ISSN 1346-7328
国総研資料　第583号
ISSN 0286-4630
建築研究資料　第123号
平成 22 年 3 月

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.583　　March 2010

建築研究資料

Building Research Data

No.123　　March 2010

地球シミュレータを用いた東京 23 区全域における高解像度のヒートアイランド数値解析

足永靖信・鍵屋浩司

High resolution numerical simulation on the urban heat island of the entire 23 wards of Tokyo using the earth simulator

Yasunobu ASHIE, Koji KAGIYA

平成 22 年 3 月

国土交通省　国土技術政策総合研究所
National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

独立行政法人　建築研究所
Building Research Institute
Incorporated Administrative Agency, Japan

はしがき

ヒートアイランド現象（都市の気温上昇）は年々深刻さを増してきている。政府が2004年3月に決定したヒートアイランド対策大綱では、基本的な対策として、人工排熱の低減、地表面被覆の改善、都市形態の改善等が明記されており、国、自治体等によりこれらのヒートアイランド対策が実施されている。都市で発生した熱をすみやかに希釈するためには、海からの涼風の利活用は重要な視点であり、都市形態と風通しおよび気温形成の関係について検討する必要がある。

国土技術政策総合研究所と建築研究所は、それぞれ国土技術政策総合研究所プロジェクト研究「都市空間の熱環境評価・対策技術の開発（平成16～18年度）」と建築研究所重点的研究課題「ヒートアイランド緩和に資する都市形態の評価手法の開発（平成18～20年度）」を実施してきた。併せて両研究所は共同研究「都市空間の熱環境評価・対策技術の開発（平成16～18年度）」を実施してきたところである。本資料は、両研究所によるこれらの研究成果であり、建物周辺から都市スケールに至る熱環境を高解像度で予測する大規模数値解析技術と解析結果をまとめたものである。

本資料がヒートアイランド対策の立案に役立てられ、良好な都市環境形成の一助になることを期待する。

平成２２年３月

国土交通省国土技術政策総合研究所
副所長　　高井賢司

独立行政法人建築研究所
理事長　村上周三

概　要

近年、ヒートアイランド現象（都市の気温上昇）の緩和を目的として、人工排熱の削減や都市緑化など様々な対策が国、自治体等により実施されている。東京をはじめとする大都市の多くは沿岸部に位置しており、都市空間において海風の導入は気温低下に有効であると考えられる。都市空間における海風の気象緩和効果を定量化するためには、都市の上空を流れる風と同時に、河川や街路、建物等の都市の複雑な隙間を流れる風を計算する必要がある。本研究は、大規模なベクトル並列型スーパーコンピュータ、「地球シミュレータ」を都市環境問題に適用し、建物周辺から都市スケールに至る熱環境を高解像度で予測する大規模数値解析技術の開発に取り組むものである。本研究資料では、数値解析技術の開発内容および東京23区全域を50億メッシュで詳細に解像したヒートアイランド状況の解析結果について紹介する。

足永靖信（独立行政法人建築研究所環境研究グループ上席研究員・当時）
（平成21年4月より、国土技術政策総合研究所建築研究部環境・設備基準研究室長）
鍵屋浩司（国土技術政策総合研究所都市研究部都市開発研究室主任研究官）

ABSTRACT

In recent years, the urban heat island phenomenon has become an important social problem in Japan. Countermeasures to reduce this effect include reduction of anthropogenic heat release and enhancement of urban vegetation. Tokyo city is located opposite the Tokyo bay, and cool sea breezes blow over a wide area during the daytime in summer. Therefore, introducing cool sea breezes into urban spaces can be considered an effective measure for reducing urban heat island effects. Numerous official and residential buildings exist in urban areas, and the scale of vortices among these buildings is extremely small compared to that of the urban heat island circulation. It has been difficult to evaluate the airflows of both an urban space and an urban boundary layer. Hence, in this study, we developed a numerical simulation tool that can resolve individual buildings using a highly parallel vector supercomputer system named the ‘Earth Simulator’ for analyzing the urban heat island. This paper reports the recent simulation results obtained for the entire area of Tokyo's 23 wards.

Yasunobu ASHIE
(Formerly Chief Research Engineer, Environmental Research Group, Building Research Institute)
(Since April 2009: Head, Environmental and Equipment Standards Division, Building Department, National Institute for Land and Infrastructure Management)

Koji KAGIYA
(Senior Researcher, Urban Development Division, Urban Planning Department, National Institute for Land and Infrastructure Management)

目次

1　はじめに ---------- 1

2　広域CFD解析の理論式 ---------- 12
2．1　解析モデル ---------- 12
2．2　差分による数値解析 ---------- 18
2．3　表面温度の設定 ---------- 27

3　計算プログラムの最適化 ---------- 37
3．1　最適化に関わる条件 ---------- 37
3．2　必要になる計算機資源の推定 ---------- 37
3．3　計算プログラムの診断 ---------- 39
3．4　最適化の作業内容 ---------- 42
3．5　最適化の行程 ---------- 44

4　入力データの作成 ---------- 49
4．1　データ整備の概要 ---------- 49
4．2　地盤および建物の高さ ---------- 49
4．3　建物等幾何データのメッシュ整備 ---------- 60
4．4　土地利用 ---------- 62
4．5　日射到達高さ ---------- 66
4．6　人工排熱 ---------- 67

5　東京23区全域を対象にした気温、風速分布の大規模数値解析 ---------- 86
5．1　概要 ---------- 86
5．2　解析結果 ---------- 89
5．3　広域CFD解析の事例集 ---------- 90
5．4　地域類型化 ---------- 91
5．5　考察 ---------- 93

6　得られた成果と今後の課題／謝辞 ---------- 148

参考文献 ---------- 149

研究発表等（平成16～21年度） ---------- 152

付録説明：東京ヒートマップについて ---------- 158

執筆者／研究参画者 ---------- 160

付録：東京ヒートマップ（CD-ROM）

図表一覧

図１　都市が高温化する要因
図２　ヒートアイランドの数値モデル
図３　隅田川周辺の気温と風（地上10m）
図４　体積占有率が小さくなる典型例
図５　実質的な格子
図６　日陰域の簡易判別
図７　建物壁面と日射向きの配置パターン
図８　日陰判定の事例
図９　葉1枚を含む微小領域における放射の透過
図１０　葉面の配置と有効表面積
図１１　地表面温度の日変化（2005年7月31日、東京）
図１２　加速率と最大経過時間（最大経過時間が大きなものを矢印で表示）
図１３　加速率と平均ベクトル長（最大経過時間が大きなものを矢印で表示）
図１４　ロードインバランス(16CPU)（ICCG(+BiCGSTAB)関連を矢印で表示）
図１５　ロードインバランス(64CPU)（ICCG(+BiCGSTAB)関連を矢印で表示）
図１６　領域分割法
図１７　領域分割法における通信処理
図１８　配列の「使い廻し」の例
図１９　動的割当機能を利用する例
図２０　最適化の行程
図２１　300ノード利用申請（960プロセス）
図２２　300ノード利用申請（2,400プロセス）
　（ａ）戸越
　（ｂ）汐留
図２３　データ整備範囲
図２４　1mDSMの分布事例
図２５　5mメッシュ分解した建物に高さを設定した例（東京ドーム周辺）
図２６　大規模な建物における建物高さの詳細化の例
　（ａ）建物階数データに基づく従来の方法
　（ｂ）1mDSMデータを用いる今回の方法
図２７　CADデータを適用した地区
　（ａ）汐留地区
　（ｂ）建物配置
図２８　MAPCUBE建物（一般建物）と東京都GIS建物の水平位置の比較
図２９　CADとGISを組み合わせた都市幾何形状の3次元表現（CFD解析結果を含む）
図３０　用途別建物平均階高
図３１　用途別延床面積規模別平均階高
図３２　建物の分布（4階以上）
　（ａ）住宅地図データ
　（ｂ）東京都GISデータ
図３３　開口率・体積占有率の計算例（左：球体の場合、右：直方体の場合）
図３４　開口率・体積占有率の計算例
　（ａ）開口率（東西南北）
　（ｂ）開口率（上下）、体積占有率
図３５　汐留付近における体積占有率分布の例（k=10）
図３６　密接した建物の屋上面および壁面
図３７　詳細化した建物の屋上の一部
図３８　街区区域より作成した道路オブジェクト
図３９　建物排熱の推計フロー
図４０　事業所排熱（地上、煙突）の推計フロー
図４１　建物各棟からの顕熱分布例（14時）その１
図４２　建物各棟からの顕熱分布例（14時）その２

図４３　建物各棟からの潜熱分布例（14時）その１
図４４　建物各棟からの潜熱分布例（14時）その２
図４５　建物各棟からの排熱の排出位置（その１）
図４６　建物各棟からの排熱の排出位置（その２）
図４７　自動車排熱（消費エネルギーベース）の推計フロー
図４８　5mメッシュ別路面高さ（自動車排熱高さ）の例
図４９　5mメッシュ別路面高さ（自動車排熱高さ）の例
図５０　5mメッシュ別の自動車顕熱（14時）の例
図５１　5mメッシュ別の自動車顕熱（14時）の例
図５２　地表面近傍における人工排熱（顕熱14時）の例
図５３　地表面近傍における人工排熱（顕熱14時）の例
図５４　断面位置
図５５　5mメッシュ別人工排熱量（顕熱14時）の例（西→東方向の鉛直断面）(1)
図５６　5mメッシュ別人工排熱量（顕熱14時）の例（西→東方向の鉛直断面）(2)
図５７　5mメッシュ別人工排熱量（顕熱14時）の例（西→東方向の鉛直断面）(3)
図５８　5mメッシュ別人工排熱量（顕熱14時）の例（西→東方向の鉛直断面）(4)
図５９　5mメッシュ別人工排熱量（顕熱14時）の例（西→東方向の鉛直断面）(5)
図６０　解析領域
図６１　解析の流れ
図６２　メソスケール解析結果　2005年7月31日14時（第2階層、地上10m）
図６３　気温の分布（500mメッシュ平均）2005年7月31日14時
（ａ）地上2m
（ｂ）地上10m
（ｃ）地上50m
（ｄ）地上100m
図６４　スカラー風速の分布（500mメッシュ平均）2005年7月31日14時
（ａ）地上2m
（ｂ）地上10m
（ｃ）地上50m
（ｄ）地上100m
図６５　体積占有率の分布（500mメッシュ平均）2005年7月31日14時
（ａ）地上2m
（ｂ）地上10m
（ｃ）地上50m
（ｄ）地上100m
図６６　比湿の分布（500mメッシュ平均）2005年7月31日14時
（ａ）地上2m
（ｂ）地上10m
（ｃ）地上50m
（ｄ）地上100m
図６７　鉛直方向の風速の分布（500mメッシュ平均）2005年7月31日14時
（ａ）地上2m
（ｂ）地上10m
（ｃ）地上50m
（ｄ）地上100m
図６８　気温の鉛直断面分布（500mメッシュ平均）2005年7月31日14時
（ａ）Y=-22000～-21500m
（ｂ）Y=-13000～-12500m
（ｃ）Y=-4000～-3500m
（ｄ）Y=5000～5500m
図６９　スカラー風速の鉛直断面分布（500mメッシュ平均）2005年7月31日14時
（ａ）Y=-22000～-21500m
（ｂ）Y=-13000～-12500m
（ｃ）Y=-4000～-3500m
（ｄ）Y=5000～5500m

図７０　比湿の鉛直断面分布（500mメッシュ平均）2005年7月31日14時
（ａ）Y=-22000～-21500m
（ｂ）Y=-13000～-12500m
（ｃ）Y=-4000～-3500m
（ｄ）Y=5000～5500m
図７１　東京23区全域の気温分布（地上10m）2005年7月31日14時
図７２　METROSの観測による東京23区の気温分布（東京都）2005年7月31日14時
図７３　気温分布の事例（図７１の実線で囲んだ矩形領域）2005年7月31日14時
（ａ）地上10m
（ｂ）地上2m
図７４　気温、風速の鉛直断面分布（図７１の点線部分）2005年7月31日14時
図７５　水平ロール渦
図７６　東京都心臨海部（10km四方）
図７７　東京都心臨海部（10km四方）における気温分布　2005年7月31日14時
（ａ）標高34.7m
（ｂ）標高65.1m
（ｃ）標高112.6m
図７８　東京都心臨海部（10km四方）におけるスカラー風速分布　2005年7月31日14時
（ａ）標高34.7m
（ｂ）標高65.1m
（ｃ）標高112.6m
図７９　隅田川　2005年7月31日14時
（ａ）土地利用
（ｂ）風速（標高11.0m）
（ｃ）気温（標高11.0m）
（ｄ）土地利用その２
（ｅ）気温（標高21.5m）・風速（標高23.2m）
図８０　目黒川　2005年7月31日14時
（ａ）土地利用
（ｂ）風速（標高3.6m）
（ｃ）気温（標高3.6m）
図８１　皇居　2005年7月31日14時
（ａ）土地利用
（ｂ）風速（標高30.6m）
（ｃ）気温（標高30.6m）
図８２　汐留・有楽町　2005年7月31日14時
（ａ）土地利用
（ｂ）風速（標高3.6m）
（ｃ）気温（標高3.6m）
（ｄ）風速（標高48.5m）
（ｅ）気温（標高48.5m）
図８３　臨海部のライフライン施設　2005年7月31日14時
（ａ）土地利用
（ｂ）風速
（ｃ）気温
図８４　赤坂・六本木・恵比寿　2005年7月31日14時
（ａ）土地利用
（ｂ）風速ベクトル（u,v）（標高92.3m）・鉛直風速（標高88.6m）
（ｃ）風速ベクトル（u,v）（標高92.3m）・気温（標高88.6m）
（ｄ）土地利用その２
（ｅ）風速ベクトル（u,v）（標高39.0m）・気温（標高36.8m）
図８５　新宿・渋谷・四谷　2005年7月31日14時
（ａ）土地利用
（ｂ）風速ベクトル（u,v）（標高39.0m）・気温（標高36.8m）
（ｃ）土地利用２

（ｄ）風速ベクトル（u,v）（標高39.0m）・気温（標高36.8m）
（ｅ）土地利用３
（ｆ）気温（標高41.3m）
（ｇ）気温（標高77.9m）
図８６　第1主成分得点の分布
図８７　第2主成分得点の分布
図８８　第3主成分得点の分布
図８９　第4主成分得点の分布
図９０　第5主成分得点の分布
図９１　クラスター分析による地域類型
図９２　上空と地上付近の気温差
（ａ）気温差と風速比
（ｂ）気温差とグロス建ぺい率
図９３　圧力の鉛直分布
図９４　体積占有率の鉛直分布
図９５　風速比の鉛直分布
図９６　気温差の鉛直分布

表１　本研究資料で使用する記号一覧
表２　数値解析コードの概要
表３　熱伝導率の補正値ηと実質的な格子幅の比rの対応
表４　上空および側方境界条件
表５　東京の観測データ（2005年7月31日）
表６　地表面熱収支パラメータの事例１
表７　地表面熱収支パラメータの事例２
表８　地表面熱収支パラメータ（本研究資料）
表９　ベクトル性能
表１０　並列性能
表１１　メモリ使用量（30km四方を想定）
表１２　AMGCG法とICCG法の比較
表１３　インバランス状況のサブルーチン比較
表１４　並列性能
表１５　最大コスト(約40%)を占めるk3d_bcgstbの状況(Rank0)
表１６　高コストを占めるサブルーチン（k3d_bcgstb以外）
表１７　地域別使用データ
表１８　5mDEMと1mDSMによる平均標高の差分の例
表１９　用途 、延床面積別の建物棟数（東京23区）　国土地理院1mDSMデータ、東京都GISを用いた場合
表２０　川崎市GISの建物用途と東京都GISの建物用途の対応
表２１　横浜市GISの建物用途と東京都GISの建物用途の対応
表２２　建物用途と建物名称の関係から抽出した用途別キーワードの例
表２３　住宅地図データを利用した場合の建物用途と地上階数の設定方法
表２４　東京都GISの土地用途コードと土地利用項目の対応
表２５　川崎市GISの土地用途コードと土地利用項目の対応
表２６　横浜市GISの土地用途コードと土地利用項目の対応（その1）
表２７　横浜市GISの土地用途コードと土地利用項目の対応（その2）
表２８　細密数値情報（10ｍメッシュ土地利用）の用途と土地利用項目の対応
表２９　人工排熱の排出位置
表３０　東京都GISの建物用途と人工排熱用途区分の対応表
表３１　川崎市GISの建物用途と人工排熱用途区分の対応表
表３２　横浜市GISの建物用途と人工排熱用途区分の対応表
表３３　地域冷暖房計画区域の熱源システムおよび供給延床面積
表３４　地域冷暖房の熱源システムの分類
表３５　「LOCALS」のモデル構成
表３６　主成分分析による成分行列
表３７　類型毎のクラスター中心

1　はじめに

地球規模の温暖化は世界的に共通の関心事になっている。また、ヒートアイランド現象（都市の気温上昇）は年々深刻化している。ここ 100 年間で東京の気温は約 3℃上昇したが、同期間の日本全体の気温上昇は約 1℃であった[1)]。この傾向から東京地域の場合は、地球規模の長期的な気候変動に加えてヒートアイランドによる気温の変化が顕著に表れていることが強く示唆される。

気温は、建築や人の生活において基本的な環境要因であると言える。都市のヒートアイランド現象は地域の人口密度とのつながりが強いとされている[2)]。したがって、ヒートアイランド化でもたらされた気温の変化は都市の過密性を反映するものであり、そこに居住する人間に多大な影響を与える可能性がある。

図 1 に都市の気温上昇の要因を示す。まず、地表面被覆の影響が考えられる。東京 23 区の地表面の 8 割近くは建物、道路等の人工的な構造物で被覆されており、水面・公園等の自然要素による被覆割合は 2 割に満たない[3)]。アスファルト、コンクリートの表面温度は夏季の日中に 50～60℃に上昇し夜間においても蓄熱効果で温度がなかなか下がらない性質がある。その結果、気温も上がってしまうのである。

2 番目の要因は人工排熱である。国土交通省・環境省は、東京 23 区における建物、交通、事業所等から発生する人工排熱について時空間データベースを整備した[4)]。人工排熱の日集計値（8 月平均を想定）を調べると東京 23 区全体で約 2,000TJ/日であり、この値を東京 8 月の日射日総量値と比較すると、快晴日の 1 割、月平均日の 2 割に相当する。自然界では大気を暖める対流熱量は太陽放射のせいぜい 1 割程度[5)]であり、それを踏まえると都市の人工排熱は大変大きい熱源であると言える。また、人工排熱の中で建物からの発生量が最も大きく、全体の半分を占めていることも指摘されている。

もう 1 点は都市の風通しである。東京臨海部では屏風状の超高層ビル群が建設されており、環境影響が危惧されている[6)]が、高層建築物がもたらす風の変化が周辺の気温に及ぼす影響は十分解明されていないのが現状である。東京 23 区には建物が 160 万棟存在し、東京 23 区全体の面積の 30%を占有している[7)]。建築物は自然地形と共に都市域の凹凸を形成しており、その形態を工夫して都市の風通し改善を図ることが必要である。

以上から気温低減のため、まず行うべき対策は都市で発生する熱量を減らすことである。都市で発生する熱には地表面被覆からの放熱と

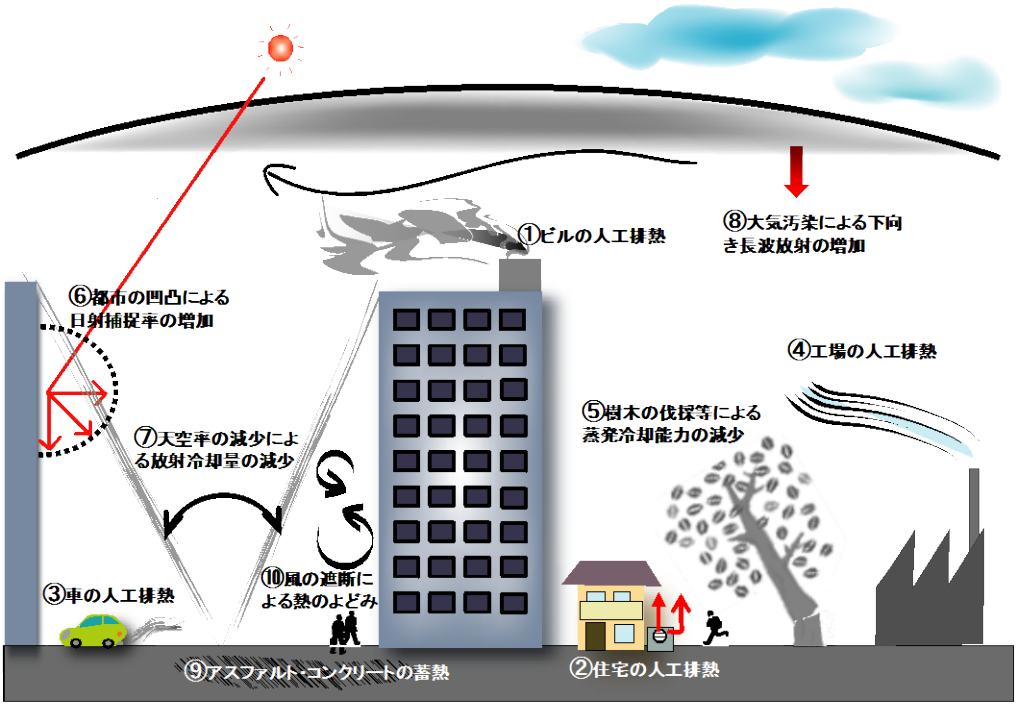


図 1　都市が高温化する要因

人工排熱があり、これらの削減を図る必要がある。これまで、緑化や高反射仕上げ等による表面温度の低減[8)9)]や室外機への水散霧による顕熱抑制[10)]など様々な発生熱源対策が講じられてきた。個々の対策の推進は極めて重要かつ有効であるが、ヒートアイランド現象が生じる都市スケールとの乖離が大きく、対策効果のリアリティを得ることは難しい。

発生した熱を都市空間で澱ませないこと、風通しを良くすることも重要な視点である。発生熱源対策が個々の建材や機器の問題であるのに対して、風通しの評価においては大気側を含めて解析のスケールを拡げて考える必要がある。都市を俯瞰すると、都市で発生した熱を上空へ効率良く放散させる都市構造が求められる。日本の大都市の多くは沿岸部に位置しており、海陸風循環が発生するのでその冷熱ポテンシャルを活用することも有効であると考えられる[11)]。しかし、都市の上空を流れる風と同時に、河川や街路、建物等の都市の複雑な隙間を流れる風をミクロに再現する解析は実質困難であった。

都市域には建物、樹木等が複雑に配置されており、都市空間内およびその上空で熱や運動量の輸送が行われている。都市の構成要素は様々なスケールを有しており、全ての構成要素を一律に取り扱うことは計算機能力の制約から不可能である。そこで、全ての構成要素を直接解像することはあきらめ、メッシュ単位で粗視化する行為が通常必要になる。メッシュ幅や解析領域の大きさは目的によるため、それに応じてモデル化が必要である。

数値モデルには大きく、メソスケールモデル[12)13)14)15)16)]、キャノピーモデル[17)18)19)20)21)]、CFD（Computational Fluid Dynamics;数値流体力学）[22)23)24)25)]の３つが存在する。これらの数値モデルのメッシュ解像度、解析領域のスケール（水平方向）を整理したのが図２である。本研究資料では、現実の建物配置・形状を解像する計算方法を CFD と呼ぶ。CFD は市街地の風環境予測において有効な手法の一つであり、様々な適用事例が見られる[26)]が、広域スケールの問題へはほとんど適用されていないのが現状である。メソスケールモデルはメッシュ解像度が粗いが広域を取り扱いやすく、キャノピーモデルは上記モデルの中間のスケールを取り扱うのに適している。メソスケールモデルやキャノピーモデルは原理上、街区の内部を細かく分析するのには向いていない[27)]。だから、図中にメッシュ解像度 10m 付近で実用上、“gap”（隙間）があるとして区別している。この“gap”（隙間）の克服に向けて、CFD の解析領域の拡張、メソスケールモデルなどの異種モデルとのネスティング（入れ子式に大小を結合すること）が考えられる。後者については数多くの研究事例が見られる[28)]ので、本稿では広域 CFD 解析の可能性について述べる。

広域 CFD 解析には２つの視点がある。一つは、学術的興味に関するものである。図３に 1km 四方領域における風、気温の分布を示す。メソスケールモデルを用いる場合であればこの領域は 1km メッシュで代表されることになる。しかし、実際には数多くの建物、道路がこの地区には存在しており、土地利用、起伏について相当のばらつきが存在する。もし、これらの複雑な３次元形状を考慮して広域の計算を実施したら、都市境界層にどのような現象が見られるのか。これが第一の視点である。

第二の視点は都市設計への応用である。図３を細かく見ると蛇行する河川に沿って風が流れていることがわかる。しかし、蛇行のコーナー部分では風が直進し、そのまま市街地に流入している。そのような場所の気温はその他の市街地に比べて 1℃程度低い。そういった低温域は河川の周辺にたくさん見られる。広域の CFD

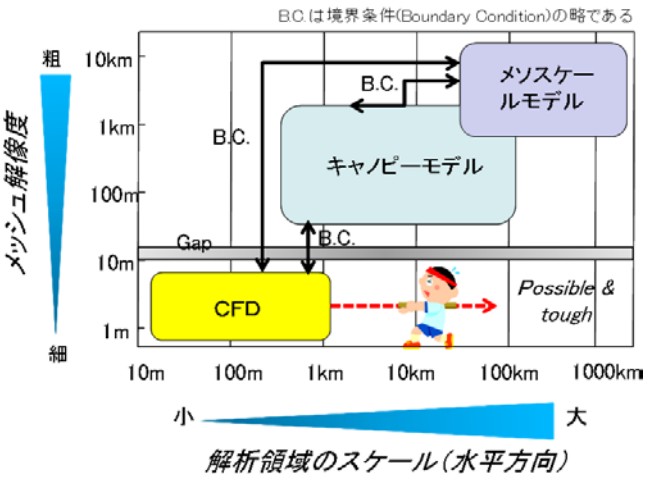


図２　ヒートアイランドの数値モデル

解析から得られる情報は、パッシブ冷却効果を都市デザインに取り入れる上でとても重要である。

メッシュの高解像度化と十分な解析領域の確保は、数値解析に携わる研究者が慢性的に抱える要望であったが、そのためには高性能なスーパーコンピュータの活用が不可欠であると言える。独立行政法人海洋研究開発機構が運用する大規模なベクトル並列型スーパーコンピュータ、「地球シミュレータ」は、主記憶容量と演算処理速度において運用開始時点（2002年3月）で世界最大の規模と能力を持つ設備であり、広く外部研究機関にもその利活用が図られている。このため、独立行政法人建築研究所では、2004年度から2008年度まで一般公募利用として「地球シミュレータ」を活用して研究を進めてきたところであり、本成果は「地球シミュレータ」に負うところが大であった。

なお、「地球シミュレータ」とは、640台のスーパーコンピュータおよび付帯設備から構成され、主記憶容量は10テラバイト、演算処理速度は40テラフロップス（テラフロップスとは、コンピュータの処理速度を表す単位の一つで、1秒間に1兆回の浮動小数点数演算（実数計算）を実行できることを意味する）である。2009年3月より新システム（主記憶容量：20テラバイト、演算処理速度：131テラフロップス）の運用を開始しており、2009年度には「地球シミュレータ」の一般公募利用として、地球科学分野16件（地球温暖化、マントル、宇宙等）、先進・創出分野9件（ゲノム、原子力等）が実施されている。「地球シミュレータ」は、10～20kmメッシュによる全球解析[29)30)]を可能とし、気候変動に関する政府間パネルの2007年ノーベル平和賞受賞に貢献するなど、気候変動予測において大きな役割を果たしている。

本研究は「地球シミュレータ」を都市環境問題に初めて活用し、建物周辺から都市スケールに至る熱環境を高解像度で予測する大規模数値解析技術の開発に取り組むものである。東京23区全域を水平5mメッシュで詳細に解像した大規模数値解析を実施した結果について紹介を行うと共に、都市形態と熱環境の関係を考察する。なお、本研究資料で述べる、計算プログラムの最適化や計算の実行は旧システム上で実施された。

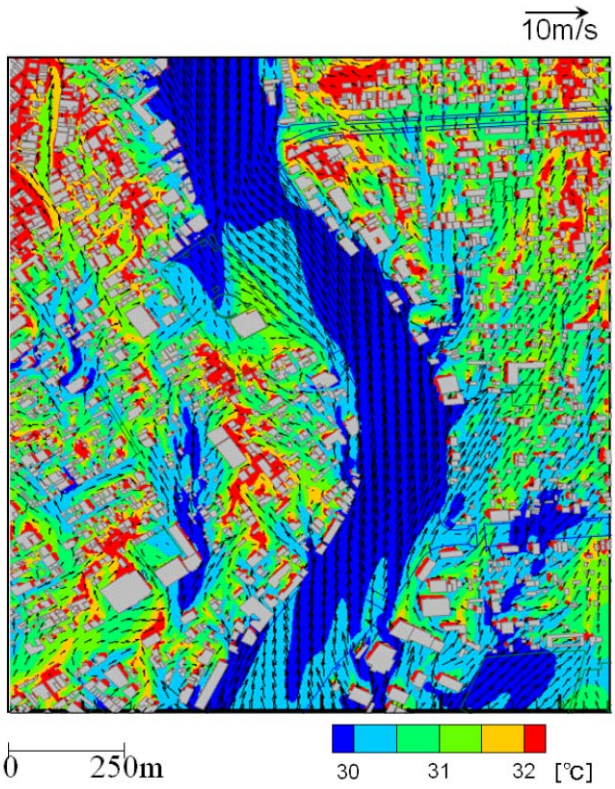


図3　隅田川周辺の気温と風（地上10m）

本研究資料で使用する記号について表1にまとめる。

表１　本研究資料で使用する記号一覧

記　号	意　　味	単　位
a	葉面積密度（a=1.5）	m^2/m^3
a_c	葉の吸収率	－
B_C	固定部分のメモリ量	GB
C_d	樹冠の抵抗係数（C_d=0.20）	－
C_g	土壌の比熱	J/kg/K
C_p	混合空気の定圧比熱 $\left(=(1-q)C_{p,a}+qC_{p,v}\right)$	J/kg/K
$C_{p,a}$	乾燥空気の定圧比熱	J/kg/K
$C_{p,v}$	水蒸気の定圧比熱	J/kg/K
$C_{p\varepsilon 1}$	ε 方程式の樹木抵抗項に係る補正係数（$C_{p\varepsilon 1}$=1.8）	－
C_{q3}	モデル定数（C_{q3}=0.25）	－
$C_{\varepsilon 1}$	モデル定数（$C_{\varepsilon 1}$=1.44）	－
$C_{\varepsilon 2}$	モデル定数（$C_{\varepsilon 2}$=1.92）	－
$C_{\varepsilon 3}$	モデル定数（$C_{\varepsilon 3}$=1.44）	－
$C_{\theta 3}$	モデル定数（$C_{\theta 3}$=0.25）	－
C_μ	モデル定数（C_μ=0.09）	－
D	拡散係数	kg/m/s
e	水蒸気圧	mmHg
E	蒸発潜熱	W/m^2
E_r	並列化効率	－
$\mathbf{e_S}$	日射ベクトル	－
e_{sat}	飽和蒸気圧	Pa
f	Coriolis パラメータ $\left(=2\Omega\sin\phi\right)$	1/s
F	葉の配置関数	－

