



Title	都市大気環境保全のための数値予測モデルの開発とその応用に関する研究
Author(s)	近藤, 明
Citation	大阪大学, 1999, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3155726
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

都市大気環境保全のための
数値予測モデルの開発とその応用
に関する研究

1999年 3月

近 藤 明

都市大気環境保全のための
数値予測モデルの開発とその応用
に関する研究

1999年 3月

近 藤 明

目次

1	緒言	9
1.1	研究背景	9
1.1.1	都市大気環境の変化	9
1)	大気汚染	10
2)	気温・湿度	11
3)	降雨	12
1.1.2	地球温暖化と環境調和型都市	14
1.1.3	都市大気環境保全と数値モデル	14
1.2	既往研究	15
1.2.1	都市大気環境予測モデル	15
1)	海陸風を含む境界層モデル	15
2)	熱収支モデル	16
3)	都市キャノピモデル	16
4)	大気汚染濃度予測モデル	17
1.2.2	OASIS モデル	18
1.3	研究目的と構成	18
	参考文献	21
2	都市大気環境予測モデル	27
2.1	緒言	27
2.2	都市境界層予測モデル	28
2.2.1	基礎方程式	28
2.2.2	乱流モデル	30
2.2.3	接地境界層モデル	33
2.2.4	地表面熱収支モデル	35
2.3	都市キャノピモデル	43
2.3.1	都市キャノピ形状のモデル化	43
2.3.2	キャノピ内での熱収支モデル	43
2.3.3	キャノピ内の正味放射量の算定方法	44
1)	正味短波放射量の算定方法	44
2)	正味長波放射量の算定方法	46
2.3.4	都市キャノピを含む大気境界層の基礎方程式	46
2.4	ネスティング法	49
2.5	4次元データ同化法	50
2.6	大気濃度予測モデル	51
2.6.1	拡散方程式	51
2.6.2	沈着モデル	51
2.6.3	光化学反応モデル	54
2.7	結言	61

参考文献	62
3 韓国釜山新島建設による周辺気候への影響	66
3.1 緒言	66
3.2 計算条件	66
3.2.1 計算領域	66
3.2.2 広領域の計算条件	66
1) 初期条件	66
2) 境界条件	68
3) 土地利用パラメータ	68
3.2.3 ネスティング領域の計算条件	69
1) 初期条件	69
2) 境界条件	69
3) 土地利用パラメータ	69
3.3 広領域の計算結果	69
3.3.1 計算結果	69
3.3.2 計算値と観測値の比較	70
3.4 ネスティング領域の計算結果	70
3.4.1 計算結果	70
3.4.2 人工島による気候変化	74
3.4.3 丘陵地域の造成の影響	74
3.5 結言	74
参考文献	81
4 都市キャノピモデルの感度解析	82
4.1 緒言	82
4.2 都市キャノピ内の放射量の感度解析	83
4.2.1 短波放射の計算結果	83
1) 計算精度の検討	83
2) 都市形状の影響	83
3) 反射率の影響	86
4.2.2 被覆率による SVF の変化	88
4.3 1次元モデルを用いた都市キャノピ内の温度・流れの感度解析	88
4.3.1 計算条件	90
4.3.2 被覆率の影響	91
4.3.3 キャノピ高さの影響	91
4.4 都市キャノピ層を考慮した3次元大気境界層モデルの大阪市への応用	98
4.4.1 計算領域	98
4.4.2 広領域の計算条件	99
1) 初期条件	99
2) 境界条件	100
3) 土地利用パラメータ	100
4) FDDA のための観測データ	100
4.4.3 Nesting 領域の計算条件	101
1) 初期条件	101

2) 境界条件	101
3) 土地利用パラメータ	101
4) 都市キャノピ形状の推定	101
5) 人工排熱量の推定	105
4.4.4 広領域の計算結果	106
1) FDDA を用いた計算結果	106
2) FDDA の有効性	106
4.4.5 Nesting 領域の計算結果	111
4.5 結言	118
参考文献	119
5 大阪湾岸の大気汚染濃度予測	121
5.1 緒言	121
5.2 大気汚染物質濃度予測モデル	121
5.2.1 反復風上差分法	122
5.3 計算条件	123
5.3.1 計算領域	123
5.3.2 計算日時	124
5.3.3 流れ場計算の初期条件と境界条件	124
1) 初期条件	124
2) 境界条件	124
5.3.4 濃度計算の初期値および境界条件	124
1) 初期条件	124
2) 境界条件	124
5.3.5 光解離定数	125
5.3.6 計算手順	125
5.4 排出量の算定	126
5.4.1 硫黄酸化物・窒素酸化物排出量の算定	126
5.4.2 炭化水素排出量の算定	129
5.4.3 有効煙突高の算出	138
5.4.4 排出量の日変動パターン	138
5.5 観測データとの比較	139
5.5.1 流れ場の計算結果	139
5.5.2 流れ場の計算値と観測値との比較	139
5.5.3 大気汚染濃度の計算値と観測値との比較	139
5.6 船舶からの排出影響	143
5.7 結言	157
参考文献	158
6 結論	159
6.1 各章のまとめ	159
6.2 今後の課題	160
記号表	162

表 目 次

1.1	都市化による大気環境変化	9
1.2	都市化による温暖化要因	12
2.1	モデルの分類	28
2.2	キャノピ構造のパラメータ定義式	48
2.3	各物質におけるシュミット数	54
2.4	各物質の対象面における表面抵抗値 [s/m]	54
2.5	CBM-IV における反応物質	56
2.6	CBM-IV における反応式	57
2.6	CBM-IV における反応式 (続き)	58
2.6	CBM-IV における反応式 (続き)	59
2.6	CBM-IV における反応式 (続き)	60
3.1	広領域の土地利用パラメータ	68
4.1	都市キャノピ形状のパラメータ値	84
4.2	計算の緯度経度	86
4.3	反射率のパラメータ値	86
4.4	SVF の計算値と理論式の比較	88
4.5	1 次元モデルで用いるパラメータ値	91
4.6	建物壁面と地表面の熱特性	91
4.7	メッシュサイズ	99
4.8	広領域の土地利用分類	99
4.9	広領域の土地利用パラメータ	100
4.10	広領域の観測所と観測項目	102
4.11	ネスティング領域の土地利用分類	105
4.12	ネスティング領域の土地利用パラメータ	105
4.13	地域別排熱原単位	106
4.14	家庭部門の消費比率と効率	111
4.15	システムの顕熱・潜熱排出比率	111
4.16	大阪市のシミュレーションスケジュール	111
5.1	各化学物質の初期濃度 [ppm]	125
5.2	天頂角と K_1 の関係	126
5.3	SO _x の発生源別の排出量	129
5.4	NO _x の発生源別の排出量	129
5.5	炭化水素排出量原単位	133
5.6	HC の発生源別の排出量	134
5.7	炭化水素排出量の一般化学種への配分表 (重量比)	136
5.8	一般化学種のモデル (CBM-IV) 用化学種への配分表	137
5.9	船舶の排出高さ	138

目 次

1.1	SO ₂ 濃度の経年変化	10
1.2	NO ₂ 濃度の経年変化	10
1.3	SPM 濃度の経年変化	10
1.4	CO 濃度の経年変化	10
1.5	光化学オキダント注意報発令数の経年変化	10
1.6	大阪市の8月の最高気温の経年変化	11
1.7	大阪市の8月の最低気温の経年変化	11
1.8	大阪市の8月の日平均気温の経年変化	11
1.9	大阪市の8月の相対湿度の経年変化	11
1.10	大阪市の8月の降雨量の経年変化	12
1.11	大阪市の8月の1mm以下の降雨日数の経年変化	13
1.12	大阪市の8月の31mm以上の降雨日数の経年変化	13
1.13	OASIS 概要	19
1.14	本研究の構成	20
2.1	大気境界層の概念図 文献 2-1) より引用転載	27
2.2	z座標系から z*座標系への変換	29
2.3	熱収支モデルの概念図	36
2.4	都市キャノピ構造のモデル化 (a) とブロック (b)	43
2.5	ブロック単位的光子追跡プロセスの概略図	45
2.6	CMG と FMG の格子点の関係	50
2.7	ガスの輸送モデル	52
3.1	広領域	67
3.2	ネスティング領域	67
3.3	広領域の土地利用区分	68
3.4	ネスティング領域の土地利用区分	69
3.5	新島建設後のネスティング領域の土地利用区分	70
3.6	広領域の4時間毎の高さ50mでの風速および温位分布	71
3.7	釜山気象台での観測値と計算値の比較:速度 u は x 方向の速度成分を, 速度 v は y 方向の速度成分を表す.	72
3.8	釜山空港での観測値と計算値の比較:速度 u は x 方向の速度成分を, 速度 v は y 方向の速度成分を表す.	73
3.9	新島建設前の4時間毎の高さ50mでの風速および温位分布	75
3.10	新島建設前後の温度変化	76
3.11	新島建設前後の風速変化	77
3.12	新島建設前後の温度変化 (丘陵地は削らない)	78
3.13	新島建設前後の風速変化 (丘陵地は削らない)	79
4.1	光子数の違いによるフラックス比の計算結果: a _b は式 (2.126) を参照	83
4.2	アルベドの実験値と計算値の比較 (観測値は Aida ⁴⁻⁴⁾ より引用)	84
4.3	被覆率を変化させたときのフラックス比の鉛直分布	85

4.4	キャノピ高さを変化させたときのフラックス比の鉛直分布	85
4.5	建物の形を変化させたときのフラックス比の鉛直分布	87
4.6	建物方向を変化させたときのフラックス比の鉛直分布	87
4.7	建物と地表面の反射率を変化させたときのフラックス比の鉛直分布	89
4.8	鏡面反射率の割合を変化させたときのフラックス比の鉛直分布	89
4.9	地表面の反射率を変化させたときのフラックス比の鉛直分布	90
4.10	被覆率を変化させたときのSVFの鉛直分布	90
4.11	計算上面での温位の境界条件	92
4.12	被覆率を変化させたときの風速の鉛直分布	93
4.13	被覆率を変化させたときの温位の鉛直分布	94
4.14	被覆率を変化させたときの地表面の短波フラックスの時系列変化	95
4.15	被覆率を変化させたときの地表面の長波フラックスの時系列変化	95
4.16	キャノピ高さを変化させたときの風速の鉛直分布	96
4.17	キャノピ高さを変化させたときの温位の鉛直分布	97
4.18	計算対象広領域とネスティング領域	98
4.19	8月の典型的な海陸風日の風速	103
4.20	建物被覆率の分布 [-]	104
4.21	建物平均高さの分布 [m]	104
4.22	人工排熱の分布 [$\text{J}/\text{m}^2\text{s}$]	107
4.23	人工排熱の経時変化	107
4.24	FDDAを用いた広領域の風系	108
4.25	FDDAを用いない広領域の風系	109
4.26	5地点の速度 u, v および温度の観測値と計算値の時系列変化	110
4.27	ネスティング領域の風系	112
4.27	ネスティング領域の風系 (続き)	113
4.28	ネスティング領域の温度分布	114
4.28	ネスティング領域の温度分布 (続き)	115
4.29	地点Aの高さ6m, 15m, 30mでの風速 u, v および温度の時系列変化	116
4.30	地点Bの高さ6m, 15m, 30mでの風速 u, v および温度の時系列変化	117
4.31	地点Cの高さ6m, 15m, 30mでの風速 u, v および温度の時系列変化	117
5.1	計算領域	123
5.2	工場・事業所の排出量算出手順	126
5.3	自動車の排出量算出手順	127
5.4	船舶の排出量算出手順	127
5.5	群小発生源の排出量算出手順	128
5.6	航空機の排出量算出手順	128
5.7	SO_x の排出量マップ	130
5.8	NO_x の排出量マップ	130
5.9	HCの人工排出量マップ	135
5.10	HCの自然排出量マップ	135
5.11	排出量の日変動パターン	138
5.12	流れ場の計算結果	140
5.12	流れ場の計算結果 (続き)	141
5.13	観測値と計算で求めた風速ベクトルの時系列変化	142
5.14	観測値と計算で求めた NO_2 濃度の時系列変化	144

5.15 観測値と計算で求めた NO 濃度の時系列変化	145
5.16 観測値と計算で求めた O ₃ 濃度の時系列変化	146
5.17 観測値と計算で求めた SO ₂ 濃度の時系列変化	147
5.18 15 時の O ₃ 濃度の空間分布	148
5.19 NO ₂ 濃度の空間分布	149
5.20 NO 濃度の空間分布	150
5.21 O ₃ 濃度の空間分布	151
5.22 SO ₂ 濃度の空間分布	152
5.23 船舶排出の NO ₂ 濃度への寄与	153
5.24 船舶排出の NO 濃度への寄与	154
5.25 船舶排出の O ₃ 濃度への寄与	155
5.26 船舶排出の SO ₂ 濃度への寄与	156

第1章 緒言

1.1 研究背景

1.1.1 都市大気環境の変化

工業化と共に都市への人口集中は加速され、現在、世界の人口の約47%が都市人口である。日本でも都市人口は過去20年間に約15%増加し、全人口の70%を占めている¹⁻¹⁾。このように都市化が進行することにより、都市の利便性は増す増す良くなり、さらに都市への人口集中を招くという循環に陥っている。過度の人口を抱えた都市では、人間によって排出される様々な廃棄物をもはや自然の浄化能力では対応できず、多くの環境問題が生じている。水空間への廃棄物の排出は水質悪化や地下水汚染を、大気空間への廃棄物の排出は大気汚染を引き起こしている。エネルギーの廃棄は、温排水やヒートアイランド現象を生じさせている。当然ながらゴミとして排出される廃棄物も、燃焼処理過程で生じるダイオキシンに代表されるように2次汚染の影響が深刻になりつつある。

大気空間について、都市化によって生じると考えられる環境変化を表1.1にまとめる¹⁻²⁾。以下、このような大気環境変化が実際に起こっているかについて観測データを基に解析してみる。

表 1.1 都市化による大気環境変化

大気汚染	凝結核	10 倍以上の増加
	汚染濃度	5 から 15 倍以上の増加
太陽放射		15 から 20%の減少
	紫外線	30%の減少(冬)、5%の減少(夏)
温度	年平均	0.5 から 1.5 °C上昇
	晴天時	2 から 6 °C上昇
風速	年平均	10 から 20%の減少
	無風時	5 から 10%の増加
相対湿度		2%の減少(冬)、8 から 10%減少(夏)
雲	雲量	5 から 10%増加
	霧	100%増加(冬)、30%増加(夏)
降雨	降雨量	5 から 10%増加
	小雨	10%の増加

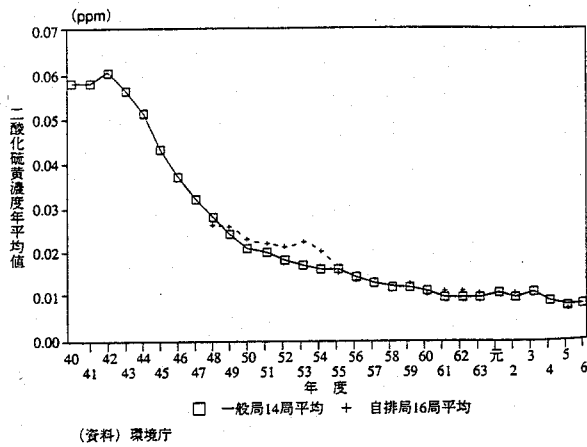


図 1.1 SO₂濃度の経年変化 文献¹⁻³⁾より引用転載
環境基準:1 日平均値 0.04ppm 以下, 1 時間
値 0.1ppm 以下

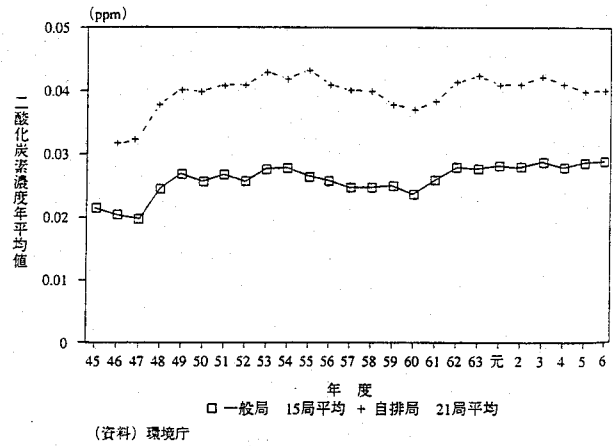


図 1.2 NO₂濃度の経年変化 文献¹⁻³⁾より引用転載
環境基準:1 日平均値 0.04ppm~0.06ppm
以下

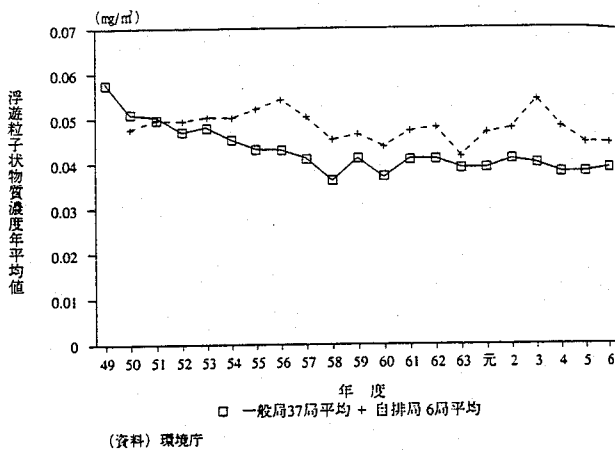


図 1.3 SPM 濃度の経年変化 文献¹⁻³⁾より引用転載
環境基準:1 日平均値 10mg/m³以下, 1 時間
値 20mg/m³以下

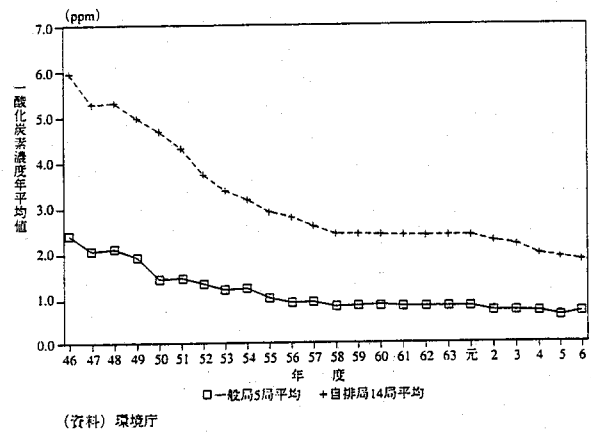


図 1.4 CO 濃度の経年変化 文献¹⁻³⁾より引用転載
環境基準:1 日平均値 10ppm 以下, 8 時間値
20ppm 以下

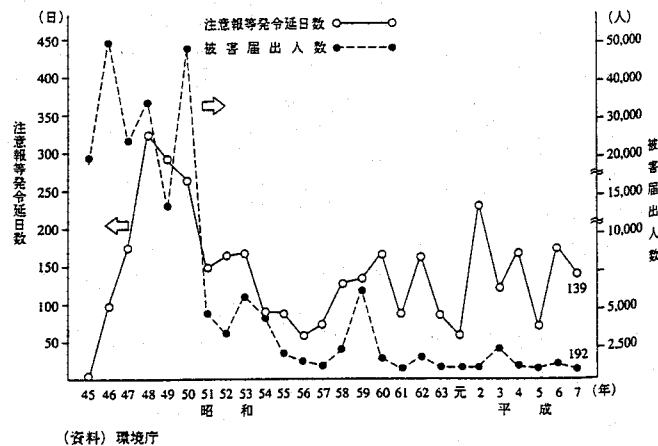


図 1.5 光化学オキダント注意報発令数の経年変化 文献¹⁻³⁾より引用転載
環境基準:1 時間値 0.06ppm 以下

1) 大気汚染

図 1.1~1.5に SO₂, NO₂, SPM, CO 濃度の経年変化および光化学オキダント注意報発令数の経年変化を示す¹⁻³⁾。これらの大気汚染物質は, 大気環境基準が定められている物質である。SO₂, CO 濃度は昭和 40 年前半から大気汚染濃度は顕著に減少しており, 環境基準を満

足している。しかし、 NO_2 , SPM 濃度は、過去 30 年間横這いかあるいは漸増しており、環境基準を満足していない、光化学オキシダント注意報発令日数も昭和 40 年代に比べると減少しているものの近年はほぼ横這いの状態であり、オキシダント濃度も環境基準を満足していない。このように我が国の大気汚染状況は、昭和 40 年代前半の著しく汚染されていた時期に比べるときれいになったとは言え、 NO_2 , SPM, オキシダント濃度の環境基準はまだ満たされておらず、濃度減少のための施策を実施することが急務である。

2) 気温・湿度

大阪市の過去 100 年間¹⁻⁴⁾の 8 月の最高気温、最低気温、日平均気温の変化をそれぞれ図 1.6, 図 1.7, 図 1.8 に示す¹⁻⁵⁾。大阪市 8 月の最高気温についてトレンド解析を行うと、95%信頼度で 0.009 ± 0.003 [$^{\circ}\text{C}/\text{年}$]、最低気温は 0.019 ± 0.003 [$^{\circ}\text{C}/\text{年}$]、日平均気温は 0.014 ± 0.003 [$^{\circ}\text{C}/\text{年}$] となり、100 年間で最高気温、最低気温、日平均気温はそれぞれ 1.0°C 、 2.0°C 、 1.5°C 上昇したことを示している。大阪府下の他の観測点で日平均気温について、同様のトレンド解析を行うと、大阪府北部地域の東郷、能勢で、それぞれ 0.008 ± 0.009 [$^{\circ}\text{C}/\text{年}$]、 -0.006 ± 0.009 [$^{\circ}\text{C}/\text{年}$]、大阪府南部地域の上ノ郷では 0.010 ± 0.011 [$^{\circ}\text{C}/\text{年}$] の結果となり、明確な温度上昇を示していない。このように都市化が顕著な大阪市では、ヒートアイランド現象が生じていることがわかる。

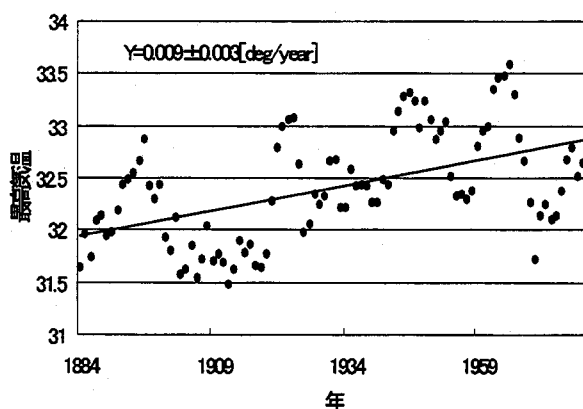


図 1.6 大阪市の 8 月の最高気温の経年変化

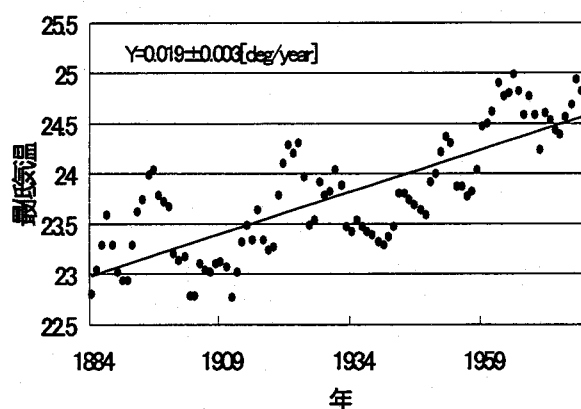


図 1.7 大阪市の 8 月の最低気温の経年変化

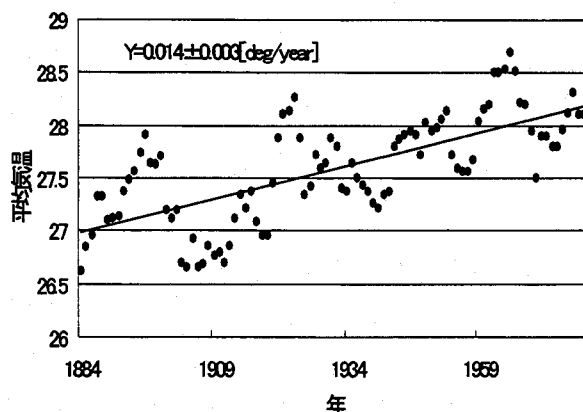


図 1.8 大阪市の 8 月の日平均気温の経年変化

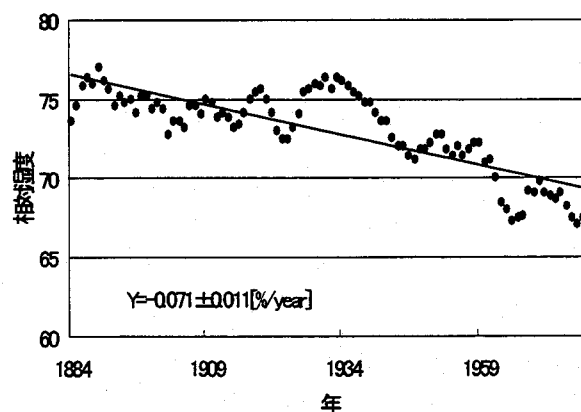


図 1.9 大阪市の 8 月の相対湿度の経年変化

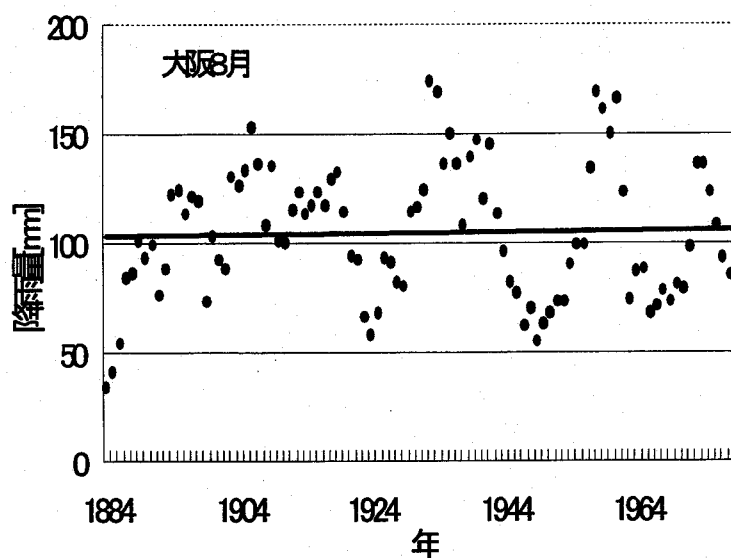


図 1.10 大阪市の8月の降雨量の経年変化

次に、大阪市の過去100年間の8月の相対湿度の変化を図1.9に示す¹⁻⁵⁾。相対湿度は、年とともに減少しているが、これは気温の上昇による影響であり、絶対湿度で見ると過去100年間で変化はあまり見られない。

このようなヒートアイランド現象を引き起こすと考えられる要因を表1.2にまとめる¹⁻⁶⁾。都市化による人工構造物の増加および人間活動にともなう排熱の増加がヒートアイランドの主な要因である。

3) 降雨

大阪市8月の降雨について、降雨量、1mm以下の降雨日数、31mm以上の降雨日数の100年間の変化をそれぞれ図1.10、図1.11、図1.12に示す¹⁻⁷⁾。大阪市の1mm以下の降雨日数は顕著に増加している様子がわかる。また、一方31mm以上の降雨日数は逆に減少傾向を示している。降雨量については、ほとんど変化はない。降雨量・降雨日数については年変動が大きく、そこから都市化の影響を抽出する事は難しく、大阪市の解析では、表1.1に示された小雨の増加傾向は見いだせたが、降雨量の増加傾向を見いだすことは出来なかった。

表 1.2 都市化による温暖化要因

太陽放射吸収量の増加	キャノピ形状 - 表面積の増大と多重反射
大気から受ける長波量の増加	大気汚染 - 吸収量の増加と再射出
大気へ放出する長波量の減少	キャノピ形状 - sky view factor の減少
人工廃熱	建物と交通からの放出
顕熱の増加	建造物の材質 - 熱容量
蒸発量の減少	建造物の材質 - 防水
乱流熱輸送の減少	風速の減少

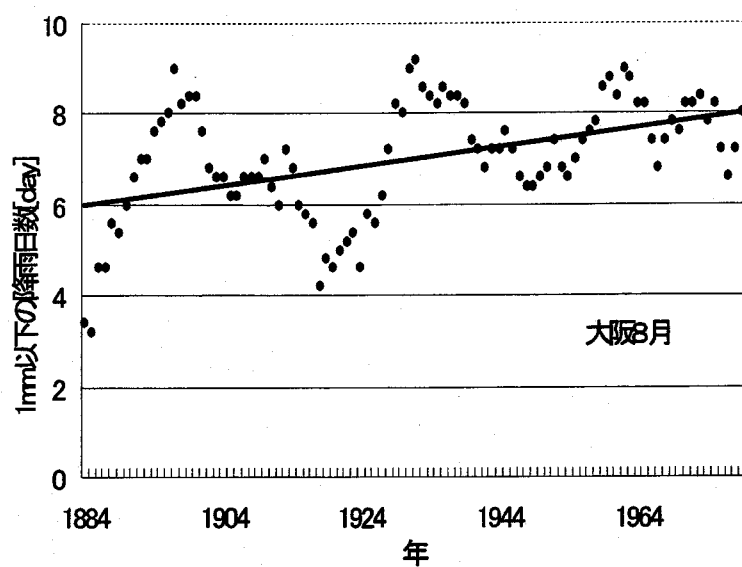


図 1.11 大阪市の8月の1mm以下の降雨日数の経年変化

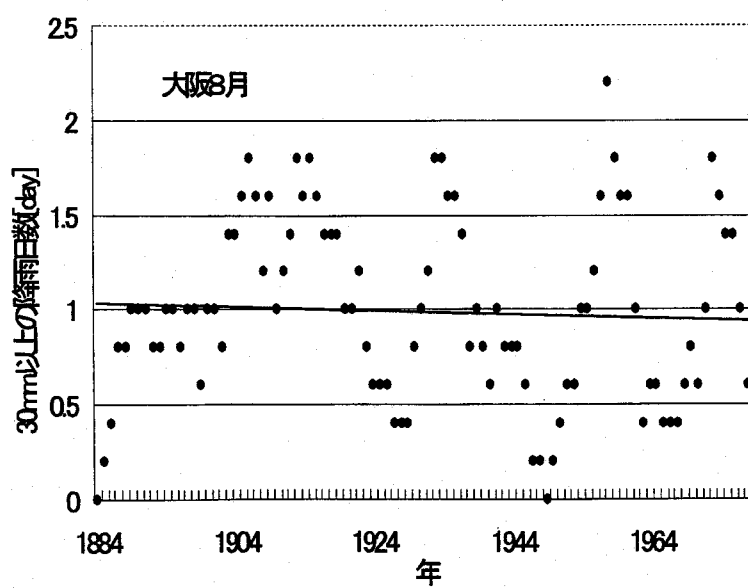


図 1.12 大阪市の8月の31mm以上の降雨日数の経年変化

一方、セントルイス郊外で実施された METROMEX¹⁻⁸⁾では、都市化にともない heavy rain の増加、降雨日数の増加、降雨量の増加等が認められている¹⁻⁹⁾¹⁻¹⁰⁾。

1.1.2 地球温暖化と環境調和型都市

1992年6月のいわゆる地球サミットで締結された「気候変動枠組み条約」は、発効に必要な50カ国の批准が完了して1994年3月21日に発効した。この条約は、「約束」として先進国に対して温室効果ガスの排出量を2000年までに1990年レベルに戻すように求めているもので、環境庁は1994年8月1日、西暦2000年度の日本のCO₂排出量は1990年度レベルを約3%上まわるという内容の温暖化対策を報告した。

そして、1997年12月京都で開かれた第3回気候変動枠組み条約締約国会議(温暖化防止京都会議、COP3)で、我が国は2008年から2012年までに温室効果ガスを6%減少させる数値目標を設定した。この度の条約では、「約束」でなく「法的拘束力」のある温室効果ガスに関する数量目標の設定である。(ただし、批准されるかどうかは未定。)これを受けて、世界各国はCO₂排出削減の強化に迫られているが、現在考えられている対策は、(1)エネルギー利用効率の向上、(2)新エネルギー・再生可能エネルギーの開発、(3)森林等のCO₂吸収源の保護等である。国土面積が小さい我が国では森林等の保護には限界があり、太陽エネルギーなどの新エネルギーで我が国の全エネルギーを賄うことは難しく、結局上記(1)のエネルギー利用効率の向上に頼るしか方法がない。

そのためには、エネルギー消費が過度に集中している都市におけるエネルギー利用率を向上しエネルギー消費を抑えることが必要となり、エコトピア計画(環境庁)、エコシティ構想(建設省)、エネルギーコミュニティ(通産省)等の地域一体の総合的省エネルギー社会をめざした環境調和型の都市構想¹⁻¹¹⁾が提案されている。また、わが国の事例ではないが、ドイツのシュツットガルトでは固有の風系を都市の冷房、汚染物の排除等の目的に積極的に利用できるような都市構造をつくるという「風の道」計画¹⁻¹²⁾が進められている。

1.1.3 都市大気環境保全と数値モデル

1.1.1節で述べたように都市大気環境は悪化(変化)している。そのため、よりよい都市大気環境を維持・改善していくことを目指す都市大気環境保全は、今後ますますその重要性が増してくると考えられる。開発との調和をどのようにとればよいのか、どのような施策を採れば大気環境を改善できるのかを考えていくことが必要であり、実際に施策を実行する場合には、その効果のある程度定量的に予測、評価することが必要となる。また1.1.2節で述べたように、省エネルギーを目指した都市構想がいろいろ提案されている。その際、個々の施策を実施すれば、その効果が数量的にいくらであり、また代替案との優劣を事前に評価することが重要となる。

しかし、大気環境は本質的に実験することが不可能である(もし実験が可能であっても、悪化した場合は元に戻すことができないため大きなリスクが生じる)ため、事前評価を行うのが困難である。しかし、大気現象を表す物理法則を数値的に解く数値シミュレーションを可能とするコンピュータの出現とともに様相が一変した。コンピュータ上で大気環境実験ができ、事前評価の道が開けてきたからである。1990年始め頃までは大気の数値シミュレーションは、大型計算機と呼ばれる膨大なコンピュータ資源と費用を必要としたため、限られた人でしか行うことは出来なかったが、その後のコンピュータの発達が目覚ましく、今では普通のパソコンでもかなり詳細な大気環境の数値シミュレーションが実行可能となっている。既に大気環境数値シミュレーションのパッケージソフト(例えばHOTMAC,CSUMM)も販売され、数値シミュレーションは誰でもが行えるツールとなってきた。このよう

に、大気環境保全の事前評価を行う場合、数値シミュレーションは非常に強力なツールとなりつつある。

しかし、現状の数値シミュレーションにも大きく2つの課題があり、今後解決していかなければならないと考えられる。

1. 数値シミュレーションで得られた結果の信頼性に対する評価がまだ不十分である。
2. 全ての現象を正確にモデル化ができていない。

1に関しては、アメダスや自治体の常時観測所などの観測データは整備されてつつあるが、海上のデータや上層の観測データについてはほとんど無きに等しいため、数値シミュレーション結果と観測結果との比較検討が十分に行えないのが現状であり、そのためモデルへのフィードバックもかかりにくくなっていること、また大気環境は、年変動・日変動などの周期性は存在するが、瞬時瞬時は決して再現しないため同じ条件での観測ができないことが要因として考えられる。また、2に関しては、植物からの蒸散や水面による冷却効果、土壌からの蒸発過程、都市建物による蓄熱や放射環境の変化などのモデル化、大気化学反応についてのモデル化についてはまだ改善の余地が多々残っている。また異なるスケールの現象を取り込むためのサブグリッドスケールのパラメータ化についても検討していく必要がある。本研究も上記1,2の課題解決に向けて行ったものである。

1.2 既往研究

都市大気環境は、非常に範囲の広い分野であため、全ての研究について、ここに網羅する事は出来ない。ここでは、本研究に関連がある局地循環風に関する研究、地表面熱収支に関する研究、都市キャノピに関する研究、大気汚染濃度予測に関する研究に関しての既往研究について述べる。また、筆者らのグループでは、地域大気シミュレーションモデル(OASIS(Osaka University Simulation System))の開発を行っている。ここで、OASISの中での本論文の位置づけと、本論文には含まれていないモデルについて簡単な説明を行う。

1.2.1 都市大気環境予測モデル

1) 海陸風を含む境界層モデル

海陸風の数値シミュレーションは、Estoque¹⁻¹³⁾によって最初に試みられた。鉛直方向の領域を接地層と大気境界層に分けてモデル化を行う方法や鉛直乱流拡散係数を大気安定度の関数として求める方法などは、現在のモデルにも踏襲されている。鉛直拡散係数を大気安定度の関数として求める考え方は、Estoque and Bhumralkar¹⁻¹⁴⁾、pielke¹⁻¹⁵⁾、sheih¹⁻¹⁶⁾、kozy¹⁻¹⁷⁾などによりいろいろな関数式が提案されている。一方、鉛直拡散係数を乱流 closure model から求める方法が Yamda and Mellor¹⁻¹⁸⁾ 1-19) 1-20) 1-21) 1-22) によって開発され、最近の海陸風を含む境界層の数値モデルの多くに用いられている。海陸風などのメソスケールの計算では、水平拡散係数は物理的な意味をもった形で使われることはあまりなく、計算の安定のために大きな値を設定するのが一般的である。また、物理的意味のない水平拡散項を基礎方程式で無視し、水平方向に smoothing を行うことで計算の不安定性を解消する方法も sheih¹⁻¹⁶⁾、kozy¹⁻¹⁷⁾、Oochouchi¹⁻²³⁾ によって行われている。水平拡散係数をメッシュ格子間隔と水平速度勾配で与える方法も Pielke and Mahrer¹⁻¹⁵⁾ 1-24) によって試みられている。初期の海陸風のモデルは平坦地であったが、Mahrer¹⁻²⁵⁾ によって地形の影響を取り込む z^* 座標系を基礎方程式に取り込むことが行われた。また、海陸風は、海面と陸面の温

度差によって起こるので陸面の温度を見積もることが必要となる。初期のモデルは陸面温度をサイン関数近似で与えていたが、Mahrer¹⁻²⁶⁾らによって地表面熱収支モデルと境界層モデルのカップリングが初めて行なわれた。海陸風を含む境界層モデルの基本的な考え方は、この時点でほぼ完成したと考えられる。その後、Yamadaによって開発されたモデルは、HOTMAC(Higher Order Turbulence Model for Atmospheric Circulations)¹⁻²⁷⁾、Pielkeらによって開発されたモデルは、CSUMM(Colorado State University Meso-scale Model)¹⁻²⁸⁾と呼ばれ多くの実用研究に応用されている。また我が国でも、いくつかの研究機関が独自に開発した局地循環モデルがあり、その相互比較¹⁻²⁹⁾が行われている。

境界層モデルの基本的な概念ができあがってから20年が立ち、境界層内に生じる主な現象はモデルで再現出来るようにはなったが、現象を単純化したモデル計算でも各モデル間に違いが生じており、境界層モデルが完全に確立されたとは言い難い。特に、安定層時の乱流量については、現象自体が十分にわかっておらず、そのためモデル化が遅れている領域であり、今後研究を進めていく必要がある。

2) 熱収支モデル

境界層内の気流は、地表面温度によって大きな影響を受けるため、地表面温度を予測することは非常に重要となる。数値モデルによって熱収支式を解く試みはMyrup¹⁻³⁰⁾によって最初に行われた。地表面で正味の放射フラックス、顕熱フラックス、潜熱フラックス、および土壌への熱フラックスのバランス式を解く方法はこれ以降のモデルでも同じである。Deardorff¹⁻³¹⁾は、土壌を覆っている植物による大気との顕熱、潜熱の効果を熱収支式に加え、その影響を考慮できるモデルを提案している。Segal¹⁻³²⁾は、Deardorffモデルの輸送係数に改良を行っている。また、Sellers¹⁻³³⁾はGCMの境界条件決定のための植生2層モデルを考案している。地表面の水分量は土壌内の水分分布と密接に関係しており、また地表面水分が水蒸気になり大気へ輸送される過程は複雑なため、潜熱フラックスを正確に評価することが難しい。そのため、土壌内の水分量について予測方程式を解き、地表面水分量予測するモデルが、Mccumber¹⁻³⁴⁾、Acs¹⁻³⁵⁾によって提案されている。土壌表面から大気への輸送を定式化する方法に α 法と β 法があり、Mihailovic¹⁻³⁶⁾にいくつかの方法がまとめられている。J.Kondo¹⁻³⁷⁾¹⁻³⁸⁾は、土壌面からの大気への輸送は土壌内の空隙から水分が蒸発するときの抵抗と定義してモデルの構築を行っている。そして、Deardorffが用いたForce Restore法との比較を行い、長期間の数値計算を行う場合はJ.Kondoのモデルが精度が良いことを示している¹⁻³⁹⁾。都市の人工構造物の影響を考慮するために、Asaeda¹⁻⁴⁰⁾¹⁻⁴¹⁾はアスファルトとコンクリートの熱特性を実験により明らかにしている。Tso¹⁻⁴²⁾は、都市建物群の蓄熱効果を考慮して熱収支式を解いている。

また、Kimura¹⁻⁴³⁾は、熱収支モデルと境界層モデルをカップリングする際、格子内の土地利用毎に熱収支式をたて顕熱、潜熱フラックスを見積もる方法を提案し、東京のヒートアイランドのシミュレーション¹⁻⁴⁴⁾に応用している。

3) 都市キャノピモデル

都市の平均建物高さ以下の空間を都市キャノピ層と位置づけ、その内部の熱、水分に着目した研究は、Oke¹⁻⁴⁵⁾によって始められ、多くの実測による研究¹⁻⁴⁶⁾¹⁻⁶⁾¹⁻⁴⁷⁾が行われている。それ以降も、都市キャノピや都市キャニオン内部に着目したモデル研究は、数多く行われている。Aida¹⁻⁴⁸⁾¹⁻⁴⁹⁾は、都市建物によるアルベドの変化を、モデル実験と2次元モンテカルロシミュレーションによって求めている。Swaidは、都市建物がある場合のSVF(Sky View Factor)の近似法を提案¹⁻⁵⁰⁾し、また建物による陰による都市気候の影響について研究¹⁻⁵¹⁾を行っている。また、Terjung¹⁻⁵²⁾は、都市建物の各面が受ける太陽放射量

を建物の幾何学的形状から導出を行っている。この方法は、Mills¹⁻⁵³⁾やSakakibara¹⁻⁵⁴⁾に用いられ、熱収支モデルと結合され、壁面や地面温度と建物形状との関係が求められている。近藤(裕)¹⁻⁵⁵⁾らも同様に、都市建物の幾何学形状から太陽放射量を推定し、1次元大気境界層モデルと結合して建物高さヒートアイランドの関係を求めている。近藤(明)¹⁻⁵⁶⁾は、モンテカルロシミュレーションを用いて3次元の都市建物の太陽放射および形態係数を求め、同様に1次元大気境界層モデルと結合して都市建物形状とヒートアイランドの関係を求めている。

Uno¹⁻⁵⁷⁾は、森林キャノピーを含む大気境界層モデル¹⁻⁵⁸⁾¹⁻⁵⁹⁾のアナログから、都市キャノピーによる風速の減少やそれによる乱流エネルギーの増加の定式化を行い、都市キャノピー層を含む大気境界層モデルのシミュレーションを行った。また、鉛直方向の建物密度分布関数¹⁻⁶⁰⁾を導入し、都市建物形状のパラメータ化を行っている。近藤(明)¹⁻⁶¹⁾やIchinose¹⁻⁶²⁾は、このモデルを3次元に拡張し都市建物とヒートアイランドの関係を調べている。しかし、建物密度分布関数を用いると計算格子内で建物の高さ分布を考慮できるが、上述した都市建物内の太陽放射量や形態係数を正確に求めることが難しい。今後は、計算格子内で建物の高さ分布を考慮でき、また都市建物内の太陽放射量や形態係数も正確に求めることが出来るモデル化が必要である。

4) 大気汚染濃度予測モデル

大気汚染濃度を数値シミュレーションで予測する方法としては大きく、オイラー型モデルとラグランジュ型モデルに分類することが出来る。オイラー型モデルは、光化学反応などの汚染物質の変質の取り扱いが簡単であるが数値差分による疑似拡散が生じる欠点があり、一方、ラグランジュ型モデルは疑似拡散の問題は生じないが、変質を取り扱うのが困難であり、両者のモデルには一長一短がある。これらの大気汚染予測モデルについては、近藤¹⁻⁶³⁾、岡本¹⁻⁶⁴⁾、市川¹⁻⁶⁵⁾によくまとめられている。オイラー型モデルでは、疑似拡散を減少させるために、差分法としてFCT法、反復風上差分法、2次モーメント法が提案されており、またセル内粒子モデルとしてスプライン法、PIC法などが提案されており、岡本¹⁻⁶⁶⁾に詳しく紹介されている。ラグランジュ型モデルで、正確な濃度分布を求めようとすると多数の粒子を追跡することが必要となる。そこで、KDE(Kernel Density Estimator)法を粒子モデルに取り込み、少ない粒子で濃度を予測する方法がYamada¹⁻²⁷⁾らによって行われ、また、標準偏差が鉛直方向に変化するときは鉛直方向の圧力勾配が粒子に作用するので、その影響を考慮するためにバイパス速度¹⁻⁶⁷⁾の導入が行われている。これらの改良されたラグランジュ型モデルの複雑地形場への応用が、Yamada¹⁻²⁷⁾、Segal¹⁻⁶⁸⁾¹⁻⁶⁹⁾によって行われている。

光化学反応モデルは、1970年頃から開発が行われてきている。池田¹⁻⁷⁰⁾や北田¹⁻⁷¹⁾の初期のモデルは反応過程を簡略化し、反応式は20程度の少ないモデルであった。その後、反応式が100程度のモデルが数多く作成され、Dodge¹⁻⁷²⁾や大原¹⁻⁷³⁾らによりモデル間の比較検討がなされている。そして、Gery¹⁻⁷⁴⁾によって、今まで開発が行われてきたCBM(Carbon Bond Mechanism)シリーズのモデルを発展させたCBM-IVモデルが提案された。CBM-IVは、従来の複雑な反応式をそのメカニズムによって簡略化した実用的なモデルである。このモデルは、Svensson¹⁻⁷⁵⁾によってアテネ、大原ら¹⁻⁷⁶⁾によって関東平野、近藤ら¹⁻⁷⁷⁾によって大阪湾岸域の光化学オキシダント濃度予測に用いられ、その有効性が検討されている。

乾性沈着モデルは、原子炉事故に関して行われた I_2 の測定によって研究が開始され、その際Chamberlain¹⁻⁷⁸⁾によって沈着速度が定義された。その後、多くの物質に関して沈着速度の測定が行われており、McMahon¹⁻⁷⁹⁾やSehmel¹⁻⁸⁰⁾によって詳細なreviewが行われている。その後も大気汚染物質である SO_x や NO_x の沈着速度の測定がいろいろと行われて

いる(例えば1-81)1-82)1-83)が、気候条件や地表面の条件による沈着速度の測定値には大きなばらつきがあり、これらとの関連性を今後研究していく必要がある。

1.2.2 OASIS モデル

筆者らのグループでは、地域大気シミュレーションモデル(OASIS(Osaka University Simulation System))の開発を行っている。OASISは、meso-scaleからurban-scaleまでの大気環境実験が出来ることを目指して開発しているシミュレーションモデルであり、図1.13にその概要を示す。OASISは、大きく4つのモデルから構成されている。

- 1 meso-scale(海陸風)・urban-scale(ヒートアイランド)の気象場予測モデル
- 2 大気汚染濃度予測モデル
- 3 積雲対流予測モデル
- 4 湿性沈着予測モデル

これらのモデル群は、将来的にはライブラリー化され、計算対象目的に応じて必要なライブラリーをリンクし、目的の計算を実行出来るようにする予定である。

本論文は、urban-scaleの気象場予測モデル、またその中の都市キャノピ層についての予測モデル、およびmeso-scaleの気象場予測と大気汚染濃度予測モデルのカップリングについて、第2章以下にその詳細を記述している。ここでは、本論文では記述していない積雲対流予測モデルと湿性沈着予測モデルについて簡単に説明する。積雲対流モデルは、降雨を伴わず雲(雲粒核)のみをシミュレーションできる雲モデル¹⁻⁸⁴⁾、降雨もシミュレーション出来るが氷相は考えない雨モデル¹⁻⁸⁵⁾(雲粒核、雨)(warm rain)、氷相までを考慮(cold rain)した電モデル¹⁻⁸⁶⁾(雲粒核、雨、電)と雪モデル¹⁻⁸⁷⁾(雲粒核、雨、電、雪)がある。今後、Ueyoshi¹⁻⁸⁸⁾らが行っているようにmeso-scale・urban-scaleの気象場予測モデルと雲モデルのカップリングを行い、海風前線やヒートアイランドによる上昇流による雲形成モデルの開発を行っていく予定である。湿性沈着予測モデルは、Hong¹⁻⁸⁹⁾¹⁻⁹⁰⁾のrainoutモデルとKumar¹⁻⁹¹⁾¹⁻⁹²⁾のwashoutモデルを開発しており、気象場予測モデルと積雲対流モデルとカップリングを行い酸性雨現象のシミュレーションモデルへの展開を進めて行く予定である。

1.3 研究目的と構成

本研究は、都市大気環境の事前評価を行うための数値モデルの開発と、それを実際のいくつかの事例に適用してモデルの確立を図り、併せてモデル精度の検討を目的として行ったものである。本論文の構成を図1.14に示す。

以下に本論文の概要を述べる。

第1章は、都市大気環境保全の事前評価のためには数値シミュレーションが必要であることを述べ、本研究の背景と目的を明らかにした。

第2章は、第3章から第5章で用いる気象場予測モデル、都市キャノピモデルおよび大気汚染濃度予測モデルの概要を説明した。

第3章から第5章は、具体的な事例を通してモデル精度の検証を行い、さらに都市大気環境保全の事前評価を行った。以下にその内容を記す。

地域大気環境シミュレータ (OASIS)

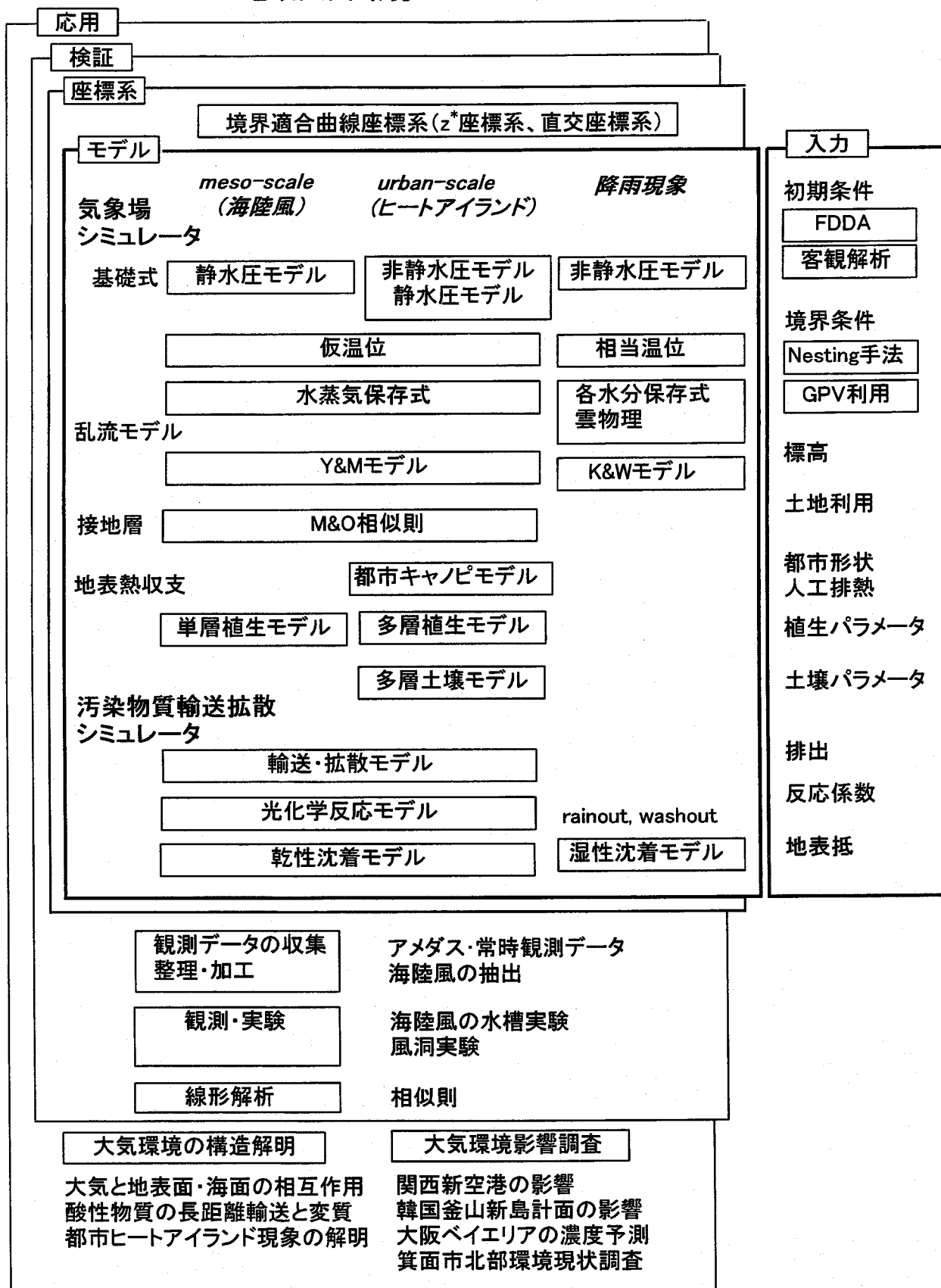


図 1.13 OASIS 概要

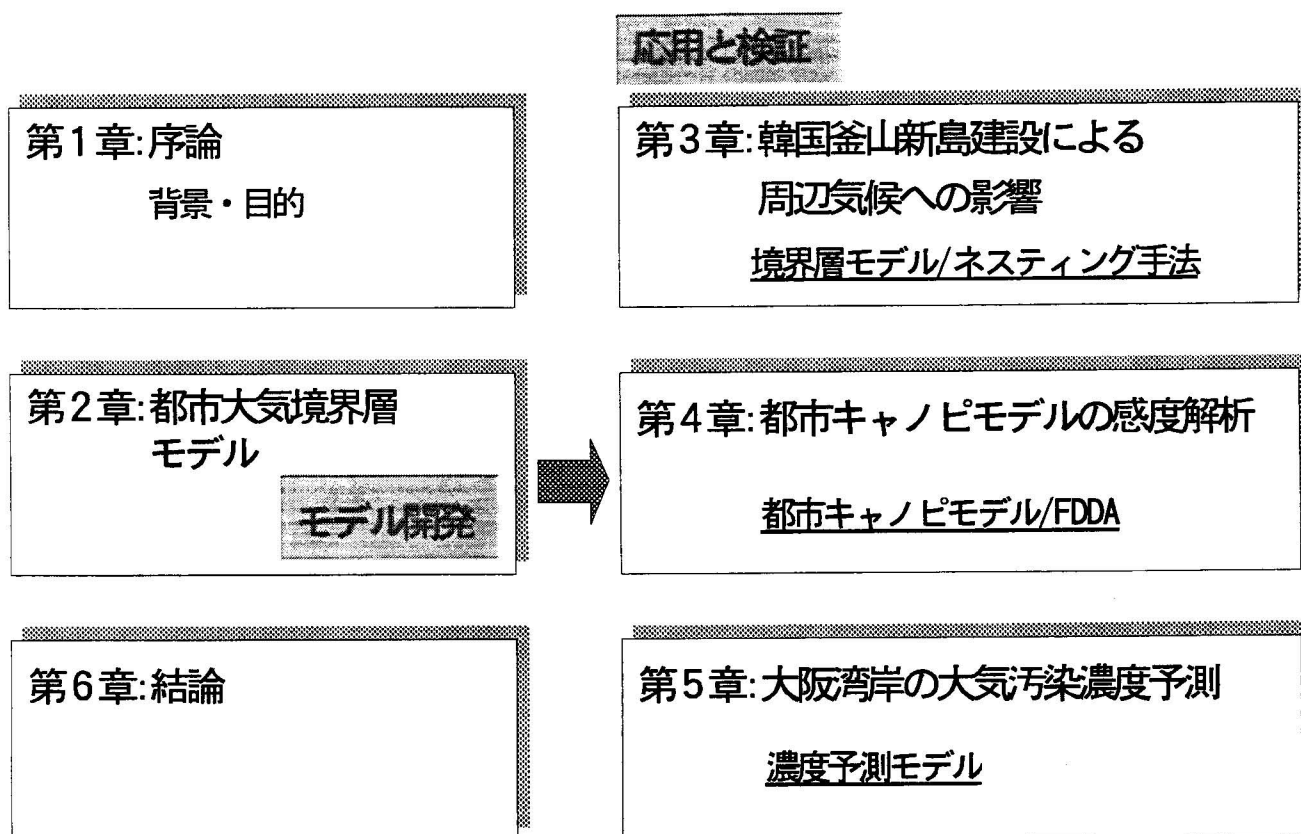


図 1.14 本研究の構成

第3章は, urban-scale の気象場予測モデルの確立を目指し, 韓国釜山市を対象にモデルを適用し, 観測データと数値計算結果を比較しモデル精度の検討も行った. また, 韓国釜山市で計画されている人工島建設による周辺気候の影響をこの数値モデルにより事前評価した.

第4章は, 筆者らが提案した都市キャノピモデルの放射計算の妥当性の検討を行い, 都市キャノピ形状と放射量の関係を明らかにした. そして, 都市キャノピモデルを含む1次元境界層モデルにより, 都市キャノピ形状とヒートアイランドの関係を見いだした. また, 都市キャノピモデル含む3次元境界層モデルを開発し, 大阪市への応用を試みた.

第5章は, meso-scale の気象場予測と大気汚染濃度予測モデルをカップリングしたモデルを, 大阪湾岸でオキシダント濃度が高くなった日を対象に適用し, 風速, 大気汚染濃度の観測データと比較しモデル精度の検討を行った. また, この計算の入力データとして大阪湾岸地域の大気汚染物質の排出量の推定を行った. 次に, 大阪湾岸域の船からの大気汚染物質排出が, 陸域濃度に与える影響をこの数値モデルにより評価した.

第6章は, 以上の結果を要約し, 今後残された課題について述べた.

