

Title	自然風の乱れを考慮した風力換気計画法に関する研究
Author(s)	山中, 俊夫
Citation	大阪大学, 1994, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3075251
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

自然風の乱れを考慮した風力換気計画法
に関する研究

1993年11月

山中俊夫

自然風の乱れを考慮した風力換気計画法
に関する研究

1993年11月

山 中 俊 夫

目 次

序 論	1
1. 本研究の目的	1
2. 本論文の構成	9
第1章 本研究に関連する既往の研究と本研究の意義	11
1.1 自然風の性質	11
1.2 自然風の乱れが風力換気に与える影響に関する研究	14
1.2.1 風の乱れによる換気メカニズム	14
1.2.2 各種要因と風の乱れによる換気量との関係	16
1.2.3 風の乱れを考慮した換気量算定のための理論モデル	17
1.3 自然風の変動性と風力換気に関する研究	25
1.4 室内の換気性能評価に関する研究	26
1.5 既往の研究における問題点と本研究の意義	30
参考文献	31
第2章 自然風の乱れを考慮した風力換気計画法の枠組み	36
2.1 風力換気計画法の満たすべき要件	36
2.1.1 風力換気性能の評価法	36
2.1.2 風力換気計画の手法と手順	38
2.1.3 自然風の乱れを考慮する方法	40
2.2 自然風の乱れを考慮した風力換気計画法	42
2.3 本章のまとめ	50
参考文献	50
第3章 風力換気メカニズム	51
3.1 本章の目的	51
3.2 定常通気メカニズム	53

3.3	複数開口における脈動換気	55
3.3.1	本節の概要	55
3.3.2	測定の概要	55
3.3.3	通気量のモデル計算	57
3.3.4	結果と考察	58
3.3.5	まとめ	64
3.4	単一開口換気における自然風の乱れによる換気効果	66
3.4.1	本節の概要	66
3.4.2	実験概要	66
3.4.3	結果と考察	69
3.4.4	まとめ	73
3.5	本章のまとめ	74
	参考文献	75
第4章	単一開口における通気量予測法	76
4.1	本章の目的	76
4.2	単一開口における通気量測定法	77
4.2.1	本節の概要	77
4.2.2	実験方法	77
4.2.3	結果と考察	81
4.2.4	まとめ	87
4.3	換気要因が単一開口通気量に及ぼす影響	88
4.3.1	本節の概要	88
4.3.2	実験方法	88
4.3.3	結果と考察	89
4.3.4	まとめ	94
4.4	脈動理論による開口部通気量の予測法の検討	95
4.4.1	本節の概要	95
4.4.2	実験概要	95

4.4.3	脈動理論による通気量計算の概要	97
4.4.4	結果と考察	99
4.4.5	まとめ	114
4.5	単一開口近傍の風速分布	115
4.5.1	本節の概要	115
4.5.2	実験概要	115
4.5.3	結果と考察	118
4.5.4	まとめ	124
4.6	混合層理論による開口部通気量の予測法の検討	126
4.6.1	本節の概要	126
4.6.2	実験概要	126
4.6.3	混合層理論による通気量計算	127
4.6.4	結果と考察	129
4.6.5	まとめ	133
4.7	単一開口における通気量算定式の提案	134
4.7.1	混合層理論式の簡略化	134
4.7.2	混合層下端風速分布の相似性	136
4.7.3	混合層の発達と混合層外端風速の採り方	139
4.7.4	通気量算定式	140
4.7.5	まとめ	141
4.8	本章のまとめ	142
	参考文献	142
第5章	単一開口における通気量算定式の適用性	143
5.1	本章の目的	143
5.2	自然風による模型箱の換気	144
5.2.1	本節の概要	144
5.2.2	実験概要	144
5.2.3	結果と考察	147

5.2.4	まとめ	152
5.3	風洞風による模型箱の換気	154
5.3.1	本節の概要	154
5.3.2	実験概要	154
5.3.3	結果と考察	156
5.3.4	まとめ	170
5.4	風洞床面に設置した模型箱の換気	171
5.4.1	本節の概要	171
5.4.2	実験概要	171
5.4.3	結果と考察	173
5.4.4	まとめ	188
5.5	本章のまとめ	189
第6章	単一開口における通気量予測のための資料整備	190
6.1	本章の目的	190
6.2	単一開口前に障害物がない場合	191
6.2.1	本節の概要	191
6.2.2	実験概要	191
6.2.3	結果と考察	192
6.2.4	まとめ	195
6.3	単一開口前にベランダがある場合	196
6.3.1	本節の概要	196
6.3.2	高層集合住宅のベランダ内風速	196
6.3.3	超高層集合住宅のベランダ内風速	212
6.3.4	ベランダ内の風速分布	219
6.3.5	まとめ	226
6.4	本章のまとめ	227
第7章	建物壁面風圧係数の予測法	228

7.1	本章の目的	228
7.2	正方形平面を有する建物の風圧係数の分布と風向特性	229
7.2.1	本節の概要	229
7.2.2	実験概要	229
7.2.3	結果と考察	231
7.2.4	まとめ	238
7.3	建物のスケールが風圧係数に及ぼす影響	239
7.3.1	本節の概要	239
7.3.2	実験概要	239
7.3.3	結果と考察	241
7.3.4	まとめ	244
7.4	正方形平面を有する建物の風圧係数の風向特性の関数化	245
7.4.1	本節の概要	245
7.4.2	風上側風向の近似関数の選択	245
7.4.3	風圧係数の風向特性の関数化	248
7.4.4	まとめ	265
7.5	本章のまとめ	266
第8章 風の乱れを考慮した通気量予測法		267
8.1	本章の目的	267
8.2	風上・風下二開口における単一開口換気	268
8.2.1	本節の概要	268
8.2.2	各通気量の定義	268
8.2.3	実験概要	269
8.2.4	結果と考察	271
8.2.5	まとめ	280
8.3	風の乱れを考慮した通気量予測法	281
8.3.1	本節の概要	281
8.3.2	風の乱れを考慮した通気量予測法	281

8.4	本章のまとめ	284
第9章	風力換気時の換気効率	286
9.1	本章の目的	286
9.2	単一開口通気時の換気効率	287
9.2.1	本節の概要	287
9.2.2	単一開口通気時の換気効率の概略	287
9.2.3	風向0°における単一開口通気時の換気効率	288
9.2.4	まとめ	294
9.3	定常通気時の換気効率	296
9.3.1	本節の概要	296
9.3.2	実験概要	296
9.3.3	結果と考察	299
9.3.4	まとめ	305
9.4	本章のまとめ	307
第10章	室内汚染物濃度の出現頻度の予測法	308
10.1	本章の目的	308
10.2	非定常計算室内汚染物濃度予測法	309
10.2.1	本節の概要	309
10.2.2	非定常計算法	309
10.2.3	室内汚染物濃度の非定常計算例	314
10.2.4	まとめ	321
10.3	瞬時定常計算による予測法	322
10.3.1	本節の概要	322
10.3.2	瞬時定常計算法	322
10.3.3	瞬時定常計算用自然風データの整備法	323
10.3.4	まとめ	324
10.3	本章のまとめ	325

総括	326
用語の説明	330
本論文に関連する発表論文	332
謝辞	338

序 論

1.本研究の目的

人間は有史以来どれほどの時間を屋内で過ごしてきたことだろう。建築の誕生が住宅から始まったことは言うまでもない。斜面の横穴で雨風をしのいでいた人間は、狩猟生活から農耕生活に移行するに伴ってその居住空間を平野に造る必要性に迫られるようになる。そのために考えだされた住居が縦穴住居である。縦穴住居は、当初夜寝るためだけの空間であったが、次第にその機能を増し、調理の場、団らんの場、作業の場として発展し、ほぼ現在の住居の機能を満たすようになる。それ以来、人間はその一日のうち多くの時間を建築空間の中で過ごすようになるわけである。近代以降その傾向はますます顕著となり、電車や自動車を室内の一種と考えれば、現在人間が呼吸する空気の大半は室内の空気であるといえよう。一説によれば、日本人の男性は二十時間を室内で過ごしており、女性の場合は二十三時間を室内で過ごしているという。

地球環境時代の今日、大気汚染に対する関心はますます高くなってきているが、室内の空気に対する関心は日本においてはまだそれほど高まってはいないと考えられる。なぜなら、安価で効率が良いというだけで石油やガスなどの化石燃料を使用するファンヒーターや開放型ストーブなどが大手を振って使用されている現状に鑑みれば、日本人の室内空気汚染に対する意識がいかに鈍感であるかがわかる。この原因には、在来工法の木造住宅の気密性が悪く、室内の空気汚染に無意識であっても健康上問題となるような汚染が生じることが殆どなかったことが挙げられる。しかし、近年、住宅は木造であっても高气密化が進んでいるため、換気に対して無意識なまま開放型燃焼器具を使用することは、命にかかわる可能性を内包しているといえる。確かに、各暖房器具メーカーは不完全燃焼防止装置を開発し、事故を防ぐべく努力はしているが、事故は予期せぬ偶然の重なりの結果生じるものであり、潜在的な危険性は極力少なくすることが重要であると考えられる。

いま日本人はともすれば非常に悪い空気環境にさらされる危険性が高まっている。1980年代に欧米の建築技術者たちを悩ませたシックビルディングシンドロームは、密かに日本の事務室でも起きている可能性は否定できない。空調負荷を減

ずるための高气密化は、室内で発生する予期せぬ汚染物に対する余裕を奪い、はめ殺しの窓は在室者から換気に関する自由を奪っている。住宅においても、高气密化に住民の換気に対する意識の低さが手伝って、かびやダニが発生し、種々のアレルギーやアトピー性皮膚炎、喘息などの問題が起こっているのである。

いま、日本の住宅メーカーは挙って住宅の気密化を推し進めている。カナダでR-2000といわれる様な高气密・高断熱住宅が開発され、日本の住宅もエネルギー消費が極力少ない住宅を目指すべきだとする意見が多い。このような住宅が一般的になるためには、気密な住宅における住まい方を我々が十分に会得しなければならないだろう。湿度の高い日本では、高气密・高断熱であればあるほど、結露やかび・ダニの発生を防ぐために、換気的重要性は高くなる。即ち、換気に対する意識の違いが室内の環境を大きく支配するようになる。この様な住宅の方向が良いか悪いかは、一つの尺度で計るべきものではなく、社会の流れのなかで評価されなければならない。高齢化、地球環境時代、省エネルギー、高度情報化の流れの中で、住宅とその住まい方はどうあるべきかが問われなければならないであろう。

いずれにしても、我々が認識しなければならないのは、空気は、良く言われるような「空気のようなもの」では決してなく、人間が健康的な生活をしていくうえで、必要不可欠で重要なものであるということである。

ここで改めて「換気とはなにか」を問うてみたい。換気とは、文字通りの意味からすれば「空気を取り替えること」であり、汚れた室内の空気をきれいな外の空気と取り替えることを意味している。しかし、実際に室内の空気を完全に外気と取り替えることは、決して容易なことではない。なぜなら、空気は気体である宿命で拡散するからである。ある時間をかけて室内の容積と同じ体積の空気を室内に供給しても、室内の空気は5分の2程度しか入れ替わらないだろう。注射器或いはところてんの様に空気を押し出せたら、1回に室容積分の空気ですべて換気は達成されるだろうが、実際には不可能と言わざるを得ない。

故に、換気をしたと言っても実際には様々な換気の程度があるわけであり、どの程度換気をしたかが重要であるといえる。

ところで換気の実質は何か。何のために室内の空気を外気と交換する

必要があるのだろうか。換気の目的は一般に、二つあると言われている。一つは室内の空気清浄度の維持のためであり、もう一つは室内の温湿度などの熱環境の維持のためである。これらの目的のためには、換気はすればするほど良いということになるが、空調などの冷暖房を行う建物の場合には、換気即ち外気の供給は、夏季・冬季には熱負荷となるため、換気は必要最小限に留めたいものとなる。一方、先にも述べたように住宅では、かびやダニ、結露の発生を防ぐためにも、換気は非常に大きな役割を担っている。

工場などの産業労働環境においては、空気清浄度と熱環境の維持のために換気は最大限積極的に行われる。ただ、工場における換気は外気にとっては汚染物の発生をもたらすものであるため、建物内の環境だけを優先させて考えるはならないことは言うまでもない。

風通しの善し悪しという言葉で表現される「通風」と、「換気」の差異については種々の議論があろうが、換気現象を風速の面から捉える必要のある場合が通風と行うことができよう。換気は室内外空気を入れ替えることであり、通風は室内に風を通すことである。いずれも熱環境の維持という目的を備えている。しかし、換気による熱環境維持の性能は室内の温湿度で評価されるべきであるのに対し、通風による熱環境維持の性能は風速で評価されるべきものである。従って、通風と換気の設計目標は異なり、その設計手法も異ならざるを得ない。故に、通風計画は換気計画とは別に行われるべきものであり、通風と換気は似て異なるものとして明確に区別する必要がある。

以上のように、換気の方法は、建物の種類と場合によって異なる。しかし、いかなる建物、いかなる場合においても、換気の方法の一つが空気清浄のためであることは議論の余地のないところである。

建物の換気計画を行うためには、想定した換気装置の条件下でどの程度の換気が達成できるかという換気性能の評価ができなければならない。現在の換気設計は、室内の用途に応じた汚染物負荷に対して必要な「換気量」が得られるように、換気装置の性能、位置、大きさ、形状などを決定する。ここで、「換気量」とは単位時間に室内に流入或いは流出した空気の体積または重量を指す。

ここで換気計画全般にわたる大きな問題として、換気性能の評価値が、開口部

を通過した流量であるということが挙げられる。換気の目的が、室内空気の清浄度と熱環境の維持であるならば、換気性能の評価は、室内の清浄度と熱環境に基づいて行われるべきものである。たとえ室に流入する流量が同じであったとしても、室内の気流の状態によっては汚染物濃度や温度に差異が生じてくることは想像に難くない。室内の気流は瞬時一様拡散とは限らないのである。このような認識は建築技術者には周知のことであろうが、これら室内の混合状態を予測し評価する技術的な手法が確立されていないことが、換気のパフォーマンス評価が開口部流量にとどまっているひとつの大きな原因であると考えられる。これらの混合状態を表現する「換気効率」の概念を導入し、それらを工学的手法によって予測する手法の開発が急務であるといえよう。

換気のための装置には、換気を起こすメカニズムに応じて多種多様なものがある。

換気をその駆動力で分類すると、自然換気と機械換気に分けることができる。自然換気とは風力や温度の違いによる重力差をその駆動力とする換気であり、機械換気とはファンをモーターで回転させることで換気を起こす方法である。

自然換気は、風や外気温度、室内温度といった変動する要因を原動力としているため、開口を通して流入しまた流出していく空気の流量も時々刻々と変動するという特性を持っている。風力換気と重力換気では風力換気の方が変動の幅は大きく、変動の周期は短い。一方の機械換気は電気によって駆動する機械力を用いるため、駆動力自身は非常に安定したものとなる。外部の風圧が非常に大きい場合や換気経路の抵抗が非常に大きな場合には、所定の流量が得られないような場合も存在するが、その流量の変化の割合は自然換気に較べると非常に小さい。この安定性の点では、機械換気は自然換気に較べ非常に優れたものであると言えることができる。しかし、経済性、静粛性の点では自然換気が圧倒的な優位に立っている。風力換気に関して言えば、たとえそよ風であっても、窓を開け放したときの通気による換気量を機械換気で得ようとすれば、非常に高価な設備となってしまふことであろう。自然換気は、その変動性と不確定性という欠点を克服できれば、非常に有効な換気手段となりえるといえよう。また、重力換気と風力換気を比較すれば、重力換気が基本的に室内に熱の発生が生じ、室内の温度がある程度

以上上昇したときに初めて起こるものであり、室内の熱環境の改善という観点からは、風力換気よりその効果は劣るものと言わざるを得ない。室内に熱の発生がなければ換気は起こらず、従って汚染物も除去できない。本来熱の発生は換気を目的として行われるものではないため、換気はあくまでも副次的な効果として位置づけられるべきものなのである。その点、風力換気は、外部の風だけを原動力としているため、室内の空気清浄度の維持ばかりでなく、熱環境の改善と維持に対しても非常に効果的である。

故に、人間が安全にかつ快適に過ごすためには、風力換気を最大限に活用することが非常に重要であるといえる。しかしながら、風力は変動し、不確定である。このことが建築の設計者をして綿密な風力換気計画を放棄させ、いたずらに機械力に頼った設計をせしむるものに他ならない。従って、より良い室内環境の設計のためには、風力換気の変動性と不確定性を考慮した風力換気計画法の確立が不可欠であるといえる。そのためには、風力の変動性と不確定性が換気計画においてどのような問題を引き起こすものであるかを考察した上で、その解決を計らねばならない。

風力の変動は、地域スケールの自然風の乱れによって生じる。地域スケールの乱れは、建物の上空風の風向と風速の変動として現われ、開口面にかかる風圧が時々刻々変化することによって、開口部の流量も変動する。従って、換気計画は、本来変動する変量を扱えるよう体系化できていなければならない。入力の時系列上の風向・風速のデータ、あるいは何らかの統計量でなければならず、換気性能の評価に至る過程では統計的な手法を用いることが必要となる。

一方、自然風の不確定性の問題についてであるが、自然風の風向・風速が不確定であるということは、自然現象である自然風の予測ができないということであり、1年先の天気が予想できないことと似ている。しかし、空調設計で用いられる手法と同様に自然風の標準データを作成して統計的に処理を行うことでその不確定性は克服できる。その標準データは時系列のデータであっても、風速・風向の頻度分布のような統計データであっても良い。しかし、現状では風力換気の計画法自身が標準データを用いたものとなっていないため、どのような自然風データを整備すれば良いかが明らかではなく、従って自然風データの資料整備もでき

ていないのが現状である。

以上換気設計における一般的問題点、風力換気の優秀性とその問題点等について述べてきた。風力換気の積極的な利用のためには、現行の風力換気計画の手法をいま一度振り返って、問題点を洗い出し、それらについても解決し、より良い風力換気計画法を確立することが不可欠であるといえる。

風力換気計画における大きな問題点に、風力換気理論が自然風の乱れを考慮したものではないということが挙げられる。現在の風力換気理論の基礎はベルヌーイの式であり、流管に垂直な面内での圧力分布は考慮されていない。また、換気理論の入力となる風圧を規定する風圧係数は、時間平均値として与えられており、風圧の変動性は考慮されていない。つまり、風の乱れによって生じる風圧の空間的、時間的変動が、考慮されていないのである。

自然風の乱れには様々なスケールのものが存在するが、数センチから数メートル程度の開口（換気口や窓）スケールの乱れが開口面に風圧の分布とその変動を引き起こす。この開口面での風圧分布変動によって生じる問題としては、単一開口における換気現象がある。ベルヌーイの式に基づく現行の換気理論では、開口を一つしか持たない部屋では、室内の圧力が開口面にかかる風圧と釣り合ってしまう、開口を通過する流量は零と算定される。しかしながら、実際には開口面での風圧分布変動によって換気が生じることが確認されている。開口を一つしか持たない室などないと思われるかもしれないが、ワンルームマンションや片廊下式のホテル、教室など、開口条件によっては単一開口しか持たない場合も少なくない。換気計画の基本は、風圧差の生じる場所に複数の開口を計画することであるが、実際問題として単一開口となってしまう室の換気性能を予測することは、最低限必要な開口面積の算定を行うために必要である。また、複数開口をもつ場合でも、風上の開口が風下の開口に較べて十分大きければ、単一開口と同じメカニズムによる換気が風上側の開口で生じることは容易に想像でき、単一開口における換気量を算定する方法の開発は重要な課題といえる。

一方、建物の大きさと同じオーダーの数メートルから数十メートルのスケールの乱れが、各開口面にかかる風圧の変動を生む。特に開口が対面する壁面に位置し、それらの壁面に平行に風が吹く場合は、時間平均の圧力差は零であるにもか

かわらず、この建物スケールの乱れによる風圧変動が原因となって、開口間に脈動現象が生じ、換気が行われることが知られている。この複数開口における脈動換気が生じるのは、非常に限定された風向の条件下であり、現実には自然風の風向はある範囲をもって常に変動しているため、この現象が実際の換気計算にどのような誤差を与えるものであるかは明らかになっていない。

以上より、風力換気計画法における今後の問題点は、換気理論を風の乱れを考慮したものにしなければならないことであると結論づけられよう。

風力換気の最大の欠点である風力の変動性・不確定性は、数百メートルから数百キロメートル程度の地域スケールの風の乱れによって生じることは先に述べた通りである。風力換気理論の問題点も、開口スケール・建物スケールの風の乱れを考慮することである。故に、大小様々な自然風の乱れを考慮した換気計画法の確立が必要であるといえる。

始めに、換気計画全般の問題として換気性能の評価が、室内の空気清浄度、熱環境に基づいて行われるべきであり、そのためには、室内の換気効率の概念の導入が不可欠であることを述べた。また、風力換気の場合、風力が変動することによって開口部を通過する流量も変動するため、室内の汚染物濃度や温湿度も変動する。故に換気性能の評価を室内の汚染物濃度と温湿度で行おうとすれば、変動する汚染物濃度や温湿度を何らかの形で評価しなければならないことになる。

時間的に変動する物理量を評価する方法としては、統計的な手法が最も望ましい。室内の汚染物濃度や温湿度の頻度分布や累積頻度分布、平均値や各種モーメントなどの諸量が換気性能の評価手法として考えられる。どのような統計量が最も望ましいかは、対象とする汚染物の種類によっても異なるものと考えられ、建物に応じた設定が必要であろう。

以上、自然風の変動性・不確定性が原因となって生じる問題を含め風力換気計画法の問題点について考察した結果、大小様々な自然風の乱れを考慮するとともに室内濃度・温湿度に基づく換気性能評価を統計的手法で行うということが現在の風力換気計画法に課された課題であると言える。本研究は、より積極的に風力換気を室内の空気清浄と熱環境維持に用いることができるように、これらの問題点を解決し、新しい風力換気計画法を確立することを目的とするもの

である。

2.本論文の構成

本論文の構成は、以下の通りである。

第1章では、本研究に関連する研究として、自然風の性質に関する研究、自然風の乱れが風力換気に与える影響に関する研究、自然風の変動性と風力換気に関する研究、室内の換気性能評価に関する研究を概観した上でそれらの研究の問題点や不備な点、残された問題点などについて述べ、本研究の意義を明確にする。

第2章では、風力換気計画法の満たすべき要件として、風力換気性能の評価法、風力換気計画の手法と手順、自然風の乱れを考慮する方法などについて論じたいうえで、自然風の乱れを考慮した風力換気計画法の枠組を組み立て、研究の目的を具体化する。

第3章では、風力換気のみカニズムを新たに①定常通気、②単一開口通気、③脈動通気の三つに分類し、その各々について検討を行なう。その結果、本研究で確立を目的としている風の乱れを考慮した風力換気計画法においては、風圧係数の簡便な予測法の確立が必要であること、必ずしも複数開口の脈動通気を考慮する必要はないこと、単一開口通気量を予測する手法の確立が必要なこと、定常通気と単一開口通気が同時に生じる場合の通気量予測ができなければならないことなどを明らかにしている。

第4章では、単一開口を持つ室における通気量の予測法の確立を目的とした種々の検討を行なっている。まず、はじめに単一開口における通気量の測定方法として室内を攪拌しながらのトレーサーガス減衰法で通気量を測定するという方法を考え、室内の濃度分布を把握することによりその妥当性を検証している。その上で基礎的検討として各種換気要因が単一開口通気量に及ぼす影響について検討を行なう。その結果を踏まえて、単一開口の通気量予測のための代表的通気理論である脈動理論と混合層理論について検討を行ない、脈動理論より混合層理論の方が優れていることを示す。混合層理論では混合層下端の風速分布と濃度分布から通気量の算定が可能であることを示し、通気量の算定式を提示する。

第5章では、第4章で提案した単一開口の通気量算定式の適用性について検討することを目的として自然風下での換気実験、風洞実験などを行ない、第4章で提案した式を修正し、実際の建物の単一開口室に適用すべき通気量算定式を誘導

している。

第6章では、開口前に障害物がない場合とベランダがある場合の二通りに分けて、単一開口における通気量を算定するために必要な壁面近傍風速の資料の蓄積を試みている。

第7章では、定常通気の場合の通気量予測のための資料として、建物壁面の風圧係数の簡便な予測法の確立を試み、風圧係数の風向特性を三次関数の回転形と直線で近似する方法を用いて、正方形平面を持つアスペクト比2から4の矩形建物の任意の位置、風向の壁面風圧係数を予測する手法を開発し、その算定式を提案している。

第8章では、風の乱れを考慮した通気量算定手法即ち、定常通気と単一開口通気が同時に生じている場合の通気量を予測する手法として、定常通気による開口面の面平均風速或いは開口前後差差圧を媒介変数とした手法を開発し、提示している。

第9章では、定常通気、単一開口通気のそれぞれの場合における、換気効率に関する基礎的検討を行ない、風力換気の場合における換気効率をどの程度の値にすればよいかについての知見を得ている。

第10章では、本研究で確立した風力換気時の通気量算定手法を用いて、室内汚染物濃度の出現頻度分布を算出する具体的手法として、非定常計算と瞬時定常計算の二種類があることを述べその手順について考察するとともに、非定常計算の例、瞬時定常計算用自然風の統計データの作成例を紹介している。

最後に、本研究で得た知見を総括し、今後に残された課題などについて言及している。

〔備考〕「通気量」：開口部を単位時間あたりに通過する空気の体積流量のこと。本論文中においては、「通気量」という語句は、第2章において始めて定義されており、それ以前の章においては原則的には用いられていない。本節に限り、全体の構成を説明するために用いている。

第1章 本研究に関連する既往の研究と本研究の意義

1.1 自然風の性質

自然風の乱れの性状に関する既往の研究は非常に多く、学問的にも確立されている。建築環境工学の分野においても研究は進んでおり、内外の研究成果を取りまとめた本も多く出版されている¹⁾²⁾。邦文の書物としては村上¹⁾が自らの研究結果を含めながらまとめた「風論」、市街地風研究会編の「市街地風の研究」³⁾などが代表的である。

自然風の性質は風速や風向変動の種々の統計値として表現される。その統計値としては、種々のものがあるが、平均風速、平均風向、風速変動の実効値、乱れの強さ、風配図、風力階級、最大瞬間風速、ガストファクター、ピークファクター、平均風速の頻度分布、年最大風速の頻度分布、風速の変動量の頻度分布、自己相関関数、相互相関関数、乱れのスケール、パワースペクトルなどを挙げることができる。

これらの統計値を用いた市街地風の特性に関する研究は、建築の分野においては、高層・超高層建物周辺の風環境の予測や構造物への耐風設計のための水平荷重の予測のために行われてきたことに注意したい。風力換気量の予測を目的とした研究は残念ながら殆ど行われておらず、これらの特性値が自然風の乱れが風力換気に与える影響を予測する上で有用なものとは限らない。しかしながら、自然風の乱れと風力換気との係わりを考える上で有用な統計値は多い。

平均風速と平均風向は、風を表現するための最も基本的な数値であり、風力換気量の算定においては自由風の平均風速と平均風向を風の条件として、風圧係数、開口面積、開口の流量係数などから開口部を通過する流量を算定するのが一般的である。その意味で、平均風速と平均風向は、風力換気計算においても非常に重要な基礎的統計量であるといえる。

風速変動の実効値とその平均風速に対する比であるところの乱れの強さは、風の乱れの程度を表現するための最も基本的な値である。これらの値が大きければ大きいほど、乱れた風とすることができるわけである。風力換気計算においては通常これらの値を考慮した計算は行われていないが、風力換気計算において風の

乱れを考慮しようとするときには必要欠くべからざる諸量であると言える。

風配図は、地域スケールの自然風の変動性を表現する代表的ものといえる。風配図は、各都市、各季節における風向の出現頻度を円グラフ上に示したものである。全風速に対して描くことも多いが、例えば5m/s以上或いは、10m/s以上についてというように風速の範囲を限定して風配図を書くことで風速の情報を持ち得る。しかしながら、ある風向、ある風速の風が吹く確率が何%であるかというような情報を表現することは難しく、自然換気の変動性を考慮した風力換気設計用の資料として用いることには適さないものといえる。なぜなら、長期にわたって変動する風力換気量の予測においては、風がどの風向からどのくらいの風速で吹くかということがまず知れなければならないからである。その意味からは、風向と風速に関する二次元の出現頻度分布の方が優れているが、過去の研究において整理され、提示されたことはない。

風力階級はもともと海上の波の状況に基づいて決められたものであり、その後陸風、ビル風を対象とした階級が提案されている。風力換気とは縁のない量である。

最大瞬間風速は主に風圧が構造物に与える影響を評価するためのものであり、風力換気においては換気量の最大値を知る意味があまりないことから、有用なものとは言いがたい。ガストファクター、ピークファクターは、いずれも最大瞬間風速を予測するためのものである。

平均風速の頻度分布は、基本的な統計量として有用なものであるが、風力換気計算のためには、全風向に対しての頻度分布ではなく、風向別の頻度分布が有用である。

年最大風速の頻度分布は、最大瞬間風速と同じ理由で風力換気計算のためには、有用なものではない。

風速の変動量（風速の変動成分）の頻度分布は、風向の変化を伴わない比較的短い時間内における風速変動の特性を表現するものであり、風力換気計算においても短時間での換気量の出現頻度分布を求めるためには必要となろう。

自己相関関数、相互相関関数は乱れのスケールを算出するための統計量であるとも考えられ、自然風の乱れの特性を表現するための関数であるが、風の乱れが

風力換気に与える影響を予測するうえで、どのような有用性を有するものであるかは未知である。乱れのスケールについても同様のことが言える。

最後に挙げられているパワースペクトルは、自然風の変動の周期や乱れの大きさに関する情報を提供するものとして非常に有用な統計値のひとつである。しかし、パワースペクトルから風の乱れによる換気量を定量的に予測したり、風力換気量の変動量を予測したりすることはできず、自然換気研究においてパワースペクトルは風の特徴を表現する一手段に過ぎない。

以上述べてきたように、多くの自然風の統計値が用いられ、自然風の観測データの解析と整理が行われているが、風力換気を目的とした研究は殆ど行われていないために、風力換気量計算の入力データとして最適な統計量の利用と整備は行われていないのが現状である。

1.2 自然風の乱れが風力換気に与える影響に関する研究

1.2.1 風の乱れによる換気メカニズム

風の乱れによる換気メカニズムを含んだ風力換気のプロセスを以下の様に4つに分類したのがH.K.Mlinowski⁴⁾である。

(1) 部屋を通過する流れ (図1.1)

開口部が圧力の異なる部位に位置している場合に生じる。この換気プロセスは強制換気と同じであるが、流量が必ずしも一定ではなく、外部風条件に依存している点が異なっている。

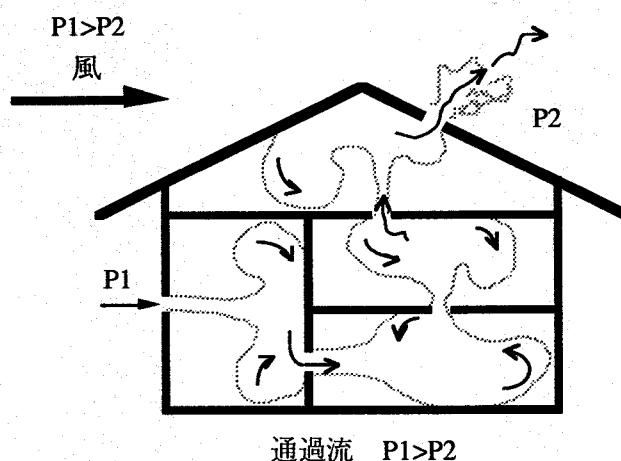


図1.1 部屋を通過する流れ (文献4)

(2) 脈動換気 (図1.2)

室のすべての開口が同一或いは僅少差の外圧の場所にあるときに生じ、圧力の時間変動が主な原動力になる。各開口部での流れの方向が時間と共に変化することが特徴的である。図1.2に示すように、開口が一つの場合と複数の開口がある場合の二通りの脈動があり、単一開口の場合には室内空気の圧縮性に基づいている。

(3) 渦の侵入による換気 (図1.3)

外部の乱流や開口部の近くで作られた乱れによって、渦が建物内に侵入し、外気を建物内に運んだり、外気との混合空気を外に排出したりする媒介となる。一つの開口内で室内空気の流出と外気の流入という相反方向の流れが生じる点が特徴的で、開口付近の気流は非常に複雑である。

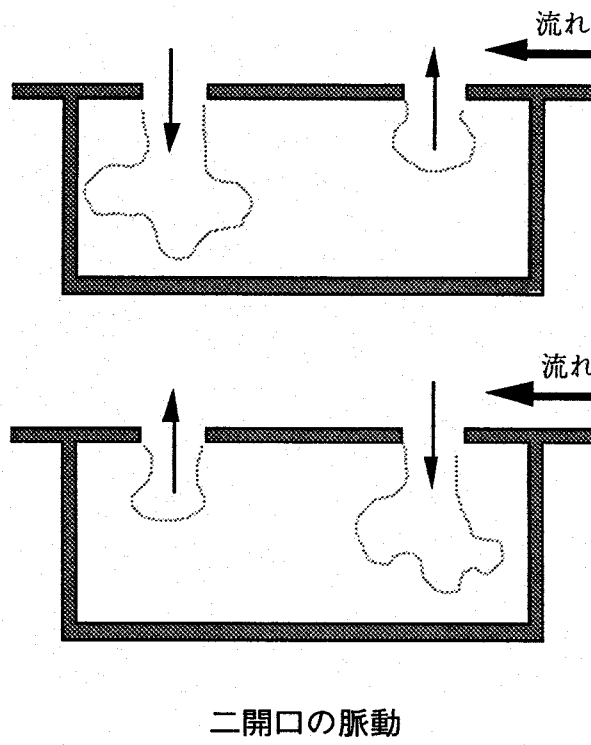
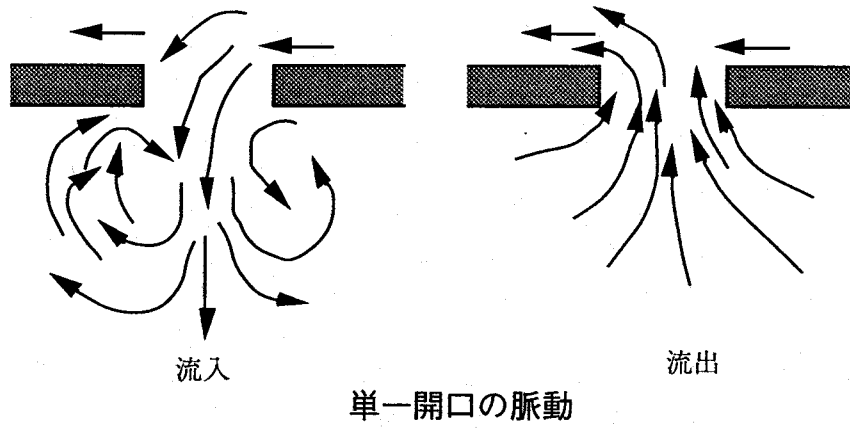


図1.2 脈動換気 (文献4)

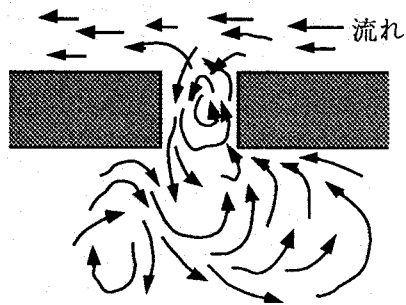


図1.3 渦の侵入による換気 (文献4)

(4)分子拡散

分子拡散は非常にゆっくりした過程であり、それが他の方式による換気を伴うとき、開口を通しての全換気量に対する相対的な寄与率はごく僅かである。ただ、浸透性のある壁の場合には、壁の通気性が低いため分子拡散の寄与率は外部風速の効果と同じオーダーであり、その効果を見捨てるべきではない。

上記4つの換気メカニズムのうち、風の乱れが関係しているのは(1)~(3)であり、上空風の風向・風速の時間変動が影響を与えるのが「(1)室を通過する流れ」で、建物スケール以下の渦によって生じるのが「(2)脈動換気」と「(3)渦の侵入による換気」である。故に、風の乱れを考慮した換気設計法確立のためには、上記(1)~(3)の換気メカニズムを観察した上で、定量的に解明していくことが不可欠である。

1.2.2 各種要因と風の乱れによる換気量との関係

風の乱れによって生じる換気量に影響を与えるであろう様々な換気要因と、風の乱れによる換気量との間の関係について種々の実験的検討が行われている。本節では、単一開口の場合と、複数開口の場合とに分けて、実験によって得られた既往の研究成果を概観する。

(1)単一開口における風の乱れによる換気量

単一開口の場合に、換気要因と単一開口室の換気量との関係については、J.P.Cockroft⁵⁾ら、楢崎ら^{6)~9)}、石原ら^{10)~13)}、樋口¹⁴⁾、村上ら¹⁵⁾、H.K.Malinowski⁴⁾など、多くの研究者らによって検討が行われている。これらの研究のうち、樋口¹⁴⁾は多種の換気要因について自然風と人工風の両方を用いて要因と単一開口換気との換気量の関係について包括的な検討を行い、単一開口の換気量は、自由風の平均風速、開口の面積と比例し、自由風風速の乱れの強さ、室の容積と正の相関を持ち、また風向や開口の形状、室の形状によっても影響を受けるが、最も影響力の強い要因は自由風の平均風速と、風向、開口面積の三つであることを示している。

他の研究者の結果においても、研究者によって実験の手法や用いた模型、風の性質などは異なるものの、定性的には概ね同様の結果が得られている。しかし、いずれも検討している換気要因は開口部への直接入力となるものではないために、

同じ換気要因の値であっても、建物の条件や室条件によって得られる換気量が変わってくる。即ち、同じ平均風速でも建物の形状と開口部の位置によって単一開口換気量が異なる訳である。故に、各研究者の成果を統合して普遍的な算定式を導きだせるまでには至っていないのが現状である。

(2)複数開口における風の乱れによる換気量

複数開口を持つ室において生じる風の乱れによる換気に関する実験的研究としては、まずD.E.Etheridgeら¹⁶⁾の研究が挙げられる。彼らは、対向壁面に開口を持つ建物模型を用いて、風が開口を持つ壁面に平行に流れ、定常通気が零となる条件下で風の乱れによって生じる二開口脈動（図1.2参照）の換気量について定量的に検討し、開口面積がある程度以上大きければ、換気量が自由風の風速と開口面積に比例することを示した。

また、風向と換気量との関係に関しては、村上ら¹⁵⁾が実験によって、J.Harris-Bassら¹⁷⁾が、実際の家屋を用いた実測によって検討を行っている。いずれも、風向の変化と共に定常通気による換気量と風の乱れによる二開口脈動の換気量がどのように変化するかを定量的に示し、開口面と風向が平行に近い場合に限り、風の乱れによって生じる風圧変動によって二開口脈動が生じ、定常計算される換気量と実際の換気量に差異が生じることを明らかにしている。

このように、複数開口における風の乱れによる換気に関しては研究例が少なく、限られた条件下での結果が得られているに過ぎない。複数開口を持つ室においては、風の乱れによる換気即ち二開口脈動が生じる風向条件が限られているため、その実用的必要性の低さから研究例が少ないものと考えられる。

以上単一開口の場合と複数開口の場合において、種々の換気要因と風の乱れによる換気量との関係についての既往の検討結果を概観した。その結果、風の乱れが換気に及ぼす影響を評価するうえで最も重要な換気要因は、単一開口、複数開口いずれにおいても、自由風の平均風速、風向及び開口面積であるといえる。

1.2.3 風の乱れを考慮した換気量算定のための理論モデル

(1)脈動モデルによる単一開口室の換気量計算

風の乱れが風力換気に与える影響が最も端的に現われるのは、序論でも述べたように部屋にただ一つしか開口がない場合であり、この場合の換気の現象や換気量を計算するための研究が古くから行われてきている。それらの多くは換気メカニズムとして脈動を対象としている。以下それら脈動モデルによる単一開口換気量計算式の概要を記す。

E.F.M. van der Held¹⁸⁾は、細い隙間を一つだけ持つ室において自然風の乱れによって生じる換気量を計算するための式を導いている。ただし、外気圧と室内圧の時間変動がsin関数に従うという仮定と、室空気の圧縮と膨張が断熱的に生じるという仮定を導入している。

$$Q = \frac{\omega C}{\pi A \sqrt{L^2 + \omega^2}} \quad (1.1)$$

ただし、 Q : 単位時間あたりの換気量（開口部流量） [m³/h]

A : 開口によって決まる定数

$$p_u - p = A Q$$

p_o : 室外圧 [mmAq]

p : 室内圧 [mmAq]

$$p_u = p_o + C \sin \omega t$$

$$p = p_o + K \sin \omega (t - t_0)$$

C : 外気圧の変動幅 [mmAq]

K : 室内圧の変動幅 [mmAq]

$$K = L C \sqrt{L^2 + \omega^2}$$

L : 圧縮速度係数 [h⁻¹]

$$L = \kappa p / V A$$

$$t_0 = \frac{1}{\omega} \tan^{-1} \frac{\omega}{L}$$

κ : $\frac{dp}{p} = \kappa \frac{dV}{V}$ を満たす定数

また、J.P.Cockcroft⁹⁾は、単一開口を持つ箱に噴流が吹き当たるという条件下に於いて、室内圧が一定であり、開口部流量と自由風風速の変動が正規分布に従

うと仮定し、換気量を簡易に算定する以下のような式を誘導している。

$$Q = \frac{1}{2} \alpha A \left(\frac{2}{\pi} \right)^{\frac{3}{4}} \sqrt{2\bar{u}\hat{u}} \quad (1.2)$$

ただし、 Q : 単位時間あたりの換気量（開口部流量） [m³/h]

αA : 有効開口面積 [m²]

α : 開口の流量係数

A : 開口面積 [m²]

\bar{u} : 自由風（自由噴流）の時間平均風速 [m/s]

\hat{u} : 自由風（自由噴流）の風速変動の実効値 [m/s]

(1.2)式を用いれば、開口に吹き当たる風の平均風速と乱れの強さがわかれば、開口部を通過する流量が算定できる。しかし、実際の建物と自然風の場合、どこかの地点の風速を取るかで算定される換気量が変わってくるという問題点を持つ。

またCockcroftは、より精解値として、コンピューターの使用を前提とした算定式も提示している。

室内空気の圧縮性を考慮し、室内空間が断熱系と仮定して、以下の式を導いている。

$$Q = \pm \alpha A \left| u^2 - \left(\frac{2\gamma Pa}{\rho} \right) \frac{v}{V_i} \right| \quad (1.3)$$

ここで、 γ : C_p/C_T 比熱の比

Pa : 開口にかかる圧力 [mmAq]（時間 t の関数）

ρ : 空気の密度 [kg/m³]

V_i : 室容積 [m³]

v : $\int_0^t Q dt$ 時刻 $t=0$ で室内圧と風圧が等しい時の室内の空気の初期量からの体積減少量 [m³]

風圧の時間変化 Pa を入力として、(1.3)式を逐次解くことによって、換気量を求

めることができる。

佐々木ら^{19)~28)}は、中空層の隙間を通しての換気について、図1.4に示すような機械系モデルを考え、以下の四つの力の釣り合いから換気量を求める式を提示している。

$f_m(t)$: 隙間内の空気の質量による慣性力

$f_c(t)$: 隙間の通気抵抗力

$f_k(t)$: 空間内空気の弾性による復元力

$S \cdot P(t)$: 風力

ただし、 S : 隙間の断面積

$P(t)$: 風圧力

基本方程式は、

$$f_m(t) + f_c(t) + f_k(t) = S P(t) \quad (1.4)$$

(1.4)式は隙間空気的位置の関数 $X(t)$ と風圧 $P(t)$ の関係式であり、時間的に変化する $P(t)$ を入力として、逐次 $X(t)$ を計算することにより、換気量を算定できる。佐々木らは同時に、単一周期変動の外圧に対する換気量算定式も提示している。佐々木らの換気モデルは隙間開口を対象とするもので、隙間内空気の慣性力を考慮している点が、Cockroftら、van der Heldと異なるところである。

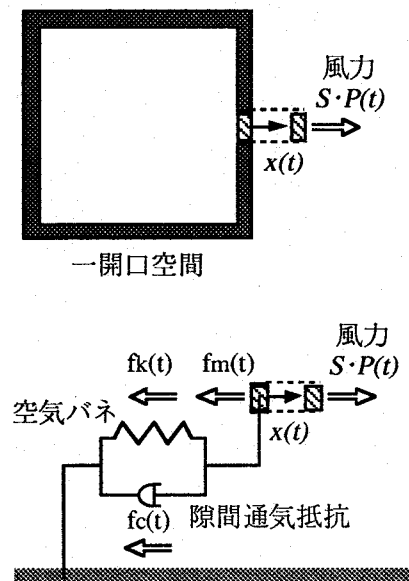


図1.4 開口内隙間空気の振動による換気モデル
(文献28)

F.Haghighatら²⁹⁾は、佐々木らと同様の脈動換気モデルを考え、開口部流量変化のパワースペクトルを風圧変動のパワースペクトルと関係づけ、パワースペクトルを考慮した換気量算定方法を提案している。

以上、脈動換気のモデル化による単一開口を持つ室の換気量算定法の研究例について概観した。いずれのモデルについても言えることだが、実験的検証が十分とはいえ、その予測精度がどの程度なのかを客観的に判断できない点に問題を残している。

(2)混合層モデルによる単一開口室の換気量計算

P.R.Warren³⁰⁾は、単一開口を持つ室の単一開口内の気流が、一様流が一端で風速0の領域に接する場合に生じる混合層に良く似ていることから、混合層理論を適用した次式の様な換気量計算式を提案している。

$$Q = k A U_L g(\eta_r) \quad (1.5)$$

ただし、 k : 混合層の広がりを表す係数

A : 開口面積 [m²]

U_L : 開口前を流れる気流の風速 [m/s]

$$g(\eta): \int_{\eta}^1 f_1(\eta) f_2(\eta) d\eta$$

混合層下流端室外側の無次元風速 $f_1(\eta)$ と無次元汚染物濃度 f_2

(η)の積の積分

η : $\frac{(y - y_i)}{k x}$ 相対変数 (混合層内の位置を表す座標)

η_r : 開口面における η の値

x, y : 直交座標系 (図1.5参照)

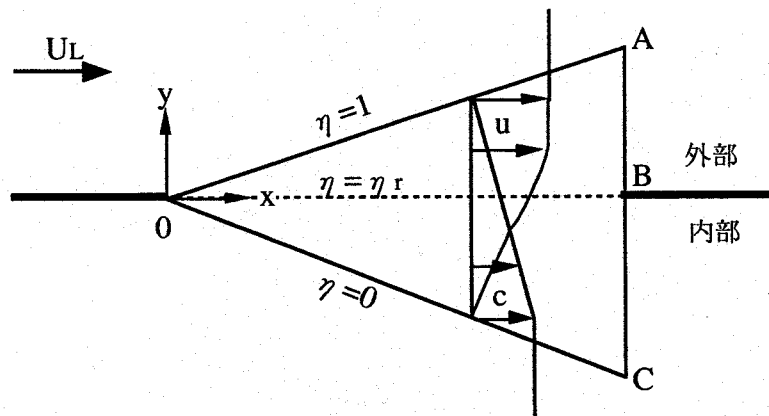


図1.5 二次元混合層の概略図 (文献31))

Warrenは、(1.5)式中に代入する係数として、 $g(\eta_r)$ と k の値も紹介している。この算定式は、風速と開口面積の積で換気量を算定するもので、単一開口の換気メカニズムのうち、渦の侵入による換気量を算定しようというものである。

M.R.Mokhtarzadeh-Dehghanら^{31)~33)}は、単一開口室を二次元キャビティー空間と考え、 $k-\epsilon$ 乱流モデルを用いて室内から単一開口を通して室外へ輸送される熱量を算定することで、換気量を計算した。基本的に室内での熱発生がある条件を対象としているが、熱発生を汚染物発生と置き換えても良いとしている。結果的に得られた実用式は、

$$\Delta C = \frac{80N}{AU} \quad (1.6)$$

ただし、 ΔC : 室内外の汚染物濃度差 [kmol/m³]

N : 汚染物の発生量 [kmol/s]

U : 開口前を流れる外部気流風速 [m/s]

A : 開口面積 [m²]

$Q = N/\Delta C$ とすれば、(1.6)式より $Q = UA/80$ を得ることができる。式の形としては、P.R.Warrenの混合層理論から導かれる式に等しい。もともとの数値流体解析は、圧力変動による脈動効果は考慮されておらず、混合層の形成を数値的に解

いたもので、P.R.Warrenのやり方と本質的には同じである。

(3)二開口脈動モデルによる複数開口を持つ室の換気量計算

D.E.Etheridgeら¹⁶⁾は、図1.6の様な対向面に二開口を持つ建物に開口面に平行な方向で風が吹くときに生じる二開口脈動による換気量の算定式を提案した。円形開口の場合と隙間の場合との二種類の式を提案しているが、どちらの場合も、開口部前後の圧力差変動の実効値 (R.M.S) の測定値から換気量を求めるものである。

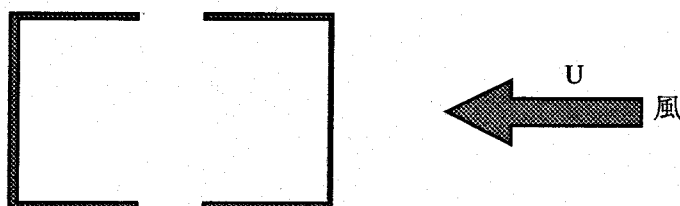


図1.6 二開口脈動が生じる風向 (平面図)

円形開口の場合は、

$$Q = 0.411 \alpha A \sqrt{\frac{2g}{\rho}} (\Delta p')^{0.25} \quad (1.7)$$

ただし、 Q : 一つの開口を通しての平均の流入・流出量 [m^3/s]

αA : 開口の有効開口面積 [m^2]

ρ : 空気の密度 [kg/m^3]

$\Delta p'$: 開口前後の圧力差 [mmAq]

g : 重力加速度 (=9.8) [m/s^2]

隙間の場合は、

$$Q = \frac{4A^3g}{95.7 z L^2 v \rho} \sqrt{\frac{2}{\pi}} (\Delta p') \quad (1.8)$$

ここに、 A : 隙間の面積 [m^2]
 z : 隙間の奥行き [m]
 L : 隙間の長さ [m]
 ν : 動粘性係数 [m^2/s]

これらの式では、換気量が自由風の風速や開口面にかかる風圧の諸量と関係づけられていないために、換気量の予測にはあまり有用とはいえない。

1.3 自然風の変動性と風力換気に関する研究

自然風の変動性が換気量に与える影響に関して検討し、自然風の変動性を風力換気設計の場で考慮する方法に関する研究例は非常に少なく、僅かに片山ら³⁴⁾の研究と石黒³⁵⁾の研究があるに過ぎない。

片山³⁴⁾らは、自然風の風速変動を正規分布で近似し、壁面風圧、開口流速、一定量の汚染物発生がある場合の室内汚染物濃度の出現頻度分布を導いている。

それによると、開口流速の頻度分布は、次式で表される。

$$f_V(v) = \frac{\sqrt{\zeta/C}}{\sqrt{2\pi}\sigma_U} \left[-\frac{(\sqrt{\zeta/C}v - \bar{u})^2}{2\sigma_U^2} \right] \quad (1.9)$$

ここに、 v : 開口流速 [m/s]

ζ : 開口の圧力損失係数

C : 開口面の風圧係数

σ_U : 自然風の風速変動の標準偏差 [m/s]

\bar{u} : 自然風の平均風速 [m/s]

(1.9)式から、換気量の出現頻度分布は容易に求められる。

片山らの式では、風圧係数を定数として扱っているため、風圧係数が変化する場合には適用できない。故に、風向の変化を伴うような長期間にわたる換気量の出現頻度分布を求めることはできない。また、汚染物濃度の頻度分布関数も示しているが、室内濃度が換気量に瞬時に対応して定常濃度になると仮定している点で問題がある。

石黒³⁵⁾の研究では、風速の頻度分布を正規分布で近似し、16方位の風向の頻度分布を考慮したうえで、1時間における換気量の積算値を算定する方法を示している。数値的に求めているため、汎用性には欠けるが、風向の変化を考慮できる点は評価できる。しかし、換気量の出現頻度分布を算定するものではない。

1.4 室内の換気性能評価に関する研究

単位時間に同じ新鮮空気が室内に供給されたとしても、室の条件や換気口の位置、流入の速度や汚染物の発生条件など非常に様々な要因の条件によって、室内に形成される汚染物の濃度分布は異なったものとなり、室内の換気性能を単に単位時間に室内に供給される新鮮空気量だけで評価できないことは明かである。そこで、室の換気性能を正しく評価するために考え出されたものが「換気効率」である。本節はこの換気効率についての既往の研究について記述し、本研究がその確立を目的としている風力換気設計において、この換気効率の問題をどう考えていくべきかの基礎とする。

換気効率に関する研究は多く行われており、そのすべてをここで紹介することは不可能であるが、これまで定義された換気効率について概観したい。

換気効率は基本的に分布系と集中系に大別することができ、他方相対換気効率と絶対換気効率という分類も可能である³⁶⁾。集中系は室全体を、分布系は室内の分布を扱い、相対換気効率は室内各点での相対的良否を、絶対換気効率はシステムとしての絶対的性能を評価するものである。表1.1に換気効率の分類を示す。

表1.1 換気効率の分類

集中系	室内における汚染質や供給空気の空間的分布を考えず、室全体としての汚染質の除去効率や、給気の有効利用率などを論じているもの
分布系	室内各場所における汚染質や給気の分布を正面から扱うもの
相対換気効率	部屋の部位によってシステムの換気性能がどう変わるかを表現するもの
絶対換気効率	実現可能な濃度低減の最大値に対して、そのシステムが汚染物濃度を低減させる能力（の比）を表すもの

また、換気効率の決定方法としては以下の二種類の方法がある。

表1.2 換気効率の決定方法

直接的測定法	建物または実物大の模型で、換気システムを作動させた状態をシミュレートする、そして、汚染物の濃度（トレーサーガス濃度）が測定され、その値を用いて換気効率を計算する。最も一般的で容易な方法
間接的方法	汚染物を排出するシステムの性能を特徴づける「システム変数」を定量的に同定する試みがなされる。これらのシステム変数より換気効率を計算する。

現在までの換気効率は、トレーサーガス濃度に基づいて提案されているものが非常に多い。それはトレーサーガスを用いた測定が比較的容易であるためで、トレーサーガス濃度に基づいて換気効率を定義すれば、換気効率を算定することが非常に容易であることも理由の一つであろう。

M.Sandbergら³⁷⁾³⁸⁾はトレーサーガスの濃度変化に基づいて種々の換気効率を提案している。濃度変化としては、トレーサーガスを連続的に発生させた状態での定常濃度で評価するものと、始めに室内にトレーサーガスを充満させてから発生を止め、その後の濃度減衰過程から評価するものがある。また、それぞれについて分布系、全体系の換気効率を考えており、非常に多種の換気効率を定義している。各換気効率の定義は省略するが、定常状態で定義される相対換気効率（分布系、集中系）、濃度減衰過渡過程状態で定義される過渡相対換気効率（分布系、集中系）、絶対換気効率（分布系）、相対拡散効率などがあげられる。それぞれの換気効率が異なった意味内容を持っており、目的に応じた測定、評価が必要になり、非常に煩雑であるのが欠点といえる。

新津ら³⁶⁾は換気の目的に応じて、純度効率と残留効率という二つの換気効率を提案している。これらはいずれも集中系に属するもので、純度効率は、ある時刻において室の体積中室内に存在する新鮮外気の割合であり、残留効率はある時間間隔0～tの間に室内に入った新鮮外気のうち、時刻tにおいてなお室内に残留しているものの割合である。新津らは、換気の目的は、衛生学的には室内空気の純度効率を高めることであり、工学的には排気口に短絡する新鮮空気をなるべく少なくして、残留効率を高めることであると述べている。これは言い換えれば、純

度効率を高める（室内の汚染物濃度を低くする）ことを目的として、残留効率をなるべく高くするような方法をとるといふことであると考えられる。ただ、この両者の効率は時間とともに変化する性質のものであり、評価する時間を定めなければ数値として比較できない。また、純度効率は効率といいながら本来の意味では効率とは言いがたい性質のものである。

アメリカなどで古くから用いられている換気効率指標としては、混合係数 (Mixing Factor)⁴¹⁾⁴⁴⁾がある。これは、完全混合を仮定した場合の換気量とトレーサーガス減衰法によって求められる実際の換気量との比であり、集中系の換気効率である。室全体の換気量の満足な尺度となり得るが、効率が完全混合より良い場合には、1以上の値になり、効率を示す値として扱う上で誤解を生む可能性がある。

長沢³⁹⁾は分布系の非常にユニークな換気効率を提案している。トレーサーガスを給気口からインパルス状（又はステップ状）に注入し、応答を室内各点で観測した場合に得られる波形を4つの槽モデルにあてはめて、各モデルにおいて逆算される流量 Q' に対する実際の給気量 Q で実効換気率を定義している。この換気効率は、異なったモデル間の換気効率の比較に問題を残すと言えよう。

近年、省エネルギーと室内空気環境への関心の高まりから、換気効率に関する議論が世界的に盛んであり、アメリカのASHRAE（米国暖房冷凍空気調和協会）、ヨーロッパを中心とするIEA、AIVC(Air Infiltration and Ventilation Center)では、空気齢の考え方に基づく換気効率の研究が盛んに行われている。空気齢とは、文字通り空気の年齢であり、新鮮な外気が室に入ったときを0歳として、室内に存在する空気に年齢をあてはめて考える手法である。空気齢の考え方自身は古くからM.Sandbergら³⁷⁾³⁸⁾によって提案されていたものであるが、近年系統的な整理が試みられている。その代表的な文献としては、AIVCのガイドライン⁴⁰⁾がある。そのなかでは、いくつかの換気効率が空気齢の概念によって定義され、トレーサーガス法を用いた測定方法が示されている。他の換気効率が、トレーサーガス濃度によって定義されているのに対し、ここで示されている換気効率は、より気流場に近い概念の空気齢によって定義されており、物理的意味が明確であるといえる。代表的な換気効率としては、室内空気がどのくらい早く入れ替わるかを示す集中

系の換気効率(Air Change Efficiency)、換気性能係数(Coefficient of Air Change Performance)、分布系の局所換気指数(Local Air Change Index)などを挙げるができる。ASHRAEでは、換気効率(Air Change Effectiveness)の測定法と評価法に関する規準(Standard)の作成が進められており、空気齢に基づく換気効率が採用される見通しである。

村上、加藤⁴⁵⁾⁴⁶⁾は、室内の気流シミュレーションに基づく換気効率を定義している。室内の気流数値シミュレーションによって室内の気流分布が予測できることを前提として、室内の濃度分布のモーメントに基づいた換気効率指標SVE1～SVE5を提案している。これらの換気効率はすべて分布系である。すべての換気効率指標の概念は明確で、SVE1は汚染物の室平均濃度への影響度を表し、SVE2は汚染物の拡散性、SVE3は吹き出し空気の空気齢、SVE4は吹き出し口の勢力範囲、SVE5は排気口の勢力範囲をそれぞれ評価するものである。これらの換気効率は気流シミュレーションが計算の前提となっているため、実測で求めるためには非常に労力を必要とするものになっている。しかし、今後数値シミュレーション技術はコンピューターの発達とともにますます発展していくものと考えられ、今後実用性の高い換気効率指標となることは確かであろう。

以上すべての換気効率に共通して言えることは、いずれも機械換気や空気調和装置を対象とした換気効率であるということである。機械換気の場合には、給気口と排気口の位置や汚染物の発生位置が確定しているために、換気効率の定義が排気口の濃度で行われているものも多い。数値シミュレーションも給気の境界条件は定常で、流量や方向が時々変化する風力換気の場合における数値シミュレーション手法は確立されていない。

1.5 既往の研究における問題点と本研究の意義

風の乱れを考慮した風力換気設計法の確立の必要性は序論で述べた通りであるが、そのためには数多くの問題点が残されている。既往の研究成果をまとめたとしても、それぞれの研究が設計法の確立を目的としたものではないために、不十分なものとしかなり得ないと考えられる。以下本章で概観した既往の研究を風の乱れを考慮した換気設計法の確立という観点から見直し、その問題点を明らかにし、本研究の意義を明確にしたい。

自然風の性質に関する研究は膨大なものがあり、自然風の特徴を表す統計量も種々用いられ、自然風データの解析と整備も行われている。しかしながら、建物の風力換気を目的としたものは殆どないことから、風の乱れを考慮した風力換気設計のために有用な統計値が何であるのかが明確となっておらず、それ故風力換気用自然風データの整備と蓄積は行われていない。本研究は、種々の時間スケール、空間スケールの自然風の乱れを考慮した風力換気設計法を目的として、その設計法に用いるべき自然風の統計値を明確にするとともにその資料整備を行うものであり、意義あるものとする。

自然風の乱れが風力換気に与える影響に関する既往の研究のうち、風の乱れによる換気メカニズムの研究は、その概念が提示されたに過ぎず、現象的に確認されていない。本研究は、換気メカニズムについても、単一開口の開口部気流の可視化によってそのメカニズムの検討を行うとともに、複数開口の脈動現象を実際の建物の風圧測定から定量的に捉えることを試みており、風力換気設計法の中でどのような換気メカニズムを考慮することが必要であるかを明らかにしている。

各種の換気要因が風の乱れによって生じる換気量に及ぼす影響に関する既往の研究の結果、影響力の大きい要因は、単一開口、複数開口いずれの条件においても、自由風の風速と風向、開口面積であることが明らかにされているが、これらの成果をふまえた上で、どのような換気量算定モデルが有効であるかを評価しなければならない。

また、種々の換気モデルが提案され、基本的には脈動理論系と混合層理論系の二つに大別できる。しかし、これらの理論はいずれも包括的な設計手法の確立を目指して行われたものではなく、現象面からの興味によるものが多い。故に、限

られた条件下での換気量を求めることはできても、実際の風力換気設計に適用するためには従来理論との整合性に問題があり、適用範囲も明確にされていないために実用に供するものとは言いがたい。本研究は、単一開口を対象とした理論モデルに関する検討を行い、脈動理論と混合層理論のいずれがより適用性の高いものであるかを明らかにする。

大きなスケールの乱れによる自然風の変動性を考慮した換気計算に関する既往の研究のうち、片山らの研究は風向の変化を考慮できず、石黒らの研究は汎用性に乏しい。本研究は、年間にわたる長期の自然風の測定データに基づいて、自然風の変動性を考慮した確率的風力換気設計法を確立することを試みており、適用性の高い手法が確立できる点で意義あるものと考えている。

換気効率に関しては従来より非常に多くの研究が行われており、提案されている換気効率の数は非常に多い。しかし、それらはすべて強制換気或いは空気調和装置を持つ場合を対象としており、風力換気設計においては必ずしも適当なものではない。本研究では、風力換気設計における換気性能評価法の持つべき要件を明確にし、その要件を満たす最も適当な換気効率を用いることとする。風力換気設計において換気効率を適用する試みはこれまで行われておらず、この点においても意義あるものとする。

参考文献

- 1) 村上周三: 風論, 新建築学大系 8 自然環境, pp.127-236, 彰国社
- 2) Michele G.Melaragno: Wind in Architectural and Environmental Design. Van Nostrand Reinhold Company
- 3) 市街地風研究会: 市街地風の研究, オーム社
- 4) H.K.Malinowski: Wind Effect on the Air Movement Inside Buildings, Proceedings of 3rd International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures, Tokyo, 1971, pp.125-134
- 5) J.P.Cockroft, P.Robertson: Ventilation of an Enclosure Through a Single Opening. Building and Environment, Vol.11, 1976, pp.29-35
- 6) 楠見孝雄, 榑崎正也: 自然風の乱れによる換気効果 (その1) 定常風の場合,

- 日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道），昭和53年9月，pp.231-232
- 7) 榑崎正也，楠見孝雄：自然風の乱れによる換気効果（その2）変動風の場合，日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道），昭和53年9月，pp.233-234
- 8) 榑崎正也，伊藤維俊：自然風の乱れによる換気効果（その3）乱れの周期分布よりの考察，日本建築学会大会学術講演梗概集（九州），昭和56年9月，pp.311-312
- 9) 榑崎正也，伊藤維俊：風力換気量予測における風速の変動成分の換気効果に関する基礎的研究，日本建築学会近畿支部研究報告集，昭和57年6月，pp.145-148
- 10) 石原正雄，新田勝通，山本照夫：風の乱れによる換気に関する実験的研究，空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集，昭和55年3月，pp.17-20
- 11) 石原正雄，新田勝通，中村智治：風の乱れによる換気に関する実験的研究（その2），空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集，昭和56年3月，pp.125-128
- 12) 石原正雄，新田勝通，富田真司：風の乱れによる換気に関する実験的研究（その3），空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集，昭和57年3月，pp.57-60
- 13) 石原正雄，新田勝通，壬生義一：風の乱れによる換気に関する実験的研究（その4），空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集，昭和58年3月，pp.13-16
- 14) 樋口祥明：風の乱れを考慮した通気量算定法に関する研究，大阪大学学位論文，昭和63年12月
- 15) 高倉秀一，村上周三，赤林伸一，大和田淳：開口部の風速・風向変動に関する風洞実験 — 1 開口の場合 — 接近流の気流性状が建物の換気、通風に及ぼす影響に関する研究（その7），日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道），昭和61年8月，pp.319-320
- 16) D.E.Etheridge, J.A.Nolan: Ventilation Measurements at Model Scale in a Turbulent Flow. Building and Environment, Vol.14, 1979, pp.53-64
- 17) J.Harris-Bass, B.Kavarana, P.Lawrence: Adventitious Ventilation of Houses,

Proceedings of Symposium on Ventilation of Housing, Research by British Gas, Second Paper, 1974, pp.106-119

- 18) E.F.M. van der Held: Der Einfluß der Turbulenz auf die Luftung. Gesundheits Ingenier, Vol.74, 1953, pp.381-385
- 19) 佐々木隆: 多層窓中空層の換気性状について, 日本建築学会学術講演梗概集 (東北), 昭和57年10月, pp.363-364
- 20) 林基哉, 佐々木隆, 荒谷登: 圧力変動時における隙間通気抵抗の性質 風圧変動による建物の自然換気に関する研究 その1, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), 昭和58年9月, pp.451-452
- 21) 林基哉, 佐々木隆, 荒谷登: 圧力変動時における隙間通気抵抗の性質 風圧変動による建物の自然換気に関する研究 その2, 日本建築学会北海道支部研究報告集, No.57, 昭和59年3月, pp.97-100
- 22) 佐々木隆, 林基哉, 荒谷登: 風圧変動による窓ガラスのたわみの中空層換気への影響 風圧変動による建物の自然換気に関する研究 その3, 日本建築学会北海道支部研究報告集, No.57, 昭和59年3月, pp.101-104
- 23) 林基哉, 佐々木隆, 荒谷登: 壁面風圧変動時の窓中空層換気 風力による建物の自然換気に関する研究 その4, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), 昭和59年10月, pp.307-308
- 24) 佐々木隆, 林基哉, 荒谷登: 風圧変動による窓中空層の結露防止 風力による建物の自然換気に関する研究 その5, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), 昭和59年10月, pp.309-310
- 25) 鈴木尚毅, 佐々木隆, 林基哉, 荒谷登: ガラス板の振動を考慮した窓中空層の換気基本特性 風力による建物の自然換気に関する研究 その6, 日本建築学会北海道支部研究報告集, No.58, 昭和60年3月, pp.69-72
- 26) 鈴木尚毅, 佐々木隆, 林基哉, 荒谷登: ガラス板の振動を考慮した風力による窓中空層の結露防止 風力による建物の自然換気に関する研究 その7, 日本建築学会北海道支部研究報告集, No.58, 昭和60年3月, pp.73-76
- 27) 林基哉, 佐々木隆, 荒谷登: 圧力変動時の一開口及び二開口空間の換気基本特性 風力による建物の自然換気に関する研究 その8, 日本建築学会北海道支

- 部研究報告集, No.58, 昭和60年3月, pp.77-80
- 28)佐々木隆, 林基哉, 荒谷登: 風力による中空層の換気性状 建物の風力換気に関する研究 第1報, 日本建築学会計画系論文報告集, 第372号, 昭和62年2月, pp.67-73
- 29)Fariborz Haghighat, Jiwu Rao, Paul Fazio: The Influence of Turbulent Wind on Air Change Rates ---- a Modelling Approach. Building and Environment, Vol.26, No.2, 1991, pp.95-109
- 30)P.R.Warren: Ventilation Through Openings on the One Wall Only. Energy Conservation in Heating, Cooling, and Ventilating Buildings, Vol.1, 1978, pp.189-206
- 31)M.R.Mokhtarzadeh-Dehghan, M.M.M.El Telbany, A.J.Reynolds: Transfer Rates in Single-Sided Ventilation. Building and Environment, Vol.25, No.2, 1990, pp.155-161
- 32)M.M.M.El Telbany, M.R.Mokhtarzadeh-Dehghan, A.J.Reynolds: Single-sided Ventilation -- Part I. The Flow between a Cavity and External Air Stream, Building and Environment, Vol.20, No.1, 1985, pp.15-24
- 33)M.M.M.El Telbany, M.R.Mokhtarzadeh-Dehghan, A.J.Reynolds: Single-sided Ventilation -- Part II. Further Conciderations, Building and Environment, Vol.20, No.1, 1985, pp.25-32
- 34)片山忠久, 徳永一雅: 市街地風の変動と換気に関する確率モデル, 日本建築学会環境工学論文集, 昭和54年5月, pp.19-24
- 35)石黒一郎: 変動風力換気計算法, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), 昭和54年9月, pp.297-298
- 36)新津靖, 藤森茂樹: 室内空気状態の衛生学的研究 第6報 換気効率の測定とその特性, 衛生工業梗概誌, 第25巻第9号, 昭和26年, pp.11-29
- 37)M.Sandberg : What is Ventilation Efficiency?, Building and Environment, Vol.16, No.2, 1981, pp.123-135
- 38)M.Sandberg, M.Sjoberg : The Use of Moments for Assessing Air Quality in Ventilated Rooms, Building and Environment, Vol.18, No.4, 1983, pp.181-197
- 39)長沢佳明: 室内空気の流動パターンと換気効率について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭51年10月, pp.203-204

- 40)AIVC : A guide to air change efficiency, Technical Note AIVC 28, 1990
- 41)F.D.Constance:Mixing Factor is Guide to Ventilation, Power, 1970
- 42)P.J.Drivas, P.G.Simmonds,F.H.Shar:Experimental Characterization of Ventilation Systems in Buildings,Environmental Science Technology, Vol.6, No.7, 1972
- 43)B.H.Jennings,I.A.Armstrong:Ventilation Theory and Practice, ASHRAE Transactions, Part1, 1971
- 44)T.Kusuda:Control of Ventilation to Conserve Energy while Maintaining Acceptable Indoor Air Quality, ASHRAE Transactions, Part1, 1976, p.1169
- 45)村上周三, 加藤信介:新たな換気効率指標と三次元乱流数値シミュレーションによる算出法 -----換気効率の評価モデルに関する研究-----, 空気調和・衛生工学会論文集, No.32, 昭和61年, pp.91-101
- 46)小林光, 村上周三, 加藤信介:不完全混合室内における局所領域の換気効率の同定に関する研究(その1) 室内における空調吹出口と排気口の勢力範囲の同定, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)D, 1992年8月, pp.541-542

第2章 自然風の乱れを考慮した風力換気計画法の枠組み

2.1 風力換気計画法の満たすべき要件

2.1.1 風力換気性能の評価法

本節では、本研究がその確立を目指している風力換気計画法において、換気性能をどのように評価すればよいのか、その基本的考え方について述べる。

序論で述べた様に、換気の目的が室内で発生した汚染物や熱の除去であることから、換気性能の評価は、その換気システムによって達成される室内汚染物濃度や温度分布に基づいて行わなければならない。風力換気のも目的も汚染物と熱の除去にあるが、近年の建築物においては、大空間をもつ工場などを別として、夏季は冷房を行うことが一般的になっているため、熱の除去という換気の役割は少なくなってきたのが現状である。故に風力換気計画は汚染物の除去だけを目的として良い場合が多い。

一方、熱の除去を目的とした風力換気のパフォーマンスを評価するためには、熱量の移動を予測し、室内の温度分布を予測することが必要である。熱の移動は、対流と輻射、伝導という三つの形態で生じ、伝導の移動速度が他の二つより遅いため、熱移動の解析には非常に複雑な非定常解析が必要になるうえに、風に関する境界条件の不確定さから、正しい予測は非常に困難であると言わざるを得ない。一方汚染物の移動は主として対流によるため、室内汚染物濃度の予測は温度予測に比べると比較的容易である。また、発生熱量が少量で熱移動における浮力の効果が比較的小さい場合には、予測される濃度分布は温度場の第一次近似値として考えることもできる。

以上の理由から、本研究で対象としている風の乱れを考慮した風力換気計画法は、室内で発生した汚染物の除去と良好な室内空気清浄度の維持をその目的と考えることが妥当であり、風力換気性能の評価は、風力換気によって達成される室内の汚染物濃度分布に対して行えば良い。

序論で、大きなスケールの風の乱れによって生まれる風力換気のパフォーマンスの大きな特徴のひとつとして、その変動性を挙げた。自然風の風向風速が時間的に変化することによって、室内の汚染物濃度や温度の分布も時間とともに大きく変動する。従っ

て、換気性能の評価は時間とともに変化する汚染物濃度分布を評価対象にしなければならず、統計的手法が必要といえる。

風力換気を積極的に利用し、風の乱れを考慮した風力換気計画を行うべき建物は何であろうか。空気調和装置が一般化している事務所ビルや種々の商業建築では、調和空気に必要な取り入れ外気量（必要換気量）を供給しており、現状では風力換気計画の必要性は低い。しかしながら外気導入を風力換気に頼れば、ファンコイルユニットだけからなるシステムの様な、ダクトが不要で非常に安価な空気調和設備を構築することができる。故に風力換気を積極的に利用するすれば、エネルギー的・コスト的に有利な建物を計画することが可能であると考えられる。

一方、工場などの労働環境では、汚染物の種類が多種多用であり、風力換気は汚染物の除去、熱の除去のために重要な役割をもつものである。しかし、扱う汚染物が人体に有害な物質であり、労働衛生の立場即ち、作業者の健康に悪影響を与えない最低限の空気環境を確保するという立場からは、原動力の不確定な風力換気は付加的な役割をもつものとしてのみ考えられることが多く、重力換気や機械換気を主とする換気計画が行われることが一般的である。

住宅や学校などにおいては、台所や便所、浴室などのユーティリティー空間を除けば、居室の換気は、自然換気に頼っているのが現状である。これらの建物内の通常の居室では、在室者の健康にかかわるような汚染物の発生はないために、変動性と不確定性をもつ風力換気を利用して快適な空気環境の維持のための風力換気計画を行うことは非常に有効であるといえる。確かに、省エネルギーと居住性の向上を目的とした住宅の気密化が今後進み、高气密住宅では熱交換型の換気扇などが一般化するものと予想されるが、同時に住宅の多様化、地域化も進むと考えられ、すべての住宅が機械換気に頼る状況は将来的にも起こりえないといえよう。学校建築においても、少なくとも公立の学校においては、騒音の問題もあり、機械換気設備が近い将来教室に全国的に普及することはないものと考えられる。

以上から、本研究で確立する風の乱れを考慮した風力換気計画法は、空調の有無に関わらず、事務所や住宅、学校などの建物計画において用いることを念頭において良い。

住宅居室内の汚染物濃度分布を評価するためには、居住域での濃度が人体に及ぼす影響を予測することが必要である。一般事務室或いは住宅や学校内の一般居室室内で発生する汚染物質は多種多様であり、人体から発生する体臭、タバコ煙、建材や家具から発生する有機物質、ファンヒーターやストーブから発生する燃焼生成物質などを挙げるができる。これらの発生汚染物は拡散性が高く、室内の濃度はほぼ均一になることが多いため、室内の平均濃度を評価することで、空気清浄度の評価ができ、換気性能の評価が可能になるものと言える。故に換気性能の評価は室の平均濃度に対して行って良いと言える。また、これらの汚染物発生源の位置を計画時に特定することは殆ど不可能であり、人体からの体臭は発生源自身が移動するため、発生源を定めた濃度予測は事実上困難である。故に換気性能評価は、位置が不特定な汚染物発生源に対して適用可能でなければならない。

以上より、風の乱れを考慮した風力換気計画法の根幹をなす換気性能評価法の満たすべき要件は、次の様にまとめることができる。

- ①風力換気性能の評価は、達成される室内の汚染物濃度に対して行われるべきである。
- ②風力換気性能の評価は時間とともに変化する汚染物濃度を評価対象にしなければならず、統計的手法が必要である。
- ③風力換気性能の評価は、事務所ビル、住宅、学校などの建物で発生する一般居室の発生汚染物を対象としている。
- ④風力換気性能の評価は室の平均濃度に対して行うことが妥当である。
- ⑤風力換気性能の評価は、位置が不特定な汚染物発生源に対して適用可能でなければならない。

2.1.2 風力換気計画の手法と手順

前節で、風力換気性能の評価法の要件を述べた。風力換気設計の目的が室内空気の清浄度の維持であることから、風力換気計画は図2.1の様に室内空気清浄度の目標値を設定し、そのために必要な室内換気性能評価値を予測し、建物を計画している場所の自然風条件、建物条件、汚染物条件、室条件などを考慮しながら、

性能評価値を達成するために必要な開口部条件などの換気設計対象条件を求めるといふ手順で行うことが望ましい。しかし、このような手法による換気設計は、時々刻々変化する自然風条件の取り扱いが確立していない現状では非常に困難であり、換気性能評価値が評価対象としている室濃度と自然風の風向・風速との関係が基本的に非線形であり、自然風の風向・風速と開口条件、建物条件その他から室内汚染物濃度を予測することは容易でも、その逆は非常に難しいという問題点を持つ。故に現実的には、適当な概算から開口条件を設定し、その開口条件と自然風条件、建物条件その他の下での換気性能評価値を予測し、それに対応する室内空気清浄度が目標値を達成しているか否かを判定し、達成されていない場合には開口条件を修正し、同じ計算を繰り返して行い、目標の空気清浄度が達成されるまで繰り返すという、トライ・アンド・エラー的な手法が考えられる。これは、建築物の構造計算に良く用いられる手法である。

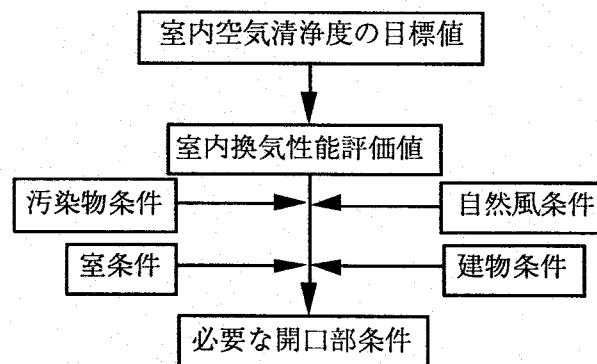


図2.1 風力換気設計の手順

その換気設計手法の手順を図2.2に示す。図2.1の設計手法をちょうどさかさまにした様なものであり、確定論的に室内換気性能評価値とそれに対応する室内空気清浄度を予測し、その設計の良否を判定するというものである。

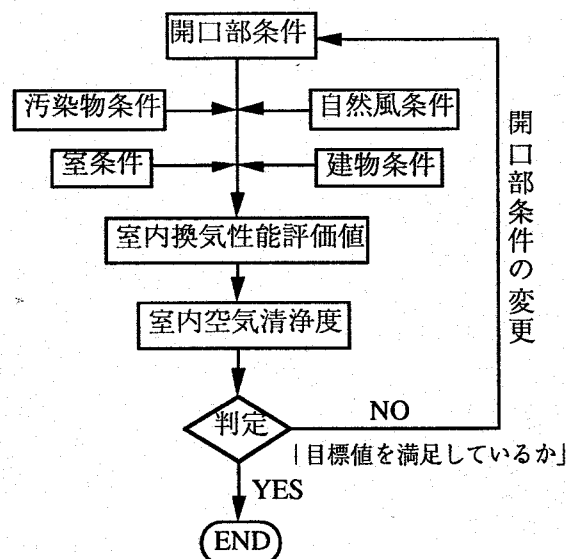


図2.2 風力換気設計の手順

2.1.3 自然風の乱れを考慮する方法

本研究の目的が、風の乱れを考慮した風力換気計画法の確立にあることは序論で述べたとおりであるが、2.1.1で述べた換気性能評価の要件を満たし、2.1.2で述べた手順での風力換気計画法において、風の乱れがどのように考慮されるべきであるのかを明確にしておかねばならない。

建物壁面の開口部にあたる自然風の乱れには、建物自身によって作りだされる数十センチのスケールの乱れから、周辺の建物や地形などによって作られる数メートル、数キロといった大きなスケールの乱れまで、様々なスケールのものがある。

非常に大きな気象スケールの乱れは、ある地点で観測される上空風の風向と風速の時間変化として現われる。故に、風力換気計画では、時々刻々変化する室内の汚染物濃度の統計値を換気性能の評価対象としなければならず、このことは、2.1.1の換気性能の要件でも述べている。

周辺の建物やそれ自身の建物によって作りだされる小さなスケールの乱れは、従来から研究されている様に、単一開口を持つ室の換気や複数開口を持つ室の脈動換気現象などを引き起こす。また、複数開口の換気においても、単一開口の換気と同じメカニズムでの換気が生じている可能性も考えられる。しかしながら、これらの換気量は現在最も一般的なベルヌーイの式に基づく換気理論では計算で

きない。

故に、風力換気計画における換気理論は風の乱れを考慮したものでなければならず、単一開口室の換気量の予測のみならず複数開口での脈動換気量や、単一開口に近い条件の複数開口で生じる単一開口換気と同じメカニズムによる換気量を予測できるものでなければならない。

以上まとめると、風力換気計画法において、自然風の乱れは、変動する室内汚染物濃度の統計的評価と単一開口換気に代表される風の乱れによる換気量の予測という二つの側面において考慮されなければならないといえる。

2.2 自然風の乱れを考慮した風力換気計画法

2.1では「換気性能評価法」、「風力換気計画の手法と手順」、「風の乱れを考慮する方法」について述べた。本節では、それらをふまえたうえで、風の乱れを考慮した風力換気計画法の枠組みを組み立てることを目的とする。

換気性能評価の要件は先に述べた通りであるが、換気性能評価が時間的に変化する汚染物濃度に対して行われるべきであるから、変動する自然風条件を入力として、時間変化する室内汚染物濃度の時系列値もしくは、統計値を予測することが必要であるといえる。そのためには、少なくとも定常状態において室内の汚染物濃度を予測計算する方法が確立されていなければならない。定常状態での室内汚染物濃度の計算ができれば、変動する自然風条件を入力とした時系列計算に拡張することは容易であり、統計値を用いた確率的検討も可能となる。そのうえで、時間的に変化する汚染物濃度をどう評価すべきかを論じなければならない。

故に本節は、次の様な手順で自然風の乱れを考慮した風力換気計画法の枠組みを組み立てる。

- 1.定常状態における室内濃度計算法の枠組みの組み立て
- 2.非定常状態で時間的に変化する室内濃度の評価法について

室内濃度計算法の枠組を考えるにあたって、まず換気性能評価にかかわる諸量の名称について考える。

換気を量的に表現する場合に、「換気量」という言葉が「室内に単位時間に供給される新鮮空気量」の意味に用いられることが多い。しかし、言葉の持つ本来の意味からすれば、「換気量」とは換気の量であり、どれだけの換気効果があるかを示す量であるべきであり、その意味から換気性能の基礎的評価値であるべきである。しかしながら、換気性能の評価法が確立されていないため、「換気量」が室内に供給される新鮮空気の量を示す言葉として安易に用いられているのが現状であると思われる。そこで、本論文では、単位時間に室内に供給される新鮮空気の流量は「通気量」と呼び、「換気量」とは区別して取り扱うことにする。

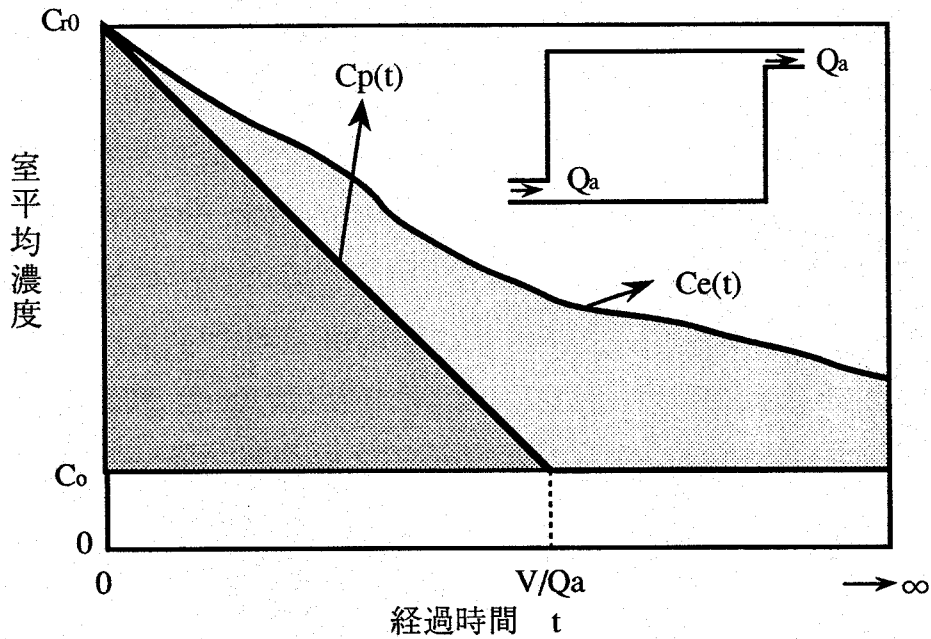
「通気」とは文字通り「空気が通る」ことであり、開口や換気口を通して流入或

いは流出する流量を示す言葉として適当であると考えている。

それでは、「換気量」とはどのような値が望ましいのであろうか。

換気性能評価法の要件の④で、換気性能評価は室平均濃度に対して行なって良いことが示され、⑤で位置が不特定の汚染物発生に対して適用できなければならないことが示されている。よって「換気量」は、これらの換気性能評価を可能にするようなものであることが望ましい。そこで、そのような条件を満たすものとして、トレーサーガス減衰法によって求められる換気量を「換気量」と呼ぶことにしたい。トレーサーガス減衰法によって求められる換気量を用いれば、「室内に均一な汚染物発生があった場合の室平均濃度」を求めることができ、定常状態における室平均の汚染物濃度を計算ために有効な変数であると言える。

それでは「換気量」は何によって予測し得るものであろうか。室内の平均汚染物濃度は、本来「汚染物の発生量」、「通気量」、「室内の気流性状」によって決まる。一方「換気量」と「汚染物の発生量」から室内の汚染物平均濃度は求めることができるため、「換気量」は「通気量」と「室内気流性状」に対応した量であり、それら両者から予測できることが望ましい。ところが、「通気量」は数値で表現ができるが気流性状そのものは一つの数量では表現できない。「換気量」を「通気量」と気流性状から予測するために、気流性状を「換気効率」で表現する手法が考えられる。「換気効率」をして「単位通気量があったときにどれだけの換気量（換気性能評価値）が得られるかを示す指標」と位置づければ、「通気量」と「換気効率」から、合理的に「換気量」を求めることが可能になると考えられる。故に、そのような性格を持つ換気効率指標として、図2.3に示す換気効率を提案する。



$$C_p = C_{r0} - \frac{Q_a}{V} (C_{r0} - C_o)t \quad (0 \leq t \leq 1)$$

$$\eta = \frac{S_1}{S_2} = \frac{\int_0^{V/Q_a} (C_p - C_o) dt}{\int_0^{\infty} (C_e - C_o) dt}$$

C_{r0} : $t=0$ 時の室内平均ガス濃度
 C_o : 外気濃度
 C_p : ピストンフロー時の予想室内平均濃度
 C_e : 実際の室内平均濃度
 V : 室容積
 k : 混合係数 (mixing factor) ($= Q_e/Q_a$)
 S_1 : 部面積
 S_2 : 部面積 + 部面積
 Q_a : 通気量
 Q_e : 換気量

ところで

$$S_1 = \frac{1}{2} \times \frac{V}{Q_a} (C_{r0} - C_o)$$

$$C_e = C_o + (C_{r0} - C_o) e^{-\frac{Q_e}{V}t} \quad \text{とすると}$$

$$S_2 = \int_0^{\infty} \{(C_{r0} - C_o) e^{-\frac{Q_e}{V}t}\} dt = \frac{V}{Q_e} (C_{r0} - C_o)$$

$$\text{故に、} \eta = \frac{S_2}{S_1} = \frac{Q_e}{2Q_a} = \frac{1}{2} k$$

図2.3 換気効率の定義

この換気効率は次のような特長を有する。

1. トレーサーガスの減衰過程において定義される。
2. 評価に用いる濃度は対象室の室平均濃度とする。これは、自然換気の場合では、給気口や排気口を特定することは実際上困難であることと、室全体の換気性能を評価するという観点から決められた。
3. ピストンフロー流のとき最も高く(最大値は1)、給気が排気口へ短絡する場合

合には低くなる。室内が完全混合、即ち流入空気が瞬時に一様拡散するとき
は0.5となり、いかなる室の換気性能も、0から1の範囲の値をとる。

4.この換気効率 η は、濃度の経時変化の積分より求められるが、濃度減衰が指数
的であれば、ある時点で算定した換気量と通気量から算出することが可能で
ある。また、この場合、過去に良く用いられた混合係数 (mixing factor:完全混
合を仮定した場合の換気量と実際の換気量との比) の0.5倍に相当する。

5.この換気効率は、値としてはAIVCのガイドライン¹⁾における換気効率 ϵ_a (Air
Change Efficiency)と全く同じものである。ただし、AIVCのものは基本的に空
気齢に基づく考え方で定義されている点包括的とも言える。

図2.3中で示しているように、室内の濃度減衰が指数的であるならば、この換
気効率 η は、換気量と通気量の比である混合係数に0.5を乗じた値に等しい。故に
この換気効率を用いれば、通気量と換気効率から換気量を求めることができ、換
気量と汚染物発生量から室平均濃度を算定することができ、定常状態における室
内平均濃度計算は容易に行うことができる。

この換気効率を用れば、室内濃度計算法の枠組みは図2.4の様に組み立てるこ
とが可能である。このフローチャートは、種々の基礎的な条件を換気条件と呼び、
換気条件と汚染物発生条件を入力として、室内の平均濃度を計算する手順を示し
たものである。

2.1.3で自然風の乱れの考慮の方法について述べた様に、図中の通気量の計算手
法は、単一開口換気に代表される風の乱れによる換気量を算定できるものでなけ
ればならず、他の変量の導出過程もすべて風の乱れを考慮したものでなければな
らないことは言うまでもない。また、このフローチャートは定常状態を想定して
いるが、この様な枠組みでの室内平均濃度計算法が確立できれば、それを時間的
に変化する室内平均濃度の計算法に拡張することは容易であると考えられる。

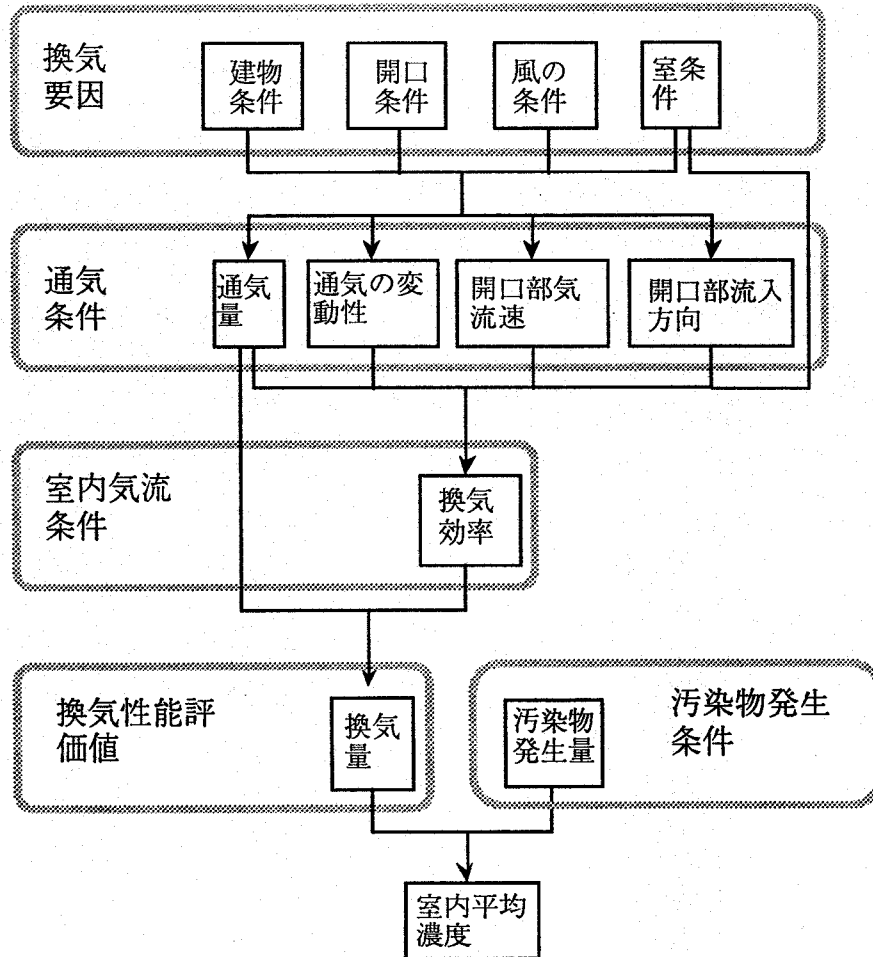


図2.4 室内平均濃度計算法 (定常状態)

次に、このような室内平均濃度の算定が可能になり、時間的に変化する室内平均の濃度の予測が行えるようになった場合、非定常状態で時間的に変化する室内濃度の評価法を確立しなければならない。時間的に変化する室内濃度の評価が、他ならぬ図2.1、図2.2で示した「室内換気性能評価値」に相当するものである。この「室内換気性能評価値」は一つの数値であることが望ましいが、一つの数値群であつても良いと考えられる。

時間的に変化する汚染物濃度を評価する方法として、汚染物濃度の頻度分布で濃度を表現する方法が、考えられる。評価値としては、累積頻度分布の90パーセントイル値や50パーセントイル値などとすれば良い。ただ、現段階では、想定する種々の汚染物の生理的或いは心理的な影響と累積頻度分布のパーセントイル値との関係が明確にされていないため、換気性能評価値として何パーセントイル値

が適当であるのかを判断することができない。故に、換気性能評価値は、現在は汚染物の室内平均濃度の頻度分布とせざるを得ないと考える。

この換気性能評価値であるところの室内平均濃度の頻度分布に対応する室内空気清浄度は現在求めることは困難である。室内空気清浄度とは、例えば清浄度を「空気のきれいさ」などのような主観評価値や、健康への影響度などで評価した値であるべきである。この室内空気清浄度に関する検討は、生理学や公衆衛生学の分野での成果をまたねばならず、現状の風力換気計画法としては、換気性能評価値である室内平均濃度の頻度分布を最終の評価値と考えることにする。

以上より、風の乱れを考慮した風力換気計画法とは、「風の乱れを考慮しながら汚染物の室内平均濃度の頻度分布を予測する手法」であると言える。言い換えれば、自然風の変動データを入力とし、風の乱れが考慮された図2.4の室内濃度計算を用いて、室内平均汚染物濃度の変動を計算し、統計解析を経て濃度の出現頻度分布を求める手法である。図2.5に本研究が最終的に確立を目指している「風の乱れを考慮した風力換気計画法」のフローチャートを示す。

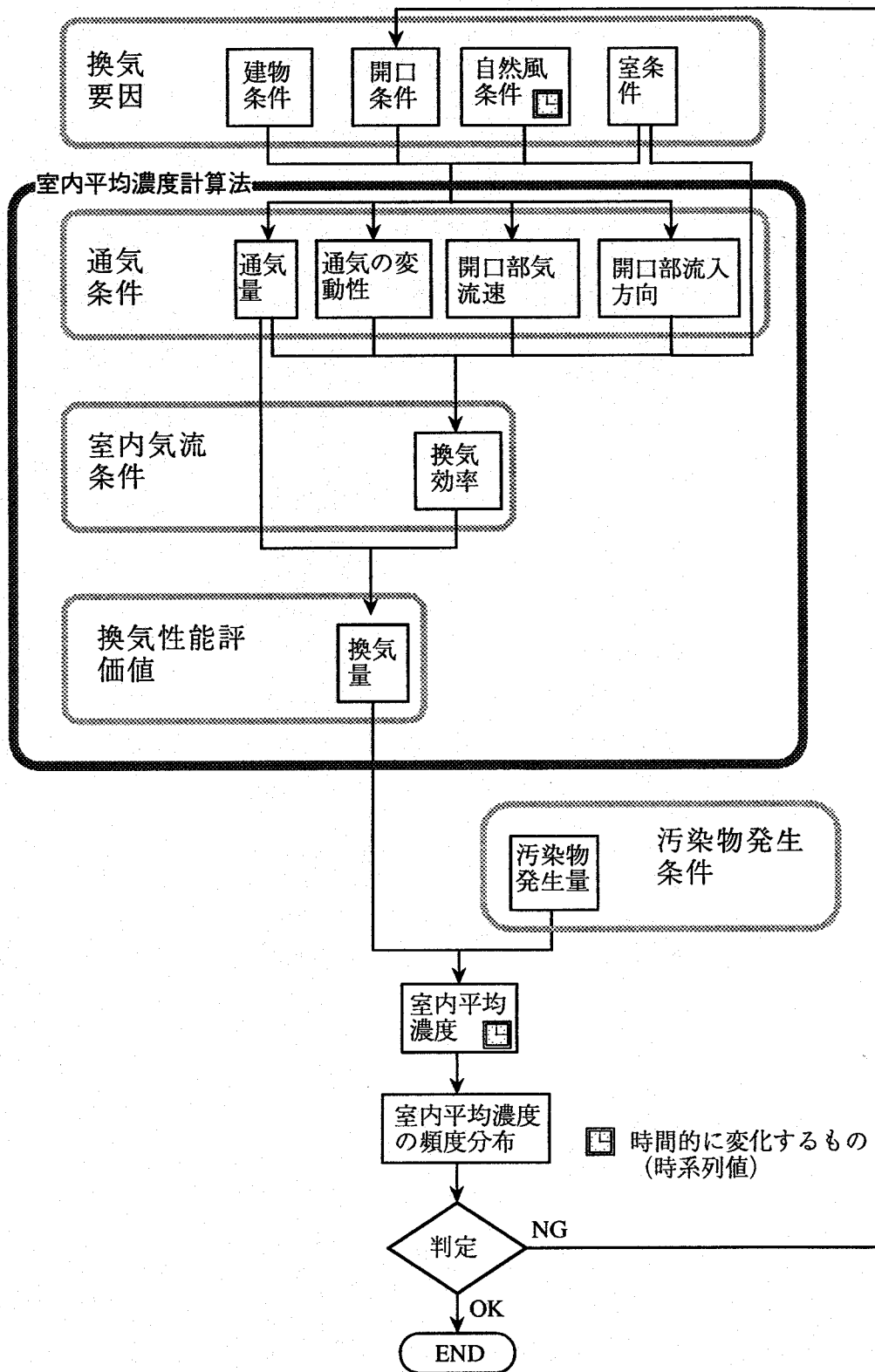


図2.5 自然風の乱れを考慮した風力換気計画法

このフローチャートを用いれば、様々な目的の換気計画を行なうことができる。例えば高気密住宅で機械換気を前提にしている場合には、目に見えない隙間によって生じる換気量が年間どの程度あるか、また室内での汚染物濃度がどの程度になるかをこのフローチャートによって求め、必要な機械換気の流量を算出することができる。また、風力換気のみを頼る建物の場合、常時開放の換気口の位置や面積を設定し、それで年間にわたって汚染物濃度の頻度分布が許容できるものであるかを判定することもできる。窓のような開放自由な開口の場合には、窓の開閉条件が想定できなければ濃度計算は難しいが、最低限必要な窓面積を求めるためには、窓が全開の状態を想定して室内汚染物濃度の計算を行なうことも可能であろう。

換気計画と言う場合、建築物の設計段階において、その建物における換気の目的に応じて、換気を目的とした装置の種類・大きさ・位置などを決定するというハード的な意味と、ファンヒーターによって暖房する場合に何時間に一回どの程度の時間窓を開けるかの様なソフト的な意味の二通りが考えられよう。故に、図2.4、図2.5のフローチャートの中の開口条件は、窓や換気窓の大きさといった開口そのものの条件と、例えば何時間に一回何分間窓を開けるかといった開口の開放計画に関する条件の二種類が考えられる。風力換気計画の計画対象は開口条件であることが多いと考えられるが、例えば窓の大きさを決定し、1時間に一回何分間窓を全開にすれば健康上支障のない空気環境が確保できるかという開放計画を求めることも可能である。

以上の様に、実際の換気計画において図2.5のフローチャートで示した手法は幅広い使い方ができ、拡張性、応用性の高い手法とすることができる。

2.3 本章のまとめ

風力換気計画法の根幹をなす換気性能評価法の満たすべき要件について論じ、風力換気計画の手法と手順を明確にした。また、風力換気計画法において風の乱れをどう考慮すべきかを明らかにした上で、自然風の乱れを考慮した風力換気計画法が「自然風の乱れを考慮しながら汚染物の室内平均濃度の頻度分布を予測する手法」であることを示し、その計画法の枠組みを提示することができた。

参考文献

1)AIVC : A guide to air change efficiency, Technical Note AIVC 28, 1990

第3章 風力換気メカニズム

3.1 本章の目的

H.K.Malinowskiが風力換気メカニズムを四つに分類していることは第1章で述べた。しかし、風の乱れを考慮した風力換気計画法においては、どのような条件下で風の乱れをどう考慮すべきなのかが重要な要件となる。H.K.Malinowskiの分類は、概念的なものに過ぎ、風の乱れによって生じる換気量を予測する手法を組み立てる上で必ずしも最適なものではない。

故に本章では、風の乱れを考慮した風力換気計画において、風の乱れを考慮する手法を確立するために望ましい換気メカニズム分類の考え方を示すとともに、各換気メカニズムについて視覚的或いは定量的な把握を試み、本研究で確立しようとする換気計画法における換気メカニズムの骨格を明確にすることを試みる。

具体的には、本研究では風力換気メカニズムを以下の三つに分けて考えることを提案する。

- ①時間平均の風圧によって引き起こされる定常通気
- ②単一開口を持つ室において風の乱れによって生じる単一開口通気
- ③開口間の風圧差の時間変動によって引き起こされる脈動通気

①の定常通気は、Malinowskiの換気メカニズムの「(1)部屋を通過する流れ」に等しく、従来のベルヌーイの式に基づく換気計算が適用できるメカニズムであり、このメカニズムによる通気量計算法は確立されている。

②の単一開口通気は、Malinowskiの換気メカニズムの「(2)脈動換気」のうち単一開口で生じるものと「(3)渦の侵入」を合わせたもので、概念的には二つのメカニズムで換気が生じているかもしれないが、それらの複合された換気メカニズムのことを指す。

③の脈動通気は、Malinowskiの換気メカニズム「(2)脈動換気」のうち複数開口で生じるものである。この脈動は、単一開口の脈動とは異なり、室内空気の圧縮性には基づいておらず、瞬時瞬時には①の定常通気の換気理論によっていると考えることができる。このメカニズムによる換気が生じるか否かは、開口条件ばか

りでなく風向の条件に左右される点が単一開口換気と異なる点である。

前章図2.5でその枠組みを示した風力換気計画法の確立のためには、通気量をはじめとする通気条件が上記三つのメカニズムに基づいて予測できなければならないことになる。

本章では、上記三つのメカニズムのうち、定常通気に関しては、従来の通気理論をベースに、その通気条件予測における問題点を論じる。単一開口換気に関しては、通気条件の予測法を確立することが本研究の大きな目的の一つであることから、その前段階として、メカニズムの現象的理解をまず深めるために、気流の可視化手法を用いて単一開口の開口部近傍気流性状を解明を試みる。複数開口の脈動通気に関しては、そのメカニズムや通気理論はほぼ解明されているため、実際の建物でどの程度の通気量がこのメカニズムによって生じているのかを建物壁面風圧の実測値を基に定量的な把握を行う。

このような検討を通して、本章では、風の乱れを考慮した風力換気設計法において、どのようなメカニズムによる換気をどの程度考慮しなければならないかを明らかにしたい。

3.2 定常通気の通気量算定

最も一般的な換気メカニズムである、時間平均の風圧差を原動力とする定常通気のメカニズムは古くから知られており、その通気量計算式も確立され、多くの教科書で紹介されている。ここに改めて記すまでもないが、それらはすべてベルヌーイの式を元にした圧力損失を速度圧と圧力損失の係数の積で表現したものであり、例えば風上と風下に一つずつ開口がある一室からなる建物の通気量は以下の様にして計算が可能である。

風上開口の流量係数を α_w 、開口面積を A_w とし、風下開口での流量係数を α_L 、開口面積を A_L 、風力による風上・風下開口面差圧を Δp とするとき、室の通気量 Q は次式で表される。

$$Q = \alpha A \sqrt{\frac{2g}{\gamma} \Delta p} \quad (3.1)$$

ただし、 g : 重力加速度

γ : 空気の比重量

αA : 風上開口と風下開口の合成した有効開口面積

$$\alpha A = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_w A_w}\right)^2 + \left(\frac{1}{\alpha_L A_L}\right)^2}} \quad (3.2)$$