F_{ci}	コリオリ力	kg/m²/s²
F_i	抗力	m/s²
F_k	樹木モデルの k、ε 輸送方程式の付加項	m²/s³
F_L	蒸発潜熱	W/m³
F_S	対流顕熱	W/m³
g_i	加速度	m/s²
G	伝導熱流	W/m²
G_f	流体の有効占有率	−
G_j（具体的には G_x, G_y, G_z）	座標系第 j 軸に垂直な計算セル界面における面開口率（G_x：x 軸に垂直、G_y：y 軸に垂直、G_z：z 軸に垂直）	−
G_k	浮力による乱流エネルギー k の生産項	Pa/s
G_s	流体の面積占有率	−
G_v	計算セルにおける流体の体積占有率	−
h	熱伝達係数	W/m²/K
H	対流顕熱	W/m²
H_B	建物高さ	m
H_B'	判定当該メッシュにおける地上からの建物の高さ	m
h_c	解析セルの厚み（高さ方向）	m
h_p	壁面から壁面第 1 定義点までの距離	m
h_q	物質伝達係数 $\left(=h/C_p\right)$	kg/m²/s
h_S	太陽高度	rad.
I_0	太陽定数	W/m²
k	乱流エネルギー	m²/s²
K	運動エネルギー	m²/s²
$\hat{K}$	平均流の運動エネルギー	m²/s²

k_p	壁面第 1 定義点の乱流エネルギー	m^2/s^2
k_1	消散係数	－
L	水の蒸発潜熱	J/kg
$L(x)$	放射エネルギー	W/m^2
$L_a\downarrow$	大気放射量	W/m^2
ℓ_m	距離	m
$L_s\uparrow$	地表面からの長波放射量	W/m^2
m	メモリ量	GB
m_r	1 プロセス数当たりのメモリ量	GB/個
M_s（具体的には M_a, M_v）	大気成分 s の分子量（M_a：乾燥空気、M_v：水蒸気）	kg/mol
N	観測データ数	個
N_P	プロセッサ数	個
N_V	ベクトルプロセッサによる高速化係数	－
N_x	x 軸方向の領域分割数	個
N_y	y 軸方向の領域分割数	個
N_z	z 軸方向の領域分割数	個
p	圧力	Pa
P	Exner 関数	－
p_a	乾燥空気の分圧	Pa
P_k	平均速度勾配による乱流エネルギー k の生産項	Pa/s
Pr_T	乱流 Prandtl 数（Pr_T=0.9）	－
P_S	大気透過率	－
p_v	水蒸気の分圧	Pa
p_0	基準圧力	Pa

q	比湿	kg/kg
$q_{G,sat}$	地表面飽和比湿	kg/kg
Q_L	人工排熱(潜熱)	W/m^3
q_m（具体的には q_R, q_W, q_G, q_c）	表面比湿（q_R：建物屋上、q_W：建物壁面、q_G：地表面、q_c：葉）	kg/kg
Q_{RG}	建物の屋上面および地表面からの排熱量	W /m^3
$\tilde{Q}_{RG,i}$	当該解析セルの建物の屋上面および地表面からの排熱のうちセル i に分配される排熱量	W
Q_S	人工排熱(顕熱)	W/m^3
Q_W	建物の壁面からの排熱量	W /m^3
$\tilde{Q}_{W,i}$	当該解析セルの建物の壁面からの排熱のうちセル i に分配される排熱量	W
$\tilde{Q}_{o,i}$	当該解析セルの建物の屋上面、壁面および地表面からの排熱のうちセル i に分配される排熱量	W
r	実質的な格子幅の比	－
R	混合空気の気体定数 $\left(=(1-q)R_a + qR_v\right)$	J/kg/K
R_a	乾燥空気の気体定数 $\left(=R_o/M_a\right)$	J/kg/K
r_c	葉の反射率	－
$R_{RG,k}$	当該解析セルの固体部分を考慮した、建物の屋上面および地表面からの余剰排熱が周辺セル k+1（直上）に分配される割合	－
R_v	水蒸気の気体定数 $\left(=R_o/M_v\right)$	J/kg/K
$R_{W,ij}$	当該解析セルの固体部分を考慮した、建物の壁面からの余剰排熱が周辺セル i±1、j±1（水平方向）に分配される割合	－
R_o	普遍気体定数	J/mol/K
$R_{o,ijk}$	当該解析セルの建物の屋上面、壁面および地表面からの排熱が周辺セル i±1、j±1（水平方向）および k+1（直上）に分配される割合	－
R_τ	乱流時間スケールの比（R_τ=0.8）	－
S	解析領域	km^2
$\mathbf{S}$	面素ベクトル	－
Sc	Schmidt 数（Sc=0.5）	－
Sc_T	乱流 Schmidt 数（Sc_T=0.9）	－

S_d	法線面直達日射量	W/m²
$S_d\downarrow$	直達日射量	W/m²
$S_g\downarrow$	全天日射量	W/m²
S_m（具体的には S_R, S_W, S_G, S_ℓ）	表面積（S_R：建物屋上、S_W：建物壁面、S_G：地表面、S_ℓ：葉）	m²
$S_n\downarrow$	正味全天日射量	W/m²
$S_s\downarrow$	天空日射量	W/m²
t	時間	s
T	気温	K
T_g	土壌温度	K
T_m（具体的には T_R, T_W, T_G, T_c）	表面温度（T_R：建物屋上、T_W：建物壁面、T_G：地表面、T_c：葉）	K
$T_{SCALAOR}$	スカラプロセッサの総計算時間	s
T_{SINGLE}	シングルプロセッサによる総計算時間	s
$T_{PARALLEL}$	複数のプロセッサによる総計算時間	s
T_{VECTOR}	ベクトルプロセッサの総計算時間	s
U	スカラー風速、$U=\sqrt{u_1^2+u_2^2+u_3^2}$	m/s
u_b	CFD 解析領域の上端における風速の境界条件	m/s
u_j	風速第 j 成分	m/s
u_p	壁面第 1 定義点の壁面接線方向速度	m/s
u^*	摩擦速度	m/s
V	解析セルの体積	m³
V_c	体積容量	m³

W_1	中間の変数、$W_1 = \left(\frac{u^*}{l_m}\right)^2 + \frac{1}{Pr_T}\frac{g_i}{\tilde{\theta}}\frac{\partial\tilde{\theta}}{\partial x_i} + \frac{1}{Sc_T}\frac{g_i}{W_1}\frac{\partial\tilde{q}}{\partial x_i}$	1/s²
W_2	中間の変数、$\frac{1}{W_2} = \frac{1}{\tilde{R}}\left(\frac{R_o}{M_v} - \frac{R_o}{M_a}\right)$	－
W_3	中間の変数、$W_3 = \frac{1}{Pr_T}\frac{g_i}{\tilde{\theta}}\frac{\partial\tilde{\theta}}{\partial x_i} + \frac{1}{Sc_T}\frac{g_i}{W_1}\frac{\partial\tilde{q}}{\partial x_i}$	1/s²
x	x座標	m
X	世界測地系座標（南北方向）	m
x_j	座標系第 j 軸	m
x_n	壁面鉛直方向の座標	m
y	y 座標	m
Y	世界測地系座標（東西方向）	m
Y_s	気体成分 s の質量分率	kg/kg
z	z 座標	m
z_b	CFD 解析領域の上端の高さ	m
z_B	土壌の不易層深さ	m
Z_S	判定当該解析メッシュの日射到達地上高さ	m
α	アルベド	－
α_g	熱拡散係数	m²/s
α_r	並列化率	－
β	蒸発効率	－
β_F	比例部分のメモリ量	GB
β_r	ベクトル化率	－
γ	時角	rad.
δ	赤緯	rad.
δ_{ij}	ディラックのデルタ関数	－
ε	乱流エネルギー散逸率	m²/s³
ε_c	葉の射出率	－
ε_G	地面の射出率	－

ε_{ijk}	エディントンのイプシロン	－
ε_0	収束判定のための微小数	－
E	経験定数（E=9.0）	－
ζ	物理量	
η	熱伝導係数等の補正値	－
θ	温位	K
θ_S	仰角	rad.
κ	カルマン定数	－
λ	混合空気の熱伝導係数	W/m/K
λ_g	土壌の熱伝導係数	W/m/K
λ_T	混合空気の乱流熱伝導係数	W/m/K
μ	混合空気の粘性係数	Pa･s
μ_T	乱流粘性係数	Pa･s
ν	動粘性係数	m^2/s
ξ	物理量	
ξ_N	同一と見なされる実験条件で繰り返し観測を行ったときに得られる N 個の物理量 ξ の観測データ	
ξ'	物理量 ξ のアンサンブル平均からの変動	
ξ''	物理量 ξ の Favre 平均からの変動	
$\overline{\xi}$	物理量 ξ のアンサンブル平均	
$\tilde{\xi}$	物理量 ξ の Favre 平均	
ξ_0	物理量 ξ の発生量	
ρ	混合空気の密度	kg/m^3
ρ_a	乾燥空気の密度	kg/m^3
ρ_g	土壌の密度	kg/m^3
ρ_v	水蒸気の密度	kg/m^3

σ	ステファンボルツマン定数（σ_k=5.67×10^{-8}）	W/m^2/K^4
σ_k	モデル定数（σ_k=1.0）	－
σ_q	モデル定数（σ_q=0.5）	－
σ_ε	モデル定数（σ_ε=1.3）	－
σ_θ	モデル定数（σ_θ=0.5）	－
τ	透過率	－
ϕ	計算対象区域の緯度	rad.
ϕ_S	方位角	rad.
ψ	天頂角	rad.
Ω	地球の自転角速度	rad./s

２　広域 CFD 解析の理論式

２．１　解析モデル

２．１．１　数値解析コードの概要

数値解析コードの概要を表２に示す。乱流モデルには工学分野で実績がある標準型 2 方程式モデル（$k-\varepsilon$モデル）を採用し、広域問題に適用するため、温位、コリオリ力、水蒸気による乱れ効果を CFD モデルに組み入れている。地面の起伏および建物の配置形状を効率良く取り扱うため FAVOR (Fractional-Area -Volume Obstacle Representation)法 [31]を導入している。

２．１．２　基礎方程式

圧縮性流体（低マッハ数流れを主とする）を対象とする標準$k-\varepsilon$モデルの基礎方程式を示す。

[1]連続の式

$$\frac{\partial \overline{\rho}}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\overline{\rho}\tilde{u}_j\right)=0 \tag{1}$$

[2]運動量輸送方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\overline{\rho}\tilde{u}_i\right)+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\overline{\rho}\tilde{u}_i\tilde{u}_j\right)=-\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\overline{p}+\frac{2}{3}\overline{\rho}k\right)+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\mu_T\right)\left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j}+\frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i}\right)\right]+\overline{\rho}g_i \tag{2}$$

$$\mu_T=\overline{\rho}C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon} \tag{3}$$

[3]エネルギー輸送方程式

$$C_p\left(\frac{\partial \overline{\rho}\tilde{T}}{\partial t}+\frac{\partial \overline{\rho}\tilde{u}_j\tilde{T}}{\partial x_j}\right)=\frac{\partial \overline{p}}{\partial t}+\tilde{u}_j\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_j}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\left(\lambda+\lambda_T\right)\frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_j}\right) \tag{4}$$

$$\lambda_T=\frac{C_p\mu_T}{\mathrm{Pr}_T} \tag{5}$$

表２　数値解析コードの概要

項　目	内容
対象流れ場	密度変化を伴う混合気体の低 Mach 数流れ
基礎方程式系	・質量保存方程式 ・運動量輸送方程式 （浮力、コリオリ力、樹木抗力を考慮。） ・エネルギー輸送方程式 （温位で定式化。人工熱や壁面等からの顕熱放散を考慮。） ・水蒸気の輸送方程式 （比湿で定式化。人工熱や壁面等からの潜熱放散を考慮。） ・乱流エネルギーkの輸送方程式 （浮力、湿気、樹木による乱れの生成を考慮。） ・乱流エネルギー散逸率εの輸送方程式 （浮力、湿気、樹木による乱れの散逸を考慮。） ※格子解像度以下の物体影響を考慮する為に、全ての方程式は FAVOR 法により定式化がなされている。
乱流モデル	標準 k-ε モデル
座標系	3 次元直交座標系
計算格子	スタガード格子
離散化法	有限差分法
空間離散化法	1 次精度風上差分（移流項）、2 次精度中心差分（移流項以外）
時間離散化法	完全陰解法
行列解法	AMG-CG 法、BiCGSTAB 法

[4]理想気体の状態方程式

$$\bar{p} = \bar{\rho}\tilde{R}\tilde{T} \tag{6}$$

[5] $k-\varepsilon$方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\bar{\rho}k\right)+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\bar{\rho}k\tilde{u}_j\right)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_T}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] \tag{7}$$
$$+P_k+G_k-\bar{\rho}\varepsilon$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\bar{\rho}\varepsilon\right)+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\bar{\rho}\varepsilon\tilde{u}_j\right)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] \tag{8}$$
$$+\frac{\varepsilon}{k}\left(C_{\varepsilon 1}P_k+C_{\varepsilon 3}\max\left[0,G_k\right]-C_{\varepsilon 2}\bar{\rho}\varepsilon\right)$$

$$P_k=\left[\mu_T\left(\frac{\partial\tilde{u}_i}{\partial x_j}+\frac{\partial\tilde{u}_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\bar{\rho}k\delta_{ij}\right]\frac{\partial\tilde{u}_i}{\partial x_j} \tag{9}$$

$$G_k=\frac{\mu_T}{\mathrm{Pr}_T}\frac{g_i}{\tilde{T}}\frac{\partial\tilde{T}}{\partial x_i} \tag{10}$$

物理量$\xi(\mathrm{x},t)$のアンサンブル平均$\bar{\xi}(\mathrm{x},t)$は、

$$\bar{\xi}(\mathrm{x},t)=\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\xi_N(\mathrm{x},t) \tag{11}$$

と定義される。ここで、$\xi_N(\mathrm{x},t)(n=1,2,...,N)$は、同一と見なされる実験条件で繰り返し観測を行ったときに得られるN個の観測データである。ただし、アンサンブル平均が意味を持つためには平均値がNに依存しない位多くの観測データが必要である。物理量ξのアンサンブル平均からの変動をξ'とすると、

$$\xi=\bar{\xi}+\xi' \tag{12}$$

と分解できる。このように物理量をその平均と平均からの変動に分解する操作を Reynolds 分解と呼ぶ。定義より変動量ξ'のアンサンブル平均はゼロとなる。

$$\bar{\xi}'=\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\left(\xi_N-\bar{\xi}\right)=\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\xi_N-\bar{\xi}\equiv 0 \tag{13}$$

また、物理量ζを用いて次の関係が成り立つ。

$$\overline{\bar{\xi}\zeta'}=0,\quad \overline{\bar{\xi}\bar{\zeta}}=\bar{\xi}\bar{\zeta},\quad \overline{\xi+\zeta}=\bar{\xi}+\bar{\zeta} \tag{14}$$

圧縮性流体の場合、密度による重みを考慮した Favre 平均[23]を用いるのが簡便である。物理量ξの Favre 平均$\tilde{\xi}$は

$$\tilde{\xi}=\frac{\overline{\rho\xi}}{\bar{\rho}} \tag{15}$$

と定義される。物理量ξの Favre 平均からの変動はξ''で表すことにする。

$$\xi=\tilde{\xi}+\xi'' \tag{16}$$

ここで、変動量ξ''のアンサンブル平均は一般にゼロとはならないが、密度ρを乗じたアンサンブル平均はゼロになる。

$$\overline{\xi''}\neq 0,\qquad \overline{\rho\xi''}\equiv 0 \tag{17}$$

２．１．３　温位の組み込み

建物を解像したCFD解析で温位を考慮した事例はほとんど見られないが、今回の解析領域は鉛直方向数百 m に達し、気温低減率により数℃の変化を来すため、メソスケールモデルの情報をCFD側に取り込む上で圧力影響は無視できないと考えられる。そこで、温度で表現したエネルギー輸送方程式を、圧力を含む形式に一旦書き換えた上で、エクスナー関数を適用することにより、温位によるエネルギー輸送方程式の定式化を行う。

温位θは次式のように定義される。

$$\theta=T/P \tag{18}$$

ここで、Pは Exner 関数で、

$$P=\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{R}{C_p}} \tag{19}$$

式(18)、(19)より、

$$\frac{dT}{T}=\frac{dP}{P}+\frac{d\theta}{\theta}=\frac{R}{C_p}\frac{dp}{p}+\frac{d\theta}{\theta} \tag{20}$$

となるから、状態方程式

$$p = \rho RT \tag{21}$$

を利用すると、

$$\frac{dT}{T} = \frac{dp}{\rho C_p T} + \frac{d\theta}{\theta} \tag{22}$$

が与えられる。これより、熱力学第1法則

$$\rho C_p dT - dp = 0 \tag{23}$$

は次のように書き換えられる。

$$\rho C_p P d\theta = 0 \tag{24}$$

したがって、式(4)は次のように与えられる。

$$\begin{aligned} &C_p\left[\frac{\partial}{\partial t}\left(\bar{\rho}\tilde{\theta}\right)+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\bar{\rho}\tilde{\theta}\tilde{u}_j\right)\right] \\ &=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\lambda+\frac{C_p\mu_T}{\mathrm{Pr}_T}\right)\frac{\partial\tilde{\theta}}{\partial x_j}\right] \end{aligned} \tag{25}$$

ただし、乱流による温位変動と速度変動の相関項は次のように定式化した。

$$-\overline{\rho\theta'' u_j''} = \frac{\mu_T}{\mathrm{Pr}_T}\frac{\partial\tilde{\theta}}{\partial x_j} \tag{26}$$

２．１．４　コリオリ力の組み込み

回転座標系上で移動した際に移動方向と垂直な方向に移動速度に比例した大きさで慣性力を受ける。これはコリオリ力とも呼ばれ、次式で表される。

$$F_{ci} = -\rho f \varepsilon_{i3k} u_k \tag{27}$$

ここで、F_{ci}：コリオリ力[kgm^{-2}s^{-2}]、f：コリオリパラメータ[s^{-1}]、ρ：密度[kgm^{-3}]、ε_{ijk}：エディントンのイプシロン[-]、u：速度[ms^{-1}]である。回転流体のCFD解析ではコリオリ力を考慮した事例が見られる[32)33)]が、建築、街区スケールのCFD解析ではこの効果は無視されることが多い。今回の解析領域は都市スケールであることから気象モデルと同様に地球の自転に伴うコリオリ力を考慮した計算を行う。

２．１．５　熱および湿気による乱れ生成

水蒸気が関わる浮力効果については気象分野では仮温位を用いる方法が一般的である。近藤らは非圧縮性流体のCFD解析における水蒸気による浮力効果の検討を行っている[34)]。

本報告では圧縮性流体のCFD解析における熱および湿気による乱れ生成の整理を試みる。気体各成分について理想気体の状態方程式

$$p_a = \rho_a R_a T \quad （乾燥空気） \tag{28}$$

$$p_v = \rho_v R_v T \quad （水蒸気） \tag{29}$$

を仮定し、気圧pは

$$p = p_a + p_v \tag{30}$$

気体定数R_a、R_vは、普遍気体定数R_0とそれぞれの分子量M_a、M_vから

$$R_a = R_0 / M_a \tag{31}$$

$$R_v = R_0 / M_v \tag{32}$$

としている。密度ρは

$$\rho = \rho_a + \rho_v \tag{33}$$

であるので、比湿をqとすると、以上の関係から

$$p = \rho\left[(1-q)/M_a + q/M_v\right]R_0 T \tag{34}$$

が得られる。

エネルギー式から気温T、水蒸気の質量保存式から比湿q、連続式から導出される圧力のポアソン方程式から気圧pがそれぞれ計算されるので、式(34)から密度ρが計算される。この方法によると、実質SIMPLEC法（後退差分）により音波の発生を抑制して数値的安定が得られていることになる。一方、圧力の鉛直分布を指数関数で近似して実質的に等圧場として取り扱う方法も提案されている[35)]。

乱流エネルギーkの方程式は元の運動量輸送方程式

$$\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} \\ &+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right]+\rho g_i \end{aligned} \tag{35}$$

と平均流の運動量輸送方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\overline{\rho}\tilde{u}_i\right)+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\overline{\rho}\tilde{u}_i\tilde{u}_j\right)+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\overline{\rho u_i''u_j''}\right)$$
$$=-\frac{\partial\overline{p}}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\mu_T\right)\left(\frac{\partial\tilde{u}_i}{\partial x_j}+\frac{\partial\tilde{u}_j}{\partial x_i}\right)\right]+\overline{\rho}g_i \quad (36)$$

とから導出することができる。

運動量輸送方程式(35)の両辺にu_iを乗じ、iについて1から3まで和を取ると、

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho K\right)+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho K u_j\right)=u_i S_i \quad (37)$$

ここで、S_iは圧力項、粘性項および重力項を表す。

$$S_i=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right]+\rho g_i \quad (38)$$

同様に、平均流の運動量輸送方程式(36)の両辺に$\tilde{u}_i$を乗じ、iについて1から3まで和を取ると、

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\overline{\rho}\hat{K}\right)+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\overline{\rho}\hat{K}\tilde{u}_j\right)+\tilde{u}_i\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\overline{\rho u_i''u_j''}\right)=\tilde{u}_i\overline{S}_i \quad (39)$$

以上で、Kおよび$\hat{K}$はそれぞれ運動エネルギーおよび平均流の運動エネルギーである。

$$K=\frac{1}{2}u_iu_i \quad , \quad \hat{K}=\frac{1}{2}\tilde{u}_i\tilde{u}_i \quad (40)$$

運動エネルギー式(37)から平均流の運動エネルギー式(39)を引き、式全体にアンサンブル平均を施すと乱流エネルギーkの方程式が得られる。

浮力による乱流エネルギーの生成項は圧力項から次のように導出される。圧力項については、

$$\overline{u_i\frac{\partial p}{\partial x_i}-\tilde{u}_i\frac{\partial\overline{p}}{\partial x_i}}=\overline{\tilde{u}_i\frac{\partial p'}{\partial x_i}+u_i''\frac{\partial p}{\partial x_i}}=\overline{u_i''\frac{\partial p'}{\partial x_i}}+\overline{u_i''\frac{\partial\overline{p}}{\partial x_i}}$$
$$=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\overline{p'u_i''}\right)-\overline{p'\frac{\partial u_i''}{\partial x_i}}+\overline{u_i''\frac{\partial\overline{p}}{\partial x_i}}$$
$$\approx\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\overline{p'u_i''}\right)+\overline{u_i''\frac{\partial\overline{p}}{\partial x_i}} \quad (41)$$

ここで、非圧縮性流れの場合には$\partial u_j''/\partial x_j=0$として消去される項は近似的にゼロとした。圧力勾配を静水圧分布とそれからの差分に分けて考えると

$$\overline{u_i''\frac{\partial\overline{p}}{\partial x_i}}=\overline{\overline{\rho}u_i''g_i}+\overline{u_i''\left(\frac{\partial\overline{p}}{\partial x_i}-\overline{\rho}g_i\right)}$$
$$\approx\overline{\left(\rho-\rho'\right)u_i''g_i}=-g_i\overline{\rho'u_i''} \quad (42)$$

と近似できる。式(42)で表される項$-g_i\overline{\rho'u_i''}$が浮力による乱流エネルギーの生成項である。浮力による生成項には密度変動と速度変動の相関項が現われるので、状態方程式を用いて温位変動と速度変動の相関項および濃度変動と速度変動の相関項に置き換える。状態方程式は次のように表される。

$$\frac{p}{P}=\rho R\theta\ , \quad R=\sum_s\frac{R_o}{M_s}Y_s\ , \quad P=\left(p/\ p_0\right)^{R/Cp} \quad (43)$$

低Mach数流れの場合、圧力変動が密度変動に与える影響は微小と見なせるので、式(43)から、

$$\overline{\rho}\tilde{R}\theta''+\overline{\rho}R''\tilde{\theta}+\rho'\tilde{R}\tilde{\theta}\approx 0 \quad (44)$$

が与えられる。ただし、2次相関項は無視した。また、

$$\tilde{R}=\sum_s\frac{R_o}{M_s}\tilde{Y}_s\ , \quad R''=\sum_s\frac{R_o}{M_s}Y_s'' \quad (45)$$

である。式(44)にg_iu_i''を乗じてアンサンブル平均を取ると、浮力による生成項は次のように表される。

$$g_i\overline{\rho'u_i''}\approx-g_i\frac{\overline{\rho}}{\tilde{\theta}}\overline{\theta''u_i''}-g_i\frac{\overline{\rho}}{\tilde{R}}\sum_s\frac{R_o}{M_s}\overline{Y_s''u_i''}$$
$$\approx\frac{\mu_T}{Pr_T}\frac{g_i}{\tilde{\theta}}\frac{\partial\tilde{\theta}}{\partial x_i}+\frac{\mu_T}{Sc_T}\frac{g_i}{\tilde{R}}\sum_s\frac{R_o}{M_s}\frac{\partial\tilde{Y}_s}{\partial x_i} \quad (46)$$

式(46)の最後の式に現れる第1項が熱による乱れ生成項、第2項が湿気による乱れ生成項となる。

２．１．６　格子解像度以下の物体認識

都市域の複雑な地形や建物幾何形状に沿って忠実に解析セルを設定することは実際には困難である。そこで、水平方向に均一な格子配置を考え、格子解像度以下の物体については流

体の体積占有率G_vとして取り扱うFAVOR法[31]により、基礎方程式を導入し、温位、コリオリ力、湿気による乱れ生成についても考慮し、次のように表した。

[1]連続の式

$$G_v\frac{\partial\overline{\rho}}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(G_j\overline{\rho}\widetilde{u}_j\right)=0 \tag{47}$$

[2]運動量輸送方程式

$$\begin{aligned}&G_v\frac{\partial}{\partial t}\left(\overline{\rho}\widetilde{u}_i\right)+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(G_j\overline{\rho}\widetilde{u}_i\widetilde{u}_j\right)=-G_v\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\overline{p}+\frac{2}{3}\overline{\rho}k\right)\\&+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[G_j\left(\mu+\mu_T\right)\left(\frac{\partial\widetilde{u}_i}{\partial x_j}+\frac{\partial\widetilde{u}_j}{\partial x_i}\right)\right]\\&+G_v\overline{\rho}g_i-G_v\overline{\rho}f\varepsilon_{i3k}\widetilde{u}_k\end{aligned} \tag{48}$$

[3]エネルギー輸送方程式

$$\begin{aligned}&C_p\left[G_v\frac{\partial}{\partial t}\left(\overline{\rho}\widetilde{\theta}\right)+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(G_j\overline{\rho}\widetilde{\theta}\widetilde{u}_j\right)\right]\\&=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(G_j\left(\lambda+\frac{C_p\mu_T}{\mathrm{Pr}_T}\right)\frac{\partial\widetilde{\theta}}{\partial x_j}\right)\end{aligned} \tag{49}$$

[4]$k-\varepsilon$方程式

$$\begin{aligned}&G_v\frac{\partial}{\partial t}\left(\overline{\rho}k\right)+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(G_j\overline{\rho}k\widetilde{u}_j\right)\\&=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[G_j\left(\mu+\frac{\mu_T}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_v\left(P_k+G_k-\overline{\rho}\varepsilon\right)\end{aligned} \tag{50}$$

$$\begin{aligned}&G_v\frac{\partial}{\partial t}\left(\overline{\rho}\varepsilon\right)+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(G_j\overline{\rho}\varepsilon\widetilde{u}_j\right)\\&=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[G_j\left(\mu+\frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right]\\&+G_v\frac{\varepsilon}{k}\left(C_{\varepsilon1}P_k+C_{\varepsilon3}\max\left[0,G_k\right]-\overline{\rho}C_{\varepsilon2}\varepsilon\right)\end{aligned} \tag{51}$$

$$\mu_T=\overline{\rho}C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon} \tag{52}$$

$$P_k=\left[\mu_T\left(\frac{\partial\widetilde{u}_i}{\partial x_j}+\frac{\partial\widetilde{u}_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}k\overline{\rho}\delta_{ij}\right]\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \tag{53}$$

$$G_k=\frac{\mu_T}{\mathrm{Pr}_T}\frac{g_i}{\widetilde{\theta}}\frac{\partial\widetilde{\theta}}{\partial x_i} \tag{54}$$

ここで、G_v：計算格子中心での流体の体積占有率[-]、G_j：計算格子界面での面開口率[-]。

２．１．７　樹木による抗力のモデル化

樹木による抗力の効果は、運動方程式に流体力学的なドラッグ項、$k-\varepsilon$の方程式に乱れ増大の項を考慮することでモデル化される。樹木については、吉田らによる樹木の抗力モデル[36]を導入し、樹木のモデルパラメータは岩田らの設定値を用いた[37]。運動方程式の付加項は以下の通りである。

$$F_i=aC_du_i\sqrt{u_j^2} \tag{55}$$

k、ε式の付加項は以下の通りである。

$$F_k=aC_d\left(\sqrt{u_j{}^2}\right)^3 \tag{56}$$

ここに、C_d：樹冠の抵抗係数(0.20)、a：樹冠の葉面積密度[m^2/m^3]である。

２．１．８　地物の熱・物質伝達

FAVOR法では解析セル内に格子解像度以下の物体（地盤、都市構造物等の固体）を含むが、これらの表面(地表面および建物の屋上・壁面)からの対流顕熱が発生する。対流顕熱は地表面および建物屋上・壁面の表面温度の固定値および解析セル内の面積から、熱伝達係数によるバルク式で見積もられ、エネルギー輸送方程式のソース項として付加される。対流顕熱の発生に伴うエネルギー輸送方程式の付加項は以下の通りである。

$$\begin{aligned}&F_S=\frac{1}{V}\sum[hS_R\left(T_R-T\right)+hS_W\left(T_W-T\right)\\&+hS_G\left(T_G-T\right)]\end{aligned} \tag{57}$$

ここに、F_S：対流顕熱[Wm^{-3}]、h：熱伝達係数

[$Wm^{-2}K^{-1}$]、S_R：建物屋根の表面積[m^2]、S_W：建物壁面の表面積[m^2]、S_G：地表面上の建物以外の表面積[m^2]、T_R：建物屋根の温度[K]、T_W：建物壁面の温度[K]、T_G：地表面温度[K]、V：解析セルの体積[m^3]、である。

同様に、蒸発に伴う水蒸気輸送方程式の付加項は以下の通りである。

$$F_L = \frac{L}{V}\sum[h_q S_R(q_R - q) + h_q S_W(q_W - q) + h_q S_G(q_G - q)] \quad (58)$$

ここに、F_L：蒸発潜熱[W m^{-3}]、h_q：物質伝達係数[$kgm^{-2}s^{-1}$]、q_R：建物屋根の比湿[$kgkg^{-1}$]、q_W：建物壁面の比湿[$kgkg^{-1}$]、q_G：地面の比湿[$kgkg^{-1}$]、q：大気の比湿[$kgkg^{-1}$]、L：蒸発潜熱[J kg^{-1}]である。

２．１．９　人工排熱

人工排熱については解析セル内の人工排熱の発生量を顕熱と潜熱に分けて見積もり、これらをエネルギー輸送方程式、水蒸気輸送方程式の付加項のソース項としてそれぞれ付加する。

２．１．１０　基礎方程式のまとめ

基礎方程式をまとめると次のようになる。

[1]連続の式

$$G_v\frac{\partial \overline{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(G_j \overline{\rho}\tilde{u}_j\right) = 0 \quad (59)$$

[2]運動量輸送方程式

$$G_v\frac{\partial}{\partial t}\left(\overline{\rho}\tilde{u}_i\right) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(G_j \overline{\rho}\tilde{u}_i\tilde{u}_j\right) = -G_v\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\overline{p} + \frac{2}{3}\overline{\rho}k\right) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[G_j(\mu + \mu_T)\left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i}\right)\right] + G_v\overline{\rho}g_i - G_v\overline{\rho}F_i - G_v\overline{\rho}f\varepsilon_{i3k}\tilde{u}_k \quad (60)$$

$$F_i = aC_d\tilde{u}_i\sqrt{\tilde{u}_j^2} \quad (61)$$

ここで、fはCoriolisパラメータで$f = 2\Omega\sin\phi$。ただし、$\Omega = 2\pi/86400[rad./s]$、緯度$\phi = 35.4\pi/180[rad.]$。また、$a$：葉面積密度[=1.5$m^2/m^3$]、$C_d$：樹冠の抵抗係数[=0.2]。

[3]エネルギー輸送方程式

$$C_p\left[G_v\frac{\partial}{\partial t}\left(\overline{\rho}\tilde{\theta}\right) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(G_j\overline{\rho}\tilde{\theta}\tilde{u}_j\right)\right] = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[G_j\left(\lambda + \frac{C_p\mu_T}{\mathrm{Pr}_T}\right)\frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial x_j}\right] + \frac{1}{P}[F_S + Q_S] \quad (62)$$

ここで、F_S：対流顕熱[W/m^3]、Q_S：人工排熱(顕熱)[W/m^3]、P：Exner関数[$=(p/p_0)^{R/Cp}$]、Pr_T：乱流Prandtl数[=0.9]。

[4]水蒸気輸送方程式

$$G_v\frac{\partial}{\partial t}\left(\overline{\rho}\tilde{q}\right) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(G_j\overline{\rho}\tilde{q}\tilde{u}_j\right) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[G_j\left(\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_T}{Sc_T}\right)\frac{\partial \tilde{q}}{\partial x_j}\right] + \frac{1}{L}\left(F_L + Q_L\right) \quad (63)$$

ここで、F_L：蒸発潜熱[W m^{-3}]、Q_L：人工排熱(潜熱)[W m^{-3}]、L：蒸発潜熱[J kg^{-1}]、Sc：Schmidt数[=0.5]、Sc_T：乱流Schmidt数[=0.9]。

[5] $k-\varepsilon$方程式

$$G_v\frac{\partial}{\partial t}\left(\overline{\rho}k\right) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(G_j\overline{\rho}k\tilde{u}_j\right) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[G_j\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_v\left(P_k + G_k - \overline{\rho}\varepsilon + \overline{\rho}\tilde{u}_j F_j\right) \quad (64)$$

$$G_v\frac{\partial}{\partial t}\left(\overline{\rho}\varepsilon\right) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(G_j\overline{\rho}\varepsilon\tilde{u}_j\right) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[G_j\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + G_v\frac{\varepsilon}{k}\left(C_{\varepsilon 1}P_k + C_{\varepsilon 3}\max[0, G_k] - C_{\varepsilon 2}\overline{\rho}\varepsilon + C_{p\varepsilon 1}\overline{\rho}\tilde{u}_j F_j\right) \quad (65)$$

$$\mu_T = \overline{\rho} C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \qquad (66)$$

$$P_k = \left[\mu_T \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \overline{\rho} k \delta_{ij} \right] \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} \qquad (67)$$

$$G_k = \frac{\mu_T}{\mathrm{Pr}_T} \frac{g_i}{\tilde{\theta}} \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial x_i} + \frac{\mu_T}{Sc_T} \frac{g_i}{\tilde{R}} \left(\frac{R_o}{M_v} - \frac{R_o}{M_a} \right) \frac{\partial \tilde{q}}{\partial x_i} \qquad (68)$$

