



Title	CG技術を用いた輻射計算の高速化手法の開発と実環境への応用に関する研究
Author(s)	池島, 薫
Citation	大阪大学, 2011, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/27633
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

CG 技術を用いた輻射計算の高速化手法の開発
と実環境への応用に関する研究

2011 年

池 島 薫

目 次

目 次	1
表目次	4
図目次	4
第1章 緒 言	7
1.1 研究背景	7
1.1.1 温熱環境検討の重要性	7
1.1.2 温熱環境の検討手法	9
1.1.2 温熱環境の検討における影響因子	10
1.1.3 温熱環境における輻射，日射の影響	10
1.2 既往研究	11
1.2.1 輻射形態係数の算出	12
1.2.2 光線追跡法（レイトレーシング）による日射影響の考慮	14
1.2.3 CG 技術の発展	15
1.3 研究目的と構成	16
参考文献	19
第2章 輻射形態係数の高速計算法	22
2.1 緒言	22
2.2 透視図を用いた形態係数の計算法	23
2.2.1 形態係数と半球投影	23
2.2.2 形態係数と透視投影	25
2.2.3 PPM 法（角錐投影法）	25
2.2.4 PPM 法による形態係数の計算手順	27
2.3 性能評価計算	29
2.3.1 適用対象モデル	29
2.4 計算誤差と考察	30
2.4.1 誤差の空間分布	30
2.4.2 誤差の平均値と標準偏差	31
2.5 計算時間の比較	34
2.6 結言	35
付録 2.1 幾何学的関係式の導出	36
付録 2.2 標準誤差の理論値 σ_{th} の導出	40
参考文献	41
第3章 日射の高速計算法	44
3.1 緒 言	44

3.2 直達日射計算の原理.....	45
3.2.1 従来法と提案する手法との関係.....	45
3.2.2 CG 技術を用いた直達日射計算の原理.....	46
3.3 室内環境評価のための直達日射計算.....	49
3.3.1 投影法.....	49
3.3.2 直達日射量.....	52
3.4 散乱日射および反射日射の計算.....	52
3.4.1 散乱日射.....	52
3.4.2 反射日射.....	53
3.5 誤差評価と誤差の理論.....	53
3.5.1 誤差の発生要因.....	53
3.5.2 誤差の評価法.....	54
3.5.3 誤差の理論値.....	54
3.6 室内モデルへの適用例.....	56
3.6.1 室内モデル.....	56
3.7 誤差評価結果と計算時間.....	58
3.8 結言.....	62
付録 3.1 $L_{\max}$ と β の理論計算値.....	63
参考文献.....	65
第4章 輻射・日射を含む熱流体解析の基礎方程式.....	67
4.1 緒言.....	67
4.2 基礎方程式.....	67
4.3 輻射・日射の影響.....	69
4.4 結言.....	70
第5章 CG技術による高速輻射・日射解析手法の屋外解析への応用.....	73
5.1 緒言.....	73
5.2 解析モデル.....	74
5.3 解析の概要.....	75
5.3.1 解析領域.....	75
5.3.2 境界条件.....	80
5.3.3 解析結果.....	85
5.4 表面反射率が都市温熱環境に与える影響.....	92
5.4.1 解析条件.....	92
5.4.2 解析結果.....	92
5.5 結言.....	99
参考文献.....	100

第 6 章	C G 技術による高速輻射・日射解析手法の屋内解析への応用.....	103
6.1	緒 言.....	103
6.2	解析の概要.....	104
6.3	解析モデル.....	105
6.4	解析結果.....	107
6.5	結言.....	114
	参考文献.....	115
第 7 章	結 論.....	116
7.1	各章のまとめ.....	116
7.2	今後の課題.....	118
	謝 辞.....	120

表目次

表 3.1	誤差の評価対象要素数.....	58
表 5.1	表面熱収支計算条件.....	84
表 5.2	各ケースにおけるアルベド.....	92
表 6.1	建物モデルの解析条件.....	105
表 6.2	各ケースにおける解析条件.....	107

図目次

図 1.1	エネルギー起源二酸化炭素に関する対策の全体像.....	8
図 1.2	モンテカルロ法による輻射エネルギーの放射.....	14
図 1.3	本論文の構成.....	17
図 2.1	半球投影図.....	24
図 2.2	投影面候補となる多面体.....	25
図 2.3	PPM 法の幾何.....	26
図 2.4	PPM 法のフローチャート.....	28
図 2.5	誤差評価モデル (5×5 分割)	30
図 2.6	形態係数の誤差空間分布.....	31
図 2.7	形態係数の誤差空間分布.....	31
図 2.8	形態係数の誤差空間分布.....	31
図 2.9	誤差のヒストグラム (メッシュ分割 : 10×10).....	32
図 2.10	PPM 法の標準誤差と理論的な標準誤差の比較.....	33
図 2.11	PPM 法とモンテカルロ法の計算時間の比較.....	33
図 2.12	dS' と dS'' を含む断面図.....	33

図 2.13	1/4 半球の投影面.....	38
図 3.1	投影法と微小要素面の関連付け.....	47
図 3.2	CG 技術による日射計算法のフロー.....	49
図 3.3	太陽位置と建物モデルの関係.....	50
図 3.4	回転変形された座標系.....	51
図 3.5	投影された窓面形状.....	51
図 3.6	日影が微小要素面を横切る状態.....	53
図 3.7	投影図上での各平面図.....	54
図 3.8	平行でない場合.....	56
図 3.9	平行となる場合.....	56
図 3.10	日射計算の室内モデル.....	57
図 3.11	冬至 14 時：回転された投影画像.....	57
図 3.12	解像度による誤差の分布.....	59
図 3.13	画像回転の効果.....	60
図 3.14	誤差の理論値との比較.....	61
図 3.15	誤差と計算時間の比較.....	61
図 3.16	面要素の投影図上の座標.....	63
図 5.1	解析対象とした大阪市中心部のエリア.....	76
図 5.2	解析対象とした大阪市中心部のエリア写真.....	77
図 5.3	瓦町 1 交差点（図 5.2 A 地点）からみた街区.....	78
図 5.4	解析検討の対象とした 4 ブロック.....	78
図 5.5	CFD モデルの鳥瞰図.....	79
図 5.6	CFD モデルのメッシュ図.....	79
図 5.7	WRF による計算領域.....	81

図 5.8	境界面における鉛直方向の速度成分 u	82
図 5.9	境界面における鉛直方向の速度成分 v	82
図 5.10	境界面における鉛直方向の温度分布.....	83
図 5.11	CG 技術によって求められた要素表面に到達する直達日射光の割合.....	85
図 5.12	垂直断面における温度分布の解析結果.....	87
図 5.13	地表面 1.5m における温度分布の解析結果.....	88
図 5.14	地表面/建物表面温度分布の解析結果(Case1).....	89
図 5.15	垂直断面における速度分布の解析結果.....	90
図 5.16	水平方向絶対風速の速度差.....	91
図 5.17	建物表面温度と地表面 1.5m における空気温度の解析結果.....	93
図 5.18	東側壁面における建物表面温度.....	94
図 5.19	西側壁面における建物表面温度.....	95
図 5.20	水平面上の絶対風速 地表面 1.5m (2 PM).....	96
図 5.21	垂直面での温度分布.....	96
図 6.1	建物（アトリウム）解析モデル.....	106
図 6.2	解析メッシュ図.....	106
図 6.3	ガラス面反射率の違いによる室内直達日射量.....	109
図 6.4	壁面反射率の違いによる室内温度分布.....	110
図 6.5	壁面反射率の違いによる SET*の水平分布.....	111
図 6.6	輻射解析の有・無による室内温度分布の変化.....	112
図 6.7	輻射解析の有・無による SET*温度の変化.....	113

第1章 緒 言

1.1 研究背景

1.1.1 温熱環境検討の重要性

地球温暖化対策やヒートアイランド現象に代表される都市空間の高温化対策など、環境問題とりわけ温熱環境への影響軽減対策は近年きわめて注目される分野となっている。2009 年頃より、世界的に脱石油文明を目指したグリーンエネルギーという言葉が盛んに用いられるようになり、以前にも増してクリーンエネルギーや Eco 設計、省エネ検討というテーマが重要な課題となっている。またグリーン IT という言葉に示されるように情報化技術を利用した省エネルギー検討、Eco 設計への取り組みも大きな注目を集めている。

低炭素型グリーン社会の実現においては、太陽電池や風力発電に代表されるグリーンエネルギーの実用化や、LED 照明等に代表される省エネデバイスの普及促進とともに、快適性と省エネルギー性を兼ね備えた温熱環境の設計・検討も大きな課題のひとつとなっている。図 1.1 は、環境省による環境白書¹⁻¹⁾に掲載された「エネルギー起源二酸化炭素に関する対策の全体像」であるが、この図にも示されているように例えばオフィス環境においては空調機器による消費エネルギー量の割合は非常に大きく、ここ数年急激に増大してきた情報管理のためのサーバーコンピュータを収容するデータセンターも膨大なエネルギーを消費するため、データセンターの空調消費エネルギー削減も非常に重要な課題となっている。

また、屋内・屋外を問わず人間が関与する空間環境においてはその快適性の実現は必要不可欠な検討条件であるが、夏期における工場環境やオフィス環境、屋外におけるヒートアイランド現象を考えてみても分かるように、温熱環境の快適性実現には現時点に

においてもなおまだまだ多くの検討・改善の余地を残している。

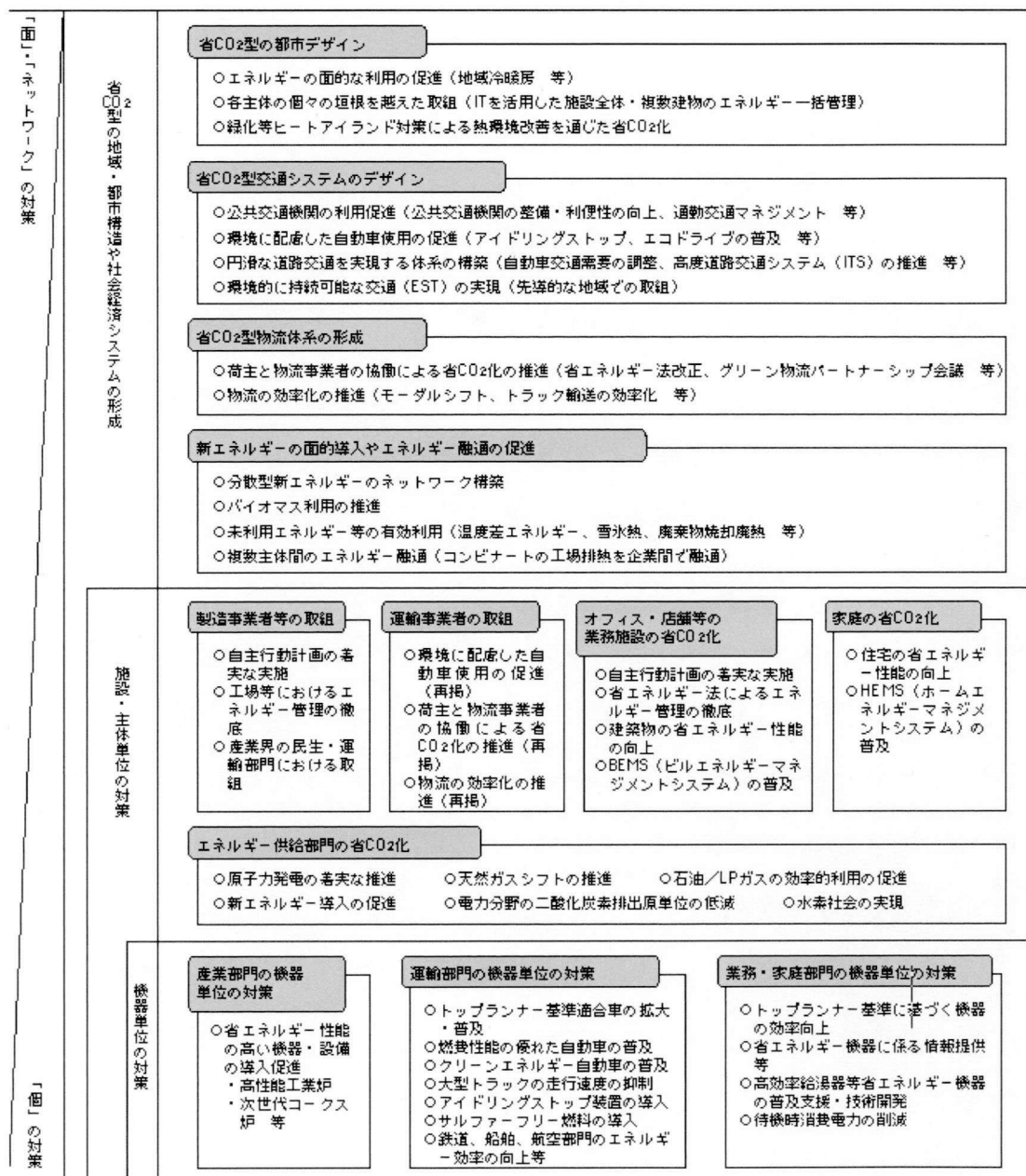


図 1.1 「エネルギー起源二酸化炭素に関する対策の全体像」

平成 19 年版 環境 循環型社会白書 環境省

1.1.2 温熱環境の検討手法

温熱環境の検討においては、実測による測定および数値解析手法を用いた検討と大きく2つの手法が用いられる。実測測定による検討は、実環境をデータとして直接捉えるため非常に有用な手段であるが、実務上多数の測定ポイントを用いて全体環境を詳細に把握することは難しく様々な要因が影響を与えた結果としてのデータが測定として得られるため、改善案を検討し検証するには多くの困難を伴う。また実測による検討では事前検討を行うことは難しく、現実的に測定が不可能な状況も少なくない。

数値解析手法を用いた検討は、温熱環境を表す物理法則をコンピュータ上で数值的に解くものであり、近年のパソコン等の急激な能力向上と共に有力な検討手法として普及してきた。数値解析を用いた検討手法は、対象を一次元のノード（接点）として捉えノード間のエネルギー収支や移動風量の関係を熱回路網法や換気回路網として捉える質点系の解析手法と、Navier-Stokes 方程式やエンタルピーの移流拡散方程式を差分法や有限体積法により三次元的に解析する流体力学的手法に大別される。

前者は計算量が軽微であることと、単室レベルでの温熱環境設計においては周囲環境との一次元的な熱収支バランスのみで温熱環境の推定が可能となるため、実現場では今なお主流をなしている。特に、温熱環境の設計検討においては、この手法は熱負荷計算と呼ばれ必要な空調能力の算出等には必須の設計手法となっている。しかしながら、この手法は対象空間を一様な質点系と見なしたバランス式を解くため、空間内の温度分布や気流分布の偏在など、詳細な実環境の検討までは行うことができない。

後者の手法は1970年代に、Launder and Spalding らにより、高 Reynolds 数型の乱流モデルを基礎とした数値解析手法^{1-2),1-3)}が提案されて以来、コンピュータ能力の飛躍的な発達とともに、多くの実用問題に適用されてきている。このようなコンピュータを利用した流体解析手法は、CFD (Computational Fluid Dynamics) と呼ばれ複雑な対象物を含んだ温熱環境の3次元的な分布を詳細に検討するためには非常に有用な手

段となっている。また近年、都市計画や建物内の空調設計、機械装置の熱設計において 3次元気流解析を利用した気流・温熱環境の検討は、設計現場において設計ツールとしての認知度も高まりつつある¹⁻⁴⁾。

1.1.2 温熱環境の検討における影響因子

温熱環境や快適性に影響を与える要因としては、大きく以下のものが挙げられる。

- 1) 空気温度
- 2) 気流
- 3) 湿度
- 4) 日射（直達日射，散乱日射）
- 5) 輻射（熱放射）
- 6) 人間の活動，着衣量

質点系の解析手法では、空間内の分布を求めることができないため対象空間を一様と仮定した平均の空気温度や湿度が求められる。

CFD を用いた 3 次元解析手法においては、上記 1)，2)，3) で示す空気温度の分布や気流の分布の検討が、これまでもさまざまな実際の検討に用いられてきており既に設計段階での有用なツールとしての位置づけが一般に認められつつある。

しかしながら、一般的な温熱環境の解析的な検討においては、上記 4) 日射（直達日射，散乱日射）や 5) 輻射が詳細に検討されることはほとんどなく、通常は単位面積当たりの平均的な熱負荷として、質点系の計算と同様に扱われるケースが大半である。

1.1.3 温熱環境における輻射，日射の影響

日射や輻射が快適性に与える影響は大きい。例えば、夏期における一般的な工場では、日射の影響を直接受ける屋根面の温度は 60℃を超えるため、天井面からの輻射が作業者に与える影響は非常に大きなものとなっている。また、オフィス空間においても近年

特にガラス張りの外観を有するビルが増大しているため日射や輻射が空間の快適性に与える影響はますます大きくなっている。また、ヒートアイランド対策に代表される屋外温熱環境においても、直達日射の影響や道路面からの照り返し、高温になった表面からの輻射の影響は大きく、これらの例が示すように日射や輻射を伴った快適な温熱環境の検討には非常に重要な要因となっている。

しかしながら、輻射や日射の影響を考慮した CFD の検討は設計レベルにおいてはまだまだ普及していないのが実情である。これは、輻射の計算において必数となる形態係数を求めるために膨大な計算時間を必要とすることが主要因となっている。また日射の計算においても時々刻々位置を変化させる太陽と解析地点の緯度経度、対象物の置かれた方位角等の関係によって日射の影響を受ける要素面を時刻毎に求める必要があるため膨大な計算時間をやはり必要としている。このため、研究論文レベルでの評価では詳細な検討が行われるケースがあるものの、設計レベルにおいては、日射の日向・日陰を計算要素単位で判定した上で3次元計算を実施することはほとんど無く、予め想定した熱負荷境界条件として平均的な値を事前に設定することが一般的となっている。

このため、CFD を用いた温熱環境の検討が設計検討のための手法として一般的に認知されつつある現状においても、輻射や日射の影響をメッシュ要素単位で詳細に考慮した解析的検討はまだまだ一般的には普及していないのが実情である。

1.2 既往研究

日射や輻射の影響を考慮した温熱環境の研究は、これまで観測およびモデルにより多くの検討がなされている。日射や輻射が大きな影響要因の一つとなる都市ヒートアイランド現象では、Kim¹⁻⁵⁾らが観測により都市と郊外で顕著な気温差があることを示しており、Jauregui¹⁻⁶⁾は、ヒートアイランド現象では日中より夜間に温度差が顕著になることを観測により示している。Giridharan¹⁻⁷⁾、近藤¹⁻⁸⁾、斎藤¹⁻⁹⁾らの研究は、地表面の変

化、潜熱によるフラックスの減少、建物群による反射、輻射特性の変化、人工排熱などがヒートアイランド現象の要因となっていることを示している。このような要因を含むマクロモデルおよびマイクロモデル（CFD）の研究も多く行われている。Kondou¹⁻¹⁰⁾、Kusaka¹⁻¹¹⁾、Shrestha¹⁻¹²⁾らは、建物群を簡略化し、日射、輻射影響を組み込んだマクロモデルを用いて、東京、大阪のヒートアイランド現象を再現している。しかしながら、多くのモデルの水平解像度は約 1km で、都市の詳細な構造を再現することはできていない。Mochida¹⁻¹³⁾、Kanda¹⁻¹⁴⁾らは、CFD を用いることにより都市の詳細な構造を再現し、日射・輻射の詳細な影響を考慮した研究も行っている。しかしながら、日射・輻射の解析には非常に多くの計算時間を必要とすることもあり、CFD を用いた解析は熱環境が最悪となる日中のある時刻の定常計算の実施で、1 日の非定常計算は実施されていない。

1.2.1 輻射形態係数の算出

輻射の影響を解析的に調べるためには、対象形状に対する物体表面間の形態係数を求めることが必数の条件となる。日射の影響を解析するには、直達光が照射される面要素の特定が必数の条件となる。このため、輻射の影響を考慮した CFD の解析を普及させるためには、高速な形態係数の計算法と、日射影響を考慮した CFD の高速な計算方法の確立が非常に重要なポイントとなる。従来、このような輻射の解析や日射の解析には、モンテカルロ法に代表されるように、該当要素面から多数の粒子線を発生させ、各々の発生粒子と他の面との衝突判定を行う方法が用いられる。

形態係数は単純な幾何形状に対しては解析的に厳密解が求められている¹⁻¹⁵⁾。また数値計算法を用い、形態係数の定義式に基づき対象となる面の面積を数値的に積分する方法^{1-16),1-17),1-18)}等もあるが、輻射体と被輻射体の間に遮蔽物が存在する場合等の複雑な対象形状の場合は、やはり適用が困難である。このため、従来の輻射環境の検討を行う研究では最も汎用的な手法としてモンテカルロ法が用いられている。モンテカルロ法は、

Howell¹⁻¹⁹⁾らによって基本的な考え方が提唱され、現在でも輻射の形態係数算出には最も汎用的に用いられている手法となっており、モンテカルロ法の実用手法を解説した市販のテキストも出版されている¹⁻²⁰⁾。モンテカルロ法では、発生源から放射されるエネルギー量を多数の粒子線の集まりとして捉え、その一つ一つの粒子線の方角を乱数による確率分布により定義する。放射された各粒子線はその一つ一つにつき、周囲の対象面の各面要素との衝突判定を行う。最終的には各面要素毎に到達する対象エネルギー量は、その面の衝突数に比例するものとして定義される。

モンテカルロ法は精度検証もさまざまな観点から研究が行われてきており、遮蔽面が存在する場合のモンテカルロ法の精度検証も幾島ら¹⁻²¹⁾によって検討されている。また、その汎用性の高さからさまざまな輻射を含む温熱環境の研究にも用いられている。大森ら¹⁻²²⁾はモンテカルロ法を用いた室内輻射環境の検討を実施し、村上ら¹⁻²³⁾はモンテカルロ法を用いた気流場と輻射場の連成解析を行っている。また、尾崎ら¹⁻²⁴⁾は複雑形状を有する大規模メッシュにおけるモンテカルロ法の応用研究を行っている。梅干野^{1-25),1-26)}らは、3D-CAD の形状データを直接利用した屋外熱収支シミュレーション技術を発表しているが、輻射形態係数の算出には従来のモンテカルロ法を使用している。

図 1.2 に示すように、モンテカルロ法ではその原理上から衝突の対象となる面要素の増加に伴い該当面要素に到達する粒子線の数が増加するため、発生源から発生させる粒子数は面要素の増加に比例して増大させる必要がある。このように、モンテカルロ法では発生させる粒子数や面要素数により計算精度が大きく変化し、計算に要する時間は粒子数と面要素の増加に伴い飛躍的に増大する。このためモンテカルロ法を用いる際には、手法の特性を理解し対象に応じた設定を行うことが不可欠となるため、実用上の精度を得るには多くの計算時間を要することとなり、工学的問題に汎用的に用いるには課題も多い。

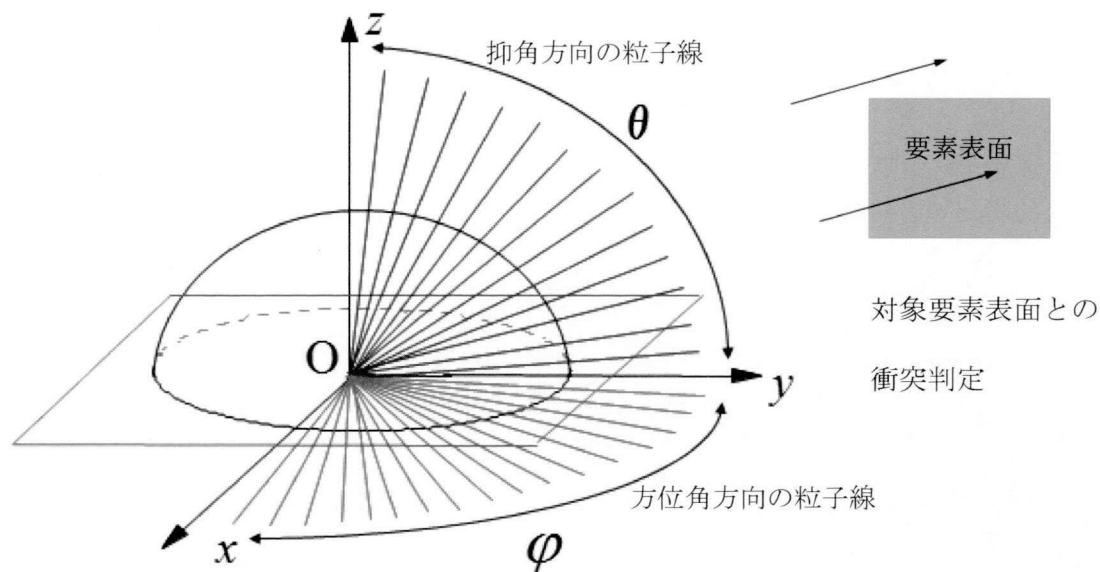


図 1.2 モンテカルロ法による輻射エネルギーの放射

1.2.2 光線追跡法（レイトレーシング）による日射影響の考慮

日射が温熱環境に与える影響は、直達日射と散乱日射の2つに大別される。このうち、直達日射については、解析対象地域の緯度、経度、方位角ならびに解析対象時間が決まれば太陽位置が解析的に求められるため、解析対象モデルとの幾何学的な関係から直達日射が到達する要素（日向）、到達しない要素（日陰）を特定することができる。従来から直達日射の到達判定には、光線追跡法が用いられている。これは太陽位置から太陽光の方向に多数の粒子線を発生させ、解析対象モデルの要素表面との衝突判定を行うものである。吉田ら¹⁻²⁷⁾はモンテカルロ法による輻射の解析と光線追跡法をもとにした日射の解析に基づき、都市街区の気流場と日射・輻射を考慮した温度場の連成解析を行っている。また大森ら¹⁻²⁸⁾は、光線追跡法により日射の影響を考慮した屋内の温熱環境の検討を数値解析により行っている。

光線追跡法は他の遮蔽物が存在する場合は、光線と遮蔽物表面との衝突判定をその都度行う必要があるため、輻射におけるモンテカルロ法と同様に、対象となる解析要素の

分割要素面が多くなると膨大な数の粒子線を発生させる必要があり、幾何学的な衝突判定を行う計算時間も増大する。また、太陽光の入射角が地平線に水平に近づくに従って地上面に到達する単位面積当たりの粒子線数は少なくなるため、時間によって変化する直達日射光のさまざまな入射角の影響を考慮するためにはやはり膨大な数の光線（粒子線）を発生させる必要がある。このような欠点を補うため、光線追跡法では対象となる各要素表面から太陽位置に向かって逆に光線を発生させ、他の要素との衝突判定を行うことで直達日射の到達を求める手法もよく用いられている。各要素表面から逆方向に光線追跡を行う場合には、対象となる全ての要素から光線を発生させる必要があるため、やはり多くの計算時間を必要としている。

1.2.3 CG 技術の発展

本研究では、輻射形態係数の算出と日射計算において、多大な計算時間を要するモンテカルロ法・光線追跡法に替えて、CG（コンピュータ・グラフィックス）による描画画像を用いた高速計算法を、新たに提案する。

近年の3Dゲームソフトや光環境のシミュレーション技術の発展に伴い、CG技術の発展にはめざましいものがある。

しかしながら、CFDに代表される技術計算におけるCG技術は、これまでの主に計算結果の可視化（ビジュアライゼーション）手段という位置づけにおいて利用されてきており、CG技術適用により得られる可視化描画情報を、CFD数値解析計算の入力情報として直接活用する応用研究はこれまであまり報告された例がない。

また、CGの投影技術により得られる画像のピクセル情報を直接利用して、CFDの輻射や日射の計算に結びつけた例はこれまでほとんど報告されておらず、精度についてもこれまで詳細に検討された例は見当たらない。

1.3 研究目的と構成

輻射・日射の影響を検討する際に従来から用いられているモンテカルロ法や光線追跡法においては、対象となる解析モデルの分割された要素数に比例する形で発生させる粒子線の数を検討する必要があるため、どの程度の粒子数を発生させるか等が解析者に依存する側面もあり研究者レベルでは手法としてよく用いられるものの、計算時間が膨大となることもあって汎用的な手法にするにはまだまだ課題も多い。

本研究は、日射および輻射の影響を考慮した温熱環境を、CFD を用いて評価するための新たな汎用的な高速計算法の基礎を確立し、従来法との比較を通してその計算時間と精度の検討を行いその実用性を明らかにすること、日射や輻射の影響を加味した実在街区への適用を行い近年のヒートアイランド対策に代表される都市計画の検討にも活用することが可能な汎用的で高速な計算方法を実現すること、を目的として行ったものである。このため、近年 CG の利用には多くの市販の汎用ソフトが用いられるが、特定の CG ソフトに依存することの無いよう、グラフィックス描画の最も基本的な機能である OpenGL によるグラフィックス・ライブラリを用い、汎用的な手法を明示することとした。また、本研究で詳述する手法の実用問題への適用を通して本手法の有用性を確かめた。

本論文の構成図を図 1.3 に示す。

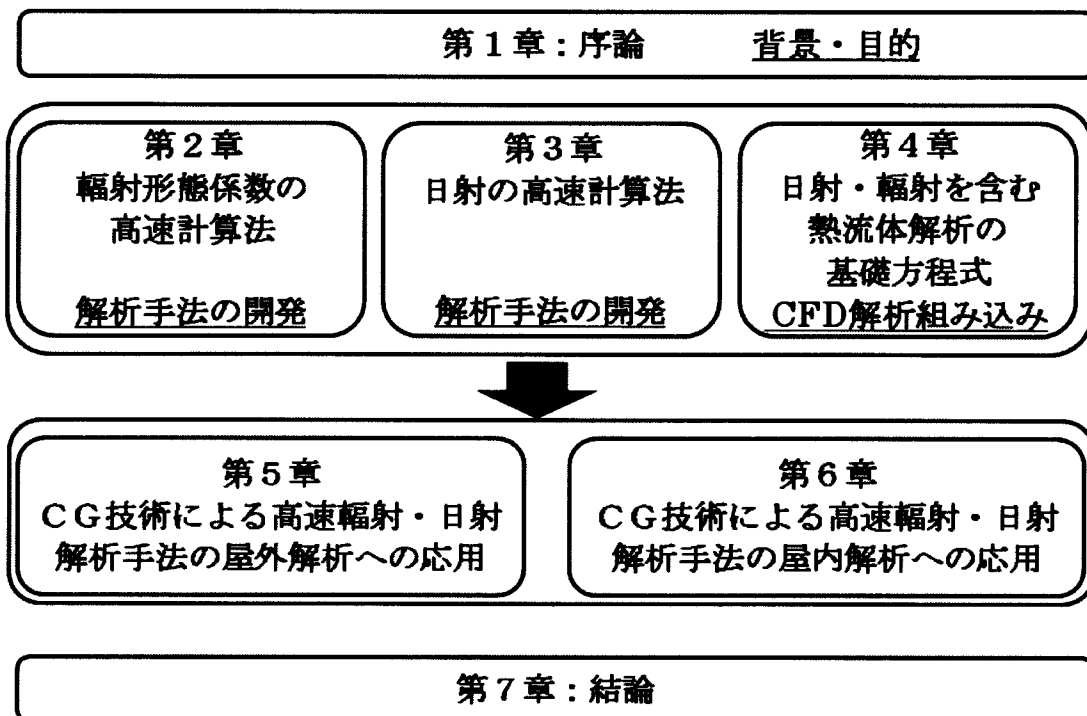


図 1.3 本論文の構成

以下に本論文の概要を述べる。

第1章は、屋外における都市環境や、オフィス・工場等の屋内環境の温熱環境の改善・評価のために数値シミュレーション技術が重要なツールとなっていることを述べ、その中でも特に日射および輻射の影響の持つ重要性を示し、本研究の背景と目的を明らかにした。