(3.1)式で、 αA は開口に固有の値であり、 g と γ は定数である。故に通気量 Q は Δp がわかればただちに予測することができる。風が吹くことによって生ずる差圧 Δp は、通常上空風の風速 V と風上開口位置での風圧係数 C_w 、風下開口位置での風圧係数 C_L を用いて次式で予測される。

$$\Delta p = (C_w - C_L) \frac{\gamma}{2g} V^2 \quad (3.3)$$

(3.3)式で開口間差圧を求めれば(3.1)式に代入することで室の通気量を求めることが可能である。

以上のように、定常通気の理論は確立されており、任意の条件における通気量

を計算することができる。しかし、そのためには、用いる開口の流量係数の値、開口位置での風圧係数の値を求めなければならない。開口の流量係数については、種々の形状の開口の流量係数の値が計測された資料があり、それにより予測が可能である。しかし、風圧係数については、風圧係数が建物の形によって大きく異なるため、資料としての蓄積は十分ではなく、特定の建物の任意の場所の風圧係数を知るためには、風洞実験或いは数値流体シミュレーションによらなければならない。風洞実験も数値流体シミュレーションも時間と費用のかかる手法であり、より簡易な風圧係数の予測手法の確立が望まれている。故に、定常通気のメカニズムとその理論は確立されているとはいえ、風力換気計画を行うためには、風圧係数の値の予測という問題点が存在しているといえよう。

ところで、前章図2.5で自然風の乱れを考慮した風力換気計画法のフローチャートを示したが、このフローチャートでは通気条件は通気量だけではなく、通気量の変動性、開口部気流速、開口部流入方向なども要因として考えている。これらの要因は、換気効率を決定するために必要であると考えている。本節で示した定常通気の理論式で通気量を算定すれば、それを開口面積で除すれば開口部気流速を求めることはできるが、通気の変動性（通気の変動性をどのような変数で表現すべきかという問題は別にして）や開口部流入方向などを求めることはできない。故に、定常通気の場合の換気効率の予測において、通気の変動性や開口部流入方向の予測が不可欠であるならば、本節で示した通気理論による通気量計算式だけでは不十分であり、他の手法の導入が必要となろう。

3.3 複数開口における脈動換気

3.3.1 本節の概要

本節では、3.1で挙げた「③開口間の風圧差の時間変動によって引き起こされる脈動通気」が実際の建物においてどの程度生じているかを定量的に把握することを目的として、実際の中層建物の壁面風圧の時間変動の多点同時測定を行い、自然風の特徴や風圧係数分布に関して検討を加えた上で、風圧の時系列データをもとに通気量の計算を行い、時間平均の風圧差によって生じる通気量と逆の方向に流れる通気量の比（逆流率）を計算によって求めた。

3.3.2 測定の概要

風圧及び上空風速・風向の測定を行ったのは、図3.1、3.2に示す8階建（一部9階建）の大阪大学工学部建設棟（大阪府吹田市山田丘2-1）である。同建物8階の図3.1に示す位置において、窓を閉じた状態で、中央に導圧チューブ（内径5mm、外径9mmのビニール製）を連結した測定孔のある一辺55cm、17mm厚の正方形スチレンボードを窓面に外側から取り付け、上記測定点のうち5点の風圧を同時に測定した。導圧チューブは、5台のトランスデューサー（バリダイン社製MP45-1-871、0～1000Hz flat、0～10mmAq）に連結し、基準圧との差圧を測定する。市販の魔法ピンに注射針をつけたゴム製の蓋を取り付けたポットの内圧を基準圧とした。ポット内外の差圧が1/2になる時間は約4秒であった。風圧の測定と同時に、ペントハウス上6mの位置（地上38m）に取り付けた微風向風速計により、風向・風速の瞬時値も測定した。トランスデューサーの出力及び風向風速計の出力は、データレコーダ（TEAC社R-71、7ch FM変調、DC～1250Hz）に記録し、後に本学計算機センターにてAD変換後解析を行った。AD変換時、風圧データはサンプリング周波数のハイカットフィルターを通した。測定日時と、測定点の組み合わせを表3.1に示す。各データにはデータ番号①～⑨をつけた。基準圧ポットは、データ①～⑥では北側階段部に、⑦～⑨では南側ベランダに設置した。（図3.1参照）

表3.1 測定日時一覧

データNo.	測定点	測定日時
①	A B C D E	S63.12/5 13:10-20
②	A B C D E	S63.12/5 13:30-40
③	A B C D E	S63.12/5 16:15-25
④	A B C D E	S63.12/5 16:40-50
⑤	A C D E F	S63.12/5 17:30-40
⑥	A C D E F	S63.12/5 17:45-55
⑦	D F G H I	S63.12/7 15:30-40
⑧	D F G H I	S63.12/7 15:50-00
⑨	D F G H I	S63.12/7 16:20-30

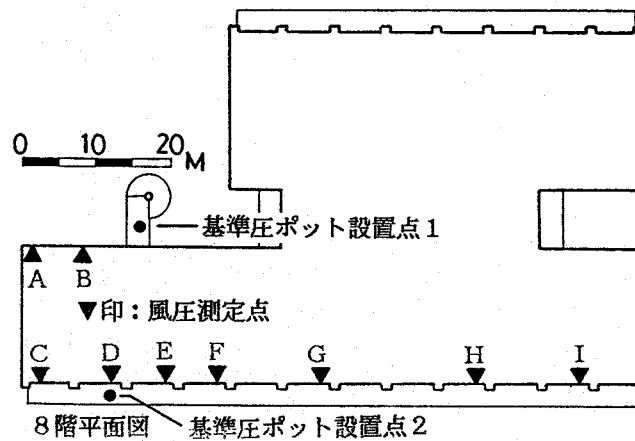
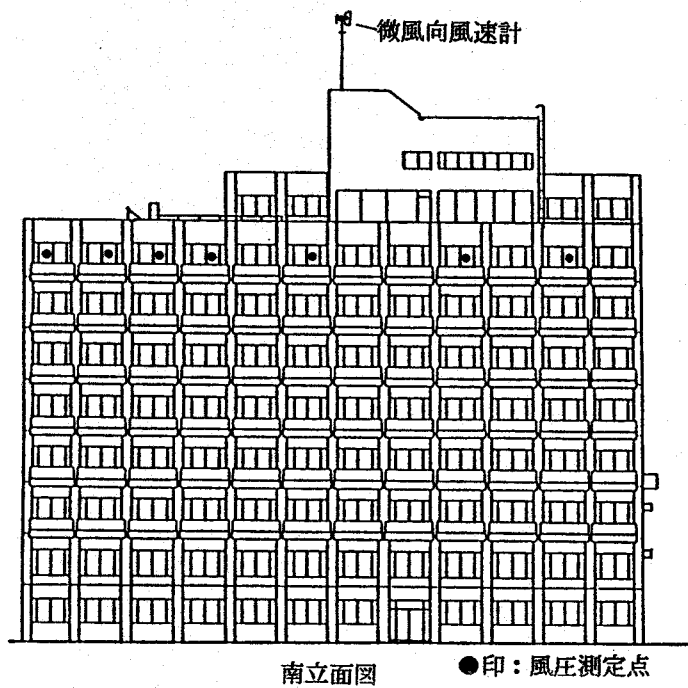


図3.1 測定建物と風圧測定点概要

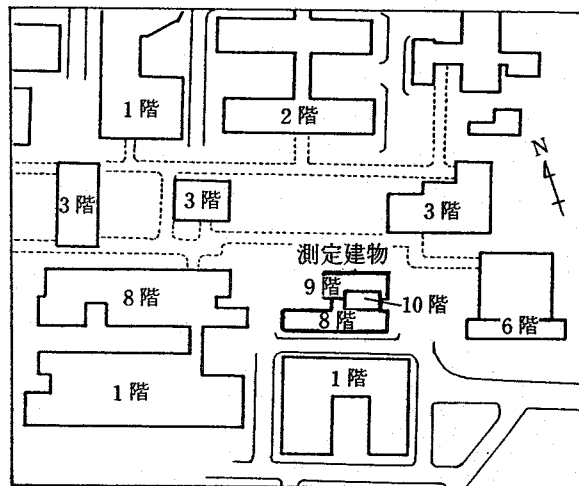


図3.2 測定建物配置図

このような圧力変動の測定においては、導圧チューブの長さが測定結果に影響を与えることが知られている¹⁾。そこで予め導圧チューブの長さ（0m：トランスデューサー直付、2、5、10m）が風圧変動のパワースペクトルに与える影響を検討した結果、チューブ長の1/4の波長付近でのパワーの若干の増大が認められたが、実験の都合上直付とはせず、各測定点の導圧チューブの長さをほぼ等しくし、データ①～⑥で10m程度、⑦～⑨で20m程度とした。解析した項目と、解析条件を表3.2に示す。

表3.2 解析項目と解析条件一覧

解析項目	解析条件
平均値	サンプリング周波数
変動の実効値	…………… 100 Hz
自己相関関数	解析データ個数
パワースペクトル※ (空間) 相関係数	…………… 65536個

※FFT法による

3.3.3 通気量のモデル計算

圧力の変動が、通気量計算に及ぼす影響を検討するために、測定した5点の風圧変動データを入力として、5つの開口をもつ室の各開口の通気量を次の条件において試算した。

I. 平均風圧から計算する場合。 ((3.1)式による。)

II. 0.01秒間隔の時々刻々の風圧変動から各時点での通気量を求め、その積算値として通気量を求める場合。計算条件の詳細を表3.3に示すが、室内空気の圧縮性は考慮していないため、室容積を特定する必要はない。

表3.3 通気量のモデル計算条件一覧

開口数	5
開口の位置	風圧測定点
各開口の面積A [m ²]	1.0 [m ²]
各開口の流量係数α	0.65
通気量計算式	$Q = 4\alpha A \sqrt{\Delta p}$
室内圧	各時点でΣq=0となる様に変化
計算時間間隔	0.01 [s]
計算データ数	65536個
計算時間	655秒
室内空気の圧縮性	考慮せず

3.3.4 結果と考察

(1)上空風の風向と風速

各データにおける上空風の風向と風速の平均値を表3.4に示す。測定建物の長辺がWNW - ESEであるので風向はすべて建物にほぼ平行に近いことがわかる。風速はデータ①～⑥で6～9 m/s、データ⑦～⑨で3～4 m/sである。

表3.4 上空風の風向・風速一覧表

データNo.	風向 [°] *	風速 [m/s]
①	271	7.64
②	269	7.19
③	266	9.36
④	276	7.66
⑤	282	8.24
⑥	280	5.99
⑦	300	3.03
⑧	288	3.85
⑨	293	3.47

*風向はNを0とし、右回りを正とした角度である。

(2)上空風のパワースペクトル

フリーハンドによるスムージングを施した①～⑨の上空風のパワースペクトルを図3.3、3.4に示す。いずれも、0.05Hz以上で減衰するが、減衰の傾きは①～⑥（図3.3）で $-10/3$ 乗程度、⑦～⑨（図3.4）では0.5Hzまで $-5/3$ 、0.5 Hz以上で -5 乗程度で減衰する。また、どのデータにおいても1～10 Hz以上の周波数ではスペクトルは横這いとなる。これらのスペクトル形状は、一般に知られる自然風のスペクトルとは若干異なったものであり、風向風速計の周波数特性に依存するところも大きいものとは考えられるが、①～⑥と⑦～⑨では自然風の性状が若干異なっていると言え、西側の8階建建物の影響が何らかの形で表れているものと考えられる。

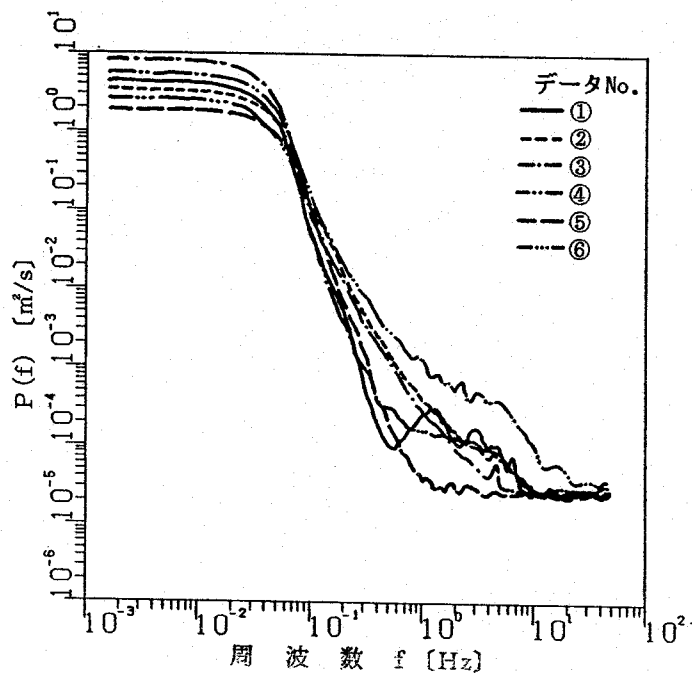


図3.3 上空風速のパワースペクトル（データ①～⑥）

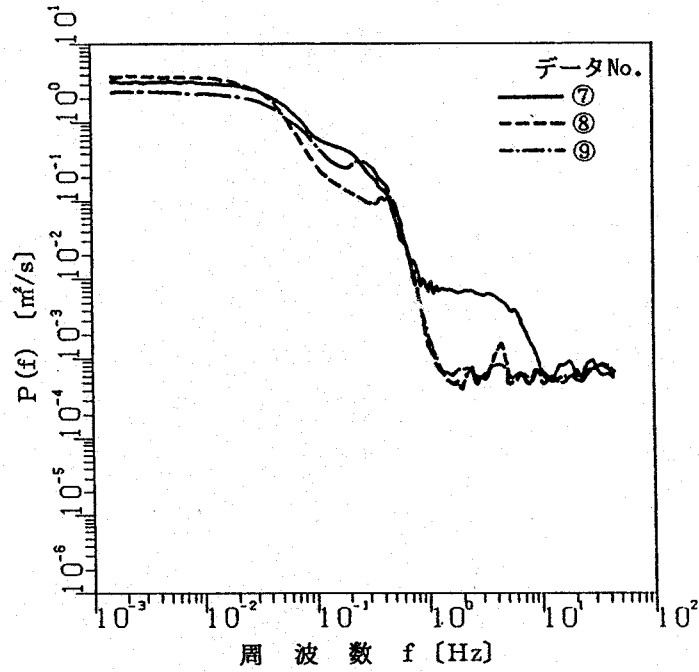


図3.4 上空風速のパワースペクトル (データ⑦~⑨)

(3)平均風圧の分布

図3.5に、データ①~⑥から得られた、上空風速度圧に対する風圧係数の分布を示す。このとき平均風向は、その範囲を図示しているように、建物長辺方向壁面

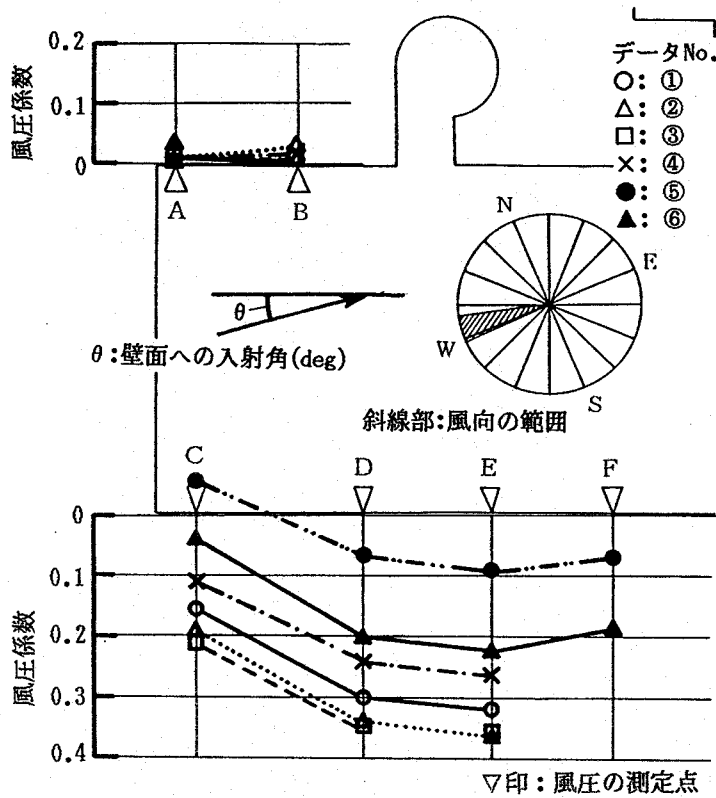


図3.5 風圧係数の分布 (データ①~⑥)

に対してなす角 $\theta = 8 \sim 24^\circ$ であったが、南側壁面の風圧係数はデータ③で最も大きく、②①④⑥⑤の順に小さくなる。また、最も端部近くで0.15ほど下がる傾向が見られ、 θ が大きいほど風圧係数は大きく、分布曲線を平行移動させた様になる。このことは、 θ の 16° の差で、風圧係数が0.3近く変化することになり、風向が壁面に平行に近いときには、風圧係数は風向の変化に対して敏感であるといえる。北側壁面では、基準圧ポットを北側に置いたため殆ど0に近い。図には示していないが、データ⑦～⑨では、基準圧ポットを南側ベランダに設置したため、風圧は0に近く、分布は殆どあられなかった。

(4) 風圧変動の実効値

図3.6は風圧変動の実効値の分布を示したものである。データ①～⑥については、北側壁面で0.3mmAq前後、南側壁面では0.2～1.0mmAq前後で、風圧係数同様データ③が最も大きく、ほぼ θ の大きい順になっていることがわかる。また、同一壁面における分布はあまり大きくない。データ⑦～⑨は、すべて0.1mmAq前後で、位置による風圧変動の実効値の差異は殆どみられない。

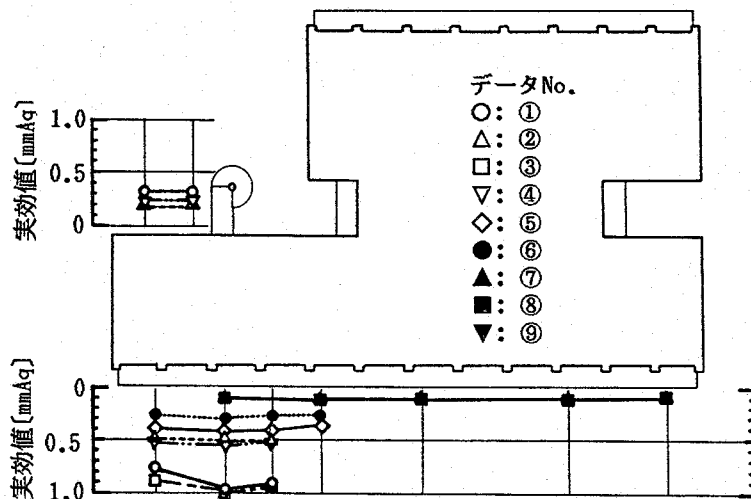


図3.6 風圧変動の実効値の分布

(5) 風圧変動のパワースペクトルの位置による違い

図3.7は、データ①における測定点A～Eのパワースペクトルを重ねて描いたものである。この図より、点AとB及びC,D,Eのそれぞれの間にはスペクトルの差異

は殆どないことがわかる。風上側である点AとBのパワーが0.1Hz付近の周波数を除いてC,D,Eの1/10程度となっており、風上と風下でパワーが大きく異なり、乱れの実効値の大きさと対応していることがわかる。減衰の傾きは点A,Bで $-2/5$ 乗、点C~Dで $-5/3$ 乗程度である。

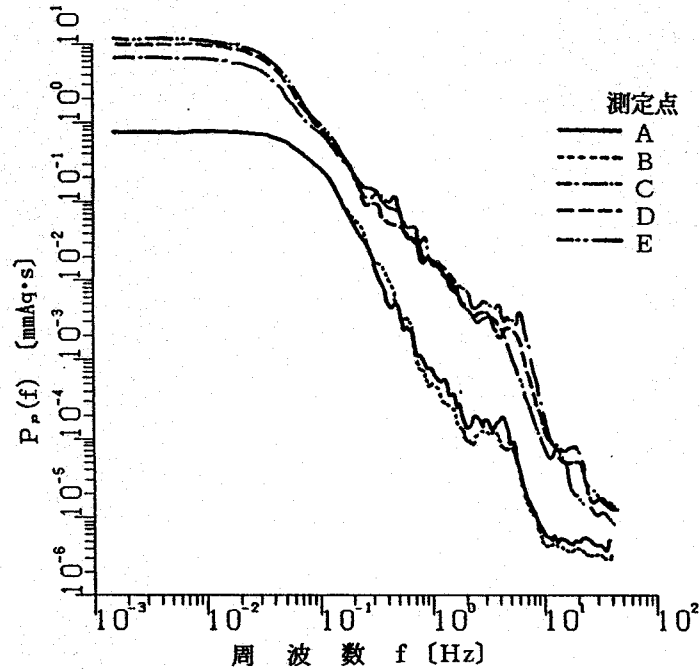


図3.7 風圧変動のパワースペクトル
(位置による違い、データ①)

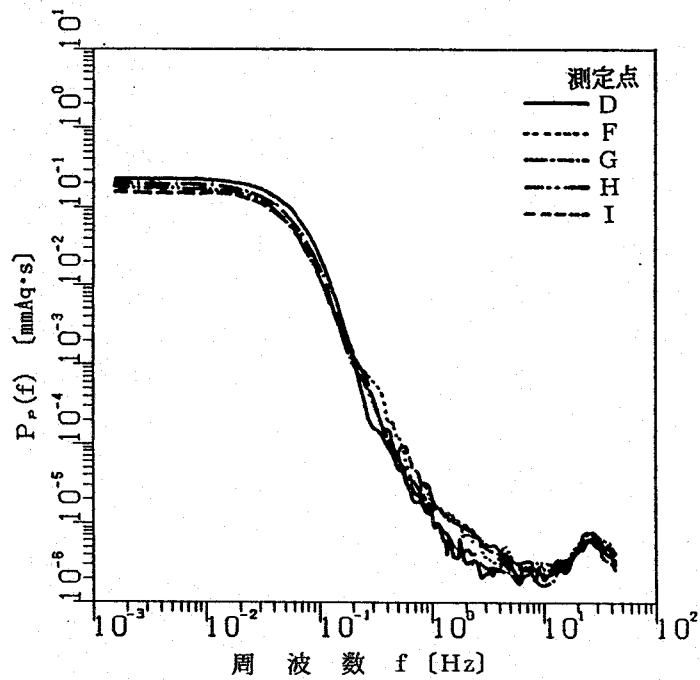


図3.8 風圧変動のパワースペクトル
(位置による違い、データ⑦)

図3.8はデータ⑦における点D, F, G, H, Iのスペクトルである。殆ど位置による差異はなく、減衰の傾きは図3.7のA, Bと等しく、 $-5/2$ 乗程度である。このときの平均風向は300度、即ち $\theta = -7.5^\circ$ で、測定壁面はすべて風下側になっている。

(7)相関係数の分布

図3.9に、南側壁面の風圧変動の相関係数を示す。点線は、データ①～⑥の平均を示す。建物長辺方向壁面に対してなす角 θ は○印で -7.5° 、 Δ で 4.5° 、 \square で 0° 、点線で $8\sim 24^\circ$ であり、 θ が大きいほど相関係数の距離減衰の割合が若干大きいことがわかる。

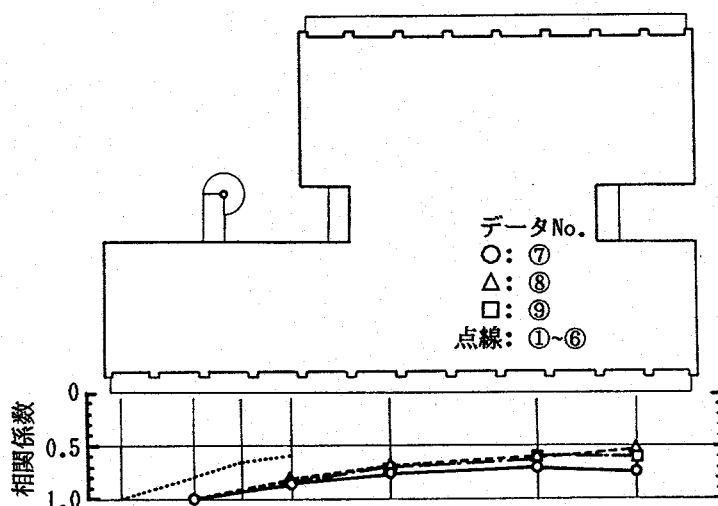


図3.9 風圧変動の相関係数の分布 [南側壁面]

(8)風圧の変動が通気量計算に及ぼす影響に関する検討

表3.5に通気量計算値の一覧を示す。通気量は2例を除き瞬時値から計算した方が大きく、その差は通気量の最大11%である。また、風圧の瞬時値を用いた計算から、どの開口においても流入と流出の両方が生じていることがわかっている。そこで、各開口における逆流の割合を知るために、平均風圧によって決まる流れの方向の流量に対して、それと逆方向の流量の割合を逆流率と定義し、各データについて示したのが図3.10である。開口C及びFで、50%を超える場合があるが、その他では概ね10%~20%以下である。C点の風圧変動の実効値はD, E, Fと大き

くは変わらないことから（図3.6参照）、C点の逆流率が大きいのは風圧が他点に比べて小さいことに原因しているものと考えられ、風上側壁面の風圧係数の小さい部位の開口では逆流率が大きくなる可能性が伺える。F点（データ⑦⑧）では、微妙な風圧のバランスから流入量と流出量がほぼ同じになるものと考えられる。

表3.5 通気量計算値一覧

データ	平均風圧から計算した通気量 [m ³ /s]	瞬時値より計算した通気量 [m ³ /s]
①	3.90	4.00
②	3.09	3.35
③	4.37	4.24
④	3.00	3.18
⑤	2.33	2.55
⑥	2.33	2.24
⑦	1.22	1.36
⑧	1.34	1.50
⑨	1.15	1.30

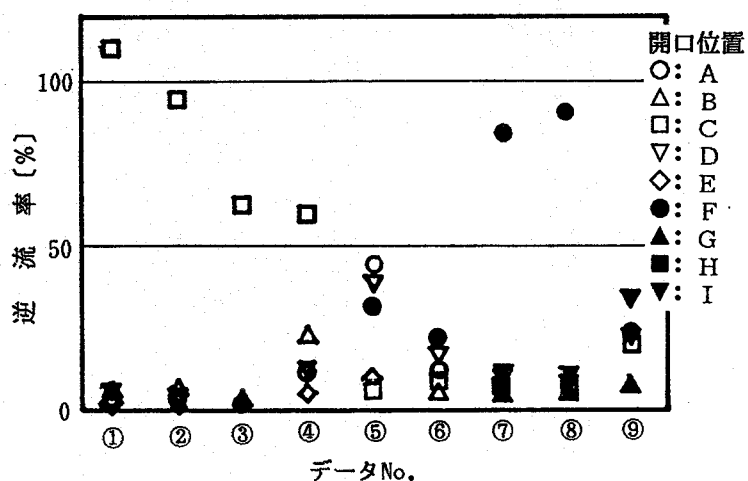


図3.10 各データにおける逆流率

3.3.5 まとめ

建物の長辺に対して8~24°の角度で風が吹くとき、各開口において平均風圧によって決まる流れの方向の流量に対する、逆向き流量の割合である逆流率は、一部開口の二三のデータを除いて概ね10%~20%以下であることがわかった。こ

これは一つの実測例に過ぎないが、一般的に言っても風向が建物の開口壁面に完全に平行に吹かない限り、複数開口における脈動通気量が全通気量に占める割合は比較的小さいものと考えることが出来る。また、風向が建物の開口壁面に完全に平行に吹く頻度の少なさをも考慮すれば、風の乱れを考慮した換気計画法の確立のためには、この複数開口の脈動通気は考慮する必要性は低いと言えよう。

3.4 単一開口換気における自然風の乱れによる換気効果

3.4.1 本節の概要

本節では、3.1で示した三つの換気メカニズムのうち、「②単一開口を持つ室において風の乱れによって生じる単一開口通気」のメカニズムの現象的理解を深めるために、可視化実験により単一開口或いは二開口の条件下における開口部気流性状を視覚的に明らかにする。二開口を持つ条件でも実験を行ったのは、二開口を持つ場合でも、開口面積に大きな差異がある場合には、単一開口と同じメカニズムによる換気が生じていると考えられるため、それを確認するためである。

実験においては、乱れを持った風として、ファンによって作りだした人工風を用いており、整流パイプによって乱れの異なる四種類の風を作った。これらの風は、実際の自然風とはかなり違った性質のものと推測されるが、風の乱れと換気メカニズムとの関係を原理的に明らかにしようとするものであることから、あえて自然風との相似性にはこだわらなかった。

3.4.2 実験概要

単一開口を持つ模型箱と風上・風下に二開口を持つ模型箱に人工風を当て、風の乱れによって生じる開口での空気の流入と流出の様子をタバコ煙を用いて視覚的に把握し、換気メカニズムを確認する。また、風の乱れや淀み点の位置、及び二開口の開口条件等が換気メカニズムに与える影響についても考察を行うため、模型箱の位置、風の乱れの性質、二開口の開口条件を変えた実験を行った。

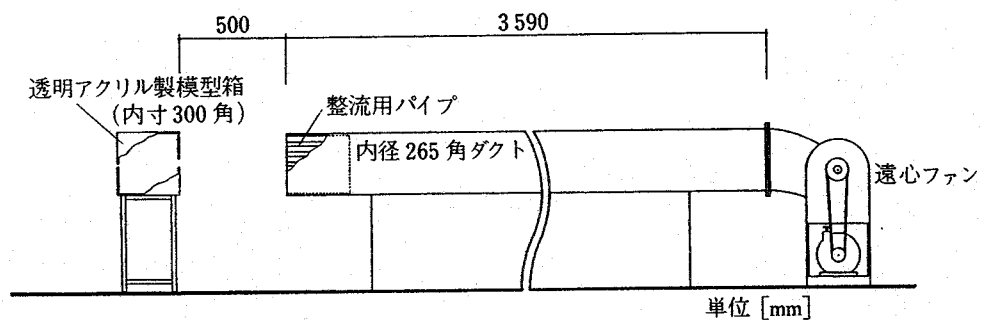


図3.11 実験装置概略図

図3.11に実験装置の概略を示す。遠心ファンによって作った風を内径265mmの角ダクトで導き、整流用パイプを通して模型箱に垂直に吹き付ける。ダクト吹き出し口に3種類の整流用パイプ束が設置出来るようになっており、4種類の乱れの異なる風を作ることが出来る。表3.6に各風種の整流用パイプ径と乱れの強さの一覧を示す。模型箱は内寸30cmの立方体であり、開口周辺の空気の流れを観察できるように、透明アクリル製とした。

表3.6 各風種の整流用パイプ径と乱れの強さ

風種	パイプ内径 [mm]	乱れの強さ [%]
A	パイプは設置せず	7.9
B	30.0	8.2
C	10.0	4.5
D	4.3	3.7

注：乱れの強さは設定風速が4m/sのときの値である。

実験は以下の手順で行った。ダクト中心軸上ダクト吹き出し口から50cmの位置に熱線風速計を設置し、風速設定を行う。その後、開口面がダクト中心軸と垂直になるように模型箱を設置する。模型箱の中に図3.12に示すタバコ煙発生装置によって作りだした煙を充満させた後、図3.13に示す断面をスライドプロジェクターによって作ったスリット光で模型箱の側方から照明し、模型上方約40cmから、開口近傍の空気の流入、模型箱内部からの煙の流出状況を一眼レフカメラ（ニコンF3、F1.4標準55mmレンズ装着）で撮影した。また、同時にビデオカメラによる撮影及び目視による観察も行った。

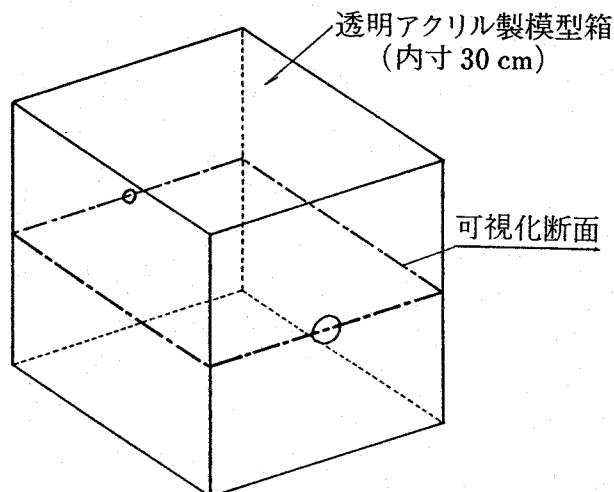


図3.12 可視化用タバコ煙発生装置

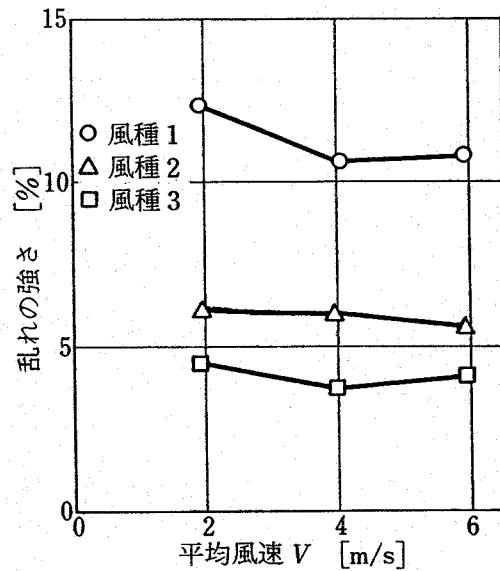


図3.13 模型箱と可視化断面

実験条件を表3.7に示す。ダクト風の乱れの差異が最も現われると考えられる、ダクト中心軸上に開口中心が位置し開口中心に淀み点が位置する条件に加えて、淀み点が開口中心になく、開口面の前に一定方向の気流が生じる場合として、開口中心をダクト中心軸から3cmずらした条件でも実験を行った。カメラの撮影条件を表3.8に示す。

表3.7 実験条件

設定風速 [m/s]	1.5
風種	A, B, C, D
風上側開口直径 [mm]	40.0
風下側開口直径 [mm]	なし, 7.1, 20.0
ダクト中心軸と模型とのずれ	0 cm, 左 3 cm

注：ダクト中心軸と模型箱のずれ左3cm（模型箱からダクト方向に向かって左）については、風下側に開口のない場合のみ実験を行った。

表3.8 撮影条件

ASA	400.0
絞り	1.4
シャッタースピード	1/30秒

3.4.3 結果と考察

(1) 単一開口での流入・流出の状況

開口径40mmの単一開口を取付けた模型箱における開口部気流の可視化写真の一部を図3.14から図3.16に示す。これらの写真は時刻を追ったものではなく、ランダムな瞬間の写真を並べたものである。

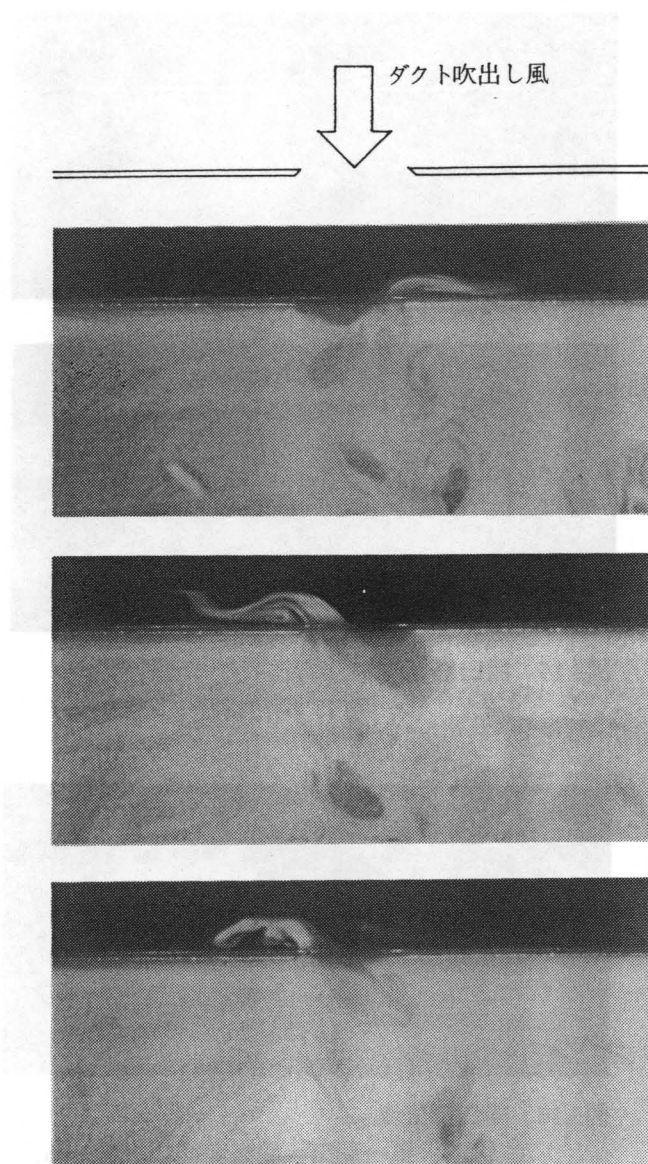


図3.14 開口部気流
(風D、単一開口、開口直径 $\phi=40.0\text{mm}$)

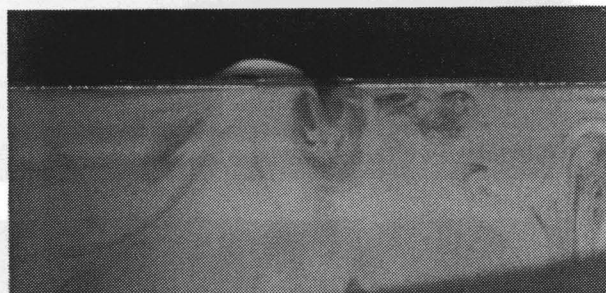
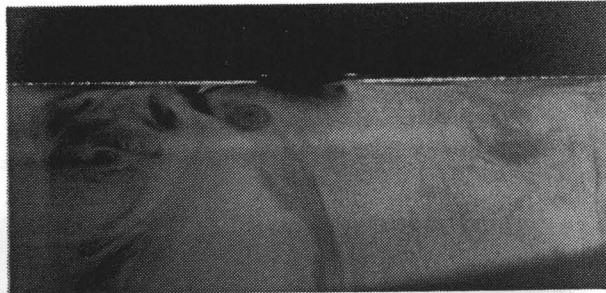
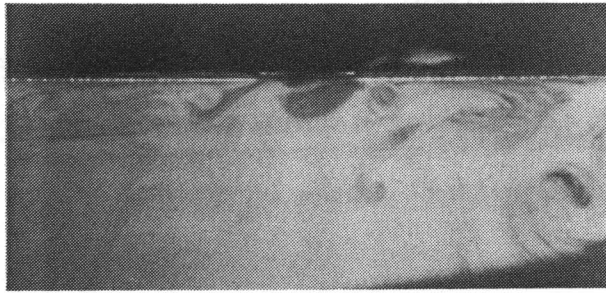


図3.15 開口部気流
(風A、単一開口、開口直径 $\phi = 40.0\text{mm}$)

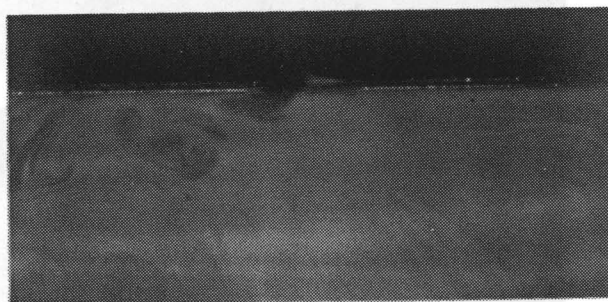


図3.16 開口部気流
(風D、単一開口、開口直径 $\phi = 40.0\text{mm}$ 、
開口中心がダクト中心軸から左に 3cm ずれている)

図3.14は、ダクト中心軸上に開口中心が位置するように設置した模型箱に風Dを当てたときの、開口での空気の流入、流出の状況を示した一連の写真である。

流入空気は白く、流出空気は黒く写っている。最上段の写真では、開口の右端部から室内空気の流出が生じており、開口の左の部分で外気の流入が生じている。下二枚の写真では、開口の左端部より空気の流出が見られ、右の部分で外気の流入が生じていることがわかる。このことから、空気の流入、流出の位置は一定しておらず、時間によって変化することがわかる。また、目視の結果、開口部での流入と流出は同時に起こっており、その流入量と流出量、流入位置と流出位置が時間とともに変動していることが観察された。この現象は、1.2.1で示したH.K.Malinowskiの分類で「渦の侵入による換気」にあたるものであると考えられる。

図3.15は、吹き出し風Aの場合である。流入した空気塊を表す黒い部分が模型箱内部で開口の左右に見られ、図3.14の風Dの場合と比較すると、風Dでは開口から箱内に流入した空気は常にまっすぐ模型箱の奥方向に侵入しているのに対し、風Aでは開口からの空気の侵入方向が一定していないといえる。模型箱内への気流の侵入方向は、開口から侵入する空気が開口部に入る直前に持っている速度ベクトルの方向に大きく左右されるものと考えられる。故にこれは、ダクト吹き出し風の乱れの性状の違いにより開口前の気流性状が異なることに起因すると考えられる。つまり、風Aのほうが吹き出し風の乱れが大きいため、開口前の気流の方向や速度が時々刻々変化していることが原因であると考えられる。また、目視から、風Aの方が風Dより侵入する空気の流速が速いことが観察され、通気量も多いものと推察される。

ダクト中心軸上に設置した模型箱に風B及び風Cを当てたときの、開口での空気の流入・流出の状況は、目視により風Bは風Aに、風Cは風Dに近い性状を示すことが確認できた。これは、表3.6に示した乱れの強さの大きさを反映していると思われる。

ダクト中心軸上からダクトに向かって左に3 cmずらして設置した模型箱に風Dを当てたときの、開口での空気の流入・流出の状況の一例を図3.16に示す。この条件では、開口で同時に空気の流入と流出が同時に生じているものの、図3.14の開口中心がダクト中心軸上にある場合と異なり、開口から侵入した空気は向かって左方向にしか流入しないことが目視からも確認された。これは、模型箱をダク

ト中心軸からダクトに向かって左にずらすことによって開口前で左向きの壁面流が生じていることに原因していると考えられる。

(2)風上・風下二面開口の流入・流出の状況

図3.17に、ダクト中心軸上に風上開口 ϕ 40.0、風下側開口 ϕ 20.0の模型箱を設置し、風Dを当てたときの風上側開口での空気の流入・流出の状況を示す。開口全面から大量の空気の流入が見られ、単一開口において見られた風上側開口における空気の流出は見られない。目視からも、空気の流出現象は確認できず、この開口条件では、風の乱れによる換気は生じないものと言することができる。

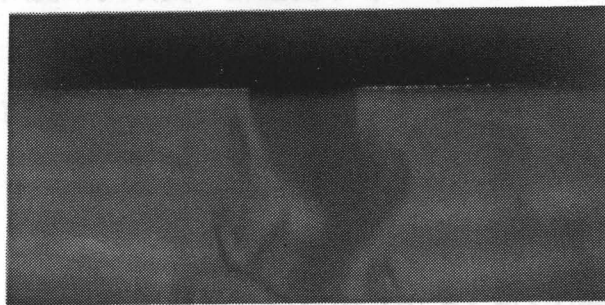


図3.17 開口部気流
(風D、風上・風下二面開口、風上側開口直径 $\phi_f=40.0\text{mm}$ 、
風下側開口直径 $\phi_b=20.0\text{mm}$)

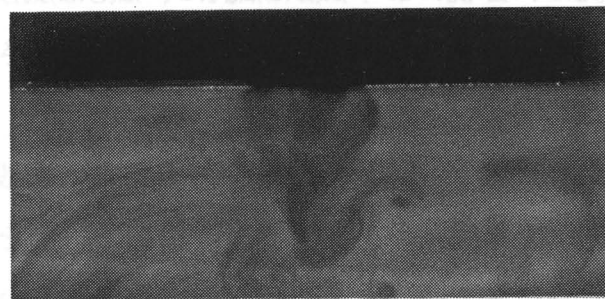


図3.18 開口部気流
(風D、風上・風下二面開口、風上側開口直径 $\phi_f=40.0\text{mm}$ 、
風下側開口直径 $\phi_b=7.1\text{mm}$)

図3.18は、風上側開口は同じ $\phi 40.0$ で、風下側開口を $\phi 7.1$ （面積は $\phi 20.0$ の $1/8$ ）とし、模型箱をダクト中心軸上に設置し、風Dを当てたときの風上側開口での空気の流入・流出の状況である。これより、図3.17の風下開口が $\phi 20.0$ のときには見られなかった空気の流出を確認することができ、単一開口と同じメカニズムの風の乱れによる換気が生じていることがわかる。この風上側開口からの流出が生じることによって、実際の通気量が、壁面風圧から算出した定常通気通気量より大きくなるものと予想できる。

3.4.4 まとめ

ダクト吹き出しの人工風と模型箱を用いた可視化実験により、単一開口を持つ模型箱において、風の乱れが原動力となって、開口で空気が同時に流入・流出し、その開口部気流は風の持つ性状の違いや開口前の気流方向の違いによって異なることが確認された。1.2.1で示したH.K.Malinowskiの分類での「脈動換気」は確認できなかったが、空気の流入量と流出量は必ずしも常に等しいとは限らず、脈動現象による換気も同時に生じている可能性は十分に考えられる。

また、模型箱が風上と風下に開口を持つ場合にも、風下側開口が風上側開口よりある程度小さい場合には、風上側の開口で単一開口と同じメカニズムによる風の乱れによる換気が生じていることが視覚的に明らかになった。

3.5 本章のまとめ

本章における検討により、明らかになったことを以下にまとめる。

- (1) 風力換気のみカニズムは次の三つに分類できる。
 - ① 時間平均の風圧によって引き起こされる定常通気
 - ② 単一開口を持つ室において風の乱れによって生じる単一開口通気
(脈動と渦の侵入)
 - ③ 開口間の風圧差の時間変動によって引き起こされる脈動通気
- (2) 定常通気場合の通気量計算式は確立されているが、風圧係数の値の簡便な予測法が確立されていないという問題点が存在する。
- (3) 定常通気の場合の換気効率に通気の変動性や開口部流入方向の予測が不可欠であるならば、それらの予測法を確立することが必要である。
- (4) 風向が建物の開口壁面に完全に平行に吹かない限り、複数開口における脈動通気量が全通気量に占める割合は比較的小さい。また、風向が建物の開口壁面に完全に平行に吹く頻度の少なさを考慮すれば、風の乱れを考慮した換気計画法において、この複数開口の脈動通気を考慮する必要性は低い。
- (5) 単一開口通気では、開口部で外気の流入と室内空気の流出が同時に生じており、その位置や量、流入方向などは、開口にあたる風の乱れの状態や開口前の気流の方向などによって影響を受ける。
- (6) 風上側と風下側にそれぞれ開口を持つ室においても、風下側の開口が風上側に比べて十分小さいときには、風上側開口で単一開口通気と同じメカニズムによる通気が生じる。

以上の結果をふまえて、次章以降では、単一開口通気を通気量予測法の検討、定常通気時の通気量予測のための風圧係数の予測法に関する検討、定常通気と単一開口通気が同時に生じる場合の通気量予測法の検討、定常通気時・単一開口通気時の換気効率に関する検討などを進めたうえで、長期的な室内汚染物濃度の出現頻度分布の予測法の検討を行い、風の乱れを考慮した換気計画法の確立を目指す。

参考文献

- 1)村上周三, 加藤信介, 森山修治: 風洞模型実験における変動圧力測定法に関する研究 導圧管を用いる変動圧力測定系統の周波数応答特性を中心として, 風工学シンポジウム, 1984年, pp.85 - 90

第4章 単一開口における通気量予測法

4.1 本章の目的

前章で、風の乱れを考慮した風力換気計画法では、通気のマカニズムとして、単一開口室において生じる通気のマカニズムである単一開口通気と複数開口を持つ室で生じる定常的な通気の両者を考慮すべきであり、複数開口の脈動換気は必ずしも考慮する必要のないことを述べた。

本章は、単一開口を持つ室において風の乱れによって生じる通気量を予測する手法の確立を目的としている。

通気量の予測法を確立するためには、換気実験における通気量の測定を欠かすことはできない。しかし現在の技術では、単一開口の通気量を開口部での風速測定から測定することは非常に困難であると言わざるを得ない。そこで本章では、通気量の実用的測定方法として、室内を攪拌しながらトレーサガス法で測定した換気量を通気量とみなす実験手法を考案し、その妥当性の検証を試みる。その上で、まず種々の換気要因が単一開口の通気量に及ぼす影響に関する検討を人工風を用いた換気実験によって行い、単一開口における風の乱れによる通気量予測法確立のための基礎的資料を得る。

それを踏まえて、従来提案されている通気モデルのうちで代表的な二つの通気モデルである脈動モデルと混合層モデルを取り上げ、その適用性に関する検討を行った。混合層理論による通気量計算法の検討にあたっては、開口近傍気流の風速測定を行い、混合層内の風速分布についての知見も得、混合層理論の妥当性検討のための資料として用いている。

それらの検討の上で、最後に単一開口における通気量の実用的算定式を提案する。

4.2 単一開口における通気量測定法

4.2.1 本節の概要

単一開口の通気量に関する検討を行う上で、通気量の測定は不可欠である。しかしながら、3.4での可視化実験で明らかになったように、単一開口で風の乱れによる通気が生じているときには、一つの開口で空気の流入と流出が同時に生じる非常に複雑な流れが形成されるため、開口部の通気量を開口部の風速測定から精度良く算定することは現状の技術では非常に困難と考えられる。故に、本研究では室内を攪拌し、トレーサーガス濃度に分布をなくして測定した換気量を通気量と見做すという手法を考える。室内に分布が存在しなければ完全混合の状態が達成されていることになり、換気効率は0.5即ち $(\text{換気量}) = (\text{通気量})$ となり得る。本節では、単一開口を持つ室において、風の乱れによる換気が行なわれているときの室内の換気特性、即ち流入外気と室内空気との混合特性を明らかにするとともに、それが箱内攪拌器の回転によってどう変化するかを明らかにすることによって、攪拌器を作動させながら測定した換気量を開口部通気量と見なすことの妥当性を検証することを目的とする。

単一開口に当たる風としては、ダクト吹き出しの人工風を用いた。

4.2.2 実験方法

(1) 実験装置

実験は、単一開口を持つ立方体の模型箱にファンで作った人工風を当てるといふ手法を取った。この模型箱自身は、建物の模型ではないが、箱内空間は室模型と考え得る。実験装置の概要を図4.1に示す。遠心ファンで作った風を内径420mmダクトを経て、内寸60cm角木製の立方体模型箱に任意の角度で吹き当てられる様になっている。模型箱は風上面に袖壁を持ち、開口中心を中心に回転させることができ、風上面中央に開口をもつ2mm厚の亚克力板を取付けることができる。ダクトの吹き出し口に2種類の寸法の異なるハニカムを取付けることによって3種類の乱れの異なる風を作った。風種とハニカム寸法の一覧を表4.1に示す。

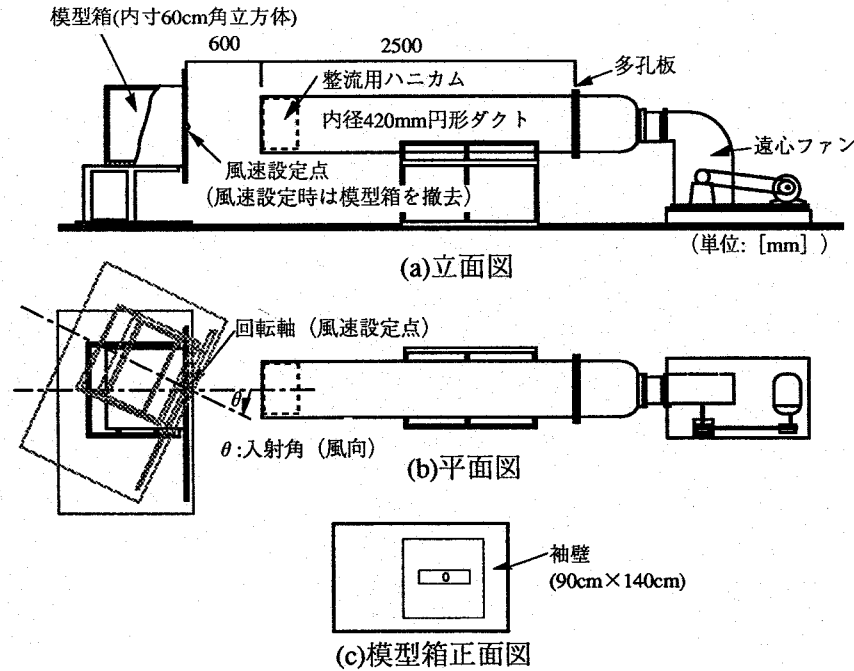


図4.1 実験装置概略図

表4.1 風種とハニカム寸法

風種	整流用ハニカム寸法
1	ハニカム設置せず
2	19mm
3	3.2mm

図4.2、図4.3に示すように、模型箱の内部には攪拌用の円盤が2枚取付けてある。この2枚の羽根が回転することによって、箱内の空気は攪拌され、トレーサーガスの濃度は均一になると考えられる。回転方向は図4.4での向きを正回転と呼ぶ。この攪拌器は、直流モーターで駆動しているが、攪拌装置の構造上、あまり回転数を遅くすると止ってしまう。故に、攪拌器が安定して回転する範囲内で可能なかぎり回転数を落とした。このときの回転数はおよそ180から200rpmである。この回転数で生じる攪拌のみによる換気量をCO₂をトレーサーガスとして測定した結果、正回転で15~21ℓ/h、逆回転で21~25ℓ/hであった。実験は数年にまたがって行なわれており、当初は正回転のみで15-19ℓ/hであったが、後に直流モーターの経年変化によるトルク低下により回転数を上昇せざるを得なくなり、正回転で20~21ℓ/h、逆回転で21~25ℓ/hとなる。このとき、正回転と逆回転の換気量の差は、回転数の差に起因すると考えられる。

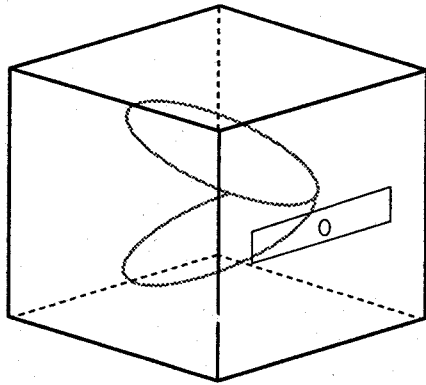


図4.2 模型箱概要図

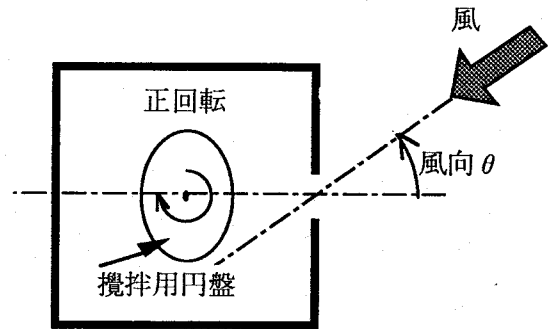


図4.4 攪拌機の正回転方向

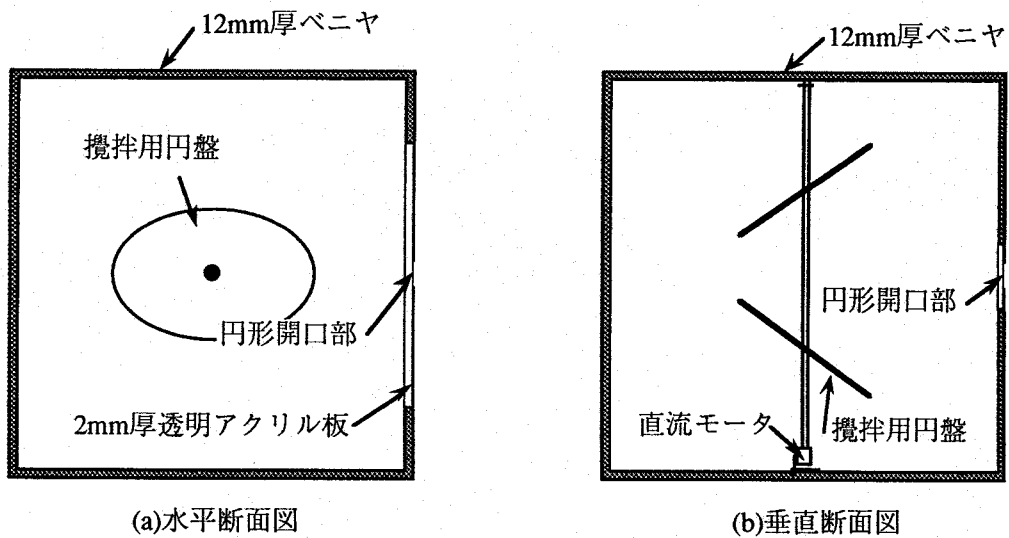


図4.3 模型箱断面図

(2)実験方法

単一の円形開口を取付けた模型箱内に CO_2 を充満させ、ダクト風によって箱内を換気している状態での箱内各点の CO_2 濃度減衰を測定する。

まず、自由噴流状態（模型箱を設置しない状態）において、熱線風速計（システム7102 日本科学工業）で風速を設定後（このとき風速計の出力をデータレコーダに記録、後に解析）、模型箱を開口中心がダクト軸中心上に位置するべく設定し、模型箱内に CO_2 を注入し、攪拌装置を作動させる。開口部を塞ぎ、箱内平均濃度を測定後開口部を開けて換気を行ない、模型箱内に設けた測定点における CO_2 濃度の経時変化を1回の実験につき1点ずつ連続測定する。1回の測定時間は60

分である。CO₂濃度の測定には赤外線吸収式濃度分析器（URA-5 島津製作所）を用いた。初期濃度は4500ppm前後とし、模型箱を置いている室の換気前後の濃度（以下外気濃度と呼ぶ）も測定した。測定点を図4.5に示す。基本測定点は箱内を27分割した中央点で、外気の流入を確認するため、開口の近傍にも測定点を設けている。ただし、E点は追加的に測定したもので、他の測定点とは実験の時期が異なる。

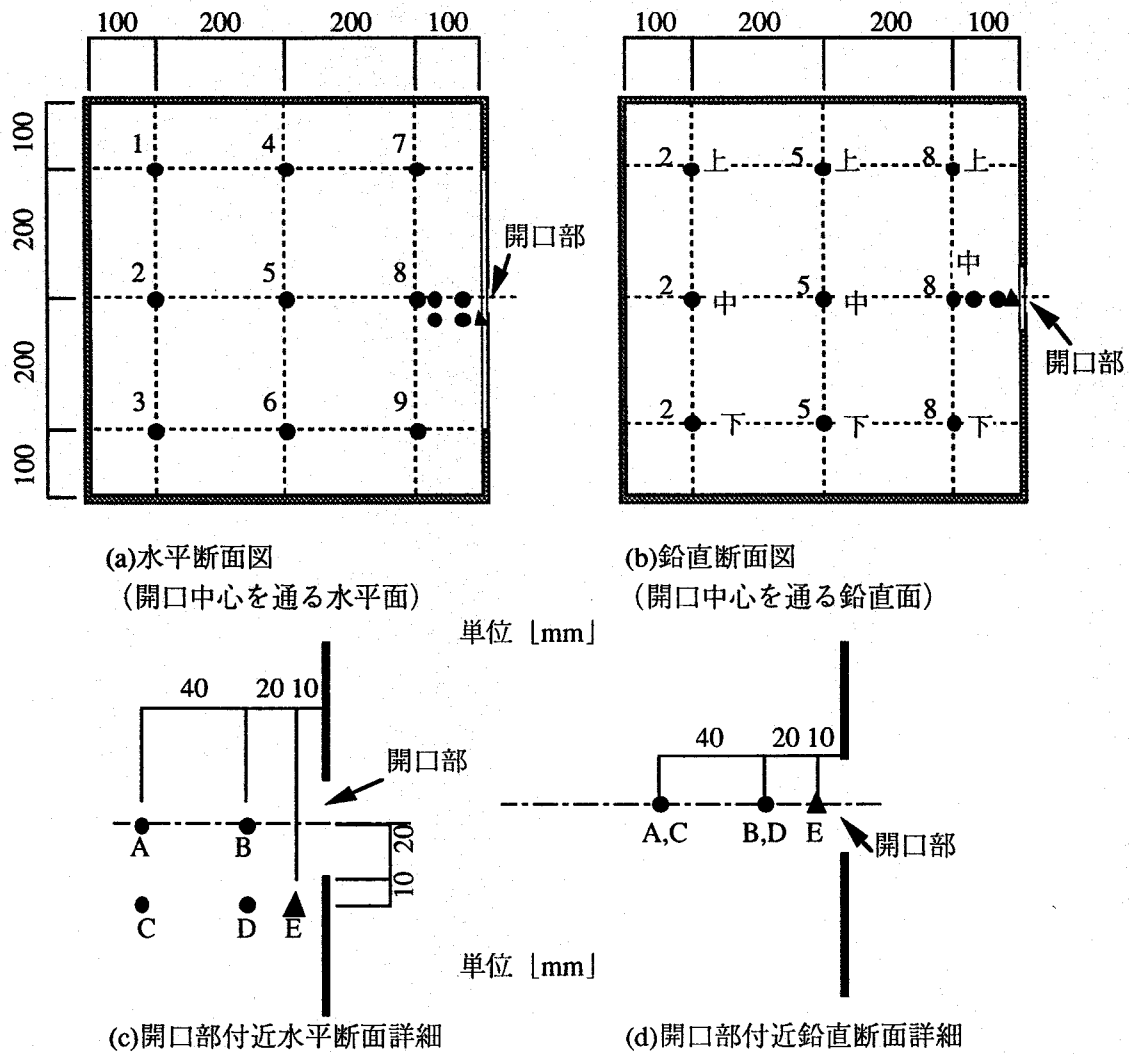


図4.5 CO₂濃度測定点 (▲E点は追加測定点)

実験条件を表4.2に示す。風向（図4.4参照）は、最もダクト風の乱れ性状の影響を受けやすい0度と、壁面で作られる乱れの影響も受ける45度の2通りとし、攪拌器の回転も、正回転方向に回転させた場合と、静止させた場合の2通りとし

た。CO₂濃度測定点から分析器までは、1ℓ/mの流量で箱内空気をサンプリングし、CO₂濃度分析器の出力は、ペンレコーダに記録した。実験終了後、記録したCO₂濃度は3分程度の時定数で平均化し、3分ごとの値を読み取った。

表4.2 実験条件一覧

設定風速 [m/s]	2.0
風 種	3
開口形状	円 形
開口直径 [mm]	40.0
開口角 [°]	0, 45
攪拌器	正回転、静止
CO ₂ 濃度測定点	32点 (図4.5参照) *

* 図中E点は風向45度のときだけ追加計測

なお、補足的に同形状の透明アクリル製模型箱を用いて同じ条件下での開口部近傍気流のたばこ煙による可視化実験も行なった。

4.2.3 結果と考察

(1)ダクト風の特徴

表4.2で示した通り、本節の実験では、設定風速は2m/s、風種は3だけであるが、本実験装置は次節以降においても用いるものであるため、全風種及び風速2m/s～6m/sにわたって、ダクト風の特徴を種々の統計解析量から考察する。

風速設定点で測定した風速を解析し、図4.6にダクト風の各風種の平均風速と乱れの強さの関係を示す。風種1では風速2m/sで2%ほど大きくなるが、それ以外の条件では平均風速にかかわらずほぼ一定の乱れの強さとなっていることがわかる。また、平均風速によらず、風種1の乱れの強さが最も大きく、風種2、3の順になっている。

図4.7に設定風速4.0m/sのときの各風種のパワースペクトルを示す (FFTにより算出し、フリーハンドによるスムージングを施した)。縦軸は乱れの実効値の二乗で基準化している。いずれの風種も数Hzにピークを持つが、スペクトル形状には若干の差異が見られ、三風種は乱れの強さだけでなくその周波数特性も異なる風であるといえる。

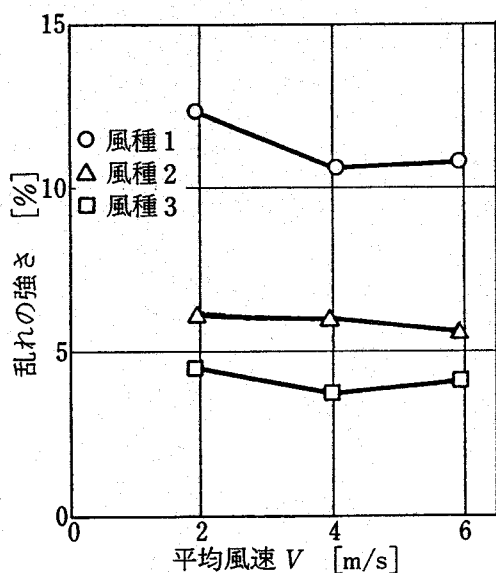


図4.6 平均風速と乱れの強さとの関係

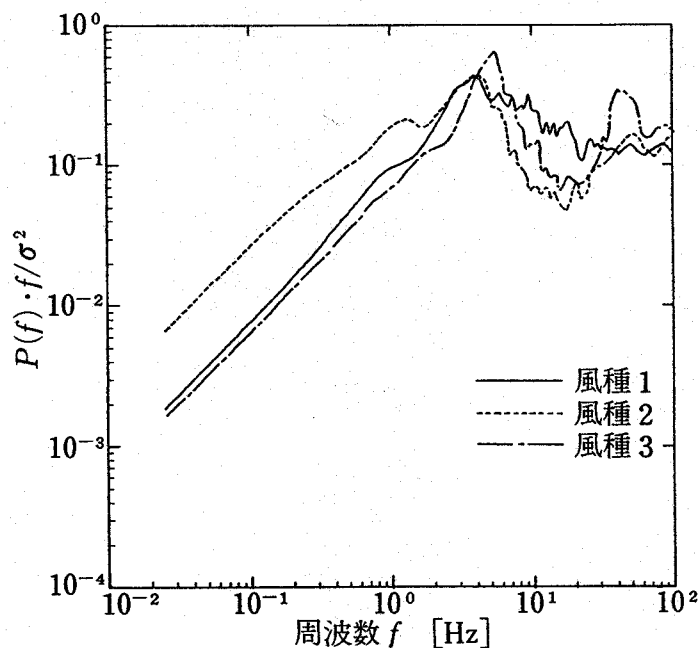


図4.7 ダクト風のパワースペクトル

図4.8は平均風速と乱れのスケールとの関係を示したものである。乱れのスケール（インテグラルスケール）は自己相関係数の時間積分から算出した。いずれの風種においても、平均風速が大きくなるとスケールは大きくなるのがわかる。風種2、3では平均風速が2m/sから4m/sになるとスケールも倍になるが、風種1では2割程度大きくなるに過ぎない。この傾向の違いは風種2、3が整流用ハニカムを通った風であることによると考えられる。全体として、ダクト風の乱れのスケールは、平均風速2 m/sで4～10cm、平均風速6 m/sで12～19cmであることがわかる。本節での実験の開口部は直径40mmの円形であり、設定風速2 m/sで風種3での乱れのスケールはほぼ開口直径と同じ程度の大きさに相当している。

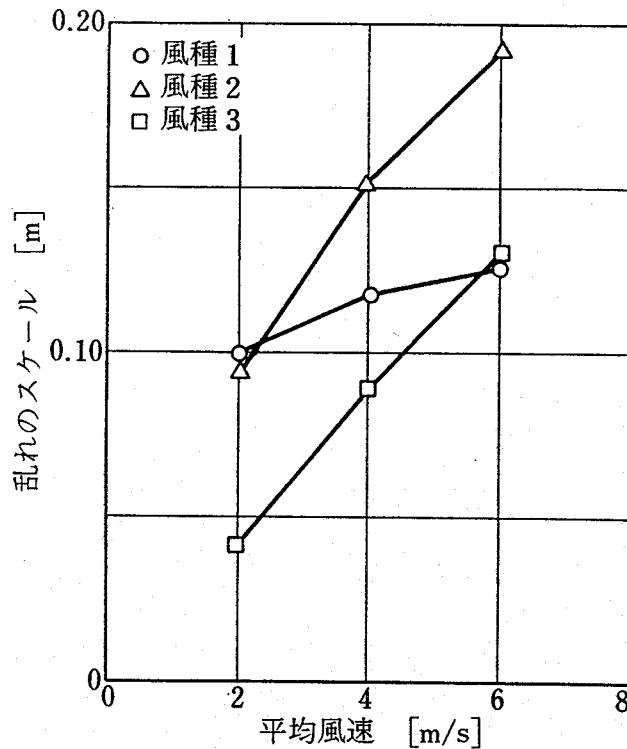


図4.8 平均風速と乱れのスケールとの関係

(2)換気時の模型箱内各点の濃度減衰

図4.9は、攪拌器停止・風向0度のときの各点のCO₂濃度の経時変化を重ねて描いたものである。濃度は、初期濃度と箱外濃度の差異の影響をなくすために、外気濃度との差を初期濃度で除した濃度比で表現し、対数軸を用いている。開口近傍のA,B,C,Dの4点を除けば、各点の濃度に大きな分布はなく、ほぼ直線的に減衰していることがわかる。これは、箱内が開口近傍を除けば完全混合の状態にあることを示している。開口近傍の4点では、換気開始後始めの10分間に大きく減少し、その後は箱内の他の点と同じ減衰率で直線的に減衰していくことがわかる。開口付近での濃度は、箱内奥の濃度に較べ10~20%低く、開口に近い点ほど低い。これは、開口近傍では開口部から流入した外気がまだ完全に拡散していないことが原因と考えられる。図中には、換気開始後60分後の箱内平均濃度から算定した換気回数の平均を示している。

図4.10は、風向45度で攪拌器を停止した条件での各点のCO₂濃度の経時変化である。すべての点の濃度は、濃度比で0.1程度のばらつきの範囲内にあり、模型箱内に大きな濃度分布は存在せず、一律に減衰することから、箱内はほぼ全域にわたっ

て完全混合の状態になっているものといえる。風向0度の場合（図4.9）と比較すると、濃度減衰率即ち換気回数は7倍程度に増加していることがわかる。

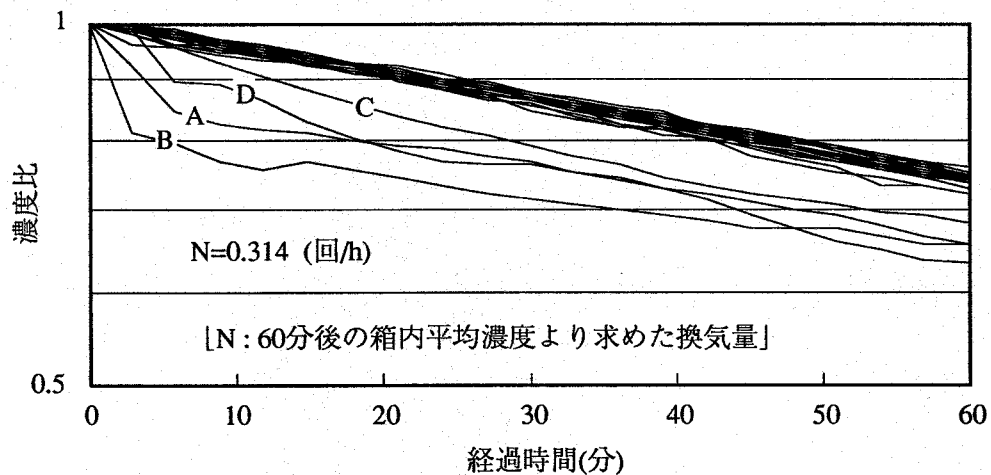


図4.9 各点の濃度の経時変化（風向0度・攪拌なし）

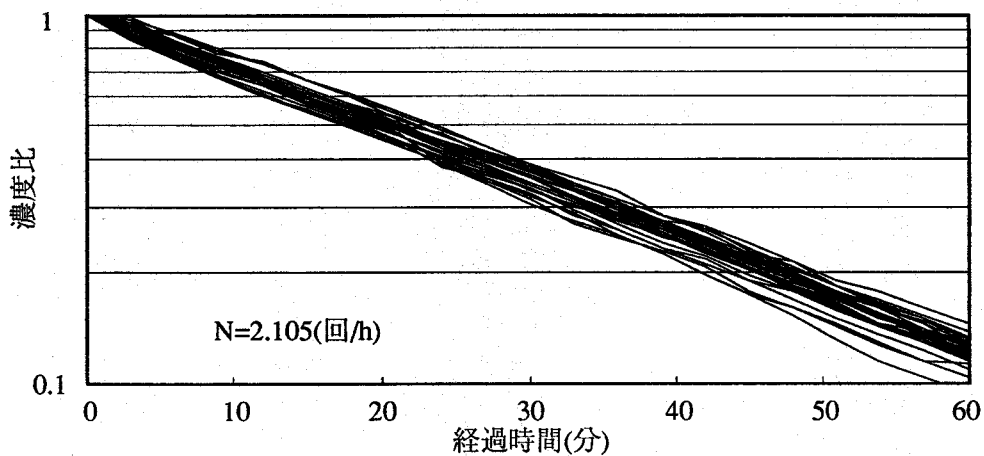


図4.10 各点の濃度の経時変化（風向45度・攪拌なし）

風向45度になると、開口から流入した外気は壁面に沿って流れると予想されたため、開口近傍でE点の濃度減衰を追加測定した。その結果を図4.11に示す。このときは箱内の基本点（27点）のサンプリングチューブは取り外しており、箱の条件が若干異なる。図中の点線は攪拌器を作動させた場合のデータである。この図より、E点での濃度減衰の状態は風向0度のA～D点の濃度減衰状態（図4.9参照）と同じであり、外気が壁面に沿って流れていくコアンダー効果が生じているものと考えられ、このことは可視化実験でも目視確認することができた。

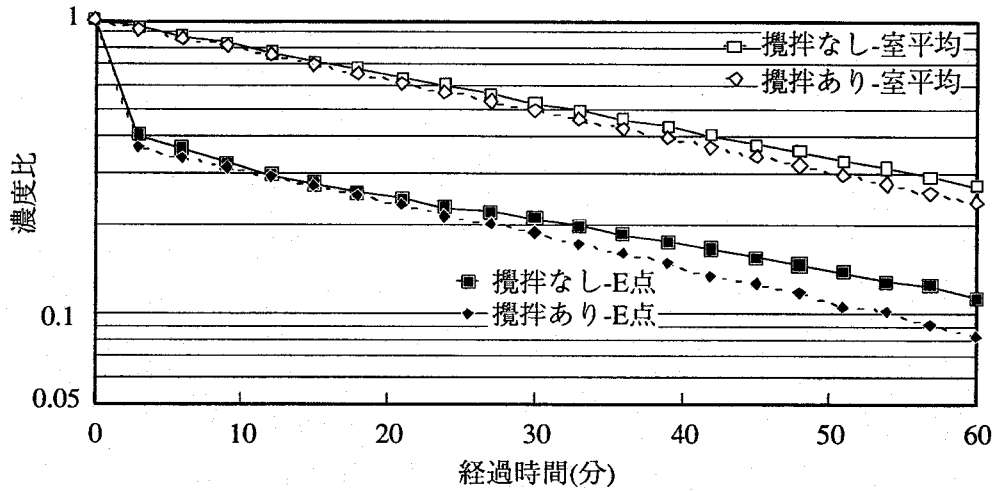


図4.11 室平均及びE点濃度の経時変化

(3)箱内攪拌時の模型箱内各点の濃度減衰

図4.12は、風向0度で攪拌器を作動させた場合の箱内各点の濃度減衰を示している。B点での濃度が他の点に較べて若干低くなっているのを除けば、模型箱内に大きな濃度分布は存在しないことがわかる。また、すべての点の濃度がほぼ直線的に減衰することから、箱内はほぼ全域にわたって完全混合の状態になっていることがわかる。攪拌をしない場合（図4.9）と比較すると、開口部近傍点での濃度が他の点の濃度とほぼ等しくなるとともに、平均換気回数が5割程度増加することがわかる。これは、攪拌することで、開口から流入して箱内空気と十分に混合しないまま流出してしまう空気の割合が減少することによるものと考えられる。

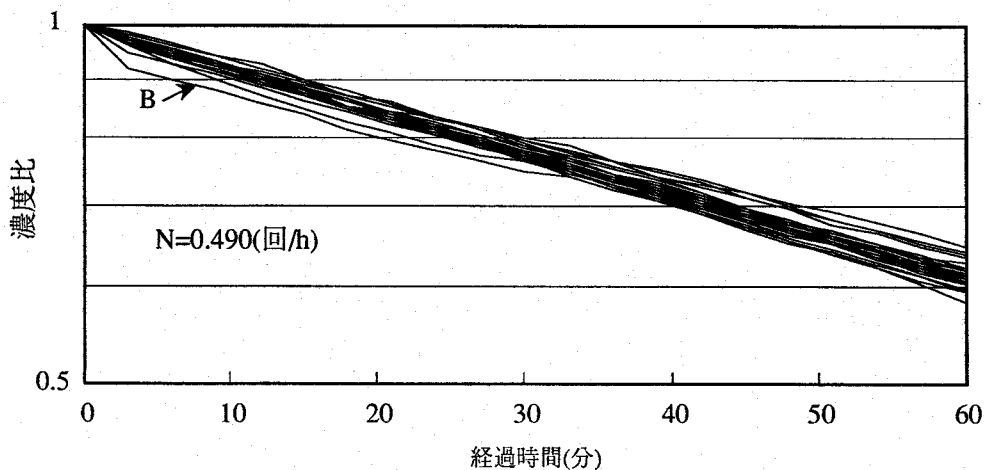


図4.12 各点の濃度の経時変化（風向0度・攪拌あり）

図4.13は、風向45度で箱内を攪拌した場合の濃度減衰であるが、攪拌をしない場合に比べて濃度のばらつきの範囲は若干小さくなるが、いずれの点の濃度も直線的に減衰し、換気回数も殆ど同じである。風向が45度の場合には、もともと完全混合に近く、攪拌の効果はあまり表出しないものと考えられる。前出の図4.11を見ても、攪拌の有無によるE点の濃度の差異は余り見られないことがわかる。風向45度では、模型箱の壁面に沿って流れてきた空気が慣性力を持ったまま、箱内に流入し、模型内壁面に沿って流れるために、箱内に流入して未混合のまま流出する空気はもともと些少であると考えられる。

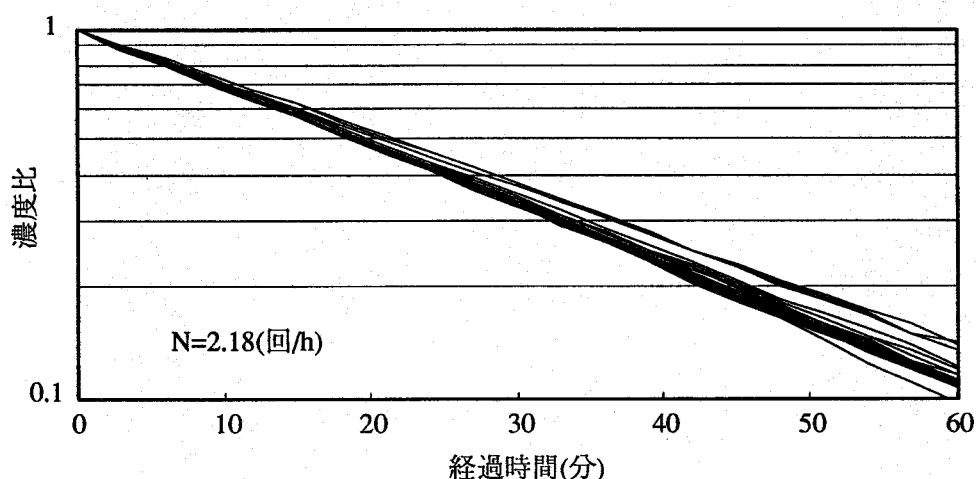


図4.13 各点の濃度の経時変化（風向45度・攪拌あり）

(4)模型箱内の換気特性

(2)、(3)の結果をまとめ、各風向で、攪拌によって箱内換気性状がどう変化するかを模式的に示したものが、図4.14である。模型箱内が濃度が一樣な高濃度域と外気の占める割合が高い低濃度域に分けることができ、風向0度では攪拌によって低濃度域が減少し、流入外気の混合率が上昇することで換気量が増加すること、風向45度では、開口部から流入する空気の混合率が高いため、攪拌の有無による差異は小さいことを表している。以上から、攪拌器は、流入空気の箱内での混合が十分でない場合に、その混合を促進する効果を持っているものといえる。攪拌器を作動させても、開口部から流入した空気がすべて箱内の空気と完全混合するわけではないと考えられるが、単一開口の通気量に関する検討を行う上で、攪拌

時の換気量を通気量とみなすことは、非常に有効な手法であると言えよう。

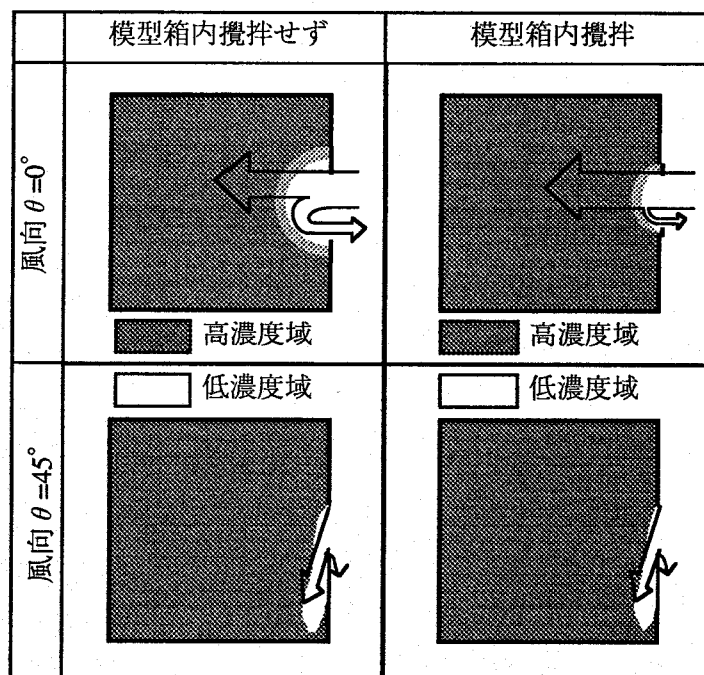


図4.14 模型箱内換気性状の模式図

4.2.4 まとめ

本節での検討により、攪拌器は、流入空気の箱内での混合を促進する効果を持ち、種々の換気要因が通気量に与える影響を検討する上で、攪拌時の換気量を通気量とみなすことは、非常に有効であることを明らかにした。また、単一開口換気での基本的換気特性及び風向がそれに及ぼす影響も明らかにできた。

4.3 換気要因と通気量との関係

4.3.1 本節の概要

本節の目的は、単一開口換気において、種々の換気要因が開口部通気量にどのような影響を及ぼすものであるのかを前節で確立した通気量測定法を用いた換気実験によって明らかにし、単一開口の通気量予測法確立のための基礎的知見を得ることである。

4.3.2 実験方法

前章で用いた実験装置（図4.1参照）を用いて、表4.3に示す実験条件で換気実験を行なった。模型箱を設置しない状態で風速を設定した後、模型箱内にCO₂を注入し、攪拌装置を作動させる。開口部を塞ぎ、箱内平均濃度を測定した後開口部を開けて換気し、10分後開口を再び閉じて箱内濃度を測定する。測定したCO₂濃度から、Seidelの式により、換気回数を算定し、箱容積216ℓを乗じて通気量を得る。一条件につき、各3回の測定を行ない、その平均値を測定データとする。なお、本節では、特に断わらない場合の攪拌方向は正回転である。

表4.3 実験条件一覧表

設定風速 [m/s]	1.0, 2.0, 4.0
風 種	1, 2, 3 (乱れの強さは1>2>3)
開口形状	円 形
開口直径 [mm]	20.0, 28.3, 40.0
風向 θ [度]	0, (15, 30, 45, 60, 75, 90) *1
攪拌器	正回転, 逆回転*2, 静止

*1, *2 特定の条件のみ

4.3.3 結果と考察

(1) 平均風速と通気量との関係 (風向0度)

図4.15に風向0度における全条件について、風速設定点で測定した自由噴流状態のダクト風の平均風速と通気量との関係を示す。いずれの風種、開口についても、通気量は平均風速にほぼ比例していることがわかる。また、平均風速が同じならば、乱れの強さの大きい風種ほど (風種3<2<1)、また、面積の大きい開口ほど通気量が大きくなっていることがわかる。

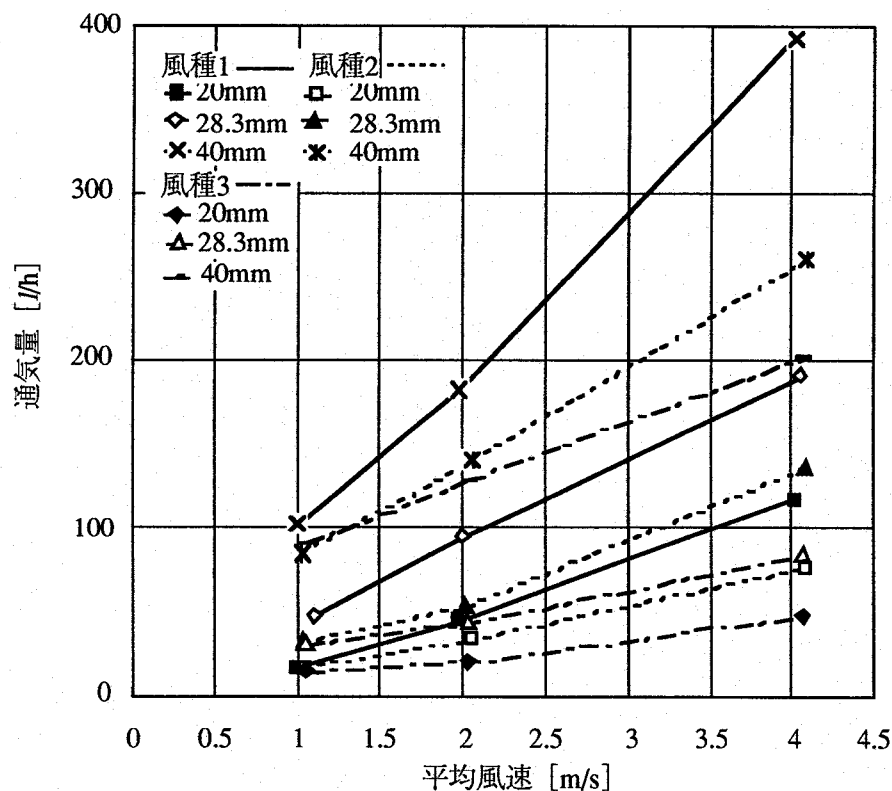


図4.15 平均風速と通気量の関係 (風向0度)

(2) 開口面積と通気量との関係 (風向0度)

図4.16は、図4.15と同じく、風向0度のときの全条件についての開口面積と通気量との関係である。図4.15の平均風速と通気量の関係と非常に似ており、いずれの風種・設定風速条件においても、開口形状が同じならば通気量は開口面積に比例すると言える。開口面積が大きくなると、開口に侵入できる渦のスケール範囲が拡大し、単位開口面積あたりの通気量が大きくなると予測することも可能で

はあるが、今回の実験で用いた人工風の乱れのスケールは概ね5cm以上であり（図4.8参照）、開口直径に較べて大きいためその効果の存在は確認できない。また、同じ開口面積の場合は、設定風速が大きいほど、また、乱れの強さの大きい風種ほど（風種3<2<1）、通気量は大きいことがわかる。

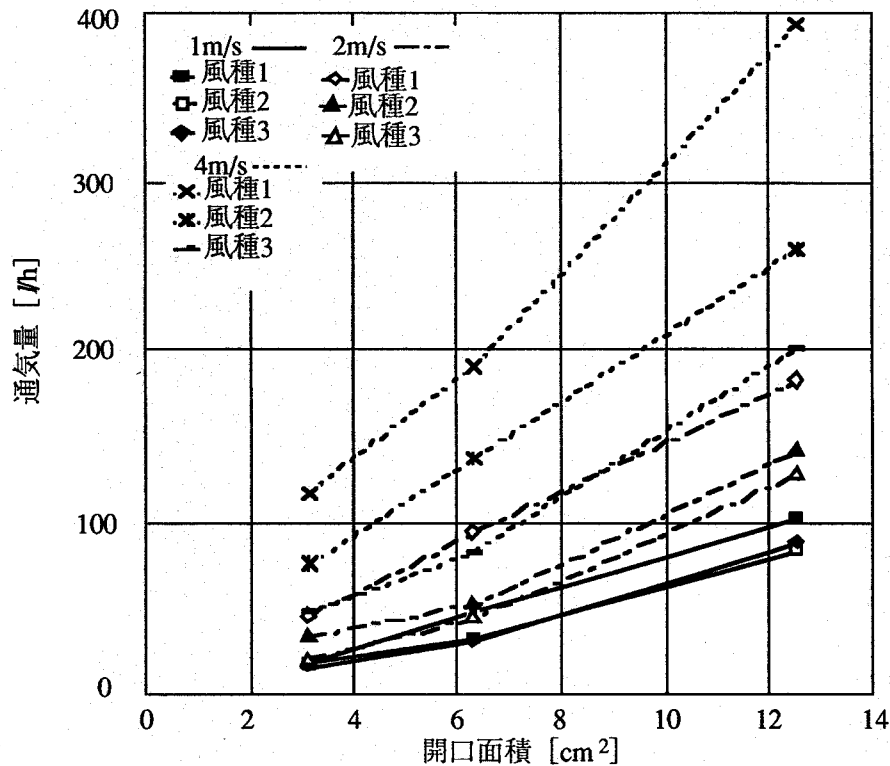


図4.16 開口面積と通気量との関係

(3) 乱れの強さと通気量との関係（風向0度）

図4.17は、風向0度の場合、自由噴流状態のダクト風の乱れの強さと通気量との関係を、両対数軸上に示したものである。いずれの条件においても、乱れの強さが大きいほど通気量は大きく、ほぼ直線となっていることから、通気量は乱れの強さの累乗に比例することがわかる。図中の点線は、通気量が乱れの強さの0.5乗に比例するとした場合の傾きを示している。実験値とこの点線を比較すると、乱れの強さが5%以下で少し傾きが急になるが、全体的には、0.5乗に比例するものと見なしてよいと考えられる。

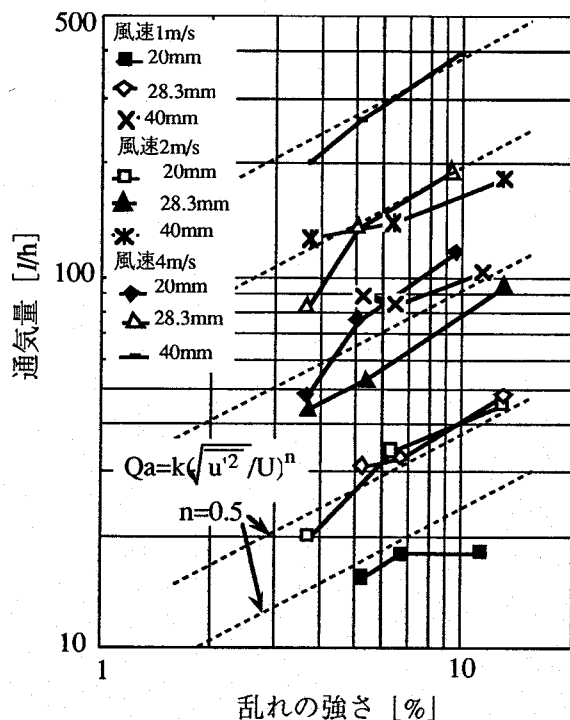


図4.17 乱れの強さと通気量との関係（全開口 風向0度）

(4) 平均風速・開口面積・乱れの強さの平方根の積と通気量との関係（風向0度）

風向0度での結果を総合するために、(1)～(3)の結果をふまえて、平均風速 \bar{U} 、開口面積 A 、乱れの強さの平方根 $(\sqrt{u'^2}/U)^{0.5}$ の積と通気量との関係を示したものが図4.18である。両者には非常に高い相関関係がみられ、風向0度で今回の条件範囲においては、 $\bar{U}A(\sqrt{u'^2}/\bar{U})^{0.5}$ に比例するとして通気量の算定を行なうことが可能である。

以上風向0度での結果について考察を行ってきた。前節4.2で見られたように、風向0度での換気特性は風向45度の場合とは著しく異なっている。故に、ここで得た知見がすべての風向範囲にあてはまるとは考えられない。よって次項で0度以外の風向での結果について検討を試みる。

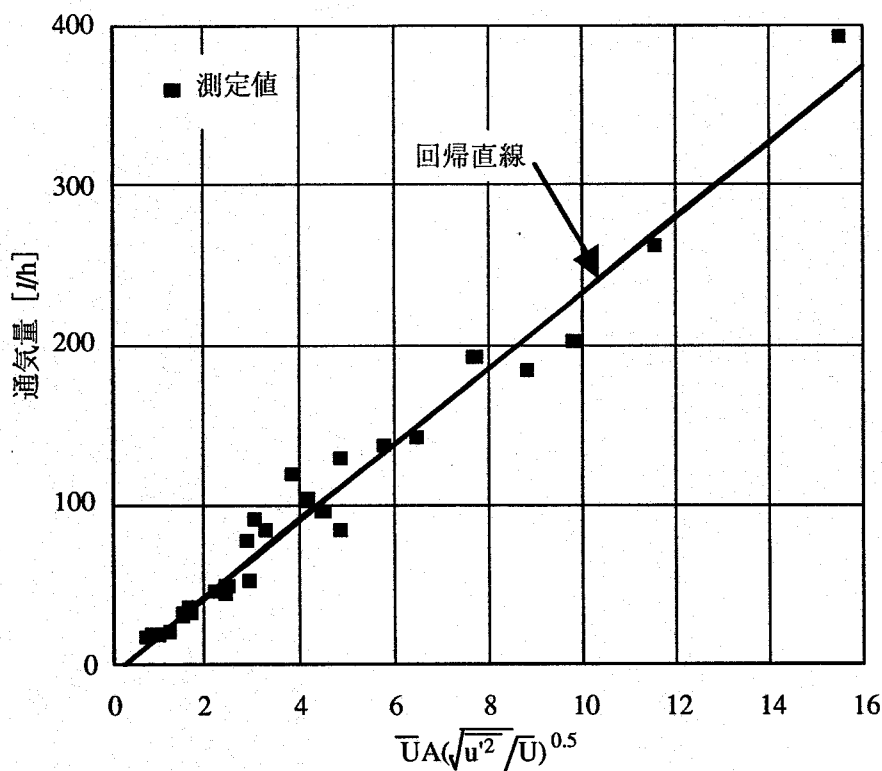


図4.18 平均風速・開口面積・乱れの強さの平方根の積と通気量の関係 (風向0度)

(5) 風向と通気量との関係

風向が0度でない場合、攪拌器の回転方向が開口から侵入する空気の流れる方向と同じ場合と違う場合で、箱内気流の混合状態が異なると考えられ、計測される通気量にも大きな影響があるものと考えられる。そこで、3通りの条件について、攪拌機の正回転時と逆回転時の風向と通気量との関係を示したものが図4.19である。図中実線が正回転時、点線が逆回転時の通気量である。風速4m/s・風種3・開口40mmの場合には、攪拌器の回転方向による通気量の差異は50l/h以下で比較的小さいが、他の2条件については、回転方向が変わることで、算定される通気量が非常に大きく違ってしまふことがわかる。特に風向60度から80度あたりが著しく、最高で200l/h異なっていることがわかる。このことは残念ながら、本研究で用いた攪拌による通気量測定法の限界を示すものであり、0度以外の風向の場合にはこの方法は不適であると言わざるを得ない。

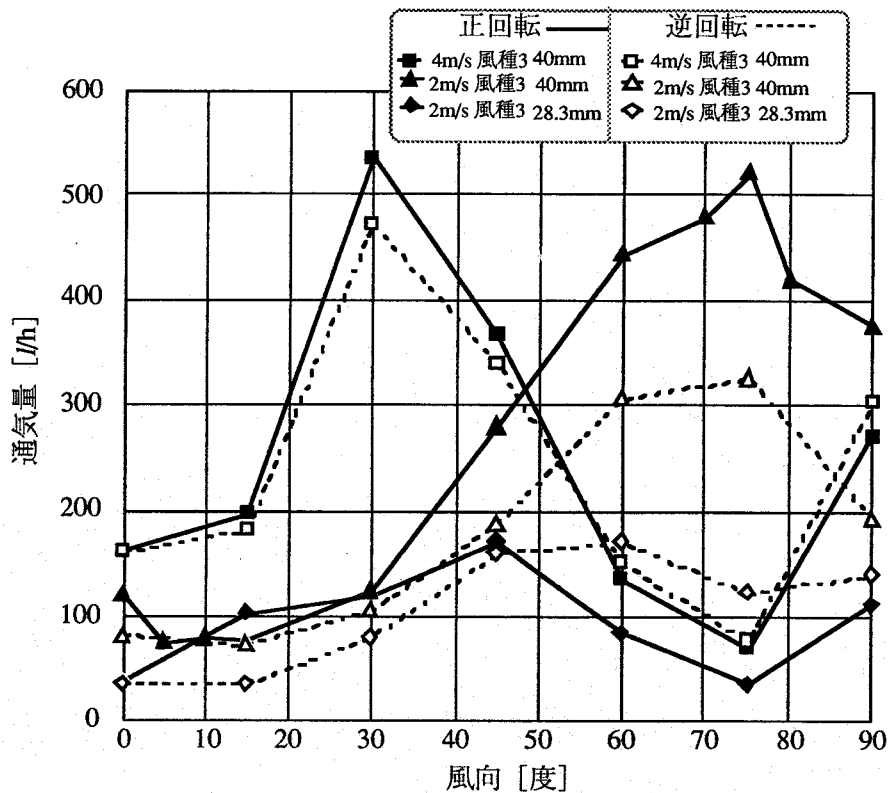


図4.19 風向と通気量との関係（攪拌器の回転方向の差異）

ところで、4.2節では、風向が45度の場合には、攪拌をしない場合でも箱内の大部分は完全混合の状態にあり、攪拌器の回転が箱内の濃度分布に与える影響は小さいということが明らかになっている。このことから推察すると、風向が0度でなく、ある程度以上の値で、基本的な箱内の気流性状が45度の場合と同じであれば、箱内の換気効率がほぼ0.5に近い可能性は極めて高いと考えられるため、通気量は換気量とほぼ同程度の値をとるものと推測できる。

しかし、いずれにせよ、図4.19から設定風速と開口の大きさによって、通気量が最大値をとる風向が異なっていることから判断すると、風向が変化した場合、その通気量の変化は他の換気要因の条件によって大きく変わり、一律的な変化傾向は示さないといえる。故に風向と通気量との関係を予測するためには、ここで検討した換気要因（図2.4参照）だけでは不十分であり、換気要因と通気量とを関連づける中間要因、例えば開口前気流の乱れの特長・風速や開口面への風圧などを導入する必要があると言えよう。

4.3.4 まとめ

本節では、種々の換気要因と通気量との関係について詳しく検討を行なった。その結果、風向0度の場合には、通気量は平均風速・開口面積・乱れの強さの平方根の積と比例するとして算定が可能であるということが明らかになるとともに、風向が0でない場合は、換気要因だけからは通気量予測は難しく、中間変数の導入が必要なことが示唆された。

4.4 脈動理論による開口部通気量の予測法の検討

4.4.1 本節の概要

前節で、単一開口を持つ室の開口部通気量を予測するためには、換気要因と通気量の間、何らかの中間変数を導入する必要があることが明らかになった。

中間変数としては種々のものが考えられる。第1章で述べた既往の研究における風の乱れを考慮した通気量算定モデルでは、主に開口面風圧を中間変数とするものと開口前を流れる気流の風速を中間変数とするものの二種類に大きく分けられる。前者が脈動理論であり、後者が混合層理論である。

本節では、開口面の風圧を中間変数とする代表的な通気理論である脈動理論の適用性について検討を行うことを目的としており、前節と同じ実験装置を用いた開口面の風圧測定から開口面風圧の特性について検討したうえで、脈動理論に基づく通気量の計算を行い、通気量の実測値と比較することによって脈動理論を用いた単一開口通気量の予測の可能性を論じる。

4.4.2 実験概要

4.2節図4.1に示した実験装置を用い、開口面にかかる風圧の測定、自由噴流状態のダクト風の風速の測定、及び模型箱の通気量の測定を行った。以下に、各測定の概要を記す。

(1)開口面にかかる風圧及びダクト風風速の測定

4.2, 4.3と実験装置を用い、自由噴流状態のダクト吹きだし風と、模型箱壁面の風圧分布及びその変動特性との相関関係を、平均風速、乱れの状態、風向（風の入射角）をパラメータとした実験から把握する。

図4.1に示した様に、ファンによって人工的に作った風を、直径42cm長さ2.5mの円形ダクトにより導き、整流用ハニカムを通して立方体模型壁面に吹き付け、表4.4の条件下で壁面風圧分布測定を行なう。乱れの異なる3種類の風を用いる。一台の微差圧トランスデューサー(MP45-14 Validyne社 0~20mmAq)を用いて図4.20に示す点での風圧を順次測定し、開口中心にあたる位置で模型箱を設置しない場合の風速を熱線風速計(MODEL 7112, KANOMAX, $\phi 5\mu\text{m}$ タンクステン)で測定し、

それぞれをデータレコーダー(R-61 TEAC DC~625Hz) に記録後、0.1ms間隔で20秒間AD変換（アナログデータをデジタルデータに変換）し、大阪大学の汎用大型計算機で解析する。風圧測定孔と差圧計は内径2mm長さ15cmのビニール製導圧管で連結し、模型箱風下面を開放し、基準圧を箱内圧とするため差圧計を箱内に設置した。

表4.4 風圧測定条件

設定風速 [m/s]	2.0	4.0	1.0, 2.0, 4.0
風種	1, 3	1	1, 2, 3
風圧測定点	L1, L2, C, R1, R2		C
風向 [度]	0, 15, 30, 45, 60, 75, 90		

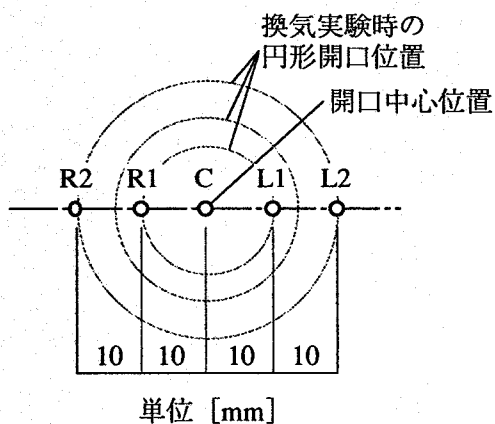


図4.20 風圧測定孔

(2) 単一開口の通気量の測定

4.3節の換気要因が通気量に及ぼす影響の検討で、風向が0でない場合の通気量測定には問題があることが明らかになった。しかし、風向と通気量との関係の定性的な傾向を把握する上では、攪拌しながらトレーサーガス法で換気回数を測定する方法は有効であるものとする。

通気量の測定方法は、4.3節で述べた方法と同じであり、厚さ2mmの円形開口を一つ持つ内寸60cm角の模型箱に遠心ファンによって作った人工風をダクトで導き、開口部に吹き当てる。実験条件を表4.5に示す。このうち風向0度の条件は4.3での実験と重複するため実際には4.3の結果を用いる。

表4.5 通気量測定条件

設定風速 [m/s]	1.0, 2.0, 4.0
風 種	1, 2, 3
風 向 [度]	0, 15, 30, 45, 60, 75, 90
攪拌器	正回転で作動

4.4.3 脈動理論による通気量計算の概要

脈動理論は、以下に示す開口部の通気の基本式及び断熱系を仮定した室内圧力変動の式からなる。これらは、Cockroftら¹⁾の基本式に等しく、開口面にかかる風圧分布は均一としている。

$$Q = \int_0^T q_i dt / T = \int_0^T q_o dt / T \quad (4.1)$$

$$q_i = 4\alpha A \sqrt{p_o - p_i} \quad q_o = 0 \quad (p_o \geq p_i) \quad (4.2)$$

$$q_o = 4\alpha A \sqrt{p_i - p_o} \quad q_i = 0 \quad (p_o < p_i) \quad (4.3)$$

$$p_i \cdot \left\{ V - \int_0^T (q_i - q_o) dt \right\}^\gamma = p_{i0} \cdot V^\gamma \quad (4.4)$$

$$p_o = C \cdot \frac{U^2}{16} + p_a \quad (4.5)$$

ただし、

Q : 通気量 [m³/s]

q_i : 流入量 [m³/s]

q_o : 流出量 [m³/s]

αA : 有効開口面積 [m²]

p_o : 開口面にかかる圧力 [mmAq]

p_i : 室内の圧力 [mmAq]

V : 室の容積 [m³]

γ : 比熱の比 (C_p/C_v : (定積比熱) / (定圧比熱))

C : 風圧係数

U : 自由風の風速 [m/s]

p_b : 初期室内圧 [mmAq]

p_a : 大気圧 [mmAq]

これらの式から、単一開口通気量を計算する場合には、ある時間ステップ Δt ごとに開口面にかかる圧力 p_o データを入力として、時事刻々と変化する流入量或いは流出量を(4.2)、(4.3)式で計算し、最後に(4.1)式で平均化して通気量 Q を算出する。

開口面にかかる風圧 p_o は、本来実際の風圧を入力とすることが望ましいが、(4.5)式で風速の時系列データから算出することも可能である。

計算時間ステップは、本節の検討で用いる内寸60cm角の模型箱の場合を対象にした予備計算の結果、0.1ms以下にすれば数値解の振動が起こりにくいことが確認されたため、 $\Delta t=0.1$ [ms] とする。本節の検討においては、一つ前の時刻の室内圧と流量から(4.4)式で室内圧を求め、入力として与えられる開口面風圧とその室内圧から(4.2)、(4.3)式で q_i 、 q_o を求める。次にそれらの値からまた次の時刻の室内圧を求めるという手順で順次計算を行う。