ここで、M_v：水蒸気の分子量[kg/mol]、M_a：乾燥空気の分子量[kg/mol]。補正係数 $C_{p\varepsilon 1} = 1.8$。

２．２　差分による数値解析

２．２．１　概要

離散化は 3 次元 Cartesian 座標系を用い、基礎方程式は有限差分法による。変数配置は、流速各成分をセル境界面に、密度、温度、圧力などのスカラー量をセル中心に配置するスタガードグリッドを採用した。移流項は 1 次精度風上差分、拡散項は 2 次精度中心差分により離散化した。流れ場の時間積分は、完全陰解法を用いた。

以下に、体積占有率を導入した方程式の離散化と境界条件の扱いについて示す。

２．２．２　空間差分

離散化にあたってはセル中心で定義される流体の体積占有率とセル界面で定義される流体の面積占有率を区別して取り扱う。以上で示した各基礎方程式は物理量ξを用い、全て以下の形に表すことができる。

$$G_v \frac{\partial}{\partial t}(\rho\xi) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(G_j \rho \xi u_j\right) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(G_j D \frac{\partial \xi}{\partial x_j} \right) + G_v \rho \xi_0 \qquad (69)$$

ここで、ξ：物理量、D：物理量ξの拡散係数、ξ_0：物理量ξの発生量

以下では式(69)に基づいて離散化の要領を説明する。連続式

$$G_v \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(G_j \rho u_j\right) = 0 \qquad (70)$$

に物理量ξを乗じて式(69)から引くと、

$$G_v \rho \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(G_j \rho \xi u_j\right) - \xi \frac{\partial}{\partial x_j}\left(G_j \rho u_j\right) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(G_j D \frac{\partial \xi}{\partial x_j} \right) + G_v \rho \xi_0 \qquad (71)$$

x 方向について式(71)の移流項を離散化すると、

$$\frac{1}{\Delta x_i}\left(G_{x,i+1/2}\xi_{i+1/2}(\rho u)_{i+1/2} - G_{x,i-1/2}\xi_{i-1/2}(\rho u)_{i-1/2}\right) - \frac{1}{\Delta x_i}\xi_i\left(G_{x,i+1/2}(\rho u)_{i+1/2} - G_{x,i-1/2}(\rho u)_{i-1/2}\right) \qquad (72)$$

ここで、G_v：セル中心で定義される体積占有率、G_x：x 軸に垂直なセル界面で定義される面積開口率、である。半整数の形（例えば i+1/2 など）で表記される添字はセル界面で定義されることを表し、整数の形（例えば i など）で表記される添字はセル中心で定義されることを表す。

拡散項についても同様に次のように離散化される。

$$\frac{1}{\Delta x_i}\left[G_{x,i+1/2} D_{i+1/2} \frac{\xi_{i+1} - \xi_i}{\Delta x_{i+1/2}} - G_{x,i-1/2} D_{i-1/2} \frac{\xi_i - \xi_{i-1}}{\Delta x_{i-1/2}} \right] \qquad (73)$$

離散化の要領は y 方向、z 方向も同様である。

２．２．３　FAVOR 法に対応した拡散項の離散化

FAVOR 法において図 4 の状態では、構造物（建物、地面）の表面と格子線が近接するため、これを含む解析セルでは流体の体積占有率G_vが小さくなっている。簡単のため、格子幅Δxはセル１、セル２で同じとし、y方向の熱伝導フラックスは省略した。さらに、固体近傍である

ことから流速はほぼゼロと見なし、移流等はゼロとする。すると、セル１におけるエネルギー方程式は次のような形に書ける。

$$\lambda\frac{T_2-T_1}{\Delta x}+Q_{s,1}\Delta x=0 \qquad (74)$$

ここで、T_1およびT_2はセル１およびセル２の温度[K]、$Q_{s,1}$はセル１におけるセル体積当たりの発熱量[W/m^3]である。

熱がこもる現象を回避するに当たり、熱伝導を促進するために、例えば流体の体積占有率$G_{v,1}$を用いて熱伝導係数をバルク補正する方法が考えられる。

$$\frac{\lambda}{G_{v,1}}\frac{T_2-T_1}{\Delta x}+Q_{s,1}\Delta x=0 \qquad (75)$$

これは、

$$\lambda\frac{T_2-T_1}{\Delta x}+G_{v,1}Q_{s,1}\Delta x=0 \qquad (76)$$

と書き直すことができ、発熱量$Q_{s,1}$に流体の体積占有率$G_{v,1}$を乗じて発熱量を削減する操作とも言えそうである（実際は他項が存在するので、そうはならない）。さて、式(76)は熱伝導フラックスを$1/G_{v,1}$倍しているが、セル２の側でも同じフラックスとするためには、

$$\frac{\lambda}{\min\left[G_{v,1},G_{v,2}\right]}\cdot\frac{T_2-T_1}{\Delta x}+Q_{s,1}\Delta x=0 \qquad (77)$$

と言うような形にならなければいけない。小さなセル１をセル２に「同化」させるため、人工拡散を付加しているような処理になるが、式(77)を別の観点から整理すると次のようになる。

図４をx方向の１次元熱伝導方程式の系と考えると、セル１、セル２の実質的な格子幅Δx_1、Δx_2は次のように見なすことができる。

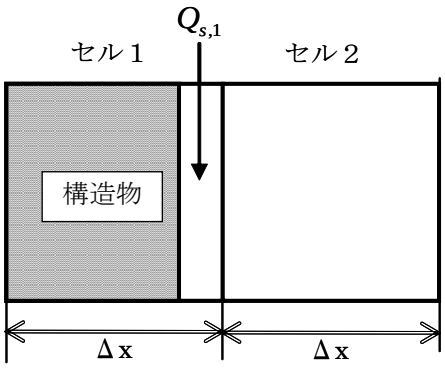


図４　体積占有率が小さくなる典型例

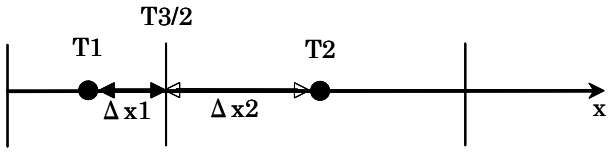


図５　実質的な格子

$$\begin{aligned}\Delta x_1&=G_{v,1}\cdot\Delta x\\ \Delta x_2&=G_{v,2}\cdot\Delta x\end{aligned} \qquad (78)$$

図４のイメージでは、$G_{v,1}<<G_{v,2}(=1)$、すなわち、$\Delta x_1<<\Delta x_2(=\Delta x)$である。以下では、表記の簡単のため、格子幅$\Delta x_1$, Δx_2はセル界面と各セル中心の距離として定義する(すなわち、以上の議論における定義の半分)。

図５に示すセルの界面における温度勾配$(\partial T/\partial x)_{3/2}$の評価は通常、Taylor 展開、

$$T_1=T_{3/2}-\Delta x_1\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{3/2}+O\left(\Delta x^2\right) \qquad (79)$$

$$T_2=T_{3/2}+\Delta x_2\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{3/2}+O\left(\Delta x^2\right) \qquad (80)$$

から、次のように１次精度で近似される。

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{3/2}=\frac{T_2-T_1}{\Delta x_1+\Delta x_2}+O(\Delta x) \qquad (81)$$

今、セル界面における温度$T_{3/2}$が別途既知であるとすると、同様に Taylor 展開、

$$T_1 = T_{3/2} - \Delta x_1 \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{3/2} + \frac{\Delta x_1^2}{2} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right)_{3/2} + O\left(\Delta x^3\right) \tag{82}$$

$$T_2 = T_{3/2} + \Delta x_2 \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{3/2} + \frac{\Delta x_2^2}{2} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right)_{3/2} + O\left(\Delta x^3\right) \tag{83}$$

から、次のように2次精度の近似式が導かれる。

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{3/2} &= \frac{\Delta x_1 \Delta x_2}{\Delta x_1 + \Delta x_2} \left(\frac{T_{3/2} - T_1}{\Delta x_1^2} + \frac{T_2 - T_{3/2}}{\Delta x_2^2} \right) \\ &\quad + O\left(\Delta x^2\right) \\ &= \frac{1}{\Delta x_1 + \Delta x_2} \left(\Delta x_2 \frac{T_{3/2} - T_1}{\Delta x_1} + \Delta x_1 \frac{T_2 - T_{3/2}}{\Delta x_2} \right) \\ &\quad + O\left(\Delta x^2\right) \end{aligned} \tag{84}$$

セル界面における温度$T_{3/2}$を Taylor 展開、式(79)(80)から、

$$T_{3/2} = \frac{T_1 \Delta x_2 + T_2 \Delta x_1}{\Delta x_1 + \Delta x_2} + O\left(\Delta x^2\right) \tag{85}$$

と近似した結果(線形内挿)を式(84)に代入すると、式(81)になる。温度$T_{3/2}$に対する別の評価を考えて見る。例えば、セル1の中心からセル2の中心までの区間において、積分値に関して、

$$\int_{-\Delta x_1}^{\Delta x_2} T(x) dx = T_1 \Delta x_1 + T_2 \Delta x_2 \tag{86}$$

が成り立つと考える。セル中心から界面まではそれぞれに線形な変化を仮定すると、左辺の積分値は次のように評価できる。

$$\int_{-\Delta x_1}^{\Delta x_2} T(x) dx = \Delta x_1 \frac{T_1 + T_{3/2}}{2} + \Delta x_2 \frac{T_{3/2} + T_2}{2} \tag{87}$$

式(86)および式(87)より、

$$T_{3/2} = \frac{T_1 \Delta x_1 + T_2 \Delta x_2}{\Delta x_1 + \Delta x_2} \tag{88}$$

となる。式(88)を式(84)に代入すると、次式が与えられる。

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{3/2} &= \frac{1}{\Delta x_1 + \Delta x_2} \left(\frac{\Delta x_2^2}{\Delta x_1} + \frac{\Delta x_1^2}{\Delta x_2} \right) \frac{T_2 - T_1}{\Delta x_1 + \Delta x_2} \\ &= \frac{\Delta x_1^3 + \Delta x_2^3}{\Delta x_1 \Delta x_2 \left(\Delta x_1 + \Delta x_2 \right)} \cdot \frac{T_2 - T_1}{\Delta x_1 + \Delta x_2} \end{aligned} \tag{89}$$

式(89)を式(81)と比較すると、次式で表される因子ηが掛かっていることがわかる。

$$\eta\left(\Delta x_1, \Delta x_2\right) = \frac{\Delta x_1^3 + \Delta x_2^3}{\Delta x_1 \Delta x_2 \left(\Delta x_1 + \Delta x_2 \right)} \tag{90}$$

式(78)を式(90)に代入すれば、

$$\eta\left(G_{v,1}, G_{v,2}\right) = \frac{G_{v,1}^3 + G_{v,2}^3}{G_{v,1} G_{v,2} \left(G_{v,1} + G_{v,2} \right)} \tag{91}$$

となる。ここで、$r = G_{v,1} / G_{v,2}$とおくと、

$$\eta = \frac{G_1^3 + G_2^3}{G_1 G_2 \left(G_1 + G_2 \right)} = \frac{1}{r} \cdot \frac{1 + r^3}{1 + r} \tag{92}$$

となり、その値をまとめると、表3のようになる。式(92)から示されるように、流体の体積占有率の比$G_{v,1} / G_{v,2}$が1からずれる程、温度勾配の評価に$1/G$に相当する補正が行われ、最初に示した式(77)に相当する熱伝導フラックスが与えられることになる。式(91)に示した因子ηをエネルギー輸送方程式の熱伝導項および水蒸気輸送方程式の拡散項で考慮する。

表3　熱伝導率の補正値ηと実質的な格子幅の比rの対応

$r = G_{v,1}/G_{v,2}$, $\eta = (1+r^3)/r/(1+r)$

r	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
η	9.10	4.20	2.63	1.90	1.50	1.27	1.13	1.05	1.01	1.00

２．２．４　時間差分

完全陰解法の説明のため、流体の体積占有率等に関する記述を省略し、以下の表記にて基礎方程式を再掲する。

[1]連続の式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho u_j\right)=0 \tag{93}$$

[2]運動量輸送方程式

$$\frac{\partial u_i}{\partial t}+R_{ui}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i} \tag{94}$$

[3]エネルギー輸送方程式

$$\frac{\partial \theta}{\partial t}+R_\theta=0 \tag{95}$$

[4]水蒸気輸送方程式

$$\frac{\partial q}{\partial t}+R_q=0 \tag{96}$$

[5] $k-\varepsilon$ 方程式

$$\frac{\partial k}{\partial t}+R_k=0 \tag{97}$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}+R_\varepsilon=0 \tag{98}$$

エネルギー輸送方程式および水蒸気輸送方程式を、時間後退差分を用いて離散化する(Euler陰解法)。

$$\left[\frac{1}{\Delta t}+\left(\frac{\partial R_\theta}{\partial T}\right)^n\right]\Delta^n\theta=-R_\theta^n \tag{99}$$

$$\left[\frac{1}{\Delta t}+\left(\frac{\partial R_q}{\partial q}\right)^n\right]\Delta^n q=-R_q^n \tag{100}$$

$$\Delta^n\theta=\theta^{n+1}-\theta^n,\quad \Delta^n q=q^{n+1}-q^n \tag{101}$$

状態方程式から次点の密度を計算する。

$$\rho^{n+1}=p^n/\left(RT^{n+1}\right) \tag{102}$$

運動方程式を2段階分離し離散化する。

$$\left[\frac{1}{\Delta t}+\left(\frac{\partial R_{ui}}{\partial u_i}\right)^n\right]\Delta^n u_i=-R_{ui}^n \tag{103}$$

$$\Delta^n u_i=\tilde{u}_i-u_i^n \tag{104}$$

$$\Delta^n\left(\rho u_i\right)=-\Delta t'\frac{\partial(\delta p)}{\partial x_i} \tag{105}$$

$$\Delta^n\left(\rho u_i\right)=\left(\rho u_i\right)^{n+1}-\rho^{n+1}\tilde{u}_i \tag{106}$$

$$\frac{1}{\Delta t'}=\frac{1}{\Delta t}+\left(\frac{\partial R_{ui}}{\partial u_i}\right)^n \tag{107}$$

式(105)の発散を取ると、

$$\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Delta t'\frac{\partial(\delta p)}{\partial x_j}\right)=\frac{\rho^{n+1}-\rho^n}{\Delta t}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho^{n+1}\tilde{u}_j\right) \tag{108}$$

$k-\varepsilon$ 方程式を、時間後退差分を用いて離散化する(Euler陰解法)。

$$\left[\frac{1}{\Delta t}+\left(\frac{\partial R_k}{\partial k}\right)^n\right]\Delta^n k=-R_k^n \tag{109}$$

$$\Delta^n k=k^{n+1}-k^n \tag{110}$$

$$\left[\frac{1}{\Delta t}+\left(\frac{\partial R_\varepsilon}{\partial \varepsilon}\right)^n\right]\Delta^n \varepsilon=-R_\varepsilon^n \tag{111}$$

$$\Delta^n \varepsilon=\varepsilon^{n+1}-\varepsilon^n \tag{112}$$

式(99)、(100)、(103)、(109)、(111)に現れる係数行列は非対称行列となるのでBi-CGSTAB法[38)39)]またはAMG法(Algebraic Multigrid、代数多重格子法)[40)41)]により計算する。また、式(108)のポアソン方程式に現れる係数行列は対称行列となるのでICCG法[38)]またはAMG法により計算する。

AMG法の理論については既報[42)]に記載が見られるが、その概要は以下の通りである。連立方程式を反復法で解く場合、格子スケールの誤差成分を迅速に減衰させる反面、長波長の誤差成分を減衰させるのに多くの反復を要する。そこで、複数のスケールの格子を組み合わせるMG法が提案されている。MG法では長波長の誤差成分も急速に減衰させる効果が期待されているが、粗格子上の修正方程式の係数行列については粗格子上で解くべき偏微分方程式を離散化して求める必要がある。AMG法では粗格子上の係数行列を細格子上の係数行列から代数的に作成することができる。

２．２．５　境界条件の種類

（１）温位

a)Dirichlet境界

流入境界に適用される。境界面で入力された固定値が代入される。

流入境界の移流項では、

$$\theta_b = \theta_{fix} \qquad (113)$$

熱伝導項は、

$$\left[\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x}\right]_b = \lambda \frac{\theta - \theta_{fix}}{\Delta x} \qquad (114)$$

ここに、θ_{fix}：入力された温位固定値[K]。

b)Neumann 境界

流出境界と対称境界に適用される。境界面で以下の勾配ゼロの条件が課せられる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial x_n} = 0 \qquad (115)$$

ここに、x_n：壁面鉛直方向座標[m]、である。

境界面の移流項では

$$\theta_b = \theta_{in} \qquad (116)$$

熱伝導項は、境界面で熱フラックスをゼロとする。

c)熱伝達境界

固体壁面と地表面境界に適用される。解析セル毎に入力された固定値が代入される。移流項は、境界面でゼロとする。熱伝達項は、

$$hS_m\left(T - T_{m,fix}\right) \qquad (117)$$

ここに、$T_{m,fix}$：入力された温度固定値[K]、h：熱伝達率[W/m^2/K]、S_m：解析セル内で流体と建物および地表面が触れる部分の表面積[m^2]、である。実際は、建物屋上、建物壁面および地表面のそれぞれ日向あるいは日陰面には異なる温度固定値が設定されるので、解析セル内への放熱量は、以下のような熱負荷の総計となる。

$$h\sum_m S_m\left(T - T_{m,fix}\right) \qquad (118)$$

（２）流速

a)Dirichlet 境界

流入境界および対称面に垂直な成分に対して対称境界に適用される。境界面で入力された固定値が代入される。

移流項では、

$$u_b = u_{fix}, \quad v_b = v_{fix}, \quad w_b = w_{fix} \qquad (119)$$

u_{fix}, v_{fix}, w_{fix}：入力された、それぞれ x, y, z 方向の流速固定値[m/s]

b)Neumann 境界

流出境界と対称面に水平な成分に対して対称境界に適用される。境界面で以下の勾配ゼロの条件が課せられる。

$$\frac{\partial u}{\partial x_n} = 0 \qquad (120)$$

c)一般化対数則

地表面に適用される。

$$\frac{u_p}{(u^*)^2}(C_\mu^{1/2}k_p)^{1/2} = \frac{1}{\kappa}\ln\left[\frac{\mathrm{E}h_p(C_\mu^{1/2}k_p)^{1/2}}{\nu}\right] \qquad (121)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x_n} = \frac{(u^*)^2}{\nu} \qquad (122)$$

ここに、u^*：摩擦速度[m/s]、ν：動粘性係数[m^2/s]、u_p：壁面第 1 定義点の壁面接線方向速度[m/s]、k_p：壁面第 1 定義点の乱流エネルギーk の値[m^2/s^2]、h_p：壁面から壁面第 1 定義点までの距離[m]、κ：カルマン定数、E：経験定数(=9.0)、C_μ：モデル定数(=0.09)、である。

（３）kおよびε

a)Dirichlet 境界

流入境界に適用される。境界面で入力された固定値が代入される。

$$k_b = k_{fix}, \quad \varepsilon_b = \varepsilon_{fix} \qquad (123)$$

ここに、k_{fix}：入力されたk固定値[m^2/s^2]、ε_{fix}：入力されたε固定値[m^2/s^3]、である。

b)Neumann 境界

流出境界と対称境界に適用される。境界面で以下の勾配ゼロの条件が課せられる。

$$\frac{\partial k}{\partial x_n} = 0, \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_n} = 0 \qquad (124)$$

c)一般化対数則
地表面と建物境界に適用される。

$$k=\frac{(u^*)^2}{C_\mu^{1/2}},\quad \varepsilon=\frac{(u^*)^3}{\kappa h_p} \qquad (125)$$

２．２．６　メソスケールモデルによる上空および側方境界条件の設定

計算領域の上空および側方境界はいわゆる人為境界で、現実の流れ場では境界とはならない箇所である。このような境界は、壁面などとは異なり流体力学的に定式化できるような明確な条件設定は見あたらず、例えば次のような取り扱いがなされる。
①実験結果など既存の知見に基づき境界条件を推定する。
②一様な流れ場と見なせる位に広い計算領域を取り、一様流れを設定する。
③等エントロピー変化あるいはRiemann不変量など計算領域の外側の条件を理論的なアプローチで補う。
④より広域を粗い格子または他のモデルで計算し、その計算結果を内挿するなどして境界条件を設定する。

本報告では④の方法に従い、メソスケールモデルを用いて広域の範囲を計算した結果を内挿して上空および側方のおける境界条件を設定した。境界条件の設定をまとめたのが表４である。

側面境界でのk, εはメソスケールモデルの計算結果より、次のように算定する。まず、

$$\mu_T\frac{\partial u}{\partial z}=\text{一定}\quad ,\quad \varepsilon=\sqrt{C_\mu}k\frac{\partial u}{\partial z} \qquad (126)$$

を仮定する。すなわち、ρk＝一定。ただし、簡単のため密度ρを一定とするため、実際はk＝一定とする。

一定とする乱流エネルギーkは次のように計算する。メソスケールモデルの計算結果から上空z_b＝500m における風速u_bが与えられる。

これより１／７乗則を適用して地表面付近z_1＝0.5m における風速u_1を計算する。

$$\frac{u_1}{u_b}=\left(\frac{z_1}{z_b}\right)^{1/7} \qquad (127)$$

地表面付近では対数則を適用して、摩擦速度u^*を計算する。

$$\frac{u_1}{u^*}=\frac{1}{\kappa}\ln\left(\frac{z_1u^*}{\nu}\right)+A \qquad (128)$$

これより乱流エネルギーkは次のように与えられる。

$$k=\frac{(u^*)^2}{\sqrt{C_\mu}} \qquad (129)$$

２．２．７　鉛直壁面第１セルの取り扱い

（１）鉛直壁面第１セルでのk, ε

等温場では、平衡条件

$$C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon}\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2=\varepsilon \qquad (130)$$

およびPrandtlの混合距離モデル

$$C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon}=l_m^2\frac{\partial u}{\partial y}\qquad (l_m=\kappa y) \qquad (131)$$

から壁面第１セルでのk, εを計算する。流速のシアー$\partial u/\partial y$は対数則より

$$\frac{\partial u}{\partial y}=\frac{u^*}{l_m} \qquad (132)$$

と与えられるので、

$$k=\frac{(u^*)^2}{\sqrt{C_\mu}},\quad \varepsilon=\frac{(u^*)^3}{l_m} \qquad (133)$$

式(125)から、

$$\frac{k^3}{\varepsilon^2}=\frac{l_m^2}{C_\mu\sqrt{C_\mu}} \qquad (134)$$

表４　上空および側方境界条件

場所	設定方法
上空面	圧力固定。 u, v固定。 温位固定。 比湿固定。 k, ε 固定。 （圧力を固定するのでwは CFD 数値解析により決められる）
流入出面	圧力勾配ゼロ。 u, v, w固定。 メソスケールモデルの計算結果が流入の場合 温位固定。 比湿固定。 k, ε 固定。 メソスケールの計算結果が流出の場合 温位勾配ゼロ。 比湿勾配ゼロ。 k, ε 勾配ゼロ。
地表面・壁面	圧力勾配ゼロ。 対数則。 熱伝達係数、物質伝達係数より各フラックスを算定。

非等温場の場合、Favre 平均の形式を用いて平衡条件は次のようになる。

$$C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} W_1 = \varepsilon \tag{135}$$

$$W_1 = \left(\frac{u^*}{l_m}\right)^2 + \frac{1}{Pr_T}\frac{g_i}{\tilde{\theta}}\frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial x_i} + \frac{1}{Sc_T}\frac{g_i}{W_2}\frac{\partial \tilde{q}}{\partial x_i} \tag{136}$$

ただし、

$$\frac{1}{W_2} = \frac{1}{\tilde{R}}\left(\frac{R_o}{M_v} - \frac{R_o}{M_a}\right), \quad \tilde{R} = \frac{R_o}{M_v}\tilde{q} + \frac{R_o}{M_a}(1-\tilde{q}) \tag{137}$$

とおいた。ここで、θ：温位 $[K]$、q：比湿 $[kg/kg]$、M_v：水蒸気の分子量 $[kg/mol]$、M_a：乾燥空気の分子量 $[kg/mol]$、R_o：普遍気体定数 $[kg/mol/K]$である。

非等温場における式(134)に相当する関係は一般には与えられていないため、式(134)を便宜上使用することにすると、

$$k = \frac{l_m^2 W_1}{\sqrt{C_\mu}}, \quad \varepsilon = l_m^2 W_1 \sqrt{W_1} \tag{138}$$

が与えられる。また、乱流粘性係数 ν_T は、

$$\nu_T = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} = l_m^2 \sqrt{W_1} \tag{139}$$

となる。

２．２．８　WETモデル

WETモデル[43]では鉛直方向の乱流熱フラックス、乱流水蒸気フラックスはそれぞれ次のように与えられる。

$$-\overline{\rho w''\theta''}=\frac{\mu_T}{\sigma_\theta}\frac{\partial\tilde{\theta}}{\partial z}-\frac{k}{\varepsilon}C_{\theta 3}g_3\overline{\rho'\theta''} \qquad (140)$$

$$-\overline{\rho w''q''}=\frac{\mu_T}{\sigma_q}\frac{\partial\tilde{q}}{\partial z}-\frac{k}{\varepsilon}C_{q3}g_3\overline{\rho'q''} \qquad (141)$$

ここで、経験定数σ_θ, σ_q, $C_{\theta 3}$, C_{q3}は次のように設定されることが多い。

$$\sigma_\theta=\sigma_q=0.5 \quad , \quad C_{\theta 3}=C_{q3}=0.25 \qquad (142)$$

式(140)(141)の右辺第１項は勾配拡散近似による項であるが、右辺第２項は浮力の効果を表す項である。状態方程式より、

$$\rho'\tilde{R}\tilde{\theta}+\rho R''\tilde{\theta}+\rho\tilde{R}\theta''\approx 0 \qquad (143)$$

$$\tilde{R}=\frac{R_o}{M_v}\tilde{q}+\frac{R_o}{M_a}(1-\tilde{q}),\quad R''=\left(\frac{R_o}{M_v}-\frac{R_o}{M_a}\right)q'' \qquad (144)$$

であるから、式(143)を式(140)(141)へ代入すると、

$$-\overline{\rho w''\theta''}=\frac{\mu_T}{\sigma_\theta}\frac{\partial\tilde{\theta}}{\partial z}+\frac{k}{\varepsilon}C_{\theta 3}\left(\frac{g_3}{\tilde{\theta}}\overline{\rho\theta''^2}+\frac{g_3}{W_2}\overline{\rho q''\theta''}\right) \qquad (145)$$

$$-\overline{\rho w''q''}=\frac{\mu_T}{\sigma_q}\frac{\partial\tilde{q}}{\partial z}+\frac{k}{\varepsilon}C_{\theta 3}\left(\frac{g_3}{\tilde{\theta}}\overline{\rho q''\theta''}+\frac{g_3}{W_2}\overline{\rho q''^2}\right) \qquad (146)$$

となる。ただし、

$$\frac{1}{W_2}=\frac{1}{\tilde{R}}\left(\frac{R_o}{M_v}-\frac{R_o}{M_a}\right) \qquad (147)$$

とおいた。

式(145)(146)に示されるように、WETモデルでは、新たな相関項$\overline{\rho\theta''^2}$, $\overline{\rho q''\theta''}$, $\overline{\rho q''^2}$の輸送方程式を計算する必要がある。ここでは、鉛直壁面に接する(を含む)解析セルでの乱流鉛直フラックスを評価するためだけであるから、相関項$\overline{\rho\theta''^2}$, $\overline{\rho q''\theta''}$, $\overline{\rho q''^2}$についても平衡条件から計算することにする。水平方向に比べて鉛直方向の生成量が卓越すると考え、また、拡散項は微小であるとして無視すると、平衡条件は次のように表される。

$$\frac{\varepsilon}{k}\frac{\overline{\rho\theta''^2}}{2R_\tau}=-\overline{\rho w''\theta''}\frac{\partial\tilde{\theta}}{\partial z} \qquad (148)$$

$$\frac{\varepsilon}{k}\frac{\overline{\rho q''^2}}{2R_\tau}=-\overline{\rho w''q''}\frac{\partial\tilde{q}}{\partial z} \qquad (149)$$

$$2\frac{\varepsilon}{k}\frac{\overline{\rho q''\theta''}}{2R_\tau}=-\overline{\rho w''\theta''}\frac{\partial\tilde{q}}{\partial z}-\overline{\rho w''q''}\frac{\partial\tilde{\theta}}{\partial z} \qquad (150)$$

ここで、乱流時間スケールの比を表す経験定数R_τは$R_\tau=0.8$と設定されることが多い。式(148)(149)(150)を式(145)(146)に代入して、$-\overline{\rho w''\theta''}$および$-\overline{\rho w''q''}$に関する代数方程式を解けば良いのであるが、その係数行列の対角成分はゼロまたは負になる場合もあり、数学的に不安定な方程式となる。そこで、式(148)(149)(150)に現れる鉛直乱流フラックスは勾配拡散近似を用いて次のように「陽的に」評価する。

$$-\overline{\rho w''\theta''}=\frac{\mu_T}{Pr_T}\frac{\partial\tilde{\theta}}{\partial z},\quad -\overline{\rho w''q''}=\frac{\mu_T}{Sc_T}\frac{\partial\tilde{q}}{\partial z} \qquad (151)$$

これより、式(148)(149)(150)は次のように表される。

$$\overline{\rho\theta''^2}=\frac{2R_\tau k}{\varepsilon}\frac{\mu_T}{Pr_T}\left(\frac{\partial\tilde{\theta}}{\partial z}\right)^2 \qquad (152)$$

$$\overline{\rho q''^2}=\frac{2R_\tau k}{\varepsilon}\frac{\mu_T}{Sc_T}\left(\frac{\partial\tilde{q}}{\partial z}\right)^2 \qquad (153)$$

$$\overline{\rho q''\theta''}=\frac{R_\tau k}{\varepsilon}\left(\frac{\mu_T}{Pr_T}+\frac{\mu_T}{Sc_T}\right)\frac{\partial\tilde{q}}{\partial z}\frac{\partial\tilde{\theta}}{\partial z} \qquad (154)$$

式(152)(153)(154)を式(145)(146)に代入

して整理すると次のようになる。

$$-\overline{\rho w''\theta''}=\left[\frac{1}{\sigma_\theta}+2\left(\frac{k}{\varepsilon}\right)^2 C_{\theta 3}R_\tau W_3\right]\mu_T\frac{\partial\tilde{\theta}}{\partial z} \quad (155)$$

$$-\overline{\rho w''q''}=\left[\frac{1}{\sigma_q}+2\left(\frac{k}{\varepsilon}\right)^2 C_{\theta 3}R_\tau W_3\right]\mu_T\frac{\partial\tilde{q}}{\partial z} \quad (156)$$

以上では、乱流 Prandtl 数 Pr_T と乱流 Schmidt 数 Sc_T は等しいと仮定した。また、

$$W_3=\frac{1}{Pr_T}\frac{g_3}{\tilde{\theta}}\frac{\partial\tilde{\theta}}{\partial z}+\frac{1}{Sc_T}\frac{g_3}{W_2}\frac{\partial\tilde{q}}{\partial z} \quad (157)$$

である。式(138)より、

$$\left(\frac{k}{\varepsilon}\right)^2=\left(\frac{l_m^2 W_1/\sqrt{C_\mu}}{l_m^2 W_1\sqrt{W_1}}\right)^2=\frac{1}{C_\mu W_1} \quad (158)$$

であるから、この関係を式(155)(156)に代入すると、

$$-\overline{\rho w''\theta''}=\left[\frac{1}{\sigma_\theta}+\frac{2C_{\theta 3}R_\tau W_3}{C_\mu W_1}\right]\mu_T\frac{\partial\tilde{\theta}}{\partial z} \quad (159)$$

$$-\overline{\rho w''q''}=\left[\frac{1}{\sigma_q}+\frac{2C_{\theta 3}R_\tau W_3}{C_\mu W_1}\right]\mu_T\frac{\partial\tilde{q}}{\partial z} \quad (160)$$