第2章は、輻射の影響を CFD に取り込む際に必要となる形態係数を求めるために CG 技術を用いた高速計算法の基本的な概念と、従来法との精度検証、計算速度比較を通して新たに提案する手法の有用性を示した。

第3章では、直達日射および散乱日射の影響を CFD 解析に取り込む際の高速計算法の原理と、従来手法との精度検証、計算速度比較を通して新たに提案する手法の有用性を示した。

第4章では、第2章および第3章で提案を行った CG 技術を用いた輻射、日射の解析手法を CFD 解析に反映させるための基礎式を示した。

第5章では具体的な事例を通して提案する手法の適用をはかり、実在街区を対象として輻射および日射の影響を含めた CFD 解析による評価を行い、輻射や日射の影響を考慮しない解析結果との比較検討を行った。

第6章では具体的な事例を通して提案する手法の適用をはかり、屋内の大規模吹き抜け空間を有する建物内を対象として輻射および日射の影響を含めた CFD 解析による評価を行い、建物表面の高反射性塗装材料が屋内空間に与える影響を解析的に調べた。

第7章は、以上の結果を要約し、今後に残された課題について述べた。

参考文献

- 1-1) 平成 19 年版 環境 循環型社会白書 環境省 2007 年
- 1-2) B.E.Launder and D.B.Spalding, The Numerical Computation of Turbulent Flows, Comp.Meth.Appl, Mech.Eng., Vol.3, pp269-289 (1974)
- 1-3) B.E.Launder and D.B.Spalding, Mathematical Models of Turbulence, Academic Press.(1972)
- 1-4) 村上周三, CFD による建築・都市の環境設計工学, 東京大学出版会 (2000)
- 1-5) Kim Y, Baik J, 2005. Spatial and temporal structure of the urban heat island in Seoul. *Journal of Applied Meteorology*, 44:591–605.
- 1-6) Jauregui E, Heat island development in Mexico City. *Atmospheric Environment*, 31:3821–3831.(1997)
- 1-7) Giridharan R, Ganesan S, Lau S S Y, Daytime urban heat island effect in high-rise and high-density residential developments in Hong Kong. *Energy and Buildings*, 36:525–534.(2004)
- 1-8) Kondoh A, Nishiyama J, Changes in hydrological cycle due to urbanization in the suburb of Tokyo Metropolitan Area, Japan. *Advances in Space Research*, 26: 1173–1176.(1999)
- 1-9) Saitoh T S, Shimada T, Hoshi H, Modeling and simulation of the Tokyo urban heat island. *Atmospheric Environment*, 30: 3431–3442.(1995)
- 1-10) Kondo H, Tokairin T, Kikegawa Y, Calculation of wind in a Tokyo urban area with a mesoscale model including a multi-layer urban canopy model , *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96 :1655–1666(2008)
- 1-11) Kusaka H, Kondo H, Kikegawa Y , A Simple Single-Layer Urban Canopy

- Model For Atmospheric models: Comparison with Multi-Layer And Slab Models , *Boundary-Layer Meteorology*, 101: 329–358(2001)
- 1-12) Shrestha K, Kondo A, Maeda C , Investigating The Contribution Of Urban Canopy Model And Anthropogenic Heat Emission To Urban Heat Island Effect Using Wrf Model , *Trans. Of The JSRAE*, 26: 1-45-55(2009)
- 1-13) Mochida A, Isaac Y.F. Lun , Prediction of wind environment and thermal comfort at pedestrian level in urban area , *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96: 1498–1527(2008)
- 1-14) Kanda M, Kawai T, Nakagawa K, A Simple Theoretical Radiation Scheme For Regular Building Arrays, *Boundary-Layer Meteorology* ,114: 71–90(2005)
- 1-15) R. Siegel and J. R. Howell : Thermal Radiation Heat Transfer, 748～791, McGraw-Hill (1972)
- 1-16) A. B. Shapiro : Computer Implementation, Accuracy, and Timing of Radiation View Factor Algorithms, *Trans. ASME*, 107, 730～732 (1985)
- 1-17) H. C. Hottel and A. F. Sarofim : Radiative Transfer , pp.47 ～ 50 , McGraw-Hill(1967)
- 1-18) G. P. Mitalas and D. G. Stephenson : FORTRAN IV Program to Calculate Radiant Interchange Factors, DBR-25, Division of Building Research, National Research Council of Canada(1966)
- 1-19) J. R. Howell and M. Perlmutter : Monte Carlo Solution of Thermal Transfer Through Radiant Media Between Gray Walls, *Trans. ASME*, 86, 116～122 (1964)
- 1-20) 谷口博・W. J. Yang・工藤一彦・黒田明慈・持田明野：パソコン活用のモンテ

カルロ法による放射伝熱解析, 160～216, コロナ社 (1988)

- 1-21) 幾島毅・鈴木邦彦・吉田一：モンテカルロ法による熱輻射形態係数の算出 計算精度および計算時間について面積積分法との比較, 日本原子力学会誌, 30, No. 6, 548～556 (1988)
- 1-22) 大森敏明・谷口博・工藤一彦：室内ふく射環境の解析法の開発と床暖房への適用, 空気調和・衛生工学会論文集, 42, 9～18 (1990)
- 1-23) 村上周三・小林光・加藤信介・大森敏明・崔棟皓：対流場, 放射場の連成シミュレーションによる冷房室内の温熱環境解析 第2報—モンテカルロ法による形態係数の精度の検討と連成計算の複雑形状室内への適用, 空気調和・衛生工学会論文集, 59, 95～104 (1995)
- 1-24) 尾関義一・斉藤恒洋・大柿聡：複雑な内部形状を有する大規模メッシュ対応型放射伝熱計算手法に関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集, 62, 101～110 (1996)
- 1-25) 梅干野晃, 浅輪貴史, 他：3D-CAD と屋外熱環境シミュレーションツールを一体化した環境設計ツール, 日本建築学会技術報告集, 20, 195-198(2004)
- 1-26) 中大窪千晶, 梅干野晃, 浅輪貴史, 他：屋外熱収支シミュレーションにおける建築材料の日射反射指向特性を考慮した放射伝熱計算モデルの導入, 日本建築学会環境系論文集, 625, 275-282 (2008)
- 1-27) 吉田伸治, 村上周三, 持田灯, 大岡龍三, 富永禎秀, 他：対流・放射・湿気輸送を連成した屋外環境解析に基づく緑化の効果の分析, 日本建築学会計画系論文集, 529, 77-84 (2000)
- 1-28) 大森敏明, 村上周三, 加藤信介：屋外・屋内複合解析格子を用いる複雑形状建物内の日射・放射総合シミュレーション, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, 265-268 (1994)

第 2 章 輻射形態係数の高速計算法

2.1 緒言

輻射による伝熱問題を解析する際には、形態係数が必要不可欠である。形態係数は輻射体から放射された全放射エネルギーのうち、被輻射体が受けとる放射エネルギーの割合を表し、解析領域の幾何形状によって決定される。

単純な幾何形状における形態係数は、解析的に厳密解が求められている²⁻¹⁾。しかし、一般的な解析領域は複雑な幾何形状から構成されており、形態係数を解析的に求めることは困難である。そのため、数値計算法が用いられる。形態係数を求める代表的な数値計算法に、形態係数の定義式に基づき、数値的に面積を積分する面積積分法²⁻²⁾、面積積分を Stokes の定理を用いて線積分に変換して解く線積分法²⁻³⁾、線積分法における一つの線積分項を解析的に積分して変換した Mitalas-Stephenson 法²⁻⁴⁾があるが、いずれの方法も、輻射体と被輻射体の間に遮へい面が存在する場に適用することは困難である。

2次元形状の場合、遮へい面が存在するときにも対応できる手法として Hottel のクロスストリング法²⁻⁵⁾があるが、3次元場には適用できない。3次元の複雑形状にも適用できる手法としてモンテカルロ法²⁻⁶⁾があり、遮へい面が存在する場合についての精度検証もされている²⁻⁷⁾。モンテカルロ法は汎用性に富むため、広く用いられている^{2-8)~2-10)}。しかし、実用精度の解を得るためには、膨大な数の放射粒子を飛ばす必要があり、その際に衝突面判定を幾度も行うため、計算時間を要することが問題である。

面要素間の形態係数の算出において、二組の面要素のなす角から、相互に可視面とはなりえない組みあわせを事前に判定しておく手法も開発されている²⁻¹¹⁾が、計算時間の大幅な短縮は期待できない。

時間のかかる衝突面判定を数値計算で行う代わりに、写真を用いた測定法により、形態係数を求める試みもなされている²⁻¹²⁾。しかし複雑形状において実用精度の解を得る

ためには多くの写真をとる必要があり，その分析にも時間を要するので，実用的ではない。

一方，Nusselt の射影法^{2-14)~2-16)}に基づき，対象点周りに設置した仮想的平面を投影面として，複雑形状を投影することで形態係数を求める手法²⁻¹⁴⁾²⁻¹⁶⁾があり，投影面に 6 面体を用いたものは Hemi-Cube 法^{2-15),2-16)}と呼ばれる。投影法では，投影面への透視変換により形態係数を算出しており，形態係数の計算手法が本質的に透視図の描画手法と共通であることを示している。また，その際に必要となる透視投影変換の操作が，3 次元 CG のためのグラフィックス・ハードウェアを用いることで高速に処理できることが示唆されており²⁻¹⁷⁾，市販のソフトウェア²⁻¹⁸⁾にも利用されているが，その詳細は明らかでない。

本章では，CG 技術を使い，3 次元幾何形状の高速図形処理に特化したグラフィックス・ハードウェアを紹介する²⁻¹⁹⁾ことで，プログラマーの技量によらず，洗練された衝突面判定アルゴリズムを自動的に利用して形態係数を高速に計算できる手法の性能を検討した。Hemi-Cube 法にかわる新たな投影法を提案し，CG 技術により描画された透視投影図のデジタル画像から形態係数を算出する式を導出し，実際に形態係数を求めるまでの一連の過程を示した。さらに，本手法の精度を定量的に評価して，実用化の可能性についても検証した。

2.2 透視図を用いた形態係数の計算法

2.2.1 形態係数と半球投影

図 2.1 の原点 O（視点）にある単位面積の底面と，3 次元空間中の微小面積 dS との間の形態係数 dF は，微小面積 dS を囲む立体角により半径 1 の半球面上に投影される投影微小面積 dS' を用いて式(2.1)で与えられる。なお，図 2.1 における φ [rad]は視線 OA の正射影線分 OA' と x 軸とのなす方位角である。

$$dF = \frac{dS' \cos \theta}{\pi} \quad (2.1)$$

ここに,

dF : 点 O の単位面積と微小面積 dS の間の形態係数 [-]

θ : 視線 OA と z 軸とのなす角 (天頂角) [rad]

dF を半球面上で積分すると,

$$\int dF = 1 \quad (2.2)$$

となり, 視点 O からの形態係数の総和が 1 となることを表す. 平面で定義される透視図を用いて形態係数を求めるためには, 球面上に投影された微小面積 dS' を平面上へさらに再投影する必要がある.

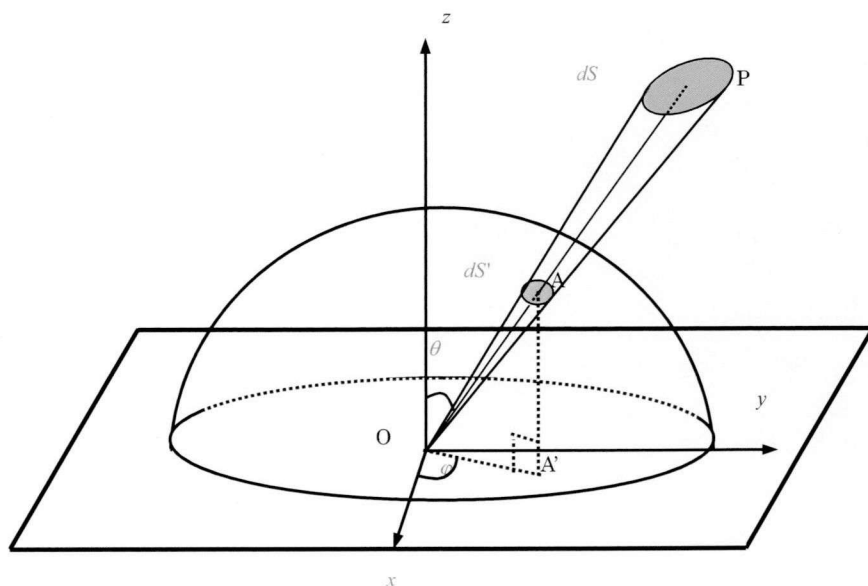


図 2.1 半球投影図

2.2.2 形態係数と透視投影

視点 O にある単位面積の底面に対する形態係数を求めるときの、視点 O を底面中心として側面を投影面とする多面体として考えられる候補の例を図 2.2 に示す。

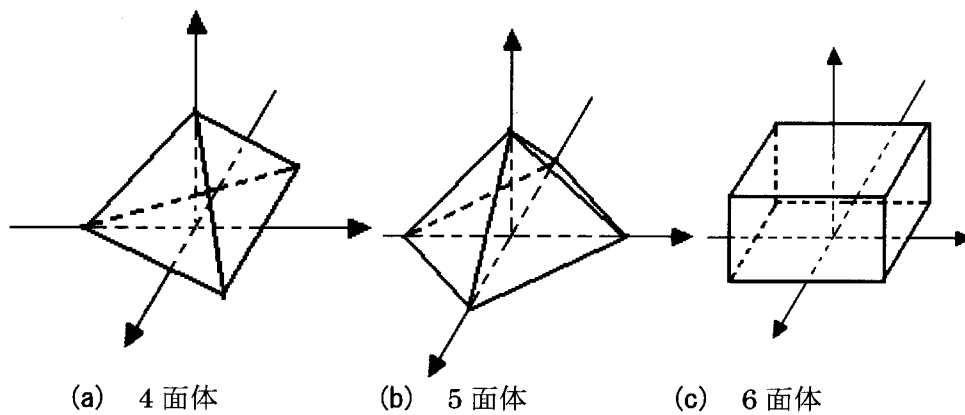


図 2.2 投影面候補となる多面体

4 面体や 5 面体，それに Hemi-Cube 法で用いられる 6 面体をはじめとして，いくつもの多面体が投影面候補として考えられる．投影面となる多面体の側面はいずれも平面であるので，通常の CG ライブラリや CG ソフトウェアがサポートしている透視投影の作画機能を用いることができる．

多面体の中で面数が最小のものは 4 面体（三角錐）であり，これを投影面にすることもできるが，本章では直角座標との関係がシンプルで，かつ必要な公式を導出しやすいことから 5 面体（四角錐）を投影面とする．この投影法は，6 面体を投影面とする Hemi-Cube 法と比較して，投影面数が少ない，投影面のかたちが一通りである，などの利点をもつ．

2.2.3 PPM 法（角錐投影法）

5 面体（四角錐，図 2.2 (b)）の底面を含まない側面を投影面とする本手法を以下，

PPM 法: Pyramid Projection Method (角錐投影法) と呼ぶことにする.

図 2.3 で, 球面上の, 天頂角 $\theta_0 = \pi/4$, 平面角 $\phi_0 = \pi/4$ の点 Q で, 球面に接する平面を投影面を選ぶ. このとき, $0 < \theta < \pi/2$, $0 < \phi < \pi/2$ (すなわち, $x > 0$ かつ $y > 0$ かつ $z > 0$ の領域) の $1/4$ 半球面は, 二等辺三角形 CDE の内部に投影される. このように, 5 面体の底面を正方形として, その対角線を xy 座標軸と一致させるとき, 他の 3 つの $1/4$ 半球面も同様に, 5 面体の側面へそれぞれ投影できる.

図 2.3 における微小面積 dS'' は, 3 次元空間中の微小面積 dS が投影面である 5 面体側面 CDE 上へ投影された微小面積である. dS' と dS'' の関係として, 式(2.3)を得た. この導出過程および投影図上の位置と θ , θ_{xy} の関係を付録 2.1 に示す.

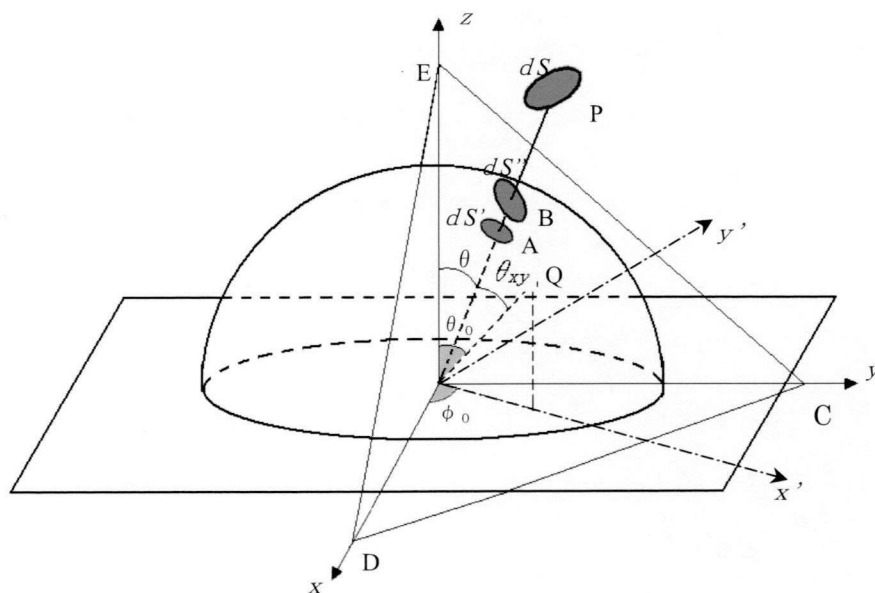


図 2.3 PPM 法 (角錐投影法) の幾何

式(2.3)は、形態係数 dF が投影面 CDE における微小面積 dS'' とその位置から与えられることを意味する。よって、視点 O にある単位面積の底面と、3次元空間中の微小面積 dS との間の形態係数 dF は、式(2.3)により求めることが可能となる。

$$dF = \frac{dS'' \cos \theta \cos^3 \theta_{xy}}{\pi} \quad (2.3)$$

ここに、

dS'' : dS が投影された面 CDE 上での微小面積 [—]

θ_{xy} : 視線 OA と OQ とのなす角 [rad]

なお、実際の計算では透視投影画像として、CG によって作画されたデジタル画像を用いるため、式(2.3)を適用することができる dS'' の最小単位は1画素 (pix) となる。

2.2.4 PPM 法による形態係数の計算手順

PPM 法による形態係数の算出までのフローチャートを図 2.4 に示す。はじめに対象となる解析領域を定め、解析領域中に3次元図形を定義する。次に、CFD の解析を行うことを前提とした解析対象領域全体の要素分割を行う。その際、形態係数の算出対象となる対象図形の要素表面ごとに異なる色情報 (RGB 値) を付加し、要素表面番号と付加した RGB 値の対応表を作成する。CG による投影画像の解像度を決めておけば式(2.3)によって投影された2次元の画像における各画素 (ピクセル) 位置単位毎の形態係数が予め求められるため、画素位置と形態係数値の表も予め用意する。そして、対象となる対象図形の要素表面に CG のカメラを設置し、PPM 法の方式にそってグラフィックス・ライブラリを用いることにより、2次元平面に投影された透視図を作画する。この際の投影画像はグラフィックス・ハードウェアを介して、高速に描画することが可能である。作成された透視図における各画素の RGB 値情報から、その画素がどの図形

要素を示しているのかを特定する。RGB の 3 成分と面要素を一意に対応させることにより原理上 $256^3=16,777,216$ 面までの面要素を区別できることになる。

ここで、透視図の解像度に合わせて、あらかじめ作成しておいた各画素に対する形態係数の表を用いて、対応する図形要素に各画素の形態係数の値を加算していくことで、3 次元空間中のそれぞれの図形要素に対する形態係数を求める。PPM 法では、視野角が $\pi/4$ となるため、上記のフローにより特定の要素表面から見た $1/4$ 半球面分の範囲にある相手方要素の形態係数が求められる。

以上の工程を平面角 ϕ_0 が $\pi/4, 3\pi/4, 5\pi/4, 7\pi/4$ となる 4 つの方向（象限）に対して同様に行うことで特定の要素表面から見た半球面の全領域を計算したことになる。よって、視点 O にある単位面積の底面に対する、3 次元空間中に存在する他の面要素との間の形態係数を 4 枚の透視投影画像から求めることができる。これら一連の作業を、対象となる全ての要素表面に対して繰り返すことで解析対象空間における要素表面間の形態係数を求めることが可能となる。

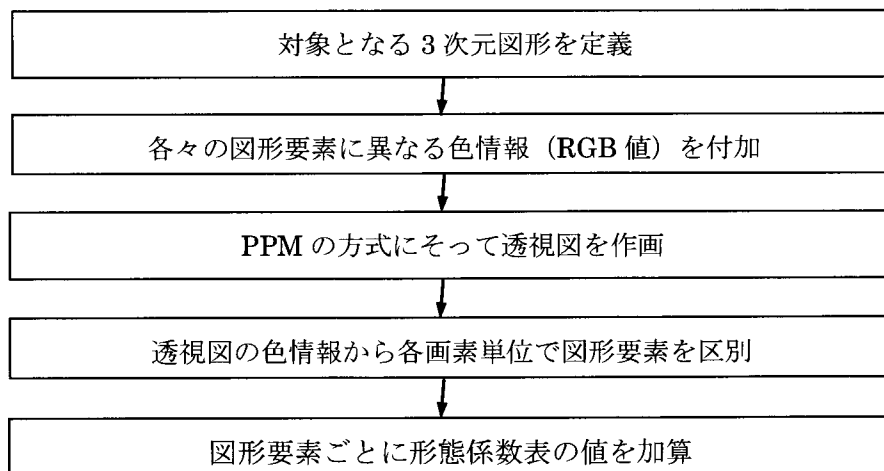


図 2.4 PPM 法のフローチャート

2.3 性能評価計算

2.3.1 適用対象モデル

2.2 で示した PPM 法を簡易形状モデルに適用して、視点 O からの形態係数を求めて、精度評価を行う。適用する形状モデルは図 2.5 に示す立方体である。立方体の 3 面を 5×5 , 10×10 , 20×20 に分割し、視点 O から見た各分割要素面の形態係数を求めた。図 2.5 に示すモデルは、1/4 半球面の範囲に相当する。PPM 法により求めた形態係数の値を正解値と比較するために、ここではモンテカルロ法によって、面要素ごとに形態係数の正解値とみなせる値を求める。なお、モンテカルロ法の放射粒子数は、十分に形態係数の値が収束したとみなせる 900 万個とする。PPM 法で求めた値と、モンテカルロ法による正解値との誤差 err_i を式(2.4)で求める。

$$err_i = VF_i - LVF_i \quad (2.4)$$

ここに、

err_i : PPM と正解値の面要素 i の形態係数差(誤差) [—]

VF_i : PPM で求めた面要素 i の形態係数 [—]

LVF_i : モンテカルロ法で求めた面要素 i の形態係数 [—]

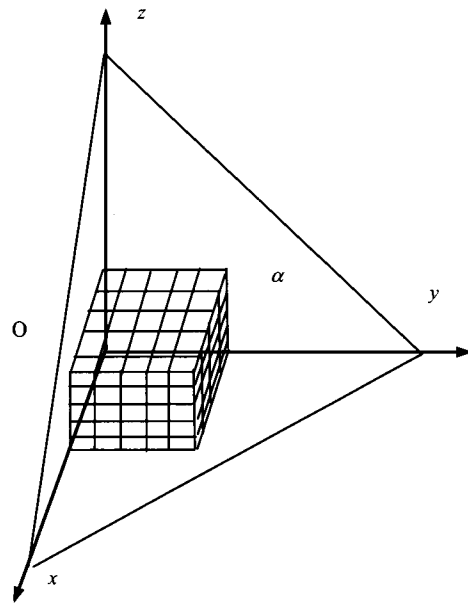


図 2.5 誤差評価モデル (5×5 分割)

2.4 計算誤差と考察

2.4.1 誤差の空間分布

メッシュ分割数 5×5 , 10×10 , 20×20 とした場合に, PPM 法により求めた面要素 i の形態係数と, モンテカルロ法による正解値との差の絶対値 $|err_i|$ を, 面要素を描画単位として空間分布図でそれぞれ図 2.6, 図 2.7, 図 2.8 に示す. それぞれの図では, 透視図の解像度を (a) 160×120 pixels, (b) 640×480 pixels と変更したときの空間分布の例を示している.

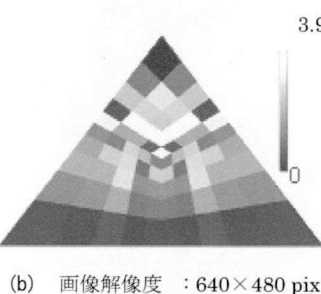
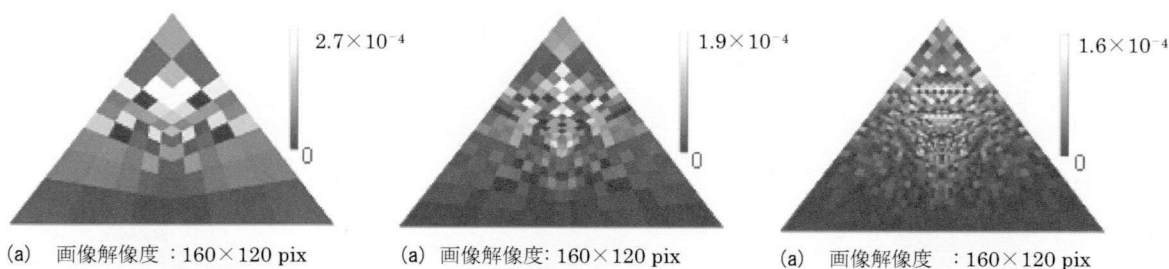


図 2.6 形態係数の誤差
空間分布
(メッシュ分割 : 5×5)

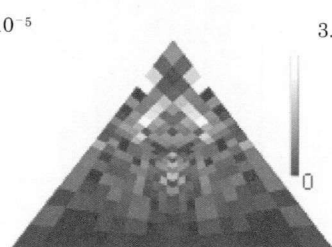


図 2.7 形態係数の誤差
空間分布
(メッシュ分割 10×10)

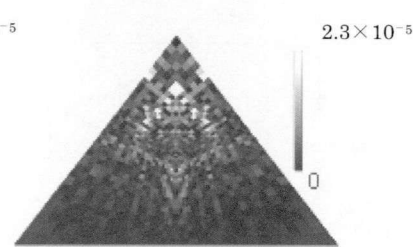


図 2.8 形態係数の誤差
空間分布
(メッシュ分割 : 20×20)

共通していえることは、底面付近の図形要素の誤差が小さいことである。この原因は、底面付近にある図形要素の形態係数の値そのものが小さいためである。いずれの図をみても、誤差が大きくなる場所は二等辺三角形の頂点より少し下の所におおよそ多く分布しているようであるが、それ以外の規則的な特徴はみられない。

2.4.2 誤差の平均値と標準偏差

メッシュ分割数 10×10 における各図形要素の形態係数の誤差を、透視図の解像度が (a) 80×60 pixels, (b) 2560×1920 pixels の場合について、図 2.9 にヒストグラムで示す。ヒストグラムから、透視図の解像度を十分に上げて有効画素数を増やした場合、誤差の分布は平均値 0 の正規分布に近づくことが分かる。このことから本手法の誤差は系統的なものではないことが推測される。

次に、本手法による誤差の標準偏差（標準誤差） σ を次式(2.5)から求める。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_D} err_i^2}{n_D}} \quad (2.5)$$

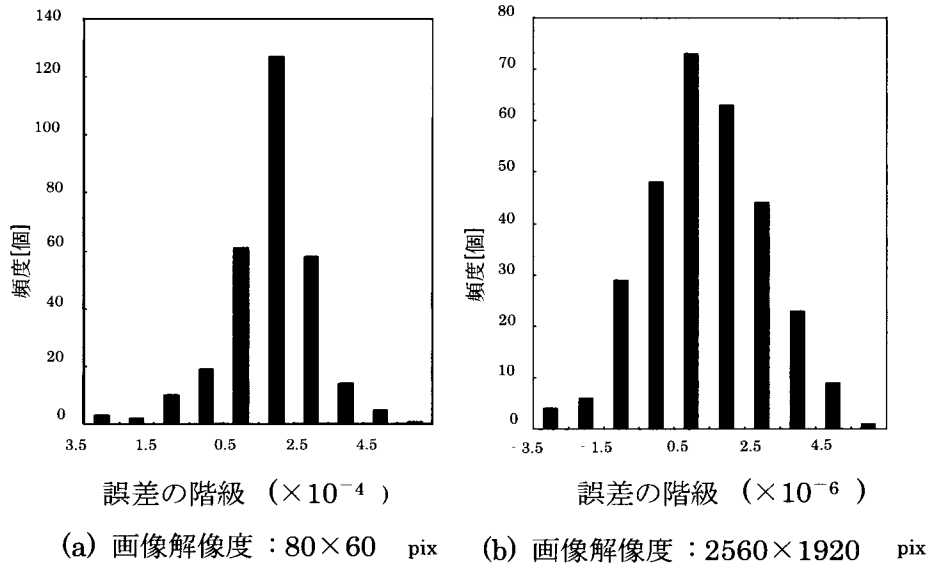


図 2.9 誤差のヒストグラム (メッシュ分割：10×10)

ここに,

σ : 誤差の標準偏差 [—]

n_D : 分割した図形要素の総数 [個]

次に, 本手法の誤差がデジタル画像を用いることによる量子化の誤差²⁻²¹⁾のみに起因するものと仮定して, 理論的な標準誤差 σ_{th} を式(2.6)のように推定した. 式(2.6)の導出過程については付録 2.2 に示す.

$$\sigma_{th} = \frac{n_T^{-3/4} n_D^{-1/4}}{\sqrt{48}} \quad (2.6)$$

ここに,

n_D : 分割した図形要素の総数 [個]

n_T : 投影画像上の有効画素数 [個]

各条件下での標準誤差の大きさと, デジタル画像の量子化誤差に起因するとして求めた式(2.6)とを比較した結果を図 2. 10 に示す. 図 2. 10 から, 誤差の大きさの目安を与える式として式(2.6)が有効であることがわかる.