参考文献

- 1-1) 中村英夫編：都市と環境 —現状と対策—, ぎょうせい, (1992)
- 1-2) 河村武：大気環境論, 朝倉書店, (1992)
- 1-3) 気象庁編：環境白書 総説 平成 10 年度版, 大蔵省印刷局, (1998)
- 1-4) 大阪管区气象台編：大阪の気象 100 年, ぎょうせい関西支社, (1982)
- 1-5) 仁志出博一：都市化が夏期降雨に及ぼす影響に関する研究, 平成 5 年度大阪大学環境工学科卒業論文
- 1-6) T.R.Oak : The energetic basis of the urban heat island, *Quart. J. R. Met.Soc.* ,108 ,1-24 (1982)
- 1-7) 中村隆司：ニューラルネットワークを用いた都市化による夏期降雨の変化に関する研究, 平成 7 年度大阪大学環境工学科卒業論文
- 1-8) S.A.Changnon : Urban Effects on Severe Local Storms at St.Louis, *J.Appl.Meteor.* ,17 ,578-586 (1978)
- 1-9) S.A.Changnon,R.T.Shealy and R.W.Scott : Precipitation Changes in Fall,Winter,and Spring Caused by St.Louis, *J.Appl.Meteor.* ,30, 126-134 (1991)
- 1-10) S.A.Changnon, : Evidence of urban and lake influences on precipitation in the Chicago area, *J.Appl.Meteor.* ,19 ,1137-1159 (1980)
- 1-11) 日本ガス協会, エネルギーコミュニティをめざして, *Gas Epoch*, 4, 10 - 11、(1994)
- 1-12) 一ノ瀬俊明, シュトゥットガルトにおける「風の道」—都市計画で都市気候を制御する試み—, 天気、40-9、691-693 (1993)
- 1-13) M.A.Estoque : A Theoretical Study of the Sea Breezes, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* ,87 ,136-146 (1961)
- 1-14) M.A.Estoque and C.M.Bhumralkar : Flow over a localized heat source, *Mon. Wea. Rev.* ,97 ,850-859 (1969)
- 1-15) R.A.Pielke: A Three-Dimensional Numerical Model of the Sea Breezes Over South Florida, *Monthly Weath.Rev.* , 102, 115-139 (1974)
- 1-16) C.M.Sheih and W.J.Moroz : Mathematical Modelling of Lake Breeze, *J. Atmos. Environ.* ,9 ,575-586 (1975)
- 1-17) T.L.Kozo : A Mathematical Model of Sea Breeze Along the Alaskan Beaufour Sea Coast: Part II, *J. Appl. Meteor.* ,21 ,906-924 (1982)
- 1-18) G.L.Mellor : Analytic Prediction of the Properties of Stratified Planetary Surface Layers, *J.Atmos.Sci.*, 30, 1061-1069 (1973)

- 1-19) G.L.Mellor and T.Yamada : A Hierarchy of Turbulence Closure Models for Planetary Boundary Layers, *J.Atmos.Sci.*, 31, 1781-1806 (1974)
- 1-20) T.Yamada and G.L.Mellor : A Simulation of the Wangara Atmospheric Boundary Layer Data, *J.Atmos.Sci.*, 32, 2309-2329 (1975)
- 1-21) T.Yamada : The Critical Richardson Number and the Ratio of the Eddy Transport Coefficients Obtained from a Turbulence Closure Model, *J.Atmos.Sci.* , 32, 926-933 (1975)
- 1-22) G.L.Mellor and T.Yamada : Development of a Turbulence Closure Model for Geophysical Fluid Problems Review *Geophys.and Space Phys.* ,20, 851-875 (1982)
- 1-23) Y.Oochouchi, M. Uryu and R.Sawada : A Numerical Study on the Effects of a Mountain on the Land and Sea Breezes *J. Meteor. Soc. Japan* ,56, 368-386 (1978)
- 1-24) R.A.Pielke and Y.Mahrer : Representation of the Heated Planetary Boundary Layer in Mesoscale models with Coarse Vertical Resolution, *J.Atmos.Sci.*,32, 2288-2308 (1975)
- 1-25) Y.Mahrer and R.A.Pielke : A Numerical Study of the Air Flow Over Mountains Using the Two-Dimensional Version of the University of Virginia Mesoscale Model, *J.Atmos.Sci.* ,32, 2144-2155 (1975)
- 1-26) Y.Mahrer and R.A.Pielke : The Effects of Topography on Sea and Land Breezes in a Two-Dimensional Numerical Model , *Mon. Wea. Rev.* ,105, 1151-1162 (1977)
- 1-27) T.Yamada and S.Bunker : Development of a Nested Grid, Second Moment Turbulence Closure Model and Application to the 1982 ASCOT Brush Creek Data Simulation , *J.Appl.Meteor.*,27 , 562-578 (1988)
- 1-28) B.L.Ulrickson and C.F.Mass : Numerical investigation of mesoscale circulations over Los Angeles basin Part I A Verification Study , *Mon. Wea. Rev.* ,118, 2136-2161 (1990)
- 1-29) 近藤裕昭, 有沢雄三他 : 局地循環モデルの相互比較 , 天気 ,41, 751-760 (1993)
- 1-30) L.O.Myrup, A Numerical Model of the Urban heat island. *J. Appl. Meteor.*, 8, 171 - 180 (1969).
- 1-31) J.W.Deardorff : Efficient Prediction of Ground Surface Temperature and Moisture, With Inclusion of a Layer of Vegetation , *J.Geophys.Res.* ,83, 1889-1903 (1978)
- 1-32) M.Segal, R.Avissar, M.C.McCumber and R.A.Pielke : Evaluation of Vegetation Effects on the Generation and Modification of Mesoscale Circulations , *J.Atmos.Sci.*,45, 2268-2292 (1988)
- 1-33) P.J.Sellers, Y.Mintz, Y.C.Sud and A.Dalcher : A Simple Biosphere Model(SiB) for Use Within General Circulation Models, *J.Atmos.Sci.*,43, 505-531 (1986)
- 1-34) M.C.McCumber and R.A.Pielke : Simulation of the Effects of Surface Fluxes of Heat and Moisture in a Mesoscale Numerical Model 1.Soil Layer, *J.Geophys.Res.*,86 ,9929-9938 (1981)

- 1-35) F.Acs., D.T.Mihailovicar, and B.Rajkovic, A coupled soil moisture and a surface temperature prediction model. *J.Appl.Meteor.*, 30, 812 -8228 (1991)
- 1-36) D.T.Mihailovic, R.A.Pielke : A Resistance Representation of Schemes for Evaporation from Bare and Partly Plant-covered Surfaces for Use in Atmospheric Models , *J.Appl.Meteor.*, 32 ,1038-1054 (1993)
- 1-37) J.Kondo , N.Saigusa and T.Sato: A Parametarization of Evaporation from Bare-Soil Surfaces, *Ame.Meteor.Soc.*, 29, 385-389 (1990)
- 1-38) J.Kondo and N.Saigusa : Modelling the Evaporation from Bare-Soil with a Formula for Vaporization in the Soil Pores, *J.Meteor.Soc. Japan*, 72, 413-421 (1994)
- 1-39) J.Kondo and N.Saigusa : A Model and Experimental Study of Evaporation from Bare-Soil Surfaces, *J.Appl.Meteor.*, 31, 304-312 (1992)
- 1-40) T.Asaeda : The Subsurface Transport of Heat and Moisture and its Effect on the Environment: A Numerical Model, 埼玉大学工学部建設系研究報告, 22, 1-19 (1992)
- 1-41) T.Asaeda : Solar Heating of Pavement and its Effect on Lower Atmosphere, 埼玉大学工学部建設系研究報告, 22, 21-38 (1992)
- 1-42) C.P.Tso, B.K.Chan and M.A. Hashin, An improvement to the Basic Energy Balance Model for Urban Thermal Environment Analysis. *Energy and Buildings*, 14, 143 - 152 (1990).
- 1-43) F.Kimura : Heat Flux on Mixtures of Different Land-use Surface: Test of a New Parameterization Scheme, *J.Meteor.Soc.Jpn.* , 67 , 401-409 (1989)
- 1-44) F.Kimura : The Effects of Land-Use and Anthotopognic Heating on the Surface Temperature in the Tokyo Metropolitan Area: A Numerical Experiment, *Atmos.Environ.* , 25B , 155-164 (1991)
- 1-45) T.R.Oak : The distinction between canopy and urban boundary layer heat island, *Atmosphere* , 14 , 268-277 (1976)
- 1-46) B.D.Kalanda , T.R.Oak and D.L. Spittlehouse : Suburban Energy Balance Estimates for Vancouver, B.C., Using the Bowen Ratio-Energy Balance Approach, *Am. Meteor.Soc.* , 19 , 791-802 (1980)
- 1-47) Y.Nakamura, T.R.Oak : Wind, Temperature and Stability Conditions in an East-West Oriented Urban Canyon, *Atmos. Environ.* , 22 , 2691-2700 (1988)
- 1-48) M.Aida : Urban Albedo as a Function of the Urban Structure - A Model Experiment (Part I), *Boundary Lay. Meteor.* , 23 , 405-413 (1982)
- 1-49) M.Aida : Urban Albedo as a Function of the Urban Structure - A Two-Dimensional Numerical Simulation (Part II), *Boundary Lay. Meteor.* , 23 , 415-424 (1982)
- 1-50) H.Swaide : The Role of Radiative-Convective Interaction in Creating the Microclimate of Urban Street Canyons, *Boundary Lay. Meteor.* , 64 , 231-259 (1993)

- 1-51) H.Swaide : Urban Climate Effects of Artificial Heat Sources and Ground Shadowing by Buildings, *Int. J. Climatology* ,13 ,797-812 (1993)
- 1-52) W.H.Terjung and S.Louie : A Climatic Model of Urban Energy Budgets, *Geo. Analysis* ,6 ,341-367 (1974)
- 1-53) G.M. Mills : Simulation of the Energy Budget of an Urban Canyon - I. Model Structure and Sensitivity Test, *Atmos. Environ.* ,27B ,157-170 (1996)
- 1-54) Y Sakakibara : A Numerical Study of the Effect of Urban Geometry upon the Surface Energy Budget, *Atmos. Environ.* ,30 ,487-496 (1996)
- 1-55) 近藤裕昭, 劉発華 : 1次元都市キャノピーモデルによる都市の熱環境に関する研究, 大気環境学会誌 ,33 ,179-192 (1998)
- 1-56) 近藤明, 山口克人, 田村直道, 前田健太郎 : 都市キャノピー内の放射量の算定方法と放射量が温度分布に及ぼす影響 , 大気環境学会誌 , 33, 306-321 (1998)
- 1-57) I.Uno, H. Ueda and S. Wakamatsu : Numerical Modeling of the Nocturnal Urban Boundary Layer, *Boundary Lay. Meteor.* ,49 ,77-98 (1989)
- 1-58) T.Yamada : A Numerical Model Study of Turbulent Airflow in and Above a Forest Canopy *J. Meteor. Soc. Jap.* ,60, 439-454 (1982)
- 1-59) O.Naot and Y. Mahrer : Two-Dimensional Microclimate Distribution Within and Above a Crop Canopy in an Arid Environment : Modeling and Observational Studies *Boundary Lay. Meteor.* ,56, 223-244 (1991)
- 1-60) J.Kondo and S.Akashi : Numerical Studies on the Two-Dimensional Flow in Horizontally Homogeneous Canopy Layers, *Boundary Lay. Meteor.* ,10,255-272 (1976)
- 1-61) 近藤明, 山口克人, 田村直道 : 都市キャノピーを考慮した大気境界層のシミュレーション , 第9回計算力学講演会講演論文集, 225-226 (1996)
- 1-62) T.Ichinose, A.Urano and et.al.: Impact Analysis of Three Dimensional Replacement of Urban Activity on Urban Thermal Environment ,*Proceeding of the Second Japanese-German Meeting* - , 279-285 (1998)
- 1-63) 近藤裕昭 : 長距離輸送と複雑地形を対象とした大気拡散シミュレーションモデルについて, 公害 ,20 ,1-25 (1985)
- 1-64) 岡本眞一, 片谷教孝 : 大気汚染の長距離輸送モデル, 天気 ,35 ,461-478 (1988)
- 1-65) 市川陽一, 佐田幸一, 朝倉一雄 : 高次の乱流統計量をもとにした大気拡散モデル, 大気汚染学会誌 ,29 ,297-312 (1994)
- 1-66) 岡本眞一著: 大気環境アセスメントのためのコンピュータ流体解析の基礎, (社)産業環境管理協会 (1993)
- 1-67) B.J.Legg and M.R.Raupach : Markov-chain simulations of particle dispersion in inhomogeneous flows: the mean drift velocity induced by a gradient in Eulerian velocity variance, *Boundary Lay. Met.* ,24,3-13 (1982)

- 1-68) M.Segal,R.A.Pielke and et : Application of a Mesoscale Atmospheric Dispersion Modeling System to the Estimation of SO₂ Concentration from Major Elevated Source in Southern Florida , *Atmos. Environ.* ,22 ,1319-1334 (1988)
- 1-69) M.Segal,C.H.Yu, R.W.Artritt and R.A.Pielke : On the Impact of Valley/Ridge Thermally Induced Circulations on Regional Pollutant Transport, *Atmos. Environ.* ,22 ,471-486 (1988)
- 1-70) 池田有光, 平岡正勝, 河本達男 : 大気汚染光化学反応機構のモデル化, 大気汚染研究 ,11 ,463-484 (1977)
- 1-71) 北田敏広,L.K.Peters : CO-CH₄ 系のグローバルな輸送-反応モデル, 大気汚染学会誌 ,15 ,91-108 (1980)
- 1-72) M.C.Dodge : A Comparison of three Photochemical Oxidant Mechanism, *J. Geophys. Res.* ,94 ,5121-5136 (1989)
- 1-73) 小原利真, 酒巻史朗, 他 : スモッグチャンパーデータによる光化学反応モデルの比較検討, 大気汚染学会誌 ,26 ,246-259 (1991)
- 1-74) Michael W.Gery, Gary Z.Whitten, James P.Killus and Marcia C.dodge : A PHOTOCHEMICAL KINETICS MECHANISM FOR URBAN AND REGIONAL SCALE COMPUTER MODELING, *J. Geophys. Res.* , 94, 12925-12956 (1989)
- 1-75) G.Svensson : A Numerical Model for Chemical and Meteorological Processes in the Atmospheric Boundary Layer , Part II : Case Study of the Air Quality Situation in Athens, Greece, *J. Appl. Meteor.* , 35, 955-973 (1996)
- 1-76) 大原利真、若松伸司他: 光化学オキシダント・シミュレーションモデルの構築と検証, 大気環境学会誌, 32, 6-28 (1997)
- 1-77) 近藤明, 山口克人, 西川栄一他: 大阪湾岸地域の大気汚染濃度に与える船舶からの排出影響の検討, 関西造船協会講演集, 85-90 (1998)
- 1-78) A.C.Chamberlain and R.C.Chadwick : DEposition of airborne radio-iodine vapor, *Nucleonics* ,8 ,22-25 (1953)
- 1-79) T.A.McMahon and P.J.Denison : Empirical Atmospheric Deposition Parameters - A Survey, *Atmos. Environ.* ,13 ,571-585 (1979)
- 1-80) G.A.Sehmel : Particle and Gas Dry Deposition: A Review, *Atmos. Environ.* ,14 ,983-1011 (1980)
- 1-81) P.S.Pakasa, R.T. Khemani and et.al. : Measurement of Wet and Dry Deposition at an Aurban Location in India, *Atmos. Environ.* ,26B ,73-78 (1992)
- 1-82) J.Padro : Seasonal Contrasts in Modelled and Observed Dry Deposition Velocities of O₃, SO₂, and NO₂ Over Three Surfaces, *Atmos. Environ.* ,27A ,807-814 (1993)
- 1-83) W.G.Cobourn , K.L.Gauri and et.al. : Laboratory Measurements of Sulfur Dioxide Deposition Velocity on Marble and Dolomite Stone Surfaces, *Atmos. Environ.* ,27A ,193-201 (1993)

- 1-84) H.D.Orville : A Numerical Study of the Initiation of Cumulus Clouds over Mountains Terrain , *J.Atmos.Sci.* ,22 ,684-699 (1965)
- 1-85) J.Y.Lin and H.D.Orville : Numerical Modeling of Precipitation and Cloud Shadow Effects on Mountain-Induced Cumuli, *J.Atmos.Sci.* ,26 ,1283-1298 (1969)
- 1-86)]H.D.Orville and F.J.Kopp : Numerical Simulation of the Life History of a Hailstorm, *J.Atmos.Sci.* ,34 ,1596-1618 (1977)
- 1-87) Y.L.Lin, R.D.Farley and H.D.Orville : Bulk Parameterization of the Snow Field in a Cloud Model, *J.Climate Appl.Meteor.* ,22 ,1065-1092 (1983)
- 1-88) K.Ueyoshi and Y.J.Han : A Three-Dimensional Simulation of Airflow and Orographic Rain over the Island of Hawaii, *J.Meteor.Soc.Jap.* ,69 ,127-152 (1991)
- 1-89) M.S.Hong and G.R.Carmicheal : An Investigation of Sulfate Production in Clouds Using a Flow-Through Chemical Reaction Model Approach, *J.Geophys.Res.* ,88 ,10733-10743 (1983)
- 1-90) M.S.Hong and I.Y.Lee : Numerical Studie of Acidification Processes within and below Clouds with a Flow-Through Chemical Reaction Model, *Atmos.Environ.* ,22 ,297-305 (1988)
- 1-91) S.Kumar : An Eulerian Model for Scavenging of Pollutants by Raindrops, *Atmos.Environ.* ,19 ,769-778 (1985)
- 1-92) S.Kumar : Reactive Scavenging of Pollutants by Rain: A Modeling Approach, *Atmos.Environ.* ,20 ,1015-1024 (1986)

第2章 都市大気環境予測モデル

2.1 緒言

空気が地表近くを流れるとき、地表面による摩擦の影響を受ける。この影響は地表に近いほど強く、地表面からおおよそ1000 m近くまで及ぶ。この気層を大気境界層 (Atmospheric Boundary Layer) と呼び、地表の影響を強く受ける高さ数10mまでの気層は接地境界層 (Surface Boundary Layer) と呼ばれる。特に、建物や舗装面などの人工構造物によって覆われている境界層は、都市境界層 (Urban Boundary Layer) と呼ばれ、建物の隙間空間の気層は、都市キャノピ層 (Urban Canopy Layer) と呼ばれる。このようすを図2.1に示す²⁻¹⁾²⁻²⁾。本章では、都市境界層を含む大気境界層を対象として、流れ場予測モデルと大気濃度予測モデルの概要について説明を行う。

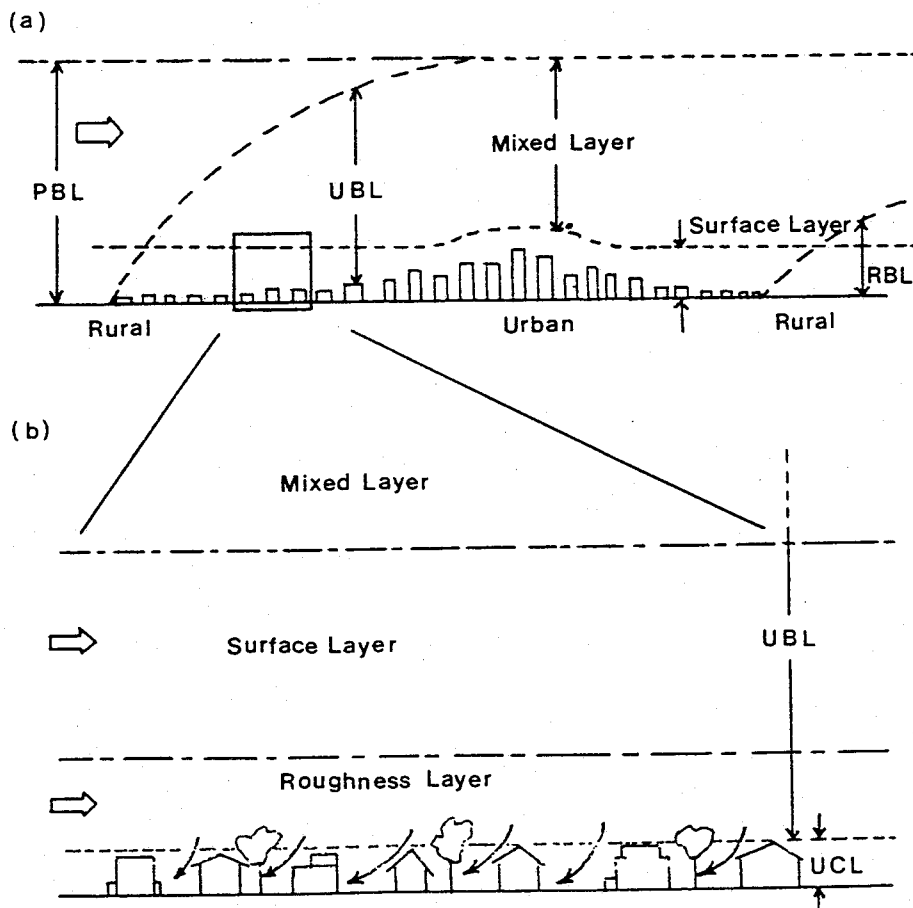


図 2.1 大気境界層の概念図 文献 2-1) より引用転載

表 2.1 モデルの分類

静水圧	shallow	密度一定
静水圧	deep	鉛直方向の密度変化は考慮
非静水圧	shallow	密度一定
非静水圧	deep	鉛直方向の密度変化は考慮
非静水圧	偽非圧縮	
非静水圧	圧縮	

2.2 都市境界層予測モデル

都市境界層予測モデルの基礎方程式は、運動量方程式、連続の式、温位および比湿の保存式から構成される。さらに、都市境界層予測モデルは、鉛直方向の乱流拡散係数を決定するための乱流モデル、接地境界層内の風速、温位および比湿を求めるための接地境界層モデル、地表面の温位、比湿を求めるための地表面熱収支モデルの各サブモデルを含んでいる。この節ではこれらのモデルの説明を行う。

2.2.1 基礎方程式

都市境界層予測モデルの基礎方程式は、運動方程式、連続の式、温位および比湿の保存式から構成される。鉛直方向の加速度が無視できるような気象現象（例えば海陸風）に対しては、一般的に静水圧モデルが用いられる。しかし、鉛直方向の加速度が無視出来ない気象現象（例えば積雲対流）や、モデル計算の水平距離が鉛直距離に比べて大きく無い場合には、静水圧近似が成り立たず、非静水圧モデルが用いられる。また、密度変化を無視するか、鉛直方向のみに密度変化を考える（水平方向の密度変化は無視）かによって shallow と deep のモデルが静水圧と非静水圧モデルのそれぞれに対して考えられる²⁻³⁾。水平方向の密度変化も考慮したモデルとして、偽非圧縮性モデル²⁻⁴⁾²⁻⁵⁾と圧縮性モデル²⁻⁶⁾²⁻⁷⁾がある。表 2.1に、解法の分類をまとめる。

海陸風の計算では、通常静水圧 shallow モデル^{例えば2-8)2-9)2-10)}が、積雲対流の計算では、非静水圧 deep モデル^{例えば2-11)2-12)2-13)}が多くのシミュレーションで用いられている。以下の章で示すように、本研究は海陸風を対象としているので、ここでは、静水圧 shallow モデルの基礎方程式を示す。

基礎方程式は、任意の地形を表現出来るように地形に沿った z^* 座標系 (z^* Coordinate) を用いて記述する。 z^* 座標系を用いると図 2.2に示すように地形の凹凸があっても直交座標系で方程式を取り扱うことが出来る。

z 座標から z^* 座標への変換は、式 (2.1) で表される。

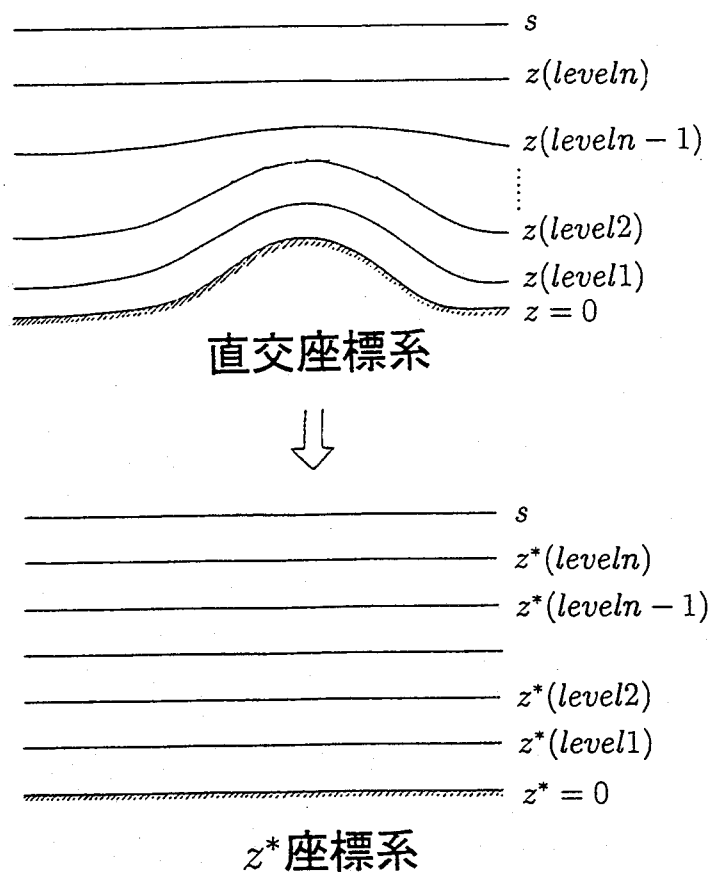
$$z^* = s \frac{z - z_G}{s - z_G} \quad (2.1)$$

ここで、 z_G は標高、 s は計算領域高さを表す。

また、 z^* 座標系で基礎方程式をを記述する際、便利なように以下に示す変数 G_1, G_2, G_3 を予め定義する。

$$G_1 = \frac{\partial z^*}{\partial z} = \frac{s}{s - z_G} \quad (2.2)$$

$$G_2 = \frac{\partial z^*}{\partial x} = \frac{z^* - s}{s - z_G} \frac{\partial z_G}{\partial x} \quad (2.3)$$

図 2.2 z 座標系から z^* 座標系への変換

$$G_3 = \frac{\partial z^*}{\partial y} = \frac{z^* - s}{s - z_G} \frac{\partial z_G}{\partial y} \quad (2.4)$$

1) 運動方程式

$$\frac{du}{dt} = fv - c_p \theta \frac{\partial \Pi}{\partial x} + g \frac{G_2}{G_1} + D(u) \quad (2.5)$$

$$\frac{dv}{dt} = -fu - c_p \theta \frac{\partial \Pi}{\partial y} + g \frac{G_3}{G_1} + D(v) \quad (2.6)$$

2) 連続の式

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w^*}{\partial z^*} - \frac{1}{z^* - s} (G_2 u + G_3 v) = 0 \quad (2.7)$$

3) 温位保存式

$$\frac{d\theta}{dt} = D(\theta) \quad (2.8)$$

4) 比湿保存式

$$\frac{dq_v}{dt} = D(q_v) \quad (2.9)$$

5) 静水力学の式

$$\frac{\partial \Pi}{\partial z^*} = -\frac{1}{G_1} \frac{g}{c_p \theta} \quad (2.10)$$

ここで, u, v, w は x, y, z 方向の速度, f はコリオリパラメータ, c_p は定圧比熱, θ は温位, Π はエクスナ関数, g は重力加速度, q_v は比湿, $D()$ は拡散項を表す.
エクスナ関数 (Π) は, 式 (2.11) で定義される.

$$\Pi = \left(\frac{P}{P_{00}} \right)^{\frac{R_d}{c_p}} \quad (2.11)$$

ここで, P, P_{00} はそれぞれ圧力, 基準圧力, R_d はガス定数を表す.
温位 (θ) とエクスナ関数 (Π) および温度 (T) には, 式 (2.12) の関係がある.

$$T = \Pi \theta \quad (2.12)$$

実質微分は, 式 (2.13) で定義される.

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w^* \frac{\partial}{\partial z^*} \quad (2.13)$$

ここで w^* は, z^* 座標系での鉛直速度に相当し, 式 (2.14) で表される.

$$w^* = G_1 w + G_2 u + G_3 v \quad (2.14)$$

拡散項 $D()$ は, 式 (2.15) で表される.

$$\begin{aligned} D() = & \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial}{\partial x} + K_H G_2 \frac{\partial}{\partial z^*} \right) + G_2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_H \frac{\partial}{\partial x} + K_H G_2 \frac{\partial}{\partial z^*} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_H \frac{\partial}{\partial y} + K_H G_3 \frac{\partial}{\partial z^*} \right) + G_3 \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_H \frac{\partial}{\partial y} + K_H G_3 \frac{\partial}{\partial z^*} \right) \\ & + G_1^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_V \frac{\partial}{\partial z^*} \right) \end{aligned} \quad (2.15)$$

ここで, K_H, K_V はそれぞれ水平および鉛直方向の拡散係数を表す.

2.2.2 乱流モデル

大気境界層の運動量の輸送を表す $\overline{u_i' u_j'}$ (変動速度の共分散) や熱量輸送を表す $\overline{u_i' \theta'}$ (変動速度と気温変動の共分散) を, 温度や速度などの既知量と結び付けてモデル化することを, 乱流モデルと言う. その中の一つに, closure モデルと呼ばれるものがある. 乱流場の物理量 (速度, 温位など) を平均値と変動量に分けて考え, これらを 2.2.1 節で示した基礎方程式に代入し, アンサンブル平均等の操作を行うと, $\overline{u_i' u_j'}$, $\overline{u_i' \theta'}$ などの共分散に関する微分方程式を導出することが出来る. しかし, 共分散の微分方程式の中には圧力との相関や三重相関などの未知量を含むため, 直接解くことができない. それで, これらの未知量を平均値や共分散などの既知量と結び付けてモデル化を行い方程式を完結させる. そのため, このモデル化は, closure モデルと呼ばれる.

Mellor & Yamada によって開発された closure モデル²⁻¹⁴⁾²⁻¹⁵⁾²⁻¹⁶⁾ は, 複雑さの程度によってモデルのレベルを 4 段階に分類している. Level4 は, 最も複雑なモデルで, 全ての共分散を診断方程式で解くモデルである. Level3 は, 乱流エネルギーと温位の共分散の 2 変数について診断方程式を解き, その他の共分散は代数式で解くモデルである. Level2 は更に簡単化され, 全ての共分散を代数式で解くモデルである. Level1 は, Level2 を更に簡略化し

たモデルである。また、乱流エネルギーのみを診断方程式で解くモデルを、Level3 と Level2 の中間に位置づけ Level2.5 と呼んでおり、多くの気象モデルで採用されている。積雲対流を含むモデルでは、水の相変化に乱流エネルギーの生成を考慮した closure モデル²⁻¹¹⁾が開発されている。また最近では、室内気流計算分野で開発されてきた $k-\epsilon$ モデル²⁻¹⁷⁾²⁻¹⁸⁾を、大気の乱流モデルへ応用する試みも行われ始めている。

本研究では、第3章の計算では Mellor & Yamada の Level2 モデルを、第4, 5章の計算では Mellor & Yamada の Level2.5 モデルを用いており、以下にこのモデルの説明を行う。

1) Level2 モデル

a) 乱流エネルギー q^2

$$q^2 = B_1 l^2 \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 (1 - Ri_f) S_M \quad (2.16)$$

b) レイノルズ応力 $\overline{w'^2}$

$$\overline{w'^2} = \left\{ \frac{1}{3} - 2 \frac{A_1}{B_1} - 6 \frac{A_1}{B_1} \left(1 - \frac{2}{3} C_2 \right) \frac{Ri_f}{1 - Ri_f} \right\} q^2 \quad (2.17)$$

c) レイノルズ応力 $\overline{u'w'}$

$$-\overline{u'w'} = l q S_M \frac{\partial U}{\partial z} \quad (2.18)$$

d) 共分散 $\overline{w'\theta'}$

$$-\overline{w'\theta'} = l q S_H \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (2.19)$$

e) 共分散 $\overline{u'\theta'}$

$$-\overline{u'\theta'} = -3 A_2 l^2 (S_M + S_H) \frac{\partial \theta}{\partial z} \frac{\partial U}{\partial z} \quad (2.20)$$

f) 共分散 $\overline{\theta'^2}$

$$\overline{\theta'^2} = B_2 l^2 S_H \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right)^2 \quad (2.21)$$

ここで、 Ri_f はフラックスリチャードソン数、 S_M, S_H は安定度関数、

$(A_1, A_2, B_1, B_2, C_1, C_2, C_3) = (0.78, 0.78, 15.0, 8.0, 0.056, 0.3, 0.33)$ は実験定数、 l は乱流の長さスケール、 $U = \sqrt{u^2 + v^2}$ は風速を表す。

乱れの長さスケールは、Blackadar²⁻¹⁹⁾の代数式から求めた。

g) 乱れの長さスケール l

$$l = \frac{\kappa z}{1 + \frac{\kappa z}{l_0}}, \quad l_0 = 0.1 \frac{\int_0^\infty z q dz}{\int_0^\infty q dz} \quad (2.22)$$

ここで、 κ はカルマン定数である。

フラックスリチャードソン数 Ri_f は, 次のように表される.

$$\begin{aligned} Ri_f &= \frac{\beta g \overline{w'\theta'}}{\overline{u'w'} \frac{\partial U}{\partial z}} \\ &= \frac{K_V^m}{K_V^\theta} \frac{\beta g \frac{\partial \theta}{\partial z}}{\left(\frac{\partial U}{\partial z}\right)^2} = \frac{K_V^m}{K_V^\theta} Ri_g = \frac{C_H}{C_M} \frac{R_{f2} - Ri_f}{R_{f1} - Ri_f} Ri_g \end{aligned} \quad (2.23)$$

ここで, K_V^m, K_V^θ は運動量および熱の鉛直拡散係数, Ri_g はグラディエントリチャードソン数, β は体積膨張率である.

安定度関数 S_M, S_H は, フラックスリチャードソン数を用いて各々次式で与えられる.

$$S_M = C_M \frac{(Ri_{fc} - Ri_f)(R_{f1} - R_f)}{(1 - Ri_f)(R_{f2} - Ri_f)} \quad (2.24)$$

$$S_H = C_H \frac{Ri_{fc} - Ri_f}{1 - Ri_f} \quad (2.25)$$

ここで, $Ri_{fc}, R_{f1}, R_{f2}, C_M, C_H$ も次式で示すように実験定数を用いて表される定数となる.

$$Ri_{fc} = \frac{E_1}{E_2} \quad (2.26)$$

$$(R_{f1}, R_{f2}) = \left(\frac{E_3}{E_4}, \frac{E_1}{E_5} \right) \quad (2.27)$$

$$C_M = \frac{A_1}{B_1} \frac{E_2 E_4}{E_5} \quad (2.28)$$

$$C_H = \frac{A_1}{B_1} E_2 \quad (2.29)$$

ここで, E_1 から E_5 は以下の式で表される.

$$E_1 = B_1 - 6A_1 \quad (2.30)$$

$$E_2 = B_1 + 12A_1(1 - C_2) + 3B_2(1 - C_3) \quad (2.31)$$

$$E_3 = B_1(1 - 3C_1) - 6A_1 \quad (2.32)$$

$$E_4 = B_1(1 - 3C_1) + 12A_1(1 - C_2) + 9A_2(1 - C_2) \quad (2.33)$$

$$E_5 = B_1 + 3A_1(1 - C_2) + 3B_2(1 - C_3) \quad (2.34)$$

また, 運動量と熱の鉛直乱流拡散係数は, 式 (2.18) と式 (2.19) から, 次のように表させる.

$$K_V^m = qlS_M \quad (2.35)$$

$$K_V^\theta = qlS_H \quad (2.36)$$

数値計算上で運動量と熱の乱流拡散係数を求めるためには、まず式(2.16), 式(2.22), 式(2.23), 式(2.24), 式(2.25)を収束するまで繰り返し計算を行い q, l を決定し、式(2.35)と式(2.36)から運動量と熱の乱流拡散係数を決定する。

2) Level2.5 モデル

基本的な考え方は、Level2 モデルと同じである。Level2 モデルとの違いは、乱流エネルギーを診断方程式で表す点である。

a) 乱流エネルギー方程式

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{q^2}{2} \right) = D \left(\frac{q^2}{2} \right) + \frac{s}{s - z_g} \left(-\overline{u'w'} \frac{\partial u}{\partial z^*} - \overline{v'w'} \frac{\partial v}{\partial z^*} \right) + \beta g \overline{w'\theta'} - \frac{q^3}{B_1 l} \quad (2.37)$$

ただし、拡散係数は $K_V = K_H = qlS_q$ である。 $S_q (=0.2)$ は実験定数である。

2.2.3 接地境界層モデル

地表面から高さ数 10m までは接地境界層と呼ばれ、そこでは運動量や熱の鉛直フラックスが一定とみなされる。本研究では、地表面付近では Monin-Obukhov の相似則が成立するとして、各方程式の地表面境界条件を決定した^{2-20) 2-21)}。

定常、水平一様な気層においては、

- 地表における摩擦応力, $\tau_g / \rho_a (\equiv -\overline{u'w'})$
- 地表における熱フラックス, $H_g / (\rho_a c_p) (\equiv -\overline{w'\theta'})$
- 浮力パラメータ, $g / \bar{\theta}$

によって、接地層内の物理量を決定できるというのが Monin-Obukhov の相似則である。ここで、 τ_g はせん断応力、 ρ_a は空気の密度、 H_g は地表からの熱フラックス、 $\bar{\theta}$ は平均温度である。これらのパラメータから、速度、温度、長さの次元を持つ量を作ると次のようになる。

1. 速度; $u_* \equiv (-\overline{u'w'})^{1/2}$ (摩擦速度)
2. 温度; $\theta_* \equiv -\overline{w'\theta'} / u_*$ (摩擦温度)
3. 長さ; $L \equiv -\frac{u_*^3 \bar{\theta}}{\kappa g \overline{w'\theta'}}$ (Monin-Obukhov の長さ)

L は大気の安定度によって変化するので、Monin-Obukhov の相似則では z/L を安定度のパラメータとして用いる。そして z/L は不安定で負、安定で正、中立で 0 になる。接地層内では u_* , θ_* , L は高さによらず一定である。接地層内の物理量を F とし、上記の 3 つの基本スケールで作った F と同じ次元の量を F_* とすると、

$$\frac{F}{F_*} = \phi(\zeta), \quad \zeta \equiv \frac{z}{L} \quad (2.38)$$

が成立し、 ϕ は ζ の普遍関数 (universal function) で与えられる。 ϕ の具体的な形は多くの実測などによって、風速や気温の平均値の鉛直分布について求められている。本研究では Businger, et al. (1971)²⁻²²⁾ の提案式を用いた。

不安定側

$$\begin{cases} \phi_m = 1.14(1 - 13.1\zeta)^{-1/4}, & \zeta \leq 0 \\ \phi_h = 0.84(1 - 7.9\zeta)^{-1/2}, & \zeta \leq 0 \end{cases} \quad (2.39)$$

安定側

$$\begin{cases} \phi_m = 1.14(1 + 4.1\zeta), & \zeta > 0 \\ \phi_h = 1.14(0.74 + 4.1\zeta), & \zeta > 0 \end{cases} \quad (2.40)$$

この Monin-Obukhov の相似則を用いると、例えば、平均風速の勾配は次のように表される。

$$\phi_m(\zeta) = \frac{\kappa z}{u_*} \frac{\partial u}{\partial z} \quad (2.41)$$

また、平均温位の勾配は次のように表される。

$$\phi_h(\zeta) = \frac{\kappa z}{\theta_*} \frac{\partial \theta}{\partial z} = -\rho_a c_p \frac{\kappa u_* z}{H_g} \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (2.42)$$

接地層では、せん断応力および鉛直上向きの熱フラックスは一定であると仮定できるので、平均風速のプロファイルに関しては、式 (2.41) を z 方向に積分すると求めることができる。

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \Psi_m(\zeta). \quad (2.43)$$

ただし、 Ψ_m は次式で与えられる。

$$\Psi_m(\zeta) = \int_{\zeta_0}^{\zeta} \phi_m(\zeta') / \zeta' d\zeta', \quad \zeta_0 = z_0 / L \quad (2.44)$$

ここで z_0 は地面の粗度高さである。同様に平均気温のプロファイルに関しては、式 (2.42) より求めることができる。

$$\theta(z) - \theta(z_0) = \frac{\theta_*}{\kappa} \Psi_h(\zeta) = -\frac{H_g}{\rho_a c_p \kappa u_*} \Psi_h(\zeta) \quad (2.45)$$

$$\Psi_h(\zeta) = \int_{\zeta_0}^{\zeta} \phi_h(\zeta') / \zeta' d\zeta'. \quad (2.46)$$

平均比湿のプロファイルに関しては、平均気温に対する普遍関数 ϕ_h に等しいと仮定した。

$$q_v(z) - q_v(z_0) = \frac{q_{v*}}{\kappa} \Psi_h(\zeta) = -\frac{E_g}{\rho_a \kappa u_*} \Psi_h(\zeta). \quad (2.47)$$

ここで、 q_{v*} は摩擦比湿、 E_g は地表からの蒸発フラックスである。高さが z_0 での風速は 0 とし、温位と比湿は Mahrer(1977)²⁻²³⁾ の提案式を用いた。

$$\theta(z_0) = \theta_g + 0.0962 \frac{\theta_*}{\kappa} \left(\frac{u_* z_0}{\nu} \right) \quad (2.48)$$

$$q_v(z_0) = q_{vg} + 0.0962 \frac{q_{v*}}{\kappa} \left(\frac{u_* z_0}{\nu} \right). \quad (2.49)$$

ここで θ_g は地表面温位、 ν は空気の動粘性係数、 q_{vg} は地表面比湿である。

次に接地層での乱流拡散係数を求める。地表面のせん断応力 τ_g は、

$$\tau_g = \rho_a u_*^2 \quad (2.50)$$

であるので, 式 (2.41) を用いて変形すると,

$$\tau_g = \rho_a \frac{\kappa u_* z}{\phi_m} \frac{\partial u}{\partial z}. \quad (2.51)$$

となる. よって接地層での運動量の乱流拡散係数は次のよう表される.

$$K_V^m = \frac{\kappa u_* z}{\phi_m}. \quad (2.52)$$

接地層での熱フラックスは式 (2.42) より,

$$H_g = -\rho_a c_p \frac{\kappa u_* z}{\phi_h} \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (2.53)$$

となるので, 温位の拡散係数は次のように表される.

$$K_V^\theta = \frac{\kappa u_* z}{\phi_h}. \quad (2.54)$$

次に, 接地層では乱流長さスケールは,

$$l = \kappa z \quad (2.55)$$

と仮定し, 乱流エネルギーは生成項と消滅項が釣り合っている (乱れの局所平衡) と仮定すると, 接地層での乱流エネルギーは次式のように表される (Yamada (1982)²⁻¹⁶⁾).

$$q^2 = B_1^{2/3} u_*^2 (\phi_m - \zeta)^{2/3}. \quad (2.56)$$

以上をまとめると Monin-Obukhov の相似則から各方程式の境界条件は以下のように決定できる.

$$u(z) = v(z) = \frac{u_*}{\kappa} \Psi_m \quad (2.57)$$

$$\theta(z) - \theta(z_0) = \frac{\theta_*}{\kappa} \Psi_h \quad (2.58)$$

$$q_v(z) - q_v(z_0) = \frac{q_{v*}}{\kappa} \Psi_h \quad (2.59)$$

$$q^2 = B_1^{2/3} u_*^2 (\phi_m - \zeta)^{2/3} \quad (2.60)$$

2.2.4 地表面熱収支モデル

人工的に改変されていない地表面の多くは, 植生に覆われており地表面温度を決定する際にはその影響を無視することはできない. ここでは, 植生層を考慮した熱収支および土壌表面比湿を求めるためのモデル²⁻²⁴⁾について述べる.

植生を熱の貯蔵を無視できる単層と仮定し, 植生が地表面を覆う割合を示す被覆度をパラメータにしてモデル化を行った. モデルでは, まず植生頂上で熱収支式をたてて, 植生の葉の代表温度を決定し, 次に地表面での熱収支式から地表の温度と比湿を決定する2層構造となっている. Fig.2.3に, 植生を考慮した熱収支モデルの概念図を示す.

植生頂上での熱収支式は, 次のように表すことができる.

$$\begin{aligned} & S_h \downarrow + R_h \downarrow - S_h \uparrow - R_h \uparrow \\ & - (S_g \downarrow + R_g \downarrow - S_g \uparrow - R_g \uparrow) = H_h - H_g + L_w (E_h - E_g) \end{aligned} \quad (2.61)$$

ここで, S は太陽の短波放射フラックス, R は長波放射フラックス, H は顕熱フラックス, $L_w E$ は潜熱フラックスである. また, 矢印はフラックスの向きを示し, サフィックス h は植生頂上, g は地表面を示す.

植生頂上の太陽の短波放射フラックスは次のように表される.

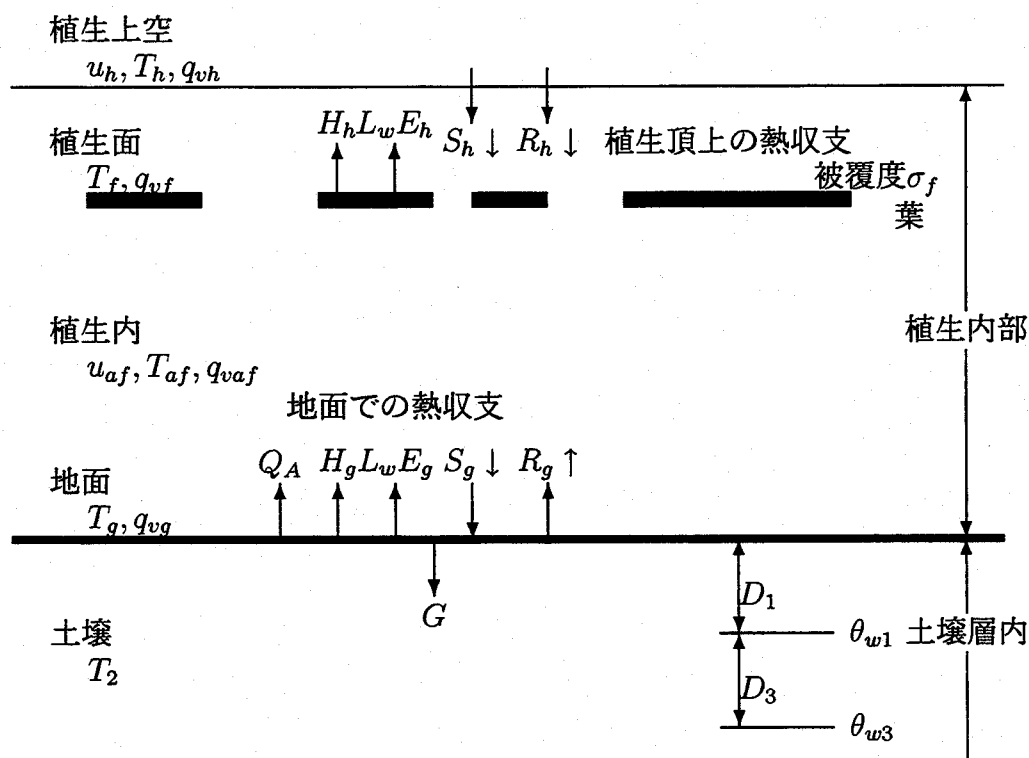


図 2.3 熱収支モデルの概念図

$$S_h \downarrow = T_r R_0 \cos Z \quad (2.62)$$

ここで、 Z は天頂角、 T_r は大気透過率、 R_0 は太陽定数である。そして、天頂角 Z は次式で表される。

$$\cos Z = \sin \phi_{lati} \sin \delta + \cos \phi_{lati} \cos \delta \cos h \quad (2.63)$$

ここで、 ϕ_{lati} は緯度、 δ は赤緯、 h は太陽時角である。そして、太陽時角 h は次式で表される。

$$h = 15(t_{JST} - 12) + \phi_{long} - 135 + \frac{e_h}{4} \quad (2.64)$$

ここで、 t_{JST} は日本標準時間、 ϕ_{long} は経度、 e_h は均時差である。

雲や水蒸気を含む大気からの長波放射フラックス²⁻²⁵⁾は次式で表される。

$$R_h \downarrow = \{C_{cloud} + (1 - C_{cloud})0.67(1670q_{vh})^{0.08}\} \sigma T_h^4 \quad (2.65)$$

ここで、 C_{cloud} は雲量、 q_{vh} は植生頂上での比湿、 σ は Stefan-Boltzman 定数、 T_h は植生頂上での気温である。

式 (2.62) の短波放射フラックスと式 (2.65) の長波放射フラックスは、地表面が平坦の場合であり、平坦でない場合は斜面の影響を考慮しなければならない²⁻²⁶⁾²⁻²⁷⁾。斜面の方位角 η_{slope} と傾斜角 α_{slope} は、次のように表される。

$$\eta_{slope} = \begin{cases} \tan^{-1} \left(\frac{\frac{\partial z_G}{\partial x}}{\frac{\partial z_G}{\partial y}} \right) & \frac{\partial z_G}{\partial y} > 0 \\ \tan^{-1} \left(\frac{\frac{\partial z_G}{\partial x}}{\frac{\partial z_G}{\partial y}} \right) + \pi & \frac{\partial z_G}{\partial y} < 0 \\ -\frac{\pi}{2} & \frac{\partial z_G}{\partial y} = 0, \frac{\partial z_G}{\partial x} < 0 \\ \frac{\pi}{2} & \frac{\partial z_G}{\partial y} = 0, \frac{\partial z_G}{\partial x} > 0 \end{cases} \quad (2.66)$$

方位角 η_{slope} は、南を0とし、東側をマイナス、西側をプラスと考える。

$$\alpha_{slope} = \tan^{-1} \sqrt{\left(\frac{\partial z_G}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z_G}{\partial y} \right)^2} \quad (2.67)$$

次に、太陽の方位角 η_{sun} について考える。太陽は、春分と秋分に真東から昇り、真西に沈む。真南の方位角を0とすると、春分と秋分の方位角は、 $-\pi/2 \leq \eta_{sun} \leq \pi/2$ となる。春分から秋分にかけての方位角は、真東、真西よりも北側によった範囲となる。このことを考慮すると、太陽の方位角は次のように表される。

$$\cos \eta_{sun} = -\cos \phi_{lati} \sin \delta + \sin \phi_{lati} \cos \delta \cos h \quad (2.68)$$

$$\sin \eta_{sun} = \frac{\cos \delta \sin h}{\sin Z} \quad (2.69)$$

$$\eta_{sun} = \begin{cases} \tan^{-1} \left(\frac{\sin \eta_{sun}}{\cos \eta_{sun}} \right) & \cos \eta_{sun} \geq 0 \\ \tan^{-1} \left(\frac{\sin \eta_{sun}}{\cos \eta_{sun}} \right) + \pi & \cos \eta_{sun} < 0 \end{cases} \quad (2.70)$$

式(2.66), 式(2.67), 式(2.68), 式(2.69), 式(2.70)で定義した、斜面の方位角, 傾斜角と太陽の方位角を用いて, 平坦地に対する短波放射フラックス, 長波放射フラックスの式を修正すると, 次のように表される。

$$S_h \downarrow = T_r R_0 \cos i \quad (2.71)$$

$$R_h \downarrow = \left\{ C_{cloud} + (1 - C_{cloud}) 0.67 (1670 q_{vh})^{0.08} \right\} \sigma T_h^4 \cos \alpha_{slope} \quad (2.72)$$

ここで, i は斜面に対する太陽の入射角で, 次式で表される。

$$\cos i = -\cos \alpha_{slope} \cos Z + \sin \alpha_{slope} \sin Z \cos(\eta_{sun} - \eta_{slope}) \quad (2.73)$$

式(2.71)と式(2.72)で定義された短波放射と長波放射を用いて, 式(2.61)の残りの短波, 長波放射フラックスは以下のように表すことができる。

$$S_g \downarrow = (1 - \sigma_f) S_h \downarrow \quad (2.74)$$

$$S_g \uparrow = \alpha_g (1 - \sigma_f) S_h \downarrow \quad (2.75)$$

$$R_g \uparrow = (1 - \sigma_f) \left\{ \epsilon_g \sigma T_g^4 + (1 - \epsilon_g) R_h \downarrow \right\} + \sigma_f \frac{\epsilon_g \sigma T_g^4 + (1 - \epsilon_g) \epsilon_f \sigma T_f^4}{\epsilon_f + \epsilon_g - \epsilon_f \epsilon_g} \quad (2.76)$$

$$S_h \uparrow = (1 - \epsilon_f) \alpha_g S_h \downarrow + \sigma_f \alpha_f S_h \downarrow \quad (2.77)$$

$$R_h \uparrow = (1 - \sigma_f) \left\{ \epsilon_g \sigma T_g^4 + (1 - \epsilon_g) R_h \downarrow \right\} + \sigma_f \left\{ \epsilon_f \sigma T_f^4 + (1 - \epsilon_g) R_h \downarrow \right\} \quad (2.78)$$

$$R_g \downarrow = (1 - \sigma_f) R_h \downarrow + \sigma_f \frac{\epsilon_f \sigma T_f^4 + (1 - \epsilon_f) \epsilon_g \sigma T_g^4}{\epsilon_f + \epsilon_g - \epsilon_f \epsilon_g} \quad (2.79)$$

ここで, σ_f は単位面積当たりの葉の被覆度, α_g は地面のアルベド, α_f は葉のアルベド, ϵ_g は地面の射出率, ϵ_f は葉の射出率, T_g は地面の温度, T_f は葉の代表温度である.

単位面積当たりの葉からまわりの空気への正味の顕熱フラックス H_f と, 単位面積当たりの葉からのまわりの空気への正味の蒸発量 E_f を次のように表す.

$$H_f = H_h - H_g \quad (2.80)$$

$$E_f = E_h - E_g \quad (2.81)$$

葉の代表的な顕熱フラックスは, 次のように求めることができる.

$$H_{leaf} = \rho_a c_p C_f u_{af} (T_f - T_{af}) \quad (2.82)$$

ここで, $C_f = 0.01 \left(1 + \frac{0.3}{u_{af}} \right)$ は葉の両面に対する輸送係数, u_{af} は植生層内の風速, T_{af} は植生層内の温度, c_p は空気の定圧比熱, ρ_a は空気の密度である. 植生層内の風速は, 次式で与える.

$$u_{af} = 0.83 \sigma_f C_{Hh}^{1/2} u_h + (1 - \sigma_f) u_h \quad (2.83)$$

植生層内の温度は, 葉面温度と地表面温度の重み付き平均で与えることとする.

$$T_{af} = (1 - \sigma_f) T_h + \sigma_f (0.3 T_h + 0.6 T_f + 0.1 T_g) \quad (2.84)$$

単位面積当たりの正味の葉の総面積 LAI をとすると, 単位面積あたりにおける葉からまわりの空気への正味の顕熱フラックスは,

$$H_f = 1.1 \text{LAI} H_{leaf} = 1.1 \text{LAI} \rho_a c_p C_f u_{af} (T_f - T_{af}) \quad (2.85)$$

である. ここで, 係数 1.1 は熱を交換するが水分を蒸散しない葉茎, 茎, 枝の影響を考慮したものである.

単位面積当たりの正味の葉の総面積 LAI は, 被覆度 σ_f と次の関係が成り立つ.

$$\text{LAI} = F_{num} \sigma_f \quad (2.86)$$

ここで, F_{num} は単位面積当たりの葉の枚数である.

同様に葉の代表的な蒸発率は, 次のように求めることができる.

$$E_{leaf} = \rho_a C_f u_{af} (q_{vsat}(T_f) - q_{vaf}) r'' \quad (2.87)$$

ここで, q_{vaf} は植生層内の比湿で, 葉面比湿と地表面比湿の重み付き平均で与えることとする.

$$q_{vaf} = (1 - \sigma_f) q_{vh} + \sigma_f (0.3 q_{vh} + 0.6 q_{vf} + 0.1 q_{vg}) \quad (2.88)$$

また, r'' は葉からの潜在的な蒸散量の割合を表し, 次式で表される.

$$r'' = 1 - \delta_c \frac{r_{stma}}{r_{stma} + r_{af}} \left\{ 1 - \left(\frac{W_{dew}}{W_{dmax}} \right)^{2/3} \right\} \quad (2.89)$$

ここで, r_{stma} は気孔抵抗, r_{af} は植生層内の空気抵抗, W_{dew} は単位面積当たり葉の上の水分量, W_{dmax} は単位面積当たり葉の上の最大水分量 ($W_{dmax} = \sigma_f$), δ_c はステップ関数で, 葉の上で凝結が起こっているときは0, そうでないときは1をとる. q_{vaf} は植生層内の水蒸気比湿, $q_{vsat}(T_f)$ は葉面の飽和水蒸気比湿である.

以上から, 単位面積当たりの葉からのまわりの空気への正味の蒸発量は,

$$E_f = LAI E_{leaf} = LAI \rho_a C_f u_{af} (q_{vsat}(T_f) - q_{vaf}) r'' = r'' (E_f)_{pot} \quad (2.90)$$

である. $(E_f)_{pot}$ は植生からの潜在的な蒸発量をあらわす. もし, $\delta_c = 0$ ならば, 正味の蒸発量 E_f は, 葉の上の凝結量を表す. $\delta_c = 1$, $W_{dew} = 0$ は, 葉からの蒸散量を表し, $\delta_c = 1$, $W_{dew} > 0$ ならば, 凝結水分の蒸発と蒸散の両方が起こっていることを表している. また, 単位面積当りの蒸散量は,

$$E_{tr} = \delta_c (E_f)_{pot} \frac{r_{af}}{r_{stma} + r_{af}} \left\{ 1 - \left(\frac{W_{dew}}{W_{dmax}} \right)^{2/3} \right\} \quad (2.91)$$

で与えられる. 上式の右辺の最後の項は, 露で覆われていない葉の割合を示している. 葉の水蒸気に対する気孔抵抗は, 次式で与えられる.

$$r_{stma} = r_c \left\{ \frac{S_{max} \downarrow}{S_h \downarrow + 0.03 S_{max} \downarrow} + \left(\frac{\theta_{wilt}}{\theta_{root}} \right)^2 \right\} \quad (2.92)$$

ここで, r_c は植物によって変わる抵抗係数, $S_{max} \downarrow$ は太陽放射の最大値, θ_{wilt} は植物がしおれる土中水分量, $\theta_{root} = 0.6 \theta_{w3} + 0.3 \theta_{w2} + 0.1 \theta_{w1}$ は植物の根の付近の水分量, θ_{wi} は第 i 層の土中水分量である.

式 (2.92) で表される気孔抵抗は, 蒸散が盛んな短波放射の強い日中に小さくなり, また土中水分量が多いと小さくなることを表している.

植生層内の空気抵抗は, 次式で与えられる.

$$r_{af} = \frac{1}{C_f u_{af}} \quad (2.93)$$

以上の結果を用いて式 (2.61) を書き直すと以下のようなになる.

$$\begin{aligned} & \sigma_f \left\{ (1 - \alpha_f) S_h \downarrow + \epsilon_f R_h \downarrow \right. \\ & \quad \left. + \frac{\epsilon_f \epsilon_g}{\epsilon_f + \epsilon_g - \epsilon_f \epsilon_g} \sigma T_g^4 \right. \\ & \quad \left. - \frac{\epsilon_f + 2\epsilon_g - \epsilon_f \epsilon_g}{\epsilon_f + \epsilon_g - \epsilon_f \epsilon_g} \epsilon_f \sigma T_f^4 \right\} = LAI \rho_a C_f u_{af} \\ & \quad \times \{ 1.1 c_p (T_f - T_{af}) \\ & \quad + L_w r'' (q_{vsat}(T_f) - q_{vaf}) \} \end{aligned} \quad (2.94)$$

この式から葉の代表温度 T_f を求める。しかし、この式は、 T_f の4次式で非線形であるので直接解くことができない。それで、Newton-Rapson 法を用い繰り返し計算を行う。

$$f(T_f) = \sigma_f \left\{ (1 - \alpha_f) S_h \downarrow + \epsilon_f R_h \downarrow + \frac{\epsilon_f \epsilon_g}{\epsilon_f + \epsilon_g - \epsilon_f \epsilon_g} \sigma T_g^4 - \frac{\epsilon_f + 2\epsilon_g - \epsilon_f \epsilon_g}{\epsilon_f + \epsilon_g - \epsilon_f \epsilon_g} \epsilon_f \sigma T_f^4 \right\} - LAI \rho_a C_f u_{af} \times \{1.1 c_p (T_f - T_{af}) + L_w r'' (q_{vsat}(T_f) - q_{vaf})\} \quad (2.95)$$

$$f'(T_f) = \sigma_f \left(-4 \frac{\epsilon_f + 2\epsilon_g - \epsilon_f \epsilon_g}{\epsilon_f + \epsilon_g - \epsilon_f \epsilon_g} \epsilon_f \sigma T_f^3 \right) - LAI \rho_a C_f u_{af} \left\{ 1.1 c_p + L_w r'' \frac{dq_{vsat}(T_f)}{dT_f} \right\} \quad (2.96)$$

ここで、Clausius-Clapeyron の式、および Tetens の式（飽和水蒸気比湿を温度の関数で求める式）を使うと、飽和水蒸気比湿を温度で偏微分した式は次式で表される。

$$\frac{dq_{vsat}}{dT} = \frac{4098 q_{vsat} (0.622 + q_{vsat})}{0.622 (T - 35.86)^2} \quad (2.97)$$

以上より、 T_f は計算することができる。

葉の代表温度 T_f を用いて、葉の表面付近の代表的な比湿は、次式で与える。

$$q_{vf} = r'' q_{vsat}(T_f) + (1 - r'') q_{vaf} \quad (2.98)$$

単位面積あたりの葉の上の水分量 W_{dew} は、次式から計算する。

$$\frac{\partial W_{dew}}{\partial t} = \sigma_f P_g - (E_f - E_{tr}) \quad 0 \leq W_{dew} \leq W_{dmax} \quad (2.99)$$

ここで、 P_g は降雨量、 $E_f - E_{tr}$ は、葉からの蒸発、または葉の上への凝結量を表す。

地表面でのエネルギー収支式は、次式のように表される。

$$-G = H_g + L_w E_g - (1 - \alpha_g) S_g \downarrow + R_g \uparrow - R_g \downarrow + Q_A \quad (2.100)$$

ここで、 G は地面への熱フラックス、 Q_A は人工排熱フラックス、 α_g は地面のアルベドである。

地面のアルベド α_g は、地面の水分含有量の関数として与えられる。

$$\alpha_g = \begin{cases} 0.31 - 0.17 \frac{\theta_{w1}}{\theta_{s1}} & \theta_{w1} \leq \theta_{s1} \\ 0.14 & \theta_{w1} > \theta_{s1} \end{cases} \quad (2.101)$$

ここで、 θ_{si} は第 i 層の飽和土中水分量である。

地表面の顕熱フラックスと蒸発量は、以下のように求めることができる。

$$H_g = \rho_a c_p C_{Hg} u_{af} (T_g - T_{af}) \quad (2.102)$$

$$E_g = \rho_a C_{Hg} u_{af} (q_{vg} - q_{vaf}) \quad (2.103)$$

植生層下の熱および水分の輸送係数は、接地境界層の無次元風速プロファイルと温度プロファイルとカルマン定数を用いて、次のように表される²⁻²⁸⁾。

$$C_{Hg} = \frac{\kappa^2}{\{\psi_m(\zeta) - \psi_m(\zeta_0)\} \{\psi_h(\zeta) - \psi_h(\zeta_0)\}} \quad (2.104)$$

土の熱特性は、土の種類よりも土の水分量によって大きく変わる。それで、土中の熱容量と熱伝導を以下のように水分の関数で与える。ここで、サフィックス g は地表面近くの土を、2 は地表面の影響を受けない深さの土を表す。

1. 土の熱容量 $\rho_{soil}c_{soil}$

$$(\rho_{soil}c_{soil})_g = 0.27 + \theta_{w1} \quad (2.105)$$

$$(\rho_{soil}c_{soil})_2 = 0.27 + \theta_{w3} \quad (2.106)$$

2. 土の熱伝導率 λ

$$\lambda_g = 0.001 + 0.004(\theta_{w1})^{1/2} \quad (2.107)$$

$$\lambda_2 = 0.001 + 0.004(\theta_{w3})^{1/2} \quad (2.108)$$

3. 1日周期の土壌深さ d_1

$$(d_1)_g = \left\{ \frac{\tau_1 \lambda_g}{(\rho_{soil}c_{soil})_g} \right\}^{1/2} \quad (2.109)$$

$$(d_1)_2 = \left\{ \frac{\tau_1 \lambda_2}{(\rho_{soil}c_{soil})_2} \right\}^{1/2} \quad (2.110)$$

ここで、 τ_1 は1日 (=86400s) である。

地表面近くの土と地表面の影響を受けない土の物性値が大きく異なる場合、force restore法で用いる土の物性値 $\rho_{soil}c_{soil}d_1$ を、次のように定式化した。

$$\rho_{soil}c_{soil}d_1 = r'(\rho_{soil}c_{soil})_g(d_1)_g + (1 - r')(\rho_{soil}c_{soil})_2(d_1)_2 \quad (2.111)$$

ここで、

$$r' = 0.3 + 0.05 \frac{\theta_{w1}}{\theta_{w3}} \quad (2.112)$$

この土の物性値 $\rho_{soil}c_{soil}d_1$ を用いて、次式の force restore 法により地表面温度を求める。

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} = c_{T1} \frac{G}{\rho_{soil}c_{soil}d_1} - c_{T2} \frac{T_g - T_2}{\tau_1} \quad (2.113)$$

ここで、 $c_{T1} = 2\sqrt{\pi}$ 、 $c_{T2} = 2\pi$ は定数、 T_2 は1日周期の影響を受けない土の温度である。定数 c_{T1} 、 c_{T2} は、土中への熱フラックス G をサイン関数で与えたときの厳密解から決定された値である。

1日の周期変化をしない土中の深さ d_2 における温度は、次式により求める。

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{G}{\rho_{soil} c_{soil} d_2} \quad (2.114)$$

ここで, $d_2 = (365 \kappa_{soil} \tau_1)^{1/2}$ は1日の周期変化をしない土中の深さ, κ_{soil} は土の熱拡散係数である.

地表面での水蒸気比湿の決定方法には, α 法と β 法がある²⁻²⁹⁾²⁻³⁰⁾. α 法は, 地表面の飽和水蒸気比湿にある係数を掛けて, 地表面の水蒸気比湿を求める方法である. β 法は, 地表面の飽和水蒸気比湿と地表面上空の比湿の重み計算で求める方法である. 本計算では, F.Acs²⁻³¹⁾による α 法を用いた.

$$q_{vg} = \alpha' q_{vsat}(T_g) \quad (2.115)$$

ここで, 比例係数 α' は次式で与える.

$$\alpha' = 1 - \left(\frac{\theta_{s1} - \theta_{w1}}{\theta_{s1}} \right)^3 \quad (2.116)$$

また, 土壌層は3層に分けて土壌水分収支を求めた. 3層モデルの各層の土壌水分の保存式は, 以下のように表される.

$$\frac{\partial \theta_{w1}}{\partial t} = \frac{1}{D_1} \left(P_g - Q_{1,2} - \frac{E_g + 0.1 E_{tr}}{\rho_w} \right) \quad (2.117)$$

$$\frac{\partial \theta_{w2}}{\partial t} = \frac{1}{D_2} \left(Q_{1,2} - Q_{2,3} - \frac{0.3 E_{tr}}{\rho_w} \right) \quad (2.118)$$

$$\frac{\partial \theta_{w3}}{\partial t} = \frac{1}{D_3} \left(Q_{2,3} - Q_3 - \frac{0.6 E_{tr}}{\rho_w} \right) \quad (2.119)$$

ここで, D_i は第*i*層の土壌厚さ, $Q_{i,i+1}$ は第*i*層と*i+1*層間の流速, ρ_w は水の密度である. そして, $Q_{i,i+1}$ は次式で表される.

$$Q_{i,i+1} = \overline{K_{i,i+1}} \left(2 \frac{\psi_{p(i)} - \psi_{p(i+1)}}{D_i + D_{i+1}} + 1 \right) \quad (2.120)$$

ここで, $\overline{K_{i,i+1}}$ は第*i*層と*i+1*層の平均透水係数で次式で与えられる.

$$\overline{K_{i,i+1}} = \frac{D_i K_i + D_{i+1} K_{i+1}}{D_i + D_{i+1}} \quad (2.121)$$

第*i*層の透水係数 K_i は, Clapp-Hornberger²⁻³²⁾の実験式から

$$K_i = K_{sati} \left(\frac{\theta_{wi}}{\theta_{si}} \right)^{2B_i+3} \quad (2.122)$$

で表される. また, 第*i*層の土壌水分ポテンシャル $\psi_{p(i)}$ も, Clapp-Hornberger²⁻³²⁾の実験式から,

$$\psi_{p(i)} = \psi_{p(sati)} \left(\frac{\theta_{wi}}{\theta_{si}} \right)^{-B_i} \quad (2.123)$$

と表される. ここで, K_{sati} は飽和透水係数, $\psi_{p(sati)}$ は飽和土壌水分ポテンシャル, B_i は, 土による実験定数である.

また, 土壌層低面からの水の流出は, 次式で表される.

$$Q_3 = K_{sat3} \left(\frac{\theta_{w3}}{\theta_{s3}} \right)^{2B_3+3} \sin \alpha_{inc} \quad (2.124)$$

ここで, α_{inc} は流出面の平均勾配である.