となる。ただし、式(136)、式(157)より、

$$W_1=\left(\frac{u^*}{l_m}\right)^2+W_3 \quad (161)$$

と表される。浮力の効果を表す係数は、

$$\lim_{G_{q\theta}\to 0}\frac{2C_{\theta 3}R_\tau W_3}{C_\mu W_1}=\lim_{u^*\to\infty}\frac{2C_{\theta 3}R_\tau W_3}{C_\mu W_1}=0 \quad (162)$$

$$\lim_{G_{q\theta}\to\infty}\frac{2C_{\theta 3}R_\tau W_3}{C_\mu W_1}=\lim_{u^*\to 0}\frac{2C_{\theta 3}R_\tau W_3}{C_\mu W_1}=\frac{2C_{\theta 3}R_\tau}{C_\mu}\approx 4.4 \quad (163)$$

のように振る舞う。すなわち、温度、濃度勾配がないときゼロとなり、不安定な方向の温度、濃度勾配があるとき最大で4.4程度の値を取る。

２．２．９　人工排熱の取り扱い

FAVOR 法において体積占有率の小さなセルに大きな人工排熱が与えられると過度の温度上昇を招くことから以下のような修正を施した。体積占有率を G_v とし、面開口率を $G_{x,1}$, $G_{x,2}$, $G_{y,1}$, $G_{y,2}$, $G_{z,1}$, $G_{z,2}$ とする。面開口率は移流項および熱伝導項の大きさを決めることを考慮し、次式に示すような流体の面積占有率 G_s を考える。

$$G_s=[(G_{x,1}+G_{x,2})\Delta y\Delta z+(G_{y,1}+G_{y,2})\Delta z\Delta x+(G_{z,1}+G_{z,2})\Delta x\Delta y]/2/(\Delta y\Delta z+\Delta z\Delta x+\Delta x\Delta y) \quad (164)$$

これより、流体の有効占有率 G_f を次のように定義する。

$$G_f=\min(G_v,G_s) \quad (165)$$

入力データにより与えられる排熱量を Q[W/m^3]とし、当該解析セルに含まれる建物の屋上面、壁面、地表面から排熱が生じるものとする。ここで、有効占有率 G_f 分のみ当該解析セルに分配し、残りの $(1-G_f)$ を周囲の解析セルに分配することを考える。現状のデータ構造では、各解析セルに含まれる建物の屋上面、壁面、地表面の面積 S_R, S_W, S_G [m^2]がそれぞれ与えられ、排熱量 Q はこれらの面からの総和として与えられている。建物の壁面からの排熱は水平方向の解析セルに、建物の屋上面および地表面からの排熱は鉛直上側の解析セルに分配するため、面積比により排熱量を分離する。

$$Q_W=\frac{S_W}{S_R+S_W+S_G}Q$$
$$Q_{RG}=\frac{S_R+S_G}{S_R+S_W+S_G}Q \quad (166)$$

ここで、Q_W：建物の壁面からの排熱量[W/m^3]、

Q_{RG}：建物の屋上面および地表面からの排熱量

[W/m³]である。

建物の壁面からの排熱量Q_Wを分配する要領は次のようになる。隣接する４つのセルが受け取ることのできる容量V_c[m³]は、有効占有率と面開口率の双方に比例すると考え、次のように定義する。

$$\begin{aligned} V_{c,i+1,j} &= G_{x,i+1/2,j} \cdot G_{f,i+1,j} \cdot V_{i+1,j} \\ V_{c,i-1,j} &= G_{x,i-1/2,j} \cdot G_{f,i-1,j} \cdot V_{i-1,j} \\ V_{c,i,j+1} &= G_{y,i,j+1/2} \cdot G_{f,i,j+1} \cdot V_{i,j+1} \\ V_{c,i,j-1} &= G_{y,i,j-1/2} \cdot G_{f,i,j-1} \cdot V_{i,j-1} \end{aligned} \qquad (167)$$

ここで、V[m³]はセル体積で、$V = \Delta x \Delta y \Delta z$である。これより、隣接セルに分配される排熱量$\tilde{Q}_W$[W]はそれぞれ次のように与えられる。

$$\begin{aligned} \tilde{Q}_{W,i+1,j} &= V_{c,i+1,j} \cdot R_{W,ij} \cdot Q_{W,ij} \\ \tilde{Q}_{W,i-1,j} &= V_{c,i-1,j} \cdot R_{W,ij} \cdot Q_{W,ij} \\ \tilde{Q}_{W,i,j+1} &= V_{c,i,j+1} \cdot R_{W,ij} \cdot Q_{W,ij} \\ \tilde{Q}_{W,i,j-1} &= V_{c,i,j-1} \cdot R_{W,ij} \cdot Q_{W,ij} \end{aligned} \qquad (168)$$

ただし、

$$R_{W,ij} = \left(1 - G_{f,ij}\right) V_{ij} / \max\left[\left(1 - G_{f,ij}\right) V_{ij}, V_{c,i+1,j} + V_{c,i-1,j} + V_{c,i,j+1} + V_{c,i,j-1}\right] \qquad (169)$$

とおいた。また、当該セルに分配される(残留する)排熱量$\tilde{Q}_{W,ij}$は次のようになる。

$$\tilde{Q}_{W,ij} = V_{ij} \cdot Q_{W,ij} - \left(\tilde{Q}_{W,i+1,j} + \tilde{Q}_{W,i-1,j} + \tilde{Q}_{W,i,j+1} + \tilde{Q}_{W,i,j-1}\right) \qquad (170)$$

建物の屋上面および地表面からの排熱量Q_{RG}を分配する要領も同様である。隣接セルが受け取ることのできる容量V_cは、次のように定義される。

$$V_{c,k+1} = G_{z,k+1/2} \cdot G_{f,k+1} \cdot V_{k+1} \qquad (171)$$

これより、隣接セルに分配される排熱量$\tilde{Q}_{RG}$[W]は次のようになる。

$$\tilde{Q}_{RG,k+1} = V_{c,k+1} \cdot R_{RG,k} \cdot Q_{RG,k} \qquad (172)$$

ただし、

$$R_{RG,k} = \frac{\left(1 - G_{f,k}\right) V_k}{\max\left[\left(1 - G_{f,k}\right) V_k, V_{c,k+1}\right]} \qquad (173)$$

である。また、当該セルに分配される(残留する)排熱量$\tilde{Q}_{RG,k}$は次のようになる。

$$\tilde{Q}_{RG,k} = V_k \cdot Q_{RG,k} - \tilde{Q}_{RG,k+1} \qquad (174)$$

当該セルの体積占有率G_fが１より小さく、かつ面積S_R、S_W、S_Gが全てゼロと言うことは原則ありえないが、プログラムの実装上はそのような場合にも備えている。要領は全く同様であるので、計算式のみ以下に示す。

$$\begin{aligned} V_{c,i+1,jk} &= G_{x,i+1/2,j,k} \cdot G_{f,i+1,jk} \cdot V_{i+1,jk} \\ V_{c,i-1,jk} &= G_{x,i-1/2,j,k} \cdot G_{f,i-1,jk} \cdot V_{i-1,jk} \\ V_{c,i,j+1,k} &= G_{y,i,j+1/2,k} \cdot G_{f,i,j+1,k} \cdot V_{i,j+1,k} \\ V_{c,i,j-1,k} &= G_{y,i,j-1/2,k} \cdot G_{f,i,j-1,k} \cdot V_{i,j-1,k} \\ V_{c,ij,k+1} &= G_{z,ij,k+1/2} \cdot G_{f,ij,k+1} \cdot V_{ij,k+1} \end{aligned} \qquad (175)$$

$$\begin{aligned} \tilde{Q}_{o,i+1,jk} &= V_{c,i+1,jk} \cdot R_{o,ijk} \cdot Q_{ijk} \\ \tilde{Q}_{o,i-1,jk} &= V_{c,i-1,jk} \cdot R_{o,ijk} \cdot Q_{ijk} \\ \tilde{Q}_{o,i,j+1,k} &= V_{c,i,j+1,k} \cdot R_{o,ijk} \cdot Q_{ijk} \\ \tilde{Q}_{o,i,j-1,k} &= V_{c,i,j-1,k} \cdot R_{o,ijk} \cdot Q_{ijk} \\ \tilde{Q}_{o,ij,k+1} &= V_{c,ij,k+1} \cdot R_{o,ijk} \cdot Q_{ijk} \end{aligned} \qquad (176)$$

$$R_{o,ijk} = \left(1 - G_{f,ijk}\right) V_{ijk} / \max[\left(1 - G_{f,ijk}\right) V_{ijk}, V_{c,i+1,jk} + V_{c,i-1,jk} + V_{c,i,j+1,k} + V_{c,i,j-1,k} + V_{c,ij,k+1}] \qquad (177)$$

$$\tilde{Q}_{o,ijk} = V_{ijk} \cdot Q_{ijk} - \left(\tilde{Q}_{o,i+1,jk} + \tilde{Q}_{o,i-1,jk} + \tilde{Q}_{o,i,j+1,k} + \tilde{Q}_{o,i,j-1,k} + \tilde{Q}_{o,ij,k+1}\right) \qquad (178)$$

２．３　表面温度の設定

２．３．１　表面温度の設定の概略

建物等の地物の表面温度について本来は対流、放射等の連成解析を３次元空間で行うことが望ましいが、今回は以下のような簡略な方法で作業を進めている。まず、当日の気象条件から鉛直１次元性を仮定して被覆毎に非定常熱伝導解析を実施する。このとき、被覆物はアスファルト、草地等とし、日射が遮られた状態についても実施しておく。次に、当該時刻における日射位置から日向日陰の状態を3次元の解析セル毎に判定する。そして、表面温度のデータベースと照合して、日向日陰、被覆の状態に応じた表面温度を解析セル毎に割り当てる。

２．３．２　日陰の判定

図６に日陰域の簡易判別方法を示す。当該メッシュ（2次元）で日射到達高さを求め、建物高さとの関係から地表面と建物壁面・屋上面の日向・日陰判定を行う。

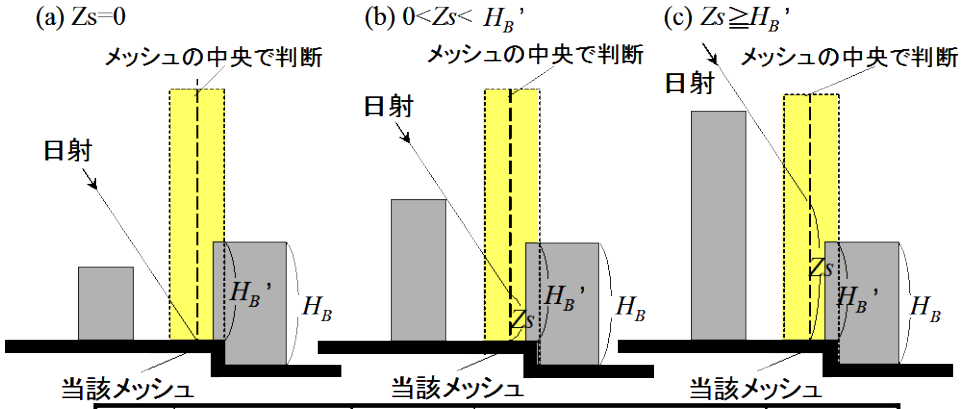
壁面の方位判定(南向きか否か)は、建物壁面の面素ベクトル $\mathbf{S}_{i,j,k}$ と日射ベクトル $\mathbf{e}_s$ の内積の正負で判定し、$\mathbf{S}_{i,j,k}\cdot\mathbf{e}_s<0$ ならば日向、$\mathbf{S}_{i,j,k}\cdot\mathbf{e}_s\geqq 0$ ならば日陰とする。

図７に建物壁面と日射向きの配置パターンを示す。ここで、$\mathbf{S}_{i,j,k}$ と $\mathbf{e}_s$ は、以下のように定義される。

$$\mathbf{S}_{i,j,k}=\begin{pmatrix}\left(G_{i+1/2}-G_{i-1/2}\right)\Delta y_j\Delta z_k\\ \left(G_{j+1/2}-G_{j-1/2}\right)\Delta z_k\Delta x_i\\ 0\end{pmatrix} \qquad (179)$$

$$\mathbf{e}_s=\begin{pmatrix}-\cos\theta_S\sin\phi_S\\ -\cos\theta_S\cos\phi_S\\ -\sin\theta_S\end{pmatrix} \qquad (180)$$

ここに、Δx_i，Δy_j，Δz_k：それぞれ解析セル (i,j,k) での東西方向，南北方向，鉛直方向の解析セルの幅[m]、$G_{i+1/2}$，$G_{i-1/2}$，$G_{j+1/2}$，$G_{j-1/2}$：それぞれ3次元の解析セル (i,j,k) での東側、西側、北側、南側界面での面積開口率[-]、θ_S：



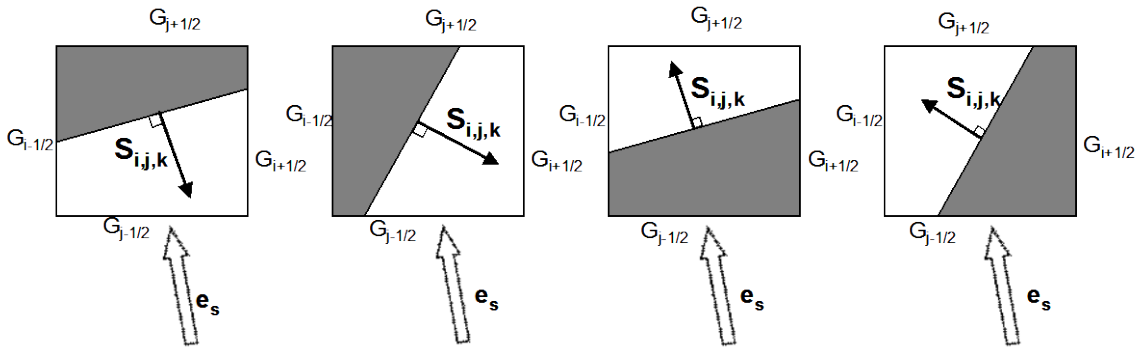
ケース	Zs と H'の関係	地表面	建物壁面(日射に面する)	建物屋上
(a)	$Zs=0$	日向	日向	日向
(b)	$0<Zs<H_B'$	日陰	Zs 以上が日向 Zs 未満が日陰	日向
(c)	$Zs\geqq H_B'$	日陰	日陰	日陰

※日射に面しない建物壁面は全て日陰

Zs:判定当該メッシュの日射到達地上高さ[m]、H_B:建物高さ[m]

H_B':判定当該メッシュの地上からの建物高さ[m]

図６　日陰域の簡易判別



$\mathbf{e}_s$：日射ベクトル、$\mathbf{S}_{i,j,k}$：建物壁面の面素ベクトル
$\mathbf{S}_{i,j,k}\cdot\mathbf{e}_s<0$なら日向、$\mathbf{S}_{i,j,k}\cdot\mathbf{e}_s\geqq 0$なら日陰
図中の灰色部分は建物等の固体を表す。左2つは日向、右2つは日陰。

図７　建物壁面と日射向きの配置パターン

仰角（$0\leq\theta_S\leq\pi/2$）、ϕ_S：方位角（$-\pi\leq\phi_S\leq\pi$）、

である。内積$\mathbf{S}_{i,j,k}\cdot\mathbf{e}_s$は以下のようになる。

$$\mathbf{S}_{i,j,k}\cdot\mathbf{e}_s=-\left(G_{i+1/2}-G_{i-1/2}\right)\Delta y_j\Delta z_k\cos\theta_S\sin\phi_S-\left(G_{j+1/2}-G_{j-1/2}\right)\Delta z_k\Delta x_i\cos\theta_S\cos\phi_S \quad (181)$$

$\Delta z_k>0$、$\cos\theta_S>0$であることから、$\mathbf{S}_{i,j,k}\cdot\mathbf{e}_s$の正負による当該解析セルの日陰判定は以下のように行うことができる。

$$-\left(G_{i+1/2}-G_{i-1/2}\right)\Delta y_j\sin\phi_S<\left(G_{j+1/2}-G_{j-1/2}\right)\Delta x_i\cos\phi_S$$

→建物壁面は日射向きである

$$-\left(G_{i+1/2}-G_{i-1/2}\right)\Delta y_j\sin\phi_S\geq\left(G_{j+1/2}-G_{j-1/2}\right)\Delta x_i\cos\phi_S$$

→建物壁面は日射向きでない

図８に日陰判定の事例を示す。

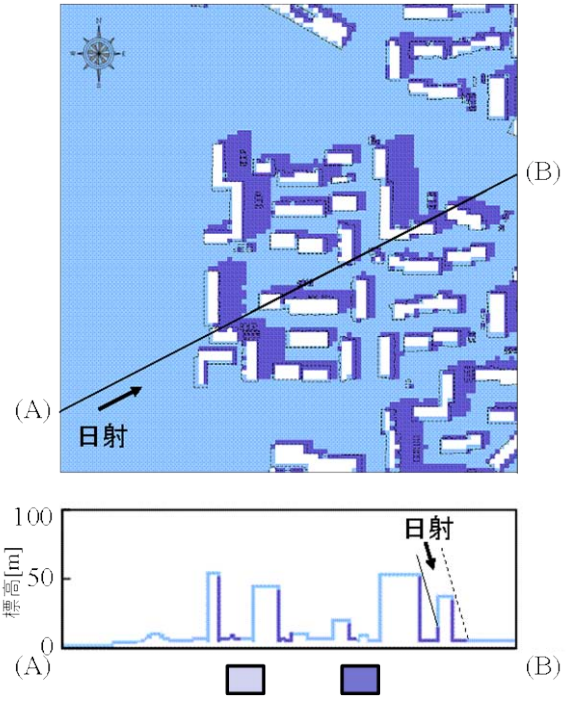


図８　日陰判定の事例

２．３．３　建物・地表面温度の求め方

（１）平坦面の熱収支

平坦面熱収支式は次のように表される。

$$S_{n\downarrow}+\varepsilon_G L_{a\downarrow}+L_{s\uparrow}+H+E+G=0 \quad (182)$$

式(182)においては建物壁面等からの熱輻射は考慮していない。各項の意味と内容は次のようになる。

$S_{n\downarrow}$：正味全天日射量

正味全天日射量$S_{n\downarrow}$[W/m²]は地表面に吸収される正味の全天日射量で、地表面アルベド(反射率)αを用いて次のように表される。

$$S_{n\downarrow}=(1-\alpha)S_{g\downarrow} \quad (183)$$

ここで、$S_{g\downarrow}$は全天日射量[W/m²]で、直達日射

量 $S_{d\downarrow}$[W/m²]と天空(散乱)日射量 $S_{s\downarrow}$[W/m²]との和である。

$$S_{g\downarrow} = S_{d\downarrow} + S_{s\downarrow} = S_d \cos\psi + S_{s\downarrow} \quad (184)$$

ただし、S_d：法線面直達日射量[W/m²]、ψ：天頂角[rad.]である。観測値がない場合などでは、法線面直達日射量 S_d および天空日射量 $S_{s\downarrow}$ はそれぞれ Bouguer 式および Berlage 式で評価されることが多い。

Bouguer 式：

$$S_d = I_0 P_S^{1/\sin h_S} \quad (185)$$

Berlage 式：

$$S_{s\downarrow} = 0.5 I_0 \sin h_S \frac{1 - P_S^{1/\sin h_S}}{1 - 1.4 \cdot \log P_S} \quad (186)$$

ここで、I_0：太陽定数[W/m²]、P_S：大気透過率、h_S：太陽高度[rad.]である。

太陽方位ベクトル (S_x, S_y, S_z) は次のように表される。

$$\begin{aligned} S_x &= -\cos\delta \sin\gamma \\ S_y &= \cos\phi \sin\delta - \sin\phi \cos\delta \cos\gamma \\ S_z &= \sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \cos\gamma \end{aligned} \quad (187)$$

ここで、ϕ：緯度[rad.]、δ：赤緯[rad.]、γ：時角[rad.]である。したがって、水平な地表面の場合、

$$\cos\psi = S_z = \sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \cos\gamma \quad (188)$$

となる。

$L_{a\downarrow}$：大気放射量

大気放射量 $L_{a\downarrow}$[W/m²]は Brunt の式で評価する。

Brunt 式：

$$L_{a\downarrow} = \left(0.526 + 0.076\sqrt{e}\right)\sigma T^4 \quad (189)$$

ここで、e：水蒸気圧[mmHg]、T：大気温度[K]、σ：Stefan-Boltzmann 定数[W/m²/K⁴]である。

$L_{s\uparrow}$：地表面からの長波放射量

地表面の射出率を ε_G とすると長波放射量 $L_{s\uparrow}$[W/m²]は次のように定式化される。

$$L_{s\uparrow} = -\varepsilon_G \sigma T_G^4 \quad (190)$$

ここで、T_G は地表面温度[K]である。

H：顕熱輸送量

顕熱輸送量 H[W/m²]は熱伝達係数 h[W/m²/K]を用いて次のように定式化される。

$$H = h\left(T - T_G\right) \quad (191)$$

E：潜熱輸送量

潜熱輸送量 E[W/m²]は蒸発効率 β を考慮して次のように定式化される。

$$E = L\beta h_q \left(q - q_{G,sat}\right) \quad (192)$$

ここで、L：蒸発潜熱[J/kg]、h_q：物質輸送係数[kg/m²/s]、q：大気中の比湿[kg/kg]である。また、$q_{G,sat}$ は地表面飽和比湿[kg/kg]で、地表面温度 T_G に対する飽和蒸気圧 e_{sat}[Pa]から次のように計算できる。

$$q_{G,sat} = \frac{\dfrac{M_v}{M_a}\dfrac{e_{sat}}{p}}{1 - \left(1 - \dfrac{M_v}{M_a}\right)\dfrac{e_{sat}}{p}} \quad (193)$$

$$e_{sat} = 6.11 \times 10^2 \cdot \exp\left[\frac{M_v L}{273 R_o}\left(1 - \frac{273}{T_G}\right)\right] \quad (194)$$

(Clausius-Clapeyron 式)

ただし、p：大気圧[Pa]、M_a：乾燥空気の分子量[kg/mol]、M_v：水蒸気の分子量[kg/mol]、

R_o：普遍気体定数[J/mol/K]である。

G：地中内熱伝導量

地中内への熱伝導量G[W/m^2]は、地表面$z=0$における土壌温度T_gの勾配を用いて、

$$G=\lambda_g\left(\frac{\partial T_g}{\partial z}\right)_{z=0} \qquad (195)$$

と表される。ここで、λ_gは土壌の熱伝導係数[W/m/K]である。また、鉛直座標zは下向きを正とする。

（２）平坦面熱収支式の計算要領

気象条件については、気象庁のホームページから公開されている時別の観測データを使用する。

・気圧
・気温
・相対湿度
・全天日射量

これらのデータは１時間毎に与えられており、任意の時刻における気象条件は、時間に関して内挿して算定する。

地中内への熱伝導量Gを評価するため、鉛直方向の１次元熱伝導方程式を考える。

$$\rho_g C_g\frac{\partial T_g}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_g\frac{\partial T_g}{\partial z}\right) \qquad (196)$$

ここで、ρ_g：土壌の密度[kg/m^3]、C_g：土壌の比熱[J/kg/K]である。日変化スケールの熱貫流の影響が小さい、十分な深さz_B[m]まで計算領域を考えると、地表面$z=0$および地底面$z=z_B$における境界条件はそれぞれ次のように与えられる。

地表面　：　$\left(T_g\right)_{z=0}=T_G$ 　　(197)

地底面　：　$\left(\frac{\partial T_g}{\partial z}\right)_{z=z_B}=0$　（断熱）　　(198)

式(196)は差分法により離散化する。時間刻みおよび格子幅をそれぞれΔtおよびΔzとし、熱伝導項を２次中心差分、時間項をEuler陽解法で離散化すると、

$$\frac{T_{g,k}^{n+1}-T_{g,k}^{n}}{\Delta t}=\frac{\alpha_g}{\Delta z^2}\left(T_{g,k+1}^{n}-2T_{g,k}^{n}+T_{g,k-1}^{n}\right) \qquad (199)$$

となる。ここで、熱伝導係数の空間勾配はないものとし、$\alpha_g=\lambda_g/\rho_g C_g$とおいた。

時間積分は以下のように実施した。

手順１：地表面温度T_Gの計算

n時刻レベルの土壌温度分布$T_{g,k}^{n}$が与えられているとき、地中内への熱伝導量Gは次のように計算できる。

$$G=\lambda_g\frac{T_{g,1}^{n}-T_G^{n}}{\Delta z/2} \qquad (200)$$

このとき、平坦面熱収支式は、n時刻レベルの地表面温度T_G^nを未知数とした次のような非線形方程式になる。

$$S_{n\downarrow}+\varepsilon_G L_{a\downarrow}-\varepsilon_G\sigma\left(T_G^n\right)^4+h\left(T-T_G^n\right)+L\beta h_q\left[q-q_G\left(T_G^n\right)\right]+\lambda_g\frac{T_{g,1}^{n}-T_g^{n}}{\Delta z/2}=0 \qquad (201)$$

式(201)はNewton法により解く。

$$\left[4\varepsilon\sigma\left(T_G^n\right)^3+h+L\beta h_q\frac{\partial q_G}{\partial T_G}+\frac{2\lambda_g}{\Delta z}\right]\Delta T_G^n=S_{n\downarrow}+\varepsilon_G L_{a\downarrow}-\varepsilon_G\sigma\left(T_G^n\right)^4+h\left(T-T_G^n\right)+L\beta h_q\left[q-q_G\left(T_G^n\right)\right]+\lambda_g\frac{T_{g,1}^{n}-T_G^{n}}{\Delta z/2} \qquad (202)$$

手順２：土壌温度分布の$T_{g,k}$計算

式(201)から計算される地表面温度T_G^nを用いて、境界条件(197)，(198)のもと、式(199)を解くと、$(n+1)$時刻レベルの土壌温度分布

$T_{g,k}^{n+1}$が与えられる。

手順３：収束判定

手順１、２により時刻レベルを更新し、２４時間毎に数値解を比較する。最新の解および２４時間前の解をそれぞれ$T_G^{(2)}, T_{g,k}^{(2)}$および$T_G^{(1)}, T_{g,k}^{(1)}$で表すとき、次式を満足すれば収束と見なす。

$$\sqrt{\frac{\left(T_G^{(2)}-T_G^{(1)}\right)^2+\sum_k\left(T_{g,k}^{(2)}-T_{g,k}^{(1)}\right)^2}{\left(T_G^{(2)}\right)^2+\sum_k\left(T_{g,k}^{(2)}\right)^2}}<\varepsilon_0 \qquad (203)$$

ただし、ε_0は収束判定のための微小数である。

表５　東京の観測データ
（2005年7月31日）

時刻	現地気圧 hPa	気温 ℃	相対湿度 %	全天日射量 MJ/m²
1	1004.4	27.4	75	−
2	1004.2	27.1	77	−
3	1004.6	26.7	79	−
4	1004.8	26.6	81	−
5	1005.3	26.0	79	0.00
6	1005.6	26.2	76	0.02
7	1005.9	26.4	75	0.15
8	1005.9	27.0	74	0.47
9	1006.2	27.4	74	0.46
10	1005.8	29.0	68	2.14
11	1005.6	29.9	64	2.64
12	1005.2	30.7	62	1.67
13	1004.4	31.1	60	2.92
14	1004.1	31.2	60	2.64
15	1003.9	30.3	64	2.29
16	1004.0	30.3	63	1.53
17	1003.8	30.0	62	1.20
18	1003.8	29.4	63	0.32
19	1004.0	28.6	69	0.07
20	1004.6	27.8	75	0.00
21	1005.1	27.4	76	−
22	1005.3	27.5	74	−
23	1005.6	27.1	77	−
24	1005.3	26.9	78	−

（３）計算に使用した具体的なデータ

気象条件については、気象庁(電子閲覧室) http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php (2010 年 2 月 6 日閲覧)から公開されている観測データを使用する。地点「東京(東京都)」における 2005 年 7 月 31 日 1 時から 2005 年 7 月 31 日 24 時までの地上観測値を表 5 に示す。

地表面熱収支に関するパラメータとして、一ノ瀬ら[44]および井原ら[45]による報告をまとめると、それぞれ表 6 および表 7 のようになる。これらを参考に、本研究資料で定義される土地利用分類に対応したパラメータを整理したのが表 8 である。

表 6　地表面熱収支パラメータの事例 1

No.	土地利用分類	アルベド	蒸発効率	密度	比熱	熱拡散係数
		[−]	[−]	[kg/m^3]	[J/kg/K]	[m^2/s]
1	田	0.17	0.50	1.8×10^3	1176	5.3×10^{-7}
2	畑	0.16	0.30	1.8×10^3	1176	5.3×10^{-7}
3	果樹園	0.16	0.30	1.8×10^3	1176	5.3×10^{-7}
4	樹木	0.16	0.30	1.8×10^3	1176	5.3×10^{-7}
5	森林	0.14	0.35	1.8×10^3	1176	5.3×10^{-7}
6	荒地	0.18	0.20	1.8×10^3	1176	5.3×10^{-7}
7	建物用地	0.18	0.05	2.4×10^3	882	7.2×10^{-7}
8	幹線交通用地	0.18	0.05	2.1×10^3	882	3.8×10^{-7}
9	その他の用地	0.18	0.10	1.8×10^3	1176	5.3×10^{-7}
10	水面	0.08	1.00	1.0×10^3	4200	5.3×10^{-7}

【引用文献】一ノ瀬俊明、下堂薗和宏、鵜野伊津志、花木啓介：細密地理情報にもとづく都市気候数値シミュレーション　地表面境界条件の高精度化、天気、44(11)、pp. 785-797、1997.11

表 7　地表面熱収支パラメータの事例 2

No.	土地利用分類	アルベド	射出率	蒸発効率	熱容量	熱伝導率
		[−]	[−]	[−]	[kJ/m^{3}K]	[W/m/K]
1	田	0.33	0.95	0.10	1940	1.0878
2	その他の農用地、ゴルフ場	0.33	0.95	0.05	1940	1.0878
3	森林	0.33	0.95	0.10	1940	1.0878
4	荒地	0.28	0.92	0.05	1940	1.0878
5	建物用地	0.39	0.96	0.02	1940	2.1757
6	幹線交通用地	0.32	0.91	0.00	1940	2.1757
7	その他の用地	0.32	0.91	0.02	1940	2.1757
8	河川地及び湖沼、海浜、海水域	0.10	0.93	0.50	4184	1.0878

【引用文献】井原智彦、相田洋志、吉田好邦、半田隆志、松橋隆治、石谷久：都市熱環境を考慮した高反射高放射塗料導入による建築物の CO2 排出削減効果の評価、第 19 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集、pp. 655-660、2003

表８　地表面熱収支パラメータ（本研究資料）

No.	土地利用分類	アルベド（反射率）	地表面からの射出率	蒸発効率	密度	比熱	熱拡散係数
		[−]	[−]	[−]	[kg/m³]	[J/kg/K]	[m²/s]
1	建物敷地	0.18	0.96	0.05	2.4×10^{3}	882	7.2×10^{-7}
2	アスファルト	0.18	0.91	0.05	2.1×10^{3}	882	3.8×10^{-7}
3	草地	0.16	0.95	0.30	1.8×10^{3}	1176	5.3×10^{-7}
4	水域	0.08	0.93	1.00	1.0×10^{3}	4200	5.3×10^{-7}
5	樹木	0.16	0.95	0.30	1.8×10^{3}	1176	5.3×10^{-7}

（４）樹木の放射モデル

樹木については樹冠を上空に設定してLambert則を適用して日射の減衰効果等を考慮した。平坦面を想定した樹木の放射モデルについて以下に述べる。

図９に示すように、１枚の葉を含むのに十分に広くかつ薄い微小領域 dS [m²]× dx [m]を考える。葉１枚の面積を S_l [m²]、透過率を τ とし、葉面は方向 x に垂直とする。このとき、放射エネルギー $L(x)$ [W/m²]について次式が成り立つ。

$$L(x+dx)\cdot dS = \left[(dS - S_l) + \tau S_l\right]L(x) = L(x)\cdot dS - (1-\tau)S_l L(x) \quad (204)$$

ここで、葉面積密度を $a(x)$ [m²/m³]とすると、

$S_l = a(x)\cdot dSdx$ であるから、

$$L(x+dx)\cdot dS = L(x)\cdot dS - (1-\tau)a(x)L(x)\cdot dSdx \quad (205)$$

すなわち、

$$\frac{\partial L(x)}{\partial x} = -(1-\tau)a(x)L(x) \quad (206)$$

となる。上式は、葉面が全て方向 x に垂直とした場合に成り立つから、葉の向きを考慮した関数 $F(x)$ を導入する。

$$\frac{\partial L(x)}{\partial x} = -(1-\tau)F(x)a(x)L(x) \quad (207)$$

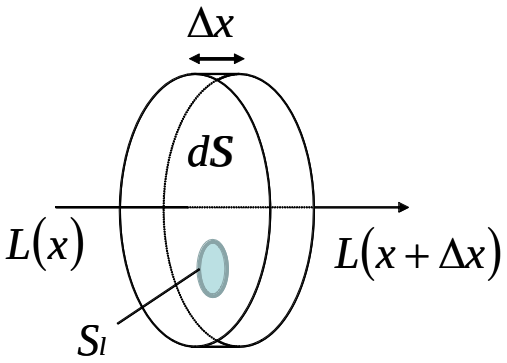


図９　葉１枚を含む微小領域における放射の透過

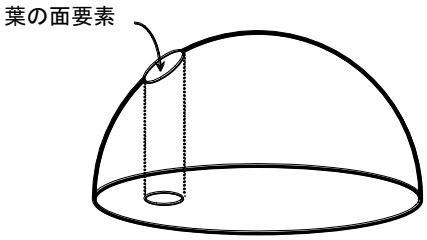


図１０　葉面の配置と有効表面積

関数 $F(x)$ は、方向 x の垂直断面に投影された「有効」葉面積を評価するためのものである。葉の傾きはどの方向についても同じ確率で現れると仮定すると、図１０に示すように、

$$F(x) = \frac{\text{円の面積}}{\text{半球の表面積}} = \frac{\pi r^2}{2\pi r^2} = \frac{1}{2} \quad (208)$$