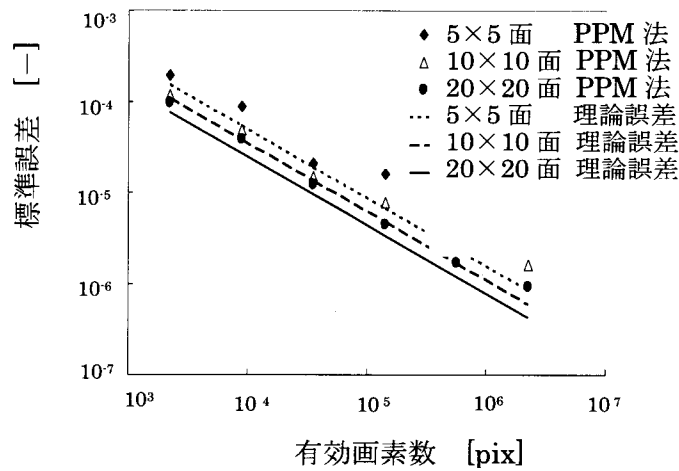


図 2. 10 角錐投影法の標準誤差と理論的な標準誤差の比較

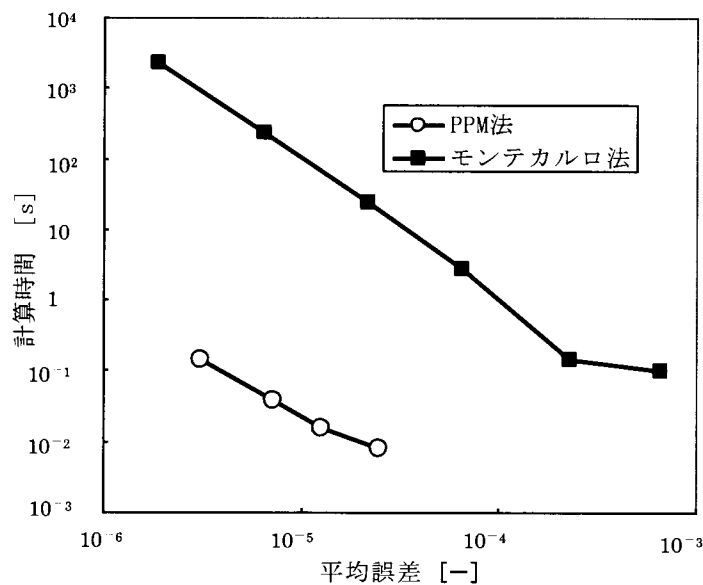


図 2. 11 角錐投影法とモンテカルロ法の計算時間の比較

2.5 計算時間の比較

メッシュ分割数 10×10 とした場合に、PPM 法およびモンテカルロ法により形態係数を求めた時の計算時間の比較を、図 2.11 に示す。計算機の CPU は Pentium4 3.40GHz を使用し、PPM 法の計算では描画ツールとして open GL, グラフィックアクセラータとして RADEON X800XT (ATI Technologies Inc.) を用いた。図の横軸は式(2.4)で表される面要素ごとの誤差の絶対値の平均値を表しており、この場合形態係数の和が 0.25 の空間に 300 の面要素があるため面要素ごとの形態係数の平均値はおよそ 10^{-3} である。したがって、誤差 10^{-5} は相対誤差で 1 % にあたる。PPM 法の計算時間は透視投影図の描画時間と、色情報から各画素を面要素に振り分ける時間の和であるが、描画時間が全体の計算時間に占める割合は、図でもっとも誤差の大きい 200×200 画素の画像を使用した場合で 20%, もっとも誤差の小さい 1000×1000 画素の画像を使用した場合で 2 % であり、グラフィックアクセラータを使用したことによる計算時間の短縮効果が大きいことがわかる。モンテカルロ法との比較では、同一の誤差に対する PPM 法の計算時間は $10^{-3} \sim 10^{-5}$ となっており、本手法はモンテカルロ法に比べて、飛躍的に計算時間の短縮化が期待できる。

なお、ここでのモンテカルロ法にはもっとも初歩的なものを用いているが、形態係数が満たすべき条件である相反則と総和則を用いて計算時間を短縮する方法が提案されている²⁻¹⁰⁾。また、ここでの計算対象は床面中央部対天井・側壁という単純な幾何学形状であるが、より実用的な複雑形状に対しては、面要素をグルーピングすることで光子の衝突判定を効率よく行う方法²⁻¹⁷⁾も提案されている。複雑形状を対象とした、これらの改良モンテカルロ法と本章で提案する手法との定量的な比較は今後の課題であるが、改良法の原理から考えて、本章で示した手法が達成した $10^{-3} \sim 10^{-5}$ に匹敵する計算時間の短縮は考えられない。また、2.3 に示したモデルでは床面中央部と、そこから離れた位置にある各面要素との間の形態係数を計算しているので、床面中央部の一点のみに

対しする計算をしているが、形態係数を計算する面要素対が近接している場合、本章にて提案する手法では計算点を複数とる（面要素を再分割する）必要があるのに対し、モンテカルロ法では放射粒子の出発点をランダムに選ぶことでこの問題を回避することができる。このような条件下での手法の定量的な評価も今後の課題であるが、このような条件はごく一部の面要素間でのみ生じるため、全体の計算時間に与える影響は小さいものと考えられる。

2.6. 結言

透視投影図を利用する形態係数の算出手法として、投影面に四角錐を用いた角 PPM 法を提案した。本章では、PPM 法で用いるパラメータの導出過程を示すとともに、求めた形態係数の精度について評価した。その結果、本手法の誤差は主として量子化誤差に起因するものであり、必要な精度に応じた解像度の透視図を用いれば、実用上問題のない精度で形態係数を算出できることが明らかとなった。透視図を用いた形態係数の算出では、通常の CG ソフトウェアが必ずもっている透視図作画機能を利用でき、専用のグラフィックス・ハードウェアを用いて高速処理できる利点がある。同一精度を得るための計算時間をモンテカルロ法と比較した場合、CG を用いる形態係数の計算では、複雑な幾何形状に対しても面倒な放射粒子の衝突面判定アルゴリズムを CG ソフトウェアに任せることができるため、大幅な短縮が達成できる。本章で提案した PPM 法は、投影面に半立方体の 5 面を用いる Hemi-Cube 法に比べて、投影面の数が少なく各投影面がすべて同形状になるため、プログラムが簡単になるという利点も有している。

付録 2.1 幾何学的関係式の導出

図 2.3 における微小面積 dS' と、投影面 CDE 上へ投影された微小面積 dS'' との幾何学的関係を図 2.12 に示し、これらの関係式の導出過程を示す。

図 2.12(a) の立面図における円弧 $L1$ と垂線 $L2$ 、および $L2$ と投影面上に投影された線分 $L3$ の関係は式(2.7)となる。

$$L1 = L2 \cos \theta_{xy}, L2 = L3 \cos \theta_{xy} \quad (2.7)$$

ここに、

$L1$: 点 O を中心とする単位円上の円弧 [—]

$L2$: 点 B からの垂線 [—]

$L3$: 投影面上に投影された線分 [—]

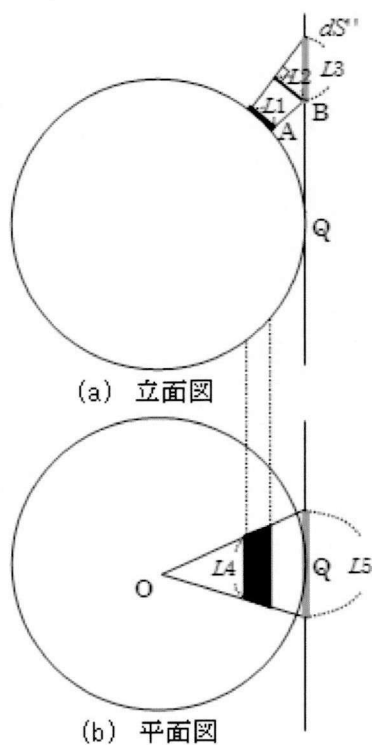


図 2.12 dS' と dS'' を含む断面図

すなわち,

$$\frac{L3}{L1} = \frac{1}{\cos^2 \theta_{xy}} \quad (2.8)$$

が導け、 dS'' の dS' に対する投影面上の画像中心 Q から半径方向への拡大率は、 $1/\cos^2 \theta_{xy}$ である。また、平面図からは式(2.9)が導ける。

$$\frac{L5}{L4} = \frac{1}{\cos \theta_{xy}} \quad (2.9)$$

ここに,

$L4$: 微小面積 dS' に対する平面図上での線分 [—]

$L5$: 微小面積 dS'' に対する平面図上での線分 [—]

これより投影による円周方向の拡大率は、 $1/\cos \theta_{xy}$ である。式(2.8)および式(2.9)から,

$$dS' = dS'' \cos^3 \theta_{xy} \quad (2.10)$$

が成立する。よって、式(2.10)を式(2.1)に代入することで、式(2.3)が得られる。

$$dF = \frac{dS'' \cos \theta \cos^3 \theta_{xy}}{\pi} \quad (2.3)$$

ここで、式(2.3)を用いて、投影面画像の各点に対する形態係数を求めるため、投影面画像上の画素の位置から θ と θ_{xy} を計算する式を導くことにする。

図 2.3 における 1/4 半球面は、図 2.13 に示す高さ 2、底面 $2\sqrt{2}$ の二等辺三角形 CDE の内部（外周を含む）に投影される。このとき、透視投影図を得るのに必要な視点 O からの視野角は垂直方向 90 度、水平方向 $2\tan^{-1}\sqrt{2} = \text{約 } 110 \text{ 度}$ である。この二等辺三角形 CDE の底辺の中心を原点 O' として、図 2.13 のように座標 (ξ, η) をとる。

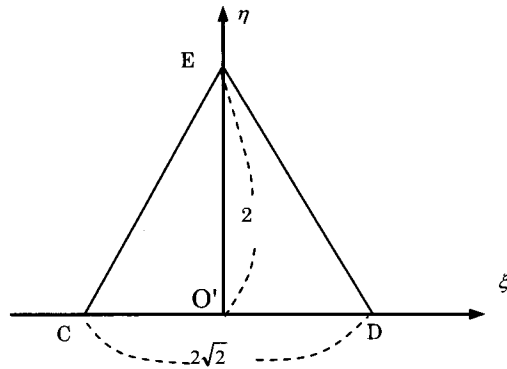


図 2.13 1/4 半球の投影面

図 2.3 のように (x, y, z) 座標系を z 軸まわりに $\pi/4$ 回転させた (x', y', z) 座標系をとると, $\cos \theta_{xy}$ は次のように求めることができる. (x', y', z) 座標系での視線 OQ の方向余弦 $(\lambda_0, \mu_0, \nu_0) = (1/\sqrt{2}, 0, 1/\sqrt{2})$ であり, 投影面上の座標 (ξ, η) と (x', y', z) 座標系との関係から, 式(2.11)となる.

$$\begin{aligned} x' &= \sqrt{2} - \eta \cos \frac{\pi}{4} = \sqrt{2} - \frac{\eta}{\sqrt{2}} \\ y' &= -\xi \\ z &= \eta \sin \frac{\pi}{4} = \frac{\eta}{\sqrt{2}} \end{aligned} \quad (2.11)$$

ここに,

(x', y', z) : 図-3 の (x', y', z) 座標系の座標点 [－]

(ξ, η) : 図-13 の (ξ, η) 座標系の座標点 [－]

したがって, 視線 OB の方向余弦を (λ, μ, ν) としたとき, 式(2.12)から, $\cos \theta_{xy}$ を求めることができる.

$$\cos \theta_{xy} = \lambda \lambda_0 + \mu \mu_0 + \nu \nu_0 \quad (2.12)$$

ここに,

$(\lambda, \mu, \nu) : (x', y', z)$ 座標系の視線 OB の方向余弦 [－]

$(\lambda_0, \mu_0, \nu_0) : (x', y', z)$ 座標系の視線 OQ の方向余弦 [－]

なおここで、 $R = \sqrt{x'^2 + y'^2 + z^2}$, $\lambda = x'/R$, $\mu = y'/R$, $\nu = z/R$ である。また、 $\cos \theta$ は z

軸との関係から、式(2.13) と求めることができる。

$$\cos \theta = \nu \tag{2.13}$$

付録 2.2 標準誤差の理論値 σ_{th} の導出

出口²⁻²¹⁾によると曲線で囲まれた図形の面積をデジタル画像上の画素数で近似したときの誤差の分散は、式(2.14)で与えられる.

$$\sigma_{th}^2 = \frac{M}{12N_u^4} \quad (2.14)$$

ここに,

M : 図形の周囲点画素数 [個]

N_u : 単位長さに対する分割数 [個]

透視図を用いた形態係数の計算では $\cos \theta \cos^3 \theta_{xy}$ の重みがかかり, 単純な面積計算とは異なるが, 誤差の大きさのもっとも粗い近似として, これらを見捨て面積計算時の量子化誤差の理論を適用する. このとき, n_T を投影画像上の有効画素数 (二等辺三角形内の画素の総数) として, 単位長さに対する分割数 N_u を, 全体の面積 0.25 を画素数 n_T の正方形で表した場合と等価と考えると, 式(2.15)となる.

$$N_u = \sqrt{\frac{n_T}{0.25}} = 2\sqrt{n_T} \quad (2.15)$$

ここに,

n_T : 投影画像上の有効画素数 [個]

図形の周囲点の画素数 M は, 各図形要素を, 平均画素数 n_T/n_D をもつ正方形で近似すると, 式(2.16)が得られる.

$$M = 4 \sqrt{\frac{n_T}{n_D}} \quad (2.16)$$

これらを式(2.14)に代入すれば, 面積計算における標準誤差 σ_{th} を式(2.17)のように求めることができる.

$$\sigma_{th} = \frac{n_T^{-3/4} n_D^{-1/4}}{\sqrt{48}} \quad (2.17)$$

参考文献

- 2-1) R. Siegel and J. R. Howell : Thermal Radiation Heat Transfer, 748～791, McGraw-Hill (1972)
- 2-2) A. B. Shapiro : Computer Implementation, Accuracy, and Timing of Radiation View Factor Algorithms, Trans. ASME, 107, 730～732 (1985)
- 2-3) H. C. Hottel and A. F. Sarofim : Radiative Transfer, 47～50, McGraw-Hill (1967)
- 2-4) G. P. Mitalas and D. G. Stephenson : FORTRAN IV Program to Calculate Radiant Interchange Factors, DBR-25, Division of Building Research, National Research Council of Canada (1966)
- 2-5) H. C. Hottel and A. F. Sarofim : Radiative Transfer, 31～39, McGraw-Hill (1967)
- 2-6) J. R. Howell and M. Perlmutter : Monte Carlo Solution of Thermal Transfer Through Radiant Media Between Gray Walls, Trans. ASME, 86, 116～122 (1964)
- 2-7) 幾島毅・鈴木邦彦・吉田一：モンテカルロ法による熱輻射形態係数の算出 計算精度および計算時間について面積積分法との比較，日本原子力学会誌，30, 6, pp.548～556 (1988)
- 2-8) 谷口博・W. J. Yang・工藤一彦・黒田明慈・持田明野：パソコン活用のモンテカルロ法による放射伝熱解析，160～216，コロナ社 (1988)
- 2-9) 大森敏明・谷口博・工藤一彦：室内ふく射環境の解析法の開発と床暖房への適用，空気調和・衛生工学会論文集，42, 9～18 (1990)
- 2-10) 村上周三・小林光・加藤信介・大森敏明・崔棟皓：対流場，放射場の連成シミュレーションによる冷房室内の温熱環境解析 第2報—モンテカルロ法による形態係数の精度の検討と連成計算の複雑形状室内への適用，空気調和・衛生工学会論文集，59, 95～104 (1995)

- 2-11)尾関義一・斉藤恒洋・大柿聡：複雑な内部形状を有する大規模メッシュ対応型放射伝熱計算手法に関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集, 62, 101～110 (1996)
- 2-12)P. O. Fanger, O. Angelius and P. Kjerulf-Jensen : Radiation Data for the Human Body, ASHRAE Trans., Vol. 76-II, 338～373 (1970)
- 2-13)R. Siegel and J. R. Howell : Thermal Radiation Heat Transfer, 219～220, McGraw-Hill (1972)
- 2-14)G.M.Maxwell, M.J.Bailey and V.W.Goldschmidt: Calculation of Radiation Configuration Factor using Ray Casting, Computer Aided Design, 18,No.7, 371-399 (1986)
- 2-15)F. C. Michael and P. G. Don : The Hemi-cube: A Radiosity Solution for Complex Environments, ACM Computer Graphics (SIGGRAPH), 19, No. 3, pp.31～40 (1985)
- 2-16)A.Voigt,N.Hanssen,C.Weichmann: The Radiosity Equation for Solving Global Heat Transfer in Industrial Furnaces, Mathematical and Computer Modeling,39, 145-150 (2004)
- 2-17)今野雅・倉淵隆・鎌田元康：放射熱伝達解析における形態係数の計算法について
の研究, 日本建築学会環境系論文集, 572, 17～22 (2003)
- 2-18)MAYA Heat Transfer Technologies 社ホームページ <http://www.mayahtt.com/>
- 2-19)OpenGL Architecture Review Board, W. Mason, N. Jackie and D. Tom, アクロス訳：OpenGL プログラミングガイド第 2 版[新装版] The Official Guide to Learning OpenGL, Version1.1, 373～393, ピアソン・エデュケーション(1997)
- 2-20)塩谷憲司・加賀昭和・近藤明・井上義雄：CG 技術を用いた形態係数の計算法, 第 18 回数値流体力学シンポジウム講演論文集, 1～6 (2004)
- 2-21)出口光一郎：デジタル画像計測における面積画素について, 計測自動制御学会

論文集, 27, No. 2, 227~229 (1991)

第3章 日射の高速計算法

3.1 緒言

日射の影響を考慮した温熱環境解析が現在盛んに行われている。都市街区における温熱環境計算を行い、温熱快適性指標を用いて屋外人体の快適性を評価した結果からは、日射の有無が快適性に大きく影響を与えるという知見が報告されている³⁻¹⁾。また、日射は屋外のみならず室内の温熱環境にとっても日射は非常に大きな影響を与えている。特に近年、全面ガラス張りのオフィス空間や、ガラス窓を多用したデザイン性あふれる建築物が増えており、窓面設計での日射受熱と温熱快適性の最適化研究もされている³⁻²⁾。日射計算は、CFDにより温熱環境解析を行う際においても、空調とともに重要な要素である。屋外環境や室内空間において日射計算を行うには、直達日射および散乱日射の影響を受ける面要素を算出する必要がある。これらの面要素を算出するには、太陽光線方向に多数の粒子線を発生させる方法^{3-3), 3-4)}が一般的であるが、複雑な形状を対象とした場合には、面要素毎に周囲の建物や壁面、障害物により構成される他の面要素との間で、粒子線の衝突関係を求める必要があるため多くの計算時間を要し、高速な計算が求められる産業界では問題となっている。

輻射計算に必須となる形態係数を高速に算出する手法としては、第2章に示したようにCG技術を用いた形態係数の高速計算法であるPPM法³⁻⁵⁾を開発し、実用化の可能性も示した^{3-6), 3-7)}。そこで本章では、CG技術を利用し画像情報とCFDの計算で必要となる面要素単位での直達日射の影響の情報を一意に結びつける方法を検討する。ここでは、CGの平行投影図作画機能により得られる2次元画像から、3次元のCFD計算に用いるための直達日射を計算する方法を示し、その誤差を理論的に解析する。さらに、開発した計算法を窓面を有する簡単な室内モデルに応用して実用化の可能性を示すとともに、生じた誤差を理論値と比較する。また、従来から用いられている一般的な粒子

追跡法による日射計算法との計算時間の比較を行い、CFD 計算を前提とした直達日射解析計算の根幹部分に本手法を適用することにより日射の影響を加味した計算体系が大幅に高速化出来ることを示す。

3.2 直達日射計算の原理

3.2.1 従来法と提案する手法との関係

熱量を扱う日射計算は、太陽の直射光による日影を扱う日照計算と深く関わっている。日照計算では、これまで日照関係図表や日影図、太陽位置図^{3-8), 3-9)}などの手法が用いられてきた。コンピュータのCG技術を用いて、建物形状に色情報を与え、室内の一点に対して、太陽位置に近い物体から重ね描きして射影図を描き、太陽位置の色情報を読むことで日照検討を自動化した研究がある³⁻¹⁰⁾。また、同様の方法で計算点周りの射影図を描き、室外部の建物形状を考慮することができる昼光環境の可視化システムも開発されている³⁻¹¹⁾が、これらの手法はいずれも室内の一点に対する日射の計算手法として提案されたものであり、室全体を対象とする温熱環境計算に適用するには極めて非効率である。

CFD と連携した計算を実施するには日射が当たる面要素を算出する必要がある。従来の方法では、太陽から光線方向に粒子を発生させた場合は、光線数により要素面の日向か日陰の判定に大きな誤差がでることもあり、面要素から太陽方向に多数の粒子を発生させ他の物体との衝突判定を行うことにより陰面消去を行う方法^{3-3, 3-4)}が一般的である。しかし、陰面消去アルゴリズムを自ら作成する必要があるためプログラムが複雑となり、複雑な形状を有する解析では日射が当たる面要素を算出するために多くの計算時間を要している。また採光計算に用いられているCGソフトを利用することにより、得られた情報を日射熱負荷としてCFD解析に取り入れる研究^{3-12), 3-13)}も行われているが、採光ソフトから得られる情報を、改めてCFD解析に必要な情報に再定義する必要

がある。このように、CG により得られる情報を日射の影響を加味した CFD 計算と連成して解析を行うための手法についての研究はこれまで報告された例がない。そこで CG が 3 次元の幾何形状処理を専門とし、高速図形処理に特化したグラフィックス・ハードウェアも一般的に普及していることに着目し、グラフィックス・ハードウェアを介した CG 技術を用い、平行投影作図機能で得られる二次元投影画像から、CFD 計算に必要なメッシュ分割面毎の直達日射の影響情報を自動的に生成するための汎用的な方法を検討する。CFD 計算を前提とした直達日射計算における根幹部分に本章で提案する CG を応用した手法を用いることにより、最適な陰面消去を高速かつ自動で行うことで、直達日射計算が極めて高速に実現できることを示す。なお、日射計算に必要となる散乱日射や反射日射の影響については、第 2 章に示した PPM 法³⁻⁵⁾（角錐投影法）を用いて要素面間の形態係数を求めておくことによりその影響を考慮することができるため、本章では直達日射への適用に絞って基本原理の検討を行う。

3.2.2 CG 技術を用いた直達日射計算の原理

(1) 投影画像と面要素の関連付け

図 3.1 に、新たに開発した直達日射計算の原理となる、CG 技術による平行投影画像と面要素の関連付け概念を示す。まず対象となる空間と対象物体を含む 3 次元解析領域のメッシュ分割を行う。次に、解析対象となる物体表面の面要素のみをピックアップし、ナンバリングを行うとともに、各面要素に特定の RGB 値を 3 成分とする色情報を付加する。この際、RGB の 3 成分が判れば面要素の番号が識別できるよう規則付けを行う。これにより、平行投影画像上の画素毎の RGB 値から、各画素が属する面要素が識別できる。

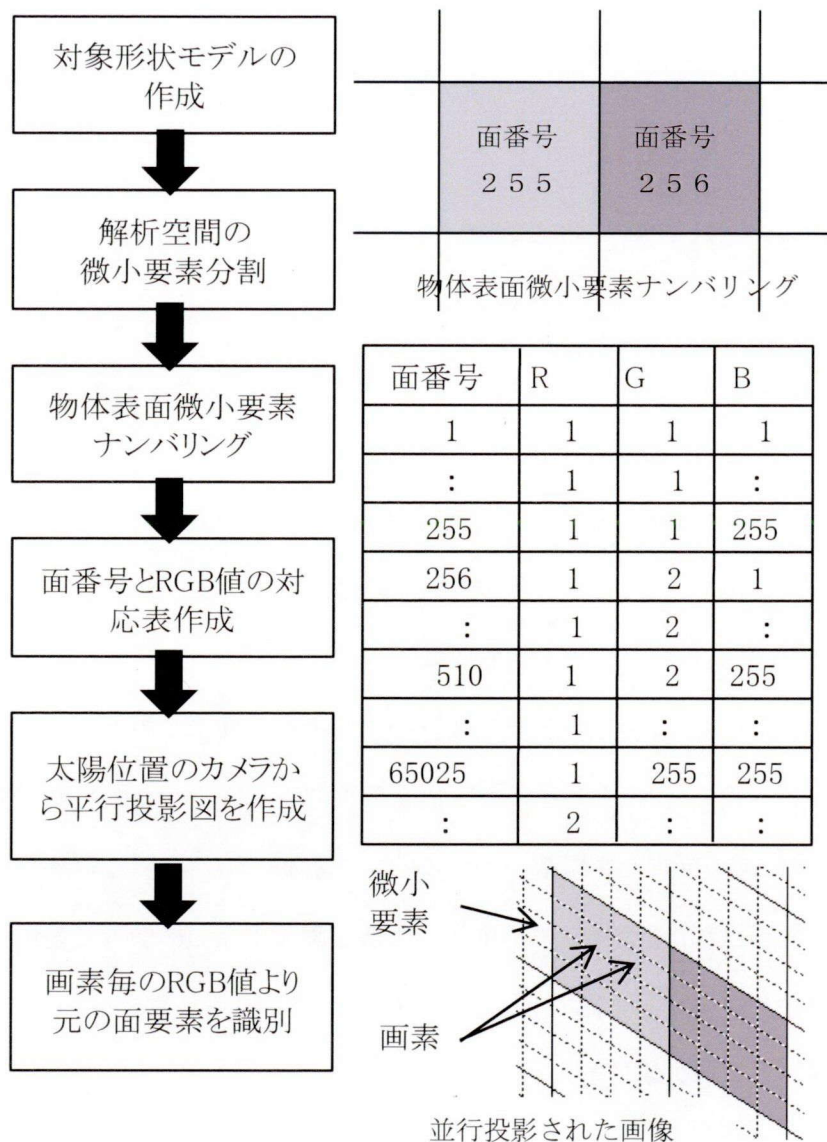


図 3.1 投影法と微小要素面の関連付け

(2) 各面要素への入射の有無の判定

① 対象となる空間に物体をすべて配置した状態で太陽方向からの平行投影図を描画し、画像上で解析対象となる面要素に対応した色情報をもつ画素数の、面要素ごとの値 n_i (i は面要素番号)を求める。

② 対象物体の中でもっとも太陽に近い側にある物体をひとつ取り除いてふたたび平行投影図を描画し、①で抽出されている面要素についてのみ、画像上の画素数の合計を再度計数する。

③ ②の操作を対象物体がひとつになるまで繰り返し、各面要素ごとに得られた n_i の最大値を、その面要素が他の物体により遮蔽されていない場合の画像上での画素数 N_i であるとする。

以上の手順により、各面要素は以下の3通りに分類される。

- i) 手順①で抽出されなかった $n_i = 0$ の直達日射の入射がない面要素
- ii) 手順①で求めた n_i が N_i に一致する、全体に直達日射が入射する面要素
- iii) $n_i < N_i$ 部分的に直達日射が入射する面要素

なお、後述するように、メッシュ分割された面要素の平行投影画像上での大きさは理論的に計算することができるので、 N_i の値の近似値を理論的に求めることが可能である。その場合には平行投影図の描画と画素数の計数に関する手順は①のみでよいが、 N_i の実際の値と理論的に計算された近似値との間には、画像を画素単位の解像度で表現する際に生じる量子化誤差が含まれ、上記の ii) の場合の判定にも誤差が生じる。

図 3.2 に CG 技術を用いた日射の高速計算法の概要をフローチャートで示す。

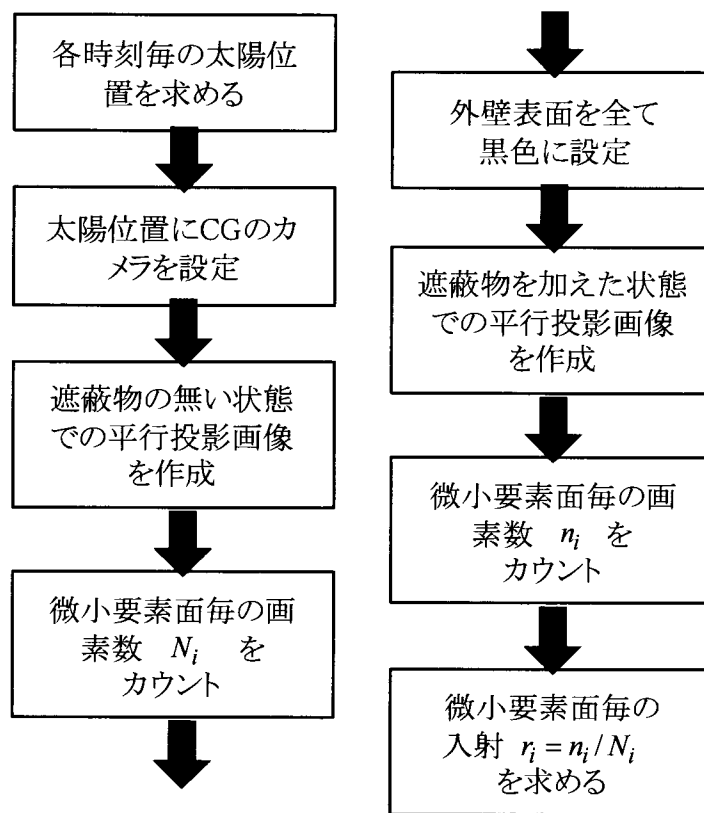


図 3.2 CG 技術による日射計算法のフロー

3.3 室内環境評価のための直達日射計算

3.3.1 投影法

図 3.3 は、建物の窓面を通して日射が室内に入射する場合を示している。窓面の中心点 0 を通る自転軸に平行な直線を自転中心と考え、点 0 を原点とし、窓面水平方向に x 軸、鉛直方向に y 軸、法線方向に z 軸をとる。式(3.1)、(3.2)から太陽高度 h と方位角 α が求まるので、これを CG の視線方向に設定する。

$$\sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t \quad (3.1)$$

$$\cos \alpha = \frac{\sin h \sin \varphi - \sin \delta}{\cos h \cos \varphi} \quad (3.2)$$

ここで, φ は緯度, δ は日赤緯, t は時角である. CG における平行投影では, 視線方向に垂直な面を平行投影面とし, 投影する範囲を図 3.3 の E, F, G, H のように設定する.