本節では二通りの条件で脈動理論による単一開口通気量計算を行う。一つは風向が0度の場合で、このときは開口中心が淀み点になることから、風速の時系列データから式(4.5)によって開口面にかかる風圧の変化を求めて計算を行う。

もう一つの方法は実際に開口面にかかる風圧の時系列データを入力として計算する方法であり、すべての風向において適用し、脈動理論に基づく通気量計算を行った。

計算条件を表4.6に示す。

表4.6 脈動理論による通気量計算の条件

計算の入力	自由噴流状態のダクト風風速	開口中心位置での風圧
設定風速 [m/s]	1.0, 2.0, 4.0	
風種	1, 2, 3	
開口直径 [mm]	20.0, 28.3, 40.0	
開口の流量係数	0.65	
風向 [度]	0*	0, 15, 30, 45, 60, 75, 90
模型箱容積V [m ³]	0.216	
比熱の比 γ	1.40	
開口面風圧係数C	1.00	—
大気圧 [mmAq]	10333	
時間ステップ [ms]	0.10	

* (開口に垂直に入射)

4.4.4 結果と考察

4.4.4.1 風向と通気量との関係

換気要因と通気量との関係は4.3で詳しく検討したが、風向と通気量との関係については十分な検討を行っていないため、あらためて考察を行っておきたい。

図4.21～図4.23に風向と測定した通気量との関係を示す。図4.21は、風種3・開口直径40mmで風速が異なる場合の図であり、図4.22は、設定風速2m/s・直径40mmで風種が異なる場合、図4.23は風種3・風速2m/sで開口直径が異なる場合の図である。いずれの条件においても風向によって通気量は大きく変化し、ある風向でピーク値を取ることがわかる。ピークを与える風向は条件によって変化し、一定ではない。また、風速による違いと開口直径による違いは大きく、風種による差異は小さいことがわかる。風向による通気量の変化は最大6倍程度と非常に大きいことがわかる。

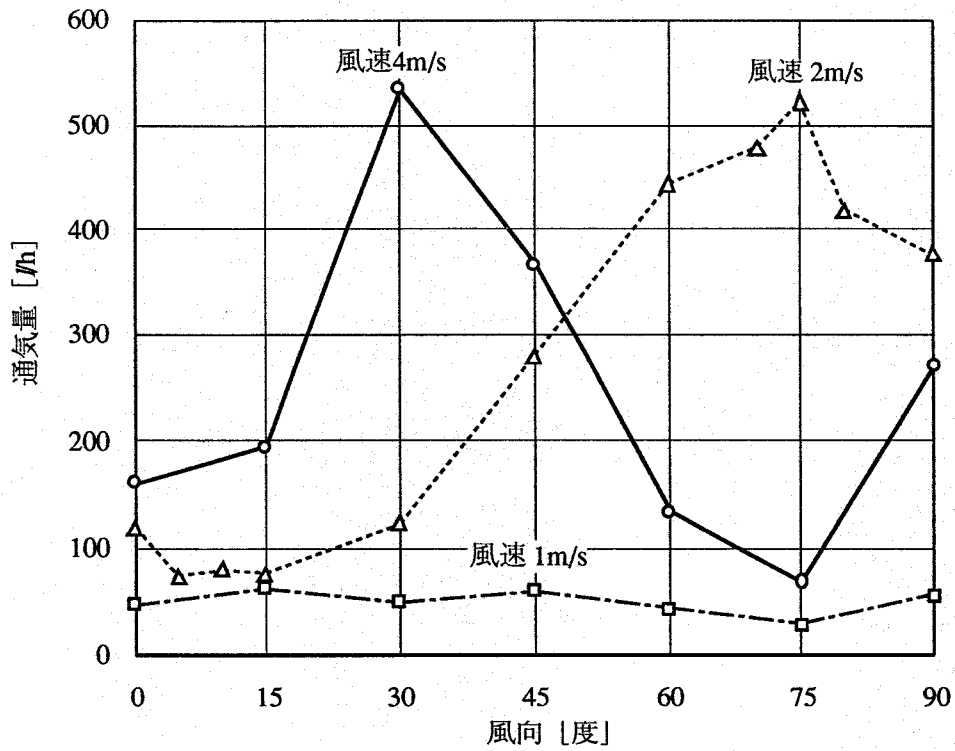


図4.21 風向と通気量との関係 (開口40mm、風種3)

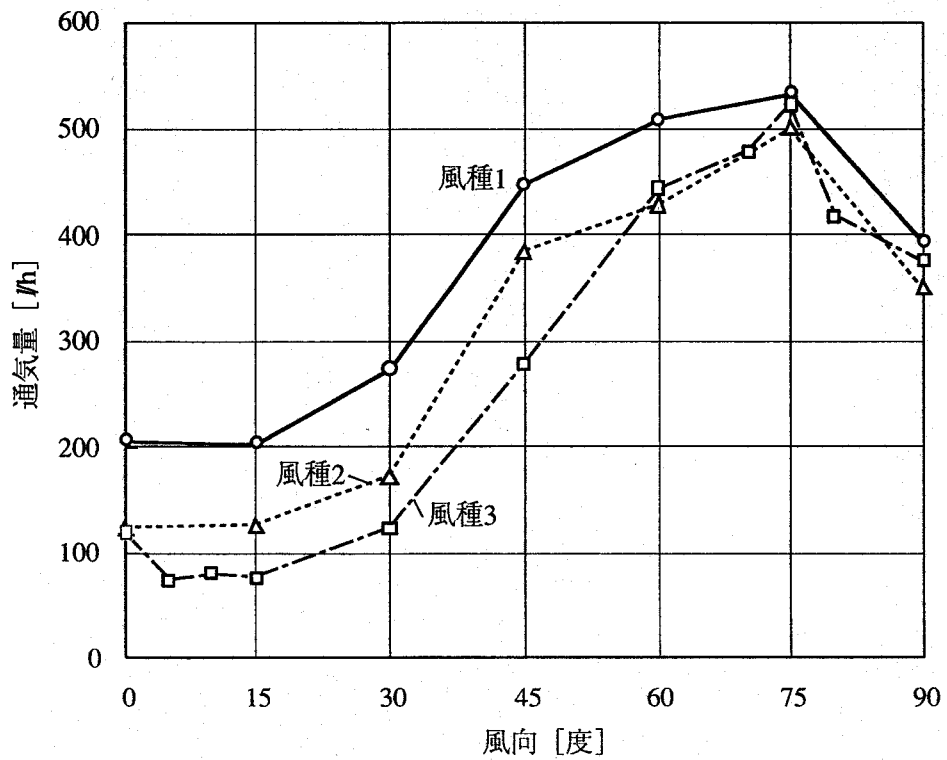


図4.22 風向と通気量の関係 (開口40mm、風速2m/s)

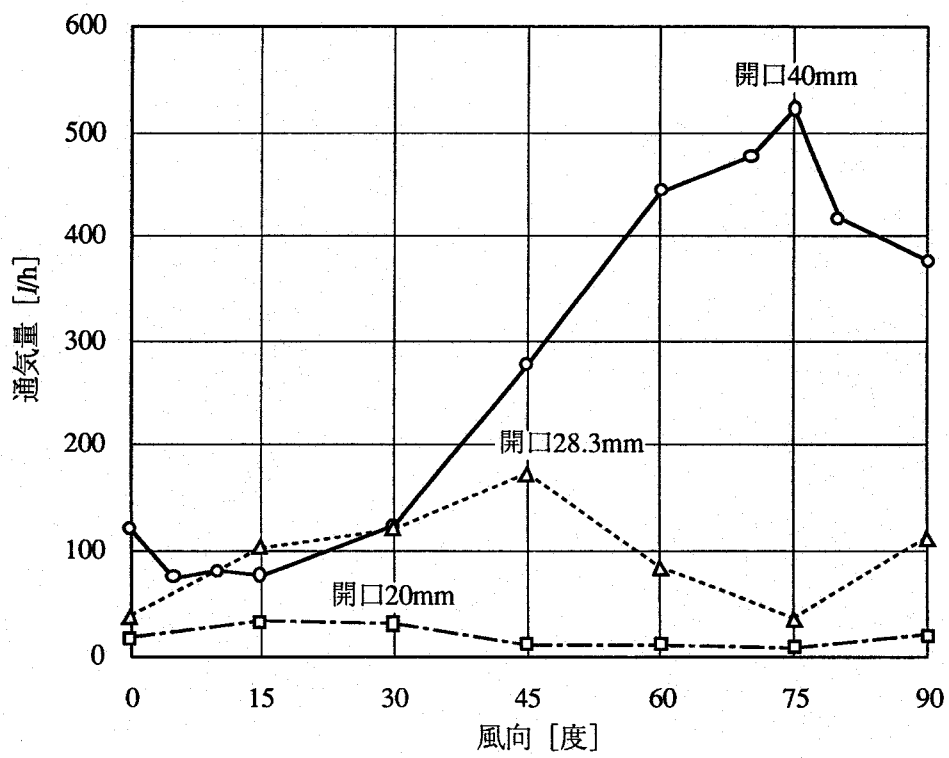


図4.23 風向と通気量との関係 (風種3、風速2m/s)

4.4.4.2 開口面風圧の特性について

4.4.4.1で風向と通気量との関係の大略を知ることができた。次に、開口面風圧についての考察を行うとともに、換気要因と通気量との変化を開口面風圧の特性から説明する事を試みる。

(1)平均風速と中心点風圧との関係

図4.24に、ダクト風の平均風速（模型箱を設置しない状態での開口位置における風速）と開口中心位置（図4.20のC点）での平均風圧との関係を示す。平均風速の増加に伴い平均風圧は増加し、その傾きは次第に大きくなる。風種による差異は微小である。

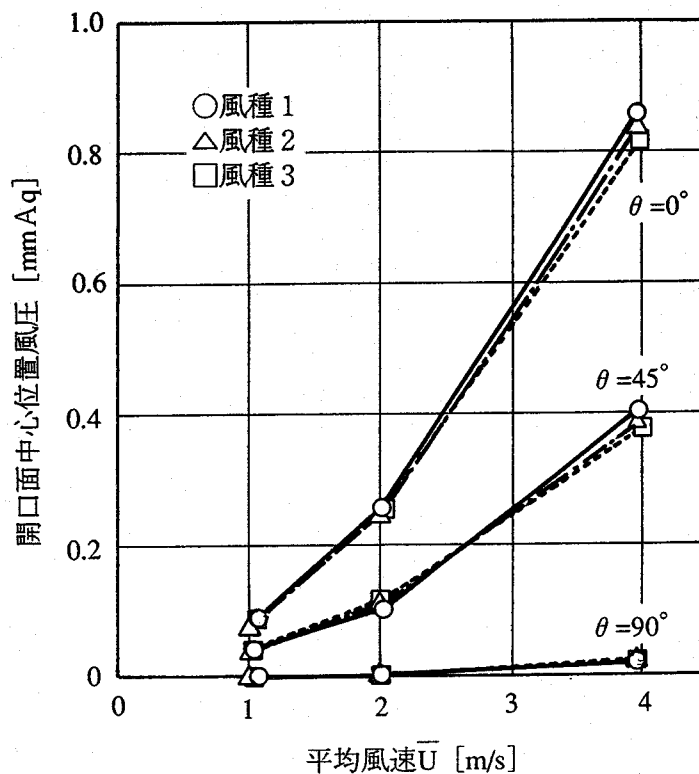


図4.24 平均風速と開口中心位置平均風圧との関係

(2)平均風速と開口中心位置の風圧変動の実効値との関係

図4.25に風向 0° におけるダクト風の平均風速と風圧変動の実効値（黒塗りプロット）との関係を示す。白抜きのプロットはダクト風の速度圧で基準化した値である。平均風速の増加に伴い、実効値は大きくなり風の乱れ性状による差も大きくなる。実効値を速度圧で基準化した値は、平均風速の増加に伴い逆に減少する傾向がある。前節図4.15より、平均風速が大きくなると通気量が大きくなることがわかっているが、図4.25及び図4.24より、その原因は平均風圧の増大と、風圧変動の実効値の増大の両方と考えることができる。

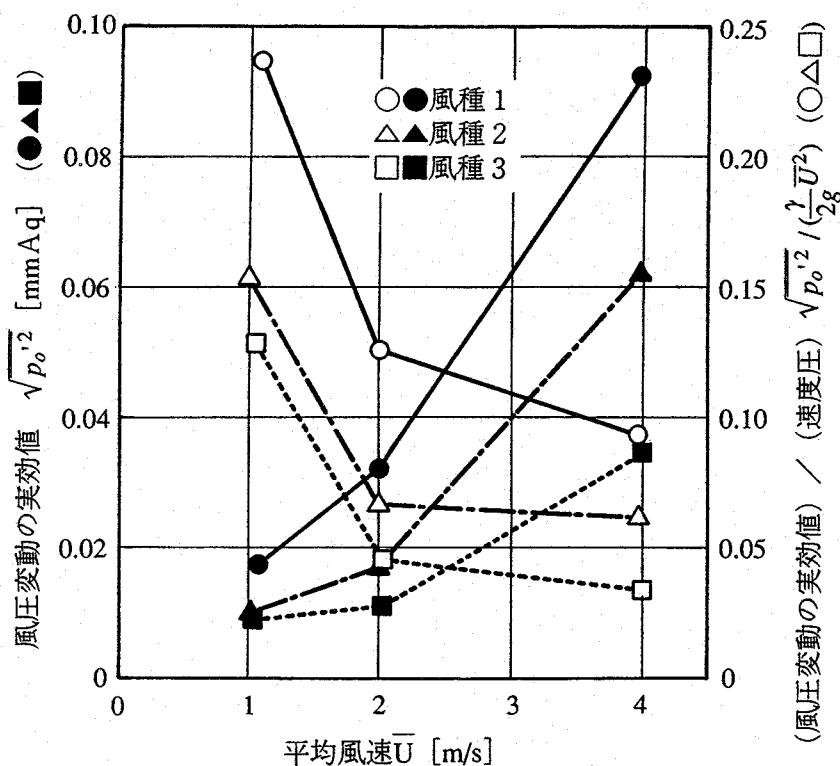


図4.25 平均風速と風圧変動の実効値との関係 ($\theta=0^\circ$)

(3)風速変動の実効値と風圧変動の実効値との関係

図4.26は、ダクト風の風速変動の実効値と開口面風圧変動の実効値との関係を示したものである。ばらつきはあるが両者の相関は高く、風速変動の実効値が大きいほど風圧変動の実効値は大きい。ただし、その増加率は風向 θ によって異なり、 $\theta=0^\circ$ が $\theta=60^\circ$ の場合の2倍近い。この結果は、ダクト風が等方性でない

ことを示唆する。図4.17でみられた風の乱れの強さが大きいほど通気量が大きい傾向は、風圧変動の実効値の増大によって説明することができる。

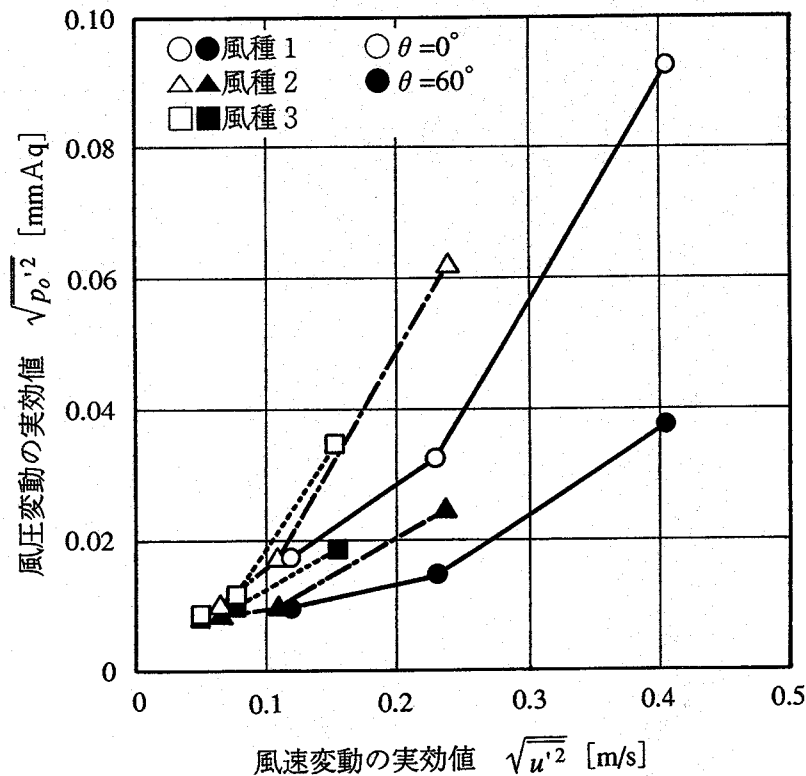


図4.26 風速変動の実効値と風圧変動の実効値との関係 ($\theta = 0^\circ, 60^\circ$)

(4) 風向 θ と風圧係数との関係

図4.27は、設定風速4m/sのときの各風種での開口面中心位置での風圧係数が風向によってどのように変化するかを示したものである。

風向 θ が 0° のときに通気量が最も大きく、 θ が大きくなるに伴い、風圧係数は始め \cos 関数的に減少し、 $\theta = 90^\circ$ でほぼ0となる。風種による差異が若干見られるが、これはダクト風の風速分布の違いに起因すると考えることができる。

図4.21～図4.23で示されたように、実際の通気量は風向 $\theta = 30 \sim 75^\circ$ でピークをもち、 $\theta = 0^\circ$ では小さいことから、風向の変化による平均風圧の変化と通気量との相関は極めて低いと言える。

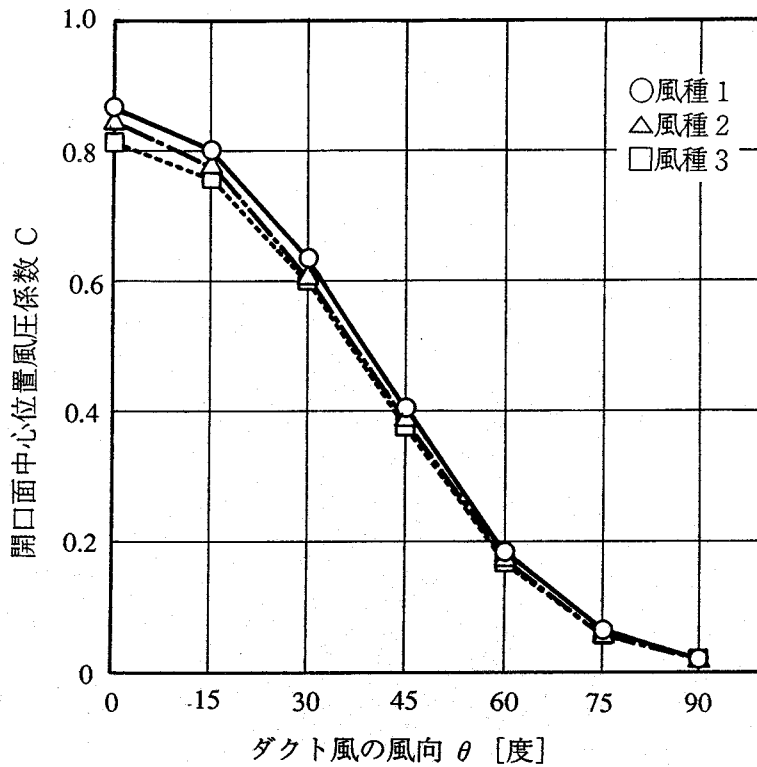


図4.27 風の入射角と開口面中心位置風圧係数との関係 ($\bar{U}=4.0\text{m/s}$)

(5) 風向 θ と風圧変動の実効値との関係

図4.28に風向と風圧変動の実効値との関係を示す。風圧の実効値はダクト風の速度圧で基準化して示しているが、風種1では $\theta=0^\circ$ で最も高く、風種3では $\theta=90^\circ$ で最も高い（設定風速 $\bar{U}=1.0, 2.0\text{m/s}$ の場合）ことがわかる。全体として見ると、 $\theta=0^\circ$ と 90° で高く、 $\theta=30\sim 75^\circ$ では比較的平坦な曲線を示す。 $\theta=90^\circ$ で風圧変動の実効値が大きいのは壁面での境界層の発達に原因があると考えられる。前述の様に、通気量は風向 $\theta=30\sim 75^\circ$ で極大となるため、風向と通気量との関係は、風圧変動の実効値からも説明することはできない。

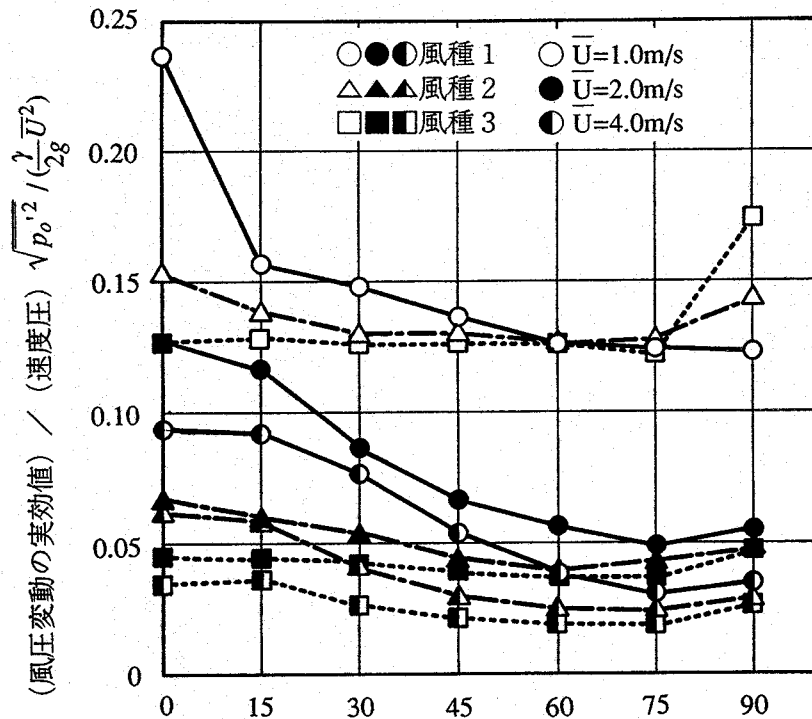


図4.28 風向と風圧変動の実効値との関係

(6)風圧係数の分布

図4.29は風向0度と75度における開口面の風圧係数の分布を示している。図より、4cm程度の範囲では風圧係数の分布は非常に小さく、分布の幅は風向0°で最大0.05、風向75°で最大0.03と大きな差異はなく、風向0°と75°の通気量の違い（例えば図4.22）を風圧分布の増減から説明することは難しいと考えられる。

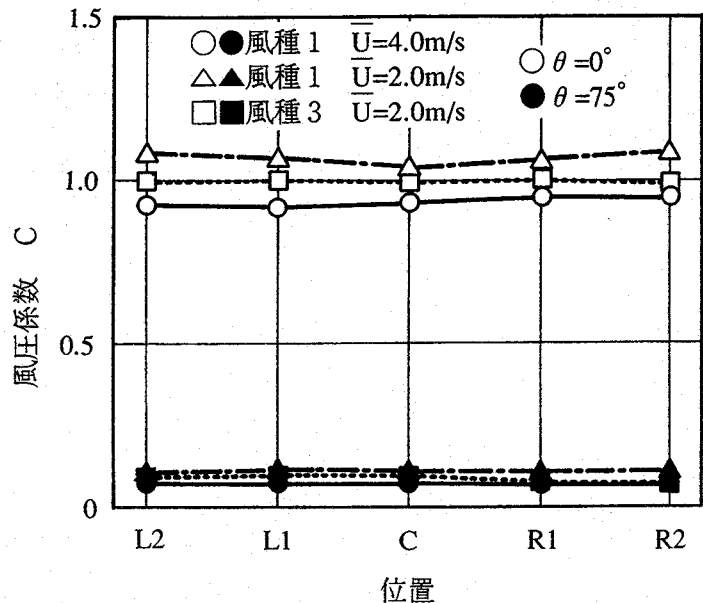


図4.29 開口面風圧係数の分布

以上、開口面の風圧の特性についての考察及び換気要因と通気量の変化を開口面風圧特性から説明することを試みた。その結果、開口に吹き当たる風の平均風速と乱れの強さが通気量に与える影響は開口面風圧の平均値と変動の実効値によって説明が可能であるが、風向が通気量に与える影響は、開口面風圧のどの特性によっても説明することは困難であった。このことは、開口面での風圧の時間変動を中間変数とする脈動理論では、平均風速や乱れの強さが通気量に与える影響は再現できても、風向が通気量に与える影響は考慮できない可能性が高いことを示唆するものと解釈することができよう。

4.4.4.3 風向0度での脈動通気量計算

風向0度の場合、開口中心が淀み点になるため、(4.5)式で風速変動から開口面風圧変動を求めても妥当であると考え、ダクト風の風速の時間変動を入力として単一開口の通気量を計算した。(20秒間の平均通気量；データ数200000個)以下、換気要因と通気量計算値との関係について考察し、4.3での換気要因と通気量実測値との関係を参照しながら、風向0度の場合に脈動通気理論計算がどの程度実際の通気量の特性を再現できるものであるかを検討する。また、風圧の高周波成分除去が通気量の計算結果に及ぼす影響を検討するため、風速の時間変動の離散データに移動平均処理を施し、その平均化個数(1~1000個；0.1ms~0.1s)が通気量計算結果に及ぼす影響についても検討を行った。

(1)平均風速と通気量計算値との関係

図4.30に、ダクト風の平均風速と通気量計算値との関係を示す。通気量計算に用いた風速データには移動平均などの処理は行っていない。

全ての風種・開口において両者の相関は高く、ほぼ比例関係がみられる。この傾向は、4.3の図4.15の通気量実測値の場合にも認められたものであり、脈動理論が風向0度での平均風速の効果を正しく反映できていることを示すものと考えられる。

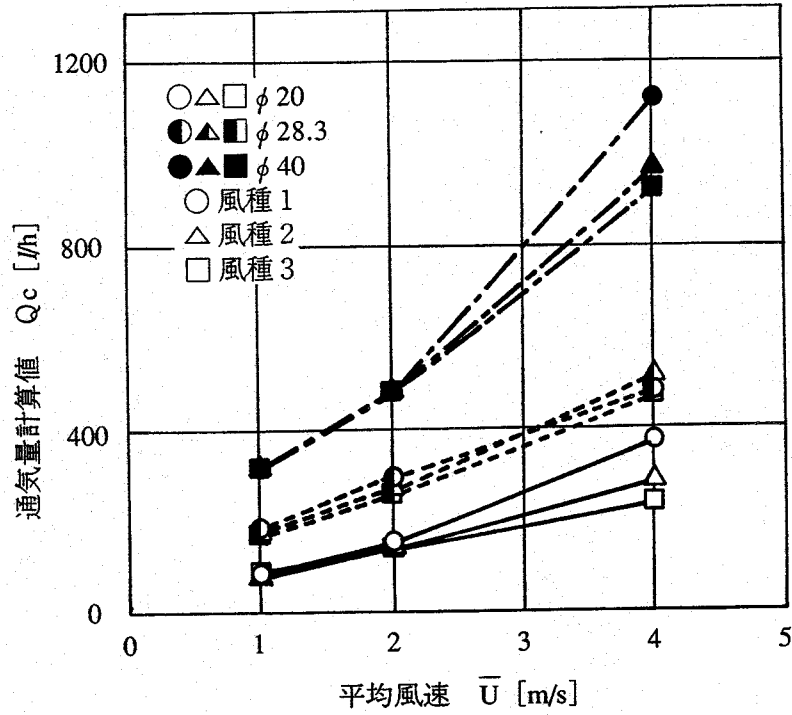


図4.30 平均風速と通気量計算値との関係

(2)開口面積と通気量計算値の関係

図4.31は円形開口の面積と通気量計算値との関係を示したものである。図4.30

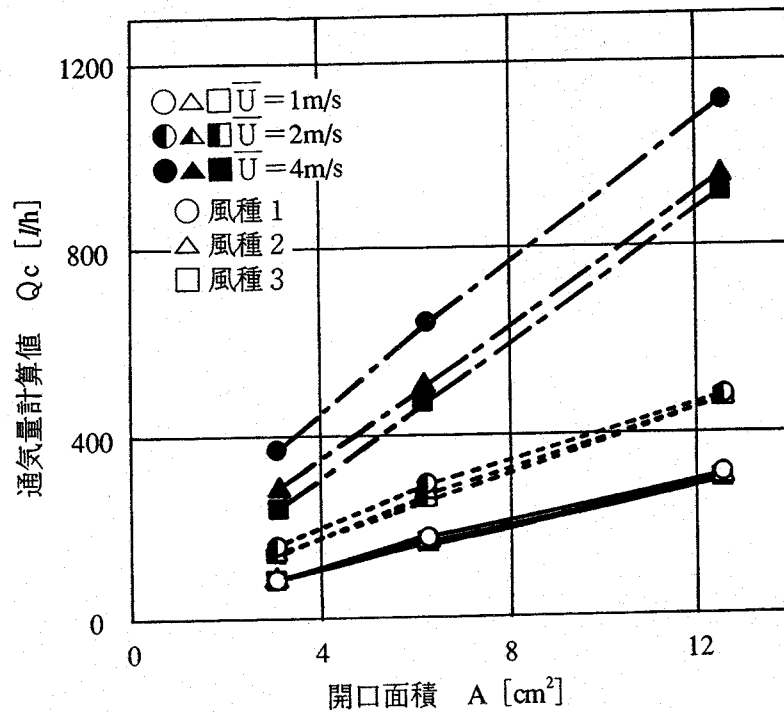


図4.31 開口面積と通気量計算値との関係

同様、入力 of 風速データには移動平均処理は行っていない。いずれの風種、風速においても、両者に比例関係がみられる。4.3の図4.16をみると、通気量の実測値は開口面積に比例しており、平均風速同様、脈動理論が風向0度での開口面積の効果を正しく反映できていると考えられる。

(3) 風速の乱れの強さと通気量計算値の関係

図4.32は、ダクト風の乱れの強さと、通気量計算値との関係を両対数軸にプロットしたものである。(入力 of 風速データには移動平均処理は行っていない) 風速が1.0, 2.0m/sの場合には、どの開口部においても、乱れの強さが大きくなっても通気量には余り大きな変化は示さないことがわかる。実測値では(4.3の図4.17)、通気量が乱れの強さの累乗に比例する傾向がみられたが、計算値では風速4m/sにおいてしかその傾向はみられない。故に、脈動理論は乱れの強さの効果を必ずしも考慮できないといえる。

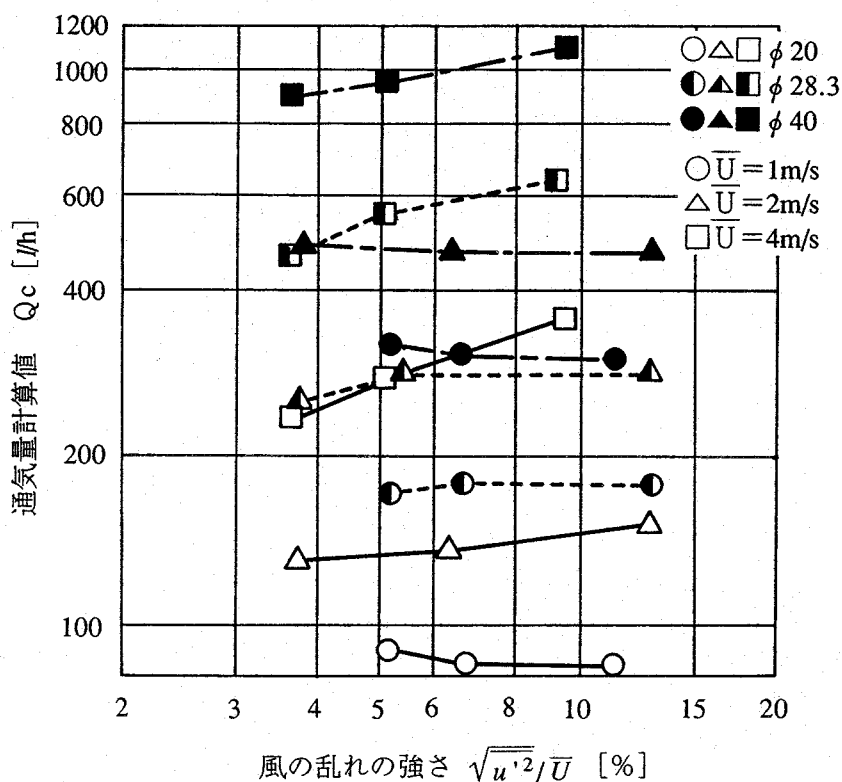


図4.32 風の乱れの強さと通気量計算値との関係

(4)移動平均化個数nと通気量計算値との関係

図4.33は、風速1m/sの場合に、入力である風速データにあらかじめ移動平均処理を行った場合の、移動平均化個数と通気量計算結果との関係を示したものである。すべての風種、開口で、風速変動の移動平均化の個数nが10個以上（ハイカット周波数1000Hz以下）になると、通気量計算値は指数的に減少するが、いずれのnでも乱れの違いによる差異は殆どみられない。開口φ40mmではn≒50から、φ28.3mmではn≒200から横這い傾向となる。移動平均処理によって風圧変動が低周波成分のみになり、室内圧が開口面外圧変動に追随するようになると、脈動による通気量は風圧変動の振幅と周波数のみに依存するため開口による差異はなくなる筈であり、これら横這い現象は計算誤差に原因すると考えられる。

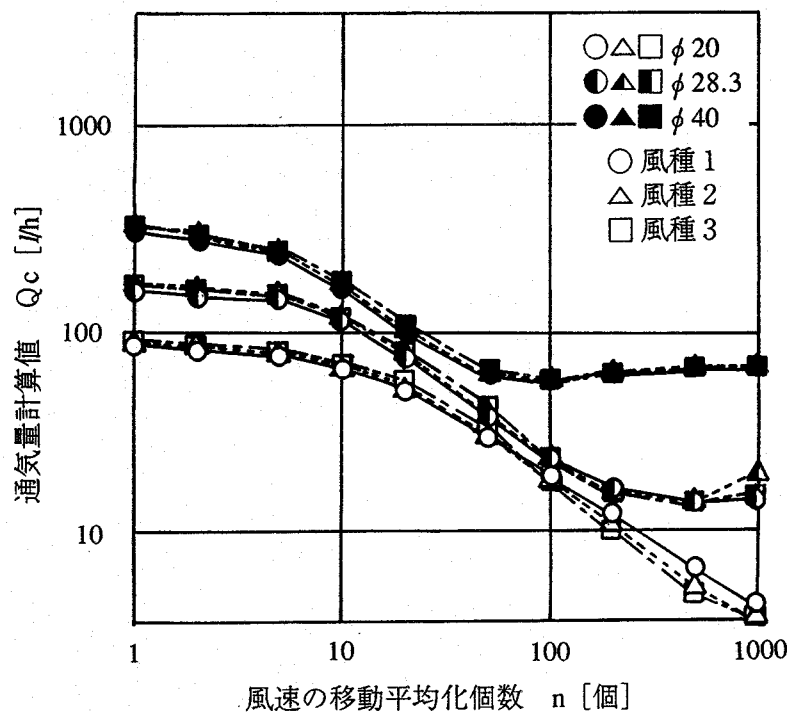


図4.33 風速の移動平均化個数と通気量計算値との関係 (風速1m/s)

(5) 通気量計算値と通気量実測値との関係

図4.34に、風速データに移動平均化をしない場合及び平均化個数 $n=100$ で移動平均処理を行なった場合の通気量と、実測した通気量との関係を示す。●印が移動平均をしない場合、▲が移動平均を移動平均を行った場合である。図中の直線は両者の平均の傾きを表している。いずれの場合も通気量の計算値と実測値に相関がみとめられ、直線の傾きは、移動平均をしない場合には0.256と小さく、計算値は実測値の約4倍程度大きくなっているのに対し、 $n=100$ で移動平均を行った場合には、傾きは1.148とほぼ計算値と実測値は平均的には等しくなることがわかる。この理由としては、開口から流入したのち箱内の空気と混合しないまま外に出でいき換気に関与しない流量分を移動平均処理によって取り除いていると考えることも可能ではあるが、第3章3.4で明らかになった様に、単一開口換気はすべてが脈動換気ではなく、開口部における瞬時的な風圧分布によって同時に流入・流出する通気が生じていることから、移動平均処理 $n=100$ (100Hz) には特別な意味はないと考えることが妥当である。

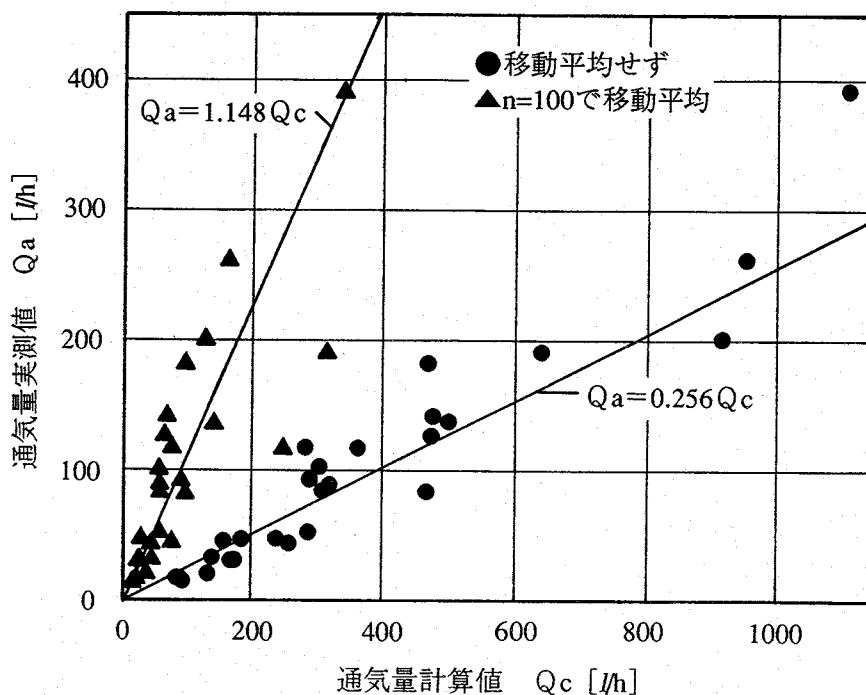


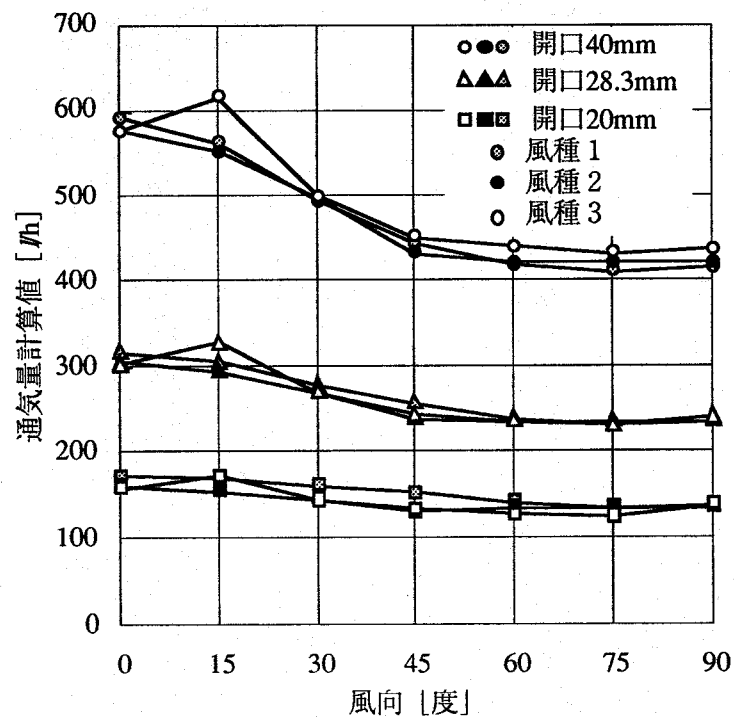
図4.34 通気量計算値と通気量実測値との関係

以上の検討から、風向0度の場合には、移動平均処理を施した風速データを入力とした脈動理論計算によって、開口部通気量を予測することが可能であるが、その適用性については検討の必要が残ると結論づけられる。

4.4.4.4 風向0～90度での脈動通気量計算

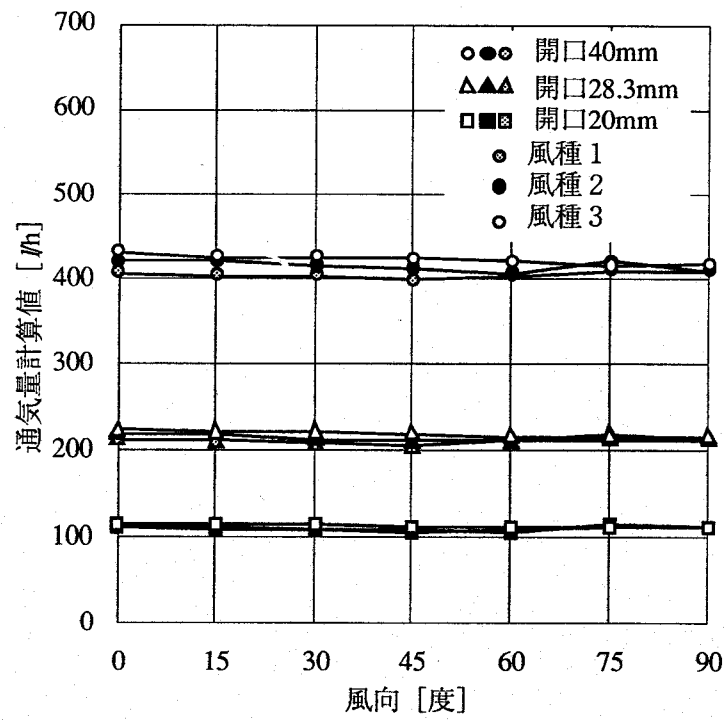
4.4.3で述べた様に、風向が0度でない場合には、壁面で境界層が発達するため風速の変動成分と風圧の変動成分が風圧係数を比例定数として比例するとは考えられない。故に(4.5)式による風圧の算出は望ましくなく、0～90度のすべての風向について、開口面で測定した風圧のデータを入力として脈動理論計算を行った。ここでは、入力データの移動平均処理は行っていない。

図4.35は、風速4m/s、2m/s、1m/sのそれぞれの場合の風向と通気量計算値との関係を示したものである。風速4m/sの場合には、風向が0度或いは15度でピーク値となるが、他の風速では、通気量計算値は風向に関わらず一定値を示すことがわ

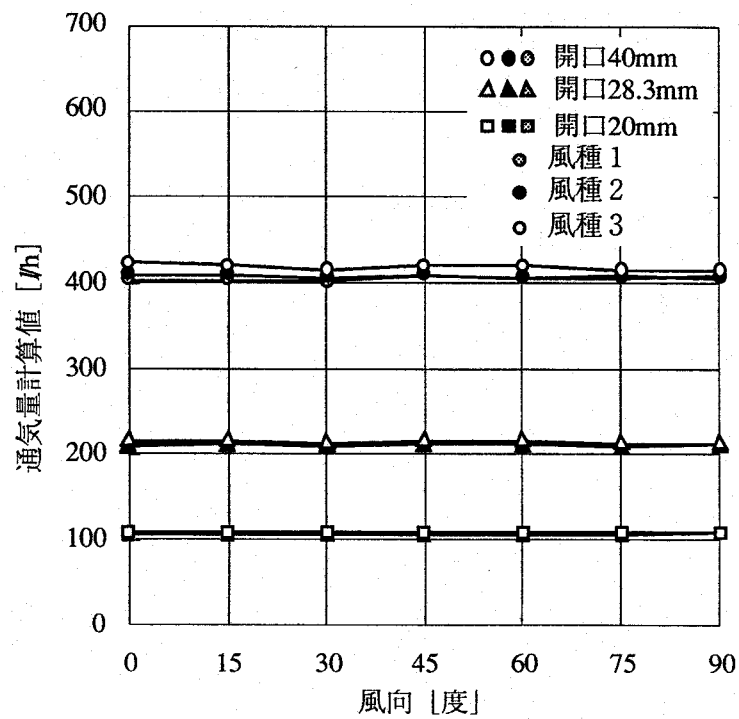


(a)風速4m/s

図4.35 風向と脈動理論による通気量計算値との関係



(b)風速2m/s



(c)風速1m/s

図4.35 風向と脈動理論による通気量計算値との関係

かる。風速4m/sでの傾向は、4.4.4.2での風圧係数或いは風圧変動の実効値の風向による変化（図4.27、図4.28）とある程度対応しているとも見ることが出来る。しかし、4.4.4.1図4.21～4.22の実際の通気量の風向による変化と比較すると、その変化傾向は全く異なっており、風向が変化する場合には脈動理論に基づく通気量計算は全く実用に供し得ないことがわかる。

4.4.5 まとめ

本節の検討によって得られた主な知見を以下に記す。

(1)風向によって実際の通気量は大きく変化し、ある風向でピーク値を取る。ピークを与える風向は条件によって変化し、一定ではない。風向による通気量の変化は最大6倍程度と非常に大きい。

(2)開口に吹き当たる風の平均風速と乱れの強さが通気量に与える影響は開口面風圧の平均値と変動の実効値によって説明が可能であるが、風向が通気量に与える影響は、開口面風圧のどの特性によっても説明することは困難である。

(3)風向が0度で開口中心に淀み点が位置する場合には、移動平均処理を施した風速データを入力とした脈動理論計算によって開口部通気量を予測することが可能である。

(4)風向が変化する場合には脈動理論に基づく通気量計算は実用に供し得ない。

実際の建物の部屋にある単一開口を考えるに、自然風の風向は季節や時刻によって様々に変化している。故に開口が淀み点に位置するのは非常に稀なケースであり、ここで検討した脈動理論による通気量予測手法は実際には適用性の非常に低い手法であると言えることができる。故に、次節以降では、開口面の風圧を中間変数とせず、壁面に添って流れる気流の風速を中間変数とする混合層理論に基づく通気量予測法に関する検討を行う。

4.5 単一開口内の風速分布

4.5.1 本節の概要

前節4.4の検討によって、開口面にかかる風圧を中間変数とする脈動理論が、開口中心に淀み点がある特別な場合にしか適用することができず、実用的な通気量予測手法とはなり得ないことが明らかになった。

本節では、開口近傍の壁面風速を中間変数とする混合層理論による通気量予測の可能性について検討するための第一段階として、風洞壁面に外接する模型箱の単一開口内の風速分布を測定し、実際に開口面内に混合層が形成されるのか、また、その混合層の大きさが開口の大きさや形状によってどのように影響を受けるのかを明らかにすることを目的とする。

4.5.2 実験概要

図4.36の様に、大阪大学工学部研究用風洞（表4.7参照）の測定洞風上端部に単一開口を持つ模型箱を外接させて設置した。模型箱は、内寸80cm角の木製立方体模型であり、風洞に接する面には厚さ2mmのアルミニウム製の開口板を取付けることができる。開口面と風洞内壁面は同一面である。

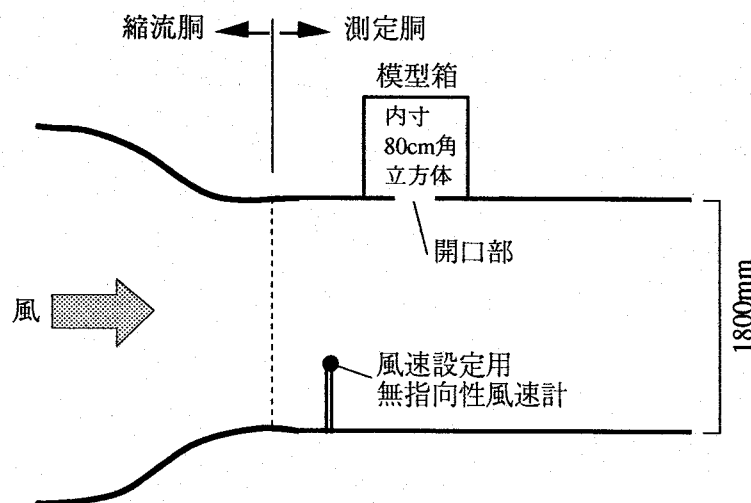


図4.36 模型箱設置概要図（平面図）

表4.7 大阪大学工学部研究用風洞要目

形 式	回流型
測定胴の大きさ	1.8m×1.8m×9.5m
風 速	2~20m/s
速 度 偏 差	±1.0%以下
気 流 偏 向 角	±1.0° 以下
気 流 乱 れ 度	0.5%以下

開口部内の風速分布を検討する上では、開口前を流れるアプローチフローはできるだけ風速分布が存在しない方が望ましい。故に、風速分布のない気流を得るため、風洞内壁面上で境界層が余り発達していない縮流胴に非常に近い位置に模型箱を設置した。

図4.37に示す様に、風洞内気流に沿う開口中心軸を通り開口面に直交する平面内の、風速を熱線風速計（I型プローブ）を用いて測定する。熱線風速計の出力はパーソナルコンピュータに装着したAD変換ボードによってリアルタイムにAD変換を行い、約20秒間の平均値と変動の実効値を光磁気ディスクに記録した。また、開口を閉じた状態でのアプローチフローの風速分布も同様に測定する。

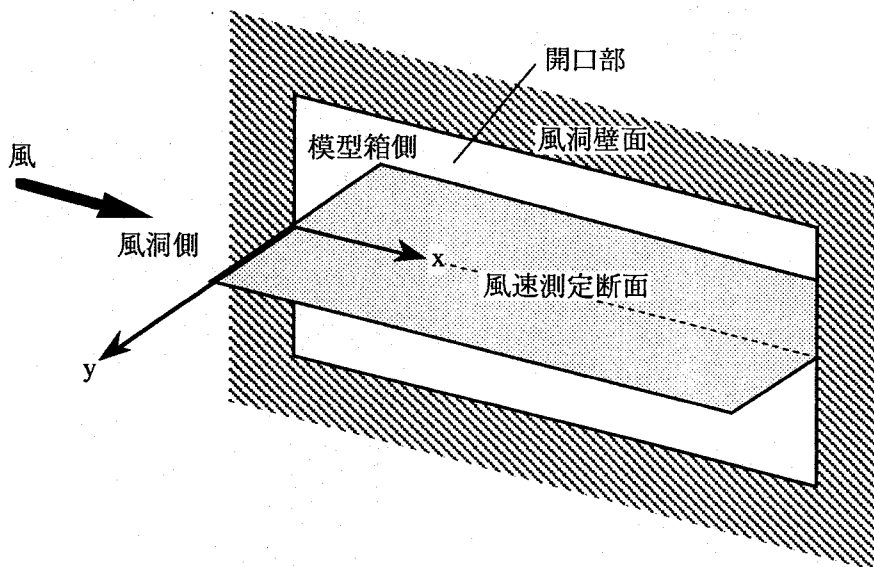


図4.37 開口内風速分布測定平面

実験条件は、表4.8に示す通り、開口条件（開口の形と向き）と設定風速 U_s の組み合わせで計6条件である。開口はすべて長方形で面積は 224.7cm^2 で等しく、辺

のアスペクト比が異なる二開口である。各開口条件での風速分布測定点を図4.38に示す。

表4.8 実験条件

開口形状	アスペクト比2 (10.6×21.2cm) アスペクト比8 (5.3×42.4cm)	組み合わせ条件
開口の向き	縦 (V), 横 (H)	
開口面積 [cm ²]	224.7	
設定風速Us [m/s]	3.0*, 6.0, 9.0* (*3m/sと9m/sはR2Hのみ)	

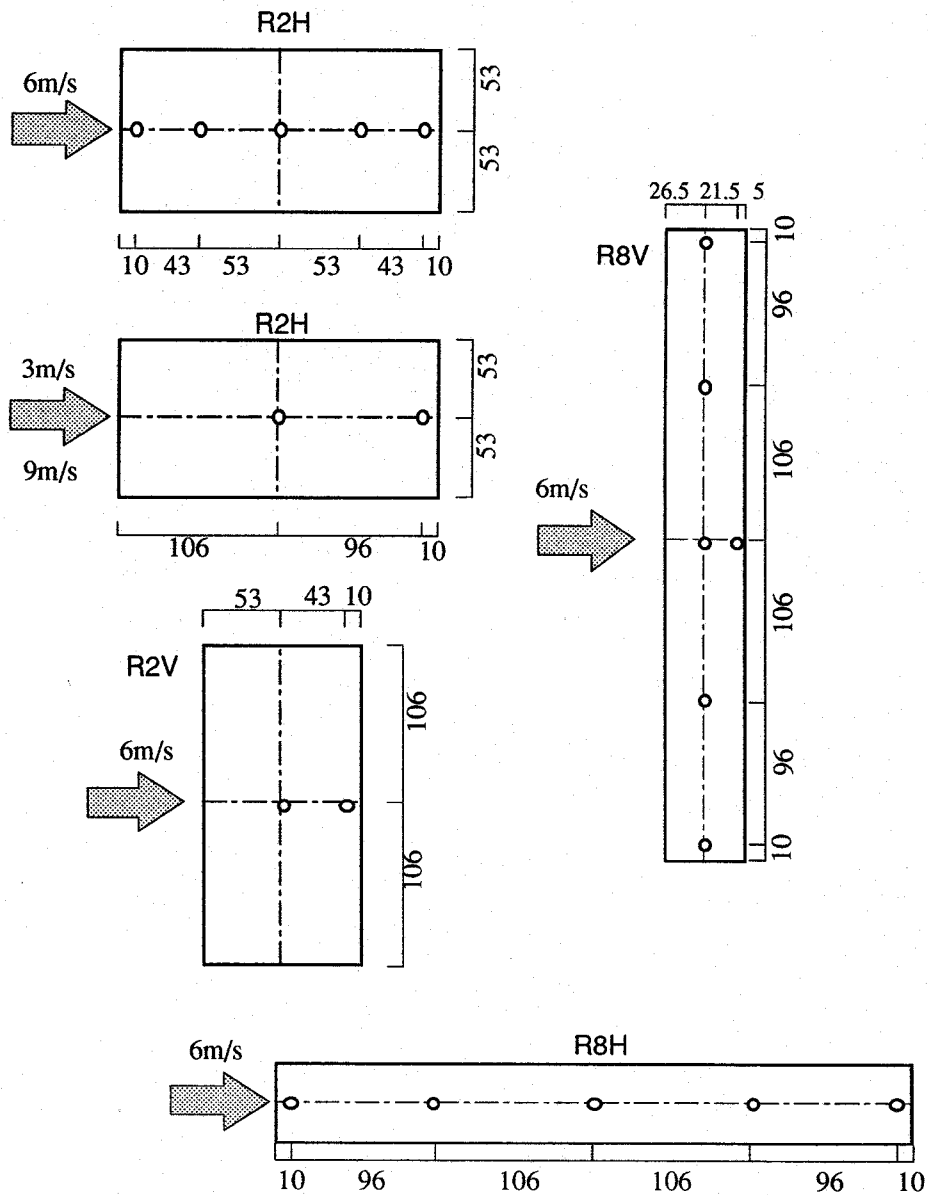


図4.38 風速分布測定位置 単位 [mm]

風洞内風速は、図4.36中の風速設定点において無指向性風速計で設定した。

4.5.3 結果と考察

(1) 風洞内の気流の特性

図4.39に開口を閉じた状態での、アプローチフローの風速比と乱れの強さの開口面に垂直な方向の分布を示す。壁面から60cm～5cmまでは風速は均一であり、壁面近くで急激に減少する。風速比95%以下を境界層とするとその厚さは約3cm程度となることがわかる。乱れの強さは、壁面から60cm～20cmまでは0.5%と非常に乱れの少ない気流であるが、壁面に近づくほど大きくなり、壁面のごく近傍では10%を越えることがわかる。

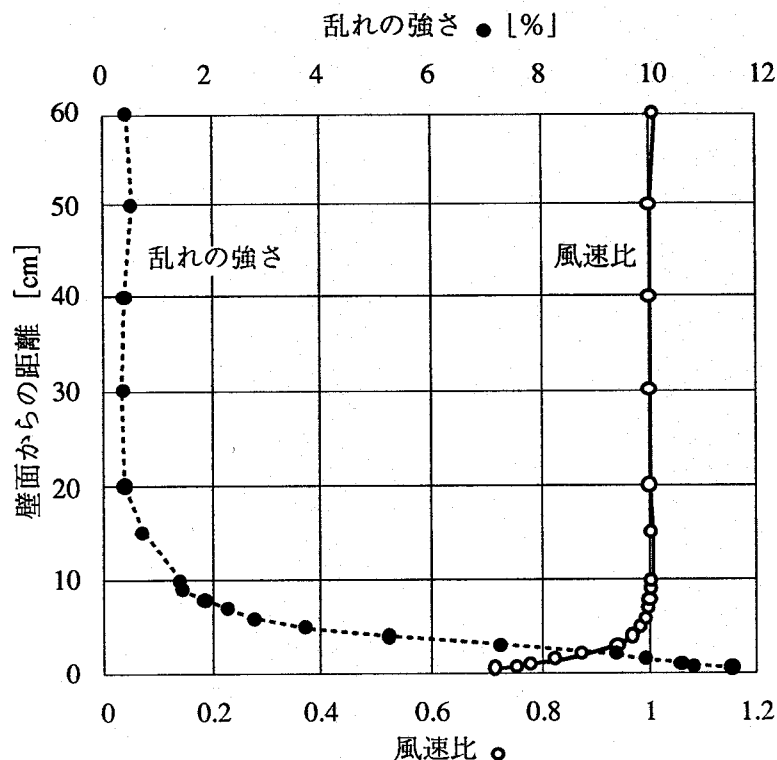


図4.39 風洞内アプローチフローの風速と乱れの強さの分布
(風速比は壁面から20cmの地点の風速を基準)

また、アプローチフローの風速分布には、開口板上の位置による差異は殆どみられないことを確認した。

(2)流れ方向への混合層の発達

開口条件がR2H（開口のアスペクト比：2、気流方向：水平、図4.38参照）、設定風速が6 m/sにおける検討面のy軸方向（図4.37参照）の風速分布を図4.40に示す。風速は、壁面から20cmの地点での風速を基準として無次元化して表現している。風洞の気流は図の左から右に向かって流れている。図は開口の断面を下方から見たものであり、分布測定地点の開口端部からの距離に応じた位置に分布図を表示してある。図中■はアプローチフローの風速分布である。開口近傍で、風洞側（模型箱外）ではアプローチフローよりも風速が低下し、その低下量は下流ほど大きくなっている。また、模型箱内では下流（右方向）ほど気流が生じ、風速が大きくなっていることがわかる。図4.41にP.R.Warrenが提案している混合層理論の混合層内風速分布を示すが、この図の様に下流へ向かうにつれて箱内への運動量の拡散が生じ、混合層が発達していることがわかる。

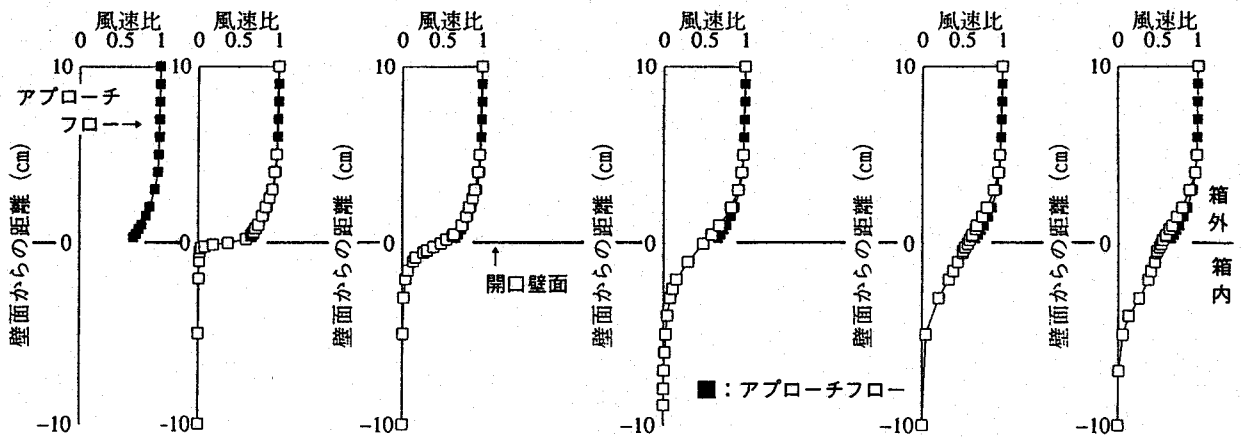


図4.40 上流から下流へのy軸方向の開口近傍風速分布の変化
(R2H、開口のアスペクト比：2、開口向き：横)

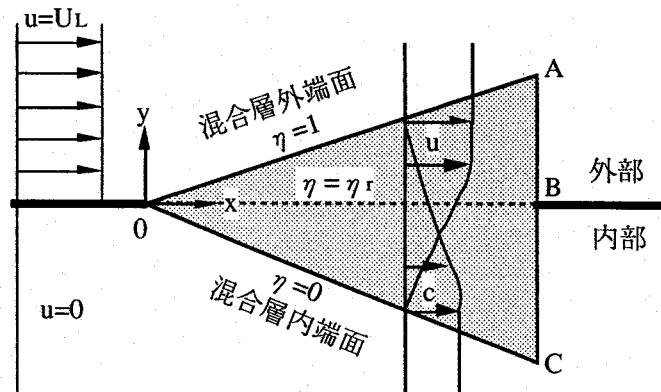


図4.41 混合層の概略図

図4.42は、風速 6 m/s の場合の各開口条件における y 軸方向の風速分布を示している。各開口条件で、測定点位置の異なる風速分布を重ねて示している。図中の ■ は開口がない場合のアプローチフローの風速分布である。いずれの開口条件でも風洞側で風速が低下するとともに、箱内側では下流ほど風速が上昇し、下流側ほど混合層が発達していることがわかる。また、開口面上 (y=0) では設定風速の約半分の値となっている。また、開口の気流方向の長さが長い条件ほど下流での混合層の発達が大きいかもわかる。

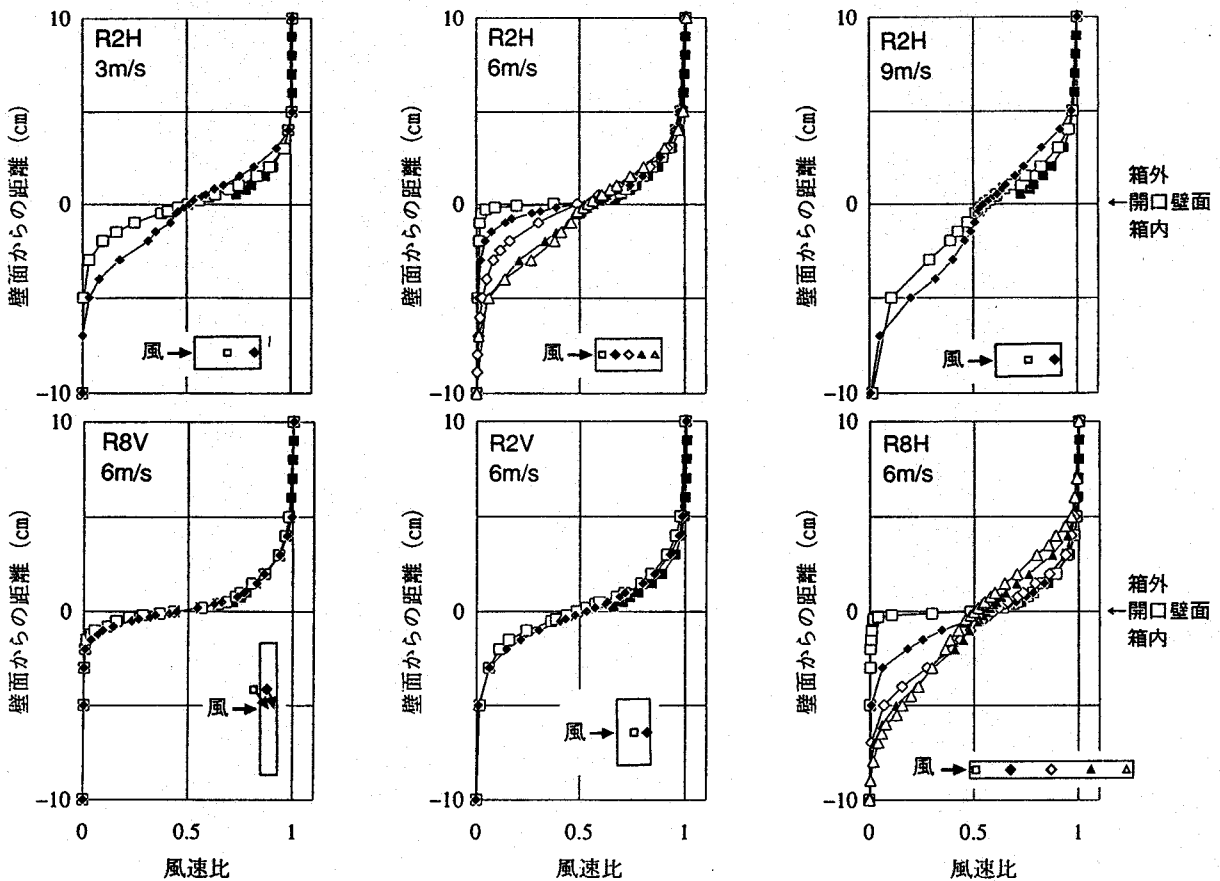


図4.42 各実験条件における y 軸方向の開口近傍風速分布
(■: アプローチフロー)

これらの図から混合層の領域を特定するためには、混合層の内か外かを風速分布から判定する必要がある。風速の差異により混合層を定める場合、風洞側では開口を閉じた状態での測定地点のアプローチフロー風速に対する風速比 $u(y)/U_A(y)$ ($u(y)$: 開口がある場合に開口面から y の距離の地点での風速、 $U_A(y)$: y でのアプローチフローの風速) が開口近傍での風速の低下割合を示すものであり、箱内側

では、設定風速に対する風速比 $u(y)/U_s$ が気流の増加割合を示す。故に、これらの風速比が風洞側の境界および箱内側の境界を示す指標となると考え、以下の考察では風洞側では風速比 $u(y)/U_A(y)$ 、室内側では風速比 $u(y)/U_s$ を用いて、混合層の発達の性状についての検討を進める。

(3) 設定風速が混合層の発達に及ぼす影響

設定風速が混合層の発達の性状に及ぼす影響を検討するために、同一の開口条件R2H（図4.38参照）で設定風速 U_s の異なる3条件について、検討面上で風速比

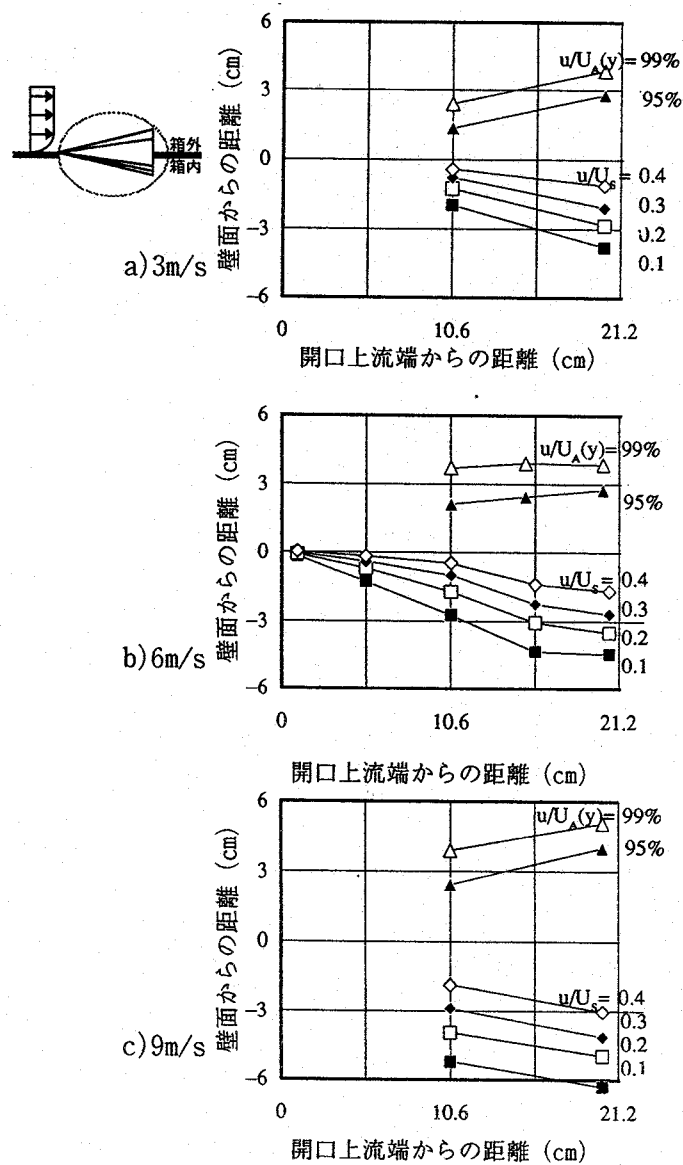


図4.43 等風速比線図 (R2H)

の等しい地点を結んだ等風速比線図を図4.43に示す。風速比は風洞側では $u(y)/U_A(y)$ であり、箱内側では $u(y)/U_s$ である。風洞側の風速比は%で表現し、箱内側は比で表示してある。

いずれの風速においても等風速線は下流ほど外側に広がっており、混合層が等風速線の形で発達していることがわかる。設定風速による差異はそれほど大きくはないが、設定風速が大きいほど同じ等風速線が広がっていることがわかる。

設定風速 6 m/s で開口上流端近傍 ($x=1\text{cm}, 5.3\text{cm}$) の二地点では、風洞側の風速比が 95%, 99% となる地点を特定できなかった。混合層が薄い開口上流端近傍においては、開口を閉じた状態のアプローチフローの風速 $U_A(y)$ を基準とした風速比を用いて混合層境界を定めることには無理があるものと考えられる。

図4.44は、3つの設定風速について、風洞側風速比99%と95%及び箱内側風速比0.1と0.3の等風速比線を重ねたものである。図4.43でも見られたように、設定風速が速いほど混合層が広がっている。P.R.Warrenの理論式(1.2.3の(2)参照)においては混合層は開口上流端からの距離に比例して拡がるとしているが、厳密に言えばその比例定数 k に風速の影響を考慮する必要があることがわかる。

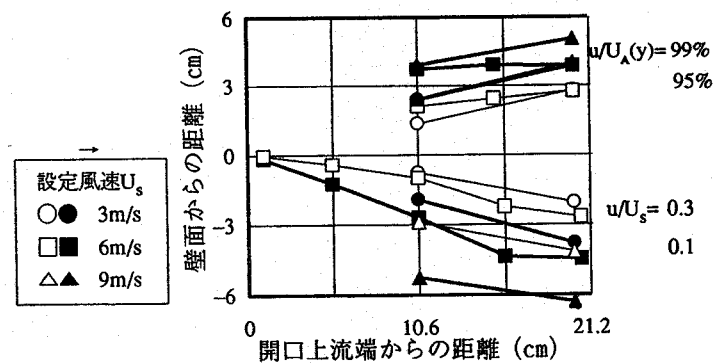


図4.44 等風速比線図 (R2H、全風速)

(4) 開口の形と向きが混合層の発達に及ぼす影響

開口の形と向きが混合層の発達の性状に及ぼす影響を検討するために、設定風速が同じ 6 m/s で、開口の形或いは向きの異なる 4 条件についての等風速比線図を図4.45に示す。いずれの開口条件でも下流へ向かうにつれ、混合層が発達していることがわかる。風洞側の開口上流端近傍には、風速比 95% ないし 99% の地

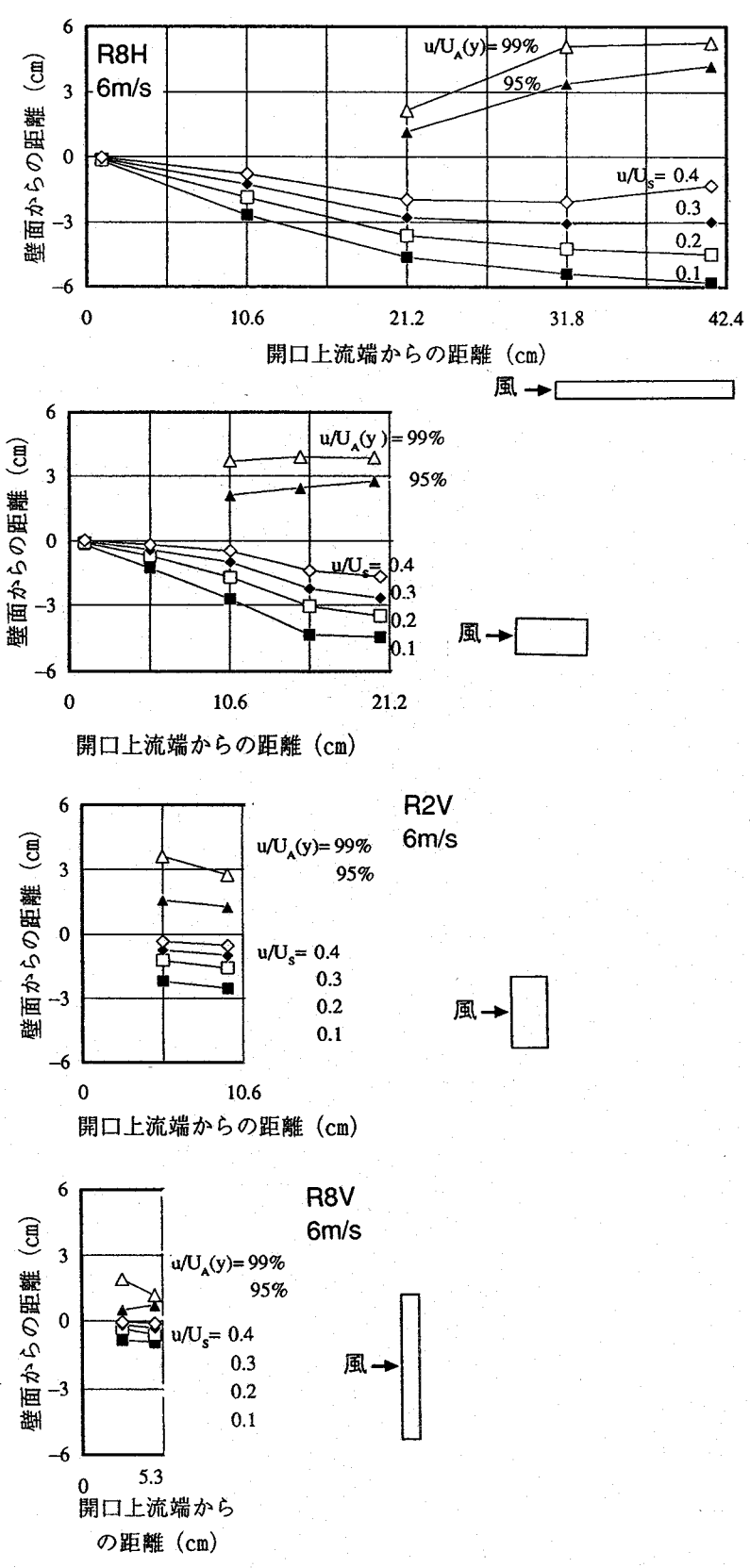


図4.45 等風速比線図 (設定風速 $U_s=6m/s$)

点を特定できない条件や、x軸方向（流れ方向：図4.37参照）の寸法の小さい開口R2VおよびR8Vで等風速比線の傾きが負即ち一旦発達した混合層の縮小が生じているものがあるが、図4.43同様、開口を閉じた状態でのアプローチフローに対する風速比での混合層境界の特定に限界があることを示唆している。

気流方向に長いR8Hの場合には、下流へ向かうにつれ混合層が発達する割合が徐々に小さくなり、混合層の形は舟形であることがわかる。P.R.Warrenの混合層理論における混合層の形は三角形である（図4.41参照）という仮定に反しており、理論の適用性と発達角の決め方に問題が存在することを示している。

図4.46は、図4.45での開口条件について、風洞側風速比99%と95%及び箱内側風速比0.1と0.3の等風速比線を重ねたものである。箱内側では開口条件による差異は殆どなく風速比は一本の曲線で表現できることがわかる。風洞側では開口条件（開口の形と向き）によるばらつきは若干大きいものの、図中の破線のように等風速比線を一本の曲線に決めることは可能であると考えられる。

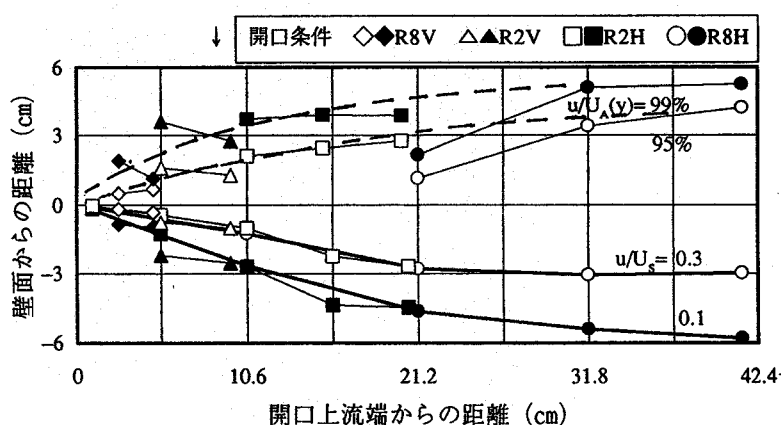


図4.46 等風速比線図（設定風速 $U_s=6\text{m/s}$ 、全開口条件）

4.5.4 まとめ

風洞に外接した模型箱の単一開口内の風速分布を種々の開口条件、風速条件のもとで測定し、風速分布から混合層の発達の様相について検討を行った結果得られた知見は以下の通りである。

- (1) 単一開口の開口面に平行な外部風が流れるとき、下流へ向かうにつれて箱内

への運動量の拡散が生じ、開口内に混合層が発達する。

(2)同じ開口条件ならば、開口外の風速が速いほど混合層の発達角は大きい。

(3)気流方向に長い開口の場合には、下流へ向かうにつれ混合層が発達する割合が徐々に小さくなり、混合層の形は舟形である。

(4)外部風の設定風速が等しい場合には、混合層内の等風速比線に関しては、箱内側では開口条件による差異も殆どなく風速比は一本の曲線で表現でき、風洞側では開口条件によるばらつきが若干大きいものの、一本の曲線に決めることができる。

本節の検討から、単一開口の開口面に平行な外部風が流れるときには開口内に混合層が形成されることが確認され、その混合層を特徴づける等風速比線についての知見も得られた。ただし、模型箱の大きさが開口に比して小さい場合には、混合層の大きさに影響を受けることが考えられ、開口面積に対して小さい室の場合には本章で得られた結果と若干異なる可能性は残る。

しかし、混合層の存在が確認されたことは、混合層理論に基づく単一開口の通気量予測法の可能性を裏付けるものであり、次節以降では混合層理論を用いた通気量予測法の検討を試みる。

4.6 混合層理論による開口部通気量の予測法の検討

4.6.1 本節の概要

前節の検討で、単一開口の開口壁面に沿って外部気流が流れるときには、開口において混合層が形成されることが確認された。混合層理論では、1.2.3の(1.5)式のように、開口部に形成される混合層の風下端の風速分布と濃度分布の積の積分から通気量を算出できる。本節では混合層理論の基本的考え方の妥当性を検討するため、この方法によって算出される通気量が実際の通気量を正しく評価しているかについて検討する。前節の実験条件における通気量をトレーサーガス法によって測定した上で、前節で測定した風速分布と仮定から導出した濃度分布の積の積分から通気量を計算し、測定した通気量と比較を行う。

4.6.2 実験概要

前節と同じ実験装置（図4.36）を用い、開口部内気流の測定を行った表4.8の条件において通気量の測定を行う。通気量の測定は「4.2単一開口における通気量測定法」で行ったのと同じ手法を用い、模型箱内部を攪拌しながら、CO₂を用いたトレーサーガス減衰法で換気回数を測定し、箱の容積を乗じたものを通気量とする。模型箱内の攪拌は、箱内部に取付けた小型扇風機（首振り）によって行った。実験の手順を以下に示す。

- 1.前節図4.36の無指向性風速計で風洞内の風速を設定する。
- 2.開口部条件を設定する。
- 3.風洞内のCO₂濃度を、赤外線吸収式CO₂濃度分析器で測定する。
- 4.箱内の小型扇風機を作動させる。
- 5.模型箱内のCO₂濃度をペンレコーダーでモニターしながら、箱内の濃度が4500～5000ppmになるまで箱内にCO₂を注入する。
- 6.CO₂の注入を停止し、模型箱内の濃度が初期濃度と風洞内濃度の差の約1/3程度減衰するところまで換気を行う。測定中、箱内は攪拌したままとする。
- 7.CO₂の初期濃度と最終濃度及び風洞内濃度からSeidelの式を用いて換気回数を算出し、模型箱容積0.512m³を乗じて通気量を算出する。

4.2で確認した様に、開口部前を壁面に沿って風が吹く場合、開口部から流入した風洞内の空気はコアンダー効果によって模型箱の内側の壁面に添って流れるため、箱内で空気と混合せずに流出する新鮮空気の量は非常に少なく、換気効率はほぼ0.5（完全混合）に近いと考えられる。故に本節の実験で、トレーサーガス減衰法で換気回数を測定しているときに箱内を攪拌しているのは、変動の少ない安定したCO₂濃度を得るという意味が大きいものといえる。風洞内が無風のときに模型箱内の攪拌のみによって生じる通気量は同面積225cm²の正方形開口で約3.5m³/hであり、決して無視し得る量ではないが、風を吹かせたときには（4m/s）攪拌の有無に関わらず、測定される換気回数に有為な差異は認められなかった。

模型箱とCO₂濃度測定用空気のサンプリング点を図4.47に示す。

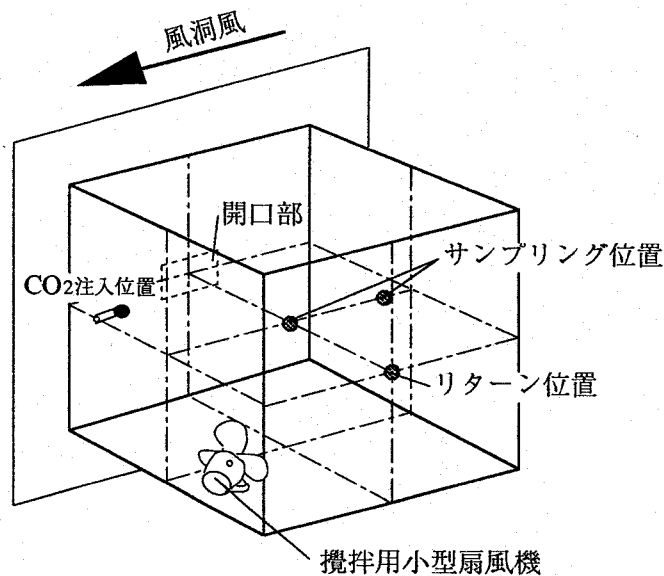


図4.47 模型箱内空気サンプリング位置

4.6.3 混合層理論による通気量計算

P.R.Warren提唱の混合層理論では、「1.2.3 風の乱れを考慮した換気量算定のための理論モデル」の(1.5)式からわかるように、通気量は混合層内の位置をあらゆる相対変数 η の積分形で表現されている。これは直交座標形で表現されていたものを変換した式であり、もともとは次の二つの式で通気量の算出が可能と考える。

流出側で求めると、

$$Q = b U_L \int_0^{y_e} f_1(y) f_2(y) dy \quad (4.6)$$

流入側で求めると、

$$Q = b U_L \int_{y_i}^0 f_1(y) (1 - f_2(y)) dy \quad (4.7)$$

ただし、

- Q : 開口部通気量 [m³/s]
- b : 開口の幅 (開口前の気流方向に直交する方向の開口幅) [m]
- U_L : 開口前を流れる気流の風速 [m/s]
- $f_1(y)$: 混合層下流端の無次元風速
(一様なアプローチフローの風速 U_L を基準)
- $f_2(y)$: 混合層下流端の無次元汚染物濃度 (室内の汚染物濃度を基準)
- y : 開口面に直交する方向の座標 (前節図4.37参照)
- y_e : 開口部下流端における混合層外端 (室外側) の y 座標
- y_i : 開口部下流端における混合層内端 (室内側) の y 座標

これらの理論式では、風速分布のない一様な外部気流を想定している。実験では、図4.39の様に完全な一様流は作りだすことができないため、(4.6)、(4.7)式による通気量計算で用いる無次元風速 $f_1(y)$ は、混合層の外端と考えられる地点での風速を基準に無次元化した風速を用いることが望ましいと考える。境界層の外端位置としては、風速比 $u(y)/U_A(y)$ ($u(y)$: 開口がある場合に開口面から y の距離の地点での風速、 $U_A(y)$: y でのアプローチフローの風速) が95%になる地点とする場合と、99%になる地点とする場合の二通りについて検討を行う。即ち $f_1(y)$ は次式で求めることができる。

$$f_1(y) = u(y) / u(y_{95\%}) \quad (4.8)$$

$$\text{或いは、} f_1(y) = u(y) / u(y_{99\%}) \quad (4.9)$$

ただし、 $y_{95\%}$: 風速比が95%になる地点のy座標

$y_{99\%}$: 風速比が99%になる地点のy座標

実験においては、模型箱内の濃度を一定に保つことは非常に困難であるため、混合層内の汚染物濃度分布を精度良く測定することは困難と言わざるをえない。故に、アプローチフローが均一であり、汚染物拡散と運動量拡散が等しいと仮定し、無次元濃度分布 $f_2(y)$ の値を推定する。即ち、次式で $f_2(y)$ を求める。

$$f_2(y) = 1 - f_1(y) \quad (4.10)$$

(4.8)或いは(4.9)と(4.10)式によって得られる $f_1(y)$ 及び $f_2(y)$ を(4.6) 或いは(4.7)式に代入して計算することにより、開口から流入或いは流出する通気量を求めることができる。

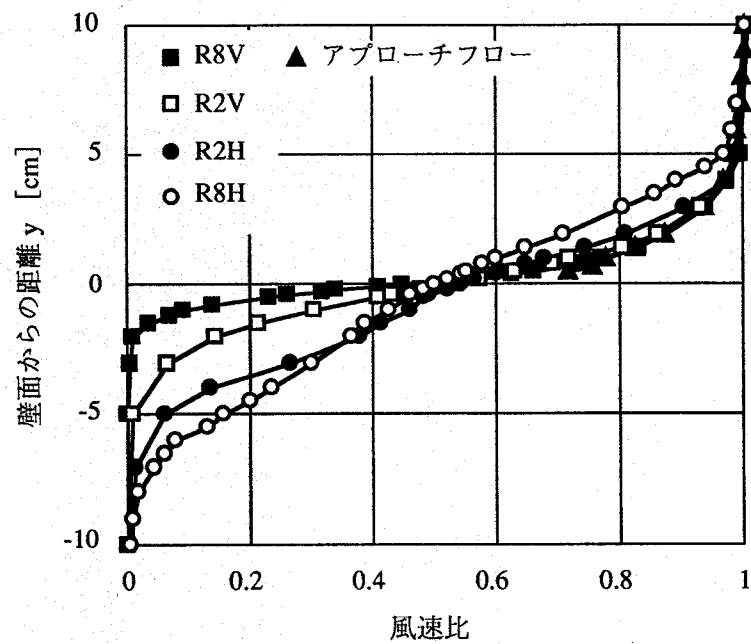
(4.6) 或いは(4.7)式における開口前を流れる気流速 U_L は境界層外端位置でのアプローチフローの気流速度とした。即ち、

$$U_L = U_A(y_e) \quad (4.11)$$

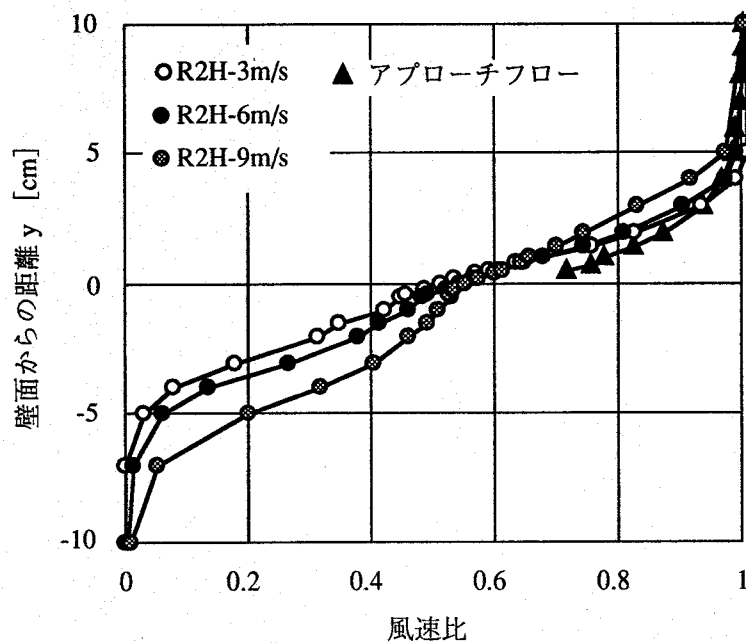
4.6.4 結果と考察

(1)開口部下端位置での風速分布

4.5で測定した開口近傍風速分布のうち、開口下端位置（図4.38中の最も下流側の測定点）における風速分布を図4.48に示す。風洞側（壁面からの距離 y が正）の風速比は、4.5の図と同様、開口を閉じた状態での測定地点のアプローチフロー風速に対する風速比 $u(y)/U_A(y)$ ($u(y)$: 開口がある場合に開口面から y の距離の地点での風速、 $U_A(y)$: y でのアプローチフローの風速)であり、箱内側（壁面からの距離 y が負）の風速比は、設定風速に対する風速比 $u(y)/U_s$ で表している。(a)は



(a) 開口条件による差異 (設定風速 $U_s=6\text{m/s}$)



(b) 設定風速による差異 (開口条件 R2H)

図4.48 開口部下流端の風速分布

設定風速が6m/sにおける各開口条件の風速分布を重ねたものであり、(b)は開口条件がR2Hにおける各設定風速の風速分布を重ねたものである。図中の▲は開口がない場合のアプローチフローの風速分布である。(a)より、開口条件による風速分布の差異は大きく、4.5の結果で明らかになった様に、気流に沿う開口の長さが長いほど混合層が発達し、風速比が1から0に遷移する領域が広いことがわかる。(b)では、設定風速風速分布の差異は若干は見られるが、開口条件による差異ほどは大きくはない。また、いずれの条件においても風速分布の曲線の形状は良く似ていることがわかる。

(2)混合層理論による通気量計算値と通気量測定値との相関関係

図4.49に通気量の計算値と測定値の相関関係を示す。流出量として計算した場合と流入量として計算した場合、及び混合層の外端の位置を風速比95%の地点とした場合と99%の地点にした場合の計四通りについての図を示している。図中の直線は、原点を通る直線で最小二乗法による回帰を行ったものである。図中には回帰直線によって通気量を評価した場合の誤差の標準偏差を示しているが、計算値と測定値の相関はいずれも非常に高いことがわかる。しかし、流出量として通気量を算出した場合には、計算値が通気量を実際より小さく評価しており、風速比95%では回帰直線の傾きが2程度、風速比99%では1.5程度で混合層外端点の位置による差異も大きい。

このように、流出量として通気量を計算した場合に計算値と測定値の差異が大きくなったのは、(4.10)式で濃度分布を導出する際に、壁面に沿う気流の風速分布が均一であると仮定したことから、汚染物の濃度を実際より小さく見積もってしまったことが原因と考えられる。風洞側（室外側）の混合層内の濃度分布を測定によって正しく求めることができたならば、(4.6)式によって流出量としての通気量を正しく求められる可能性は高いものと考えられる。

一方、流入量として開口部通気量を計算する場合には、混合層の位置を風速比95%としても99%としても混合層理論による計算値は通気量測定値をほぼ正しく評価しているといえる。これは、箱内側では仮定した濃度分布と実際の濃度分布に大きな差異がないことを示唆するものといえる。

以上より、混合層理論に基づいて混合層下端面の風速分布と濃度分布から通気量を計算する場合、仮定した濃度分布(4.10)式を用れば流入量として通気量を求める方が精度良く通気量を計算でき、この場合混合層の位置は風速比95%でも99%でも大きな差異は見られないことが明らかになった。このことは、開口前を流れる気流に風速分布が存在する場合には、混合層の外端を風速比が95%~99%になる地点とすれば良いことを示すものと言えよう。

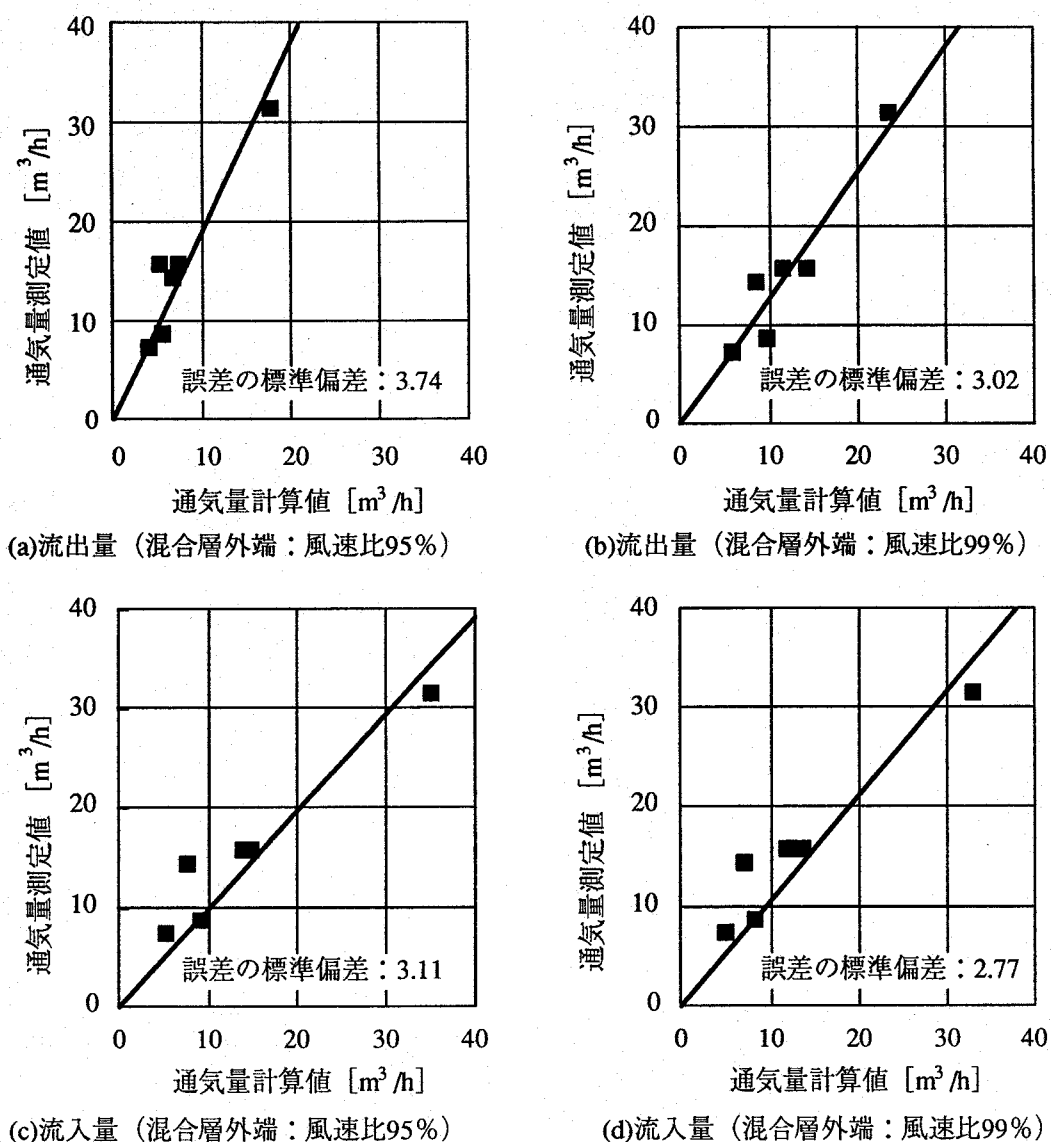


図4.49 通気量計算値と通気量測定値との相関関係

4.6.5 まとめ

本節での検討によって、混合層理論に基づいて混合層下端面の風速分布と濃度分布から通気量を求めることが可能であり、混合層理論の基本的考え方の妥当性が検証された。

4.7 単一開口における通気量算定式の提案

4.7.1 混合層理論式の簡略化

前節4.6の検討で、混合層理論の理論的妥当性を検証することができた。しかし、(4.6)或いは(4.7)式を用いて開口部通気量を求めるためには、開口部下流端の風速分布 $f_1(y)$ と濃度分布 $f_2(y)$ を知らねばならず、汎用的な手法とは言いがたい。ただし、種々の条件において風速分布及び濃度分布が各々相似である場合には、混合層の発達角を一定と仮定すれば、積分の部分が定数となり、通気量計算式が非常に簡単なものとなる。以下にその式誘導を示す。

いま、無次元風速 $u(y)/u(20)$ ($u(y)$: 開口がある場合に開口面から y の距離の地点での風速、 $u(20)$: $y=20\text{cm}$ での風速) が0.95になる地点の y 座標を y_{v95} 、0.05になる地点の y 座標を y_{v5} とし、 y 座標を次の様に基準化する。(4.6で用いた $y_{95\%}$ 、 $y_{99\%}$ とは異なるので注意されたい。)

$$y^* = \frac{y - y_{v5}}{y_{v95} - y_{v5}} \quad (4.12)$$

(4.6)式を y^* で表すと、

$$\begin{aligned} Q &= b U_L \int_{y_i^*}^{y_e^*} f_1(y^*) \cdot f_2(y^*) (y_{v95} - y_{v5}) dy^* \\ &= (y_{v95} - y_{v5}) b U_L \int_{y_i^*}^{y_e^*} f_1(y^*) \cdot f_2(y^*) dy^* \end{aligned} \quad (4.13)$$

ここに、

- b : 開口の幅
- U_L : 混合層外端の風速
- y_e^* : $y=y_e$ (混合層外端) のときの y^*
- y_i^* : $y=y_i$ (混合層内端) のときの y^*

いま、混合層の発達が開口部上流端からの距離 x に比例する場合 (混合層の断

面形状が三角形) には、 $y_{v95} - y_{v5} = ax$ と表現できるため、(4.13)式は次のように書ける。

$$Q = a x b U_L \int_{y_r^*}^{y_e^*} f_1(y^*) \cdot f_2(y^*) dy^*$$

開口の長さを l とすると開口部下流端で $x=l$ であるから

$$Q = a l b U_L \int_{y_r^*}^{y_e^*} f_1(y^*) \cdot f_2(y^*) dy^*$$

$l b = A$ (開口面積) であるから、

$$Q = U_L A a \int_{y_r^*}^{y_e^*} f_1(y^*) \cdot f_2(y^*) dy^* \quad (4.14)$$

いま、混合層の風速分布と濃度分布が条件に関わらず相似であるならば、

$$C_1 = a \int_{y_r^*}^{y_e^*} f_1(y^*) \cdot f_2(y^*) dy^* \text{と置くことができ、}$$

$$Q = C_1 A U_L \quad (4.15)$$

となる。この式は条件によらず通気量が開口面積と混合層外端の風速に比例することを示している。

(4.7)式についても、同様の変形を行えば、

$$Q = a A U_L \int_{y_r^*}^{y_e^*} f_1(y^*) \cdot \{1 - f_2(y^*)\} dy^* = C_2 A U_L \quad (4.16)$$

$$\text{ただし、} C_2 = a \int_{y_r^*}^{y_e^*} f_1(y^*) \cdot \{1 - f_2(y^*)\} dy^*$$

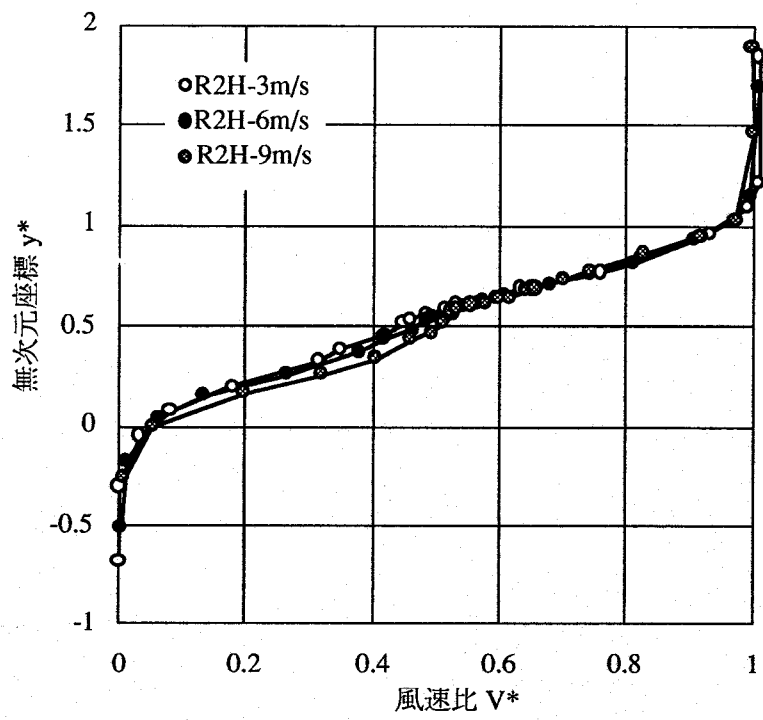
流入量と流出量は本来等しいことから、 $C_1=C_2$ が成り立つ。

以上より、いずれの開口条件、壁面気流条件においても開口部下流端の風速分布 $f_1(y)$ と濃度分布 $f_2(y)$ が各々相似であり、混合層の発達が開口中流端からの距離に対して直線的、即ち混合層の発達角が一定である場合には、単一開口の通気量は混合層外端の風速と開口部の面積に比例することが明らかになった。

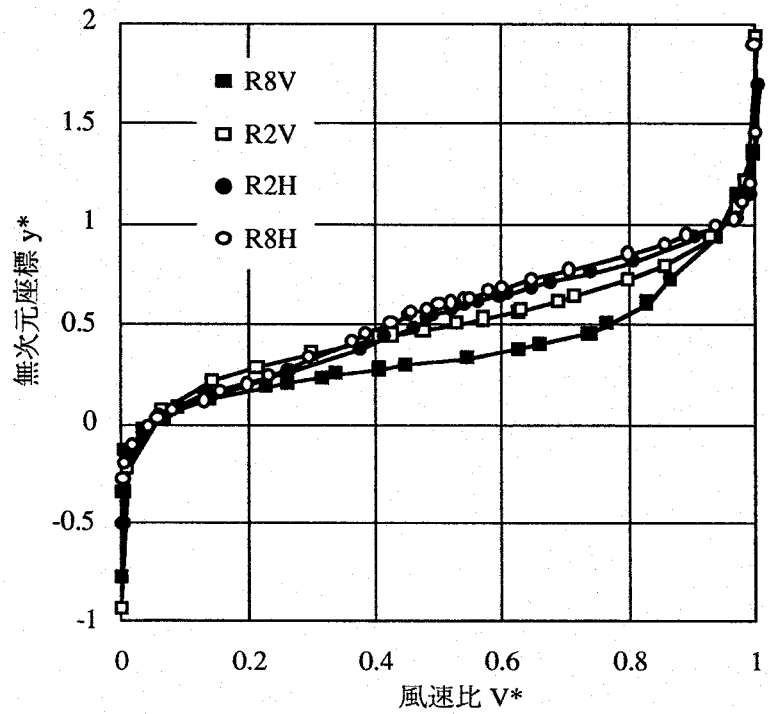
4.7.2 混合層下端風速分布の相似性

4.5で測定した混合層下端面の風速分布を基準化し、開口条件が異なっても $f_1(y)$ が同じ形状を示すかどうかを検討する。

$y=y_{v95}$ の y 座標を1とし、 $y=y_{v5}$ 地点の y 座標を0とする無次元 y 座標 y^* に対して、4.6で検討した6種の開口及び風速条件における開口部下流端の風速分布を描いたものを図4.50に示す。横軸の風速比 V^* は、 $y=20\text{cm}$ の地点の風速を基準に無次元化している。(a)は開口条件がR2Hで設定風速が3m/s、6m/s、9m/sの風速分布を重ねたものであり、(b)は設定風速6m/sで開口条件の異なる風速分布を重ねたものである。R2Hの場合には、設定風速が変化しても風速比は殆ど変わらず、風速分布は相似であることがわかる。設定風速が同じで開口条件が異なる場合には、R2HとR8H及びR2Vの三者にはそれほど大きな差異は認められないが、R8Vは無次元座標 y^* が0.2~0.9の範囲での風速が若干大きいことがわかる。R8Vは気流方向の開口の長さが53mmと最も小さく、混合層の発達が十分でないことに原因していると考えることができる。



(a)開口条件R2H



(b)設定風速 6m/s

図4.50 混合層下端風速分布

図4.51はR8Vを除く5条件 (R2H-3m/s, R2H-6m/s, R2H-9m/s, R2V-6m/s, R8H-6m/s) の風速分布を無次元座標 y^* について重ねたものである。この図より、R8V・6m/sを除いて、開口部下流端の風速分布はほぼ相似であるということが出来る。図中の曲線は、 $(y^*, V^*) = (0, 0.05), (1, 0.95)$ を通る曲線で近似した例である。最小二乗法で求めたものではないが、風速分布を比較的良く近似できていることがわかる。