となる。

式(207)の右辺は、反射と吸収による放射エ

ネルギーの単位体積当りの消散成分を表し、

$$(1-\tau)F(x)a(x)L(x) = r_c F(x)a(x)L(x) + a_c F(x)a(x)L(x) \quad (209)$$

と表すことができる。ここで、r_cおよびa_cはそれぞれ反射率および吸収率である。式(209)は次の自明の関係式に対応している。

$$\tau + r_c + a_c \equiv 1 \quad (210)$$

拡散光に対する放射伝達においては、格子セル内での葉面積密度は一定、樹冠内の拡散光は格子界面に垂直に入射・放射、樹冠内での透過減衰はLambert則に従う、と仮定した。面$(i-)$からの入射光はx軸に沿って進行すると考えるため、透過距離はΔx_iとなる。格子セル内では$F(x)=F$, $a(x)=a$で一定であるから、面$(i+)$を通過する透過光L^t_{i+}はLambert則から次のようになる。

$$L^t_{i+} = \exp(-k_1 a \Delta x_i) L^{in}_{i-} \quad (211)$$

ただし、

$$k_1 = (1-\tau)F \quad (212)$$

葉面からの自己放射を考える場合、Lambert則(207)は次のように書き換えられる。

$$\frac{\partial L(x)}{\partial x} = F(x)a(x)\varepsilon_c \sigma T_c(x)^4 - (1-\tau)F(x)a(x)L(x) \quad (213)$$

ここで、T_c:葉面温度、ε_c:葉面からの射出率、σ：Stefan-Boltzmann定数である。格子セル内では$F(x)=F$, $a(x)=a$, $T_c(x)=T_c$で一定と仮定すると、面$(i-)$から入射してx軸に沿って進む光$L(x,y,z)$は、式(213)を積分して次のように与えられる。

$$L(x,y,z) = \left(L^{in}_{i-} - H^e/k_1\right)\cdot\exp(-k_1 a x) + H^e/k_1 \quad (214)$$

ただし、

$$H^e = Fa\varepsilon_c \sigma T_c^4 \quad (215)$$

とおいた。式(205)より、面$(i+)$を通過する透過光L^t_{i+}は、

$$L^t_{i+} = \left(L^{in}_{i-} - H^e/(k_1 a)\right)\cdot\exp(-k_1 a \Delta x_i) + H^e/(k_1 a) = \exp(-k_1 a \Delta x_i) L^{in}_{i-} + H^e \Delta x_i \frac{1-\exp(-k_1 a \Delta x_i)}{k_1 a \Delta x_i} \quad (216)$$

となる。

短波放射の伝達は、葉面が良く吸収するPAR（光合成有効放射）と吸収しにくいNIR（近赤外放射）に分離して計算する。葉面の日射透過率はPAR：0.1、NIR：0.4、長波：0.0である。放射率は0.9、葉面積密度aは1.5[m^2/m^3]、樹冠の存在範囲は地上4～6mとした。

（５）表面温度の計算

表８のパラメータを用いて地表面温度を計算した結果を図１１に示す。全天日射量等の気象条件に関しては表５の数値を用いた。地表面状態として、建物敷地、アスファルト、草地、樹木を考え、日向、日陰の状態を想定した計算を行った。図中「樹木」とは樹冠下の表面温度を指す。樹冠下の表面温度は地面の蒸発と日射遮蔽の効果により、日中は草地より低い値を示す。夜間には樹冠が放射冷却を緩和するため、樹冠下では草地よりわずかに表面温度が高くなる。

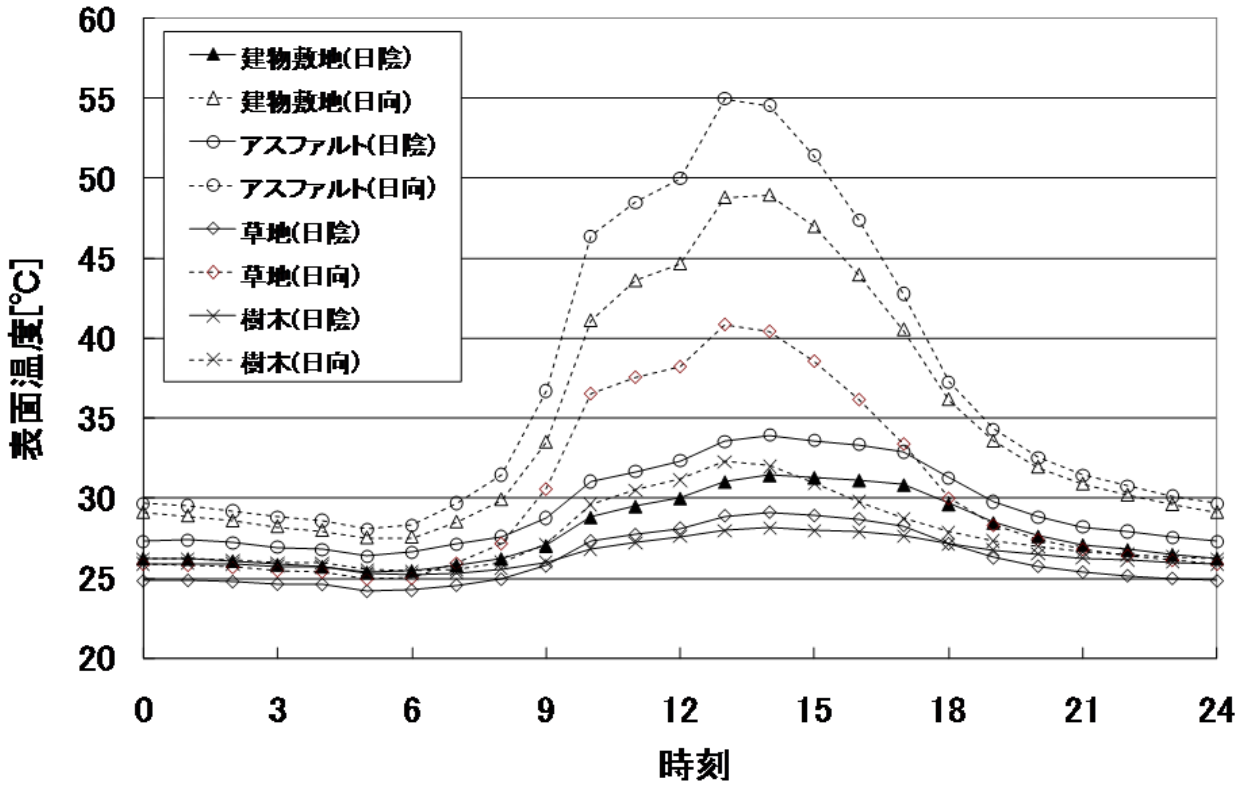


図１１　地表面温度の日変化（2005 年 7 月 31 日、東京）

３　計算プログラムの最適化

３．１　最適化に関わる条件

「地球シミュレータ」では利用ノード数制限緩和申請に当たり、下記の条件が課されている。

・ベクトル化率：95%以上

・並列化効率：50%以上

ここで、ベクトル化率とは、プログラムの実行において全てスカラー命令で実行した場合の総計算時間に対するベクトル命令で実行可能な時間の割合のことである。並列化効率とは並列加速率（プロセッサ１台に対する実行性能）を使用しているプロセッサ台数で割った値である。

アムダールの法則より、

$$T_{VECTOR} = T_{SCALOR}\left[(1-\beta_r)+\beta_r / N_V\right] \qquad (217)$$

T_{VECTOR}：ベクトルプロセッサの総計算時間

T_{SCALAR}：スカラプロセッサの総計算時間

β_r：ベクトル化率(0≦ β_r ≦1)

N_V：ベクトルプロセッサによる高速化係数

同様に

$$T_{PARALLEL} = T_{SINGLE}\left[(1-\alpha_r)+\alpha_r / N_P\right] \qquad (218)$$

$T_{PARALLEL}$：複数のプロセッサによる総計算時間

T_{SINGLE}：シングルプロセッサによる総計算時間

α_r：並列化率(0≦ α_r ≦1)

N_P：プロセッサ台数

並列化効率は次式で表される。

$$E_r = \frac{T_{SINGLE}}{N_P T_{PARALLEL}} \qquad (219)$$

E_r：並列化効率(0≦ E_r ≦1)

３．２　必要になる計算機資源の推定

３．２．１　実行環境

計算プログラムの最適化に当たり、「地球シミュレータ」上における計算プログラムの性能を確認する必要がある。最終的にターゲットとする領域は東京23区(約30km四方)であるが、最適化の方針を策定するため1km四方のデータを活用し、16CPUと64CPUで計算して実行時の性能を評価した。測定した環境を以下に記す。

実行マシン：「地球シミュレータ」

計算領域：1km(x)×1km(y)

格子点間隔：dx=dy=5[m]

計算格子数：200(x)×200(y)×100(z)

=4,000,000 点

測定ケース：2ノード16CPU(ケース1)利用と8ノード64CPU(ケース2)利用の2ケース

３．２．２　ベクトル性能

ケース１、２の実施結果からベクトル処理に関する情報を抜き出したものが、表９である。ベクトル長はできるだけ256に近い方が望ましい。CPU台数が増えることで領域を細分割したため、ベクトル長が短くなり、ベクトル演算率低下の一因となっている。一般に、並列台数を増やすと逐次処理部分のスカラ部分の割合が増え、ベクトル演算率は低下する。この低下を最小限に抑えるために、逐次処理部分の高速化およびループの一重化、ループ長を長く取れるような分割方法の検討が重要になる。

表９　ベクトル性能

ケース	ケース1	ケース2
CPU台数	16	64
経過時間(sec)	202.978	81.445
ベクトル演算率(%)	98.49	97.07
平均ベクトル長	153.186	105.902
GFLOPS（全体）	28.038	70.847
ピーク比(%)	21.90	13.80

３．２．３　並列性能

並列処理に関する情報を抜き出したものが、表１０である。式(218)より、

$$\begin{aligned} 202.978 &= T_{SINGLE}\left[(1-\alpha_r)+\alpha_r/16\right] \\ 81.445 &= T_{SINGLE}\left[(1-\alpha_r)+\alpha_r/64\right] \end{aligned} \qquad (220)$$

になり、α_r=0.9845、T_{SINGLE}=2633.638 が得ら

れる。また、並列化効率を見ると、64 台で 50%まで下がっていることがわかる。現状では、1km 四方の問題サイズに対して「地球シミュレータ」の最適化の条件を満たすのは 64CPU（=8 ノード）による実行が限界である。

３．２．４　30km 四方

16CPU と 64CPU のメモリサイズ(16CPU:12GB、64CPU：38GB）から、30km 四方のシミュレーションを行うときのメモリサイズの試算を行った。並列プログラムは、分割されるデータと分割されないデータに分けられる。並列プログラムが消費する全体のメモリサイズを考えると、分割されないデータは、MPI プロセス数（＝CPU 数、以下プロセス数と略記）に比例して大きくなり、分割されるデータは袖領域を考えなければ、プロセス数で割られてプロセス数倍されるので、プログラム全体では一定となる。それぞれ、比例部分（β_F）と固定部分（B_C）と呼ぶことにして、消費されるメモリサイズの概算を行った。

$$\begin{aligned}\beta_F + 16B_C &= 12\\ \beta_F + 64B_C &= 38\end{aligned} \qquad (221)$$

より、β_F=3.33 (GB)，B_C= 0.54 (GB)が得られる。

解析領域が 1km 四方の S 倍になる場合、計算格子数に対応するメモリ量 m は以下のように表される。

$$m = \beta_F S + B_C N_P \qquad (222)$$

したがって 1 プロセス数当たりのメモリ量 m_r は以下のようになる。

$$m_r = \frac{m}{N_P} = \frac{\beta_F S}{N_P} + B_C \qquad (223)$$

「地球シミュレータ」の 1 プロセス当たりのメモリ量は 2GB であるので、

$$\frac{\beta_F S}{N_P} + B_C \le 2 \qquad (224)$$

次に 30km 四方の場合を考える。比例部分に分割領域依存性はないとして、単純に固定部分のみを S=900(=30*30)倍する。表１１はいくつかのノード数において 30km 四方の計算格子数で必要になるメモリ量を見積もったものである。「地球シミュレータ」の場合、1 ノード当たり、16GB 以下でなくてはいけない。すなわち、少なくとも 257 ノード以上が必要であることがわかる。

計算時間は概ね次のように見積もることができる。現在の計算プログラムを用いた場合、5km

表１０　並列性能

ケース	架空の測定ケース	ケース1	ケース2
CPU 台数	1	16	64
経過時間(sec)	2633.638（推定）	202.978	81.445
加速率	1	12.97	32.34
理想的な加速率	1	16	64
並列化効率	100.00%	81.10%	50.50%

表１１　メモリ使用量（30km 四方を想定）

node	128	256	384	450
CPU(=N_P)	1024	2048	3072	3600
メモリ量(GB)	3,555	4,109	4,664	4,950
単位メモリ量(GB/node)	27.8	16.1	12.1	11.0

四方の数値解析ではノード数 8 ノード、経過時間 9.360 ノード時間の計算機資源を要する。

30km 四方の数値解析を実施するにあたって経過時間を 36(=30/5*30/5)倍、更に流入風が通り抜ける回数が計算領域の相似比に比例することから 6(=30/5)倍することにより、9.360*36*6=2021.76 ノード時間の計算機資源を要する。これを先ほど推定したノード数 257 で割ると計算時間は 7.867 時間になる。

並列化効率 50%を超えるためには、257 ノードを使用する場合、1CPU 当たり 99.95%の並列化率が必要であることがわかる。これは、10,000 秒のプログラムを並列化する場合、シリアル実行が許されるのがわずか 4.9 秒だけと言うことである。

３．３　計算プログラムの診断

３．３．１　検討の視点

東京 23 区（30km 四方を想定）のシミュレーションで、実行時の性能を推定するために、以下の視点で対象問題を検討する。

A)30km 四方に領域サイズ拡大による実行性能への影響

B) ソルバとして ICCG(+BiCGSTAB)法が採用されているが、この部分を MultiGrid 法に置き換えた場合の実行性能への影響

３．３．２　CPU 台数の違いによる分析

図１２は、加速率の順でソートしたサブルーチン毎の 16CPU と 64CPU での最大経過時間を比較したものである。加速率は、(16CPU での最大経過時間) ／ (64CPU での最大経過時間) で求めた。x 軸のルーチン名の先頭に付加した番号は、Rank0 での経過時間順にソートした場合の順位である。理想の加速率は 4 倍であるため、加速率が 4 倍を越えるものはカットした。経過時間の大きなものは以下の通りである（全てのサブルーチンの定義等の記載は省略する）。

A) 01_k3d_iccg(ICCG 法), 03_k3d_bcgstb,04_k3d_imdqdt(BiCGSTAB 法)

B) 06_k3d_module_rsdprf.setrsdprf(residual の set)

C) 56_k3d_out_restart(I/O 処理)

D) 05_k3d_dsr_dc2(19_k3d_bc_symprv,29_k3d_bc_symprs,62_k3d_bc_symprc からの呼び出し)

E) 02_k3d_m_warsm(MPI_AllReduce の呼び出し)

F) 08_k3d_dsr_dc1(12_k3d_bcgstb_pre,03_k3d_bcgstb,01_k3d_iccg からの呼び

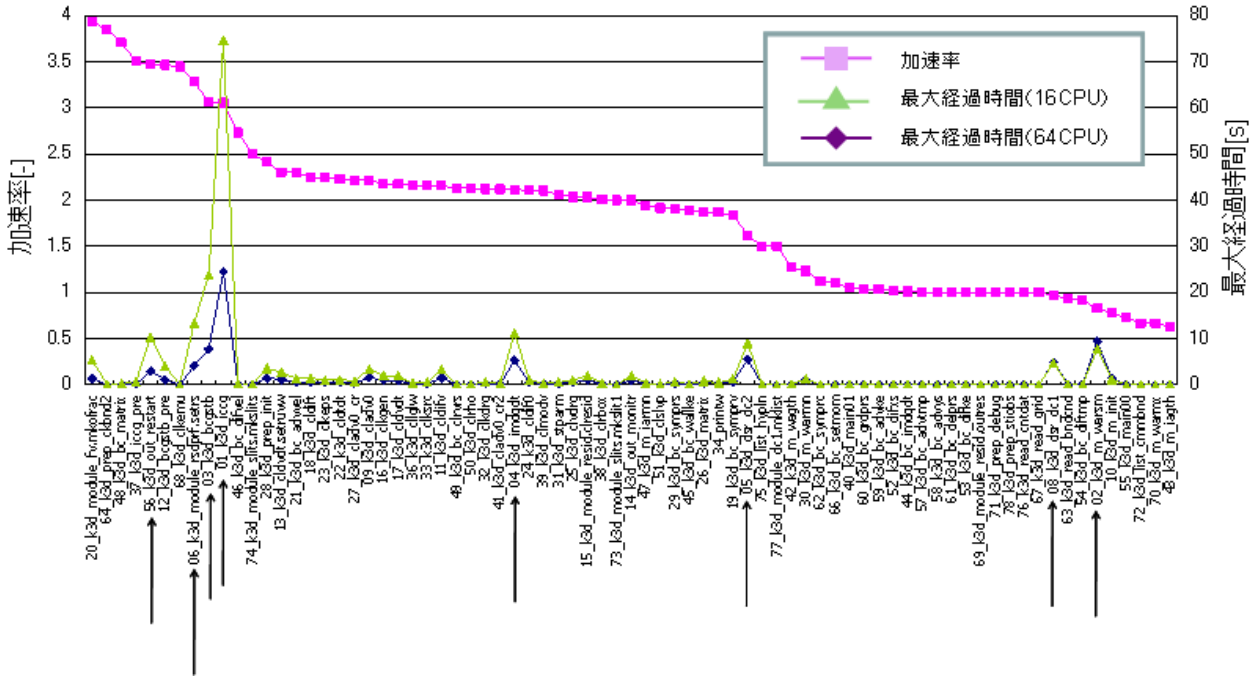


図１２　加速率と最大経過時間
（最大経過時間が大きなものを矢印で表示）

出し）

図１３は、加速率の順でソートしたサブルーチン毎の 16CPU と 64CPU での平均ベクトル長を比較したものである。CPU の増加に伴い、平均ベクトル長が短くなる傾向が見られる。平均ベクトル長は最内側ループの長さに依存しているため、1CPU が担当する領域を分割すると一般に短くなる。さきほど挙げた 01_k3d_iccg、03_k3d_bcgstb、12_k3d_bcgstb_pre、06_k3d_module_rsdprf.setrsdprf、04_k3d_imdqdt および 05_k3d_dsr_dc2 がこのケースに相当する。これらの平均ベクトル長の低下は、1km 四方の領域を 16CPU と 64CPU で分割したためと考えられる。

コストの高い 01_k3d_iccg や 03_k3d_bcgstb、12_k3d_bcgstb_pre 等のサブルーチンは、担当する領域の面積(mx×my)に比例するループを持つ。例えば、

【16CPU】

50*50=2,500［1CPU 当りの計算担当領域］

2,500/256=9.77［ベクトルループ実行回数］

2,500/10=250［平均ベクトル長］

【64CPU】

25*25=625［1CPU 当りの計算担当領域］

625/256=2.44［ベクトルループ実行回数］

625/3=208［平均ベクトル長］

となり、ほぼ実測と等しい値が得られる。領域を分割して処理量は削減されたが、平均ベクトル長が短くなることで加速率の低下を招くことがわかる。

平均ベクトル長が全く変化しない事例として、例えば 1CPU 150 メッシュのケースを計算して見ると、

150*150=22,500［1CPU 当りの計算担当領域］

22,500/256=87.89［ベクトルループ実行回数］

22,500/88=255.68［平均ベクトル長］

その 4 倍の 1CPU 300 メッシュの領域を計算した場合には、

300*300=90,000［1CPU 当りの計算担当領域］

90,000/256=351.56［ベクトルループ実行回数］

90,000/352=255.68［平均ベクトル長］

となる。MultiGrid 法においても同様の効果を

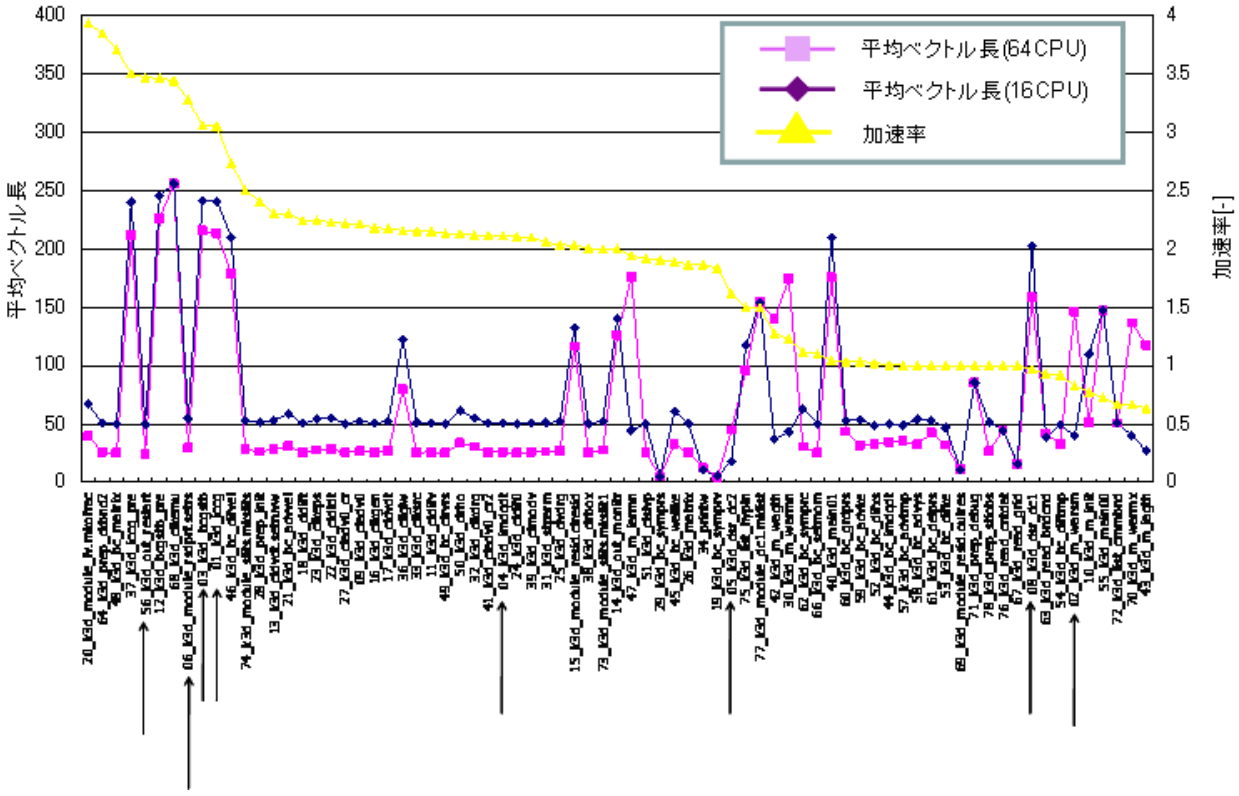


図１３　加速率と平均ベクトル長

（最大経過時間が大きなものを矢印で表示）

期待できると考えられる。

平均ベクトル長が半減しているルーチン群については以下のように考える。分割数を 16 から 64 に上げることにより、50 のループ長が 25 に減少している。しかし、30km 四方を 1CPU 当たり 150 メッシュで行う場合、平均ベクトル長は 150 と推定される。4 倍の領域(300 メッシュ)を 1CPU で担当する場合は、300/2=150 より平均ベクトル長は変化しない。したがって、今回のような加速率の低下は起こらないと予想される。

３．３．３　分割台数毎の分析

ばらつきが大きいルーチンは並列化効率を下げてしまうので原因の究明を行う必要がある。経過時間にばらつきが大きいルーチンの洗い出しを行った。図１４は、16CPU 実行による経過時間の最大値から最小値を引いた差の順に主なルーチンをソートしたものである。差が

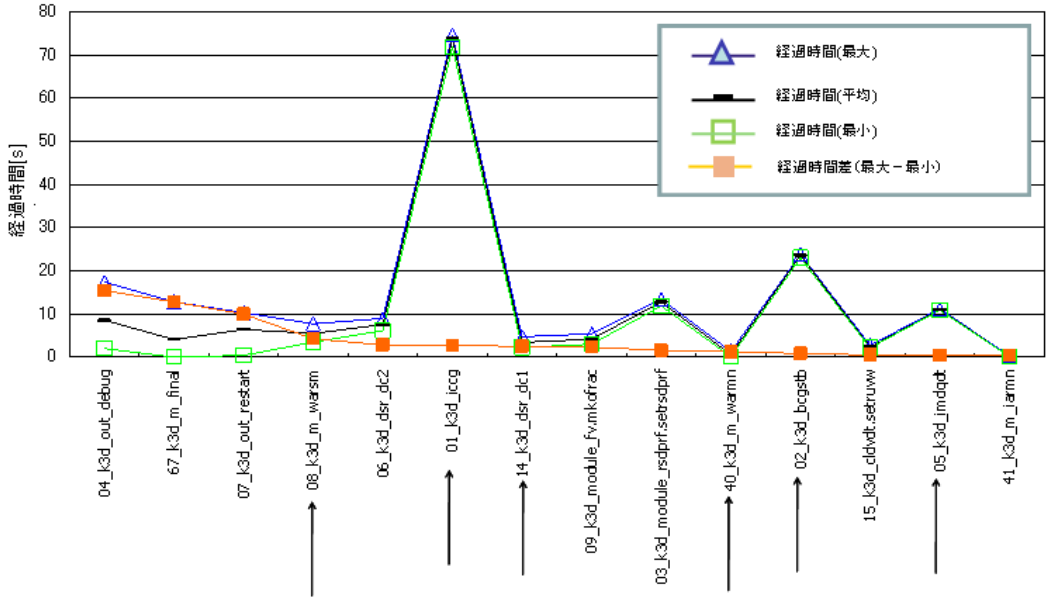


図１４　ロードインバランス(16CPU)
(ICCG(+BiCGSTAB)関連を矢印で表示)

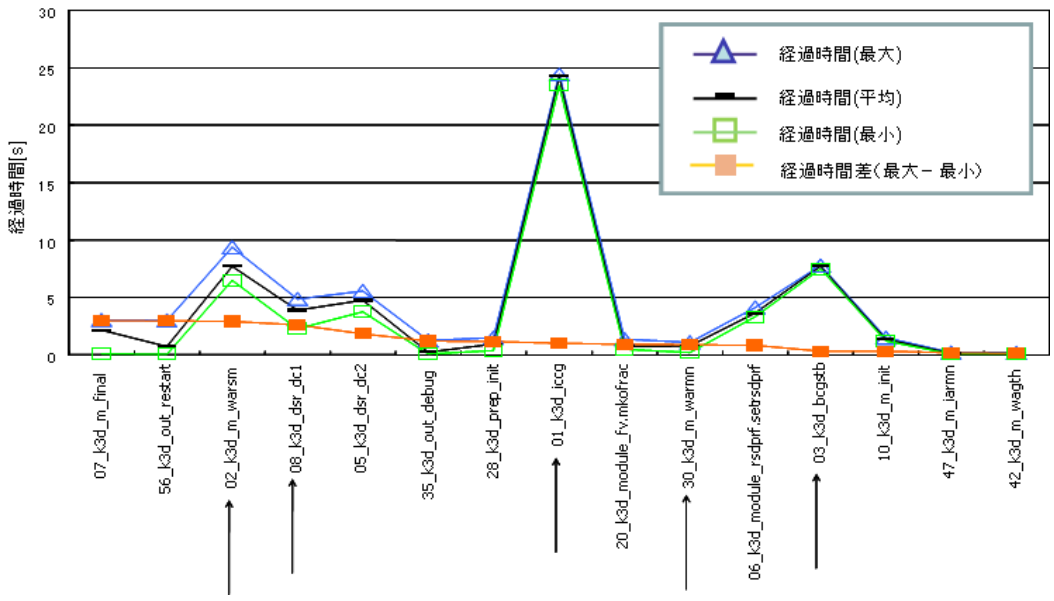


図１５　ロードインバランス(64CPU)
(ICCG(+BiCGSTAB)関連を矢印で表示)

大きい最初の3つのサブルーチンは、I/O処理(04_k3d_out_debut,07_k3d_out_restart)とその待ち合わせを含む終了処理(67_k3d_m_final)であるが、性能測定時にはI/Oを止めて評価すれば問題にはならない。矢印で示すサブルーチン群(08_k3d_m_warsm、01_k3d_iccg、14_k3d_dsr_dc1、40_k3d_m_warmn、02_k3d_bcgstb、05_k3d_imdqdt)は、ICCG(+BiCGSATB)法関連のサブルーチンであり、これらは、MultiGrid法を選択した場合、ほぼ置き換わるものの、汎用的なMPI_AllReduce系ルーチンの08_k3d_m_warsm、40_k3d_m_warmnと1対1通信isend,irecvを行っている14_k3d_dsr_dc1は残る。09_k3d_module_fv.mkofracは初期処理であるため、今は気にする必要がない。06_k3d_dsr_dc2、41_k3d_m_iarmnが境界処理から呼ばれる通信処理ルーチンである。境界処理(bcルーチン)にインバランスが見られる。同様に64CPUのロードインバランスを図１５に示す。

３．４　最適化の作業内容

３．４．１　ベクトル化

プログラムのベクトル化を主にICCG法を用いた行列ソルバーに対して実施する。ベクトル化要領を以下に示す。

（１）不完全Cholesky分解行列の反転処理

一般にLU分解行列の反転処理はハイパープレーン法によりベクトル化されるが、構造格子の場合でも間接アドレス参照になる上、ループ長を十分に取れないためベクトル演算の効率はあまり高くなく、最適化前のプログラムではこの前処理にあたる反転処理を削除していた。しかし、大規模な連立1次方程式を解く上では前処理を削除したCG法の反復計算回数が大幅に増大し、ベクトル演算による高速化ではカバーし切れないほどに計算効率が悪くなったため、前処理の導入を実施した。

（２）間接アドレスの廃止

領域分割による並列化を行う上で良いロードバランスを保つために、間接アドレス処理を用いて各プロセスの演算処理が同じによるようにしていた。ベクトル化は行われるものの、間接アドレスの参照による実効性能の低下を招いていたため、間接アドレスを廃止した。

３．４．２　並列化

プログラムの並列化を領域分割法により行った。x、y、z軸方向に任意の分割数で領域分割することができるようになっている。N_x、N_y、N_z（N_x、N_y、N_zは整数)をそれぞれx、y、z軸方向の分割数とすると、全体の領域数は$N_p = N_x \times N_y \times N_z$で、$N_p$は同時にプロセス数となる(図１６)。

数値解法として差分法を使用していることにより、分割領域の境界付近では隣接領域のデータが必要となる。その部分は双方のプロセス領域でデータを重複して保持することになる。その境界付近のデータを保持する部分を「仮想領域」と呼ぶ(図１７)。この仮想領域に隣接領域の数値を通信により保持し、差分計算を行うようにすることが並列化の前提となる。

その他、次のような並列化作業を実施する。

- 1領域1プロセッサで並列化する。プログラムは、SPMD(Single Program Multi Data)であり、使用される全てのプロセッサで、同じ実行体がロードされ、取り扱う値はプロセス毎に異なる。
- MPIコマンドで指定する実行プロセス数は

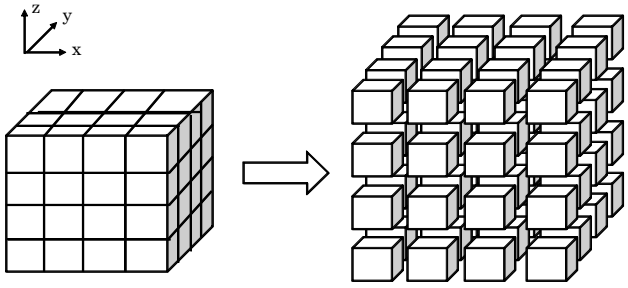


図１６　領域分割法

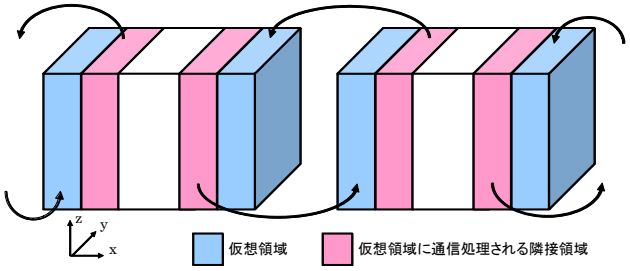


図１７　領域分割法における通信処理

領域分割の総数 N_p と同数でなければならない。一致していない場合はエラーとして実行を停止する。

・ 入力および出力については、分散するものとしないものが存在する。基本的に有次元で配列を持つデータの入出力は分散し、物理定数や計算制御データなど次元のない値は非分散としている。