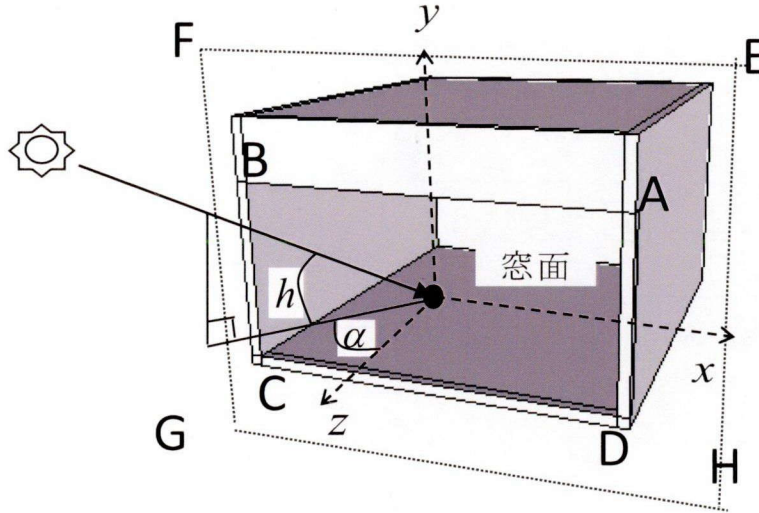


図 3.3 太陽位置と建物モデルの関係

ここでは室内空間が計算対象であるので, 窓面内のみ (厳密には面要素の大きさの程度だけ窓面を拡大した範囲) が平行投影の対象である. 図 3.3 の xyz 座標系で, 窓面長方形の 4 頂点を $A(x_1, y_1, 0), B(-x_1, y_1, 0), C(-x_1, -y_1, 0), D(x_1, -y_1, 0)$ としたとき, これらの点は同次座標系の式(3.3)により図 3.4 に示した日射方向逆向きに z' 軸をもつ $x'y'z'$ 座標系の $A'(x'_1, y'_1, z'_1), B'(-x'_1, y'_2, z'_2), C'(-x'_1, -y'_1, -z'_1), D'(x'_1, -y'_2, -z'_2)$ に回転変換されて, 投影される.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos -h & -\sin -h & 0 \\ 0 & \sin -h & \cos -h & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos -\alpha & 0 & \sin -\alpha & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin -\alpha & 0 & \cos -\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

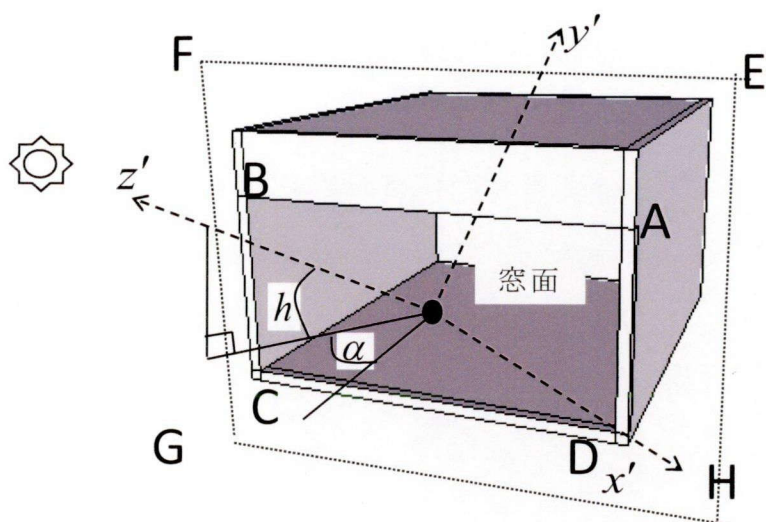


図 3.4 回転変形された座標系

よって，窓面中心が投影された点 O'' を原点にした 2 次元 $x''y''$ 座標系を図 3.5 のようにとると，窓面 ABCD は投影面 EFGH 上で平行四辺形 $A''B''C''D''$ に投影される．

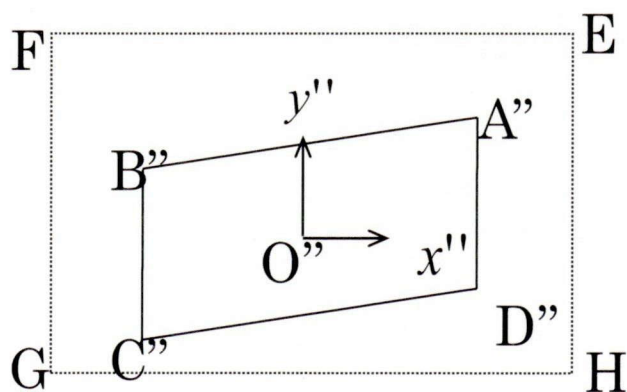


図 3.5 投影された窓面形状

平行投影図を作画するのに 3 次元 CG の標準グラフィックス・ライブラリ OpenGL を用いる。グラフィックス・ハードウェアを経て平行投影図を描き平行四辺形 A”B”C”D”内の各画素の色情報から、どの面要素に日射が到達しているかを区別する。

3.3.2 直達日射量

3.3.1 で述べた手順により、平行投影画像から各面要素に対する画像上での画素数、 n_i および N_i を求め、太陽光に垂直な面に入射する単位面積あたりの入射光量を 1 としたときの相対的な入射光量 I_i を式(3.4)で計算する。

$$\begin{aligned} \text{i) } n_i &= 0 \quad \text{のとき, } I_i = 0 \\ \text{ii) } n_i &= N_i \quad \text{のとき, } I_i = \beta_i A_0 \\ \text{iii) } n_i &< N_i \quad \text{のとき, } I_i = \beta_i (n_i / N_i) A_0 \end{aligned} \tag{3.4}$$

ここで、 A_0 は面要素の面積、 β_i は、式 (3.21) (付録 3-1 参照) で与えられる、各面要素の外向き法線ベクトルと太陽光ベクトルのなす角の余弦である。式(3.4)により入射光量 I_i が定義できれば、その後の計算は従来と同様の手法^{3-3), 3-4)}により求めることができるため、本章では割愛する。

3.4 散乱日射および反射日射の計算

3.4.1 散乱日射

3.3 節では、直達日射の到達要素面を CG 技術により求める方法を示した。散乱日射に対しては、対象となる室内表面の各要素から天空が見える割合（天空に対する形態係数）が必要となる。そのため、第 2 章で示した PPM 法により予め対象となる要素と窓面の形態係数を求める。この時、カメラの視点方向は必ず水平面よりも上方を向く方向象限にとることにより、天空面の形態係数を定義する。垂直壁面を対象要素とする場合には、PPM 法により角錐投影画像を作成するのは、水平面より上方の 2 象限に対して

カメラ方向を設定することになる。なお、散乱日射については天空面の輝度分布の影響も考えられるが、本章では天空面での輝度分布は一様であると仮定した。

3.4.2 反射日射

直達日射が到達した要素面において反射された日射成分は、本来であれば表面の材料特性によって反射指向特性を示すが、本章では反射成分は指向性のない一様拡散を示すものと仮定した。このような仮定の下では、直達光の反射成分は対象要素から見た周囲要素への形態係数の比で割り振られると仮定することができるため、第 2 章で示した PPM 法により予め各要素間での形態係数を求めておくことにより、反射光の影響を考慮することが可能となる。多重反射を考慮する場合も、形態係数による反射光の分配を順次繰り返すことで対応が可能である。

3.5 誤差評価と誤差の理論

3.5.1 誤差の発生要因

3.3.2 で示した i), ii) の場合には、入射光量の計算に誤差は生じないが、iii) の場合には、図 3.6 のように面要素内に他の物体の影のラインが生じ、境界線により分割された面要素の一部分の面積を画素単位 n_i で近似することによる量子化誤差が発生する。

これらの誤差は投影図を表示する解像度により影響を受けるため、解像度と計算誤差の関係を調べ、本手法の信頼性を確認する。

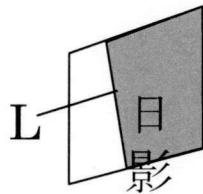


図 3.6 日影が微小要素面を横切る状態

3.5.2 誤差の評価法

3.3.2 で示した iii) の場合の誤差の大きさを

$$E_i = \beta_i (r_i - r_{i,true}) \quad (3.5)$$

$$r_i = \frac{n_i}{N_i} \quad (3.6)$$

$r_{i,true}$: r_i の真値

で定義する． E_i は、面要素が太陽光に垂直な場合に入射する入射光量を基準とした、入射光量の計算値の相対誤差を表している．

3.5.3 誤差の理論値

ここでは簡単のために、面要素が正方形の場合の誤差の理論値を求める．各平面上の正方形面要素は、投影図上でそれぞれ図 3.7 の形になる．

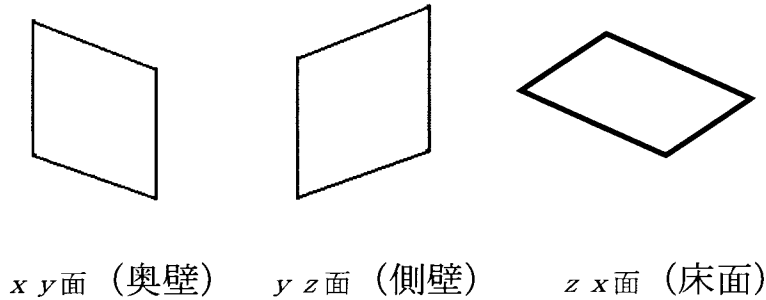


図 3.7 投影図上での各平面図

これらの面要素の一部のみに日射が照射するとき、図 3.6 の白抜き部分の面積割合を画像から求めて r_i を算出するが、ここで面積を画素数 n_i で近似することによる量子化誤差が発生する．

(1) 線分 L が座標軸と平行でない場合

出口によれば、白抜き部分の面積を画素数で近似するときの誤差の平均値はゼロ、分散は、

$$S = \frac{1}{12} \frac{M}{N^4} \quad (3.7)$$

となる^{3・14)}．ここで、 M は線分 L が横切る画素の数、 N は画像の解像度で、いま窓の幅 W_x を代表長さとして無次元化した座標で面積を評価するものとすれば、 $N=N_{W_x}$ (画像上で窓の幅に対応する画素数) となる．線分 L の長さ L は面要素のどの部分を L が通るかで変化するが、その最大値は図 3.8 に示すように長い方の対角線 L_{max} となるので、 L の平均値を

$$L_{ave} = \frac{1}{2} L_{max} \quad (3.8)$$

で近似し、

$$M = L_{ave} N_{W_x} \quad (3.9)$$

を用いれば、面積の誤差の標準偏差の理論値は、

$$\sigma_{A,th} = \sqrt{\frac{L_{max}}{24N_{W_x}^3}} \quad (3.10)$$

となり、式(3.4)の E_i の標準偏差の理論値は、

$$\sigma_{E,th} = \frac{\sigma_{A,th}}{A_0} \quad (3.11)$$

となる．

(2) 線分 L が座標軸と平行になる場合

この場合、図 3.9 に示すように幅 b が画素単位で変化するので、 b の誤差は ± 0.5 画素の間で均等に分布すると考えられる．このときの b の誤差の平均値はゼロ、標準偏差は

$$\sqrt{\int_{-1/2}^{1/2} x^2 dx} = \frac{1}{12} \text{ (pix)} \quad (3.12)$$

となるので、無次元で表した面積の誤差の標準偏差は

$$\sigma_{A,th} = \frac{1}{12} \frac{a}{N_{Wx}} \quad (3.13)$$

となる.

L_{max} は、図 3.7 に示した面要素の投影図上の形状を計算することにより、式(3.22) (付録 (3.1) 参照) を用いて求められる.

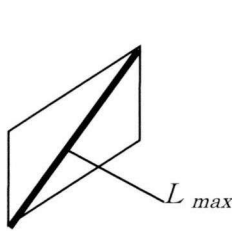


図 3.8 平行でない場合

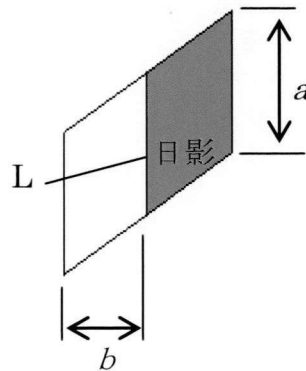


図 3.9 平行となる場合

3.6. 室内モデルへの適用例

3.6.1 室内モデル

例とする日射計算の建物モデル図 3.10 は、南窓面を有し、幅 3.6m、奥行き 4m、高さ 2.4m、窓面高さ 1.7m、の建物形状である。室内には机を模擬した障害物を配置する。建物モデルは各面要素の 1 辺が 0.1m となるよう、 $36 \times 40 \times 24$ のメッシュ分割を行う。CG による平行投影画像作成時の注視点は窓面の中心とする。図 3.11 は 12 月 22 日冬至における東京の位置設定を行い、14 時の平行投影画像を示している。なお、ここでは投影図を時計回りに 45 度回転させて表示している。これは、3.5 の議論で明らかのように、面要素を分割する線分が画像上で水平あるいは垂直になるときに量子化の誤差が大きくなるため、これを避けるための措置である。以下に示す計算例ではこの回転角を 45 度一定としたが、計算時刻が定まれば図 3.7 の面要素の形状は計算できるの

で、面要素を分割する線分が画像上で水平あるいは垂直とならない回転角を、時刻ごとに設定することができる。

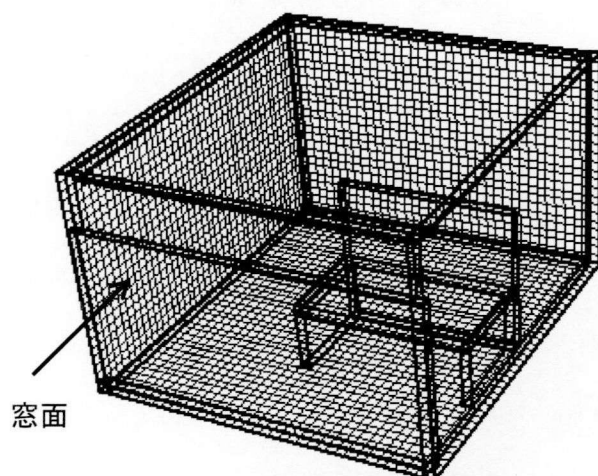


図 3.10 日射計算の室内モデル

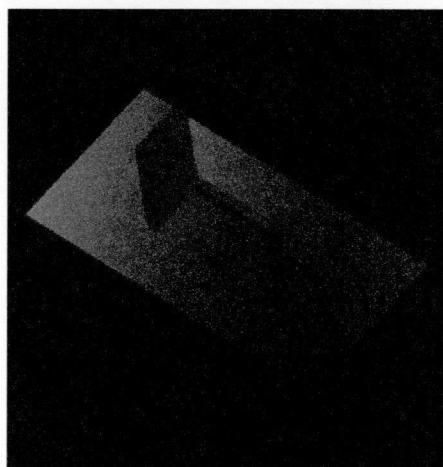


図 3.11 冬至 14 時：回転された投影画像

3.7 誤差評価結果と計算時間

図 3.10 で示した建物モデルを対象として，本章で提案する手法による直達日射の影響を受ける面要素の算出に要する時間と，式(3.5)で定義される，面要素の一部分のみに直達日射が入射する場合の入射光量の誤差を，一般的な日射判定に用いられる粒子法と比較する．なお，ここでは入射光量の評価対象面を床面・側壁面のみとし，机は対象としなかった．したがって，各時刻に用いた平行投影図は，対象物をすべて含む場合の図と，障害物（窓枠，机）を取り除いたあとの図の2枚である．CG技術により求めた直達日射による受熱の影響を受ける面要素は，粒子法により求めた面要素と一致していた．

粒子法では，各面要素を 5×5 ， 10×10 ， 16×16 に再分割したうえ各再分割面の中心から太陽位置方向に粒子を射出する．粒子法の計算時間を短縮するため面要素の外向き法線ベクトルと太陽方向の方向ベクトルの関係から太陽光が入射する可能性がある場合にのみ粒子を射出し高速化を図った．CGの解像度(画素数)は， 500×500 ， 1000×1000 ， 2000×2000 の3通りとした．この解像度は，現状での標準的なパーソナルコンピュータの解像度を考慮して設定した．いずれの場合にも，正面から見たときの窓面が画像上ではほぼ一杯に表示されるように画像の大きさと縮率を定め，計算時刻によっては変化させなかった．計算時刻と，各時刻における，一部分にのみ直達日射が入射する面要素数を表 3.1 に示す．

表 3.1 誤差の評価対象要素数

	冬至		春秋分	
	床面	側壁	床面	側壁
8時	55	45	43	27
10時	67	46	33	26
12時	32	0	32	0
14時	81	25	33	21
16時	72	45	44	22

ここで、ここで式(3.5)の評価で必要となる $r_{i,true}$ の値には、粒子法による面毎の再分割数が、 100×100 と十分大きい場合の値を用いた。

図 3.12 に解像度が 500×500 , 2000×2000 の場合に(3.5)式で定義された誤差の分布の例（春秋分 8 時・床面データ）を示す。図 3.12 より誤差の大きさは平均値をゼロとしてほぼ正負対象に分布しており、3.2 で示した誤差の理論と定性的に一致している。

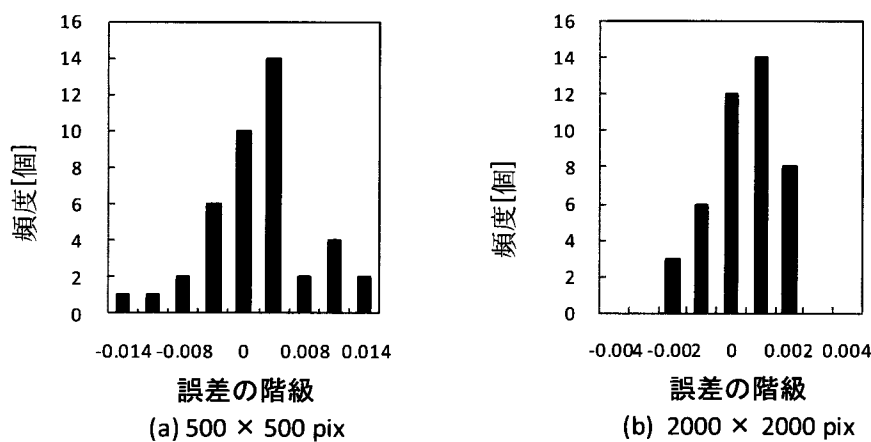


図 3.12 解像度による誤差の分布

そこで、以下では誤差の大きさを(3.11)式に相当する誤差の標準偏差で評価する。以下の図に表れる誤差の標準偏差は、表 3.1 の各時刻において、床面・側壁においてそれぞれ算出された誤差の標準偏差の平均値である。

前述のように本法では、量子化の誤差が拡大するのを避けるために、投影図を回転させて表示している。図 3.13 に、画像の回転を行わなかった場合の誤差の標準偏差と画像の回転を行った場合の誤差の標準偏差の比較を示す。図 3.13 から画像を回転させることにより、誤差の標準偏差が極端に大きくなる現象が回避できていることがわかる。

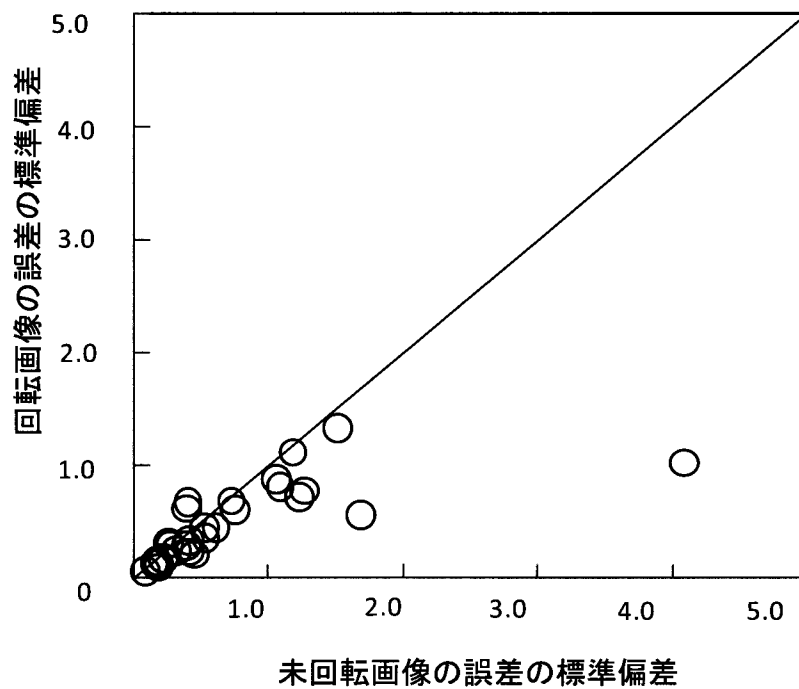


図 3.13 画像回転の効果

図 3.14 に CG 技術による誤差の標準偏差を，3.5 で示した理論値と比較して示す．

図 3.14 より，誤差の標準偏差の大きさは理論値と傾向的に一致しており，数値的にも 1.0 倍を超えていないことから，CG 技術による誤差の主要因は，量子化誤差と考えることができる．

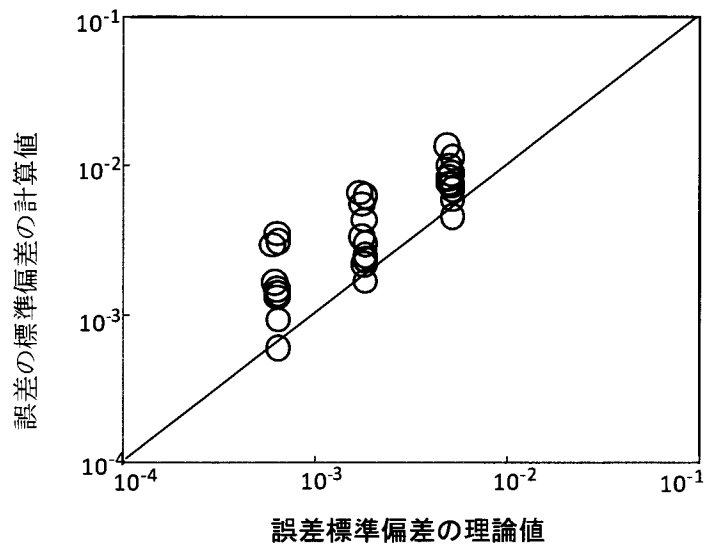


図 3.14 誤差の理論値との比較

図 3.15 に CG 技術による手法と従来の粒子法の計算時間と誤差の大きさの比較を示す。図から、許容される誤差を同じにした場合、CG 技術による手法は従来の粒子法と比較して約 $10^3 \sim 10^4$ 倍の高速化が得られることがわかる。

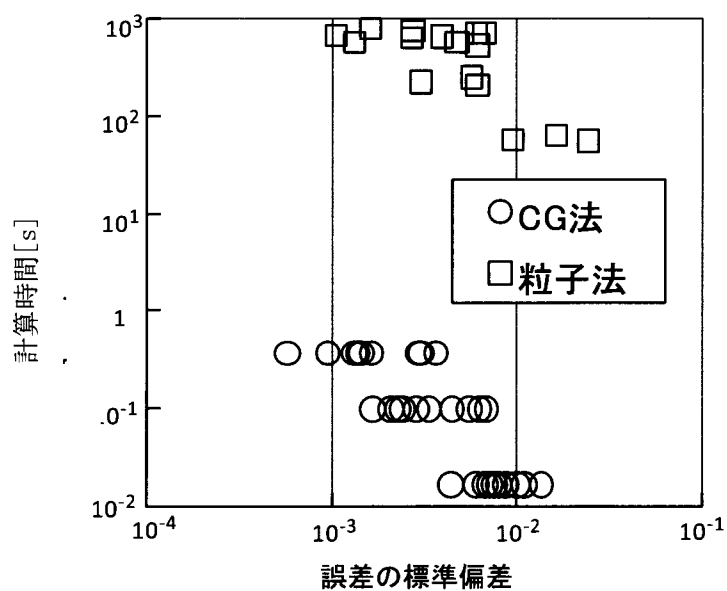


図 3.15 誤差と計算時間の比較

3.8 結言

CG の平行投影図作画機能により得られる投影画像から，3次元の CFD 計算に用いるための直達日射を計算する汎用的な計算法を開発した．本章では，投影画像から日射の影響を受ける面要素を一意に特定するためのアルゴリズムを示すとともに，開発した計算手法の誤差精度を評価した．

その結果，本手法の誤差は主として量子化誤差に起因するものであり，必要な精度に応じた解像度の画像を用いれば，実用上問題のない精度で直達日射の影響を受ける面を同定できることが明らかとなった．

以上のことから，本手法は CFD を用いる日射の計算において，従来法のような陰面消去を独自に作成する必要がなく，CG による平行投影図から日射を受ける3次元空間のメッシュ分割された面要素を特定でき，従来法に比べて計算時間の大幅な高速化を達成する汎用的手法となりうる事を示した．

付録 3.1 $L_{\max}$ と β の理論計算値

実空間の点 (x, y, z) と投影図上の座標 (x', y') との関係は, 式(3.3)を展開することにより,

$$x' = C_{\alpha}x + S_{\alpha}z \quad (3.14)$$

$$y' = -S_h S_{\alpha}x + C_h y + S_h C_{\alpha}z \quad (3.15)$$

$$\begin{aligned} C_{\alpha} &= \cos(-\alpha), & S_{\alpha} &= \sin(-\alpha), \\ C_h &= \cos(-h), & S_h &= \sin(-h), \end{aligned} \quad (3.16)$$

これを用いて, 窓の幅 W_x で無次元化した一辺の長さが d の面要素の投影図上の座標は図 3.16 のようになる.

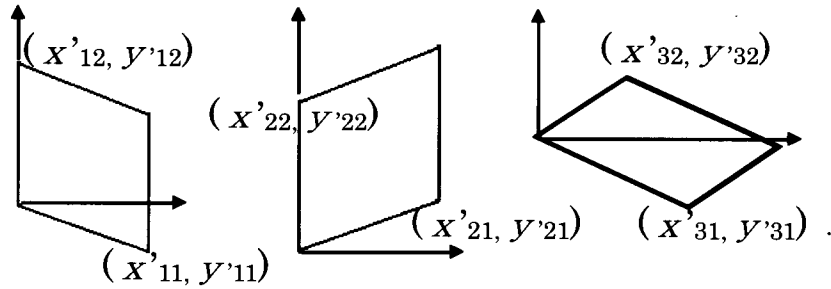


図 3.16 面要素の投影図上の座標

$$\begin{aligned} x'_{11} &= C_{\alpha}d, & y'_{11} &= S_h S_{\alpha}d \\ x'_{12} &= 0, & y'_{12} &= C_h d \\ x'_{21} &= -S_{\alpha}d, & y'_{21} &= -S_h C_{\alpha}d \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$x'_{22} = 0, \quad y'_{22} = C_h d \quad (3.18)$$

$$x'_{31} = C_{\alpha}d, \quad y'_{31} = S_h S_{\alpha}d$$

$$x'_{32} = S_\alpha d, \quad y'_{32} = -S_h C_\alpha d \quad (3.19)$$

面積は

$$A_j = |x'_{j1} y'_{j2} - y'_{j1} x'_{j2}| \quad (3.20)$$

(j=1,2,3)

面要素の外向き法線ベクトルと太陽光ベクトルのなす角の余弦は，以下の式となる．

$$\beta_j = \frac{A_j}{d^2} \quad (3.21)$$

対角線は

$$L_{\max,j} = \max\{L_{1j}, L_{2j}\} \quad (3.22)$$

$$L_{1j} = \sqrt{(x'_{ji} + x'_{j2})^2 + (y'_{j1} + y'_{j2})^2}$$

$$L_{2j} = \sqrt{(x'_{ji} - x'_{j2})^2 + (y'_{j1} - y'_{j2})^2}$$

で表される．

参考文献

- 3-1)近藤明, 塩谷憲司, 加賀昭和, 井上義雄: 都市ヒートアイランド対策の輻射による温熱環境評価, 第 15 回環境工学総合シンポジウム 2005 講演論文集, 319～322 (2005)
- 3-2)菅健太郎, 金泰延, 加藤信介: 室内温熱環境の最適設計における多目的問題に関する研究—日照・日射を考慮した窓面設計における考察—, 生産研究, 55-1, 91～95 (2003)
- 3-3)吉田伸治, 村上周三, 持田灯, 大岡龍三, 富永禎秀, 他: 対流・放射・湿気輸送を連成した屋外環境解析に基づく緑化の効果の分析, 日本建築学会計画系論文集, 529, 77-84 (2000)
- 3-4)大森敏明, 村上周三, 加藤信介: 屋外・屋内複合解析格子を用いる複雑形状建物内の日射・放射総合シミュレーション, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, 265-268 (1994)
- 3-5)加賀昭和, 近藤明, 井上義雄, 池島薫, 福田征克, 呂煜鉉: CG 技術を用いた形態係数の高速計算法, 空気調和・衛生工学会論文集, 128, 1-8 (2008)
- 3-6)上中隆史, 池島薫, 塩谷憲司, 加賀昭和, 近藤明: CG 技術を利用した高速輻射計算法の実用化, 第 15 回環境工学総合シンポジウム 2005 講演論文集, 390-393 (2005)
- 3-7)塩谷憲司, 加賀昭和, 近藤明, 井上義雄, 池島薫, 上中隆史: CG 画像を利用した高速ふく射計算法の開発とその応用, 可視化情報全国講演会 (新潟 2005) 講演論文集, 25-2, 39-42 (2005)
- 3-8)伊藤克三: 日照関係図表の見方・使い方, オーム社, (1976)
- 3-9)日本建築学会: 昼光照明の計算法, 日本建築学会, (1993)
- 3-10)栗山立慎, 野口太郎: CG による天空射影図を用いた日照環境評価法, 日本建築

学会計画系論文集, 510, 17-21 (1998)

3-11) 栗山立慎, 野口太郎: CG による天空射影図を用いた昼光計算法, 日本建築学会
計画系論文集, 519, 25-29 (1999)

3-12) 菊池 卓郎, 樋口 祥明, 井川 憲男: 採光が省エネルギー効果と室内環境に与
える影響に関する計算検討, 日本建築学会環境系論文集 74, 133~139, (2009)

3-13) 菊池 卓郎, 井川 憲男: 天空放射輝度分布モデルを用いた日射遮蔽体の透過特
性の評価に関する研究, 日本建築学会環境系論文集 73, 865-871, (2008)

3-14) 出口光一郎: デジタル画像計測における面積画素について, 計測自動制御学
会論文集, 27-2, 227-229 (1991)

第4章 輻射・日射を含む熱流体解析の基礎方程式

4.1 緒言

2.章にて記した輻射の高速計算法および3.章にて記した日射の高速計算法は、輻射・日射を考慮した CFD の解析を行う際に必要となる情報を従来の手法よりもより汎用的・高速に求めることを目的としている。本章では、2.章および3.章により求めた形態係数や日射の到達する要素の情報を用いて、CFD による気流の解析を行う際の手法を記す。

4.2 基礎方程式

CFD 解析を行うに際して用いた基礎方程式を記す。式(4.1)は質量保存則を表す連続の式、式(4.2)～(4.4)は運動量の保存則を表す Navier-Stokes 方程式、式(4.5)はエンタルピーの保存則を表すエネルギー方程式である。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \bar{v})}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \bar{w})}{\partial z} = 0 \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \bar{u})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u} \bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \bar{v} \bar{u})}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \bar{w} \bar{u})}{\partial z} = \\ \frac{\partial}{\partial x}(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho\bar{v})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\bar{u}\bar{v})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\bar{v}\bar{v})}{\partial y} + \frac{\partial(\rho\bar{w}\bar{v})}{\partial z} = \\ \frac{\partial}{\partial x}(\mu + \mu_t)\left(\frac{\partial\bar{v}}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu + \mu_t)\left(\frac{\partial\bar{v}}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu + \mu_t)\left(\frac{\partial\bar{v}}{\partial z}\right) - \frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho\bar{w})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\bar{u}\bar{w})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\bar{v}\bar{w})}{\partial y} + \frac{\partial(\rho\bar{w}\bar{w})}{\partial z} = \\ \frac{\partial}{\partial x}(\mu + \mu_t)\left(\frac{\partial\bar{w}}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu + \mu_t)\left(\frac{\partial\bar{w}}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu + \mu_t)\left(\frac{\partial\bar{w}}{\partial z}\right) - \frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho C_p \bar{T})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\bar{u} C_p \bar{T})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\bar{v} C_p \bar{T})}{\partial y} + \frac{\partial(\rho\bar{w} C_p \bar{T})}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \lambda \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \lambda \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \lambda \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \right) + S \end{aligned} \quad (4.5)$$