2.3 都市キャノピモデル

都市の建物群によって形成される隙間空間を都市キャノピ層という。都市キャノピ層内では、建物壁面によって受ける太陽放射量は時間と建物形状によって変化し、また建物壁面間と天空で輻射交換を行うため、壁面が受ける正味の放射量を推定するのが困難である。この節では、都市キャノピ形状をモデル化し、壁面が受ける正味の放射量を推定する方法を説明する。また、都市キャノピを含む大気境界層の基礎方程式についても説明を行う。

2.3.1 都市キャノピ形状のモデル化

都市キャノピ構造は、Fig.2.4a に示すように、同じ大きさの建物が規則正しく格子状に配置されるとモデル化する。その中で、1つの建物だけを含む小領域をブロックと名付け、Fig.2.4b にその様子を示す。ブロックは、 $W_{sx} \times W_{sy}$ 四方の大きさを持ち、その中に横 W_{bx} × 縦 W_{by} × 高さ (キャノピ高さ) h_c の建物が建っているとする。

2.3.2 キャノピ内での熱収支モデル

都市キャノピ内の壁面、地面および屋上面の微小面 i についての熱収支式を式 (2.125) に示す。

$$R_{net,i} = G_i + H_i + L_w E_i \quad (2.125)$$

ここで R_{net} は正味放射フラックス、 G は表面内部への熱フラックス (内部に入る方向を正)、 H 、 $L_w E$ はそれぞれ顕熱、潜熱フラックス (外部へ出ていく方向を正) である。

微小面 i の正味放射フラックス $R_{net,i}$ は、式 (2.126) で表される。

$$R_{net,i} = a_{b,i} R_{S \downarrow} - \epsilon_i \sigma T_i^4 + \epsilon_i \left[F_{is} R_{L \downarrow} + \sum_{j, j \neq s} F_{ij} \epsilon_j \sigma T_j^4 \right] \quad (2.126)$$

$i \neq j$ $i, j \neq s$

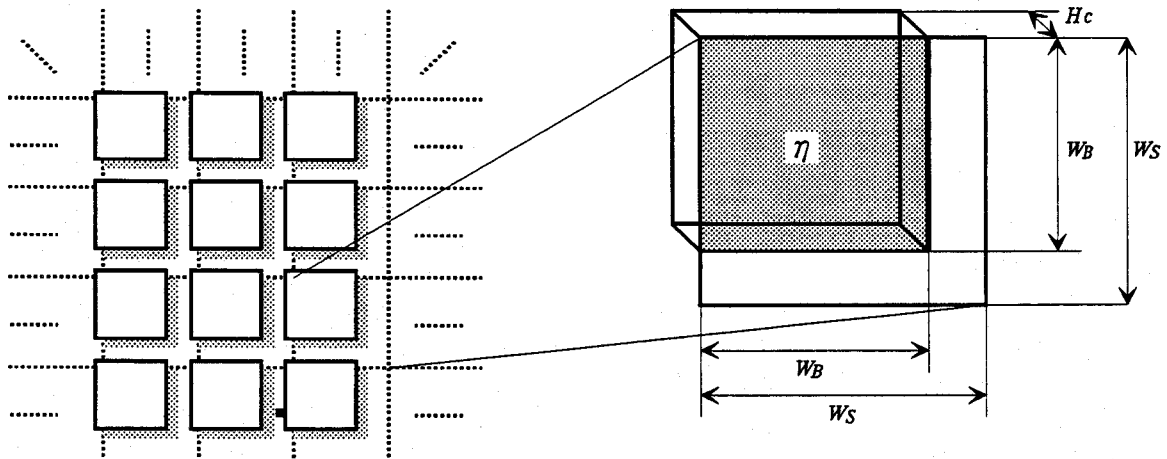


図 2.4 都市キャノピ構造のモデル化 (a) とブロック (b)

ここで $a_{b,i}$ は、面 i が受ける短波放射フラックスの都市キャノピ上空の短波放射フラックスに対する比率、 F_{ij} は、面 i から面 j をみたときの形態係数である。 $a_{b,i}$ と F_{ij} の算出方法は2.3.3節で記述する。なお、サフィックス $i = s$ は天空面を表す。また、 $R_S \downarrow$, $R_L \downarrow$ はそれぞれ都市上面に入射する短波、長波放射フラックス、 σ は Stefan-Boltzman 定数、 ϵ は長波放射フラックスの射出率、 T は表面温度を表す。実際の計算ではすべての面は黒体 ($\epsilon_i = 1$) と仮定した。

都市上面に入射する長波放射フラックスは式 (2.65) とは異なり Idso & Jackson²⁻³³⁾ の式 (2.127) を用いた。

$$R_L \downarrow = \sigma [C_{cloud} + \epsilon_a (1 - C_{cloud})] T_{as}^4 \quad (2.127)$$

$$\epsilon_a = 1 - 0.261 \exp \left[-7.77 \times 10^{-4} (T_{as} - 273)^2 \right] \quad (2.128)$$

ここで C_{cloud} は雲量、 T_{as} はスクリーン高さの気温である。本研究では T_{as} として都市キャノピ上面の気温を用いた。

顕熱、潜熱フラックスは式 (2.129), (2.130) で与えた。

$$H_i = \rho_a c_p C_H u (T_i - T_a) \quad (2.129)$$

$$L_w E_i = L_w \rho_a C_E u (q_{vsuf,i} - q_{v,a}) \quad (2.130)$$

ここで C_H , C_E はそれぞれ顕熱、水分のバルク輸送係数、 q_{vsuf} は表面比湿、 $q_{v,a}$, T_a は大気の水蒸気と温度である。バルク輸送係数は壁面では $C_H = C_E = 0.05$ 、地面では式 (2.104) に示したように大気の安定度を考慮してモニン・オブコフの相似理論より推定した。

また表面温度 T_i は、地表面熱収支モデルで示した方法と同様に式 (2.131) に示す Force Restore 法を用いて求めた。

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = c_{T1} \frac{G_i}{\rho_i C_i d_i} - c_{T2} \frac{T_i - T_{2,i}}{\tau}, \quad c_{T1} = 2\pi^{1/2}, c_{T2} = 2\pi \quad (2.131)$$

ここで $\rho_i C_i$ は熱容量、 $\tau (= 86400[s])$ は1日の長さ、 d_i , $T_{2,i}$ はそれぞれ日変動しない深さとその深さでの温度である。

2.3.3 キャノピ内の正味放射量の算定方法

都市内部が受ける放射フラックスは、建物の存在により時間とともに複雑に変化する。放射エネルギーは光子により輸送されており、その光子の都市内部における挙動を追跡することができれば、都市内部の放射フラックスを推定することができる。しかし、全ての光子を追跡するには膨大な時間と計算コストがかかるため、ここでは Aida²⁻³⁴⁾ が用いたモンテカルロ法による光子追跡を3次元に拡張し、都市内部の正味放射フラックスを推定した。

1) 正味短波放射量の算定方法

短波放射フラックスは、直達日射 I_D と天空日射 I_S に分けることができ、それぞれ式 (2.132), (2.133) で表される Bouguere と永田の式を用いた²⁻³⁵⁾。

$$I_D = R_0 T_r^{1/\sin(\alpha_{sun})} \sin(\alpha_{sun}) \quad (2.132)$$

$$I_S = (R_0 - I_D) \sin(\alpha_{sun}) (0.66 - 0.32 \sin(\alpha_{sun})) [0.5 + (0.4 - 0.3) T_r \sin(\alpha_{sun})] \quad (2.133)$$

ここで R_0 は太陽定数, T_r は大気透過率, α_{sun} は太陽高度角である. Fig.2.5に, モデル化した都市構造のブロック内の直達日射の追跡プロセスの概略を示す. 天空日射の追跡プロセスもほぼ同じであり, 以下に短波放射の追跡ステップを記す.

1. ブロック上面から都市キャノピ内部に向かって光子を投入する. 直達日射の場合は, 光子の入射方向は太陽高度角 α_{sun} と時角 h から決定する. 天空日射の場合は, 一様乱数 r を用いて式 (2.134) で示す方位角 θ_a と入射角 η_a を決定し, 入射方向を決める. Fig.2.5 にその様子を示す.

$$\theta_a = 2\pi r \quad \eta_a = \cos^{-1}(1 - 2r) \quad (2.134)$$

2. 光子がある面に衝突するとその面のもつ吸収率分だけエネルギーが吸収され, 光子は鏡面反射か乱反射を行う. どちらの反射が起こるかは, あらかじめ設定した鏡面反射と乱反射の起こる比率に従って, 乱数により決定される. 乱反射の場合は, 式 (2.135) の代わりにランベルトの余弦法則に基づいて, 式 (2.135) で示す方位角 θ_a と入射角 η_a を決定し, 反射方向を決める²⁻³⁶⁾.

$$\theta_a = 2\pi r \quad \eta_a = \cos^{-1} \sqrt{1 - r} \quad (2.135)$$

3. このような操作を光子がブロック上面から抜けるまで繰り返す. (繰り返し回数の最大は 20 回) また, ブロック側面から光子が抜け出た場合は, その反対側のブロック側面から抜け出た時同じ入射方向で光子を投入する. すなわち, Fig.2.5 に示すように A から側面に抜け出た光子を A' から再投入させる.

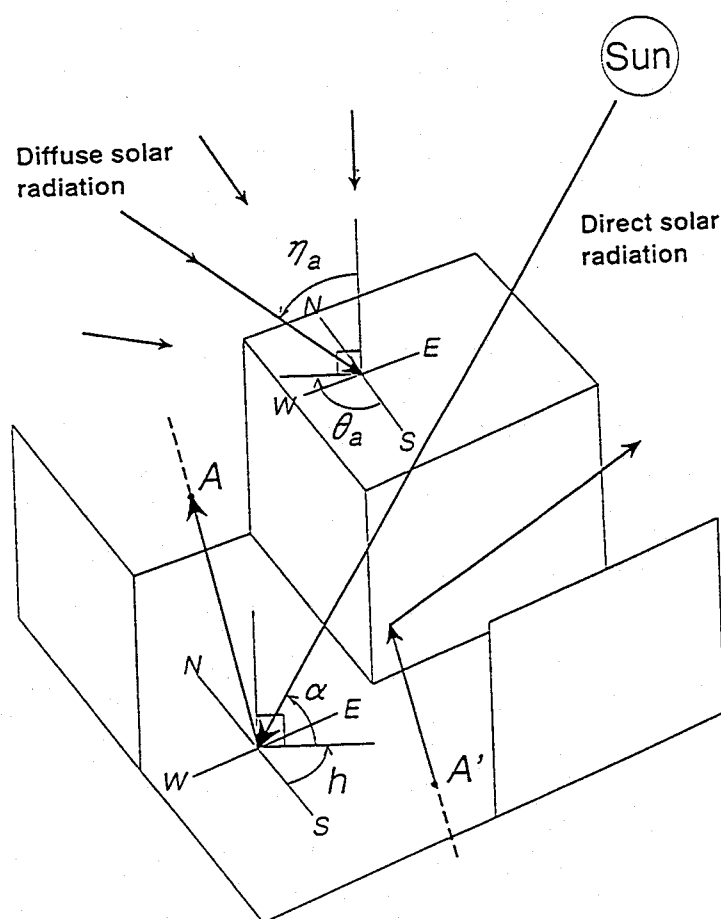


図 2.5 ブロック単位の光子追跡プロセスの概略図

以上の追跡ステップを多数の光子に対して行う。

ブロック上面の面積を A_s , 投入光子数を N , 都市内部の面 i の面積を A_i , 面 i が吸収する光子数を F としたとき, 面 i が吸収する正味の短波放射フラックス I_e は式 (2.136) で表される。

$$I_e = \frac{A_s}{A_i} \left(\frac{F_D}{N_D} I_D + \frac{F_S}{N_S} I_S \right) \quad (2.136)$$

ここでサフィックス D, S はそれぞれ直達, 天空日射を表す。すると, 面 i が受ける短波放射フラックスの都市キャノピ上空の短波放射フラックスに対する比率 $a_{b,i}$ (式 (2.126) 参照, 以後フラックス比と呼ぶ) は式 (2.137) で決定でき, 都市キャノピ内の壁面, 屋上面および地上面の正味放射フラックスを求めることができる。

$$\begin{aligned} a_{b,i} &= \frac{I_e}{I_D + I_S} \\ &= \frac{A_s}{A_i} \frac{(F_D/N_D)I_D + (F_S/N_S)I_S}{I_D + I_S} \end{aligned} \quad (2.137)$$

2) 正味長波放射量の算定方法

長波放射フラックスを求めるための光子追跡は次の2つのステップで行う。

1. ブロック内のある面から式 (2.134) を用いて光子の放射方向を決める。ブロック側面から抜け出た場合は, 短波放射フラックス追跡法と同様の処理を行う。
2. 放出された光子がある面 (ブロック上面を含む) に衝突したら, 追跡を終了する。

以上の追跡ステップを全ての面について行う。そして, この結果を用いて形態係数を求める。面 i から放射された N_i 個の光子うち面 j が受けた光子数を N_{ij} とすると形態係数 F_{ij} は式 (2.138) で定義される。

$$F_{ij} = N_{ij}/N_i \quad (2.138)$$

また, 面 j が都市上空面の場合の形態係数を特に天空係数 (SVF: sky view factor) とよぶ。

2.3.4 都市キャノピを含む大気境界層の基礎方程式

都市キャノピを含む基礎方程式は, 2.2.1節に示した基礎方程式に, 都市建物による風速減少およびそれによる乱流エネルギーの増加の項が付加される²⁻³⁷⁾²⁻³⁸⁾。また, 温位と比湿の保存式には, 建物壁面からの顕熱フラックス・潜熱フラックス, および人工的な顕熱フラックス・潜熱フラックスによる大気加熱, 大気水蒸気増加項が生成項として組み込まれる。そして, 都市建物の隙間をポーラス²⁻³⁹⁾と考えて, 基礎方程式を作成した。

1) 運動方程式

$$\frac{du}{dt} = r_v f v - r_v c_p \theta \frac{\partial \Pi}{\partial x} + r_v g \frac{G_2}{G_1} + D(u) - r_v C_D \xi_u A(z) u \sqrt{u^2 + v^2} \quad (2.139)$$

$$\frac{dv}{dt} = -r_v f u - r_v c_p \theta \frac{\partial \Pi}{\partial y} + r_v g \frac{G_3}{G_1} + D(v) - r_v C_D \xi_v A(z) v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (2.140)$$

2) 連続の式

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial r_x u}{\partial x} + \frac{\partial r_y v}{\partial y} + \frac{\partial r_z w^*}{\partial z^*} \\
& + G_2 \left(\frac{\partial r_x u}{\partial z^*} - \frac{\partial r_z u}{\partial z^*} \right) + G_3 \left(\frac{\partial r_y v}{\partial z^*} - \frac{\partial r_z v}{\partial z^*} \right) \\
& - \frac{1}{z^* - s} (G_2 r_z u + G_3 r_z v) = 0
\end{aligned} \quad (2.141)$$

3) 温位方程式

$$\frac{d\theta}{dt} = D(\theta) + r_v \frac{1}{\rho_a c_p} (H_B + H_A) \quad (2.142)$$

4) 比湿方程式

$$\frac{dq_v}{dt} = D(q_v) + r_v \frac{1}{\rho_a L_w} (L_w E_B + L_w E_A) \quad (2.143)$$

5) 静水圧方程式

$$\frac{\partial r_z \Pi}{\partial z^*} = -r_v \frac{s - z_g}{s} \frac{g}{c_p \theta} \quad (2.144)$$

ここで r_v は格子空間で建物で占められていない空間の比, r_x, r_y, r_z は格子の yz, xz, xy 断面で建物で占められていない yz, xz, xy 断面の比, $H_B, L_w E_B$ はそれぞれ建物表面からの顕熱フラックス, 潜熱フラックス (式 (2.129), (2.130) 参照), $H_A, L_w E_A$ はそれぞれ人間活動による顕熱, 潜熱フラックス放出を表す. C_D は抵抗係数, ξ_u, ξ_v は x, y 方向に垂直な建物の表面積の割合, $A(z)$ は建物の表面積密度を表す. また, 実質微分は, 次式で定義される.

$$\frac{d}{dt} = r_v \frac{\partial}{\partial t} + r_x u \frac{\partial}{\partial x} + r_y v \frac{\partial}{\partial y} + r_z w^* \frac{\partial}{\partial z^*} \quad (2.145)$$

また拡散項 $D()$ は, 次式で表される.

$$\begin{aligned}
D() &= \frac{\partial}{\partial x} \left(r_x K_H \frac{\partial}{\partial x} + r_x K_H G_2 \frac{\partial}{\partial z^*} \right) + G_2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left(r_x K_H \frac{\partial}{\partial x} + r_x K_H G_2 \frac{\partial}{\partial z^*} \right) \\
&+ \frac{\partial}{\partial y} \left(r_y K_H \frac{\partial}{\partial y} + r_y K_H G_3 \frac{\partial}{\partial z^*} \right) + G_3 \frac{\partial}{\partial z^*} \left(r_y K_H \frac{\partial}{\partial y} + r_y K_H G_3 \frac{\partial}{\partial z^*} \right) \\
&+ G_1^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left(r_z K_V \frac{\partial}{\partial z^*} \right)
\end{aligned} \quad (2.146)$$

6) 乱流エネルギー方程式

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \left(\frac{q^2}{2} \right) &= D \left(\frac{q^2}{2} \right) \\
&+ r_v \frac{s}{s - z_g} \left(-\overline{u'w'} \frac{\partial u}{\partial z^*} - \overline{v'w'} \frac{\partial v}{\partial z^*} \right) + r_v \beta g \overline{w'\theta'} - r_v \frac{q^3}{B_1 l} \\
&+ r_v C_D A(z) (\xi_u |u|^3 + \xi_v |v|^3)
\end{aligned} \quad (2.147)$$

ただし, 拡散係数は $K_V = K_H = qlS_q$ である.

2.3.1節で述べたように, 都市キャノピ構造をモデル化すると, 基礎方程式に現れる都市形状のパラメータは, 表 2.2 のように定義できる. ここで, 抵抗係数は建物表面の材質 (コ

表 2.2 キャノピ構造のパラメータ定義式

η	$\frac{W_{bx}W_{by}}{W_{sx}W_{sy}}$
r_v	$\frac{W_{sx}W_{sy} - W_{bx}W_{by}}{W_{sx}W_{sy}}; \quad z \leq h_c$ 1; $z > h_c$
r_x	$\frac{W_{sy} - h_c}{W_{sy}}; \quad z \leq h_c$ 1; $z > h_c$
r_y	$\frac{W_{sx} - h_c}{W_{sx}}; \quad z \leq h_c$ 1; $z > h_c$
r_z	$\frac{W_{sx}W_{sy} - W_{bx}W_{by}}{W_{sx}W_{sy}}; \quad z \leq h_c$ 1; $z > h_c$
$A(z)$	$\frac{2(W_{bx} + W_{by})}{W_{sx}W_{sy} - W_{bx}W_{by}}; \quad z \leq h_c$ 0; $z > h_c$
ξ_u	$\frac{W_{By}}{2(W_{Bx} + W_{By})}$
ξ_v	$\frac{W_{Bx}}{2(W_{Bx} + W_{By})}$
C_D	0.2

ンクリートやガラス, 木材等) や建物表面付近にできる渦の状態に依存するパラメータであり値を特定することが困難であるが, 本研究では, Yamada と同じ値²⁻³⁷⁾を採用した.

2.4 ネスティング法

都市大気環境予測モデルのスケールは、数 10km^2 と狭く、もっとスケールが大きいシノプティックの影響を受ける。それで、このようなシノプティックの影響を取り入れるために、大きな計算領域で、シノプティックな大気環境をまず予測し、その結果を都市スケールの小さな計算領域の境界条件に与える計算方法を用いる²⁻⁴⁰⁾²⁻⁴¹⁾。このような計算方法をネスティングという。大きな計算領域の計算格子は、通常小さな領域の計算格子より大きい格子を用いる。ここで、大きな計算領域の格子点を CM(coarse mesh)、小さい計算領域の格子点を FM(fine mesh) とする。ネスティングには、大きい計算領域の結果を小さい計算領域の境界条件にだけ適用する one-way と、更に小さい計算領域の結果を真値として、大きい計算領域の対応する計算格子点の値を更新する two-way の2通りの方法がある。

大きい計算領域の結果を小さい計算領域の境界条件に適用するためには、CM の値を何らかの方法で FM の値に内挿する必要がある。本研究では、次に示す T.L.Clark²⁻⁴²⁾ の2次の内挿式を用いて行った。

$$\phi = E_- \Phi_- + E_0 \Phi_0 + E_+ \Phi_+ \quad (2.148)$$

ここで、 ϕ は FM での値、 Φ は CM での値、 E_- 、 E_0 、 E_+ は係数で、以下の式で表される。

$$E_- = \frac{\epsilon(\epsilon - 1)}{2} + \alpha \quad (2.149)$$

$$E_0 = (1 - \epsilon^2) - 2\alpha \quad (2.150)$$

$$E_+ = \frac{\epsilon(\epsilon + 1)}{2} + \alpha \quad (2.151)$$

ここで、

$$\alpha = \frac{\left(\frac{\Delta l}{\Delta L}\right)^2 - 1}{24} \quad (2.152)$$

ここで、 Δl は FM の格子距離、 ΔL は CM の格子距離である。

図 2.6 に、CMG と FMG の格子点の関係図を示す。 ϵ は、-1 で CM の Φ_- の格子、0 で Φ_0 の格子、1 で Φ_+ の格子に対応し、-1 ~ 1 の値をとる。すなわち、FM の格子に対応する ϵ の値を入力すると、式 (2.148) の CM の3点より、FM の値が求まる。 α を 0 にすると普通の2次内挿式になる。

小さい計算領域の結果を真値として、大きい計算領域の対応する計算格子点の値を更新する方法は、C.Chen²⁻⁴³⁾ に従い、スカラ量については、FM の格子平均値を、速度については、運動量が保存されるようにした。

$$\text{スカラ量: } \Phi = \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta X \Delta Y} \sum \phi \quad (2.153)$$

$$\text{風速: } U = \frac{\Delta y}{\Delta Y} \sum u \quad (2.154)$$

$$\text{風速: } V = \frac{\Delta x}{\Delta X} \sum v \quad (2.155)$$

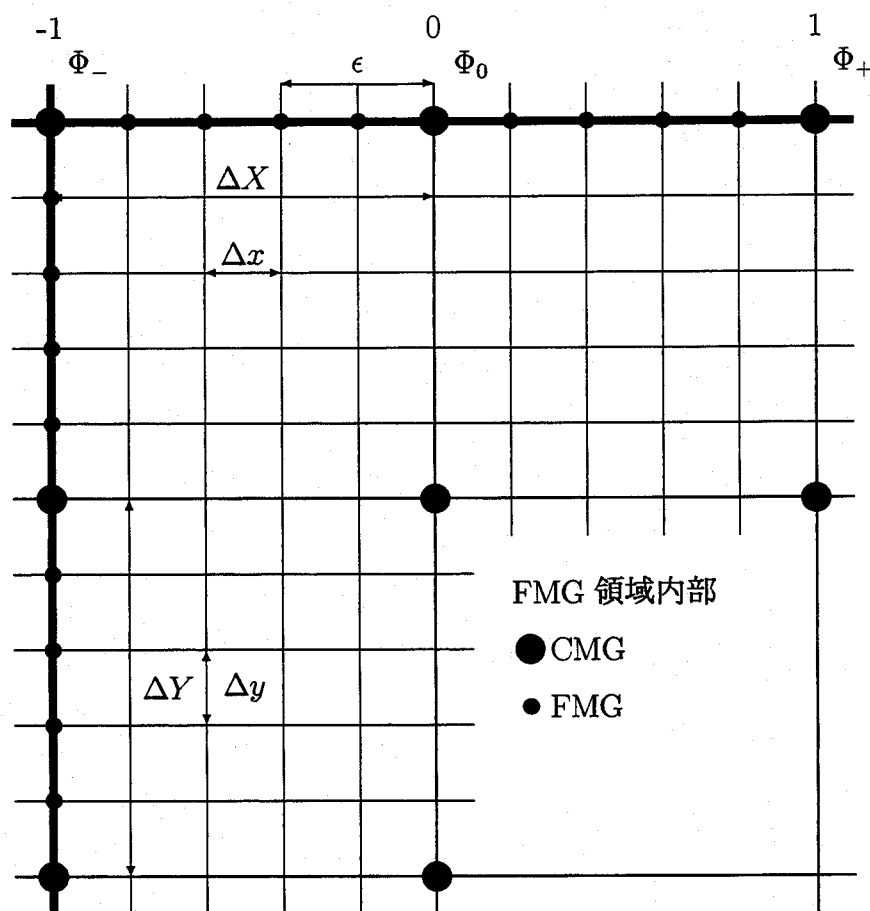


図 2.6 CMG と FMG の格子点の関係

ここで, $\Delta x, \Delta y$ は FM の水平格子間隔, $\Delta X, \Delta Y$ は CM の水平格子間隔である.

ただし, 実際の計算で two-way を用いて大きい計算領域の対応する計算格子点の値を更新する場合は, FM での標高の解像度を CM の解像度に落とす必要が生じる. 緩やかな地形を対象にする場合は, 標高の解像度を落とすことによる計算誤差は小さいが, 急峻な地形を対象にする場合は, 標高の解像度を落とすことによる計算誤差が, two-way を用いない場合に生じる計算誤差よりも大きくなる. そのため, 3 章以下の応用計算では, one-way を用いた.

2.5 4次元データ同化法

数日間にわたる局地循環風のシミュレーションでは, 1) 的確な初期値設定, 2) シノプティックな気圧場の変化, 3) メッシュ内の地形, 4) 雲・降水の取り込み を行わなければ現実と顕著な差異を生じる. これを解決する方法の一つとして, 4次元データ同化法 (Four Dimensional Data Assimilation: FDDA) の局地循環風への取り込みが行われている²⁻⁴⁴⁾²⁻⁴⁵⁾.

FDDA はモデルの予報値と観測値との差をニュートン緩和法で補正する手法であり, 次式のように書くことができる²⁻⁴⁶⁾.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = F(\phi, x, y, z, t) + G_{\phi} \times w_t \times w_{xyz} \times (\phi_{obs} - \phi) \quad (2.156)$$

ここで、 ϕ は物理変数、 F は ϕ についての方程式、 G_ϕ はナudging係数、 w_t, w_{xyz} は時間、空間の重み係数、 ϕ_{obs} は観測値である。FDDAでは、 G_ϕ, w_t, w_{xyz} などの設定に自由度が大きい。当然ながら、これらの係数値を大きく設定すると観測値とモデルの一致性は向上するが不自然な流れを生じる可能性があり、小さく設定すると観測値がうまく再現できない。そのためこれらの係数値を適切に設定することが重要である。通常ナudging係数は、運動方程式に対して $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 程度の値、温位方程式に対しては、それより一桁程度小さい値を用いられることが多く、本研究もそれに従った。

FDDAに用いる観測値の取り扱いとして、観測点での値をそのまま用いる Observation Nudging と、観測値を客観解析しグリッド点で用いる Analysis Nudging がある。本研究では、Analysis Nudging を用いた。客観解析の方法は、Dickerson の MASCON モデル²⁻⁴⁷⁾に、地形の影響を考慮できるように改良したモデル²⁻⁴⁸⁾を用いた。4.4節でこの方法を用いるが、観測データとしては、兵庫県および大阪府の常時観測データとアメダスデータの地上観測データしかないため、FDDAは、高さ24mまでの範囲で適用した。

2.6 大気濃度予測モデル

大気汚染濃度予測モデルは、移流拡散方程式および光化学反応モデルと沈着モデルから構成されており、以下に各モデルについて説明する。

2.6.1 拡散方程式

大気中の汚染物質濃度の移流拡散方程式は、 z^* 座標系を用いて次のように表される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial c_i}{\partial t} = & -u \frac{\partial c_i}{\partial x} - v \frac{\partial c_i}{\partial y} - w^* \frac{\partial c_i}{\partial z^*} \\ & + \left(\frac{s}{s - z_G} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_V^c \frac{\partial c_i}{\partial z^*} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H^c \frac{\partial c_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_H^c \frac{\partial c_i}{\partial y} \right) + R_i + Q_i \end{aligned} \quad (2.157)$$

ここで移流拡散方程式中の i は汚染物質の種類、 c は汚染物質濃度、 K_H^c, K_V^c はそれぞれ汚染物質濃度の水平拡散係数および鉛直拡散係数である。また R_i は光化学反応における生成消滅率、 Q_i は高所排出源による排出率である。汚染物質濃度に対する鉛直方向の拡散係数はガス輸送と熱輸送の相似性から熱に対する鉛直方向の拡散係数に等しいとした。 $(K_V^c = K_V^{\theta})$

また水平方向の拡散係数については、数値粘性にまかせることとし、 $K_H^c = 0$ とした。

2.6.2 沈着モデル

大気汚染物質が大気中から除去される沈着過程には dry deposition と wet deposition がある。dry deposition は土壌面、水面および地表の植物や構造面に直接沈降・吸着する過程である。wet deposition は、雲の中で雨滴の生成核となって除去される rain out と雨滴の落下中にガスやエアロゾルが捕捉吸着され地表面へ除去される wash out の2つの過程がある。本研究では大気汚染物質のシミュレーションとして、高濃度の発生しやすい、よく晴れた海陸風日を対象としているため、沈着現象としては、ガスの dry position のみを考慮した。

大気汚染物質の乾性沈着のメカニズム²⁻⁴⁹⁾には、土壌や水面での吸収、植物への取り込みなどがある。その際大気中から地表面へ汚染物質が輸送されることにより、地表面に濃

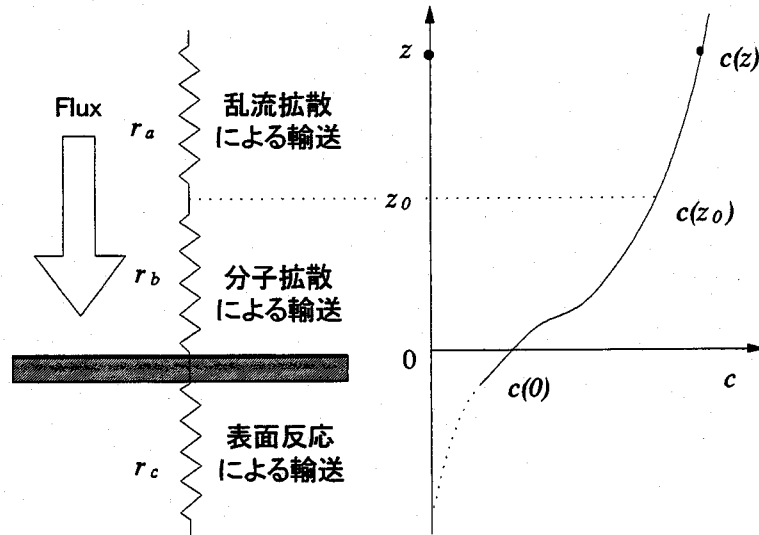


図 2.7 ガスの輸送モデル

度勾配が生じ、それが駆動力となって、地表面に向かう物質の輸送が継続的に維持される。ここでその輸送過程は大気安定度、汚染物質の種類、沈着面の材質状態に支配されており、本研究では図 2.7 に示すように乱流境界層内の乱流拡散による輸送過程、粘性境界層内の分子拡散による輸送過程、地表面反応による輸送過程の三過程に分けて考える。

ここで便宜的に地表の単位面積中に単位時間に輸送される汚染物質量、すなわち乾性沈着フラックスは高度 z での汚染物質濃度に比例するものと考えられ、沈着速度 v_g を用いて次のように定義される。

$$F = v_g \cdot c(z) \quad (2.158)$$

沈着速度の逆数は抵抗であるので全抵抗 r_t は、次式で表される。

$$\begin{aligned} r_t &= \frac{1}{v_g} = \frac{c(z)}{F_d} = \frac{c(z) - c(z_0) + c(z_0) - c(0)}{F_d} \\ &= r_a + r_b + r_c \end{aligned} \quad (2.159)$$

ここで

$$r_a = \frac{c(z) - c(z_0)}{F_d} : \text{乱流層抵抗} \quad (2.160)$$

$$r_b = \frac{c(z_0) - c(0)}{F_d} : \text{粘性層抵抗} \quad (2.161)$$

$$r_c = \frac{c(0)}{F_d} : \text{表面抵抗} \quad (2.162)$$

そこで、これらを用いて沈着速度を表すと

$$v_g = \frac{1}{r_a + r_b + r_c} \quad (2.163)$$

となり、各輸送抵抗を求めることにより沈着速度を求めることができる。そこで各輸送抵抗値の算出について以下に記す。

1) 乱流層抵抗 (r_a)

乱流拡散による輸送過程での沈着抵抗である乱流層抵抗は大気の安定度等の微気象要素を用いて次のように表される.

$$r_a = \int_{z_0}^z \left(\frac{1}{K_V^c} \right) dz \quad (2.164)$$

式 (2.164) を普遍関数を用いて表すと次式になる.

$$r_a = \frac{\psi_h \left(\frac{z}{L} \right) - \psi_h \left(\frac{z_0}{L} \right)}{\kappa u_*} \quad (2.165)$$

ただし, u_* は摩擦速度, ψ_h は無次元温位プロファイル, L はモニン・オブコフ長さ, κ はカルマン定数である.

2) 粘性層抵抗 (r_b)

粘性層内の物質輸送に対するスタントン数 S_t はシャーウッド数 S_h , シュミット数 S_c および粗度レイノルズ数 Re_* で表され, 次式のようになる.

$$S_t = \frac{S_h}{S_c \cdot Re_*} = \frac{\frac{k_D z_0}{\nu}}{\frac{D}{u_*} \frac{u_* z_0}{\nu}} = \frac{k_D}{u_*} \quad (2.166)$$

ここで, k_D は物質伝達率, ν は空気の動粘性係数, D は排除厚さである. そして, シャーウッド数, シュミット数 および粗度レイノルズ数は次のように定義される.

$$S_h = \frac{k_D z_0}{D}, S_c = \frac{\nu}{D}, Re_* = \frac{u_* z_0}{\nu} \quad (2.167)$$

一方粘性層内の沈着フラックス F_d は次式で表される.

$$F_d = k_D \{c(z_0) - c(0)\} \quad (2.168)$$

よって粘性層抵抗 r_b は式 (2.161) の定義より次式となる.

$$r_b = \frac{c(z_0) - c(0)}{F_d} = \frac{1}{k_D} \quad (2.169)$$

式 (2.166), 式 (2.169) より k_D を消去すると, 粘性層抵抗 r_b は次式となる.

$$r_b = \frac{1}{S_t \cdot u_*} \quad (2.170)$$

以上のように, 粘性層抵抗は対象となるガスの種類と地表面の状態により決定される. スタントン数について本研究では陸上では Wesley and Hicks²⁻⁵⁰⁾ の式を用いた.

$$S_t = \frac{1}{5 \cdot \left(\frac{S_c}{Pr} \right)^{\frac{2}{3}}} \quad (2.171)$$

ここで, Pr はプラントル数である. また, 水面については Chamberlain²⁻⁵¹⁾ の滑らかな面に対するスタントン数の式を用いた.

$$S_t = \frac{1}{5[S_c - 1 + \ln\{1 + 0.83(S_c - 1)\}]} \quad (2.172)$$

表 2.3 各物質におけるシュミット数

物質	S_c
NO	0.96
NO ₂	1.22
O ₃	1.25
HC (All Species)	1.00
SO ₂	1.28

表 2.4 各物質の対象面における表面抵抗値 [s/m]

物質	都市面	自然面	海面
NO	391.7	257.0	2400.0
NO ₂	391.7 ^{A)}	257.0 ^{B)}	2400.0
O ₃	30.0 ^{D)}	150.3 ^{E)}	2400.0 ^{F)}
HC (All Species)	391.7	257.0	2400.0
SO ₂	30.0 ^{G)}	86.0 ^{H)}	40.0 ^{I)}

その際必要となる各汚染物質におけるシュミット数は、SO₂ は Spalding の物質移動論²⁻⁵²⁾ からの値を用い、NO、NO₂、O₃については近似式 $S_c = 0.145 M_G^{0.556}$ を用いて求めた。炭化水素類については後述するように、光化学反応モデルでは使用する物質は単一の物質を表していないので、全てを一律の値とした。その値を表 2.3 に示す。

3) 表面抵抗 (r_c)

表面抵抗は対象物質と沈着面の状態によって決定されるため、沈着面の含水率、酸性度、微生物の存在など、様々な要素がからみあい定式化が難しい。そのためこれらを明らかにするため過去に多くの研究者により様々な汚染物質や土壌の状態を対象とした実験が行われ、報告がされている。本研究では実験で求めた値、および文献調査によって、計算に用いる対象汚染物質の表面抵抗値を決定した。対象地表面として、都市面 (人工構造面)、自然面 (土壌面)、海面、の3種類を設定した。その一覧を表 2.4 に示す。

ここで NO₂ について A) は原²⁻⁵³⁾ による実験値でコンクリートとアスファルトの構成比を 1:1 とし、並列合成抵抗の式より求めた。同様に B) は畑の土と砂をを構成比 1:1 として求めた。C) については実験値は非常に穏やかな波の立たない条件で実験を行っており、実際の海面に比べ表面抵抗が大きく見積もられていると考えられるため、水に溶けにくい O₃ の実験値と同様の値を用いた。その O₃ について D) は李²⁻⁵⁴⁾ と同様に都市構造物による物理性質に従うと考え、SO₂ と同じものを与えた。E) は Colbeck²⁻⁵⁵⁾、F) は Garland and Penkett²⁻⁵⁶⁾ の値を用いた。SO₂ については辻²⁻⁵⁷⁾ の文献調査を参考に設定した。NO については研究例が少ないことから、NO₂ と同様の表面抵抗とした。炭化水素についても同様に研究例が少なく今回の計算においては全ての物質について、NO₂ と同様の表面抵抗とした。

2.6.3 光化学反応モデル

大気汚染物質濃度予測を行う際には、移流・拡散、沈着など色々な過程を考慮しなければならないことは先に述べたが、この中でも特にその説明が困難な過程が光化学反応過程

である。この過程では大気中で様々な物質が、太陽光や温度など様々な条件のもと複雑な化学反応を起こし、その反応の数は相当数におよび、完全にその発生のメカニズムが解明されていない。しかし光化学オキシダントがこの複雑な化学反応の結果生成されることから、本研究の最大の目的である高濃度オキシダントの予測を行ううえでは、この光化学反応は欠くことのできない非常に重要な過程といえる。

そこで本研究では、現在高濃度オキシダントの予測において世界的によく用いられている CBM-IV²⁻⁵⁸⁾ を光化学反応モデルとして用いることとした。

CBM-IV(Carbon Bond Mechanism) は対流圏中での数百の反応について、光化学反応で重要な役割を果たす反応炭化水素をいくつかの共通のグループに分類することにより、モデル化したものである。ここではこの有機物質種を一重結合や二重結合といった炭素間の結合によって分ける、炭素結合を用いている。これによって大気中に排出される多用な有機物質種を、似た反応を示すより少ない数の物質種で表すことができ、複雑な大気中の化学反応を比較的容易に取り扱うことが出来る。

CBM-IV では反応を 4 つ分類して考えている。

- (1) 無機物質種
- (2) 特殊な化学反応を示すか、環境中で特に重要なため特別に扱われる有機物質種
- (3) 炭素結合法により表される有機物質種
- (4) 分子構造を持つ有機物質種

具体的にこれらを示すと (1) は O_3 や NO_x , HO_x といった反応に寄与する無機物質種である。(2) の特殊に扱われるものは 3 つで、その物質と理由は以下の通りである。

- ホルムアルデヒド

- 実質的に全ての有機物質の酸化反応において生成される
- 加えて他のカルボニル基に比べて、非常に反応性に富んでいる

- エチレン

- 他のアルケンより明らかに反応が遅い
- 炭化水素の排出の大部分を成している
- ほとんどの条件で、ホルムアルデヒドを高い割合で生成する

- イソプレン

- 自然環境から排出される炭化水素のほとんどを占めている
- 他のアルケンに比べ OH や NO_3 をとった反応が非常に早い

(3) の炭素結合法で表されるものは、一重結合である PAR (パラフィン), 二重結合である OLE (オレフィン), アルデヒド基を持つ ALD2 (アルデヒド) の 3 つである。

(4) の分子構造を持つものは 7 つの炭素を持つ TOL (トルエン) に代表されるモノアルキルベンゼンと、8 つの炭素を持つ XYL (キシレン) に代表されるジおよびトリアルキルベンゼンである。このように分類した結果 CBM-IV 内の反応成分数は 33 種類、反応式は 81 本に要約される。この反応成分物質と反応式の一覧を、それぞれ表 2.5 と表 2.6 に示す。

表 2.5 CBM-IV における反応物質

	物質名	
NO	一酸化窒素	Nitric oxide
NO ₂	二酸化窒素	Nitrogen dioxide
NO ₃	硝酸基	Nitrogen trioxide
N ₂ O ₅	五酸化二窒素	Dinitrogen pentoxide
HONO	亜硝酸	Nitrous acid
HNO ₃	硝酸	Nitric acid
PNA	ペルオキシ硝酸	Peroxynitric acid (HO ₂ NO ₂)
O ¹ D	酸素原子 (励起状態)	Oxygen atom (singlet)
O	酸素原子 (励起状態)	Oxygen atom (triplet)
OH	水酸基	Hydroxyl radical
H ₂ O	水	Water
O ₃	オゾン	Ozone
HO ₂	水酸基	Hydroperoxy radical
H ₂ O ₂	過酸化水素水	Hydrogen peroxide
CO	一酸化炭素	Carbon monoxide
FORM	ホルムアルデヒド	Formaldehyde (CH ₂ =O)
ALD2	Himolecular	weight aldehyde (RCHO, R>H)
C ₂ O ₃	ペルオキシアシル基	Peroxyacyl radical
PAN	ペルオキシ酸アミド	Peroxyacyl nitrate (CH ₃ C(O)O ₂ NO ₂)
PAR	パラフィン炭素結合	Paraffinic carbon bond (C-C)
ROR	第二有機酸基	Secondary organic ooosy radical
OLE	オレフィン炭素結合	Olefinic carbon bond (C=C)
ETH	エテン	Ethene(CH ₂ =CH ₂)
TOL	トルエン	Toluene (C ₆ H ₅ -CH ₃)
CRES	クレゾールおよびそれ以上の高分子フェノール	Cresol and higher molecular weight phenols
TO ₂	トルエン-水酸基のアダクト	Toluene - hydroxyl radical adduct
CRO	メチルフェノキシ遊離酸	Methylphenoxy radicals
OPEN	高分子アロマティック酸化リング片	Aromatic ring fragment acid
XYL	キシレン	Xylene (C ₆ H ₄ -(CH ₃) ₂)
MGLY	メチルグリオキサール	Methyl glyoxal (CH ₃ C(O)C(O)H)
ISOP	イソプレン	Isoprene
XO ₂	NO → NO ₂ 作用素	NO - to - NO ₂ operation
XO ₂ N	NO → NO ₃ 作用素	NO - to - NO ₃ operation

表 2.6 CBM-IV における反応式

式番号	反応式	反応速度
無機反応		
R1	$\text{NO}_2 + h\nu \rightarrow \text{NO} + \text{O}$	radiation dependent
R2	$\text{O} \rightarrow \text{O}_3$	$1.4 \times 10^3 e^{1175/T}$
R3	$\text{O}_3 + \text{NO} \rightarrow \text{NO}_2$	$1.8 \times 10^{-12} e^{-1370/T}$
R4	$\text{O} + \text{NO}_2 \rightarrow \text{NO}$	9.3×10^{-12}
R5	$\text{O} + \text{NO}_2 \rightarrow \text{NO}_3$	$1.6 \times 10^{-13} e^{687/T}$
R6	$\text{O} + \text{NO} \rightarrow \text{NO}_2$	$2.2 \times 10^{-13} e^{602/T}$
R7	$\text{O}_3 + \text{NO}_2 \rightarrow \text{NO}_3$	$1.2 \times 10^{-13} e^{-2450/T}$
R8	$\text{O}_3 + h\nu \rightarrow \text{O}$	radiation dependent
R9	$\text{O}_3 + h\nu \rightarrow \text{O}^1\text{D}$	radiation dependent
R10	$\text{O}^1\text{D} \rightarrow \text{O}$	$1.9 \times 10^8 e^{390/T}$
R11	$\text{O}^1\text{D} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{OH}$	2.2×10^{-10}
R12	$\text{O}_3 + \text{OH} \rightarrow \text{HO}_2$	$1.6 \times 10^{-12} e^{-940/T}$
R13	$\text{O}_3 + \text{HO}_2 \rightarrow \text{OH}$	$1.4 \times 10^{-14} e^{-580/T}$
R14	$\text{NO}_3 + h\nu \rightarrow 0.89 \text{NO}_2 + 0.89 \text{O} + 0.11 \text{NO}$	radiation dependent
R15	$\text{NO}_3 + \text{NO} \rightarrow 2\text{NO}_2$	$1.3 \times 10^{-11} e^{250/T}$
R16	$\text{NO}_3 + \text{NO}_2 \rightarrow \text{NO} + \text{NO}_2$	$2.5 \times 10^{-14} e^{-1230/T}$
R17	$\text{NO}_3 + \text{NO}_2 \rightarrow \text{NO}_2 \text{O}_5$	$5.3 \times 10^{-13} e^{256/T}$
R18	$\text{NO}_2 \text{O}_5 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{HNO}_3$	1.3×10^{-21}
R19	$\text{NO}_2 \text{O}_5 \rightarrow \text{NO}_3 + \text{NO}_2$	$3.5 \times 10^{14} e^{-10897/T}$
R20	$\text{NO} + \text{NO} \rightarrow 2\text{NO}_2$	$1.8 \times 10^{-20} e^{530/T}$
R21	$\text{NO} + \text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{HONO}$	4.4×10^{-40}
R22	$\text{OH} + \text{NO} \rightarrow \text{HONO}$	$4.5 \times 10^{-13} e^{806/T}$
R23	$\text{HONO} + h\nu \rightarrow \text{OH} + \text{NO}$	radiation dependent
R24	$\text{OH} + \text{HONO} \rightarrow \text{NO}_2$	6.6×10^{-12}
R25	$\text{HONO} + \text{HONO} \rightarrow \text{NO} + \text{NO}_2$	1.0×10^{-20}
R26	$\text{OH} + \text{NO}_2 \rightarrow \text{HNO}_3$	$1.0 \times 10^{-12} e^{713/T}$
R27	$\text{OH} + \text{HNO}_3 \rightarrow \text{NO}_3$	$5.1 \times 10^{-15} e^{1000/T}$
R28	$\text{HO}_2 + \text{NO} \rightarrow \text{OH} + \text{NO}_2$	$3.7 \times 10^{-12} e^{240/T}$
R29	$\text{HO}_2 + \text{NO}_2 \rightarrow \text{PNA}$	$1.2 \times 10^{-13} e^{749/T}$
R30	$\text{PNA} \rightarrow \text{HO}_2 + \text{NO}_2$	$4.8 \times 10^{13} e^{-10121/T}$

表 2.6 CBM-IV における反応式 (続き)

式番号	反応式	反応速度
無機反応		
R31	$\text{OH} + \text{PNA} \rightarrow \text{NO}_2$	$1.3 \times 10^{-12} e^{380/T}$
R32	$\text{HO}_2 + \text{HO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2$	$5.9 \times 10^{-14} e^{1150/T}$
R33	$\text{HO}_2 + \text{HO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2$	$2.2 \times 10^{-38} e^{5800/T}$
R34	$\text{H}_2\text{O}_2 + h\nu \rightarrow 2\text{OH}$	radiation dependent
R35	$\text{OH} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{HO}_2$	$3.1 \times 10^{-12} e^{-187/T}$
R36	$\text{OH} + \text{CO} \rightarrow \text{HO}_2$	2.2×10^{-13}
ホルムアルデヒド反応		
R37	$\text{FORM} + \text{OH} \rightarrow \text{HO}_2 + \text{CO}$	1.0×10^{-11}
R38	$\text{FORM} + h\nu \rightarrow 2\text{HO}_2 + \text{CO}$	radiation dependent
R39	$\text{FORM} + h\nu \rightarrow \text{CO}$	radiation dependent
R40	$\text{FORM} + \text{O} \rightarrow \text{OH} + \text{HO}_2 + \text{CO}$	$3.0 \times 10^{-11} e^{-1550/T}$
R41	$\text{FORM} + \text{NO}_3 \rightarrow \text{HNO}_3 + \text{HO}_2 + \text{CO}$	1.0×10^{-16}
高分子アルデヒド反応		
R42	$\text{ALD2} + \text{O} \rightarrow \text{C}_2\text{O}_3 + \text{OH}$	$1.2 \times 10^{-11} e^{-986/T}$
R43	$\text{ALD2} + \text{OH} \rightarrow \text{C}_2\text{O}_3$	$7.0 \times 10^{-12} e^{250/T}$
R44	$\text{ALD2} + \text{NO}_3 \rightarrow \text{C}_2\text{O}_3 + \text{HNO}_3$	2.5×10^{-15}
R45	$\text{ALD2} + h\nu \rightarrow \text{FORM} + \text{XO}_2 + \text{CO} + 2\text{HO}_2$	radiation dependent
R46	$\text{C}_2\text{O}_3 + \text{NO} \rightarrow \text{FORM} + \text{XO}_2 + \text{HO}_2 + \text{NO}_2$	$5.4 \times 10^{-12} e^{250/T}$
R47	$\text{C}_2\text{O}_3 + \text{NO}_2 \rightarrow \text{PAN}$	$8.0 \times 10^{-20} e^{5500/T}$
R48	$\text{PAN} \rightarrow \text{C}_2\text{O}_3 + \text{NO}_2$	$9.4 \times 10^{16} e^{-14000/T}$
R49	$\text{C}_2\text{O}_3 + \text{C}_2\text{O}_3 \rightarrow 2\text{FORM} + 2\text{XO}_2 + 2\text{HO}_2$	2.0×10^{-12}
R50	$\text{C}_2\text{O}_3 + \text{HO}_2 \rightarrow 0.79\text{FORM} + 0.79\text{XO}_2$ $+ 0.79\text{HO}_2 + 0.79\text{OH}$	6.5×10^{-12}

表 2.6 CBM-IV における反応式 (続き)

式番号	反応式	反応速度
アルカン反応		
R51	$\text{OH} \rightarrow \text{FORM} + \text{XO}_2 + \text{HO}_2$	$1.1 \times 10^2 e^{-1710/T}$
R52	$\text{PAR} + \text{OH} \rightarrow 0.87\text{XO}_2 + 0.13\text{XO}_2 \text{ N} + 0.11\text{HO}_2$ $0.11\text{ALD2} + 0.76\text{ROR} - 0.11\text{PAR}$	8.1×10^{-13}
R53	$\text{ROR} \rightarrow 1.10\text{ALD2} + 0.96\text{XO}_2 + 0.94\text{HO}_2$ $+ 0.04\text{XO}_2 \text{ N} + 0.02\text{ROR} - 2.10\text{PAR}$	$1.0 \times 10^{15} e^{-8000/T}$
R54	$\text{ROR} \rightarrow \text{HO}_2$	1.6×10^3
R55	$\text{ROR} + \text{NO}_2 \rightarrow$	1.65×10^{-11}
アルケン反応		
R56	$\text{O} + \text{OLE} \rightarrow 0.63\text{ALD2} + 0.38\text{HO}_2 + 0.28\text{XO}_2$ $+ 0.30\text{CO} + 0.20\text{FORM} + 0.02\text{XO}_2 \text{ N} + 0.22\text{PAR} + 0.20\text{OH}$	$1.2 \times 10^{-11} e^{-324/T}$
R57	$\text{OH} + \text{OLE} \rightarrow \text{FORM} + \text{ALD2} + \text{XO}_2 + \text{HO}_2 - \text{PAR}$	$5.2 \times 10^{-12} e^{504/T}$
R58	$\text{O}_3 + \text{OLE} \rightarrow 0.50\text{ALD2} + 0.74\text{FORM} + 0.33\text{CO}$ $+ 0.44\text{HO}_2 + 0.22\text{XO}_2 + 0.10\text{OH} - \text{PAR}$	$1.4 \times 10^{-14} e^{-2105/T}$
R59	$\text{NO}_3 + \text{OLE} \rightarrow 0.91\text{XO}_2 + \text{FORM} + \text{ALD2}$ $+ 0.09\text{XO}_2 \text{ N} + \text{NO}_2 - \text{PAR}$	7.7×10^{-15}
R60	$\text{OH} + \text{ETH} \rightarrow \text{FORM} + 0.70\text{XO}_2 + \text{CO} + 1.70\text{HO}_2$ $+ 0.30\text{OH}$	$1.0 \times 10^{-11} e^{-792/T}$
R61	$\text{OH} + \text{ETH} \rightarrow \text{XO}_2 + 1.56\text{FORM} + \text{HO}_2 + 0.22\text{ALD2}$	$2.0 \times 10^{-12} e^{411/T}$
R62	$\text{O}_3 + \text{ETH} \rightarrow \text{FORM} + 0.42\text{CO} + 0.12\text{HO}_2$	$1.3 \times 10^{-14} e^{-2633/T}$
芳香族反応		
R63	$\text{OH} + \text{TOL} \rightarrow 0.08\text{XO}_2 + 0.36\text{CRES} + 0.44\text{HO}_2$ 0.56TO_2	$2.1 \times 10^{-12} e^{322/T}$
R64	$\text{TO}_2 + \text{NO} \rightarrow 0.90\text{NO}_2 + 0.90\text{OPEN} + 0.90\text{HO}_2$	8.1×10^{-12}
R65	$\text{TO}_2 \rightarrow \text{HO}_2 + \text{CRES}$	4.2
R66	$\text{OH} + \text{CRES} \rightarrow 0.40\text{CRO} + 0.60\text{XO}_2 + 0.60\text{HO}_2$ 0.30OPEN	4.1×10^{-11}
R67	$\text{NO}_3 + \text{CRES} \rightarrow \text{CRO} + \text{HNO}_3$	2.2×10^{-11}
R68	$\text{CRO} + \text{NO}_2 \rightarrow$	1.4×10^{-11}

表 2.6 CBM-IV における反応式 (続き)

式番号	反応式	反応速度
芳香族反応		
R69	OH + XYL \rightarrow 0.70HO ₂ + 0.50XO ₂ + 0.20CRES + 0.80MGLY + 1.10PAR + 0.30TO ₂	$1.7 \times 10^{-11} e^{116/T}$
R70	OH + OPEN \rightarrow XO ₂ + C ₂ O ₃ + 2HO ₂ + 2CO + FORM	3.0×10^{-11}
R71	OPEN + h ν \rightarrow C ₂ O ₃ + CO + HO ₂	radiation dependent
R72	O ₃ + OPEN \rightarrow 0.03ALD2 + 0.62C ₂ O ₃ + 0.70FORM + 0.03XO ₂ + 0.69CO + 0.08OH + 0.76HO ₂ + 0.20MGLY	$5.4 \times 10^{-17} e^{-500/T}$
R73	OH + MGLY \rightarrow XO ₂ + C ₂ O ₃	1.7×10^{-11}
R74	MGLY + h ν \rightarrow C ₂ O ₃ + CO + HO ₂	radiation dependent
イソプレン反応		
R75	O + ISOP \rightarrow 0.60HO ₂ + 0.80ALD2 + 0.55OLE + 0.50XO ₂ + 0.50CO + 0.45ETH + 0.90PAR	1.8×10^{-11}
R76	OH + ISOP \rightarrow FORM + XO ₂ + 0.67HO ₂ + 0.40MGLY + 0.20C ₂ O ₃ + ETH + 0.20ALD2 + 0.13XO ₂ N	9.6×10^{-11}
R77	O ₃ + ISOP \rightarrow FORM + 0.40ALD2 + 0.55ETH + 0.20MGLY + 0.60CO + 0.10PAR + 0.44HO ₂ + 0.10OH	1.2×10^{-17}
R78	NO ₃ + ISOP \rightarrow XO ₂ N	3.2×10^{-13}
オペレータ反応		
R79	XO ₂ + NO \rightarrow NO ₂	8.1×10^{-12}
R80	XO ₂ + XO ₂ \rightarrow	$1.7 \times 10^{-14} e^{1300/T}$
R81	XO ₂ N + NO \rightarrow	6.8×10^{-13}

2.7 結言

本章では、第3章以下で用いる数値モデルについて記述した。

運動方程式、連続式、熱・比湿保存式および静水力学式からなる基礎方程式、鉛直乱流拡散を決定するための乱流モデル、地表付近の境界条件決定のための接地境界層モデルと熱収支モデルは、第3章から第5章の大気境界層の流れを予測するために用いられる。本研究で提案する都市キャノピモデルの精度および感度解析は、第4章で詳細に述べられる。また、大気境界層予測モデルと都市キャノピモデルのカップリング計算も、第4章で行われる。都市スケールの詳細な計算を行うためのネスティング法は、第3章と第4章で用いられる。基礎方程式中に観測値への同化項を付加し、計算値と観測値を同化させる4次元同化法については、第4章で試みられている。移流・拡散、沈着過程、光化学反応過程を含む大気濃度予測モデルは、第5章で用いられる。

参考文献

- 2-1) 中村泰人: アーバンキャニオンの熱挙動とモデリング, 日本建築学会環境工学委員会熱・空気環境省委員会第19回シンポジウム, 3-10 (1989)
- 2-2) オーク, 斎藤直輔他訳: 境界層の気候, 朝倉書店 (1989)
- 2-3) R.A. Pielke: Mesoscale Meteorological Modeling, ACADEMIC PRESS (1984)
- 2-4) D.R.Durran and J.B.Klemp : The Effects of Moisture on Trapped Mountain Lee Waves , *J.Atmos.Sci.* , 39 , 2490-2506 (1982)
- 2-5) M.Ikawa : Technical Reports of the MRI ,28 (1991)
- 2-6) M.C.Tapp and P.W.White : A non-hydrostatic mesoscale model , *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 102, 277-296 (1976)
- 2-7) K.M.Carpenter : An experimental forecast using a non-hydrostatic mesoscale model, *Quart.J.Roy.Meteor.Soc.* , 105 , 629-655 (1979)
- 2-8) R.A.Pielke : A Three-Dimensional Numerical Model of the Sea Breezes Over South Florida , *Monthly Weath.Rev.* ,102 , 115-139 (1974)
- 2-9) T.Yamada : A Numerical Simulation of Nocturnal Drainage Flow , *J.Meteor.Soc.Jpn.* ,59 ,108-122 (1981)
- 2-10) F.Kimura and S.Takahashi : Climatic Effects of Land Reclamation in Tokyo Bay - Numerical Experiment , *Energy and Buildings* ,15-16, 147-156 (1990/91)
- 2-11) J.P.Klemp and R.B.Wilhelmson : The Simulation of Three-Dimensional Convective Storm Dynamics , *J.Atmos.Sci.*,35,1070-1096 (1978)
- 2-12) M.Murakami : Numerical Modeling of Dynamical and Microphysical Evolution of Isolated Convective Cloud -The 19 July 1981 CCOPE Cloud- , *J.Meteor.Soc.Jap.* , 68, 107-128 (1990)
- 2-13) K.Ueyoshi and Y.J.Han : A Three-Dimensional Simulation of Airflow and Orographic Rain over the Island of Hawaii, *J.Meteor.Soc.Jap.* , 69, 127-152 (1991)
- 2-14) G.L.Mellor and T.Yamada : A Hierarchy of Turbulence Closure Models for Planetary Boundary Layers , *J.Atmos.Sci.* ,31, 1781-1806 (1974)
- 2-15) T.Yamada and G.L.Mellor : A Simulation of the Wangara Atmospheric Boundary Layer Data, *J.Atmos.Sci.* ,32 , 2309-2329 (1975)
- 2-16) G.L.Mellor and T.Yamada : Development of a Turbulence Closure Model for Geophysical Fluid Problems ,*Review Geophys.and Space Phys.* ,20, 851-875 (1982)

- 2-17) W.Sha and T.Kawamura : A Numerical Study on Sea/Land Breezes as a Gravity Current Kelvin-Helmholtz Billows and Inland Penetration of the Sea-Breeze Front , *J. Atmos. Sci.* ,48, 1649-1665 (1991)
- 2-18) 高木久之, 北田敏廣 : ドップラーソーダによる大気境界層下部の乱れの鉛直分布とその $k-\epsilon$ モデルによる解析, *天気*, 41, 827-846 (1994)
- 2-19) Blackadar, A.K, Boundary layer wind maxima and their significance for the growth of nocturnal inversions. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 38, 283 - 290 (1957).
- 2-20) 竹内清秀, 近藤純正: 大気科学講座 1 地表に近い大気, 東京大学出版界 (1981)
- 2-21) J.R. Garratt: The atmospheric boundary layer, CAMBRIDGE (1992)
- 2-22) J.A.Businger, J.C.Wyngaard, Y.Izumi, and E.F.Bradley : Flux-profile relationship in the atmospheric surface layer. *J. Appl. Meteor.*, 28, 181-189 (1971).
- 2-23) Y. Mahrer and R.A.Pielke : A Numerical Study of the Air Flow over Irregular Terrain. *Beit. Phys. Atmos.*, 50, 98-113 (1977).
- 2-24) J.W.Deardorff : Efficient prediction of ground surface temperature and moisture with inclusion of a layer vegetation. , *J. Geophys. Res.*, 83, 1889 -1903 (1978)
- 2-25) D.D.Staley and G.W.Jurica : Effective atmospheric emissivity under clear skies , *J. Appl. Meteor.*, 11, 349 -356 (1972)
- 2-26) Y. Mahrer and R.A.Pielke : The Effects of the Topography on Sea and Land Breezes in a Two-Dimensional Numerical Model., *Mon. Wea. Rev.*, 105, 1151-1162 (1977).
- 2-27) 吉川暁, 山口克人, 近藤明, 齋木謙太郎 : 地形の傾斜を考えた熱収支モデル, 空気調和・衛生工学近畿支部学術研究発表会, 79-82 (1991)
- 2-28) F.Kimura : Heat Flux on Mixtures of Different Land-use Surface: Test of a New Parameterization Scheme , *J. Meteor. Soc. Jpn.* ,67, 401-409 (1989)
- 2-29) D.T.Mihailovic, R.A.Pielke : A Resistance Representation of Schemes for Evaporation from Bare and Partly Plant-covered Surfaces for Use in Atmospheric Models , *J. Appl. Meteor.* ,32 , 1038-1054 (1993)
- 2-30) 近藤純正: 水環境の気象学, 朝倉書店 (1994)
- 2-31) F.Acs., D.T.Mihailovic, and B.Rajkovic : A coupled soil moisture and a surface temperature prediction model. *J. Appl. Meteor.*, 30, 812 -8228 (1991)
- 2-32) R.B.Clapp and G.M.Homberger : Empirical equations for some soil hydraulic properties, *Water Resour. Res.*, 14, 601-604 (1978)
- 2-33) S.D. Idso and R.D.Jackson : Thermal radiation from the atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 74, 5397-5403 (1969).
- 2-34) M. Aida and K.Gotoh : Urban Albedo as a Function of the Urban Structure - A Two-Dimensional Numerical Simulation. *Bound. Layer Met.*, 23, 416 - 424 (1982).