３．４．３　メモリの削減

所要メモリを削減することはノード数の低減につながり、必要とされる並列化率が緩和されることになる。使用メモリ量を以下のように約 3 割削減した。

従来版：2,306MB（最大）、180GB（10 ノードのトータル）

削減版：1,656MB（最大）、129GB（10 ノードのトータル）

プログラムのメモリを削減するために次の作業を実施した。

(a)計算途中で一時的に確保される一時配列の縮小、削減

(b)恒久配列のうち、再計算することで一時配列に変更する。

```
call sub1(work01)
→sub01でwork01に風速uの2乗を定義する。
call sub2(work01)
→sub02でwork01を風速uの2乗として利用する。
call sub3(work01)
→sub03でwork01に風速vの2乗を定義する。
call sub4(work01)
→sub04でwork01を風速vの2乗として利用する。
```

図１８　配列の「使い廻し」の例

```
Allocate(uu(mx,my,mz))
call sub1(uu)
→sub01でuuに風速uの２乗を定義する。
call sub2(uu)
→sub02でuuを風速uの２乗として利用する。
deallocate(uu)
Allocate(vv(mx,my,mz))
call sub3(vv)
→sub03でvvに風速vの２乗を定義する。
call sub4(vv)
→sub04でvvを風速vの２乗として利用する。
deallocate(vv)
```

図１９　動的割付機能を利用する例

運動方程式の計算ルーチン k3d_cldvdt 以下では多くの一時配列を利用しており、このルーチンを中心に一時配列を削減した。一時配列を削減する場合、図１８に示すような同じ配列を異なる用途で使用する、いわゆる「使い廻し」が行われることがある。ただし、このような処理の場合、一時配列の利用範囲が不明瞭になり、第3者がプログラムを読みにくくなるばかりでなく、再度プログラムを変更する場合にバグを作り易くなってしまう。

Fortran90 の配列機能を利用することで「配列の使い廻し」は回避することができる。割付配列の機能を利用すれば図１８の例は図１９のようにコーディングすることが可能である。

この方法はプログラムの変更も少なく、したがって元々のプログラムの「筋」を壊さないため安全、確実な方法と言える。ただし、動的割付配列の場合、メモリ管理のための余計なオーバーヘッドがかかるため、演算量に比べて allocate､deallocate の頻度が高くなってくると計算効率に影響が出る場合もあると考えられる。

３．４．４　ICCG(+BiCGSTAB)法の MultiGrid 法への置き換え

係数行列から代数的に、より粗い計算格子における方程式を導出できる代数的多重格子法（AMG 法）は、計算格子のトポロジーに依存しないため、汎用的な実装が可能な計算手法である。本報告で使用した AMG 法の特徴は以下の通りである。

(a)CG 法の前処理に AMG 法を適用する

(b)多重格子法：V サイクル

(c)緩和法：不完全 Cholesky 分解

(d)並列化：局所前処理行列

(e)ベクトル化:Hyper plane 法

(f)各格子レベルでの反復法:最密=1、中間=5、最粗:10

実際の計算プログラムに AMG 法を組み込み、CFD 解析を実施することにより、導入効果を確認した。計算条件を以下に示す。

・計算領域：5km(x)×5km(y)×500m(z)

・領域分割：5×16=80

・格子点間隔：dx=dy=5[m]

・計算格子数：1000(x)×1000(y)×100(z)
=100,000,000 点

・測定ケース：AMGCG 法利用と AMG 法利用の 2 ケース

AMGCG 法利用と AMG 法利用による計算結果を比較したのが表１２である。AMGCG 法の適用により反復回数は 74 分の 1 程度に縮減される。AMGCG 法の 1 反復当たりの演算量は ICCG 法に比べて約 3 倍であるため、実効の加速率は約 20 倍程度である。

なお、ICCG(+BiCGSTAB)法のルーチンはコストの 3 割弱を占めるが、MultiGrid 法に置き換わった場合にコスト分布が大きく変わる。これにより境界処理や集団通信系のチューニングが必要になる。双方共に取りうる手段があるので、できるだけ本番データに近いデータによる性能測定を行うことで対策をより具体化する必要がある。

表１２　AMGCG 法と ICCG 法の比較

解法	反復回数	計算時間（s)
AMGCG 法	44(　1)	5.5(　1)
ICCG 法	3,240(73.6)	110.3(20.1)

CG 法の収束判定は $\|r\|_\infty < 10^{-12}\|b\|_\infty$ とした。

AMGCG 法は 10 タイムステップの平均値、AMG 法は 3 タイムステップの平均値である。

３．４．５　インバランスの是正

各サブルーチンのトレース情報を取得し、バランスが悪化しているサブルーチンに対して、最適化処理を実施した。表１３にインバランスの是正事例を示す。この作業に伴い、並列化率は表１４のように改善している（5km 四方、40PE+80PE、400STEP)。

３．５　最適化の行程

３．５．１　最適化の行程

計算プログラムに温位対応等のモデル拡張、AMG ソルバーの組み込み、メモリ削減等を実施する。この計算プログラムに対してノード数の拡張を可能とするため、インバランスの是正等

表１３　インバランス状況のサブルーチン比較

No.	subroutine name	tune	処理前				処理後			
			40PE T1(秒)	80PE T2(秒)	ratio T1/T2	imbalance T2-T1/2(秒)	40PE T1(秒)	80PE T2(秒)	ratio T1/T2	imbalance T2-T1/2(秒)
1	k3d_bcgstb		2935	1544	1.9	76.5	2937	1545	1.9	76.5
2	amg_forwd		553	273	2.03	-3.5	554	273	2.03	-4
3	amg_bakwd		464	228	2.04	-4	465	228	2.04	-4.5
4	amg_smooth		314	150	2.09	-7	314	150	2.09	-7
5	k3d_bc_imdqdt	*1	282	189	1.49	48	77	51	1.51	12.5
6	k3d_imdqdt_makcoef		261	133	1.96	2.5	261	133	1.96	2.5
7	amg_rest		223	104	2.14	-7.5	223	104	2.14	-7.5
8	k3d_bcgstb_pre		209	107	1.95	2.5	209	107	1.95	2.5
9	amg_cg		180	99	1.82	9	178	100	1.78	11
10	amg_ax		166	79	2.1	-4	142	79	1.8	8
11	k3d_bc_advtmp	*1	151	101	1.5	25.5	54	35	1.54	8
12	amg_prol		142	66	2.15	-5	142	66	2.15	-5
13	k3d_cladv0		122	62	1.97	1	122	62	1.97	1
14	k3d_bc_difxs	*1	120	82	1.46	22	46	31	1.48	8
15	k3d_bc_advvel	*1	105	64	1.64	11.5	89	53	1.68	8.5
16	k3d_bc_difke	*1	96	65	1.48	17	36	25	1.44	7
17	k3d_cldifv		98	50	1.96	1	98	50	1.96	1
18	k3d_bc_diftmp	*1	89	60	1.48	15.5	32	21	1.52	5
19	k3d_dsr_dc2		86	52	1.65	9	94	53	1.77	6
20	k3d_bc_grdprs	*1	80	53	1.51	13	22	15	1.47	4
21	k3d_bc_advke	*1	79	53	1.49	13.5	29	19	1.53	4.5
22	k3d_bc_delprs	*1	74	50	1.48	13	19	13	1.46	3.5
23	amg_cedger		73	65	1.12	28.5	71	68	1.04	32.5
24	k3d_clkgen		65	33	1.97	0.5	65	33	1.97	0.5
25	k3d_cldvdt_setruvw		63	32	1.97	0.5	63	32	1.97	0.5
26	k3d_m_warsm		62	80	0.78	49	59	81	0.73	51.5
27	k3d_bc_difvel	*1	56	36	1.56	8	54	33	1.64	6
28	k3d_bc_advys	*1	55	36	1.53	8.5	31	20	1.55	4.5
29	k3d_out_debug	*2	43	23	1.87	1.5	0	0	-	0
30	k3d_cldift		41	21	1.95	0.5	41	21	1.95	0.5
31	k3d_module_exner.calexnr		39	22	1.77	2.5	39	22	1.77	2.5
32	k3d_cldtdt		36	19	1.89	1	36	19	1.89	1
33	k3d_bc_freeke	*1	36	23	1.57	5	22	14	1.57	3
34	k3d_module_resid.clresid		35	18	1.94	0.5	35	18	1.94	0.5
35	k3d_bc_wallke		31	21	1.48	5.5	32	21	1.52	5
36	k3d_clkeps		31	16	1.94	0.5	31	16	1.94	0.5
37	k3d_cllglw		31	14	2.21	-1.5	31	14	2.21	-1.5
38	k3d_bc_rstexnr	*1	29	20	1.45	5.5	15	10	1.5	2.5
小計						365.5				251

*1：指示行挿入、*2:ソース修正

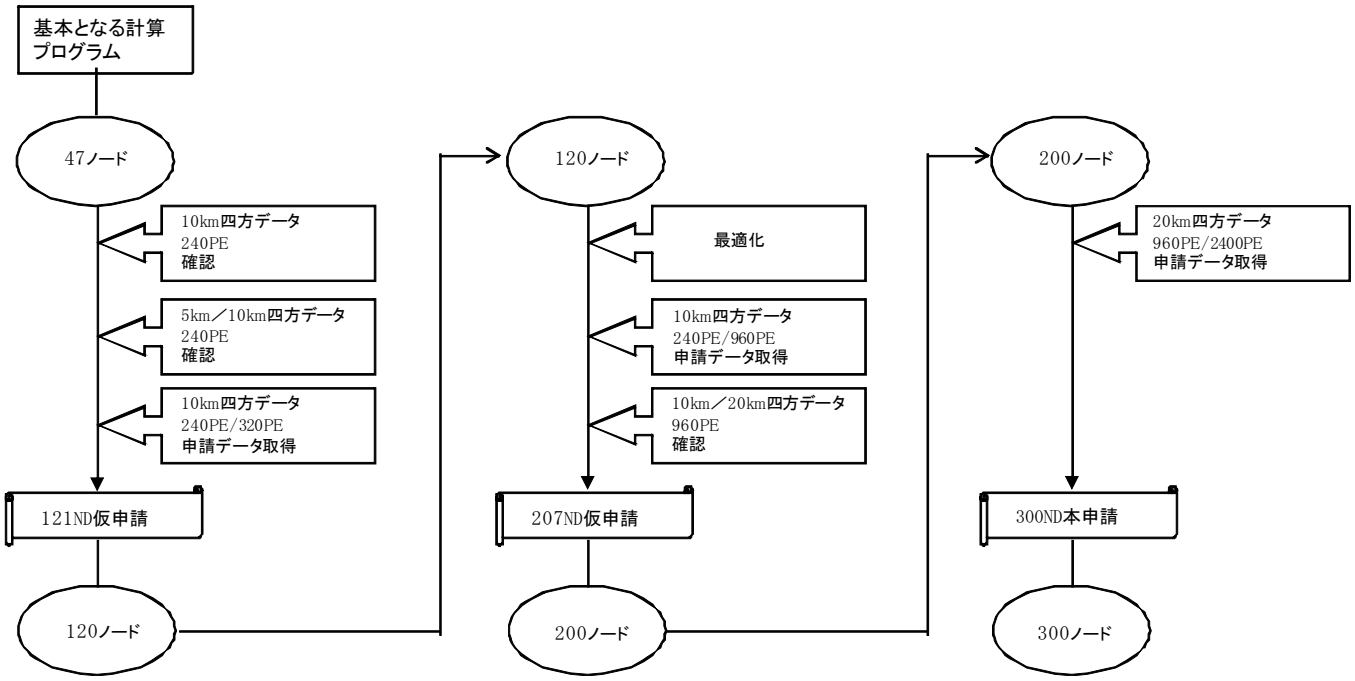


図２０　最適化の行程

の最適化処理を行いながら図２０に示す行程で作業を実施した。

３．５．２　最終的な最適化状況

200 ノードクラスの最適化を施した後、20km 四方データを利用して並列性能を調査した。その結果、表１４に示す通り並列化効率が 300 ノードを利用しても 50%を超えていることから、300 ノードクラスの最適化が達成された。

３．５．３　高分割時の主要サブルーチンの状況

120ノード利用時と300ノード利用時における主要サブルーチンの状況(Rank0)を表１５に示す。高分割時でも平均ベクトル長の劣化が比較的小さいことと、通信ルーチンが含まれないために960PE／2400PE=2.388倍と効率的に実行されている。なお、並列化効率100%では960PE／2400PE=2.5倍、並列化効率50%では1.75倍である。

その他の高コストを占めるサブルーチンについて表１６に一覧する。これらのサブルーチン群には実行効率の悪いものも含まれるが、最大コストルーチンの全体に占める割合が大きいため、他ルーチンの性能をカバーしているものと考えられる。

３．５．４　２３区データの実行可能性

表１４　並列性能

20km四方・800STEP	960 PE（120ND）	2400 PE（300ND）
経過時間	13039.7 秒	6297.1 秒
ベクトル化率	99.13%	98.97%
平均ベクトル長	241.2	235.3
GFLOPS(ピーク比)	1965.4(25.5%)	4209.3(21.9%)
並列化率(%)	99.983	
並列化効率(%)	71.394	

表１５　最大コスト(約 40%)を占める k3d_bcgstb の状況　(Rank0)

項目	960 PE（120ND）	2400 PE（300ND）	RATIO
経過時間	5218.7 秒	2185.0 秒	2.388
ベクトル化率	99.79%	99.78%	－
平均ベクトル長	252.5	247.0	0.978
MFLOPS	2692.5	2620.4	0.973

表１６　高コストを占めるサブルーチン（k3d_bcgstb 以外）

サブルーチン	960 PE（120ND）	2400 PE（300ND）	RATIO
amg_forwd	771.5 秒	352.2 秒	2.191
k3d_m_warsm	680.2 秒	504.2 秒	1.349
amg_bakwd	645.7 秒	293.5 秒	2.200
amg_smooth	447.3 秒	204.4 秒	2.189
amg_cg	429.6 秒	330.9 秒	1.298

20km四方解析の実行性能情報から120ND実行時の1プロセスのメモリ所要量は、1,744MBであった。よって、20km四方データの全体のメモリ所要量は、1,674.24GB（＝1.744(GB)×120(ND)×８(PE/ND)）である。

ここで、所要メモリ量がデータの面積に比例すると考えた場合、30km四方データのメモリ所要量は、袖部分を1割含むとき、3,767GB（＝1,674.24(GB)×（33×33／22／22））となる。また、23区全域（33km四方）データのメモリ所要量は、袖部分を1割含むとき、4,483GB（＝1,674.24(GB)×（36×36／22／22））と見積もられる。

300ノードを利用した場合の利用可能総メモリ量は、4,800 GB（＝300(ND)×16(GB/ND)）であるから、最適化の条件として300ノードを達成しておけば、23区全域データを実行可能になると考えられる。

３．５．５　300ノード申請時の情報

300ノード申請時の情報を図２１、図２２に示す。

```
MPI Program Information:
========================
Note: It is measured from MPI_Init till MPI_Finalize.
      [U,R] specifies the Universe and the Process Rank in the Universe.

Global Data of 960 processes:          Min [U,R]             Max [U,R]           Average
============================

Real   Time (sec)           :      13039.042 [0,279]      13039.690 [0,912]      13039.505
User   Time (sec)           :      12832.937 [0,667]      12971.455 [0,296]      12937.662
System Time (sec)           :          3.043 [0,328]          8.666 [0,0]            4.919
Vector Time (sec)           :      11083.217 [0,380]      12052.044 [0,888]      11587.315
Instruction Count           :  1095334992582 [0,928]  1321892000237 [0,940]  1139780911644
Vector Instruction Count    :   339783061785 [0,382]   384859803728 [0,896]   367759549610
Vector Element Count        : 81699498270562 [0,382] 93025183622168 [0,896] 88721847894711
FLOP Count                  : 24995212643261 [0,382] 27295302077202 [0,438] 26487528790375
MOPS                        :       6380.423 [0,382]       7244.010 [0,96]        6917.281
MFLOPS                      :       1932.227 [0,360]       2113.605 [0,579]       2047.314
Average Vector Length       :        239.767 [0,465]        243.045 [0,739]        241.234
Vector Operation Ratio (%)  :         98.868 [0,940]         99.238 [0,136]         99.135
Memory size used (MB)       :       2238.126 [0,0]         2239.141 [0,34]        2238.900
MIPS                        :         84.660 [0,928]        102.059 [0,940]         88.098
Instruction Cache miss (sec):         27.463 [0,19]          43.417 [0,144]         37.440
Operand     Cache miss (sec):         62.750 [0,698]        108.765 [0,959]         71.804
Bank     Conflict Time (sec):         78.771 [0,620]        117.148 [0,192]        100.014


Overall Data:
=============

Real   Time (sec)           :    13039.690
User   Time (sec)           : 12420155.665
System Time (sec)           :     4722.610
Vector Time (sec)           : 11123822.321
GOPS   (rel. to User Time)  :     6640.621
GFLOPS (rel. to User Time)  :     1965.427
Memory size used (GB)       :     2098.968
```

図２１　300ノード利用申請（960プロセス）

```
MPI Program Information:
========================
Note: It is measured from MPI_Init till MPI_Finalize.
      [U,R] specifies the Universe and the Process Rank in the Universe.

Global Data of 2400 processes:          Min [U,R]             Max [U,R]         Average
==============================

Real   Time (sec)           :       6296.231 [0,31]        6297.121 [0,2200]        6296.804
User   Time (sec)           :       6228.745 [0,1822]      6278.447 [0,87]          6257.484
System Time (sec)           :          1.603 [0,842]          5.941 [0,0]              2.405
Vector Time (sec)           :       5181.171 [0,2380]      5626.437 [0,576]         5475.353
Instruction Count           :   529491568085 [0,2328]  712760511538 [0,19]      554210437031
Vector Instruction Count    :   150191332005 [0,900]   167388737985 [0,176]     160991911922
Vector Element Count        : 35110426322510 [0,982]  39571801122450 [0,176]  37892030039814
FLOP Count                  : 10356147043641 [0,982]  11306991699979 [0,19]   10974941300868
MOPS                        :       5676.561 [0,982]       6382.276 [0,136]         6118.299
MFLOPS                      :       1653.842 [0,920]       1812.617 [0,1817]        1753.888
Average Vector Length       :        232.591 [0,985]        237.701 [0,1000]         235.346
Vector Operation Ratio (%)  :         98.486 [0,3]           99.085 [0,2256]          98.971
Memory size used (MB)       :       1259.720 [0,0]         1260.641 [0,1448]        1260.454
MIPS                        :         84.569 [0,2328]       113.768 [0,19]           88.568
Instruction Cache miss (sec):         30.199 [0,19]          47.216 [0,2192]          40.272
Operand     Cache miss (sec):         49.266 [0,447]        118.903 [0,2396]          61.513
Bank     Conflict Time (sec):         42.190 [0,1540]       118.182 [0,2034]          65.747


Overall Data:
=============

Real   Time (sec)           :     6297.121
User   Time (sec)           : 15017961.453
System Time (sec)           :     5771.110
Vector Time (sec)           : 13140847.184
GOPS   (rel. to User Time)  :    14683.952
GFLOPS (rel. to User Time)  :     4209.337
Memory size used (GB)       :     2954.189
```

図２２　300ノード利用申請（2,400プロセス）

４　入力データの作成

４．１　データ整備の概要

（１）データ整備の範囲

データ整備の範囲は、東京 23 区およびその周辺を含む 33ｋｍ四方の南北矩形エリアである（図２３）。東西および南北方向のインデックスをそれぞれi、jとしてデータ整備範囲の南西端を始点として全域を東西 6600 区間、南北 6600 区間に等分割している。セル中心座標（Ｙ、Ｘ）のＹ、Ｘは世界測地系－平面直角座標系第９系の東西方向、南北方向の座標を表す。インデックスi、jと座標の関係は次式で表される。

$$Y = -25000.0 + (i-1)\times 5.0 + 2.5$$
$$X = -52500.0 + (j-1)\times 5.0 + 2.5 \qquad (225)$$

３次元セルは 5ｍ×5ｍ×h_cの直方体である（南北：5m、東西：5m：上下：1～10m）。鉛直方向の分割は不等間隔としており、セル高さh_cはセル中心標高によって変化する。鉛直方向のインデックスをkとし、標高 0～500m の間を 100 区間に区切っている（k=0～99）。

（２）地域別使用データの一覧

水平 5m メッシュ解像度のデータベースを整備するに当たり、地盤面標高や建物高さ、土地利用等の推計に使用したデータを地域別に表１７にまとめた。

図２３　データ整備範囲

４．２　地盤および建物の高さ

４．２．１　高さ関連のデータ

（１）地盤面標高データ

地表面高さのデータから作成される数値標高モデルは DEM(Digital Elevation Model)と称されている。地盤面の標高については、国土地理院の 5mDEM を用いる。ただし、5mDEM は関東地域において東京 23 区内に整備範囲が限られている。そこで、5mDEM が未整備の東京 23 区外の地域については国土地理院数値地図 50ｍメッシュ標高データを利用した。両データの接続する部分については、精度の違いに起因して大きな段差が生じることがある。そこ

表１７　地域別使用データ

地域	地盤面標高	建物形状	建物高さ	土地・建物用途	樹木
東京23区	数値地図5mメッシュ標高	都市計画GIS（平成13年度）、MAPCUBEデータ	MAPCUBEデータ、国土地理院航空レーザー測量データ	都市計画GIS（平成13年度）	植生図
東京都／市部	数値地図50mメッシュ標高 ※可能な地域は数値地図5mメッシュ標高	都市計画GIS（平成9年度）	都市計画GIS（平成9年度）	都市計画GIS（平成9年度）	植生図
横浜市		都市計画GIS（平成9年度）	都市計画GIS（平成9年度）	都市計画GIS（平成9年度）	植生図
川崎市		都市計画GIS（平成14年度）	都市計画GIS（平成14年度）	都市計画GIS（平成14年度）	植生図
千葉県		住宅地図	住宅地図、細密数値情報	住宅地図、細密数値情報	細密数値情報
埼玉県		住宅地図	住宅地図、細密数値情報	住宅地図、細密数値情報	細密数値情報

で 50mメッシュと 5m メッシュが隣接する場合は、5mDEM 領域内の境界付近の標高値と 50m メッシュ領域の標高値を用いて、50m メッシュ領域における境界付近の 10 メッシュ分（500m 相当）について線形補間した。

（２）航空レーザー測量データ

航空レーザー測量により地表表層の建物や構造物、樹木、地盤等の絶対高さを知ることができる。このような高さのデータより作成した地表モデルは数値表層モデル、DSM(Digital Surface Model)と称されている。本研究資料では国土地理院による 1mDSM を活用する。このデータは 5mDEM の基になるものであり、観測は平成 13～14 年度に実施されたが、一部新宿地区のみ平成 16 年度のデータが整備されている。

1mDSMと 5mDEMの差分を取り、建物配置と照合することで建物高さを求めることができる。ただし、地盤面の評価において 1mDSMと 5mDEMが不一致であると誤差要因になる。そこで、建物や構造物、樹木等の影響を受けない更地として、国立競技場、駒沢公園競技場、光が丘公園内競技場の敷地から、それらに含まれる 1mDSMと 5mDEMを抽出した。表１８は 2,500m^{2}の領域について 1mDSMと 5mDEMによる集計値を比較したものである。いずれも、差分の平均は数センチのオーダーであり、両者の差異は小さいと考えられる。

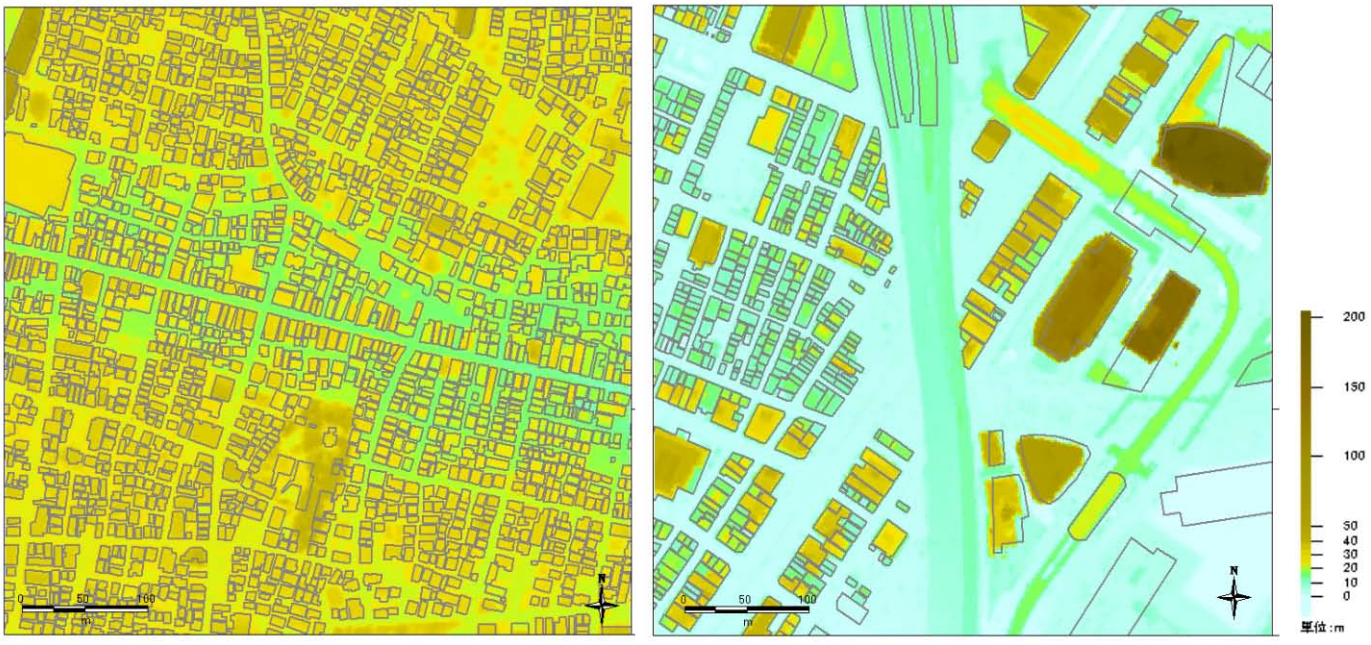
図２４は汐留付近と戸越付近について、1mDSM データと東京都 GIS の建物オブジェクトを重ねて標高値を表示した例である。1mDSM データは東京都 GIS の建物位置とほぼ一致していることがわかる。

そこで、1mDSMを活用して東京都GIS建物を 5m メッシュ毎に分割し、各メッシュの高さは、分割されたメッシュに含まれる 1mDSMポイントの中央値とした。塔屋や傾斜屋根等の屋上面の高さの違いを反映することになる。ただし、作業負荷を勘案し、屋上面の高さの違いを考慮する建物の対象は、建築面積が 5,000m^{2}以上または地上階数が 15 階以上の建物（東京 23 区内で約 1,400 棟）とした。それ以外の比較的小規模な

表１８　5mDEM と 1mDSM による平均標高の差分の例

場　所	5mメッシュ標高－1mDSM平均(m)		
	最大	最小	平均
国立競技場	0.06	-0.08	-0.004
駒沢公園競技場	0.04	-0.22	-0.07
光が丘公園競技場	0.06	-0.23	-0.08

※各場所において 5mDEM を 100 個抽出し、同位置の 1mDSM を平均化して平均標高を求め、両者の標高の差分を集計



(a)戸越　　(b)汐留

図２４　1mDSM の分布事例

建物については、屋根面を全て水平（陸屋根）と仮定し、各メッシュの建物に一律の高さを与える。

図２５に東京ドーム周辺における地盤面の高さも含めた建物高さ分布（5m メッシュ）の例を示す。図２６は大規模な建物における建物高さの詳細化の例である。通常は建物階数の情報を用いて図左に示すように全ての建物の屋上面は陸屋根で表現されていることが多いが、今回の場合、図右に示すように 5m メッシュ分割における 1mDSM データの活用により、建物高さが詳細化されている。

東京都 GIS データと 1mDSM データの作成年度の違いにより、建物の建替えや滅失などの影響による不整合（例えば、東京都 GIS の従前建物のオブジェクトに 1mDSM より建替え後の建物高さが与えられたり、逆に東京都 GIS の建物が既に滅失しているために 1mDSM から 0m の高さが与えられたりするなど）が発生しているケースもある。そこで、東京都 GIS の建物階数、1mDSM と 5mDEM との高さの差により求めた建物の相対高さを用いて１階当たりの階高を求め、不整合の影響により階高が適切な範囲にない場合には、1mDSM データより高さは付与せず、東京都 GIS の建物階数×3.5m をその建物の相対高さとし、5mDEM による地盤面標高と合わせ絶対高さを求めた。

高さを 5m メッシュで分割した建物に付与する際には、高さの平滑化処理が必要となる。なぜならば、1mDSM のポイント位置と東京都 GIS の建物の平面位置に若干のズレが生じる上に 1mDSM データ自身にも様々なノイズが含まれているからである。

（３）CAD データ

近年、ランドマーク的な建物については建物の詳細な形状を再現する CAD データ等のデジタル化が民間企業により推進されている。これらの市販データを用いると建物の形状について精度が向上すると期待され、解析領域において

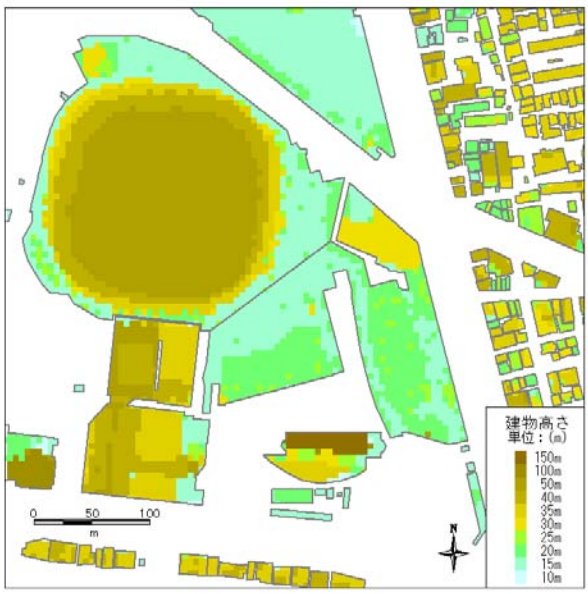
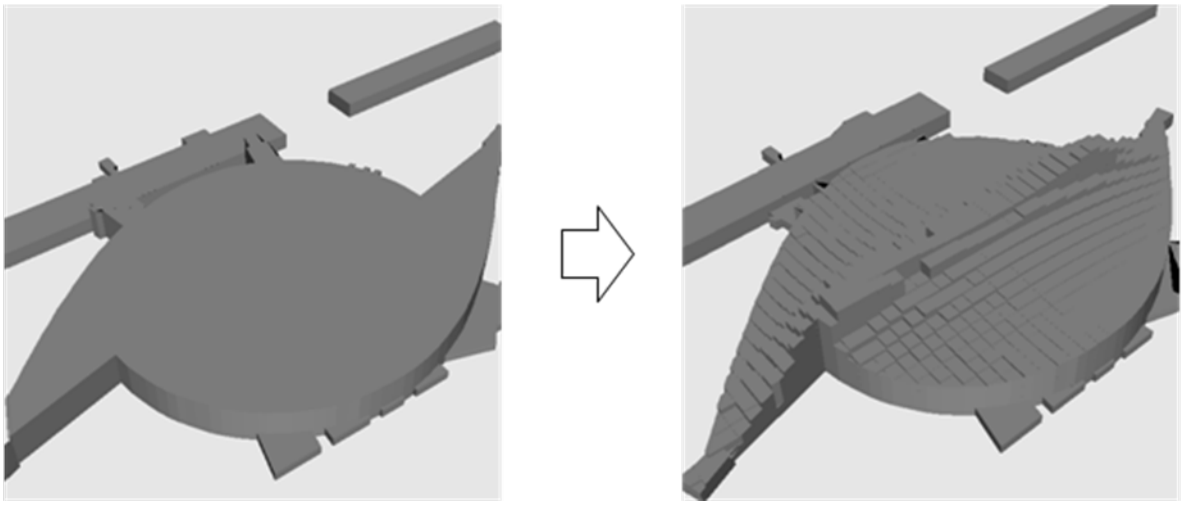