ここで、 ρ は密度、 u は x 軸方向の速度成分、 v は y 軸方向の速度成分、 w は z 軸方向の速度成分、 μ は粘性係数、 μ_t は渦粘性係数、 p は圧力、 g は重力加速度、 C_p は比熱、 λ は熱伝導率、 S はエネルギー方程式における生成項である。変数上に付した $\bar{}$ は、乱れによる変動を時間平均した値を示す。

乱流による渦粘性の効果については高 Reynolds 数型の標準 $k-\varepsilon$ モデルを用いることにより考慮した^{4.1)・4.2)}。

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u k)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v k)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w k)}{\partial z} = \\ \frac{\partial}{\partial x} \mu_t \left(\frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \mu_t \left(\frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \mu_t \left(\frac{\partial k}{\partial z} \right) + G_k - \rho \varepsilon \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$G_k = \mu_t \left[2 \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right\} + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right]$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u\varepsilon)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v\varepsilon)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w\varepsilon)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \mu_t \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \mu_t \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \mu_t \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + C_1 G_k \frac{\varepsilon}{k} - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

$$C_1 = 1.44 \quad C_2 = 1.92 \quad (4.7)$$

ここで、 k は乱流エネルギー、 μ_t は渦粘性係数、 G_k は乱流エネルギー k の生成項、 ε は乱流消散率、 C_1, C_2 は実験から決定される実験定数である。

なお、壁近傍要素に対する境界条件には壁関数を用いた。

解析にあたっては、非圧縮性流体を仮定し密度 ρ は一定値として与えた。

式(4.1)～(4.7)を、有限体積法により離散化し SIMPLE 法^{4.3)}を用いて解析を行った。

4.3 輻射・日射の影響

日射・輻射は物体表面上で反射・吸収あるいは透過され、吸収されるエネルギーは熱量に変換される^{4.4)}。固体表面上では、式(4.7)に示すように周囲空気側への対流熱伝達による熱移動、表面に接する固体内部への熱伝導、周辺固体への放射熱伝達による熱移動現象が発生する。CFD 解析を行う際には、式(4.8)で示す固体表面における熱収支式を満足するように周囲空気側、固体側および放射による周辺固体へのエネルギー分配を行い、最終的には式(4.5)で示したエネルギー方程式の生成項 S にその影響を反映させるものとした。

固体壁面での熱収支式を式(4.8)に示す。

$$(1 - \alpha_i) (S_{Dir} + S_{Dff})_i + (1 - \alpha_i) \sum_{j=1}^n \alpha_j F_{ji} S_j + \alpha \varepsilon_i (F_{sky} T_{sky}^4 + \sum_{j=1}^n \varepsilon_j F_{ji} T_j^4)$$

$$= \alpha \varepsilon T_A^4 + \rho C_p c_h u_a (T_A - T_a) + \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (4.8)$$

ここで、 α_i はアルベド、 S_{Dir}, S_{Dff} は各々要素 i に到達する直達日射および散乱日射量を示す。 F_{ji} は要素 j から見た要素 i の形態係数、 S_j は要素 j に到達する全日射量、 σ はステファンボルツマン定数、 ε は輻射の射出率、 ρ は空気密度、 c_p は空気の定圧比熱、 c_h は熱移動係数、 u_a は壁面近傍速度、 T_A は要素表面温度、 T_a は要素表面に隣接する空気要素での温度、 λ は固体の熱伝導率を示す。

日射量 S_{Dir}, S_{Dff} は、第3章で示したCG技術による高速日射計算手法を用い、形態係数 $F_{i,j}, F_{sky}$ の計算は、第2章で示したCG技術を用いた高速輻射計算法であるPPM法を用いた。左辺第一項は、要素表面 i に到達する直達と天空散乱日射量、第二項は要素 i に影響を与える他の要素からの反射日射量である。日射の反射は第3章に示したように完全一様散乱反射を仮定することにより、反射成分を周囲要素に対する形態係数の重みにより他の要素へ割り振るものとした。左辺第三項は、天空からの輻射と他の要素からの輻射による熱量を示す。右辺第一項は、要素 i から放出される輻射熱エネルギー量、右辺第二項は要素 i の表面から対流により空気側に伝わる熱量、右辺第三項は要素 i の固体側に熱伝導により伝わる熱量を示す。なお、要素 i における潜熱フラックスの影響は考慮していない。

4.4 結言

本章では、第2章で示したCG技術を用いた高速輻射計算法、および第3章で示した高速日射解析手法を実際のCFD解析に用いる際の基礎式を示した。要素間毎の輻射形態係数の情報ならびに日射到達面の情報は、要素表面での熱収支の式から空気側および固体側への移動熱量として割り振ることができ、熱エネルギー方程式の生成項として考慮される。反射日射量は、完全一様散乱と仮定しているが指向性を持つ散乱特性の考

慮等は今後の課題である.

参考文献

- 4-1) Patankar S.V,1980,Numerical Heat Transfer and Fluid Flow,*McGRAWHILL BOOK* (1980)
- 4-2) B.E.Launder and D.B.Spalding, The Numerical Computation of Turbulent Flows, *Comp.Meth.Appl, Mech.Eng.*,Vol.3,pp269-289 (1974)
- 4-3)B.E.Launder and D.B.Spalding, *Mathematical Models of Turblence*,Academic Press.(1972)
- 4-4) 村上周三：CFD による建築・都市の環境設計工学，東京大学出版会（2000）

第5章 CG技術による高速輻射・日射解析手法の 屋外解析への応用

5.1 緒 言

都市ヒートアイランド現象は、重要な環境問題の1つであり、観測およびモデルにより多くの研究がなされている。多くの観測結果⁵⁻¹⁾⁻⁵⁻⁵⁾は、都市と郊外で気温差があること、日中より夜間に温度差が顕著になること、夏季よりも冬季に顕著になることが示されている。ヒートアイランド現象の要因として、地表面の変化、潜熱によるフラックスの減少、建物群による反射、輻射特性の変化、人工排熱などが考えられている⁵⁻⁶⁾⁻⁵⁻⁸⁾。このような要因を含むマクロモデルおよびミクロモデル(CFD)の研究も多く行われている。建物群を簡略化し、日射、輻射影響を組み込んだマクロモデル⁵⁻⁹⁾⁻⁵⁻¹²⁾を用いて、東京、大阪のヒートアイランド現象を再現している。しかしながら、多くのモデルの水平解像度は約1kmで、都市の詳細な構造を再現することはできない。都市の詳細な構造を再現し、日射・輻射の詳細な影響を考慮できるCFDも研究が行われている⁵⁻¹³⁾⁻⁵⁻¹⁶⁾。しかしながら、熱環境が最悪となる日中のある時刻の定常計算の実施で、1日の非定常計算は実施されていない。

多くの都市は海岸沿いに位置しており、Papanastasiou⁵⁻¹⁷⁾は、海陸風により顕著な風向の日変動がみられることを報告している。また、建物・道路は方向により、日射を受ける量の日変動は大きく、また蓄熱により大気との熱交換量に時間遅れが生じる。このようなことから、都市の温熱環境の検討をCFDにおいて行うためには、1日の非定常計算を行うことが、非常に重要である。

しかしながら、輻射や日射の影響を考慮したCFD非定常計算は、設計レベルにおい

てはまだまだ普及していないのが実情である。これは、輻射計算において必要な形態係数を求めるために、膨大な計算時間を要することが主要因となっている。また、日射の計算においても太陽高度と太陽方位と、解析地点の緯度経度、対象物の置かれた方位角等の関係によって日射の影響を受ける対象物の日射による吸熱量を時刻毎に求める必要があるため、膨大な計算時間をやはり必要としている。さらに、計算対象領域外に支配される気温、風速、風向の境界条件を適切に設定する手法がないためである。そのため、屋外街区の気流検討において、日射の日向・日陰を計算要素単位で判定した上で3次元の非定常計算を実施することはほとんど無く、予め想定した熱負荷境界条件として平均的な値を事前に設定することが一般的となっている。

第2章では、CG技術による高速輻射計算法、PPM法により、第3章ではCG技術による日射計算法により、日射・輻射の計算に要する時間を大幅に短縮することが可能であることを示した。

本章では、CG技術によるPPM法およびCG技術による日射計算法をCFDに組み込み、さらにメソスケールモデル(WRF)から得られる気温、風速、風向データをCFDの境界条件に設定することにより、実在街区の1日の非定常計算を実施し、CG技術によるPPM法およびCG技術による日射計算法の実用性を検証するとともに、日射・輻射が気流および熱環境に与える影響について評価した。

5.2 解析モデル

解析を行うにあたっては、第4章で示した熱・気流の基礎方程式および固体表面における熱収支式を、解析モデルとして用いた。非圧縮性流体を仮定した3次元のナビエ・ストークス方程式、連続の式を有限体積法により離散化し、SIMPLE法⁵⁻¹⁸⁾を解法に用いた。浮力の影響については、ブシネスク近似で与えた。温度については、エンタルピーの移流拡散方程式を用いた。乱流モデルには、標準 $k-\epsilon$ モデルによる高レイノルズ

数乱流モデルを用いた。

ビル壁面や地表面では、日射および輻射の影響を考慮して、4章式(4.8)に示した熱収支バランス式から固体側と空気側への熱移動量を求めた。なお、要素表面における潜熱フラックスの影響は考慮していない。

日射フラックスの直達日射フラックスと、散乱フラックス量については式(5.1)により計算した⁵⁻¹⁹⁾。

$$S_{Diff} = (0.66 - 0.32 \sinh) E_{e0} \sinh(1 - P^{\cosh h}) \times \{0.5 + (0.4 - 0.3P) \sinh\} \quad (5.1)$$

$$S_{Dir} = E_{e0} P^{\cosh h} I_i$$

ここで、 E_{e0} は地表の大気圏外の法線日射量、 h は太陽高度、 P は大気透過率である。各要素の直達日射フラックスは、以上の方法を用いて、10分ごとに計算した。各要素の散乱フラックスは、第2章で示した方法による得られた形態係数から10分ごとに計算した。

5.3 解析の概要

5.3.1 解析領域

計算対象領域は、図 5.1 に示す大阪市中心部瓦町1の400m×400mの16ブロック街区である。図 5.2 には実街区の写真を示す。また、図 5.3 には図 5.2 の中心付近である瓦町1の交差点（図 5.2 A 地点）からみた実街区の写真を示す。境界の影響を取り除くために、計算対象領域の外側に300mの仮想空間を設定した。解析は、16ブロックのビル形状をモデル化したが、解析結果の検討対象としたのは図 5.4 の実線で囲まれた4ブロックである。周囲12ブロックは検討対象とした4ブロックに影響を与える領域としてモデル化の対象とした。また、図 5.3 に示すように計算対象領域内には、非

常に高い建物が存在しているため、このビルの高さである 151m を考慮した上、解析空間の高さは 350m とした。CFD 解析のために作成した 3 次元モデルの鳥瞰図を図 5.5 に示す。

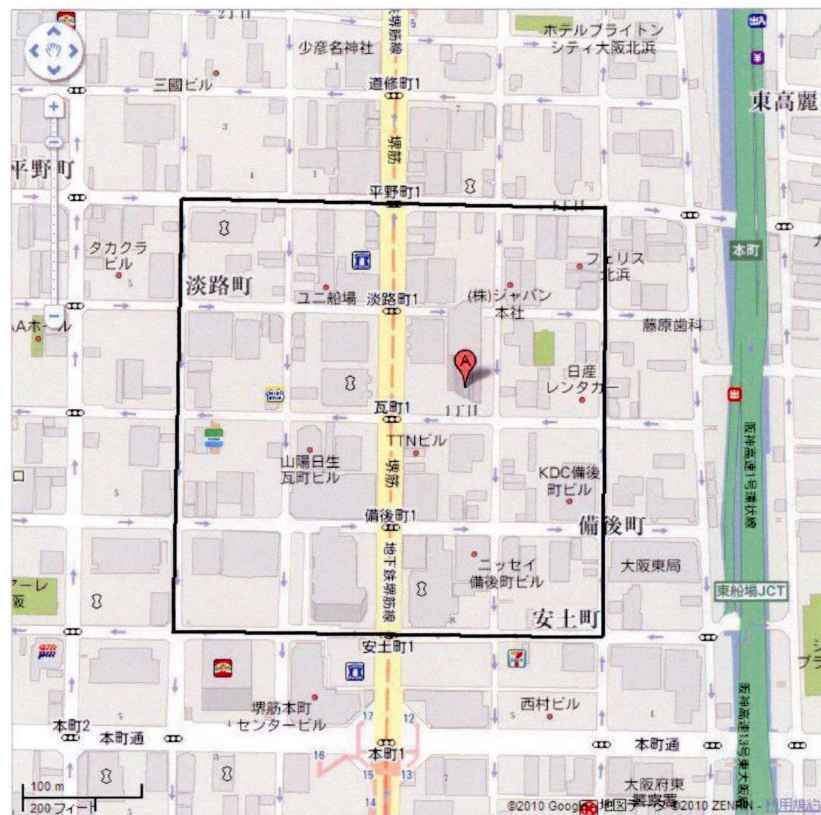


図 5.1 解析対象とした大阪市中央区のエリア

(Google Map より転載)

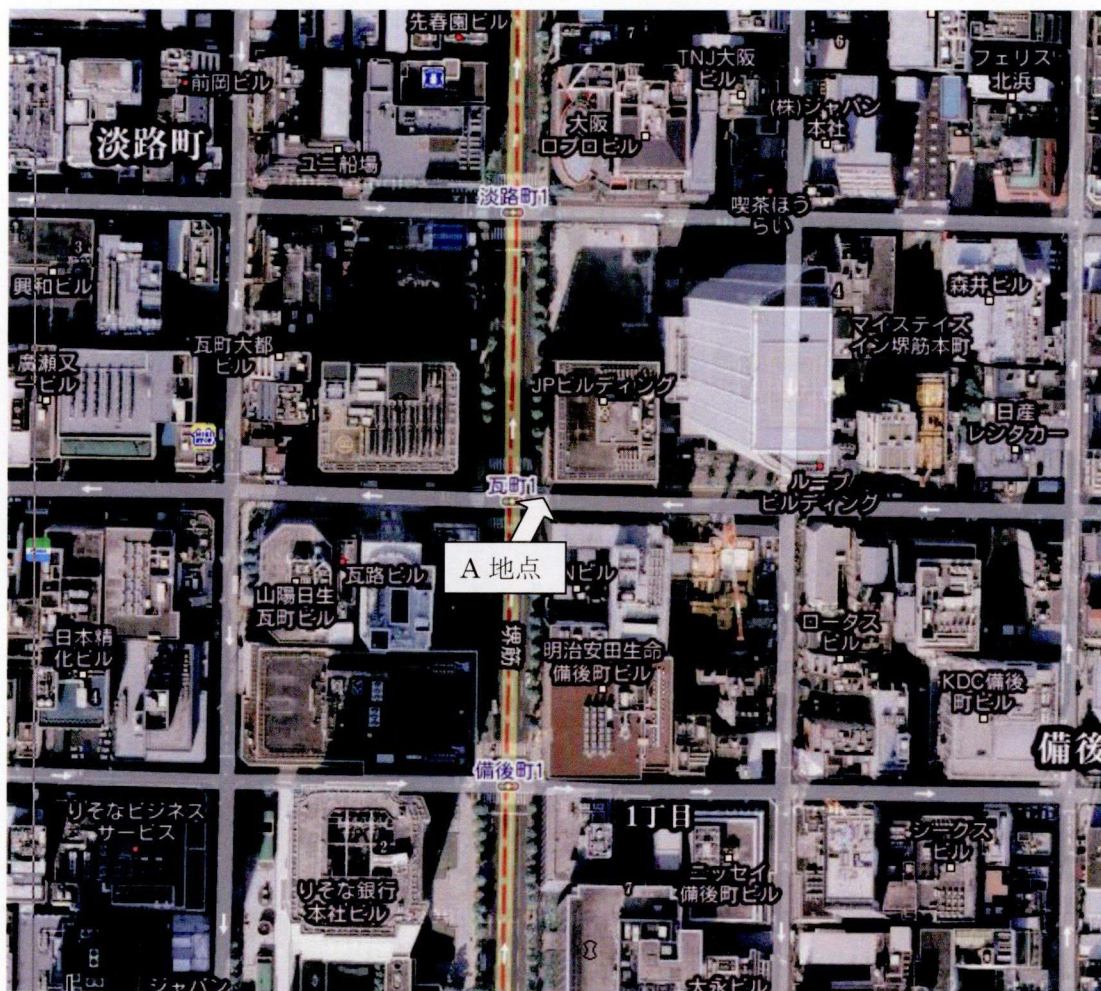


図 5.2 解析対象とした大阪市中心部のエリア写真

(Google Map より転載)



図 5.3 瓦町 1 交差点（図 5.2 A 地点）からみた街区

（Google Map より転載）

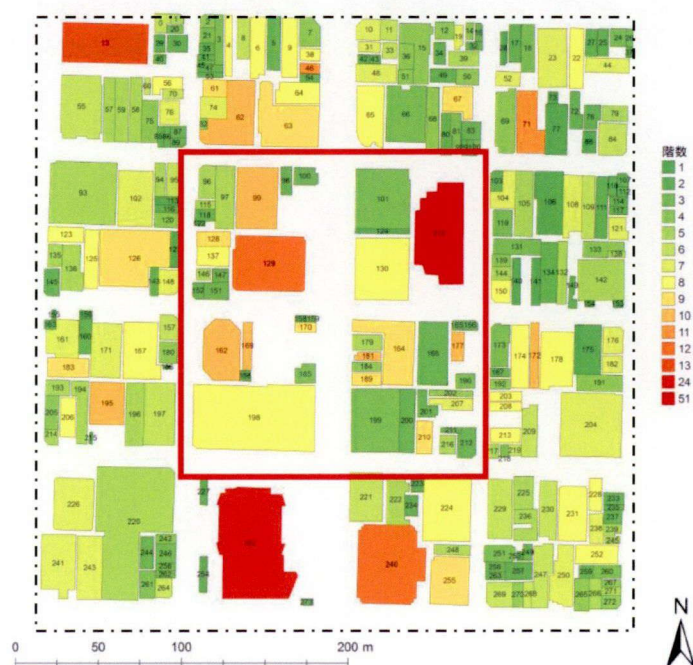


図 5.4 解析検討の対象とした 4 ブロック

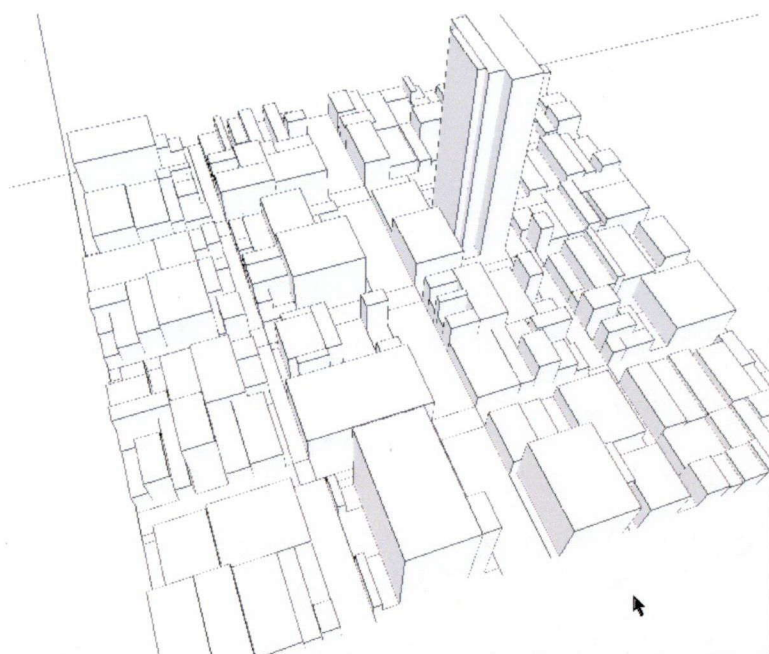


図 5.5 CFD モデルの鳥瞰図

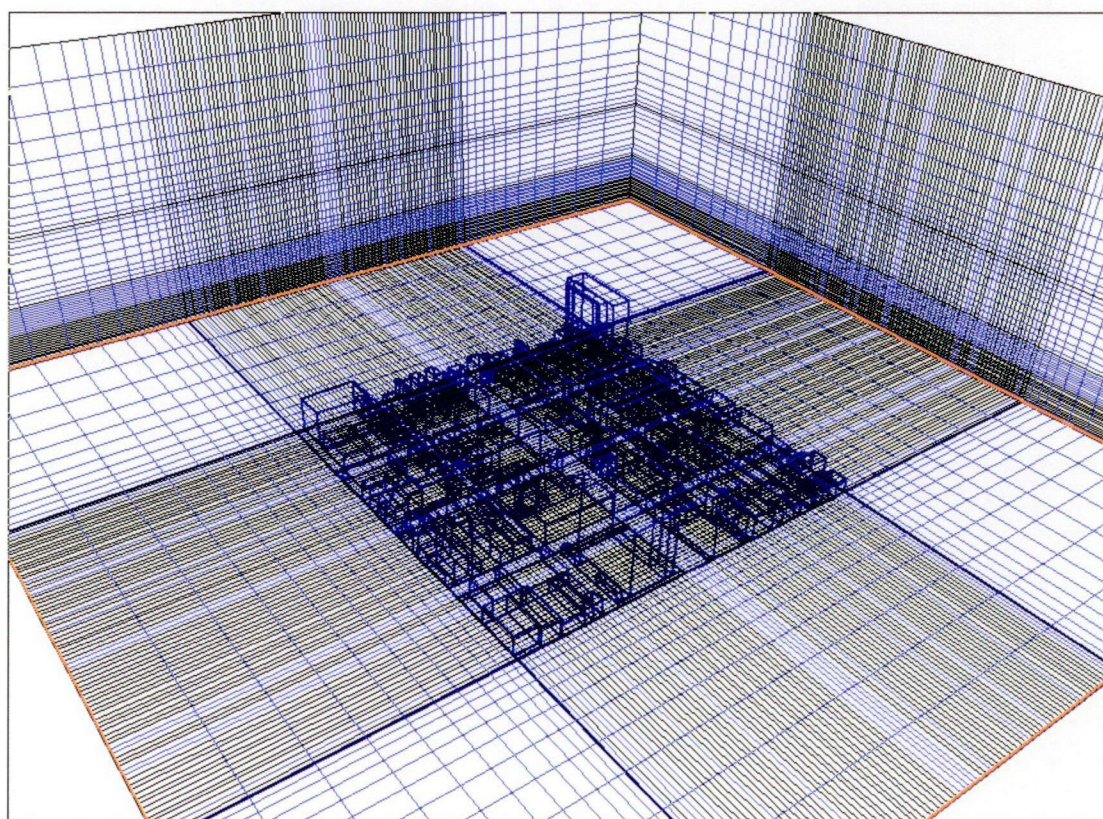


図 5.6 CFD モデルのメッシュ図

図 5.6 に示す解析のメッシュ分割数は、仮想空間を含めた計算領域全体で $103 \times 104 \times 50 = 535,600$ である。

5.3.2 境界条件

事前準備として WRF (Weather Research and Forecasting) を用いて、この計算領域を含む近畿圏を含む領域 (図 5.7) を対象に、2007 年 8 月 8 日から 14 日の 1 週間の計算を行い、気温の観測値との一致がよい 2007 年 8 月 11 日 7 時から 8 月 12 日 7 時までの 24 時間を計算対象期間とした⁵⁻¹²⁾。なお、予備計算は 8 月 11 日 5 時からの 2 時間とした。

WRF の鉛直解像度は CFD に比べて粗いので、WRF の異なる 2 つの高度 (約 30m と約 200m) の気温および風速データから、Monin-Obukhov の相似則⁽⁵⁻²⁰⁾を用いて各時刻の気温と風速の鉛直分布を求め、CFD の全ての側面境界条件とした。例として、8 月 11 日の 8:00, 12:00, 16:00, 24:00 における気温と風速の CFD 境界条件鉛直分布を図 5.8～図 5.10 に示す。また、上端境界条件は、Monin-Obukhov の相似則から得られた高さ 350m の値を一様に与えた。

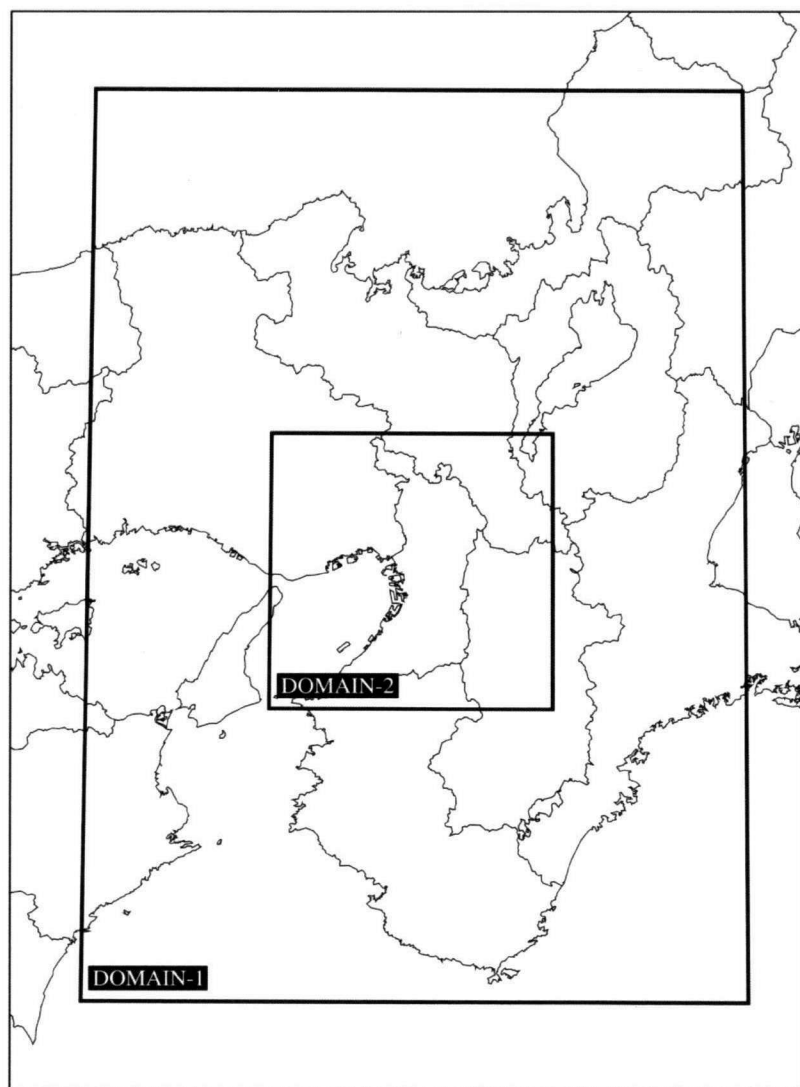


図 5.7 WRF による計算領域

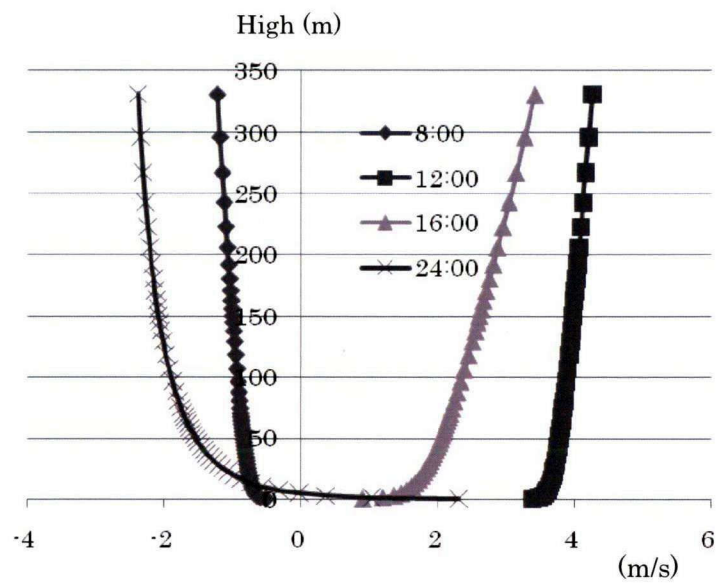


図 5.8 境界面における鉛直方向の速度成分 u

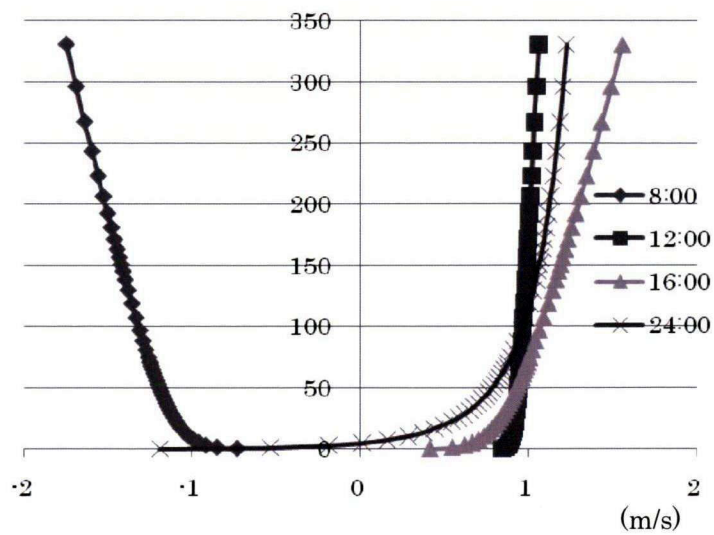


図 5.9 境界面における鉛直方向の速度成分 v

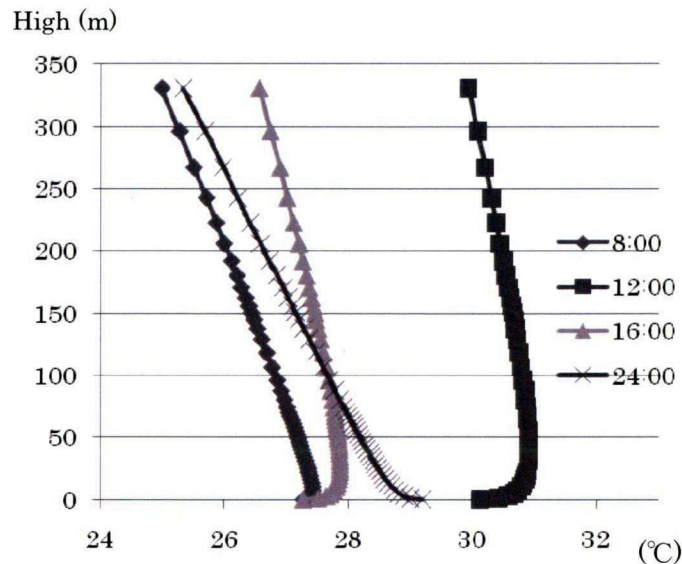


図 5.10 境界面における鉛直方向の温度分布

CFD による非定常解析の際には各時間刻み毎の境界条件値は、Monin-Obukhov の相似則から予め求めた各時刻における鉛直分布を元に時間方向の線形補間を行うことで定めた。