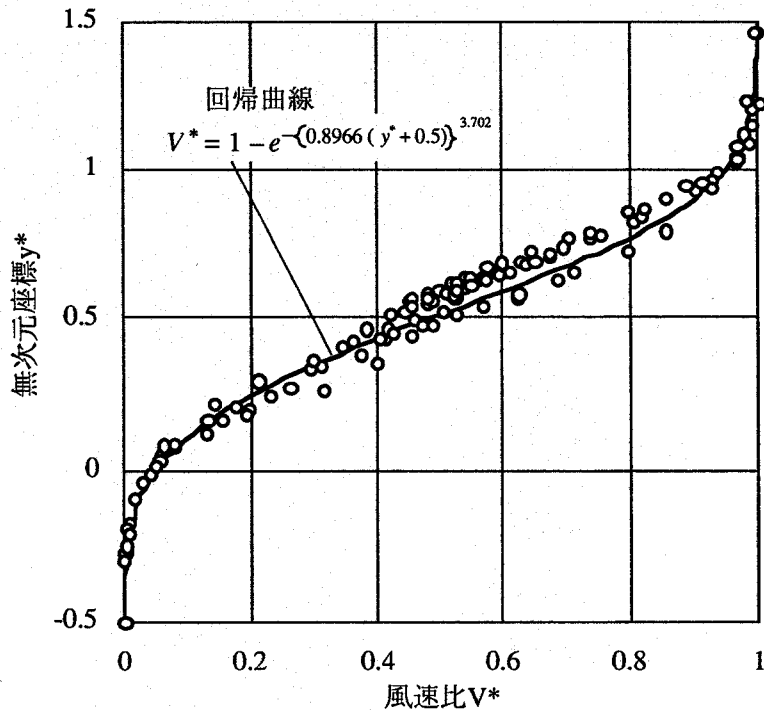


図4.51 開口部下流端風速分布 (R8Vを除く)

以上の検討から、開口部下流端の風速分布は、ある程度混合層が発達する開口条件においてはほぼ相似になることが確認されたと言える。

通気量が(4.15)、(4.16)の様に表されるためには、汚染物濃度の分布 $f_2(y)$ も相似にならなければならない。4.5の実験では汚染物濃度は技術上の問題から測定できず、汚染物濃度分布の相似性の検討は行うことができない。しかしながら、前節の計算で、風速分布から(4.10)式で予測した濃度分布を用いて流入量として求めた通気量の計算結果が、通気量の測定値とほぼ一致したことは、(4.10)式によって濃度分布を求めることの妥当性を示すものと考えることができ、風速分布の相似性が確認できたことから、濃度分布も相似である可能性は極めて高いと言えることができる。

4.7.3 混合層の発達と混合層外端風速の採り方

(4.15)式、(4.16)式が成り立つためには、混合層の発達が開口上流端からの距離 x に対して直線的でなければならないことは先に述べた通りである。そこであらためて、混合層の領域を示す図を図4.52に示す。この図は、図4.46と同じものであり、設定風速6m/sにおける各開口条件での等風速比線図を重ねたものである。図中に混合層の発達が直線的であった場合の線を示している。風洞側では、ばらつきは大きいがほぼ直線的と見なすことも可能であるが、模型箱内側では開口上流端からの距離 x が0~20cmでは一定の角度で直線的に広がるが、20cmを越えると発達角が若干小さくなり、直線と考えることには若干の問題が存在するものといえる。しかしながら、通気量予測全体の精度を勘案したうえで、実用性を重視する場合には、混合層の発達を直線的と考えることも許されるといえよう。

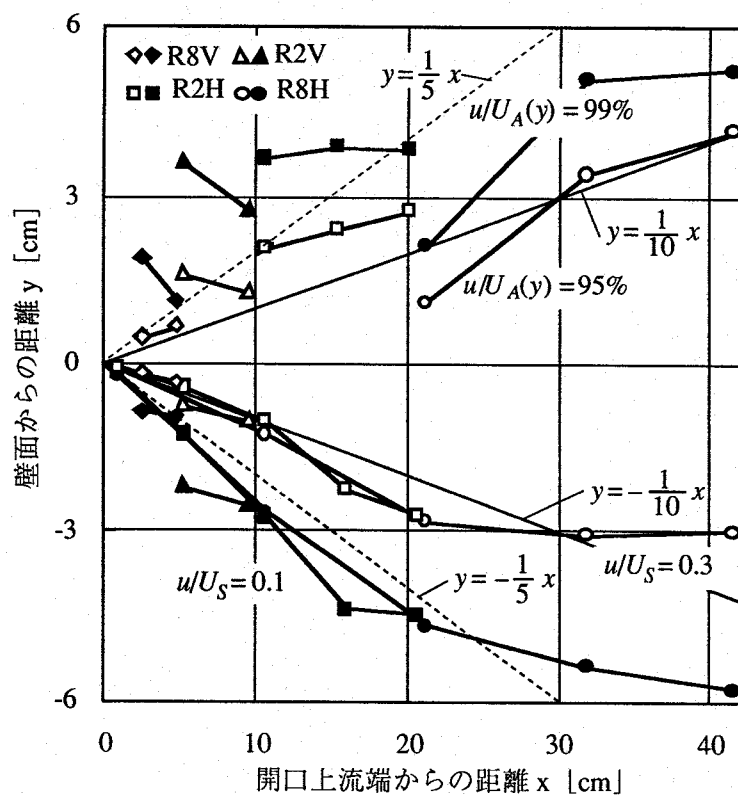


図4.52 混合層内の等風速比線 (設定風速 6m/s)

その場合、図4.52より混合層外端を風速比 $u(y)/U_A(y)$ が95%となる位置 $y_{95\%}$ と考えれば、混合層外端位置は、近似的に $y = \frac{1}{5}x \sim y = \frac{1}{10}x$ で与えることができ、混

混合層外端の風速 U_L は、この位置のアプローチフローの風速を採れば良いことになる。このようにして求めた混合層外端の風速 U_L と開口面積から(4.15)式から通気量を計算するためには、定数Cの値を知らなければならない。

4.7.4 通気量算定式

混合層の外端を風速がアプローチフローの風速の95%になる位置とし、開口部の下流端における風速の測定値から混合層の外端位置を求めた場合、 $y=(1/10)*x$ (y : 壁面からの距離、 x : 開口部の上流端からの距離) で求めた場合、 $y=(1/5)*x$ で求めた場合の3通りについて、通気量測定値を開口面積と混合層外端位置風速で除して定数Cを算出した。その結果を図4.53に示す。

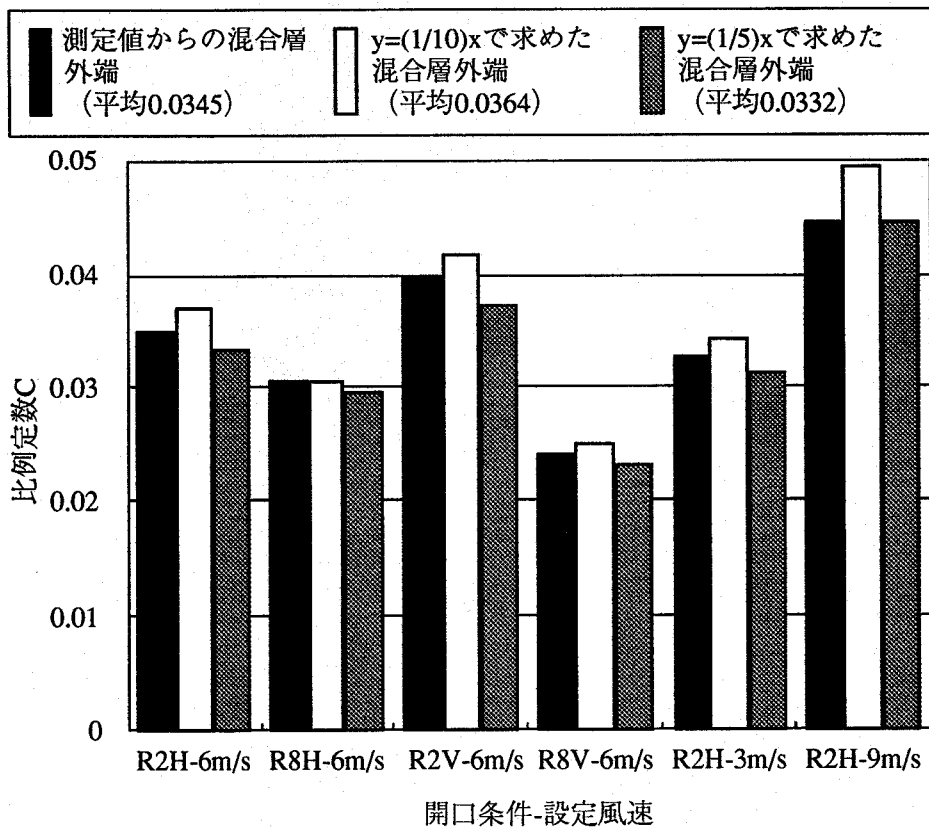


図4.53 開口条件・設定風速条件と比例定数Cとの関係

混合層外端の決定方法による差異は比較的小さく、開口条件、設定風速による差異の方が大きいことがわかる。R8V-6m/sが最も小さく0.024程度であり、R2H-9m/sが最も大きく、0.045~0.05である。各開口・設定風速条件のCを平均す

ると、0.033～0.036であることがわかる。混合層の採り方に関して言えば、混合層の発達勾配を1/10としても1/5としても大差はないが、図4.52から、1/10とする方が開口上端からの距離に関する適用範囲は広いといえよう。

以上から、混合層理論に基づく、実用的な通気量算定式を下記の様に定める。

$$Q = 0.036 A U_L \quad (4.17)$$

ただし、

A: 開口面積 [m²]

U_L: 混合層外端風速 [m/s]

ただし、混合層外端位置は、簡易には次式で求めることができる。

$$y = \frac{1}{10} x \quad (4.18)$$

x: 開口部の流れに沿う長さ [cm]

y: 混合層外端の壁面からの距離 [cm]

壁面に沿う気流の風速分布を知れば、(4.17)、(4.18)式を用いて単一開口の通気量を実用的精度で算出することができるものとする。

4.7.5 まとめ

本節での検討によって、混合層理論に基づく実用的な通気量算定式を誘導することができた。

ただし、ここで示した通気量算定式は、乱れの小さい風洞内の風を用いた実験結果に基づくものであるため、すべての条件に適用し得る汎用性を持つとは限らないことに留意しなければならない。

4.8 本章のまとめ

本章における検討によって、以下の結果を得ることができた。

- (1)種々の換気要因が通気量に与える影響を検討する上で、攪拌時の換気量を通気量とみなすことは、非常に有効である。
- (2)風向0度の場合には、通気量は(平均風速)×(開口面積)×(乱れの強さの平方根)に比例するとして算定が可能であるが、風向が0でない場合は、換気要因だけからは通気量予測は難しく、中間変数の導入が必要である。
- (3)風向によって実際の通気量は大きく変化し、ある風向でピーク値を取る。
- (4)風向が0度で開口中心に淀み点が位置する場合には、脈動理論計算によって開口部通気量を予測することが可能であるが、一般的には脈動理論に基づく通気量計算は実用に供し得ない。
- (5)単一開口の開口面に平行な外部風が流れるとき、下流へ向かうにつれて箱内への運動量の拡散が生じ、開口内に混合層が発達する。
- (6)混合層理論に基づいて混合層下端面の風速分布と濃度分布から通気量を求めることが可能であり、混合層理論の基本的考え方は妥当である。
- (7)混合層理論に基づく実用的な通気量算定式を誘導した。

本章で提示した混合層理論に基づく通気量算定式で、風の乱れによって生じる単一開口の通気量を予測することが一応可能になったものといえる。しかし、その通気量算定式の適用性についてさらに検討を進める必要があると考える。

参考文献

- 1)J.P.Cockroft : P.Robertson: Ventilation of an Enclosure Through a Single Opening, Building and Environment, Vol.11, 1976, pp.29-35
- 2)P.R.Warren : Ventilation Through Openings on One Wall Only, Energy Conservation in Heating, Cooling, and Ventilating Buildings, Vol.1, 1978, pp.189-206

第5章 単一開口における通気量算定式の適用性

5.1 本章の目的

第4章で混合層理論に基づいて、最終的に提案された、単一開口を持つ室における通気量算定式の適用性を、種々の条件下における実験によって検討し、算定式の修正が必要と判断される場合には、算定式に修正を施すことを本章の目的とする。

検討を行った条件は、8階建建物の屋上に設置した単一開口を持つ模型箱が自然風によって換気される場合、風洞の側壁面に外接させて取付けた単一開口を持つ模型箱が風洞の風によって換気される場合、風洞の床面に設置した単一開口を持つ模型箱が風洞の風によって換気される場合の三通りである。風洞の床に模型箱を設置した場合においては、風洞内の気流の風速分布が一様な場合と自然風の接地境界層を再現した場合の二通りの条件で実験を行う。

5.2 自然風による模型箱の換気

5.2.1 本節の概要

本節では、自然風によって単一開口を持つ立方体模型箱が換気される場合に、開口前を流れる壁面近傍風速と通気量との関係について検討し、第4章で提案した通気量算定式の適用性について論じる。

5.2.2 実験概要

大阪大学工学部建設棟（第3章図3.1、図3.2参照）の8階部屋上に、単一開口を持つ内寸80cm角立方体の木製模型箱を設置し、自然風によって換気を行う。この模型箱は第4章の4.5で用いたものと同じ形状と寸法を有する。模型箱には、厚さ2mmの亚克力製開口板を取付けることができ、内部には攪拌用小型扇風機を設置している。模型箱の内部を攪拌しながらCO₂を一定量（0.34ℓ～0.50ℓ/min）連続的に発生させ、模型箱内の濃度変化から通気量を算出する（トレーサーガス発生法）。CO₂の発生量は、積算流量計で測定した。

通気量の測定と同時に、開口部の中心前方5cmの地点で、開口面に沿って流れる壁面近傍気流の風速を無指向性風速計（アネマスター KANOMAX）を用いて測定するとともに、建物のペントハウス上6m（地上38m）で上空風の風向・風速を微風向風速計（PR-500TC 小笠原計器）で測定する。模型箱内のCO₂濃度は赤外線吸収式分析計（URA-107 島津製作所）で測定した。無指向性風速計、微風向風速計の出力電圧はADボードを装着したパソコン（PC-9801VM21 NEC）によって0.2秒おきにサンプリングし、53秒間の平均値、及び変動の実効値を1分間ごとにフロッピーに記録した。CO₂濃度分析器の出力電圧は、1分おきの値をフロッピーに記録した。

図5.1に模型箱を設置した屋上の屋根伏図を、図5.2に模型箱の設置概要図を示す。図5.2の模型下部の測定器箱には、無指向性風速計の本体を納めてある。

開口部は、正方形開口と細長開口の二種類を用いた。細長開口は長辺が鉛直方向を向くように取付ける。各開口部を取付けた場合に攪拌器の作動によって生じる換気量をあらかじめ無風の実験室において測定した。その結果を開口の諸量とともに表5.1に示す。1分間おきの模型箱内CO₂濃度と外気濃度から1分平均の換

気量を算出し、それから表5.1の攪拌による換気量を差し引いたものを模型箱の通気量とする。測定を行った日時を表5.2に示す。

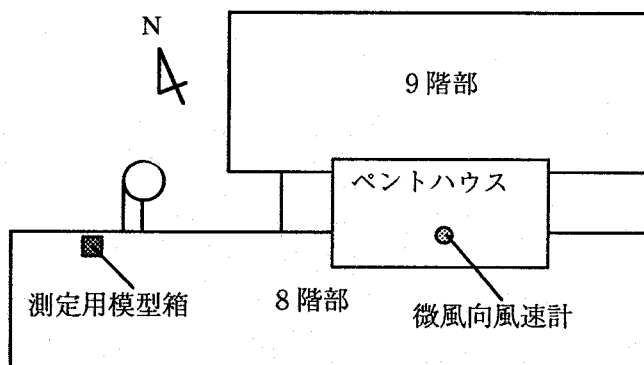


図5.1 屋根伏図

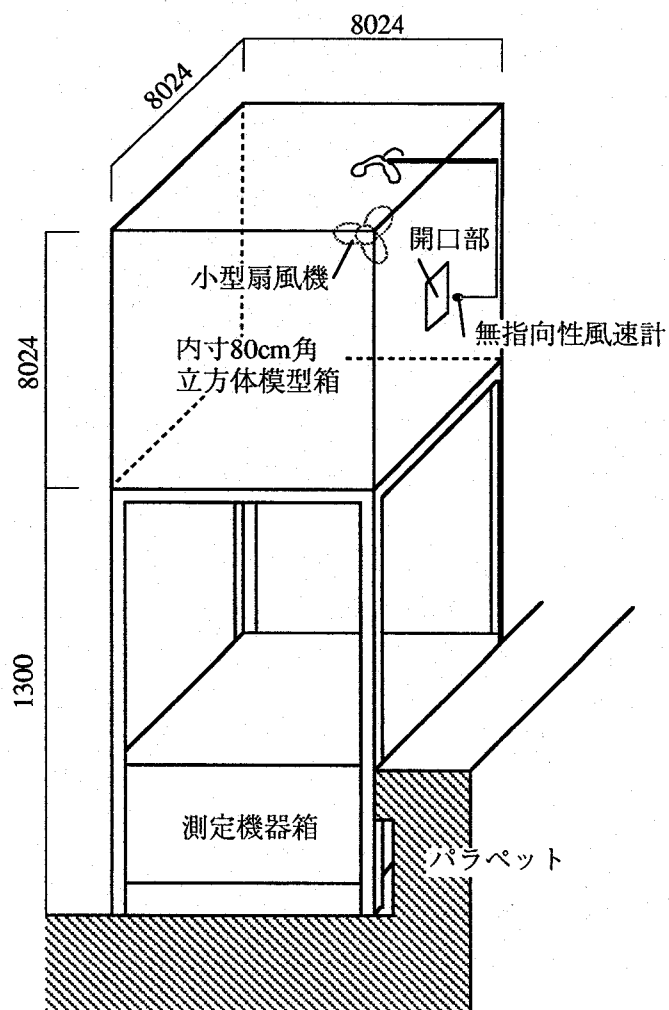


図5.2 測定用模型箱設置概要図 単位 [mm]

表5.1 開口部の諸量と攪拌器による換気量一覧

開口の種類	開口寸法 [cm]	厚み [mm]	面積 [cm ²]	流量係数	有効開口面積 [cm ²]	攪拌による換気量 [m ³ /h]
正方形開口	15×15	2	225	0.60	135.0	1.775
細長開口	1×60	2	60	0.64	38.4	0.924

表5.2 測定時間一覧

開口条件	測定日	時間
正方形開口	1988年11月7日	17:35~23:58
	1988年11月8日	00:00~16:30
	1988年11月8日	17:00~23:58
	1988年11月9日	00:00~16:30
	1988年11月9日	17:30~20:10
	1988年11月10日	14:30~20:10
	1988年11月11日	11:40~19:00
細長開口	1988年11月12日	14:30~23:58
	1988年11月13日	00:00~3:05
	1988年12月2日	11:40~23:40

以下に、通気量の算出法を示す。

模型箱内のCO₂濃度の時間変化は一般に次式で表される。

$$C_{rt} = C_0 + (C_{r0} - C_0) e^{-nt} + \frac{M}{nV} (1 - e^{-nt}) \quad (5.1)$$

ここに、

C_{rt} : 時刻 t における模型箱内CO₂濃度 (体積比)

C_{r0} : 時刻 $t=0$ における模型箱内CO₂濃度

C_0 : 外気CO₂濃度

M : CO₂の発生量 [m³/h]

n : 換気回数 [回/h]

V : 模型箱の体積 [m³]

t : 時間 [h]

いま、(5.1)式を時間間隔 $\Delta t=1/60$ [h] (=1分) で離散化すると、

$$C_{rti} = C_0 + (C_{rti-1} - C_0) e^{-n\Delta t} + \frac{M}{nV} (1 - e^{-n\Delta t}) \quad (5.2)$$

が得られる。

ただし、

C_{rti} : 時間 t_i における模型箱内CO₂濃度 (体積比)

C_{rti-1} : 時間 t_{i-1} における模型箱内CO₂濃度

t_i : i 番目の時刻 [h]

Δt : 時間間隔 (=1/60 [h] = 1 [min])

i : 時間番号 ($i=1,2,3,4,\dots$)

測定した Δt (1分) おきの模型箱内CO₂濃度を(5.2)式に代入し、はさみうち法によって換気回数 n について数値的に解くことによって、 Δt おきの平均の換気回数を求めることができる。 $n \times V$ を通気量とする。

5.2.3 結果と考察

(1) 開口前の風速分布

図5.3に、開口をテープで閉じた状態で、開口前1cmから7cmの風速分布を無指向性風速計で測定した結果を示す。模型箱壁面から20cmの距離の地点に基準点を設け、もう一台の風速計で基準風速を測定した。図中の風速は、基準風速との平均風速の比で表現している。風速比は0.7から0.9程度であり、大きな分布は見られないことがわかる。開口から1cmにおいてもあまり風速の低下がみられないことから、模型箱の壁面気流の境界層の厚さは1cm以下であろうと推定できる。

ところで、第4章において、開口の混合層の外端位置は近似的に開口の長さ \times (1/10) で求められることを述べた。同様にして混合層の外端位置を推定すると、正方形開口で1.5cm、細長開口では0.1cm~6cmとなる。細長開口の場合、壁面前気流の流れる方向によって混合層外端の位置が大きく変化することがわかる。模型箱の開口面が建物の壁面とほぼ同一面に近いため、建物壁面に沿って上昇する気流が開口面に当たることが多い。細長開口は長辺が鉛直縦方向になるよう取付けているため、気流は開口の長辺に沿って流れることが多いと考えられる。故に細長開口における混合層の外端は壁面から数cm~6cm程度の地点と考えられる。

以上から、分布測定は一回しか行っていないため断言は避けなければならないが、いずれの開口の場合においても、混合層の外端は壁面から数cmであり、混合層外端風速は測定を行った壁面から5cmの地点の風速の0.7倍から1.1倍程度で、大きな差異はないと考えることができよう。

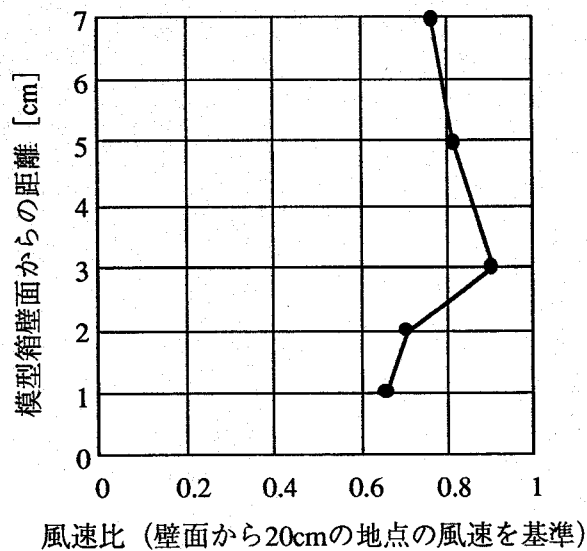


図5.3 模型箱壁面近傍の風速分布

(2) 上空風風速と開口近傍風速との関係

自然風によって換気される単一開口室の壁面気流風速と通気量との関係を検討し、第4章で提案した通気量算定式の適用性を論ずる前に、単一開口のある壁面に沿って流れる開口近傍気流速度が上空の風向風速とどのような関係にあるのかについて検討を行う。この検討自身は、本章の目的の達成に直接つながるものではないが、模型箱を設置した場所の風が上空風とどの程度異なっているのかを知ることは実験の条件を規定する意味で有意義なものとする。

図5.4に、上空風の風速と開口近傍風速との関係を示す。(a)は16分割の平均風向がWの場合、(b)はENEの場合である。各々平均化時間が1分の場合、10分の場合、30分の場合の三通りについて図を示している。上空風風速と開口近傍風速の相関は風向Wの方が高いが、いずれも両者に比例関係が見られることがわかる。開口近傍風速は、風向Wでは上空風速の0.2倍、風向ENEでは0.3倍前後であるこ

とがわかる。

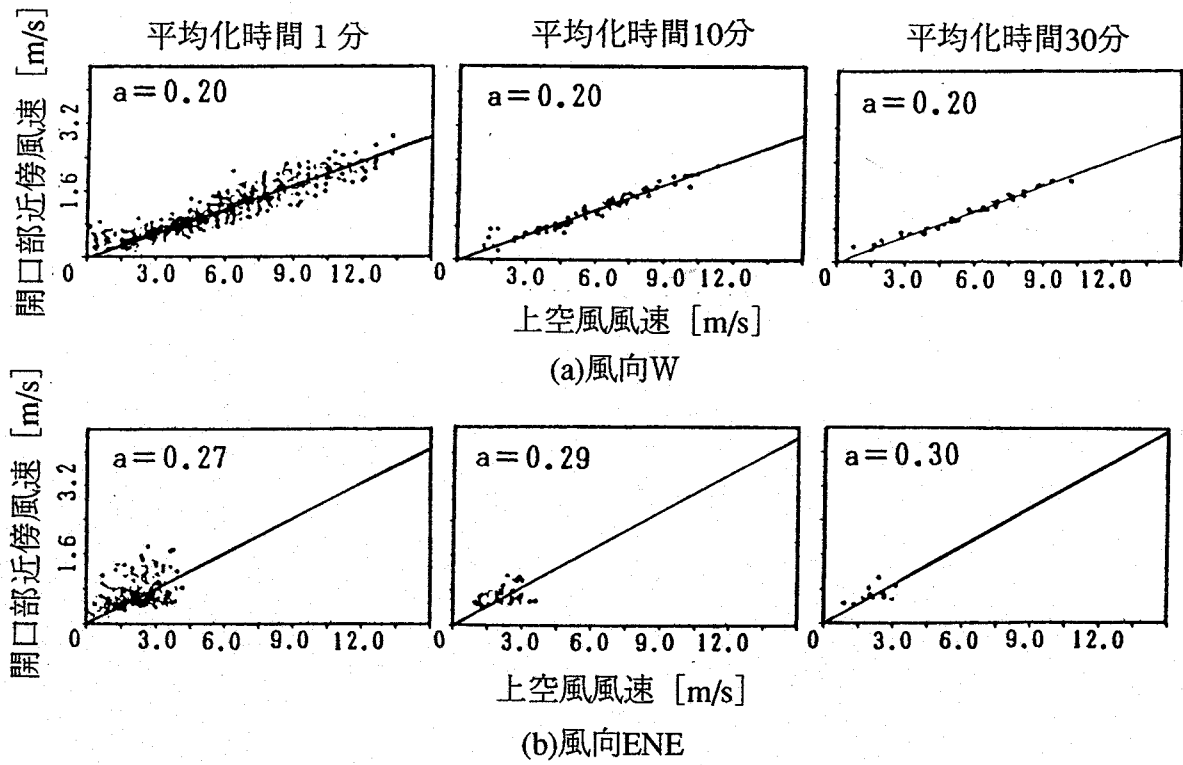


図5.4 上空風風速と開口近傍風速との関係

図5.5は、全風向について、上空風風速と開口近傍風速の風速比を原点を通る回帰直線から求め、1分平均の場合のデータ数とともに示したものである。データ数はSWから時計回りにENEまでの風向が多く、風向Nで風速比が最も大きくなる。開口面は建物壁面と同じく、NNEを向いていることから、おおむね風向が開口面と直角になるほど風速比は大きくなるものと言える。

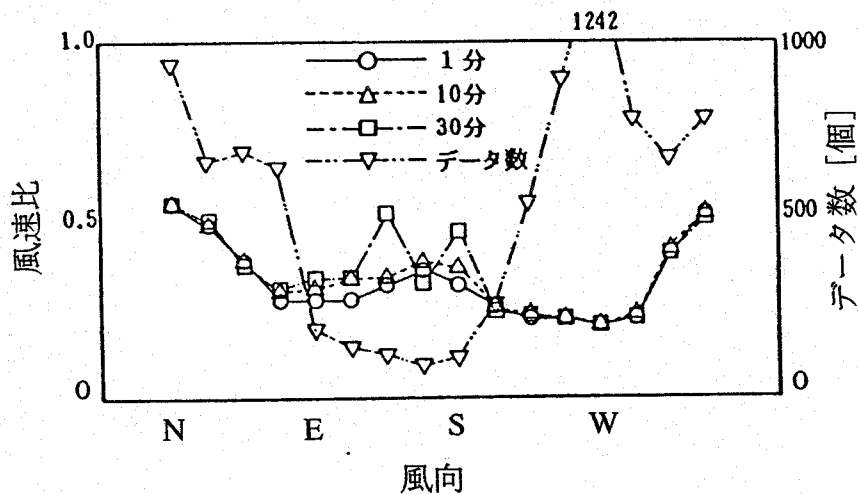


図5.5 各風向における風速比（上空風風速基準）とデータ数（1分間平均）

(3)開口近傍風速と通気量との関係

図5.6に、開口近傍風速と開口部通気量との関係を示す。(a)は正方形開口の場合で、(b)は細長開口の場合である。図5.4同様に平均化時間を三通りに変えた図を示している。図中の直線は、原点を通る直線で回帰した結果である。

正方形開口の方がばらつきは大きいですが、いずれの場合も開口部通気量は開口近傍風速と比例していることがわかる。図中に(4.15)式をあてはめた場合に回帰直線の傾きから算出した定数Cの値を併記しているが、正方形開口の場合は0.04、細長開口の場合は0.13程度である。第4章で提案した通気量算定式である(4.17)式の定数Cは0.036であり、正方形開口の定数Cは算定式の定数とほぼ一致していることがわかる。しかしながら、細長開口の場合は算定式の係数の3.6倍であり、かなり大きいことがわかる。この原因は、模型箱の一辺の長さ80cmに比べて開口の長さが60cmと長いため、開口面に生じる時間平均風圧に不均一な分布が生じていることが考えられる。風洞に模型箱を外接させた4.5の実験では、風洞の測定胴が長いために、風圧の不均一は僅少であったと考えられる。

開口面にかかる時間平均風圧の不均一は、建物の大きさに比して開口が大きい場合にのみ表出するものであり、一般の建物における窓程度の大きさの開口の場合には、殆ど現われてこないものと考えられる。故に、一般的な建物の開口においては、たとえ細長開口であっても、定数Cの値が0.036に近くなる可能性は高い

と考える。

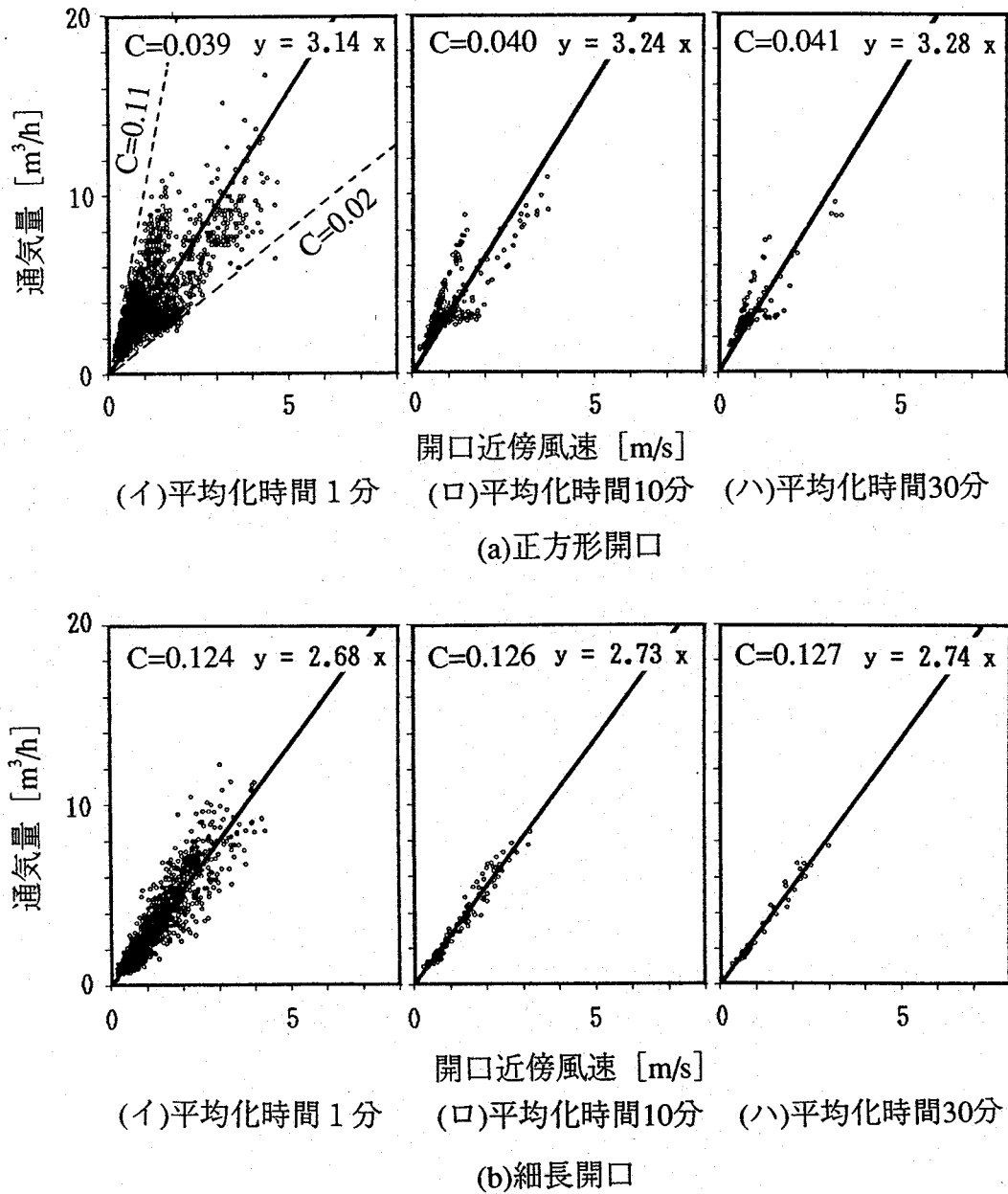


図5.6 開口近傍風速と通気量との関係

次に、図5.6(a)の正方形開口の場合のデータのばらつきの原因について考えてみたい。例えば、平均化時間1分の場合、定数Cの値にすると0.02から0.11の範囲に分布していることが図から読み取れる。平均のCと比較すると最大0.5倍から3倍のばらつきがあることになる。このばらつきの一つの原因としては、開口面にかかる風圧の瞬時瞬時の分布とその変動性の違いを考えることができる。それら

の風圧特性は壁面を流れる気流の乱れの強さと相関があると考えられるので、図5.6(a)の10分間平均についての図を開口近傍気流の乱れの強さ別に描いたものが図5.7である。ここでの乱れの強さの評価時間は10分間である。図中の直線は図5.6同様原点を通る直線で回帰したものである。回帰直線の傾きから求めたCの値は0.026~0.04であり、乱れの強さが大きいほどCの値が大きくなる傾向が認められる。このことから、図5.6のばらつきの原因の一つは、開口前を壁面に沿って流れる気流の乱れの性状、ひいては開口面にかかる風圧分布の変動特性によるものといえる。ただしここでの乱れの強さは、評価時間が10分であることからかなりスケールの大きな渦によって生じる乱れの強さであるため、ここでの結果をもとに乱れの強さとCの値を定性的に関係づけるべきではないものとする。

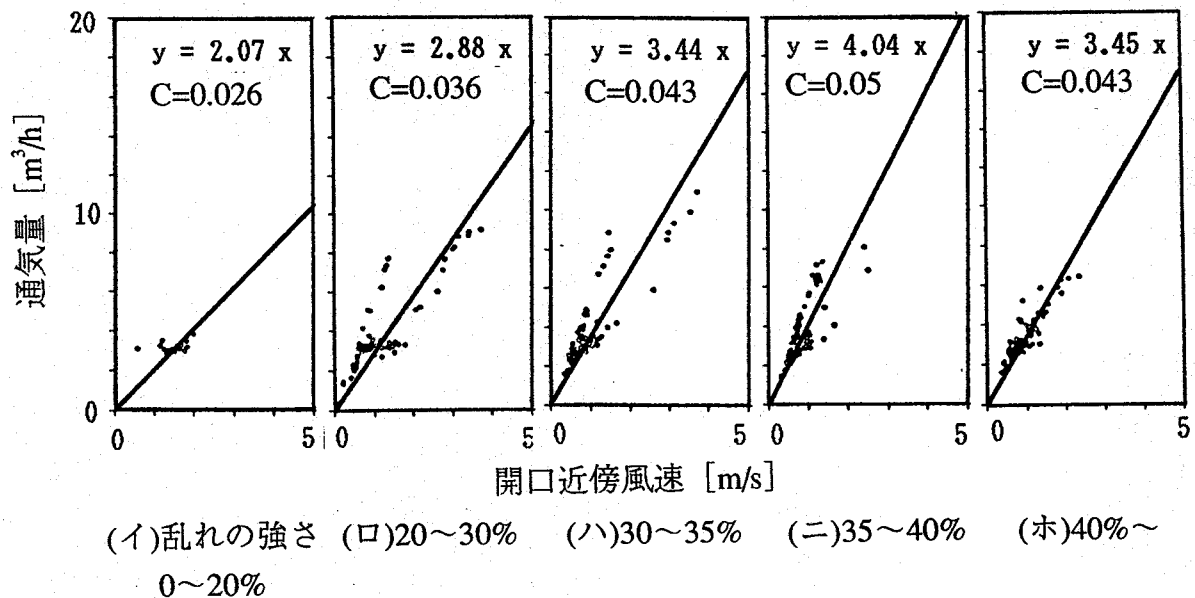


図5.7 開口近傍風速と通気量との関係 (正方形開口、平均化時間10分)

以上から、正方形開口の場合には、(4.17)式は平均的には成り立つが、細長開口の場合には時間平均の風圧分布によると考えられる通気量のため、(4.17)式は通気量を1/3程度に小さく見積ってしまうといえる。

5.2.4 まとめ

本節の検討によって、自然風によって換気される単一開口をもつ模型箱の場合、

単一開口の通気量予測式は正方形開口では正しく通気量を評価するが、時間平均の風圧に分布が生じると考えられる細長開口の場合には通気量を1/3程度に見積ってしまうことが明らかになった。ただし、正方形開口の場合、開口近傍を流れる壁面気流の乱れの強さの大小によって実際の通気量は若干変化するという示された。

5.3 風洞風による模型箱の換気

5.3.1 本節の概要

本節では、第4章の4.5、5.1と同じ寸法の単一開口を持つ模型箱を風洞の側壁面に風洞の外側から取付け、開口形状、開口面積、開口の向き、風洞内の風速、風洞風の乱れの性質などをパラメーターとした換気実験を行い、各種実験パラメーターと通気量との関係、及び混合層外端位置での壁面近傍風速と通気量の関係などについて幅広く検討し、第4章で提案した単一開口の通気量予測式の適用性を検討する。本節での検討の主眼の一つは、開口角や開口形状による通気量の変化を混合層外端位置の違いによる気流速の違いによってどの程度説明できるかについて検討することにあるといえる。

5.3.2 実験概要

実験に用いた風洞は、4.5と同じ大阪大学工学部研究用風洞（表4.7参照）である。図5.8に測定洞の断面図を示す。風洞の測定洞の入口には、種々の大きさの格子が取付けられるようになっており、風洞内の乱れを変えることができる。4.5で用いた内寸80 cm角の気密な木製立方体模型箱を風洞の側壁面に取付けた。4.5では測定洞の風上側端部に取付けたが、ここでは壁面に境界層が発達している下流に近い場所を取付けた。模型箱は一つの面を風洞の側壁と共用しており、その面に種々の開口をもつ2 mm厚のアルミ製開口板が取付けられるようになっている。共用面は円形のベニアがはめこまれているため、開口の長辺と気流方向のなす角（開口角： θ ）を自由に変化させることができる。図5.9に開口角の定義を示す。用いた開口は、円形、正方形、アスペクト比2，8，16の長方形開口である。アスペクト比2の長方形開口については、大、中、小の3種類の面積の開口を用いた。アスペクト比2の中、大の開口を除き、開口面積はすべて等しく、 225cm^2 である。変化させた実験パラメータは、平均風速、風種（乱れの強さ）、開口形状、開口面積、開口角の5つであり、その設定条件を表5.3に示す。ただし、すべてのパラメータの組み合わせについて実験を行なった訳ではなく、表5.3のうち一つのパラメータだけを変化させることにより、計62条件について模型箱の換気実験を行い、通気量の測定を行った。

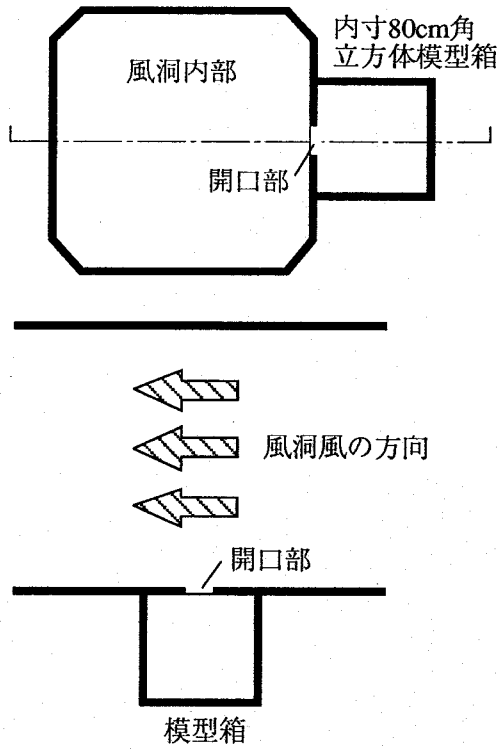


図5.8 風洞の断面図

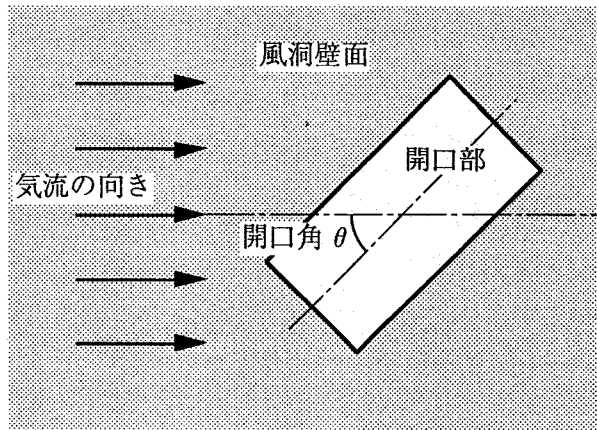


図5.9 開口角の定義概要

表5.3 実験条件一覧

設定風速 [m/s]	3, 6, 9		
風種	1	2	3
格子	太	細	なし
乱れの強さ	大	中	小
開口形状	円形, 7ス ^へ 外比1	7ス ^へ 外比2	7ス ^へ 外比8, 7ス ^へ 外比16
開口面積 [cm ²]	225	225, 450, 675	225
開口角 θ [°]	0, 22.5, 45, 67.5, 90		

風速設定は開口のない状態で開口前20cmの位置で無指向性風速計により行なった。換気実験に先だって風洞内壁面近傍の風速分布を熱線風速計で測定した。通気量の測定方法は4.6での実験と同じである。模型箱内を小型扇風機で攪拌しながら、箱内に注入したCO₂濃度の時間減衰を測定し、Seidelの式より換気回数を求め、箱容積を乗じたものを通気量とする。CO₂の注入位置、及び箱内空気の採取位置なども4.6と同じである（図4.47参照）。

5.3.3 結果と考察

(1)風洞内の気流の特性

図5.10に、風洞壁面近傍の風速と乱れの強さの分布を示す。風速は壁面から20cmの位置での風速を1として基準化して表現している。壁面近傍の境界層の厚さは(a)の風種1で8～10cm、(b)の風種2で14cm、(c)の風種3で約8cmであり、風種2の境界層が最も厚いことがわかる。また、いずれの風種でも境界層内の風速の分布は壁面に近づくほど急激に風速が低下する指数的な分布形状を示しているといえる。乱れの強さは、いずれの風種でも、壁面に近づくほど大きくなる。平坦な部分の値は風種1が最も大きく、風種2、風種3の順に小さくなるが、壁面に最も近い壁面からの距離1cmのところでは、風種の差異による差異はそれほど大きくはないことがわかる。

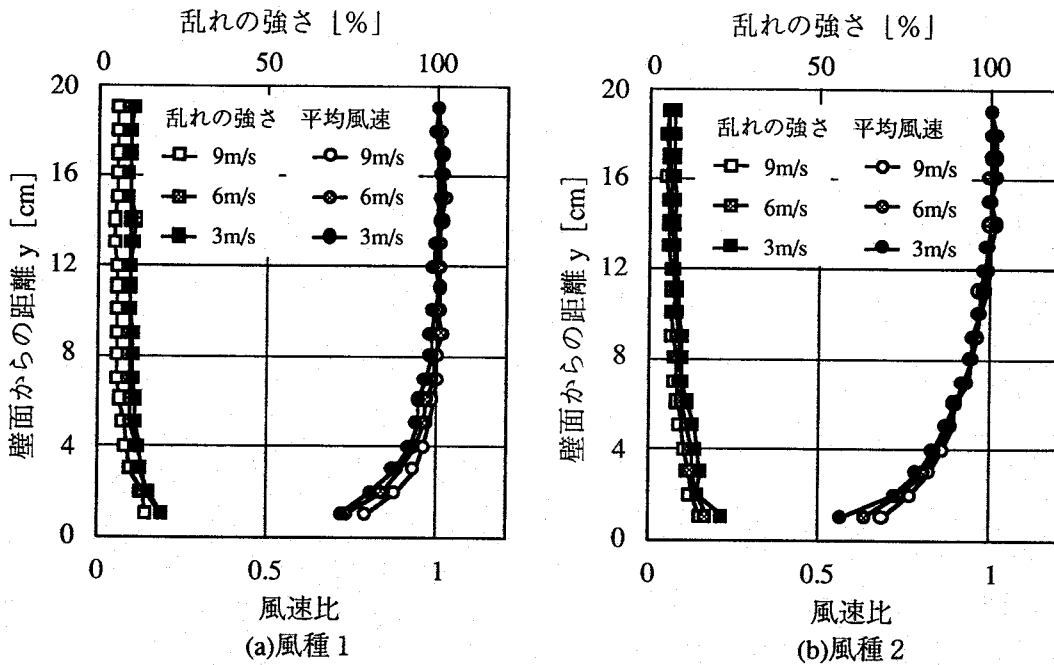
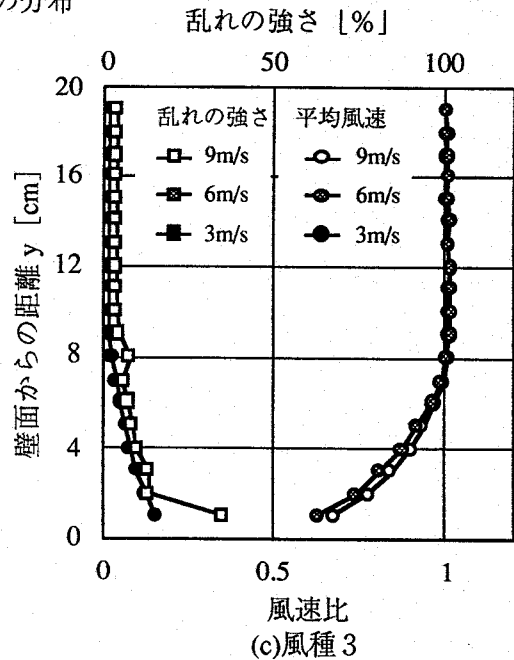


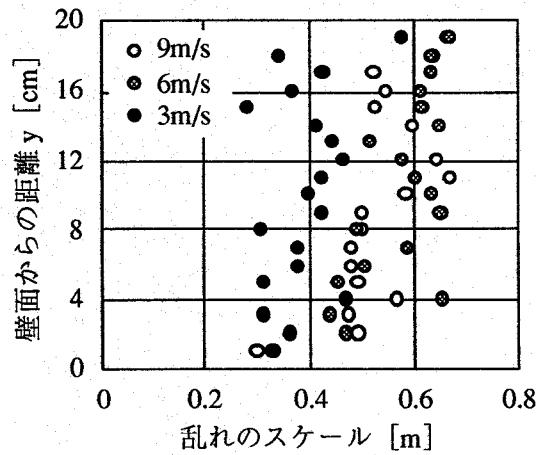
図5.10 風洞壁面近傍の風速と乱れの強さの分布

図5.11に、各風種における風洞壁面近傍の乱れのスケールの分布を示す。乱れのスケールは熱線風速計で測定した風速の時系列データの自己相関関数から算出したものである。いずれの条件においても乱れのスケールにはかなりのばらつきがみられる。このばらつきは、測定データの記録時刻の違いによるものと考えられ、同位置の乱れのスケールが時間的にかなり大きく変動していることを示唆している。また、

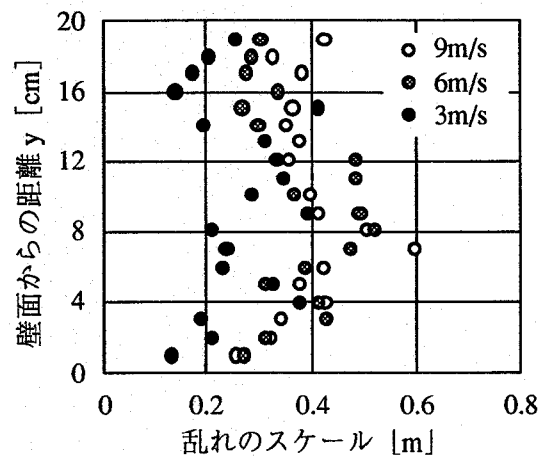


風速が大きいほど若干スケールが大きくなる傾向があるが、全体的に見ると風種 1 で0.3~0.65m、風種 2 で0.15~0.6m、風種 3 で0.03~0.2程度の範囲内にあり、乱れの強さの大きい風種ほど乱れのスケールが大きいことがわかる。風種 1 と 2 では測定胴の上流端に格子を設置しているため、かなり大きな乱れのスケールになっている。風種 3 は、風洞内に格子を設置していないため、壁面境界層の外側

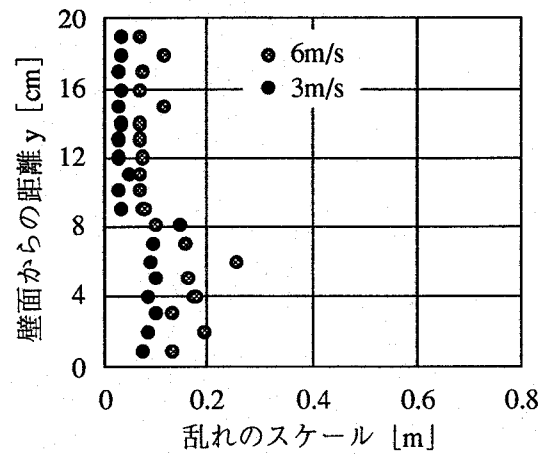
と考えられる壁面から8cm以上離れたところでは、乱れのスケールは非常に小さく、分布も小さいことがわかる。



(a)風種 1



(b)風種 2



(c)風種 3

図5.11 風洞壁面近傍の乱れのスケールの分布

(2)各種実験パラメーターと通気量との関係

本節の目的は、壁面近傍気流の混合層外端位置の風速から通気量を算定する単一開口通気量算定式について検討することであるが、換気実験で得られた通気量に関する基礎的知見を得るため、実験パラメーターと通気量との関係について考察を行う。

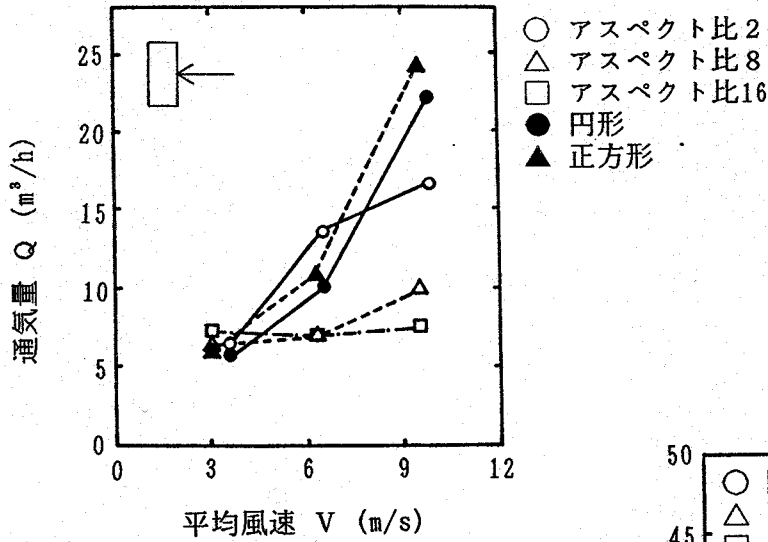
図5.12は、壁面から20cmの地点での風洞内の風速と通気量との関係を示したものである。この地点の風速は、本来設定風速と等しい筈であるが、実際には若干のずれが生じている。(a)は開口角 $\theta=90^\circ$ 、風種2、開口面積 225cm^2 の条件下で、開口形状による差異に着目したもので、(b)はアスペクト比2、開口面積 225cm^2 の開口で風種と開口角の差異に着目、(c)は開口角 $\theta=90^\circ$ 、風種2、アスペクト比2の長方形開口で開口面積の異なる条件を重ねたものである。

(a)より、長方形開口のアスペクト比が8或は16のときには平均風速と通気量は比例しないことがわかる。この原因としては、 3m/s では攪拌用の小型扇風機の作動による通気量の存在が大きな割合を占めていることが考えられる。小型扇風機による通気量は無風時正方形開口で $3.5\text{m}^3/\text{h}$ であり、風が吹いた場合には小さくなるものの0とはなっていないと考えられる。故に、いずれの条件においても風速 3m/s における通気量はもっと小さいと推測でき、アスペクト比8と16の開口においても風洞内の平均風速と通気量が比例する可能性は残される。その他の開口においては、風速 6m/s 、 9m/s における通気量が大きいため、明らかに通気量と平均風速とは比例している。円形開口と正方形開口の通気量に大きな差異は見られないが、長方形開口でアスペクト比が大きくなるのに従って通気量が小さくなるのは、 $\theta=90^\circ$ ではアスペクト比が大きいほど気流に沿う方向の開口長さが小さくなるために混合層外端位置が壁面に近づき、混合層外端位置での壁面近傍風速が低下することに原因していると考えられることができる。

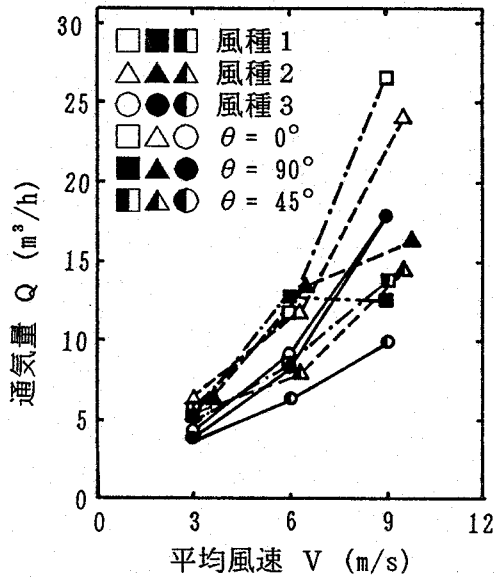
(b)より、 $\theta=90^\circ$ で $V=9\text{m/s}$ の2点を除いて、風洞内風速が高くなるに従って傾きが若干急になる傾向も認められるが、 3m/s での攪拌による通気量を考慮すれば通気量は風洞内風速にほぼ比例しているといつて実用的にはさしつかえないものと言えよう。一方、風洞内平均風速が同じであっても、乱れの強さの大きい風種ほど通気量は大きく、風種1では20%程度の通気量の増加が認められる。これは

主として図5.10に見られた平均風速の差異に原因していると考えられる。

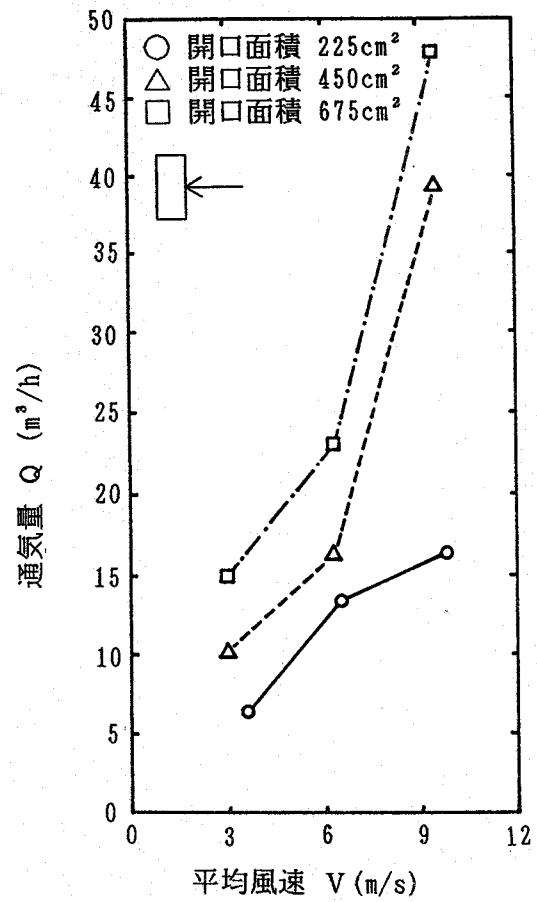
(c)より、開口面積が異なっても通気量は風洞内の平均風速にほぼ比例することがわかる。



(a)開口形状による差
($\theta = 90^\circ$, 風種2, 開口面積 225cm^2)



(b)風種と開口角による差
(アスペクト比2, 開口面積 225cm^2)



(c)開口面積による差
($\theta = 90^\circ$, アスペクト比2, 風種2)

図5.12 壁面から20cmの風洞内平均風速と通気量との関係

図5.13に、開口角と通気量との関係を示す。(a)は風種2、設定風速6m/sにおける各開口条件についての結果であり、(b)はアスペクト比2、面積225cm²の開口について、設定風速と風種が異なる実験結果を重ねたものである。

(a)より、開口面積225cm²では、開口角90°で開口形状による差異が最も大きくなり、45°で最も小さくなるのがわかる。スリットに近い開口（アスペクト比8, 16）では $\theta=0^\circ$ 即ち気流が開口の長辺に沿って流れるときに、最も通気量が大きくなるのがわかる。正方形に近い開口（アスペクト比1, 2）では開口角45°で通気量が最も小さくなる。開口角0°ではアスペクト比による通気量の差異はない。これらの傾向は、開口条件の違いによって混合層外端までの距離が異なり、その結果混合層外端位置での壁面近傍風速に差異が生じていることを示唆するものである。

(b)より、攪拌による通気量が大きいと考えられる設定風速3m/sを除き、両者の関係は良く似た傾向を示していると言える。

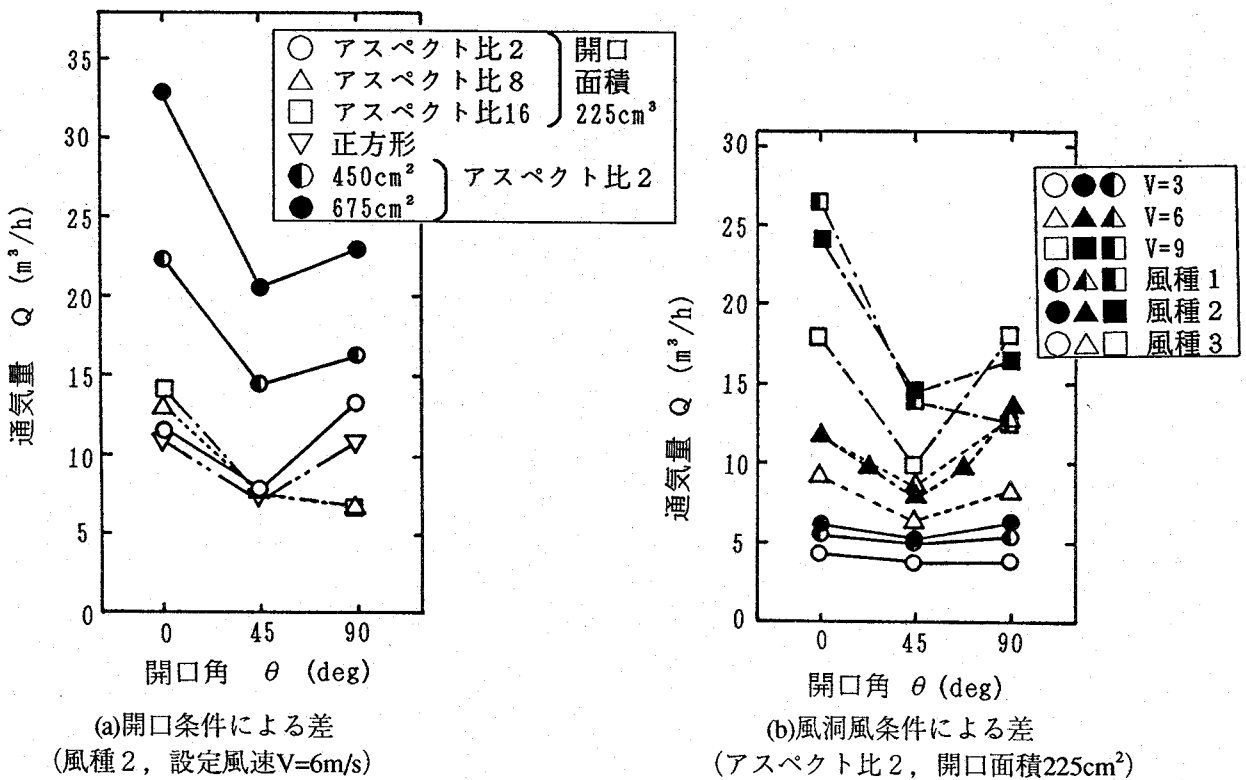


図5.13 開口角 θ と通気量との関係

図5.14は、設定風速6m/s、アスペクト比2の長方形開口について開口面積と通気量の関係を示したものである。いずれの条件においても開口面積と通気量が比例関係にあり、単一開口の通気量算定式が成り立つことを示している。

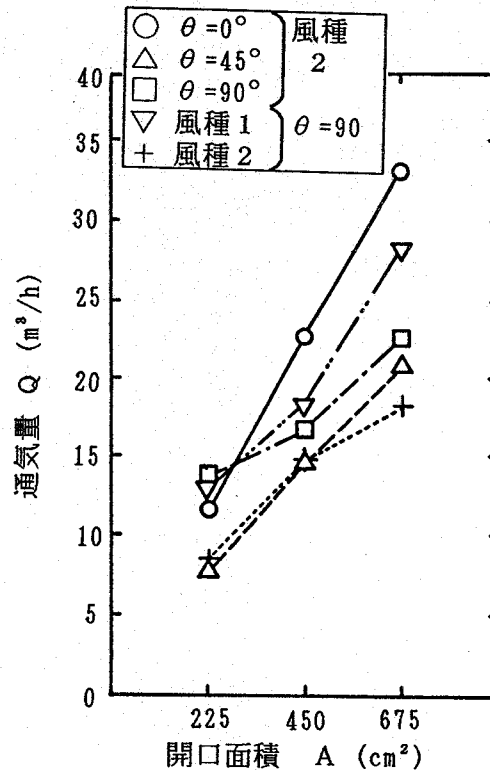


図5.14 開口面積と通気量との関係
(設定風速V=6m/s, アスペクト比2)

(3)混合層外端位置における壁面近傍風速の算出

第4章で提案した単一開口における通気量算定式は、通気量が混合層外端位置での壁面近傍平均風速と開口面積を入力としているため、本節での実験条件における通気量を算出するためには、混合層外端位置での風速を知らなければならない。

長方形開口で開口角が0° 或いは90° の場合には、第4章の(4.18)式によって混合層外端位置を算出することができる。しかし、それ以外の開口角の場合や円形開口の場合には、開口の場所によって混合層の厚さが異なる考えられるため、混合層外端位置を(4.18)式で一つに定めることができない。そこで、そのような場

合の混合層外端の代表位置を、(4.18)を用いて算出される開口面下流端での混合層外端位置の幾何平均として求めることにする。壁面流の風速分布が壁面からの距離に対して線形ではないため、本来は混合層外端位置風速の分布を考慮した重みづけ平均をするべきであるが、算定式の予測精度に鑑みればあまりに煩雑である。

以下に、開口角が θ ときの混合層外端位置の算出式を示す。

長方形開口の場合には、開口の長辺を b 、短辺を a 、開口の長辺に対して気流がなす角を θ とすると、図5.15に示すように開口部下流端における混合層外端までの距離を幾何平均することで、平均の混合層外端位置 L_{ave} を求める次式を誘導することができる。

$$L_{ave} = \frac{ab}{10(b \sin\theta + a \cos\theta)} \quad (5.3)$$

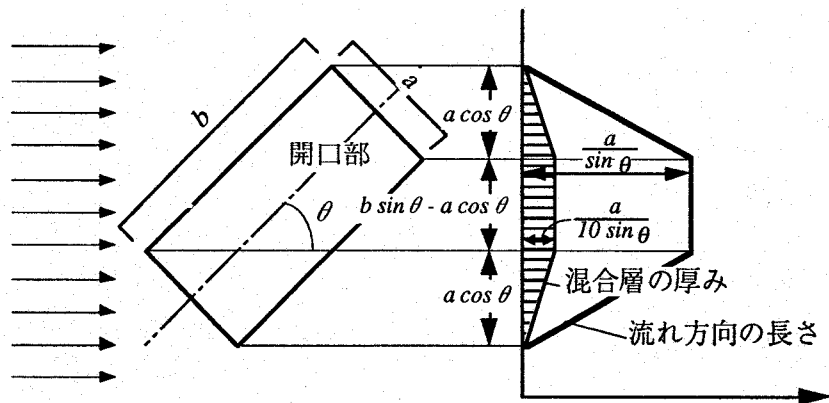
直径 r の円形開口の場合には、図5.15(c)より、次式を誘導できる。

$$L_{ave} = \frac{\pi r}{20} \quad (5.4)$$

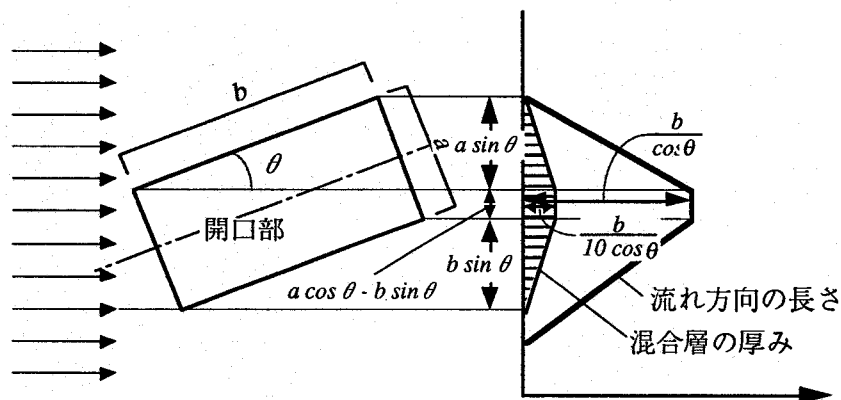
円形開口の場合には、混合層外端位置 L_{ave} が開口角に依存しないことは言うまでもない。これらの式を用いれば、表5.3のすべての開口条件について、混合層外端位置を算出することが可能である。なお、(5.3)式は $\theta=0^\circ$ 、 90° の場合には、(4.18)式に等しい。

混合層外端位置がわかれば、図5.10の風速分布からその地点での壁面近傍風速を算出しなければならない。風速は壁面から1cmおきの地点においてのみ測定しているため、図5.16に示すように、各条件における壁面近傍での風速分布を指数関数で最小二乗法により回帰し、任意の地点の風速を算出できるようにした上で、全実験条件における混合層外端位置風速を算出した。風種3の風速9m/sについてはデータが失われているため、6m/sの風速分布を援用した。

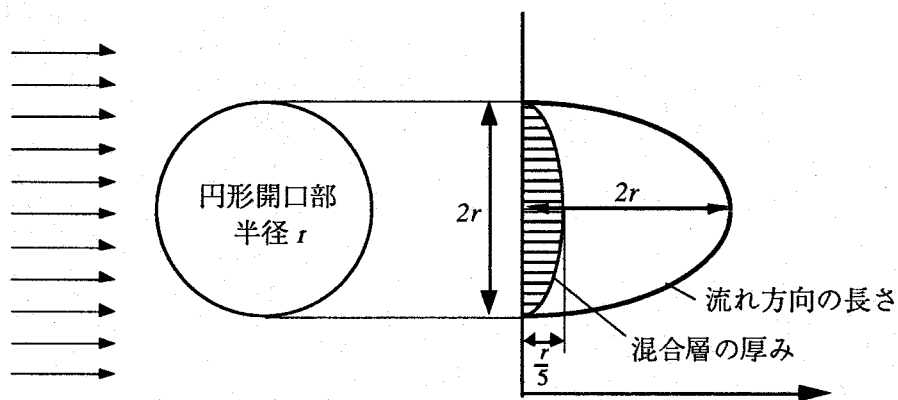
算定した混合層外端位置とその位置での壁面近傍風速の一覧を表5.4に示す。



(a)CASE1



(b)CASE2



(c)CASE3

図5.15 開口部下流端における混合層厚さ

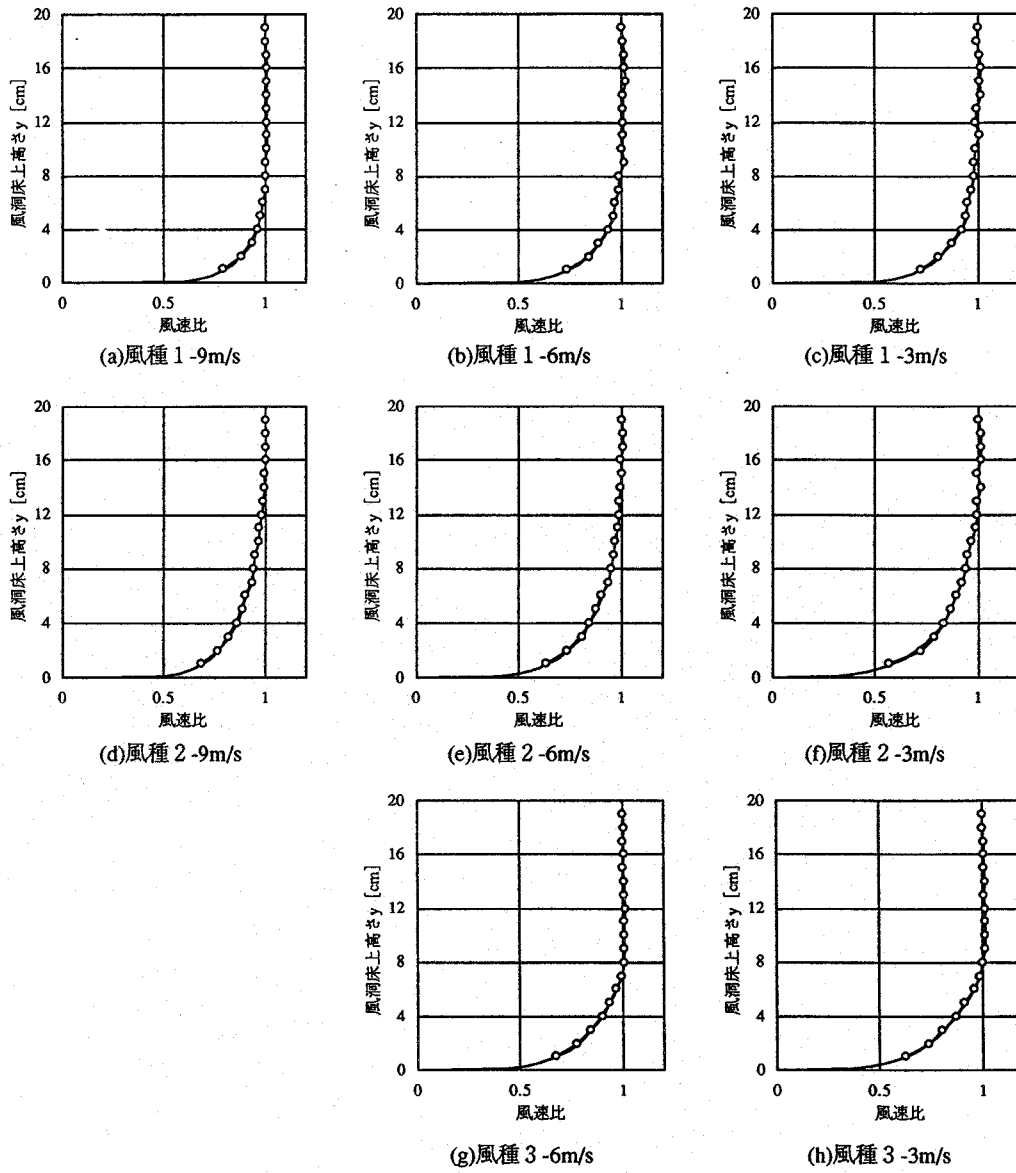


図5.16 壁面近傍風速の曲線近似

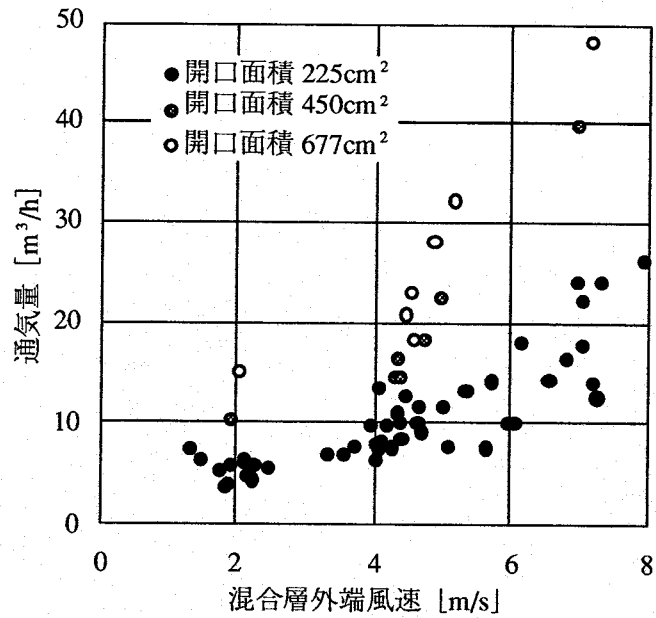
表5.4 混合層外端位置一覽表

実験 番号	風種	設定風速 [m/s]	開口	開口角 [°]	開口面積 [cm ²]	風速 [m/s]	混合層外端 までの距離 [cm]	混合層外 端風速比	混合層外 端風速 [m/s]
1	2	6	○	0	225	6.5	1.33	0.68	4.40
2	2	6	□	0	225	6.3	1.50	0.69	4.36
3	2	6	□	45	225	6.3	1.06	0.65	4.08
4	2	6	□-A2小	0	225	6.3	2.12	0.74	4.67
5	2	6	□-A2小	22.5	225	6.3	1.25	0.67	4.21
6	2	6	□-A2小	45	225	6.3	1.00	0.64	4.03
7	2	6	□-A2小	67.5	225	6.3	0.95	0.63	3.99
8	2	6	□-A2小	90	225	6.3	1.06	0.65	4.08
9	2	6	□-A2中	0	450	6.3	3.00	0.79	4.99
10	2	6	□-A2中	45	450	6.3	1.41	0.68	4.31
11	2	6	□-A2中	90	450	6.3	1.50	0.69	4.36
12	2	6	□-A2大	0	677.1	6.3	3.68	0.82	5.20
13	2	6	□-A2大	45	677.1	6.3	1.73	0.71	4.49
14	2	6	□-A2大	90	677.1	6.3	1.84	0.72	4.54
15	2	6	□-A8	0	225	6.3	4.24	0.85	5.34
16	2	6	□-A8	45	225	6.3	0.67	0.59	3.72
17	2	6	□-A8	90	225	6.3	0.53	0.57	3.56
18	2	6	□-A16	0	225	6.3	6.00	0.91	5.72
19	2	6	□-A16	45	225	6.3	3.26	0.81	5.08
20	2	6	□-A16	90	225	6.3	3.75	0.53	3.33
21	2	9	○	0	225	9.8	1.33	0.72	7.06
22	2	9	□	0	225	9.5	1.50	0.73	6.97
23	2	9	□-A2小	0	225	9.5	2.12	0.77	7.34
24	2	9	□-A2小	45	225	9.5	1.00	0.69	6.56
25	2	9	□-A2小	90	225	9.8	1.06	0.70	6.83
26	2	9	□-A2中	90	450	9.5	1.50	0.73	6.97
27	2	9	□-A2大	90	677.1	9.5	1.84	0.76	7.19
28	2	9	□-A8	90	225	9.5	0.53	0.63	5.97
29	2	9	□-A16	90	225	9.5	3.75	0.60	5.67
30	2	3	○	0	225	3.6	1.33	0.63	2.25
31	2	3	□	0	225	3	1.50	0.65	1.94
32	2	3	□-A2小	0	225	3	2.12	0.71	2.12
33	2	3	□-A2小	45	225	3	1.00	0.58	1.74
34	2	3	□-A2小	90	225	3.6	1.06	0.59	2.12
35	2	3	□-A2中	90	450	3	1.50	0.65	1.94
36	2	3	□-A2大	90	677.1	3	1.84	0.68	2.04
37	2	3	□-A8	90	225	3	0.53	0.49	1.48
38	2	3	□-A16	90	225	3	3.75	0.45	1.35
39	3	6	○	0	225	6	1.33	0.71	4.29
40	3	6	□-A2小	0	225	6	2.12	0.79	4.71
41	3	6	□-A2小	45	225	6	1.00	0.68	4.05
42	3	6	□-A2小	90	225	6	1.06	0.68	4.10
43	3	6	□-A2中	90	450	6	1.50	0.73	4.39
44	3	6	□-A2大	90	677.1	6	1.84	0.76	4.58
45	3	9	□-A2小	0	225	9	2.12	0.79	7.07
46	3	9	□-A2小	45	225	9	1.00	0.68	6.08
47	3	9	□-A2小	90	225	9	1.06	0.68	6.15
48	3	3	□-A2小	0	225	3	2.12	0.75	2.24
49	3	3	□-A2小	45	225	3	1.00	0.62	1.87
50	3	3	□-A2小	90	225	3	1.06	0.63	1.90
51	1	6	○	0	225	6	1.33	0.77	4.64
52	1	6	□-A2小	0	225	6	2.12	0.84	5.02
53	1	6	□-A2小	45	225	6	1.00	0.74	4.43
54	1	6	□-A2小	90	225	6	1.06	0.74	4.47
55	1	6	□-A2中	90	450	6	1.50	0.79	4.74
56	1	6	□-A2大	90	677.1	6	1.84	0.82	4.90
57	1	9	□-A2小	0	225	9	2.12	0.88	7.93
58	1	9	□-A2小	45	225	9	1.00	0.80	7.20
59	1	9	□-A2小	90	225	9	1.06	0.81	7.26
60	1	3	□-A2小	0	225	3	2.12	0.82	2.45
61	1	3	□-A2小	45	225	3	1.00	0.72	2.16
62	1	3	□-A2小	90	225	3	1.06	0.73	2.18

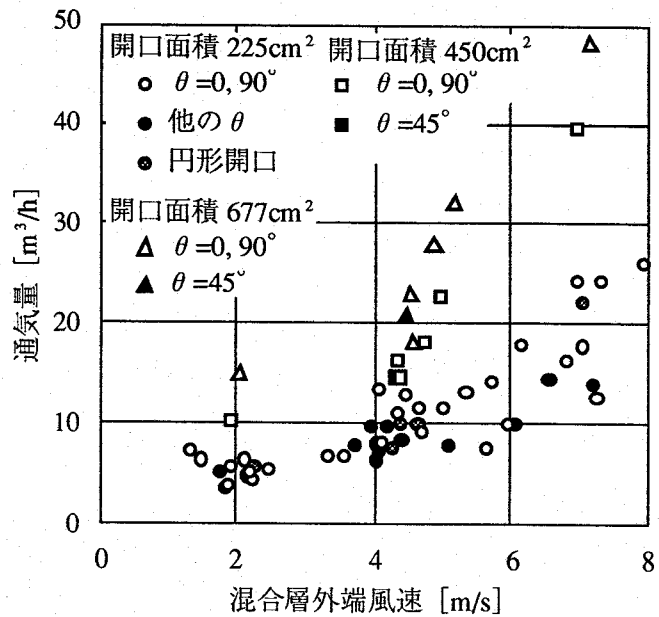
○：円形開口 □：正方形開口 (A2：アスペクト比2 A8：アスペクト比8 A16：アスペクト比16)

(4) 混合層外端風速と通気量との関係

図5.17に(4.18)式及び(5.3), (5.4)式によって求めた各開口条件における混合層外端位置における壁面近傍風速と測定した通気量との関係を示す。(a)は開口面積による差をみるため開口面積によってプロットを変えたもの、(b)は開口面積と開口角によって、(c)は風種によってプロットを変えたものである。

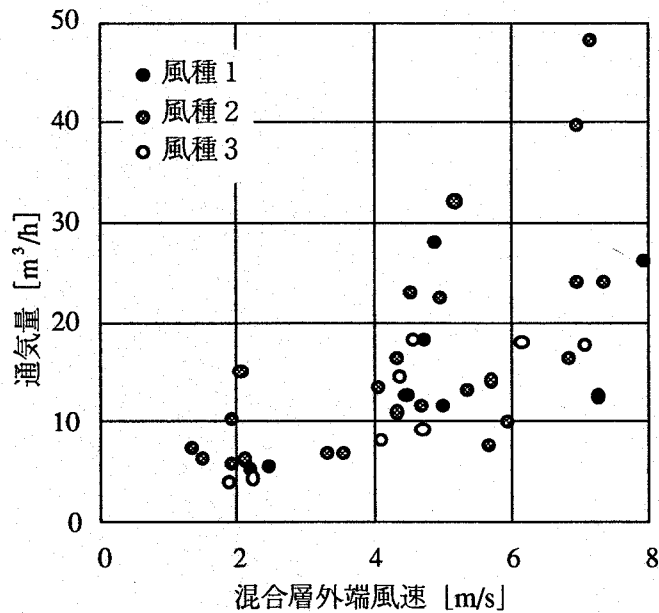


(a) 開口面積による差



(b) 開口面積及び開口角による差

図5.17 混合層外端位置の壁面近傍風速と通気量との関係



(c)風種による差

図5.17 混合層外端位置の壁面近傍風速と通気量との関係

同図(a)より、開口面積が同じならば、通気量は混合層外端風速にほぼ比例することがわかる。開口面積 225cm^2 については、開口条件が非常に多いため（表5.4参照）、プロットのばらつきは他の面積よりも大きいことがわかる。

(b)を見ると、(4.18)式によって混合層外端位置を計算した風向角 0° 、 90° の場合と、(5.3)、(5.4)式を用いた他の開口角及び円形開口の場合に有為な傾向の差異は認められないことがわかる。故に、(5.3)、(5.4)式による混合層位置の算出は妥当であると言える。

(c)から、風種による差異は全体のばらつきに比較すると顕著ではなく、壁面気流の乱れが通気量に与える影響は混合層外端風速に比べると非常に小さいといえよう。

(5)混合層外端風速と単位開口面積当たりの通気量との関係

図5.18は、混合層外端位置における壁面近傍風速と通気率（単位開口面積当たりの通気量）との関係を示したものである。図中の●は、4.6での測定値であり、(4.18)式の基になったデータである。今回の実験値はすべて○で表しているが、

全体的に4.6の実験値●の方が今回の測定値○より若干上に位置していることがわかる。この差異の原因としては、実験に用いた開口条件の違い、壁面に沿って流れる気流の境界層の風速分布、乱れの特性的差などを考えることができる。

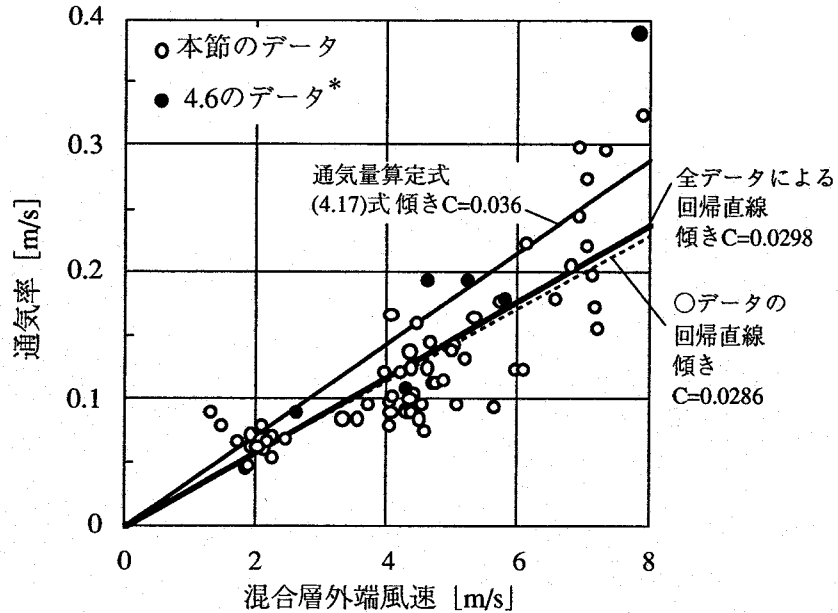


図5.18 混合層外端位置の壁面近傍風速と通気率
(単位開口面積当たりの通気量) との関係

*4.6のデータは混合層外端を(4.18)式で求めたもの

また、図中には通気量算定式(4.17)と、本節での測定値に対して回帰した直線、及び4.6、本節合わせた全データについて回帰した直線を併記している。回帰直線の傾きは(4.17)式の定数Cに相当する。これらから、今回の測定値の殆どが通気量算定式(4.17)の直線よりも下に位置しており、(4.17)式では通気量を大きめに見積ってしまう傾向のあることがわかる。故に(4.17)式の適用範囲を広げるためには、定数Cの値を見直す必要があるものと言える。全データについての回帰直線の傾きは図より0.0298であるので、 $C=0.03$ とすることが望ましいといえよう。以上より、(4.17)式の定数部を修正すると、単一開口の通気量予測式は、次式の様に表される。

$$Q = 0.03 A U_L \quad (5.5)$$

ただし、

A: 開口面積 [m²]

U_L: 混合層外端風速 [m/s]

混合層外端位置は、(5.3), (5.4)式で求めるものとする。

5.3.4 まとめ

本節での結果を以下にまとめる。

(1)アスペクト比1～8の長方形開口と円形開口で種々の開口角 θ に対して、混合層外端位置は、開口部下流端における混合層の厚みの幾何平均を求める、(5.3)式及び(5.4)式で算出することが妥当である。

(2)単一開口における通気量算定式(4.17)式の適用範囲を、種々の開口角 θ を持つアスペクト1～8の長方形開口と円形開口まで広げるためには、定数部Cを0.03とすれば良い。

5.4 風洞床面に設置した模型箱の換気

5.4.1 本節の概要

前節までの検討によって、種々の形状を持つ単一開口における通気量を予測するための通気量算定方法として、(5.3)或いは(5.4)式によって混合層外端位置を算出し、(5.5)式によって通気量を求める手法を提案することができた。

しかし、この手法を導く元になった実験は、定常的に一定風速の気流が流れる風洞の側壁面に単一開口を持つ模型箱を設置するという手法によっていた。実際の建物のなかの外壁に面する一室が外壁面に単一開口を持っている場合、開口前を流れる壁面気流は自身の建物の影響を受け、風向によっては風洞内の風とかなり異なった性質の乱れをもつものと推察される。

故に本節では、種々の風を吹かせた風洞内の床面に単一開口を持つ30cm角の立方体模型箱を設置し、より実際の建物に近い条件下で単一開口の換気実験を行い、第4章で提示した単一開口通気量算定式の適用性について検討を行う。風洞風としては、極力風速分布をなくした乱れの異なる二種類の風（以下一様流と呼ぶ）と大気の接地境界層を模擬した境界層流（以下境界層流と呼ぶ）の計3種類の風を用いた。実験では開口側の条件は変えず、上空風の風速とその乱れ性状及び風向をパラメータとする。

5.4.2 実験概要

大阪大学工学部研究用風洞（4.5の表4.7、5.3の図5.8参照）内の床面に直径40mmの円形開口（2mm厚アクリル製）を持つ内寸30cm角の木製立方体模型箱を設置し、その箱内を攪拌しながら CO_2 を用いたトレーサーガス減衰法で箱内換気量を測定した。模型箱内部には、箱内を一様に攪拌するための攪拌装置を取付けた。その模型箱の概要を図5.19に示す。風洞内の模型箱の設置状況を図5.20に示

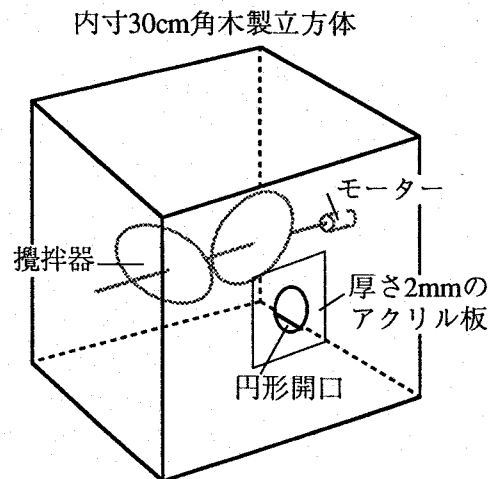


図5.19 模型箱の概要
(ガスサンプリング用のチューブは省略)

す。

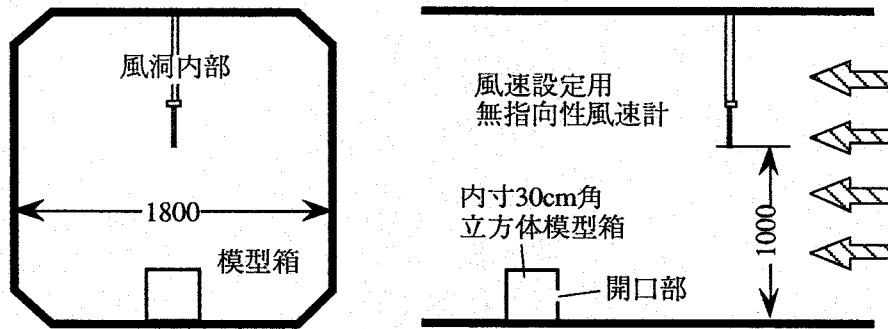


図5.20 風洞の概要 単位 [mm]

風洞の測定胴の入口には、格子が取付けられるようになっており、風洞内の乱れを変えることができる。そこで、格子を設置しない場合と設置した場合の二通りの一様流を用いた。また、大小のラフネスを模型箱の上流側の風洞床面に設置することによって、 $\alpha=1/5$ の指数則に従う接地境界層を再現し、合計3種類の風を用いて換気実験を行う。

実験条件を表5.5に示す。変化させたパラメータは、風洞内の風、設定風速、風向の三つである。風速の設定は風洞床面上100cmの地点で無指向性風速計によって測定した平均風速によって行った。風向は図5.21に示すように開口がある模型箱の壁面への入射角で定義している。

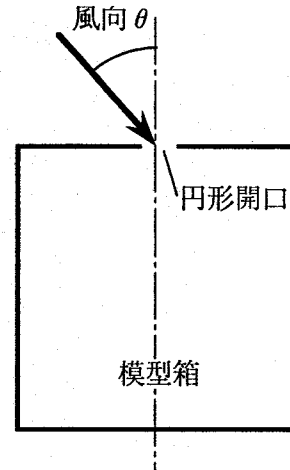


図5.21 風向説明図 (平面図)

表5.5 実験条件

設定風速 [m/s]	3, 6, 7.5, 9	4.5, 6.75, 9
風洞風	格子なし, 格子あり	境界層流
風向 [°]	0, 22.5, 45, 67.5, 90, 135, 180	0, 22.5, 45, 67.5, 90, 101.25, 112.5, 135, 180

模型箱内部を一様に攪拌しながら、箱内にCO₂を注入し、その濃度減衰から換気回数を求め、箱容積27ℓを乗じたものを通気量と見なす。箱内部は、4500pp前後になるまでCO₂を注入し、開口を開けた状態での濃度減衰を連続的に測定する。外気基準の濃度が初期濃度の約0.3倍となったところの濃度を用いて換気回数を算出する。換気回数に箱容積を乗じたものを開口部通気量とする。濃度測定には赤外線吸収式濃度分析器（URA-107 島津製作所）によって行った。箱内の攪拌は、あらかじめ箱内への外気の侵入方向を可視化実験によって確認し、その侵入気流を妨げない向きに攪拌器を回転させるようにした。

換気実験に先だって、各風洞風条件における風洞内の風速の鉛直分布を熱線風速計（I型プローブ、システム7102 日本科学工業）によって測定するとともに、各条件における開口前の壁面気流速度の分布を、開口のない状態で熱線風速計によって測定した。

5.4.3 結果と考察

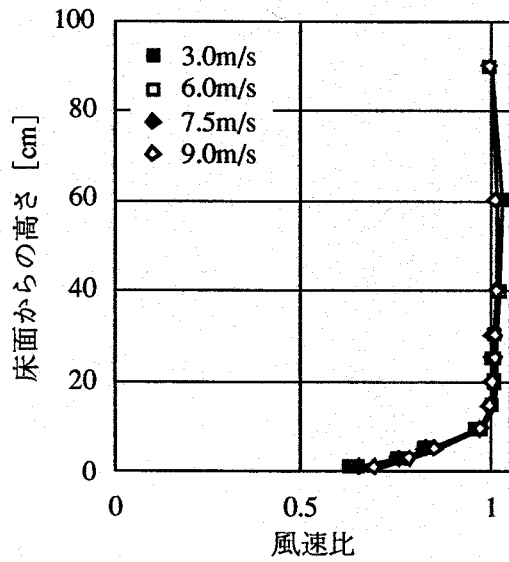
(1) 風洞風の特性

図5.22に各風洞風におけるアプローチフローの風速の鉛直分布を示す。(a)が格子を設置しない場合、(b)が格子を設置した場合、(c)が接地境界層を作成した場合である。横軸の風速は、(a)と(b)では床面上90cm、(c)では100cmの地点の風速を基準にした風速比で表している。図より、一様流ではいずれも境界層の厚さは15cm前後であるが、境界層流では約85cmとかなり厚いことがわかる。模型箱の開口は、床面から15cmの所に開口中心が位置するように取付けられているので、一様流の境界層厚さはちょうど開口の高さに相当している。また、一様流では境界層外の風速は一様で分布がないことがわかる。

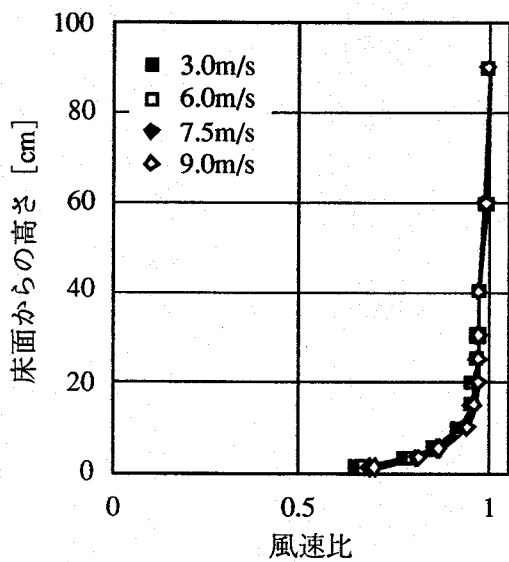
図5.23は、各風洞風条件におけるアプローチフローの乱れの強さの鉛直分布を示したものである。(a)の格子なしの一様流の場合には、境界層外の乱れの強さは非常に小さく、1%以下であり、(b)の格子がある場合には境界層外で4～5%であることがわかる。(c)の境界層流では、乱れの強さは非常に大きく、床面上40cmで10%、10cm以下では20%を越えることがわかる。

アプローチフローは建物に当たってから建物によってその方向や乱れを変えて

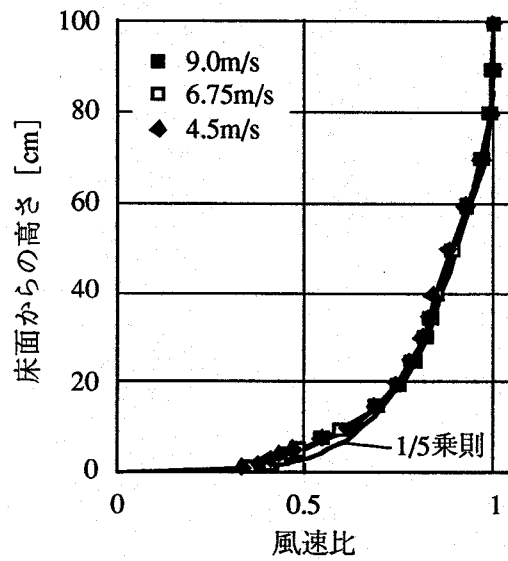
建物の回りを流れ、ときに剥離するため、開口前を流れる風はアプローチフロー
 そのままでは決してないが、開口前の風の乱れは、境界層、格子、格子なしの順
 に小さくなるものと予想できる。



(a)一様流 (格子なし)

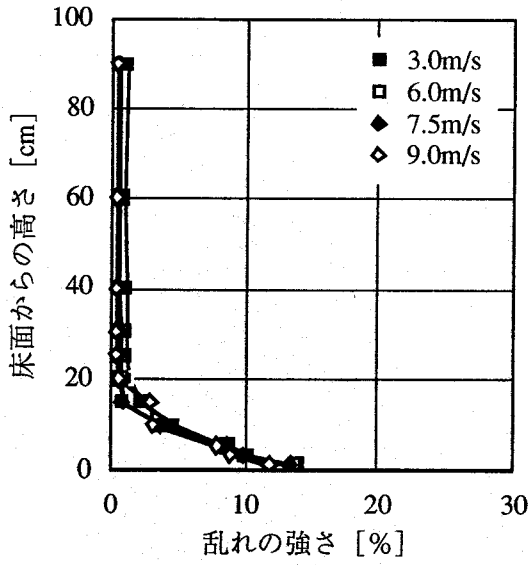


(b)一様流 (格子あり)

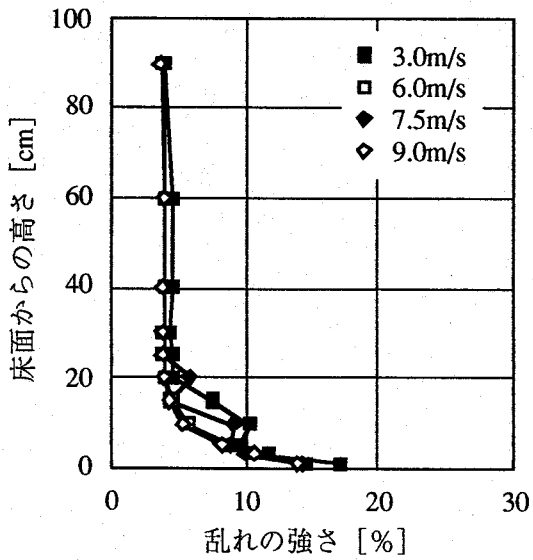


(c)境界層流

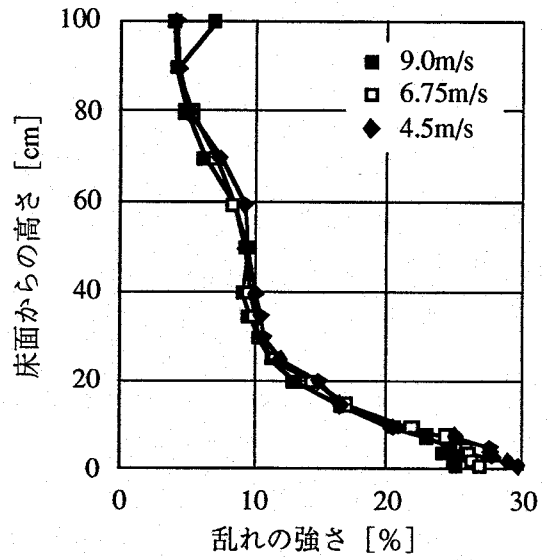
図5.22 風洞内の風速の鉛直分布



(a)一様流 (格子なし)



(b)一様流 (格子あり)



(c)境界層流

図5.23 風洞内の乱れの強さの鉛直分布

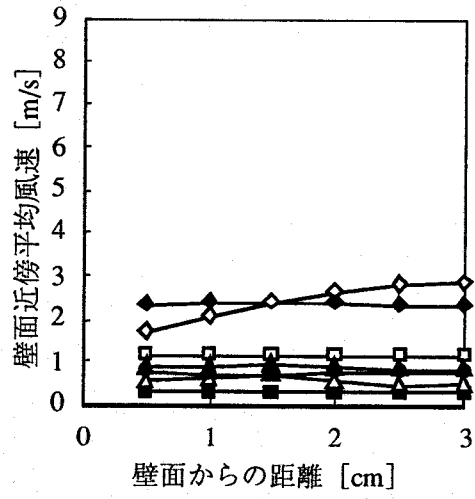
(2) 模型箱の壁面近傍気流の特性

図5.24は、開口を閉じて測定した、開口中心の前の壁面近傍風速分布である。測定は風速計のプロープのタングステンワイヤーが壁面に対して常に垂直になるようにしておこなったため、壁面に平行な風速成分を主として測定している。いずれの条件においても、風向 67.5° 以外の風向の場合は、風速分布がほぼ一様であることがわかる。 67.5° での風速分布は、壁面境界層によるものではなく、建物回りの流線の変化が大きいことによると考えられる。

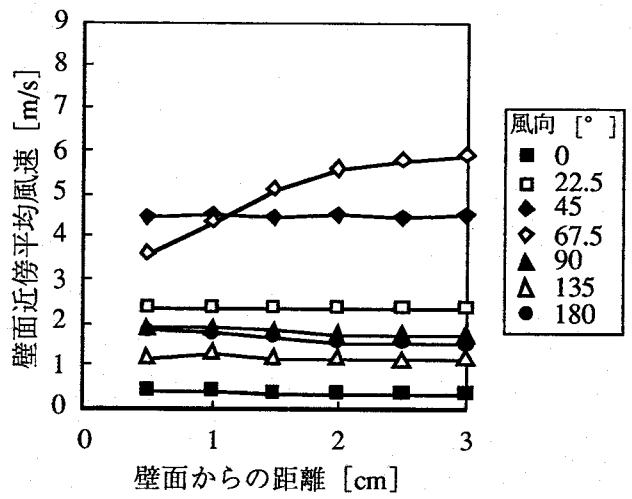
図において風速分布が見られないことから、壁面気流の境界層は 5mm 以下であると考えられる。

一方、風速の絶対値は、設定風速が大きいほど大きいが、同じ設定風速、同じ風洞風ならば 45° 或いは 67.5° が最も大きく、 22.5° 或いは 90° と続き、 0° 或いは 180° で最も小さい。一様流では、最も小さくなるのは風向 0° であるのに対し、境界層流では 180° で最も小さくなるのが興味深い。風速の絶対値から判断すると、開口のある壁面上流端部で剥離が生じるのは、 67.5° から 90° のあいだであると推察することができる。

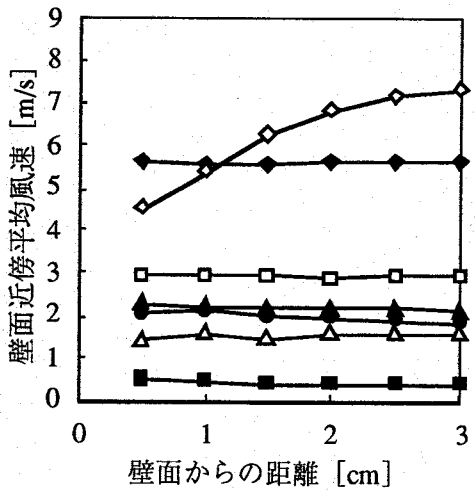
前節で単一開口部に生じる混合層外端までの距離の算定式(5.3), (5.4)式を提案したが、それによると、径 40mm の円形開口の場合、混合層外端までの距離の代表値は約 3mm 余りと算定される。この地点での混合層外端の壁面近傍流の風速は、技術的な問題から本節では測定することはできなかった。しかし、図5.24で 5mm の地点での風速が他の地点の風速と殆ど差がなかった (67.5° を除く) ことから、壁面から 3mm の地点の風速は 5mm 地点の風速と大きくは変わらない可能性はある。故に以下では、壁面から 5mm 地点の風速を混合層外端位置の壁面気流速に等しいとして考察を進めることにする。