- 2-35) 宇田川光弘 : パソコンによる空気調和計算法, オーム社, (1986)
- 2-36) 谷口博 : パソコン活用のモンテカルロ法による放射伝熱解析, コロナ社, (1994)
- 2-37) T.Yamada : A numerical model study of turbulent airflow in and above a forest canopy. *J. Met. Soc. Japan*, 60, 439 - 454 (1982).
- 2-38) I.Uno, H. Ueda and S. Wakamatsu : Numerical Modeling of the Nocturnal Urban Boundary Layer. *Bound. layer. Meteor.*, 49, 77 - 98 (1989).
- 2-39) 富士総合研究所編 : 汎用流体解析システム FUJI-RIC/ α -Flow, 丸善, (1993)
- 2-40) N.L.Seaman, F.L.Ludwig, E.G.Donall, T.T.Warner and C.M.Bhumralkar : Numerical Studies of Urban Planetary Boundary-Layer Structure under Realistic Synoptic Conditions, *J.Appl.Meteor.* ,28 ,760-781 (1989)
- 2-41) T.Yamada and S.Bunker : Development of a Nested Grid, Second Momentum Turbulence Closure Model and Application to the 1982 ASCOT Brush Creek Data Simulation , *J.Appl.Meteor.* ,27 ,562-578 (1987)
- 2-42) T.L.Clark and R.D.Farley : Severe Downslope Windstorm Calculations in TWO and Three Spatial Dimensions Using Anelastic Interactive Grid Nesting: A Possible Mechanism for Gustiness, *J.Atmos.Sci.* ,41 ,329-350 (1984)
- 2-43) C.Chen : A Nested Grid, Nonhydrostatic, Elastic Model Using a Terrain-following coordinate Transformation: The Radiative-nesting Boundary Condition, *Month. Weath. Rev.* ,119 ,2852-2869 (1991)
- 2-44) T.Yamada and S. Bunker : A numerical model study of nocturnal drainage flows with strong wind and temperature gradients, *J. Appl. Meteor.* ,28 ,545-554 (1989)
- 2-45) D.R.Stauffer and N.L.Seaman : Use of four - Dimensional data assimilation in a limited - area mesoscale model. Part II : Effects of data assimilation within the planetary boundary layer, *MON. Wea. Rev.* ,119 ,734-754 (1991)
- 2-46) 鶴野伊津志 : 4次元データ同化手法による関東地域の局地循環シミュレーションと評価, 大気環境学会誌 ,30 ,351-366 (1995)
- 2-47) M.H.Dickerson : MASCON - A Mass Consistent Atmospheric Flux Model for Regional with Complex Terrain, *J. Appl. Meteor.* ,17 ,241-253 (1978)
- 2-48) W.R.Goodin and et.al. : An Objective Analysis Technique for Constructing Three - Dimensional Urban - Scale Wind Fields, *J. Appl. Meteor.* ,19 ,98-108 (1980)
- 2-49) 吉川暁, 山口克人, 近藤明, 辻裕伸, 寸田朋子 : 大気汚染ガスの乾性沈着モデル, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, 67-70 (1991)
- 2-50) M.L.Wesley, B.B.Hicks : Some Factors That Affect the Deposition Rates of Sulfur Dioxide and Similar Gases on Vegetation, *J. Air Poll. Control Assoc.*, 27, 1110-1116 (1977)

- 2-51) A.C.Chamberlain : The Transport of Gases to and from Grass and Grasslike Surfaces, *Proceeding Royal Soc.*, A290, 236-265 (1966)
- 2-52) D.J.Spalding 藤縄 勝彦訳 : 物質移動論, 産業図書,
- 2-53) 原達己, 李相得, 山口克人, 近藤明 (1995) : 地表構成面への NO_2 の沈着抵抗, 第 36 回大気環境学会講演要旨集, 565 (1995)
- 2-54) 李和云 : 地域大気環境の数値予測モデルに関する研究, 大阪大学大学院環境工学専攻博士論文 (1987)
- 2-55) I.Colbeck, Roy M.Harrison : Dry Deposition of Ozone: Some Measurements of Deposition Velocity and of Vertical Profiles to 100Meters, *Atmos. Env.*, 19, 1807-1818 (1985)
- 2-56) J.A.Garland : The Dry Deposition of Sulphur Dioxide to Land and Water Surfaces, *Proc. R. Soc. Land*, a354, 245-268 (1977)
- 2-57) 辻裕伸 : 大気汚染ガスの沈着除去過程のモデル化に関する研究, 大阪大学大学院環境工学専攻修士論文 (1991)
- 2-58) Michael W.Gery, Gary Z.Whitten, James P.Killus and Marcia C.dodge : A PHOTOCHEMICAL KINETICS MECHANISM FOR URBAN AND REGIONAL SCALE COMPUTER MODELING, *J. Geophys. Res.*, Vol.94, No.D10, 12925-12956 (1989)

第3章 韓国釜山新島建設による周辺気候への影響

3.1 緒言

韓国釜山市では、Yeung-do と Songdo で囲まれた湾を埋め立てて人工島を作る計画がある。人工島は約 6.2km^2 の大きさを持ち、住宅、商業施設および港湾施設が建設される予定である。また埋め立て土の一部は Yeung-do と Songdo の丘陵の土が利用され、その跡地には住宅、商業施設が建設される。このような大規模な地表面の改変が行われた場合、周辺の大気環境への影響が懸念される。

大規模な地表改変を対象に数値計算が行われた研究事例がいくつかある。Hjelmfelt³⁻¹⁾ は、セントルイスを対象に都市化が起こる場合と起こらない場合の地表面パラメータを変化させて大気流れの違いをシミュレーションしている。同様に北田³⁻²⁾ は濃尾平野の土地利用の植被率と水面比率を変化させると、局地気候にどのような変化を与えるかを数値計算で求めている。また、Kimura³⁻³⁾ は東京湾を埋め立て場合の気候影響を数値モデルで調べている。

本章でもこれらの研究事例と同様に、数値モデルを用いてその影響を予測した。

3.2 計算条件

3.2.1 計算領域

計算対象広領域を図 3.1 に示す。図 3.1 中の四角の枠で囲まれた領域がネスティング領域部で、韓国釜山市域に対応する。また、図中の●は釜山気象台、■は釜山空港の位置を示している。ここでは、気象観測が行われており、3.3.2 節でモデル計算との比較を行う。ネスティング領域部の拡大図を図 3.2 に示す。人工島は、Yeung-do と Songdo の間に建設が予定されている。

広領域の水平方向のグリッドサイズは、 $\Delta x = 2000[\text{m}]$ 、 $\Delta y = 2000[\text{m}]$ で 25×25 メッシュに分割した。ネスティング領域の水平方向のグリッドサイズは、 $\Delta x = 400$ 、 $\Delta y = 400[\text{m}]$ で 25×25 メッシュに分割した。広領域とネスティング領域の鉛直方向のメッシュ数は、下層から 20, 60, 80, 100, 140, 300, 400, 600, 900[m] の 9 層である。

3.2.2 広領域の計算条件

1) 初期条件

風速の初期値は全領域で 0 と設定した。温位の初期値は、全領域で海面高さでの地表面温位 298K、温位勾配 0.005K/m で与えた。比湿の初期値は、高さ 2000m 以下は相対湿度 50%、高さ 2000m 以上は相対湿度 20% で与えた。

計算開始時刻は 8:00LST として 2 日間の計算を行った。以後に示す計算結果は、後半の 1 日分の計算結果である。

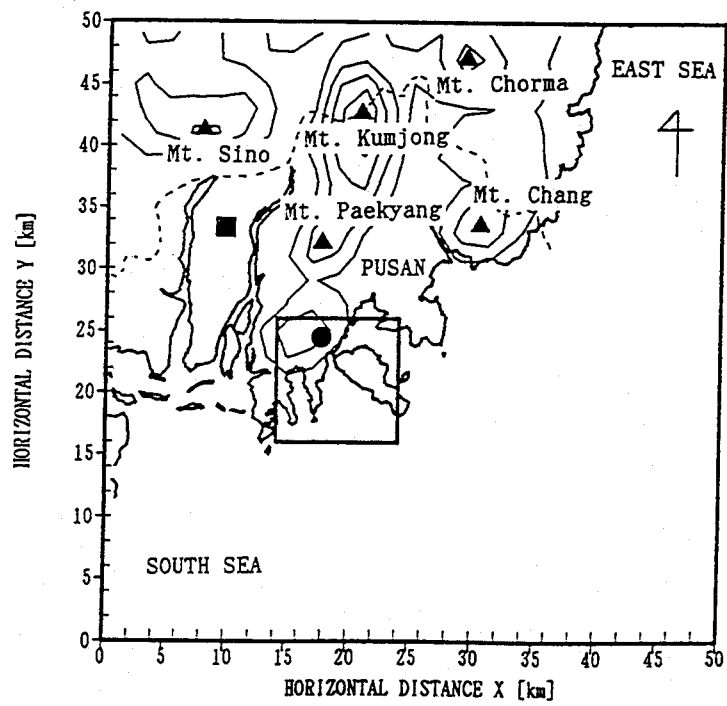


図 3.1 広領域

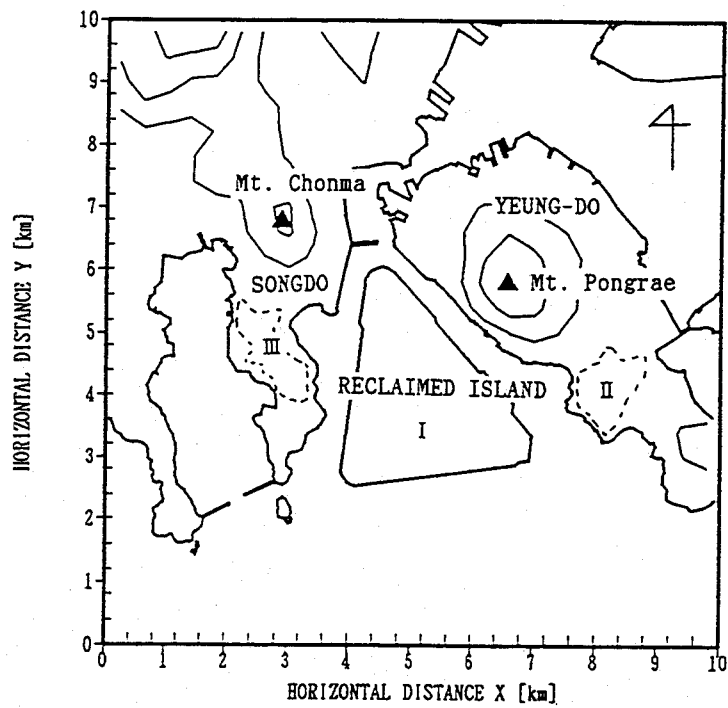


図 3.2 ネスティング領域

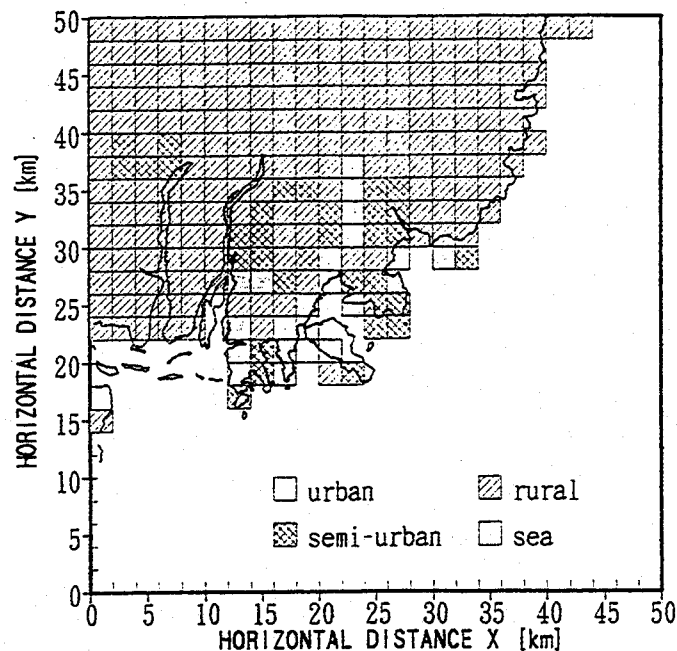


図 3.3 広領域の土地利用区分

表 3.1 広領域の土地利用パラメータ

土地利用	透過係数 [-]	人工廃熱 [cal/m ² s]	粗度 [m]	アルベド [-]	FSF ^a [-]	LAI ^b [-]	初期土壌水 [-]
Urban	0.664	16.36	1.0	0.2	0.1	4	0.1
Semi-urban	0.7	5.95	0.3	0.2	0.6	6	0.15
Rural	0.71	0	0.5	0.28	0.9	7	0.2
Sea	-	-	0.001	-	-	-	-

^a Foliage shielding Factor^b Leaf Area Index

2) 境界条件

上端境界値は、風速、温位、比湿の各物理量が初期状態から変化しないとした。地表面境界値は、Monin-Obukhov の相似則から求めた (2.2.3節参照)。側面境界は、全ての変数について勾配=0とした。

3) 土地利用パラメータ

韓国においては、土地利用データのデータベースが完備されていないため、地図と照らし合わせて土地利用区分を、都市 (urban)、郊外 (semi-urban)、田園 (rural) および海面 (sea) の4つに分類した。図 3.3に分類した結果を示す。また、各分類毎の土地利用パラメータを、表 3.1に示す。

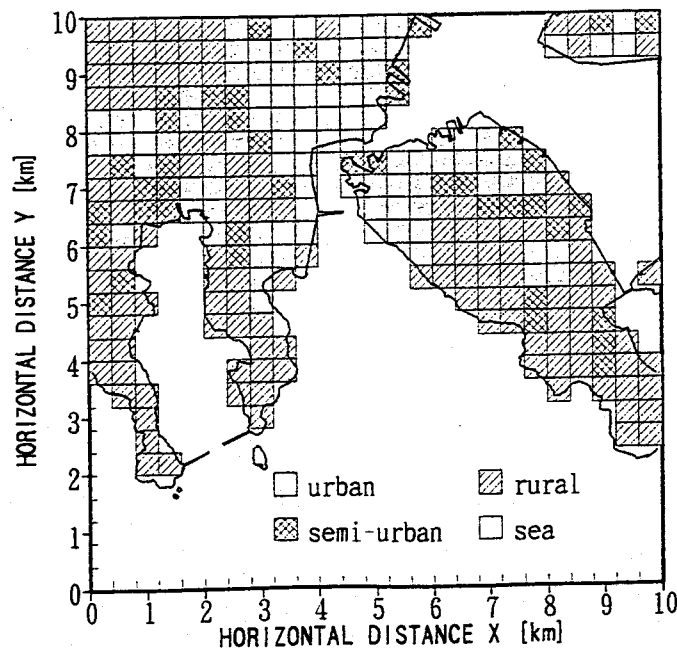


図 3.4 ネスティング領域の土地利用区分

3.2.3 ネスティング領域の計算条件

1) 初期条件

広領域の初期条件と同じである。

2) 境界条件

側面境界値は、広領域の計算値を基に2.4節に示したネスティング方法から決定した。上端と地表面境界条件は広領域と同様である。

3) 土地利用パラメータ

広領域と同様に土地利用区分を、都市 (urban), 郊外 (semi-urban), 田園 (rural) および海面 (sea) の4つに分類した。図3.4に分類した結果を示す。

また、新島建設後の土地利用を図3.5に示す。人工島および、新島建設のために土砂採取所で、その後は住宅地建設が計画されている Yeung-do と Songdo の丘陵地は Semi-urban のカテゴリとした。また、Yeung-do と Songdo 丘陵地の標高は約100mであるが、土砂採取後の標高は約40mと設定した。

3.3 広領域の計算結果

3.3.1 計算結果

広領域の4時間毎の高さ50mでの風速および温位分布を図3.6に示す。

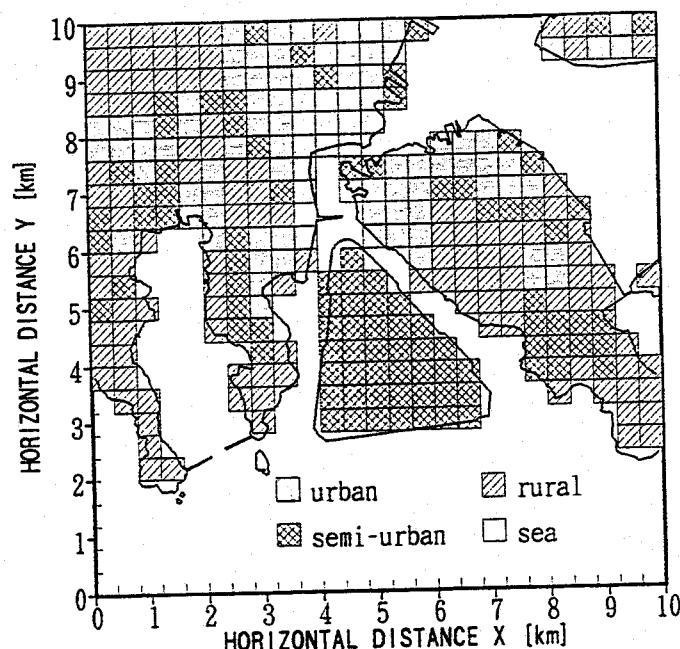


図 3.5 新島建設後のネスティング領域の土地利用区分

3.3.2 計算値と観測値の比較

モデル計算の妥当性を検証するために、釜山気象台および釜山空港での観測値と計算値の比較を行った。1991 年および 1992 年の 7 月の観測データから海陸風が発達したと考えられる 6 日間のデータを、計算との比較のために用いた。海陸風が発達する日は、以下の 3 つの条件を満足すると仮定して選んだ。

- 1 日平均風速が、対象観測期間の日平均風速より小さい。
- 2 日温度較差が、対象観測期間の日温度較差より大きい。
- 3 降雨がない。

図 3.7 に釜山気象台での観測値と計算値の速度 u, v および温度の時系列変化を示す。図中の●は 6 日間の観測値の平均値を表し、縦棒は標準偏差を表している。ただし、観測は、3 時間おきにしか行われていないため、1 日の観測データは 8 個である。また、図 3.8 に釜山空港での観測値と計算値の速度 u, v および温度の時系列変化を示す。

釜山気象台での温度の計算値は、観測値に比べて高くなっている。釜山気象台は非常に険しい小高い山の頂上に存在しているが、モデル計算の標高はメッシュ平均値なので観測値の標高を低く評価したためと考えられる。また、釜山空港での風速 v の計算値は、日中かなり小さくなっている。モデル計算の空間解像度が粗く、空港のパラメータ設定（例えば、平坦地、粗度長さが小さい）が、適切でなかったためと考えられる。このように多少の違いはあるが、全体としては観測値と計算値は良好な一致を示している。

3.4 ネスティング領域の計算結果

3.4.1 計算結果

新島建設前の 4 時間毎の高さ 50m での風速および温位分布を図 3.9 に示す。

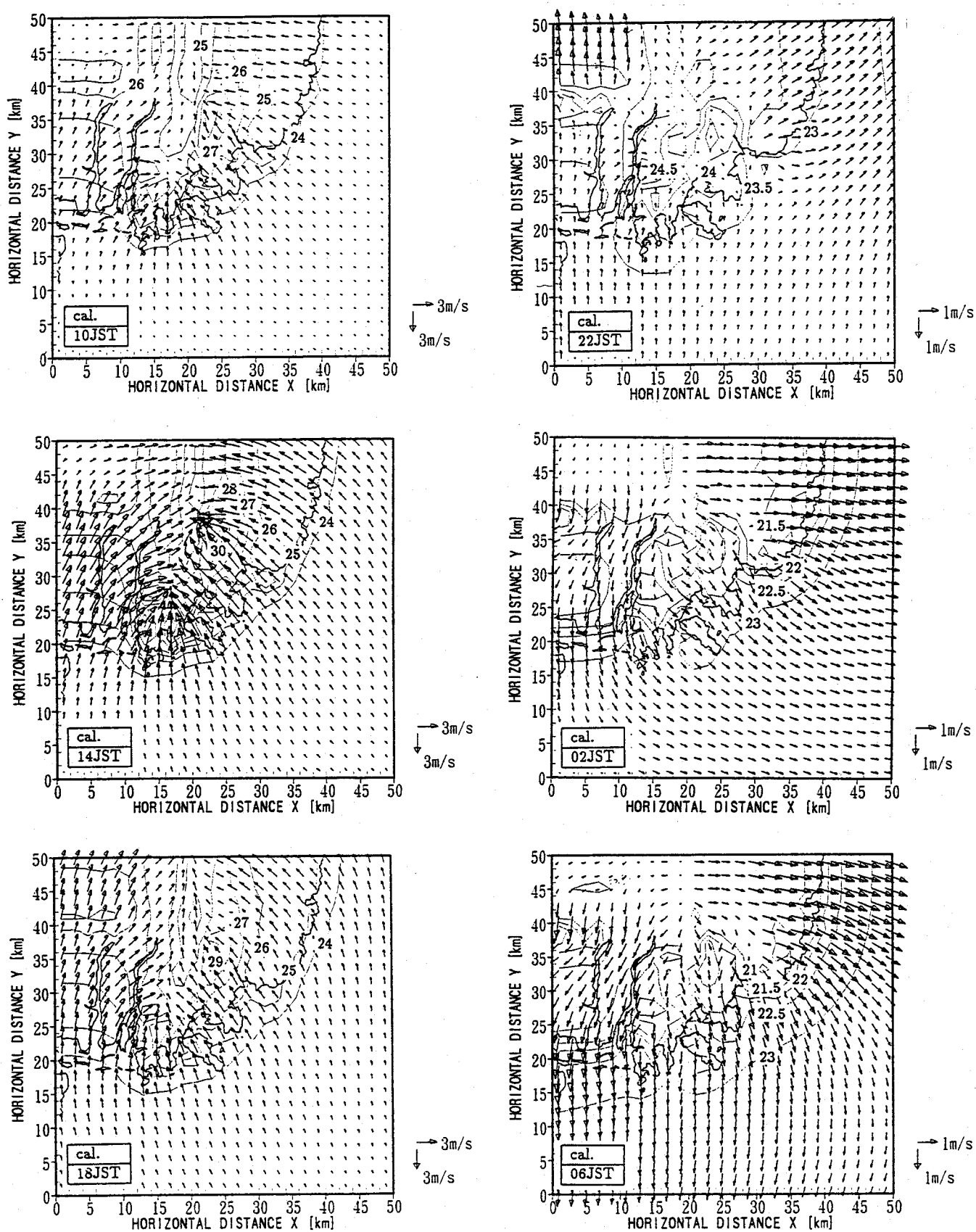


図 3.6 広領域の4時間毎の高さ50mでの風速および温位分布

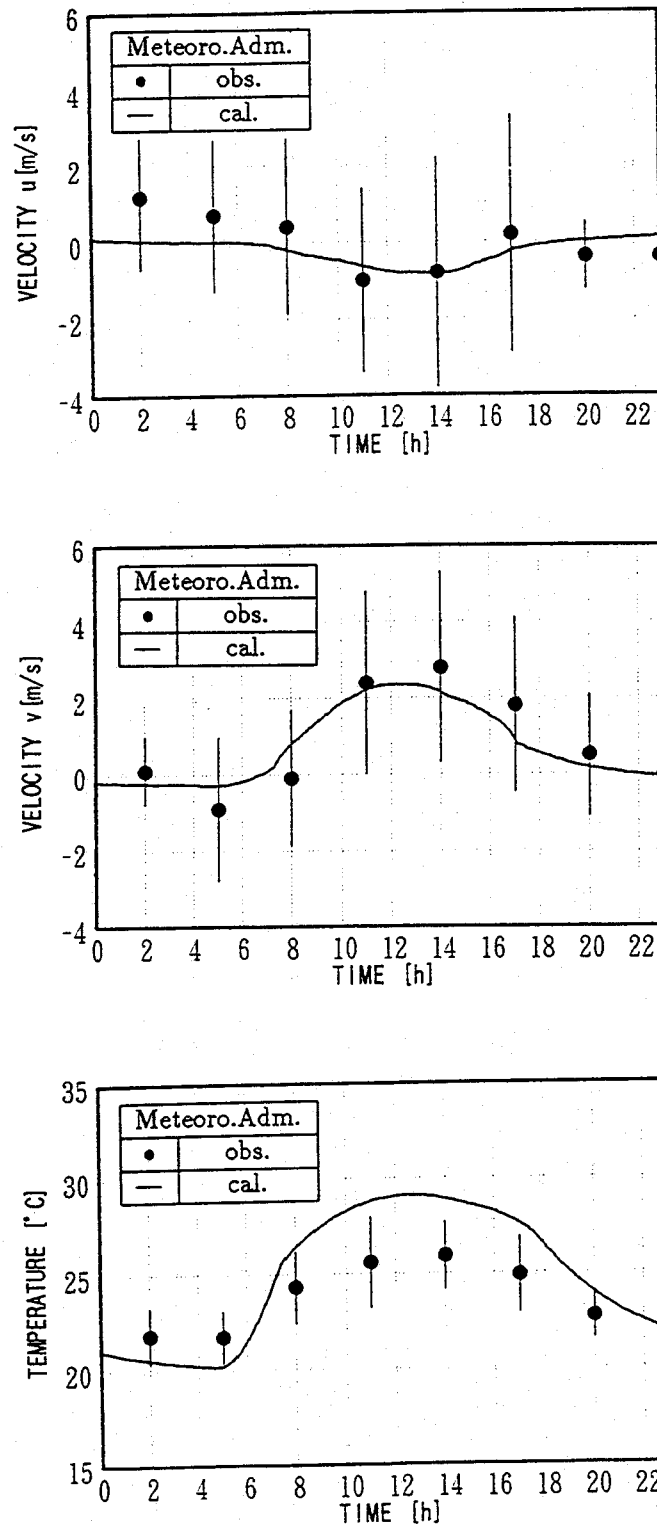


図 3.7 釜山気象台での観測値と計算値の比較

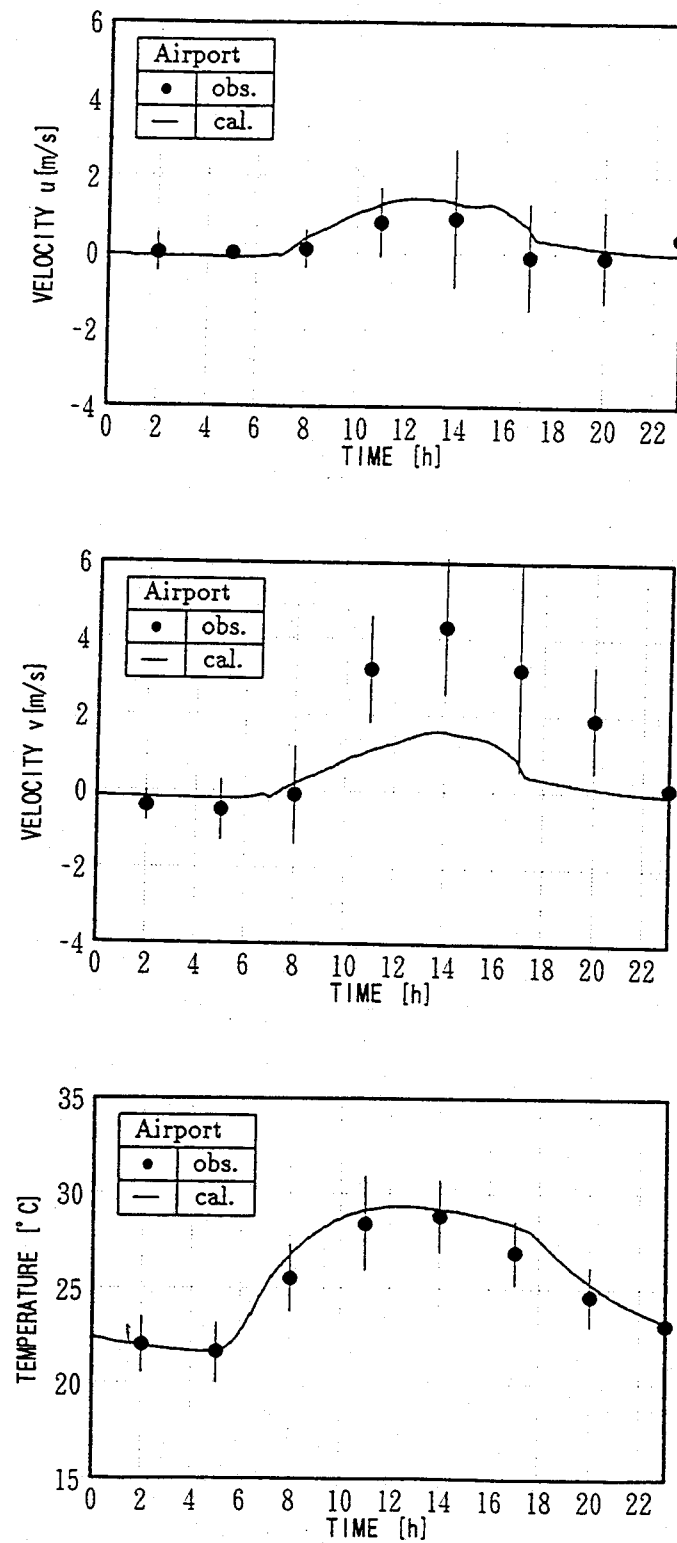


図 3.8 釜山空港での観測値と計算値の比較

3.4.2 人工島による気候変化

新島建設後の温度の計算値から新島建設前の温度の計算値を引いた高さ 50m での差の空間分布を図 3.10 に示す。日中は、人工島の地表温度が上昇するために人工島周辺で温度が高くなっており、14 時に最大で 1.4℃の温度上昇が見られる。一方 Yeung-do の西側では、0.2℃の温度下降が起こる。後に述べるが、この場所は風速が速くなり、周りの海面の冷たい空気が流れこんだためと考えられる。Songdo では温度の変化はほとんど見られない。夜間の 2 時、4 時の人工島上空では、0.1℃の温度低下が見られる。一方 Yeung-do と Songdo の丘陵跡地では、0.3℃から 0.5℃の温度上昇が見られる。山を削ったことにより標高が低くなったことと土地利用の分類を田園から半都市に変更したことによる夜間の温度上昇の相互作用の結果である。陸風から海風へ転換する 8 時には、温度の変化はほとんど見られない。

次に、風速の変化を図 3.11 に示す。日中は、人工島の温度が上がり海風が加速され、40cm/s から 50cm/s の速度上昇が見られる。図からわかるように変化が最大になる点は 2 箇所あり、1 つは人工島の西側、もう 1 つは Yeung-do の西側である。地形を変えずに人工島のみを建設するとしたシミュレーションでは、風速の変化の最大点は人工島の中央に現れ温度上昇の最大点と一致する。(図 3.13 を参照) このような最大点のずれと風速の変化が増大したのは、Yeung-do の丘陵地を削ったために風の通り道ができたと考えられる。夜間は、人工島による温度降下と粗度高さの増加による影響で 15cm/s の風速の減少が見られる。

3.4.3 丘陵地域の造成の影響

3.4.2 節では、新島建設の影響と丘陵地域の造成の 2 つの影響の相互作用によって風速や温度の変化が見られた。ここでは、新島建設のみでどのような影響が現れるかをシミュレーションし、丘陵地域の造成の影響を検討する。3.4.2 節と同様に、新島建設後の温度の計算値から新島建設前の温度の計算値を引いた高さ 50m での差の空間分布を図 3.12 に示す。また、次に、風速の変化を図 3.13 に示す。

温度変化を見ると、日中は海風が卓越し、新島上空では丘陵地域の影響をあまり受けないため、日中は新島上空の温度上昇は、丘陵地帯を造成してもしなくてもほぼ同様な結果を示している。夜間は、丘陵地域の造成を行わない方が、新島上空の温度下降がわずかであるが大きくなっている。これは、丘陵地域を造成すると Songdo での温度が上昇し、陸風によって暖かい風が、新島上空に吹き込んでくるためと考えられる。

風速変化を見ると、日中の風速の増加が丘陵地域を造成しない場合は約 30cm/s に対して、丘陵地域を造成すると約 50cm/s と大きくなり、また最大値が出現する場所が、丘陵地域を造成しない場合は新島中央なのに対し、丘陵地域を造成すると新島西側へと移動する。おそらく新島により温度上昇と Songdo の温度上昇によって加速された風速が、新島西側で合流するために生じたと考えられる。

新島建設のような大規模地表改変では、それによる影響だけでなく、周辺の地形改変(ここでは標高の低下)や土地利用変化などが気候変化をもたらす事が明らかとなった。実際に計画が行われれば、それに付随する交通網整備や Yeung-do, Songdo 以外の土地利用変化も生じると考えられ、それらも考慮したシミュレーションが必要である。

3.5 結言

韓国釜山市では、Yeung-do と Songdo で囲まれた湾を埋め立てて人工島を作る計画がある。人工島は約 6.2km²の大きさを持ち、住宅、商業施設および港湾施設が建設される予定

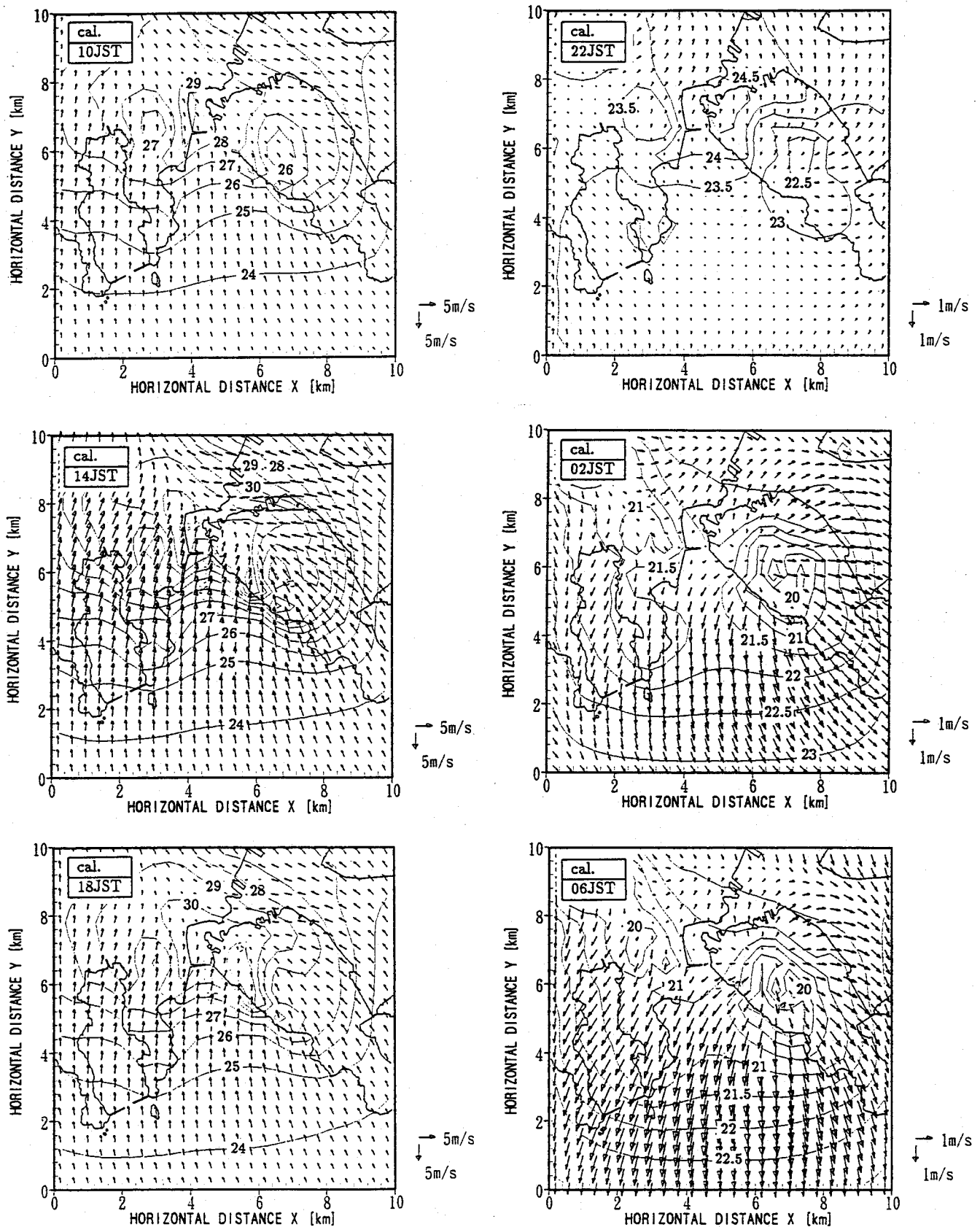


図 3.9 新島建設前の4時間毎の高さ50mでの風速および温位分布

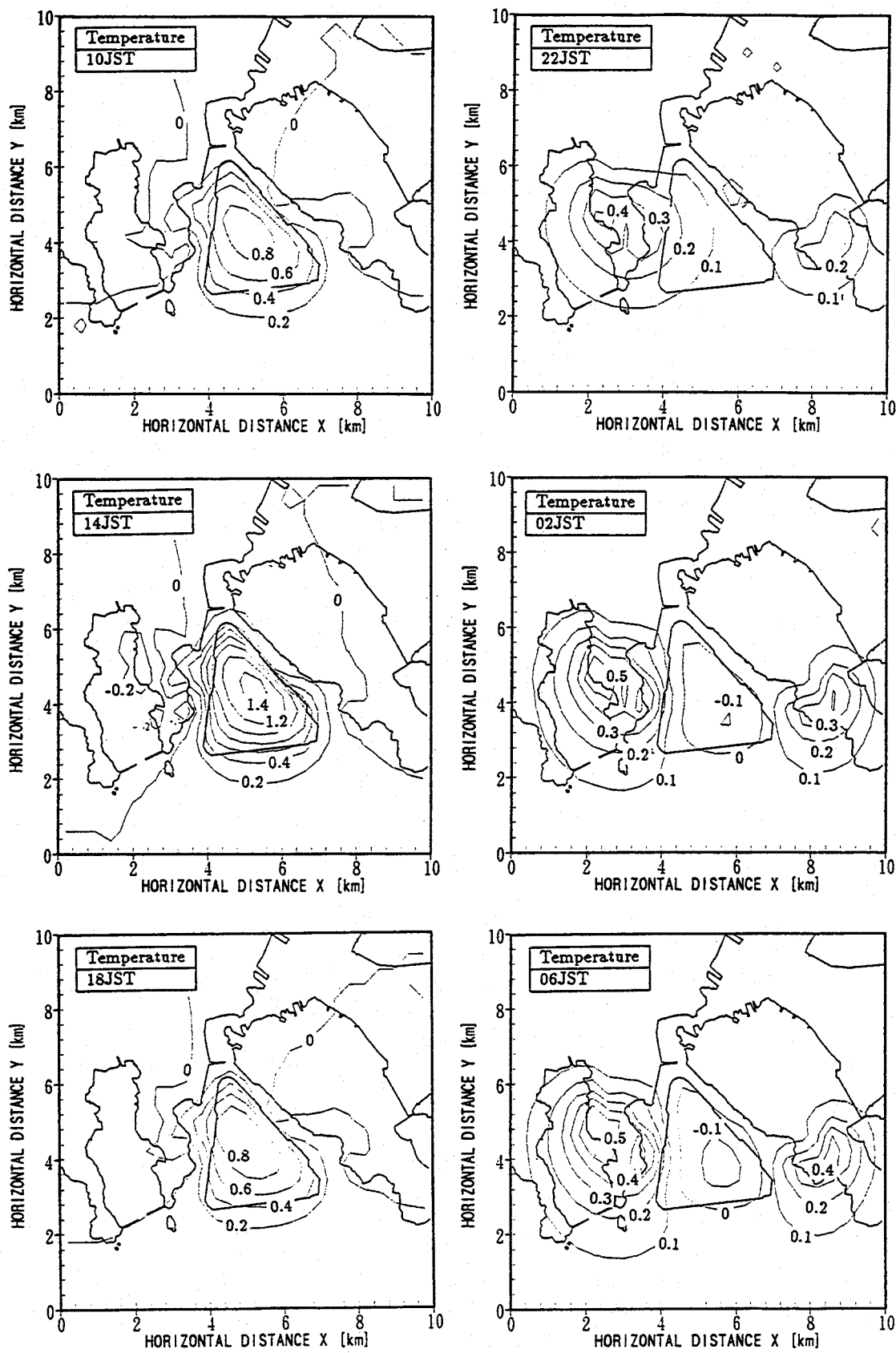


図 3.10 新島建設前後の温度変化

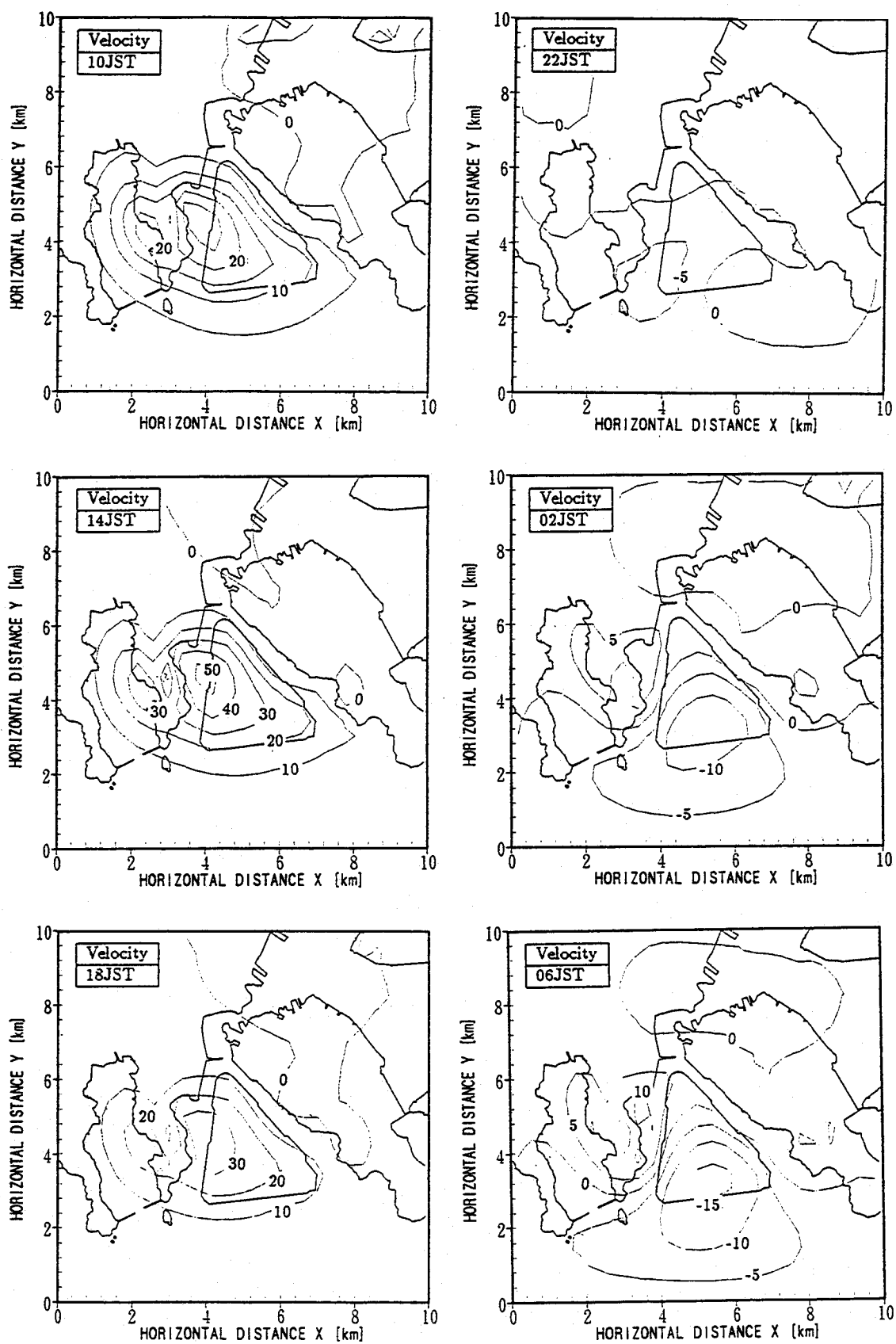


図 3.11 新島建設前後の風速変化

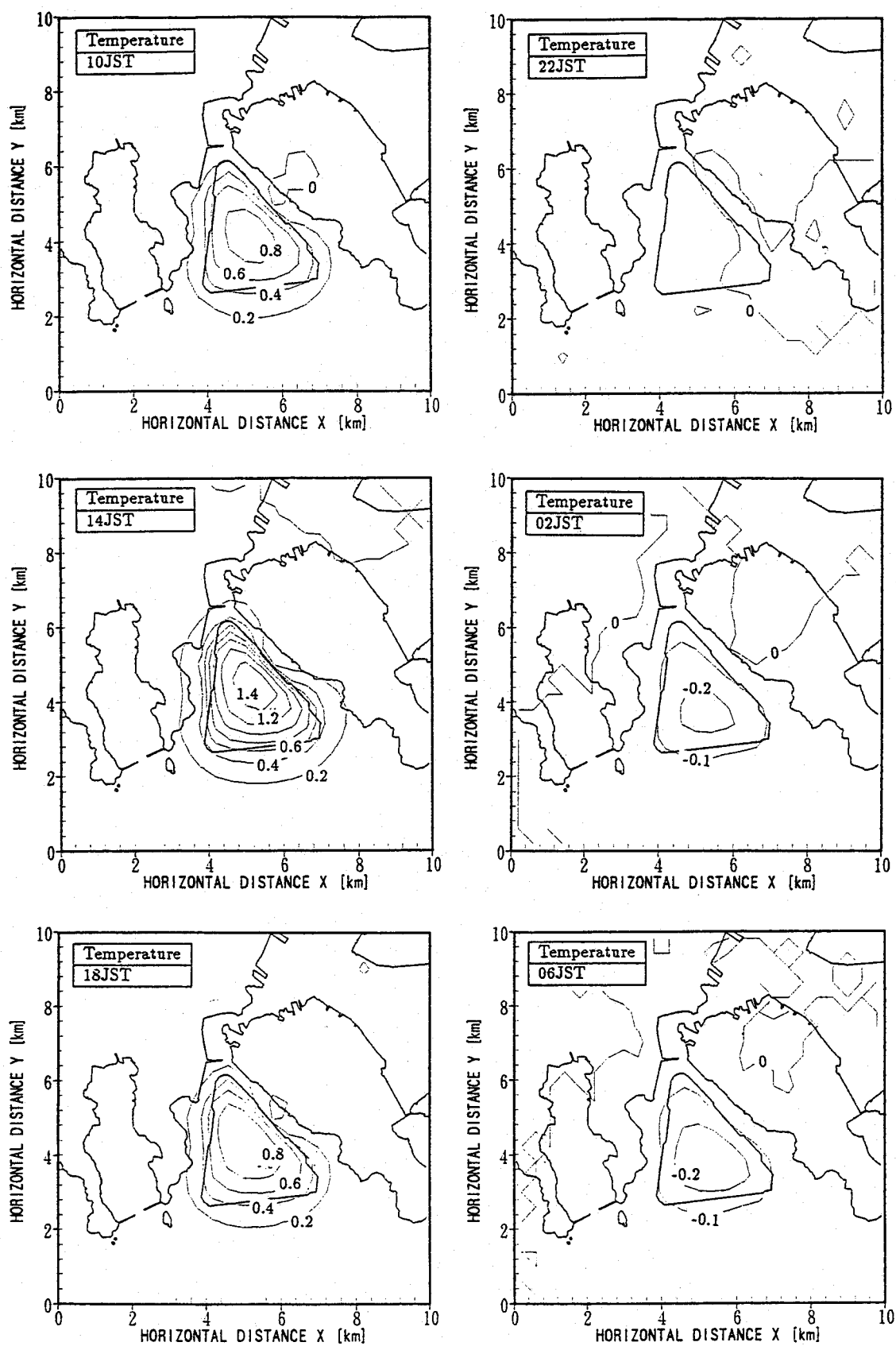


図 3.12 新島建設前後の温度変化 (丘陵地は削らない)

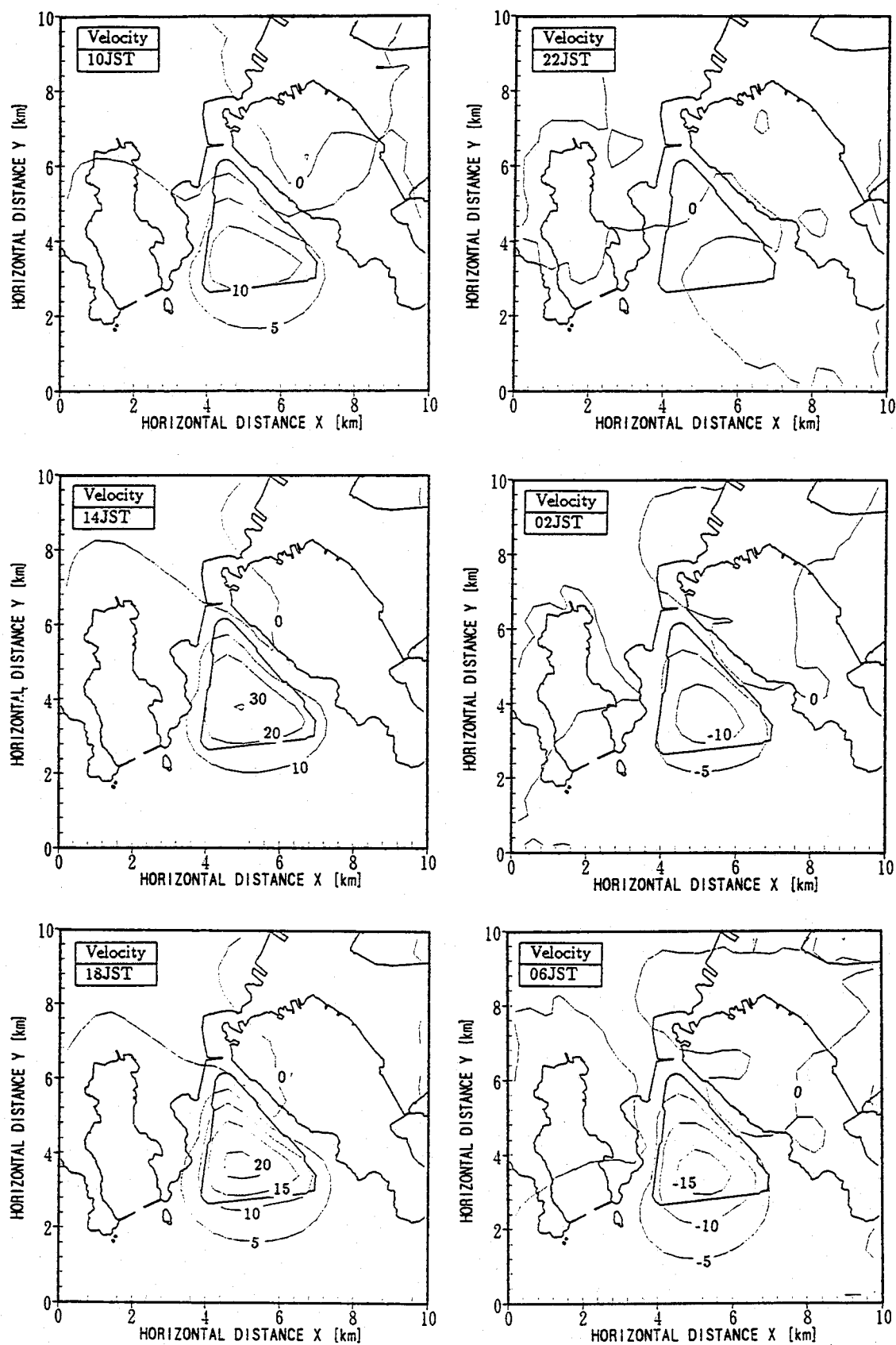


図 3.13 新島建設前後の風速変化 (丘陵地は削らない)

である。また埋め立て土の一部は Yeung-do と Songdo の丘陵の土が利用され、その跡地には住宅、商業施設が建設される。3次元シミュレーションモデルを用いて、この新島建設が気象変化に及ぼす影響を検討した。まず、釜山気象台と釜山空港の観測データと計算値の比較を行った結果、両者はほぼ良好な一致を示し、モデルの妥当性が検証された。次に、新島開発前後の温度と風速にどのような違いが生じるかを検討した。新島上空で、日中の温度上昇は最大約 1.4 度に達することが示された。また、Songdo では土砂採取の結果標高が低くなり、また土地利用のカテゴリが変化することにより夜間温度が約 0.5 度上昇することが示された。風速は、新島西側で最大約 50cm/s 早くなり、このような風速の増加は、Songdo 丘陵地域の造成の結果であることが示された。新島建設のような大規模地表改変では、それによる影響だけでなく、周辺の地形改変や土地利用変化などが気候変化をもたらす事が明らかとなり、今後このようなシミュレーションを行う際は、開発に伴う周辺地域の変化を考慮する事が重要である。

参考文献

- 3-1) M.R.Hjelmfelt : Numerical Simulation of the Effects of St. Louis on Mesoscale Boundary-Layer Airflow and Vertical Air Motion: Simulations of Urban vs Non-Urban Effects, *J. APPL. Met.* ,21 ,1239-1257 (1982)
- 3-2) 北田敏広, 米津千晴 : 都市域における緑被率, 環境水面率の増加が下記の地域規模の気候緩和に及ぼす影響, 環境工学研究論文集 ,30 ,361-370 (1993)
- 3-3) F.Kimura and S.Takahashi : Climatic Effects of Land Reclamation in Tokyo Bay - Numerical Experiment, *Energy and Buildings* ,15-16 ,147-156 (1990/91)

第4章 都市キャノピモデルの感度解析

4.1 緒言

現在、世界の人口の約 47 % が都市に集中し、我が国でも都市人口は全人口の約 70% に達している⁴⁻¹⁾。人口集中により都市ではエネルギー消費密度が大きくなり、建物や道路建設等、地表面の大部分が改変されることにより、ヒートアイランドや風速の減少等に代表される都市気候が生じている。例えば大阪市では過去 100 年間で、8 月の日平均気温、最高気温、最低気温はそれぞれ約 1.5 °C、1 °C、2 °C 上昇している⁴⁻²⁾。

このような都市ヒートアイランドの解明のために観測・実験や数値モデルによる研究が数多く行われている。Nakamura⁴⁻³⁾は、キャニオン内の温度分布測定を行い壁面方位と温度との関係を明らかにしている。また、理想化した都市模型を用いて、Aida⁴⁻⁴⁾は都市アルベドと太陽高度の関係を、Swaid⁴⁻⁵⁾は建物日照面と太陽高度の関係を明らかにしている。メソスケール数値モデルを用いて、都市ヒートアイランド現象を解明しようとする研究も多々行われている⁴⁻⁶⁾⁴⁻⁷⁾。また、植物群で形成されるキャノピ層に対して開発された数値モデル⁴⁻⁸⁾⁴⁻⁹⁾を、都市建物群の隙間空間である都市キャノピ層内に応用し、建物や人工排熱によるキャノピ層内の大気、熱環境を解明しようとする研究も、Uno⁴⁻¹⁰⁾や近藤⁴⁻¹¹⁾らによって行われている。一方建築分野では、都市建物群の隙間空間を都市キャノピ層とはとらえずに、数個の建物によって囲まれた小空間に着目した研究も行われている⁴⁻¹²⁾⁴⁻¹³⁾。以上のように都市ヒートアイランドの研究においては一般に、都市建物群の形状や方位が複雑であるためキャノピ層の正確な放射収支を求めるのが困難である。

そこで本章は、都市建物形状をモデル化し、モンテカルロ法による光追跡法を用いて都市キャノピ層内の短波・長波放射量の高さ方向分布を算出し、都市建物形状や建物表面の反射率等の変化が都市キャノピ層内の短波・長波放射収支にどのように影響するかを調べ、さらに都市キャノピ層を考慮した 1 次元大気境界層モデルを用いて、都市建物形状が都市キャノピ層内の風速、温度に及ぼす影響を明らかにする。また、この都市キャノピモデルを含む 3 次元大気境界層モデルを開発して、大阪市への応用を試み都市建物がヒートアイランド現象に及ぼす影響を評価する。

なお、2.3.3 節で述べた正味放射フラックス推定方法を用いると、モデル化した都市キャノピ内の壁面、屋上面および地表面の微小面の長波放射フラックスと短波放射フラックスを推定することができる。しかし、都市キャノピ内の水平方向に平均された温度や風速の鉛直分布を求める目的のためには、都市キャノピ内の壁面、屋上面および地表面内の水平面の温度分布や顕熱フラックス分布等を必要としない。それで、都市キャノピ層を鉛直方向にいくつかの区切り、その各層で平均した正味放射フラックスを求めることにし、以後の節では水平方向に平均された放射フラックス、風速、温位について議論を行う。

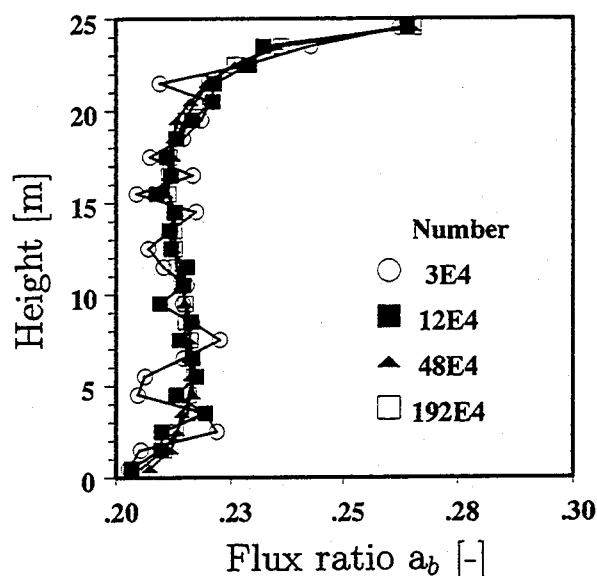


図 4.1 光子数の違いによるフラックス比の計算結果: a_b は式 (2.126) を参照

4.2 都市キャノピ内の放射量の感度解析

4.2.1 短波放射の計算結果

1) 計算精度の検討

短波放射フラックスの計算はモンテカルロ法を用いているため、発生させる光子が少ないとばらつきを生じる。投入光子数を変えて計算したフラックス比の鉛直分布を図 4.1 に示す。この結果から、以後の計算では光子投入数を 192 万個とした。

また、Aida^{4,4)}は、平面をコンクリートで覆い、その上に $0.15\text{m} \times 0.15\text{m} \times 0.15\text{m}$ のコンクリートブロックを 0.15m 間隔で多数に設置した都市模型を屋外に作成し、太陽放射量と模型からの短波放射量を測定し、その比からアルベドを求めている。また、コンクリートブロックを設置しない実験から、この実験で用いたコンクリートのアルベド値は 0.4 と報告している。計算によるアルベドは、ブロック上面からの投入光子数を N 、天空に抜ける光子数を F としたとき、 F/N で求められる。この実験と同じ条件で短波放射フラックスの計算を行い、実験結果のアルベド値と比較した。図 4.2 に示すように、15 時すぎの実験値は計算値に比べて大きな値となっているが、他の実験値と計算値はほぼ一致しており、2.3.3 節で述べた短波放射フラックスの計算手法は妥当であると考えられる。

2) 都市形状の影響

都市キャノピ内の表面が受ける短波放射フラックスが、都市形状の違いによってどのように変化するかを調べた。ここでは都市形状を決定する要素として、(1) 建物被覆率、(2) キャノピ高さ、(3) 建物が南に向かって縦長か横長か、(4) 建物の向き の 4 つを考えた。表 4.1 に各要素のモデルパラメータ値を示す。また太陽高度は表 4.2 に示す緯度、経度および日時から算出した。

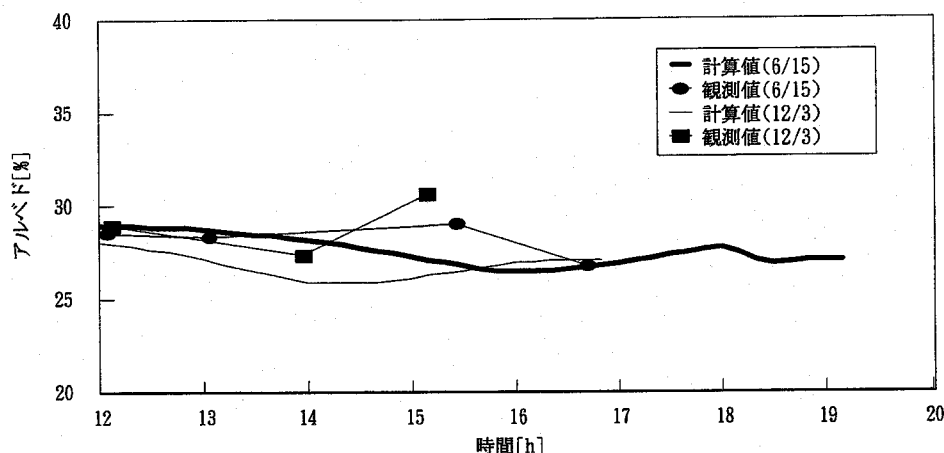


図 4.2 アルベドの実験値と計算値の比較 (観測値は Aida⁴⁻⁴⁾より引用)

表 4.1 都市キャノピ形状のパラメータ値

	η [-]	h_c [m]	$W_{sx} \times W_{sy}$ [m]×[m]	$W_{bx} \times W_{by}$ [m]×[m]	$\alpha_b^{1)}$ [rad]
Case1	0.25	25	50×50	25×25	0
Case2	0.36	25	50×50	30×30	0
Case3	0.49	25	50×50	35×35	0
Case4	0.64	25	50×50	40×40	0
Case5	0.25	30	50×50	25×25	0
Case6	0.25	40	50×50	25×25	0
Case7	0.25	50	50×50	25×25	0
Case8	0.25	25	50×25	25×12.5	0
Case9	0.25	25	25×50	12.5×25	0
Case10	0.25	25	50×50	25×25	$\pi/6$
Case11	0.25	25	50×50	25×25	$\pi/3$

1) the angle between a building and east - west direction.

被覆率を 0.25 (Case1), 0.36 (Case2), 0.49 (Case3), 0.64 (Case4) と変化させたときの, フラックス比 $a_{b,i}$ の鉛直分布の太陽時角による変化を図 4.3 に示す. 図 4.3 で, 高さ 0m でのプロットは地表面のフラックス比を, 高さ 25m でのプロットは屋上面でのフラックス比を表し, またその間のプロットは, 水平方向に平均した壁面のフラックス比である. また図上部に記した値は太陽時角を表している. 太陽時角が大きくなると, 地表面を含むキャノピ低部壁面でフラックス比は小さくなり, そして被覆率が高いほどフラックス比は小さくなる. 特に被覆率が高い Case4 の場合は, その影響が顕著である. また太陽時角が 90 度の場合には太陽高度が低くなり, キャノピ壁面上部で大きな値となる.