次に各時刻における対象地域の太陽高度位置を算出し、第 3 章で示した CG 技術を用いて各時刻毎対象要素毎の直達日射の到達割合を求めた。反射日射については、完全散乱を仮定し各要素から他の要素に対する形態係数により反射成分は割り振られるものとした。各要素間の輻射形態係数は、第 2 章で示した CG 技術による PPM 法を用いた。

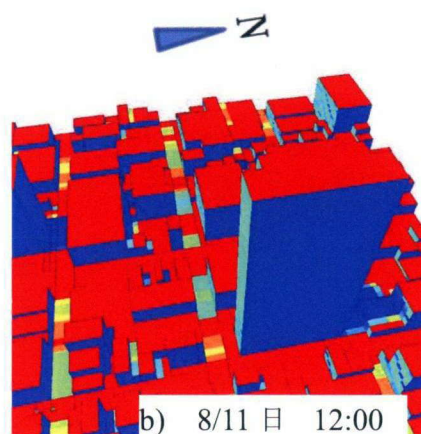
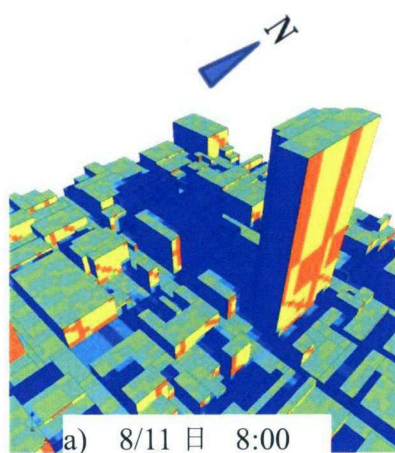
計算は、気流と温度の境界条件に加え、日射・輻射を考慮した表面での熱収支を計算する場合 (Case1)、気流と温度の境界条件は考慮するが日射・輻射は考慮せず表面での熱収支を計算しない場合 (Case2)、の 2 通りの 24 時間解析を行い、気流と温度場の影響を検討した。表面での熱収支を計算する場合の条件を表 5.1 にまとめる。なお、アルベドについては、岩村⁵⁻²¹⁾、大岡⁵⁻²²⁾らの研究をもとに設定した。

表 5.1 表面熱収支計算条件

日射解析	第 3 章手法により算出
輻射（形態係数）	第 2 章手法により算出
建物壁体	厚み 150mm コンクリート
建物アルベド	0.2
室内壁表面温度	26℃
地面アルベド	0.2
地中	0.6m を 22℃固定

図 5.11 には、一例として CG 技術により求めた 8 月 11 日における 8 時、12 時、14 時、16 時の直達日射光の要素面への到達量分布を示す。午前（8 時）は東面、日中（12 時）は屋上面、午後（16 時）は西面への直達日射量が多いことがわかる。図 5.11 に示した。

N は北方位を示している。



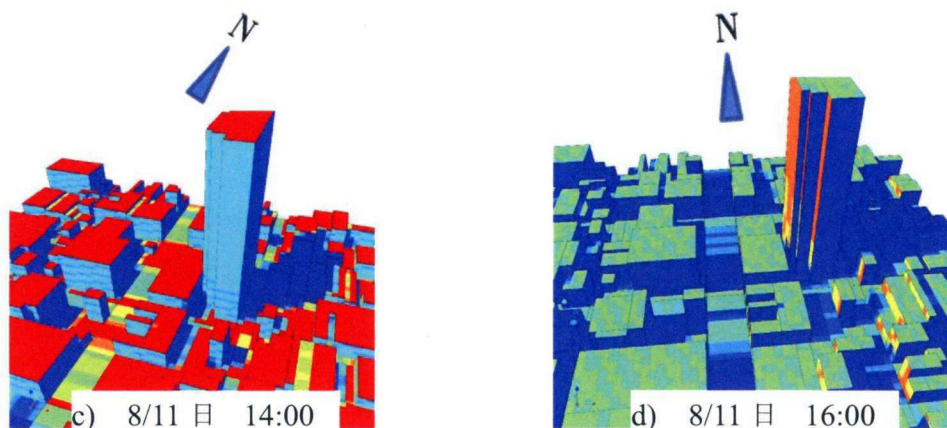


図 5.11 CG 技術によって求められた要素表面に到達する
直達日射光の割合

5.3.3 解析結果

日射・輻射の影響を考慮して 24 時間の CFD 解析を行った結果の一例を示す。図 5.12 に、2007 年 8 月 11 日における、8 時、12 時、16 時、24 時における対象街区の垂直断面における温度分布を示す。図 5.12 における a)-d) は Case1 の場合、e)-f) は Case2 の場合の結果である。Case2 では、ほぼ境界条件の気温の鉛直分布を示している。一方、Case1 では建物表面が受ける日射熱量の違いにより、地上近傍で大きな気温上昇が生じており、12 時では約 3℃の気温上昇が生じている。

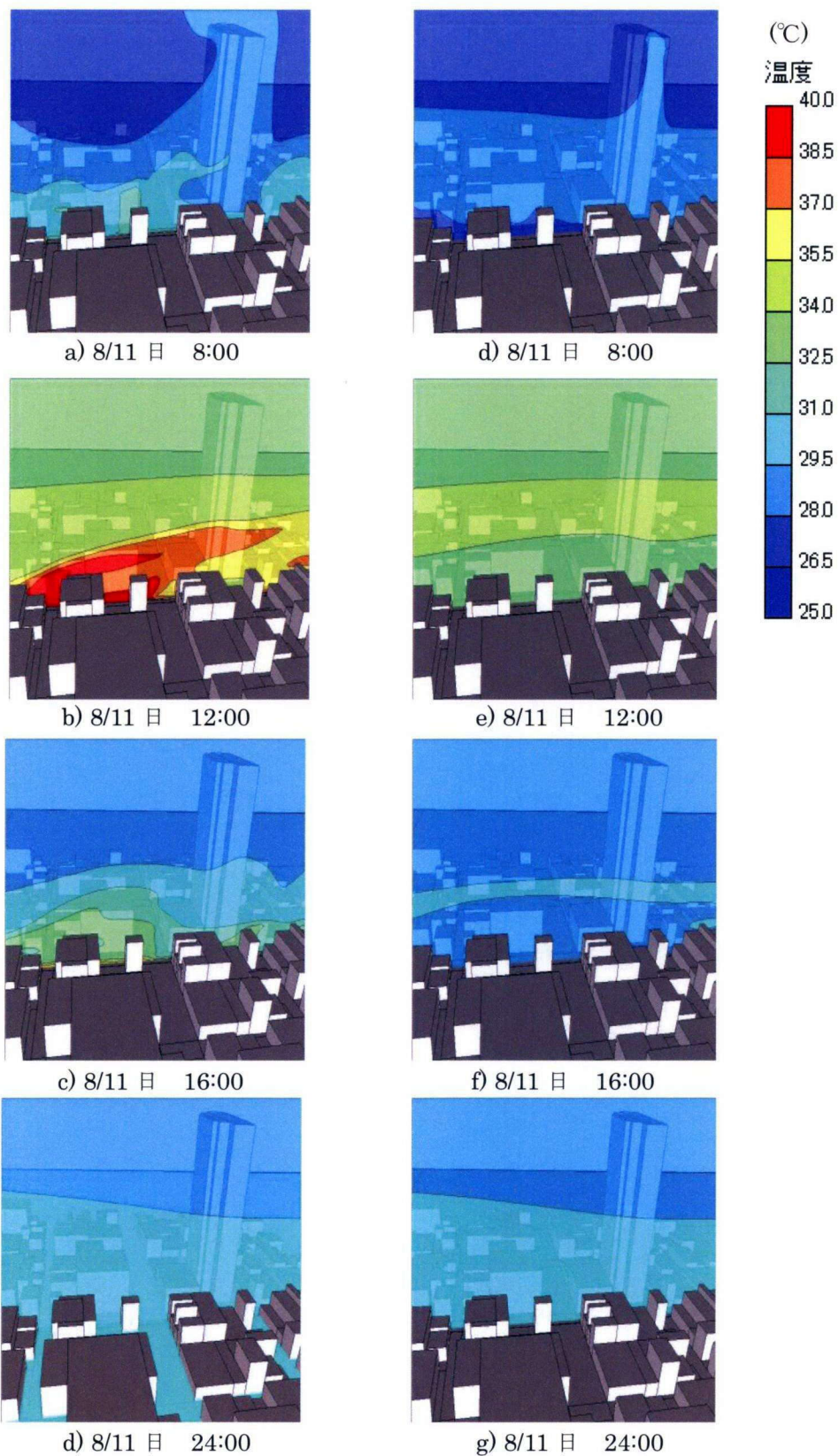
図 5.13 に、地表面より 1.5m の高さにおける対象街区の水平面温度分布を示す。a)-d) は Case1 の場合、e)-f) は Case2 の場合の結果である。Case2 ではほぼ均一の気温を示しているのに対し、Case1 の日中の気温は高く、建物構造と気流の影響により複雑な気温分布を示している。

図 5.14 に、Case1 の地表面および建物表面の表面温度分布を示す。図 5.11 に示し

た直達日射を受ける面の温度が高くなっている。12 時の道路面温度は、50℃以上を示している。

図 5.15 に、対象街区の垂直断面における気流の絶対速度の大きさの分布を示す。a)-d) は Case1 の場合、e)-f) は Case2 の場合の結果である。高層ビル西側で鉛直方向に速度分布が生じているのは、気温上昇による浮力の影響である。日中の地上近傍の Case1 の速度は Case2 の速度に比べると大きい。夜間の地上近傍の Case1 の速度は Case2 の速度に比べると小さい。

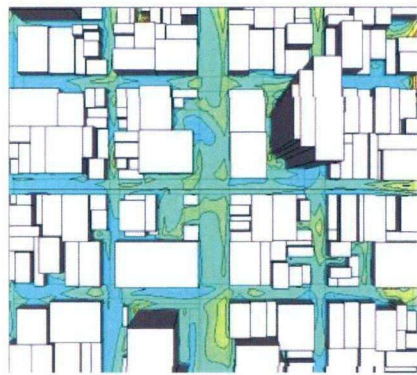
日射・輻射の影響を考慮した Case1 の計算結果は、日射・輻射の影響を考慮していない Case2 の計算結果に比べると定性的に都市ヒートアイランドの特徴を良く再現している。



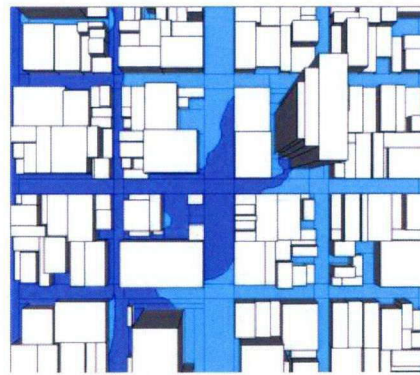
Case1 日射・輻射を考慮した解析

Case2 日射・輻射を考慮しない解析

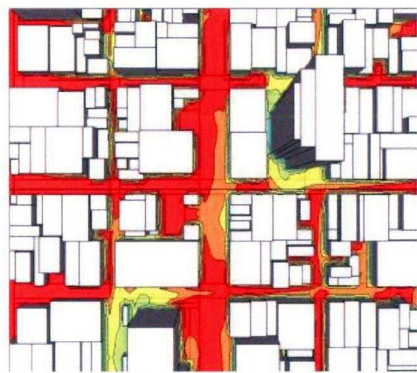
図 5.12 垂直断面における温度分布の解析結果



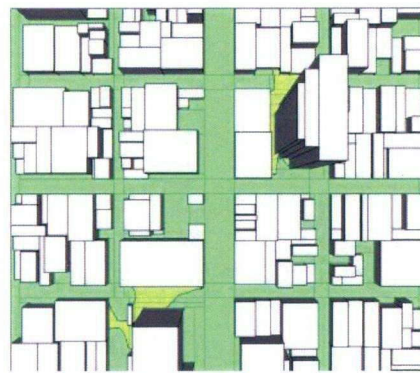
a) 8/11 日 8:00



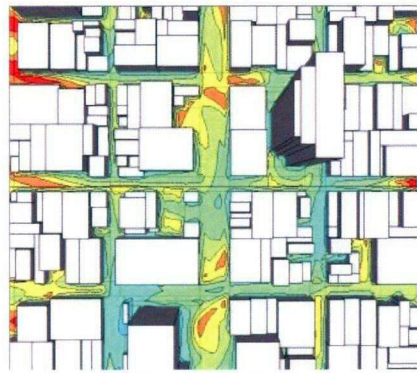
d) 8/11 日 8:00



b) 8/11 日 12:00



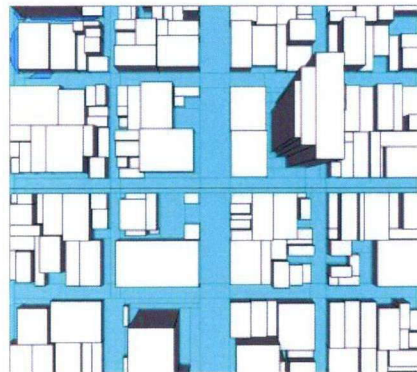
e) 8/11 日 12:00



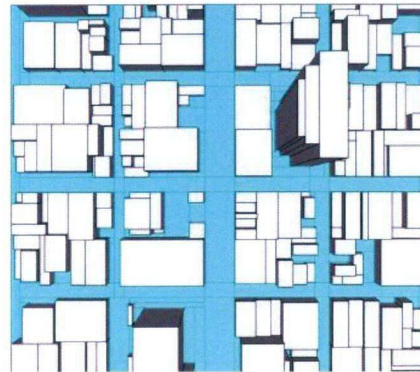
c) 8/11 日 16:00



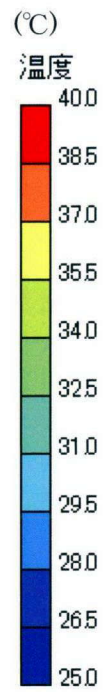
f) 8/11 日 16:00



d) 8/11 日 24:00



g) 8/11 日 24:00



Case1 日射・輻射を考慮した解析

Case2 日射・輻射を考慮しない解析

図 5.13 地表面 1.5m における温度分布の解析結果

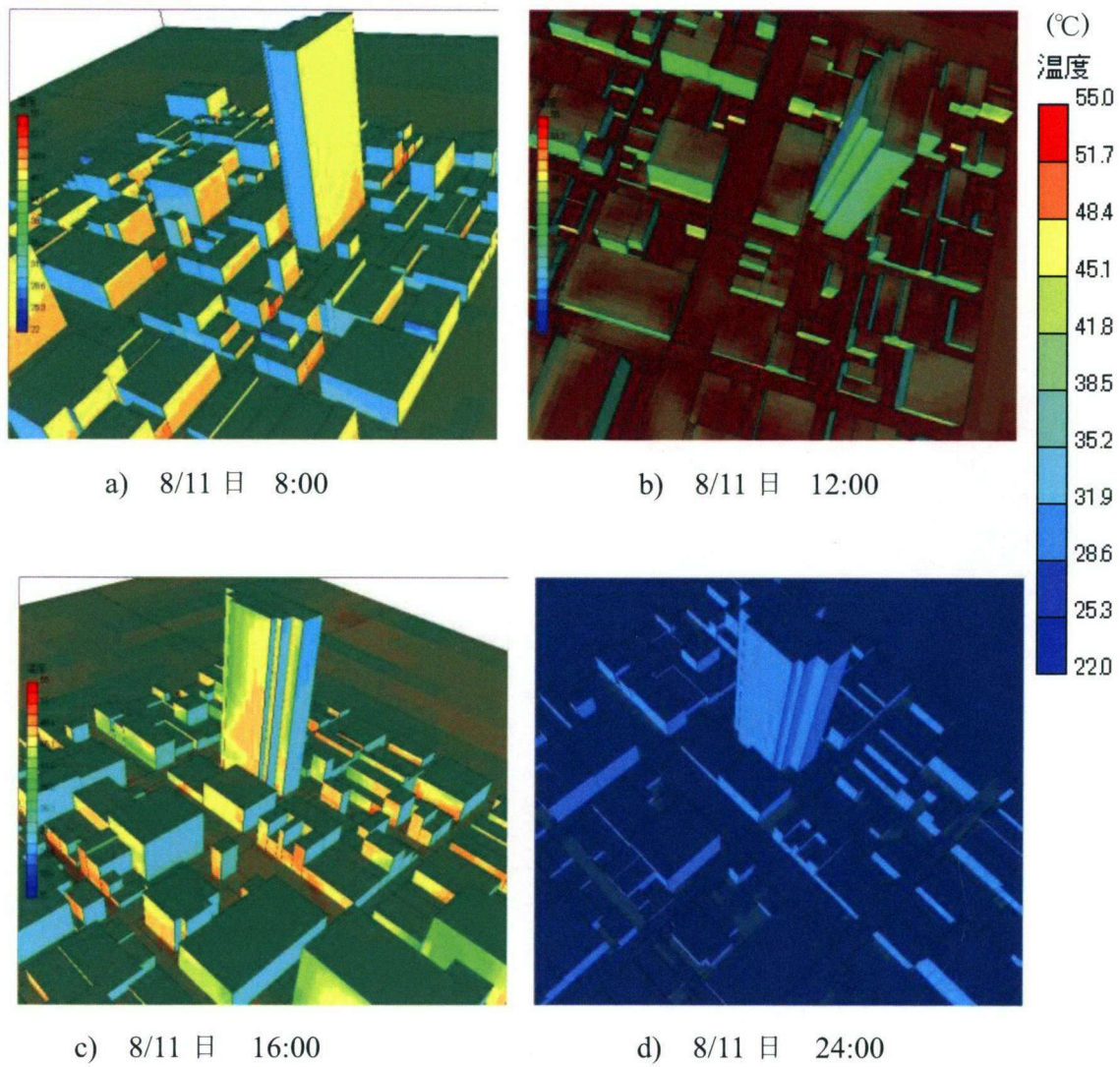
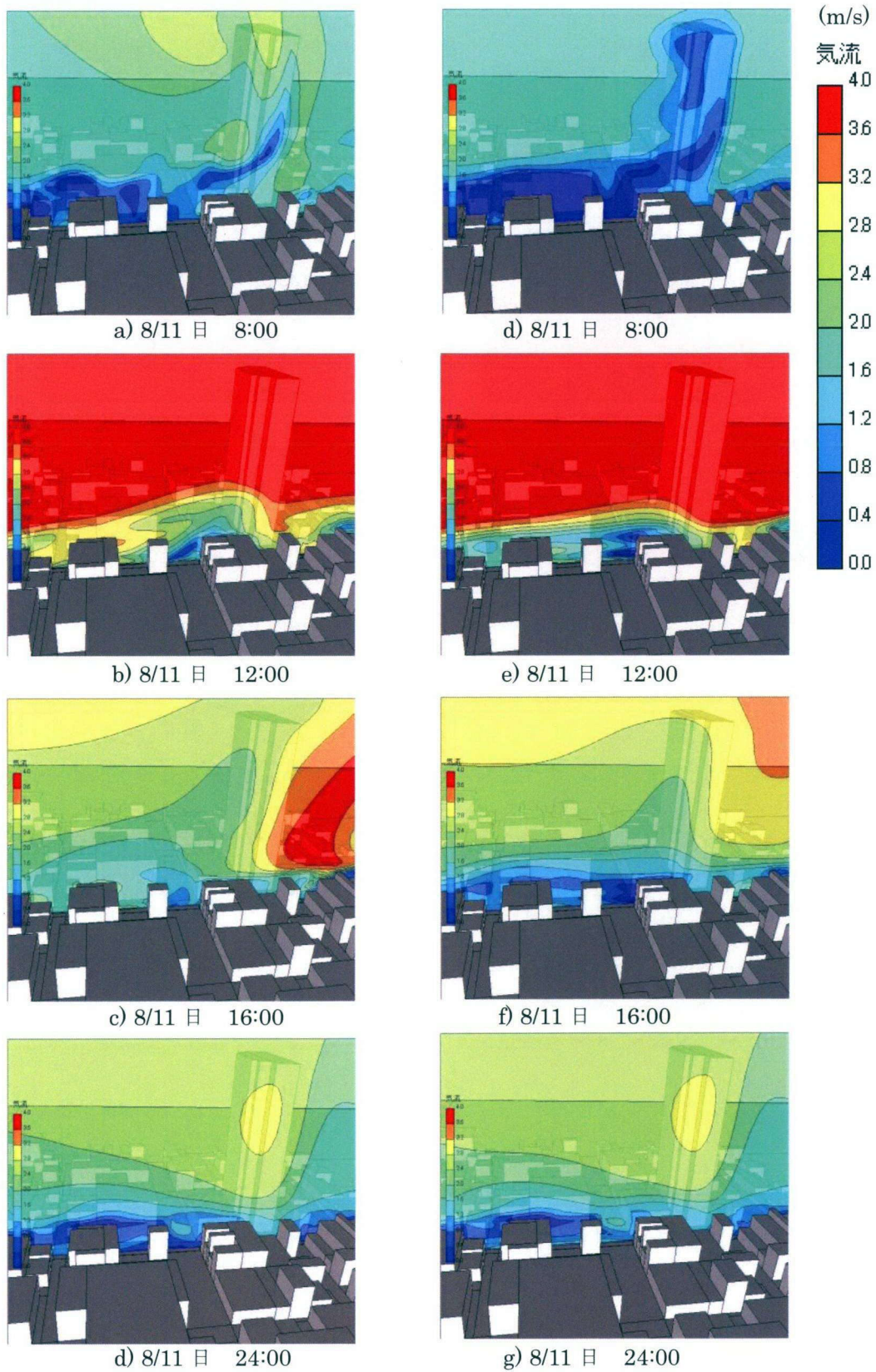


図 5.14 地表面/建物表面温度分布の解析結果(Case1)



Case1 日射・輻射を考慮した解析

Case2 日射・輻射を考慮しない解析

図 5.15 垂直断面における速度分布の解析結果

次に各時刻毎に地上面からの高さ $Z=1.25\text{m}$, $Z=45\text{m}$, $Z=175\text{m}$ において Case1 と Case2 の水平方向の絶対風速 $\sqrt{(u \times u + v \times v)}$ の差を図 5.16 に示す. 日中の Case1 の絶対風速は, Case2 より大きく, 地表面に近いほど増加している. 逆に, 夜間では地表面に近いほど減少していることが分かる. このような結果は, 日中と夜間における大気の安定・不安定の特徴を良く再現している.

また, $Z=175\text{m}$ では, $Z=1.5\text{m}$ や $Z=45\text{m}$ のケースとは反対の挙動を示しているのは, 上空では流量バランスから下層と反対の挙動を示しているものと考えられる.

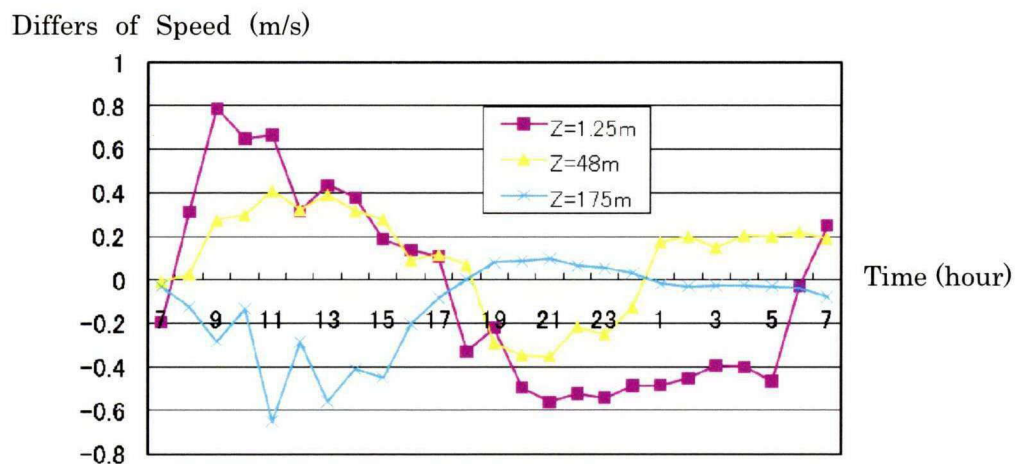


図 5.16 水平方向絶対風速の速度差

5.4 表面反射率が都市温熱環境に与える影響

5.4.1 解析条件

5.3 の解析では，表 5.1 に示すように建物表面および地表面のアルベドを共に 0.2 と仮定した解析を行った．ここでは，建物および道路の表面に高反射性素材を用いることを想定し，表面反射率を変動させたときの表面温度，気温，気流の変化について評価した．建物および道路表面に高反射性素材^{5・23)}のアルベドは，表 5.2 に示すように 6 ケースの計算を行った．ここで **Case2** は 5.3 で示した日射・輻射の影響を考慮した解析の基本ケースである．

表 5.2 各ケースにおけるアルベド

計算ケース	1	2	3	4	5	6
屋根アルベド	0.15	0.20	0.20	0.20	0.40	0.40
建物側面アルベド	0.15	0.20	0.20	0.40	0.20	0.40
道路アルベド	0.15	0.20	0.25	0.15	0.15	0.25

5.4.2 解析結果

表 5.2 に示した 6 ケースの解析を実施した結果を以下に示す．図 5.17 は，解析領域を真上から見た建物の表面温度及び道路面からの 1.5m 高さの気温分布を示している．また建物側面のアルベドを変更した **Case2** と **Case4** について建物側面の表面温度分布を，東側は図 5.18 に，西側は図 5.19 に示す．東側については日射を直接受ける午前 7 時～午後 0 時，西側は午後 1 時～午後 6 時の結果を示した．図 5.20 に午後 2 時における地表面の風速の絶対値を示す．もっとも気温差が出現する午後 0 時～2 時について道路面のアルベドのみが異なる **Case 2** と **Case 3** の垂直断面における気温分布を図 5.21 に示す．