図２５　5m メッシュ分解した建物に高さを設定した例（東京ドーム周辺）



（ａ）建物階数データに基づく従来の方法　　（ｂ）1mDSM データを用いる今回の方法

図２６　大規模な建物における建物高さの詳細化の例

部分的に導入を試みた。

CAD データとして MAPCUBE（インクリメント P 株式会社、株式会社パスコ、株式会社キャドセンター）を適用する。MAPCUBE はレーザー測量データと 2 次元ベクター地図をベースに汎用的な OBJ フォーマットで構成された 3 次元都市データであり、ランドマーク建物（形状に応じた建物高さ等を詳細に再現）と一般建物（建物高さ等を簡易に再現）がある。

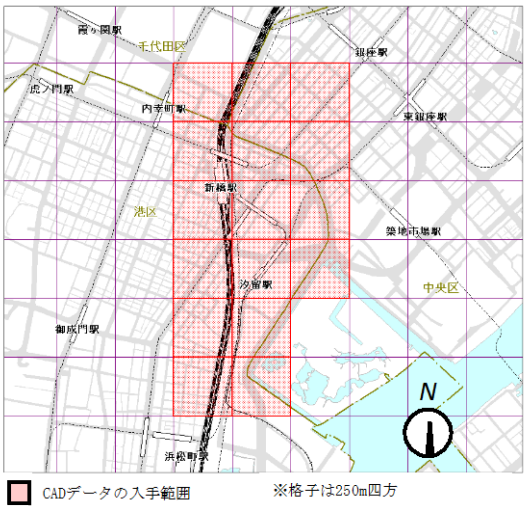
CAD データを適用したのは図２７に示す汐留地区（100ha）である。MAPCUBE データのランドマーク建物は東京都建物 GIS データよりも詳細な形状を有しているが、東京都土地 GIS データとの水平位置が一致していない場合が見られる。そこで、東京都土地 GIS データと整合するよう修正を施したデータを使用した（MAPCUBE データを水平移動）。MAPCUBE データの一般建物オブジェクトは、塔屋などの形状・高さを再現している点で東京都 GIS 建物より詳細である。ただし、これについても東京都 GIS 建物とのずれが見られた（図２８）。そこで、MAPCUBE データの一般建物についてもランドマーク建物と同様に位置補正を施した。近年完成した建物については東京都建物 GIS データ、MAPCUBE 共に未整備のため、それらについては住宅地図をベースに GIS データを独自に作成した。

ランドマーク建物の水平位置を修正したオブジェクト、東京都 GIS 建物オブジェクトに一般建物の屋根形状を適用したオブジェクトを CFD 解析結果と共に図２９に示す。東京都 GIS データにおける建物の位置関係を保持しつつ、屋上等の精緻な形状を再現している。

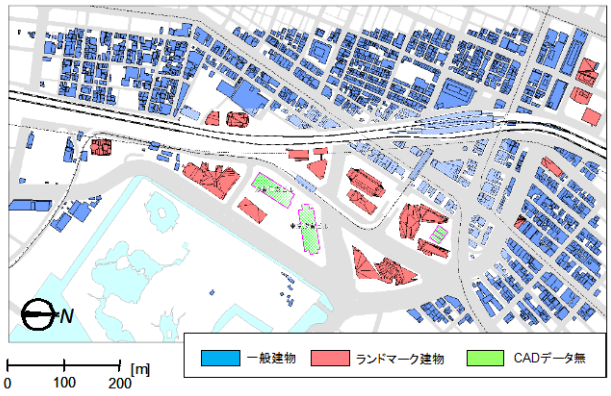
４．２．２　東京都内における建物高さの推定

東京都内では建物用途、建物階数が GIS データで整備されている。そこで、1mDSM が未整備等の理由により直接建物高さを知ることができない場合、当該建物について、建物高さを、建物用途毎の階高に建物階数を乗じて算出する。1mDSM、MAPCUBE により直接建物高さを知ることができる場合、その値をそのまま用いる（MAPCUBE を優先する）。

４．２．３　東京都以外の領域における建物高さの推定



（ａ）汐留地区



（ｂ）建物配置

図２７　CAD データを適用した地区

図２８　MAPCUBE 建物（一般建物）と東京都 GIS 建物の水平位置の比較

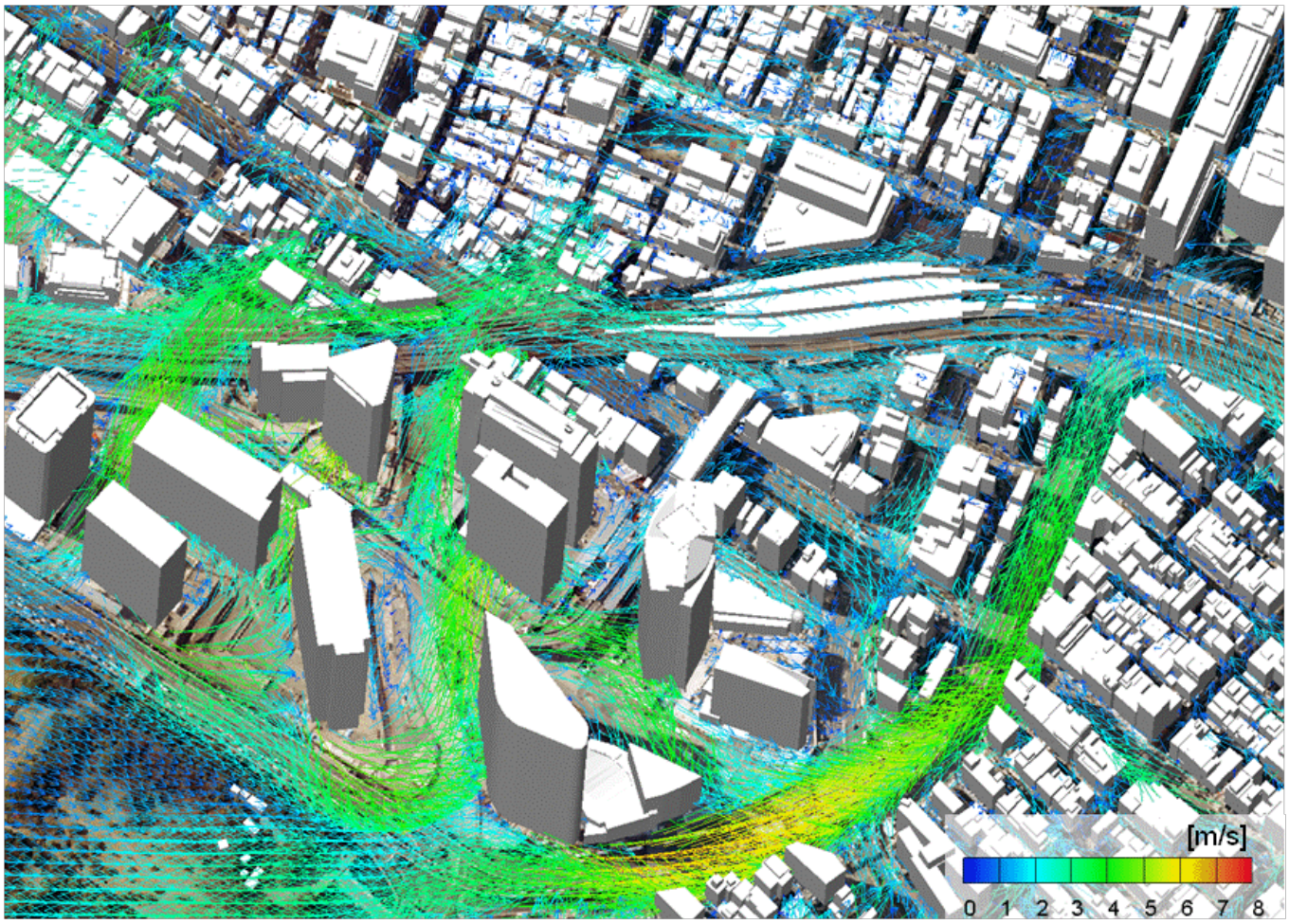


図２９　CAD と GIS を組み合わせた都市幾何形状の３次元表現（CFD 解析結果を含む）

東京都以外の領域では1mDSMが未整備である等の理由のため直接建物高さを知ることができない。そこで、東京 23 区の建物について集計した建物用途毎の平均階高を用いて、当該建物の階数を乗じることで簡易に建物高さを算出することにする。

（ａ）神奈川県

解析領域に含まれている川崎市、横浜市では建物用途、建物階数が GIS データで整備されている。しかし、建物用途の区分は東京都のそれと一致しない場合がある。そこで、神奈川県と東京都の建物用途区分の対応関係を設定した上で、当該建物の建物高さを、建物用途毎の階高に建物階数を乗じて算出する。

（ｂ）千葉県、埼玉県

千葉県、埼玉県の建物用途、建物階数については GIS データを入手することができなかった。そこで、千葉県、埼玉県の住宅地図の建物名称からその建物の階数と東京都の建物用途区分の対応関係を設定した上で、当該建物の建物高さを、建物用途毎の階高に建物階数を乗じて算出する。

４．２．４　東京 23 区の建物階高

東京 23 区の建物階高を集計するに当たり、東京 23 区の建物高さを以下の要領で整備した。大規模建物、MAPCUBE 建物の高さは以下のように設定した。

ｉ）5m メッシュ単位で分割して建物形状および高さを詳細化している大規模建物は、各棟のメッシュ高さの 95%タイル値を代表高さとした（煙突や尖塔などの影響を除くため）

ⅱ）MAPCUBE データ（汐留地区周辺）の建物は、各棟における最高高さとした

その他の建物については陸屋根を仮定した。

建物高さがわかったので、東京都 GIS データの建物階数で除することでその建物の階高を知ることができる。関係法令を踏まえ、階高（各階のスラブの表面間の高さ）は 2.5m を下限とする。

- 建築基準法施行令第 21 条 1 項により、居室の天井の高さは 2.1m 以上でなければならない。
- 公庫融資住宅に係る基準（公庫住宅等基礎基準第 14 条）では、共同住宅の居住室の天井高さは 2.3m 以上必要である（なお、最近のマンションは 2.4m 以上が一般的）。
- 東京都建築安全条例第 32 条 3 項により、延床面積 50m²以上の自動車車庫や自動車駐車場は、格納または駐車部分の床から天井またははり下までの高さは 2.1m以上、車路の部分においては 2.3m以上必要である。

建物用途別、延床面積別に平均階高を集計した結果を図３０に示す。参考に住宅については床高補正の有無についても記載してある。建築基準法施行令第 22 条により、木造住宅は床高が 45cm 以上必要であるため、階高を算出する際には、建物の高さから 45cm 引いた有効高さについても合わせて検討した。

独立住宅および集合住宅の平均階高は床高の補正の有無に関わらず 3m 以上になった。独立住宅の方が集合住宅より値が少し大きい。官公庁施設、専用商業施設、専用工業施設の平均階高は 4m 以上の値を示し、事務所建築物の 3.5m より大きい。供給処理施設、スポーツ興行施設、倉庫運輸関係施設の平均階高は 5m を

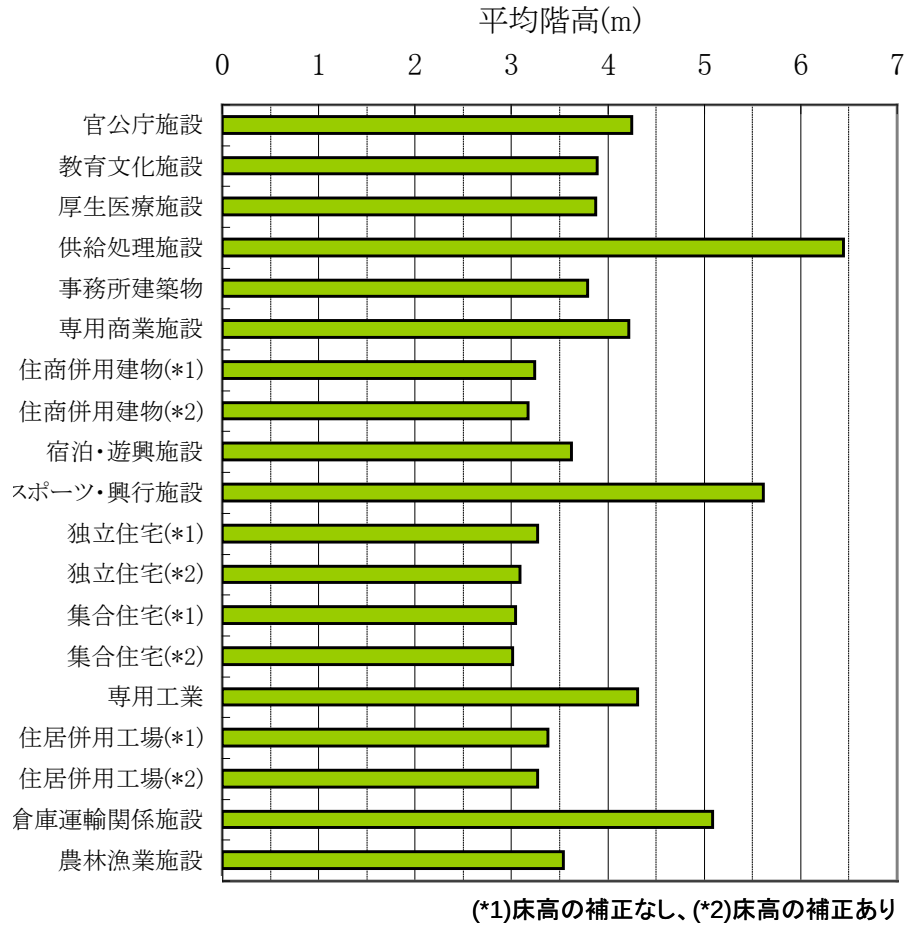


図３０　用途別建物平均階高

※建築基準法施行令第 22 条により、木造住宅は床高が 45cm 以上必要であるため、住宅関連用途の階高を算出する際には、建物の高さから 45cm 引いて階高を補正した場合とそうでない場合を併記した。

表１９　用途、延床面積別の建物棟数（東京 23 区）

国土地理院 1mDSM データ、東京都 GIS を用いた場合

用途名称	延床面積(m²)				合計棟数
	～1000	1000～5000	5000～20000	20000～	
官公庁施設	2,872	615	216	76	3,779
教育文化施設	14,984	3,969	1,666	104	20,723
厚生医療施設	5,055	1,282	248	59	6,644
供給処理施設	1,810	208	103	60	2,181
事務所建築物	40,463	12,300	2,163	462	55,388
専用商業施設	15,347	1,697	246	96	17,386
住商併用建物	167,233	3,394	217	16	170,860
宿泊・遊興施設	5,455	1,171	153	73	6,852
スポーツ・興行施設	745	252	85	31	1,113
独立住宅	738,183	166	1	0	738,350
集合住宅	212,675	27,534	3,697	458	244,364
専用工業	18,542	2,040	222	32	20,836
住居併用工場	47,379	303	5	0	47,687
倉庫運輸関係施設	19,204	1,211	355	143	20,913
合計棟数	1,289,947	56,142	9,377	1,610	1,357,076

超える。

1mDSM データを用いて用途、延床面積別の建物棟数を集計したのが表１９である。実際には 1mDSM データから 160～170 万棟が判別できたが、東京都 GIS データと整合するものは 135 万棟強であった。東京都 GIS データに登録されていない物置などを拾っている可能性がある。また、調査年度の相違により建物の新設、撤去の影響も考えられる。

図３１は用途別延床面積別の平均階高の集計結果である。全体的な傾向として、延床面積が増大するにつれ平均階高の値が大きくなる。特に、スポーツ・興行施設や供給処理施設の階高は延床面積と共に急速に増加している。大規模な体育館やドーム、清掃工場など特殊な建物空間が反映された数値であると考えられる。

事務所建物についても延床面積が増大すると平均階高の値が大きくなり、延床面積 20,000m²を超えると平均階高は 4mを超える。ただし、延床面積 20,000m²以上の建物棟数が非常に少ないことから、延床面積の大きな場合についてはあくまでも増加傾向を示すための参考値であることに留意する必要がある。

独立住宅の床面積が大きくなると階高が増している。床面積の規模に応じて空間にゆとりが出てくると解釈できる。一方、集合住宅ではそのような傾向はあまり見られない。

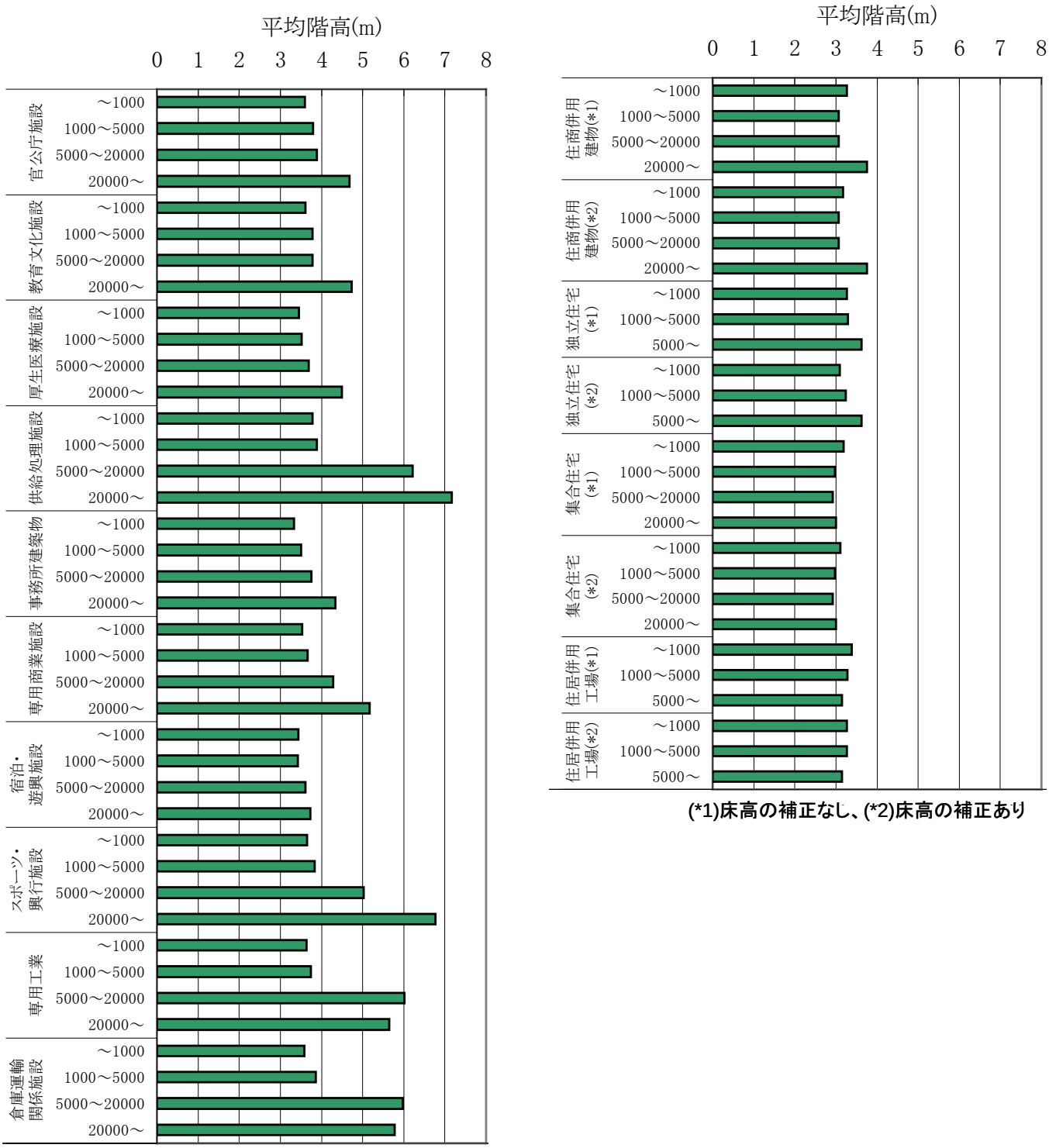


図３１　用途別延床面積規模別平均階高

４．２．５　東京都以外の領域における建物用途区分の設定

（ａ）神奈川県

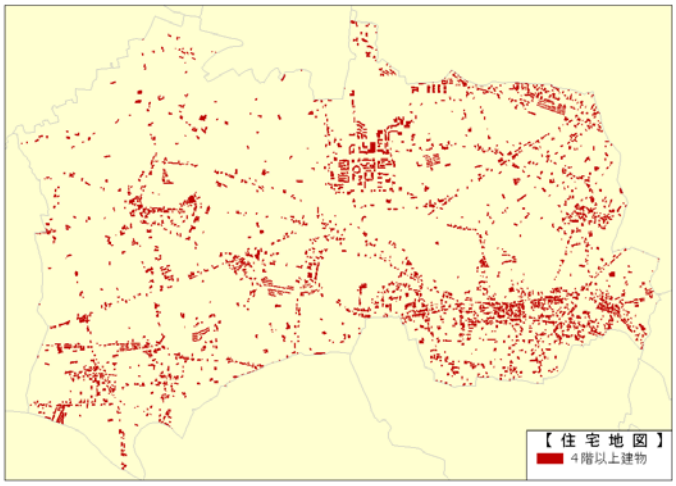
神奈川県内（川崎市、横浜市）の建物については、東京 23 区と建物用途の区分の対応を設定する。川崎市 GIS の建物用途と東京都 GIS の建物用途の対応を表２０に、横浜市 GIS の建物用途と東京都 GIS の建物用途の対応を表２１に示す。

（ｂ）千葉県、埼玉県

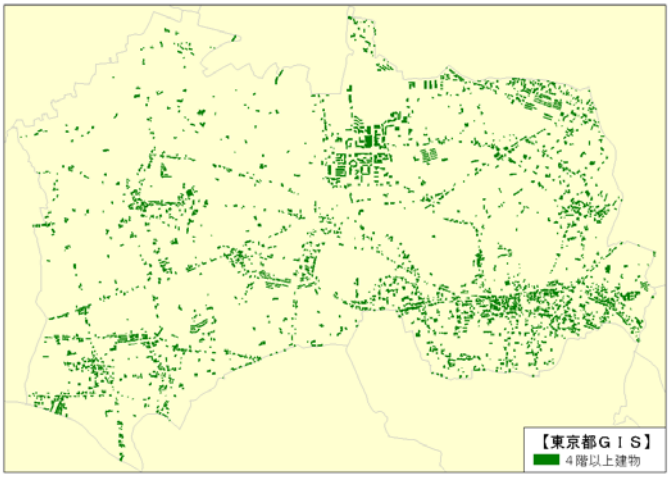
千葉県、神奈川県内の建物については、住宅地図データを用いて以下のように建物用途、建物地上階数を設定した。まず、住宅地図から建物用途と建物名称の関係を修正し、抽出された用途別の名称キーワードを表２２に示す。この関係に基づいて、千葉県、神奈川県内の住宅地図の各建物の名称（表札）から建物用途を割りあてた。名称が記載されていない建物や表２２の名称キーワードを含まない建物については、細密数値情報（10ｍメッシュ土地利用）データを併用し、用途を推定した。作成にあたっては、東京都練馬区の住宅地図データをサンプルとしている。使用したサンプルデータにおいては、階数の属性が入力されているデータは全体の約 15%程度であった。

住宅地図データにおいて、4 階以上の建物については地上階数の属性が付与されている。住宅地図の 4 階以上の建物の分布と東京都 GIS データの 4 階以上の建物の分布は概ね一致している（図３２）。階数属性が記載されていない建物については、地上階数を 2 階と仮定する。ただし、住宅地図データで 3 階以下の建物についても階数の情報が一部整備されている場合、その情報を優先する。

住宅地図データを利用した場合の建物用途と地上階数の設定方法を表２３に整理する。



（ａ）住宅地図データ



（ｂ）東京都 GIS データ

図３２　建物の分布（4 階以上）

表２３　住宅地図データを利用した場合の建物用途と地上階数の設定方法

		地上階数属性有	地上階数属性無
建物名称より建物用途の推定可の場合	建物用途	建物名称より推定した用途	建物名称より推定した用途
	地上階数	各建物の地上階数	地上階数2階と仮定
建物名称より建物用途の推定不可の場合	建物用途	細密数値情報より推定した用途	細密数値情報より推定した用途
	地上階数	各建物の地上階数	地上階数2階と仮定

表２０　川崎市 GIS の建物用途と東京都 GIS の建物用途の対応

コード	内容	対応する東京都GIS用途分類
0	用途不明	不明
10	住宅	独立住宅
20	集合住宅	集合住宅
30	店舗併用住宅	住商併用建物
41	店舗併用集合住宅(宿泊施設)	住商併用建物
42	店舗併用集合住宅(娯楽施設)	住商併用建物
43	店舗併用集合住宅(遊戯施設)	住商併用建物
44	店舗併用集合住宅(上記以外)	住商併用建物
50	作業所併用住宅	住居併用工場
60	業務施設	事務所建築物
71	商業施設(A)	専用商業施設
72	商業施設(B)	専用商業施設
73	商業施設(C)	専用商業施設
80	宿泊施設	宿泊・遊興施設
91	娯楽施設(A)	宿泊・遊興施設
92	娯楽施設(B)	宿泊・遊興施設
93	娯楽施設(C)	宿泊・遊興施設
101	遊戯施設(A)	宿泊・遊興施設
102	遊戯施設(B)	宿泊・遊興施設
110	商業系用途複合施設	専用商業施設、宿泊・遊興施設
120	官公庁施設	官公庁施設
131	文教厚生施設(A)	教育文化施設、厚生医療施設
132	文教厚生施設(B)	教育文化施設、厚生医療施設
141	運輸倉庫施設(A)	倉庫運輸関係施設
142	運輸倉庫施設(B)	倉庫運輸関係施設
150	重化学工業施設	専用工場
160	軽工業施設	専用工場
171	サービス工業施設(A)	専用工場
172	サービス工業施設(B)	専用工場
180	家内工業施設	専用工場
191	処理施設(A)	供給処理施設
192	処理施設(B)	供給処理施設
193	処理施設(C)	供給処理施設
200	農業施設	農林漁業施設等
210	防衛施設	その他

表２２　建物用途と建物名称の関係から抽出した用途別キーワードの例

用　途	キーワード
事務所	（株）, 支店, 郵便, 信用, 局, 金庫, 自動車, 建設, 工場, 本社, 交番, 工業, 銀行, 署, ＪＡ, 生命
学校	区立, 小学校, 幼稚園, 中学校, 神社, 集会, 学校, 高等, 地域, 区民, 会館, 地区, 都立, 大学, 図書, 学部, 附属, （学）, 町会, 斎場
商業建物	ＳＳ, 石油, レストラン, 湯, ジョナサン, テニス, ゴルフ, マクドナルド, マート, 給油, エッソ, クラブ, ホスト, 三菱石油, ブック, 中古
ホテル	パラダイス, ゲーム, 旅館, ホテル
住居併用工場	クリーニング, 製作, モータース, （有）, 木工
住商併用建物	店, ビル, 美容, 屋, 商店, 酒店, 理容, 中華, スナック, そば, サロン, ヘアー
集合住宅	コーポ, ハイツ, 第, アパート, ハイム, 都営, メゾン, マンション, 棟, ハウス, 丁目, パーク, グリーン, 号, 寮, シティ
その他	保育, 福祉, 法人, 医療, 医院, 病院, 社団, 保健, 支援, 児童, ～園, 社会, クリニック, 介護, 老人, ～会, 歯科, 施設, 外科, 財団, 在宅, 学童, 内科, 敬老, 出生, 特別, 脳, 診療, 医学部, 言語, 授産, 赤ちゃん, 母子, 奉仕

表２１　横浜市 GIS の建物用途と東京都 GIS の建物用途の対応

コード	大分類	中小分類	東京都GISの主用途
1110	住居系地域	独立専用住宅	独立住宅
1120		集合住宅	集合住宅
1130		住居系付属建物	独立住宅、集合住宅
1210	業務系地域	事務所建物	事務所建築物
1220		通信報道施設	事務所建築物
1311	商業系地域	専用商業店舗	専用商業施設
1312		商住併用施設(1)	住商併用建物
1313		専用飲食店舗	専用商業施設
1314		商住併用施設(2)	住商併用建物
1315		専用サービス店舗	専用商業施設
1316		商住併用施設(3)	住商併用建物
1320		卸売市場	供給処理施設
1330		宿泊施設	宿泊・遊興施設
1341		遊技施設	宿泊・遊興施設
1342		商住併用施設(4)	住商併用建物
1343		遊興施設(1)	宿泊・遊興施設
1344		遊興施設(2)	宿泊・遊興施設
1345		興行施設	スポーツ・興行施設
1346		スポーツ施設1	スポーツ・興行施設
1411	工業系地域	家内工業施設	専用工業
1412		サービス工業施設A	専用工業
1413		サービス工業施設B	専用工業
1414		軽工業施設	専用工業
1415		重化学工業施設	専用工業
1420		工住併用施設	住居併用工場
1430		研究施設1	事務所建築物
1440		危険物施設	供給処理施設
1510	官公庁施設地域	官公庁施設(1)	官公庁施設
1520		官公庁施設(2)	官公庁施設
1530		研究施設2	教育文化施設
1611	公共公益系施設地域	教育施設(1)	教育文化施設
1612		教育施設(2)	教育文化施設
1613		教育施設(3)	教育文化施設
1620		文化施設	教育文化施設
1630		コミュニティー施設	教育文化施設
1640		文化教養施設	教育文化施設
1650		宗教施設	教育文化施設
1661		医療施設(1)	厚生医療施設
1662		医療施設(2)	厚生医療施設
1670		社会福祉施設	厚生医療施設
1680		スポーツ施設2	スポーツ・興行施設
1710	暫定利用地	展示住宅	屋外利用地・仮設建物
1720		仮設建物	屋外利用地・仮設建物
1810	用途不明地	用途不明建物(1)	不明
1820		用途不明建物(2)	不明
1910	都市運営施設地区	道路施設	－（東京都GISには建物がない）
1920		鉄道施設	倉庫運輸関係施設
1931		埠頭施設	倉庫運輸関係施設
1932		船客ターミナル施設	倉庫運輸関係施設
1940		航空施設	倉庫運輸関係施設
1951		一般駐車施設	倉庫運輸関係施設
1952		駐輪施設	倉庫運輸関係施設
1953		バス施設	倉庫運輸関係施設
1954		倉庫	倉庫運輸関係施設
1955		物流施設	倉庫運輸関係施設
1961		供給施設	供給処理施設
1962		処理施設	供給処理施設
3110	農業・漁業用地	農業施設	農林漁業施設
3120		漁業施設	農林漁業施設
4350	複合施設（商業系）	商業・業務系複合施設	専用商業施設、事務所建築物
4360		業務・商業・住居系複合施設	事務所建築物、専用商業施設、集合住宅
4420	複合施設（工業系）	工住複合施設	住居併用工場
4690	複合施設（公共系）	公共系複合施設	官公庁施設
4700	複合施設（公共住居系）	公住複合施設	集合住宅

４．３　建物等幾何データのメッシュ整備

４．３．１　開口率と体積占有率

3次元セルの建物等幾何データのメッシュ値はセル界面の開口率とセル内の流体の体積占有率で表される。開口率は東西南北上下6面で定義され、各界面における流体が通過可能な面積の割合を示している。体積占有率はセル毎に定義され、セル内に占める流体の体積割合を示している。例えば、図３３の左図のようにセル内に接する球体が存在する場合は、開口率は1.0、体積占有率は約0.4764となる。右図のように右下隅の半分が立方体で塞がれている場合は、南、東、下面の開口率が0.75となり、体積占有率は0.875となる。