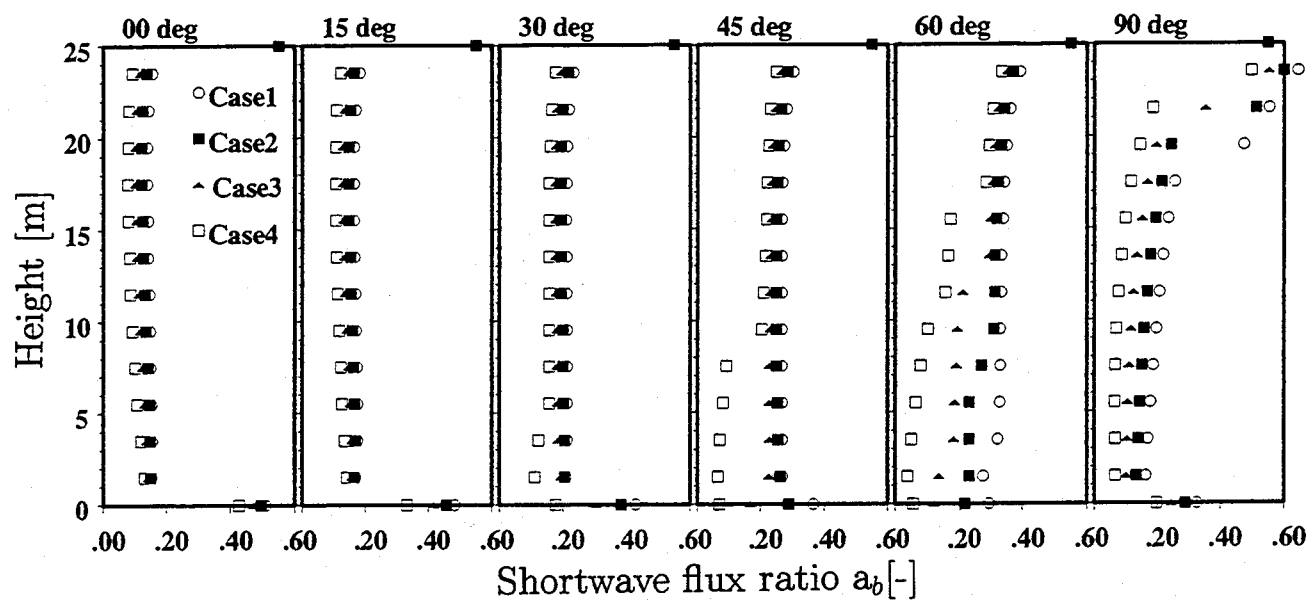


図 4.3 被覆率を変化させたときのフラックス比の鉛直分布

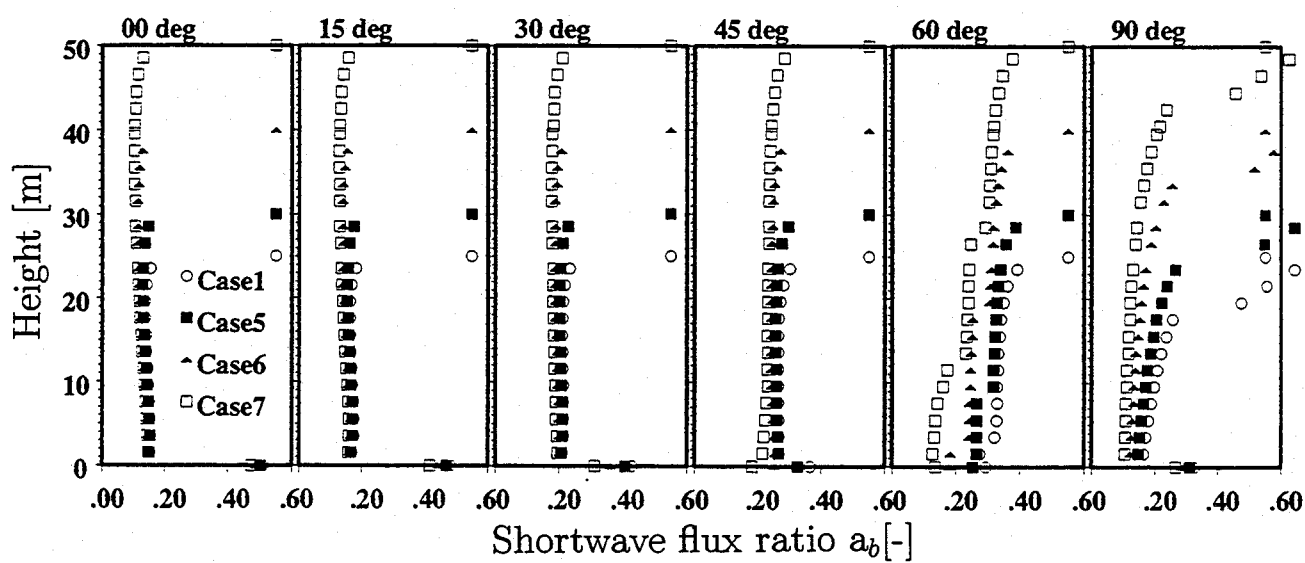


図 4.4 キャノピ高さを变化させたときのフラックス比の鉛直分布

表 4.2 計算の緯度経度

Latitude	34.8	[deg]
Longitude	135	[deg]
Julian	219(7.Aug.)	[day]
Transmissivity	0.664	[-]

表 4.3 反射率のパラメータ値

	Building wall [-]	Ground surface [-]	Ratio of mirror refrection [-]
Case1	0.45	0.45	0
Case12	0.6	0.6	0
Case13	0.3	0.3	0
Case14	0.45	0.45	0.2
Case15	0.45	0.45	0.5
Case16	0.45	0.3	0
Case17	0.45	0.2	0

キャノピ高さを 25 (Case1), 30 (Case5), 40 (Case6), 50m (Case7) と変化させたときの、フラックス比の鉛直分布の太陽時角による変化を図 4.4 に示す。太陽時角が 0 度と 15 度の場合は、キャノピ高さによるフラックス比の違いは小さいが、太陽時角が 30 度を越えると、キャノピ高さが高くなるほど地表面を含むキャノピ壁面低部でフラックス比は小さくなる。

建物平面の形を正方形にした場合 (Case1), 南北方向と東西方向の建物長さの比を 2:1 にした場合 (Case8), 南北方向と東西方向の建物長さの比を 1:2 にした場合 (Case9) についての、フラックス比の鉛直分布の太陽時角による変化を図 4.5 に示す。地表面では、Case9 のフラックス比が Case10 に比べて大きくなるが、キャノピ内壁面のフラックス比は逆に、Case8 の方が大きい。また、太陽時角が 45 度では、Case8 と Case9 の鉛直分布は一致する。

建物と東西方向とのなす角を、0 (Case1), $\pi/6$ (Case10), $\pi/3$ (Case11) に変化させたときの、フラックス比の鉛直分布の太陽時角による変化を図 4.6 に示す。太陽時角が負の値であるとき (太陽が東側にある), Case10 と Case11 のフラックス比を比較すると地表面では Case10 の方が大きく、壁面では Case11 の方が大きな値となる。太陽時角が正の値になると (太陽が西側にある), 上記と反対となる。

3) 反射率の影響

建物および地表面の反射条件を (1) 建物・地表面の反射率は等しいとして、反射率を変える, (2) 建物, 地表面とも同じ比率で、鏡面反射が起こると設定する, (3) 建物と地表面の反射率を変える, の 3 通りに変えて、都市キャノピ内の短波放射フラックスの計算を行った。各計算で用いた反射率の値を表 4.3 に示す。

反射率を 0.6 (Case12), 0.45 (Case1), 0.3 (Case13) と変化させたときの、フラックス比の鉛直分布の太陽時角による変化を図 4.7 に示す。太陽時角が小さい場合は、反射率によるフラックス比の違いは地表面で大きく現れるが、キャノピ壁面ではほとんどフラックス比の違いは生じない。太陽時角が増加すると、地表面のフラックス比の違いは小さくなり、逆にキャノピ内の上部壁面でフラックス比の違いが大きくなる。

鏡面反射率を 0 (Case1), 0.2 (Case14), 0.5 (Case15) と変化させたときの、フラックス

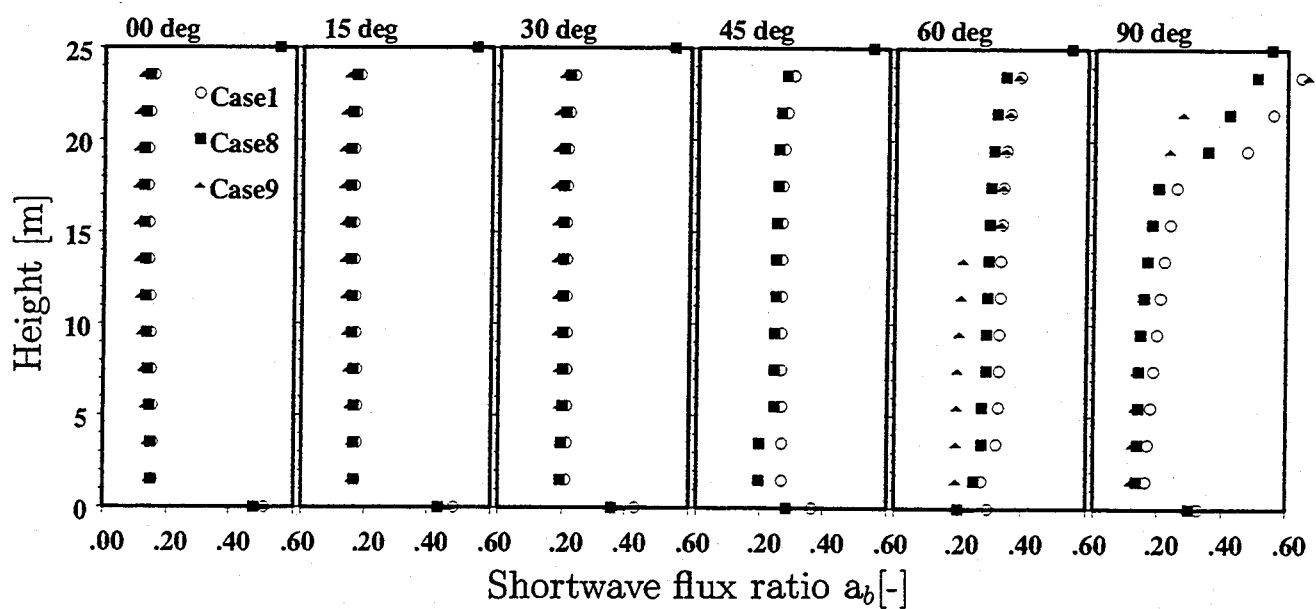


図 4.5 建物の形を変化させたときのフラックス比の鉛直分布

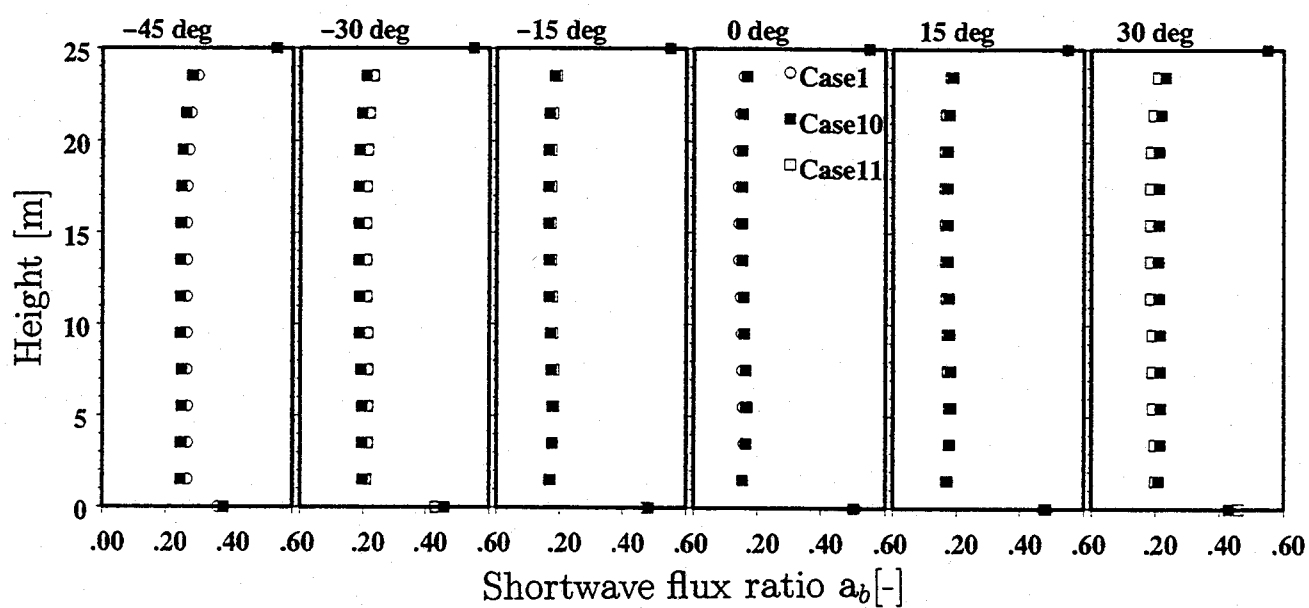


図 4.6 建物方向を変化させたときのフラックス比の鉛直分布

表 4.4 SVF の計算値と理論式の比較

	η [-]	h_c [m]	Averaged SVF ¹⁾ [-]	Eq.(15) [-]	F_{gs} [-]
Case1	0.25	25	0.428	0.428	0.557
Case2	0.36	25	0.347	0.347	0.456
Case3	0.49	25	0.267	0.267	0.348
Case4	0.64	25	0.183	0.183	0.228
Case5	0.25	30	0.384	0.384	0.505
Case6	0.25	40	0.319	0.319	0.424
Case7	0.25	50	0.272	0.272	0.363

1) The averaged SVF (SVF_a) is defined as follows equation.

$$SVF_a = \frac{\sum A_i F_{i,s}}{\sum A_i}$$

where A_i is an area and $F_{i,s}$ is sky view factor.

比の鉛直分布の太陽時角による変化を図 4.8 に示す。太陽時角が小さい場合は、鏡面反射率が大きいほどキャノピ内のフラックス比が小さくなっているが、太陽時角が大きくなると違いはほとんど見られない。なお、鏡面反射の吸収率は入射角によって変化するが、この影響は無視した。

地表面反射率を 0.45 (Case1), 0.3 (Case16), 0.2 (Case17) と変化させたときの、フラックス比の鉛直分布の太陽時角による変化を図 4.9 に示す。地表面のフラックス比は、地表面反射率が小さいほど大きな値となるが、逆にキャノピ内壁面のフラックス比は、地表面反射率が大きいほど大きな値となる。

4.2.2 被覆率による SVF の変化

被覆率を 0.25 (Case1), 0.36 (Case2), 0.49 (Case3), 0.64 (Case4) と変化させたときの、SVF の鉛直分布を図 4.10 に示す。また、Swaid⁴⁻¹⁴⁾ は、キャノピ平均の SVF を次式で定義している。

$$SVF = \frac{W_{sx}W_{sy} - W_{bx}W_{by}}{W_{sx}W_{sy} - W_{bx}W_{by} + 2h_c(W_{bx} + W_{by})} \quad (4.1)$$

被覆率と都市キャノピ高さを変化させたときの、モンテカルロ法によって求めたキャノピ平均の SVF, 式 (4.1) による SVF, および地表面の SVF (F_{gs}) を表 4.4 に示す。モンテカルロ法によって求めたキャノピ平均の SVF と式 (4.1) による SVF の値は完全に一致しており、2.3.3 節で述べた長波放射フラックスの計算手法は妥当であると考えられる。SVF は、図 4.10 に示したように被覆率が大きくなるほど小さな値となり、またキャノピ高さが高くなるほど小さな値となる。

4.3 1 次元モデルを用いた都市キャノピ内の温度・流れの感度解析

都市キャノピを考慮した 1 次元大気境界層モデルを用いて、被覆率 η およびキャノピ高さ h_c を変化させたとき、都市キャノピ内およびその上空の温度・風速への影響を調べた。

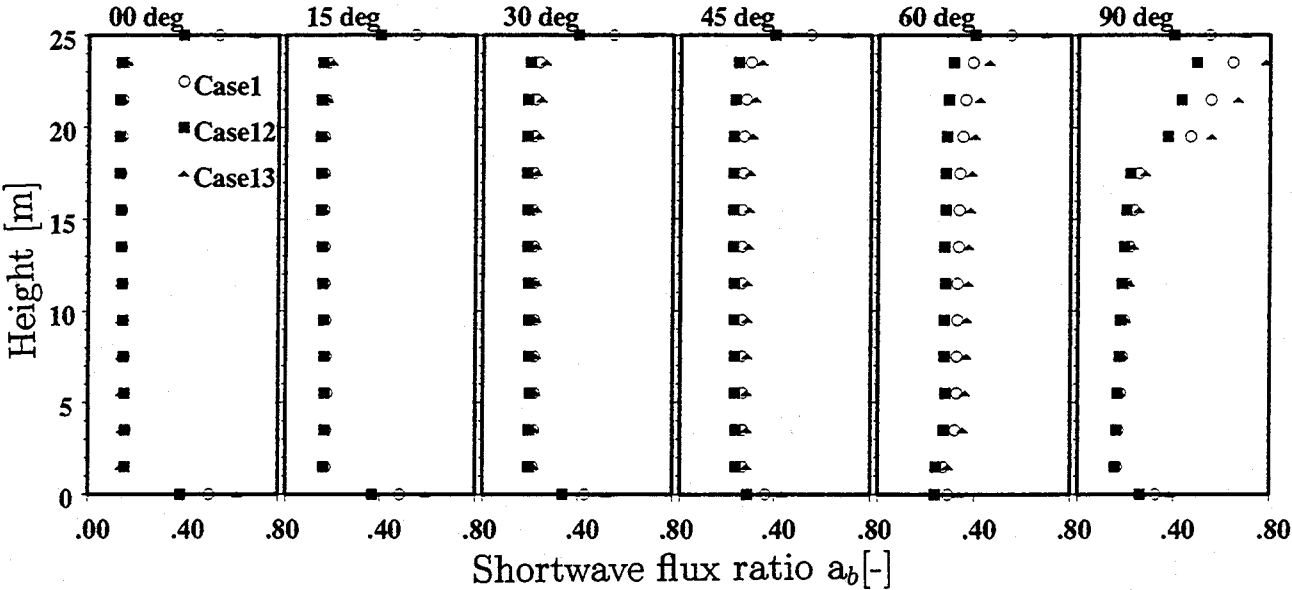


図 4.7 建物と地表面の反射率を変化させたときのフラックス比の鉛直分布

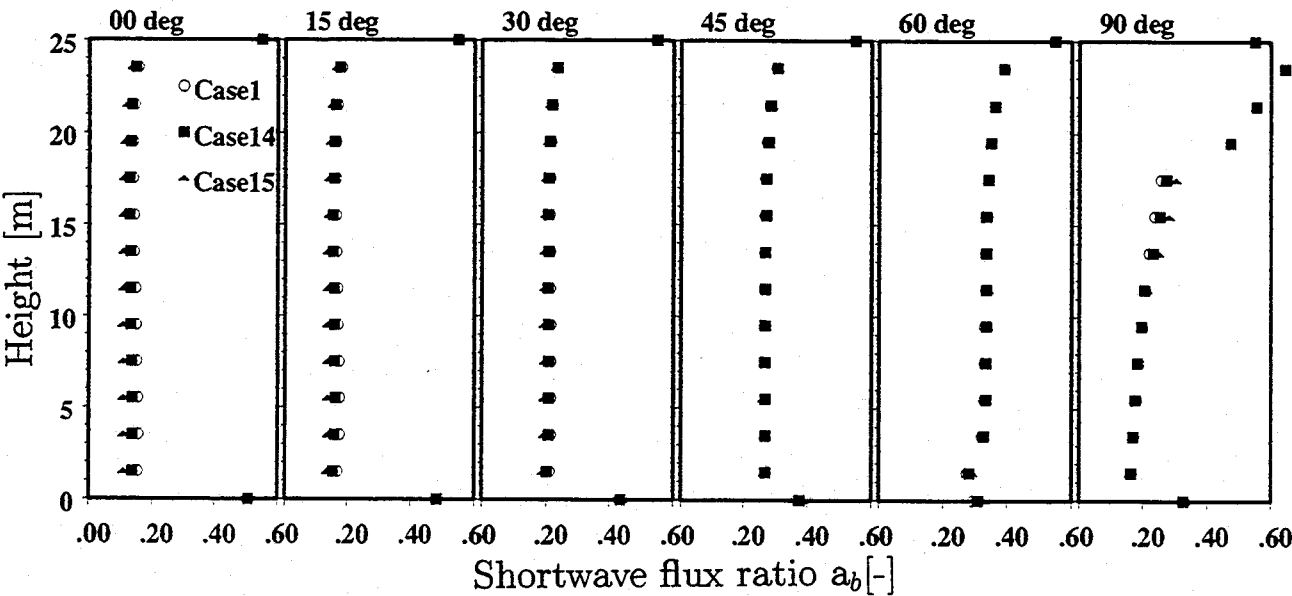


図 4.8 鏡面反射率の割合を変化させたときのフラックス比の鉛直分布

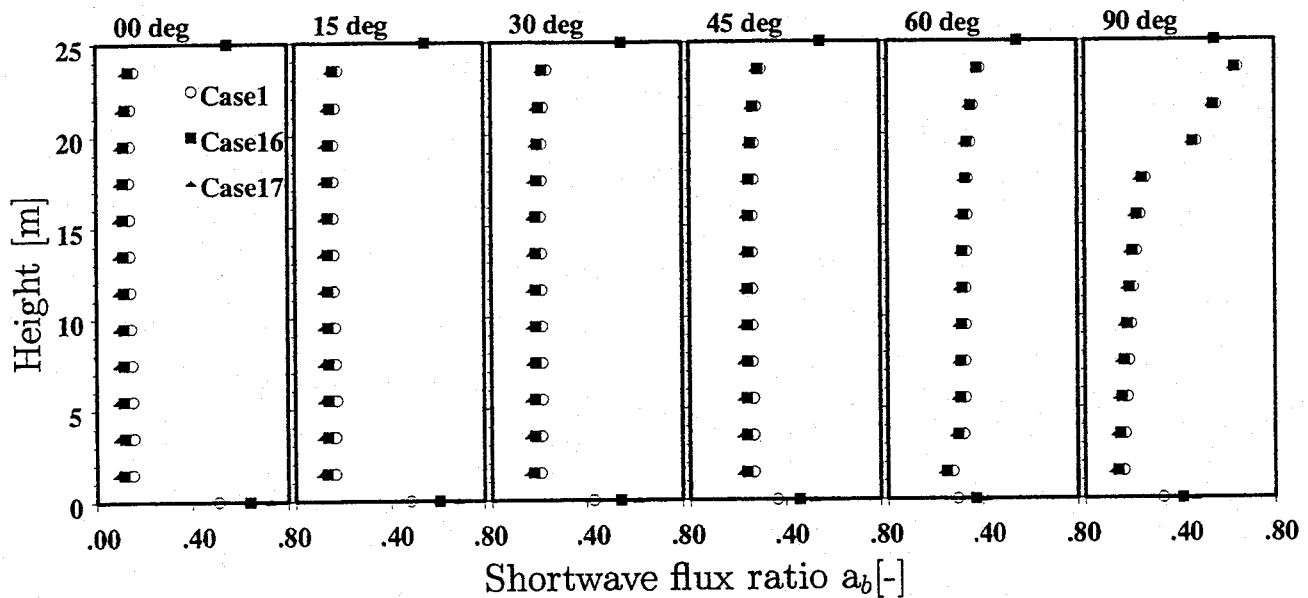


図 4.9 地表面の反射率を変化させたときのフラックス比の鉛直分布

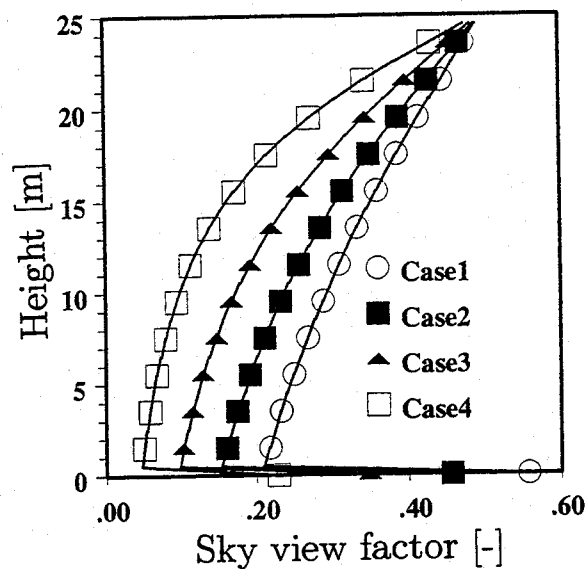


図 4.10 被覆率を変化させたときの SVF の鉛直分布

4.3.1 計算条件

表 4.5 に計算で用いた被覆率 η およびキャノピ高さ h_c の値を示す。Run1 は建物がない場合を表し、Run2 から Run4 は被覆率を変化させた計算、そして Run4 から Run6 は都市キャノピ高さを変化させた計算を表わしている。境界上端高さは、建物の影響が及ばないと考えられる 200m とし、風速と温位の境界条件を設定した。風速は常に 3m/s とし、温位は、図 4.11 に示す大阪市上空で観測された日変動値を与えた。また、建物表面は全てコンクリート、地表面は全てアスファルトに覆われているとし、表面での潜熱フラックスは 0 と仮定した。コンクリートおよびアスファルトに対する物性値を表 4.6 に示す。建物形状に着目して温度・風速への影響を調べるために、人間活動による顕熱、潜熱フラックスの放出も 0 とした。

また、鉛直方向の計算格子数は 50 メッシュとし、地表面から高さ 40m までは格子間隔

表 4.5 1 次元モデルで用いるパラメータ値

	η [-]	h_c [m]	$W_{sx} \times W_{sy}$ [m]×[m]	$W_{bx} \times W_{by}$ [m]×[m]
Run1	0	-	-	-
Run2	0.16	20	50×50	20×20
Run3	0.36	20	50×50	30×30
Run4	0.64	20	50×50	40×40
Run5	0.64	30	50×50	40×40
Run6	0.64	40	50×50	40×40

表 4.6 建物壁面と地表面の熱特性

	Heat capacity [Jm ⁻³ K ⁻¹]	reflectivity [-]
Asphalt	1.86×10 ⁶	0.2
Concrete	2.03×10 ⁶	0.45

2m の細かいメッシュを用いた。

4.3.2 被覆率の影響

被覆率 η を 0.16 (Run2), 0.36 (Run3), 0.64 (Run4) と変化させたときの 4 時間置きの風速と温位の鉛直分布を図 4.12 と図 4.13 に示す。白丸は建物が無い条件 (Run1) の計算結果である。被覆率が大きいほど建物抵抗作用が強く、風速の減速も大きくなっている。特に日中は乱流混合が大きいいため、キャノピ高さより上空でも減速が起こっている。一方夜間は、乱流混合がほとんどないため、減速はキャノピ内だけにしか見られない。18 時の $\eta=0.64$ (Run4) の鉛直分布を見ると、キャノピ内で急激な減速が生じている。このとき都市キャノピ上面付近の大気は安定となっており、運動量が都市キャノピ内に輸送されにくくなったためと考えられる。Fig.9b の温位分布を見ると、被覆率が大きいほど都市キャノピ内の日中の温位上昇は少なく、夜間の温位低下が抑えられている様子がわかる。すなわち、被覆率が大きいほど日較差が小さくなっている。図 4.14 と図 4.15 に地表面が受ける正味短波放射フラックスと正味長波放射フラックスの時系列変化を示す。図 4.14 からわかるように被覆率が大きくなるほど地表面が受ける短波放射フラックスは少なくなり、日中の温位上昇が小さくなる。一方、夜間は図 4.15 からわかるように被覆率が大きいほど地表面から放出する長波放射フラックスが少なく、温位の低下が抑えられる。このシミュレーション結果より、都市被覆率の増大が、夜間に温度が低下しにくくなるヒートアイランド現象を起こす原因の 1 つであることが明かとなった。

4.3.3 キャノピ高さの影響

キャノピ高さ h_c を 20 (Run4), 30 (Run5), 40 (Run6)[m] と変化させたときの 4 時間置きの風速と温位の鉛直分布を図 4.16 と図 4.17 に示す。白丸は建物が無い条件 (Run1) の計算結果である。キャノピ高さが高いほど、キャノピ内での風速の減速は大きくなっている。一方、都市キャノピ上空では、キャノピ高さの差だけ風速分布を鉛直方向にシフトさせる

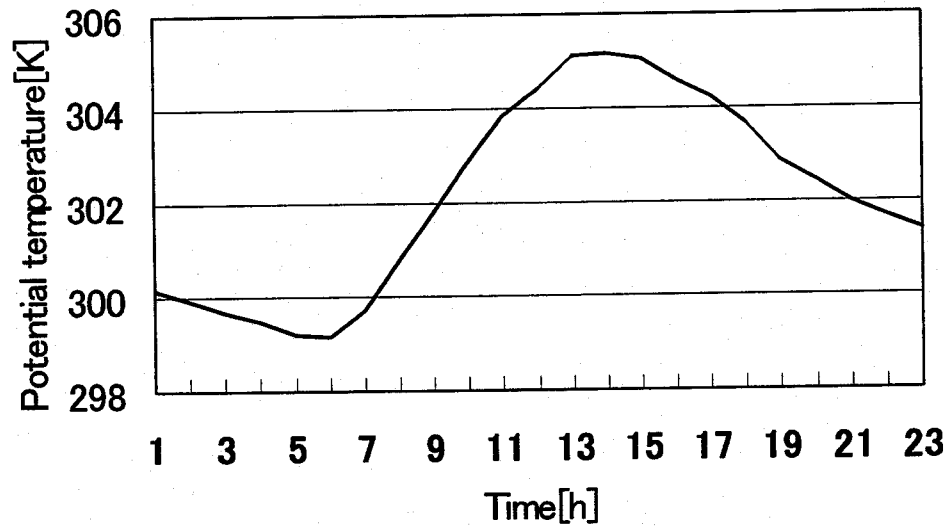


図 4.11 計算上面での温位の境界条件

と風速の減速はほとんど起こっていないことがわかる。これは、運動量保存式 (2.140) の抵抗項や乱流エネルギー保存式 (2.147) の生成項にキャノピ高さの影響が直接反映しておらず、キャノピ上空の乱流混合が、キャノピ高さが違ってほとんど等しく計算されるためである。また 10 時のキャノピ内の風速分布がキャノピ高さによって大きく異なるのは、その時刻の Run5 と Run6 のキャノピ内の大気が安定になっていることによる。図 4.17 の温位分布を見ると、キャノピ高さが高くなるほど都市キャノピ内の日中の温位上昇は少なく、夜間の温位低下が抑えられている様子がわかる。原因は 4.3.2 節で述べたように、キャノピ高さが高くなると日中に地表面付近が受ける短波放射フラックスが少なく、逆に夜間は放出する正味長波放射フラックスが小さくなるためである。建物の高層化も、ヒートアイランド現象を引き起こす原因の 1 つであることが示された。

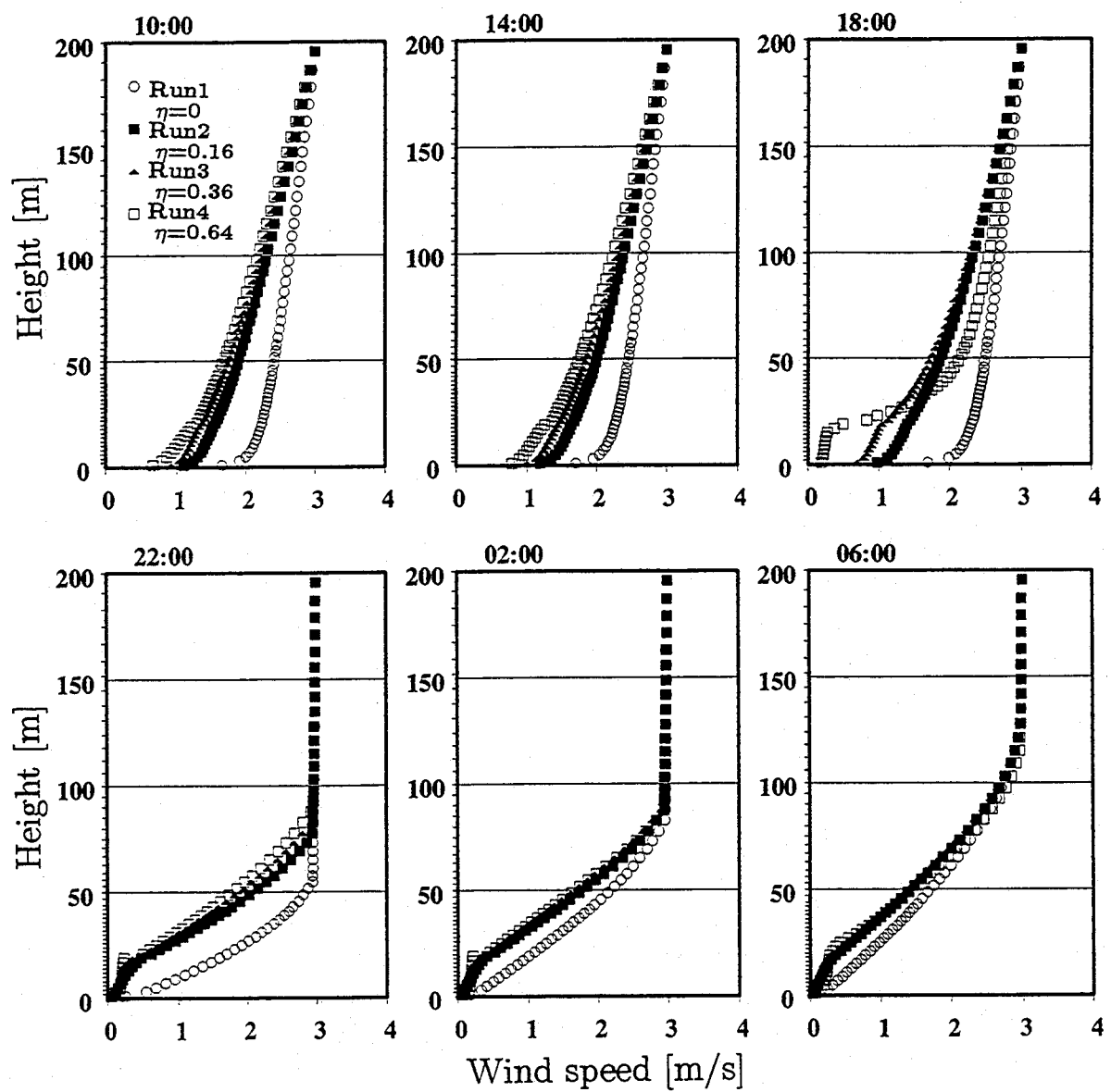


図 4.12 被覆率を変化させたときの風速の鉛直分布

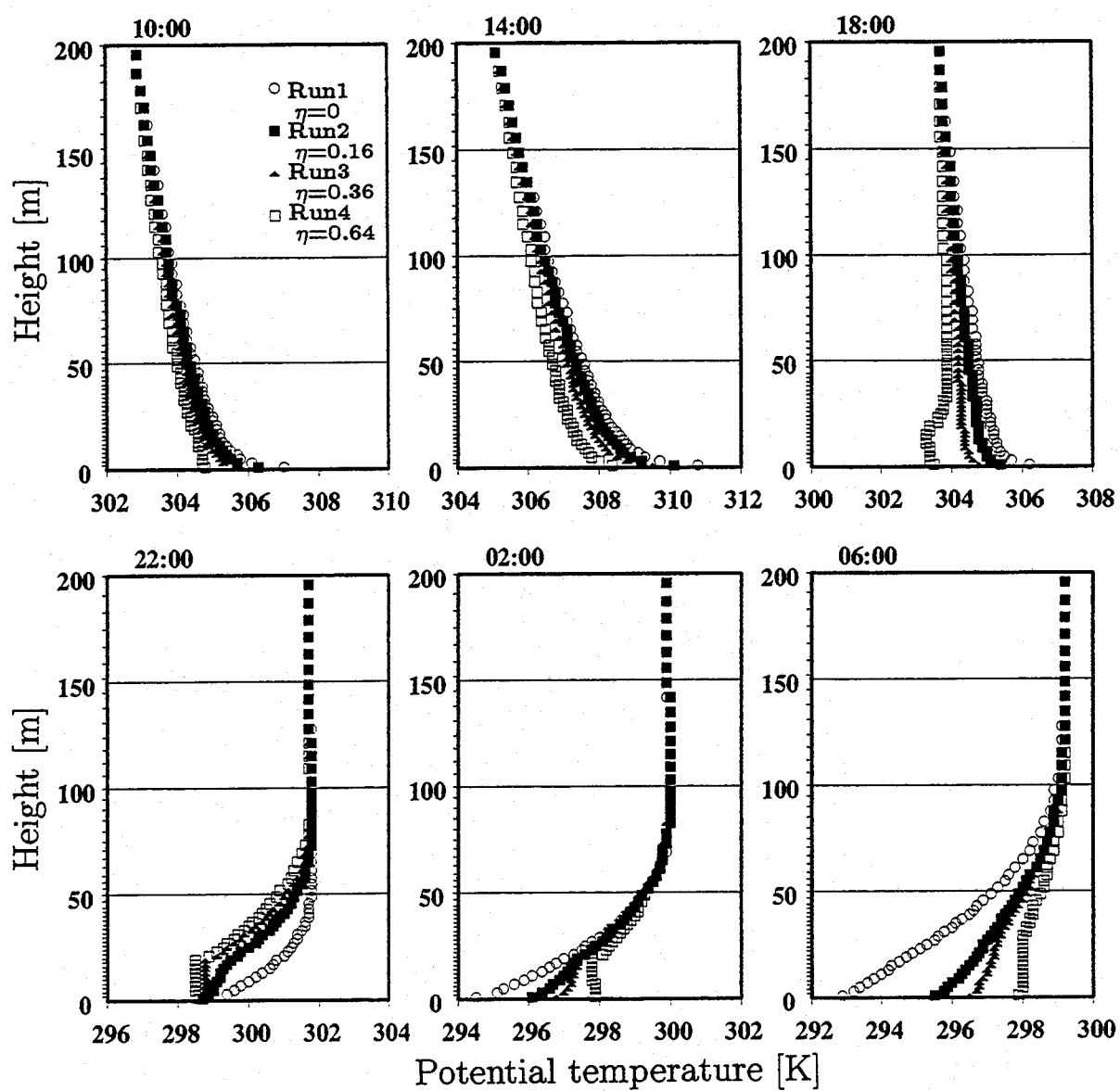


図 4.13 被覆率を変化させたときの温位の鉛直分布

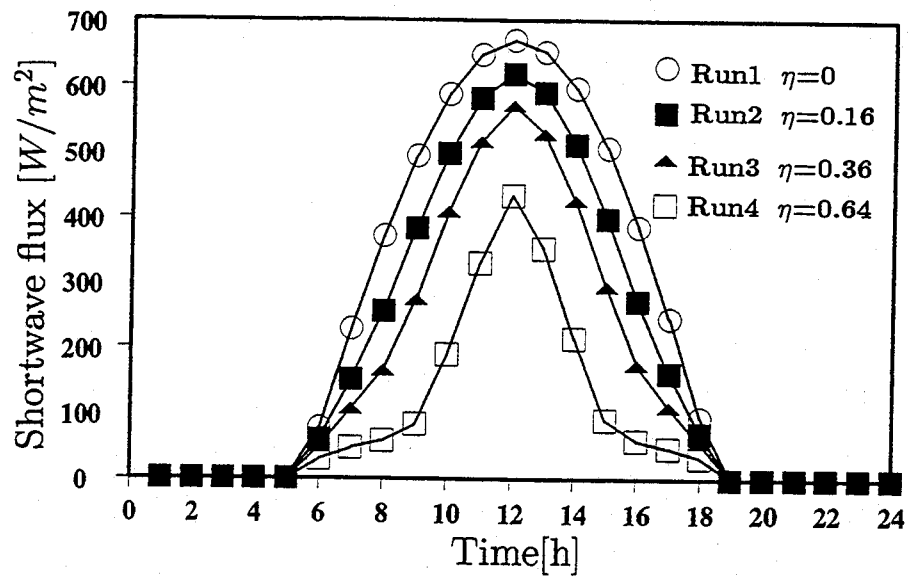


図 4.14 被覆率を変化させたときの短波フラックスの時系列変化

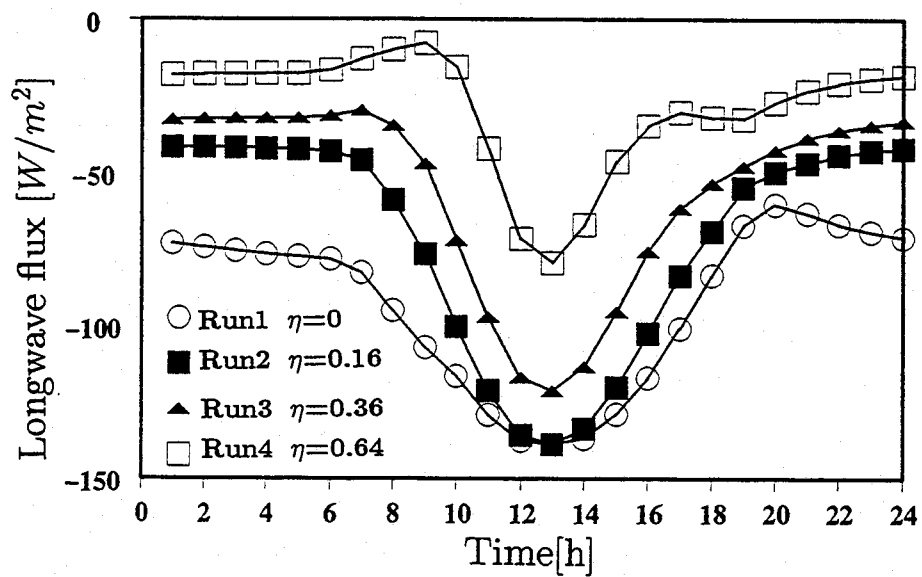


図 4.15 被覆率を変化させたときの長波フラックスの時系列変化

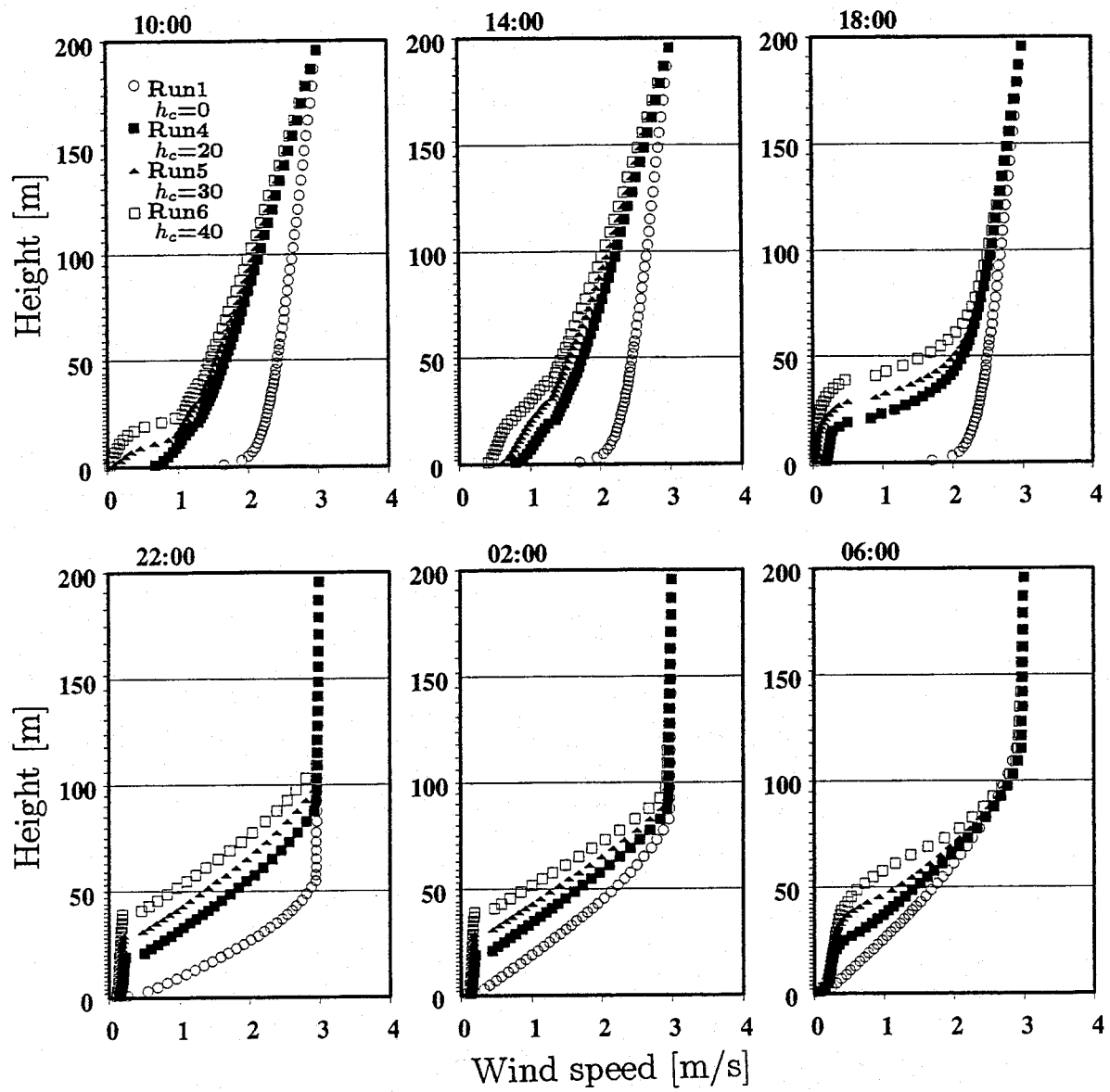


図 4.16 キャノピ高さを变化させたときの風速の鉛直分布

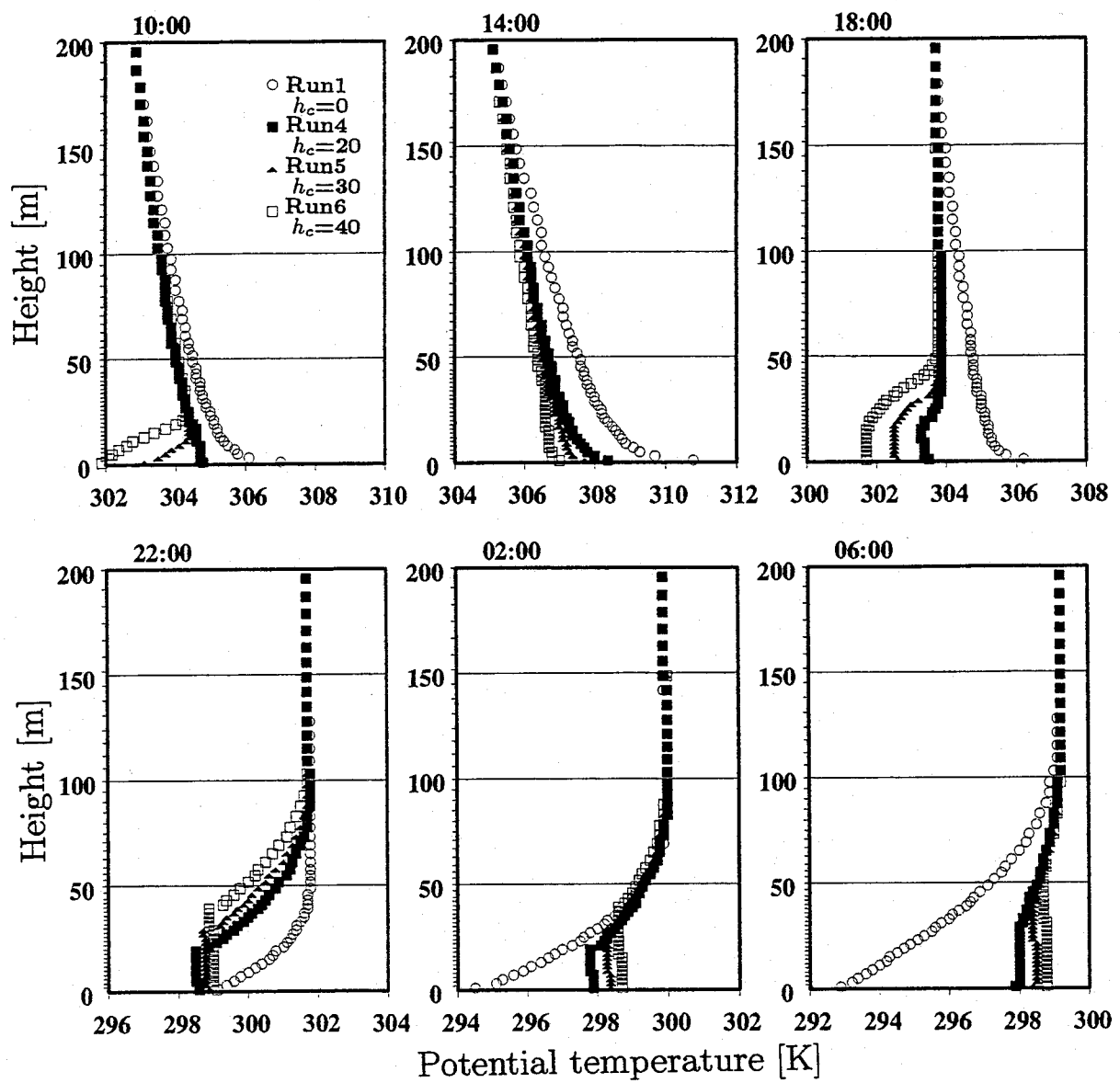


図 4.17 キャノピ高さを変化させたときの温位の鉛直分布

4.4 都市キャノピ層を考慮した3次元大気境界層モデルの大 阪市への応用

2.3.1節で説明した都市キャノピ形状は、同じ高さを持つ建物が格子状に無限に広がっているとしてモデル化し、都市キャノピ内の放射量を計算した。3次元モデルでは、計算格子毎に建物高さ・被覆率を推定して都市キャノピ形状を決定し、1次元と同様の計算手法を適用した。そして、大阪市を都市キャノピモデルの計算対象地域とした。計算対象地域は20km²と狭いので、ネスティング法を用いた。また、計算は海陸風が発達しやすい夏期を対象として行った。その際、典型的な海陸風場を計算上に再現するために、計算対象領域の観測値から海陸風日を抽出して平均操作を行い、観測所毎の典型的な海陸風のデータを作成し、これをFDDAのデータとして広領域の計算を行った。この節では、FDDAを用いることの効果を検討するとともに、都市建物と人工排熱によるヒートアイランドへの影響を評価した。

4.4.1 計算領域

計算対象広領域を図4.18に示す。図4.18中の四角の枠で囲まれた領域がネスティング領域部で、大阪都市部に相当する。

広領域の水平方向のグリッドサイズは、 $\Delta x = 5733[m]$ 、 $\Delta y = 4622[m]$ で20×20メッシュに分割した。ネスティング領域の水平方向のグリッドサイズは、 $\Delta x = 573.3$ 、 $\Delta y = 462.2[m]$ で40×40メッシュに分割した。広領域の鉛直方向のメッシュ数は15層、ネスティング領域の鉛直方向のメッシュ数は23層である。広領域とネスティング領域の各々のメッシュ幅を表4.7に示す。

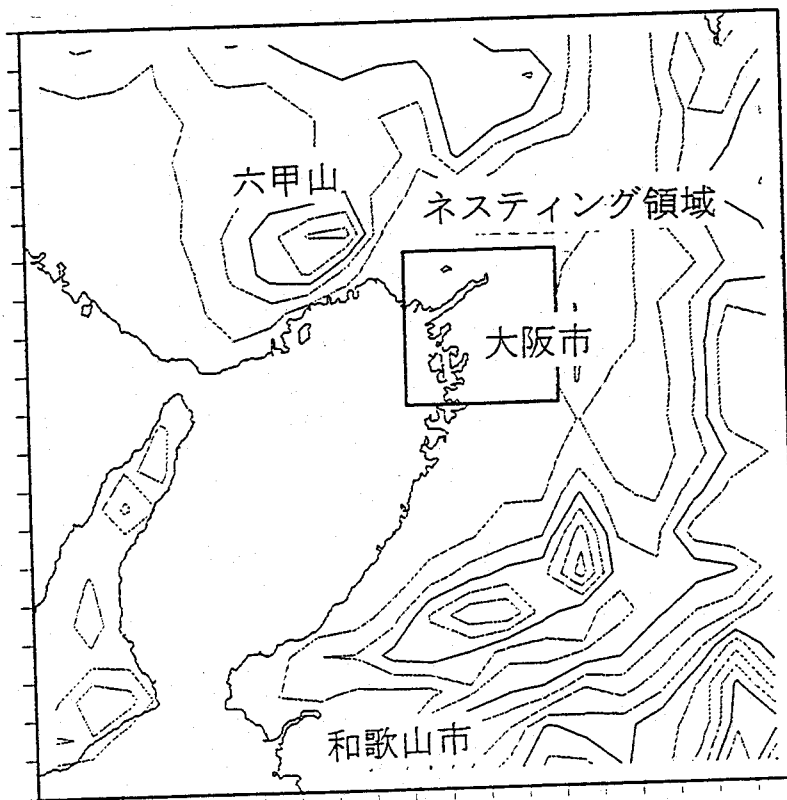


図 4.18 計算対象広領域とネスティング領域

表 4.7 メッシュサイズ

広領域メッシュ幅 [m]	ネスティング領域メッシュ幅 [m]	領域高さ [m]
8m × 4 メッシュ	3m × 12 メッシュ	36
48	44	80
129	129	209
210	210	419
290	290	709
371	371	1080
452	452	1532
532	532	2064
613	613	2677
694	694	3371
774	774	4145
855	855	5000

表 4.8 広領域の土地利用分類

国土地理院	広領域
(1) 田	植生部
(2) 畑	
(3) 果樹園	
(4) その他の樹木畑	
(5) 森林	樹木部
(6) 荒地	都市部
(7) 建物用地 A	
(8) 建物用地 B	
(9) 幹線交通用地	
(10) その他の用地	
(11) 湖沼	海浜部
(12) 河川地 A	
(13) 河川地 B	
(14) 海浜	
(15) 海水域	

4.4.2 広領域の計算条件

1) 初期条件

風速の初期値は全領域で 0 と設定した。温位の初期値は、全領域で海面高さでの地表面温位 298K、温位勾配 0.005K/m で与えた。比湿の初期値は、高さ 2000m 以下は相対湿度 50%、高さ 2000m 以上は相対湿度 20% で与えた。また、乱流量の初期値は、Level2 モデルから決定した。

計算開始時刻は 8:00JST として 2 日間の計算を行った。以後に示す計算結果は、後半の 1 日分の計算結果である。

表 4.9 広領域の土地利用パラメータ

土地利用	粗度 [m]	植生被覆度 [-]	F_{num} [-]	葉のアルベド [-]	1層の土壌水 [m ³ /m ³]	2層の土壌水 [m ³ /m ³]
植生部	0.3	1.0	2	0.2	0.2	0.25
樹木部	0.3	0	7			
都市部	0.3	1.0	2			
海浜部	0.1	0	2			

2) 境界条件

上端境界値は，風速，温位，比湿の各物理量が初期状態から変化しないとした．地表面境界値は，Monin-Obukhov の相似則から求めた (2.2.3節参照)．側面境界は，全ての変数について勾配=0 とした．

3) 土地利用パラメータ

地表面の温度と比湿は，熱収支モデルにより決定されるが，1つの計算格子上に植生，裸地，人工構造物などいろいろな土地利用形態が存在している．そのため1つの計算格子で一義的に熱収支モデルのパラメータ値を決定することが出来ない．そこで，国土地理院の土地利用データに基づいて，広領域は4つの土地利用に分類を行った．表4.8に国土地理院の土地利用分類とモデルで用いた土地利用分類を示す．

この土地利用に対するパラメータ値を，表4.9に示す．このように分類した土地利用毎に熱収支モデルを解き，土地利用毎の植生と地表面からの顕熱フラックス (H_f, H_g)，潜熱フラックス (E_f, E_g) を求める．1つの格子の土地利用比 R_{avail} は，国土地理院の土地利用データから算出することができ，1つの格子からの顕熱フラックス，潜熱フラックスは以下のように決定することができる．これを温位，比湿の保存式の境界条件とする．

$$H_{net} = \sum_i (H_{f,i} + H_{g,i}) R_{avail,i} \quad (4.2)$$

$$E_{net} = \sum_i (E_{f,i} + E_{g,i}) R_{avail,i} \quad (4.3)$$

ここで， $R_{avail,i}$ は格子毎の土地利用 i の構成比である．

4) FDDA のための観測データ

広領域内には，風速または温度を観測しているアメダス，大阪府・兵庫県常時観測所が109箇所存在している．表4.10に各観測所の名称と観測項目を示す．1991年から1995年の8月のデータを基に海陸風日の抽出 (4-15) (4-16) (4-17) (4-18) (4-19) (4-20) を行った．海陸風日としては，以下の4項目を満たす日と定義した．

- 1 日平均風速が対象期間の平均日平均風速より小さい．
- 2 日射量が対象期間の平均日射量より多い．
- 3 温度日較差が対象期間の平均温度日較差より大きい．
- 4 降雨がない．

選ばれた海陸風データから、時間毎の平均風速・最頻度風向を求め、広領域の典型的な海陸風日の風速・風向を決定した。このようにして求めた4時間毎の観測値の風速・風向を図4.19に示す。

4.4.3 Nesting 領域の計算条件

1) 初期条件

広領域の初期条件と同じである。

2) 境界条件

側面境界値は、広領域の計算値を基に2.4節に示したネスティング方法から決定した。上端と地表面境界条件は広領域と同様である。

3) 土地利用パラメータ

ネスティング領域は6つの土地利用に分類を行った。表4.11に国土地理院の土地利用分類とモデルで用いた土地利用分類を示す。また、この土地利用に対するパラメータ値を、表4.12に示す。土地利用分類の「都市」部は、建物と道路に分類することができ、建物部分からの顕熱フラックスは2.3.2節で述べた方法で求め、道路部分からの顕熱フラックスは地表面熱収支モデルから求める。このとき道路部分の土地利用比は建物被覆率 η を用いて、 $(1 - \eta)R_{avail, 都市}$ で与えられる。

4) 都市キャノピ形状の推定

大阪市の建物被覆率と建物高さは、大阪市計画局による平成4年土地利用現況調査⁴⁻²¹⁾より求めた。建物被覆率は、建物総数の1階床面積データから決定した。また、建物高さは建物総数の延床面積データを1階床面積データで割り平均建物高さを求め、そして1階分の高さを3[m]として決定した。ただし、大阪市以外については、データが揃わなかったため建物がないと仮定した。このようにして決定した建物被覆率と建物高さの分布を図4.20と図4.21に示す。

2.3.1節で説明した都市キャノピ形状は、同じ高さ形を持つ建物が格子状に無限に広がっているとしてモデル化し、都市キャノピ内の放射量を計算した。3次元モデルでは、計算格子毎に建物高さ・被覆率を推定して都市キャノピ形状を決定し、1次元と同様の計算手法を適用する。

1つの格子の縦横幅をそれぞれ Δx , Δy , 建物個数を n^2 , ブロックの縦横幅を W_{Sx} , W_{Sy} , 建物の縦横幅を W_{Bx} , W_{By} , ブロック面積に対する建物面積の被覆率を η とすると、次のような関係式が成立する。

$$\begin{cases} \Delta x = nW_{Sx} \\ \Delta y = nW_{Sy} \end{cases} \quad (4.4)$$

$$\begin{cases} W_{Bx} = \sqrt{\eta}W_{Sx} \\ W_{By} = \sqrt{\eta}W_{Sy} \end{cases} \quad (4.5)$$

大阪市に応用した計算では、 $\Delta x = \Delta y =$ 約 500[m], 建物の数は 10^2 とした。形状パラメータは表2.2と同じであるが、風向に垂直な表面積の割合 ξ_u , ξ_v は以下のように定義した。

表 4.10 広領域の観測所と観測項目

アメダス	風速	温度	兵庫県常時観測所	風速	温度	大阪府常時観測所	風速	温度
大津	○	○	神戸市深江	○	×	八尾保健所	○	○
田辺	○	○	神戸市東灘	○	×	泉大津保健所	○	○
能勢	○	○	神戸市灘	○	×	守口保健所	○	○
枚方	○	○	神戸市葺合	○	×	国設大阪	○	○
豊中	○	○	神戸市兵庫南部	○	×	茨城市役所	○	×
大阪	○	○	神戸市長田	○	×	寝屋川市役所	○	○
生駒山	○	○	神戸市須磨	○	×	高石中学校	○	×
堺	○	○	神戸市白川台	○	×	泉佐野保健所	○	×
熊取	○	○	神戸市垂水	○	×	池田市役所	○	○
福崎	○	○	神戸市西神	○	×	大東市役所	○	×
西脇	○	○	神戸市押部谷	○	○	府立修徳学院	○	×
三田	○	○	神戸市北	○	×	貝塚市消防署	○	○
三木	○	○	神戸市北神	○	×	島本町役場	○	×
明石	○	○	尼崎市立尼崎高校	○	×	富田林市役所	○	○
神戸	○	○	尼崎市国設尼崎	○	○	南海団地	○	○
郡家	○	○	尼崎市城内高校	○	×	泉南市役所	○	×
洲本	○	○	尼崎市小田南中学校	○	×	緑が丘小学校	○	×
南淡	○	○	尼崎市大庄公民館	○	×	三日月民会館	○	×
奈良	○	○	尼崎市尼崎東高校	○	×	笠松	○	○
針	○	○	明石市王子	○	×	藤井寺市役所	○	×
大寺陀	○	○	明石市二見	○	×	八尾市立病院	○	×
五條	○	○	明石市大久保	○	×	淀川工業高校	○	×
かつらぎ	○	○	西宮市役所	○	○	淀屋橋	○	○
和歌山	○	○	西宮市鳴尾支所	○	○	松原小学校	○	×
高野山	○	○	西宮市互木公民館	○	×	国府小学校	○	×
			西宮市甲陵中学校	○	○	摂津市役所	○	×
			西宮市山口小学校	○	○	泉南府民センター	○	×
			西宮市浜甲子園	○	×	藤井寺市役所	○	○
			洲本市役所	○	×	末広公園	○	×
			芦屋市山手小学校	○	×	天の川下水ポンプ場	○	×
			芦屋市潮見小学校	○	×	カモドールMBS	○	×
			芦屋市打出浜	○	×	天満中学校	×	○
			伊丹市役所	○	○	平尾小学校	×	○
			伊丹市菅原小学校	○	×			
			相生市役所	○	×			
			加古川市役所	○	○			
			加古川市尾上	○	×			
			加古川市志方市民センター	○	×			
			加古川市別府	○	×			
			加古川市神野	○	×			
			加古川市東神吉	○	×			
			加古川市平荘	○	×			
			西脇市役所	○	×			
			宝塚市老人福祉センター	○	○			
			宝塚市長尾南会館	○	×			
			高砂市役所	○	×			
			高砂市北浜	○	×			
			高砂市阿弥陀	○	×			
			高砂消防分署	○	×			
			川西市役所	○	×			
			三田市役所	○	×			

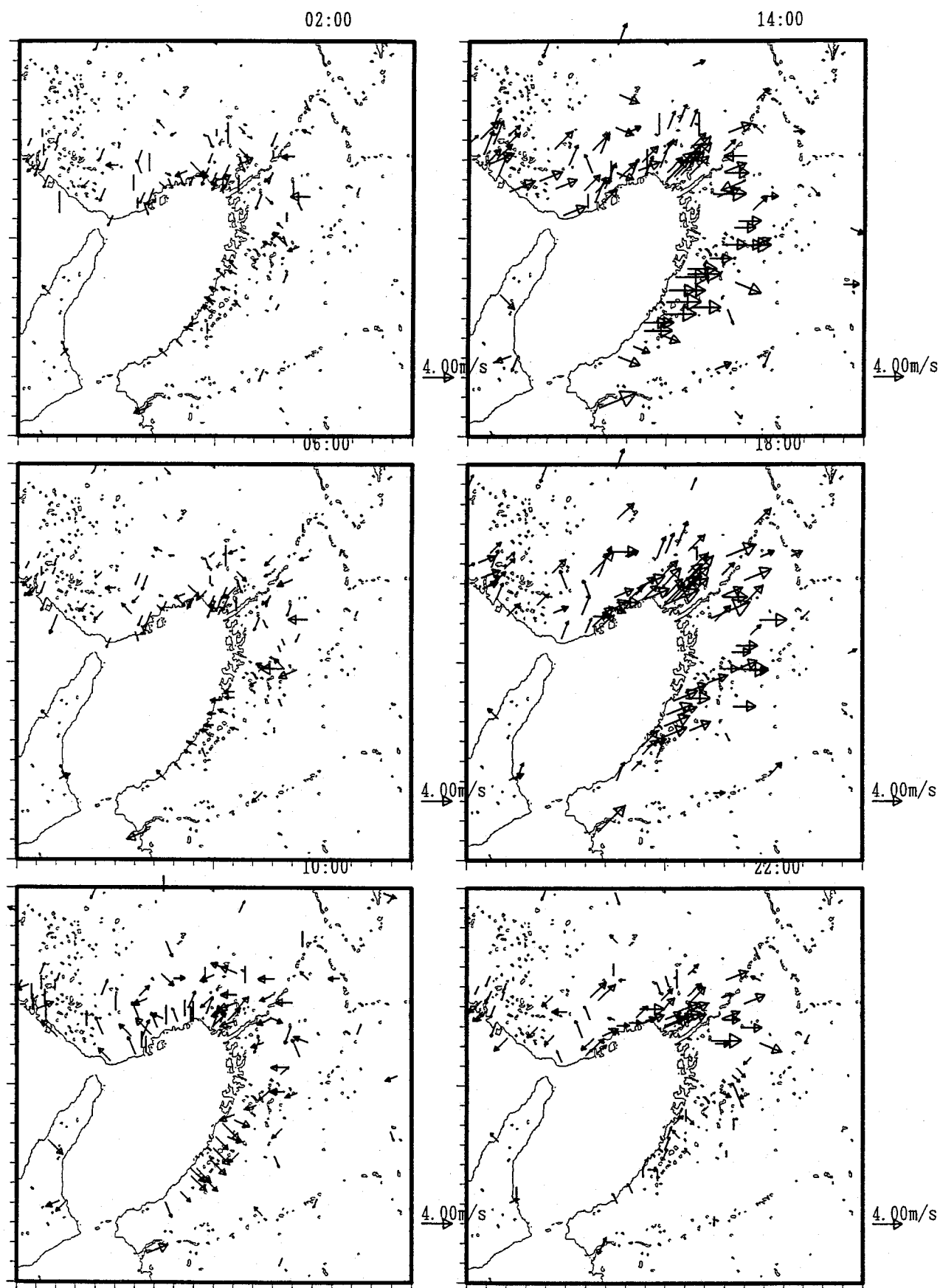


図 4.19 8 月の典型的な海陸風日の風速

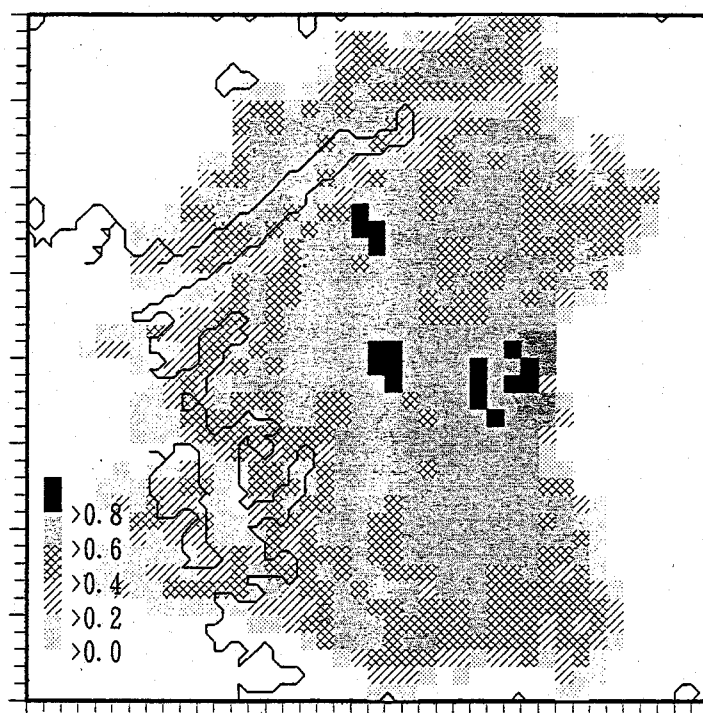


図 4.20 建物被覆率の分布 [-]

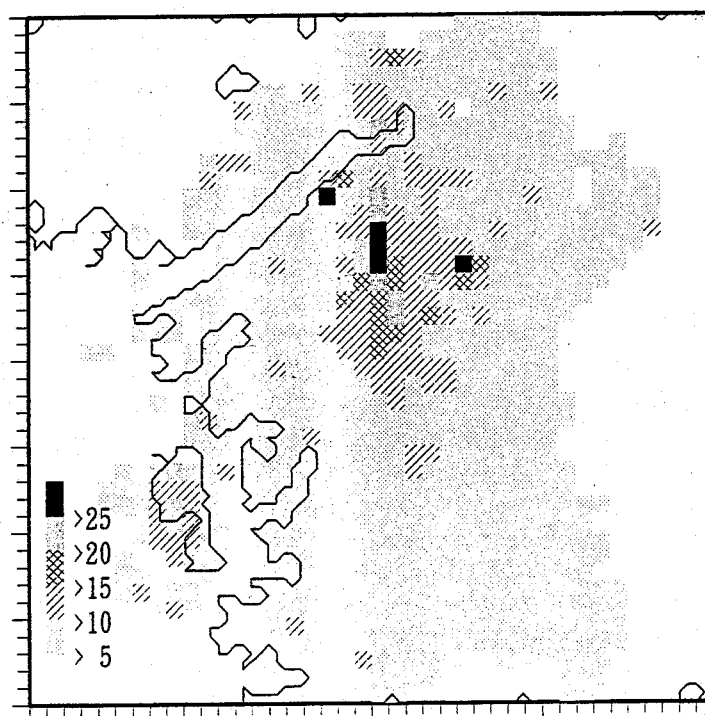


図 4.21 建物平均高さの分布 [m]

表 4.11 ネスティング領域の土地利用分類

国土地理院	ネスティング領域
(1) 田	田
(2) 畑	畑
(3) 果樹園	森林
(4) その他の樹木畑	森林
(5) 森林	森林
(6) 荒地	裸地
(7) 建物用地 A	都市
(8) 建物用地 B	都市
(9) 幹線交通用地	都市
(10) その他の用地	裸地
(11) 湖沼	水辺
(12) 河川地 A	裸地
(13) 河川地 B	畑
(14) 海浜	裸地
(15) 海水域	水辺

表 4.12 ネスティング領域の土地利用パラメータ

土地利用	粗度 [m]	植生被覆度 [-]	F_{num} [-]	葉のアルベド [-]	1 層の土壌水 [m ³ /m ³]	2 層の土壌水 [m ³ /m ³]
裸地	0.002	0.1	1	0.2	0.05	0.1
都市	0.5	0.1	4	0.12	0	0.05
樹木	0.5	0.9	6	0.12	0.15	0.2
田	0.01	0.9	4	0.2	0.2	0.25
畑	0.01	0.5	2	0.2	0.05	0.1
水辺	0.0001	-	-	-	-	-

$$\begin{cases} \xi_u = W_{By} / [2(W_{Bx} + W_{By})] \\ \xi_v = W_{Bx} / [2(W_{Bx} + W_{By})] \end{cases} \quad (4.6)$$