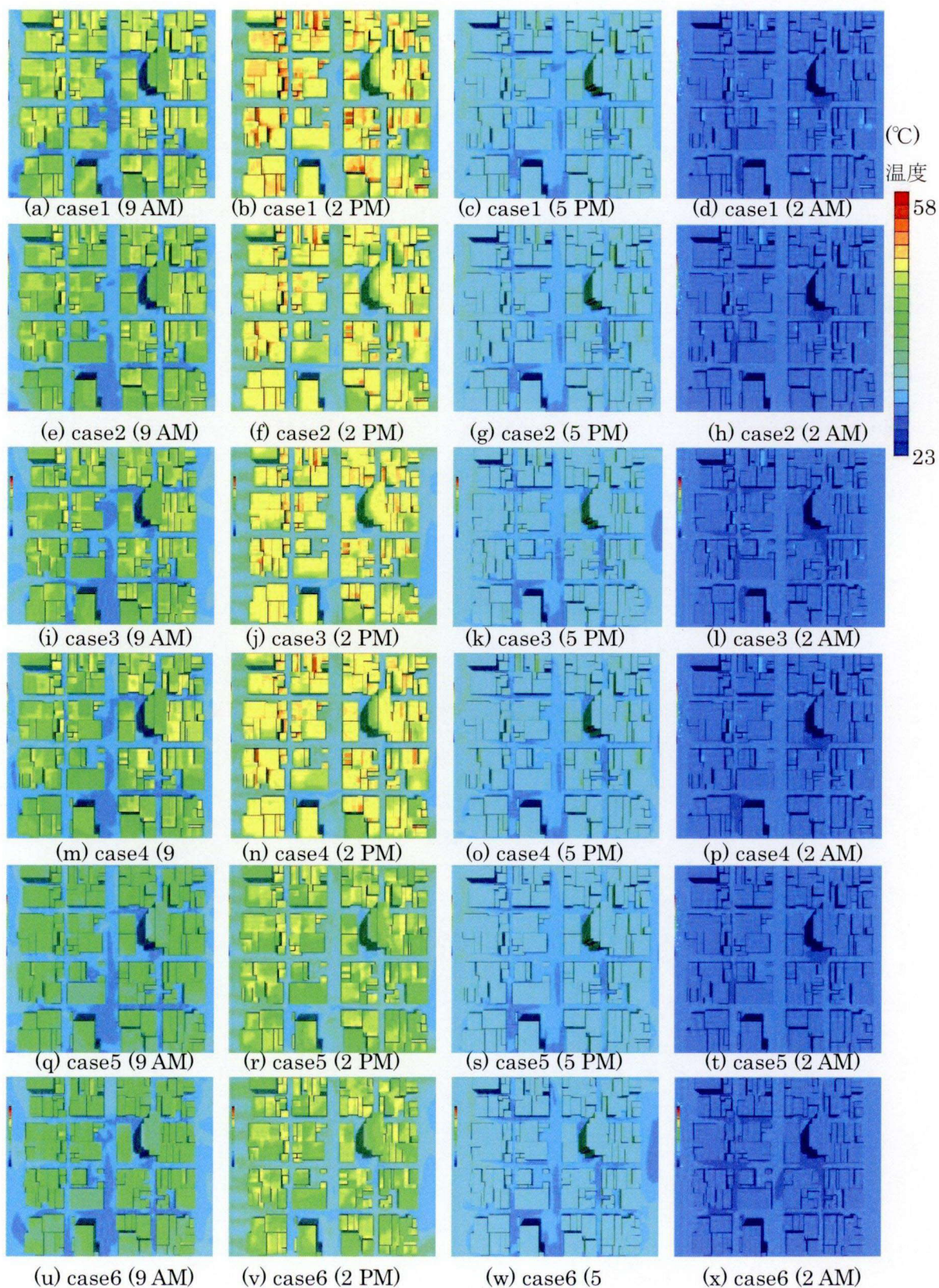


図 5.17 建物表面温度と地表面 1.5m における空気温度の解析結果

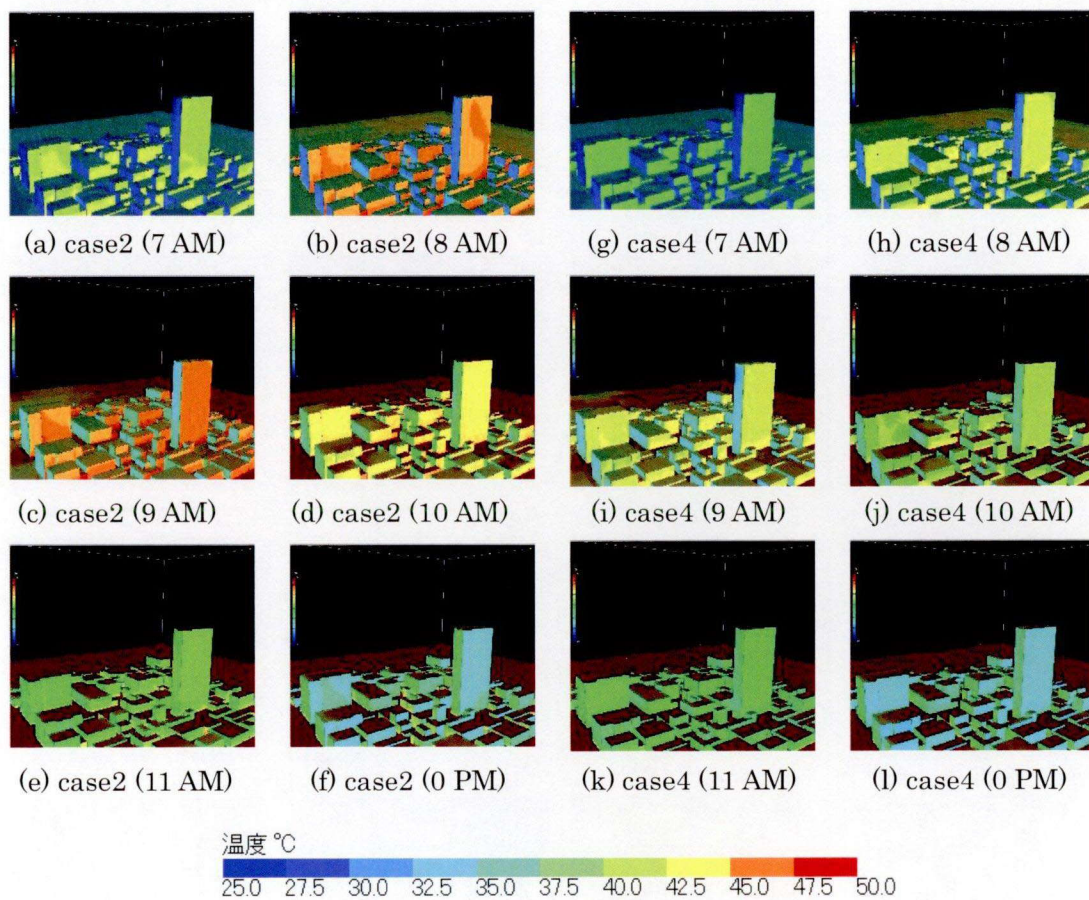


図 5.18 東側壁面における建物表面温度
Case2 と Case4 7:00 -24:00

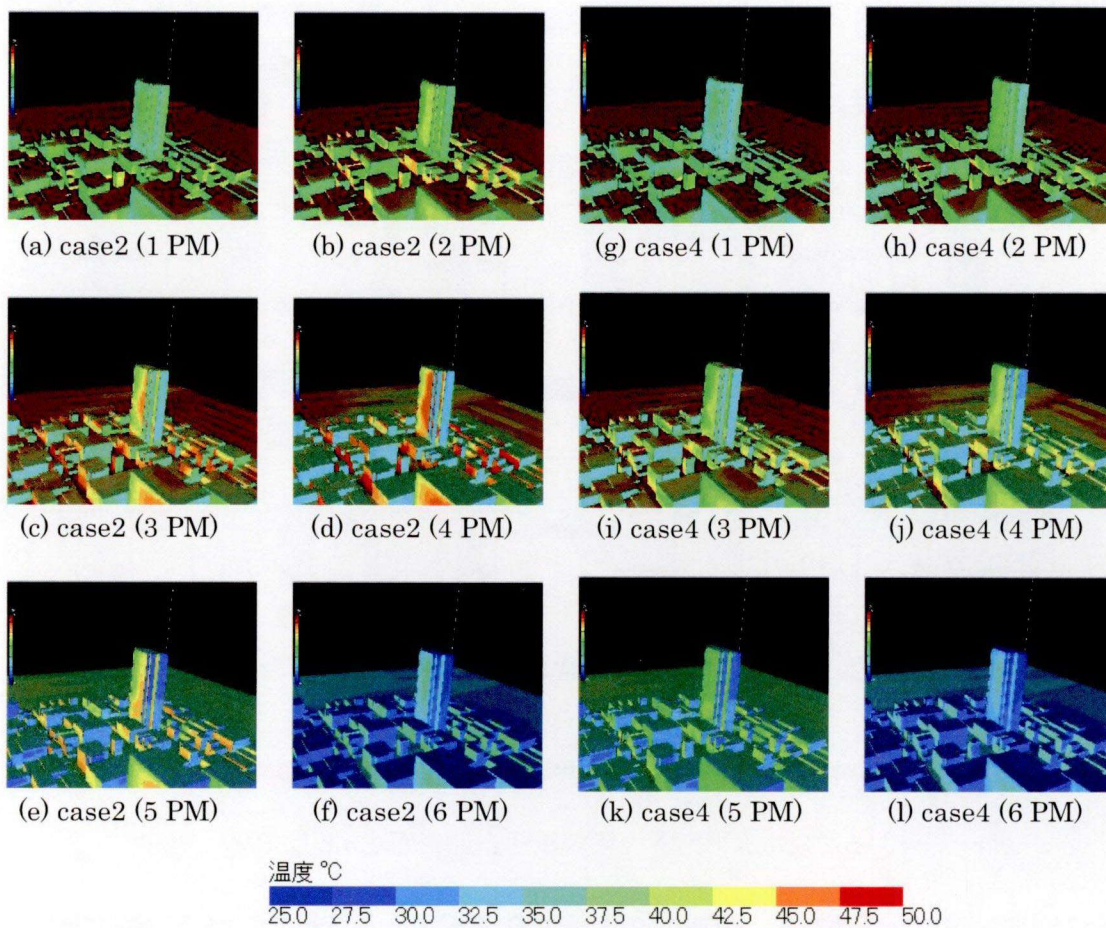


図 5.19 西側壁面における建物表面温度
Case2 と Case4 13:00 -18:00

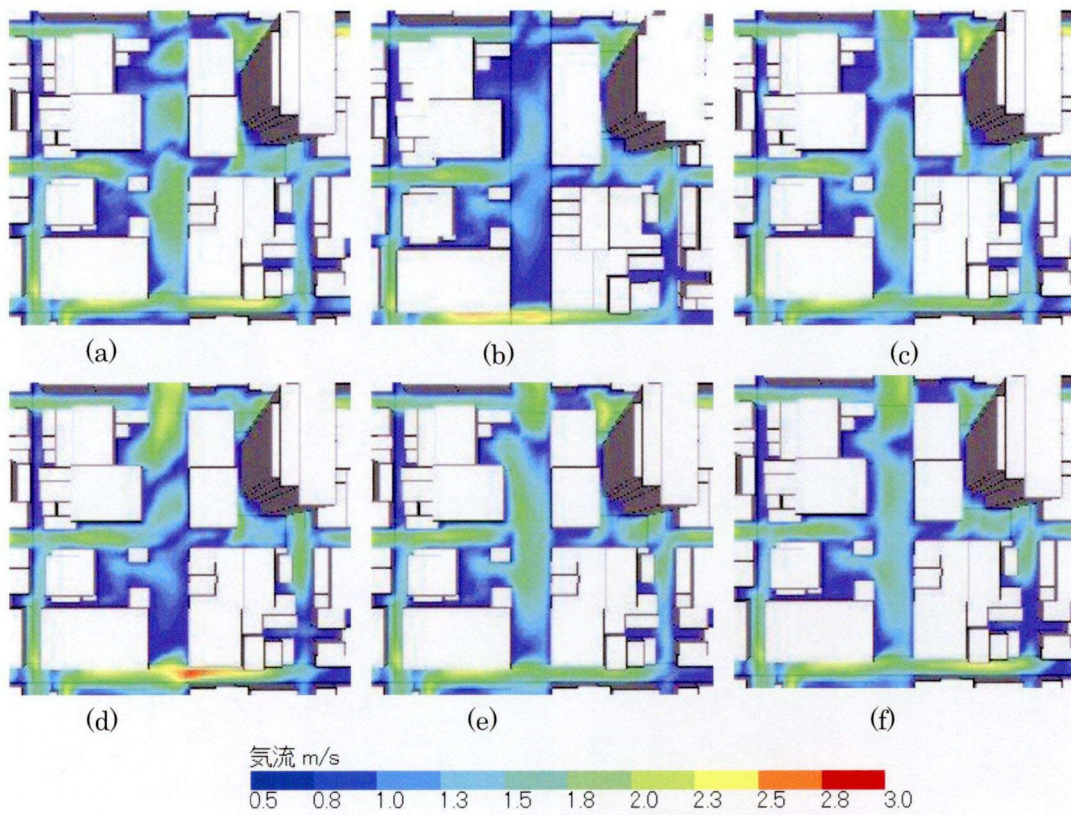


図 5.20 水平面上の絶対風速 地表面 1.5m (2 PM)

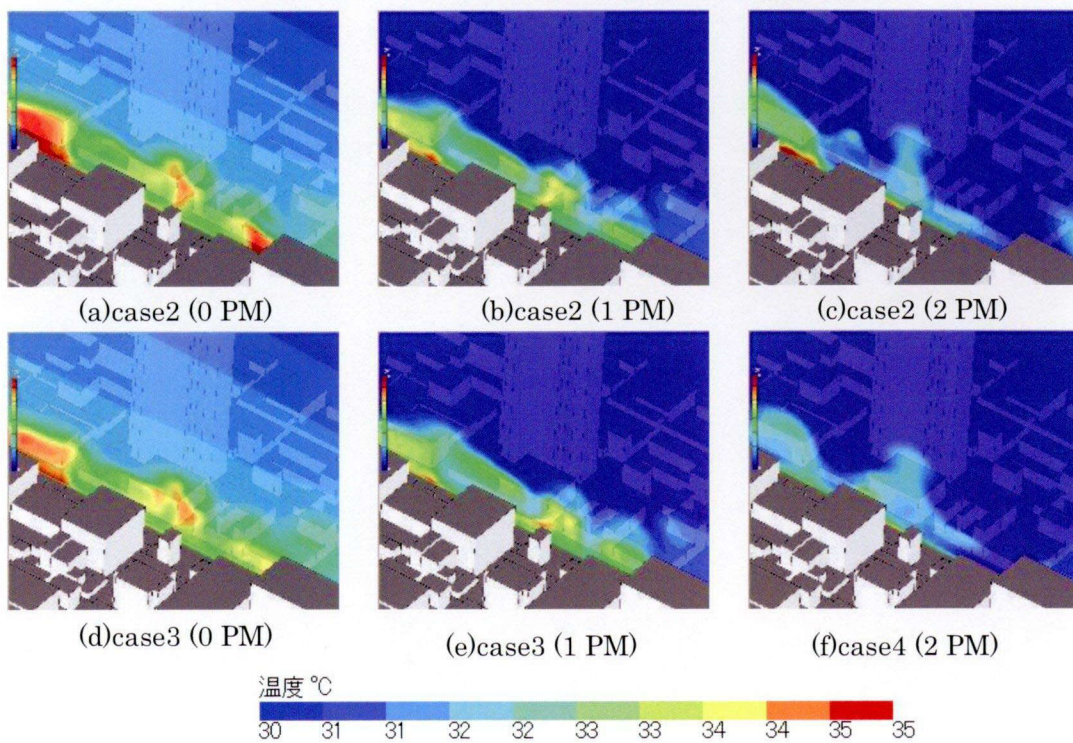


図 5.21 垂直面での温度分布

図 5.17 の Case2 と Case1 を比較すると、Case2 の表面温度が全体的に低くなっている。建物表面アルベドの低下が、都市ヒートアイランド現象の要因と考えられる。Case2 と Case3 を比較すると、道路表面アルベドの上昇により、日中の道路表面温度が約 5°C 低くなった。Case2 と Case4 を比較すると、図 5.18 の午前および図 5.19 の午後の結果のように太陽放射を受ける建物側面の表面温度が、著しく低下することが分かる。以上より、表面温度に寄与する最大の要因は日射であることは明白である。また、建物側面アルベドだけを上昇させた場合、建物側面の反射量が増加し、その一部が道路面で吸収されるため、道路表面温度の上昇が生じる。Case2 と Case5 を比較すると、屋根面アルベドを上昇させることにより、屋根面表面温度は約 6°C 減少するが、その影響は屋上近傍に限定され、地上 1.5m の気温にはほとんど影響を与えない。Case2 と建物側面と道路表面に高反射性素材の適用を想定した Case6 を比較すると、建物および道路表面温度は、大きく低下したが、気温への影響はあまり見られなかった。また、アルベドの変化は、夜間気温には全く影響を与えない。

図 5.17 の気温と図 5.20 の風速を比較すると、風速の大きくなる領域で気温が低くなる傾向があり、風速上昇が気温低下の要因にあることを示唆している。図 5.21 より、道路面アルベドの上昇が、地上 10m 付近までの気温に影響を与えることを示している。気温差の最大は、太陽放射が最大となる時間帯で、約 0.5°C 程度である。

以上より、表面温度を低下させるには、表面アルベドを高くすれば良いことが明確となった。しかし、建物表面または道路表面アルベドのみを小さくすると、その表面温度は低下するが反射により他の表面温度上昇を招く危険性もある。屋上面アルベドの変化は、地上近傍の気温に与える影響はほとんどないが、街区の屋上面レベルがほぼ同一高さの場合、屋上面レベルでの気温に与える影響は無視することはできない。当然ながら、建物表面と道路表面アルベドともに高くすると、都市ヒートアイランド緩和にもっとも有効となる。今後は、建物内部への負荷を考慮することによって、最適な表面アルベド

を考えていく必要があると考えられる.

5.5 結言

実在の街区である大阪府中央区の特定エリアを対象として、日射・輻射を考慮した 24 時間の非定常気流・熱解析を行った。気流・温度の境界条件は WRF による計算結果により求めた。直達日射に関しては CG による平行投影法を用い、輻射に関しては CG による PPM 法を用いた。日射・輻射を考慮した場合と考慮しない場合の 2 つのケースにおいて 24 時間の非定常計算を実施した。

両者には大きな差異があることが示され、日射・輻射を考慮することにより、都市ヒートアイランドの特徴を定性的に再現できることを示唆した。

今後は、定量的な再現を目指して、実測と比較によりモデルを発展させることが課題である。また、解析に用いるメッシュ分割数や解析空間の大きさが解析結果に与える影響等の検討も今後の課題である。

参考文献

- 5-1) Kim Y, Baik J, Spatial and temporal structure of the urban heat island in Seoul. *Journal of Applied Meteorology*, 44:591–605. (2005)
- 5-2) Jauregui E, Heat island development in Mexico City. *Atmospheric Environment*, 31:3821–3831.(1997)
- 5-3) Lemonsu A, Masson V, Simulation of a summer urban breeze over Paris. *Boundary Layer Meteorology*, 104: 463–490.(2002)
- 5-4) Montavez J P, Rodriguez A, Jimenez J I, A study of the urban heat island of Granada. *International Journal of Climatology*, 20: 899–911.(2000)
- 5-5) Klysik K, Fortuniak K, Temporal and spatial characteristics of the urban heat island of Lodz, Poland. *Atmospheric Environment*, 33: 3885–3895.(1999)
- 5-6) Giridharan R, Ganesan S, Lau S S Y, Daytime urban heat island effect in high-rise and high-density residential developments in Hong Kong. *Energy and Buildings*, 36:525–534.(2004)
- 5-7) Kondoh A, Nishiyama J, Changes in hydrological cycle due to urbanization in the suburb of Tokyo Metropolitan Area, Japan. *Advances in Space Research*, 26: 1173–1176.(1999)
- 5-8) Saitoh T S, Shimada T, Hoshi H, Modeling and simulation of the Tokyo urban heat island. *Atmospheric Environment*, 30: 3431–3442.(1995)
- 5-9) Kondo H, Tokairin T, Kikegawa Y, Calculation of wind in a Tokyo urban area with a mesoscale model including a multi-layer urban canopy model , *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96 :1655–1666 (2008)
- 5-10) Khiem M, Ooka R, Hayami H, Yoshikado H, Process analysis of ozone formation under different weather conditions over the Kanto region of Japan

- using the MM5/CMAQ modelling system , *Atmospheric Environment*, 44: 4463-4473 (2010)
- 5-11) Kusaka H, Kondo H, Kikegawa Y , A Simple Single-Layer Urban Canopy Model For Atmospheric models: Comparison with Multi-Layer And Slab Models , *Boundary-Layer Meteorology*, 101: 329–358 (2001)
- 5-12) Shrestha K, Kondo A, Maeda C , Investigating The Contribution Of Urban Canopy Model And Anthropogenic Heat Emission To Urban Heat Island Effect Using Wrf Model , *Trans. Of The JSRAE*, 26: 1-45-55 (2009)
- 5-13) Mochida A, Isaac Y.F. Lun , Prediction of wind environment and thermal comfort at pedestrian level in urban area , *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96: 1498–1527 (2008)
- 5-14) Huang H, Ooka R, Kato S, Urban thermal environment measurements and numerical simulation for an actual complex urban area covering a large district heating and cooling system in summer , *Atmospheric Environment* ,39 :6362–6375 (2005)
- 5-15) Ashie Y, Vu Thanh Ca, Asaeda T, Building canopy model for the analysis of urban climate, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*,81: 237-248. (1999)
- 5-16) Kanda M, Kawai T, Nakagawa K, A Simple Theoretical Radiation Scheme For Regular Building Arrays, *Boundary-Layer Meteorology* ,114: 71–90 (2005)
- 5-17) Papanastasiou D.K., D. Melas, I. Lissaridis , Study of wind field under sea breeze conditions: an application of WRF model , *Atmospheric Research* ,98: 102–117 (2010)
- 5-18) Patankar S.V, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, *McGrawHill*

BOOK (1980)

- 5-19) Ngata T, Proceedings of the Architectural Institute of Japan (1978)
- 5-20) Roger A. Pielke, Mesoscale Meteorological Modeling, Academic Press (1984)
- 5-21) 岩村裕也, 村上周三, 他: 街区形状と実効日射反射率・空調負荷の関係, 空調
和衛生工学会論文集, 1067-1070, (2004)
- 5-22) 大岡龍三, 大森敏明, 他: 数値シミュレーションを利用したヒートアイランド対
策による人体影響評価に関する研究 (その1), 日本建築学会大会学術講演梗概
集, (2008)
- 5-23) Hashem A. Surabi M. Arthur R., “Global cooling: increasing world-wide urban
albedos to offset CO₂,” (2008)

第6章 CG技術による高速輻射・日射解析手法の 屋内解析への応用

6.1 緒言

屋内の熱環境や快適性の評価においては、日射・輻射は非常に重要な影響要因であることはよく知られている。建築物の設計や空調設備設計においては、日射負荷や輻射の負荷を考慮した熱負荷計算は必須となっている⁶⁻¹⁾。しかしながら従来の設計用熱負荷計算では、設計対象空間を質点系の回路網として捉えるため、日射や輻射も室全体としての負荷量を与えるにとどまっており、3次元的な温度分布の詳細な検討がなされていないのが実情である。気流場の解析を含めた屋内環境の3次元の温度分布や快適性を検討するCFDの解析は従来から多くの研究が行われてきているが、要素面単位での日射や輻射の影響を考慮した研究例はそれほど多くはない。幾つかの研究は、日射や輻射を含めたCFDの解析手法の提案を行っているが⁶⁻²⁻⁶⁻⁸⁾、最初のステップで非定常の輻射・伝導解析による熱移動の計算を行い表面温度を算出した後、得られた表面温度を境界条件としてCFDによる解析を行うものである。そしてこれらの研究では、モンテカルロ法もしくはモンテカルロ法に類する光線追跡法により、日射・輻射の影響を算出していた。

本章では、第2章および第3章で示したCG技術によるPPM法およびCG技術による日射計算法を、大規模な吹き抜け空間（アトリウム）を有する建物の屋内環境の解析に応用した。対象とした大規模な吹き抜け空間を有する建物形状では、ガラス面が大きな占有面積となるため特に日射の影響が無視できない。本章では近年、省エネルギー対策の面から注目されている高反射性塗装材料の影響を輻射・日射を考慮したCFD解析

により検討し、これらの手法の実用性を検証するとともに、日射・輻射が気流および熱環境に与える影響について評価した。

6.2 解析の概要

解析を行うにあたっては、第5章と同様に、第4章で示した熱・気流の基礎方程式および固体表面における熱収支式を、解析モデルとして用いた。屋内の直達日射の影響を3次元モデルの要素単位で評価するため、第3章で示したCG技術により日射の当たる要素、当たらない要素を各時刻で求めた。建物内側表面、及び建物外側表面ともに、日射および輻射の影響を考慮して、第4章の式(4.8)に示した熱収支バランス式から壁面固体側と空気側への熱移動量を求めた。第5章と同様に、日射フラックスの直達フラックスと、散乱フラックス量は式(5.1)により計算した。ただし、本章では建物屋内を対象としたため、建物壁面の外側表面から建物周囲環境への輻射の影響までは考慮していない。また、本章では屋内の快適性環境を評価するために、屋内壁面からの輻射の影響を平均輻射温度(MRT)として求め、温熱快適性指標であるSET*を用いた解析を行った。平均輻射温度は、高さ1.2mの位置で前後・左右・上下の6方向での放射温度を求め、人体面積の重み付け平均を考慮し、式(6.1)から求めた。

$$\sigma T_R^4 = \sum F \sigma T_S^4 + S \downarrow_{direct} + \frac{S \downarrow_{diff}}{6} \quad (6.1)$$

ここで、 σ はステファンボルツマン定数、 T_R は平均輻射温度、 F は形態係数、 T_S は周囲壁温度、 $S \downarrow_{direct}$ は直達日射、 $S \downarrow_{diff}$ は散乱日射を表す。

SET*は、人体の熱収支を考慮した温感指標であり、温度・気流・湿度・平均輻射温度に加え、人体の代謝量および着衣状況を考慮した体感温度を示している。

ASHRAE(The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers)では、夏期の快適性域を $SET^*=22.8\sim 26.1^{\circ}\text{C}$ としている⁶⁻⁹⁾。 SET^* の指標が快適性域を大きく上回るほどそこにいる人は不快な暑さを感じることになる。なお、本章の解析では湿度解析は行わなかったため、 SET^* 算出時の湿度は一樣で相対湿度50%と仮定した。また、 SET^* 算出時の代謝量 $Met=1.2$ ，着衣量 $Clo=0.6$ と仮定して解析を行った。

6.3 解析モデル

解析モデルを図 6.1 に示す。建物モデルは幅 20m×奥行き 18m×高さ 21m で、東側面は一面ガラスでできているものとし、その他床面、天井面を含む5面は、コンクリートと仮定した。解析に用いたメッシュを図 6.2 に示す。解析メッシュ数は、 $47\times 43\times 49=99,029$ メッシュとした。

ここでは、日射・輻射の影響を明確に検討する目的から、あえて換気や冷房を伴わない密閉空間での非空調条件を仮定した。壁面外側表面には、境界条件として外気に対する熱伝達率を仮定した。解析条件を表 6.1 に示す。

表 6.1 建物モデルの解析条件

外部熱伝達率	鉛直壁面 $h_o=11.6\text{w}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ 天井面 $h_o=17.4\text{w}/\text{m}^2\cdot\text{K}$
壁面	コンクリート : 西, 南, 北, 床, 天井面
ガラス面	ガラス板 : 南面

建物内側表面では、気流場と温度に対する境界条件として壁関数を適用した。この建物に日射が当たる 8 月 11 日の 8 時から 15 時までの間の屋内環境の変化を解析し、日射・輻射が与える影響を調べた。

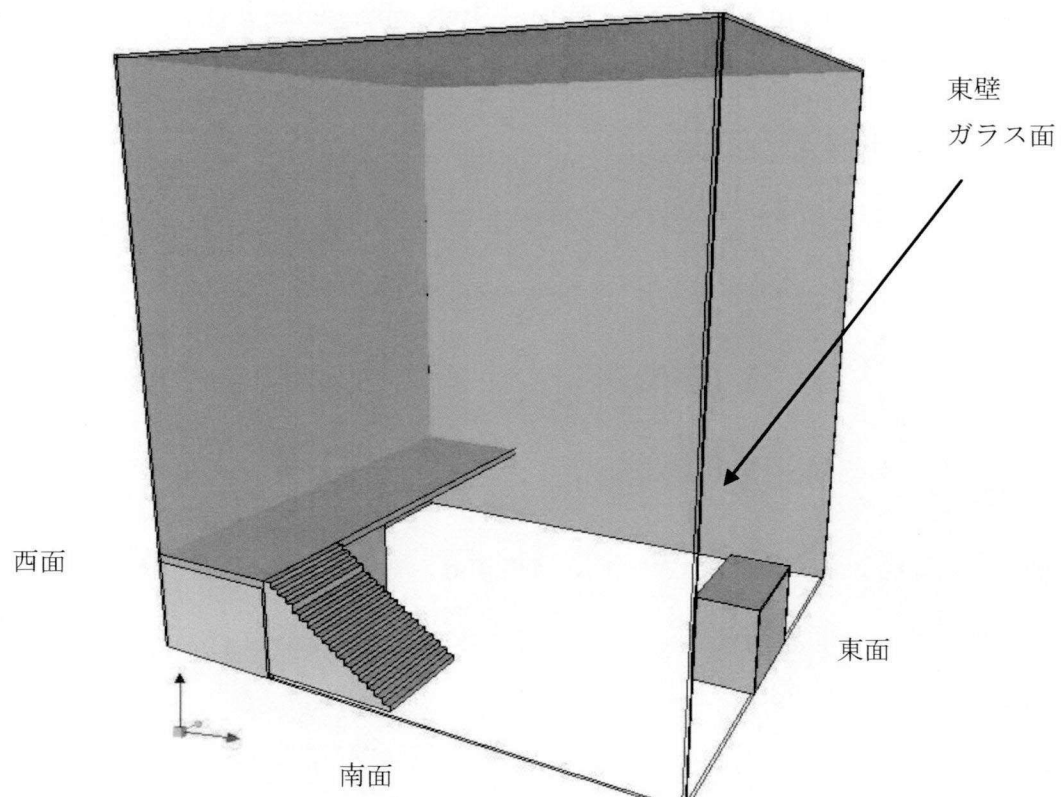


図 6.1 建物（アトリウム）解析モデル

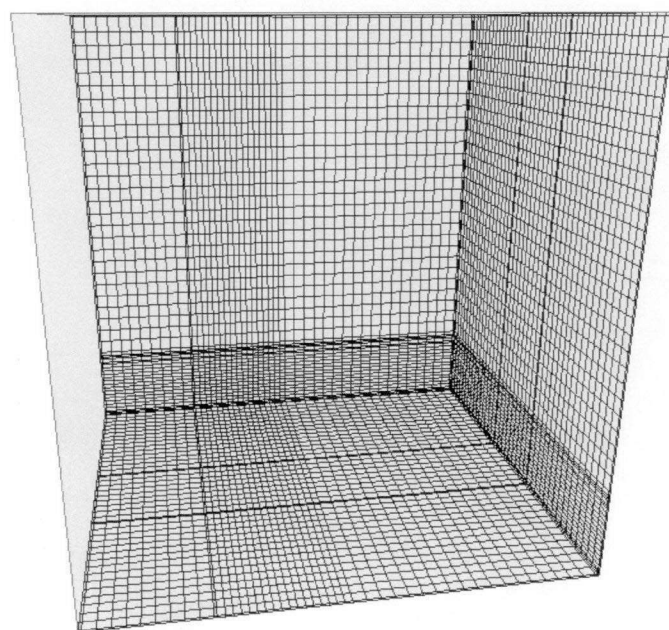


図 6.2 解析メッシュ図

解析では、日射・輻射の影響が顕著に表れると考えられる壁面での反射率の違いによる影響を調べるとともに、輻射計算を行わない場合との結果の比較を行った。ガラス面を含む各壁面、床面が通常の反射率を有する場合と、高反射性塗装材料を施した場合の2ケースについて比較を行った。通常のガラス面および壁面での反射率を0.2とし、高反射性塗装材料を施したケースでは、南側ガラス面の日射反射率を0.8、その他の壁面での反射率を0.7とした。各ケースにおける解析条件を表6.2に示す。

表 6.2 各ケースにおける解析条件

計算ケース	Case1	Case2	Case3
日射	○	○	○
輻射	○	○	×
壁面アルベド	0.2	0.7	0.2
東ガラス面アルベド	0.2	0.8	0.2

6.4 解析結果

表 6.2 に示した3ケースの解析を実施した結果を以下に示す。図 6.3 は8月11日の10:00, 11:00, 11:50の各時刻において、東ガラス面を通して屋内に侵入する直達日射量を示す。ガラス面のアルベドを0.2としたCase1では、屋内に到達する直達日射量は、 $450\text{w/m}^2 \sim 650\text{w/m}^2$ となり太陽高度の高い8月を仮定しているため、水平面が最も受熱する日射量が多い。Case2は、高反射性塗装を仮定し、アルベドを0.8としたため屋内に侵入する直達日射量が極端に減少している。

図 6.4 は、8月11日の11:00, 12:00, 13:00における建物屋内の高さ1.2mにおける水平面温度分布と建物奥行き方向の中央断面での垂直面温度分布を示す。図 6.4 では建物の南側壁面を手前から見ており、右側の側面が東ガラス面となっている。Case1では壁面およびガラス面のアルベドが0.2としており、建物の外壁面では日射熱量の大半が壁体に一端吸収されるとともに、東側ガラス面では大部分の日射量が屋内に侵入す

るため高さ 1.2m における屋内温度は、11 時において 30℃を超え、13 時では 35℃を超える温度分布となっている。本章における解析では、日射・輻射の影響を比較検討する目的から非空調の密閉空間を仮定しているため、Case1 の条件下では非常に高い屋内温度となる。Case2 では、高反射性塗装材料を用いた場合を仮定し、壁面でのアルベド 0.7 および東側ガラス面でのアルベドを 0.8 としたため、外側壁面に照射された日射の大半が反射され、東側ガラス面でも大部分の日射量が反射され屋内には侵入しないため、高さ 1.2m における屋内温度は Case1 より 3℃～4℃程度低下している。

図 6.5 は、Case1 と Case2 における高さ 1.2m の SET*の水平分布を示す。Case1 では、10:00 の段階でも日射があたる範囲での快適性が極端に悪化している。ガラス面が東側壁面のみのため、直達日射の侵入は午前中のみに限られているが、周囲の外壁も日射の影響を受け高温となるため、快適性は悪化している。高反射性塗装材料を用いた場合を仮定した Case2 では、10:00 の時刻で日射が侵入するエリアの SET*の値が高くなるものの、11:00、12:00 の時刻においても SET*の値は 28℃前後となっており、高反射塗装材料が屋内環境の快適性を改善する効果がよく現れている。

図 6.6 は、輻射解析を考慮した Case1 と輻射解析を考慮しない Case3 による高さ 1.2m における水平面温度分布と建物奥行き方向の中央断面での垂直面温度分布を示す。また、図 6.7 は、Case1 と Case3 による高さ 1.2m の SET*の水平分布を示す。輻射解析の有無により、鉛直断面での温度分布は Case1 の結果が高くなっている。輻射を考慮しない解析では日射の当たらない壁面の温度は低いままであるが、輻射解析を行うことにより日射の当たる壁面と当たらない壁面でも輻射の熱交換が行われ、壁面温度が上昇していることが原因と考えられる。また、SET*の分布は Case1 の結果の方が悪化していることを示している。これは日射の影響により壁面の温度が上昇し、屋内壁表面から輻射を受けることによって、平均輻射温度が上昇していることがその要因として考えられる。