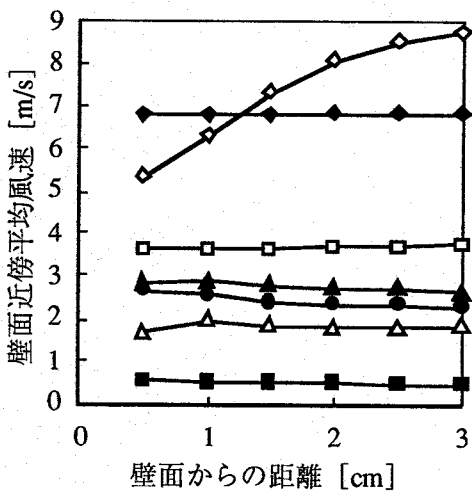
(a)格子なし 3.0m/s



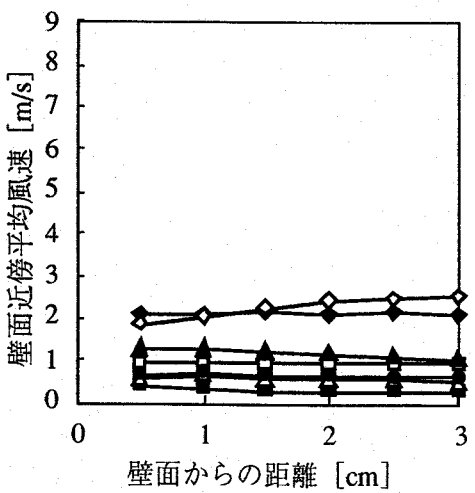
(b)格子なし 6.0m/s



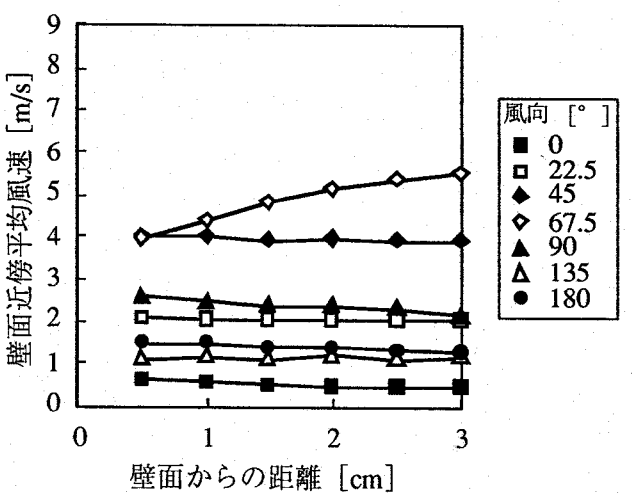
(c)格子なし 7.5m/s



(d)格子なし 9.0m/s



(e)格子あり 3.0m/s



(f)格子あり 6.0m/s

図5.24 模型箱壁面近傍風速の分布

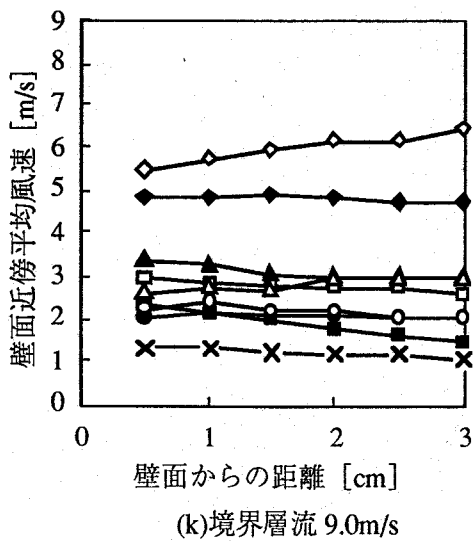
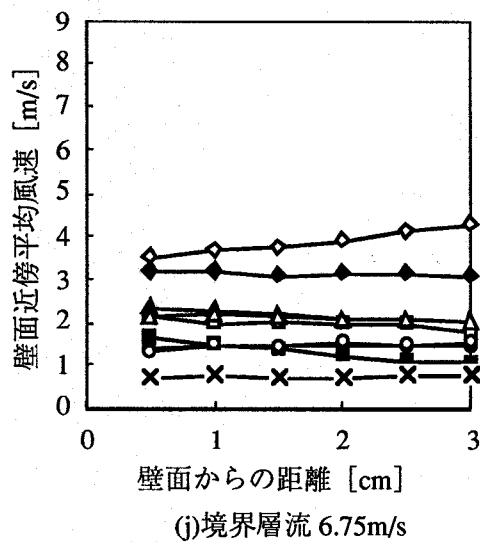
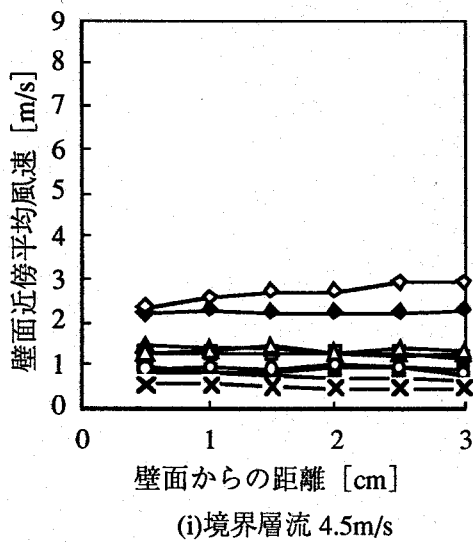
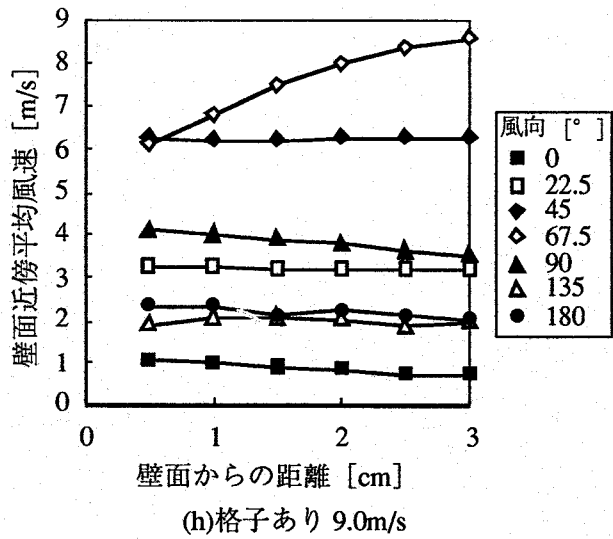
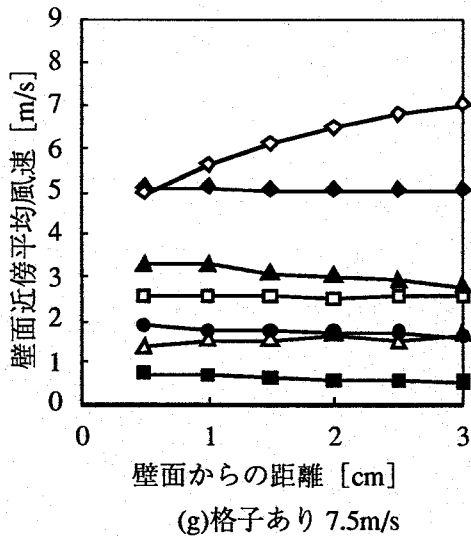
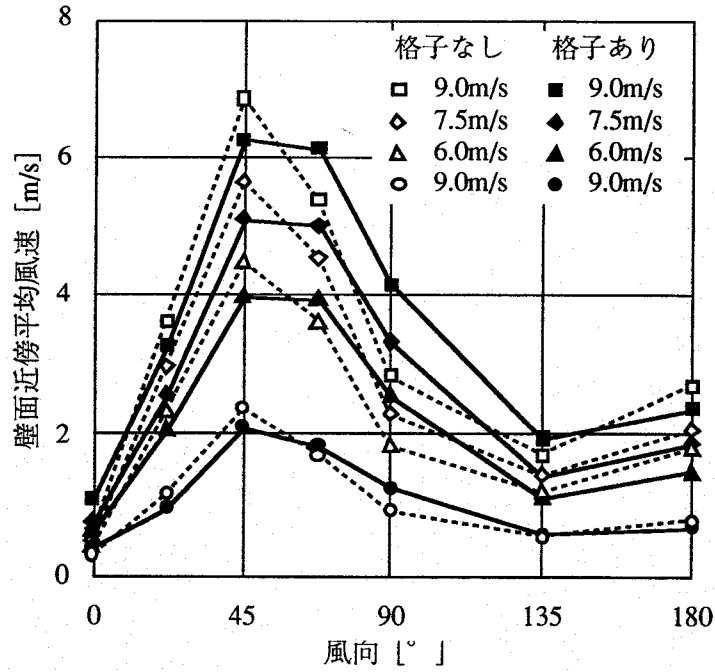
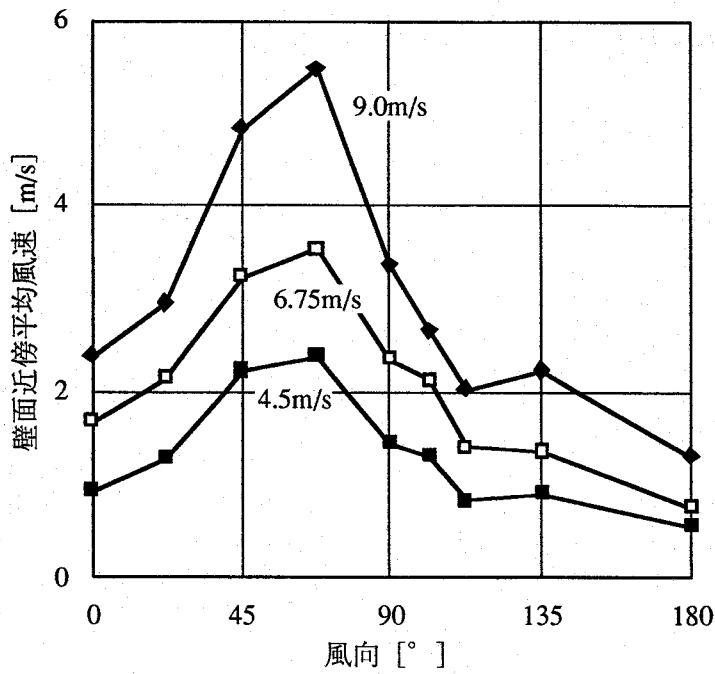


図5.24 模型箱壁面近傍風速の分布

図5.25は、風向と壁面から5mmの地点の風速（以下単に壁面近傍風速と呼ぶ）との関係を示す。(a)は一様流の場合、(b)が境界層流の場合の図である。



(a)一様流



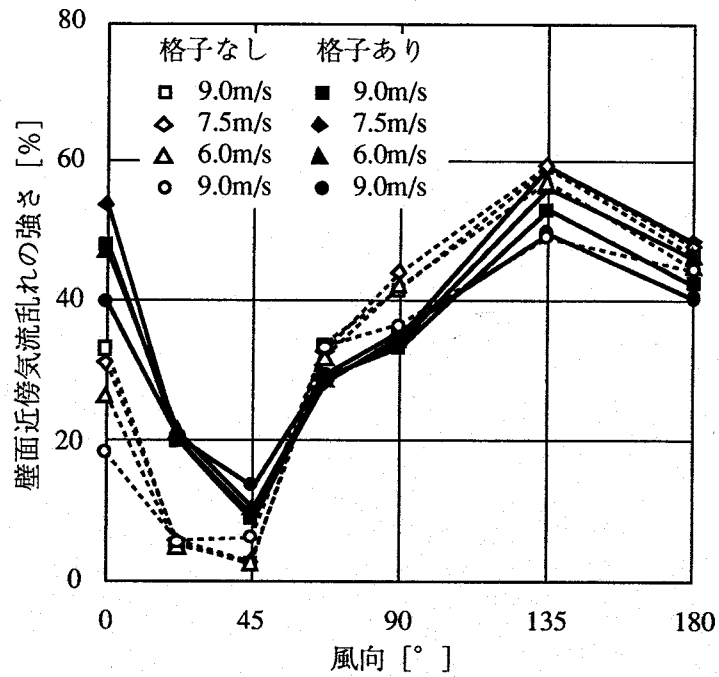
(b)境界層流

図5.25 風向と壁面近傍平均風速（壁面から5mm地点）との関係

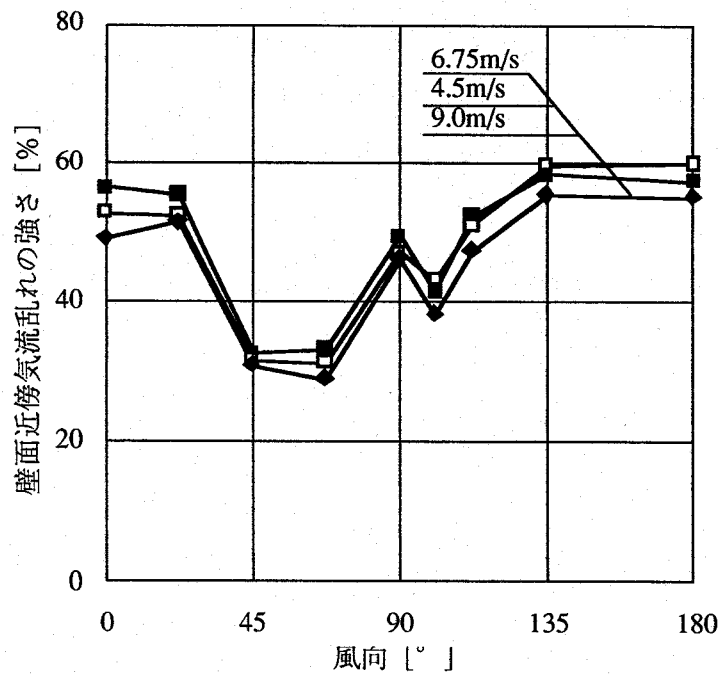
一様流の場合には、格子の有無による差異はあまりなく、いずれの設定風速においても風向 45° で最も大きな値となっていることがわかる。また、風向 0° での風速が最も小さい。境界層流の場合にも変化傾向は似ているが、設定風速によらず 67.5° で最大値を取っている点、風向 0° での値が比較的大きい点などが異なっている。

図5.26は、風向と壁面から5mmの地点の乱れの強さとの関係を示す。(a)は一様流の場合、(b)が境界層流の場合である。いずれの風洞風条件においても、設定風速による乱れの強さの差は殆ど見られない。また、一様流の場合における格子の有無による差は、風向 0° と 22.5° において顕著に現われるが、その他の風向においては大きな差はみられない。一様流では、風向 22.5° と 45° での乱れの強さが他の風向に比べて小さく、数%から20%であるが、他の風向では30%から60%の範囲内の値を取り、 135° で最大値を示すことがわかる。境界層流の場合には、風向による差異は一様流ほど大きくはなく、風向 45° と 67.5° で30%程度、風向 135° ～ 180° で60%となっている。風向が 67.5° 以上では、一様流と境界層流の乱れの強さには大きな差異はないといえよう。

前節5.3の実験では、壁面近傍の気流の乱れの強さは概ね20%以下であり、乱れの強さだけで判断すれば本節の実験における一様流の 22.5° と 45° の風に相当していることがわかる。市街地に建つ実際の建物は、周辺の建物によって形成される接地面境界層の中にあるため、開口前を流れる気流の乱れの強さは最低でも30%以上であることになり、前節で提案した単一開口通気量予測式の適用範囲を外れる可能性が高いことが示唆されよう。



(a)一様流



(b)境界層流

図5.26 風向と壁面近傍気流の乱れの強さ（壁面から5mm地点）との関係

図5.27は、風向と壁面から5mmの地点の乱れのスケールとの関係を示したものである。乱れのスケールは風速変動の自己相関関数の時間積分より算出した。(a)は一様流の場合、(b)が境界層流の場合の図である。縦軸は対数軸で表現している。

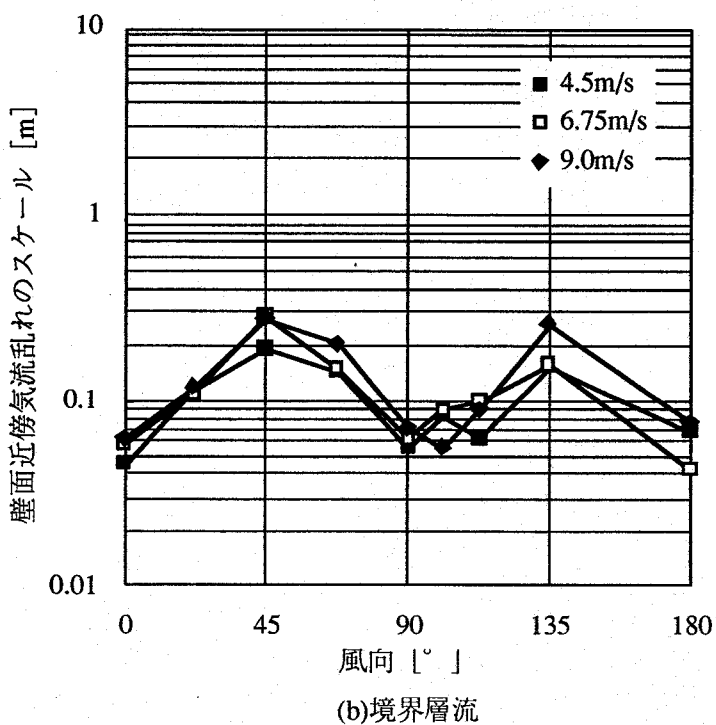
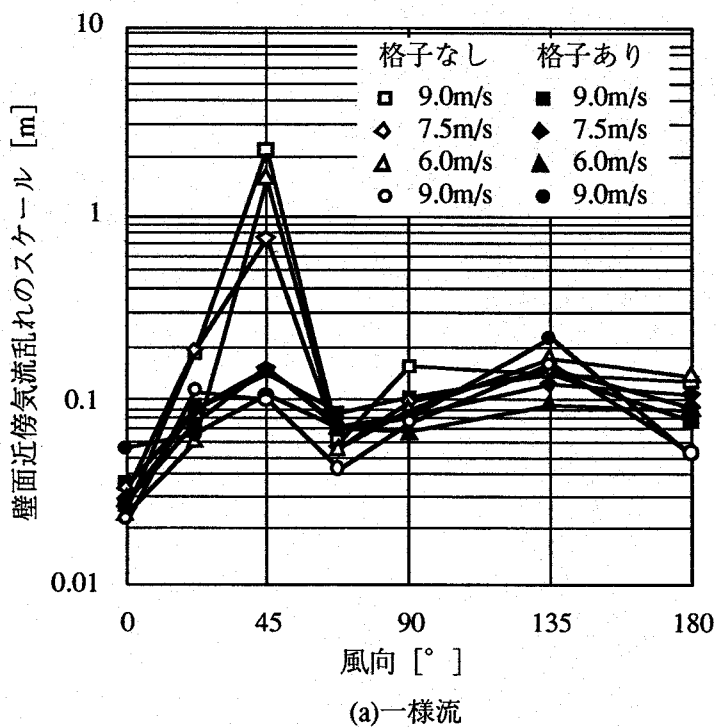


図5.27 風向と壁面近傍気流の乱れのスケール（壁面から5mm地点）との関係

一様流では風向 0° のときに最も小さく、 $2\text{cm}\sim 6\text{cm}$ 程度であり、それ以外の風向では凡そ数 cm から 20cm の値を取る。ただし、格子がない場合で風向 45° での乱れのスケールが最大 2m と非常に大きいことがわかる。これは、気流がもつ乱れではなく、風洞風の周期的な風速変動があらわれたものと考えられる。境界層流の場合には、風向 0° 、 $90^\circ\sim 112.5^\circ$ で 4cm から 10cm 、それ以外の風向で 10cm から 20cm の値となっている。全体的にみて、一様流と境界層流の乱れのスケールに顕著な差異は認められないことがわかる。以上より、本節の実験でも前節での実験同様、開口前の気流の乱れのスケールは開口と同程度の大きさから数倍の大きさのものであることがわかる。

(3) 模型箱内の攪拌の効果について

一様流のいくつかの条件下に於いて測定した、模型箱内を攪拌した場合の換気量と攪拌しない場合の換気量の関係を図5.28に示す。換気量が小さい場合には、攪拌時の換気量が攪拌しない場合の換気量より若干大きくなることがわかる。攪拌のみによる換気量は $0.12\sim 0.14$ なので、その影響が現れているものといえるが、箱内を攪拌しない場合には濃度分布が生じているために攪拌によって換気量が大きくなっていることも考えられる。攪拌の有無に関わらず $0.2\sim 0.4$ の値を示す場合もあり、攪拌のみによる換気量を一律に差し引くことはできない。

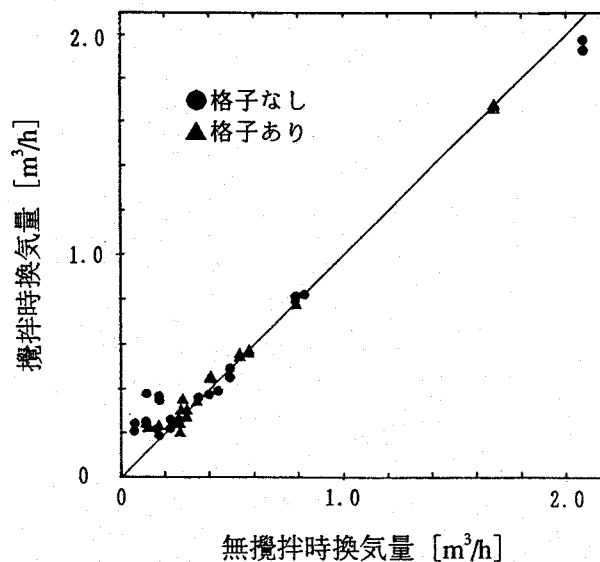


図5.28 無攪拌時換気量と攪拌時換気量との関係（一様流）

(4) 風向と通気量との関係

図5.29は、風向と測定した通気量との関係を示したものである。(a)は一様流の場合、(b)は境界層流の場合である。

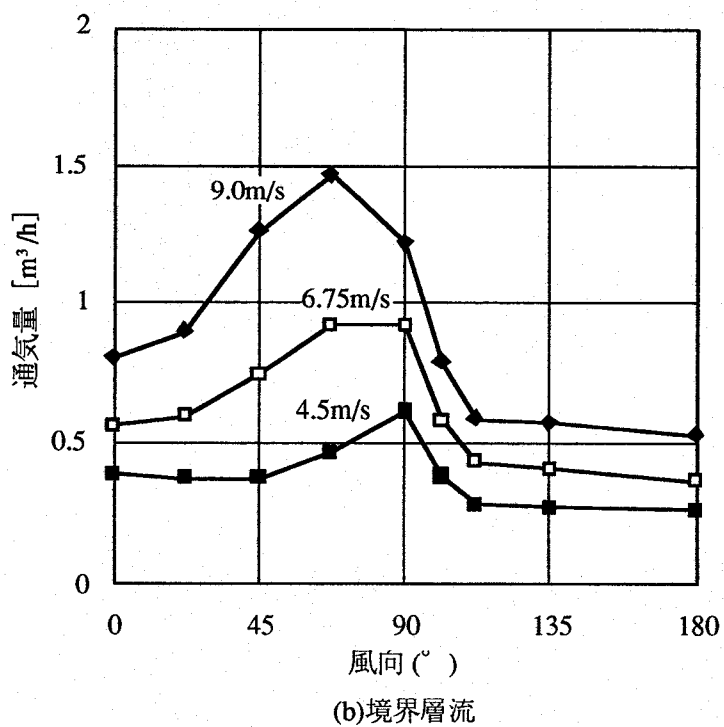
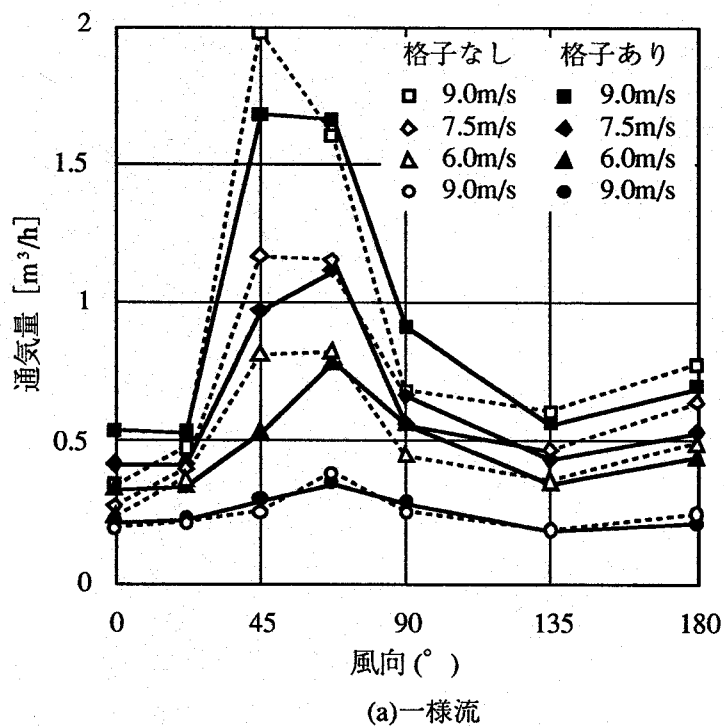


図5.29 風向と通気量との関係

いずれの条件の場合でも、風向によって通気量は大きく変化することがわかる。一様流の場合は、風向 45° 或いは 67.5° で最大値を示すが境界層流の場合には 67.5° 或いは 90° で最大となる。図5.25で壁面近傍風速は一様流では 45° 、境界層流では 67.5° で最大となったことと考え合わせると、必ずしも壁面近傍風速の大小だけで通気量の大小が決定されているわけではないことが示唆される。例えば、図5.26より一様流の風向 45° は風速は速くても乱れの強さが小さいことによつて、一様流の通気量が 67.5° で最大となる場合があると考えることができよう。

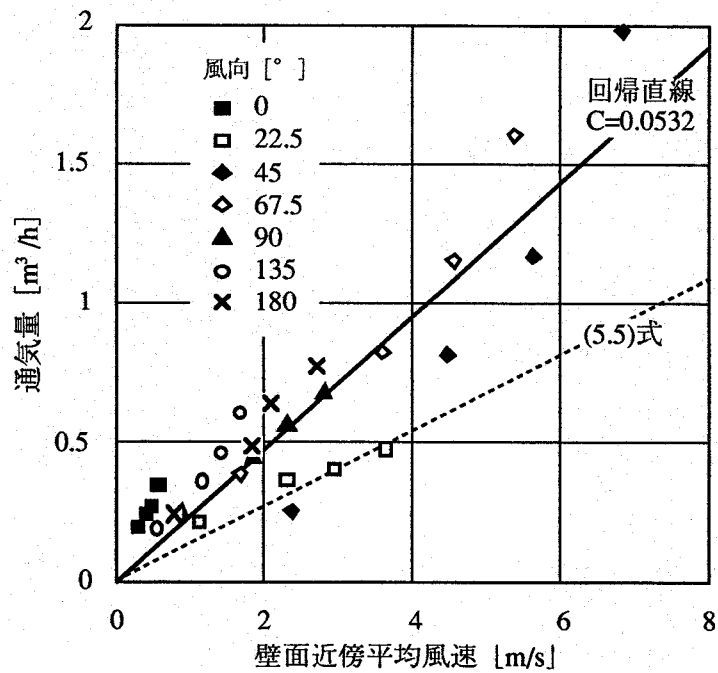
(5)壁面近傍風速と通気量との関係

図5.30は、各風洞風において、開口前壁面から5mmの地点で測定した壁面近傍風速と通気量との相関関係を示したものである。(a)~(c)は各風種で風向ごとにプロットを変えたもの、(d)は全データについての図である。図中には原点を通る直線で回帰した回帰直線と前節5.3で提案した通気量算定式(5.5)式を併記している。(a)の格子なしの一様流の場合には、各風向において壁面近傍風速と通気量は比例するが、その傾きは風向によって異なることがわかる。風向 22.5° と 45° の乱れの強さが20%以下の場合には、傾きは小さく、(5.5)式に近いが、その他の風向では傾きは大きく、全風向のデータに対する回帰直線の傾きは(5.5)式の定数に換算して $C=0.05316$ となることがわかる。風向 0° での傾きが最も大きい、通気量の小さい範囲なので、攪拌の影響が若干含まれていることも否定できない。

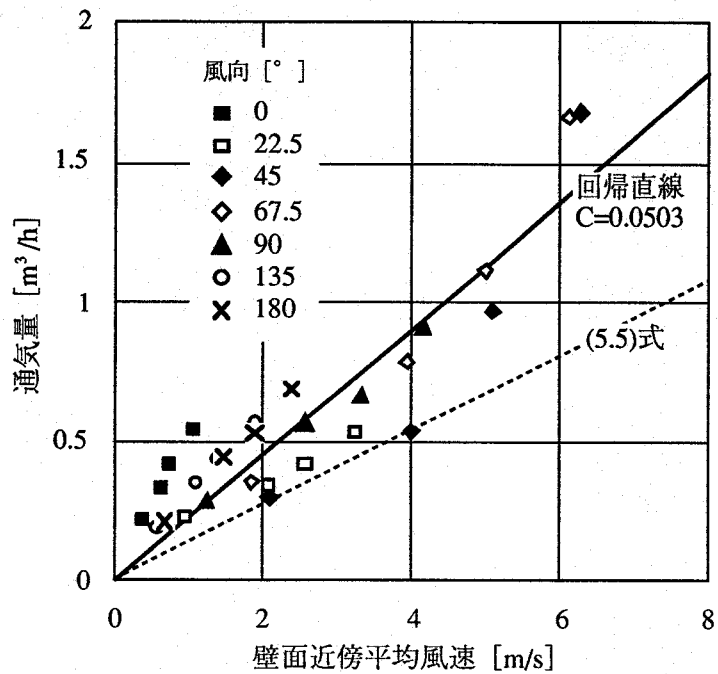
(b)の一様流の場合もほぼ同様の傾向が見られ、風向 45° (このとき図5.26より乱れの強さは15%以下) では(5.5)式とほぼ一致するが、全風向について回帰すると係数 C は0.05とかなり大きくなる。

(c)の境界層流の場合には、風向による差異は少なく、風向に関わらず通気量は壁面風速に比例していることがわかる。回帰直線の傾きは $C=0.063$ であり、(5.5)式の $C=0.03$ のほぼ2倍である。境界層流の場合は、図5.26より、壁面近傍流の乱れの強さがすべて30%以上であったことにより、(5.5)式と合うデータがないものと考えられる。このことは、(5.5)式を導いた実験の壁面近傍風速の乱れの強さはすべて20%以下であったことと呼応している。

(d)はすべての回帰直線とデータを重ねたものである。

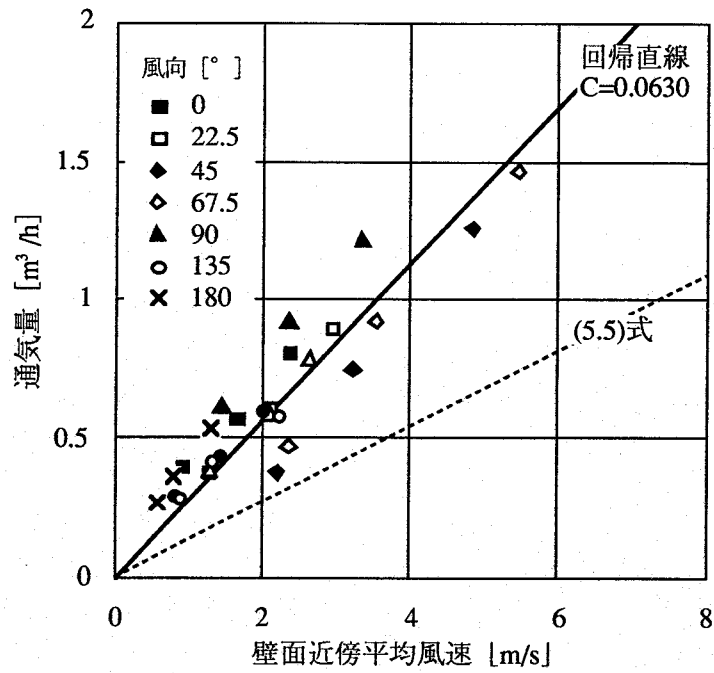


(a)一様流 (格子なし)

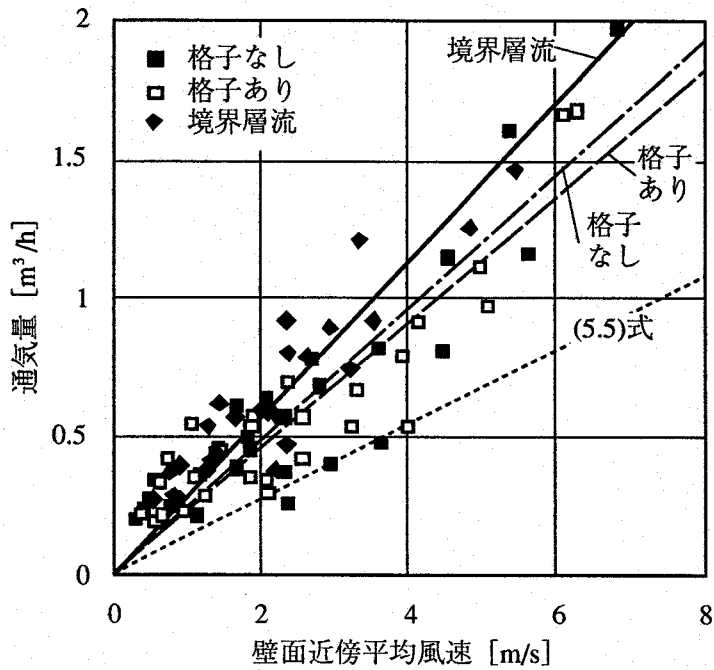


(b)一様流 (格子あり)

図5.30 壁面近傍平均風速 (壁面から5mm地点) と通気流との関係



(c)境界層流



(d)全風洞風

図5.30 壁面近傍平均風速（壁面から5mm地点）と通気流との関係

前節で補正した通気量算定式(5.5)式の比例定数0.03は、壁面近傍風速の乱れの強さが20%以下の場合には正しく通気量を評価しているが、30%以上の建物周辺の壁面近傍気流に対しては、0.06とした方が望ましいといえる。実際の建物は乱れた接地境界層の中に存在するわけであるから、一般的には、一様流で得た実験結果の様にはならず、境界層流で得た結果を重視すべきであると考えられる。

故に、本節では、一般的建物の単一開口部に適用すべき通気量算定式として、(5.5)式を次のように修正して提案する。

$$Q = 0.06 A U_L \quad (5.6)$$

ただし、

Q : 通気量 [m^3/s]

A : 開口面積 [m^2]

U_L : 混合層外端風速 [m/s]

混合層外端位置は、(5.3), (5.4)式で求める。

5.4.4 まとめ

本節での検討により、実際の建物外壁面の単一開口の通気量を混合層外端位置の壁面近傍風速と開口面積から算定するためには(5.5)式の比例定数を修正する必要があることが明らかになり、一般的に適用できる単一開口通気量算定式(5.6)を提案することができた。

5.5 まとめ

本章における検討の結果得られた結果は下記の通りである。

- (1) 単一開口の通気量予測式(4.17)式は、自然風によって換気される正方形開口をもつ模型箱の通気量は正しく評価するが、風圧に分布が生じると考えられる細長開口の場合には通気量を1/3程度に見積ってしまう。また、正方形開口の場合、開口近傍を流れる壁面気流の乱れの強さの大小によって通気量は若干変化する。
- (2) アスペクト比1～8の長方形開口と円形開口において、種々の開口角 θ に対する混合層外端位置は、開口部下流端における混合層の厚みの幾何平均を用いることが妥当である。
- (3) 単一開口における通気量算定式(4.17)式の適用範囲を、種々の開口角 θ を持つアスペクト1～8の長方形開口と円形開口まで広げ、かつ実際の建物の単一開口室に適用するためには、 $Q = CAU_L$ の定数部Cを0.06としなければならない。

本章で提案した単一開口の通気量予測式(5.6), (5.3), (5.4)式を用いることによって、開口前の壁面を流れる気流の風速分布と開口面積を知れば、通気量の予測は容易であるといえる。

次章では、壁面近傍気流の風速を予測するための資料作成を試みる。

第6章 単一開口における通気量予測のための資料整備

6.1 本章の目的

4章、5章の検討によって、単一開口を持つ室の通気量は、開口面積と開口前を流れる壁面近傍気流の風速分布から容易に求められる通気量算定法が確立された。

しかし、計画中の建物の単一開口室において、その通気量を予測し、室の換気設計に役立てるためには、壁面近傍風速に関する資料の蓄積が不可欠である。故に本章は、限られた条件ではあるが、建物の壁面近傍風速を予測する際に必要な基礎的データの整備を、風洞実験と実際の建物における実測によって行うことを目的としている。

単一開口の通気量算定式〔(5.6)式〕では、開口部の形状と大きさによって決められる混合層外端位置における風速と開口面積を入力として通気量を算出する。壁面の開口条件が通常設計条件となるため、混合層外端位置を固定して考えることはできず、設計用の資料としては壁面近傍の風速分布に関する資料が必要である。しかしながら、建物の開口部は通常2m程度以下であることから、混合層外端位置は壁面から20cm以下となり、柱や廂などの種々の突起物の影響を受ける場所の風速分布が重要となり、その包括的な資料整備はかなりの時間と労力を要する。従って本章では、壁面が理想的な滑面である場合と、集合住宅に一般的な標準的なベランダがある場合に限って資料整備を試みることにする。設計段階における精度良い壁面近傍風速の予測には、設計建物の壁面を再現した模型を用いた風洞実験をせざるを得ないが、第一次の近似値として、本章での結果を援用することは、許されるものとする。

6.2 開口前に障害物がない場合

6.2.1 本節の概要

本節では、単一開口における通気量を予測するための基礎資料として、外壁表面が平滑で、形状が単純な直方体建物の建物壁面の風速分布を風洞実験によって測定し、その分布形状と境界層厚さについて若干の検討を加えた上で、壁面近傍気流の境界層外風速の壁面分布に関する資料整備を試みる。

6.2.2 実験概要

5.4での実験と同様に、大阪大学工学部研究用風洞において格子及び大小ラフネスを用いて1/5乗の指数則に従う接地境界層を再現し、風洞床面に図6.1に示す5つの建物模型を順次設置し、その建物壁面近傍の風速を熱線風速計（5 μ mタングステンI型プローブ、システム7102 日本科学工業）により計測した。模型の平面はA、B、Cが正方形で、DとEは長方形である。なお、模型BとCは相似な模型である。

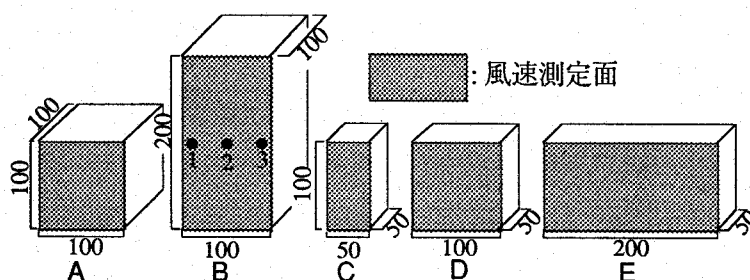


図6.1 建物模型寸法と壁面法線方向の風速分布測定点

まず表6.1に示す条件において、模型Bの外壁面の法線方向の壁面気流風速分布の測定を行った。測定点の壁面上の位置（図6.1中の1,2,3）は、各風向で最も分布が大きいと予測される位置とした。風向は測定壁面に対する入射角として表現している。（図6.2参照）熱線風速計のI型プローブを図6.3の様に上方から設置し、壁面に沿って流れる風速成分を測定した。

その風速分布形状に関して検討を行った上で、壁面から5mmの位置において、表6.2に示す条件下で壁面近傍平均風速の壁面分布を測定した。平均風速は41秒間

の平均値として算出した。

表6.1 風速の局所的分布測定条件

アプローチフロー	$\alpha=1/5$ の指数則		
設定風速	風洞の床上90cmで10m/s		
建物模型	B		
風向 (図6.2参照)	0, 67.5	90	180
測定点	1	2	3
壁面からの距離 d [mm]	3, 4, 5, 6, 8, 10		

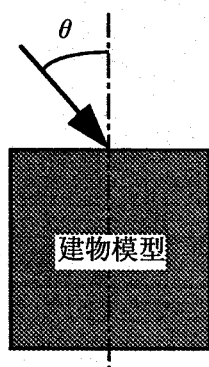


図6.2 風向説明図

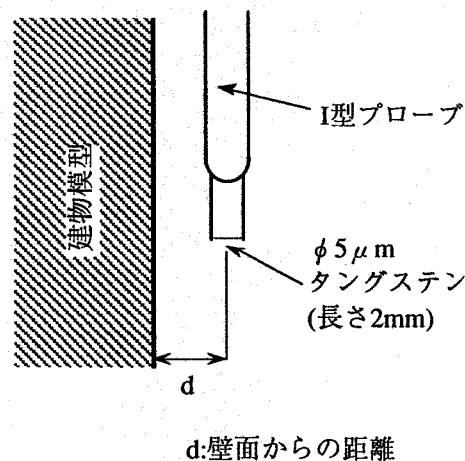


図6.3 プローブ設置方法 (立面図)

表6.2 壁面近傍風速の壁面分布測定条件

アプローチフロー	表6.1に同じ
設定風速	表6.1に同じ
建物模型	図6.1のA~Dの5種類
風速測定点	建物の一側面上に25点 (図6.5中の点参照)
風向 (°)	0, 22.5, 45, 67.5, 90, 112.5, 135, 157.5, 180

6.2.3 結果と考察

(1) 壁面近傍気流の壁面法線方向の風速分布

図6.4に、模型Bの各条件における壁面近傍気流の壁面法線方向の局所的風速分布を示す。風向67.5°が最も風速が高く、次に0, 90, 180°の順に小さくなることがわかる。また分布に関しては、風向90°を除けば風速分布は殆どないことがわかる。風向90°で壁面から6mmまで小さく、6mm以遠で風速が高くなるのは、

壁面から 6 mm までは剥離領域内であることによると考えられる。

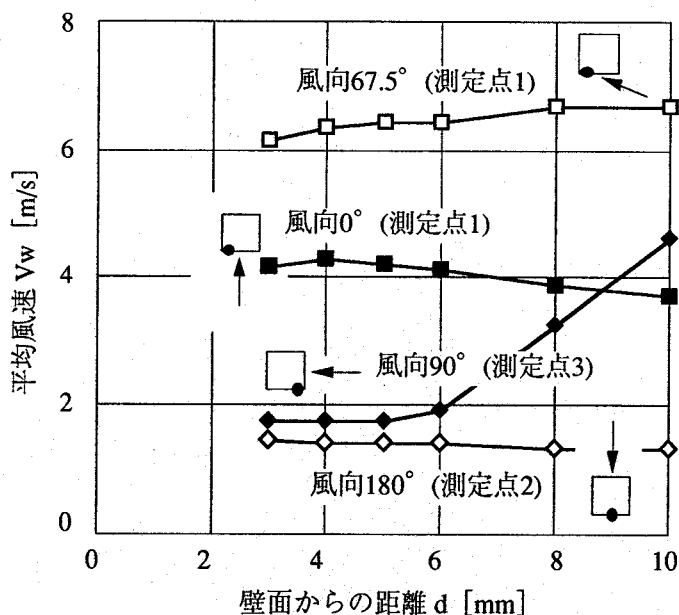


図6.4 壁面近傍気流の壁面法線方向の風速分布

また、いずれの条件においても、壁面から 3 mm の地点の風速が 3 mm 以遠の風速の値と差がなく、この地点の風速は実際には 2 mm から 4 mm までの平均風速であることから判断して、壁面近傍気流の境界層は 2 mm 以下であることがわかる。3 mm 以下の地点での風速分布の計測は I 型プローブでは困難であり、境界層用プローブの使用が不可欠である。本実験の結果のみから、正確な境界層厚さの判断はできないが、壁面から 3 mm ~ 6 mm の地点の風速は境界層外端の風速にほぼ等しいと考えられる。

任意の位置、任意の開口条件における混合層外端位置における風速を求めるためには、壁面気流の境界層内の風速分布を知らなければならない。しかし、今回の測定では、風速測定 of 技術的問題から、境界層内の風速分布を測定することはできなかった。

(2) 壁面近傍平均風速の壁面方向分布について

(1)での測定結果から、壁面から 3 mm ~ 6 mm の地点の風速は境界層外端の風速にほぼ等しいことが推察できるため、壁面気流の境界層外端風速として壁面から

5 mmでの平均風速の壁面方向分布を測定した結果をコンターの形でまとめたものが図6.5である。図は各建物の立面を正方形に基準化したものであり、風速は各建物の上端高さでのアプローチフローの風速に対する比で表現している。風向0, 180°を除き、風洞の風は図の向かって右から左方向に向かって流れている。

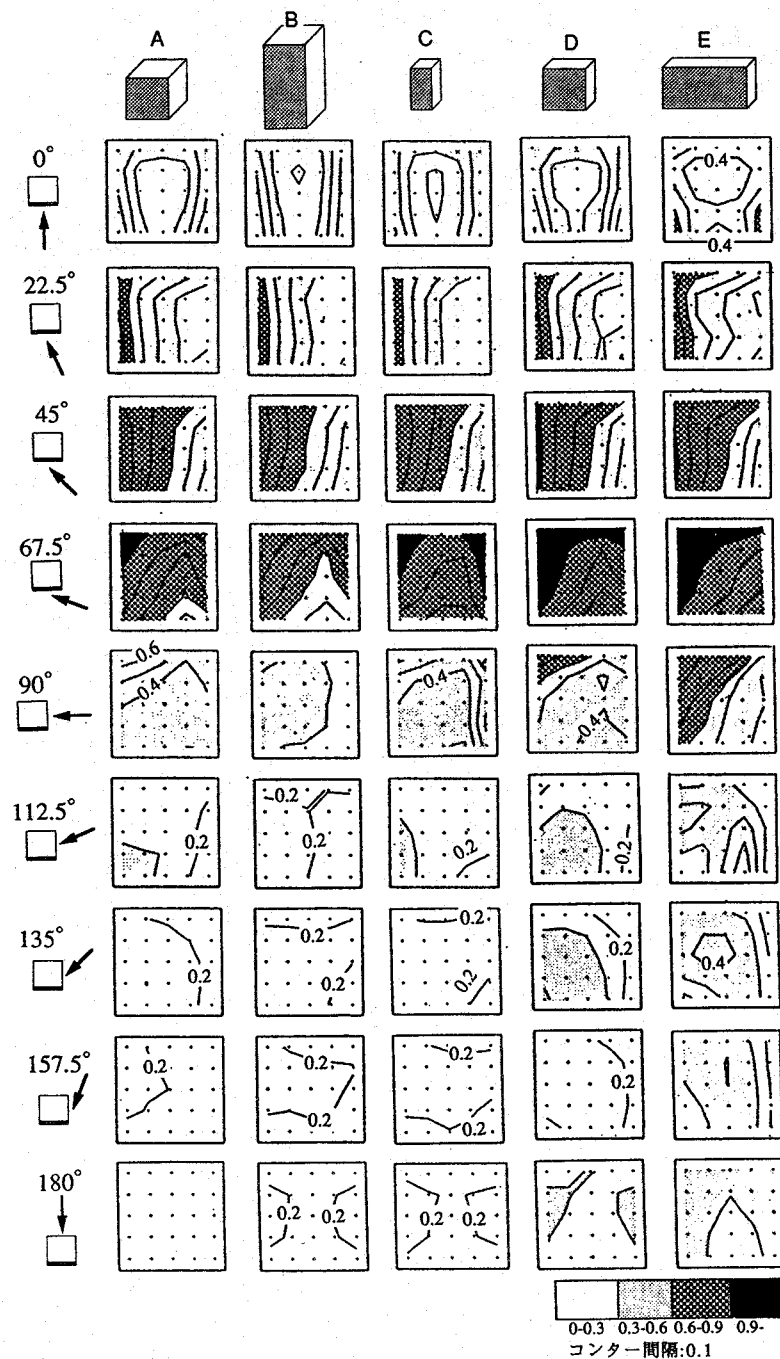


図6.5 各模型・各風向の壁面近傍風速比の分布
(建物上端高さのアプローチフロー風速に対する風速比)

相似な二つの模型である模型BとCの風速分布を比較してみると、いずれの風向においても両者はほぼ等しいことがわかる。故に、建物の形状が同じならば軒高風速で基準化することによって建物の大きさは考慮する必要がないといえる。ただし、風向 90° の風上側で模型Cの方が高い値を示しているが、これは、壁面から5mmの点がC模型では剥離領域外に近くなることに原因する可能性が高い。

いずれの模型においても、風向 0° では、淀み点近傍で風速が低下し、風向 22.5° 、 45° では風下ほど風速が高くなっており、風圧係数との逆の相関が伺える。また、風向 67.5° の風速は最も高く、軒高のアプローチフローと同程度の風速になっている。

建物形状による風速比の差異は、風向 0° 及び 90° で顕著であり、 157.5° 、 180° ではコンター形状には差があるものの、絶対値の差は比較的小さいことがわかる。

この図を用いることで、外壁面が平滑な建物の壁面近傍気流の境界層外端風速を上空風速との比から求めることができ、単一開口における通気量予測の上で非常に有効な資料となり得ると考える。

6.2.4 まとめ

本節の検討によって、外壁の表面が平滑な建物の壁面近傍気流の壁面境界層外端の風速分布に関する資料を得ることができた。風速計測の技術的な制約から、壁面近傍気流の境界層内の風速分布を捉えることはできなかった。

より詳細には、今後の壁面近傍流の境界層に関する研究の発展を待たなければならないが、現状においては滑面近傍の風速分布は一定として取り取り扱わざるを得ないといえよう。

6.3 開口前にベランダがある場合

6.3.1 本節の概要

住宅に於ける風力換気の重要性は高い。戸建て住宅の場合にはその形状の個体差が非常に大きく、設計用資料の標準化は非常に困難である。従って、前節で整備した壁面近傍気流の風速分布データは住宅では集合住宅においてその利用価値が高いものといえる。しかしながら、集合住宅は通常、ベランダ（バルコニーと呼ばれることの方が多い）が付帯しており、壁面が平滑であることは少ない。故に、集合住宅においてベランダ側の掃き出し窓を開けた時の様な単一開口における通気量を予測するためには、ベランダ内を流れる気流の風速を予測できなければならない。

故に本節は、ベランダを持つ高層・超高層集合住宅のベランダ内風速を予測するための資料の蓄積を目的とする。まず、実際の中層集合住宅のベランダ内風速とベランダ前風速の測定及び同建物の縮尺模型を用いた風洞実験を行ない、風洞実験の予測精度に関して検討を行なうとともに、片廊下型の高層集合住宅のベランダ内風速に関する資料を得る。そのうえで、超高層集合住宅の全体模型を用いた風洞実験を行い、風向とベランダの位置が超高層集合住宅のベランダ内の風速に及ぼす影響について考察を行なう。また、高層・超高層のベランダ部の拡大模型による風洞実験を行ない、ベランダ内を流れる気流の風速分布についても検討を行なう。

6.3.2 高層集合住宅のベランダ内風速

6.3.2.1 実測概要

ベランダ前の気流の風速とベランダ内の風速の実測を行ったのは、淀川に面して建つ14階建高層集合住宅（大阪市此花区 高見フローラルタウン）である。図6.6に、建物周辺の配置図を示す。測定を行ったのは昭和63年1月25日から3月5日までであり、同建物の竣工後入居までの間に行った。

フロッピーに記録する。なお上空風の平均風向は、方位に対応する電圧の平均化処理により求めた。

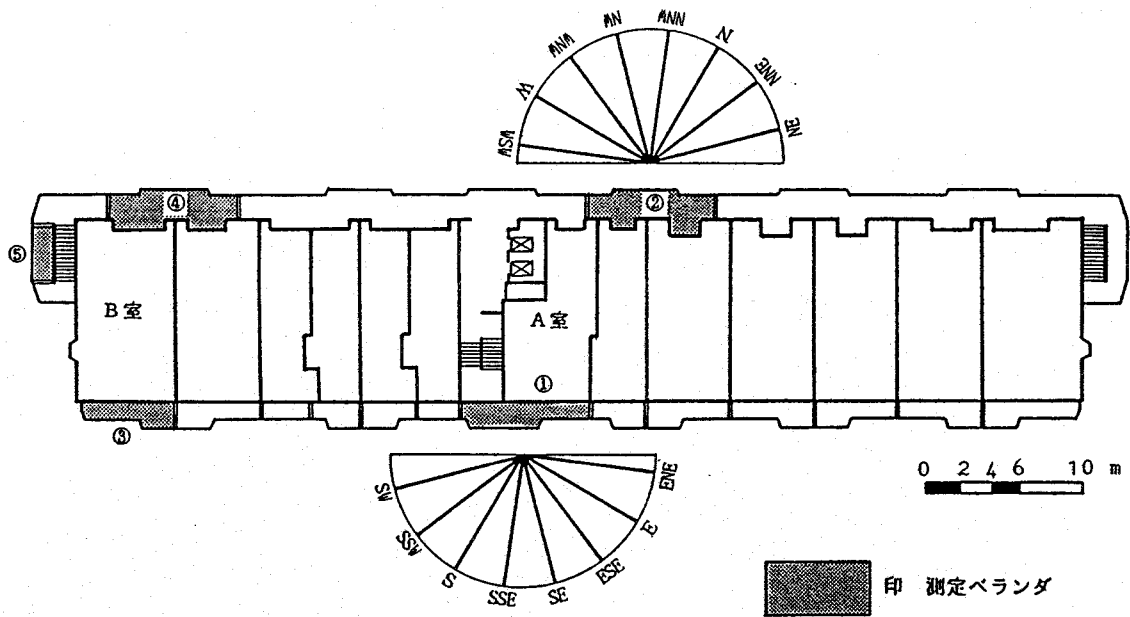


図6.7 高層集合住宅の基準平面と測定ベランダ

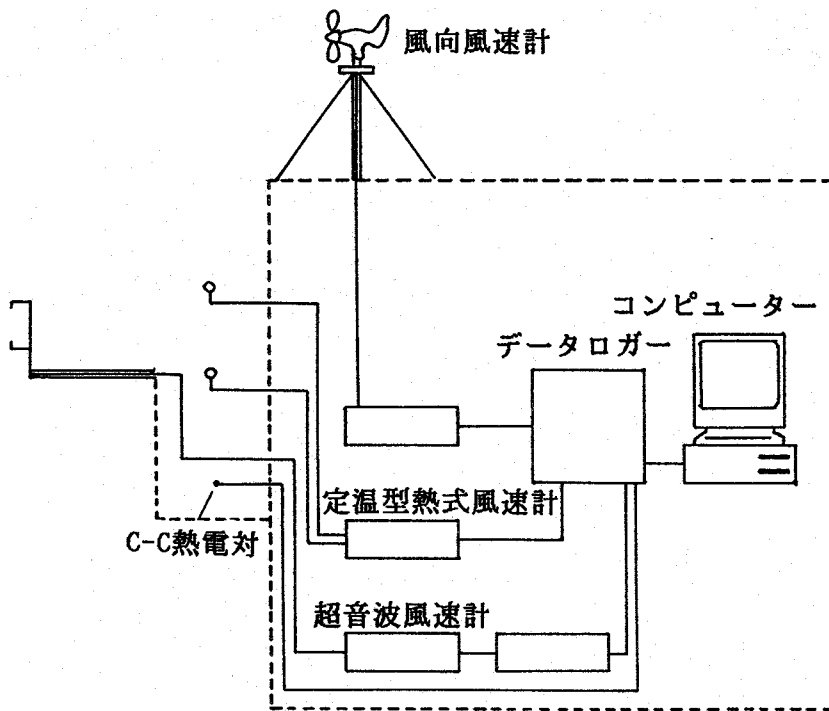


図6.9 測定システム

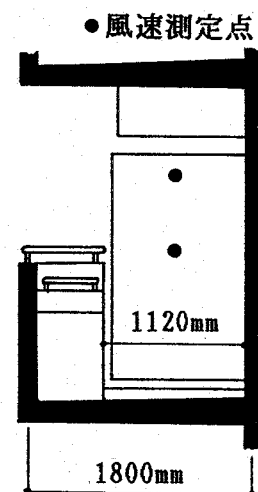


図6.8 ベランダ断面図と風速測定点

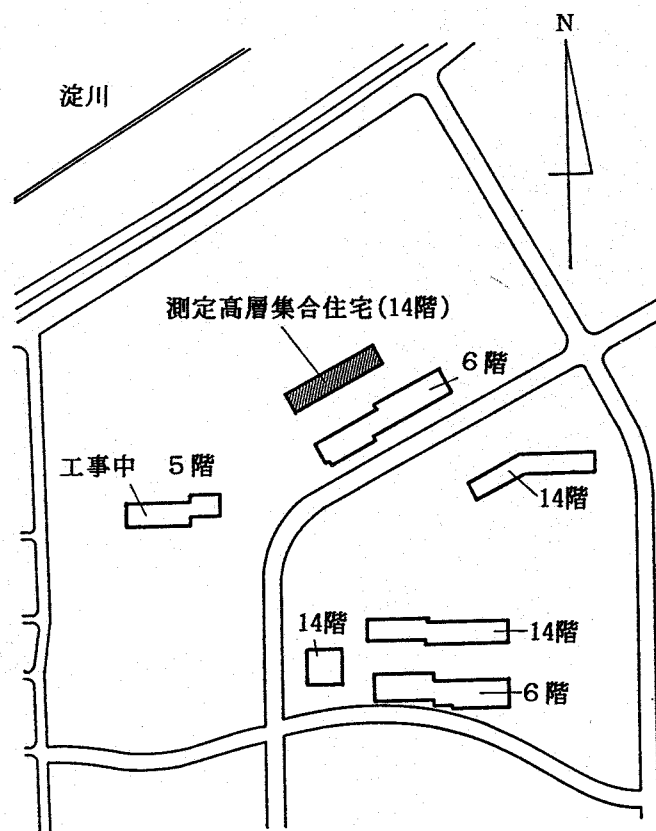


図6.6 測定対象高層集合住宅配置図

建物の基準階平面図を図6.7に示す。ベランダ内外の風速測定を行なったのは、図中の、10階と14階のベランダと共用廊下および14階西側の階段踊り場で、各測定地点を3～7日ずつ順次測定した。共用廊下側及び階段踊り場測定時には、風速測定点をはさんで廊下に衝立を2枚設け、模擬ベランダを作成した。ベランダの幅は、①②④が8.6m、③が6.5m、⑤が3.6mである。同建物のペントハウス上3mの（地上47m）に微風速風向計を設置し、建物上空の風向・風速の測定も行った。

測定項目は、上空風の風向・風速、ベランダ及び模擬ベランダ内の風速（床上高さ120cmと180cm、壁面より56cm、図6.8参照）、ベランダ前2mの地点の風向・風速、外気温である。ベランダ前風向・風速は、三次元超音波風向風速計（海上電機製）を用いた。測定システムは図6.9に示す通りで、各測定器からの出力をデータロガーでAD変換後、パソコン（PC-9801VM NEC）を用いて一分毎に42秒間（35個）の平均（以下1分間平均と呼ぶ）・最大値・変動の実効値を計算し、

測定点と測定日時の一覧表を表6.3に示す。なお、ベランダ内風速は昼間のみ測定したが、その他は終日測定を行なった。

表6.3 測定日一覧表

10階ベランダ①	昭和63年1/25～1/27
10階模擬ベランダ②	昭和63年1/28～2/3
10階ベランダ③	昭和63年2/9～2/13
10階模擬ベランダ④	昭和63年2/4～2/8
14階ベランダ①	昭和63年2/15～2/17
14階模擬ベランダ②	昭和63年2/18～2/20
14階ベランダ③	昭和63年2/26～2/29
14階模擬ベランダ④	昭和63年2/22～2/25
14階模擬ベランダ⑤	昭和63年3/2～3/5

6.3.2.2 風洞実験概要

本学工学部研究用風洞を用い、不等間隔格子により(1/4.1)乗の指数則に従う風速分布を持つ接地境界層を作成した。風洞内中央の風速と乱れの強さの鉛直分布を図6.10に示す。模型の縮尺は1/250で、実測した高層集合住宅とその周辺の建物を再現した。模型は木製滑面仕上げで、ベランダを再現している。

実物の建物で測定を行った地点でのベランダ前及びベランダ内の風速測定と建物上空の風向・風速測定点における風速の測定を行なった。実験条件は表6.4に示す通りで、風向は実測の時に頻度の高かった風向としてSSW～NEの10風向を設定する。風速測定には、熱線風速計を使用し、熱線が鉛直方向を向く様にして測定を行った。プローブのサポートは極力気流を妨げないように常に下流側に来るようにして設置した。熱線風速計の出力の10秒間の平均値を記録し、校正係数を乗じて平均風速を算出する。

表6.4 実験条件一覧

風向	SSW, SW, WSW, W, WNW, WN, NNW, N, NNE, NE
アプローチフローの風速	床上80cm (地上200m) で10m/s
風速分布	1/4.1乗則

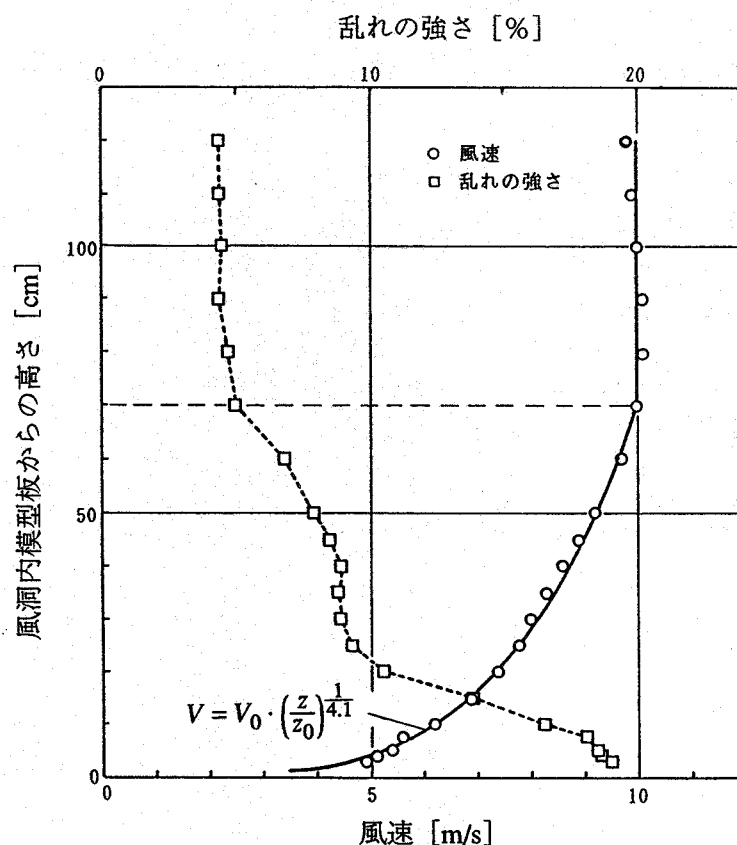


図6.10 風洞内風速と乱れの強さの鉛直分布

6.3.2.3 結果と考察

(1)高層建物上空風の特徴

図6.11に実測を行なったときの高層集合住宅上空風の風配図を示す。図中の実線は全風速データに関するもので、点線は風速 5 m/s以上の風速についての風配を示している。風向・風速データは10分間の平均値を用い、いずれも全データ個数に対する頻度の風向分布である。この図より、全風速についてみれば、NNWの方向から風が吹くことが最も多いが、平均風速 5 m/s以上の風はWNWからWSWのほぼ西側から吹くことがわかる。同地区は海に近く、西側は海の方であり、海風が卓越していると言える。

図6.6より、測定を行なった建物は長辺がWSW-ENEの方向を向いているため、風向WSWの時はベランダ面に沿って風が吹き、W、WNWの時は北側の模擬ベランダは風上側になり、南側のベランダは風下側になることがわかる。

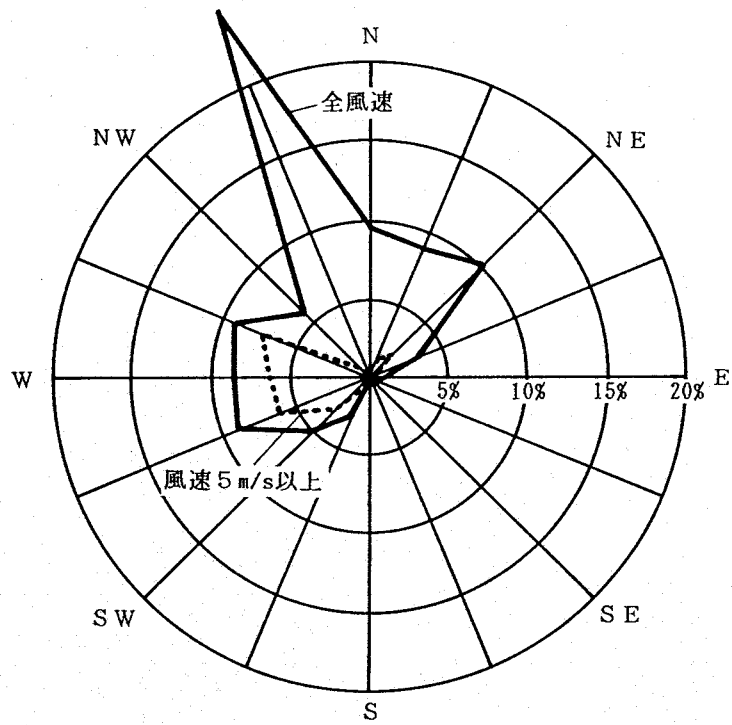


図6.11 建物上空風の風配図（10分間平均値による）

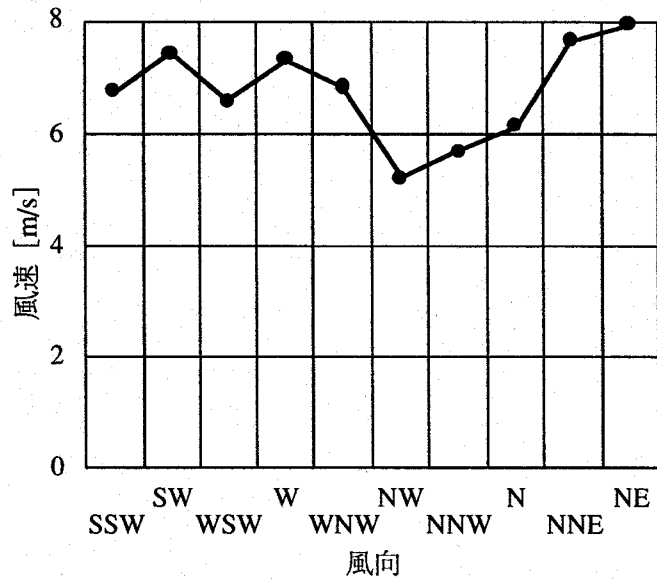


図6.12 風向と高層集合住宅模型上空風速との関係（風洞実験値）

図6.12は風洞実験で測定した、風向と高層集合住宅模型上空風速との関係を示したものである。風向によって若干の変化があり、NWとNNWで6m/s以下になっ

ている。この風向は、建物の長辺方向にほぼ垂直な方向から風が吹く場合であり、建物に当たった風は壁面に沿って上昇することになるため、建物上空風の方向が上向きになると考えられる。建物上空風速の測定においても、熱線は鉛直方向を向いているため、上空風速は風速の水平方向成分を測定することから、風速が若干低下するものと考えることができる。

(2)実測値と風洞実験値との比較

測定したデータのうち、ベランダ内風速に関するデータが200個以上得られた風向について、上空風速とベランダ前風速、上空風速とベランダ内風速（床上120cm）、ベランダ前風速とベランダ内風速との関係を図6.13に示す。各測定ベランダ・風向ごとに、最も左の列が上空風速とベランダ前風速との関係、中央の列が上空風速とベランダ内風速との関係、右の列がベランダ前風速とベランダ内風速との関係である。各風速とも1分間の平均風速である。

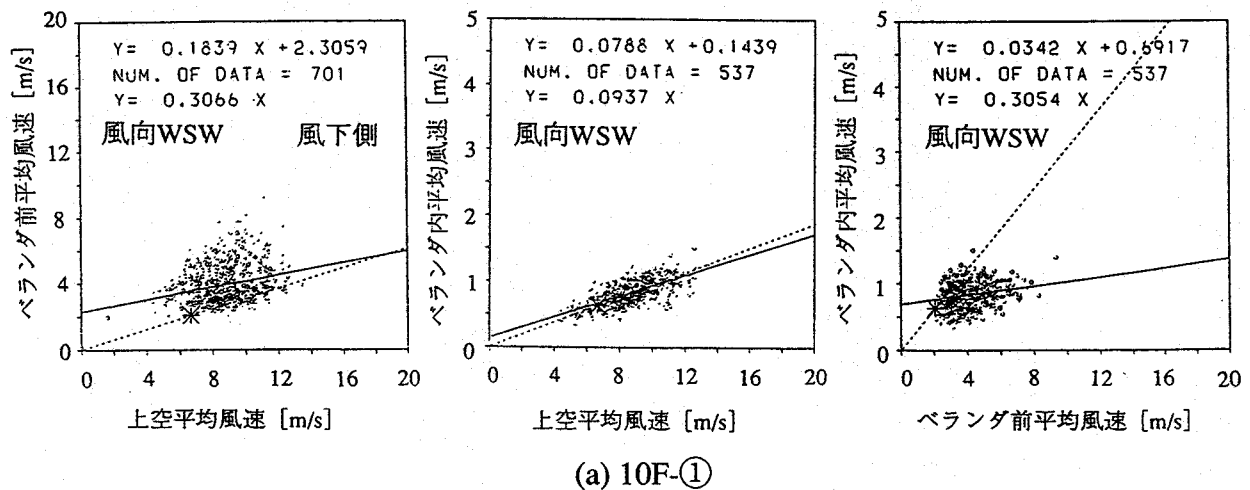
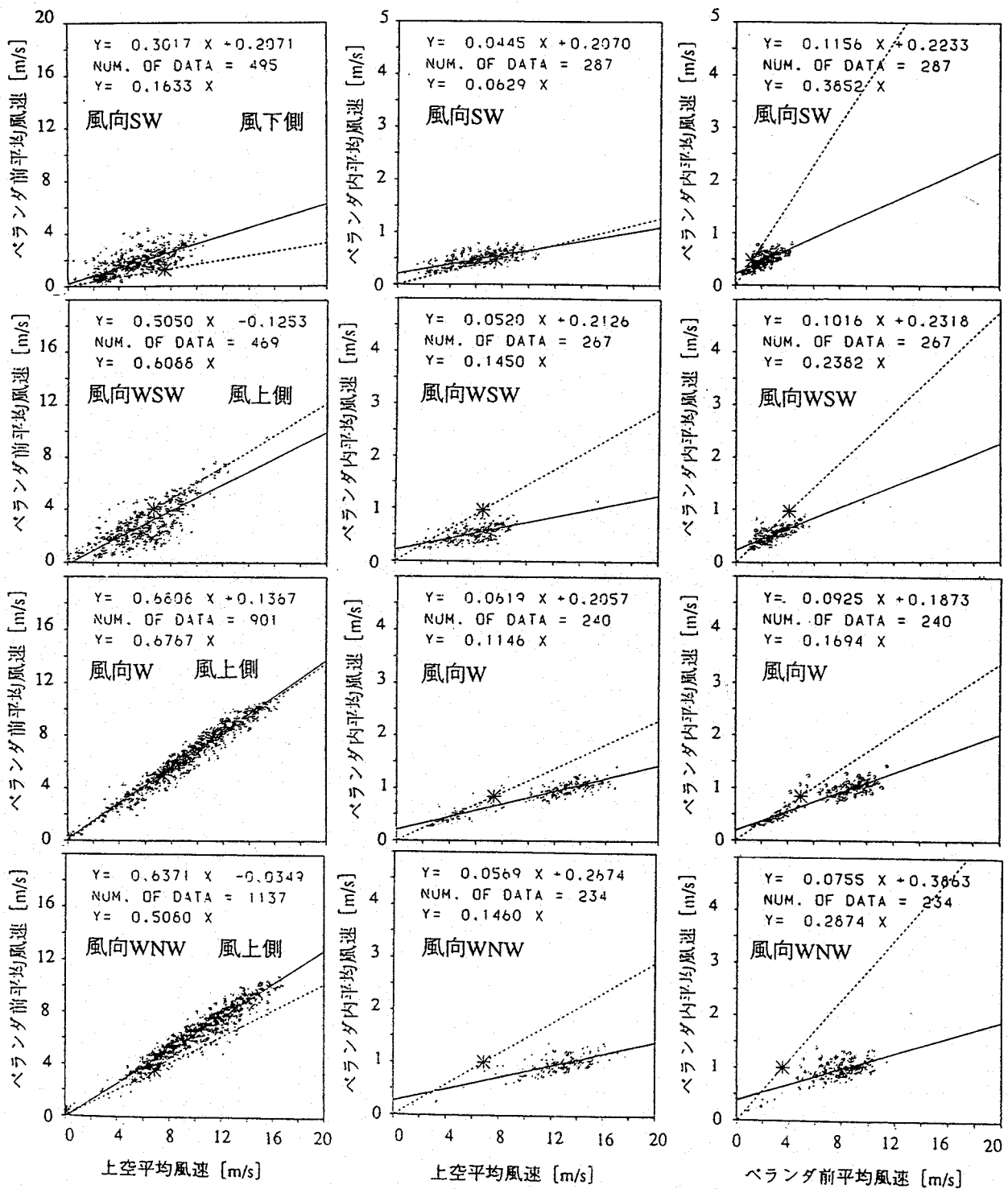
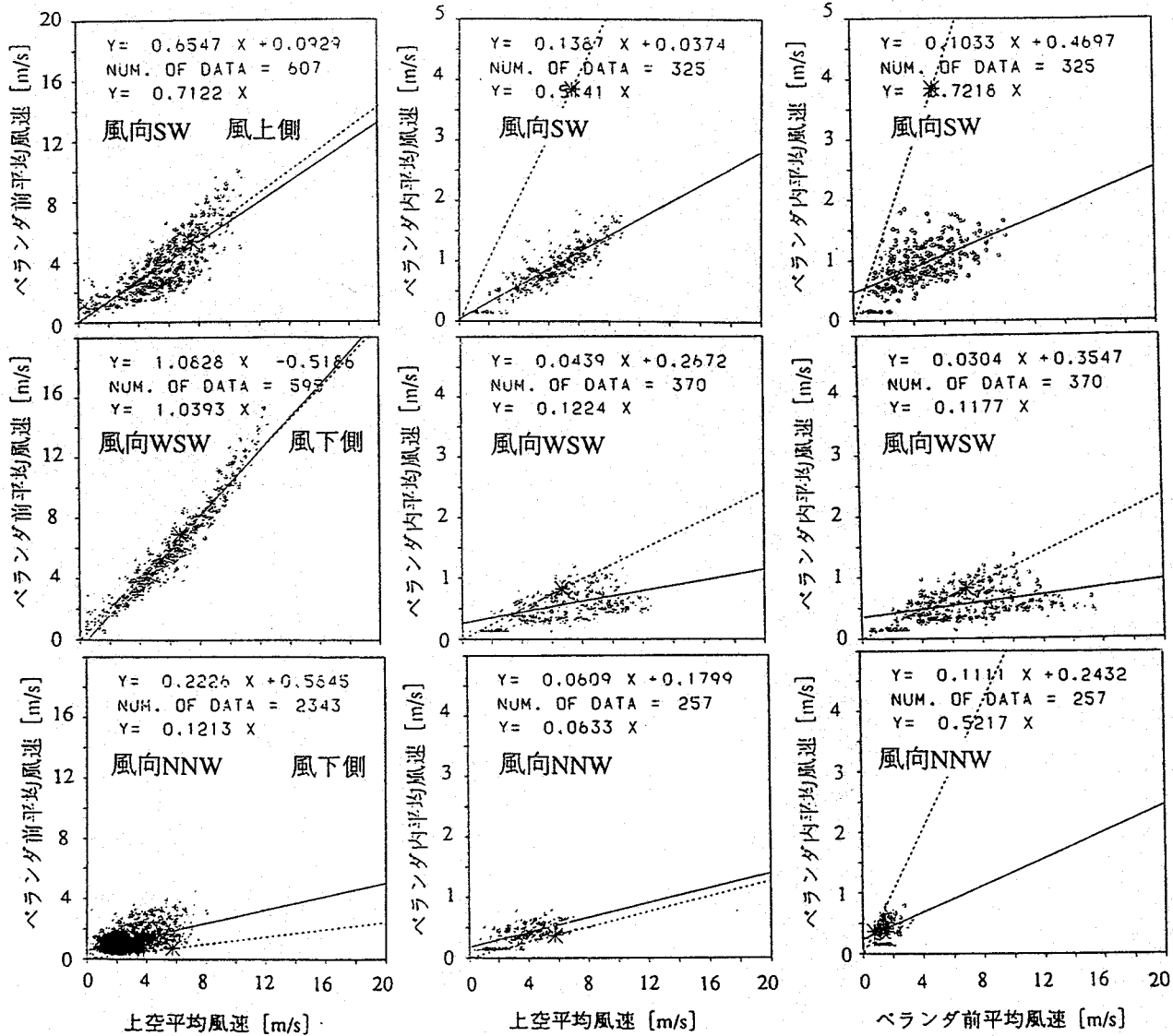


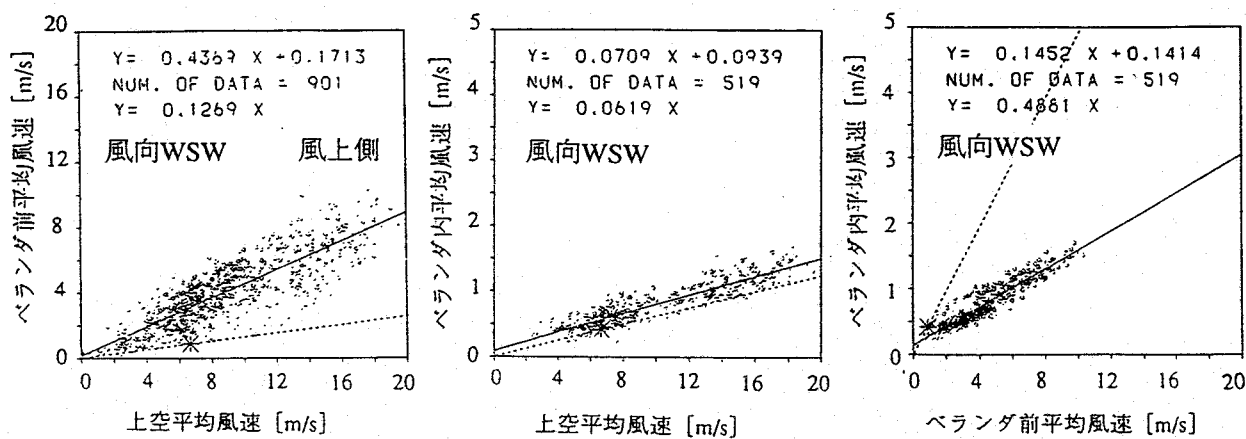
図6.13 上空風速とベランダ前及びベランダ内風速との関係、
ベランダ前風速とベランダ内風速との関係（1分間平均値による）



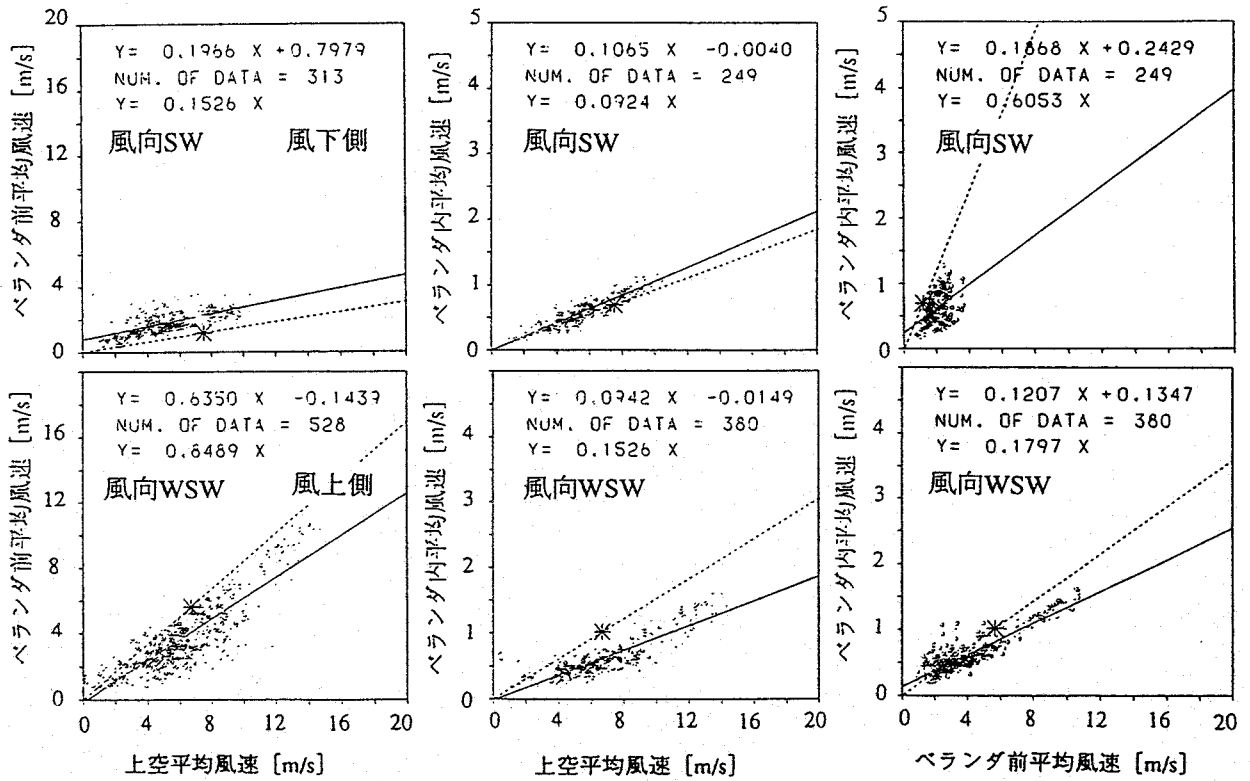
(b) 10F-②



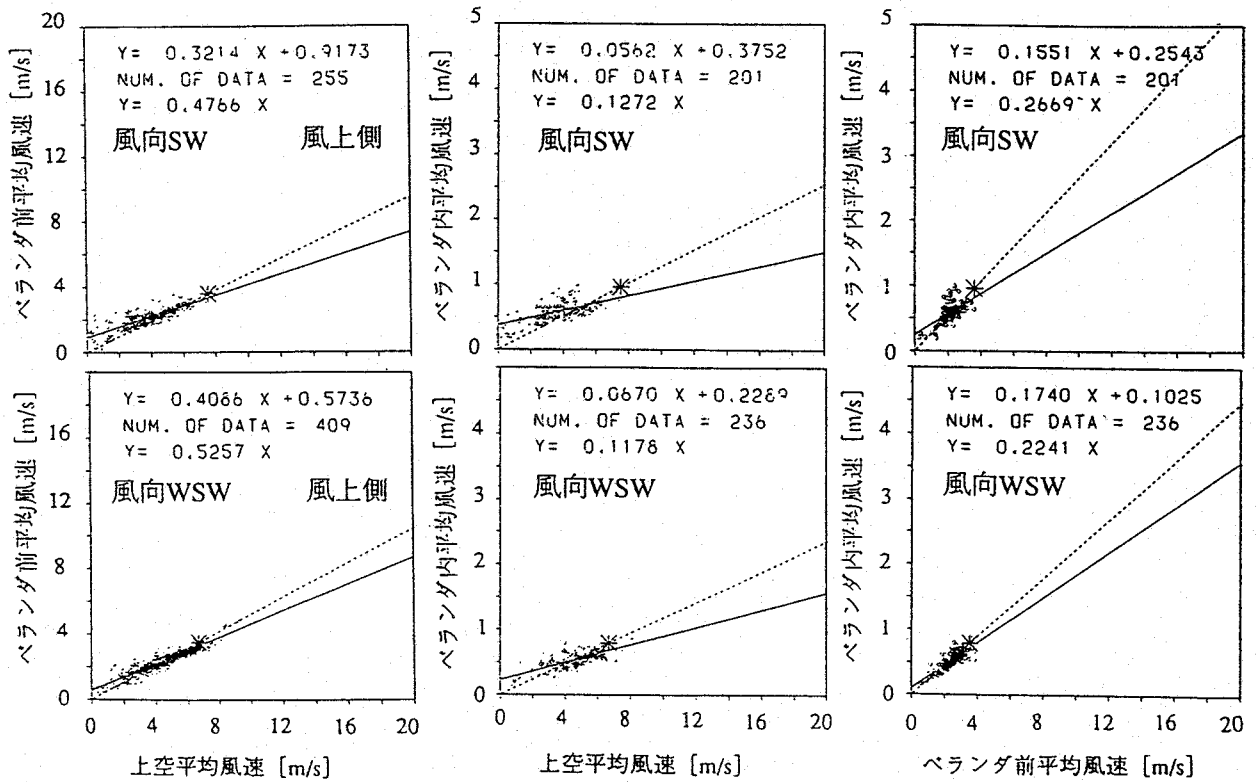
(c) 10F-3



(d) 10F-4



(e) 14F-②



(f) 14F-⑤

図6.7からわかるように、同じ風向であっても、測定したベランダによってそのベランダが風上側に面する場合と風下側に面する場合がでてくる。そこで、図中に風上側か風下側かを明記した。図中の直線は、実測データを最小二乗法によって回帰したものである。*印は風洞実験で得た値であり、プロットと原点を点線で結んでいる。

この図より、ベランダ前風速、ベランダ内風速ともばらつきはあるものの上空風速と比例し、回帰直線の傾きはベランダが風上側に面する場合ほど大きいことがわかる。風洞実験での値（点線）と比較すると、ベランダ前風速については10F-③の風向WSW、ベランダ内風速については10F-③の風向SWで直線の傾きが倍程度異なっていることを除けば、両者はほぼ一致しているといえる。

ベランダ前の風速とベランダ内の風速の関係に関しても両者に比例関係が見られるが、風洞実験によって得られた値と実測値は、風上側では10F-②の様に良く一致する場合と、10F-③、④の様にあまり一致しない場合があることがわかる。全体的には、上空風速とベランダ前風速及びベランダ内風速の関係と同程度の精度はあるものと推察できる。

一方、実測値に関して言えば、ベランダに関わらずベランダ前風速に対するベランダ内風速の比は風上側の場合およそ0.20から0.25の値をとることがわかる。ベランダが風下側になる風向の場合には、風速の値が小さいため明確には言えないが、0.1から0.2程度範囲の値となっている。風上側と風下側でベランダ前風速とベランダ内風速の比が異なるのは、ベランダ前を流れる壁面近傍気流の方向が異なることによるものと考えられる。図6.13に示した風上側の場合には、建物の長辺に平行に近い風向が多いため、ベランダ前の気流も水平に近いと推察でき、0.20から0.25という風速比の値は鉛直方向にベランダ前気流が流れる向く様な条件下では異なるものと予想することができる。

図6.14に10F-③のベランダについて、各風向における上空風速に対するベランダ内風速の比を示した。○印が実測、△印が風洞での値である。実測値は、原点を通る直線で回帰した場合の直線の傾きである。SSW、SWを除けば、両者の比は0.5～1.5程度であり、変化傾向は一致している。SSW、SWで両者が大きく異なるのは、この風向でベランダ前気流が場所によって大きく変化していることから、

模型や風速計設定の誤差が現われているものと考えられる。

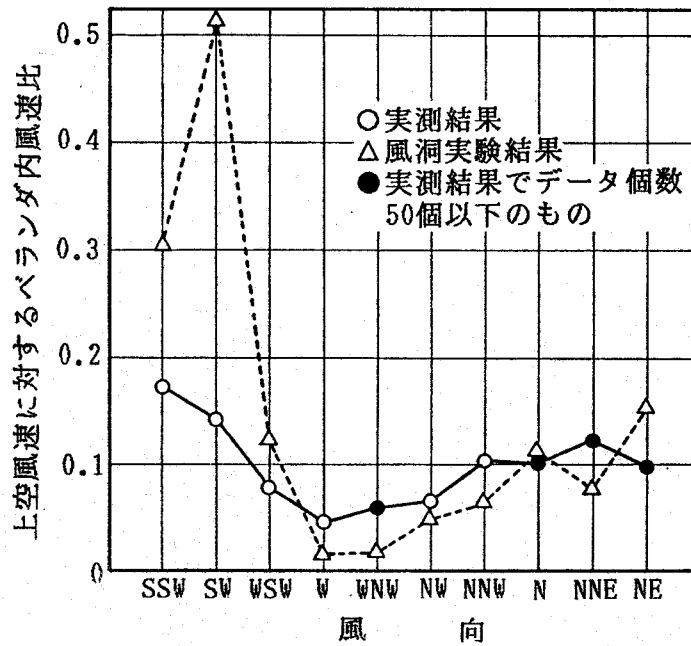


図6.14 風向と上空風速に対するベランダ内風速の比の関係 (10F-③)

そこで、すべてのベランダについて、(風洞で得られた風速比) / (実測で得られた風速比) を風向に対してプロットしたのが、図6.15である。(ベランダ内風速は床上120cm) いずれの風向においてもかなりのばらつきがあり、風向によって平均が1を越える場合と1以下の場合があるが、殆どの点が0.5~2の範囲に入り、ばらつきはあるものの、風洞による予測は可能であるといえる。今回の風洞によるベランダ内風速予測結果に、安全率の概念を適用するとすれば、2.0程度が望ましいといえよう。図6.3で上空風速とベランダ前風速との関係と上空風速とベランダ内風速の関係において風洞実験値と実測値がほぼ同じ程度の精度での一致を見せていたことから、上空風とベランダ前風速についても図6.14とほぼ同様の精度で予測が可能と考えられる。

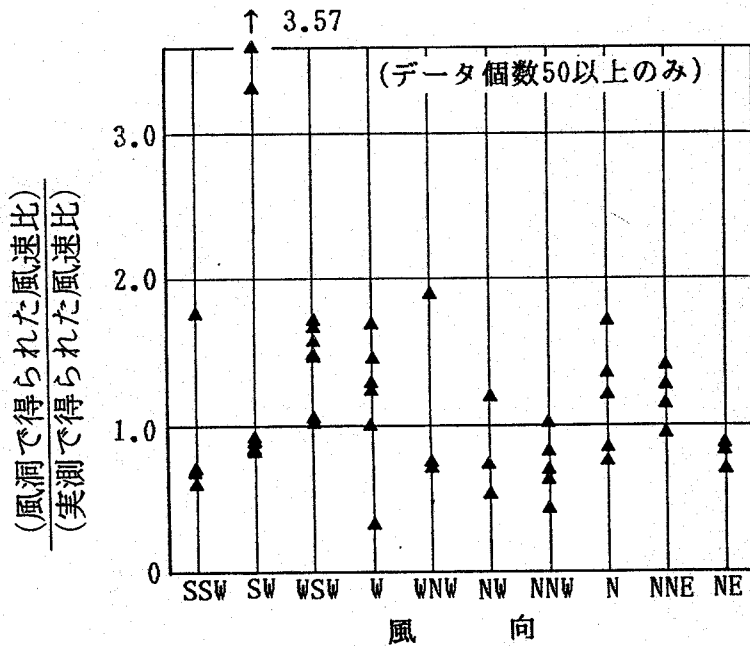


図6.15 各風向における (風洞で得られた風速比) / (実測で得られた風速比)
(風速比：上空風速に対するベランダ内風速の比)

(3) 風向とベランダ前風速及びベランダ内風速との関係 (風洞実験結果)

図6.16に風洞実験で得られた、風向とベランダ前風速及びベランダ内風速との関係を示す。ベランダ内風速及びベランダ前風速はすべて上空風に対する風速比で表している。いずれのベランダにおいても、風向によってベランダ前風速、ベランダ内風速ともに変化し、両者とも比較的良く似た傾向の変化をするが、条件によっては、ベランダ前の風速が大きくなってもベランダ内の風速は余り変化しない場合も存在する。例えば、ベランダ②、④の風向WSWとWなどがそうである。この傾向は北側の模擬ベランダに顕著であり、熱線風速計プローブの設置誤差や壁面風速分布の差異などが原因とも考えられるが、特定は困難である。

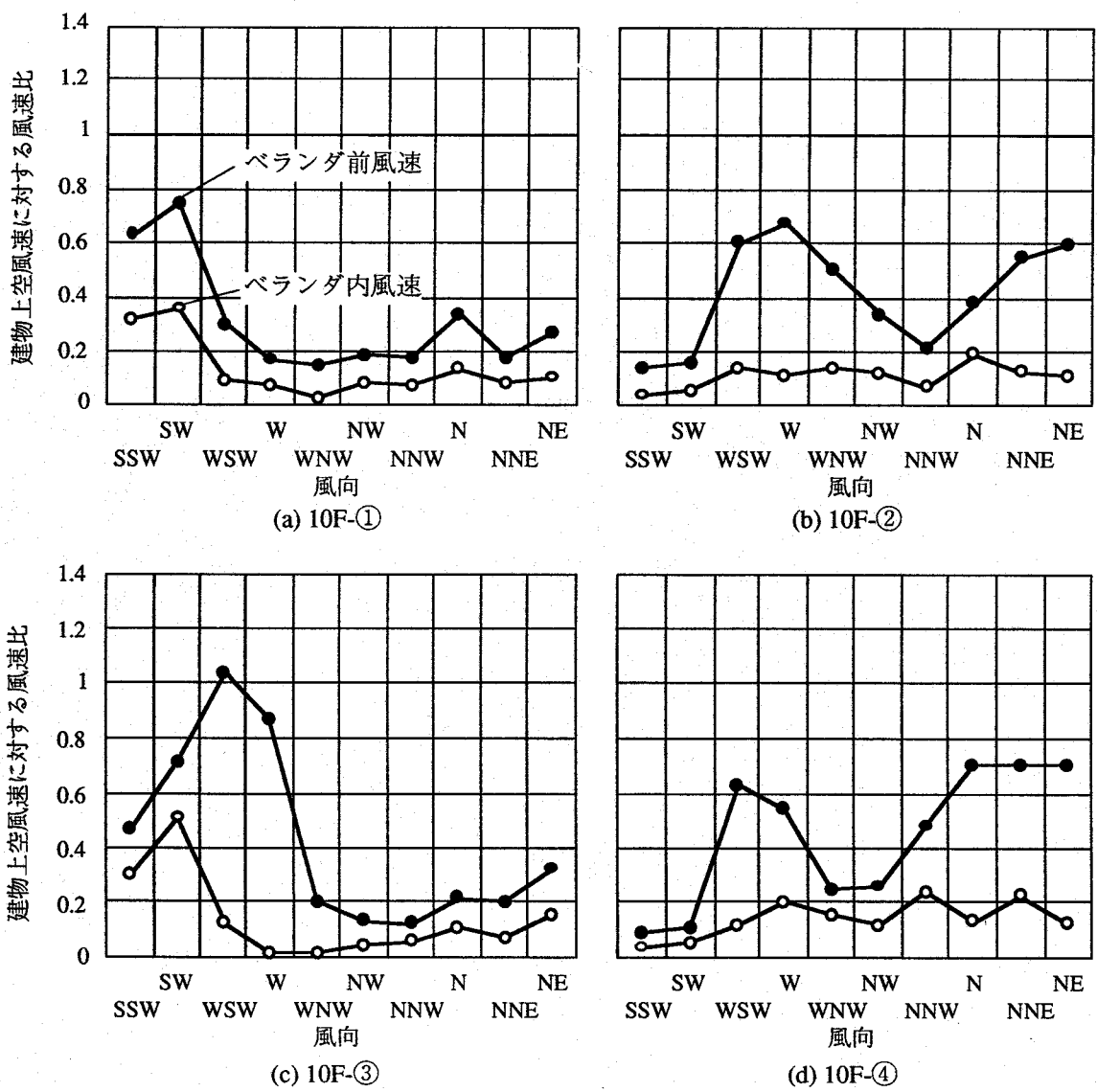


図6.16 風向とベランダ前風速及びベランダ内風速との関係
(風洞実験値)

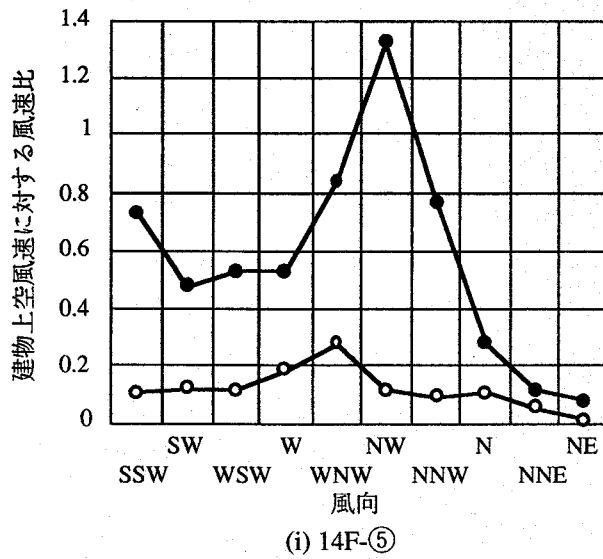
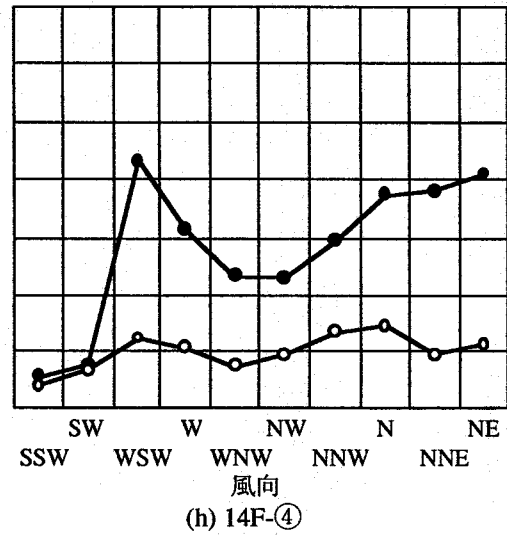
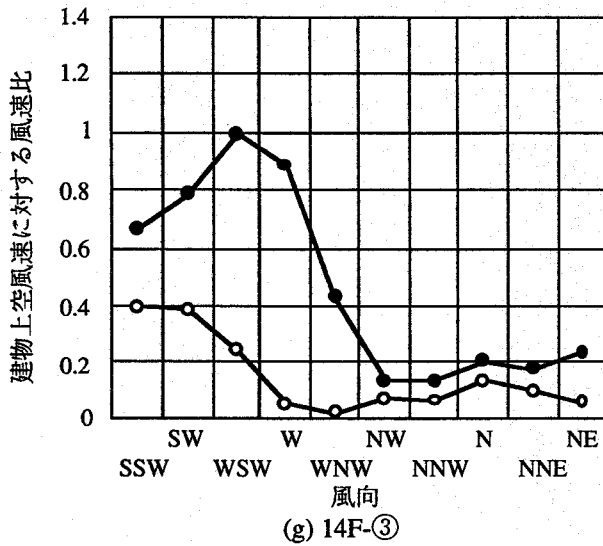
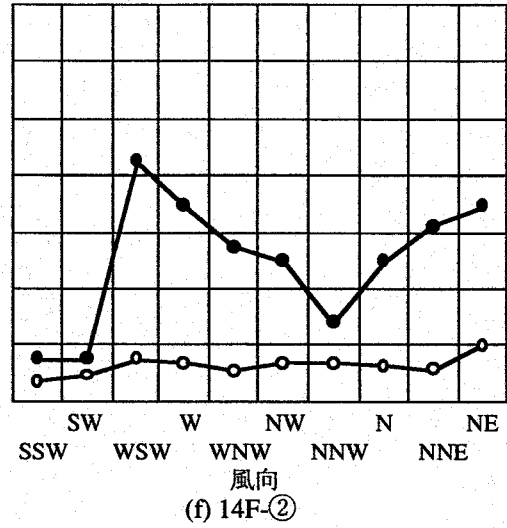
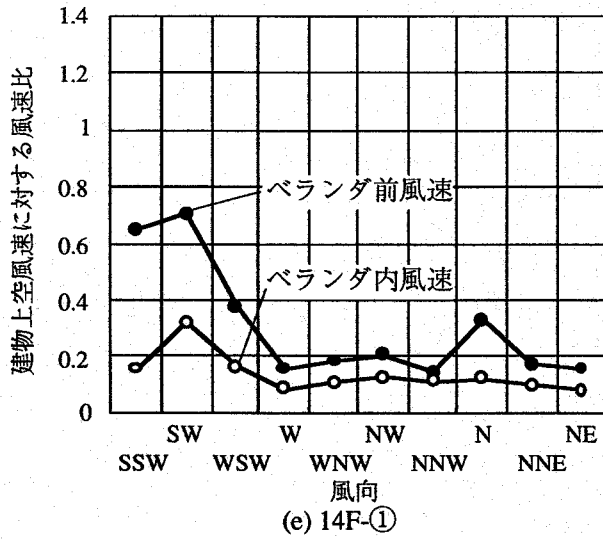
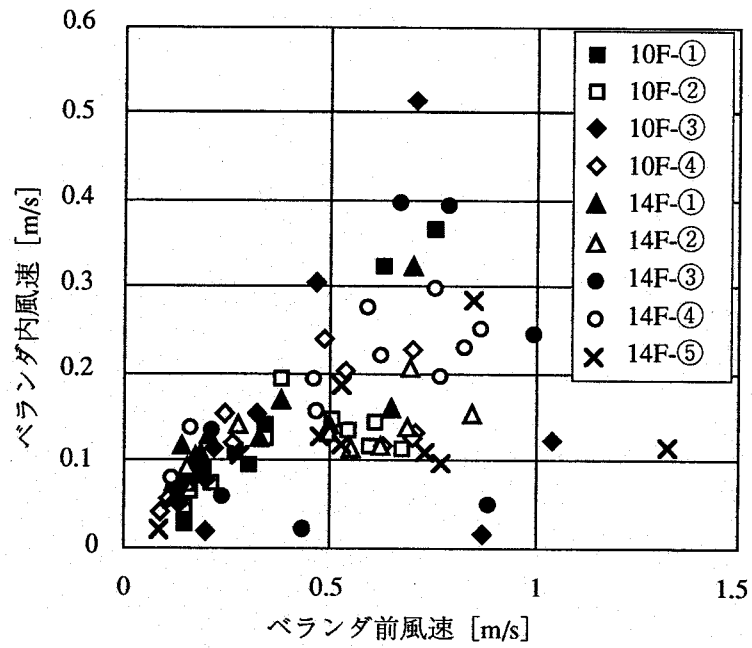


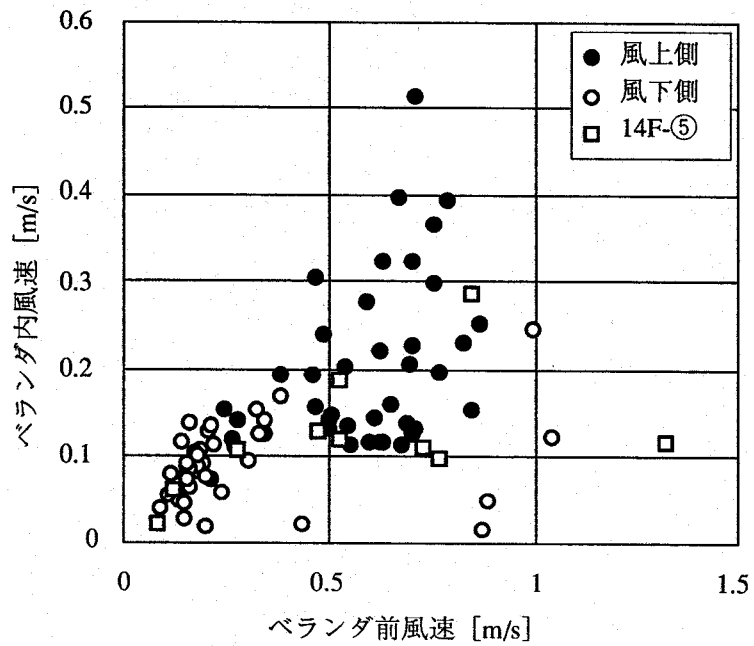
図6.16 風向とベランダ前風速及びベランダ内風速との関係 (風洞実験値)

(4)ベランダ前風速とベランダ内風速との関係 (風洞実験結果)

図6.17は、風洞実験によって得た、ベランダ前風速とベランダ内風速の関係を
示したものである。(a)はベランダ別にプロットを分けたもの、(b)は①から④のベ



(a) ベランダ別



(b) 風上側・風下側別

図6.17 ベランダ前風速とベランダ内風速との関係
(風洞実験値)

ランダについて風上側と風下側に分けたものである。14F-⑤は、建物の妻側にあるためプロットを別にしてしている。両者に正の相関は見られるものの、かなりのばらつきがあることがわかる。(b)より、風下側の場合(○印)には、ベランダ内風速が大きいにも関わらずベランダ内風速が小さい場合があることがわかる。これらの点を除けば、ベランダ前風速に対するベランダ内風速の比は大方0.2から0.7程度の範囲内にある。このばらつきは、風洞実験の誤差と、ベランダの位置と風向によってきまるベランダ前気流の向きとベランダ前の風速分布の差異に影響を受けているものと言うことができる。風上側と風下側の比較では風下側の方が両風速の比は大きい傾向が認められる。

図6.13の実測値では、ベランダ前の風速とベランダ内の風速比は風上側でおよそ0.2から0.25、風下側で0.1から0.2で、風下側の方がむしろ小さい値であり、風洞実験における傾向とは異なっていた。この傾向の差異は、風下側はベランダ前風速、ベランダ内風速ともに小さく、実験誤差も大きいことが一因といえる。

6.3.3 超高層集合住宅のベランダ内風速

6.3.3.1 実験概要

超高層集合住宅におけるベランダ内風速の予測に有用な資料を得ることを目的として、6.3.2で測定した高層集合住宅が建つ高見フローラルタウン内に建設予定の30階建超高層集合住宅を対象に、風洞模型実験によってベランダ内風速、ベランダ前風速、建物上空風を測定する。用いた風洞、境界層、模型の縮尺、実験方法などは6.3.2の高層集合住宅の風洞実験と同じである。図6.18は同団地完成時を再現した模型の配置図である。円外の建物は、それらが測定対象の超高層集合住宅の風上側に位置する場合のみ風洞内に設置した。

風洞の床上80cmの地点での風速を10m/sに設定して実験を行なった。風速を測定した点は9階、16階、23階、30階で、風速が強いと思われる風上側のベランダ前8mm(実物では2mに相当)のベランダ前風速と、ベランダ内床上130~180cm(プローブの長さが2mmなので、その長さが50cmに相当する。)で壁面と手摺りの中央部に位置する点で、主としてベランダ中央部と入り隅部のベランダ内風速である。測定点は階ごとに異なる。風向は、S, W, WNW, NW, N, NEの6