5) 人工排熱量の推定

人工排熱量は交通部門と民生部門に分けて推定した⁴⁻²²⁾。

交通部門は、自動車からの窒素酸化物排出量に表 4.13 に示す地域別の排熱原単位を乗じて推定した。飛行機、船舶からの人工排熱はここでは考慮していない。

民生部門は、早稲田大学尾島研⁴⁻²³⁾の冷房・暖房・給湯等のエネルギー需要原単位に、大阪市の 250m メッシュの延べ床面積を乗じてまず熱需要量 Q を求める。ここで、大阪市の延べ床面積は、大阪市計画局による平成 4 年土地利用現況調査によるものを用いた。

次に燃料消費量 E を次式から求める。

$$E = \frac{Qa}{\epsilon} \quad (4.7)$$

ここで、 Q は熱需要量、 a はエネルギー消費比率、 b は機器効率である。家庭部門は、冷房は全て電力で賄われ、暖房は電力・都市ガス・LPG・灯油で、給湯は電力・都市ガス・LPGが使われるとし、表 4.14 の示すエネルギー消費比率と機器効率から燃料消費量 E を求める。

業務部門は、冷房・暖房・給湯別の空調機器設置比率と効率から燃料消費量 E を求める。最後に排熱量 Q' を次式から求める。

$$Q' = \frac{COP_c + 1}{COP_c} E \quad (4.8)$$

ここで、 E は各システムでの燃料消費量、 COP_c は成績係数である。

暖房では、排熱量 Q' は全て顕熱として放出される。給湯では、半分が顕熱として放出され残りの半分は潜熱として放出される。そして冷房では、表 4.15 に示す、システムの顕熱・潜熱排出比率に従って排熱が放出されるとする。

このようにして決定した人工排熱量の分布を図 4.22 に示し、また人工排熱の排熱強度の時間変化を図 4.23 に示す。

4.4.4 広領域の計算結果

1) FDDA を用いた計算結果

4.4.2 4) 節で求めた観測データを基に客観解析を行った後、FDDA を用いて広領域の計算を行った。その 4 時間毎の風系を図 4.24 に示す。

2) FDDA の有効性

FDDA を用いないで行った広領域の計算結果を図 4.25 に示す。図 4.24 と図 4.25 を比較すると、FDDA を用いると風速が全般的に速くなっている様子がわかる。これは、計算の速度が観測値に比べて小さいため、FDDA を用いると速度の計算値が観測値に近づき大きくなるためである。

次に、広領域の適当な 5 地点の速度 u, v および温度の観測値と FDDA を用いた計算値、用いない計算値の時系列変化を図 4.26 に示す。FDDA を用いることにより計算値が観測値に近づいている様子がわかる。温度については、観測地点が少ないので直接的には FDDA は用いていないため、速度に FDDA を用いた場合と用いない場合の差はほとんど見られない。

ここで得られた計算結果を用いて、次節で大阪市内のシミュレーションを行う。図 4.26 に見られるように、計算値の風速は観測値に比べて弱く、また温度のピーク値も計算値は

表 4.13 地域別排熱原単位

地域	ガソリン [%]	軽油 [%]	排熱原単位 [TJ/NO _x ton]
大阪市	58.2	41.8	3.232
北大阪	53.5	46.5	2.951
東大阪	56.4	43.6	3.110
南河内	61.9	38.1	3.340
泉州	62.5	37.5	3.273
平均	58.1	41.9	3.165

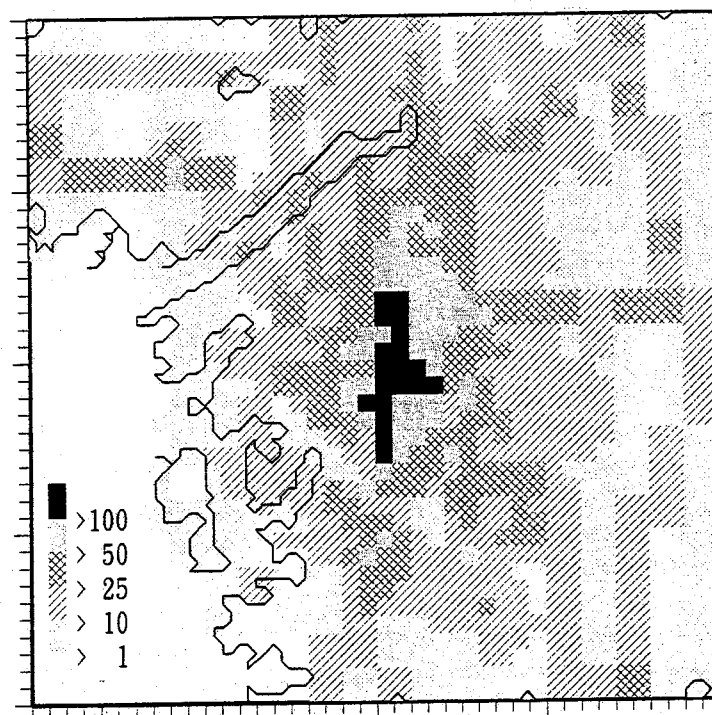


図 4.22 人工排熱の分布 [$\text{J}/\text{m}^2\text{s}$]

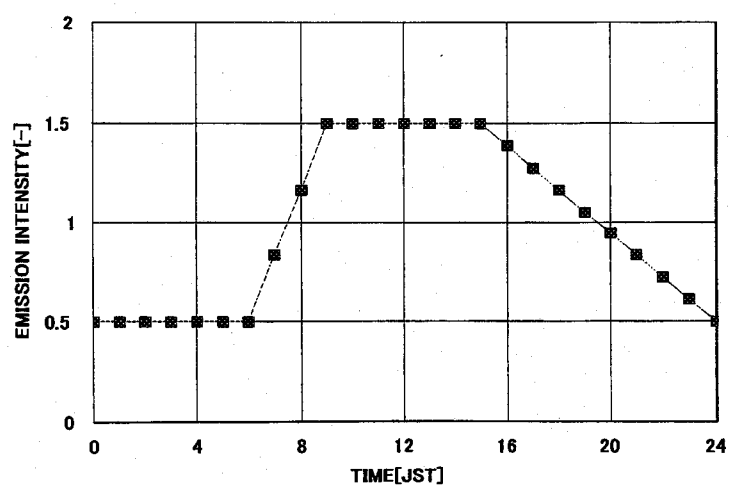


図 4.23 人工排熱の経時変化

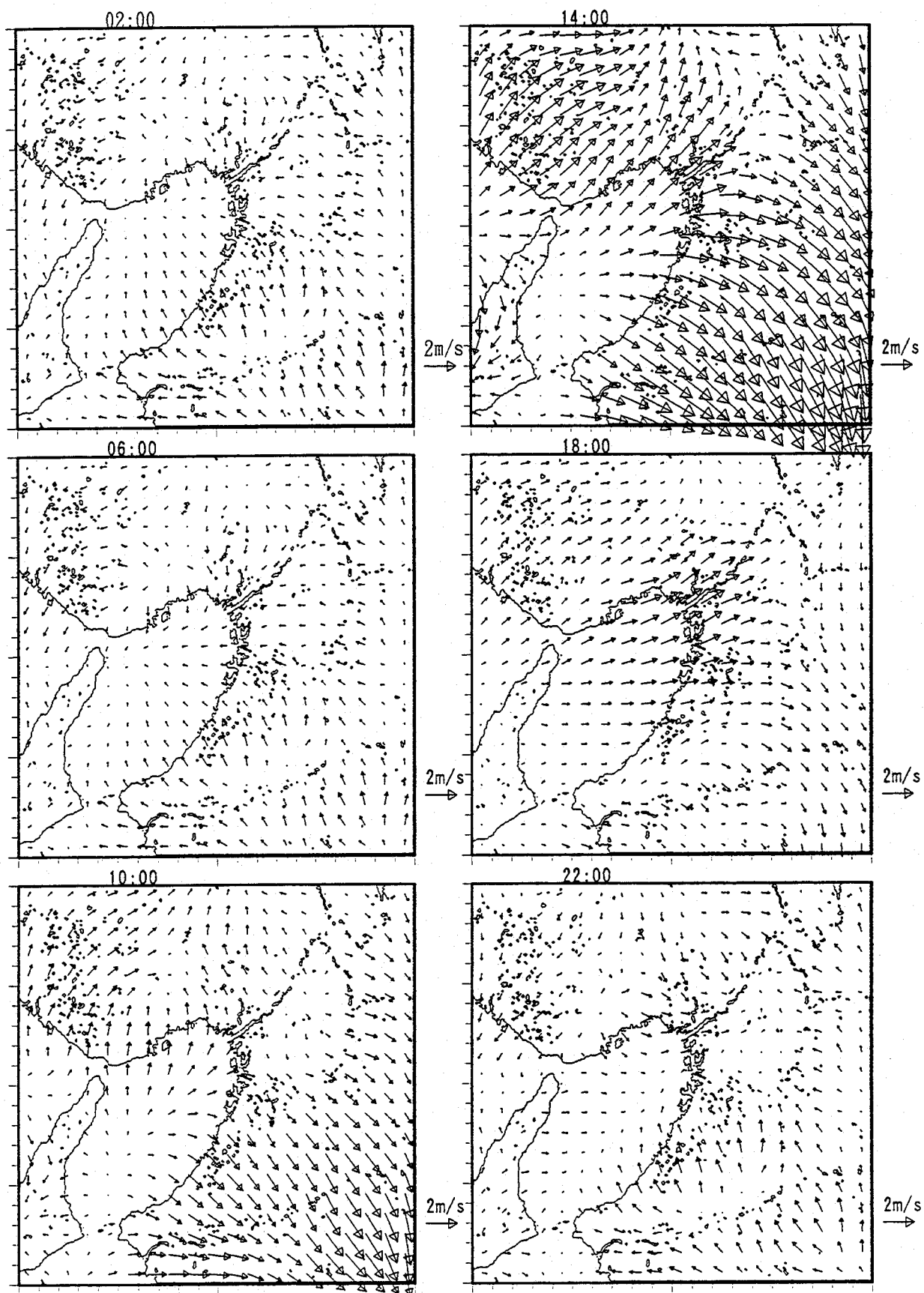


図 4.24 FDDA を用いた広領域の風系

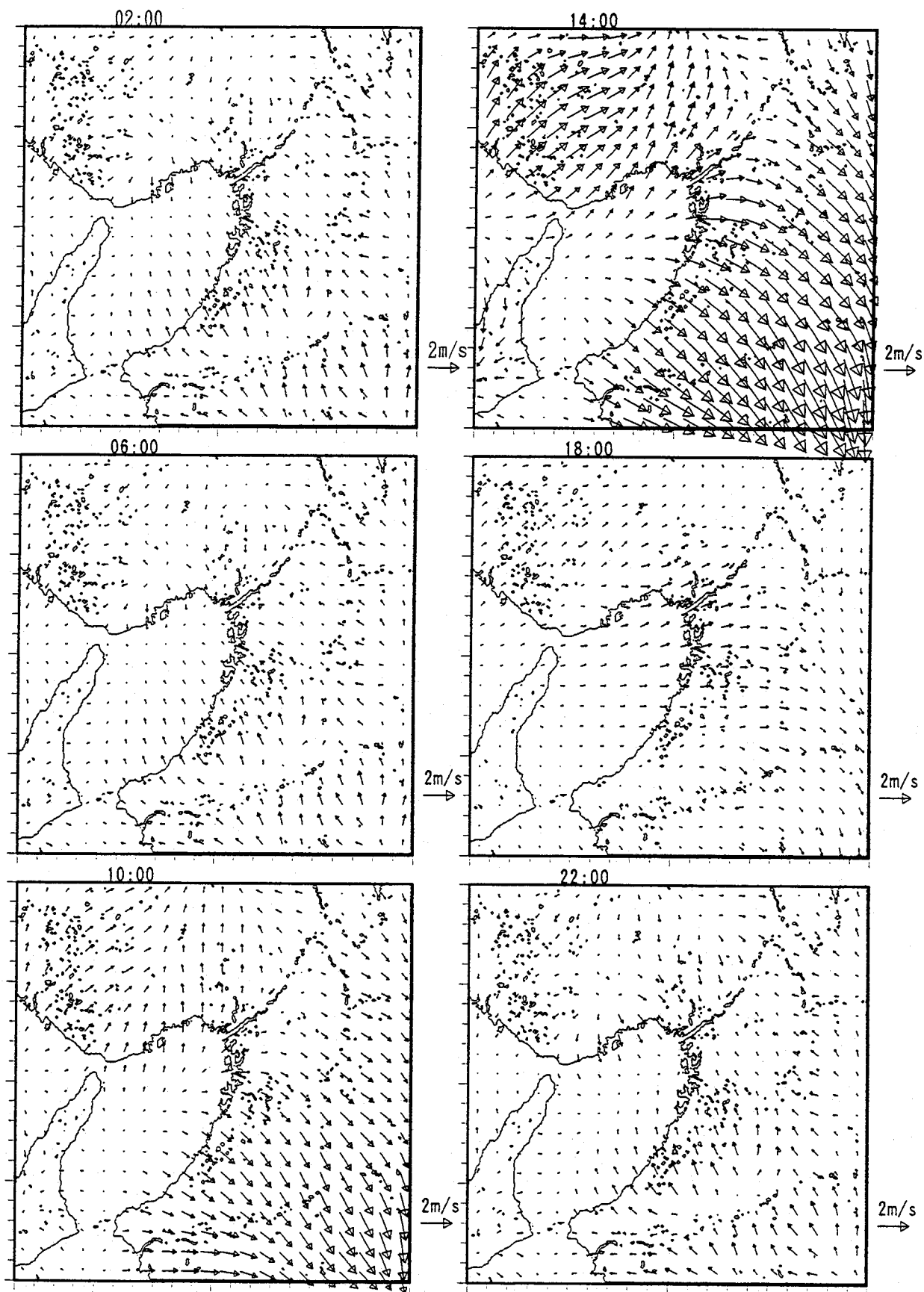


図 4.25 FDDA を用いない広領域の風系

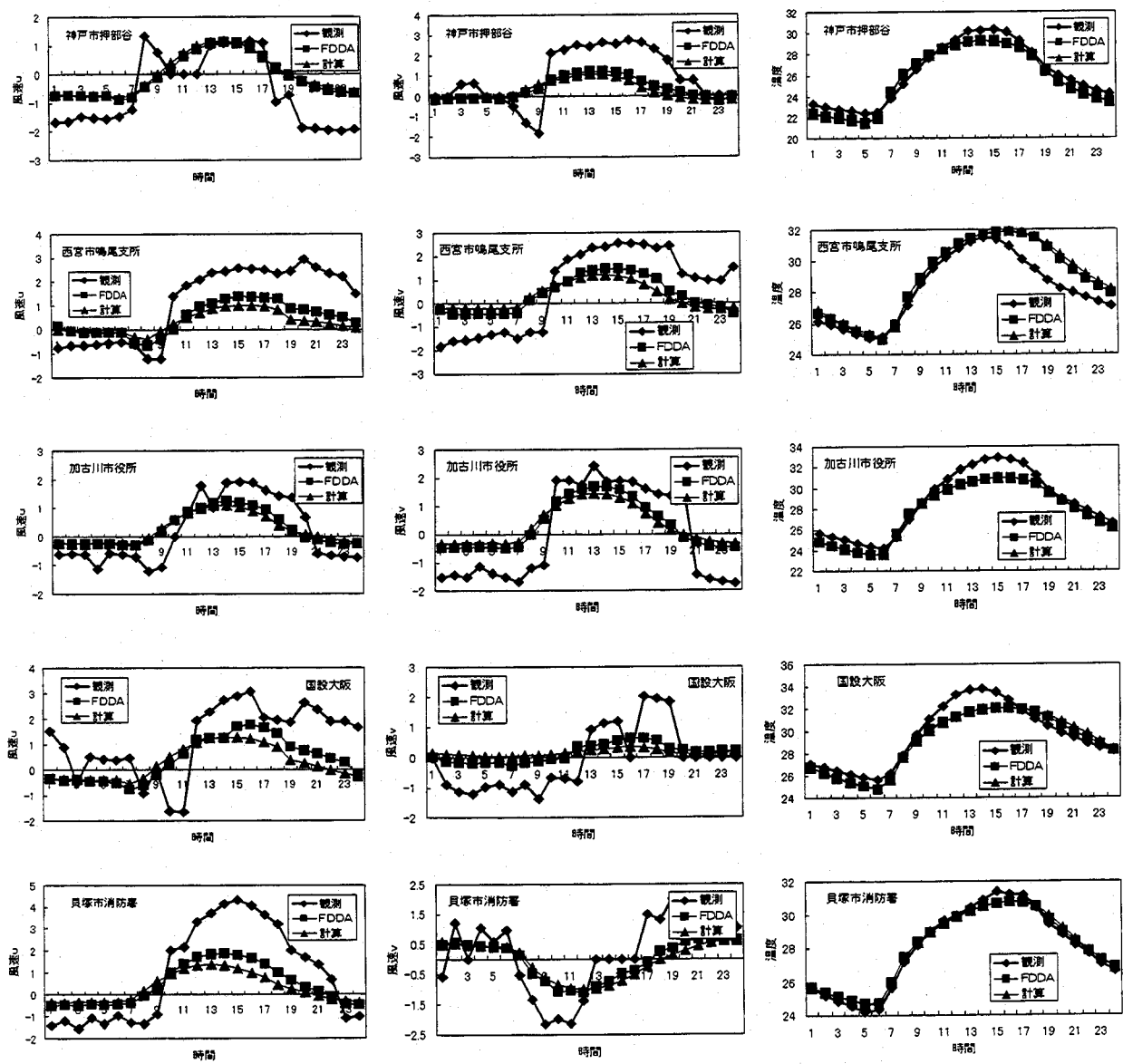


図 4.26 5 地点の速度 u, v および温度の観測値と計算値の時系列変化

表 4.14 家庭部門の消費比率と効率

	エネルギー源	消費比率	効率
冷熱需要	電力	1.00	3.04
暖房需要	電力	0.07	1.00
	都市ガス	0.29	0.85
	LPG	0.02	0.85
	灯油	0.62	0.85
給湯需要	電力	0.10	0.90
	都市ガス	0.80	0.85
	LPG	0.10	0.85

表 4.15 システムの顕熱・潜熱排出比率

システム	潜熱比	顕熱比
電動ターボ冷凍機+冷却塔	0.875	0.125
空気熱源ヒートポンプ	0.000	1.000
ガス吸収式冷凍機+冷却塔	0.887	0.113

観測値に比べて低い。大阪湾の海陸風を予測するためには、太平洋から日本海を含む領域で計算することが必要と言われており、風速が弱いのは計算領域が狭いことが要因として考えられる。ピーク温度が低く評価されたのは、メッシュ毎に設定した広領域の熱収支パラメータ値に問題があると考えられる。このように広領域の計算結果の現況再現性にはまだ問題があるので、この値を境界値として計算を行う次節の結果については定性的な評価にとどめる。

4.4.5 Nesting 領域の計算結果

前節の計算結果を境界条件として、都市キャノピの影響を含む大阪市内の数値シミュレーションを行った。都市キャノピの被覆率および高さは、図 4.20、図 4.21 に示した値を用いた。また、人工排熱量は、図 4.22 に示した値を用いた。表 4.16 に、この節で行う計算スケジュールを示す。

都市キャノピモデルを含み、人工排熱をキャノピ内の高さ方向に均等に排出する条件 (Run1) で計算した、2 時間置きの風系と温度分布を図 4.27 と図 4.28 に示す。風系図を見ると、日中に海風、夜間に陸風が吹いている様子がわかる。22 時から 2 時にかけて、都市部に風の収束域が現れているのがわかる。収束域は陸風とともに海岸へ移動し、4 時には見

表 4.16 大阪市のシミュレーションスケジュール

	都市キャノピモデル	人工排熱
Run1	○	○ キャノピ内均等排出
Run2	○	×
Run3	×	×

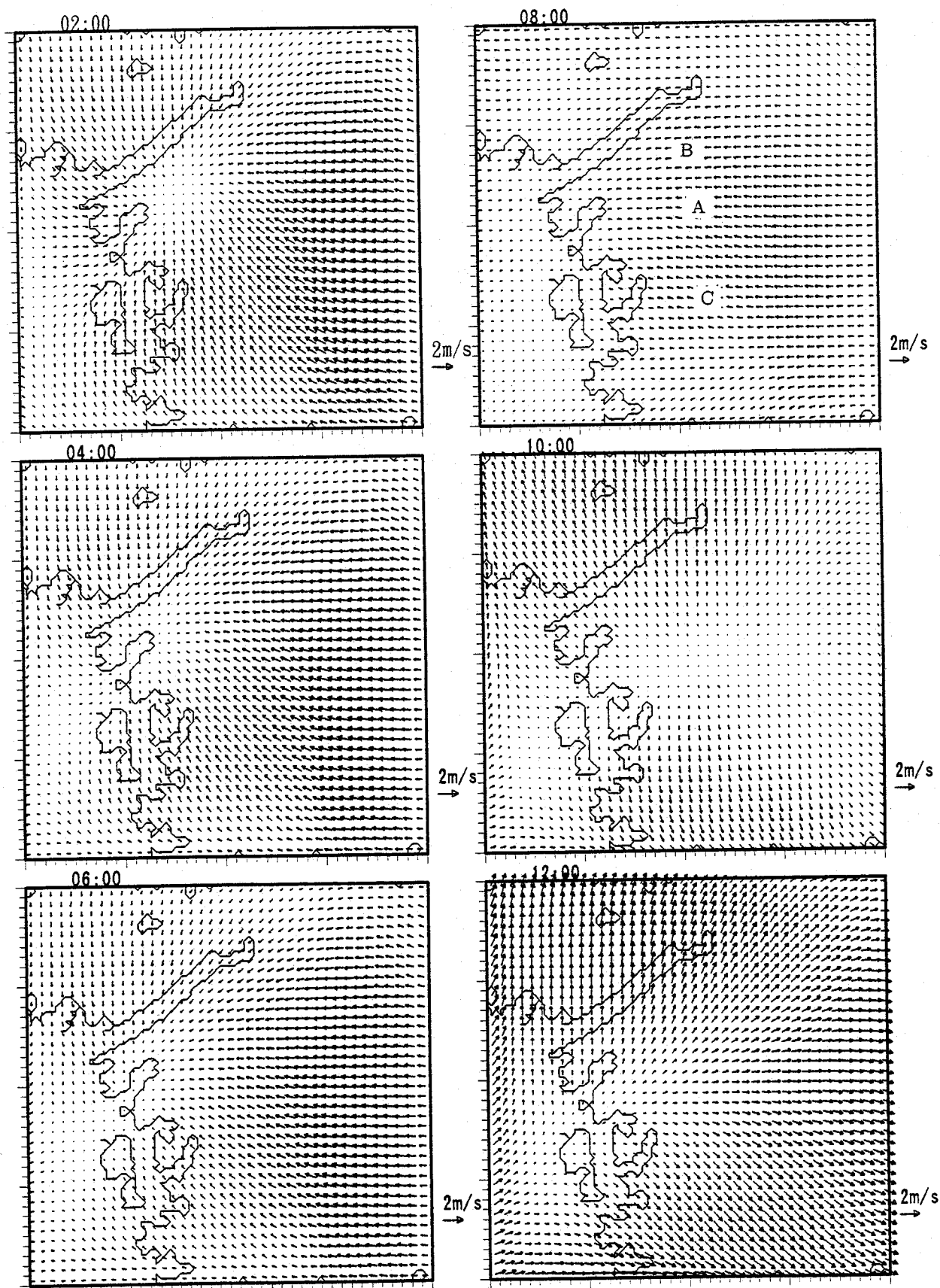


図 4.27 ネスティング領域の風系

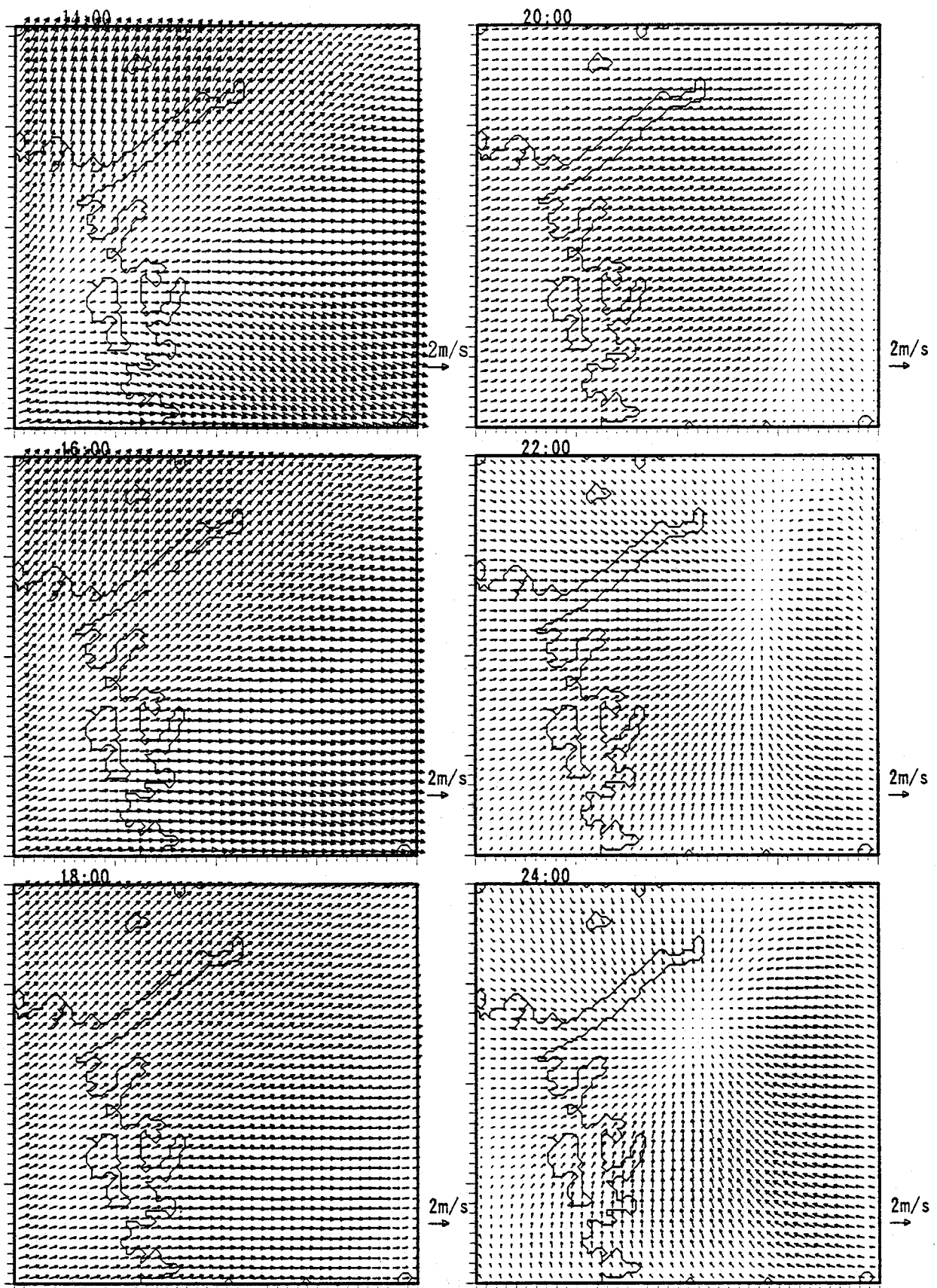


図 4.27 ネスティング領域の風系 (続き)

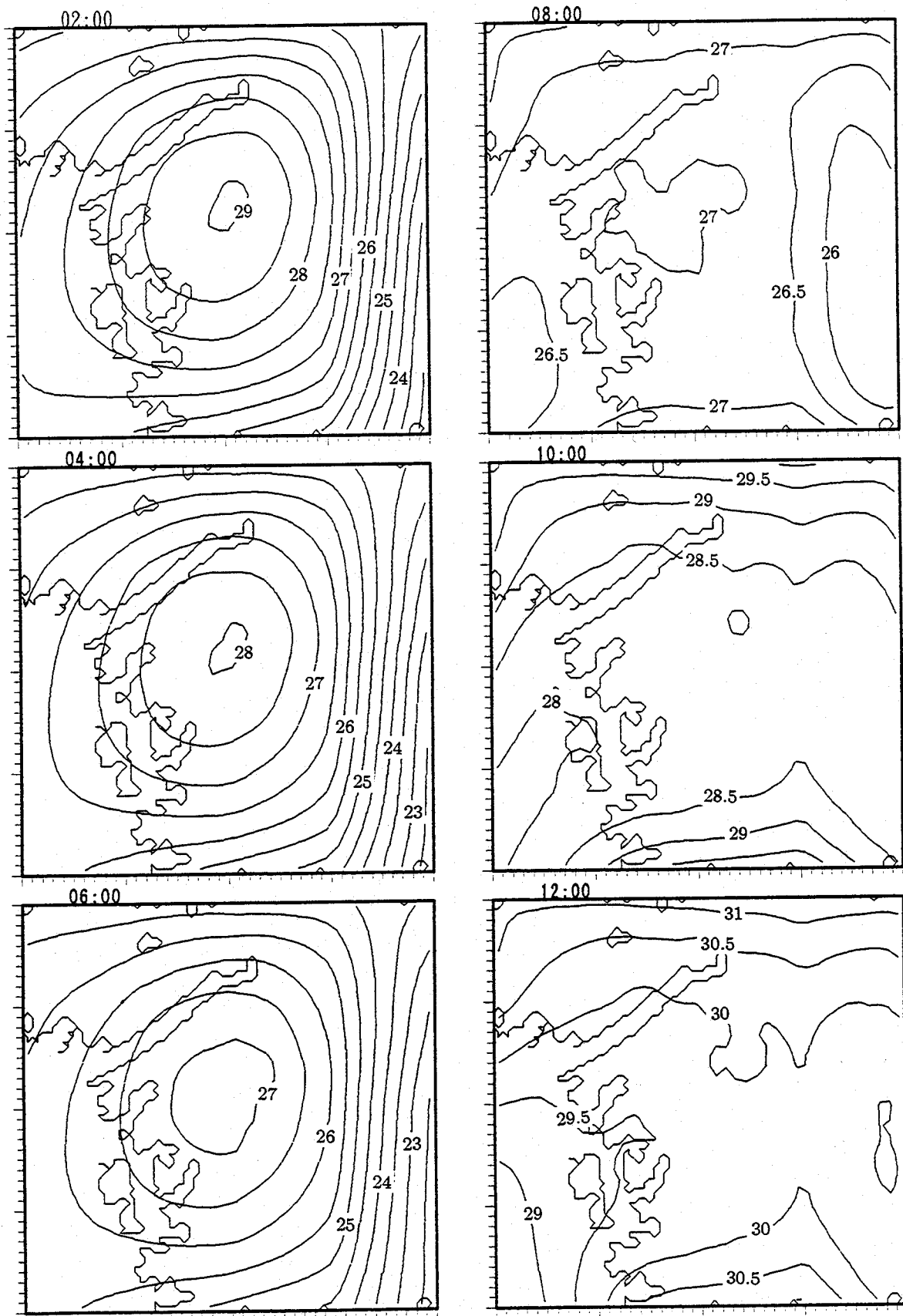


図 4.28 ネスティング領域の温度分布

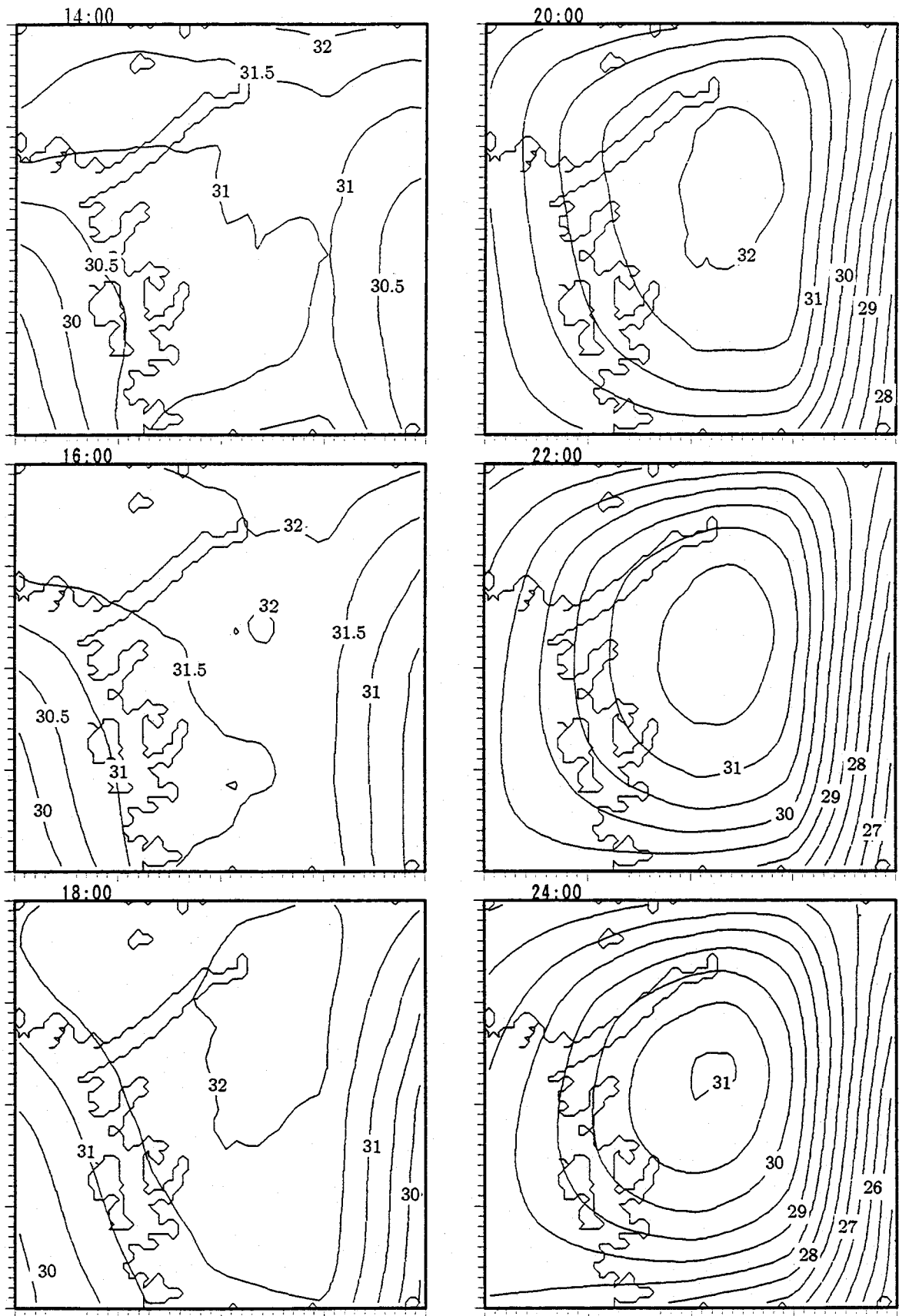


図 4.28 ネスティング領域の温度分布 (続き)

られなくなる。この収束域は、夜間の温度低下が低い地域に一致する。次の温度分布を見ると、8時から12時にかけて、都市キャノピ領域の温度上昇が小さい様子がわかる。また、夜間の都市キャノピ領域では、天空放射が小さく、また排熱量が大きいいため、温度低下が小さい様子が見て取れる。

建物なし排熱なし (Run3) と建物あり排熱なし (Run2) と建物あり排熱あり (Run1) の異なる3地点の高さ6m, 15m, 30mでの風速 u, v および温度の時系列変化を図4.29, 図4.30, 図4.31に示す。地点A, B, Cの地点は図4.27の8時の風系図に示す。地点A, Bは、高層で建坪率が高い都市中心部、地点Cは、A, Bに比べると建物高さ・建坪率が共に小さい場所である。

地点Aの温度の時系列変化(図4.29)の、建物なし排熱なし (Run3) と建物あり排熱なし (Run2) を比較すると、日中はRun2の温度がRun3に比べて低く、逆に夜間はRun2の温度がRun3に比べて高くなっている。1次元モデルの感度解析でも述べたように、建物の影響で、日中は地表面が受ける太陽放射量が減少し、夜間は地表面から大気への長波放射量の放出が減少した結果である。排熱を考慮すると(建物あり排熱あり (Run1)), 日中の温度は、Run3とほぼ同じになり、建物による気温低下と排熱による温度上昇がほぼ見合っていることがわかる。Run1は、排熱により夕方から夜間にかけての温度低下が少ない様子が見える。これは、夕方から大気は安定になり鉛直混合が起こりにくく、キャノピ内に熱がこもるためと考えられる。高さが高くなるに連れて、3つの計算の差は小さくなる。高さ3mで温度差が最大になる6時では、建物影響による温度上昇は約3.7度、排熱による温度上昇は約1.4度である。

1次元モデルの感度解析では、風速は建物抵抗によって減衰した。3次元解析では、計算領域内での温度分布によって風系が変化し、また高い建物があるとその周りに風が回り込むため、単純に建物による減衰傾向は見られない。風速 u のRun2とRun3を見ると、建物による減衰傾向が見られるが、Run1では、14時頃から24時にかけては速度の増加が見られる。

地点B, Cについても、ほぼ同様な傾向が見て取れる。地点Cは、地点A, Bに比べて建物高さが小さいので、高さ30mでの温度差は、地点A, Bに比べて小さくなっている。

数値モデル計算では、日中は都市建物による地表面が受ける太陽放射量が減少し、それ

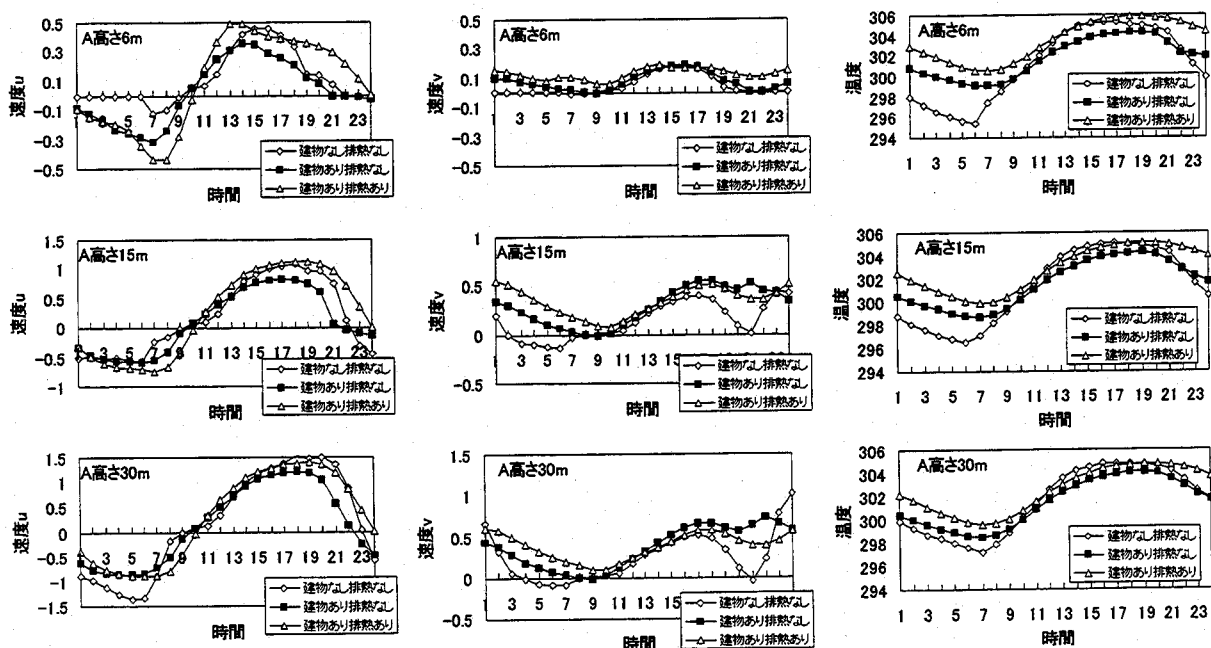


図 4.29 地点A の高さ6m, 15m, 30mでの風速 u, v および温度の時系列変化

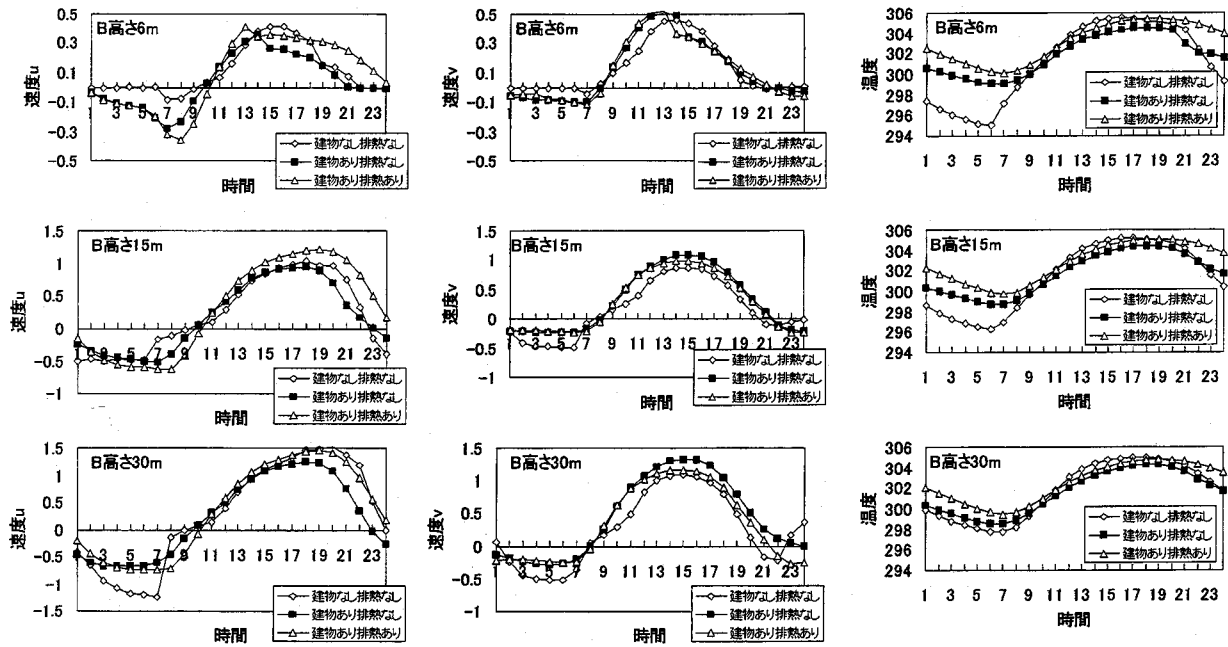


図 4.30 地点 B の高さ 6m, 15m, 30m での風速 u, v および温度の時系列変化

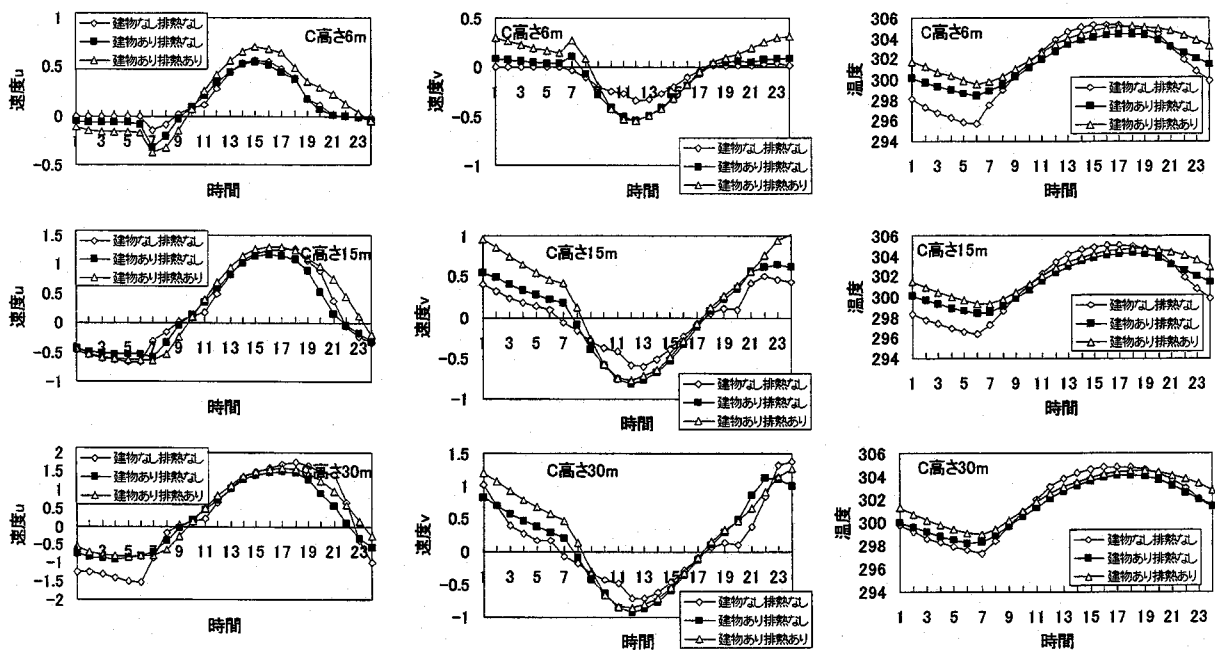


図 4.31 地点 C の高さ 6m, 15m, 30m での風速 u, v および温度の時系列変化

による気温低下と、人工排熱による気温上昇がほぼ拮抗するという結果が得られた。また、夜間は都市建物による地表面が天空に放出する長波放射量が減少し、それによる気温低下が抑えられ、また人工排熱による気温上昇が付加されて都市中心部で、約5度の気温上昇が起こった。そして、この気温上昇は、人工排熱による気温上昇よりも天空へ放出する長波放射の減少による気温低下抑制の影響が大きいことが示された。今後は、ここで示された結果が妥当であるかを観測等により検証していく必要がある。

4.5 結言

都市キャノピ内の建物群を同じ大きさの建物が規則正しく格子状に配置されるとモデル化し、モンテカルロ法に基づく光追跡法により都市キャノピ内表面の高さ方向分布の短波放射と長波放射フラックスを精度良く推定した。(1) 建物被覆率、(2) キャノピ高さ、(3) 建物の形、(4) 建物の向き、を変化させて、また(5) 建物、(6) 地表面の反射率および(7) 鏡面反射率を変化させて、キャノピ内の短波放射フラックス分布の影響を調べた。太陽高度角が小さく太陽時角が大きくなると、建物形状や反射率の違いによる影響が顕著に現れてくる。そして建物による被覆率を増大させたり、キャノピ高さを高くすると、地表面が受ける短波放射フラックスは少なくなった。また反射率を小さくすると、地表面が受ける短波放射フラックスは大きくなるが、壁面については大きな違いを生じなかった。次に、建物による被覆率とキャノピ高さを変えて、キャノピ内の表面の形態係数を求めた。建物による被覆率を増大させたり、キャノピ高さを高くすると、キャノピ内表面の天空係数は小さくなり、天空に放出する長波放射フラックスが減少した。

このように推定した正味放射フラックスを用いて熱収支方程式を解き、これと1次元大気境界層モデルを結合して、都市キャノピ内の気温・風速分布を求めた。建物による被覆率を増大させ、キャノピ高さを高くすると、建物抵抗により都市キャノピ内の風速減少は大きくなることが示された。また、建物による被覆率を増大させ、キャノピ高さを高くすると、地表面が受ける短波放射フラックスは少なくなるため、日中の温位上昇が小さくなり、一方、夜間は地表面が天空に放出する長波放射フラックスが少なくなるため、温位の低下が抑えられることが示された。これらの結果により都市の建物による被覆率の増大と建物高さの上昇は、夜間に温度が低下しにくくなるヒートアイランド現象を引き起こす原因の1つであることが明らかとなった。

次に都市キャノピ層を考慮した3次元大気境界層モデルを作成し、大阪市域に応用した。その結果、日中は都市建物による地表面が受ける太陽放射量が減少し、それによる気温低下と、人工排熱による気温上昇がほぼ拮抗するという結果が得られた。また、夜間は都市建物による地表面が天空に放出する長波放射量が減少し、それにより気温低下が抑えられる効果と人工排熱による気温上昇の相乗作用により都市中心部では、約5度の気温上昇が生じた。夜間の気温上昇は、人工排熱よりも、天空へ放出する長波放射の減少による影響が大きいことが示された。今回のモデルでは考慮していないが、都市キャノピの幾何学形状による都市キャノピ上空と都市キャノピ内の風向変化の影響および乱流の長さスケールの建物間距離による制約をモデルに付加することが、今後必要になると考えられる。

参考文献

- 4-1) 中村英夫編：都市と環境 —現状と対策—, ぎょうせい, (1992)
- 4-2) 大阪管区気象台編：大阪の気象 100 年, ぎょうせい関西支社, (1982)
- 4-3) Y. Nakamura and T. R. Oke: Wind, Temperature and Stability Conditions in an East-West Oriented Urban Canyon. *Atmos. Environ.*, 22, 2691 - 2700 (1988).
- 4-4) M. Aida and K. Gotoh.: Urban Albedo as a Function of the Urban Structure - A Model Experiment. *Bound. Layer Met.*, 23, 405 - 413 (1982).
- 4-5) H. Swaid: Urban Climate Effects of Artificial Heat Source and Ground Shadowing by Buildings. *Int. J. Climat.*, 13, 797 - 812 (1993).
- 4-6) F. Kimura and S. Takahashi : The Effect of Land-use and Anthropogenic Heating on the Surface Temperature in the Tokyo Metropolitan Area : A Numerical Experiment. *Atmos. Environ.*, 25B, 155-164 (1991).
- 4-7) T. Saitoh, T. Shimada and H. Hoshi : Modeling and Simulation of the Tokyo Urban Heat Island. *Atmos. Environ.*, 30, 3431-3442 (1996).
- 4-8) N. R. Wilson and R. H. Shaw : A higher order closure model for canopy flow. *J. Appl. Meteor.*, 16, 1197-1205 (1977).
- 4-9) Yamada, T.: A numerical model study of turbulent airflow in and above a forest canopy. *J. Met. Soc. Japan*, 60, 439 - 454 (1982).
- 4-10) Uno, I., H. Ueda and S. Wakamatsu : Numerical Modeling of the Nocturnal Urban Boundary Layer. *Bound. layer. Meteor.*, 49, 77 - 98 (1989).
- 4-11) 近藤裕昭, 劉発華他：都市の熱環境に関する研究, 大気環境学会講演要旨集, 356-356 (1997).
- 4-12) 持田灯, 村上周三他：日射の影響を考慮した市街地の風環境の予測・評価法に関する基礎的研究, 空気調和衛生工学会学術講演会講演論文集, 1245-1248 (1994).
- 4-13) 中山哲士, 石野久彌他: 1次元熱収支モデルによる都市熱環境解析に関する研究, 空気調和衛生工学会学術講演会講演論文集, 1239-1243 (1994).
- 4-14) H. Swaid: The Role of Radiative-Convective Interaction in Creating the Microclimate of Urban Street Canyons. *Bound. Layer Met.*, 64, 231 - 259 (1993).
- 4-15) 北林興二：海陸風の統計的解析, 公害, 11, 80-111 (1976)
- 4-16) 江口恒夫：大阪市の海陸風について—地上風データの統計解析—, 天気, 24, 739-746 (1977)
- 4-17) 楠田信, 阿部信男：大分市の夏季の海陸風, 天気, 29, 81-86 (1982)

- 4-18) 伊藤久徳, 川添俊弘: 和歌山県における海陸風, 天気, 30, 151-158 (1982)
- 4-19) 藤部文昭: 海陸風の季節的特性, 天気, 28, 367-374 (1981)
- 4-20) 堤純一郎, 他: 夏季の海陸風を対象とする気象データの統計解析, 日本建築学会計画系論文報告書, 389, 28-36 (1988)
- 4-21) 大阪市, 大阪市メッシュデータシステム (1985)
- 4-22) 金地孝行, 都市エネルギーフローの実態把握とその改善効果, 大阪府による都市エネルギー有効利用による省エネルギー効果と環境影響評価. 大阪大学修士論文. (1995)
- 4-23) 尾島俊男研究室, 建築の光熱水原単位 [東京版]. 早稲田大学出版部. (1995)

第5章 大阪湾岸の大気汚染濃度予測

5.1 緒言

都市域は、産業および人口の過度の集中により工場・自動車等からの窒素酸化物・硫黄酸化物等の大気汚染物質の排出量が非常に多くなっている。工場等の排出規制により二酸化硫黄 (SO_2) は環境基準が達成されているものの、二酸化窒素 (NO_2)、浮遊粒子状物質 (SPM) および2次生成物質である光化学オキシダント (O_3) については必ずしも環境基準を満足しておらず良好な大気環境が保全されているとはいいがたい。その中でも広域スケールの汚染物である光化学オキシダントは、注意報発令日 (環境基準の2倍の濃度が観測されその状態が続くと判断された日) が平成7年度日本国内で延べ139日と非常に厳しい汚染状況にある⁵⁻¹⁾。このような状況下で、平成4年には「自動車 NO_x 法」が公布され、自動車排出窒素酸化物削減計画が策定されている。このように、陸上の大気汚染排出源 (固定発生源、移動発生源) については、環境庁・地方自治体によりさまざまな規制が実施されているが、海上の船舶からの排出については我が国だけではなく世界的にもほとんど規制はなされていない。国際海事機関 (IMO: International Maritime Organization) における海洋環境保護委員会 (MEPC: Marine Environment Protection Committee) において、1990年に“Exhaust Gas Emission from International Marine Transport”が提出され、船舶が排出する硫黄酸化物・窒素酸化物の排出量は地球全体の4~7%を占めると報告されている⁵⁻²⁾。東京湾や大阪湾沿岸域では、海上交通量も多く、陸域での排出規制が実施される中、船舶からの排出量影響を無視できないと考えられる。今後船舶からの排出規制を実施する上で、現状の船舶からの排出が陸域大気汚染濃度に及ぼしている影響を評価することが重要である。東京湾沿岸については、船舶からの排出影響をプルームモデルを用いて評価した研究⁵⁻²⁾が行われているが、東京湾よりも排出量が多い大阪湾⁵⁻³⁾については、その影響評価が行われていない。また、プルームモデルでは長期期間の影響評価は可能であるが、短期の高濃度大気汚染の評価を行うことができない。

そこで、メソスケール予測モデルと短期の高濃度大気汚染が予測できる光化学反応を含む大気汚染濃度予測モデルを用いて、大阪湾沿岸域を対象に高濃度光化学オキシダントが観測された日について、船舶からの排出が陸域大気濃度に与える影響を検討する。

5.2 大気汚染物質濃度予測モデル

大気汚染予測のためのシミュレーションモデルは、メソスケール予測モデル⁵⁻⁴⁾とこのモデルで予測された流れ場をもとに大気汚染物質濃度を予測するモデルから構成される。メソスケール予測モデルは2.2節で、大気汚染物質濃度予測モデルは2.6節で述べたモデルを用いた。

5.2.1 反復風上差分法

濃度計算の移流項について、1次精度の風上差分を用いると、計算値は負にならず安定に計算が出来るが、大きな疑似拡散を生じる。中心差分などの2次精度の計算法を用いると、疑似拡散は解消されるが、濃度値が大きく変化する点ではギップス現象を生じ計算値が負の値となる⁵⁻⁵⁾。このギップス現象を生じずにかつ2次精度を持つ差分法に反復風上差分法⁵⁻⁶⁾があり、本研究でもこの反復風上差分法を用いた。

この手法は1次精度の風上差分による疑似拡散を、逆拡散速度を用いてもう一度1次風上差分を繰り返し、1次風上差分の利点を持ちつつ、疑似拡散を小さくする差分方法であり以下に簡単に説明する。

移流方程式を1次元で表すと

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(uc) \quad (5.1)$$

となる。式(5.1)を1次精度の風上差分式で表すと、式(5.2)となる。

$$c_i^{N+1} = c_i^N - \{F(c_i^N, c_{i+1}^N, u_{i+1/2}^N) - F(c_{i-1}^N, c_i^N, u_{i-1/2}^N)\} \quad (5.2)$$

ここで c_i^N は i 点での N タイムステップ目の濃度、 F は移流フラックスで、式(5.3)で表される。

$$F(c_i, c_{i+1}, u) = [(u + |u|)c_i + (u - |u|)c_{i+1}] \frac{\Delta t}{2\Delta x} \quad (5.3)$$

ここで $\Delta t, \Delta x$ は時間間隔と空間間隔である。

式(5.1)の移流方程式について、テーラー展開を行い、3次の項以上を無視すると、式(5.4)になる。

$$\left(\frac{\partial c}{\partial t}\right)_i^n = -\frac{\partial}{\partial x}(uc)_i^n + \frac{\partial}{\partial x} \left[0.5(|u|\Delta x - \Delta t u^2) \frac{\partial c}{\partial x} \right]_i^n \quad (5.4)$$

1次精度の風上差分は、式(5.4)の第1項のみを表しており、第2項を無視することで計算誤差を生じるが、この項が風上差分の計算の安定性を保つのに重要な働きをしている。そこでこの安定性を保ちつつ、この誤差を打ち消すために、まず式(5.2)の移流計算を行った後で、その誤差を打ち消す補正計算を行う。ここで $K' = 0.5(|u|\Delta x - \Delta t u^2)$ とすると、式(5.4)の第2項は、式(5.5)で表される。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K' \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (5.5)$$

さらにこの式を変形すると、

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{\partial(u_d c)}{\partial x} \quad (5.6)$$

と書き直される。ここで (u_d) は拡散速度で、次式で与えられる。

$$u_d \equiv \begin{cases} -\frac{K'}{c} \frac{\partial c}{\partial x} & \text{if } c > 0 \\ 0 & \text{if } c = 0 \end{cases} \quad (5.7)$$

この逆拡散速度を次式のように再定義すると、

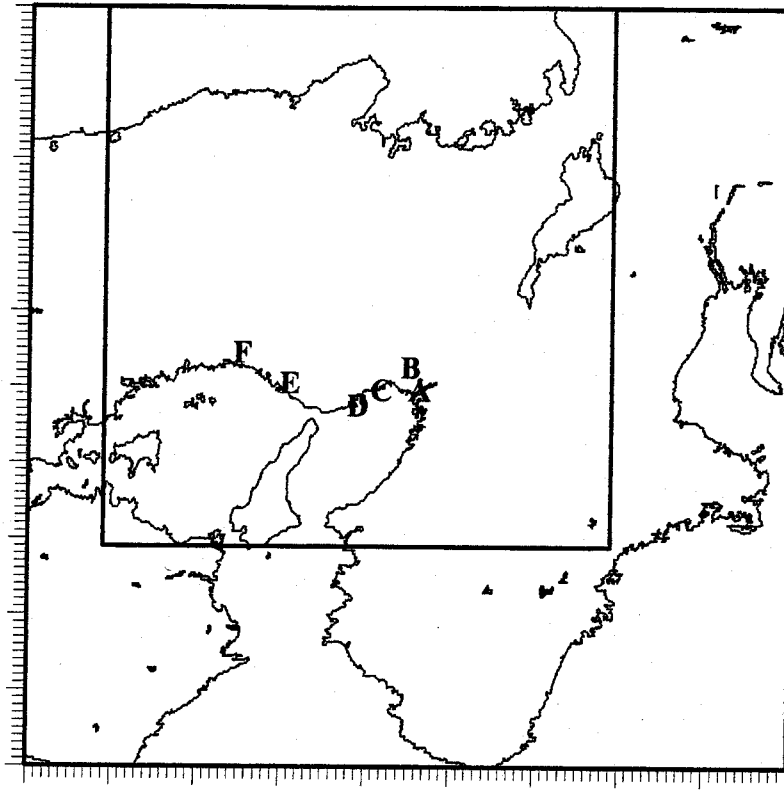


図 5.1 計算領域

$$\tilde{u} = \begin{cases} -u_d & \text{if } c > 0 \\ 0 & \text{if } c = 0 \end{cases} \quad (5.8)$$

式 (5.5) の拡散方程式は, 逆拡散速度 \tilde{u} をともなった移流方程式 (5.6) によって計算される.

以上, この考え方に基づく補正計算も合わせた移流手法 (反復風上差分法) は下記のように整理出来る.

$$1) \quad c_i^* = c_i^n - \{F(c_i^n, c_{i+1}^n, u_{i+1/2}^n) - F(c_{i-1}^n, c_i^n, u_{i-1/2}^n)\} \quad (5.9)$$

$$2) \quad c_i^{n+1} = c_i^* - \{F(c_i^*, c_{i+1}^*, \tilde{u}_{i+1/2}) - F(c_{i-1}^*, c_i^*, \tilde{u}_{i-1/2})\} \quad (5.10)$$

$$\tilde{u}_{i+1/2} = \frac{(|u_{i+1/2}| \Delta x - \Delta t u_{i+1/2}^2)(c_{i+1}^* - c_i^*)}{(c_i^* + c_{i+1}^* + \varepsilon) \Delta x} \quad (5.11)$$

ここで ε は $c_{i+1}^* = c_i^* = 0$ のときでも計算可能とするための係数で, $\varepsilon = 10^{-15}$ と設定した.

また, 実際の計算では時間分割法⁵⁻⁵⁾を適用した. まず x 方向の移流項に反復風上差分を用いて計算を行い, 次に y 方向の移流項に反復風上差分を用いて計算を行い, 最後に z 方向の移流拡散項と生成項を含む計算を行った. なお, z 方向の移流項については, 1次精度風上差分を用いた.