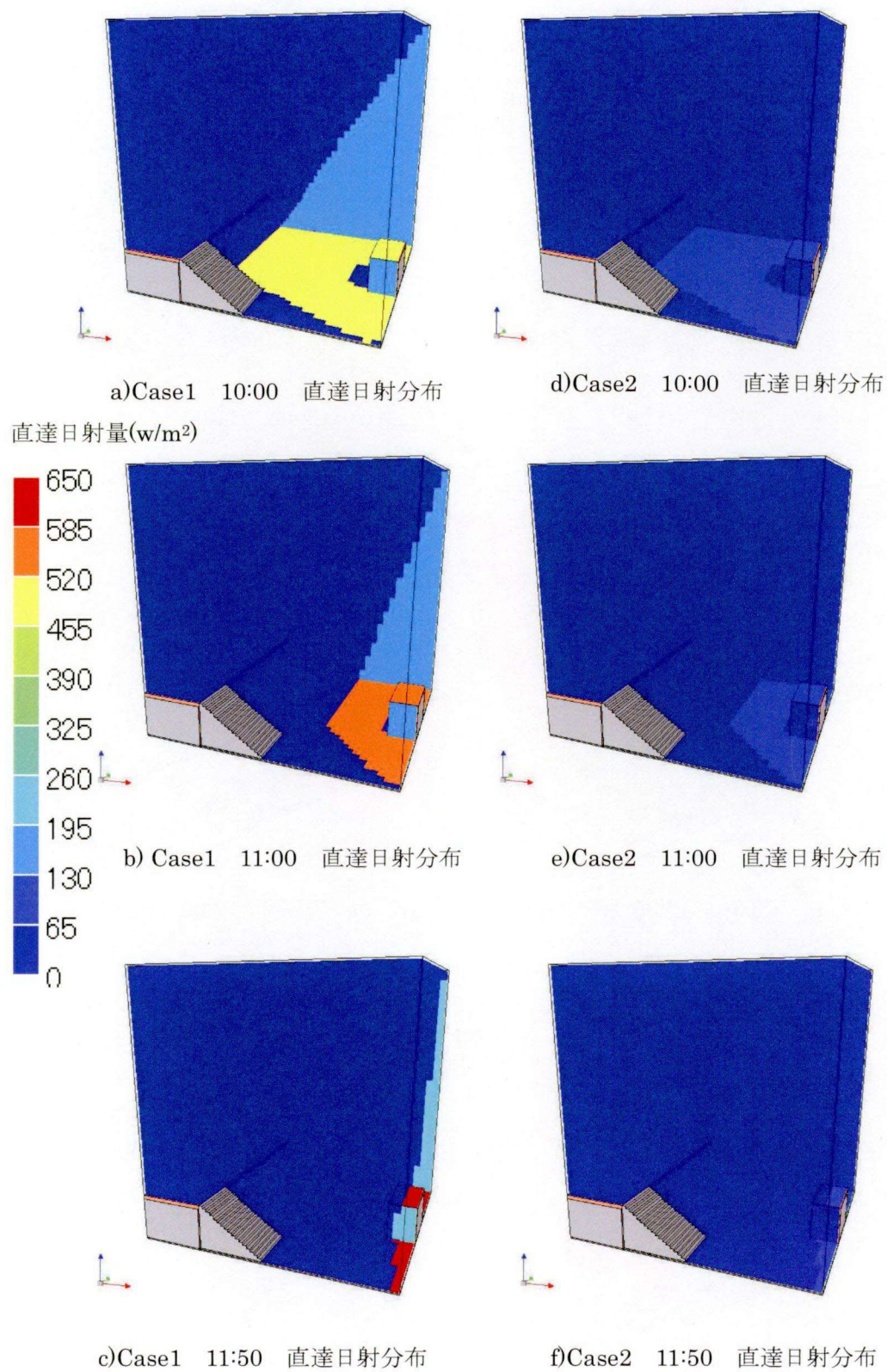
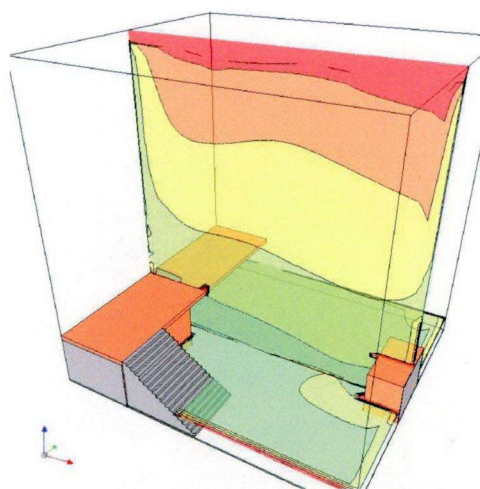
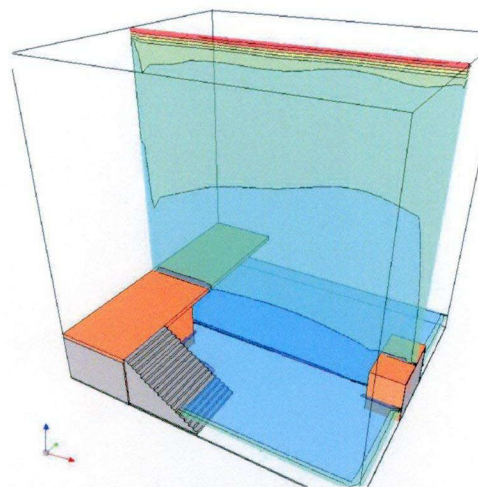


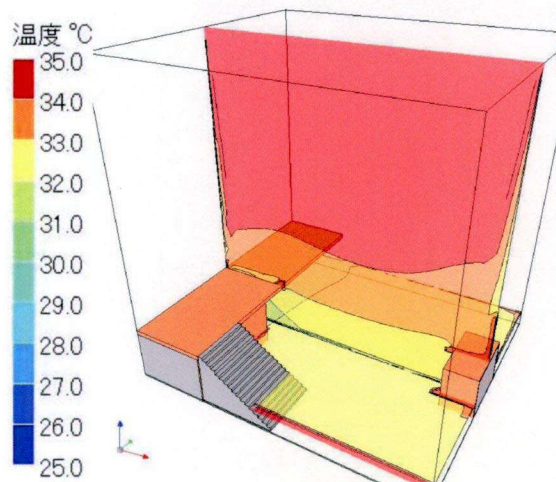
図 6.3 ガラス面反射率の違いによる室内直達日射量



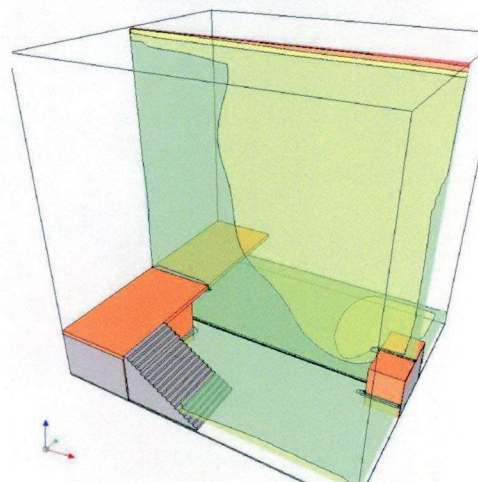
a) Case1 11:00 温度分布



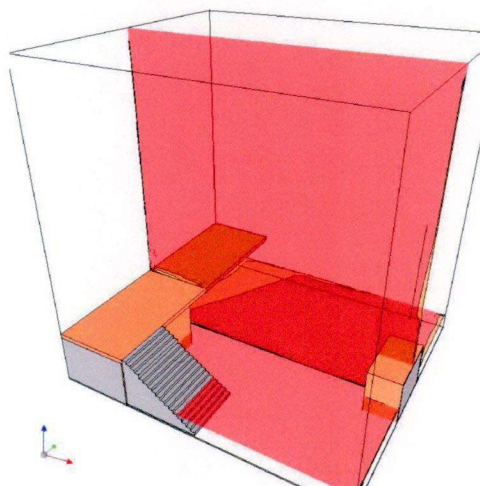
d) Case2 11:00 温度分布



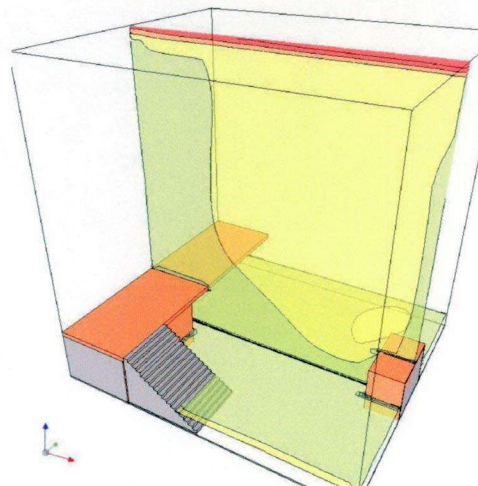
b) Case1 12:00 温度分布



e) Case2 12:00 温度分布



c) Case1 13:00 温度分布



f) Case2 13:00 温度分布

図 6.4 壁面反射率の違いによる室内温度分布

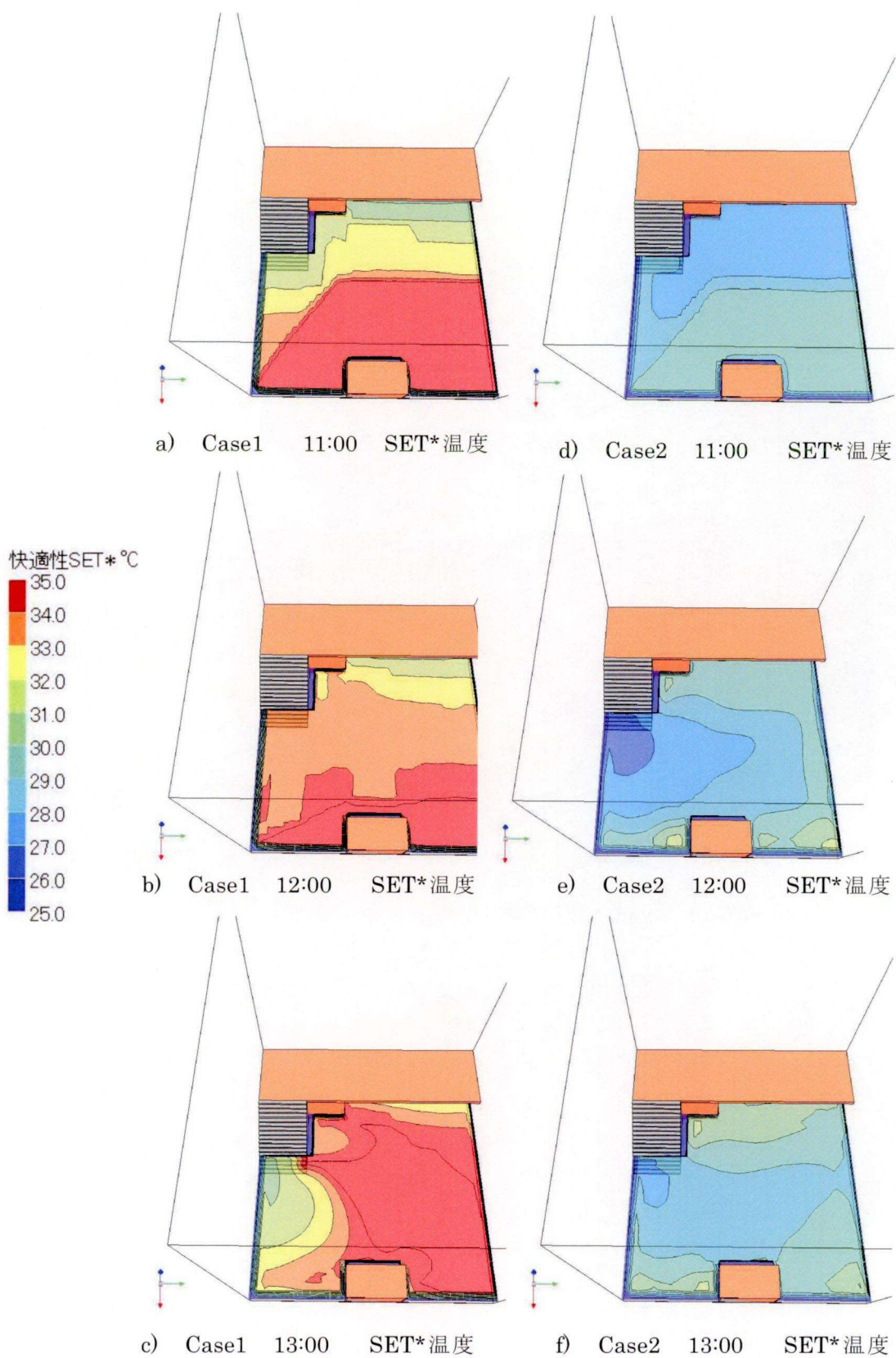


図 6.5 壁面反射率の違いによる SET*の水平分布

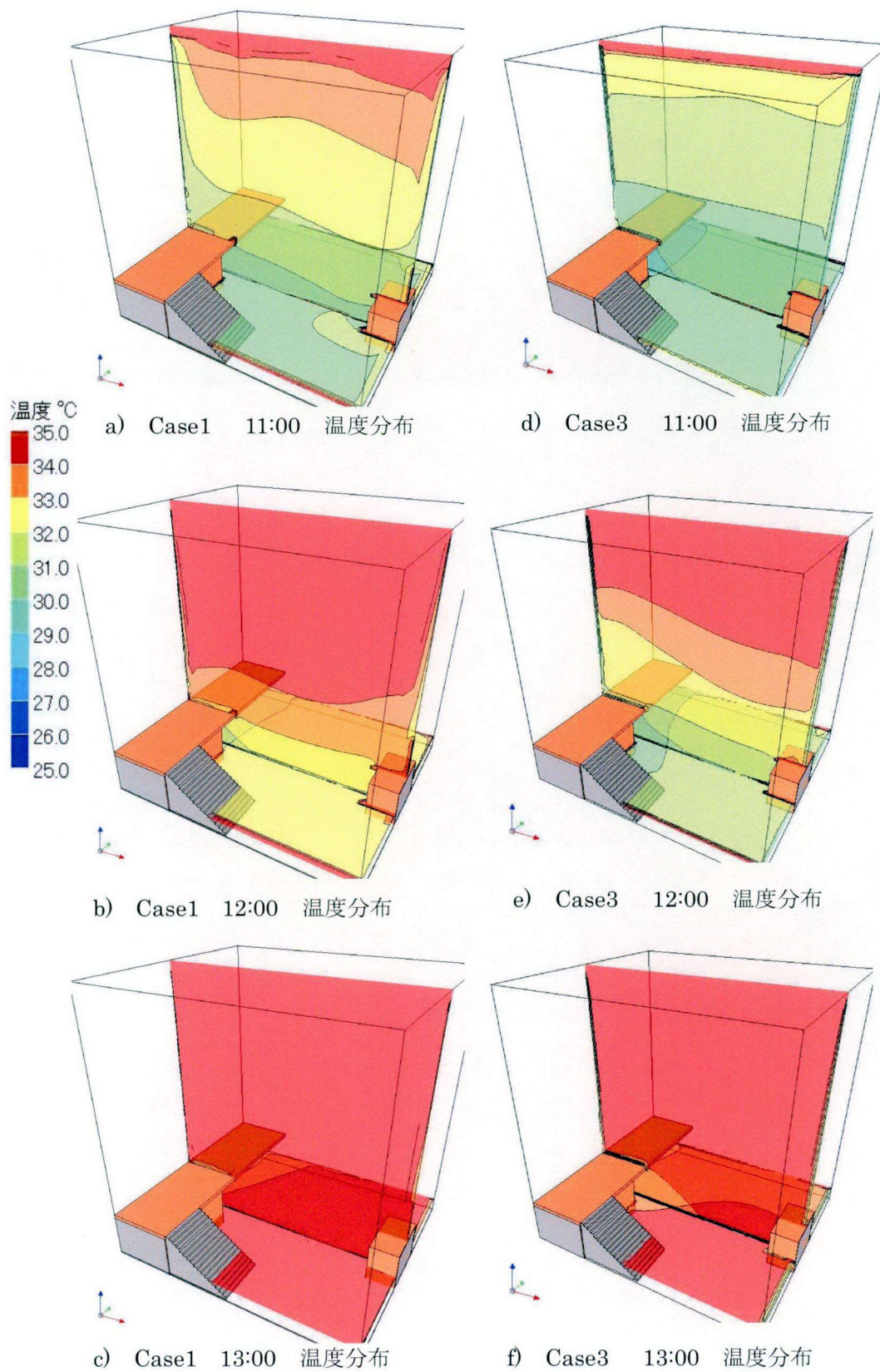


図 6.6 輻射解析の有・無による室内温度分布の変化

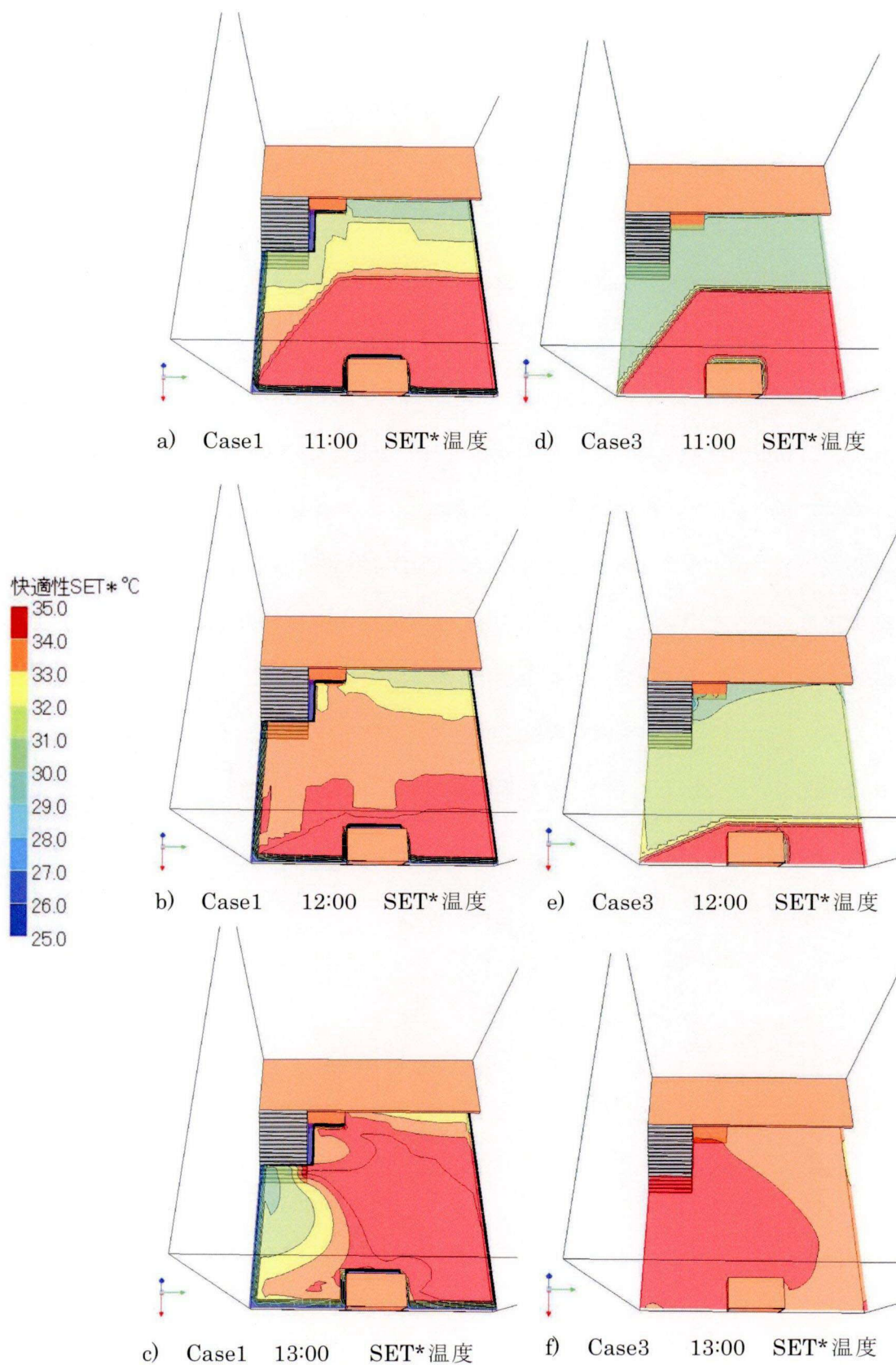


図 6.7 輻射解析の有・無による SET*温度の変化

6.5 結言

本章では、CG 技術による輻射・日射の計算手法をガラス面が大きな占有面積を占める大きな吹き抜け空間を有する建物（アトリウム）に適用し、輻射・日射の影響を考慮した 3 次元の非定常気流・熱解析を行った。輻射については、第 2 章で示した CG 技術により予め各要素間の輻射形態係数を求めることにより解析を行った。日射については、第 3 章で示した手法を適用することにより、時々刻々変化する日射の影響を 3 次元の CFD 解析対象の要素単位で評価した。また、近年省エネルギー対策の面から注目されている高反射性塗装材料の影響も輻射・日射を考慮した CFD 解析により検討した。

ガラス面や壁面での反射率は、屋内環境に大きな影響を与えることが示され、建物方位やガラス面の大きさを考慮した 3 次元の CFD 解析により両者の違いをより詳細に検討できる可能性を示唆し、CG 技術を用いた輻射・日射の解析手法が汎用的な熱環境、快適性の評価に応用できることを示した。

なお、本章で示した応用例も解析的検討のみに留まっているため、第 5 章と同様に今後は実測との比較によりモデルを発展させることが課題である。

参考文献

- 6-1) 石野久彌, 他, 設計用最大熱負荷計算法, 社団法人空気調和・衛生工学会(1989)
- 6-2) 宮内郷史, 持田灯, 吉野博, 他, 放射・対流連成 CFD 解析と熱負荷計算を統合した室内外温熱環境予測手法の研究, 日本建築学会東北支部研究報告会 79-84, (2004)
- 6-3) 大森敏明, 谷口博, 工藤一彦, 室内ふく射環境の解析法の開発と床暖房への適用, 空気調和・衛生工学会論文集, 42, 9-18(1990)
- 6-4) 横井睦己・村上周三・加藤信介・近本智行, アトリウム空間内の熱・空気流動性状に関する実験ならびに CFD による解析 第2報, 空気調和・衛生工学会論文集, 66, 97-109, (1997)
- 6-5) 村上周三・加藤信介・横井睦己・近本智行, アトリウム空間内の熱・空気流動性状に関する実験ならびに CFD による解析 第2報, 空気調和・衛生工学会論文集, 66, 97-109, (1997)
- 6-6) 齊藤 義明, 加藤 信介, 池澤 広和, 他, 複雑形状を有する大空間の温熱環境解析, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 1159-1162(2004)
- 6-7) 村上周三, 高橋義文, 加藤信介, 崔棟皓, 近藤靖史, 対流場, 放射場の連成シミュレーションによる冷房室内の温熱環境解析 (第1報) 空気調和・衛生工学会論文集 57, 105-116(1995)
- 6-8) 村上周三, 小林光, 加藤信介, 大森敏明, 崔棟皓, 対流場, 放射場の連成シミュレーションによる冷房室内の温熱環境解析 (第2報) モンテカルロ法による形態係数の精度と連成計算の複雑形状室内への適用, 空気調和・衛生工学会論文集 59, 95-104 (1995)
- 6-9) ASHRAE: Fundamentals Handbook (SI) Chapter8 (1993)

第7章 結論

本章では、本研究で得られた成果を述べ、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。

7.1 各章のまとめ

第1章では、本研究の研究背景として地球温暖化やヒートアイランド現象に代表される都市空間の高温化対策が近年の非常に大きなテーマの一つとなっていることを示し、温暖化に対する省エネルギー対策の観点に加え、温熱対策の点からも屋外・屋内における温熱環境のコントロールは重要な意味を持つことを示した。また現時点における温熱対策の設計検討手法として、熱負荷計算と CFD 解析の位置づけがどのようなものであるかを示した。温熱環境に影響を与える要因因子の中でも、輻射・日射は非常に大きな影響を与えるファクターとして認識されているにも関わらず、これらの影響を解析的に詳細に検討するためには多大な計算機負荷を必要とするため、現在もなお多くの場合の温熱環境の CFD 解析では輻射・日射の影響は考慮されていないことを指摘し、高速で汎用的に用いることのできる輻射・日射の解析手法の必要性を述べた。

第2章では、新たに開発を行った CG 技術を用いた輻射計算手法である PPM 法（角錐投影法）の原理を述べ、CFD の解析対象要素表面毎に RGB の値を一意に予め与えておくことによって、CG による PPM 法により得られる画像の画素情報から高速に形態係数を求めることができることを示した。また、従来から輻射解析を行う際に広く適用されているモンテカルロ法と PPM 法を比較し、モンテカルロ法に比べ 1000 倍以上の高速化が可能となることを示した。さらに、モンテカルロ法との精度比較も同時に行い、PPM 法が十分実用的な精度を有することを示した。

第 3 章では、CG 技術を用いた日射解析手法の原理を述べた。直達日射に対しては CG による平行投影画像を利用し、第 2 章で示した概念と同様に CFD の解析対象要素表面毎に RGB の値を一意に予め与えておくことによって直達日射の到達する範囲を要素単位で識別できることを示した。散乱日射や直達日射が到達した要素面からの反射日射については、第 2 章で示した要素間の形態係数を用いてその影響を解析できることを示した。さらに、日射解析を行う際に従来から用いられている光線追跡法との比較を通して、日射到達面の識別段階において、CG の特性を活かした日射解析手法により従来の手法に比べ 1000 倍程度の高速化が可能となることを示した。また第 3 章では、CG 技術による日射解析手法の誤差評価も行い、本手法が十分実用的であることを示した。

第 4 章では、第 2 章および第 3 章で示した手法により得られる、要素間毎の輻射形態係数の情報ならびに日射到達面の情報を、実際の CFD による温熱環境解析に組み込む際に必要となる基礎方程式を示した。

第 5 章では、本研究にて提案した手法の実用性を確認するため、大阪市中央区にある実在街区を対象として、輻射・日射を考慮した屋外環境における 24 時間の非定常気流・温熱環境の解析を行った。まず、輻射・日射を考慮した 24 時間の非定常気流・温熱環境の解析結果と、輻射・日射の影響を考慮せずに同様の解析を行った結果の比較を行い、両者の結果には顕著な差が現れること、輻射・日射の影響を考慮した CFD の解析結果が都市ヒートアイランドの特徴をより適切に再現することを示した。次に、輻射・日射の環境においては重要な要因となる、地表面および建物表面の反射率の違いが都市環境に与える影響を検討し、地表面および建物表面温度に寄与する最大の要因は日射であることを示し、これを高速で解析することを可能とする第 2 章および第 3 章で示した手法の有用性を明らかにした。

第 6 章では、第 5 章と同様に本研究にて提案した手法を屋内環境に適用した。東側一面がガラス面で覆われたアトリウム空間を想定し、建物壁面、およびガラス面の反射特

性が屋内環境に与える影響を解析的に調べた。次に、輻射解析を行った場合と行わない場合の比較を行った。第 6 章では、平均輻射温度を考慮した温熱快適性指標 SET*を用いた評価も行い、輻射解析の有無が SET*の値に大きく影響することを示して、これを高速で行えることを可能にする第 2 章および第 3 章で示した手法の有用性を明らかにした。

第 7 章は、以上の結果を要約し、今後に残された課題について述べた。

7.2 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. 解析手法の精度に対する更なる検討

CG 技術による輻射形態係数の算出は、原理的に点対面の形態係数を求めている。本来であれば、形態係数の定義通り面対面としての形態係数を求める必要がある。CG 技術による手法の汎用性を高めるためにも点対面の持つ誤差特性は把握しておくことは今後の課題である。一方で、形態係数は対象となる面間の幾何学的相互関係を表す値であり、必要となる形態係数の保持数は対象となる面要素 2 乗に比例するため、現状における応用対象モデルではメッシュ数も数百万メッシュとなることも多く、コンピュータのメモリー限界から、対象要素面をまとめるグルーピングが必要となっている。このような状況下では、点対面による誤差よりもグルーピングによる誤差が遙かに大きいと考えられるため、本研究では CG 技術による点対面の誤差特性の検討は現段階では実施していない。また、実際の都市街区の計画においては都市構成物体のアルベドだけではなく、構成物体の熱容量のデータベース化や、建物窓面の影響、緑地帯や樹木の影響等を考慮する必要がある。例えば日射の影響に対する重要なファクターとなる樹木などは、メッシュでは表現できない物体であり、本研究では対象として扱っていないが CG 技術の応用として樹木による日射の透過特性等を考慮できるよう手法の拡張を図ることも

今後の課題となっている。また、本研究では OpenGL を用いて手法の実用性、精度検証、高速化性能の検討を行ったが、GPU やメモリなどグラフィックス・ハードウェアに依存する影響や性能検証も今後の課題となっている。

2. 解析手法の精度に対する実験検証

第2章および第3章において示した CG 技術による輻射・日射の解析手法は、それぞれ従来から用いられてきたモンテカルロ法や光線追跡法との比較を通して精度の妥当性を示したが、実験モデルや実測との比較検証にまでは至らなかった。従来手法との精度比較を通して、原理的な面での精度の妥当性は確保できていると考えているものの、現実的問題に応用した際の精度上の改善点はこれからの検討課題となっている。実験データとの比較を通して、解析手法の妥当性を検証し、さまざまな応用面に汎用的に用いられる手法とすることは今後の課題である。また、実測との比較においては直達日射の反射光の持つ指向特性の影響を把握することも今後の課題となっている。本論文では、反射光については一様完全散乱を仮定したが入射角による散乱特性を考える必要性も検討の余地を残している。

謝 辞

大阪大学大学院工学研究科近藤明准教授には、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。また、2010年に退官された大阪大学大学院工学研究科加賀昭和名誉教授にも、本研究を進めるにあたって終始さまざまなご提案、ご指導をいただき CG 技術の分野に関する多種多様な知識をご教示いただきました。厚く感謝申し上げます。大阪大学大学院工学研究科下田吉之教授、加賀有津子教授には本論文の執筆にあたって大変貴重なご助言とご指導をいただきました。また、大阪大学大学院基礎工学研究科桃瀬一成准教授には、輻射解析の実装にあたりさまざまなご提案、ご指導をいただきました。さらに、大阪大学大学院工学研究科加賀研究室の卒業生、ならびに近藤研究室在室の皆様にも有形無形のご支援を頂きました。あわせてここに厚く感謝の意を表します。

本研究は、筆者の所属する株式会社アドバンスドナレッジ研究所における製品開発と同時進行的に進めてきた側面もあり、株式会社アドバンスドナレッジ研究所のスタッフの方々からも結果として非常に有益な助言や示唆をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