風向である。

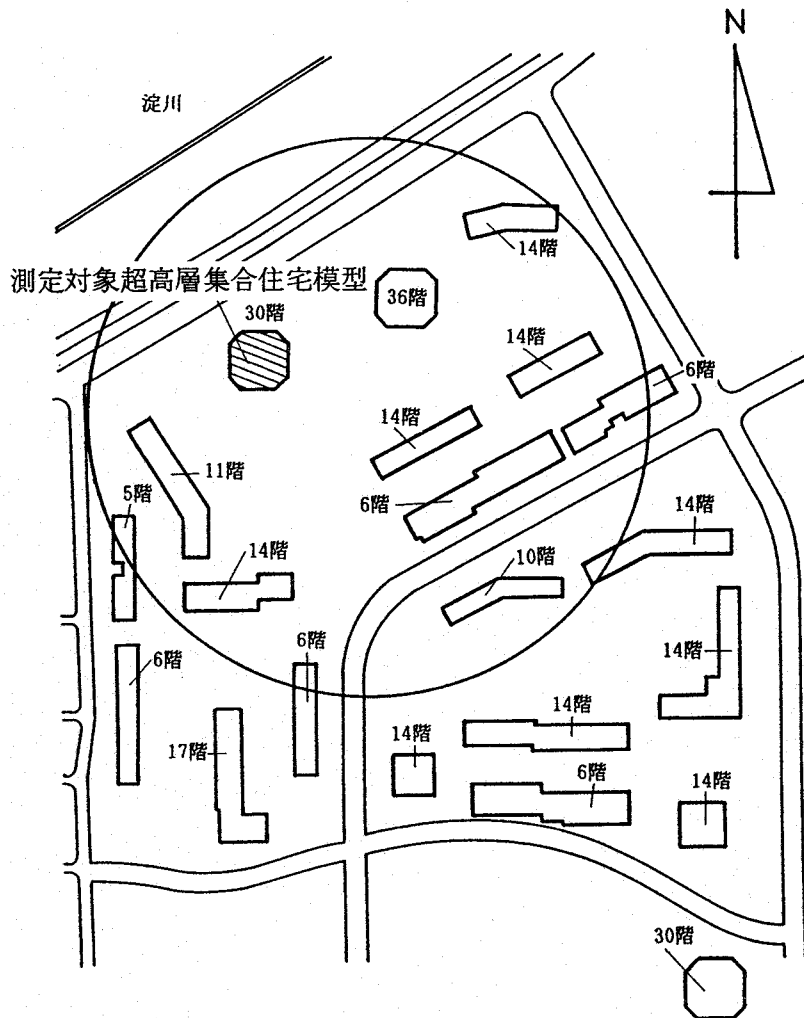


図6.18 超高層集合住宅模型配置図

6.3.3.2 結果と考察

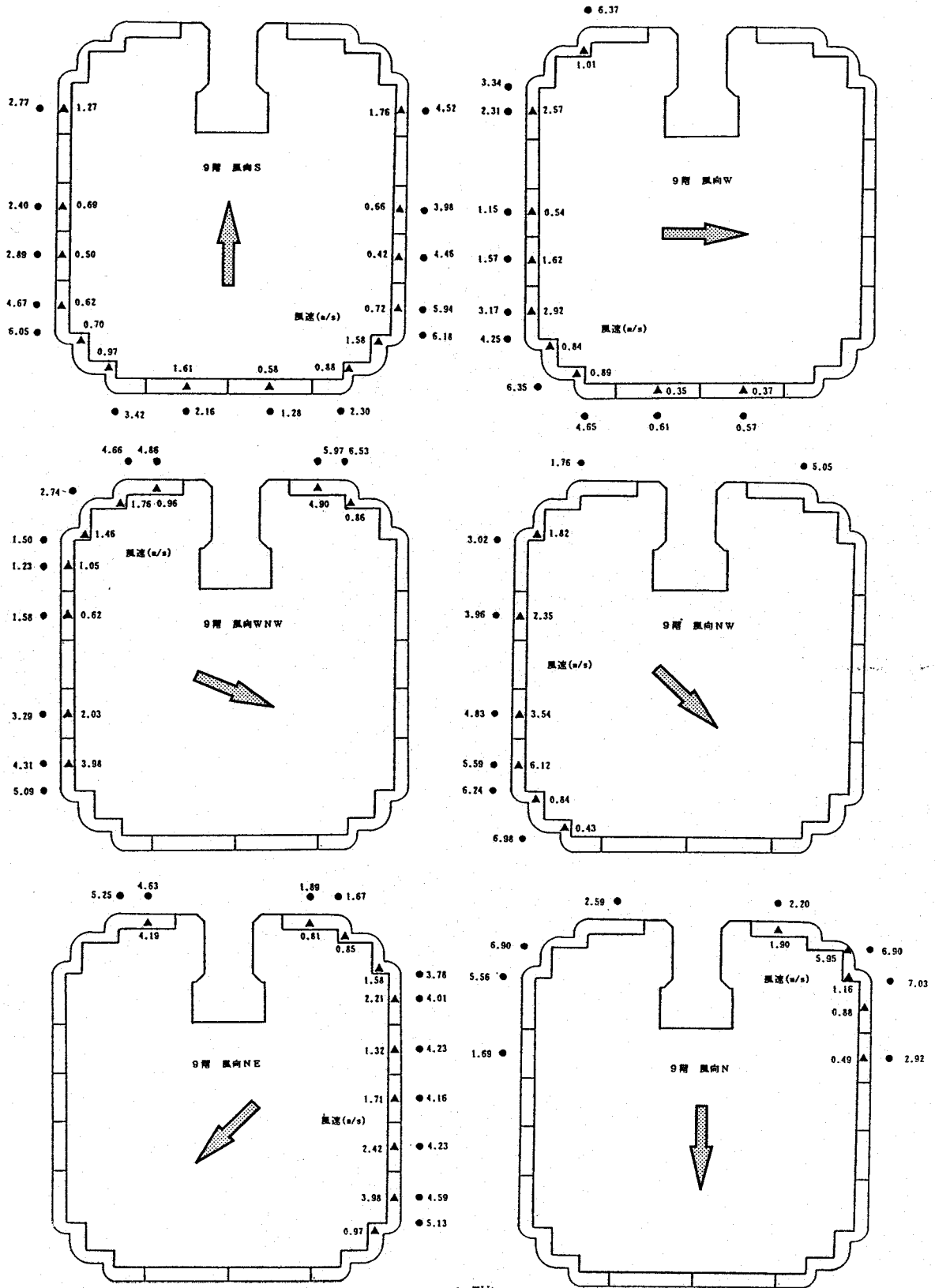
図6.19に測定した各階、各風向におけるベランダ前風速とベランダ内風速を示す。どの階・風向についても風上側の端部のベランダで、ベランダ前風速、ベランダ内風速ともに大きくなるのがわかる。端部のベランダでは、ベランダ前で流線が集まり強風域となることが原因となってベランダ前風速が大きいと考えられる。また、片側の端部にベランダ仕切り板がなく、開放されている上に、ベランダ前が強風域となっているためベランダ内風速も大きいものと考えられる。

ベランダ内風速について、各階ごとに最も大きい風速値を抜き出すと、9階：6.1 (NW)、16階：5.6 (NE)、23階：6.9 (NE)、30階：6.6 (NE)である。また、端部

のベランダを除けば他のベランダ中央部や入隅部では概ね 2 m/s以下である。

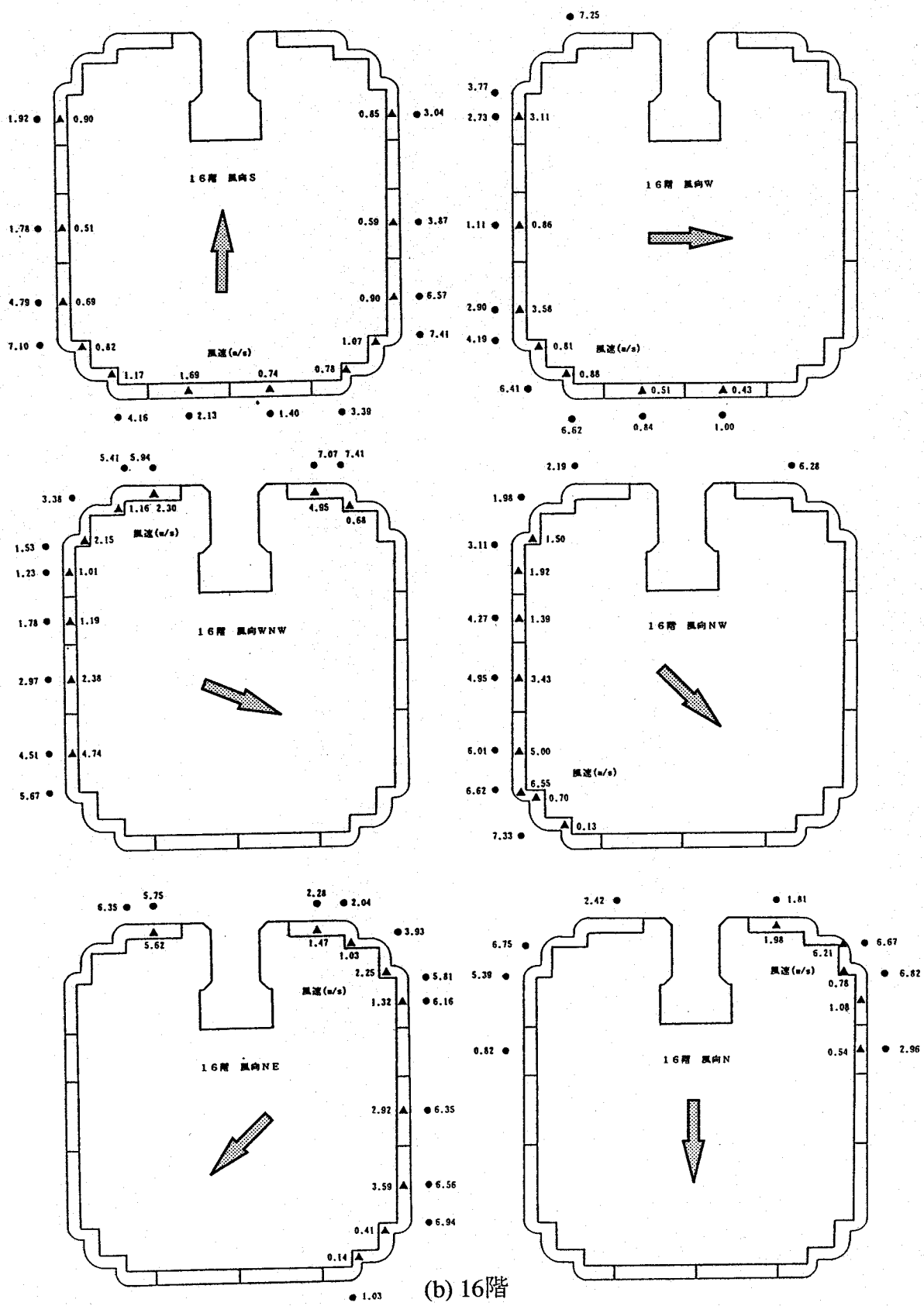
6.3.2の風洞の予測精度を勘案すれば、地上200m（風洞床上80cm）で10 m/sの風が吹くとき、この超高層集合住宅では、端部ベランダで3.5～14m/s、それ以外で1～3m/sの風が吹く可能性があるといえよう。

ここで示した図は特定位置のベランダについてのものであり、風向に対して背面側のベランダの資料は得られていないが、超高層集合住宅のベランダ内風速の予測の上有用な資料となり得ると考える。

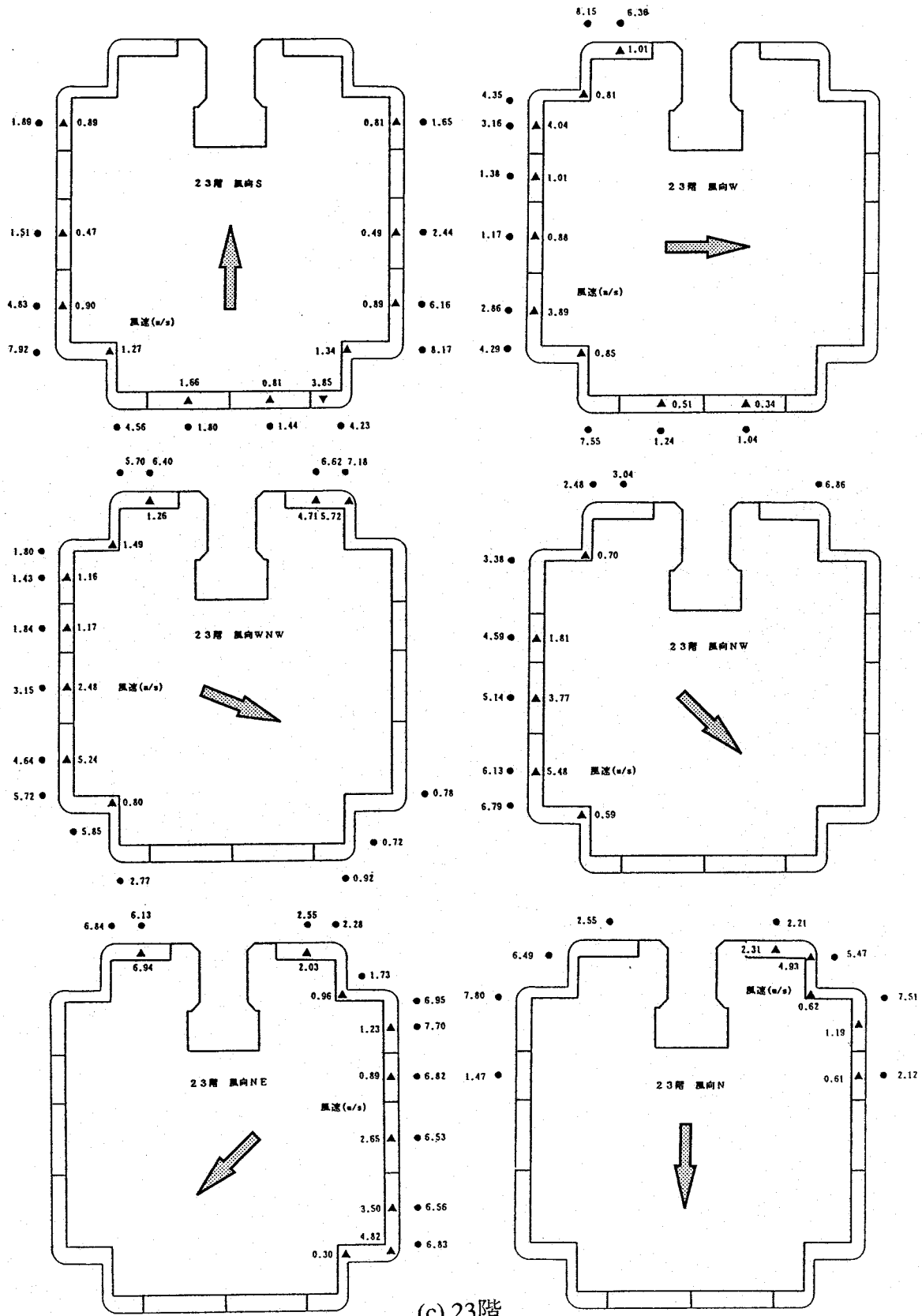


(a) 9階

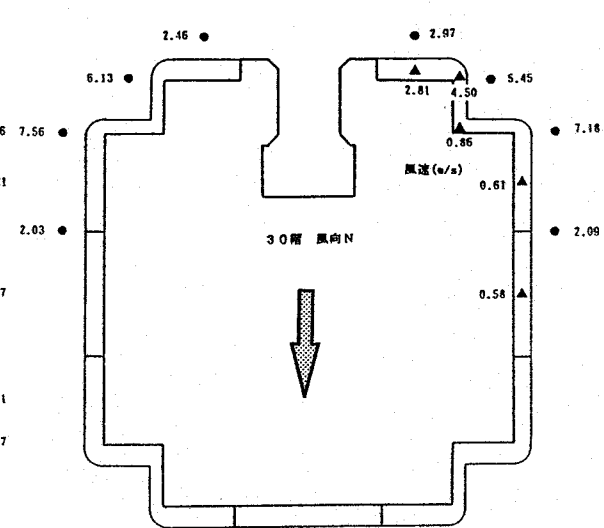
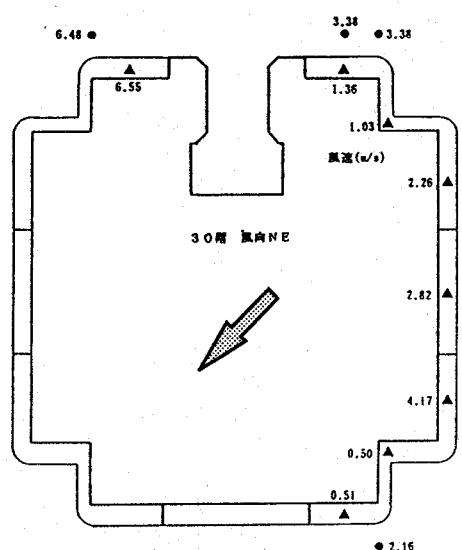
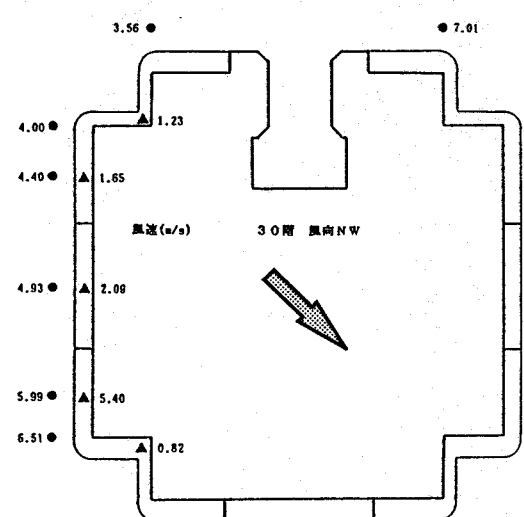
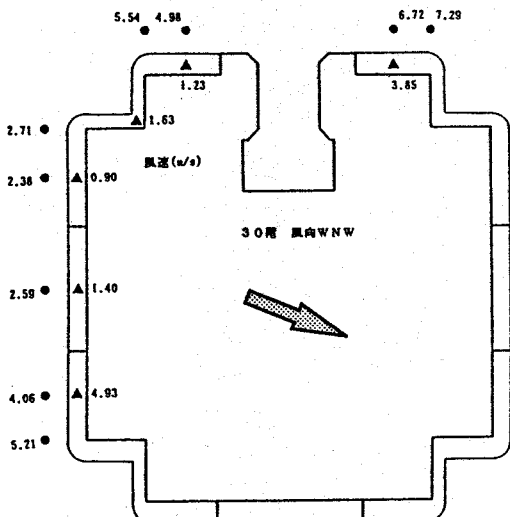
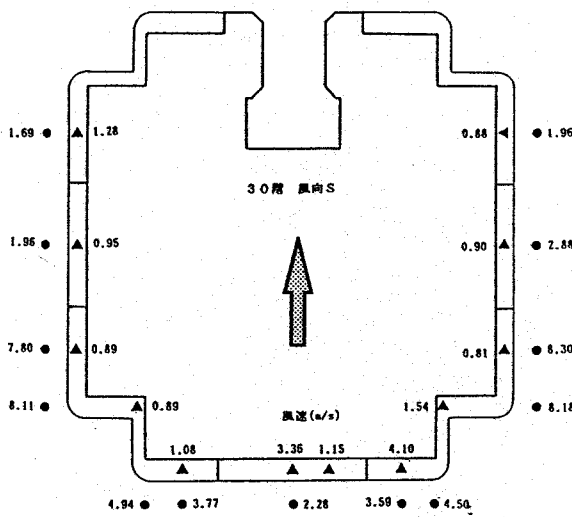
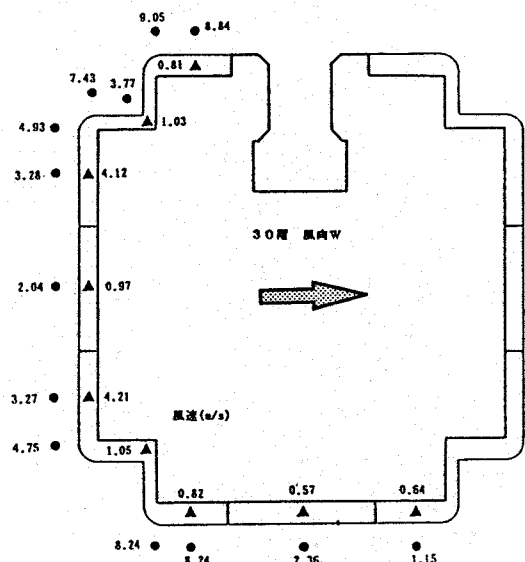
図6.19 超高層集合住宅模型バルコナ前・バルコナ内風速分布



(b) 16階



(c) 23階



(d) 30階

6.3.4 ベランダ内の風速分布

6.3.4.1 実験概要

ベランダ内の詳細な風速分布について検討を行なうため、6.3.2、6.3.3で測定対象とした集合住宅のベランダ部のみを再現したモデルを、一様な風の吹く風洞内に設置し、ベランダ前風速分布及びベランダ内風速分布を測定する。また、実物の高層集合住宅の10F-②のベランダでベランダ内風速分布の実測も行なった。風洞のベランダモデルは3階分のベランダを再現したもので、左右・上下のベランダも再現している。縮尺は1/30である。

風洞実験の条件を表6.6に示す。風洞実験において風速は熱線風速計によって測定し、実測ではベランダ内風速は定温度型熱式風速計、ベランダ前風速は三次元超音波式風向・風速計を用いた。

6.3.4.2 結果と考察

(1)高層集合住宅のベランダ内風速分布

図6.20に実物の高層集合住宅の模擬ベランダ10F-②における床上120cmでの平均風速（8～10分間平均）の床上120cmでの分布を示す。数値はベランダ前2mの地点での風速に対する比で表している。この測定の時、建物上空風速は約10m/s、風向はWSWで安定しており、ベランダ前風速はほぼベランダと平行で、13°の吹き上げ流となっており、平均風速は5m/s前後であった。図から、ベランダ内の風速は、ベランダ前の風速に比べて壁面から26cmの位置で約0.12～0.23倍、壁面から56cmの位置で0.1～0.18倍程度であり、ベランダ中央部付近ほど強い風が吹いていることがわかる。また、ベランダ端部付近に対して、中央部では約2倍程度の平均風速となっている。

図6.21は、縮尺1/30のベランダモデルを用いて風洞内で測定した床上120cmに相当する高さにおける風速分布である。実測で風速分布を測定したベランダ10F-②と若干形状は異なるが、ほぼ同じベランダの幅である。これを見ると、ベランダ内風速は壁面から30cmに相当する位置でベランダ前2mの地点の風速（9.88 m/s）の約0.11～0.2倍、壁面から60cmに相当する位置で、0.09～0.16（端部で0.18）倍となっており、これは図6.20の実測した風速範囲とほぼ一致している。しかし、

分布については、風下側のベランダ端部の風速が中央部の風速より大きな風速となっており、図6.20とは若干傾向を異にする。この原因としてはベランダ模型が建物の一部だけを取り出したものであり、ベランダ前の風速分布が忠実に再現できていない可能性があること、ベランダの形状が若干異なることなどが考えられる。

しかしいずれにしても、片廊下型の高層集合住宅のベランダにおいて、ベランダ前の気流が水平方向に流れるとき、ベランダ前風速に対するベランダ内風速の比はおよそ0.1から0.2程度であると推定することができよう。

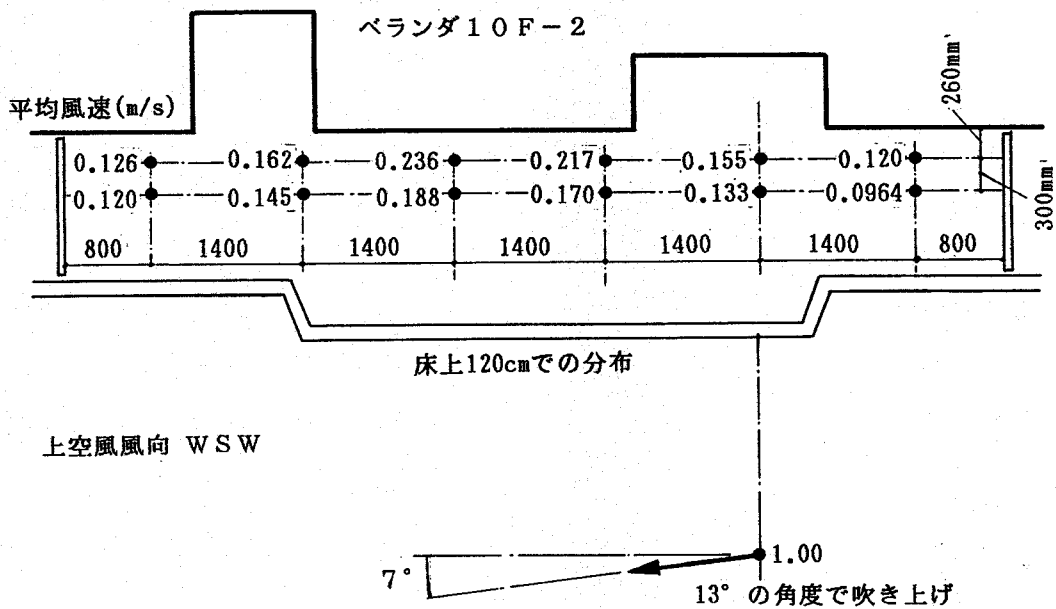


図6.20 実物高層集合住宅ベランダ内 (10F-②) 平均風速の分布 (床上120cm)

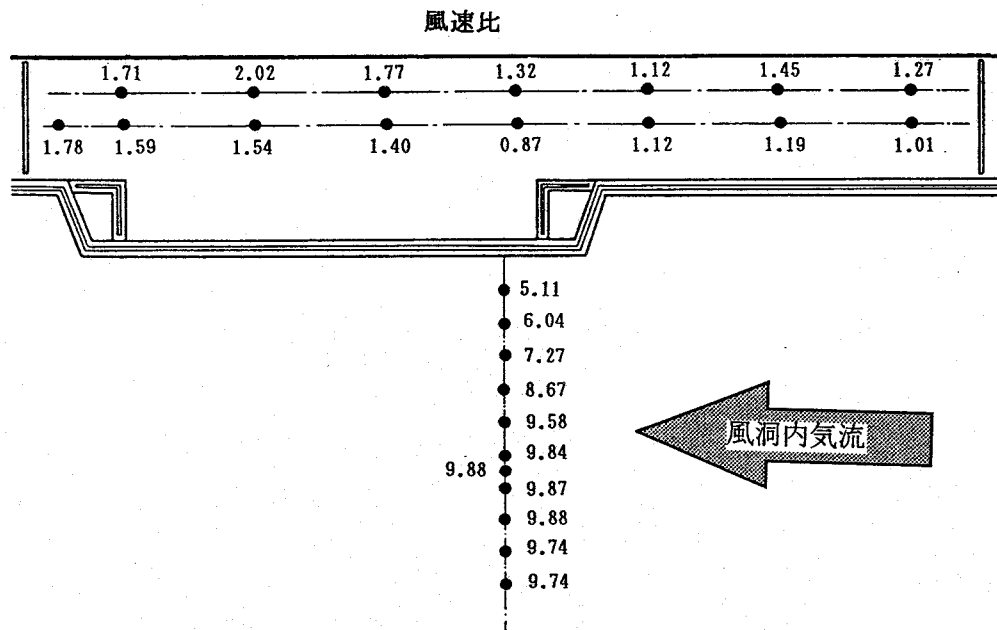


図6.21 高層集合住宅模型ベランダ内 (ベランダ①) 平均風速の分布
(床上40mm：床上120cm相当)

(2) 超高層集合住宅のベランダ内風速分布

図6.22、図6.23に、縮尺1/30の超高層集合住宅のベランダ模型を用いて風洞内で測定したベランダ前及びベランダ内の風速分布を示す。図6.22より、限られた風向の条件ではあるが、ベランダ内についても、ベランダ前についても、壁面に垂直な方向にはそれほど大きな風速分布は存在しないものといえる。

図6.23を見ると、ベランダ前での風速が6～7 m/sであるのに対して、床上130cmに相当する位置 (模型床上44mm) では、3～7 m/s (風速比：約0.5～1)、床上60cmに相当する位置 (模型床上21mm) では、1～6 m/s (風速比：約0.15～1)、床上180cmに相当する位置 (模型床上59mm) では6～8 m/s (風速比：ほぼ1) となっている。ベランダ内では上部ほど風速が高いことがわかる。また、ベランダ前の風速に対するベランダ内の風速の比は高層集合住宅のそれに比べてかなり大きく、位置による違いも大きいことがわかる。興味深いことは、どの断面においても、柱の前で風速が大きく、他の部位での風速の2倍程度になっていることである。これはベランダ内の断面積の減少に原因しているものと考えられる。

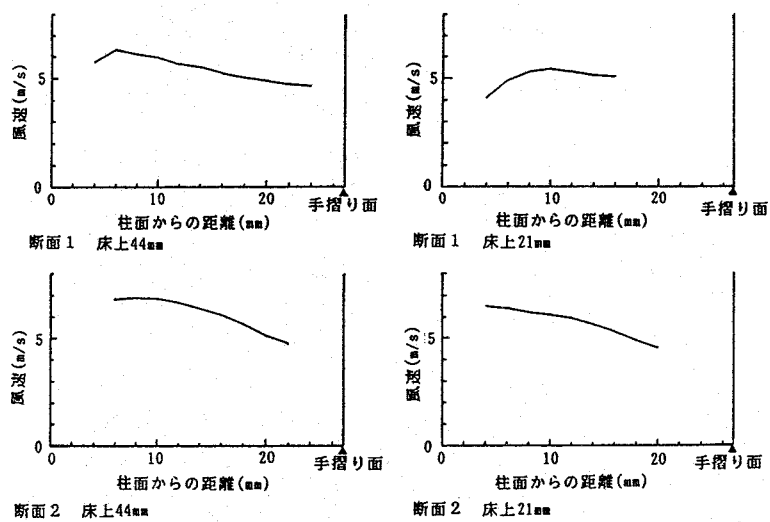
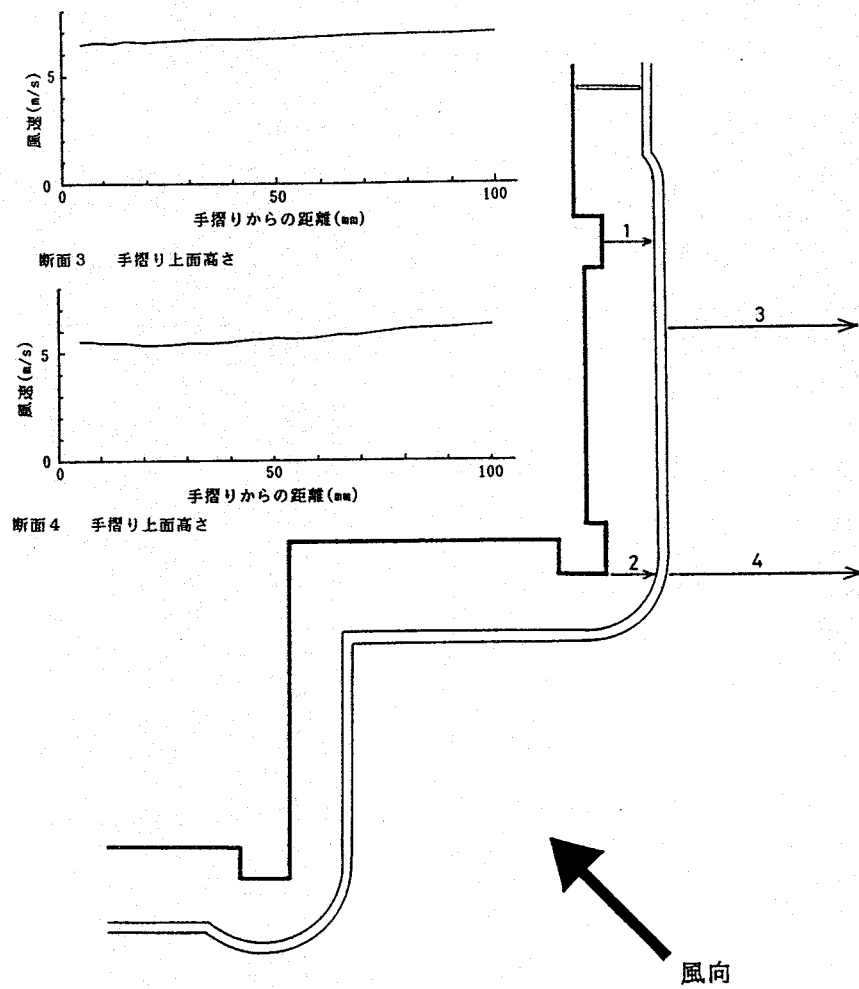


図6.22 超高層集合住宅模型ベランダ内風速分布（壁面と垂直方向）

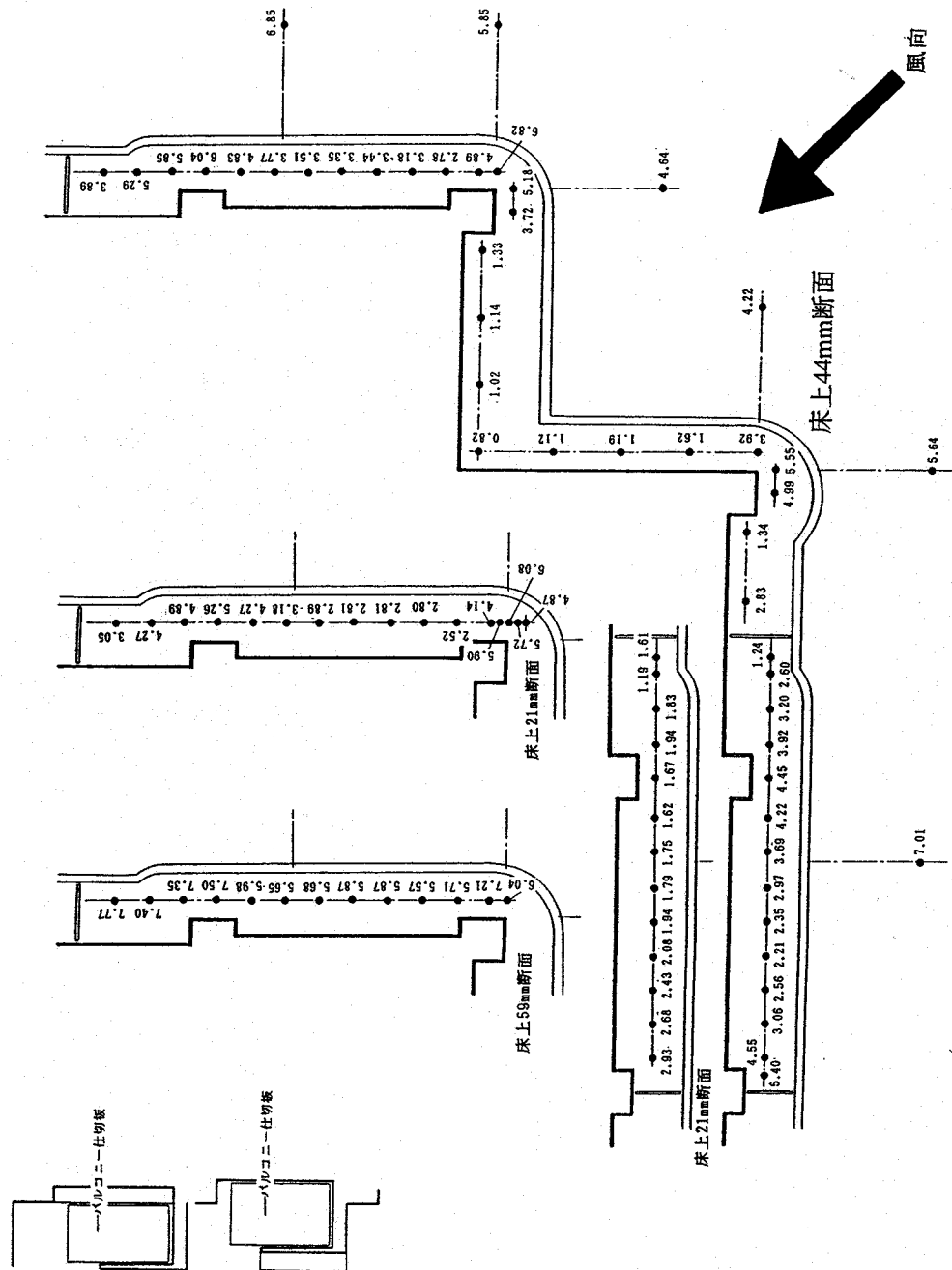


図6.23 超高層集合住宅模型バルコニー内風速分布 (a) 風向①

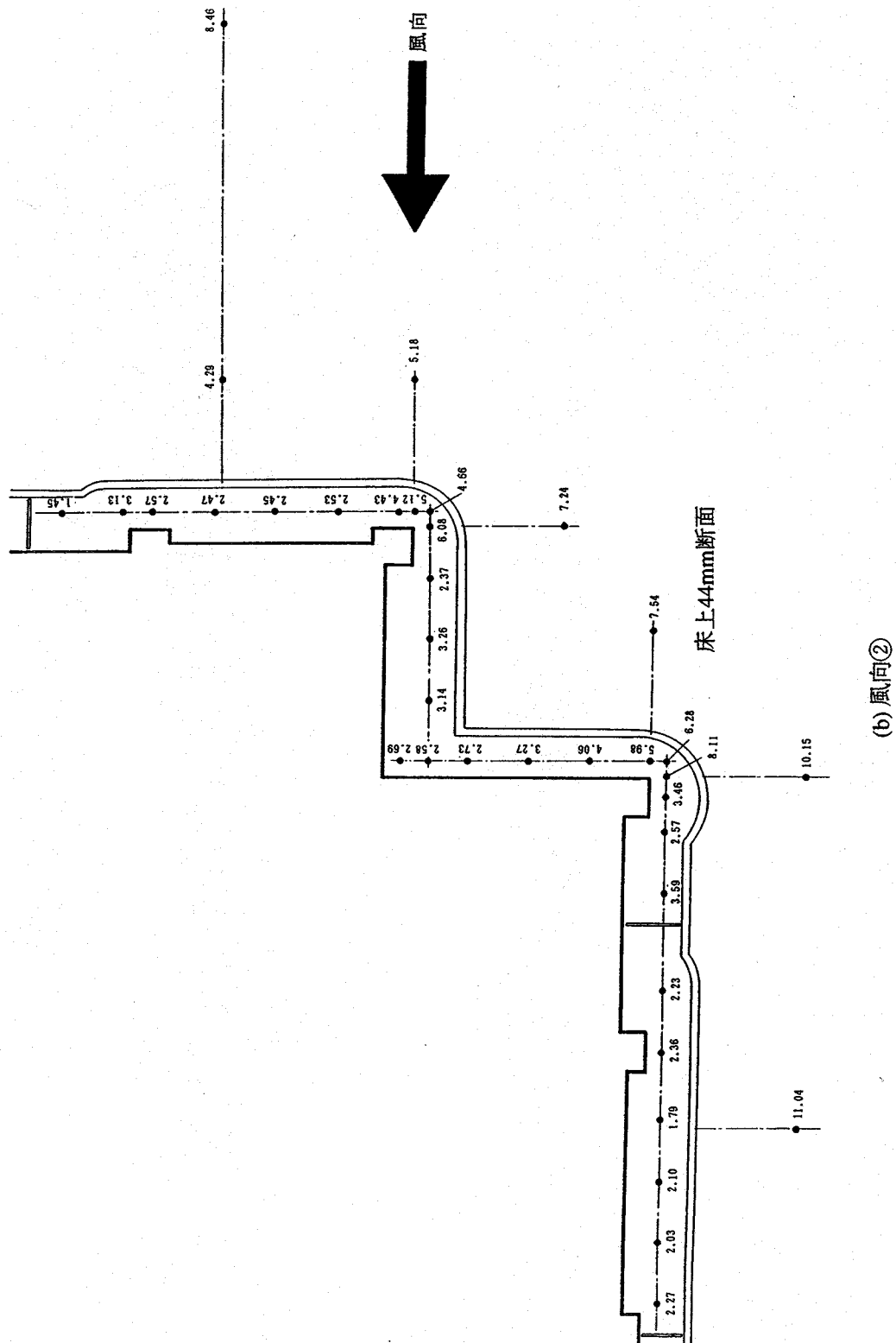


図6.23 超高層集合住宅模型ベランダ内風速分布 (b) 風向②

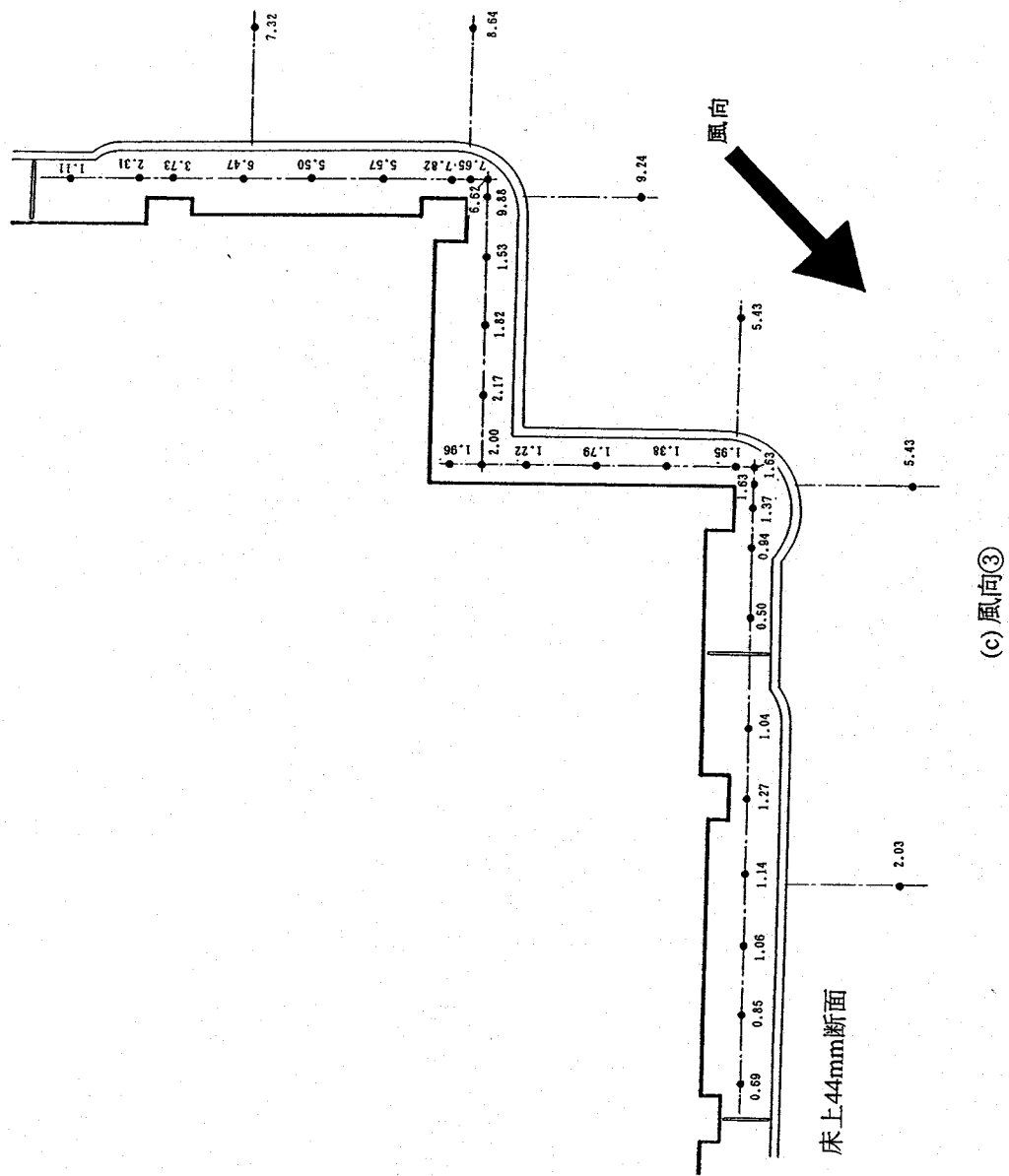


図6.23 超高層集合住宅模型バルコニー内風速分布 (c) 風向③

6.3.5 まとめ

本節で得られた結果を総合すると以下の様に結論づけられる。

(1)風洞実験の精度は、上空風速とベランダ内風速の関係においては凡そ0.5倍～2倍程度であり、上空風とベランダ前風速、ベランダ前風速とベランダ内風速との関係においても同程度であると推察される。

(2)片廊下型高層集合住宅のベランダ前風速とベランダ内風速の比は、ベランダ前の気流が水平に近い場合は、およそ0.1から0.25程度であり、ベランダが風下側に面する場合には実測からは0.1～0.2程度であるがばらつきは大きいと考えられる。

(3)実験対象とした超高層集合住宅のベランダの場合、地上200m（風洞床上80cm）で10 m/sの風が吹くとき、端部ベランダで3.5～14m/s、それ以外で1～3m/sの風が吹く可能性が高い。

(4)超高層集合住宅のベランダの場合、ベランダ前風速に対するベランダ内風速は場所によって非常に大きく異なり、0.15～1程度の範囲の値を取る。

以上から、片廊下型の高層集合住宅のベランダに関しては、ベランダが風上側でベランダ前をほぼ水平に風が流れると予想される場合には、6.2の資料をもとに壁面近傍風速を算出し、0.1～0.2を乗ずることでベランダ内開口近傍風速を求めることができる。ベランダ内に単一開口がある場合には、壁面の風速分布が均一と仮定すれば、求めた壁面近傍気流風速は混合層外端風速に等しいため、(5.6)式によって通気量を算出することが可能である。風下側などのその他の条件の場合には、確かな結果は得られなかったが、空気清浄の観点から安全側としては0.1程度の値を用いることが適当であろう。

超高層集合住宅の端部近くのベランダの場合にはベランダの位置や風向によってベランダ内風速が大きく異なるため、ベランダ前の風速からベランダ内の風速を予測することは現実的ではなく、風洞実験値を参考に上空風からベランダ内風速を予測するほうが望ましい。ただ、壁面の中央付近のベランダについては、高層集合住宅と同様の手法でのベランダ内風速の予測が可能であろう。

6.4 本章のまとめ

本節の検討によって、外壁の表面が平滑な建物の壁面近傍気流の壁面境界層外端の風速分布に関する資料を得ることができた。ただし、滑面近傍の風速分布に関しては現状では一定として取り取り扱わざるを得ない。

また、片廊下型の高層集合住宅のベランダに関しては、ベランダが風上側でベランダ前をほぼ水平に風が流れると予想される場合には、本節での資料をもとに壁面近傍風速を算出し、0.1~0.2を乗ずることでベランダ内壁面近傍風速を求めることができる。風下側ベランダなどのその他の条件の場合には、安全側として0.1を乗ずれば良い。

超高層集合住宅の端部近くのベランダの場合には風洞実験値を参考に上空風からベランダ内風速を予測するのが望ましい。ただ、壁面の中央付近のベランダについては、高層集合住宅と同様の手法でのベランダ内風速の算出が可能である。

第7章 建物壁面風圧係数の予測法

7.1 本章の目的

第4章～第6章における検討によって、建物内の部屋がただ一つの開口しか持たない場合における開口部通気量の予測は可能になったものといえる。しかし、一般的には複数の開口を持つ室が多いことは周知の事実であり、そのような室においては定常通気が卓越するであろうことは第3章で述べた通りである。

第3章3.2において、定常通気時の換気のみカニズムは解明され通気理論も確立されているが、風力換気計画を行なうためには風圧係数の予測法の確立が不可欠であることを述べた。現在、風圧係数の予測法としては、風洞実験による方法及び流体力学に基づく数値シミュレーションによる方法の二種類があるが、いずれの方法も多く費用と時間がかかる。戸建ての住宅に関しては、その形状の多様さから風洞実験等による個別の予測に頼らざるを得ないが、直方体建物の場合には実験値をもとに風圧係数を建物の形状をパラメータにした数式で表現することが可能と考えられる。

故に本研究は、風力換気計画に用いる簡易な風圧係数の予測法として、高層・超高層建築物の風圧係数を十分な精度を保ちながら、任意の形状の建物、位置、風向における風圧係数を机上でパソコン程度を用いて簡易に予測することができる手法を開発することを目的とする。

本章では、建物形状のパラメータをアスペクト比で表現できる正方形平面を持つ高層・超高層集合住宅を対象にする。通常建物の平面は必ずしも正方形ではないが、正方形平面の風圧係数の予測法が確立した上で、その適用範囲を長方形に拡張するための検討を行なうことで、長方形建物の風圧係数の予測法は比較的容易に確立できるものとする。

具体的には、正方形平面を持つ単純な直方体建物の壁面の風圧係数の分布と風向特性を把握するとともに、建物スケールが軒高速度圧基準の風圧係数に及ぼす影響について検討する。その上で、風圧係数の風向特性の関数化を試み、任意のパラメータを入力とする関数式の決定法の確立を試みる。

7.2 正方形平面を有する建物の壁面風圧係数の分布と風向特性

7.2.1 本節の概要

本節では、正方形平面を有する建物の壁面風圧係数の分布が、建物の高さや壁面上の位置、風向などによってどのように変化するか、また、ある位置での壁面風圧係数が風向によってどの様に変化するのかについて検討し、正方形平面を持つ建物の壁面風圧係数の簡易予測法を確立するうえでの基礎的な知見を得る。建物の壁面風圧係数は、境界層型風洞を用いた模型実験によって測定する。

7.2.2 実験概要

実験は大阪大学工学部研究用風洞（回流型、測定胴は $1.8 \times 1.8 \times 9.5\text{m}$ ）内に接地境界層を再現し、風洞床面上に種々の建物模型を設置し、その壁面風圧係数を測定するという手法によって行った。接地境界層は、図7.1に示す様に測定胴上端部の乱流格子と床面に配列した大・小二種のラフネスによって作成した。風洞内の様子を図7.2に示す。この境界層は、第5章5.4で作成したのと同じであるが、本章ではかなり大きな模型を用いることから水平方向の風速分布に関しても詳細な検討を行なう。

風洞内境界層内に図7.2に示す4種類の建物模型を設置し、模型壁面にかかる風圧をトランスデューサー（バリダイイン社製、MP45-1-871 0~1000Hz flat 0~10 mmAq）によって測定する。トランスデューサーの出力はAD変換ボードを装着したパソコンを用いて30秒間の平均値をフロッピーディスクに記録した。測定点は図7.3中の・印で示した点である。実験条件を表7.1に示す。風圧の基準静圧は風洞中央の床上100cmの地点でピトー管によって測定した静圧である。風洞内静圧に不均一がないことはあらかじめ確認した。風圧係数の基準速度圧は、床上80cmの速度圧或いは各模型の軒高の速度圧とする。図7.4に風向の説明を示す。

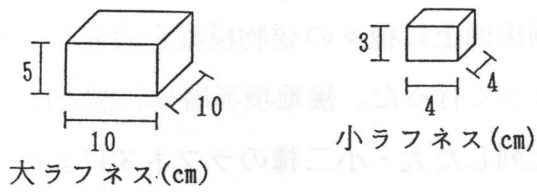
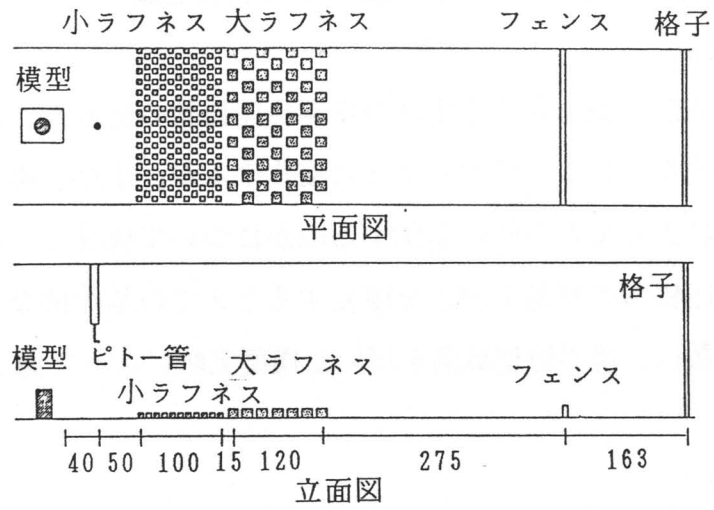


図7.1 風洞内平面図及び立面図

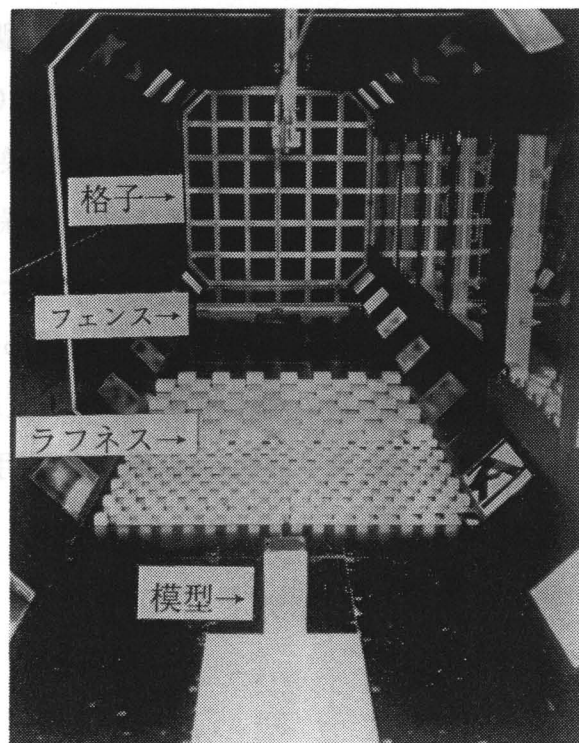


図7.2 風洞内部

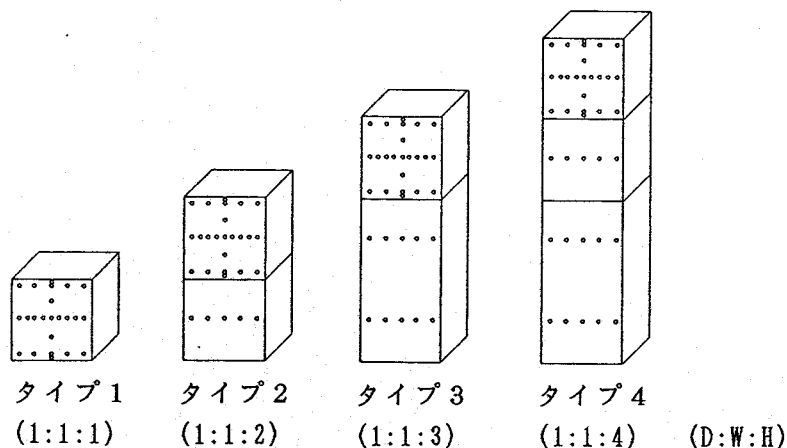


図7.3 使用した模型（・測定点）



図7.4 風向説明図
(建物平面図)

表7.1 実験条件

模型タイプ	1	2	3	4
設定風速 [m/s]	10 (風洞床上80cm)			
測定側面	1面			
建物高さ [cm]	10	20	30	40
風向* θ [°]	0, 22.5, 45, 67.5, 90, 112.5, 135, 157.5, 180			

*図7.4参照

7.2.3 結果と考察

(1) 風洞内境界層の特性

境界層の鉛直方向の風速分布を図7.5に示す。風洞中央部で $\alpha=1/5$ の指数則に従う（図中▲印）風速分布となっていることがわかる。図中には中央断面から風上に向かって右方向10cm～40cmの地点の風速の鉛直分布も示しているが、中央断面から外側に離れるほど風速の絶対値は若干高くなり、風速分布形状も変化することがわかる。これは、風洞床面の両側にラフネスを設置することができないため、外縁の風速が大きくなることの影響であると考えられる。（図7.2参照）

図7.6には風洞内風速の水平方向の分布を示している。図7.7は、境界層内の乱れの強さの鉛直分布を示したものである。床面上30～60cmで場所による差が大きくなっているが、これは平均風速の差異に起因するものと考えられる。

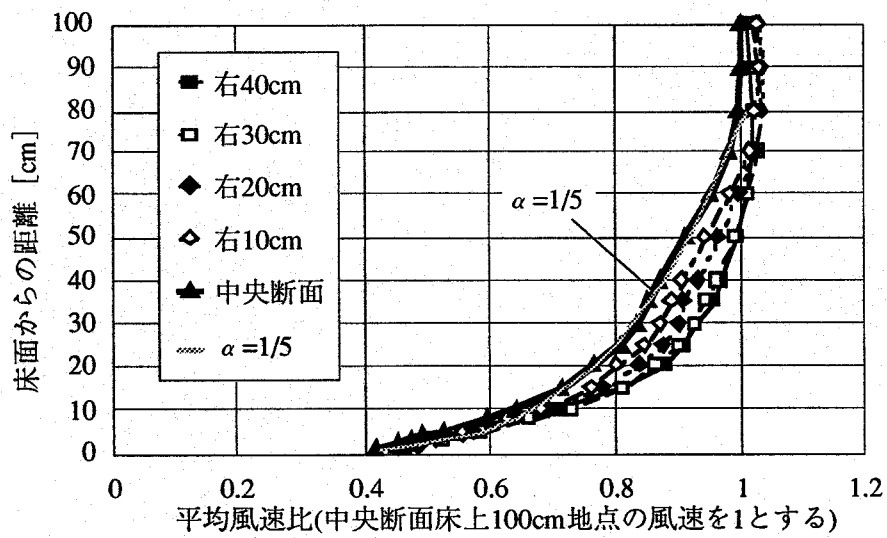


図7.5 風洞内平均風速の分布

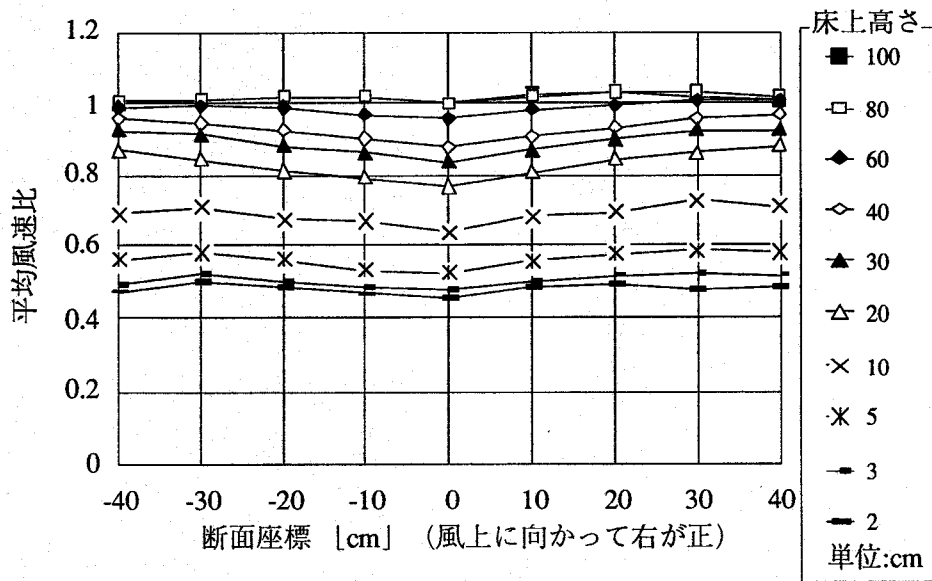


図7.6 風洞内平均風速の水平面分布

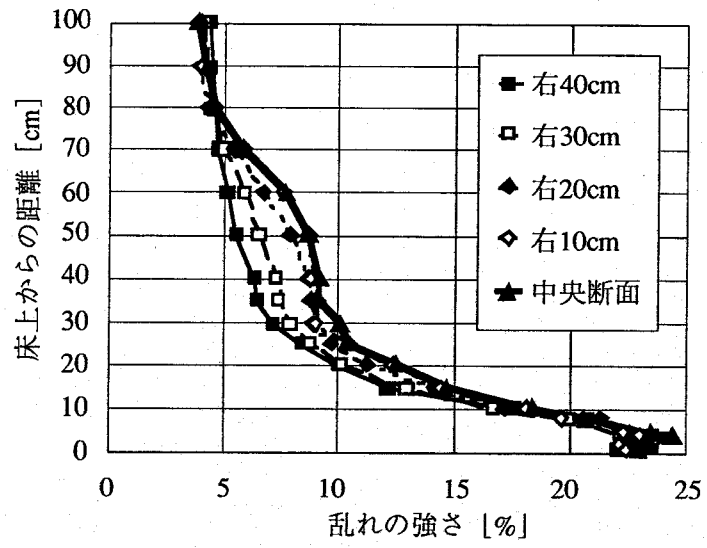


図7.7 風洞内乱れの強さの鉛直分布

(2) 壁面風圧係数の水平方向分布

図7.8は、タイプ4の建物模型の(3/8)H、(31/41)H、(39/40)H (H：模型の高さ)の高さでの風圧係数分布を重ねて描いたものである。図中の矢印は風洞内気流の方向を示している。風圧係数の基準速度圧は風洞床上100cmの高さでの速度圧である。風向が変化すると分布曲線の形が大きく変化するが、測定点の高さによる風圧係数の差異は、風向による変化に比べると小さいことがわかる。

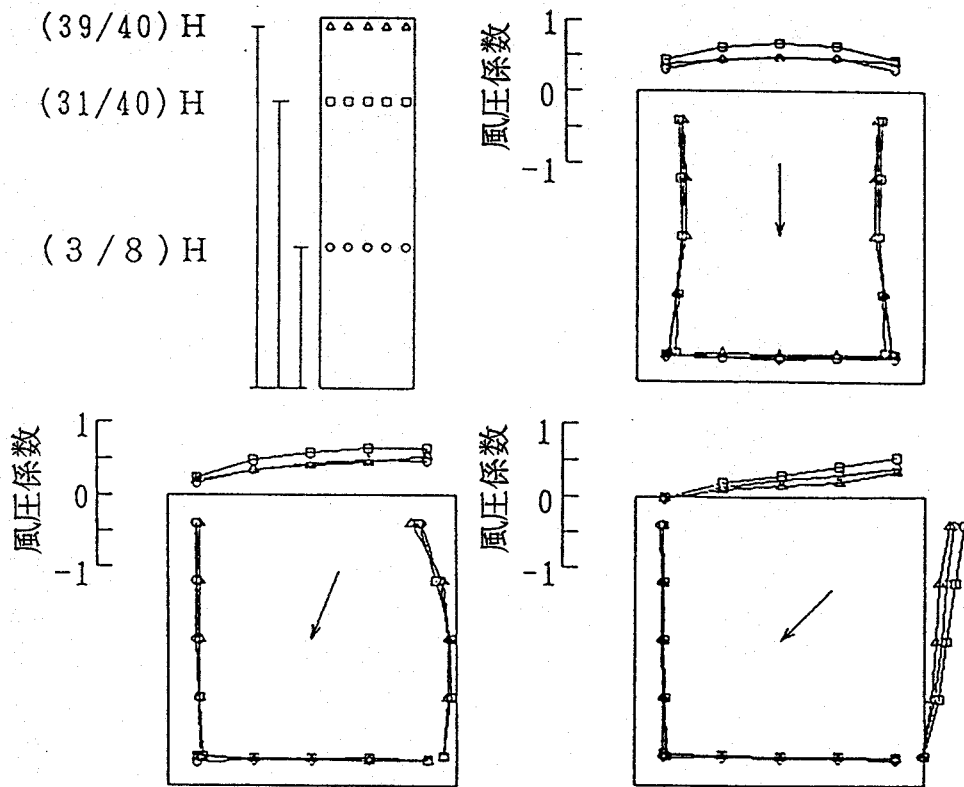


図7.8 風圧係数の水平方向分布
(タイプ4：矢印は風の方向)

(3) 壁面風圧係数の鉛直方向分布

図7.9はタイプ4の建物模型の(1/2)Wの測定点(中央点)の風圧係数が風向によってどう変化するかを示したものである。(風圧係数の基準速度圧は風洞床上100cmの高さの速度圧である。)風向が 0° の場合(図中○印:風が測定壁面に垂直に吹き当たる場合)には、建物の下部から上部になるに従って徐々に風圧係数が大きく、建物の上部付近に一つのピークを持つような分布形状になっており、建物の上端部付近で急激な風圧係数の低下がみられる。この分布形状は風向が 45° の場合(図中△印)でも変化しないが、風圧係数の絶対値は入射角 0° の半分程度になっている。風向が 90° (□印)、 180° (●印)の様、測定面が建物のWAKE内に入る場合には、風圧係数の鉛直分布に大きな不均一は生じないことがわかる。ただ、風向 90° と 180° では、風圧係数の絶対値には凡そ倍の差が存在することがわかる。

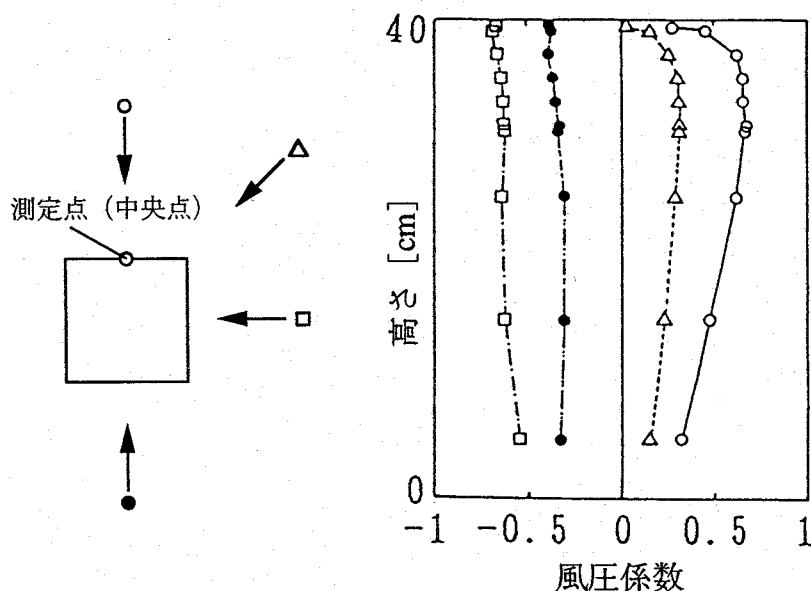


図7.9 中央点における風圧係数の鉛直方向分布
(タイプ4:矢印は風の方向)

図7.10は、タイプ4の建物について、図に示す風向（ 0° と 67.5° ）及び平面上の測定点（○△□●▲）の風圧係数の鉛直分布を示したものである。（風圧係数の基準速度圧は風洞床上100cm）(a)の風向が 0° の場合には、いずれの位置の風圧係数の鉛直分布も相似な形状であることがわかる。端部の点での風圧係数は中央の三点より3割程度小さい値を示している。(b)の風向が 67.5° の場合にはすべての点の風圧係数は負の値を示し、鉛直分布の形態に場所によって若干の差異はあるが、いずれもあまり大きな分布はないことがわかる。最も風上に当たる点（▲）では、端部での剥離の影響で負圧が大きくなっていることがわかる。

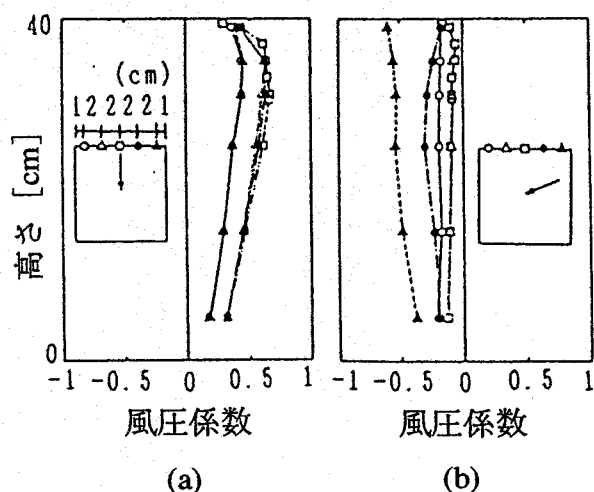


図7.10 平面上の各位置における風圧係数の鉛直方向分布
(タイプ4：矢印は風の方向)

図7.11は、建物のタイプによって風圧係数の鉛直分布がどう異なるかを示すため、風向 0° での中央点と 67.5° での風上端部点での各建物の風圧係数分布を重ねて示したものである。縦軸は、各建物の軒高を1として基準化している。風圧係数は建物高さの影響をなくすため、建物の軒高さでのアプローチフローの速度圧を基準にして表したものである。風向 0° [(a)] では建物タイプによる差異はあまり見られないことがわかる。タイプ1では若干平坦な分布となっているが、これは風洞床上10cm以下での風速分布が厳密には指数則に従っていないことが原因であると考えられる。風向 67.5° [(b)] では建物模型タイプによって、風圧係数の絶対値が若干異なることがわかる。

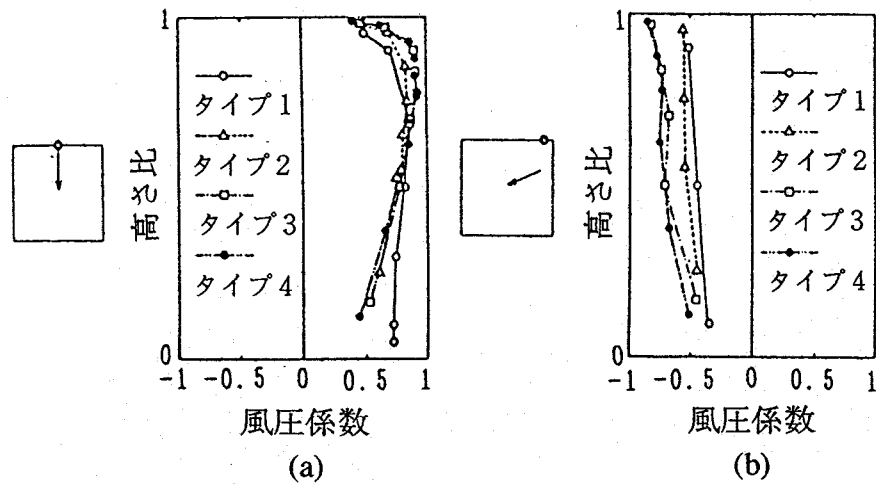


図7.11 同じ平面上の位置における高さ比と風圧係数との関係

(4) 壁面風圧係数の風向特性 (建物タイプ4)

図7.12にタイプ4の建物について、風向と風圧係数との関係を示す。風圧係数は建物の軒高さでの速度圧を基準としている。(a)、(b)は高さが同じ点での比較、(c)、(d)は平面上の位置が同じ点での比較を目的としている。これらの図より、ある測定点の風圧係数は、 $-90^\circ \sim 90^\circ$ の風向における負圧から正圧のピークまで大きく変化する部分と、その他の風向における負圧で変化の少ない部分との二つの部分で構成されていることがわかる。 90° から 270° までの負圧の領域では、測定点の違いによる差異も小さいことがわかる。また、高さが同じで平面上の位置が異なる場合((a),(b))には、 -90° から 90° での曲線形状が異なり、平面上の位置が同じで高さが異なる場合((c),(d))には、 -90° から 90° での曲線形状は同じでピークの高さのみが変化することがわかる。

第2章で述べたように、本研究でその確立を目的としている風力換気計画は、長期にわたる自然風の風速と風向の時系列データ、建物の風圧係数、開口の諸量を入力として、換気量あるいは室内の汚染物濃度の頻度分布を算出、評価することによって行うものである。故に換気計画に必要なのは、設計対象とする室の風圧係数が風向によってどのように変化するかというデータである。図7.12に示した風圧係数の風向特性が建物の形状や大きさ、位置をパラメーターとした関数で表現できれば、換気設計を行う上で非常に有用な風圧係数予測式となるものと考

えられる。図7.12に関する考察から、 $-90^{\circ} \sim +90^{\circ}$ の風圧係数が大きく変化している風向範囲では、中央点で2次関数、その他の点で3次以上の高次の関数で近似を行える可能性が高いと考える。

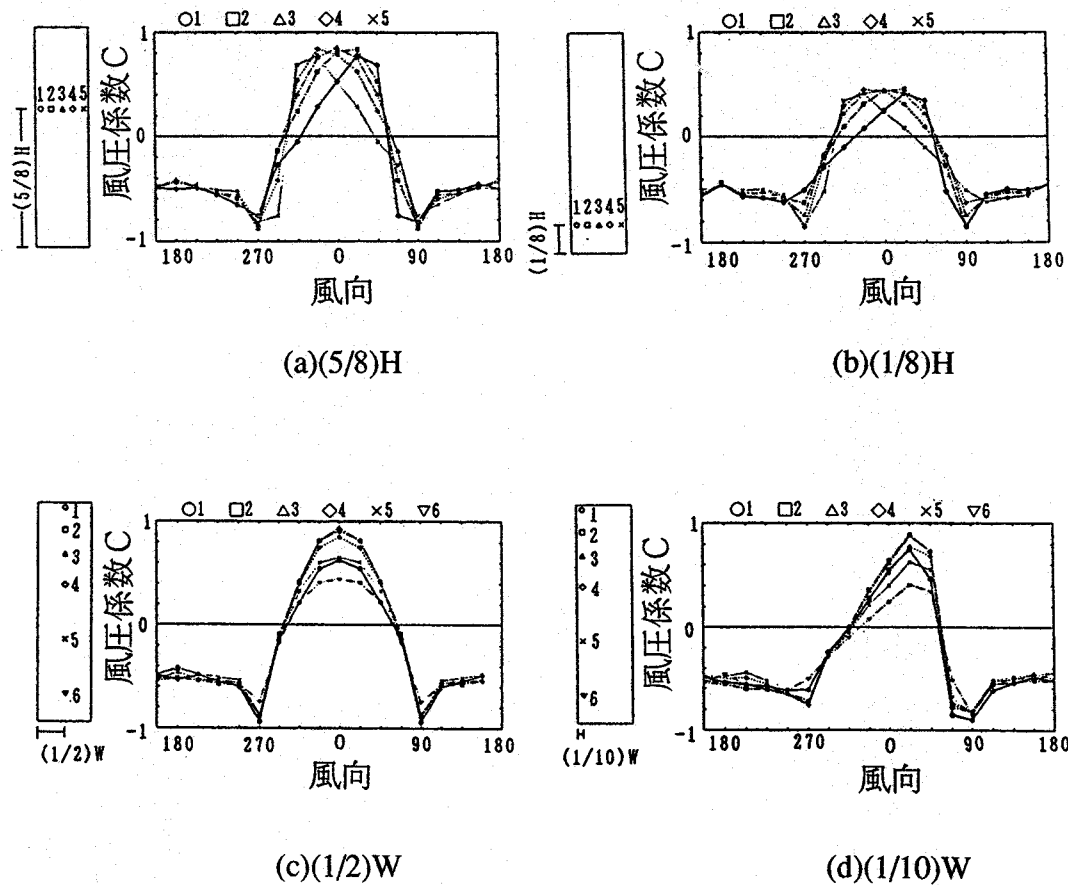


図7.12 風圧係数の風向特性 (タイプ4)

7.2.4 まとめ

本章の検討により、紙面の関係でごく一部ではあるが、風圧係数の壁面分布及び風向の特性の概略を明かにすることができた。また、風力換気設計を目的とした風圧係数を風向の関数として表すためには、 $-90^{\circ} \sim +90^{\circ}$ の風圧係数が大きく変化している風向範囲では、中央点で2次関数、その他の点で3次以上の高次の関数で近似を行える可能性が高いことが明らかになった。

7.3 建物のスケールが風圧係数に及ぼす影響

7.3.1 本節の概要

風圧係数を机上で予測する手法確立のためには、風圧係数の風向特性を関数化することが効果的であるということの前章で述べた。本節では種々の条件をパラメーターとした風圧係数の関数化を試みる前段階として、建物の大きさが風圧係数に及ぼす影響について検討することを試みる。建物の風圧がアプローチフローの平均風速のみによって決まるのであれば、ある高さの速度圧を基準にした風圧係数は、自然風の風速の分布形状のみによって決まることになる。ここで風速分布が指数則に従っていれば、建物上端高さでの風速を1とすれば建物の大きさにかかわらず風速の鉛直分布は等しくなる。故に、自然風の風速の鉛直分布が指数則に従っている場合、建物上端でのアプローチフローの速度圧を基準にして風圧係数を表現すれば、建物の大きさが異なっても風圧係数は等しくなる。しかし、風圧係数が乱れの強さの影響を大きく受けるものならば、乱れの強さは一般に指数則に従わず地表面近くほど大きいため、大きさの異なる建物の風圧係数は同じにはなり得ない。そこで本節では、指数則の境界層型風洞を用い、風洞内に作成した境界層の風速分布・乱れの強さについて検討した上で、種々の大きさを持つ3種類の建物形状、9つの風向について、壁面風圧を測定し、建物の大きさが、建物上端高さの速度圧基準の風圧係数分布に与える影響を風洞実験によって検討する。

7.3.2 実験概要

使用した境界層は前節と同じである。(図7.1~7.2及び図7.5~7.7参照) 風洞内床面に、図7.13に示す3つの形状で、大・中・小の3つの大きさの建物模型(タイプAは2種)を設置し、図7.14に示す点での風圧及び床面上100cmの速度圧をトランスデューサー(バリサイン社製0~5mmAq)で測定した。建物模型の寸法は表7.2の通りである。実験条件を表7.3に示す。本章は正方形平面を持つ建物を予測対象としているが、本節での検討に関しては、将来の適用範囲拡張を念頭に置き、長方形平面を持つ建物も検討条件に含んでいる。

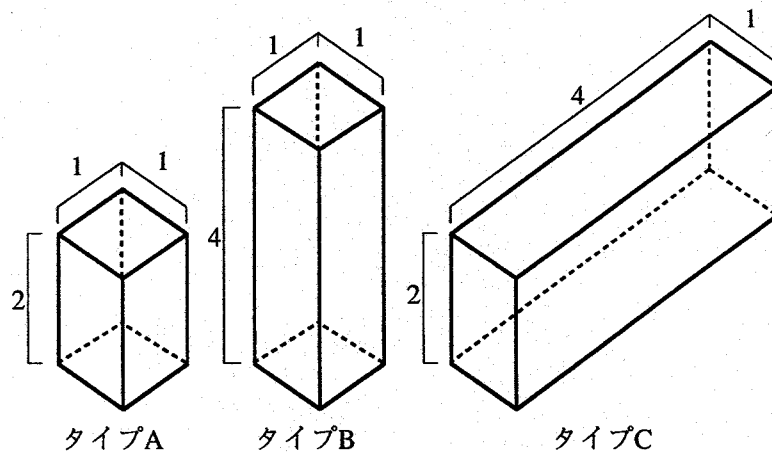


図7.13 使用した建物模型形状と各辺の比

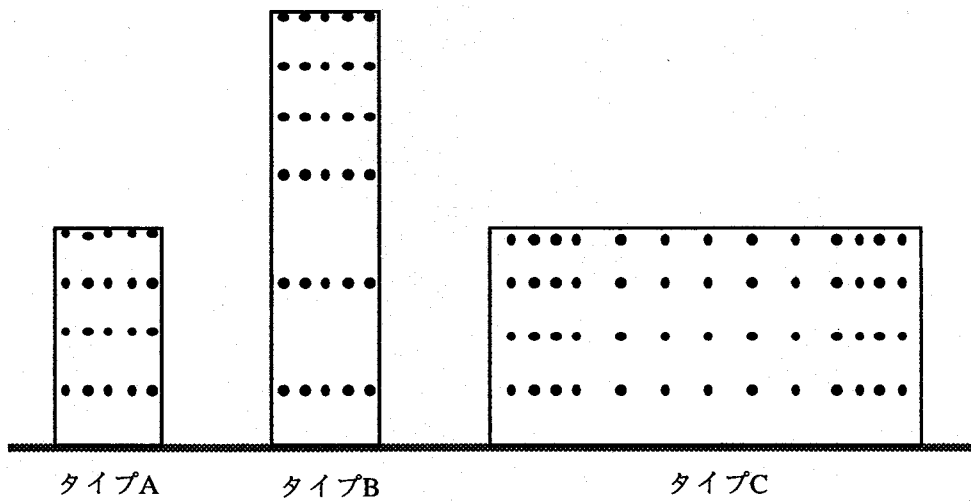


図7.14 風圧測定点

表7.2 模型寸法 (単位cm)

	タイプA			タイプB			タイプC		
	W	D	H	W	D	H	W	D	H
大型模型	15	15	30	15	15	60	60	15	30
中型模型	10	10	20	10	10	40	40	10	20
小型模型	---	---	---	5	5	20	20	5	10

表7.3 実験条件

風速分布	$\alpha = 1/5$ の指数則に従う
風向	0~180° まで22.5° おきに9風向
設定風速	風洞床上80cmで10m/s
基準静圧	風洞床面上100cmの高さでの風洞内静圧
基準速度圧	各模型高さでの速度圧 (風速分布からの換算値)
建物タイプ	タイプA、タイプB、タイプC
風圧測定点	図7.14参照のこと

7.3.3 結果と考察

(1)風圧係数の水平方向分布

図7.15は、各建物タイプ壁面の風圧係数（建物上端の速度圧で基準化）の水平方向分布を、無次元座標軸上に示したものである。表示している高さは、いずれも淀み点付近の高さである。(a)のタイプAでは、風向0度の風上面・側面中央、風向22.5度の右側面上端で大きさによる0.1程度の風圧係数の差異が表れている。タイプBでは、むしろ風下側で大きさによる差異が大きく、大型模型と小型模型の差は最大0.2程度となっている。A、Bいずれの建物タイプにおいても、模型の大きさが大きいほど風圧係数の絶対値は大きい。これらの差異の原因は、乱れの状態の差異に起因する気流場の違い、風速分布が厳密には指数則となっていないこと、閉塞率の差異などを考えることができる。

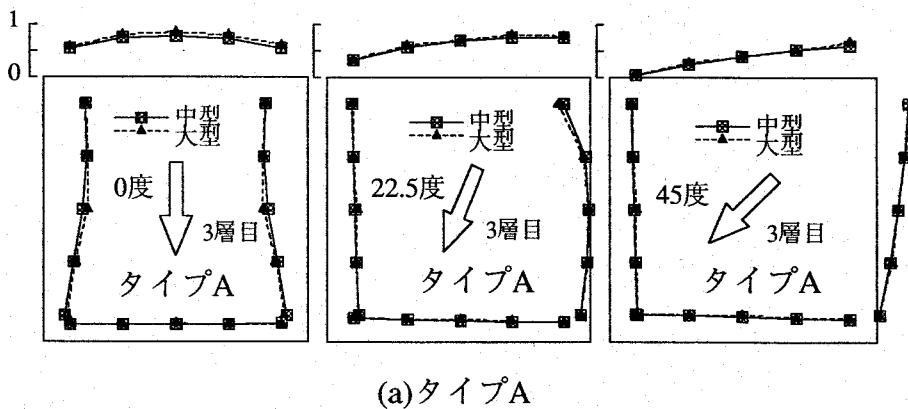
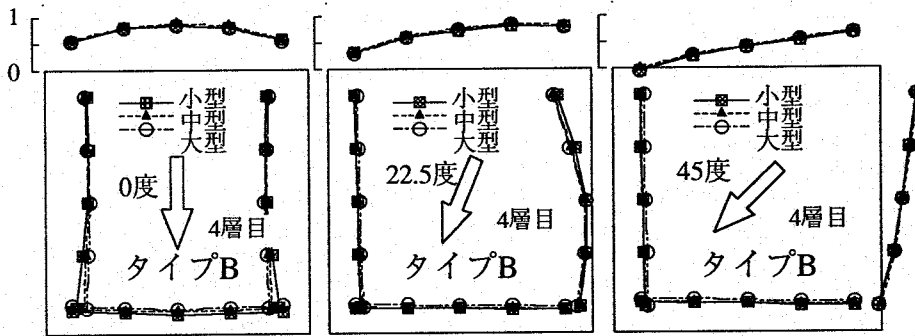
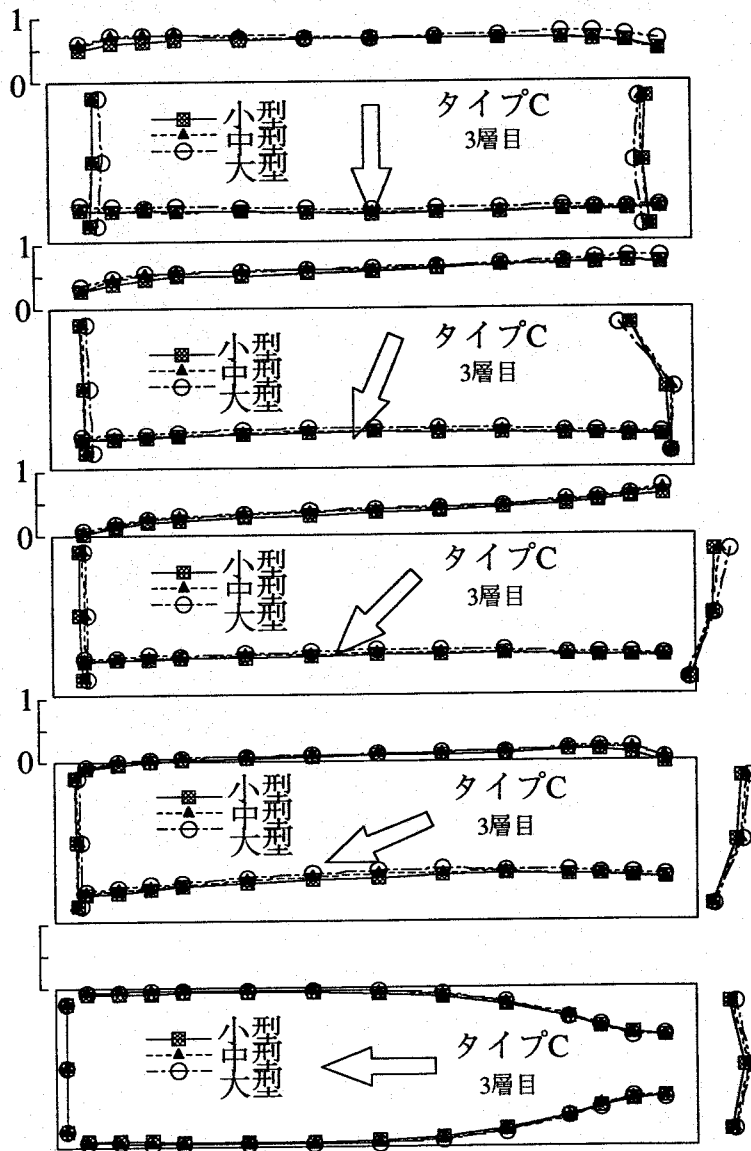


図7.15 風圧係数の水平方向分布



(b)タイプB



(c)タイプC

図7.15 風圧係数の水平方向分布

(c)はタイプCの模型についての図であるが、風向0、22.5度で端部ほど、模型の大きさによる差異が最大0.2程度と大きくなっており、これは主として、図7.5～7.7で見られた風速の水平方向分布に起因するものと考えられる。風向45～90度でもタイプA、B同様の最大0.2程度の差異が見られる。

(2) 大きさの異なる建物模型の風圧係数の相関関係

図7.16は各模型タイプにおける大きさの異なる模型の風圧係数の相関関係を示したものである。図中の点線は、最小自乗法で直線回帰した結果であり、相関係数、回帰直線、2種の模型の風圧係数の差の二乗平均の平方根、データ数を併記している。

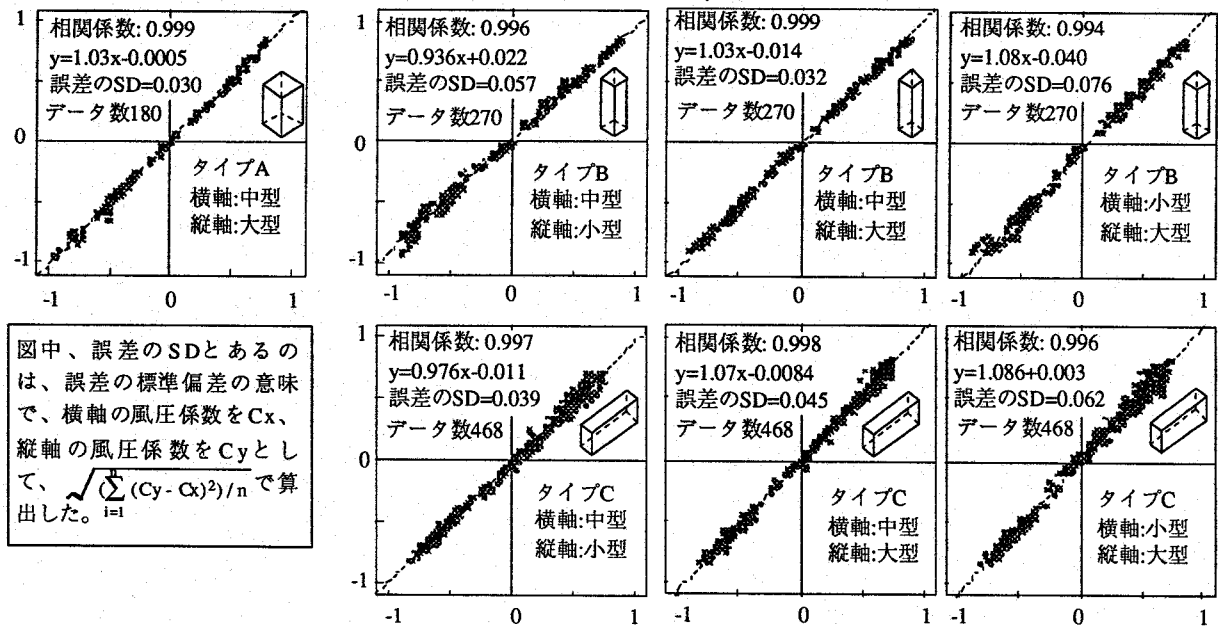


図7.16 大きさの異なる模型の風圧係数の相関関係

いずれの図においても相関関係は0.99以上であるが、タイプA、Bの中型模型と大型模型の相関が最も高い。タイプB、Cとも小型模型と大型模型の相関は他より低い。タイプCは比較的ばらつきが大きいですが、これは風洞内風速の水平方向分布によるものと考えられ、今回用いた境界層特有のものとする。風洞での実験精度を勘案すれば、模型の大きさによる風圧係数の差異はいずれの模型形状にお

いても微少であり、風圧係数の基準速度圧を建物の軒高の速度圧にとれば、風圧係数の予測式において建物の大きさのファクターは考慮する必要はないといえよう。

7.3.4 まとめ

本節での検討によって、風圧係数を建物の軒高のアプローチフローの速度圧を基準として表せば、いかなる大きさの建物であっても形状が同じならば風圧係数は等しくなることが示され、風圧係数の風向特性を関数化するにあたっては建物の大きさをパラメータにする必要はないことが明らかになった。

7.4 正方形平面を有する建物の風圧係数の関数化

7.4.1 本節の概要

7.2では、風洞実験で得た風圧係数に関して検討し、風圧係数の風向特性は風上側と風下側に分けられ、風上側の風向特性は、高次関数での近似の可能性があることを示した。また、7.3においては、種々の形状の建物について、建物の大きさそのものは関数化のパラメーターとする必要はないことを示すことができた。本節では、実際に風圧係数の関数化を試みる。なお本節では、風圧係数はすべて建物の軒高でのアプローチフローの速度圧を基準に無次元化したものを指す。

7.4.2 風上側風向の近似関数の選定

検討に用いる風圧データは、7.2で測定した風圧データである。（正方形平面を有する直方体建物）ここではタイプ4の建物を取り上げ、関数化のポイントとなる風上側風向の風圧係数の近似関数の選定を試みる。

図7.17は、建物タイプ4の測定点1（図中の建物立面図参照）における風圧係数の風向特性の風向 $-90^{\circ} \sim 90^{\circ}$ の範囲を最小二乗法を用いて高次関数（3次～5次）で近似した一例である。4次と5次関数では、明らかに曲線形状が不自然であり、誤差も大きいことがわかる。3次関数の場合も極大値付近での風圧係数を正しく

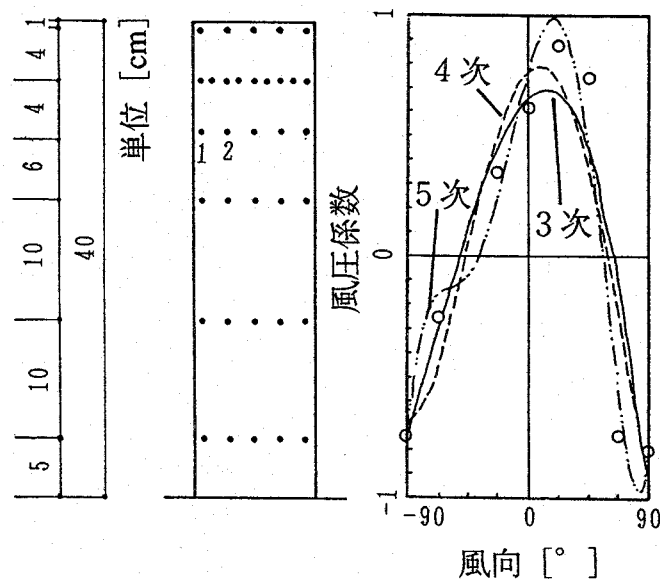


図7.17 高次関数による近似曲線の一例（ $-90^{\circ} \sim 90^{\circ}$ ）

近似できていないことがわかる。故に高次関数をそのまま用いてもその近似精度はそれほど高くなり得ないと言えよう。

次に、高次関数の回転形による風圧係数の風向特性の近似を試みることにした。図7.18は、図7.17と同じタイプ4の建物の1と2の点（図7.17中建物立面図参照）での風向（ $-90^{\circ} \sim 90^{\circ}$ ）と風圧係数の関係を、3次関数を回転させた関数によって近似した例である。（回転角は、測定点1で 13° 、測定点2では 7° ：1度ずつ異なった回転角について最小二乗法で3次関数の係数を決定し、最も残差の小さい回転角を選定）図より、測定データは、いずれの点も回転させた関数の曲線上にはほぼ乗っており、うまく近似が行えることを示している。

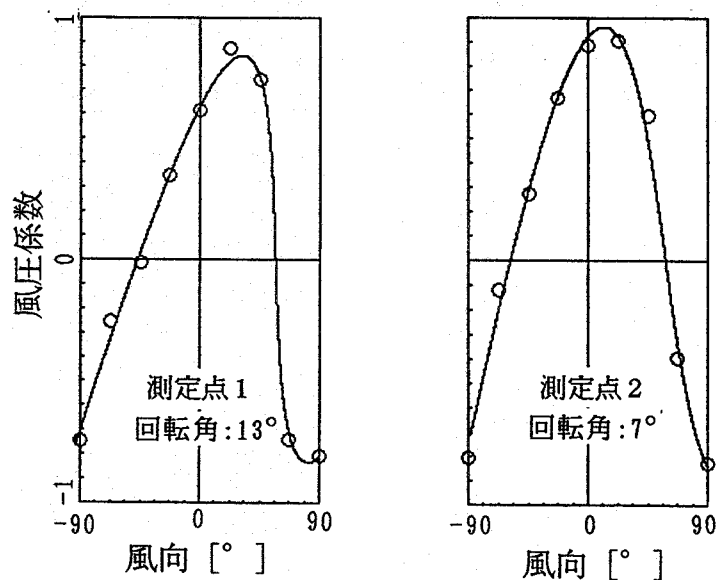


図7.18 回転した3次関数による近似曲線の一例

図7.19は、風向の範囲を $-112.5^{\circ} \sim 112.5^{\circ}$ までとし、回転した4次関数で近似した結果である。いずれの点においても近似化の精度は高いが、3次関数の回転形による近似（図7.18）と比較すると、風向 $\pm 90^{\circ}$ 付近での誤差が若干大きいことがわかる。

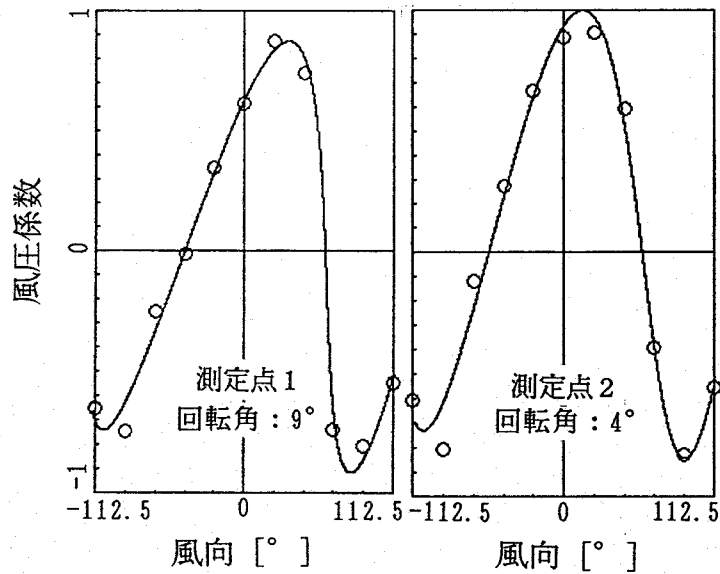


図7.19 回転した4次関数による近似曲線の一例

図7.20は、タイプ4の建物模型のすべての測定点に対して、3次関数、4次関数の回転形で近似を行い、最も誤差の少ない回転角を縦軸に、測定点の平面上の位置を幅比として横軸に取ったものである。(a)が3次関数の場合（風向は $-90^{\circ} \sim 90^{\circ}$ ）、(b)が4次関数の場合（風向は $-112.5^{\circ} \sim 112.5^{\circ}$ ）である。これらより、いずれの図においても、両者の相関は非常に高く、回転角は幅比0即ち壁面の中央

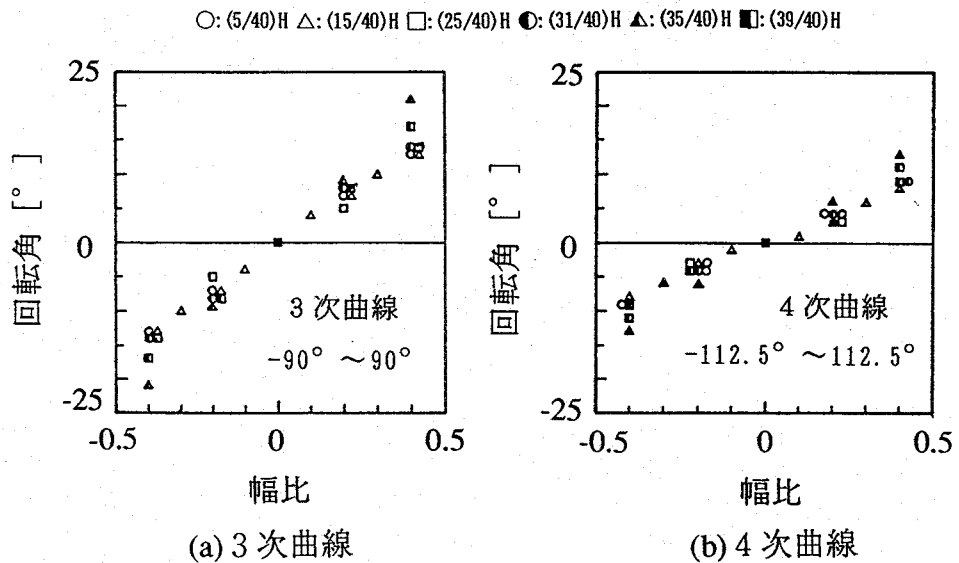


図7.20 幅比と最適回転角との関係

線上の点で0となること、回転角は測定点の高さに係わらず、平面上の位置のみによって決まることがわかる。

図7.21は、横軸に幅比を取り、縦軸に近似式と測定値の差の標準偏差、即ち誤差の標準偏差を取ったものである。幅比が大きくなるほど、即ち建物の端部に近いほど、誤差の標準偏差は大きくなることがわかる。また、3次関数と4次関数を比較すると、全体的に3次関数の方が精度が高いことがわかる。

以上の検討から、近似する風向の範囲は若干小さくなるが、風上側の風向の風圧係数は3次関数の回転形での近似が適当であることが明らかになったといえる。

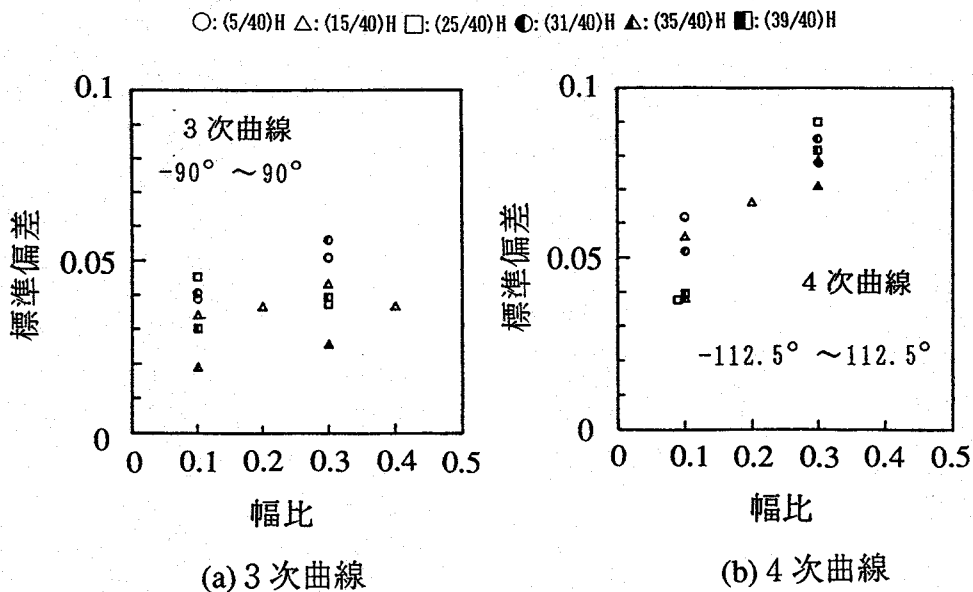


図7.21 幅比と近似誤差の標準偏差との関係

7.4.3 風圧係数の風向特性の関数化

風上側風向の風圧係数の風向特性を3次関数の回転形で、それ以外の風向での風圧係数を直線で近似し、任意の建物形状、位置の風圧係数を机上で簡易に算定する方法の確立を試みる。検討に用いるデータは、7.2で計測したものである。

(すべての建物タイプを対象)

(1) 近似関数の基本形

表7.4に近似関数の基本形を示す。風向-90° ~ 90° を風上側風向、±112.5° ~

±180° を風下側風向と呼び、風上側風向を3次関数の回転形で、風下側風向を直線で近似し、両者の間は直線で補間する方法を考える。

表7.4 近似関数の基本形

風上側風向 (-90~90度)
$C' = a\theta'^3 + b\theta'^2 + c\theta' + d$ $C' = C \cos \phi - (0.5/90) \theta \sin \phi$ $\theta' = \theta \cos \phi + (90/0.5) C \sin \phi$ <p>ただし、 C: 風圧係数 θ: 風向 [°] ϕ: 回転角 [°]</p>
風下側風向 (±112.5° ~ ±180°)
$C = \alpha (\theta + \beta)$ <p>C: 風圧係数 θ: 風向 [°] α, β: 定数</p>

壁面上の位置は図7.22に示す無次元座標で表わす。W*は7.4.2で幅比と呼んだものに等しい。建物形状はアスペクト比λで表す。

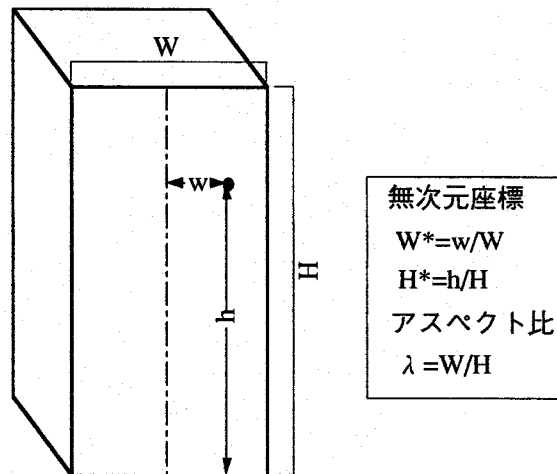


図7.22 無次元座標と建物のアスペクト比

(2) 回転角 ϕ の算定方法

各建物・位置での16方位の風圧係数値から、最小自乗法で係数を決定する場合、最も誤差の少ない回転角を求めた。図7.23に無次元水平座標W*と回転角 ϕ の関係

を示す。 $W^*=0$ （壁面中心軸）で ϕ は必ず0となり、ばらつきはあるが両者に比例関係が認められる。故に、係数の数を減らす目的で、回帰直線

$$\phi = 38.5 \cdot W^* \quad (7.1)$$

で ϕ を算定する。

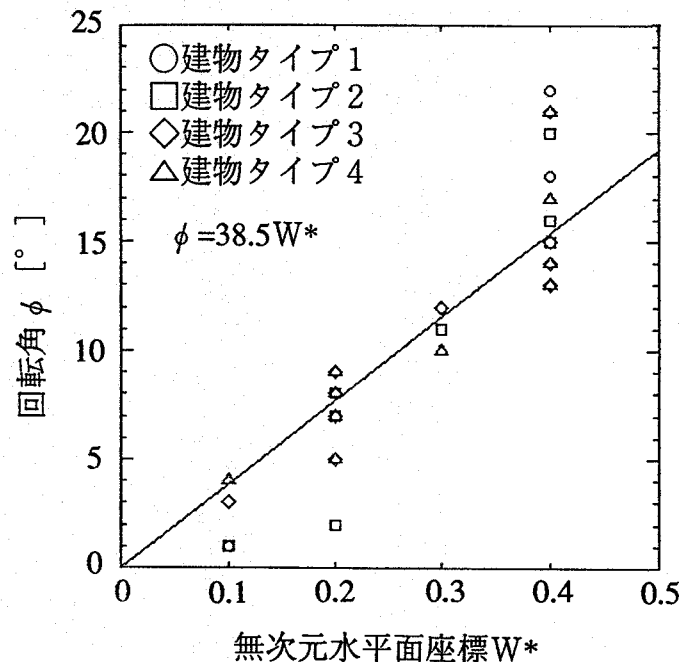


図7.23 無次元水平面座標 W^* と回転角 ϕ との関係

(3) θ の係数 c の算定方法

(7.1)式を用いて再度最小自乗法による近似を行った。回転前の3次関数の極大値はほぼ $\theta = 0$ 付近にあったため、図7.24に無次元座標 W^* と極大値を与える風向 θ_p の関係を示す。 θ_p は平均的にはほぼ -5° から 5° の範囲にある。 $\theta_p = (-b - \sqrt{b^2 - 3ac})/3a$ より、 $\theta_p = 0$ とすると $c = 0$ となり、係数を一つ減らすことができる。故に、

$$c = 0 \quad (7.2)$$

とする。

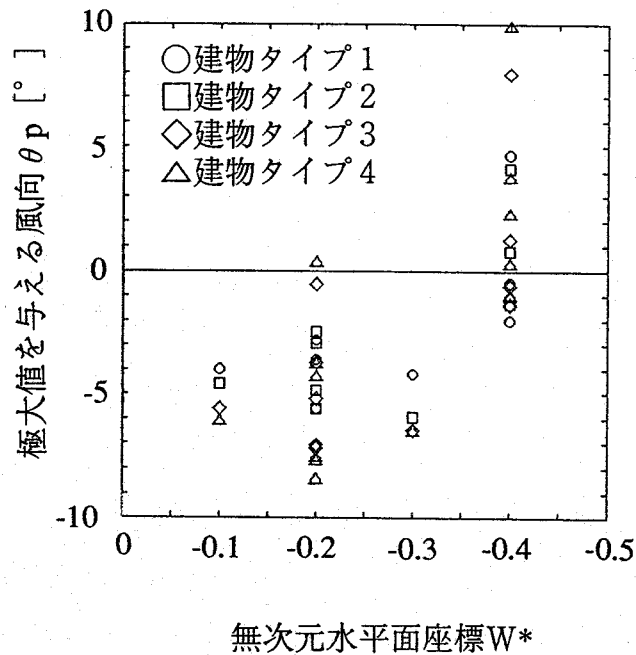


図7.24 無次元水平面座標 W^* と極大値を与える風向 θ_p との関係

(4) θ^3 の係数 a の算定方法

(7.1)、(7.2)式を用いて再度近似を行った。図7.25に、全ての測定点について無次元座標 W^* と係数 a の関係を示す。各建物の同じ高さの点を直線で結んである。図より、各建物タイプ・高さで、 W^* と a は比例することがわかる。故に例えば $W^* = -0.4$ のときの a がわかれば、全ての W^* での a が知れる。図7.26に無次元座標 H^* と $W^* = -0.4$ での a をアスペクト比 λ で除した値 $a_{W^*=-0.4} / \lambda$ との関係を示す。タイプ1の建物(●印のプロット)を除き、両者は2次関数で近似できる。以上から、タイプ1の建物を除いて、以下の係数 a の算定式を得た。

$$a = \lambda W^* (-3.63 \times 10^{-6} H^{*2} + 4.76 \times 10^{-6} H^* + 6.96 \times 10^{-8}) \quad (7.3)$$