5.3 計算条件

5.3.1 計算領域

流れ場の計算領域は 図 5.1で示す東経 $133^\circ 48' \sim 137^\circ$, 北緯 $33^\circ 30' \sim 35^\circ 56'$ で囲まれた東西 256km, 南北 292km (1メッシュ約 3km の 90メッシュ \times 100メッシュ) の領域であ

る。大阪湾岸域の流れ場を推定するためには、日本海と太平洋を含む広領域で数値シミュレーションを行う必要性が示されており⁵⁻⁷⁾、本研究でもそれに従った。濃度計算領域は、図5.1内の四角で囲まれた領域で、東経 $134^{\circ}09' \sim 136^{\circ}18'$ 、北緯 $34^{\circ}13' \sim 35^{\circ}56'$ で囲まれた東西170km、南北204km (1メッシュ約3kmの60メッシュ×70メッシュ) である。

鉛直方向は計算領域の上面の高さを5000mとし、下層からの格子間隔が8, 8, 8, 8, 48, 129, 210, 290, 371, 452, 532, 613, 694, 774, 855mとなる15層の不均等メッシュを用いる。風速・風向および NO 、 NO_2 、 O_3 、 SO_2 濃度の計算値は、図5.1中に示すA~Fの大気常時観測所のデータと比較を行う。兵庫県下には89カ所の大気常時観測所が存在する(1995年度)が、船舶からの排出の濃度影響を調べる目的から、瀬戸内海に面し風速・風向および NO 、 NO_2 、 O_3 、 SO_2 濃度の全ての観測が行われているこの6地点を計算値と比較する観測所として選んだ。また観測されるオキシダント濃度は、オゾン(O_3)濃度に等しいとして計算値のオゾン(O_3)濃度と比較を行った。

5.3.2 計算日時

計算は1990年8月2日10時から72時間実施し、観測値との比較は、3日目の8月4日0時からの24時間に対して行った。この期間は南から太平洋高気圧が張り出し晴れの日が続く気象条件であった。また8月4日は、阪神・播磨地域に全域に光化学スモッグ注意報が発令され、オキシダント濃度だけでなく二酸化窒素、二酸化硫黄濃度も高い値を記録した日であった。

5.3.3 流れ場計算の初期条件と境界条件

1) 初期条件

風速の初期値は全領域で0と設定した。温位の初期値は、全領域で海面高さでの地表面温位298K、温位勾配0.005K/mで与えた。比湿の初期値は、高さ2000m以下は相対湿度50%、高さ2000m以上は相対湿度20%で与えた。また、乱流量の初期値は、Level2モデルから決定した。

2) 境界条件

地表面温度および比湿は、国土地理院の土地利用データから各格子の土地利用割合を求め、各々に対して地表面熱収支式を解いて決定した(4.4.2.3節参照)。モデル底面境界の温位と風速は、モニン・オブコフの相似則から決定した。上端境界は不変とした。側面境界条件は、全ての変数に対して勾配=0とした。

5.3.4 濃度計算の初期値および境界条件

1) 初期条件

高さ209m(鉛直方向の地表から6番目の格子)までと、それより上空とに分けて各汚染物質の初期値を与えた。表5.1にその値を示す。

2) 境界条件

計算領域上面の濃度値は、計算期間中変化しないとし、側面境界条件は勾配=0とした。底面境界条件は式(5.12)による地表からのフラックス F で与えた。

表 5.1 各化学物質の初期濃度 [ppm]

物質	0[m] ~ 209[m]	209[m] ~
NO	0.015	0.002
NO2	0.015	0.002
O3	0.020	0.020
OLE	0.0021440	0.001072
PAR	0.04690	0.02345
TOL	0.000150	0.00015
XYL	0.000081250	0.00008125
HCHO	0.00140	0.0007
ALD2	0.00060	0.0003
ETH	0.0064655	0.0032327
CRES	0.10000E-05	0.10000E-05
MGLY	0.10000E-05	0.10000E-05
OPEN	0.10000E-05	0.10000E-05
PNA	0.10000E-05	0.10000E-05
NXOY	0.10000E-08	0.10000E-05
PAN	0.10000E-05	0.10000E-05
CO	0.20	0.10
HONO	0.10000E-05	0.10000E-05
H2O2	0.10000E-05	0.10000E-05
HNO3	0.10000E-05	0.10000E-05
MEOH	0.10000E-05	0.10000E-05
ETOH	0.10000E-05	0.10000E-05
ISOP	0.10000E-05	0.10000E-05
SO2	0.010	0.010
0		

$$F = -v_g \cdot c + Q_{sf} \quad (5.12)$$

ここで Q_{sf} は地上面からの汚染物質排出フラックスである。

5.3.5 光解離定数

2.6.3節で示した 81 の反応式のうち 11 の反応式の反応速度は、 NO_2 の光解離定数の関数である。光解離定数の関数式としては、北田ら⁵⁻⁸⁾により提案されている式があるが、ここでは、表 5.2 に示す天頂角と NO_2 の光解離定数 K_1 の対応値から各時刻の NO_2 の光解離定数を設定した。

5.3.6 計算手順

流れ場計算と濃度計算を同時に行うと、非常に多くの計算時間が必要となる。そのため、流れ場の計算は予め実行し、1 時間毎の風速、温位、比湿および摩擦速度データをハードディスクに保存した。そして、濃度計算に必要な流れ場データは、時間値を線形内そうして求めた。

表 5.2 天頂角と K_1 の関係

天頂角	K_1
0	0.638
10	0.632
20	0.615
30	0.586
40	0.542
50	0.482
60	0.399
70	0.283
78	0.162
86	0.048

5.4 排出量の算定

本研究では船舶からの排出寄与を調べる目的から、大阪湾に面する兵庫県、大阪府および大阪湾上からの硫黄酸化物、窒素酸化物、炭化水素の排出量の推定を行なった。そして、他の計算領域の排出量は0と仮定した。

5.4.1 硫黄酸化物・窒素酸化物排出量の算定

硫黄酸化物と窒素酸化物については、(1) 工場・事業所、(2) 自動車、(3) 船舶、(4) 群小発生源、(5) 航空機の5種類の排出源に分類した。工場・事業所、自動車、群小発生源、航空機の兵庫県および大阪府からの排出量は、兵庫県から提供して頂いた。これらの排出量は、窒素酸化物総量規制マニュアル⁵⁻⁹⁾に従っているので、以下に簡単にその方法を説明する。船舶からの排出については西川⁵⁻³⁾の方法に基づいて算出した。

(1) 工場・事業所

工場・事業所に対して実施された「大気汚染物質排出量総合調査」の調査結果をもとに汚染物質量を算出する。算定手順を図5.2に示す。

(2) 自動車

「平成2年度全国道路交通情勢調査」の対象道路を(一般国道、主要地方道、一般県道)を幹線道路とし、その他の道路を細道路と分類する。そして幹線道路、細道路各々について

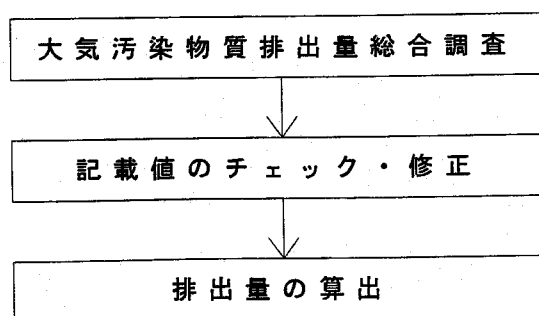


図 5.2 工場・事業所の排出量算出手順

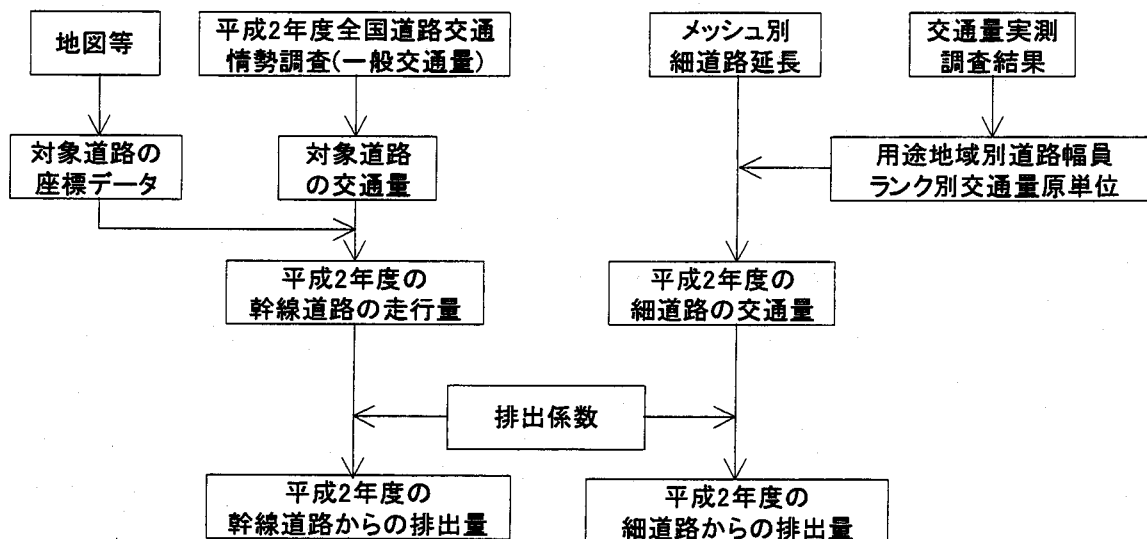


図 5.3 自動車の排出量算出手順

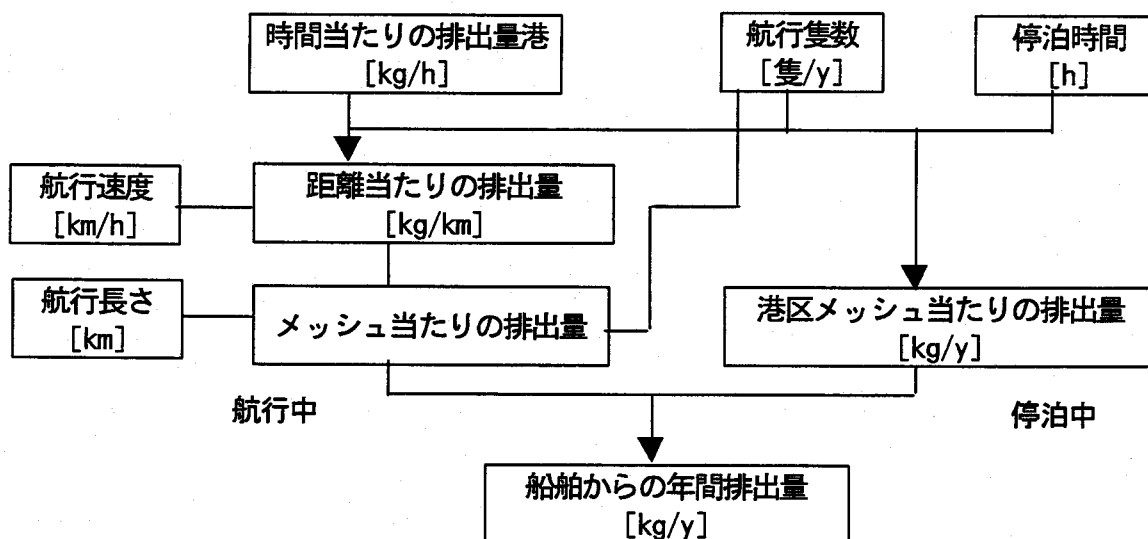


図 5.4 船舶の排出量算出手順

車種別の交通量を調査し、車種毎の排出係数を乗じて排出量を算出する。その算定手順を図 5.3 に示す。

(3) 船舶

船舶からの排出量推定のために、(1) 航行隻数、停泊時間から大阪湾の OD 表の作成、(2) OD 間の航路から航路長さの算出、(3) 主機・補機の出力、燃料消費量から排出係数の決定、を行い、航行中、停泊中の航路長さあたり時間あたりの排出量を推定した。船舶の排出量算定手順を図 5.4 に示す。

(4) 群小発生源

一般家庭および小規模事業所において、暖房、厨房に使用される都市ガス、LPG および灯油の使用量を調査し、排出係数を乗じて排出量を算定した。群小発生源の排出量算定手順

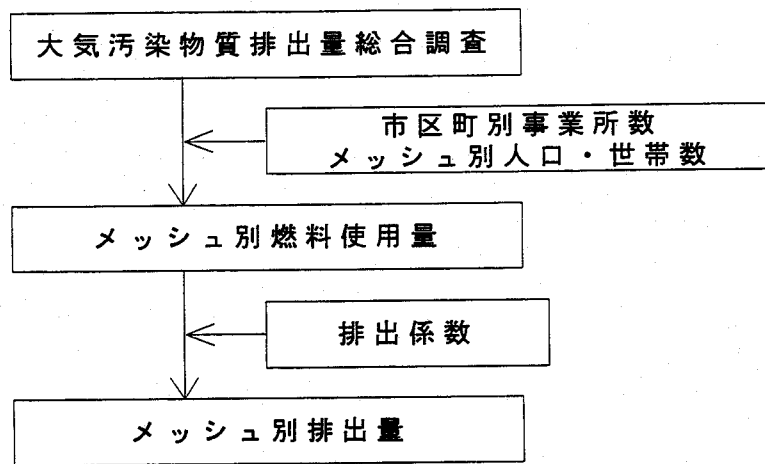


図 5.5 群小発生源の排出量算出手順

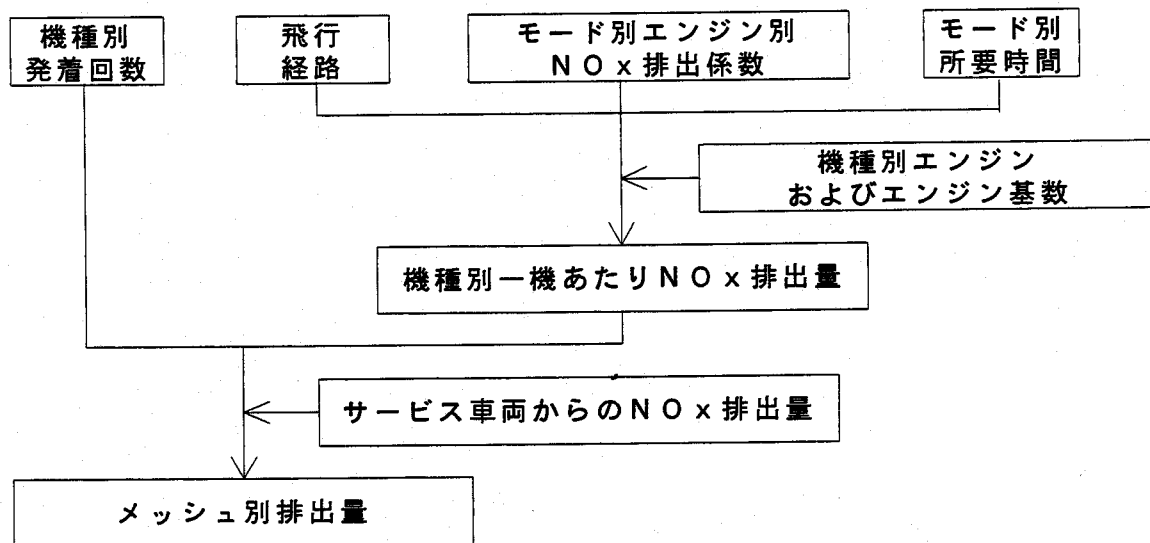


図 5.6 航空機の排出量算出手順

を図 5.5 に示す。

(5) 飛行機

大阪国際空港 (伊丹空港) に離発着する航空機およびサービス車両を対象として排出量を算出する。また高度 300 m 以下の範囲を対象とする。その算定手順を図 5.6 に示す。

推定した硫黄酸化物と窒素酸化物の排出量を表 5.3 と表 5.4 に示す。また、計算領域での排出量マップを図 5.7 と図 5.8 に示す。船舶からの硫黄酸化物と窒素酸化物の排出量はそれぞれ 18609[ton/year] , 56480[ton/year] となり、大阪湾沿岸域の排出量の約 30% を占めている。

東京湾で推定された船舶からの硫黄酸化物と窒素酸化物は、それぞれ 19700[ton/year] , 20400[ton/year] となっており⁵⁻³⁾、東京湾と比較すると大阪湾では窒素酸化物の排出量が多くなっている。これは、東京湾の総航行隻数約 34 万隻に対して大阪湾が約 40 万隻と多く、その内航海時間当たりの排出係数が大きいフェリーの航行隻数が約 23 万隻を占めてい

表 5.3 SO_xの発生源別の排出量

発生源	排出量 [ton/year]	割合 [%]
(1) 工場・事業所	33904	59.2
(2) 自動車	4664	8.1
(3) 船舶	18609	32.5
(4) 群小発生源	0	0.0
(5) 飛行機	70	0.1
合計	57249	100.0

表 5.4 NO_xの発生源別の排出量

発生源	排出量 [ton/year]	割合 [%]
(1) 工場・事業所	58690	32.6
(2) 自動車	57053	31.7
(3) 船舶	56480	31.3
(4) 群小発生源	6203	3.4
(5) 飛行機	1792	1.0
合計	180221	100.0

ることと、その他に外洋と瀬戸内海を結ぶ通過隻数が6万隻と多いことによると考えられる。硫黄酸化物量に差が見られないのは、大阪湾の計算ではバースに入れば全ての船舶燃料をA重油にしたことによると考えられる。ちなみに、A、C重油の硫黄含有率は、それぞれ0.8、2.7wt%で計算を行った。

5.4.2 炭化水素排出量の算定

1) 排出源

炭化水素については、(1)貯蔵、(2)出荷、(3)給油、(4)製造、(5)塗装、(6)建築塗装、(7)印刷、(8)金属等表面処理、(9)クリーニング、(10)接着剤その他の溶剤使用過程等、(11)ばい煙発生施設、(12)自動車の12種類の人工発生源と植物からの自然発生源の計13種類に分類して排出量を推定した。人工発生源の概要を以下に説明する。

(1) 貯蔵

重油、原油等石油製品の炭化水素を貯蔵する施設を対象とし、受入ロス、呼吸ロス、排出口ロス分を排出量とする。

(2) 出荷

船舶(タンカー)、タンク貨車、タンクローリー車による炭化水素の出荷時の受入ロス分を排出量とする。(主に油槽所での出荷)

(3) 給油

給油(ガソリンスタンド)におけるガソリン、軽油等の地下タンクへの受け入れ時のロスと自動車給油時の蒸発ロス分を排出量とする。

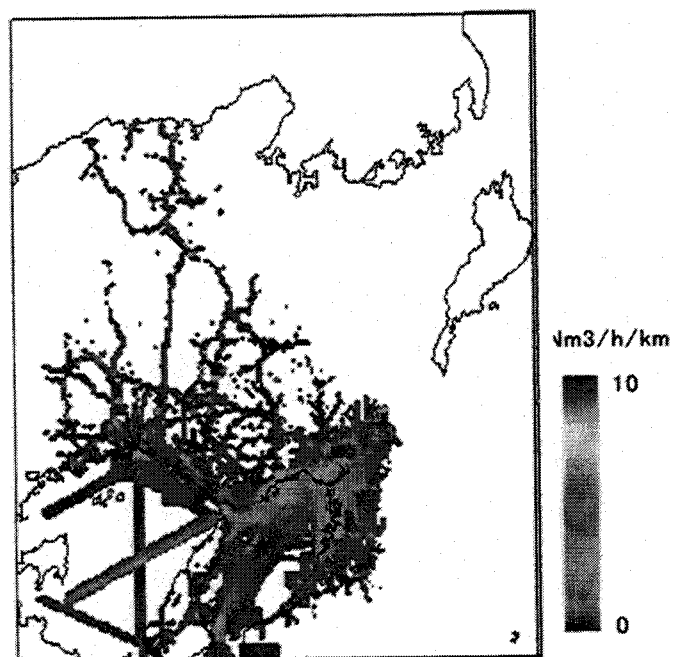


図 5.7 SO_xの排出量マップ

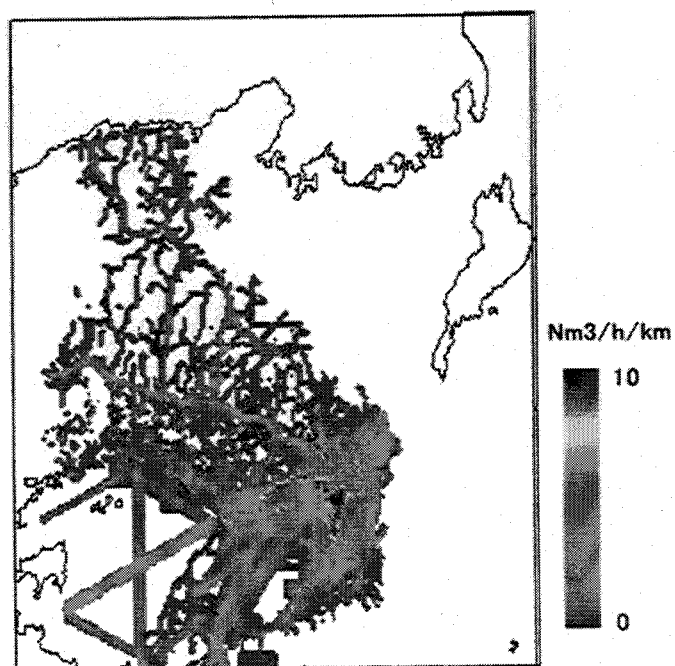


図 5.8 NO_xの排出量マップ

(4) 製造

有機溶剤等の各種炭化水素類を原料, 溶媒として使用し, 関連製品を製造する工程で排出される炭化水素類を対象とする.

(5) 塗装

製品を製造する際に行われる塗装工程から排出される有機溶剤系の炭化水素類を対象とする. (自動車補修塗装も含む)

(6) 建築塗装

建築工事で行う塗装過程で排出される有機溶剤系の炭化水素類を対象とする.

(7) 印刷

印刷施設で排出される有機溶剤系の炭化水素類を対象とする.

(8) 金属等表面処理

金属製品, プラスチック製品等の表面処理の工程で排出される有機溶剤系の炭化水素類を対象とする.

(9) クリーニング

クリーニング施設で排出されるクリーニング溶剤 (石油系, テトラクロロエチレン等) の炭化水素類を対象とする.

(10) 接着剤その他の溶剤使用過程等

上記以外で, 有機溶剤の使用過程で排出される炭化水素類を対象とする.

(11) ばい煙発生装置 (燃焼プロセス)

工場, 事業所のばい煙発生施設において燃料の燃焼過程で排出される炭化水素類を対象とする.

(12) 自動車

自動車走行時に排出される炭化水素類を対象とする.

(13) 植物起源

樹木 (広葉樹, 針葉樹) および水田 (稲) から発生する炭化水素類を対象とする.

2) 排出算定手順

貯蔵, 出荷, 製造, 塗装, 印刷, 金属等表面処理, クリーニング, 接着剤その他の溶剤使用過程等については, 排出原単位をもとに, 次式から排出量を算定した.

$$\text{炭化水素排出量 } [t] = \sum_{ij} \text{排出原単位}_{ij} \times \text{フレーム値}_i \quad (5.13)$$

ここで, i は業種, j は発生過程である. また各業種におけるフレーム値は, 製造業は品目別工業製造品年間出荷額, 電気業は発電電力量, ガス業はガス供給量, 自動車整備業は自動車等保有台数, その他は人口である. この排出原単位については石炭等導入地域影響調査報告書⁵⁻¹⁰⁾に従った. 表 5.5 にその値を示す.

給油は, 次式から求めた.

$$((\text{県内販売量} - (\text{県内産業用使用量})) \times (\text{販売額比 (調査地域/県内)}) \times (\text{排出係数})) \quad (5.14)$$

建築塗装については, 次式から求めた.

$$(\text{全国建築塗料用途別溶剤使用量}) \times (\text{建築物着工面積比率 (調査地域/全国)}) \quad (5.15)$$

ばい煙発生装置については、代表的な燃料の種類別の窒素酸化物と炭化水素の排出係数比に NO_x の排出量に乗じて求めた。

$$(\text{NO}_x \text{ 排出量}) \times (\text{排出係数比 (HC/NO}_x\text{)}) \quad (5.16)$$

自動車については、自動車の種類、速度別の排出係数を予め算出し、この排出係数に幹線道路および細道路の走行量に乗じて求めた。

植物起源については、森林および水田面積に排出係数に乗じて求めた。森林および水田の排出係数は、それぞれ $3231.3[\mu\text{g}/\text{m}^2\text{hr}]$, $510.0[\mu\text{g}/\text{m}^2\text{hr}]^{5-11}$ とした。

表 5. 5 炭化水素排出量原単位

発生過程 業 種	貯蔵	出荷	製造	塗装	印刷	金属等 表面処理	クリーニング	接着剤その 他の溶剤使 用過程等	
食料品、た/千億円・年	0.23	0.21	7.51	0.01	0.00	0.00	0.00	6.59	品目別工業製造品年間出荷額
繊維工業	0.06	0.00	0.00	4.32	91.17	0.00	0.00	2.52	"
木材・木製	0.00	0.00	0.00	219.04	0.00	0.00	0.00	16.44	"
家具・装備	0.00	0.00	0.00	55.94	0.00	0.00	0.00	0.05	"
パルプ・紙	0.23	0.00	0.00	145.51	131.29	0.56	0.00	33.96	"
出版・印刷	1.10	0.00	0.00	0.08	1,218.98	0.00	0.00	7.44	"
化学工業	12.02	9.17	233.58	32.04	0.42	0.09	0.00	13.49	"
石油製品・	45.16	70.25	1.16	6.92	0.00	0.00	0.00	0.00	"
ゴム製品製	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	50.81	"
なめし皮・	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	"
窯業・土石	0.05	0.00	0.00	0.59	0.03	1.87	0.00	0.96	"
鉄鋼業	0.26	0.00	0.00	229.70	0.00	4.74	0.00	14.42	"
非鉄金属製	0.00	0.00	0.00	18.01	0.13	40.89	0.00	5.44	"
金属製品製	0.12	0.00	0.00	872.79	2.57	61.79	0.00	0.47	"
一般機械器	0.35	0.00	0.00	86.15	0.00	20.79	0.00	0.29	"
電気機械器	0.14	0.00	0.00	7.39	0.20	37.66	0.00	16.78	"
輸送用機械	0.00	0.00	0.00	330.42	0.01	37.18	0.00	1.85	"
精密機械器	0.00	0.00	0.00	29.44	0.00	48.04	0.00	0.10	"
その他の製	0.07	0.00	0.23	68.11	8.77	21.77	0.00	12.26	"
電気業	/百万kWh・年	0.00	0.00	1.60	0.00	0.00	0.00	0.00	発電電力量
ガス業	/百万t・年	2.36	0.00	3.67	0.00	0.00	0.00	0.00	都市ガス製造供給量+民生用LPG使用量
洗濯・理容	/百万人・年	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	829.08	0.00	人口
自動車整備	/百万台・年	0.00	0.00	1,311.74	0.00	0.00	0.00	0.00	自動車+軽自動車+小型二輪車保有台数
その他	/百万人・年	21.88	130.31	3.70	0.30	3.78	0.00	3.03	人口

表 5.6 HC の発生源別の排出量

発生源	発生量	割合
	[ton/year]	[%]
(1) 貯蔵	1822	0.9
(2) 出荷	3628	1.9
(3) 給油	11931	6.1
(4) 製造	8516	4.4
(5) 塗装	60150	30.9
(6) 建築塗装	35399	18.2
(7) 印刷	24325	12.5
(8) 金属等表面処理	6659	3.4
(9) クリーニング	10859	5.6
(10) 接着剤その他の溶剤使用過程等	3232	1.7
(11) ばい煙発生施設	1651	0.8
(12) 自動車	26541	13.6
合計	194717	100.0

3) 排出量

推定した種類別の炭化水素排出量を表 5.6 に示す。人工発生源の炭化水素排出量は、塗装・建築塗装、自動車、給油の 4 つの排出源で全体の約 75% を占めている。自然発生量は、兵庫県下だけでも 167000[ton/year] となり、ほぼ人工発生量と同じ排出量である。計算領域での人工排出量マップを図 5.9 に、自然排出量マップを図 5.10 に示す。

以上のように推定した炭化水素を各排出源ごとの種類別構成比⁵⁻¹⁰⁾(表 5.7) を用いて一般化学種に配分し、それをさらに CBM-IV 用化学種(表 5.8) に配分して⁵⁻¹²⁾、大気汚染濃度シミュレーションの入力データとした。

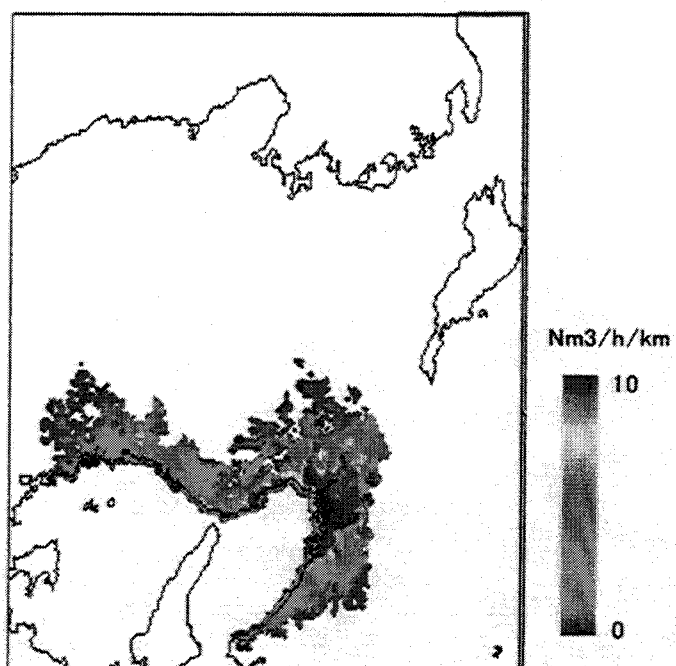


図 5.9 HC の人工排出量マップ

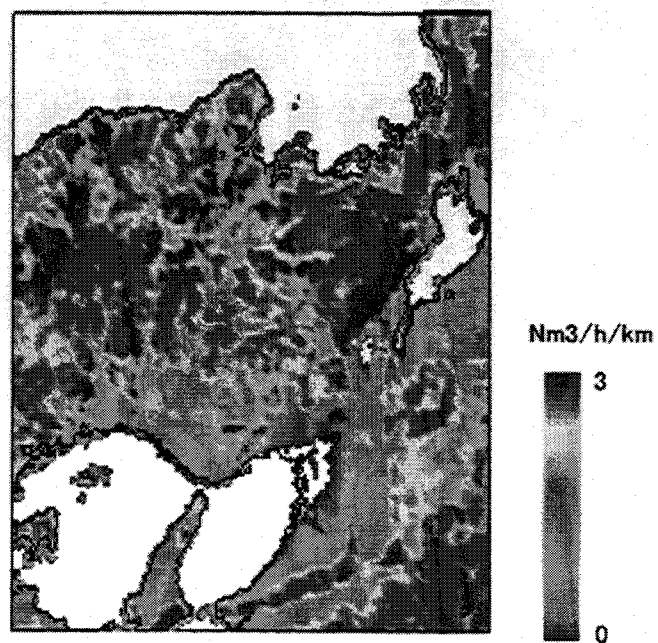


図 5.10 HC の自然排出量マップ

表5. 7 H C排出量の一般化学種への配分比率 (重量比)

	エタン	エチレン	アセチレン	プロパン	プロピレン	i-ブタン	n-ブタン	i-ペンタン	n-ペンタン	2-M・ペンタン	3-M・ペンタン	n-ヘキサン	ベンゼン	トルエン	E・ベンゼン	p・mキシレン	o・キシレン	アセトン	スチレン	エーテル	メチルエチルケトン	クロルベンゾール	ピリジン	二酸化エチレン	塩化メチレン	四塩化炭素	テトラクロルエチレン	1・1・1トリクロルエタン	トリクロルエチレン	モノテルペン	αピネン	インブレン	
	貯蔵、出荷	0.0	0.0	0.0	1.8	0.0	15.2	19.1	35.7	13.1	6.3	3.1	3.2	0.9	1.0	0.1	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	99.9
	給油	3.0	2.9	1.6	20.3	2.8	6.7	16.1	14.4	6.9	3.7	2.1	5.0	4.3	7.1	1.0	1.3	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.1
	溶剤使用	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	25.7	32.6	30.3	11.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.1
	排気ガス	3.1	12.0	5.5	6.1	5.5	4.6	15.1	10.4	6.0	3.8	2.3	4.4	5.6	10.5	1.6	2.4	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.1
植物起源	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.3	12.6	44.1	71.0
水田	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	25.0	25.0	20.0	70.0

表 5. 8 一般化学種のモデル用化学種への配分比率 (mol 比)

[illegible]

表 5.9 船舶の排出高さ

煙突高さ	排ガス量	排ガス温度
[m]	[Nm ³ /hour]	[°C]
10	348	300
20	1025	300
30	2966	300

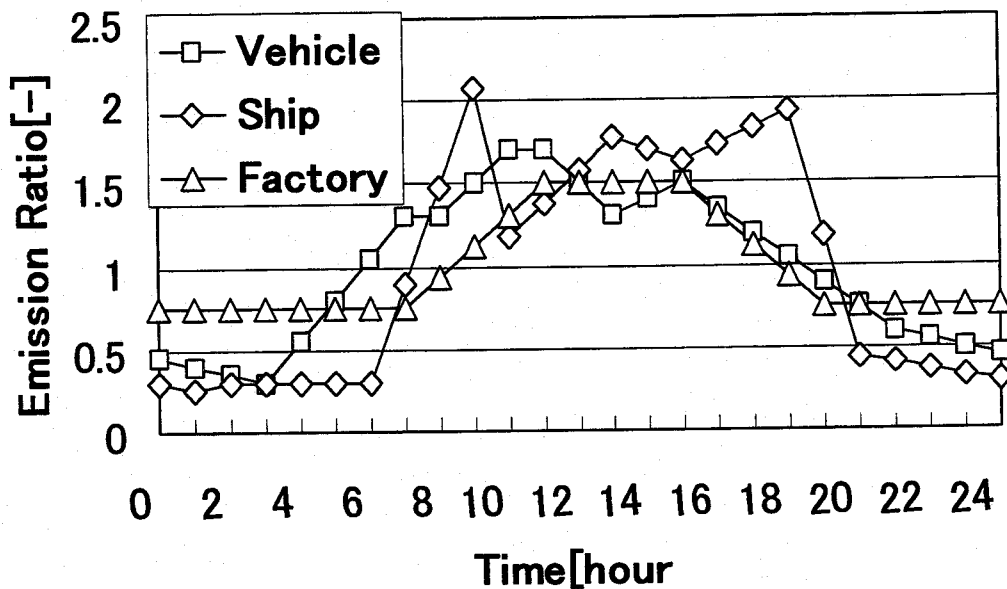


図 5.11 排出量の日変動パターン

5.4.3 有効煙突高の算出

工場・事業所および船舶からの排出は高所排出源として扱った。有効煙突高の計算は窒素酸化物総量規制マニュアル⁵⁻⁹⁾に準拠し、有風時は CONCAWE 式を、無風時は Briggs と CONCAWE 式の重み平均により算出した。船舶については明石海峡通過船のデータを基に、煙突高、排煙量を 3 つに代表させて (表 5.9) 有効煙突高を計算した。

5.4.4 排出量の日変動パターン

幹線道路と細道路については、阪神地区の幹線道路数ヶ所の時刻別交通量データを基に変動パターンを作成した。船舶 (バース) については、大阪港、堺泉北港における入出港の時刻別船舶数データ⁵⁻¹³⁾を基に変動パターンを作成した。船舶 (航路) については、明石海峡・友ヶ島海峡の通過船舶数データ⁵⁻¹³⁾を基に変動パターンを求めたが、時間変動が小さいのでシミュレーションでは簡単に 24 時間一定排出とした。工場・事業所と群小発生源については、日中に多く夜間に減少するように与えた。この結果を図 5.11 に示す。縦軸の排出量比は、1 日の平均排出量に対する割合を示している。炭化水素発生源の建築塗装およびクリーニングは日中 (8 時から 17 時) のみの排出とした。給油と自動車は、幹線道路と細

道路と同様の変動パターンとした。貯蔵については24時間一定排出とした。植物起源については、日射量や光合成により日変動を生じるので、日射量に比例する変動パターンを仮定した。炭化水素発生源の他の排出源については、工場・事業所と同じ変動パターンを与えた。

5.5 観測データとの比較

風速・風向およびNO, NO₂, O₃, SO₂濃度の計算値は、図5.1中に示すA~Fの大気常時観測所のデータと比較を行う。

5.5.1 流れ場の計算結果

大気汚染濃度の再現計算をするには、4.4節で用いたFDDAを使って実際に近い流れ場を再現して、大気汚染濃度の計算に用いる方が濃度計算の再現性は良くなる。しかし、予報に用いようとする場合には、流れ場も数値計算で予測する必要がある。その総合的な結果として、大気汚染濃度が正しく予測出来るかを検討しなければならない。ここでは、この考えに基づいてFDDAを用いずに、流れ場の計算を行った。その2時間置きの高さ $z^* = 12\text{m}$ の流れ場を、図5.12に示す。

5.5.2 流れ場の計算値と観測値との比較

A~Fの6地点の観測値と計算で求めた風速ベクトルの時系列変化を図5.13に示す。地点A, B, C, Dでは計算値の海風への転換が9時頃に起こるのに対し、観測値では13時頃と遅い。また地点A, Bでは観測値の陸風への転換は計算値に比べて早く、風速も計算値に比べるとかなり大きい。地点E, Fについては、観測値と計算値は概ね良く一致している。

次に、鵜野ら⁵⁻¹⁴⁾が近畿地域の局地風に対してモデルの定量的評価に用いた次式の一致性インデックス d を用いて、モデル計算の評価を行った。

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (V_{cal} - V_{obs})^2}{\sum_{i=1}^n (|V'_{cal}| + |V'_{obs}|)^2} \quad (5.17)$$

ここで、 n は観測点数、 V_{cal}, V_{obs} はモデル計算値と観測値、 $V'_{cal} = V_{cal} - \bar{V}_{obs}$ 、 $V'_{obs} = V_{obs} - \bar{V}_{obs}$ 、 \bar{V}_{obs} は観測の平均値である。計算値と観測値が完全に一致した場合には $d = 1$ となり、ずれが大きくなるほど $d = 0$ に近づく。6地点の8時から19時までの日中の d の平均値は約0.43、1時から7時および20時から24時の夜間の d の平均値は約0.15となり、夜間に計算値と観測値のずれが大きくなった。

以上のように計算値と観測値の差は、シノプティックな流れ場を0と設定して計算を行ったことが原因として考えられ、数少ない高層気象観測データから適切なシノプティックの場を推定し、モデルにその条件を取り込むことが今後必要である。

5.5.3 大気汚染濃度の計算値と観測値との比較

A~Fの常時観測6地点の観測値と計算で求めたNO₂, NO, O₃, SO₂濃度の時系列変化を図5.14, 図5.15, 図5.16, 図5.17に示す。図中の■が観測値を表し、実線(Run1)が計算

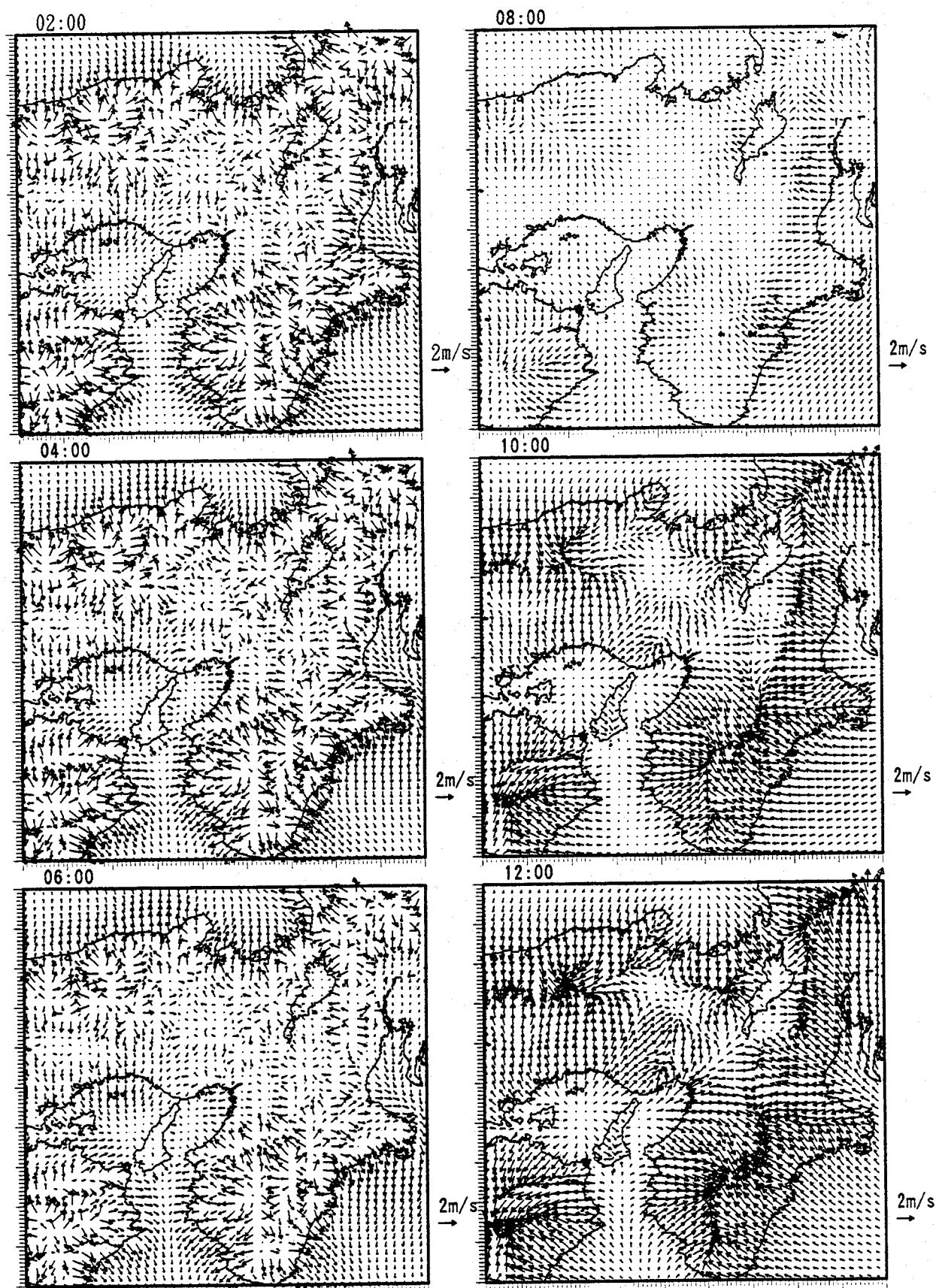


図 5.12 流れ場の計算結果

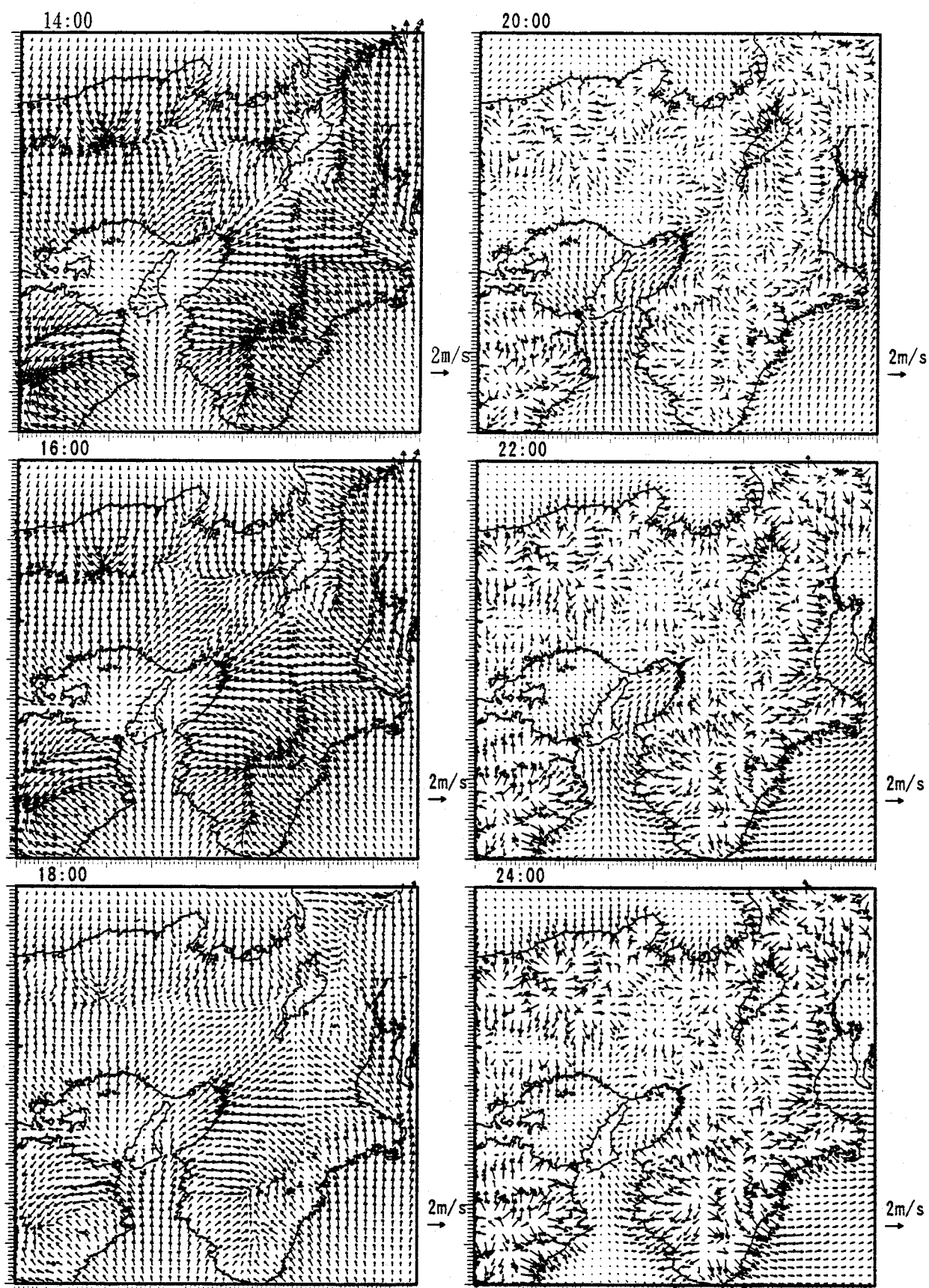


図 5.12 流れ場の計算結果 (続き)

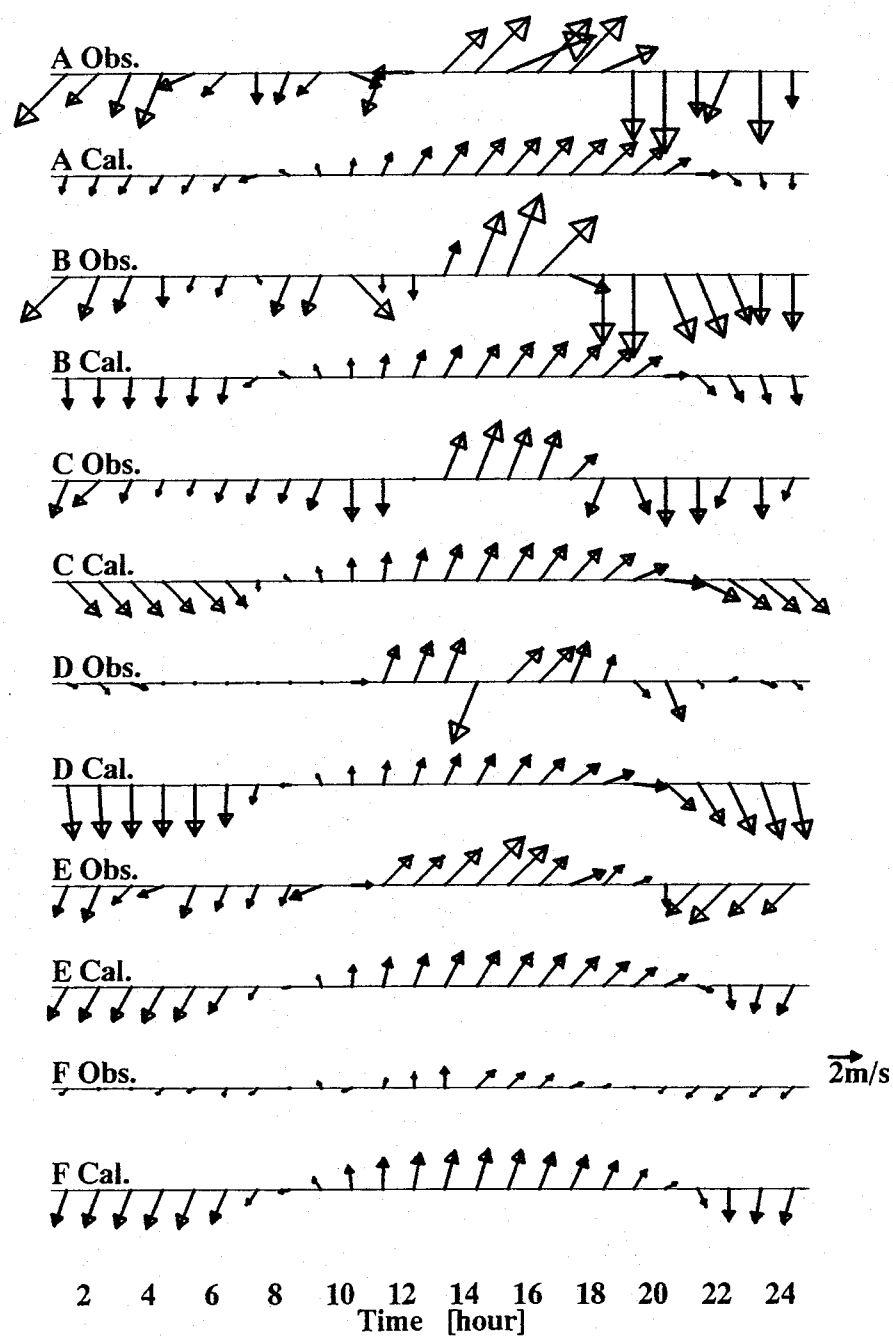


図 5.13 観測値と計算で求めた風速ベクトルの時系列変化

値を表している。また図中の細線 (Run2) は、船舶からの排出量を 0 と仮定した計算結果である。これについては、次節で述べる。

SO₂濃度について、計算値と観測値はほぼ一致している。ただし、地点 A, B では観測値の陸風への転換時間が早いため、18 時前後で計算値が観測値に比べて高い値になっている。地点 A, B, C で、計算では 9 時頃から海風へ転換するのに対し、観測では 13 時と遅いため、6 時から 12 時頃にかけて NO 濃度の計算値は観測値に比べて高くなっている。このため NO から NO₂ への酸化反応に O₃ が多く消費され、光化学反応によって生成される正味の O₃ は減少し、15 時頃の観測値の O₃ 濃度ピークが計算で再現されなかったと考えられる。また地点 A, B の NO₂ 濃度が、18 時前後に計算値が観測値に比べて高い値になっているのは、先に述べたように計算の陸風への転換が遅いためである。地点 D, E, F で、NO, O₃ 濃度の計算値と観測値の時系列変化は、ほぼ一致している。地点 E, F の 0 時から 12 時まで NO₂ 濃度の観測値が計算値に比べて高いのは、観測値の陸風が弱いためと考えられる。また、地点 D で 8 時頃から 18 時頃まで NO₂ 濃度の観測値が非常に高い値を示しているが、明確な原因は不明である。

次に、光化学オキシダントシミュレーションモデルの現況再現性能を評価する米国 EPA の評価指標を用いて、本計算の現況再現性を評価する。評価指標は、O₃ 濃度エラー (NGE : Normalized Gross Error), バイアス (NGB : Normalized Gross Bias) および最高値予測精度 (HPA : unpaired Highest-prediction Accuracy) の 3 つであり、それぞれに目標値が設定されている⁵⁻¹⁵⁾。

$$NGE = \frac{1}{n+H} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^H \frac{|C_{obs} - C_{cal}|}{C_{obs}} = 0.30 \sim 0.35 \quad (5.18)$$

$$NGB = \frac{1}{n+H} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^H \frac{C_{obs} - C_{cal}}{C_{obs}} = \pm(0.05 \sim 0.15) \quad (5.19)$$

$$HPA = \frac{C_{obs,max} - C_{cal,max}}{C_{obs,max}} = \pm(0.15 \sim 0.20) \quad (5.20)$$

ここで、 C_{obs} , C_{cal} は観測値と計算値、 $C_{obs,max}$, $C_{cal,max}$ は全観測点 n 、全時間 H における観測と計算の最高濃度を表す。NGE と NGB の計算では、観測値が 60ppb 以上である時のみを対象とした。6 地点を対象に計算を行った結果、NGE=0.398, NGB=0.386, HPA=0.468 となった。NGB と HPA の計算値が EPA 目標値より大きな値となったのは、15 時の O₃ 濃度の空間分布を示す図 5.18 からわかるように、O₃ 濃度の高濃度域が海岸付近からかなり内陸に入って地域に出現し、評価対象とした神戸より東の海岸付近で O₃ 濃度が低く計算されたことによる。これは、計算値の海風への転換が観測値に比べて早いため、臨海地域からの汚染物質が内陸へ輸送されたことが原因と考えられる。

以上のように、モデル計算で O₃ 濃度の現状再現を完全に行うことは出来なかったが、(1) 計算対象日の流れ場の再現が不十分、(2) 排出量推定の誤差、(3) 光化学反応等のモデルの不正確さ、(4) 観測データの地域代表性、等がその理由として考えられ、今後検討していく必要がある。

参考に、NO₂, NO, O₃, SO₂ 濃度の 4 時間毎の空間分布を、図 5.19, 図 5.20, 図 5.21, 図 5.22 に示す。

5.6 船舶からの排出影響

船舶からの排出量が陸域の大気汚染濃度に与える寄与率を調べるために船舶からの排出量を 0 と仮定して計算を行った。その結果を図 5.14, 図 5.15, 図 5.16, 図 5.17 の細線で

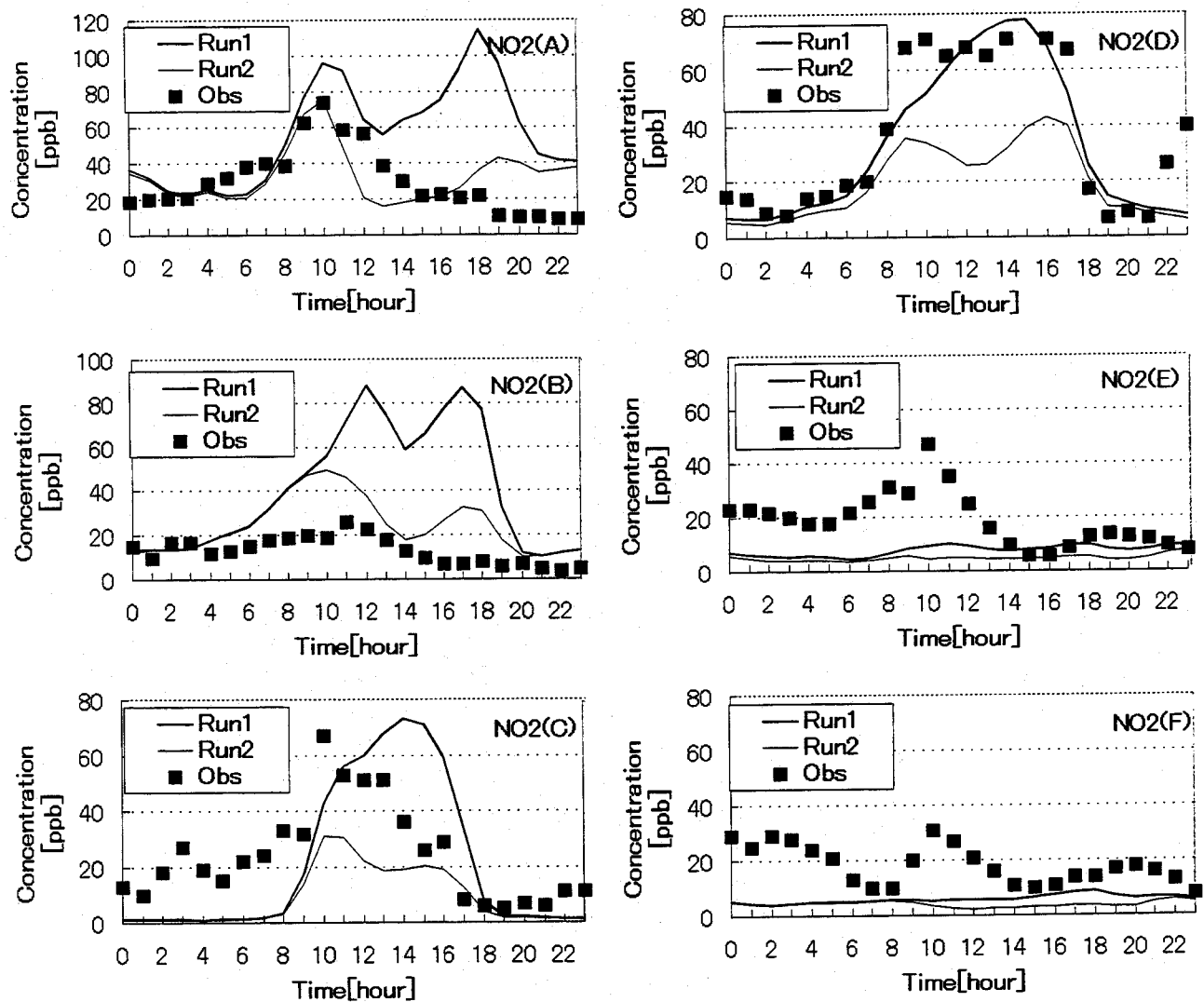


図 5.14 観測値と計算で求めた NO₂濃度の時系列変化

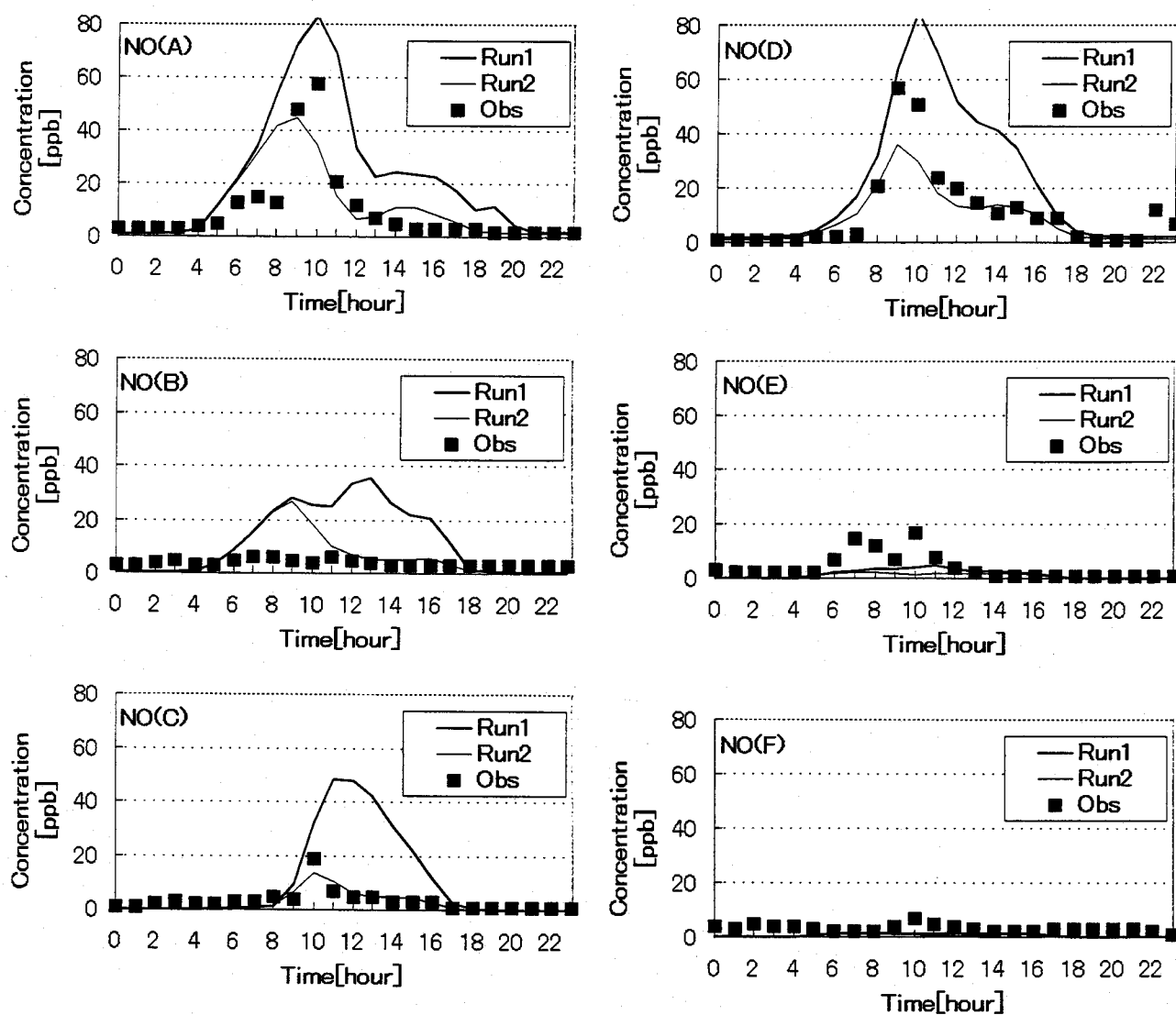
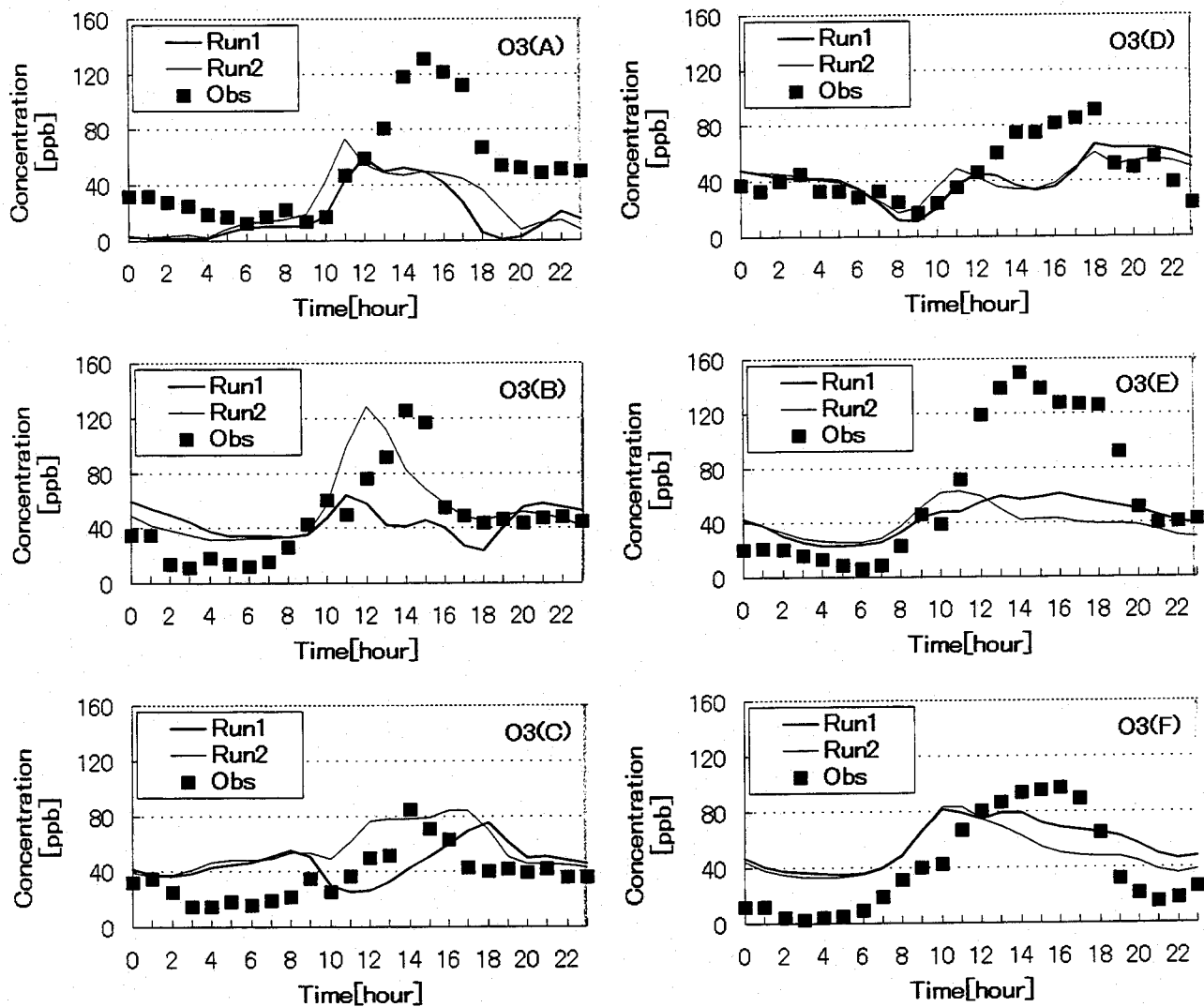
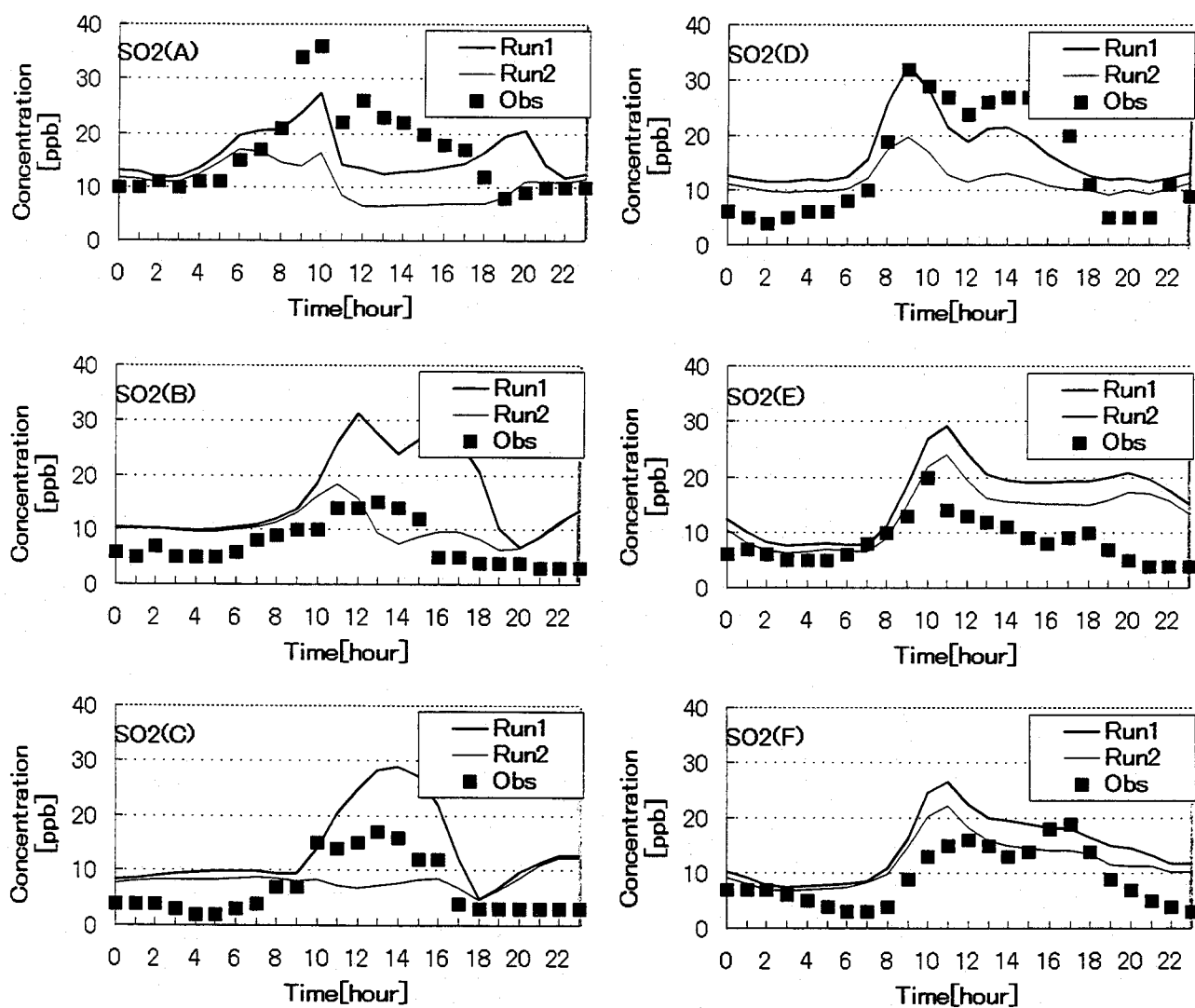
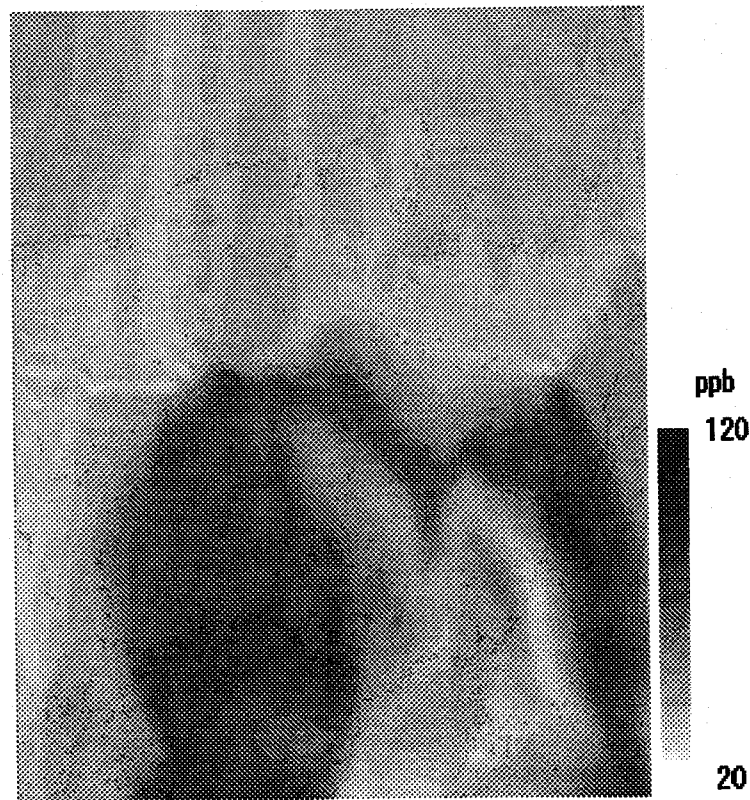