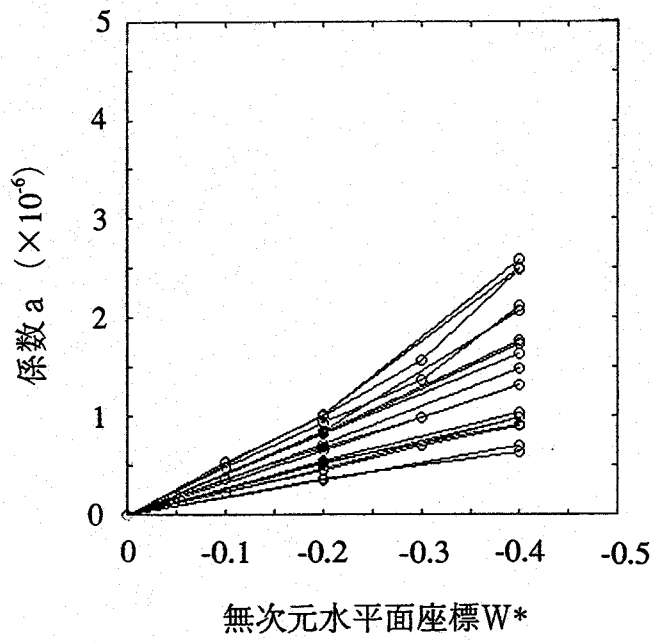


図7.25 無次元水平面座標 W^* と係数 a との関係

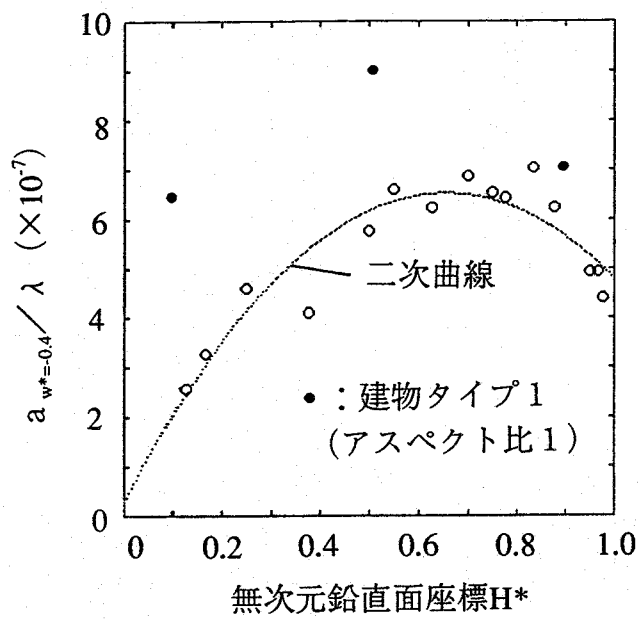


図7.26 無次元鉛直面座標 H^* と $a_{w^*=-0.4} / \lambda$ との関係

(5) θ^2 の係数bの算定法

a同様、b、dの算定式でもタイプ1は適用範囲外とする。図7.27に W^* とbとの関係を示す。曲線は、同じ建物・高さを2次曲線 ($b = \alpha W^{*2} + b_{W^*=0}$) で近似したものである。殆どの曲線は重ならないことがわかる。

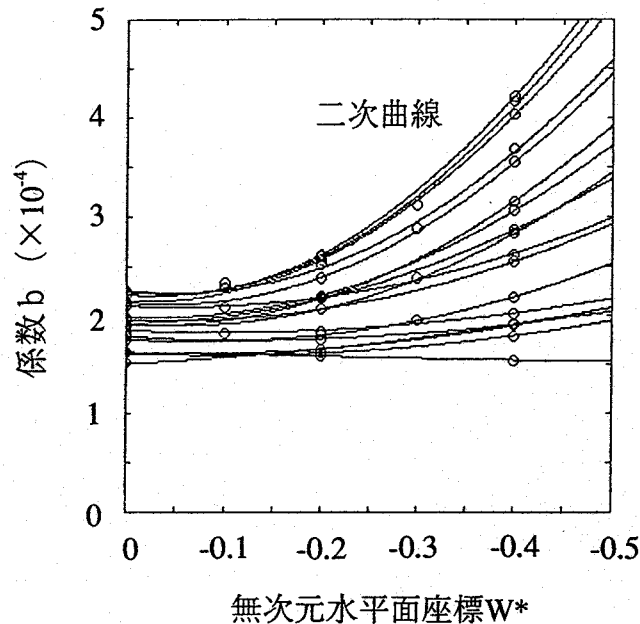


図7.27 無次元水平面座標 W^* と係数bとの関係

そこでa同様、無次元座標 H^* と $b_{W^*=-0.4}/\lambda^{(3A)}$ との関係を図7.28に示す。両者の関係が2次関数で表現できること、及び、図は示していないが、 $b_{W^*=0}$ と $b_{W^*=-0.4}$ 、及び α と $b_{W^*=-0.4}$ には線形関係が見られたことから、以下のbの算定式を得た。

$$\begin{aligned}
 b = & \{4.70 \lambda (2.72 \cdot 10^{-4} H^{*2} - 3.69 \cdot 10^{-4} H^* - 2.55 \cdot 10^{-5}) + 7.58 \cdot 10^{-4}\} \cdot W^{*2} \\
 & + 0.245 \lambda (2.72 \cdot 10^{-4} H^{*2} - 3.69 \cdot 10^{-4} H^* - 2.55 \cdot 10^{-5}) - 1.23 \cdot 10^{-4}
 \end{aligned}
 \tag{7.4}$$

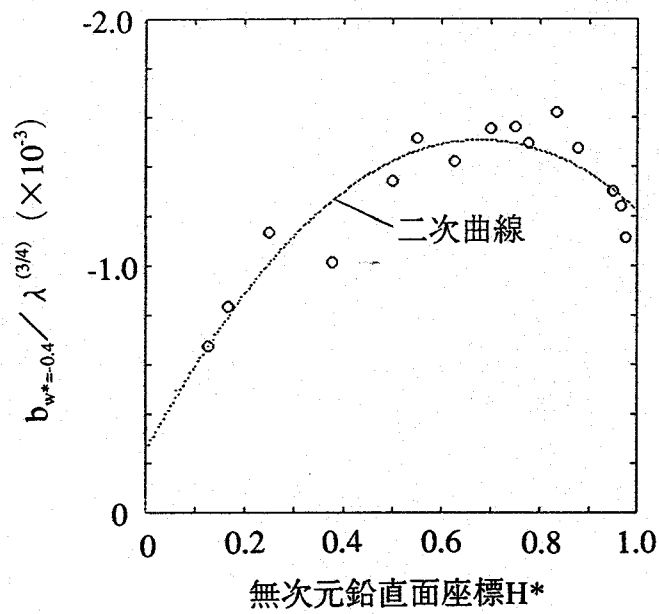


図7.28 無次元鉛直面座標 H^* と $b_{w*=-0.4} / \lambda^{(3/4)}$ との関係

(6)定数項 d の算定式

図7.29に H^* と d との関係を示す。

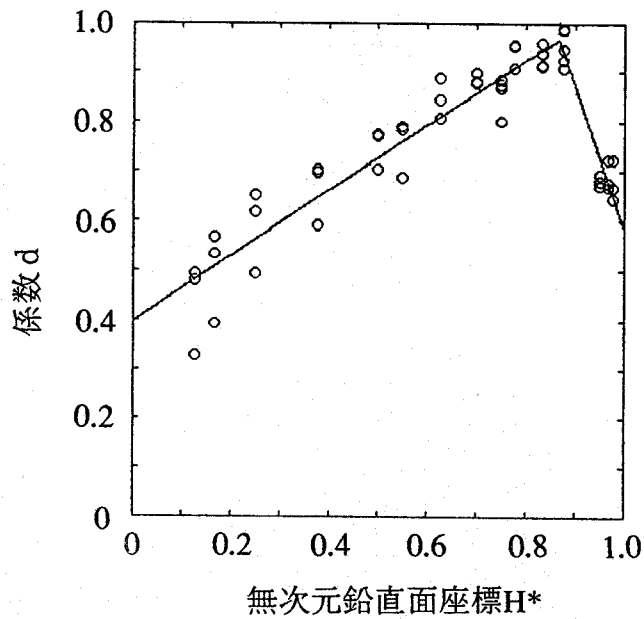


図7.29 無次元鉛直面座標 H^* と係数 d との関係

図より d は W^* によらない変数として以下の式の様近似する。

$$d = 0.655H^* + 0.399 \quad (H^* \leq 0.868) \quad (7.5)$$

$$d = -2.91H^* + 3.49 \quad (H^* \geq 0.868)$$

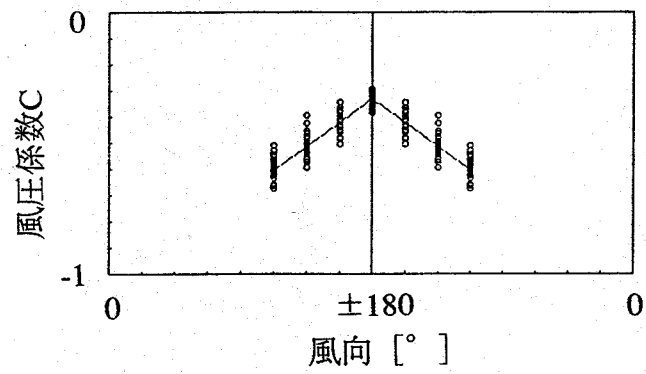
(7) 回転角の補正

式(7.1)から式(7.5)を用いて、風上側風向の風圧係数を求めるとき、ごく数例ではあるが、回転角が大きすぎ、特定の風向での風圧係数が2つ存在する（曲線が逆行）場合があることがわかった。故にこの場合には、 ϕ を 1° ずつ減らし、逆行をしない様補正しなければならない。

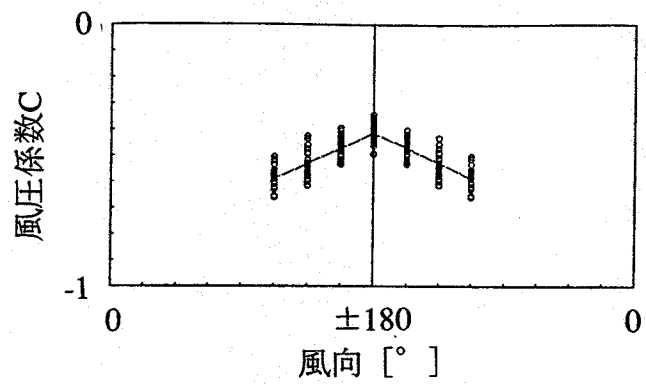
(8) 風下側風向での関数化

図7.30に各建物タイプの風下側の風向と風圧係数の関係を示す。風上側曲線の近似精度に鑑み、以下の算定式を得た。

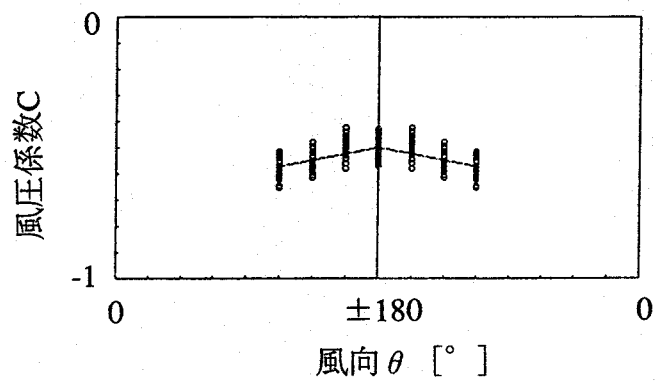
$$C = (1.49 \cdot 10^{-3} \lambda + 7.05 \cdot 10^{-3}) (|\theta| - 180) + 0.0841 \lambda - 0.163 \quad (7.6)$$



(a)アスペクト比 2



(b)アスペクト比 3



(c)アスペクト比 4

図7.30 風下側の風向と風圧係数Cとの関係

(9) 近似関数による風圧係数の予測精度

本報で示した予測式を用い、アスペクト比2～4の建物の全風向の風圧係数を予測し、測定値との比較を行った。図7.31に風圧係数の予測値と実測値の関係を示す。平均的には両者は比例関係にあり、風圧係数誤差の標準偏差は0.191である。この誤差が許容し得るものであるかどうかは、この近似式を用いる換気計算その他の計算全体における精度によって決まるものであると考えられるが、不確定な自然風を入力とする風力換気計算のためには、十分な精度を有していると考えて良いと言えよう。

ただし、ここで提案した予測式の適用範囲は正方形平面を有するアスペクト比2～4の建物であることを注意されたい。

なお、今回の検討に用いたアスペクト比2～4のすべての測定値と得られた関数との比較を図7.32に示す。横軸は風向であり、縦軸は風圧係数（建物の軒高基準）、図中、ASPはアスペクト比、HIGHTは無次元鉛直面座標 H^* 、WIDTHは無次元水平面座標 W^* を意味する。大きな誤差は $\pm 90^\circ$ あたりの風向で生じていることがわかる。

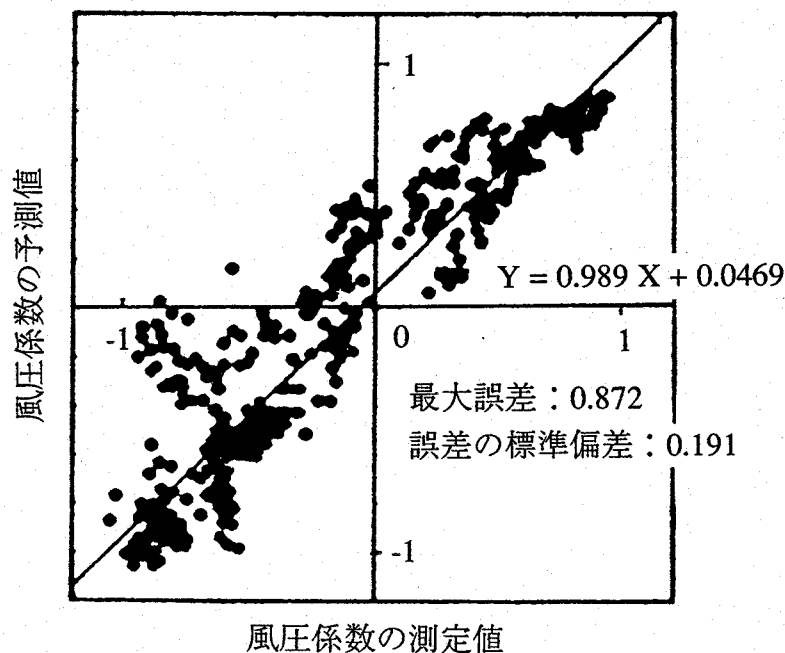


図7.31 風圧係数の測定値と近似式による予測値との関係

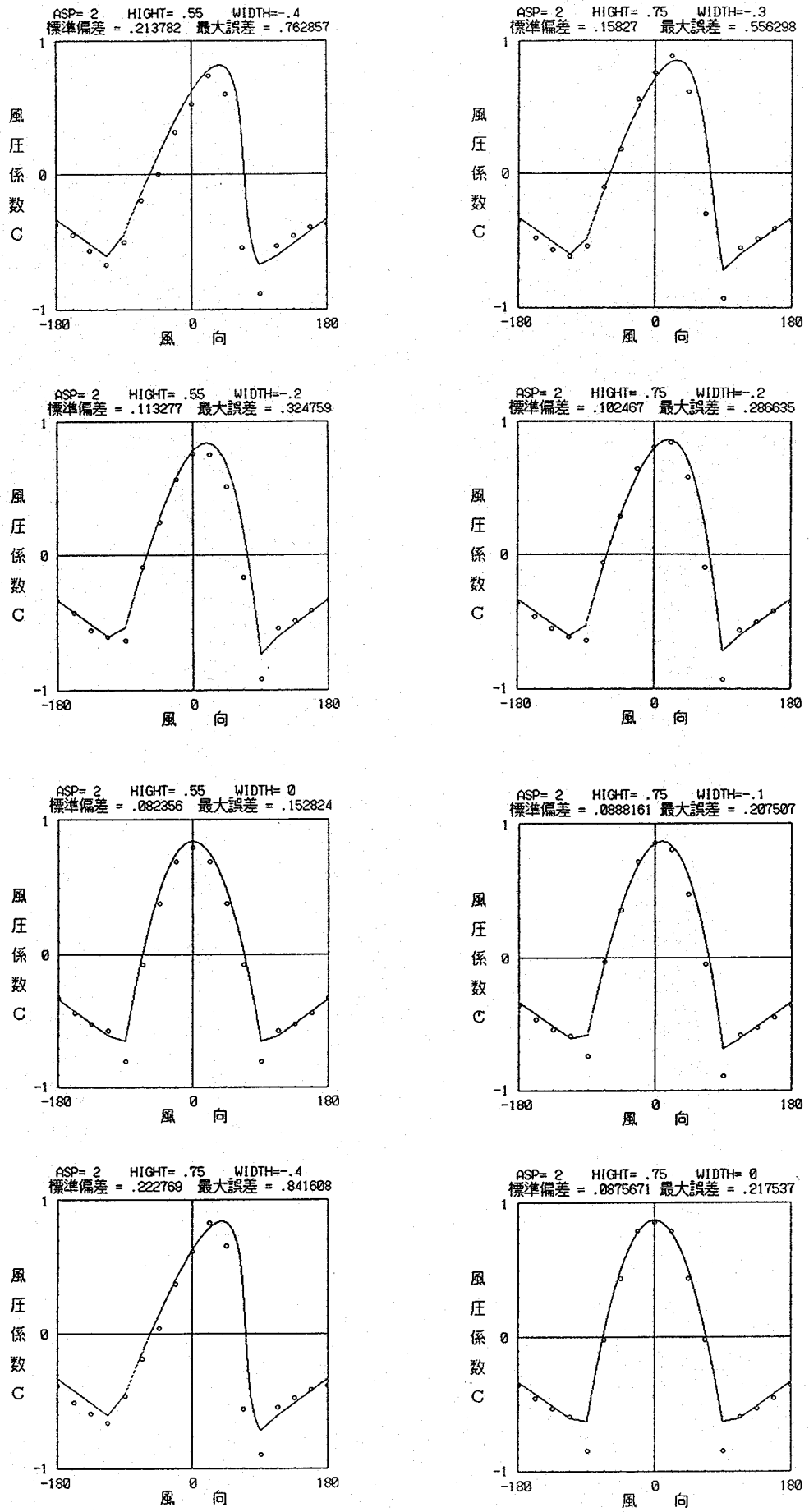


図7.32 風圧係数の近似例

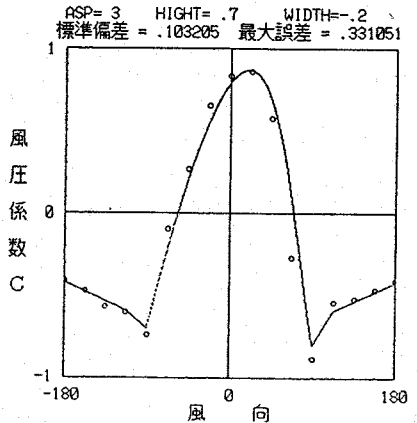
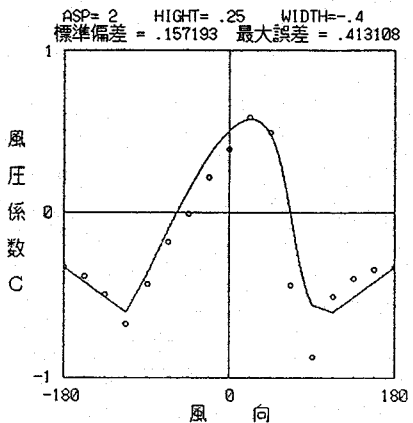
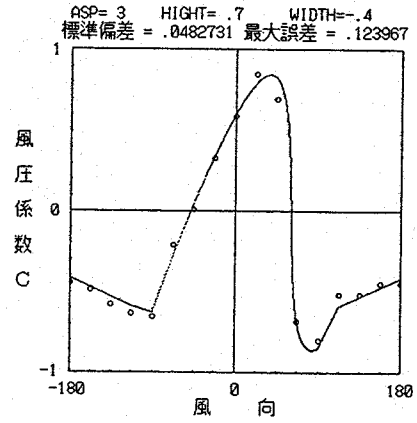
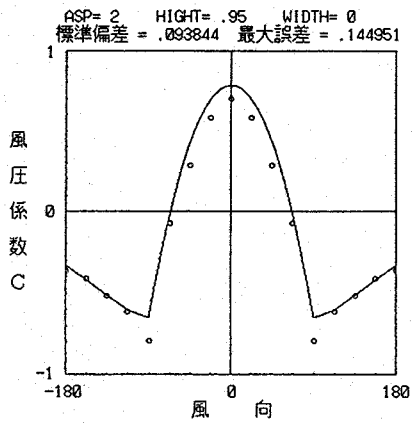
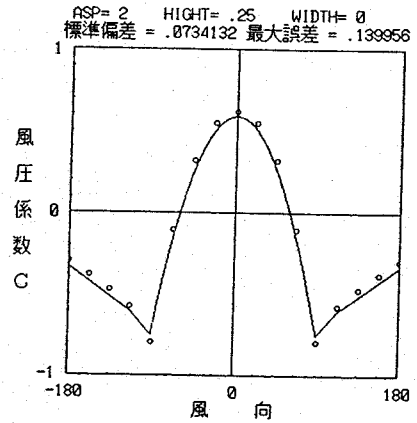
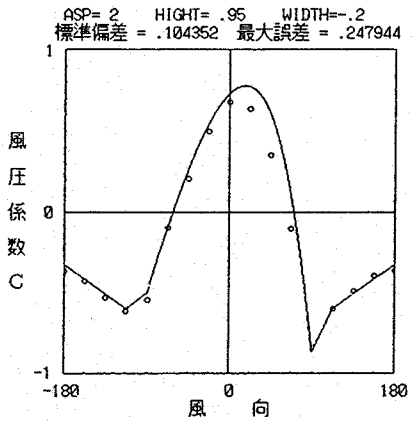
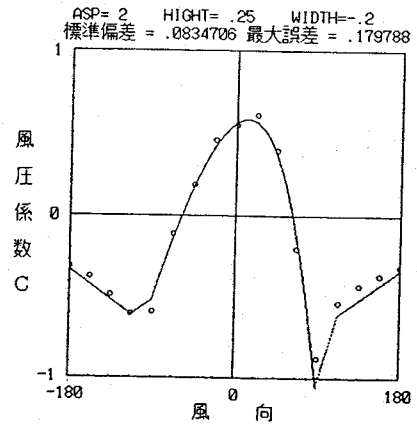
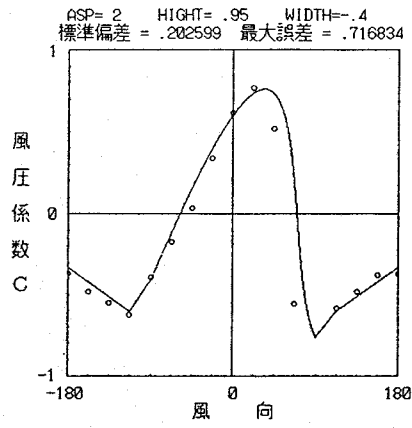


図7.32 風圧係数の近似例

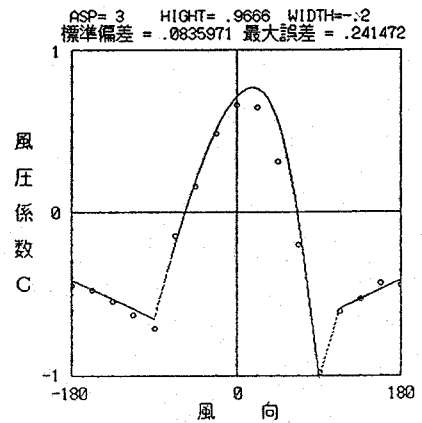
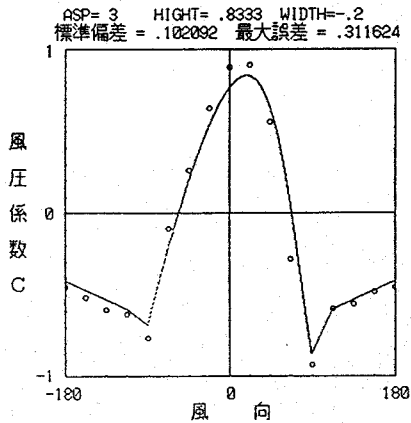
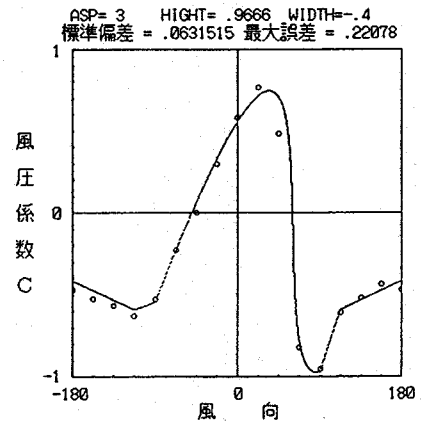
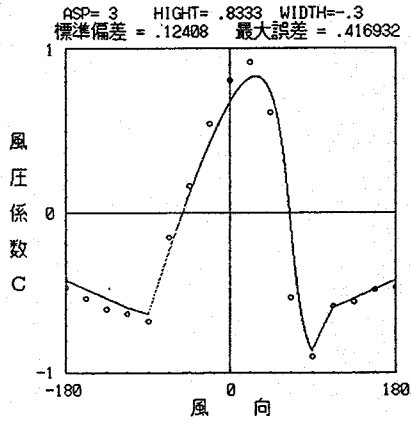
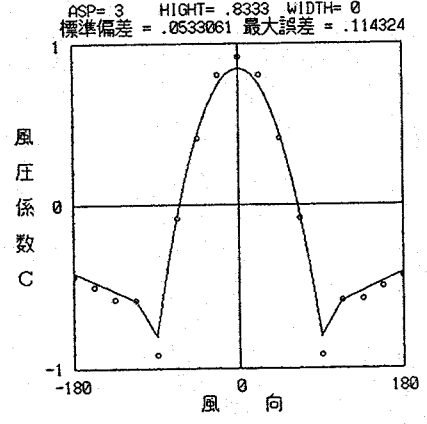
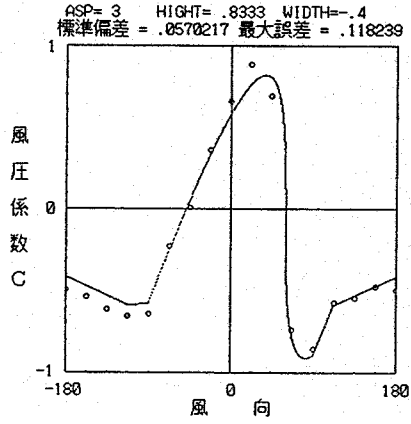
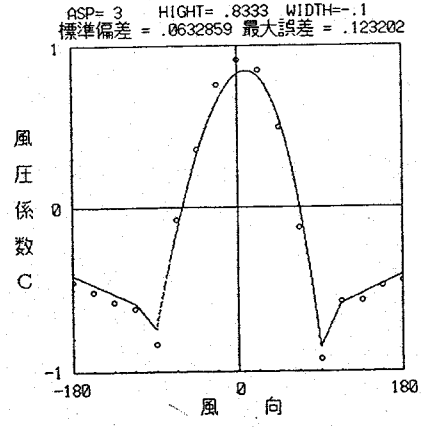
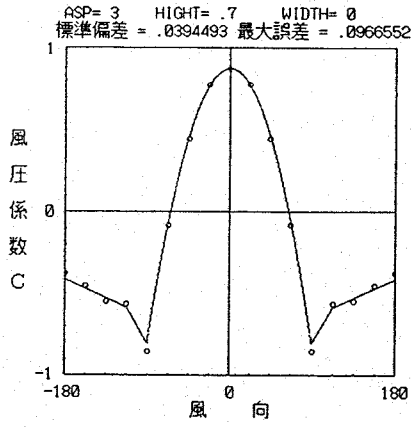


図7.32 風圧係数の近似例

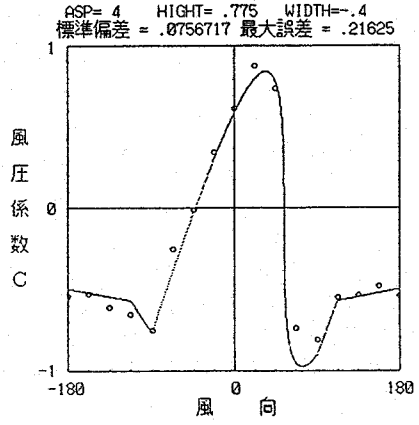
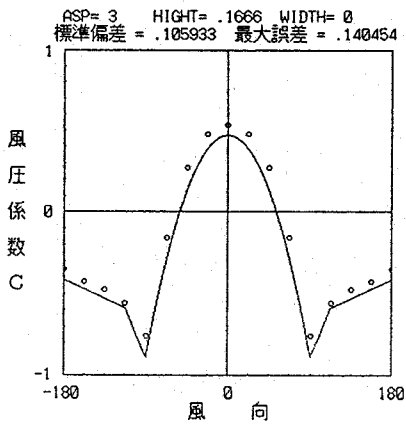
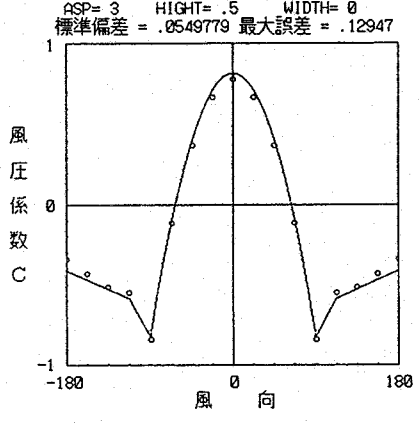
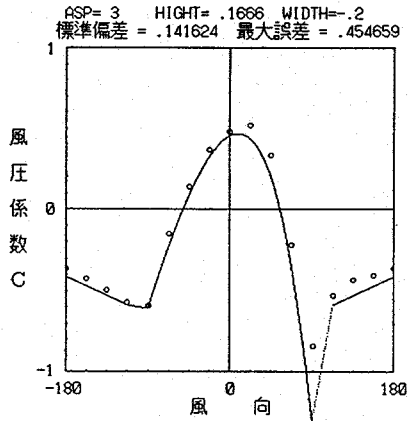
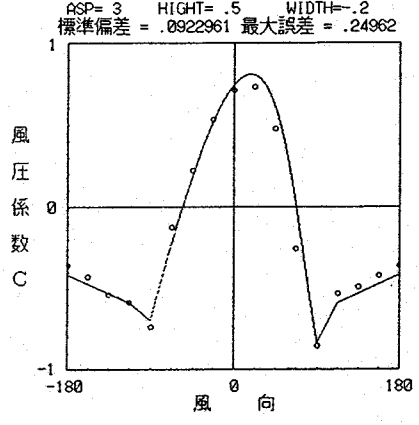
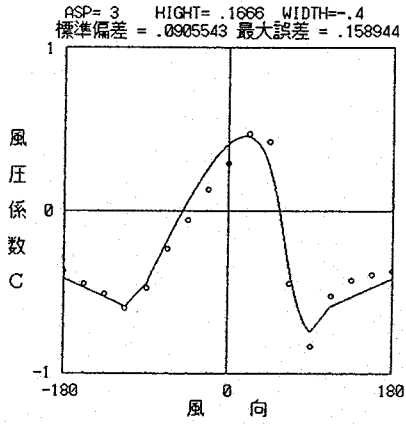
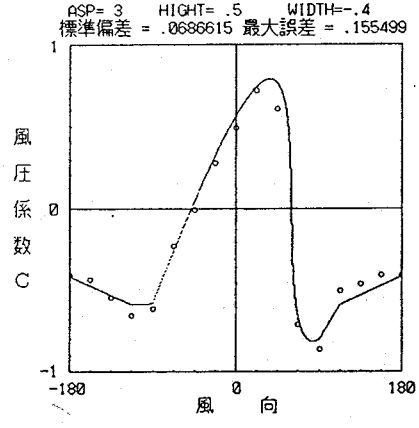
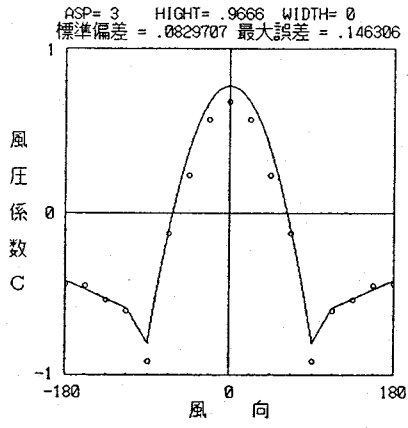


図7.32 風圧係数の近似例

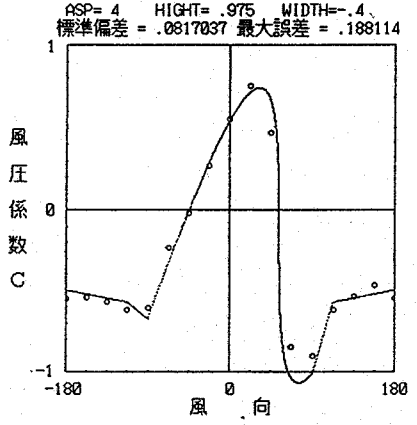
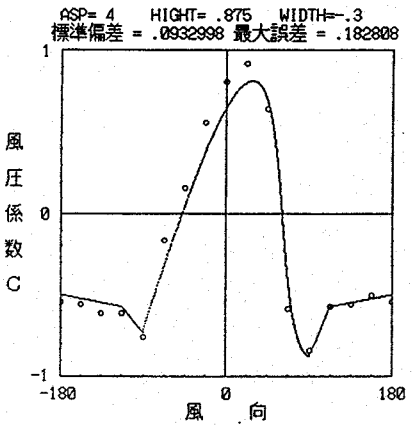
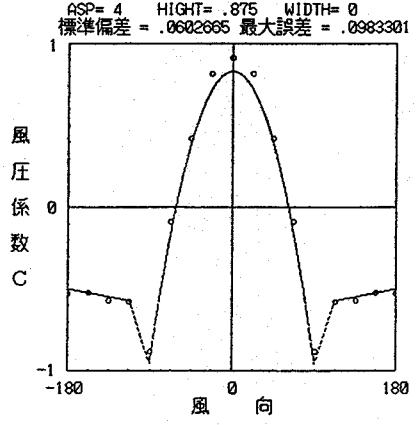
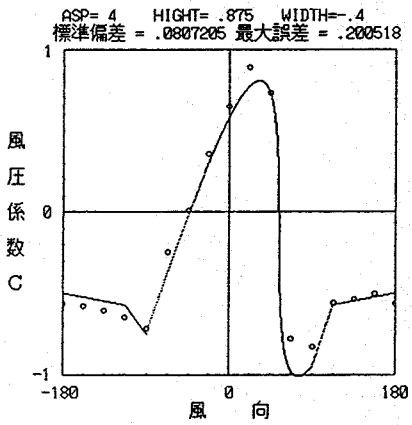
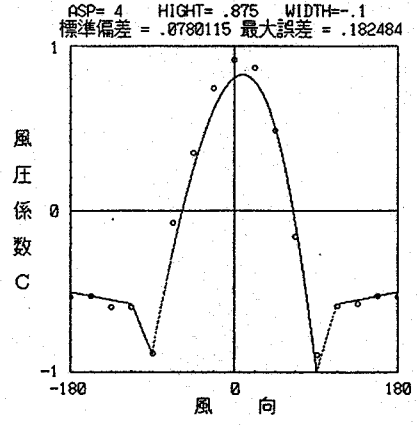
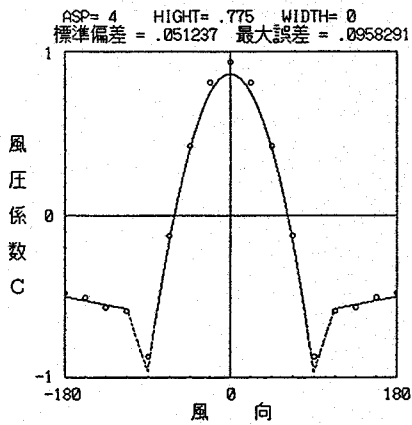
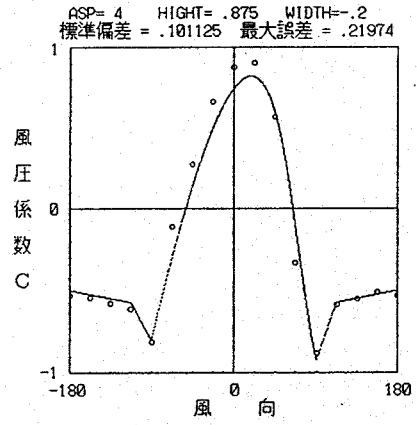
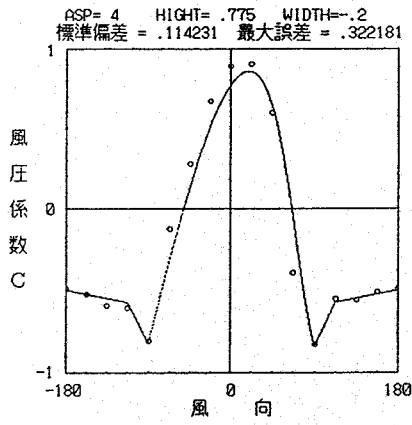


図7.32 風圧係数の近似例

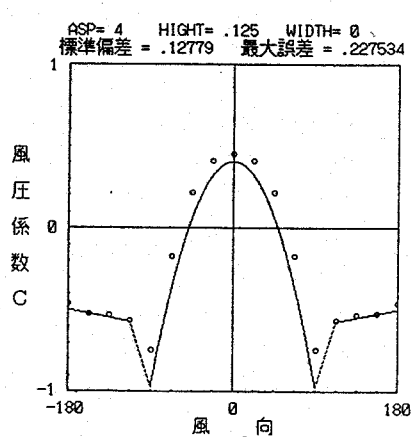
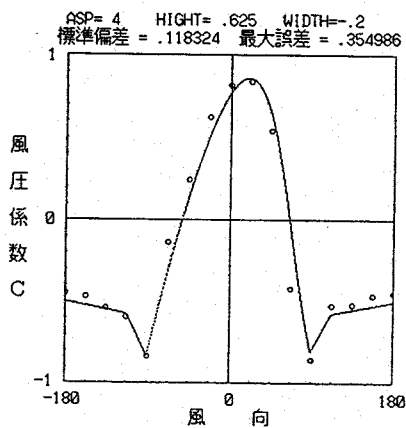
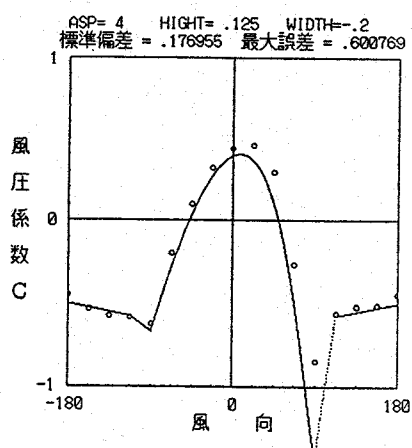
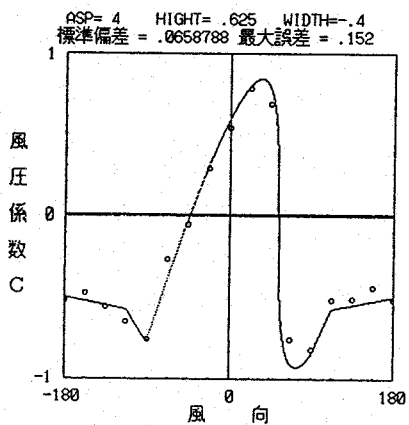
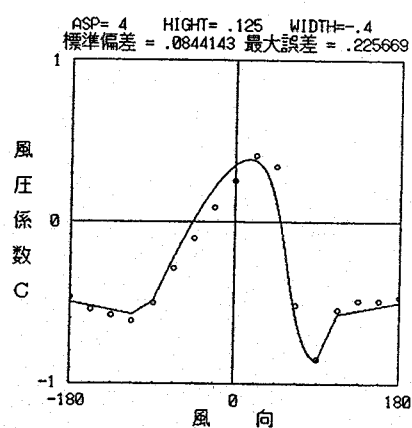
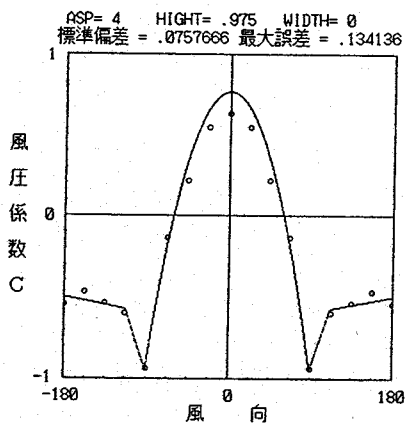
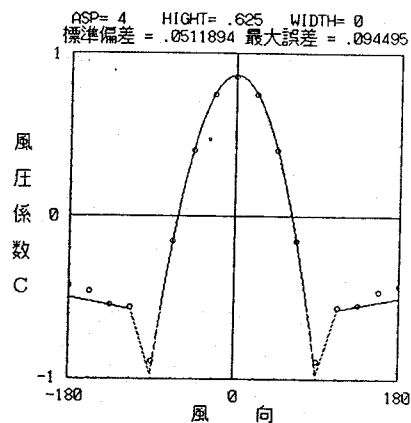
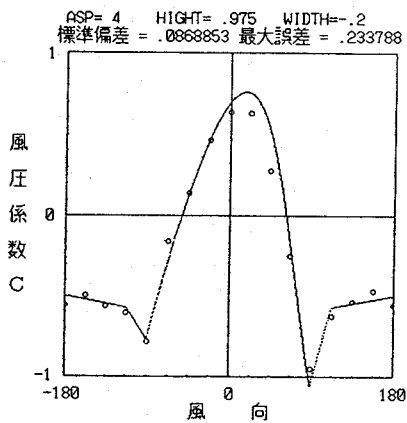


図7.32 風圧係数の近似例

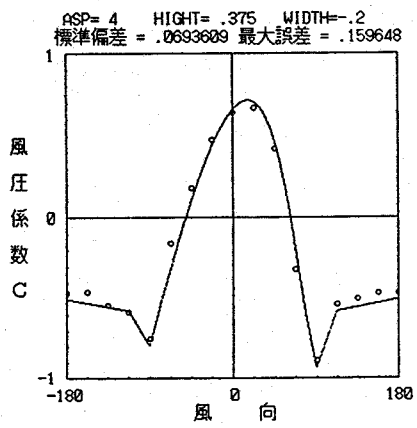
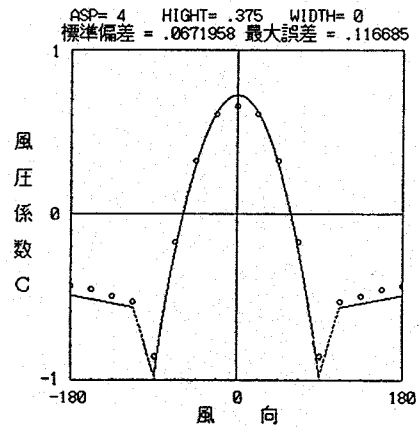
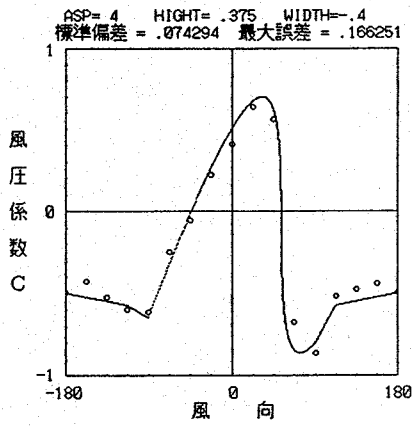


図7.32 風圧係数の近似例

7.4.4 まとめ

本節の検討により、風上側風向では3次関数の回転形、風下側風向は直線を用いた近似によって、アスペクト比2から4の正方形平面を持つ建物の任意の点、任意の風向の風圧係数を簡単に予測する一連の式を決定し、机上で風圧係数を予測する手法を確立することができたといえる。

7.5 本章のまとめ

本章の検討により、建物の棟高の速度圧を基準とした壁面の風圧係数は建物スケールの影響を殆ど受けないことが明らかになり、正方形平面を持つ直方体建物の風圧係数の風向特性を関数化することができた。本章で示した式を用いれば、建物立面のアスペクト比2から4までの形状の建物の任意の位置、風向の風圧係数を算定することが可能である。ただし、平面が正方形でない建物の風圧係数や他のアスペクト比などの場合についての検討が今後の課題として残されているといえる。

第8章 風の乱れを考慮した通気量予測法

8.1 本章の目的

前章までの検討により、単一開口における風の乱れによって生じる通気量及び複数開口における風圧差による定常通気時の通気量の予測は可能になった。しかしながら、3.4で示した様に、風上・風下に複数開口を持つ室においても、風下側の開口が風上側の開口に比べて十分小さいときには、風上側開口で単一開口と同じメカニズムによる通気が生じる。従って、風の乱れを考慮した通気量予測法を確立するためには、定常通気と単一開口通気が同時に生じる場合の通気量を算定する手法を開発することが必要である。本章は、複数開口を持つ室として最も一般的な条件である、風上・風下の対向する二面に開口を持つ室を対象に、定常通気と単一開口通気が同時に生じている場合の通気量を算定する手法の開発を試みた上で、風の乱れを考慮した通気量予測法を提案することを目的とする。

8.2 風上・風下二開口における単一開口換気

8.2.1 本節の概要

本節では、風上・風下の対向する二面に面積の異なる大小の開口を持つ室において、単一開口通気と風圧差による定常通気が同時に生じている場合の通気量予測法の開発を試みる。接地境界層を再現した風洞床面に設置した二開口を持つ立方体模型箱の換気実験を行ない、種々の風向における換気メカニズムに関する検討、通気量を予測するための変数に関する検討を行なう。

8.2.2 各通気量の定義

本節の検討では、二つの開口において単一開口通気と定常通気が同時に生じることから、一口に通気量といってもどのようなメカニズムによってどちらの開口を通るものであるかを特定することができない。故に、通気量を以下の三つに分類して定義することにする。

大開口通気量：面積の大きい方の開口部を通過する流量（風の乱れによる通気量を含む）

小開口通気量：小さい方の開口部を通過する流量

一開口通気量：大開口で生じると考えられる風の乱れによる通気量（単一開口換気と同じメカニズムによる）

図8.1は、各通気量を概念的に示したものである。

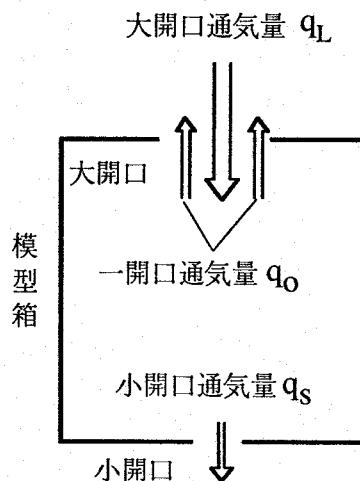


図8.1 各通気量概念図

8.2.3 実験概要

対向壁面に大小の円形二開口を持つ模型箱（図8.2参照）を、図8.3に示す $\alpha = 1/5$ の指数則に従う接地境界層を再現した風洞床面に設置し、模型箱の換気実験を行った。この境界層は第7章で用いたものと同じである。各通気量の測定と算出の方法を表8.1に示す。大開口通気量は箱内を常時攪拌しながら CO_2 を用いたトレーサーガス減衰法によって求めた。（攪拌のみによる換気量は40mmの単一開口で $0.12 \sim 0.14 \text{ m}^3/\text{h}$ ）詳細は5.4の実験概要を参照されたい。小開口通気量は、小開口の前後差圧の時間平均を測定し、開口の有効開口面積から算出する。大開口通気量と小開口通気量の差が風の乱れによって生じる単一開口通気量であると考えている。測定機器を表8.2に、実験条件を表8.3に示す。実験条件は、風向系列、開口系列、風速系列の三系列を設定した。換気実験後、両開口を閉じ、大開口前5mmの点での壁面近傍気流速（壁面に平行な成分）を測定した。なお、開口はアクリル製で厚さは2mm、流量係数は0.65～0.70である。

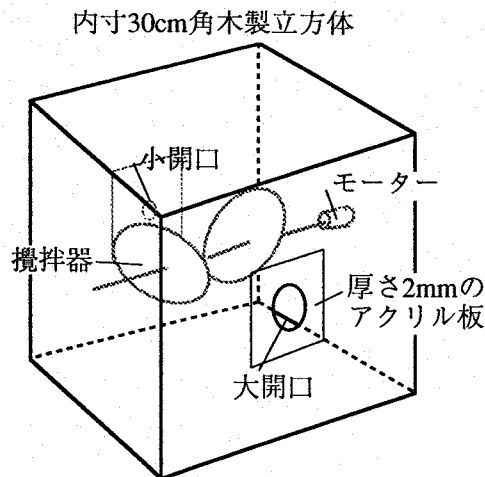


図8.2 模型箱の概要
(ガスサンプリング用のチューブは省略)

表8.1 各通気量の測定と算出の方法

各通気量	測定方法	算出方法
大開口通気量 q_L	CO_2 を用いたトレーサーガス減衰法 (模型箱内を常に攪拌)	Seidelの式
小開口通気量 q_s	小開口の前後差圧	$4\alpha A \sqrt{\Delta P}$
一開口通気量 q_o	—	$q_L - q_s$

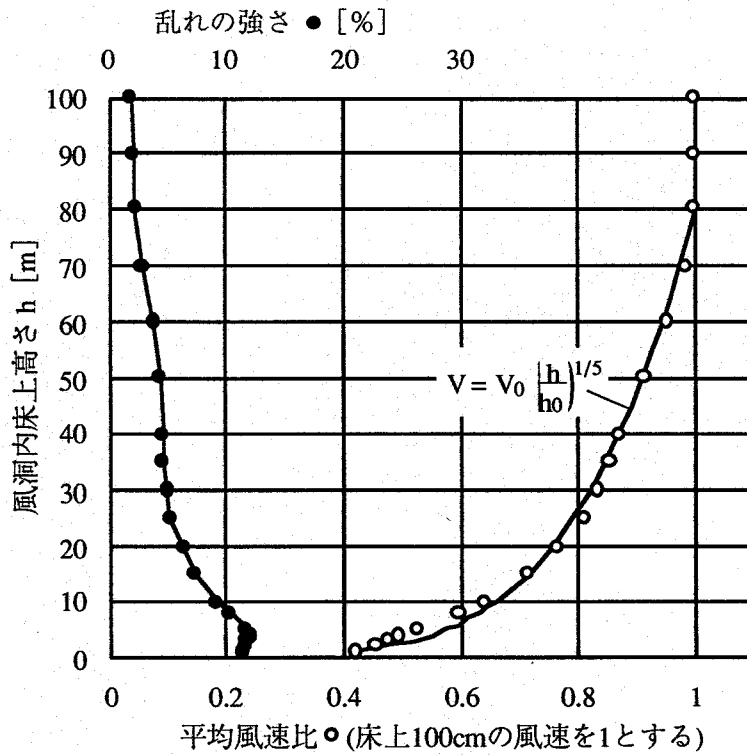


図8.3 風洞内境界層の風速と乱れの強さの鉛直分布

表8.2 測定機器

測定項目	測定機器
CO ₂ 濃度	赤外線式ガス濃度分析器 URA-105 (島津製作所)
開口前後差圧	微差圧トランスデューサー Model MP45-18 (バリダイン社)
壁面近傍風速	熱線風速計システム7102 (日本科学工業)

表8.3 実験条件

	A.風向系列	B.開口系列	C.風速系列
設定風速* [m/s]	6.75	6.75	4.5, 6.75, 9.0
風向** [度]	0, 22.5, 45, 67.5, 90, 112.5, 135, 157.5, 180	0, 45, 135	0, 45, 135
大開口直径 [mm]	φ 40	φ 40, φ 28.3, φ 20	φ 40
開口面積比	0***, 0.01, 0.05, 0.1	0, 0.01, 0.05, 0.1	0, 0.01, 0.05, 0.1

*設定風速は境界層外端の風速を意味する

***開口面積比0とは小開口がない場合

**風向は大開口への風洞風の入射角で表現

8.2.4 結果と考察

(1) 風向による各通気量の変化と換気メカニズム（風向系列）

図8.4に風向と大開口通気量との関係を示す。小開口が大きいほど大開口通気量は大きい、風向による変化傾向は小開口の大きさによって異なり、小開口が小さくなるほど $67.5\sim 90^\circ$ に通気量のピークを持つ様になる。図8.5に風向と小開口通気量との関係を示す。どの小開口径でも風向 90° を軸に左右対称であり、図8.4とは傾向が大きく異なる。大小開口間の風圧係数差は 90° で0となり、 90° を軸として左右対象形になる筈なので、この図は小開口での通気量が大小開口間の風圧差と大小開口を直列結合した有効開口面積から計算される通気量に等しいことを示唆している。風向 90° で通気量が0でないのは、風向 0° が風向による風圧係数差の変化が大きい風向であるために、模型箱の設置角度の誤差が原因となって測定風圧の誤差が大きくなったことによる可能性がある。図8.6に、風向と一開口通気量（風の乱れにより大開口で生じる付加的な通気量）との関係を示す。いずれの開口条件でも 90° で最も大きくなっているが、これは 90° では両開口面の風圧差の周期的変動に伴う二開口の脈動換気による通気量が付加されているためと考えられる。（小開口通気量は本来0と考えられるため、本来はもっと大きな値を示すと考えられる。）風向 90° を除けば、小開口の径によらず一開口通気量の風向による変化傾向は非常に類似しており、小開口径が大きいほど一開口通気量は小さいことがわかる。故に、一開口通気量は風向によって大きく影響を受けるが、風向が一定ならば小開口が小さいほど大きいといえる。図中、小開口径 12.5mm の風向 112.5° 以上で通気量が負となるのは、小開口前後差圧の低下による微差圧の誤差、通気量の増加に伴う濃度計の応答誤差等が原因と考えられ、本来は0に近い正值を取るものとする。

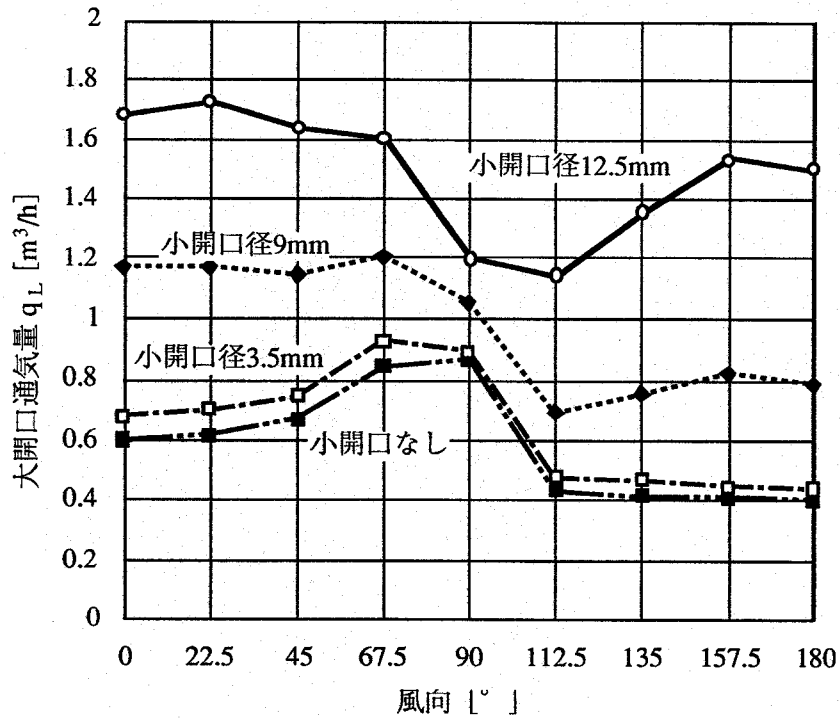


図8.4 風向と大開口通気量との関係
(風向系列、風速6.75 m/s、大開口径40mm)

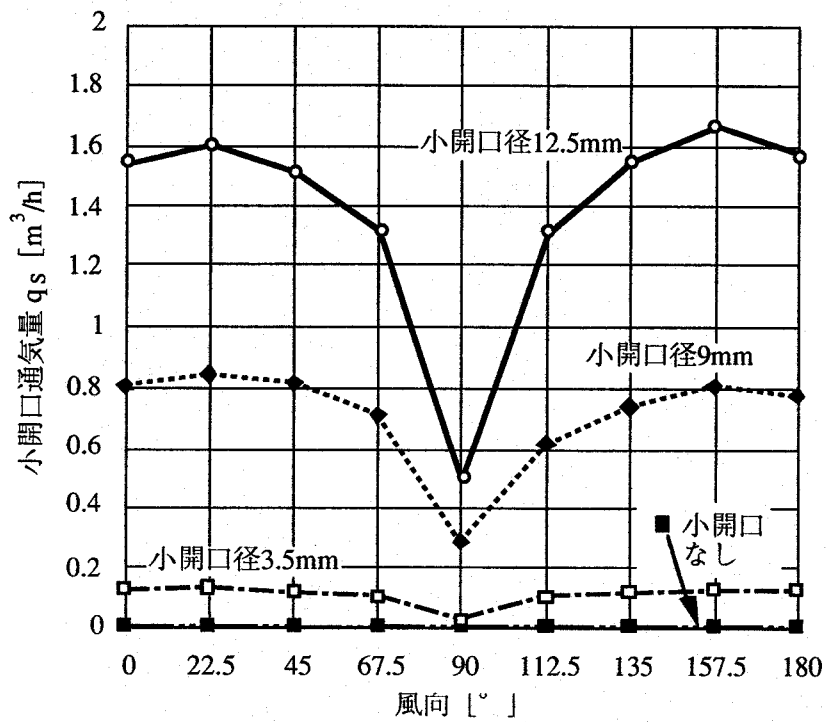


図8.5 風向と小開口通気量との関係
(風向系列、風速6.75m/s、大開口径40mm)

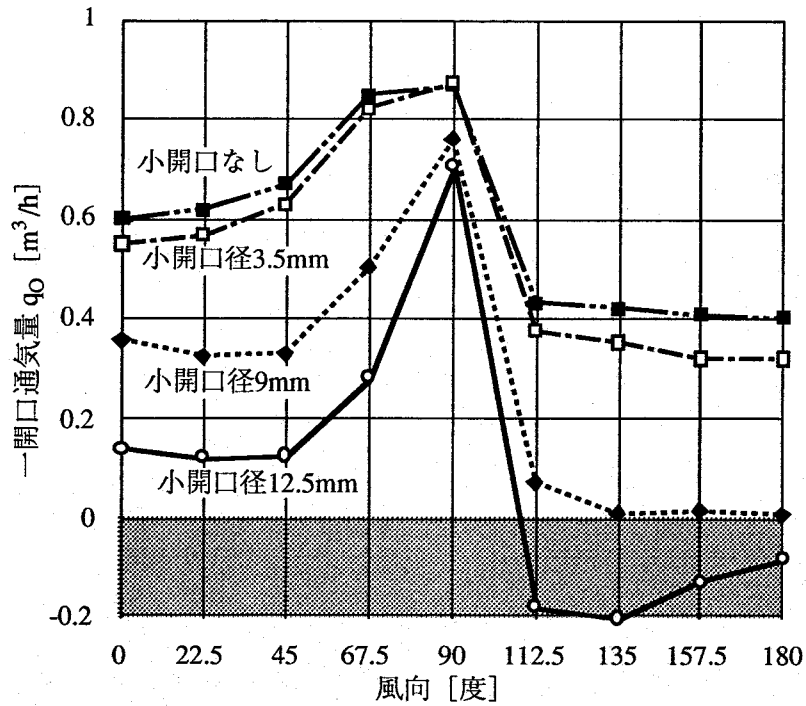


図8.6 風向と一開口通気量との関係
(風向系列、風速 6.75m/s、大開口径40mm)

図8.7には、風向による開口前の壁面近傍風速の変化を示しているが、図8.6の小開口がない場合の変化傾向と類似している。これは、単一開口の通気量が壁面

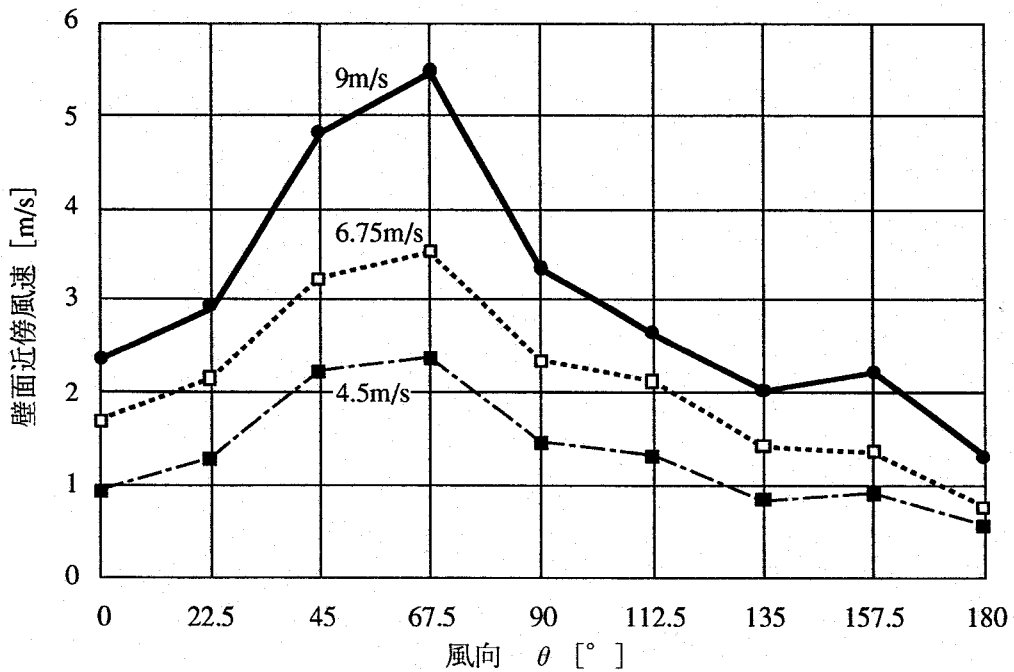


図8.7 風向と壁面近傍風速との関係

近傍風速に比例することを裏付けている。90°を除けば、他の小開口径においても、同様な変化傾向を示しており、単一開口通気量は二開口の場合でも壁面風速に比例するものと考えられる。以上から推察される風向による換気メカニズムの変化を図8.8に示す。

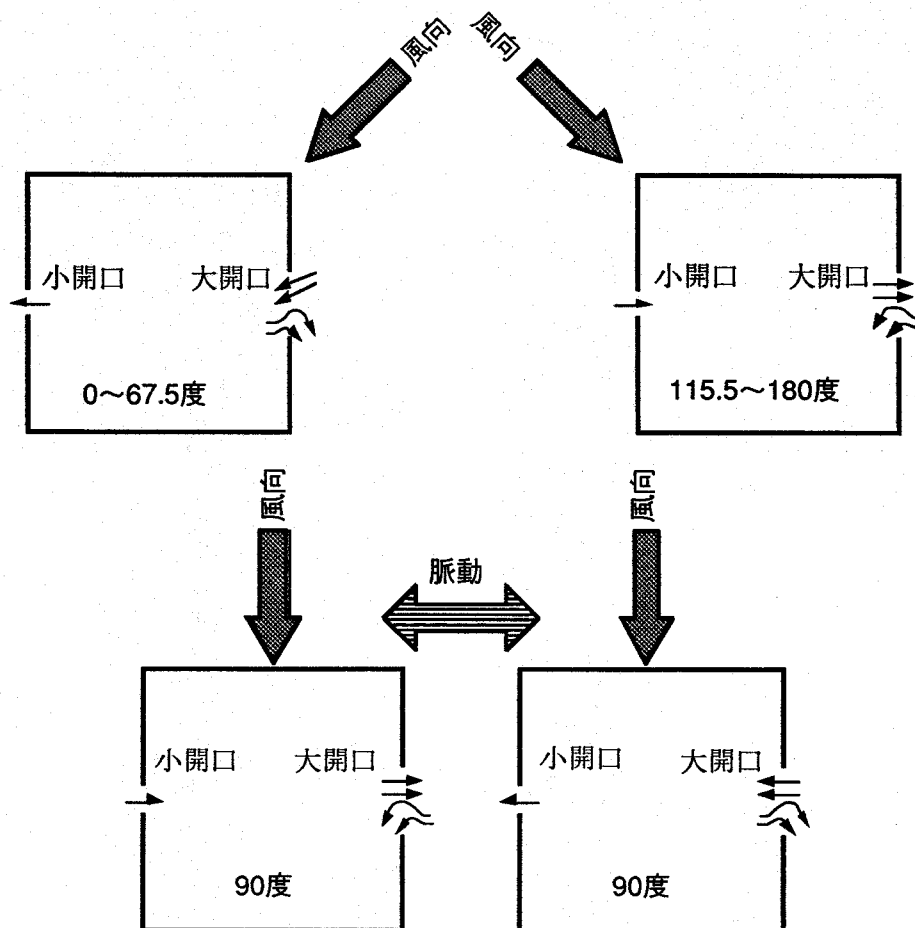


図8.8 風向による換気性状の変化

(2)大開口面積及び壁面近傍風速と一開口通気量との関係

単一開口の通気量は開口面積と境界層外端位置での壁面近傍風速に比例することは(5.6)式で示した通りである。大小二開口を持つ室における一開口通気量について、単一開口換気での特性がどの程度適用可能かを検討するとともに、通気量予測法確立のために新たに導入すべき変量を探る。

図8.9に大開口面積と一開口通気量との関係を示す(開口系列)。開口面積比と風向が一定ならば、一開口通気量は大開口面積に比例し、単一開口換気と同じ傾

向を持っていることがわかる。

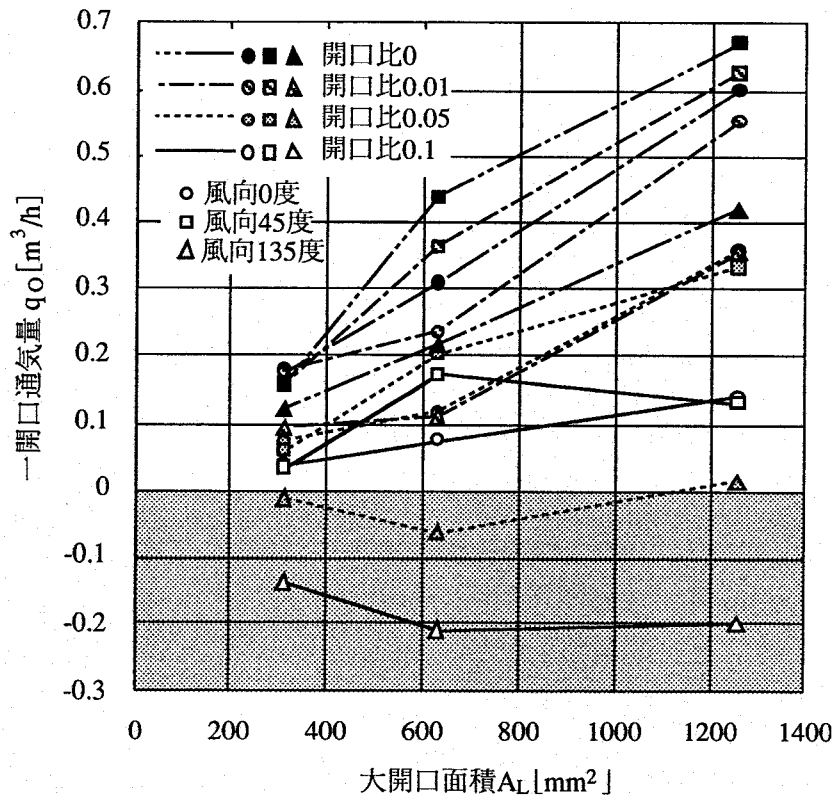


図8.9 大開口面積と一開口通気量との関係
(開口系列、風速 6.75m/s)

図8.10、8.11は、壁面近傍風速と一開口通気量との関係を風向系列及び風速系列についてそれぞれ示したものである。各図中の折れ線は、図8.10では風向の変化を、図8.11では設定風速の変化を意味する。図8.10から、風向の変化に伴い、壁面風速と一開口通気量の関係は不規則な変化を示し、一開口通気量を予測するためには、風向の変化を評価する何らかの変量の導入が不可欠であることがわかる。また図8.11から、開口比と風向が一定ならば、設定風速が変化しても一開口通気量はほぼ壁面近傍風速に比例することがわかる。故に、導入する変量には設定風速の影響を受けないことが要求される。

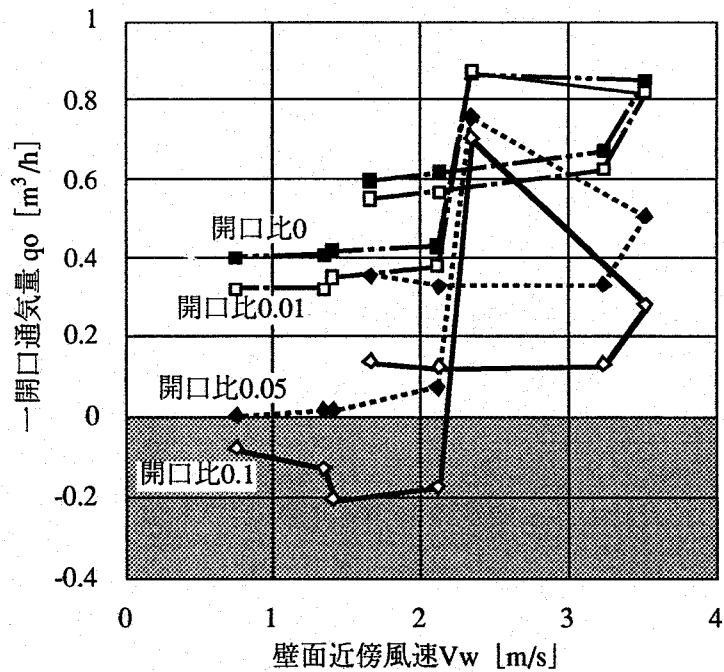


図8.10 壁面近傍風速と一開口通気量との関係
 (風向系列：折れ線は風向の変化を意味する。
 風速6.75m/s、大開口径40mm)

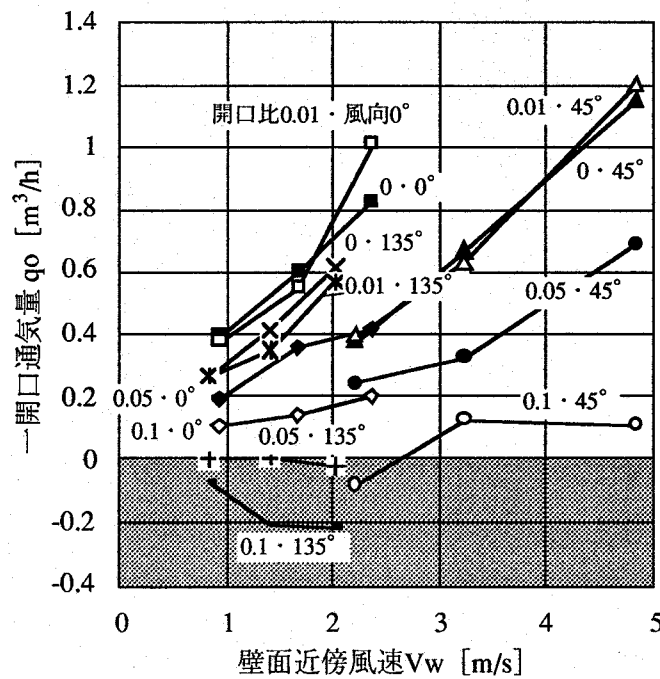


図8.11 壁面近傍風速と一開口通気量との関係
 (風速系列：折れ線は設定風速の変化を意味する。
 大開口径40mm)

(3)一開口通気量の予測法

図8.9～8.11の結果を参考に、一開口通気量の算定式の導出を試みる。単一開口換気の通気量は開口面積と壁面近傍風速の積に比例する。故に、単位壁面近傍風速・単位大開口面積当たりの一開口通気量を縦軸とし、通気量予測時に計算可能な種々の変量を横軸に取り、両者の相関について検討を加える。

図8.12は、風向の変化を評価し、かつ設定風速の効果を受けない変数として、設定風速の速度圧で無次元化した大開口前後差圧（大開口を小開口通気量が通過したと仮定した場合の圧力損失）を横軸に取ったものである。一開口通気量が0又は負の値の点は除外した。大開口前後差圧の正と負の領域それぞれにおいて負の相関がみられる。図中の曲線は最も残差の平方和が小さくなる回帰曲線である。縦軸の切片0.063は、第5章5.4で示した様に、この境界層下における単一開口換気での平均的な値である（図5.30(c)参照）。この回帰式を用いれば、設定風速と風圧係数、開口の有効開口面積から横軸の大開口無次元差圧の値を算出し、読み取った縦軸の値に壁面近傍風速と大開口面積を乗ずることで、通常の換気計算によって求められる小開口通気量に付加すべき一開口通気量を算定することができる。

図8.13は、横軸を設定風速で基準化した大開口面風速（小開口通気量を大開口面積で除したもの）としたものである。図8.12と同様の結果が得られており、一開口通気量の算出にこの図中の回帰曲線を用いることも可能である。

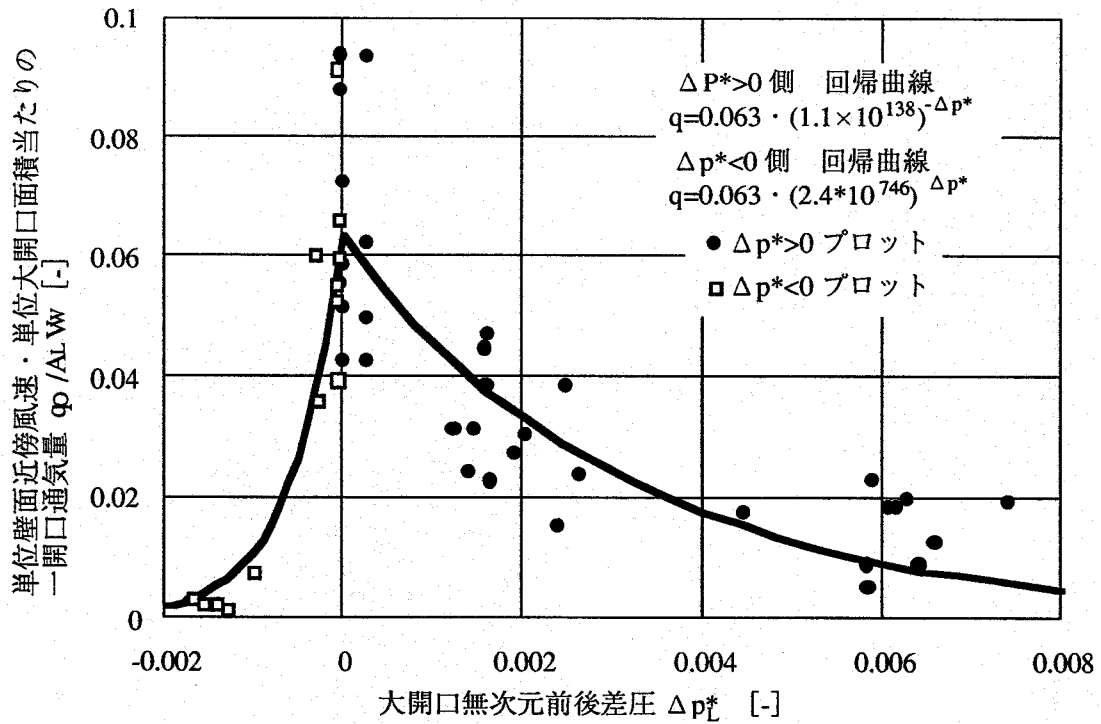


図8.12 大開口無次元前後差圧と単位壁面風速・単位大開口面積当たりの一開口通気量との関係

(0以下の値と開口比0及び風向90°を除く)

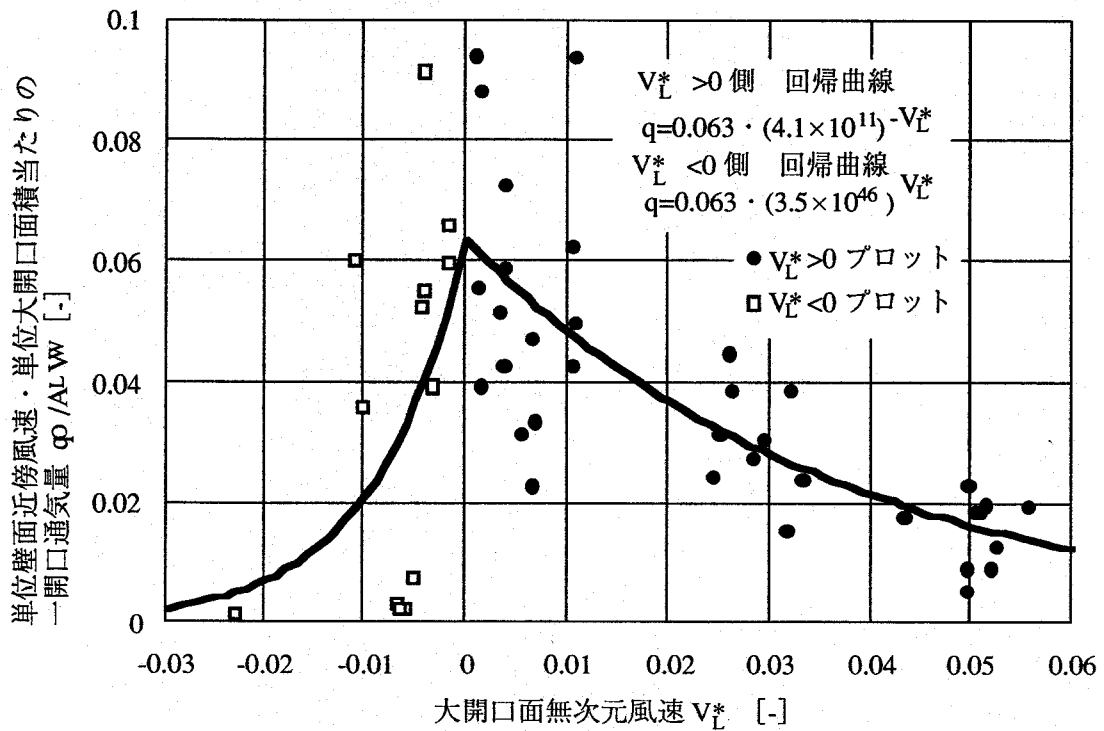


図8.13 大開口面無次元風速と単位壁面近傍風速・単位大開口面積当たりの一開口通気量との関係

(0以下の値と開口比0及び風向90°を除く)

図8.12、図8.13で示した回帰曲線は、設定風速の速度圧或いは設定風速で無次元化した変量を用いているが、汎用性を考えれば建物の軒高の速度圧或いは風速を基準として無次元化の方が望ましいといえる。そこでそれぞれの回帰式を建物の軒高の速度（圧）で基準化した変量で表現した式を以下に示す。

軒高の速度圧基準の大開口無次元前後差圧による算定式

$\Delta p_{L}^{**} > 0$ の場合

$$q_o = 0.063 \cdot A_L V_w \cdot (1.8 \times 10^{93})^{-\Delta p_{L}^{**}} \quad (8.1) \text{式}$$

$\Delta p_{L}^{**} < 0$ の場合

$$q_o = 0.063 \cdot A_L V_w \cdot (1.5 \times 10^{504})^{\Delta p_{L}^{**}} \quad (8.2) \text{式}$$

軒高の風速基準の大開口面無次元風速による算定

$V_L^{**} > 0$ の場合

$$q_o = 0.063 \cdot A_L V_w \cdot (3.5 \times 10^9)^{-V_L^{**}} \quad (8.3) \text{式}$$

$V_L^{**} < 0$ の場合

$$q_o = 0.063 \cdot A_L V_w \cdot (1.8 \times 10^{38})^{V_L^{**}} \quad (8.4) \text{式}$$

ただし、

- q_o : 一開口通気量 [m³/s]
- V_w : 壁面近傍風速 [m/s]
- A_L : 大開口面積 [m²]
- V_L^{**} : 軒高風速基準大開口面無次元風速
- Δp_{L}^{**} : 軒高速度圧基準大開口無次元前後差圧

(8.1)～(8.4)式では、Y軸の切片を0.063としたが、単一開口における通気量算定式(5.6)式では有効数字を考え0.06としている。故に実際の計算には0.06とした方が望ましいものといえよう。

故に(8.1)～(8.4)式は次の様に表現することができる。

軒高の速度圧基準の大開口無次元前後差圧による場合

$\Delta p^{**} > 0$ の場合

$$q_o = Q \cdot (1.8 \times 10^{93})^{-\Delta p^{**}} \quad (8.5) \text{式}$$

$\Delta p^{**} < 0$ の場合

$$q_o = Q \cdot (1.5 \times 10^{504})^{\Delta p^{**}} \quad (8.6) \text{式}$$

軒高の風速基準の大開口面無次元風速による場合

$V_L^{**} > 0$ の場合

$$q_o = Q \cdot (3.5 \times 10^9)^{-V_L^{**}} \quad (8.7) \text{式}$$

$V_L^{**} < 0$ の場合

$$q_o = Q \cdot (1.8 \times 10^{38})^{V_L^{**}} \quad (8.8) \text{式}$$

ただし、

Q: 単一開口時の通気量 [m³/s] ((5.6)式 [Q = 0.06 A U_L] で求める)

8.2.5 まとめ

本節での検討により、風上・風下に開口を大小の開口を持つ場合の換気メカニズムの概略を明らかにすることができたとともに、風の乱れによって大開口で生じる一開口通気量は、建物の軒高の速度圧で基準化した大開口無次元前後差圧或いは建物の軒高の風速で基準化した大開口無次元風速と開口面積、壁面風速から算出することが可能であることを示すことができた。今後の問題としては、本節で示した予測式の適用範囲を検討することが挙げられる。

8.3 風の乱れを考慮した通気量予測法

8.3.1 本節の概要

前節において、風上・風下に開口を持つ室で一開口通気と定常通気が同時に生じている場合に、単位開口面積当たり、単位壁面風速当たりの一開口通気量を軒高風速基準大開口面無次元風速或いは軒高速度圧基準大開口無次元前後差圧の関数として算出できることを示した。本節では、定常通気の通気量計算法を含めて、風の乱れを考慮した通気量予測法の手順をまとめる。

8.3.2 風の乱れを考慮した通気量予測法

風の乱れを考慮した通気量予測は、以下の手順に従って行なうことができる。

1. 予測対象とする建物の開口位置において想定する風向における風圧係数を求める。平面が正方形のアスペクト比2～4の建物の場合には、(7.1)式～(7.6)式及び表7.4によって予測することができる。

$$\phi = 38.5 \cdot W^* \quad (7.1)$$

$$c = 0 \quad (7.2)$$

$$a = \lambda W^* (-3.63 \times 10^6 H^{*2} + 4.76 \times 10^6 H^* + 6.96 \times 10^8) \quad (7.3)$$

$$b = \{4.70 \lambda (2.72 \cdot 10^4 H^{*2} - 3.69 \cdot 10^4 H^* - 2.55 \cdot 10^5) + 7.58 \cdot 10^4\} \cdot W^{*2} \\ + 0.245 \lambda (2.72 \cdot 10^4 H^{*2} - 3.69 \cdot 10^4 H^* - 2.55 \cdot 10^5) - 1.23 \cdot 10^4 \quad (7.4)$$

$$d = 0.655 H^* + 0.399 \quad (H^* \leq 0.868) \quad (7.5)$$

$$d = -2.91 H^* + 3.49 \quad (H^* \geq 0.868) \\ C = (1.49 \cdot 10^3 \lambda + 7.05 \cdot 10^3) (\theta - 180) + 0.0841 \lambda - 0.163 \quad (7.6)$$

表7.4 近似関数の基本形

風上側風向 (-90~90度)
$C' = a \theta'^3 + b \theta'^2 + c \theta' + d$ $C' = C \cos \phi - (0.5/90) \theta \sin \phi$ $\theta' = \theta \cos \phi + (90/0.5) C \sin \phi$ <p>ただし、 C: 風圧係数 θ: 風向 [°] ϕ: 回転角 [°]</p>
風下側風向 (±112.5° ~ ±180°)
$C = \alpha (\theta + \beta)$ <p>C: 風圧係数 θ: 風向 [°] α, β: 定数</p>

- 開口部の面積Aと流量係数 α を設定する。
- 開口の有効開口面積 αA を算出し、各開口の通気量がバランスするよう室内圧を求め、各開口の定常通気時の流量を算出する。通気の基礎式は(3.1)式による。

$$Q = \alpha A \sqrt{\frac{2g}{\gamma} \Delta p} \quad (3.1)$$

ただし、 g : 重力加速度

γ : 空気の比重量

αA : 風上開口と風下開口の合成した有効開口面積

$$\alpha A = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_w A_w}\right)^2 + \left(\frac{1}{\alpha_L A_L}\right)^2}} \quad (3.2)$$

- 室内圧と風圧から各開口での前後差圧或いは面平均風速を算出する。
- 開口部前の壁面近傍風速を予測する。直方体建物の場合には図6.5を用いることができる。
- ベランダがある場合には、壁面近傍風速からベランダ内風速を予測する。簡易に求めるためには、壁面風速に0.1を乗ずれば良い。
- 開口前の壁面近傍風速の分布と壁面上での風向が特定できる場合には、開口の大きさに応じて混合層外端位置の壁面近傍風速を求める。混合層外端は、

(5.3)式(5.4)式を用いれば良い。

長方形開口の場合には、開口の長辺をb、短辺をa、開口の長辺に対して気流がなす角を θ とすると、

$$L_{ave} = \frac{ab}{10(b \sin\theta + a \cos\theta)} \quad (5.3)$$

直径 r の円形開口の場合には、

$$L_{ave} = \frac{\pi r}{20} \quad (5.4)$$

8. 壁面近傍風速と開口面積から各開口が単一開口として存在した場合の通気量を(5.6)式によって算出する。

$$Q = 0.06 A U_L \quad (5.6)$$

ただし、

Q: 通気量 [m³/s]

A: 開口面積 [m²]

U_L: 混合層外端風速 [m/s]

混合層外端位置は、(5.3), (5.4)式で求める。

9. 建物の軒高の速度圧或いは風速を求める。

10. 各開口の前後差圧を軒高の速度圧で除して基準化、或いは各開口の面平均風速を軒高の風速で基準化する。

11. 各開口の一開口通気量を(8.5)~(8.8)式を用いて算出する。

$\Delta p^{**} > 0$ の場合

$$q_o = Q \cdot (1.8 \times 10^9)^{-\Delta p_L^{**}} \quad (8.5)式$$

$\Delta p^{**} < 0$ の場合

$$q_o = Q \cdot (1.5 \times 10^{504})^{\Delta p_L^{**}} \quad (8.6) \text{式}$$

軒高の風速基準の大開口面無次元風速による場合

$V_L^{**} > 0$ の場合

$$q_o = Q \cdot (3.5 \times 10^9)^{-V_L^{**}} \quad (8.7) \text{式}$$

$V_L^{**} < 0$ の場合

$$q_o = Q \cdot (1.8 \times 10^{38})^{V_L^{**}} \quad (8.8) \text{式}$$

ただし、

Q: 単一開口時の通気量 [m³/s] ((5.6)式 [$Q = 0.06 A U_L$] で求める)

以上の手順によって、各開口における定常通気量と風の乱れによって生じる一開口通気量を予測することができる。

室全体としての通気量を算出する場合にはさらに以下の手順が必要である。

12.各開口の定常通気量から、流入量或いは流出量の合算値として室の定常通気量を求める。

13.各開口の一開口通気量を合計し、室の一開口通気量とする。

14.室の定常通気量と室の一開口通気量を合計することにより、室の通気量を求めることができる。

以上の手順で、任意の建物条件における室の通気量を求めるためには、いまだ設計用資料は十分であるとは言いがたく、今後の研究成果を待たねばならないことも事実である。また、換気計画は、開口の通気量の予測に留まらず、室の換気性能の評価値である換気量の予測の上に行なわれなければならないため、室全体の通気量の予測値はあまり意味を持たず、各開口の通気量をもとに換気量の予測を行なわなければならないことを付記する。

8.4 本章のまとめ

本章の成果は以下の通りである。

(1)風上・風下に大小の開口を持つ場合の風の乱れによって生じる一開口通気量は、建物の軒高の速度圧で基準化した大開口無次元前後差圧或いは建物の軒高の風速で基準化した大開口無次元風速と開口面積、壁面風速から算出できることを示した。

(2)複数開口がある場合に、定常通気による通気量及び風の乱れによって生じる通気量を算出する手順を提示した。

第9章 風力換気時の換気効率

9.1 本章の目的

第2章で述べたように、風の乱れを考慮した風力換気計画法とは、「風の乱れを考慮しながら汚染物の室内平均濃度の頻度分布を予測する方法」であり、図2.5のフローチャートに示した「風の乱れを考慮した風力換気計画法」を確立するためには、通気量を始めとする通気条件から、換気効率を予測し、換気性能評価値であるところの換気量を予測した上で室内の汚染物濃度を算出、評価しなければならない。

前章までの検討で、多少資料が不十分な部分は残るものの、風の乱れを考慮した通気量予測法が確立されたと言える。従って、通気条件から換気効率を予測する手法を確立することができれば、換気量、汚染物濃度の予測は可能になるものといえる。

本章では、単一開口通気の場合、定常通気の場合それぞれについて、第2章で定義した換気効率を支配する要因に関して検討を行ない、種々の通気条件から換気効率を予測する手法確立のための基礎的知見を得ることを試みる。

9.2 単一開口通気時の換気効率

9.2.1 本節の概要

第4章4.2の「単一開口における通気量測定法」において、単一開口を持つ模型箱にファンによって作った噴流を吹き当てることによって単一開口通気を生じさせ、箱内の攪拌器の回転によって模型箱内の換気特性がどのように変化するかについて検討を行なった。4.2での検討の目的は、単一開口の通気量を箱内を攪拌しながらのトレーサーガス法で測定することの妥当性を検討することであったが、同時に模型箱内の換気効率に関わる知見も得られている。

本節では、4.2の結果をもとに単一開口通気時の換気効率について考察を行ない、単一開口通気時の換気効率の概略を把握したうえで、特に換気効率が悪化するであろうと考えられる風向 0° の条件において実験を行ない、種々の換気要因及び通気条件が換気効率に及ぼす影響についての検討を試みる。

9.2.2 単一開口通気時の換気効率の概略

4.2では、40mm径の円形開口を一つ有する内寸60cm角の立方体模型箱に噴流を吹き付けて、模型箱内各点の濃度減衰を測定している。（詳細は4.2を参照されたい。）4.2で得られた結果から、風向 0° と 45° について、換気量、通気量及び換気効率の一覧を表9.1に示す。風向 0° では換気効率は0.32と小さいが、風向 45°

表9.1 換気量・通気量・換気効率一覧

風向 [$^\circ$]	0	45
換気量 [m^3/h]	0.07	0.45
通気量 [m^3/h]	0.11	0.47
換気効率	0.32	0.48

では0.48とほぼ完全混合の状態になっていることがわかる。4.2の図4.14に気流を模式的に示しているが、風向 45° では単一開口から模型箱内に侵入した新鮮外気は模型箱内壁に沿って流れるため、箱内空気と混合しないままに流出する外気が殆どないことが換気効率を良くしている原因と言える。風向 45° で流入外気が箱内壁面に沿って流れるのは、箱内に流れ込む気流が開口前の気流によって慣性力

を持っているからと考えられ、開口前に一定方向の気流が存在している場合には風向45°と同様の気流性状を持つものと推測できる。故に、4.2では風向0°と45°での結果しか得られていないが、一般的には風向45°と同様の気流性状になることが多く、単一開口通気時の換気効率はほぼ0.5に近いと推論することができる。

一般の建物内における単一開口室では、開口前に一定方向の気流が生じることが多いと考えられるため、開口部気流はほぼ風向45°と同様の性状を有し、換気効率は0.5に近いものと考えられる。しかし、実際のケースでは稀な条件かもしれないが、風向が0°、即ち開口部中心に淀み点が位置する条件下での換気効率を知ることは、単一開口換気時の換気効率を考える上で非常に重要な意味を持つと考えられる。なぜならば、単一開口の通気において、どのような条件の場合に換気効率が低下するものであるかを知り、風力換気計画において換気効率を0.5としてはならない条件を知ることができるからである。

9.2.3 風向0°における単一開口通気時の換気効率

9.2.3.1 実験概要

第4章4.3「換気要因と通気量との関係」において、単一開口を持つ模型箱の通気量を測定し、各種の換気要因と通気量との関係について検討を行なった。本節では、4.3で設定した実験条件のうち、風向0°の場合についての換気量を測定し、4.3で測定した通気量と換気量とから換気効率を算出する。換気効率は、第2章図2.3に示した様に、室平均濃度の時間積分で定義されるが、換気量と通気量の比に1/2を乗ずることで算出が可能である。

実験に用いた装置及び実験手法は、4.3で用いたものと同じである。（実験装置は図4.1、模型箱は図4.2、図4.3を参照されたい。）単一開口を持つ内寸60cmの立方体模型箱にダクト噴流を吹き付け、CO₂を用いたトレーサーガス減衰法で換気回数を測定し、箱容積216ℓを乗じて換気量を得る。実験条件を表9.2に示す。模型箱を設置しない状態においてダクト中心軸上ダクトから60cmの地点における風速を熱線風速計で測定し、平均風速、乱れの強さ、乱れの実効値を算出した。

表9.2 実験条件一覧表

設定風速 [m/s]	1.0, 2.0, 4.0
風 種	1, 2, 3 (乱れの強さは1>2>3)
開口形状	円形
開口直径 [mm]	20.0, 28.3, 40.0

9.2.3.2 結果と考察

(1)平均風速と換気効率

図9.1は、全条件でのダクト風の平均風速と換気効率との関係を示したものである。どの条件においても、平均風速が大きくなるに従って換気効率は0.5（完全混合）に近づくが、その増加割合は乱れの強さの大きい風種ほど小さい。値としては、乱れの強さの大きい風種ほど、換気効率は大きい。第4章4.3で、平均風速が大きいほど、また、風の乱れが大きいほど通気量は大きいことが明らかになっていることから、この傾向は通気量が大きいほど箱内の気流速度が増加し、混合せ

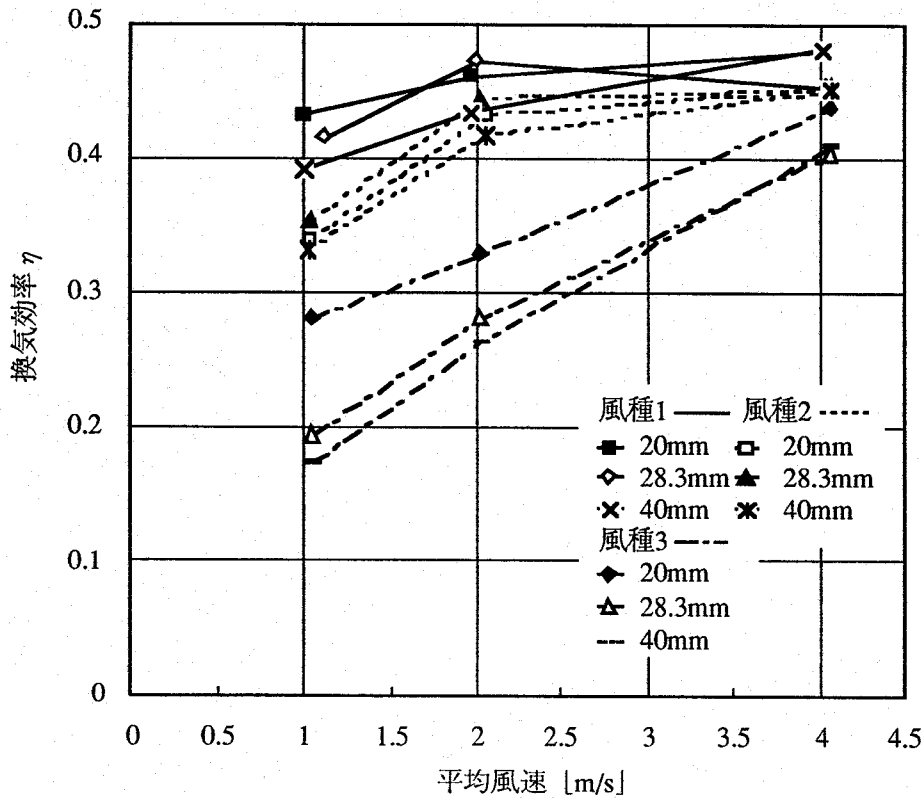


図9.1 平均風速と換気効率との関係

ずに排出される流入空気量の割合が減少し、完全混合即ち瞬時一様拡散の状態に近づくことが原因であると考えられる。ここで興味深いことは、同風種、同平均風速ならば、開口面積が小さいほど、換気効率が良いことである。

(2)開口面積と換気効率

図9.2は、開口面積と換気効率の関係を示したものであるが、図9.1からもわかったように、風種と風速が同じならば、開口面積が小さいほど換気効率は若干大きくなり、0.5に近づくことがわかる。開口面積が小さいほどそれに比例して通気量は減少するので、通気量が小さいほど換気効率が良くなっているわけで、一見不合理とも受け取れるが、換気効率を決定する要因が通気量だけではないことを示していると考えられる。

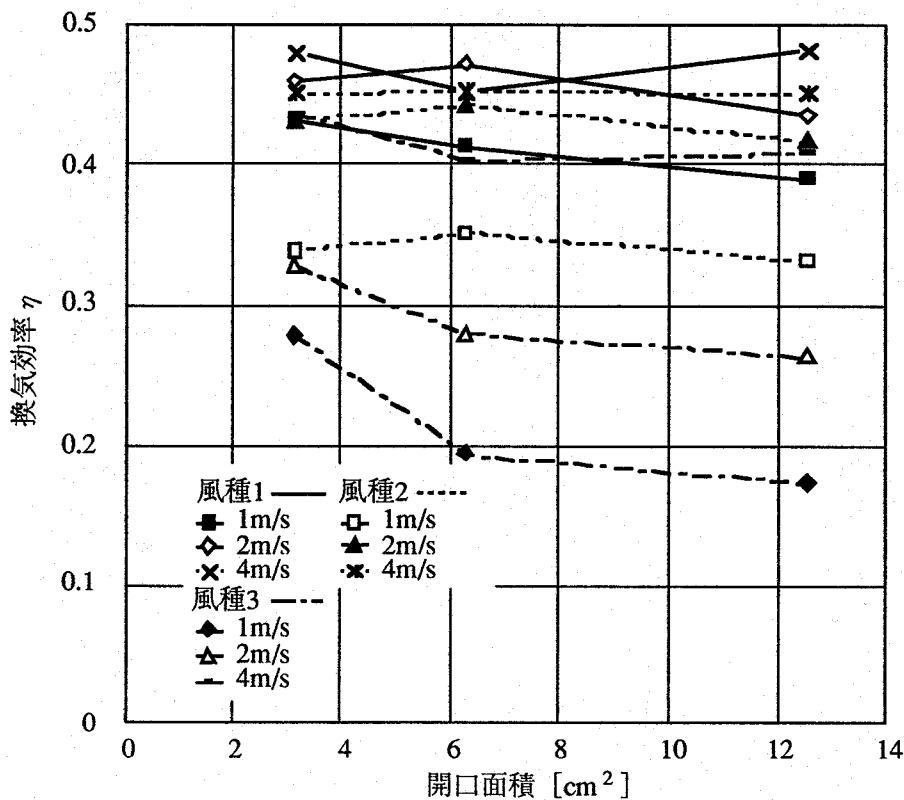


図9.2 開口面積と換気効率との関係

(3)乱れの強さと換気効率との関係

図9.3に、ダクト風の乱れの強さと換気効率との関係を示す。乱れの強さが大きくなるに伴って、換気効率は増加し、0.5に漸近することがわかる。乱れの強さが大きいほど、通気量が増加するとともに、開口から箱内に流入する気流の乱れの強さも大きくなり、そのことが結果的に換気効率の増加をもたらすものと考えられる。

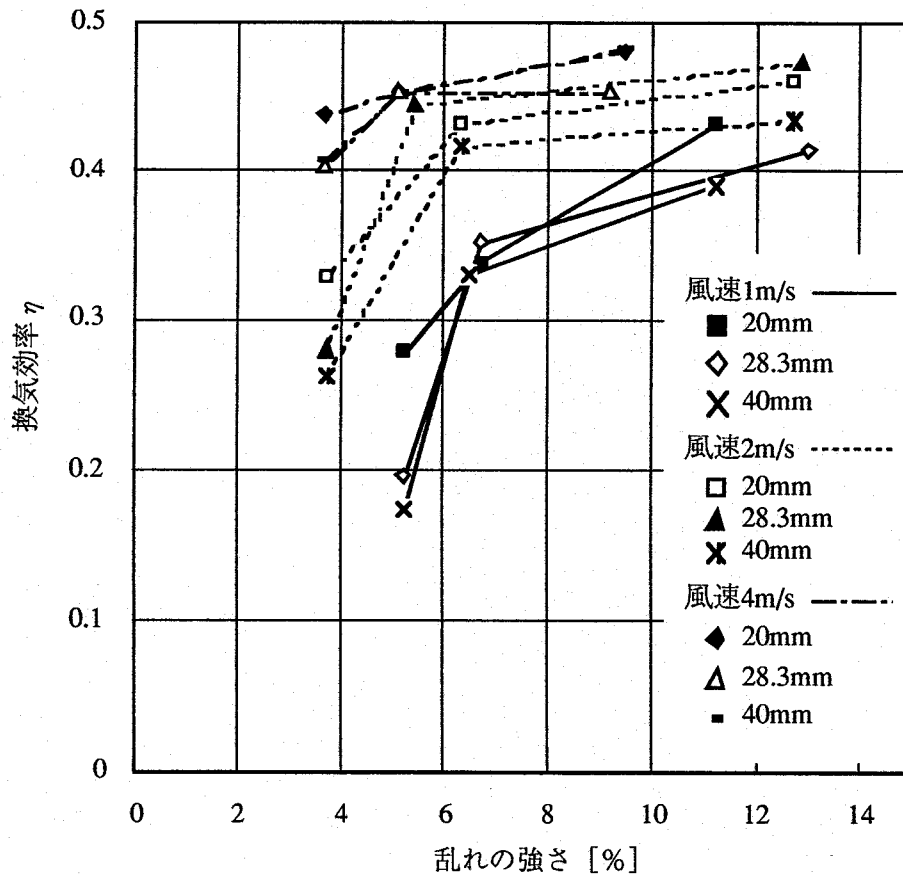


図9.3 乱れの強さと換気効率

(4)乱れの実効値と換気効率との関係

以上の検討で、換気要因と換気効率との相関関係は非常に複雑であることが示唆されたが、換気効率が平均風速と乱れの強さに大きく左右されるため、それらの積即ち乱れの実効値と換気効率との関係について検討する。乱れの実効値は、平均風速と乱れの強さの積である。図9.4から、両者は非常に相関が高く、両者の

関係は1本の曲線で代表させることも可能であろう。乱れの実効値には、開口面積の効果が含まれていないが、開口面積による差異は、平均風速や乱れの強さの差異に比較すると小さいため、このような結果が得られたものと言える。故に、開口面積の効果を無視しうるならば、風向0度での換気効率 η は、乱れの実効値から、予測することが可能と言えよう。

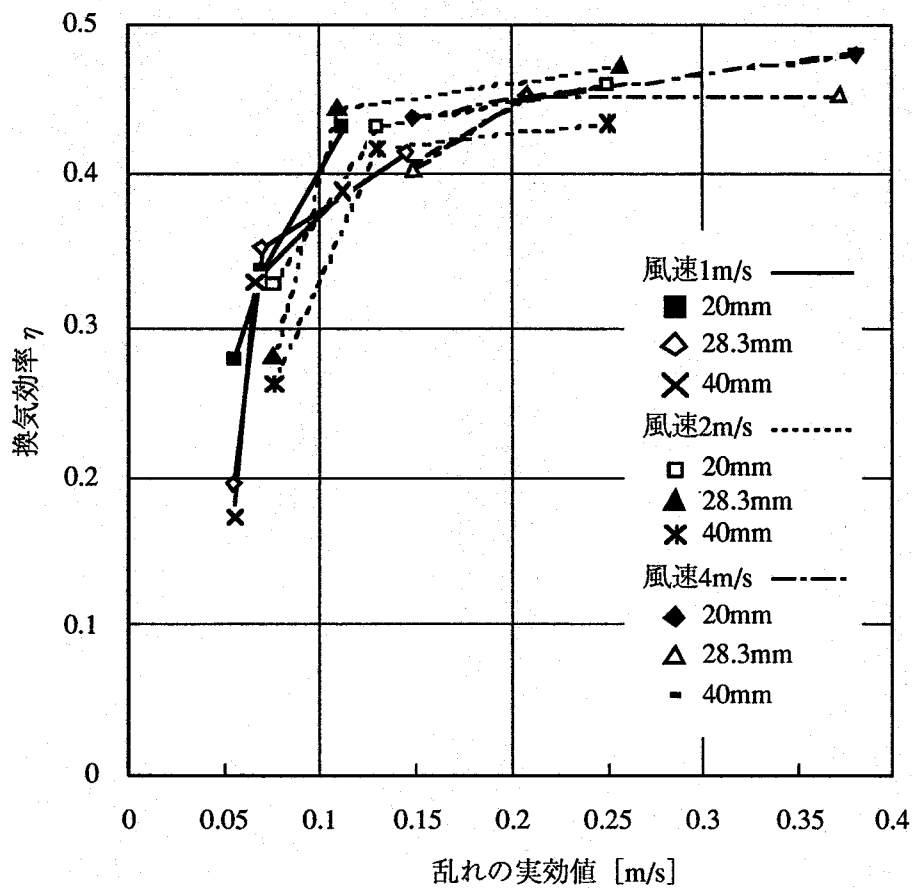


図9.4 乱れの実効値と換気効率との関係

(5) 通気量と換気効率との関係

ダクト風の乱れの実効値との相関がよいとしても、第2章2.2図2.4で示したように、換気効率は本来通気条件から算定されるべきものである。故に、通気条件から換気効率を算定する可能性を検討する。

図9.5は、通気量と換気効率との関係である。正の相関は認められるが、ばらつきが非常に大きいことがわかる。

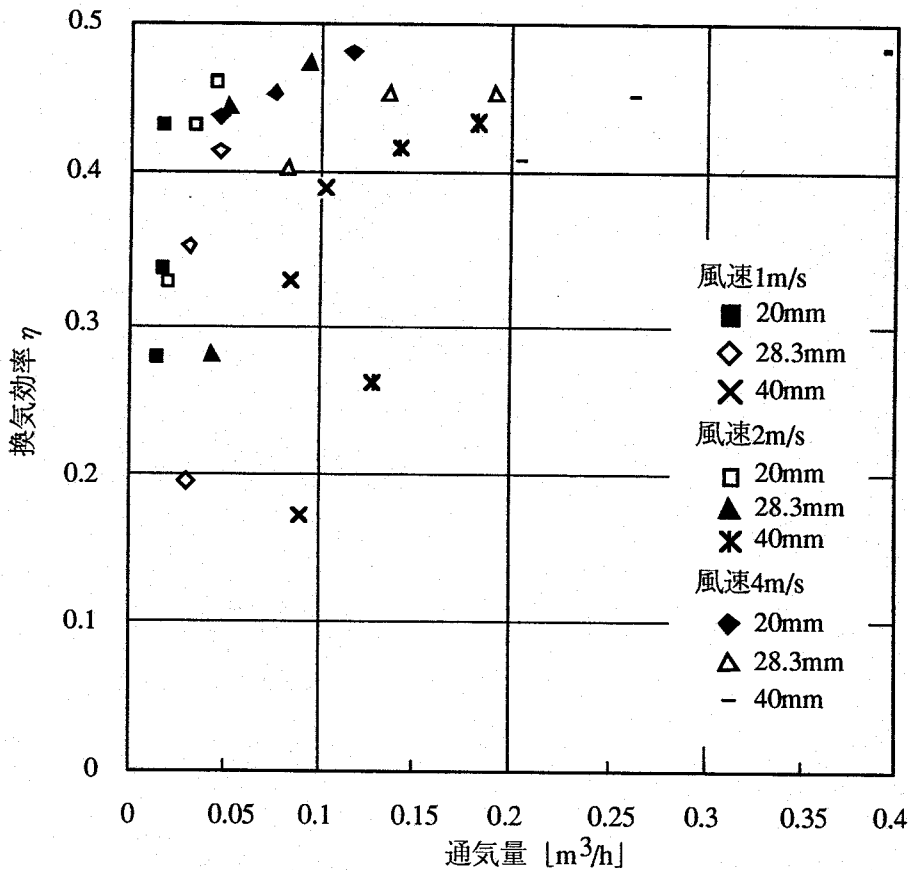


図9.5 通気量と換気効率との関係

(6) 単位開口面積あたりの通気量と換気効率との関係

図2.4中の開口部気流速に相当するものとして、単位開口面積あたりの通気量を考え、それと換気効率との関係を図9.6に示す。図よりかなりばらつきは少なくなり、単位開口面積あたりの通気量が大きくなるに従って、換気効率は増加し、0.5に漸近していくことがわかる。開口部気流速が大きくなるほど、流入後混合せず

に流出する空気の量が減少するものと考えられる。本節での実験では、開口部気流の測定を行っていないが、開口部気流の乱れの強さや実効値などの変量の導入でより相関の高い変量の誘導は可能と予想される。

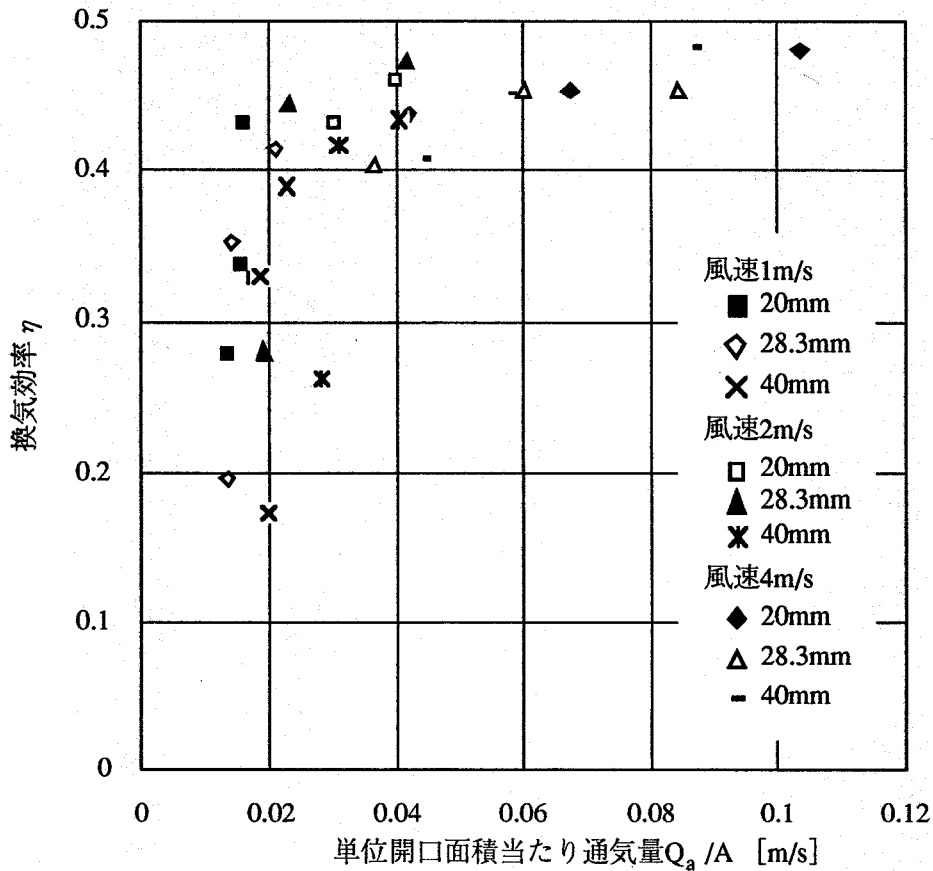


図9.6 単位開口面積当たりの通気量と換気効率との関係

9.2.4 まとめ

本節では、風向0度の際の換気効率に、換気要因や通気条件がどのような影響を与えるものであるかを明らかにした。最も相関の高かった換気要因は、ダクト風の乱れの実効値であり、最も相関の高かった通気条件は開口部気流速であった。

ここで得られた知見は、単一開口に種々の乱れを持つ噴流が吹き当たり、淀み点が開口中心に位置する特殊な条件下において適用されるものである。また、風種3の様に非常に乱れの少ない風が自然風下の建物の開口部に当たることは殆ど

ないと言って良いであろう。従って、実際の風力換気計画における換気効率を予測する上で直接役に立つ知見が得られているとは残念ながら言いがたい。しかし、開口中心に淀み点の存在する単一開口換気においては、換気効率は常に0.5ではなく、単位開口あたりの通気量が小さい場合には換気効率が低下するということが貴重な知見であるといえる。

9.3 定常通気時の換気効率

9.3.1 本節の概要

前節では単一開口における換気効率に関する検討を行なった。本節では、風力による定常通気時の換気効率について基礎的検討を行なう。

機械換気の場合での換気効率に関する研究は多いが、風力換気の定常通気は通気量の変動するという点と流入外気の方向が開口前の気流方向に左右されて様々に変化するという機械換気とは異なった特性をもっているため、機械換気の場合の換気効率に関する知見を風力換気にそのまま援用することはできない。

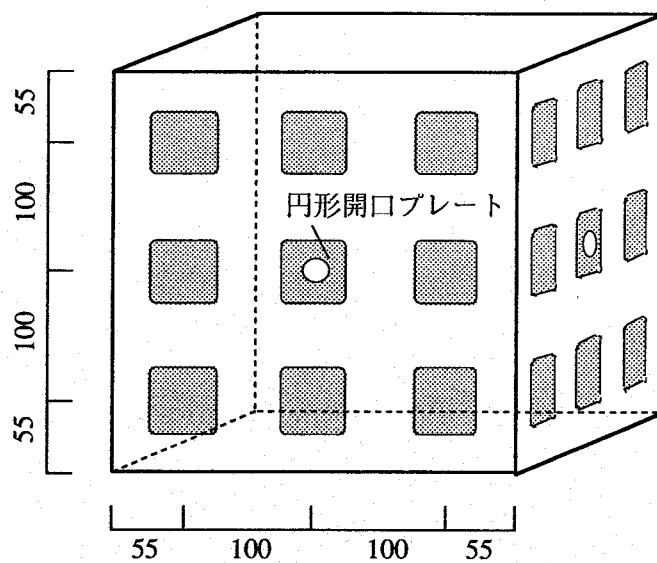
本節では、換気効率に影響を与える代表的要因のひとつである開口の位置関係に着目し、二つの開口を持つ室における開口の位置関係と換気効率との関係についての基礎的知見を得るために、風洞内で模型箱を用いた換気実験を行う。最も基礎的な知見を得ることを目的として、模型箱は地面に建つ建物模型ではなく、風洞の中央部に設置した立方体模型とした。

9.3.2 実験概要

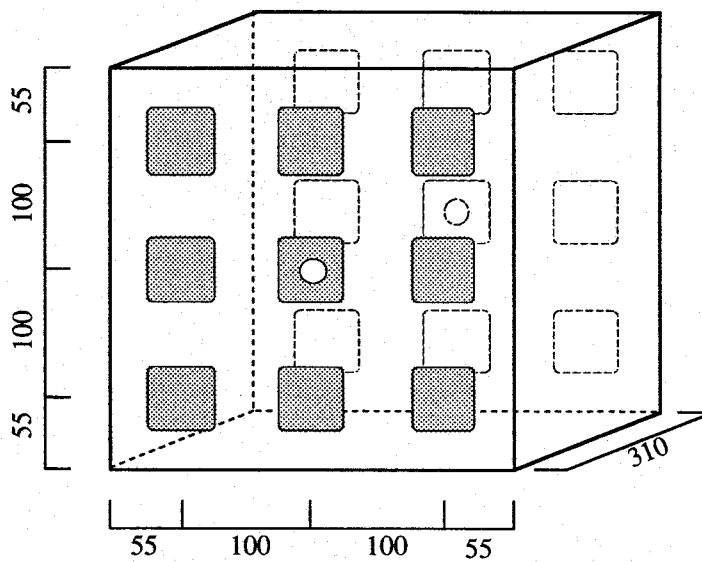
隣接する二面或いは対向する二面に円形開口（ $\phi 20\text{mm}$ 、厚さ 0.6mm ）を一つづつ取り付け付けた模型箱A、Bを風洞の中央部に設置し、換気実験を行った。図9.7に模型箱の概要を示す。開口プレートは図9.8に示す通りで、開口の前後の差圧を測定するためのチューブを取り付けている。条件として設定する開口部以外の部位には、開口のないプレートを取り付けた。図9.9に示す様に、一様流を吹かせた風洞内のほぼ中央部に模型箱を設置した。測定胴の上流に格子を取付けているため、風洞内の乱れの強さは約4%である。この風は、第5章5.3の風種2の風（表5.3）に等しい。実験条件を表9.3に、設定した開口条件を図9.10に示す。開口条件は、換気効率に差があると予想される条件を選択している。

換気効率は、通気量と換気量の比から求められるため（図2.3参照）、換気量と通気量の測定を行なった。通気量は風下側の開口の前後差圧から $Q_a = 4\alpha A\sqrt{\Delta p}$ （ Q_a ：通気量 [m^3/h]、 αA ：有効開口面積 [m^2]、 Δp ：風下開口前後差圧 [mmAq]）により算出した。また、換気量はトレーサースガスに二酸化炭素を用い、ある時間（基準化濃度が1から0.3になるまでの時間）前後の室内平均濃度（開口

を閉じて室内を攪拌して測定) の減衰量からSeidelの式により求めた。初期濃度は4500ppm前後とした。換気効率は換気量と通気量の比を2で除して算出した。



(a)モデルA (隣接タイプ)
内寸30cm角立方体



(b)モデルB (対向タイプ)
内寸30cm角立方体

図9.7 模型箱概要 単位 [mm]

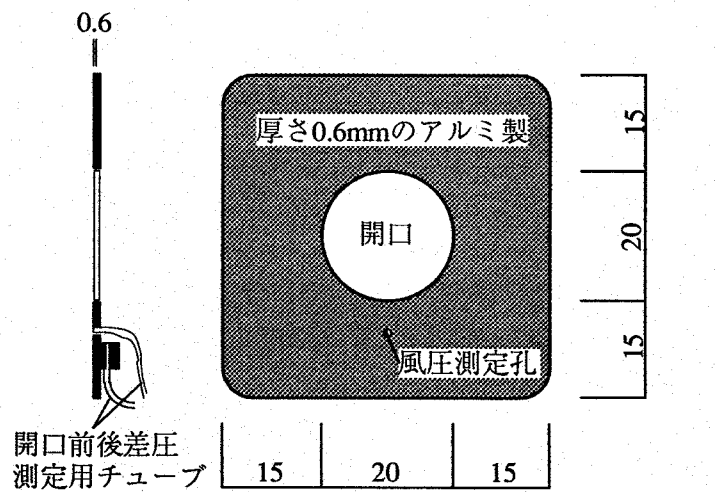


図9.8 開口プレートの詳細

単位 [mm]

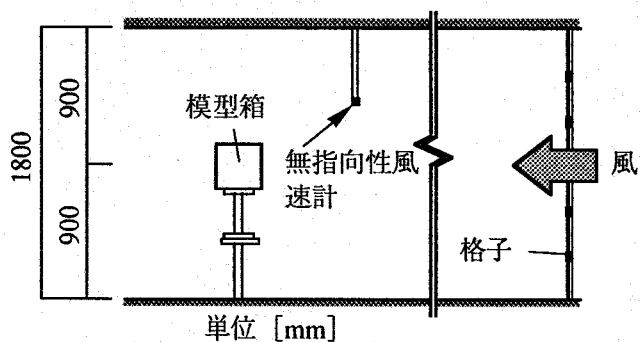
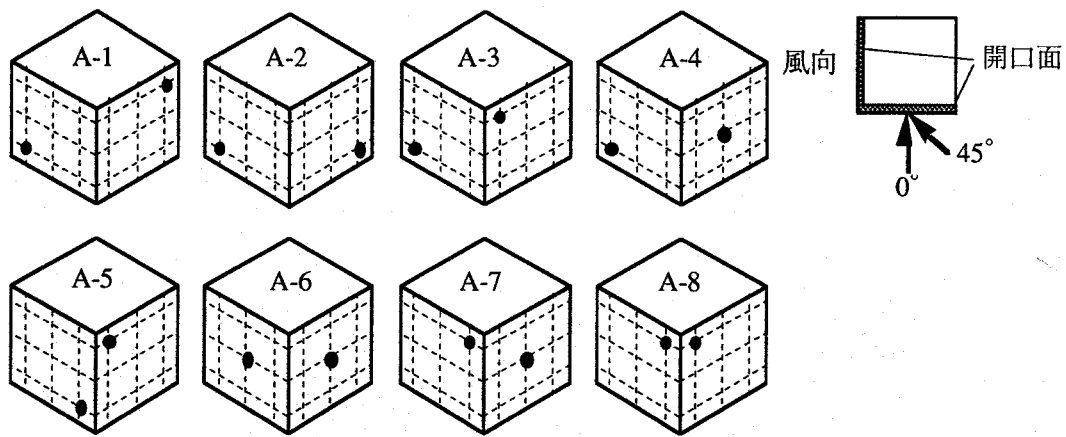


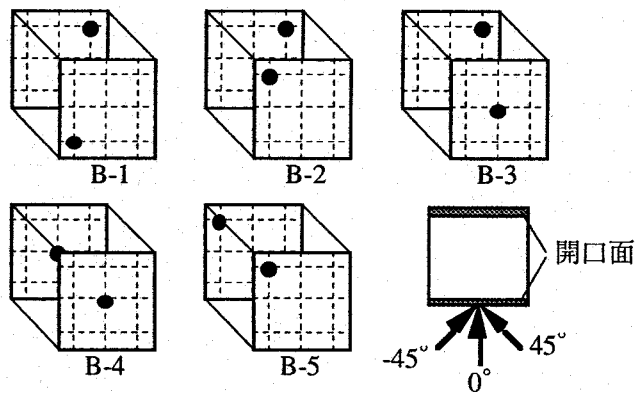
図9.9 模型箱設置概要（風洞断面）

表9.3 実験条件一覧

設定風速	2 m/s	
風洞風の乱れの強さ	4 %	
模型箱	A	B
開口条件	8 通り	5 通り
風向		



(a) 模型箱タイプA



(b) 模型箱タイプB

図9.10 開口条件一覧

9.3.3 結果と考察

(1) 開口パターンと通気量との関係

各模型、各風向における開口パターンと通気量との関係を図9.11に示す。右から左へ通気量の大きい順に並べている。(a)隣接面 0° （隣接面モデルAの風向 0° ）では、風上側の開口が壁面中央にあるほど、また、側壁の開口が風上側に位置するものほど、通気量が大きくなっていることがわかる。通気量は、一般に開口面にかかる風圧差の平方根に比例するため、この通気量の傾向は、風上側では中央ほど風圧が高く、側壁では風上ほど負圧になることによって説明が可能である。他の条件の場合にも、通気量の大小は二開口面の風圧係数の差の大小関係に

よって説明することができると考えられる。全体的にみると、本実験における通気量は0.65から1.4 [m³/h] の範囲にあることがわかる。

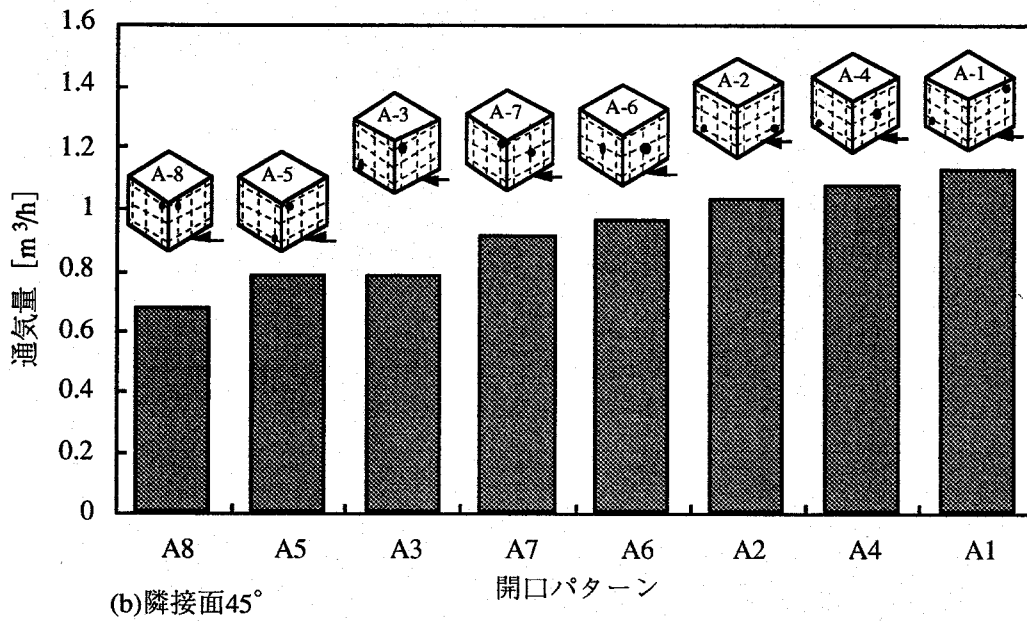
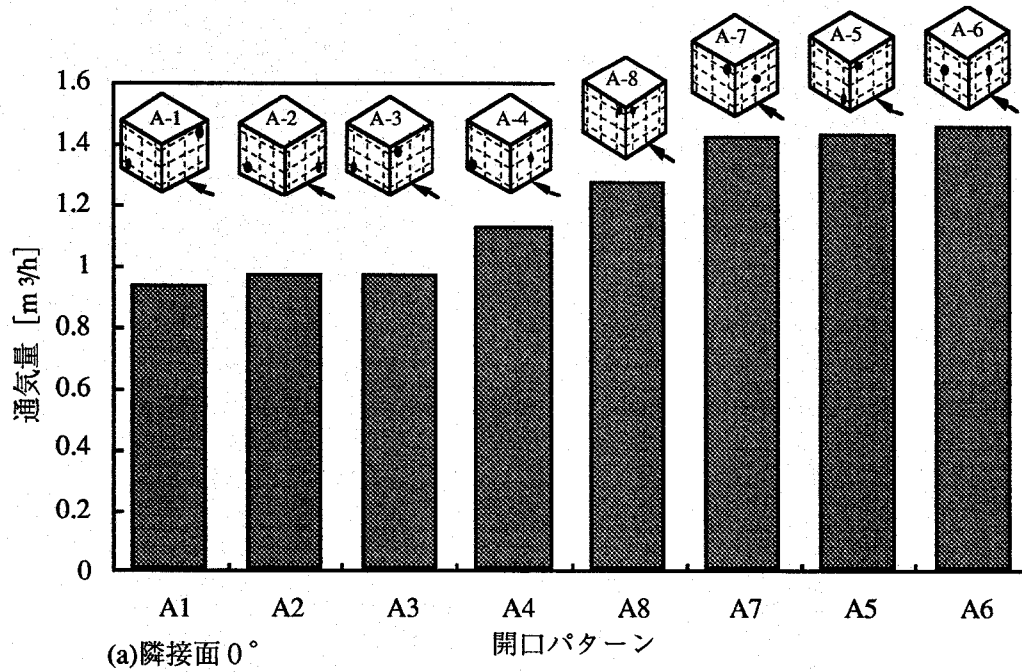


図9.11 開口条件と通気量との関係

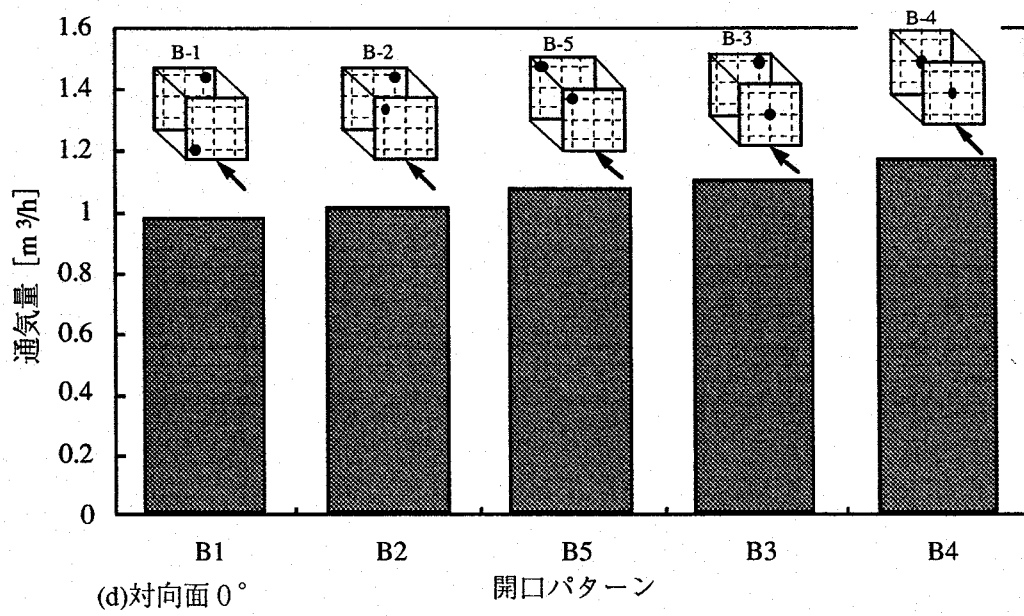
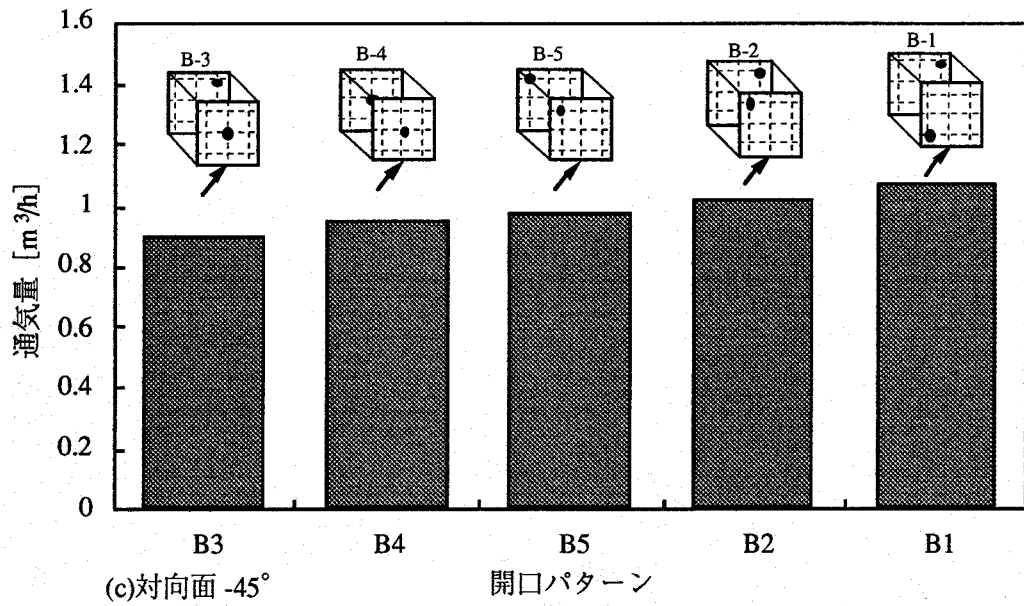


図9.11 開口条件と通気量との関係

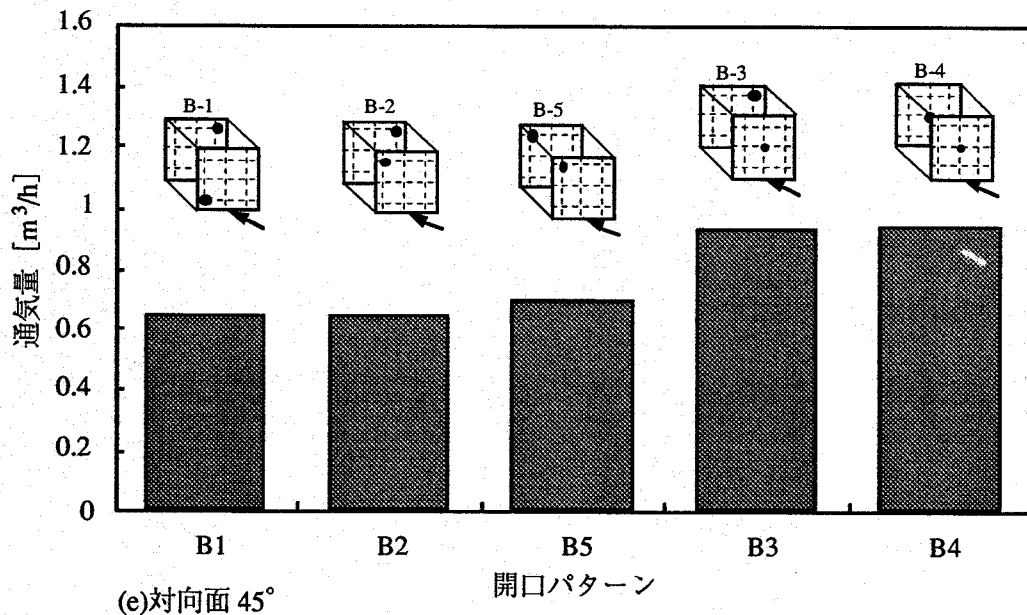


図9.11 開口条件と通気量との関係

(2)開口パターンと換気効率との関係

図9.12に、各模型、各風向における開口パターンと換気効率との関係を示す。右から左に換気効率の大きいものから順に並べている。(a)隣接面・風向0°では、換気効率はすべて0.5より大きく、完全混合をやや上回る換気効率の値を示している。A-6~8の様に見流入空気が箱内空気と混合せずに流出するという短絡換気が生じそうな開口条件もあるが、実際には短絡は生じずに室内に大きな流れの経路が生じていることを示唆している。興味深いのは、換気効率の良い開口パターンほど図9.11での通気量が小さくなっている点である。通気の経路によっては、通気量が小さいほど拡散が少なく、ピストンフロー的な流れに近くなることによると考えられる。

(b)隣接面・風向45°では、多くの条件で完全混合のときの換気効率0.5を下回っており、全体的に隣接面0°より換気効率が悪いことがわかる。このことから、風上側開口からの外気の流入方向が風下開口に向き、箱内空気と混合せずに流出する空気の割合が大きいものと予想できよう。換気効率の最も悪いA-8は通気量が最も小さい条件であり、通気量が換気効率に与える影響は風向によって異なることがわかる。

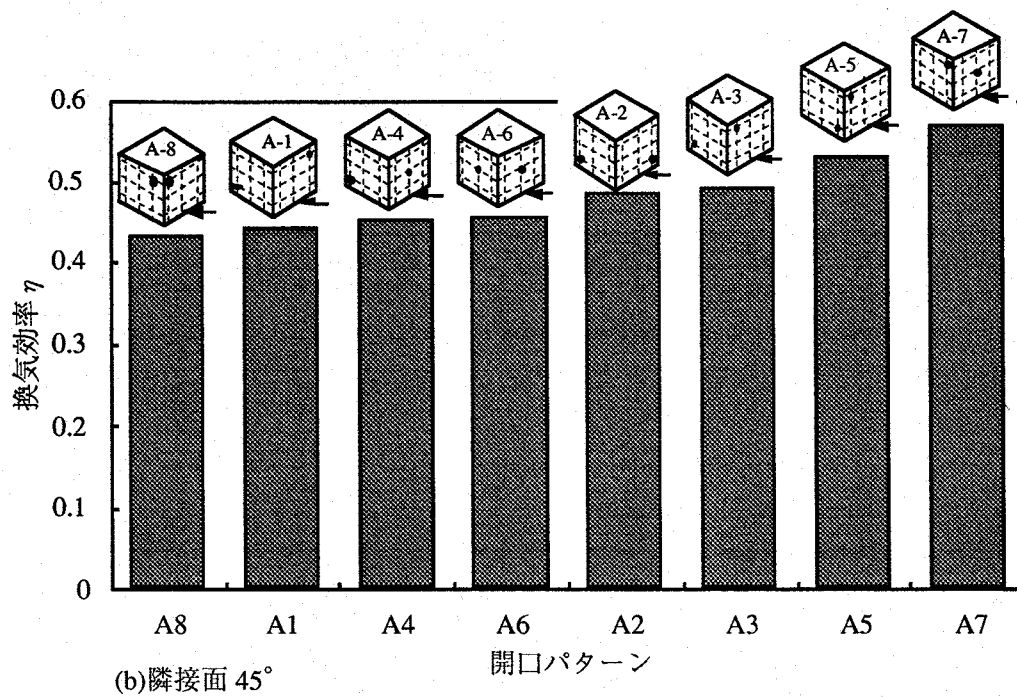
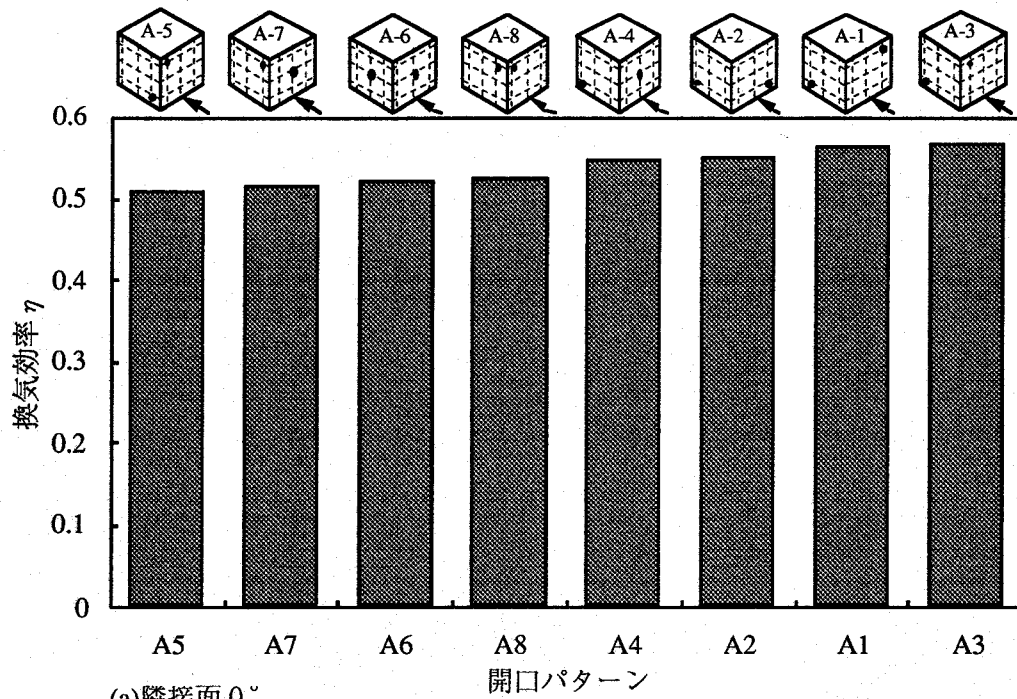


図9.12 開口条件と換気効率

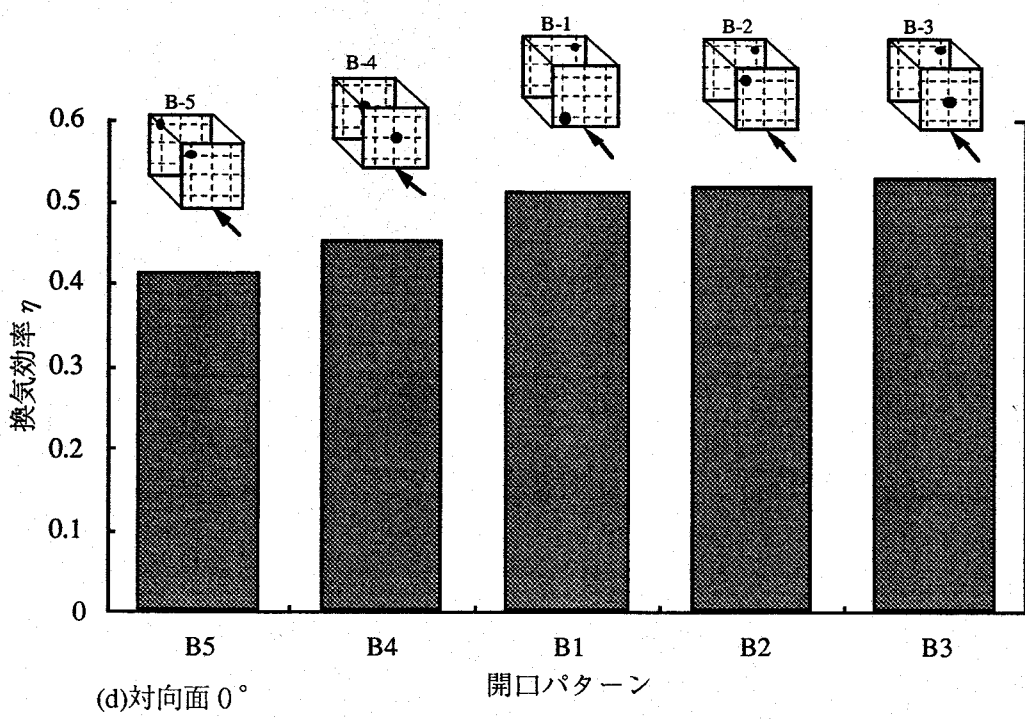
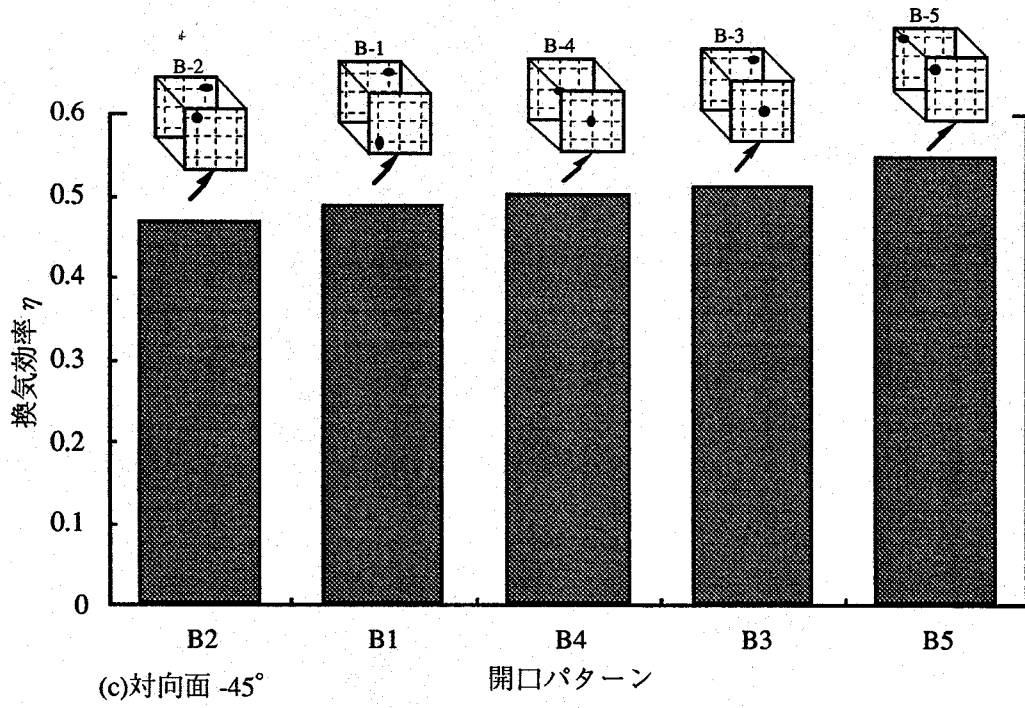


図9.12 開口条件と換気効率

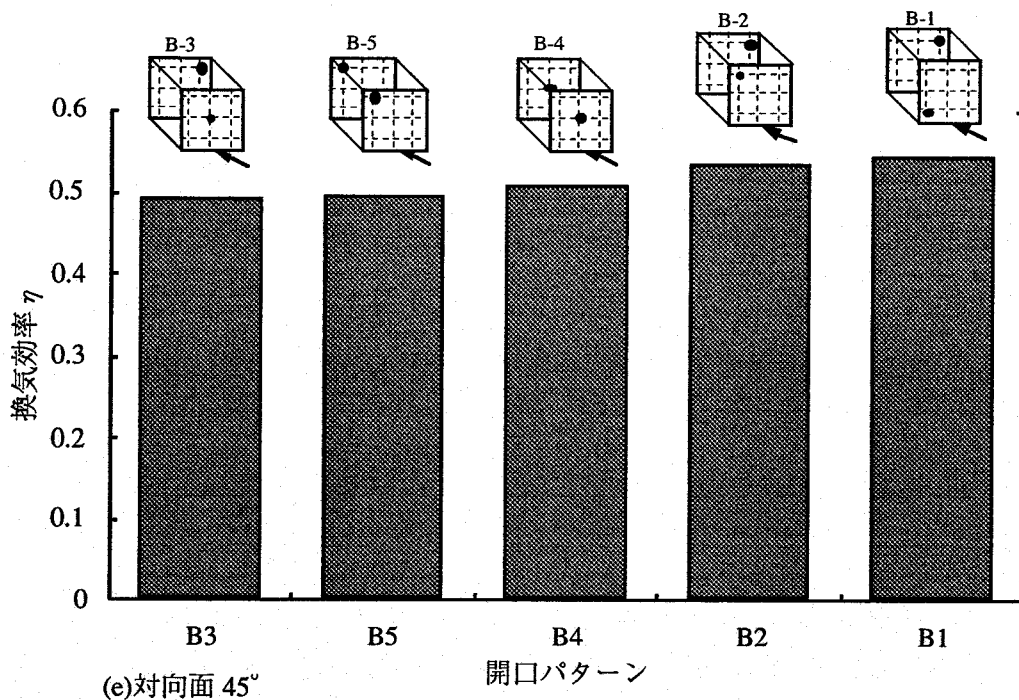


図9.12 開口条件と換気効率

(c)対向面（モデルB）・風向 -45° 及び(e)対向面・風向 $+45^\circ$ では、換気効率は凡そ0.5前後で、開口パターンによる換気効率の変化は比較的小さいことがわかる。(d)対向面・風向 0° では、パターンB-5とB-4の換気効率が0.4~0.45と完全混合より悪いことがわかる。B-4では風上開口が淀み点に位置するため、流入空気がまっすぐ風下開口に向かって流れることによって換気効率が低下し、B-5では流入した外気が、コアンダー効果によって模型箱内の隅にそって流れ、風下開口に短絡することによって換気効率が低下するものと推測することができる。

以上から、換気効率が0.5より悪い条件は、隣接面 45° と対向面 0° の一部の開口条件で、逆に換気効率が0.5より良い条件は、隣接面 0° 、 45° の一部の開口条件であり、今回の実験条件の範囲内においては、換気効率は最大0.58、最低で0.4程度であることがわかった。

9.3.4 まとめ

定常通気時の換気効率について風洞実験によって検討を行なった結果、通気量が0.65から1.4 [m^3/h]の範囲内において開口パターンによって生じる換気効率の

差異は、0.4から0.58程度の範囲内であり、隣接面に開口がある方が、開口パターンによる差異が大きくなることがわかった。本節の実験では、設定風速を2 m/s一定としたことから、風向によって通気量が変化し、開口の位置関係が換気効率に与える影響だけを抽出することはできなかった。また、設定風速や模型箱の形状が異なったり、模型箱が風洞床面に設置した場合には異なる傾向を示す可能性も高い。しかしながら、ここで得られた知見より、四方が外気に面する立方体に近い部屋の場合、定常通気時の換気効率は最低で0.4程度になる可能性があるということができよう。

本来換気効率は、室内の流入空気の拡散性状と室内の気流性状によって決まるものであるため、模型箱内の気流測定の上、気流性状から換気効率を考察することが今後の課題であろう。

9.4 本章のまとめ

本章では、単一開口通気と定常通気の換気効率について基礎的な検討を行なった。その結果得られた知見は以下の通りである。

(1)単一開口を持つ室の換気効率は、開口前を一定方向に風が流れる場合には0.5と考えられる。

(2)単一開口通気で開口中心に淀み点の存在する場合において、換気効率は常に0.5ではなく、単位開口あたりの通気量が小さい場合には換気効率が低下する。

(3)定常通気時の換気効率について検討を行なった結果、四方が外気に面する立方体に近い部屋の場合、定常通気時の換気効率は0.4から0.6程度変化する可能性がある。

本章では、単一開口通気と定常通気が同時に生じている場における換気効率については検討を行なっていない。しかし、本章での検討結果から、単一開口で開口中心に淀み点が位置する特殊な場合を除いて、最低で0.4程度を考えれば風力換気計画を行なう上ではほぼ安全側であると言えることができよう。いずれにしても、風力換気時の換気効率については残された検討課題が多く、今後とも研究を進める必要がある。

第10章 室内汚染物濃度の出現頻度の予測法

10.1 本章の目的

第2章において、本研究で確立を目指している風の乱れを考慮した風力換気計画法とは「風の乱れを考慮しながら汚染物の室内平均濃度の頻度分布を予測する手法」と言えることを述べ、図2.5にそのフローチャートを示した。図2.5に沿った風力換気計画法を確立するためには、通気量と換気効率から算出される換気量の予測のみならず、汚染物の発生条件が決まった場合に室内の汚染物濃度の頻度分布の予測を行わなければならない。自然風の風向、風速は時々刻々変動するものであるため、予測される換気量、室内汚染物濃度も時間的に変化する。その時間的に変動する室内汚染物濃度の頻度分布を算出するための種々の手法に関して検討を行なうことが、本章の目的である。

汚染物濃度頻度分布の予測法として最も基礎的で精度の高い方法は、自然風の風向・風速の時系列データを入力とした非定常計算であるといえる。非定常計算は、時々刻々の汚染物濃度の変化を時系列で計算し、統計処理によって最終的に濃度の頻度分布を算出する方法であり、最も正確ではあるが処理の期間によっては膨大なデータの記憶要領と計算時間を要するという欠点を有する。

一方、比較的短い時定数における汚染物濃度の変化を無視し得るならば、ある計算時間間隔内で室内汚染物濃度は定常に達するとして、換気量の頻度分布から汚染物濃度の頻度分布を対応させることができる。即ち、室内の汚染物濃度が瞬時に定常濃度に達するとして換気量と汚染物濃度を対応させる訳である。汚染物のある発生量ごとに、入力となる自然風の風向と風速の同時頻度分布がわかればその発生量下での通気量の頻度分布は容易に求めることができ、換気効率の値を予測して与えれば換気量の頻度分布を得ることができる。この手法では換気量と室内濃度を一対一に対応させることができるため、換気量の頻度分布と汚染物の頻度分布は汚染物の発生量ごとに対応づけることができる。

本章ではこの手法を瞬時定常計算と呼び、非定常計算法とともにその手法について検討を行なう。

10.2 非定常計算による室内汚染物濃度予測法

10.2.1 本節の概要

本節では、室内汚染物濃度を最も精度良く計算できる手法である非定常計算法の手順と計算式について述べるとともに、自然風データを用いて通気量の頻度分布、汚染物濃度の頻度分布及び汚染物濃度の累積頻度分布の算出を行なった例を示す。

10.2.2 非定常計算法

非定常計算は、自然風の風向・風速の時系列データを入力として、設計条件である開口条件などを想定した場合の室内汚染物濃度の頻度分布もしくは累積頻度分布を最終的に算出するものである。基本的には、第2章の図2.5に従って行なえばよいが、以下にその手順を示す。

- 1.計画対象建物上空の自然風の風向・風速の時系列データを用意
- 2.計画対象室の開口条件を決定
- 3.各風向における開口位置での風圧係数を予測
- 4.各風向における開口前での壁面近傍風速比（上空風速に対する比）を予測
- 5.開口の通気量の時間変化を予測
- 6.換気効率を予測
- 7.開口の換気量の時間変化を予測
- 8.室内の汚染物とその発生量を想定
- 9.室内の汚染物濃度の時間変化を算出
- 10.室内汚染物濃度の頻度分布を算出

以下各項目の詳細について記す。

1.計画対象建物上空の自然風の風向・風速の時系列データを用意

自然風に関しては残念ながら標準気象データの作成が行なわれていない。最も望ましいのは建設予定地の上空のデータであり、測定を行なうのが理想ではあるが、最寄りの気象台データを用いるのが現実的であろう。気象台では風向・風速

の10分間平均値の10分間隔の時系列データを観測しており、入手することは可能である。フロッピーディスクなどの媒体に記憶させることが望ましいといえる。

気象台データの風向は通常16方位に分割されているが、測定を行なう場合には360度表現で連続の方が良い。また、平均化時間は10分が一般的である。

データの長さは、計画対象とする室の使用状況にもよるが、年間データを用いることが一般的である。季節や時間帯別に換気計画を行なう場合には、季節データや時間帯データが必要となる。

2.計画対象室の開口条件を決定

風力換気計画の計画対象となるのは、室の換気口や窓であるが、気密性も室内空気環境を左右する非常に大きな要因であり、計画対象室の気密性能に応じた隙間の相当開口面積が開口面積として計上されなければならない。現状の技術では気密性を自由に制御することは困難なため、それ自身が設計の対象になることは少なく、バックグラウンド的な開口面積として重要なものであると言える。

換気口や窓の場合には、開口の位置、面積、形状、流量係数を決定し、気密性の場合には隙間相当開口面積を決定し、流量係数は適当な値を設定する。現状では0.65程度とするのが妥当であろう。

3.各風向における開口位置での風圧係数を予測

定常通気は、開口にかかる時間平均の風圧差を原動力として生じることから、定常通気量を算出するためには各時刻における開口面での風圧の時間変動を予測しなければならない。そのために必要なのが、各風向における各開口面での風圧係数である。風圧係数は上空の自由風の速度圧に対する比であるが、設置境界層内の建物の風圧係数は軒高の速度圧基準とすることが実用的である。

正方形平面を有するアスペクト比2～4の建物については、本論文第7章で提示した予測式を用いればよい。本研究で提示した式を用いれば、風圧係数が風向に対して連続しているため、360°分割の風向に対しても計算することができ、高精度の風圧計算が可能である。それ以外の形状の建物の場合には、風洞模型実

験によって求めることが最も望ましいが、類似した形状の建物の風圧係数の資料から机上で予測しても良い。風圧係数が風向に対して離散的であり、自然風データの風向分割が連続である場合には、直線等を用いた補間が有効である。

なお、計画対象室が単一開口しか持たず、気密性が非常に高い場合には、風圧係数の予測の必要はない。

4.各風向における開口前での壁面近傍風速比（上空風速に対する比）を予測

第5章で提示した通気量算定式で単一開口の通気量を算定するためには、開口面積と混合層外端の壁面風速を知らなければならない。本来は、開口の形状と大きさから混合層外端位置を算出し、予測される壁面近傍の風速の分布から混合層外端位置での壁面近傍風速を算出することが望ましい。しかしながら、壁面近傍の風速分布の予測資料が整っていない現状においては、壁面近傍風速に分布がないものとし、第6章で提示した開口前に障害物がない場合の壁面近傍風速の分布図（図6.5）を用いて算定しても良い。

開口前にベランダがある場合には、第6章でのベランダ前風速の資料を用いて予測を行なうか、或いは、図6.5で予測した壁面近傍風速に0.1を乗じてベランダ内風速とすることができる。

壁面近傍風速の予測に関しては、問題点も多く完全に確立されたとは言いがたいため、ある程度の誤差はあるものとして安全側の計画をしなければならない。

5.開口の通気量の時間変化を予測

ここからは、時系列の計算となる。自然風の風向、風速の時系列データを入力として、時々刻々の開口面風圧、壁面近傍風速を算出し、各時刻において開口部の通気量を算出する。ある時刻において、開口にかかる風圧と開口前の壁面近傍風速が既知であるとき、開口面の風圧から定常通気の通気量（小開口通気量）を算出するとともに、第8章で提示した式〔(8.5)～(8.8)式〕で一開口通気量を算出することができる。故に時系列の自然風データから、一開口通気量、大開口通気量の時間変化を予測することができる。開口が複数の場合には、各開口の定常通気量と一開口通気量が算出されることになる。

なお、隙間の相当開口面積に対しては一開口通気量は零とするべきである。

6.換気効率を予測

風力換気時の換気効率に関する検討は残念ながら不十分であり、通気条件に応じた換気効率の予測は不可能である。しかし、第9章の検討結果を参考に、開口が淀み点になる単一開口の条件を除いて換気効率 $\eta=0.4$ と設定すれば安全側の風力換気計画を行なうことができる。

7.開口の換気量の時間変化を予測

一開口通気量と小開口通気量を合計することで室の通気量の時間変化を求める。その通気量に換気効率 η の2倍を乗ずることで換気量の時系列変化を予測することができる。 η を0.4とすれば換気量は通気量の0.8倍となる。

8.室内の汚染物とその発生量を想定

室内にどのような汚染物が単位時間にどのくらいの量発生するかを想定しなければならない。室の用途によって異なるが、一般居室においては、人体から発生する二酸化炭素、体臭その他の生理的空気汚染物、タバコ煙、化石燃料の燃焼による一酸化炭素、ホルムアルデヒド、ラドンなどが考えられる。中でも最も一般的なのが体臭であろう。体臭は、二酸化炭素 CO_2 をそのモニターとすることができ、発生量の規定も容易である。

汚染物として何を想定し、その発生量をどう設定するかは換気計画の根幹にかかわる非常に重要な問題であるといえる。例えば気密な現代の住宅においては、体臭を代表する二酸化炭素濃度がビル管法で規定される1000ppmを越えないように換気計画をすることが空気環境の悪化を防ぐ有効な方策の一つであると考えられる。

発生量は、自然風のデータの期間に応じて、一定値としたり、時間帯や季節に応じて変化する値とすれば良い。

9.室内の汚染物濃度の時間変化を算出

換気量の時系列データと汚染物の発生量から、室内の汚染物濃度の時間変化を計算することができる。第2章2.2で述べたように、換気量とは室内の汚染物の除去性能を表現する指標であり、換気量を用いれば室全体に均質な汚染物発生があった場合の室平均汚染物濃度を算出することができる。

以下、換気量から室内汚染物濃度の計算式を誘導する。

いま、ある時刻 t における換気量が $Q_e(t)$ であり、室平均の汚染物濃度が $C(t)$ 、室容積が V 、汚染物の発生量が $M(t)$ 、外気濃度が C_o であるとき、 t 時から $(t+dt)$ 時までの微小時間 dt における室内平均汚染物濃度の変化を dC とすると、汚染物の保存則より次式が成り立つ。

$$V dC = C_o Q_e dt - C(t) Q_e dt + M(t) dt \quad (10.1)$$

いま、換気量がある時間間隔 Δt おきの離散値であり、 Δt の平均値である場合を考える。換気量を Q_{ei} 、発生量を M_i ($i=1, 2, 3, 4, \dots, n$) とすると、 i 番目の時刻 t_i において、(10.1)式は、次のように書ける。

$$V dC = C_o Q_{ei} dt - C(t) Q_{ei} dt + M_i dt \quad (10.2)$$

(10.2)式を $C(t)$ について解けば、 Δt より小さい t (t_i からの経過時間) に対して次式を得る。

$$C(t) = C_o + (C_i - C_o) e^{-\frac{Q_{ei}}{V} t} + \frac{M_i}{Q_e} (1 - e^{-\frac{Q_{ei}}{V} t}) \quad (10.3)$$

$t = \Delta t$ のとき $C_{(t)} = C_{(\Delta t)} = C_{i+1}$ であるから、(10.3)式は次の様に書ける。

$$C_{i+1} = C_o + (C_i - C_o) e^{-\frac{Q_{ei}}{V} \Delta t} + \frac{M_i}{Q_{ei}} (1 - e^{-\frac{Q_{ei}}{V} \Delta t}) \quad (10.4)$$

(10.4)式は Δt 間隔の室平均濃度 C_i に関する漸化式であり、時間間隔 Δt ごとの

換気量と発生量の平均が与えられれば、室平均濃度が順次計算できることがわかる。

10.室内汚染物濃度の頻度分布を算出

(10.4)式を用いて、時間間隔 Δt の室内汚染物濃度を時系列上で順次計算することによって得た室内汚染物濃度の時間変化に統計処理を施すことによって、室内汚染物濃度の頻度分布、累積頻度分布を算出することができる。頻度分布からは最多頻度の濃度を、累積頻度分布からは各パーセンタイル値を読み取ることができる。この頻度分布或いは累積頻度分布を評価することによって、所要の換気性能が得られているかどうかを判定することができる。

以上の様な手順によって、自然風の時系列データから室内の汚染物濃度の頻度分布を導くことができる。かなり煩雑な手法であることは確かであり、コンピューターを用いた汎用プログラムとすることが今後の課題であると言えよう。

10.2.3 室内汚染物濃度の非定常計算例

10.2.3.1 計算方法

ここでは、10.2.2で示した手順に添って集合住宅の室内汚染物濃度の非定常計算を行ない、汚染物濃度の頻度分布、累積頻度分布を算出した例を示す。

計算対象としたのは図10.1に示すような辺の比が1:2:4の形状を持つ高さ40mの中層集合住宅内の6つの住戸である。設計条件としては、住戸の気密性、建物の方位を想定し、表10.1の様に気密性7条件、建物方位8条件、住戸位置6条件の合計336通りについて計算を行なう。建物の方位は図10.2のように表現している。計算の入力とする自然風データは、大阪大学工学部建設棟屋上(地上38m)で風向・風速を測定した1989年1年間のデータを用いる。表10.2に測定の概要を示す。風向風速の平均化時間は气象台では通常10分間であるが、より短い時定数の風速変動による室内濃度変化を再現できるよう、平均化時間は1分間とした。計算には1989年の一年間の風速・風向データを用いる(データの数:401760個)。風向は北を0とし、右回りを正とする角度で表現した。図10.3に計算に用いた自

然風の風配図を示す。

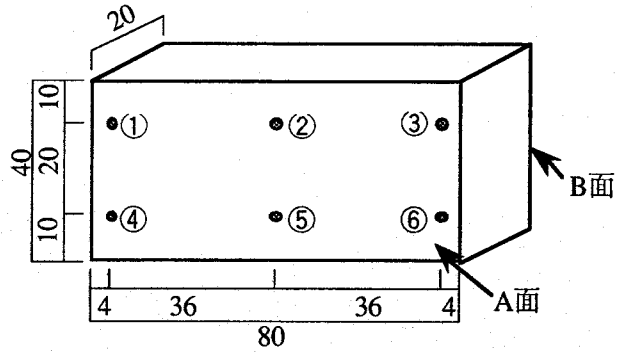


図10.1 建物の寸法と住戸位置 単位 [m]

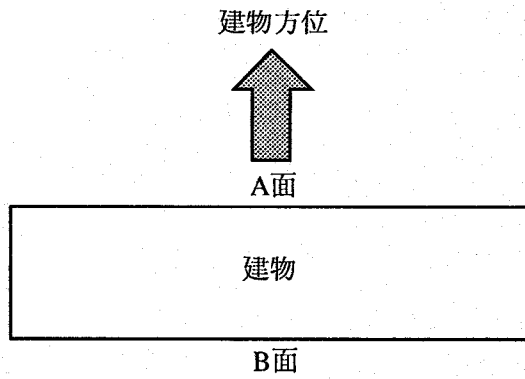


図10.2 建物方位の定義 (平面図)

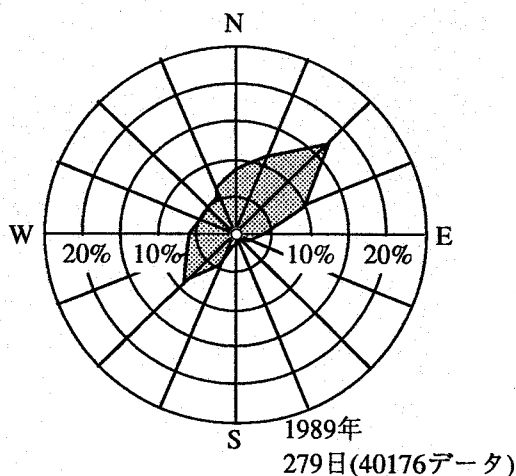
表10.1 計算において変化させたパラメータ

気密グレード	0	1	2	3	4	5	6
単位床面積当たりの有効開口面積 $\alpha A/A_f$ [cm ² /m ²]	0.7	1.3	2.2	4.1	7.1	12.5	22.4
建物方位	WSW, SW, SSW, S, SSE, SE, ESE, E						
住戸位置	①, ②, ③, ④, ⑤, ⑥						

(αA : 隙間の相当有効開口面積 A_f 床面積)

表10.2 自然風の風向・風速の測定概要

測定位置	大阪大学工学部建設棟屋上 (大阪府吹田市山田丘2-1) 地上38m
測定機器	微風向風速計 (小笠原計器PR-500TC)
記録システム	微風向風速計からの測定データをコンピュータで1分間平均値を算出しフロッピーディスクに記録。



風配図

図10.3 自然風データの風配図

表10.3に示す様に、住戸内には間仕切りがなく、一室からなるものとする。検討対象とする室内発生汚染物は4人の在室者の息に含まれる二酸化炭素とした。先にも述べたように設計対象としては気密性を考え、換気口などの大きな開口は考えない。このような計算を行えば、機械換気設備がなく窓を締め切っている状態において、風力換気によって最低限の換気量を得るためには、住戸の位置によってどの程度の気密性と建物方位が必要であるのかを知ることができる。住戸の隙間は建物のA面とB面の対向面に等量ずつ分布するものとした。

表10.3 住戸条件

床面積 [m ²]	75
天井高 [m]	2.4
室容積 [m ³]	180
在室者数 [人]	4

測定で得た自然風データを建物の軒高風速に換算し（1/5乗の指数則を適用）、風洞実験で得た風圧係数を用いて通気量の計算を行なう。図10.4は住戸のAB面の風圧係数の差がA面への入射角によってどのように変化するかを示したものである。風圧係数は軒高の速度圧を基準としている。自然風の風向が度で表現されているため16方位以外の風向での風圧係数は直線補間によって求めている。通気量の計算式を表10.4に示す。開口がすべて隙間であることから、一開口通気量は0とする。

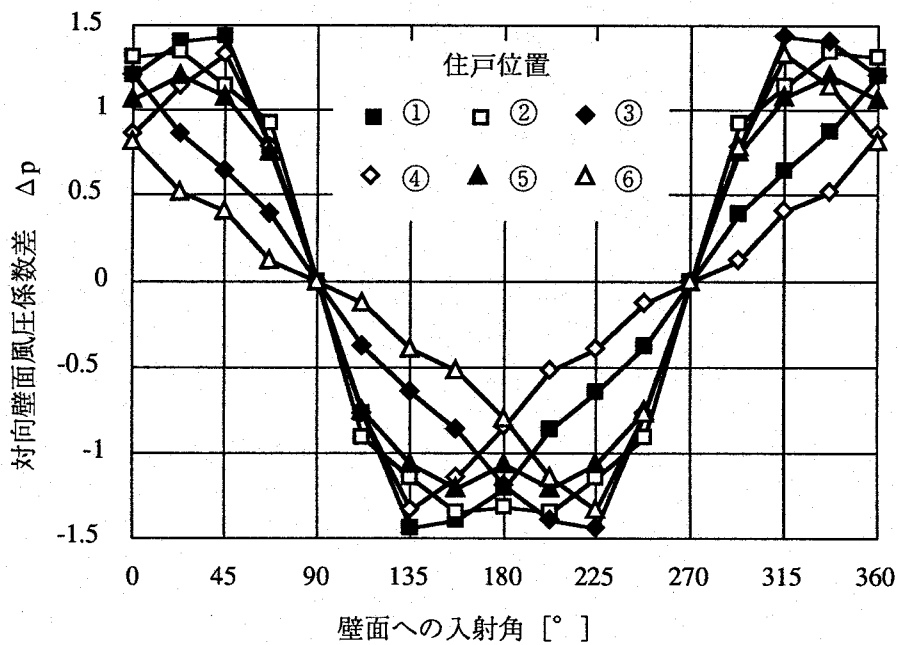


図10.4 各住戸位置における風向と対向壁面風圧係数差との関係

表10.4 通気量の計算式

計算式	$Q_e = \alpha AV / \Delta C$
Q_e	通気量 [m^3/s]
αA	有効開口面積 [m^2]
ΔC	風圧係数差
V	建物の軒高風速 [m/s]

換気効率 η は $\eta=0.4$ とする方が安全側ではあるが、ここでは $\eta=0.5$ とする。

一分おきの一分間平均の風向・風速データを入力として、換気量の離散データを算出し、(10.4)式によって CO_2 濃度の時間変化を順次算出する。1989年1月1日の最初の室内 CO_2 濃度は外気濃度に等しいとした。濃度計算における設定条件を表

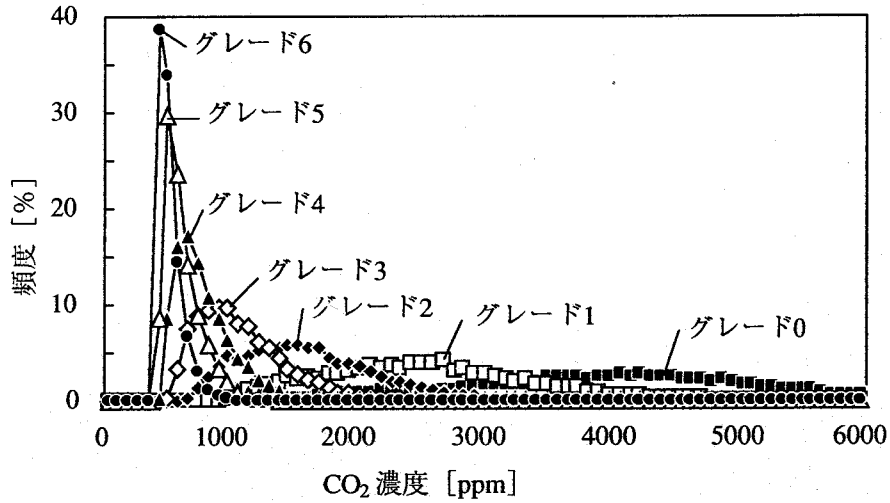
10.5にまとめる。逐次計算によって算出したCO₂濃度を統計処理することによって、頻度分布及び累積頻度分布を算出する。

表10.5 濃度計算における設定条件

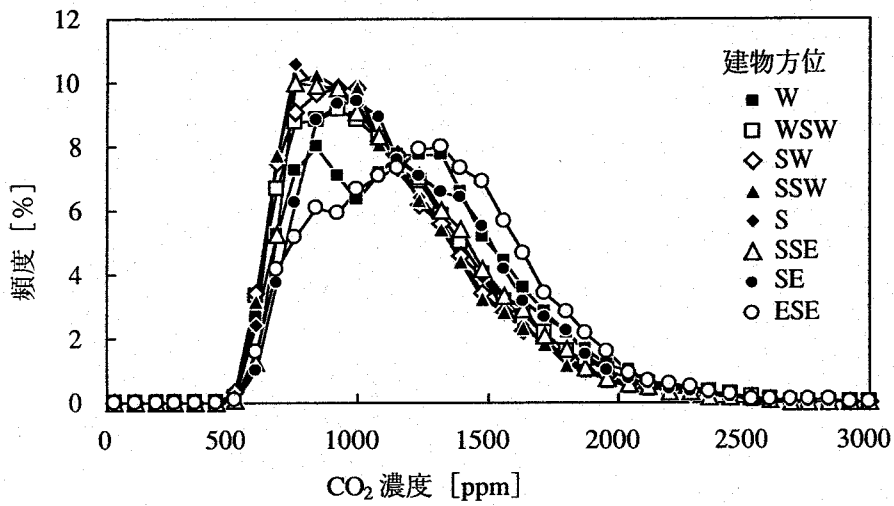
外気のCO ₂ 濃度 Co [ppm]	380
計算時間間隔 Δ t [h]	1/60 (1分)
室容積 V [m ³]	180
CO ₂ 発生量 [m ³ /h]	0.072 (在室者 4名)

10.2.3.2 計算結果

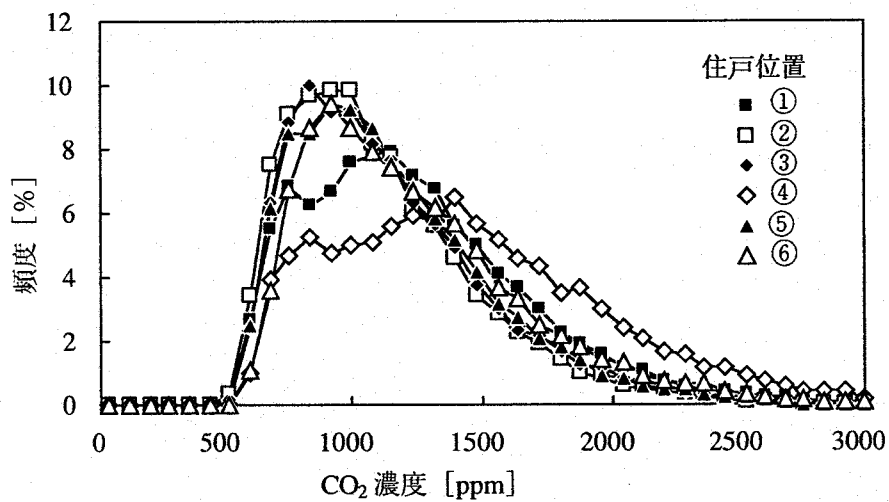
図10.5に室内のCO₂濃度の頻度分布を、図10.6に累積頻度分布を示す。いずれも、(a)は気密性（気密グレードで表現）による違い、(b)は建物方位による違い、(c)は住戸位置による違いを表している。示した図は計算した条件のうち一部にしか過ぎないが、気密性が換気性能に及ぼす影響が最も大きく、住戸位置や建物方位の影響は比較的小さいことなどが読み取れる。特に累積頻度からはパーセンタイル値を読むことができ、非常に有効な資料である。



(a)気密グレードの違い (住戸位置② 建物方位SW)

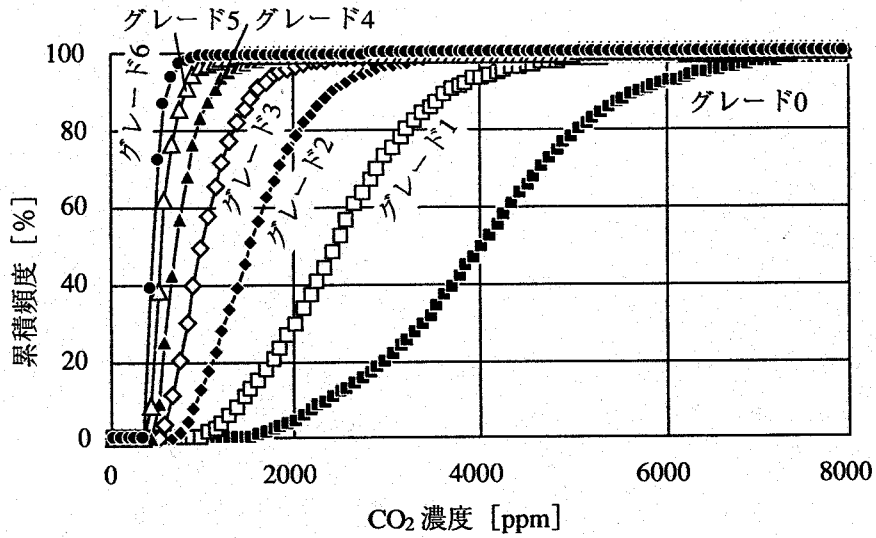


(b)建物方位の違い (気密グレード3、住戸位置②)

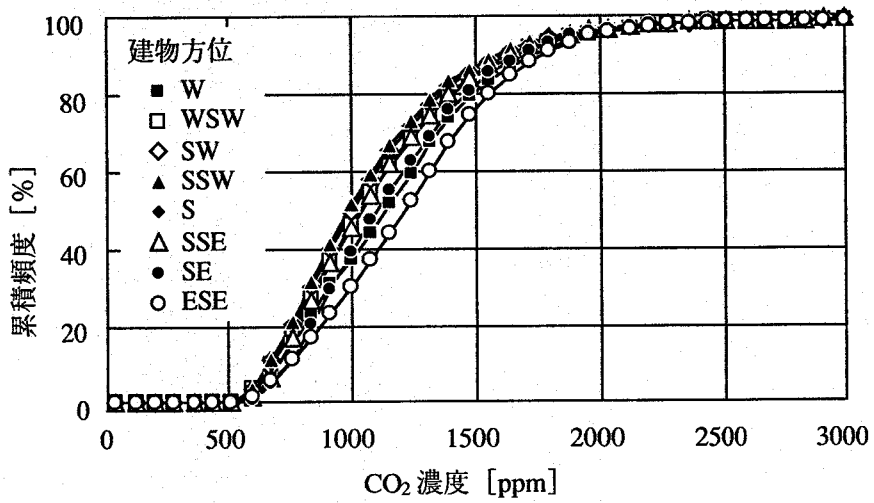


(c)住戸位置の違い (気密グレード3、建物方位SW)

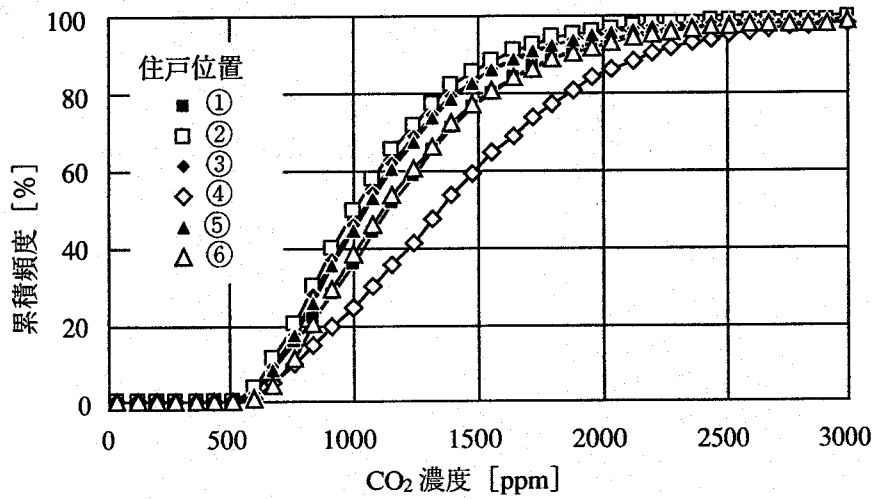
図10.5 室内CO₂濃度の頻度分布 (分級幅は80ppm)



(a)気密グレードによる違い (住戸位置②、建物方位SW)



(b)方位による違い (気密グレード3、住戸位置②)



(c)住戸位置による違い (気密グレード3、建物方位SW)

図10.6 室内CO₂濃度の累積頻度分布

10.2.4 まとめ

本節では、時系列の自然風データを用いて、室内汚染物濃度を時系列の非定常計算によって算出する方法の手順を示すとともに、中層の集合住宅を例に室内の汚染物濃度の頻度分布、累積頻度分布の算出を試み、本節で示した手法の有効性を確認した。

本節では1分おきの1分間平均の自然風データを用いたが、CO₂濃度の頻度分布は平均化時間の影響をうけると考えられるため、平均化時間が頻度分布にどのような影響を与えるものであるのかを検討することが今後残された課題であるといえることができる。

10.3 瞬時定常計算による室内汚染物濃度予測法

10.3.1 本節の概要

前節で、非定常計算による室内汚染物濃度の頻度分布計算法の手順を述べ、その試算例を示した。前述のように非定常計算は、自然風の時系列データを入力とするため、膨大な記憶容量を必要とする上に、計算時間も長時間となり、簡易な手法とは言いがたい。故に本節では、室内汚染物濃度が瞬時にそのときの換気量での定常濃度になるものと仮定することで、計算手法の大幅な簡略化ができることを示す。

10.3.2 瞬時定常計算法

室内の汚染物濃度は通常非定常で変化するものであり、瞬時に定常濃度には達しないのが普通である。しかしながら、換気量が室容積と汚染物発生量に対して十分大きい場合には、時系列計算の時間間隔 Δt 内にほぼ定常濃度に達するものといえる。

いま、室の換気量が Q_e 、外気濃度 C_o 、室容積 V 、汚染物の発生量が M であるとすると、換気量、発生量が一定であるときの定常濃度は次式で与えられる。

$$C_s = \frac{M}{Q_e} + C_o \quad (10.5)$$

上式より、室内の汚染物濃度が瞬時に定常に至ると仮定すれば、換気量と室内濃度は一対一の対応をすることになり、濃度計算が非常に簡略化される。また、そればかりでなく、自然風の風向・風速の頻度分布から、室内汚染物の頻度分布を算出することが可能になる。

自然風の風向が D 、風速が V 、このときの風圧係数差を ΔC とすると、このときの通気量はひとつ決まる。換気効率を決定し換気量を算出すれば、(10.5)式より室内の汚染物濃度を決定することができる。つまり、自然風の風向 D と風速 V の一つの組み合わせに対して室内の汚染物濃度 C が一つ対応することになる。室内汚染物濃度が $C_1 < C < C_2$ である確率は、 $C_1 < C < C_2$ となるすべての D と V の組み合わせの範囲について、確率密度を積分することで算出することができる。

このように、室内汚染物濃度の瞬時定常を仮定した計算では、室内汚染物濃度の時系列計算を経ることなく汚染物濃度の頻度分布を計算することができる。しかし、この手法によって濃度の頻度分布を算出するためには、検討を行なっておかなければならない以下の様な事項が残されている。

- 1.自然風データの平均化時間、汚染物の発生量、室容積及び換気量に応じて、算定される濃度の頻度分布の誤差はどの程度であることを明らかにすること。
- 2.自然風の風向・風速の同時出現頻度分布の資料の整備。

本節ではこれらの問題に関する検討を十分に行なうことはできないが、次項で2の自然風の風向・風速の頻度分布の整備を試みた例を紹介する。1の精度の問題に関しては、今後の検討課題としたい。

10.3.3 瞬時定常計算用自然風データの整備法

自然風の風向・風速の同時頻度分布の例（大阪府吹田市地上38mで観測、1989年7月）を図10.7に示す。横軸に16方位の風向、縦軸に風速を取り、10分間の平均風向と平均風速の頻度分布を0.5%刻みのコンターで表現したものである。風向と風速の同時の頻度分布を表現する整理はあまり試みられておらず、唯一風速の範囲別の風配図が用いられていただけである。風速範囲別風配図では風向と風速の組み合わせ条件下での正確な頻度を求めることができないため、瞬時定常計算による汚染物濃度の頻度分布計算には用いることができない。図10.7のような風向・風速の頻度分布を用いれば、縦軸を風向ごとの風圧係数差に換算したうえで換気量に換算し、横軸方向に積分することで、換気量の頻度分布を得ることができる。換気量と室内濃度を(10.5)式で対応させれば、室内汚染物濃度の頻度分布を算出することができる。故に、この様な自然風の風向・風速の同時頻度分布のデータの整備が今後必要であると言うことができる。

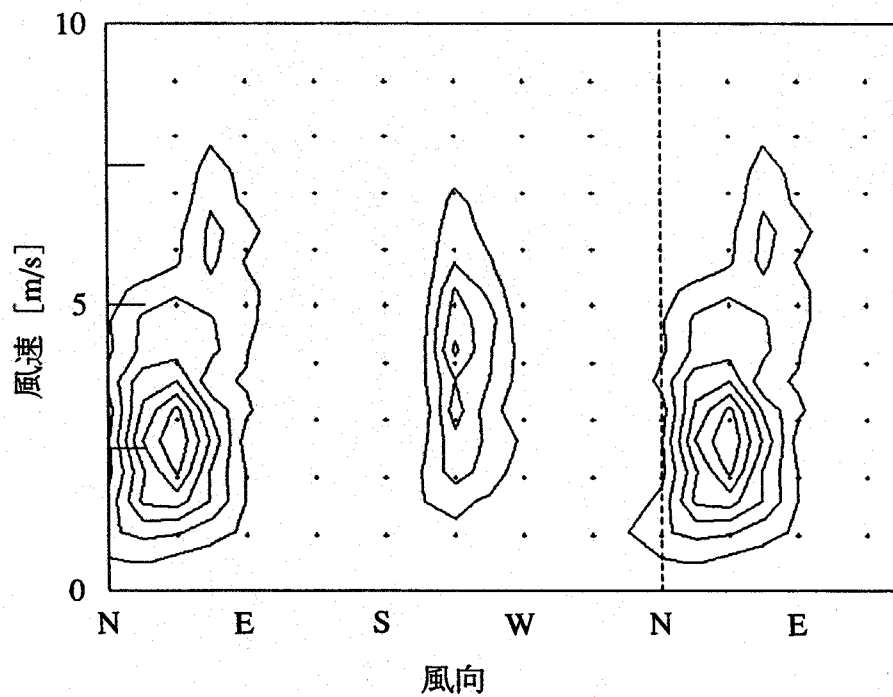


図10.7 風向・風速の同時頻度分布（1989年7月、10分間平均）
 （コンターは0.5%間隔、分級は風向16方位、風速2 m/s）

10.3.4 まとめ

本節では、自然風の風向・風速の同時頻度分布を利用した簡易な瞬時定常計算の概念と手法及びそれに用いる自然風の風向・風速の同時頻度分布の例を示した。

10.4 本章のまとめ

本章では、時系列の自然風データを用いて室内汚染物濃度を時系列の非定常計算によって算出する方法の手順を示すとともに、中層の集合住宅を例に室内の汚染物濃度の頻度分布、累積頻度分布の算出を試み、同手法の有効性を確認した。

また、自然風の風向・風速の同時頻度分布を利用した簡易な瞬時定常計算の概念と手法及びそれに用いる自然風の風向・風速の同時頻度分布の例を示した。

非定常計算法の汎用プログラムの開発、瞬時定常計算の精度検討と風向風速の頻度分布の整備などが残された課題であるといえよう。

総 括

本研究では、大小様々な自然風の乱れを考慮するとともに室内の汚染物濃度の統計値の評価に基づいた風力換気計画法の確立を目的として様々な検討を行なった。その結果得られた代表的な知見と研究の成果をまとめると以下の通りである。

- (1) 風力換気計画法の根幹をなす換気性能評価法の満たすべき要件について論じ、風力換気計画の手法と手順を明確にした。また、風力換気計画法において風の乱れをどう考慮すべきかを明らかにした上で、自然風の乱れを考慮した風力換気計画法が「自然風の乱れを考慮しながら汚染物の室内平均濃度の頻度分布を予測する手法」であることを示し、その計画法の枠組みを提示した。
- (2) 風力換気のマカニズムは、①時間平均の風圧によって引き起こされる定常通気、②単一開口を持つ室において風の乱れによって生じる単一開口通気（脈動と渦の侵入）、③開口間の風圧差の時間変動によって引き起こされる脈動通気の三つに分類できる。
- (3) 建物の開口壁面に完全に平行に風が吹かない限り、複数開口における脈動通気量が全通気量に占める割合は比較的小さい。また、風向が建物の開口壁面に完全に平行に吹く頻度の少なさを考慮すれば、風の乱れを考慮した換気計画法において複数開口の脈動通気を考慮する必要性は低い。
- (4) 風向が0度で開口中心に淀み点が位置する場合には、脈動理論計算によって開口部通気量を予測することが可能であるが、一般的には脈動理論に基づく単一開口の通気量計算は実用に供し得ない。
- (5) 混合層理論に基づいて混合層下端面の風速分布と濃度分布から通気量を求めることが可能であり、混合層理論の基本的考え方は妥当である。
- (6) 混合層理論に基づき、実際の建物の単一開口室に適用できる単一開口における通気量算定式を提示した。
- (7) 外壁の表面が平滑な建物の壁面近傍気流の壁面境界層外端の風速分布に関する資料を得ることができた。ただし、滑面近傍の風速分布に関しては現

状では一定として取り取り扱わざるを得ない。

- (8) 片廊下型の高層集合住宅のベランダに関しては、ベランダが風上側でベランダ前をほぼ水平に風が流れると予想される場合には、本節での資料をもとに壁面近傍風速を算出し、0.1~0.2を乗ずることでベランダ内壁面近傍風速を求めることができる。風下側ベランダなどのその他の条件の場合には、安全側として0.1を乗ずれば良い。
- (9) 建物の棟高の速度圧を基準とした壁面の風圧係数は建物スケールの影響を殆ど受けないことが明らかになり、正方形平面を持つ直方体建物の風圧係数の風向特性を関数化することができた。本研究で示した手法を用いれば、建物立面のアスペクト比2から4までの形状の建物の任意の位置、風向の風圧係数を算定することが可能である。
- (10) 風上側と風下側にそれぞれ開口を持つ室においても、風下側の開口が風上側に比べて十分小さいときには、風上側開口で単一開口通気と同じメカニズムによる通気が生じ、そのときの一開口通気量は、建物の軒高の速度圧で基準化した大開口無次元前後差圧或いは建物の軒高の風速で基準化した大開口無次元風速と開口面積、壁面風速から算出できることを示した。
- (11) ピストン流で1、完全混合で0.5となる換気効率 η は、単一開口で開口中心に淀み点が位置する特殊な場合を除いて、最低で0.4程度を考えれば風力換気計画を行なう上ではほぼ安全側であると言えることができる。
- (12) 時系列の自然風データを用いて室内汚染物濃度を時系列の非定常計算によって算出する方法の手順を示すとともに、中層の集合住宅を例に室内の汚染物濃度の頻度分布、累積頻度分布の算出を試み、同手法の有効性を確認した。
- (13) 自然風の風向・風速の同時頻度分布を利用した簡易な瞬時定常計算の概念と手法及びそれに用いる自然風の風向・風速の同時頻度分布の例を示した。

本研究により、風の乱れが通気量に与える影響を考慮しながら、自然風のデータを入力として室内の汚染物濃度の頻度分布を予測することが可能になり、より

望ましい風力換気計画が可能になったものと言える。

第2章でも述べたように、この風力換気計画法を用いれば、高気密住宅で目に見えない隙間によって生じる室内汚染物濃度の頻度分布を算出し、必要な機械換気の流量を算出することができる。また、常時開放の換気口の位置や面積を設定し、年間にわたって汚染物濃度の頻度分布が許容できるものであるかを判定することもできる。最低限必要な窓面積を求めるためには、全開の状態を想定して室内汚染物濃度の計算を行なうことも可能であろう。また、開口の大きさを決定した後、何時間に一回何分間開放すればよいかの様な開口の開放計画を求めることも可能である。本研究で確立した風力換気計画法の応用できる範囲は広く、空調する事務室や機械換気を行なう高気密住宅、学校やスポーツ施設などへ適用することで、省エネルギー的かつイニシャルコストも安く、地球環境時代に相応しい風力換気システムを構築することが可能であるものとする。

しかしながら、本研究で提示した単一開口の通気量算定式や大小二開口換気時の一開口算定方法、風圧係数の関数式、換気効率に関する知見などは主として模型箱を用いた実験に基づいて導かれたものであり、各々の式や知見の実際の建物の場合への適用性については今後の検討課題であると言える。同時に最終的に算出される室内汚染物濃度の頻度分布が、どの程度の精度をもっているのかについては実測などによる検証が不可欠である。

単一開口の通気量算定式においては、接地境界層下の建物の壁面気流の乱れの強さが概ね20%以上であるとして、乱れの強さに関わらず通気量が開口面積と混合層外端風速の積に比例するとしており、壁面気流の風の乱れを考慮したものとはなっていない。しかし、建物の立地条件や建物の表面粗度により壁面気流の乱れが本研究での実験範囲より大きい或いは小さい場合には、この通気量算定式の比例定数を変えなければならない可能性は否定できず、実際の建物の壁面近傍気流についての検討が今後必要であろう。

また、換気効率に関する幅広い条件下での検討、室内の汚染物濃度の算定のための汎用プログラムの開発、自然風データの整備、瞬時定常計算による室内汚染物濃度の頻度分布算出精度に関する検討などを進めることも、より良い風力換気計画のために必要な事項であるとする。

一方、第10章の濃度頻度分布の試算において、室内で発生する汚染物質として室内の在室者から発生するCO₂を想定したが、本研究では室内の汚染物濃度の頻度分布を予測する手法の開発に焦点をあてており、実際の風力換気計画において、室内で発生する汚染物質として何を想定し、どの程度の累積頻度がどの程度の濃度レベルであれば室内環境として許容できるかについては考察を行っていない。室内発生汚染物の発生量や人体への生理的、心理的影響に関しては、実測や疫学的調査、心理実験などの研究が必要であり、今後の大きな課題であると言えよう。

本研究は、換気原動力として風力だけを考えた換気計画法の確立を目的としたわけであるが、実際には室内外の温度差によって換気が生じることは周知であり、例えば暖房時に間欠的に開放する窓面積の設計などのためには、重力換気を考慮することが必要である。より現実に即したシミュレーションに基づいた換気計画のためには重力換気を含み込んだ換気計算法の開発が必要になるものと考えられる。

用語の説明

本研究で用いている用語の意味内容について説明する。

通気量

本研究で新しく用いた用語。開口部を単位時間に通過する空気の体積。

換気量

一般的には、通気量の意味で用いられることが多いが、本論文においては室に供給された新鮮外気のうち、実際に室の汚染物除去に貢献した空気の流量の意味に用いている。具体的には、トレーサーガス減衰法で求められる換気回数に室の容積を乗じたものとして数値的に定義している。

換気効率

ある通気量が与えられたときに、それによって室全体の汚染物を如何に速やかに室外に排出できるかを表す指標。本研究では、トレーサーガス減衰法によって得られる室平均濃度の減衰曲線の時間積分値と、同じ通気量が与えられた場合にピストンフロー（押し出し流れ）を仮定して得られる室平均濃度変化の時間積分値の比で定義している。

風力換気

自然換気の一つで、文字通り風が吹くことによって生じる換気のことを言う。

重力換気

自然換気の一つで、室内外の温度差による密度差が生む圧力差によって生じる換気のことを言う。そのメカニズムは煙突効果とも呼ばれている。

乱れの強さ

風の乱れを表現する一つの数値で、風速の時間変動を平均値と変動成分（平均

値からの偏差)に分け、変動成分の二乗平均の平方根を平均風速で除したものを乱れの強さと呼ぶ。通常はパーセントで表示する。

乱れのスケール

風の乱れの空間的大きさを表現するための数値で、概念的には乱れの中で卓越する渦の径と考えられる。求める手法によって、インテグラルスケール、スペクトルスケールの二種類の呼び名がある。インテグラルスケールは、自己相関関数の時間積分値から特徴時間を算出し平均風速を乗じたもので、スペクトルスケールはパワースペクトルの卓越周波数で平均風速を除いたものである。本研究では自己相関関数が $\tau=0$ から積分し、始めて τ が0になるまでの時刻まで積分し、特徴時間を求めている。

風圧係数

建物の壁面に風が当たり、同じ高さの静止外気圧よりも高い圧力が壁面にかかる時、壁面静圧と静止外気圧との差を自由風の速度圧で除したものを言う。ある風速の風が吹くとき、壁面に加わる圧力が自由風の速度圧に比してどれくらいかを示す数値である。

混合層

流れが流線に沿った境界面で静止空気と接するときその境界面に発達する乱れた混合領域のことを言う。混合層内部では空気と物質との混合が盛んに生じる。

本論文に関連する発表論文

- 1) 榑崎正也, 山中俊夫, 樋口祥明: 風の乱れを考慮した換気設計法に関する研究 第1報——風の乱れによる換気効果とそのメカニズム, 空気調和・衛生工学会論文集, No.39, 1989年2月, pp.25-34
- 2) 榑崎正也, 山中俊夫, 樋口祥明: 風の乱れを考慮した換気設計法に関する研究 第2報——換気要因に関する検討, 空気調和・衛生工学会論文集, No.40, 1989年6月, pp.19-29
- 3) 山中俊夫, 榑崎正也, 樋口祥明: 風の乱れを考慮した換気設計法に関する研究 第3報——単一開口換気の開口部通気量と換気効率, 空気調和・衛生工学会論文集, No.50, 1992年10月, pp.1-12
- 4) Masaya Narasaki, Toshio Yamanaka, Masaaki Higuchi: INFLUENCE OF TURBULENT WIND ON THE VENTILATION OF AN ENCLOSURE WITH A SINGLE OPENING, Environmental International, Vol.15, 1989, pp. 627-634
- 5) 山中俊夫, 榑崎正也: 建物壁面における風圧分布の変動特性に関する研究 —実物建物における風圧変動の実測, 平成元年度日本建築学会近畿支部研究報告集, 第29号・計画系, 1989年5月, pp.9-12
- 6) 榑崎正也, 山中俊夫, 樋口祥明, 高志学: 自然風の乱れによる換気効果 その6. 開口部周辺気流の可視化, 昭和59年度日本建築学会近畿支部研究報告集, 第24号・計画系, 1984年, pp.17-20
- 7) 榑崎正也, 山中俊夫, 樋口祥明, 高志学, 福井康樹: 自然風の乱れによる換気効果 (その11) 開口部通気量及び換気効率の検討, 昭和61年度日本建築学会近畿支部研究報告集, 第26号・計画系, 1986年, pp.193-196
- 8) 榑崎正也, 山中俊夫, 樋口祥明, 福井康樹: 自然風の乱れによる換気効果 (その13) 開口部通気量に関する検討, 昭和61年度日本建築学会大会学術講演梗概集, 1986年, pp.323-324
- 9) 榑崎正也, 山中俊夫, 樋口祥明, 福井康樹: 自然風の乱れによる換気効果 (その14) 換気効率に関する検討, 昭和61年度日本建築学会大会学術講演梗概集, 1986年, pp.325-326

- 10) 榑崎正也, 樋口祥明, 福井康樹, 山中俊夫, 沖本孝之: 自然風の乱れによる換気効果 (その15) 箱内換気性状及び風向の影響, 昭和62年度日本建築学会近畿支部研究報告集, 第27号・計画系, 1987年, pp.85-88
- 11) 榑崎正也, 山中俊夫, 樋口祥明, 福井康樹: 自然風の乱れによる換気効果 (その16) 風向の影響に関する検討, 昭和62年度日本建築学会大会学術講演梗概集, 1987年, pp.1077-1078
- 12) 山中俊夫, 榑崎正也, 樋口祥明, 福井康樹, 沖本孝之: 自然風の乱れによる換気効果 (その17) 脈動換気モデルによる開口部通気量の予測, 昭和62年度日本建築学会学術講演梗概集, 1987年, pp.1079-1080
- 13) 山中俊夫, 榑崎正也, 樋口祥明, 沖本孝之: 自然風の乱れによる換気効果 (その18) 壁面風圧変動特性に関する検討, 昭和63年度日本建築学会近畿支部研究報告集, 第28号・計画系, 1988年5月, pp. 165-168
- 14) 大黒賢宏, 山中俊夫, 榑崎正也, 樋口祥明: 自然風の乱れによる換気効果 (その19) 上空風速と開口近傍風速との関係, 1989年度日本建築学会大会学術講演梗概集D, 1989年10月, pp. 625-626
- 15) 山中俊夫, 榑崎正也, 樋口祥明, 大黒賢宏: 自然風の乱れによる換気効果 (その20) 開口部近傍風速と通気量との関係, 1989年度日本建築学会大会学術講演梗概集D, 1989年10月, pp. 627-628
- 16) 山中俊夫, 榑崎正也, 大黒賢宏: 自然風の乱れによる換気効果 (その21) 開口部近傍風速を媒介変数とした通気量予測式の検討, 平成2年度日本建築学会近畿支部研究報告集, 第30号・計画系, 1990年5月, pp. 169-172
- 17) 山中俊夫, 榑崎正也, 大黒賢宏: 自然風の乱れによる換気効果 (その22) 開口部近傍風速を用いた通気量予測式の検討, 1990年度日本建築学会大会学術講演梗概集D, 1990年10月, pp. 553-554
- 18) 山中俊夫, 榑崎正也, 大黒賢宏, 岩本清孝: 自然風の乱れによる換気効果 (その23) 単一開口室における通気量算定法, 平成3年度日本建築学会近畿支部研究報告集, 第31号・計画系, 1991年5月, pp. 137-140
- 19) 岩本清孝, 榑崎正也, 山中俊夫, 大黒賢宏: 自然風の乱れによる換気効果 (その24) 単一開口室における通気量算定法, 1991年度日本建築学会大会学術

講演梗概集D, 1991年9月, pp. 583-584

- 20) 岩本清孝, 榑崎正也, 山中俊夫: 自然風の乱れによる換気効果 (その25)
単一開口室における通気量算定法, 平成4年度日本建築学会近畿支部研究報告集, 第32号・計画系, 1992年5月, pp. 85-88
- 21) 岩本清孝, 榑崎正也, 山中俊夫: 自然風の乱れによる換気効果 (その26)
単一開口室における通気量算定法, 1992年度日本建築学会大会学術講演梗概集D, 1992年8月, pp. 591-592
- 22) 山中俊夫, 榑崎正也, 岩本清孝: 自然風の乱れによる換気効果 (その27)
建物壁面近傍風速の分布, 1992年度日本建築学会大会学術講演梗概集D, 1992年8月, pp. 593-594
- 23) 岩本清孝, 榑崎正也, 山中俊夫: 自然風の乱れによる換気効果 (その28)
単一開口における混合層内風速分布に関する検討, 平成5年度日本建築学会近畿支部研究報告集, 第33号・計画系, 1993年, pp.145-148
- 24) 山中俊夫, 榑崎正也, 岩本清孝: 自然風の乱れによる換気効果 (その29)
大小二つの開口を持つ室の通気量算定法, 平成5年度日本建築学会近畿支部研究報告集, 第33号・計画系, 1993年, pp.149-152
- 25) 岩本清孝, 榑崎正也, 山中俊夫: 自然風の乱れによる換気効果 (その30)
混合層理論に基づく単一開口通気量の算定, 1993年度日本建築学会大会学術講演梗概集D, 1993年9月, pp.817-818
- 26) 山中俊夫, 榑崎正也, 岩本清孝: 自然風の乱れによる換気効果 (その31)
大小二つの開口を持つ室の風の乱れによる換気効果, 1993年度日本建築学会大会学術講演梗概集D, 1993年9月, pp.819-820
- 27) Toshio Yamanaka, Masaya Narasaki, Takahiro Daikoku: VENTILATION RATE OF AN ENCLOSURE WITH A SINGLE OPENING EXPOSED TO NATURAL WIND, Precedings of the 5th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Volume 4, July 1990, pp. 479-484
- 28) 榑崎正也, 山中俊夫, 樋口祥明, 福井康樹: 風の乱れによる換気に関する研究 (その3) 箱内混合性状及び通気量測定, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, 1987年, pp.63-66

- 29) 岩本清孝, 榑崎正也, 山中俊夫, 大川慶: 単一開口を持つ室の風力換気に関する研究 - 壁面近傍風速を媒介変数とする通気量算定, 空気調和・衛生工学会近畿支部研究発表論文集, 1992年, pp.155-158
- 30) 大黒賢宏, 榑崎正也, 山中俊夫, 甲谷寿史: 建築物壁面における風圧係数の机上予測法に関する研究, 平成2年度日本建築学会近畿支部研究報告集, 第30号・計画系, 平成2年5月, pp.173-176
- 31) 甲谷寿史, 山中俊夫, 榑崎正也, 大黒賢宏: 建築物壁面における風圧係数の机上予測法に関する研究 (その2 二次方程式による風向特性の関数化), 1990年度日本建築学会大会学術講演梗概集D, 1990年10月, pp.535-536
- 32) 大黒賢宏, 山中俊夫, 榑崎正也, 甲谷寿史: 建築物壁面における風圧係数の机上予測法に関する研究 (その3 高次方程式を用いた風向特性の関数化), 1990年度日本建築学会大会学術講演梗概集, 1990年10月, pp.537-538
- 33) 大黒賢宏, 榑崎正也, 山中俊夫, 甲谷寿史: 建築物壁面における風圧係数の机上予測法に関する研究 (その4 回転した3次関数による風圧係数の風向特性曲線の近似), 平成3年度日本建築学会近畿支部研究報告集, 第31号・計画系, 平成3年5月, pp.145-148
- 34) 山中俊夫, 榑崎正也, 大黒賢宏, 甲谷寿史: 建築物壁面における風圧係数の机上予測法に関する研究 (その5) 正方形平面建築物の風圧係数の風向特性曲線の関数化, 1991年度日本建築学会大会学術講演梗概集, 1991年9月, pp.561-562
- 35) 山中俊夫, 榑崎正也, 大黒賢宏, 甲谷寿史: 建築物壁面における風圧係数の机上予測法に関する研究 (その6) 建物の大きさが風圧係数に与える影響, 平成4年度日本建築学会近畿支部研究報告集, 第32号・計画系, 平成4年6月, pp.81-84
- 36) 山中俊夫, 榑崎正也, 大黒賢宏, 甲谷寿史, 石原匡: 高層・超高層建築物の壁面風圧係数の予測法に関する研究 (その2) 風圧係数の風向特性の関数化, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, 1991年3月, pp.123-126
- 37) 山中俊夫, 榑崎正也, 大黒賢宏, 甲谷寿史, 石原匡: 高層・超高層建築物の

- 壁面風圧係数の予測法に関する研究（その3）建物のスケールが風圧係数分布に及ぼす影響，空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集，1992年3月，pp.147-150
- 38) 榑崎正也，山中俊夫，樋口祥明，沖本孝之，大黒賢宏：自然風データに基づく換気設計法に関する研究（その1）単一開口換気の通気量算定法に関する検討，空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集，1989年3月，pp.19-22
- 39) 田辺 新，榑崎正也，山中俊夫，大黒賢宏：自然風の統計値に基づく自然換気設計法に関する研究，1990年度日本建築学会大会学術講演梗概集D，1990年10月，pp. 555-556
- 40) 田辺 新，榑崎正也，山中俊夫，大黒賢宏：自然風の統計値に基づく換気設計法に関する研究 その2 自然風の統計処理及び表現法に関する検討，平成3年度日本建築学会近畿支部研究報告集，第31号・計画系，1991年5月，pp. 141-144
- 41) 田辺 新，榑崎正也，山中俊夫，大黒賢宏：自然風の統計値に基づく換気設計法に関する研究 その3 瞬時定常計算を利用した統計的予測法，1991年度日本建築学会大会学術講演梗概集D，1991年9月，pp. 559-560
- 42) 佐藤克峰，榑崎正也，山中俊夫，安田順司：集合住宅の風力換気設計に関する研究 一気密性、建物方位、住戸位置が換気量及び室内汚染物濃度に及ぼす影響，平成5年度日本建築学会近畿支部研究報告集，第33号・計画系，1993年，pp.137-140
- 43) 佐藤克峰，榑崎正也，山中俊夫，安田順司：集合住宅の風力換気設計に関する研究 （その3）気密性、建物方位、住戸位置が室内汚染物濃度に及ぼす影響，1993年度日本建築学会大会学術講演梗概集D，1993年，pp.825-826
- 44) 佐藤克峰，榑崎正也，山中俊夫：自然風データに基づく集合住宅の換気設計に関する研究 気密性、建物方位、住戸位置が室内汚染物濃度に及ぼす影響，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，1993年，pp.129-132
- 45) 山中俊夫，榑崎正也：風力によって換気される2開口を持つ室の換気効率に関する研究，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，1993年，

pp.109-112

- 46) 榑崎正也, 山中俊夫: 市街地に建つ超高層集合住宅のベランダ内風環境の予測: 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, 1989年3月, pp.15-18

謝 辞

本論文は、私が大阪大学大学院博士前期課程に在学中、修士論文のテーマとして大阪大学教授榎崎正也先生が私に与えて下さった研究を発展させ、まとめたものです。榎崎先生には、学生の際は勿論のこと私が助手として就任後も、本研究を進めるにあたって終始高い御見識でご指導、御鞭撻を賜りました。ここに心より厚く感謝の意を表します。

大阪大学教授山口克人先生、大阪大学教授柏原士郎先生には、本論文の審査の労をお取りくださり、有益かつ丁寧なご指導を賜りました。心より御礼申し上げます。

また、大阪大学助教授佐藤隆二先生には、私が大阪大学在学中より、研究の進め方、工学的考え方などについて懇切なご教示、ご指導を賜りました。本研究を進めるうえでも、終始御鞭撻を賜るとともに、有益な御助言と御支援を下さいました。ここに深く感謝の意を表します。

本研究を進めるにあたり、大手前女子大学助教授大野治代先生には、先生が大阪大学に御在職中より、常に温かい御支援を頂きました。厚く感謝申し上げます。

また、共同研究者として御助力を頂くとともに、私が本論文を執筆中には種々多様な公務への御協力を頂いた大阪大学助手甲谷寿史氏に深謝申し上げます。

本研究で実験を行なう際に、快く御相談に応じて頂いた大阪大学技官山本勲氏に感謝申し上げます。また、本研究で風洞実験を効率良く行なうことができたのは、常に適切な御指導と御協力を頂いた大阪大学教務員五十嵐一孝氏のおかげであり、ここに感謝申し上げます。

さらに、大学院の頃より共同研究者として実験やデータ整理、論文執筆などに長年にわたって多大な御助力を頂いた樋口祥明氏（現 竹中工務店技術研究所）、修士論文或いは卒業論文などとして本研究に携わり、実験装置の製作、実験データの収集、解析などに惜しみない御協力を下さった高志学、高志実千代、福井康樹、沖本孝之、土岐裕、南川俊哉、坂井理、大黒賢宏、小野田尚、田辺新、石原匡、岩本清孝、大川慶、佐藤克峰、安田順司、山口善久、木戸一成の諸氏に心より感謝申し上げます。

最後に、本研究を進めるにあたって御助力を頂きました関係各位、大阪大学の卒業生の方々に深謝致します。