図 5.15 観測値と計算で求めた NO 濃度の時系列変化

図 5.16 観測値と計算で求めた O₃濃度の時系列変化

図 5.17 観測値と計算で求めた SO_2 濃度の時系列変化

図 5.18 15 時の O_3 濃度の空間分布

示す。海風が吹く日中に船舶からの汚染物質が陸域に輸送されるために、Run2 に比べて Run1 の NO , NO_2 , SO_2 濃度は高くなっている様子がわかる。東京湾で行われた船舶寄与率の計算式⁵⁻²⁾を参考に、6つの常時観測点の船舶からの寄与率を次式で与えて評価を行った。

$$\text{船舶寄与率} = \frac{\text{船舶からの排出による寄与濃度の日平均値}}{\text{船舶からの排出量を含めた計算濃度の日平均値}} \quad (5.21)$$

ここで、船舶からの排出による寄与濃度は、船舶からの排出量を含めて計算した濃度から、船舶からの排出量を0と仮定して計算した濃度を引いた値である。その結果、場所によって船舶寄与率は異なるが、 SO_2 で約15~30%、 NO_2 で約30~50%となった。東京湾を対象にプルームモデルで計算された沿岸から1km内の船舶寄与率は、 SO_2 で、11~49%、 NO_2 で約4~11%と示されている。この結果と本計算のような特定の1日の寄与率と単純には比較できないが、 SO_2 については大阪湾の船舶寄与率は東京湾の船舶寄与率と同等となった。 NO_2 については大阪湾の船舶寄与率が非常に大きな値となった。これは、大阪湾の窒素酸化物の排出量が東京湾に比べて大きいことが原因と考えられる。

次に、船舶からの排出量が陸域濃度に及ぼす影響を調べるために、高さ $z^*=20\text{m}$ での Run1 の濃度値から Run2 の濃度値を引いた濃度を求めた。この結果の NO_2 と NO の空間分布を図 5.23、図 5.24 に示す。この値が船舶排出による陸域濃度の寄与分と考えられる。8時から12時までは、船舶による高濃度上昇域が船舶からの排出量が集中している阪神沿岸域に限定されている様子がわかる。その後、海風の発達とともに NO_2 の濃度上昇域は内陸へと進行し、16時には15ppbを越える上昇域が内陸40kmまで達し、18時にはさらに内陸へと移動している。しかし神戸市および六甲山近傍では、顕著な濃度上昇域が見られ

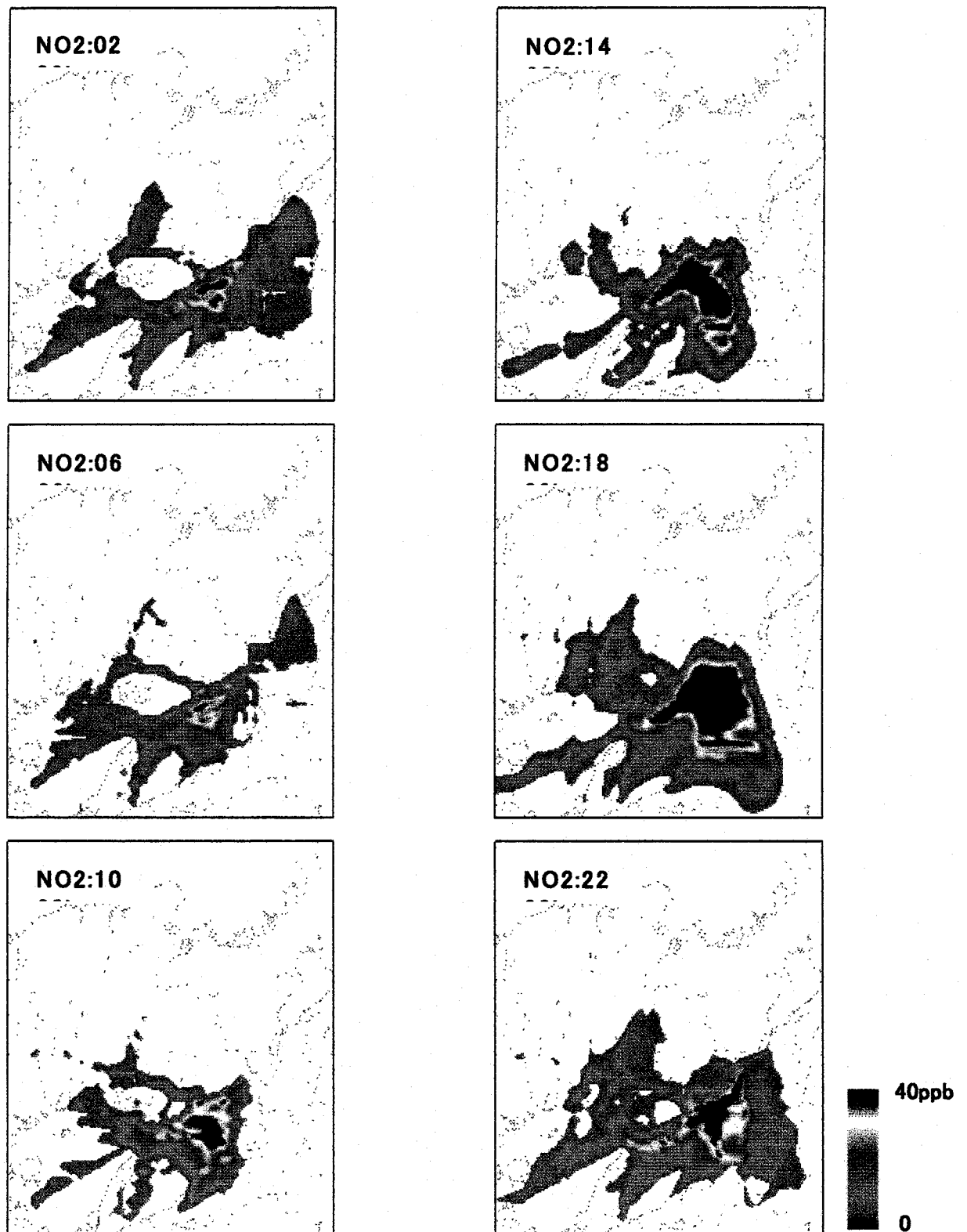


図 5.19 NO₂濃度の空間分布

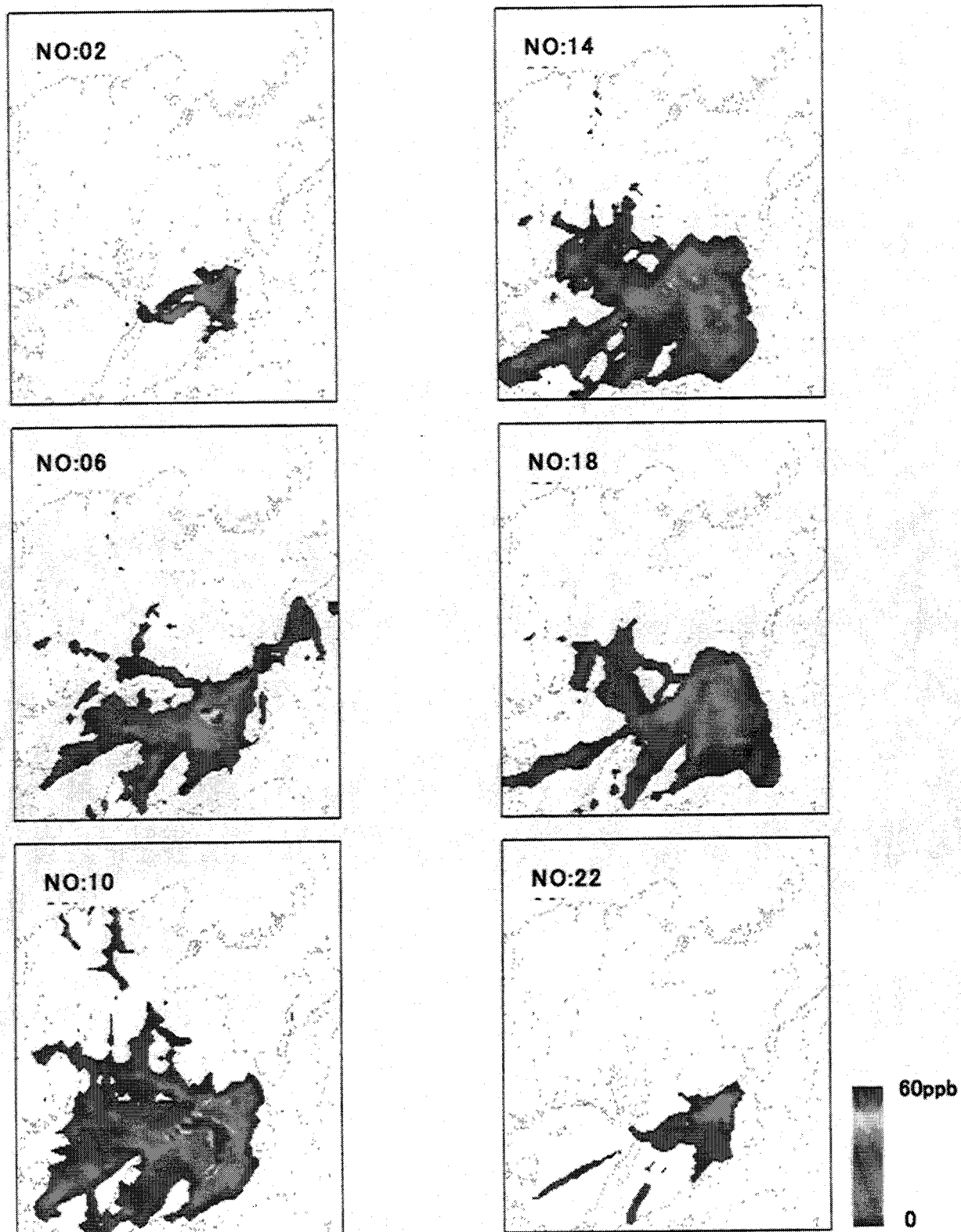


図 5.20 NO 濃度の空間分布

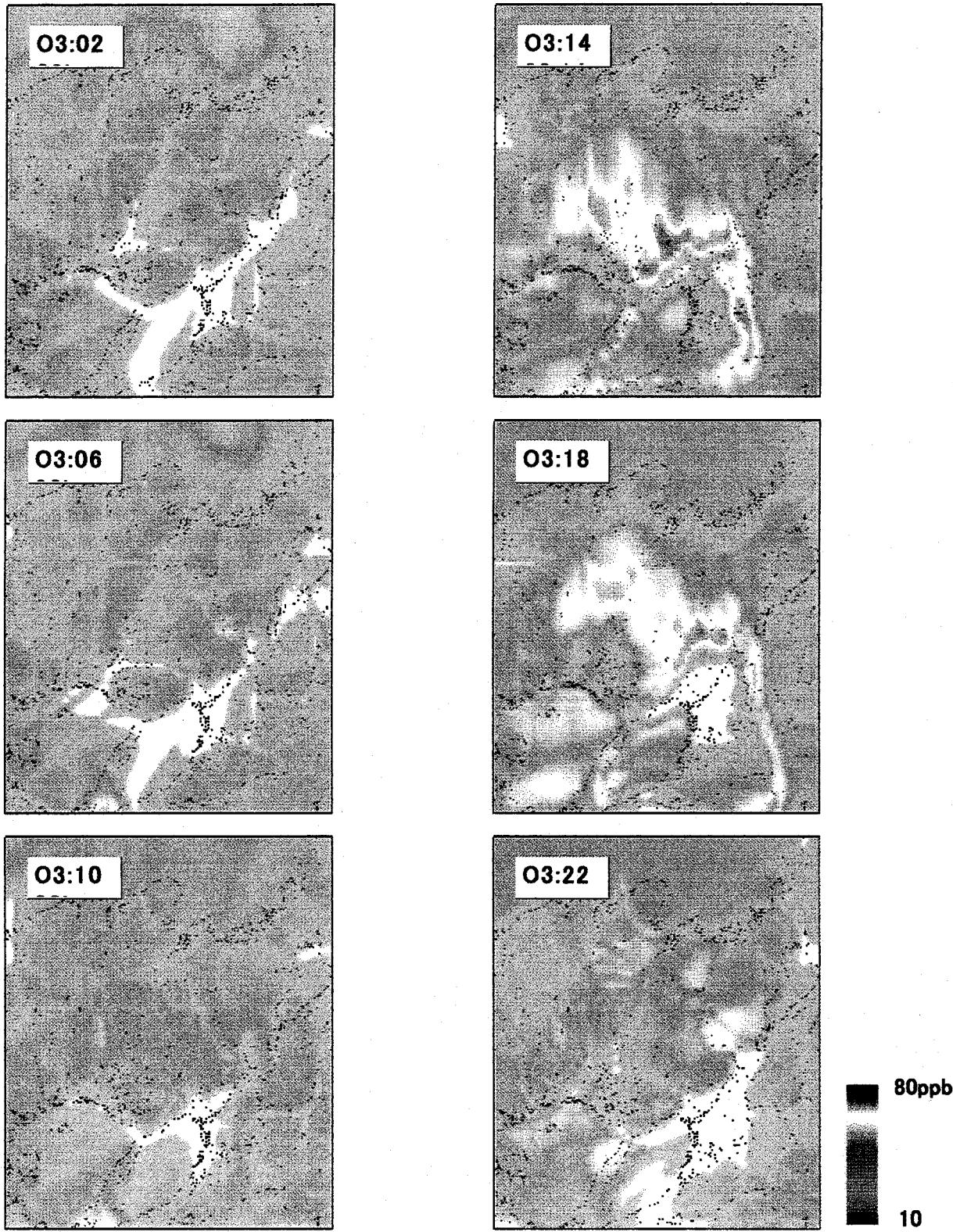


図 5.21 O_3 濃度の空間分布

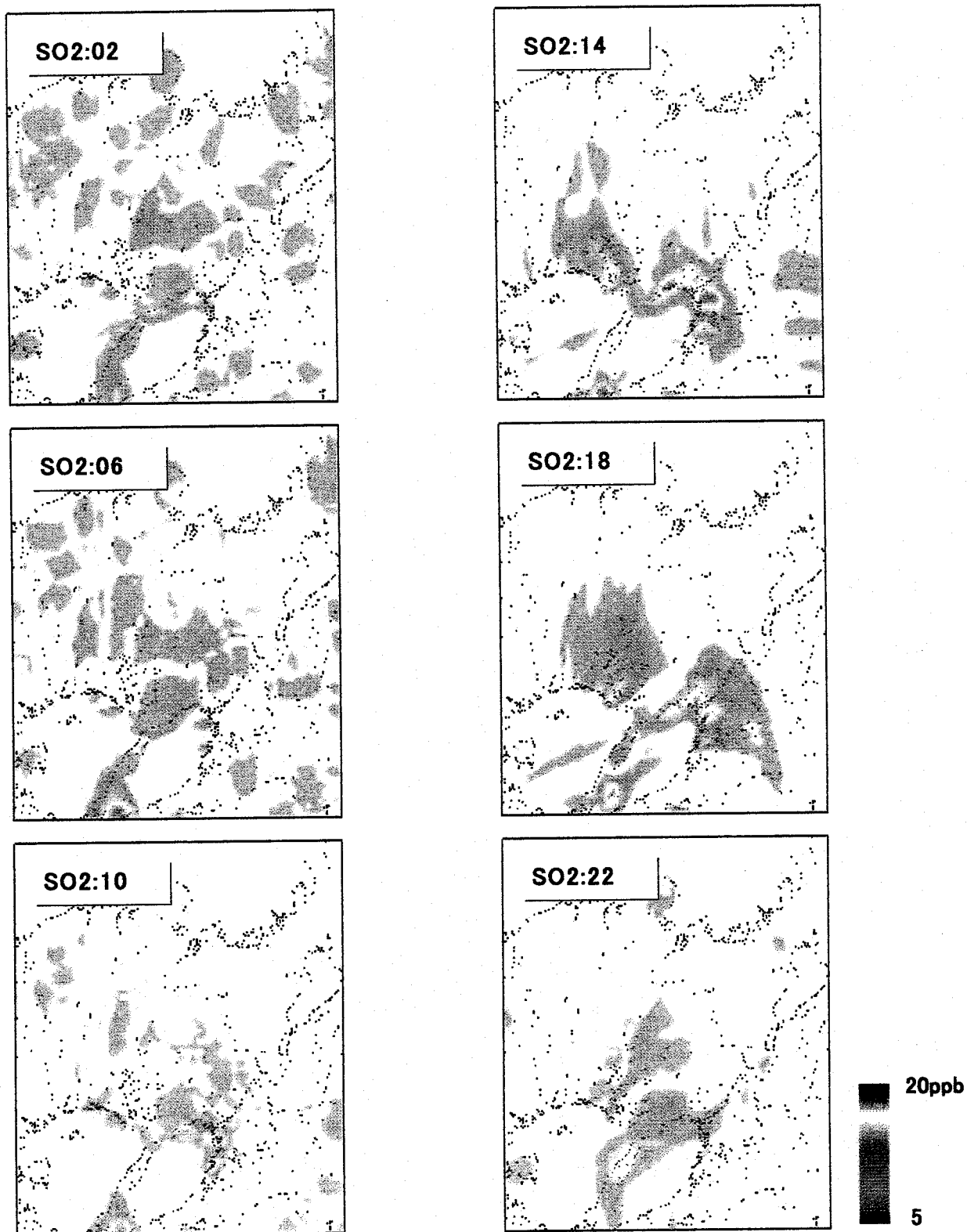


図 5.22 SO₂濃度の空間分布

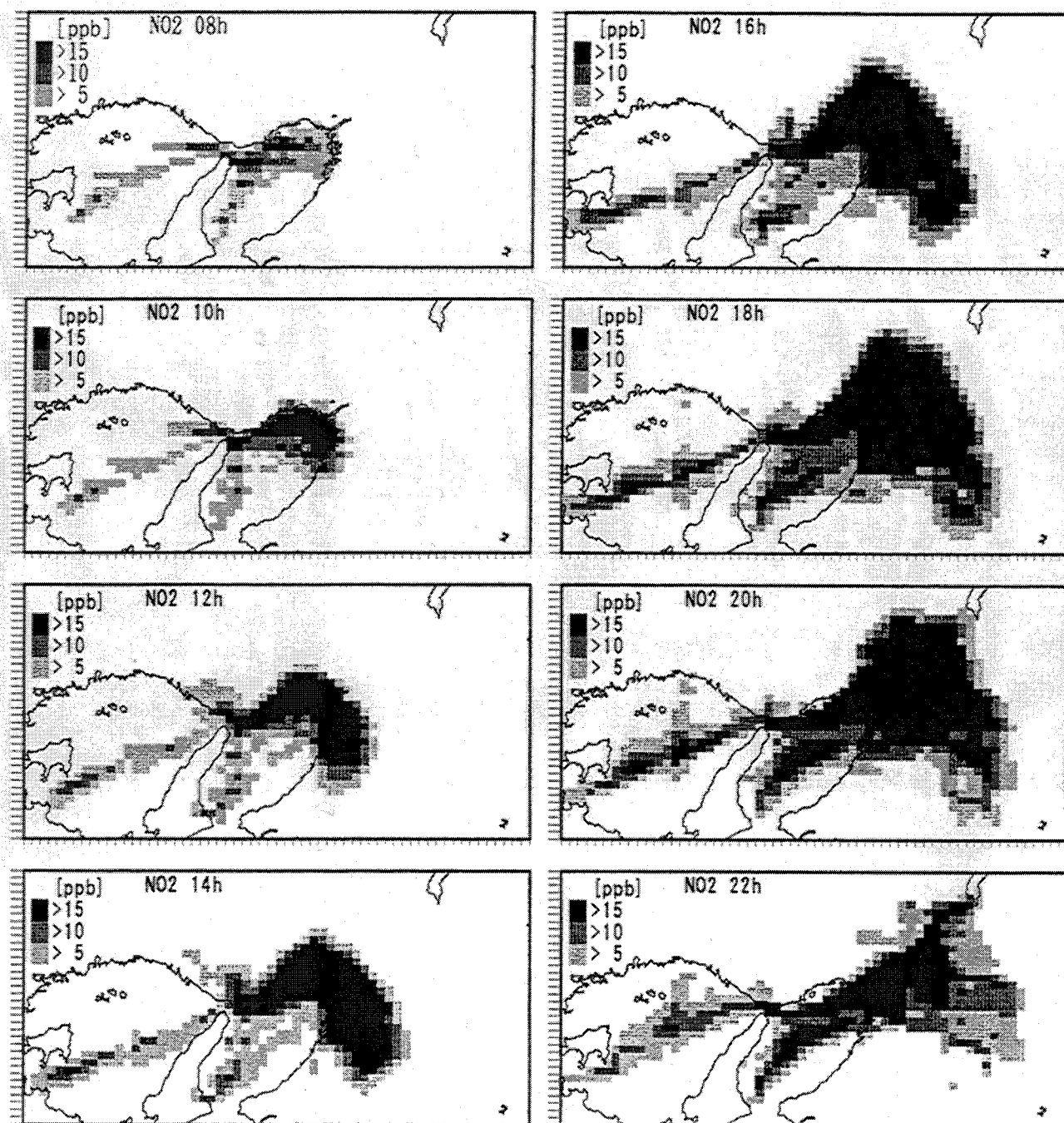


図 5.23 船舶排出の NO_2 濃度への寄与

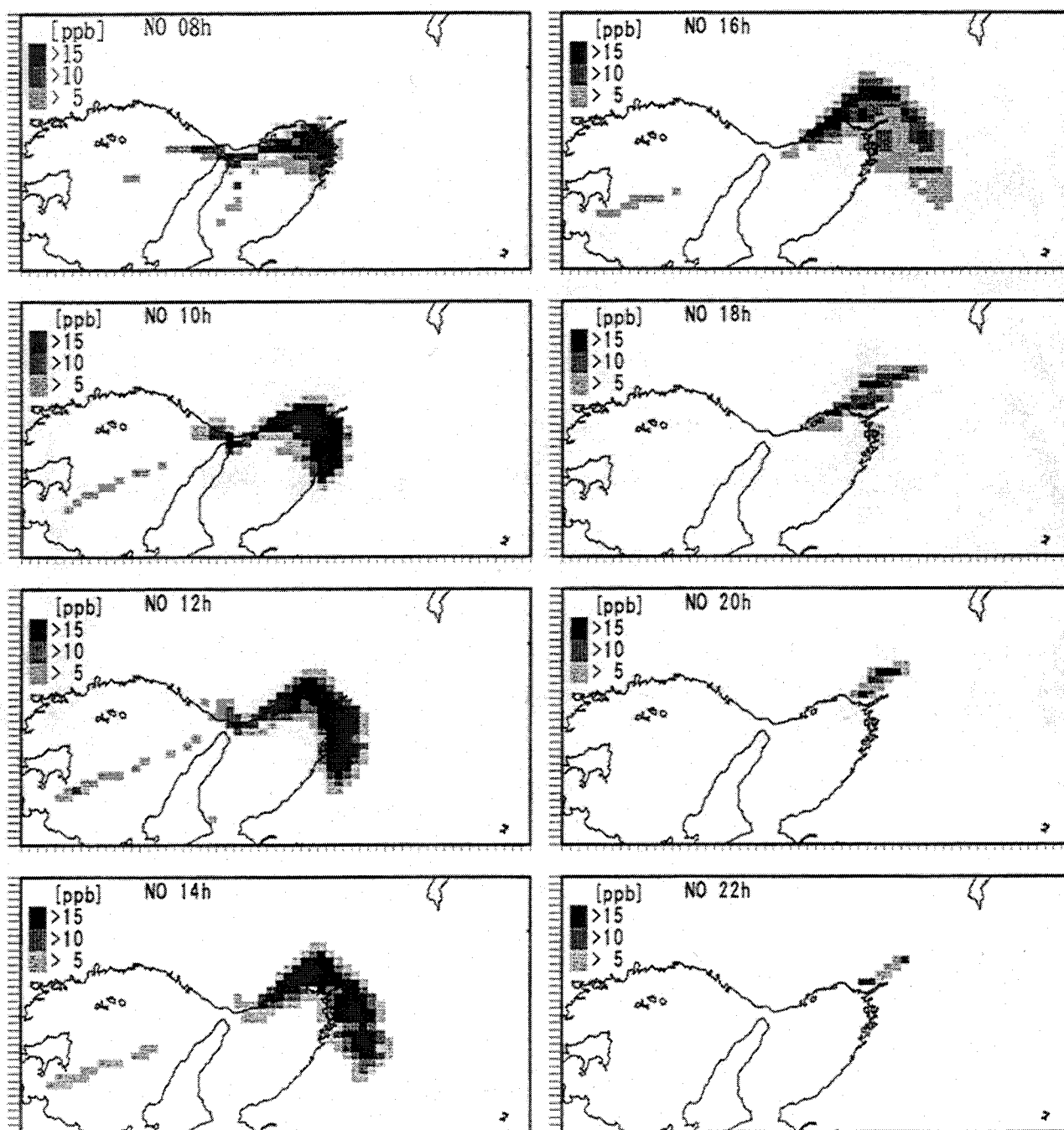


図 5.24 船舶排出の NO 濃度への寄与

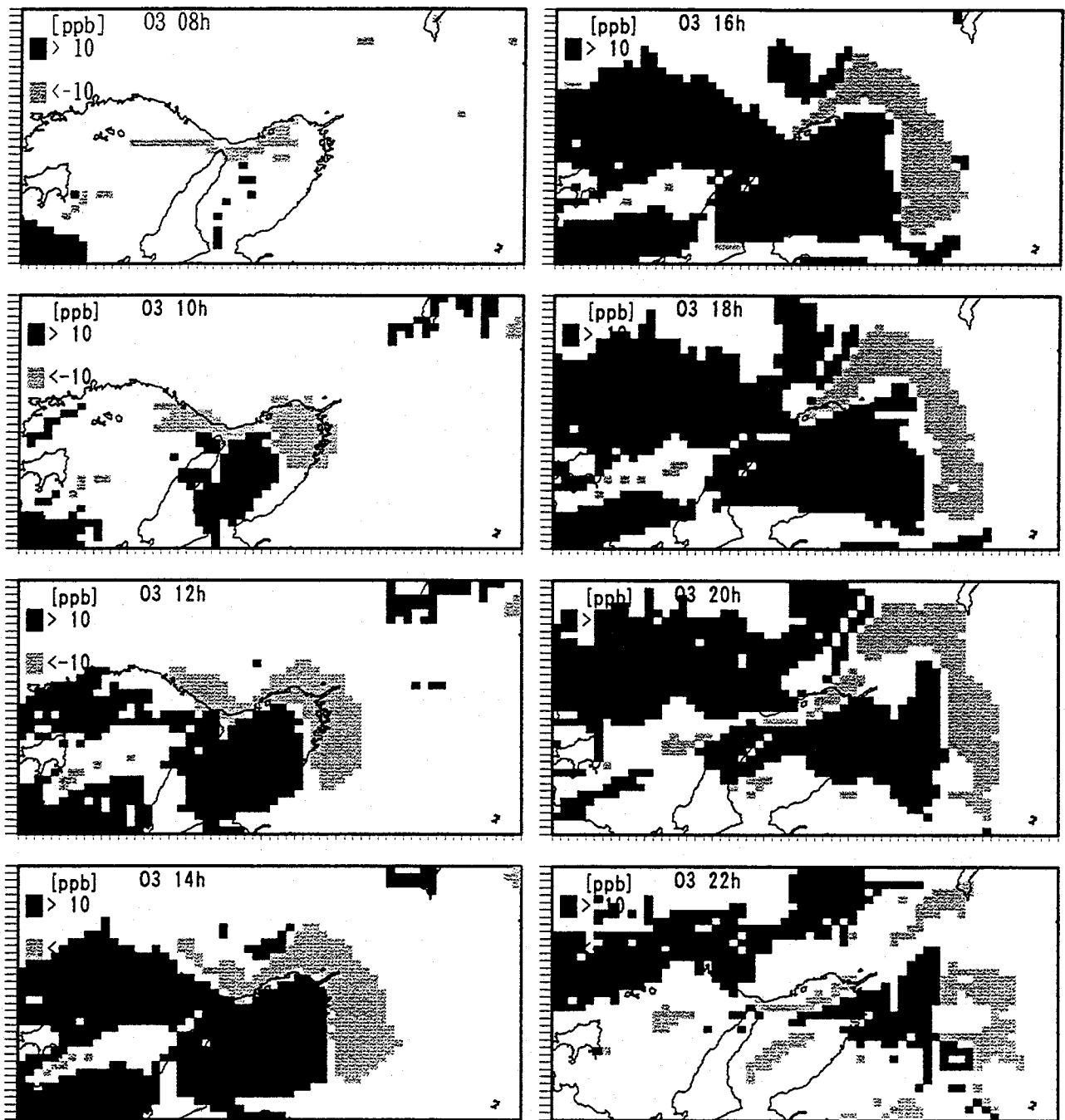


図 5.25 船舶排出の O_3 濃度への寄与

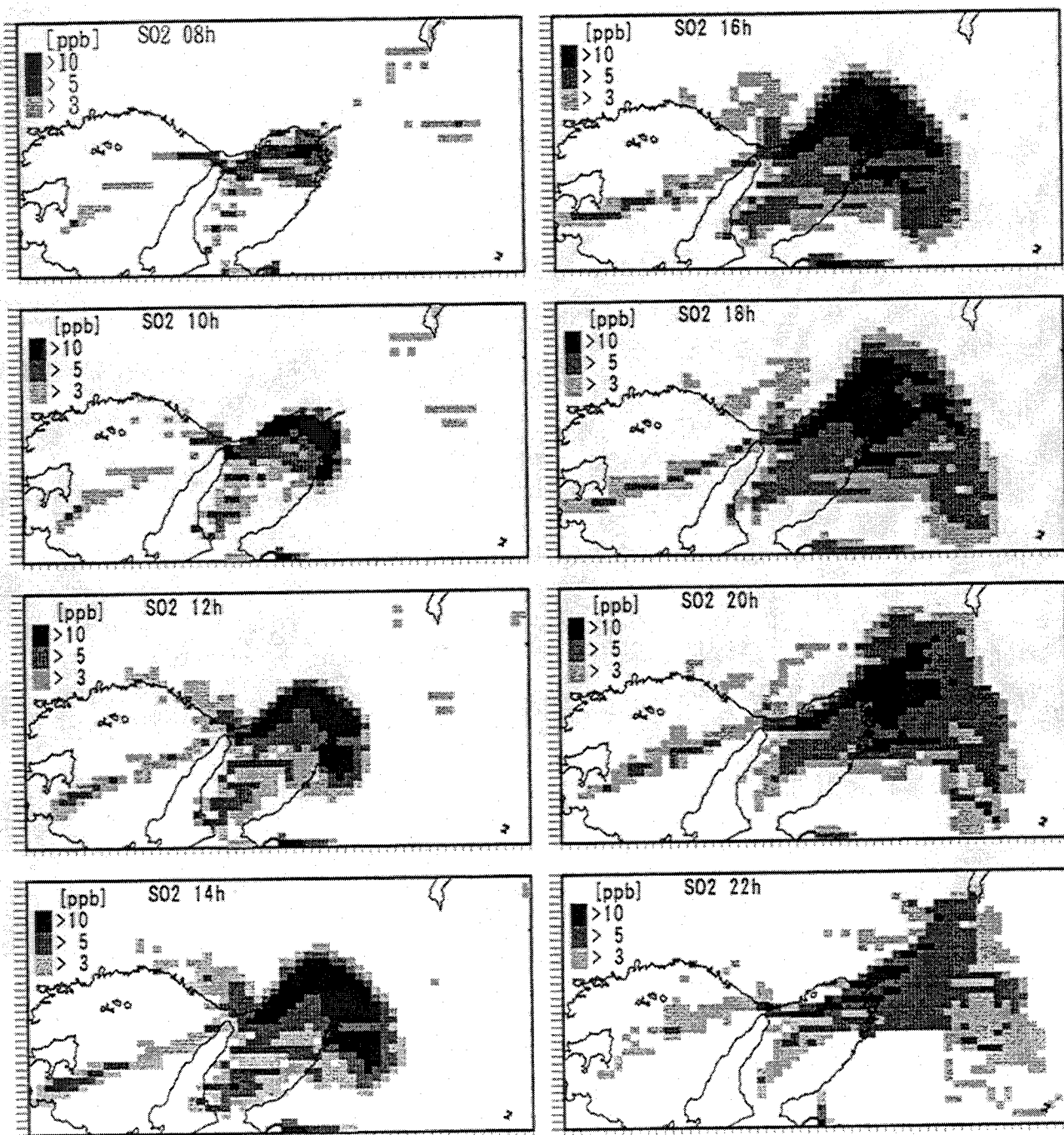


図 5.26 船舶排出の SO₂ 濃度への寄与

ない。これは、シミュレーションで得られたこの地域の風向が南西風であったことに起因する。一方、NOの濃度上昇域は内陸へと進行はするものの、NO₂に比べると濃度の上昇はそれほど大きくなく、18時になると濃度上昇域ほとんどなくなっている。同様に、Run1の濃度値からRun2の濃度値を引いたO₃の空間分布を図5.25に示す。16時と18時のO₃の濃度減少域とNO₂の濃度上昇域とほぼ一致している。この時間帯では、太陽放射が弱くなり光化学反応が活発に行われなくなるため、日中高濃度となったO₃とNOの化学反応による正味のNO₂生成量が増加し、内陸でNO₂濃度上昇域が形成されたと推測できる。

また、阪神地域は船舶からのNO_x排出量が非常に多いため、O₃濃度は減少するが、逆に播磨地域では、O₃濃度は増加する。この結果からも推測出来るように、O₃濃度を減少させるためには、単純にNO_x排出量を減らせば良いわけでない。さらに炭化水素排出量も関係しており、O₃濃度を減少のためには、NO_x排出量と炭化水素排出量を総合的に減少させることが不可欠である。

図5.26にSO₂の濃度上昇域の空間分布を示す。SO₂の濃度上昇域の空間・時間変動のパターンはNO₂とほぼ同じであるが、NO₂に比べると16時以降の内陸の濃度上昇は小さい。

以上、このシミュレーション結果から、海陸風が発達する日には船舶からの陸域濃度の寄与は沿岸部だけでなく、陸域内部まで及んでいることが示された。

5.7 結言

メソスケール予測モデルと短期の高濃度大気汚染が予測できる光化学反応を含む大気汚染濃度予測モデルを用いて、大阪湾沿岸域を対象に高濃度光化学オキシダントが観測された日について、船舶からの排出が陸域大気濃度に与える影響を検討した。まず、大阪府、兵庫県および海上からの大阪湾岸域を対象にSO_x、NO_x、HCの排出量を算定した結果、SO_x、NO_xの船舶からの排出量は、全排出量の約30%を占めており、特にNO_xの排出量が多いことが示された。次に、この推定した排出量を入力データとして、高濃度光化学オキシダントが観測された日を対象にシミュレーションを実施し、観測値との比較を行った。排出量データの推定誤差や流れ場再現の不十分さを考慮すると、計算値と観測値は、ほぼ良好な一致を示した。最後に、船舶からの排出量を0と仮定して計算を行い、船舶からの排出が陸域濃度に及ぼす寄与を調べた。船舶からの排出による陸域濃度上昇域は、12時までは船舶からの排出量が集中している阪神沿岸域に限定されてるが、海風が発達とともにSO₂、NO₂の濃度上昇域は内陸に進出し、16時では内陸40kmまでに達し、特にNO₂濃度は内陸部でも濃度上昇が高くなることが示された。このように、海風が発達するような流れ場では、船舶からの排出による陸域濃度の寄与は沿岸部だけでなく陸域内部にまで影響していることが示された。

今後は、計算領域全体の排出量を推定し、今回のシミュレーションとは異なった流れ場や季節で、船舶排出の陸域濃度の寄与の計算を行い、船舶からの排出量と陸域濃度上昇の関連づけを行うことが必要である。

参考文献

- 5-1) 環境庁編：環境白書・総説 平成八年度版, 大蔵省印刷局, 383-386(1996)
- 5-2) 船舶排出大気汚染物質削減手法検討調査報告書, 日本船舶機関学会 (1995)
- 5-3) 西川栄一, 財田武彦: 大阪湾を航行する船舶からの大気汚染物質排出量の推定, 日本船舶機関学会誌, 29, 412-421 (1994)
- 5-4) Akira Kondo, Katsuhito Yamaguchi and Hee Kwan Ahn : Simulation of Climatic Effects by construction of Reclaimed Island in Pusan, Korea, *Atmos. Environ.*, Vol.30, No.13, 2437-2448 (1996)
- 5-5) 岡本真一：大気環境アセスメントのためのコンピュータ流体解析の基礎, 産業環境管理協会,(1993)
- 5-6) Piotr K.Smolarkiewicz : A Simple Positive Definite Advection Scheme with Small Implicit Diffusion, *Mon. Wea. Rev.*, vol III, 479~486, 1983
- 5-7) 伊藤久徳: 近畿地方の広域海風に関する数値実験, 天気, 42, 17-27 (1995)
- 5-8) 北田敏広,L.K.Peters : CO-CH₄ 系のグローバルな輸送-反応モデル, 大気汚染学会誌, 15, 91-108 (1980)
- 5-9) 環境庁大気保全局大気規制化編: 窒素酸化物総量規制マニュアル (改訂版), 公害研究対策センター (1993)
- 5-10) 兵庫県生活文化部環境局: 平成7年度石炭等導入地域影響調査報告書 (1996)
- 5-11) 千葉県環境部大気保全課: 平成5年度光化学スモッグ発生源対策調査報告書, (1994)
- 5-12) U.S. Environmental Protection Agency: User's Guide For the Urban Airshed Model, EPA-450/4-90-007 (1990)
- 5-13) 日本海難防止協会: 長期展望にたった大阪湾における海上交通システム調査報告書 (その1~4), (1985~1988)
- 5-14) 鶴野伊津志, 大原利真他: 近畿地域の局地循環風シミュレーションと評価, 天気, 43, 303-317 (1996)
- 5-15) 大原利真, 若松伸司他: 光化学オキシダント・シミュレーションモデルの構築と検証, 大気環境学会誌, 32, 6-28 (1997)

第6章 結論

本章では、本研究で得られた成果を述べ、その研究を通して明らかになった課題を整理し、今後発展させていくべき方向と展望について記述し、本論文の結論とする。

6.1 各章のまとめ

第1章では、大気汚染、気温、および降雨を例として大気環境の変化を明らかにし、大気環境保全の重要性を指摘した。さらに、省エネルギーの環境調和型都市を構築していくことが、地球温暖化防止のために不可欠であることを指摘し、本研究の目的である都市大気環境の事前評価を行うことの必要性を述べ、数値シミュレーションが、事前評価の有効な手法であることを述べた。また、本研究に関連がある局地循環風、都市キャノピ、大気汚染濃度予測に関する既往研究について述べ、筆者らのグループが開発している地域大気シミュレーションモデル(OASIS(Osaka University Simulation System))の中での本論文の位置づけを明らかにした。

第2章は、運動方程式、連続式、熱・比湿保存式および静水力学式で構成される基礎方程式に、鉛直乱流拡散を決定するための乱流モデルと、地表付近の境界条件決定のための接地境界層モデルと熱収支モデルを含む大気境界層予測モデル、本研究で提案する都市建物群内の放射量を予測できる都市キャノピモデル、都市スケールの詳細な計算を行うためのネスティング法、計算値と観測値を同化させる4次元同化法、および移流・拡散、沈着過程、光化学反応過程を含む大気濃度予測モデルの概要を説明した。

第3章は、韓国釜山市で計画されている人工島建設(Yeung-doとSongdoで囲まれた湾に約6.2km²の人工島を作る計画)による周辺気候の影響を、3次元シミュレーションモデルにより事前評価した。釜山気象台と釜山空港の観測データと計算値の比較を行った結果、両者はほぼ良好に一致しモデルの妥当性が検証された。新島開発前後の温度と風速の影響を数値シミュレーションで評価した結果、新島上空で、日中の温度は最大約1.4度上昇し、Songdoでは土砂採取の結果標高が低くなり、また土地利用のカテゴリが変化することにより夜間温度が約0.5度上昇することが示された。風速は、新島西側で最大約50cm/s早くなり、このような風速の増加は、Songdo丘陵地域の造成の結果であることが示された。新島建設のような大規模地表改変では、それによる影響だけでなく、周辺の地形改変や土地利用変化などが気候変化をもたらす事が明らかとなり、事前予測を行う際は、開発に伴う周辺地域の変化を考慮する事が重要であることが示唆された。

第4章は、筆者らが提案した都市キャノピモデルの放射計算の妥当性の検討を行った。(1)建物被覆率、(2)キャノピ高さ、(3)建物の形、(4)建物の向き、を変化させて、また(5)建物、(6)地表面の反射率および(7)鏡面反射率を変化させて、キャノピ内の短波放射フラックス分布の影響を調べた。その結果、太陽高度角が小さく太陽時角が大きくなると、建物形状や反射率の違いによる影響が顕著に現れ、建物による被覆率を増大させたり、キャノピ高さを高くすると、地表面が受ける短波放射フラックスは少なくなり、また反射率を小さくすると、地表面が受ける短波放射フラックスは大きくなることが示された。次に、建物による被覆率を増大させたり、キャノピ高さを高くすると、キャノピ内表面の天空係数

は小さくなり、天空に放出する長波放射フラックスが減少することが明かとなった。都市キャノピモデルと1次元大気境界層モデルを結合して、都市キャノピ内の気温・風速分布を求めた。建物による被覆率を増大させ、キャノピ高さを高くすると、建物抵抗により都市キャノピ内の風速減少は大きくなることが示された。また、建物による被覆率を増大させ、キャノピ高さを高くすると、地表面が受ける短波放射フラックスは少なくなるため、日中の温位上昇が小さくなり、一方、夜間は地表面が天空に放出する長波放射フラックスが少なくなるため、温位の低下が抑えられることが示された。これらの結果により都市の建物による被覆率の増大と建物高さの上昇は、夜間に温度が低下しにくくなるヒートアイランド現象を引き起こす原因の1つであることが明らかとなった。次に都市キャノピ層を考慮した3次元大気境界層モデルを作成し、大阪市域に応用した結果、日中は都市建物による地表面が受ける太陽放射量が減少し、それによる気温低下と、人工排熱による気温上昇がほぼ拮抗し、夜間は都市建物による地表面が天空に放出する長波放射量が減少し、それにより気温低下が抑えられる効果と人工排熱による気温上昇の相乗作用により都市中心部では、約5度の気温上昇が生じた。そして、夜間の気温上昇は、人工排熱よりも、天空へ放出する長波放射の減少による影響が大きいことが示された。

第5章は、meso-scaleの大気境界層予測モデルと大気汚染濃度予測モデルをカップリングしたモデルを用いて、大阪湾沿岸域を対象に高濃度光化学オキシダントが観測された日について、船舶からの排出が陸域大気濃度に与える影響を検討した。まず、大阪府、兵庫県および海上からの大阪湾沿岸域を対象に SO_x 、 NO_x 、 HC の排出量を算定した結果、 SO_x 、 NO_x の船舶からの排出量は、全排出量の約30%を占めており、特に NO_x の排出量が多いことが示された。次に、この推定した排出量を入力データとして、高濃度光化学オキシダントが観測された日を対象にシミュレーションを実施し、観測値との比較を行った。排出量データの推定誤差や流れ場再現の不十分さを考慮すると、計算値と観測値は、ほぼ良好な一致を示した。最後に、船舶からの排出量を0と仮定して計算を行い、船舶からの排出が陸域濃度に及ぼす寄与を調べた。船舶からの排出による陸域濃度上昇域は、12時までは船舶からの排出量が集中している阪神沿岸域に限定されているが、海風の発達とともに SO_2 、 NO_2 の濃度上昇域は内陸に進入し、16時では内陸40kmまでに達し、特に NO_2 濃度は内陸部でも濃度上昇が高くなることが示された。このように、海風が発達するような流れ場では、船舶からの排出による陸域濃度の寄与は沿岸部だけでなく陸域内部にまで影響していることが示された。

第6章は、以上の結果を要約し、今後残された課題について述べた。

6.2 今後の課題

研究を通して明らかになった課題を以下に記述する。

1. モデルの検証方法の確立

数値モデルを用いて将来予測を行う場合は、数値モデルの妥当性を予め確かめることが必要となる。本研究でも、そのような手続きを踏んで予測を行っている。数値モデルの検証方法として、ある特性の日の観測値と、もしくは特定の気象条件が備わった日の平均値である気候値と計算値を比較する方法が通常用いられる。しかし、数値計算には、(1) 初期値設定、(2) 格子解像度に見合うモデル入力データの平均化、(3) モデルパラメータ値の精度 等の不確かな要因が存在する。また観測値(気候値)の数は、計算対象領域内に通常僅かしかなく、また、観測値が地域代表値(計算の格子解像度の平均値)を表しているかどうかを判断出来ない。このように、いろいろな問題を抱えた観測値と計算値を比較する場合、数値モデルの妥当性は、何を基準として

検証すればよいかがあいまいである。極端に言うとも、観測値と計算値が一致したとしても、数値モデルの妥当性を検証したことにはならない可能性がある。今後、観測値に、地域代表性や信頼性に基づいて許容範囲を設定する等の方法を確立することが必要であるし、数値モデルについても、上記に述べた不確定要素を考慮した計算値の信頼性評価法を確立することが必要である。

2. 現象の精度良いモデル化

夜間の大気安定時の乱流モデル、建物高さ分布を考慮できる都市キャノピモデル、多層植生モデル が、都市境界層の気流・熱環境を予測するのに必要である。

(a) 夜間の大気安定時の乱流モデル

本研究で用いた乱流 closure model は、大気が安定になると乱流エネルギーが消滅し、乱流拡散係数がほとんど0に近い値になる。そのため、大気が安定になると鉛直の乱流混合が起こらなくなる。しかし、地表付近では大気が安定になっても、間欠性乱流などにより鉛直混合が生じている。この影響を適切にモデル化を行った例はなく、今後の大気境界層モデルの大きなテーマである。

(b) 建物高さ分布を考慮できる都市キャノピモデル

本研究では、都市キャノピ構造を同じ大きさの建物が規則正しく格子状に配置されるとした都市キャノピモデルを提案した。このように都市キャノピ構造を規格化することにより、容易に都市キャノピ内の放射量を算定することが可能となった。しかし、実際の都市建物はいろいろな高さを持っており、具体的な都市域の計算を行う場合は、その影響を取り込む必要がある。今後は、現状のモデルに建物高さ分布を考慮できるように拡張する事が課題である。

(c) 多層植生モデル

本研究で用いている植生モデルは、単層モデルである。今後、環境調和型の都市の環境緩和機能を数値モデルを用いて予測を行う場合には、接地境界層内の温度や風速の鉛直分布を正確に評価しなければならない。都市キャノピモデルは、この目的のために開発したものである。同様に、植生(樹木)についても、植生による放射量や潜熱フラックス、顕熱フラックスの鉛直分布を評価できる多層植生モデルを開発することが必要である。

大気環境予測モデルとその応用に関して述べてきたが、数値モデルで現象を全て予測出来ないのが現状であり、将来的にも完全に予測を行うことは不可能である。しかし、大気環境の事前評価を行うには、数値モデルが最も強力な手段であるのは紛れもない事実である。CO₂等の温室効果ガスによる地球温暖化対策が、世界各国で盛んに議論されているが、その裏付けとなっているのは、いくつかの GCM モデルによる「CO₂等の温室効果ガスがこのまま増加すると、2050年の地球の平均温度が2~3℃上昇する。」という計算結果であり、数値モデルによる計算結果が、意志決定に初めて用いられた画期的な出来事である。今後、数値モデルによる計算結果は、いろいろな場面で、意志決定に使用される機会が増えてくると考えられる。そういう意味で数値モデルは、今後益々発展していくと考えられる。しかし、数値モデルは精巧になればなるほど、決定しなければならないパラメータ値が増加し、そのパラメータ値の決定には必ず不確定要素が付きまとう。それ故、数値モデルの解は、あくまで予測値であり、絶対的な解を得ることは出来ない。数値モデラーとしては、予測値をなんとか絶対的な解に近づける努力を行わなければならないが、数値モデルの限界についても常に自覚しておかなければならない。自戒の念をこめて、本論文の最後の言葉とする。

記号表

A_1	: 乱流モデルの係数	(=0.78)
A_2	: 乱流モデルの係数	(=0.78)
A_i	: 微正面 i の面積	[m^2]
A_S	: ブロック上面の面積	[m^2]
$A_{(z)}$: 建物表面積密度	[m^2/m^3]
B_1	: 乱流モデルの係数	(=15.0)
B_2	: 乱流モデルの係数	(=8.0)
C_1	: 乱流モデルの係数	(=0.056)
C_2	: 乱流モデルの係数	(=0.3)
C_3	: 乱流モデルの係数	(=0.33)
C_{cloud}	: 雲量	[-]
C_d	: 形態係数	[-]
C_f	: 葉の表面に対する輸送係数	[-]
C_{Hg}	: 地表面の輸送係数	[-]
C_{Hh}	: 植生頂上の輸送係数	[-]
D	: 排除厚さ	[m]
$D()$: 拡散項	
D_i	: 第 i 層の土壌厚さ	[m]
E_1	: 乱流モデルの定数	
E_2	: 乱流モデルの定数	
E_3	: 乱流モデルの定数	
E_4	: 乱流モデルの定数	
E_5	: 乱流モデルの定数	
E_A	: 人間活動による蒸発量	[$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]
E_B	: 建物表面からの蒸発量	[$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]
E_f	: 葉からの正味の蒸発量	[$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]
$(E_f)_{pot}$: 植生からの潜在的な蒸発量	[$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]
E_g	: 地表面からの蒸発量	[$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]
E_h	: 植生頂上からの蒸発量	[$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]
E_i	: 微正面 i の蒸発量	[$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]
E_{leaf}	: 葉の蒸発量	[$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]
E_{tr}	: 葉の蒸散量	[$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]
E_-	: ネスティングのための係数	
E_0	: ネスティングのための係数	
E_+	: ネスティングのための係数	

F	: 微正面 i が吸収する投入光子数	[個]
F_D	: 微正面 i が吸収する直達日射の投入光子数	[個]
F_d	: 沈着フラックス	[m/s]
$F_{i,s}$: 微正面 i の天空に対する形態係数	[-]
$F_{i,j}$: 微正面 i の微正面 j に対する形態係数	[-]
F_{num}	: 単位面積当たりの葉の枚数	[-]
F_S	: 微正面 i が吸収する天空日射の投入光子数	[個]
G	: 土中への熱フラックス	[J/m ² s]
G_i	: 微正面 i の壁面への熱フラックス	[J/m ² s]
G_1	: z^* 座標系への微分オペレータ	
G_2	: z^* 座標系への微分オペレータ	
G_3	: z^* 座標系への微分オペレータ	
G_ϕ	: ナッジング係数	[-]
H_A	: 人間活動による顕熱フラックス	[J/m ² s]
H_B	: 建物表面からの顕熱フラックス	[J/m ² s]
H_f	: 葉からの正味の顕熱フラックス	[J/m ² s]
H_g	: 地表面からの顕熱フラックス	[J/m ² s]
H_h	: 植生頂上からの顕熱フラックス	[J/m ² s]
H_i	: 微正面 i の顕熱フラックス	[J/m ² s]
I_D	: 直達日射	[J/m ² s]
I_e	: 微正面 i が吸収する正味の短波放射フラックス	[J/m ² s]
I_S	: 天空日射	[J/m ² s]
K_H	: 水平方向拡散係数	[m ² /s]
K_H^c	: 汚染物質濃度水平拡散係数	[m ² /s]
K_i	: 第 i 層の透水係数	[m/s]
$\overline{K_{i,i+1}}$: 第 i 層と第 $i+1$ 層の平均透水係数	[m/s]
K_{sati}	: 第 i 層の飽和透水係数	[m/s]
K_V	: 鉛直方向拡散係数	[m ² /s]
$K_V^{(\theta)}$: 熱の鉛直方向拡散係数	[m ² /s]
$K_V^{(m)}$: 運動量の鉛直方向拡散係数	[m ² /s]
K_V^c	: 汚染物質濃度の鉛直拡散係数	[m ² /s]
L	: Monin-Obukhov 長さ	[m]
L_w	: 蒸発潜熱	[J/kg K]
LAI	: 単位面積当たりの正味の葉の表面積	[-]
N	: 投入光子数	[個]
N_D	: 直達日射の投入光子数	[個]
N_S	: 天空日射の投入光子数	[個]
P	: 圧力	[hPa]
P_{00}	: 基準レベルの圧力	(= 1000) [hPa]

P_g	: 降雨量	[kg/m ² s]
P_r	: プラントル数	[-]
Q_A	: 人工排熱	[J/m ² s]
Q_i	: 高所排出源の排出率	[m ³ /s]
$Q_{i,i+1}$: 第 i 層と第 i+1 層間の流速	[m/s]
R_0	: 太陽定数	[J/m ² s]
R_d	: 乾燥空気のガス定数	(= 0.0686) [cal/g K]
R_{f1}	: 乱流モデルの定数	
R_{f2}	: 乱流モデルの定数	
$R_g \downarrow$: 地表面下向きの長波放射フラックス	[J/m ² s]
$R_g \uparrow$: 地表面上向きの長波放射フラックス	[J/m ² s]
$R_h \downarrow$: 植生頂上下向きの長波放射フラックス	[J/m ² s]
$R_h \uparrow$: 植生頂上上向きの長波放射フラックス	[J/m ² s]
R_i	: 光化学反応における生成消滅率	[1/s]
R_{if}	: フラックスリチャードソン数	
R_{ifc}	: 臨界フラックスリチャードソン数	
R_{ig}	: グラジエントリチャードソン数	
R_{neti}	: 微正面 i の正味放射フラックス	[J/m ² s]
Re_*	: 粗度レイノルズ数	[-]
S_c	: シュミット数	[-]
$S_g \downarrow$: 地表面下向きの短波放射フラックス	[J/m ² s]
$S_g \uparrow$: 地表面上向きの短波放射フラックス	[J/m ² s]
S_h	: シャーウッド数	[-]
$S_h \downarrow$: 植生頂上下向きの短波放射フラックス	[J/m ² s]
$S_h \uparrow$: 植生頂上上向きの短波放射フラックス	[J/m ² s]
$S_{max} \downarrow$: 短波放射フラックスの最大値	[J/m ² s]
S_H	: 安定度関数	
S_M	: 安定度関数	
S_q	: 実験定数	(=0.2)
S_t	: スタントン数	[-]
T	: 大気温度	[K]
T_2	: 土中内の温度	[K]
T_{af}	: 植生層内の温度	[K]
T_{as}	: スクリーン高さの気温	[K]
T_f	: 葉の温度	[K]
T_g	: 地面温度	[K]
T_h	: 植生頂上温度	[K]
T_R	: 大気透過率	[-]
U	: 速度	[m/s]

W_{bx}	: 建物の横幅	[m]
W_{by}	: 建物の縦幅	[m]
W_{dew}	: 葉の上の水分量	[m ³ /m ²]
W_{dmax}	: 葉の上の最大水分量	[m ³ /m ²]
W_{sx}	: ブロック内の横幅	[m]
W_{sy}	: ブロック内の縦幅	[m]
Z	: 天頂角	[deg]
$a_{b,i}$: 微正面 i が受ける短波放射フラックスの都市キャノピ 上空の短波放射フラックスに対する比率	[-]
c_i	: 汚染物質の濃度	[m ³ /m ³]
c_p	: 定圧比熱	(= 239.05) [J/kg K]
c_{T1}	: 定数	(= $2\sqrt{\pi}$)
c_{T2}	: 定数	(= 2π)
$(d_1)_2$: 土壌深さ	[m]
$(d_1)_g$: 土壌深さ	[m]
e_h	: 均時差	[deg]
f	: コリオリパラメータ	[1/s]
g	: 重力加速度	(= 9.8) [m/s ²]
h	: 太陽時角	[deg]
h_c	: キャノピ高さ	[m]
i	: 斜面に対する太陽の入射角	[deg]
k_D	: 物質伝達率	[m/s]
l	: 乱れの長さスケール	[m]
l_0	: 乱れの長さスケール	[m]
q^2	: 乱流エネルギー	[m ² /s ²]
q_i	: 地上排出源による排出率	[m ³ /m ² s]
q_v	: 比湿	[kg/kg]
q_{vaf}	: 植生層内の比湿	[kg/kg]
q_{vf}	: 葉の比湿	[kg/kg]
q_{vg}	: 地表面比湿	[kg/kg]
q_{vh}	: 植生頂上比湿	[kg/kg]
q_{vsat}	: 飽和比湿	[kg/kg]
$q_{vsuf,i}$: 微正面 i の比湿	[kg/kg]
q_{v*}	: 摩擦比湿	[kg/kg]
r_{af}	: 植生層内の空気抵抗	[s/m]
r_a	: 乱流層抵抗	[s/m]
r_b	: 粘性層抵抗	[s/m]
r_c	: 植物の抵抗	[s/m]
r_c	: 表面抵抗	[s/m]
r_t	: 全輸送抵抗	(= $r_a + r_b + r_c$) [s/m]

r_{stma}	: 気孔抵抗	[s/m]
r_v	: 格子空間で建物で占められていない空間比	[-]
r_x	: yz 断面で建物で占められていない断面比	[-]
r_y	: xz 断面で建物で占められていない断面比	[-]
r_z	: xy 断面で建物で占められていない断面比	[-]
r'	: 土壌値決定の比率	[-]
r''	: 葉からの蒸発量の割合	[-]
s	: 計算領域上面の高さ	[m]
t	: 時間	[s]
t_{JST}	: 日本標準時	[h]
u	: x 方向の速度成分	[m/s]
$\overline{u'w'}$: レイノルズ応力	[m ² /s ²]
$\overline{u'\theta'}$: 共分散	[mK/s]
w	: z 方向の速度成分	[m/s]
u_{af}	: 植生層内の風速	[m/s]
u_*	: 摩擦速度	[m/s]
v	: y 方向の速度成分	[m/s]
v_g	: 沈着速度	[m/s]
w_t	: 時間の重み係数	[-]
w_{xyz}	: 空間の重み係数	[-]
w^*	: z^* 座標系における鉛直方向の速度成分	[m/s]
$\overline{w'^2}$: レイノルズ応力	[m ² /s ²]
$\overline{w'\theta'}$: 共分散	[mK/s]
x, y, z	: Catesian 座標系	
z_0	: 粗度高さ	[m]
z_G	: 標高	[m]
z^*	: z^* 座標系	
ΔL	: CMG の格子間隔	[m]
Δl	: FMG の格子間隔	[m]
Π	: エクスナー関数	[-]
Ψ_h	: 無次元温位プロファイルの積分値	[-]
Ψ_m	: 無次元速度プロファイルの積分値	[-]
α	: ネスティング法の補正係数	[-]
α'	: α 法の係数	[-]
α_f	: 葉のアルベド	[-]
α_g	: 地面のアルベド	[-]
α_{inc}	: 流出面の平均勾配	[deg]
α_{slope}	: 傾斜角	[deg]
α_{sun}	: 太陽高度角	[deg]

β	: 体積膨張率	[1/K]
δ	: 赤緯	[deg]
δ_c	: ステップ関数	[-]
ϵ	: FMG の格子番号	[-]
ϵ_a	: 雲の射出率	[-]
ϵ_f	: 葉の射出率	[-]
ϵ_g	: 地面の射出率	[-]
ϵ_i	: 微正面 i の射出率	[-]
ζ	: 安定度パラメータ	(= z / L) [-]
ζ_0	: 粗度高さの安定度パラメータ	(= z_0 / L) [-]
η_a	: 天空日射の入射角	[deg]
η_{slope}	: 斜面の方位角	[deg]
η_{sun}	: 太陽の方位角	[deg]
θ	: 温位	[K]
$\bar{\theta}$: 平均温位	[K]
$\overline{\theta^2}$: 共分散	[K ²]
θ_a	: 天空日射の方位角	[deg]
θ_g	: 地表面温位	[K]
θ_{root}	: 根の付近の土中水分量	[m ³ /m ³]
θ_{si}	: 第 i 層の飽和土中水分量	[m ³ /m ³]
θ_{wi}	: 第 i 層の土中水分量	[m ³ /m ³]
θ_{wilt}	: 植物が枯れる土中水分量	[m ³ /m ³]
θ_*	: 摩擦温度	[K]
κ	: カルマン定数	(=0.4) [-]
λ_2	: 土中の土の熱伝導率	[W/mK]
λ_g	: 地表の土の熱伝導率	[W/mK]
ν	: 空気の動粘性係数	[m ² /s]
ξ_u	: x 方向に垂直な建物の表面積の割合	[-]
ξ_v	: y 方向に垂直な建物の表面積の割合	[-]
ρ_a	: 空気の密度	(= 1.293) [kg/m ³]
ρ_w	: 水の密度	(= 1.293) [kg/m ³]
$(\rho_{soil} c_{soil})_2$: 土中の土の熱容量	[kg/m ³]
$(\rho_{soil} c_{soil})_g$: 地表の土の熱容量	[kg/m ³]
σ	: Stefan-Boltzman 定数	[W/m ² K ⁴]
σ_f	: 葉の被覆率	[-]
τ_1	: 1 日	(=86400) [s]
τ_g	: 摩擦応力	[kg/ms ²]
ϕ_{lati}	: 緯度	[deg]
ϕ_{long}	: 経度	[deg]

ψ_h	: 無次元温位プロファイル	[-]
ψ_m	: 無次元速度プロファイル	[-]
ψ_{obs}	: 観測値	
$\psi_{p(i)}$: 第 i 層の土壌水分ポテンシャル	[m]
$\psi_{p(sati)}$: 第 i 層の飽和土壌水分ポテンシャル	[m]

謝辞

本論文は、大阪大学工学部助手として大学に戻ってきてからの研究成果をまとめたものです。

大阪大学大学院工学研究科山口克人教授には、本研究を進めるにあたって終始高いご見識でご指導、ご鞭撻を賜りました。ここに心より厚く感謝の意を表します。大阪大学大学院工学研究科 鈴木敏夫教授、中辻啓二教授、水野稔教授には、本論文の査読の労をお執り下さり、有益かつ丁寧なご指導を賜りました。心よりお礼申し上げます。吉川暉 大阪大学名誉教授には、大阪大学ご在職中はもとよりご退官後も大所高所からご指導を賜りました。厚く感謝申し上げます。

本研究を進めるにあたり、常日頃から有益なご討議とご助言を頂いた大阪大学大学院工学研究科加賀昭和助教授、井上義雄助手に、深く感謝いたします。また、神戸商船大学西川栄一教授には、貴重なデータを提供していただき、さらに有益なご討議を頂きました。心よりお礼申し上げます。

また、大阪大学環境工学科吉川研究室卒業生、山口研究室卒業生および在学中の皆様にも、有形無形のご支援を頂きました。厚く感謝致します。