メッシュの鉛直面（東西南北4面）の開口率の計算方法を図３４（ａ）に示す。地面から順に見ると、以下のようになる。

ｋ＝0は完全に地中にあるので開口率＝0

ｋ＝1は大部分が地面と建物で塞がれているが、一部が開放されているので開口率＝0.15

ｋ＝2は建物１と建物２で塞がれているので、開口率＝0.35

ｋ＝3は建物１の一部と建物２で塞がれているので、開口率＝0.40

ｋ＝4は建物２で塞がれているので、開口率＝0.60

ｋ＝5以上は建物がないので開口率＝1.0

同様に水平面（上下２面）開口率と体積占有率は図３４（ｂ）のように求める。

以上の定義に基づいて、5mメッシュのポーラスデータを整備した。計算結果の例として、汐留付近のk=10の断面で切り出した体積占有率の分布を図３５に示す。

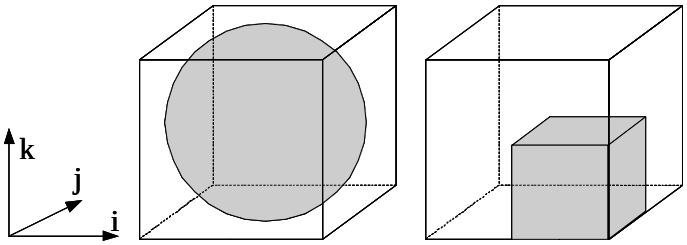


図３３　開口率・体積占有率の計算例
（左：球体の場合、右：直方体の場合）

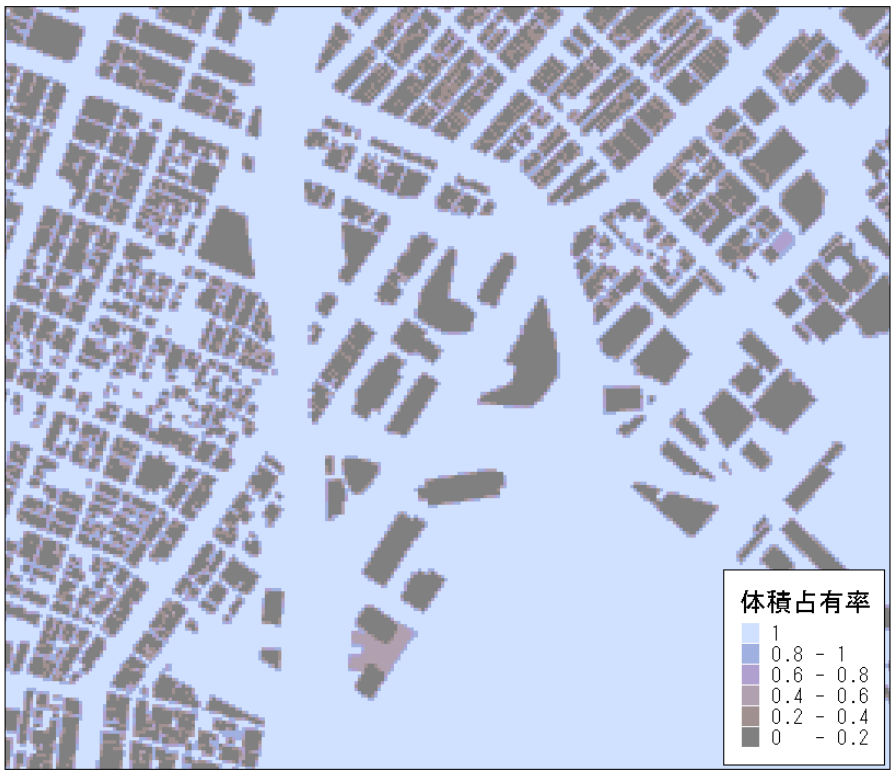
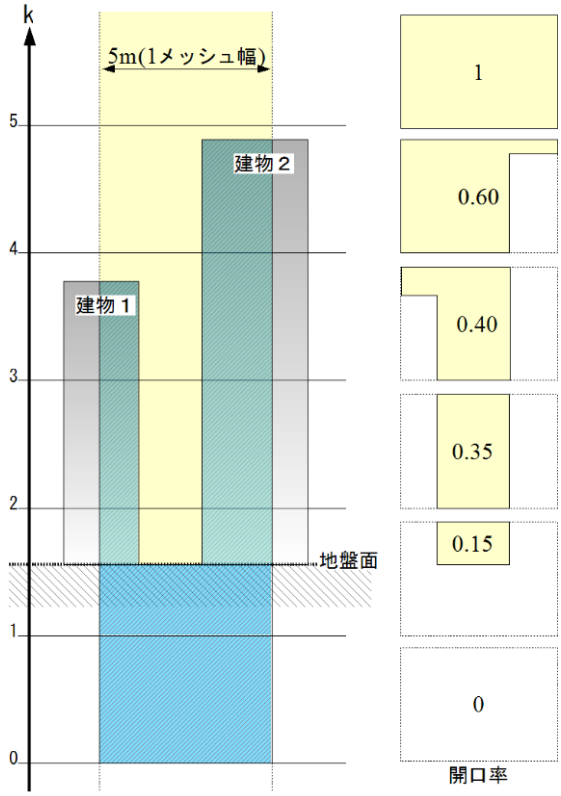
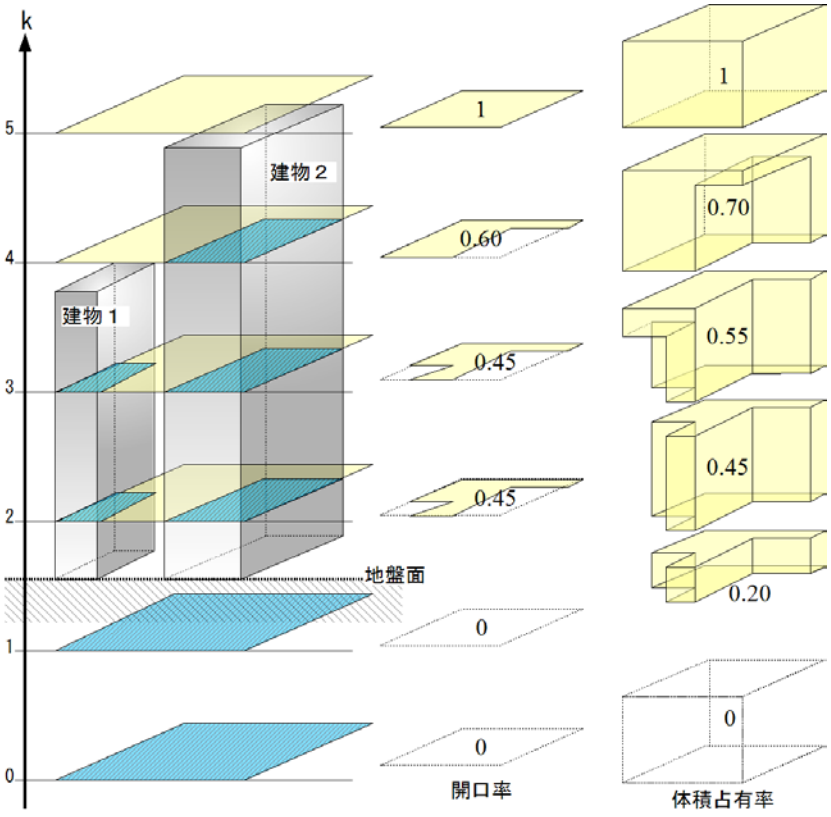


図３５　汐留付近における体積占有率分布の例（k=10）



（ａ）開口率（東西南北）



（ｂ）開口率（上下）、体積占有率

図３４　開口率・体積占有率の計算例

４．３．２　屋上面・壁面の面積

エネルギー輸送方程式を解く上で、解析セル内において顕熱が放散される建物の屋上面・壁面の面積の情報を知る必要がある。解析セル内の壁面面積については、5m メッシュ毎に分割された建物の周囲長に高さを乗じて算出した。図３６のように１セルに複数の建物が含まれる場合は各建物の合計面積とし、また建物同士が接している部分は合計壁面面積から除く処理を行った。なお、MAPCUBE データや 1mDSMデータにより形状を詳細化した建物の壁面面積は、図３７の(A)～(C)の部分のように屋上の塔屋等の側面部分の面積も含まれる。屋上面積については、建物屋上を凹凸のない水平面と設定した建物、MAPCUBE データや 1m DSM データにより形状を詳細化した建物のいずれも 5m メッシュで分割された建物の面積とした。

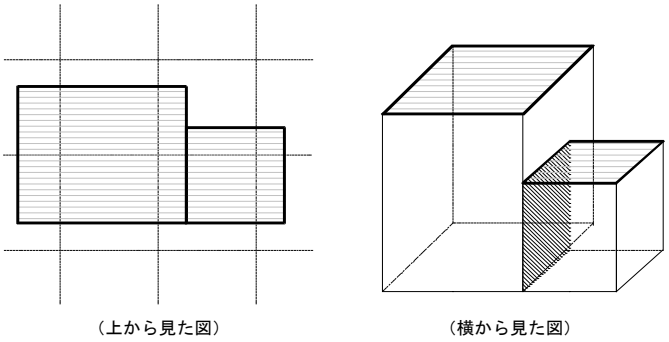


図３６　密接した建物の屋上面および壁面

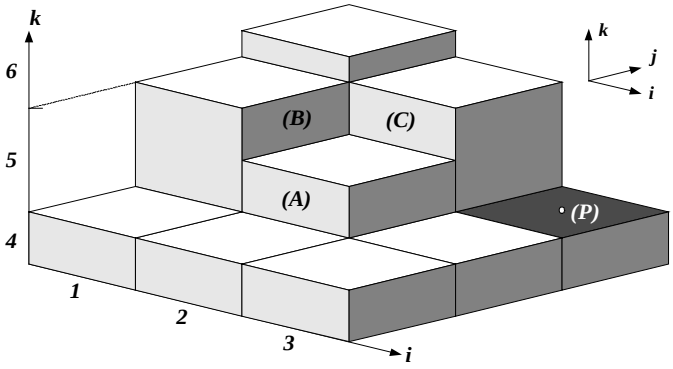


図３７　詳細化した建物の屋上の一部

４．４　土地利用

４．４．１　東京都

数値解析における土地利用項目は、(a)建物敷地、(b)アスファルト、(c)草地、(d)水域、(e)樹木、(f)地表面なしの 6 種類である。(a)～(d)の項目については東京都 GIS（平成 9 年度）の土地データ、(e)は東京都現存植生図データ（1990 年代）を用いて、5m メッシュ毎の土地利用項目を設定した。メッシュ内に占める面積が最大となる項目をメッシュの代表土地利用項目とする。表２４に東京都 GIS の土地用途コードと土地利用項目の対応を示す。この対応関係は、東京 23 区内、東京市部地域において共通しているものである。

４．４．２　神奈川県

神奈川県（川崎市、横浜市）内については、川崎市、横浜市の土地 GIS データおよび植生図データを利用して土地利用項目を設定した。表２５に川崎市 GIS、表２６および表２７に横浜市 GIS における土地用途コードと土地利用項目の対応関係を示す。なお、それぞれの GIS の土地用途と東京都 GIS の土地用途分類との対応を図ったうえで、土地利用項目の設定を行った。

４．４．３　千葉県、埼玉県

千葉県内や埼玉県内の代表土地利用項目については、国土数値情報、住宅地図、細密数値情報を活用して以下のデータ処理を実施した。

図３８　街区区域より作成した道路オブジェクト

まず、国土数値情報 2500（空間データ基盤）の街区区域のポリゴンおよび道路線のライン

データを用いて、道路線（道路中心線）によるバッファと街区区域（道路部分が抜けた領域）から図３８のような道路ポリゴンを作成した。次いで、それを 5m メッシュで分割して、各々の土地利用の属性をアスファルトとした。また、住宅地図データより水面を抽出して 5m メッシュで分割し、土地利用の属性を水域とした。

次に、住宅地図データの建物を利用し、水面部分を除く街区区域ポリゴンから建物部分を型抜きし、残りの区域オブジェクトを 5m メッシュで分割した。そして、細密数値情報（10m メッシュ土地利用）のデータを利用して、5m メッシュで分割された区域オブジェクトを包含する細密数値情報の 10m メッシュより土地利用属性を付与した。表２８に細密数値情報の用途と土地利用項目の対応を示す。樹木については、細密数値情報の山林・荒地等を樹木と仮定した。

表２４　東京都 GIS の土地用途コードと土地利用項目の対応

東京都土地ＧＩＳ 主用途		コード	土地利用項目 名称	コード
公共用地	官公庁施設	111	建物敷地	1
	教育文化施設	112	建物敷地	1
	厚生医療施設	113	建物敷地	1
	供給処理施設	114	建物敷地	1
商業用地	事務所建築物	121	建物敷地	1
	専用商業施設	122	建物敷地	1
	住商併用建物	123	建物敷地	1
	宿泊・遊興施設	124	建物敷地	1
	スポーツ・興行施設	125	建物敷地	1
住宅用地	独立住宅	131	建物敷地	1
	集合住宅	132	建物敷地	1
工業用地	専用工場	141	建物敷地	1
	住居併用工場	142	建物敷地	1
	倉庫運輸関係施設	143	建物敷地	1
	農林漁業施設等	150	草地	3
空地	屋外利用地・仮設建物	210	建物敷地	1
	公園・運動場等	300	草地	3
	未利用地等	400	アスファルト	2
道路		510	アスファルト	2
鉄道・港湾等		520	アスファルト	2
農業用地	田	611	草地	3
農用地	畑	612	草地	3
	樹園地	613	草地	3
	採草放牧地	620	草地	3
水面・河川・水路		700	水域	4
林野	原野	800	草地	3
	森林	900	草地	3
その他		220	アスファルト	2
不明		0	アスファルト	2
不整合		9	アスファルト	2
（東京都現存植生図から求める）			樹木	5
（東京都建物ＧＩＳから求める）			地表面なし	0

表２５　川崎市 GIS の土地用途コードと土地利用項目の対応

NO	コード	内容				土地利用項目	
		大分類	中分類	小分類		名称	コード
1	10101	自然的土地利用	農地	田	農振外	草地	3
2	10102				農振内	草地	3
3	10201			畑	農振外	草地	3
4	10202				農振内	草地	3
5	10300		山林	平坦地山林		草地	3
6	10400			傾斜地山林		草地	3
7	10500		河川、水路、水面			水域	4
8	10600		荒地、海浜			草地	3
9	10701		耕作放棄地	農振外		草地	3
10	10702			農振内		草地	3
11	20100	都市的土地利用	住宅用地			建物敷地	1
12	20200		集合住宅用地			建物敷地	1
13	20300		店舗併用住宅用地			建物敷地	1
14	20400		店舗併用集合住宅用地			建物敷地	1
15	20500		作業所併用住宅用地			建物敷地	1
16	20600		業務用地			建物敷地	1
17	20700		商業用地			建物敷地	1
18	20800		宿泊娯楽用地			建物敷地	1
19	21100		商業用地			建物敷地	1
20	21200		公共用地			建物敷地	1
21	21300		文教厚生用地			建物敷地	1
22	21400		運輸倉庫用地			建物敷地	1
23	21500		重化学工業用地			建物敷地	1
24	21600		軽工業用地			建物敷地	1
25	21900		供給処理施設用地			建物敷地	1
26	22000		農地(農業施設)			草地	3
27	22100		防衛用地			アスファルト	2
28	30100		オープンスペース	その他オープンスペース		草地	3
29	30101			都市公園		草地	3
30	30102			ゴルフ場		草地	3
31	30201		その他空き地	未利用地		アスファルト	2
32	30202			取壊し改装工事中		アスファルト	2
33	30203			屋外利用地	駐車場	建物敷地	1
34	30204				それ以外	建物敷地	1
35	30301		道路用地	自動車専用道路		アスファルト	2
36	30302			幅員22m以上		アスファルト	2
37	30303			幅員12～22m		アスファルト	2
38	30304			幅員4～12m		アスファルト	2
39	30305			駅前広場		アスファルト	2
40	30400		鉄道用地			アスファルト	2

表２６　横浜市 GIS の土地用途コードと土地利用項目の対応（その 1）

横浜市GISの土地用途分類		土地利用項目	
小分類コード	土地利用小分類	名称	コード
1110	独立専用住宅地域	建物敷地	1
1120	集合住宅地区	建物敷地	1
1210	事務所地区	建物敷地	1
1220	通信報道施設	建物敷地	1
1311	専用商業店舗地	建物敷地	1
1312	商住併用施設(1)地	建物敷地	1
1313	専用飲食店舗他	建物敷地	1
1314	商住併用施設(2)地	建物敷地	1
1315	専用サービス店舗地	建物敷地	1
1316	商住併用施設(3)地	建物敷地	1
1320	卸売市場地区	建物敷地	1
1330	宿泊施設地区	建物敷地	1
1341	遊技施設地	建物敷地	1
1342	商住併用施設(4)地	建物敷地	1
1343	遊興施設(1)地	建物敷地	1
1344	遊興施設(2)地	建物敷地	1
1345	興行施設地	建物敷地	1
1346	スポーツ施設(1)地	建物敷地	1
1411	家内工業施設地	建物敷地	1
1412	サービス工業施設(A)	建物敷地	1
1413	サービス工業施設(B)	建物敷地	1
1414	軽工業施設地	建物敷地	1
1415	重化学工業施設地	建物敷地	1
1420	工住併用施設地区	建物敷地	1
1430	研究施設1地区	建物敷地	1
1440	危険物施設地区	建物敷地	1
1510	官公庁施設(1)地区	建物敷地	1
1520	官公庁施設(2)地区	建物敷地	1
1530	研究施設2地区	建物敷地	1
1611	教育施設(1)地	建物敷地	1
1612	教育施設(2)地	建物敷地	1
1613	教育施設(3)地	建物敷地	1
1620	文化施設地区	建物敷地	1
1630	コミュニティー施設地区	建物敷地	1
1640	文化教育施設地区	建物敷地	1
1650	宗教施設地区	建物敷地	1
1661	医療施設(1)地	建物敷地	1
1662	医療施設(2)地	建物敷地	1
1670	社会福祉施設地区	建物敷地	1
1680	スポーツ施設(2)地区	建物敷地	1
1710	展示用施設地区	建物敷地	1
1720	仮設建物地	建物敷地	1

表２７　横浜市 GIS の土地用途コードと土地利用項目の対応（その 2）

横浜市GISの土地用途分類		土地利用項目	
小分類コード	土地利用小分類	名称	コード
1810	用途不明地(1)	アスファルト	2
1820	用途不明地(2)	アスファルト	2
1911	自動車専用道路	アスファルト	2
1912	幹線道路(1)	アスファルト	2
1913	幹線道路(2)	アスファルト	2
1914	一般道路	アスファルト	2
1915	狭隘道路	アスファルト	2
1916	道路管理施設地	アスファルト	2
1921	鉄軌道用地	アスファルト	2
1922	鉄道施設地	アスファルト	2
1931	埠頭施設地	アスファルト	2
1932	船客ターミナル施設地	建物敷地	1
1940	航空施設地	アスファルト	2
1951	駐車場1	建物敷地	1
1952	駐輪場1	建物敷地	1
1953	バス施設地	建物敷地	1
1954	倉庫地	建物敷地	1
1955	物流施設地	建物敷地	1
1961	供給施設地	建物敷地	1
1962	処理施設地	建物敷地	1
2000	未利用空地	アスファルト	2
2110	駐車場2	建物敷地	1
2120	駐輪場2	建物敷地	1
2130	資材置場	建物敷地	1
2141	スポーツ広場	草地	3
2142	一般広場	草地	3
2150	園地	草地	3
2160	墓地	草地	3
2210	土砂造成改変地	アスファルト	2
2220	土砂・産廃処分地	アスファルト	2
3111	水田	草地	3
3112	畑地	草地	3
3113	果樹園	草地	3
3114	農業施設地	草地	3
3120	漁業施設地	草地	3
3210	広葉樹林	草地	3
3220	針葉樹林	草地	3
3230	竹林	草地	3
3240	普通樹林	草地	3
3310	河川	水域	4
3320	水路	水域	4
3330	水面	水域	4
3410	荒地	草地	3
3420	海浜	アスファルト	2
3510	海面	水域	4
4350	商業・業務系複合施設	建物敷地	1
4360	商業・業務・住居系複合施設	建物敷地	1
4420	工住併用住宅	建物敷地	1
4690	公共系複合施設	建物敷地	1
4700	公住複合施設	建物敷地	1

表２８　細密数値情報（10ｍメッシュ土地利用）の用途と土地利用項目の対応

大分類	中分類	小分類	分類項目	土地利用項目
山林・農地等	山林・荒地等		樹林地、竹林、篠地、笹地、野草地（耕作放棄地を含む）、裸地、ゴルフ場等	樹木
	農地	田	水稲、蓮、くわい等を栽培している水田（短期的な休耕田を含む）、季節により畑作物を栽培するもの	草地
		畑・その他の農地	普通畑、果樹園、桑園、茶園、その他の樹園、苗木畑、牧場、牧草地、採草放牧地、畜舎、温室等の畑及びその他の農地	草地
造成地	造成中地		宅地造成、埋立等の目的で人工的に土地の改変が進行中の土地	ｱｽﾌｧﾙﾄ
	空地		人工的に土地の整理が行われ、現在はまだ利用されていない土地及び簡単な施設からなる屋外駐車場、ゴルフ練習場、テニスコート、資材置場等	ｱｽﾌｧﾙﾄ
宅地	工業用地		製造工場、加工工場、修理工場等の用地、工場に付属する倉庫、原料置場、生産物置場、厚生施設等	建物
	住宅地	一般低層住宅地	３階以下の住宅用建物からなり、１区画あたり１００平方メートル以上の敷地により構成されている住宅地、農家の場合は、屋敷林を含め１区画	建物
		密集低層住宅地	３階以下の住宅用建物からなり、１区画あたり１００平方メートル未満の敷地により構成されている住宅地	建物
		中高層住宅地	４階建以上の中高層住宅の敷地からなる住宅地	建物
	商業・業務用地		小売店舗、スーパー、デパート、卸売、飲食店、映画館、劇場、旅館、ホテル等の商店、娯楽、宿泊等のサービス業を含む用地及び銀行、証券、保険、商社等の企業の事務所、新聞社、流通施設、その他これに類する用地	建物
公共公益施設用地	道路用地		有効幅員４ｍ以上の道路、駅前広場等で工事中、用地買収済の道路用地	ｱｽﾌｧﾙﾄ
	公園・緑地等		公園、動植物園、墓地、寺社の境内地、遊園地等の公共的性格を有する施設及び総合運動場、競技場、野球場等の運動競技を行うための施設用地	草地
	その他の公共公益施設用地		公共業務地区（国、地方自治体等の庁舎からなる地区）、教育文化施設（学校、研究所、図書館、美術館等からなる地区）、供給処理施設（浄水場、下水処理場、焼却場、変電所からなる施設地区）、社会福祉施設（病院、療養所、老人ホーム、保育所等からなる施設地区）、鉄道用地（鉄道、車両基地を含む）、バス発着センター、車庫、港湾施設用地、空港等の用地	建物
河川・湖沼等			河川（河川敷、堤防を含む）、湖沼、溜池、養魚場、海浜地等	水面
その他			防衛施設、米軍施設、基地跡地、演習場、皇室に関係する施設及び居住地等	ｱｽﾌｧﾙﾄ
海			海面	水面
対象地域外				ｱｽﾌｧﾙﾄ

４．５　日射到達高さ

今回の作成データは5mメッシュの解像度を持つため、メッシュに含まれる各表面の日射の有無を当該解析セルの中心における日射到達高さにより間接的に判定する方法を考えることにする。メッシュの中心に日射が到達する下限の高さのことを日射到達高さとする。

メッシュの中心から太陽位置（方位角、高度）の向きにラインを伸ばして日射を遮る周囲の建物の有無を調べる。遮る建物がある場合はその建物までの距離と建物の高さから、メッシュの中心における日射到達高さを求める。

まず、日射に面する建物壁面の日陰判定を行う。建物を除外した場合の日射到達高さを求める。当該メッシュの中心から伸ばした日射判定ラインを遮る建物がない場合は日射到達高さは0ｍとなる。

メッシュの中心が建物内部にあり、日射到達高さが建物高さよりも低い場合は、日射に面する日射到達高さより上の壁面および建物屋上に日射があたっていることになる。だから、日射到達高さは建物高さと等しくなる。なお、太陽の方位角と高度は以下の条件を与えて算出した。

・ジュリアンデイ　　209 日
・時間　　真太陽時 14 時
・緯度、経度 35 38' 58 41''、139 45' 00 77''

上記の条件で算出される方位角は 246.1 度、高度は 58.9 度となる。

建物高さは、メッシュ内に存在する単独もし

くは複数建物の高さの最大値である。なお、1mDSM データを用いて各建物を 5m メッシュに分割して高さを詳細化した建物については、上記の建物高さは、各メッシュ内の詳細化した建物の高さとなる。

日射到達高さは、複数のメッシュをまたがって存在する建物の場合など自身の建物による周囲の凹凸の影響も考慮される。例えば、図３７の(P)面は、隣接するセルに存在する自身の建物の影響を受け日陰となる場合がある。建物を含む日射到達高さについても同様である。

４．６　人工排熱

４．６．１　人工排熱の対象

下記の用途の人工排熱を対象とする。

① 建物（地域冷房施設含む）の空調および熱源・換気システムから屋外に放出される顕熱潜熱について東京夏季（8 月平均）における 24 時間のうち、14 時を対象とする。
② 車が交通に費やすエネルギー量から屋外に放出される顕熱潜熱について東京夏季（8 月平均）における 24 時間のうち、14 時を対象とする。
③ 工場で費やすエネルギー量から屋外に放出される顕熱潜熱について東京夏季（8 月平均）における 24 時間のうち、14 時を対象とする。

４．６．２　データ整備範囲

東京 23 区およびその周辺を含む 33km 四方の南北矩形エリアデータである。

４．６．３　人工排熱の排出位置

建物や工場、自動車など各種の人工排熱の排出位置は表２９のように設定した。建物の空調および熱源・換気システムから屋外に放出される排熱の排出位置を一意に定めるのは難しい。そこで、建物規模で空調システムの導入割合を関数化した排熱原単位をもとに排熱を算出することにする。建物各棟の排熱量を 3 次元の解析セルへ空間的に配分するために排出位置を用途毎に区別し、非住居系は屋上面、住居系は壁面（バルコニー）と設定した。排出位置をポイント的に設定するのは困難なため、屋上や壁面より一様に排出されるものと仮定した。

地域冷暖房（DHC）が導入されている区域において、地域冷暖房に加盟する建物から回収した熱量は、地域冷房施設に投入されるエネルギー量と共にプラント位置の建物の屋上面から排出されると仮定する。地域冷暖房に加盟する建物については、熱源システムによる排熱がその場では発生しないことになる。ただし、換気による熱交換を見込み、建物用途により壁面あるいは屋上面から室内外のエンタルピー差に相当する熱量（冷気）が換気で屋外へ排出されるとした。

工場からの排熱については、燃焼炉の発熱が想定され、これについては屋上面から放熱され

表２９　人工排熱の排出位置

区分	排熱の種類	細分類	排出位置(高さ)
建物	建物排熱(DHC供給建物を除く)	住宅系建物(併用含む)	壁面
		非住宅系建物	屋上面
	DHCプラントの排熱		屋上面
	DHC供給建物の換気排熱	住宅系建物(併用含む)	壁面
		非住宅系建物	屋上面
事業所	工場排熱	地上排熱	屋上面
		煙突排熱	施設(建物)高さ+10m
	清掃工場・火力発電所排熱	地上排熱	屋上面
		煙突排熱	(絶対)煙突高さ
自動車	幹線道路からの排熱	高速道路	最上位の路面
		水面上の橋	橋上の路面
		上記以外	地盤面
	非幹線道路からの排熱	水面上の橋	橋上の路面
		上記以外	地盤面

るとしている。煙突排熱については、各工場の煙突位置および高さが不明なため、排出高さを施設高さ＋10mと仮定し、清掃工場・火力発電所については各事業所の煙突位置および高さを個別に調査した。煙突側壁における熱損失は無視した。

建物や工場の建物各棟から排出される熱を屋上面あるいは壁面位置のセルに配分する際には、得られている3次元ポーラスデータの屋上面積と壁面面積を活用した。

自動車の排熱の排出位置については路面高さとした。路面高さは地盤面の高さを国土地理院5mメッシュ標高データより、高速道路の高架（最上位面の路面）や水面上の橋の路面高さは国土地理院の航空機レーザー測量データ（概ね1m間隔毎の地盤面や建物表面などの高さデータ）より与えた。なお、数値計算の仕様に合わせ、掘割区間など路面高さが0m未満の場合は排出高さを0mに補正した。

なお、建物、工場、車の排熱原単位は既往の文献[4]に基づいて与えているが、5mメッシュで作成するに当たり算出方法を以下に整理しておく。

４．６．４　建物からの排熱

建物（地域冷暖房施設を含む）から放出される顕熱・潜熱を建物毎に表２９の排出位置を踏まえて用途別（住居系、非住居系）に推計した。

図３９は建物からの人工排熱の推計のフローである。東京都市部、神奈川県、埼玉県、千葉県についても、当該フロー左の地域冷暖房計画区域外における推計のフローを適用しており、各々の地域のGISデータを用いて求めた建物別用途別延床面積に用途別規模別排熱原単位を乗じて排熱を推計した。

地域冷暖房施設については、供給建物（需要先）やプラント位置について調査を行い、供給先の建物が判明した区域はプラントからの排熱および供給建物からの換気排熱を求め、他方、地域冷暖房施設の供給先の建物が不明な区域については、熱供給事業便覧データ等の供給延床面積に相当する延床分は換気排熱のみが放出されるとし、それ以外の延床分は地域冷暖房から熱の供給を受けていない建物以外の建物同様の方法により、平均的な排熱を求めた。

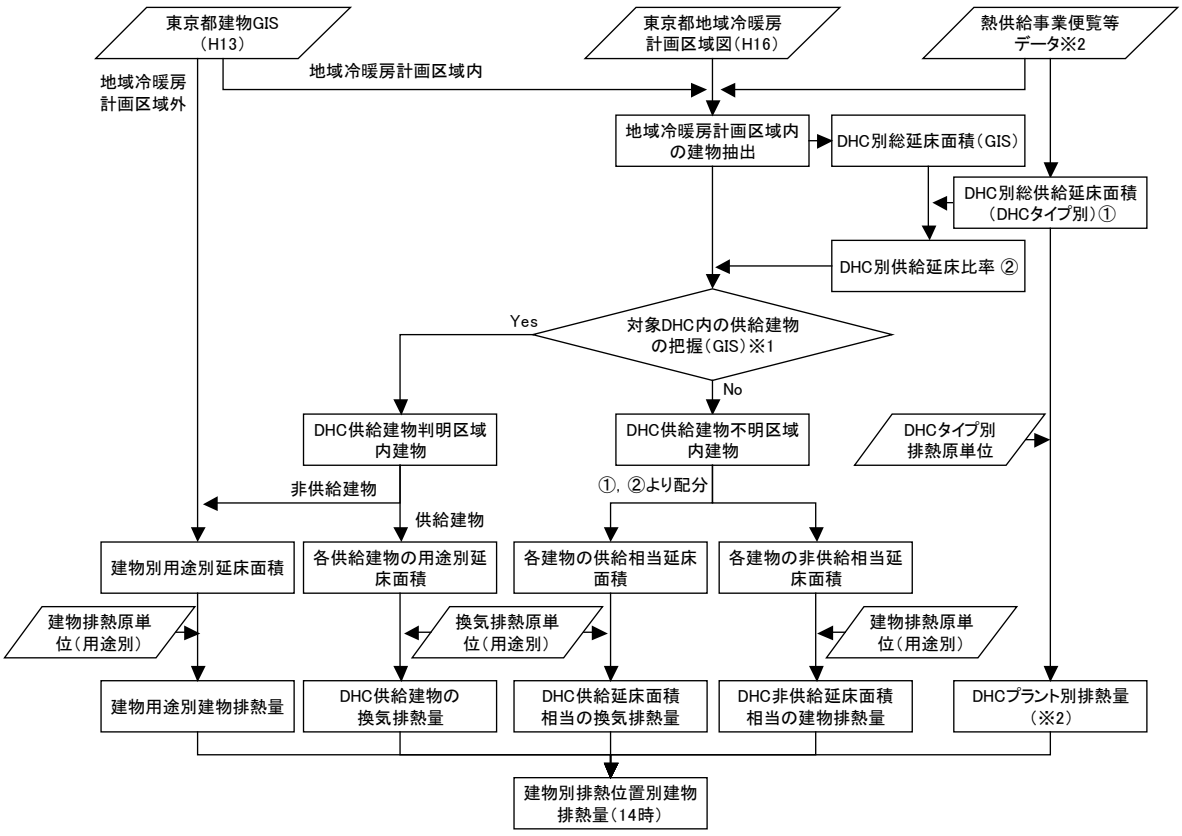


図３９　建物排熱の推計フロー

表３０に示すように建物用途と人工排熱用途区分の対応を図った上で、用途別の延床面積の規模に応じた区分毎に延床面積を集計した。神奈川県（横浜市および川崎市）のデータについては、各々の自治体の都市計画GISデータ（横浜市：平成９年度、川崎市：平成14年度）を用い、表３１や表３２に示す対応により、東京都内と同様に用途別規模別延床面積を集計した。

埼玉県、千葉県のデータについては、体積占有率の算出と同様に、住宅地図データから排熱の推計に必要な建物の用途および階数を推定した。このようにして求めた用途別延床規模別延床面積に建物用途別時刻別延床面積規模別の排熱原単位を乗じて、建物各棟からの人工排熱を推計した。そして、各棟を３次元セルにより分割し、前出の３次元ポーラスデータの屋上面積と壁面面積のデータを活用し、各棟の排熱を屋上面あるいは壁面に位置するセルに配分し、単位体積当たりの顕熱、潜熱の量を求めた。

４．６．５　地域冷暖房施設からの排熱

東京23区における地域冷暖房計画区域（計画中も含む）に関して、各区域の熱源システムのタイプ（表３３）および供給延床面積について整理した。熱源システムは田口ら[46)]の分類による（表３４）。各区域において、地域冷暖房施設から熱の供給を受けている建物の特定やプラント位置（複数ある場合は冷熱源の能力も）の把握を行った。

各区域の供給延床面積に地域冷暖房施設の排熱原単位（8月の推計値）を乗じて、各区域における地域冷暖房施設のプラントからの排熱を求め、プラント位置の建物の屋上面のセルに配分した。プラントが複数存在する区域については、冷熱源能力の比に応じて各棟に配分し、各々の屋上面のセルに配分した。なお、地域冷暖房施設から熱の供給を受けている建物については、換気排熱（顕熱、潜熱）のみが各棟から排出されるとし、住居系は壁面位置のセルに、非住居系は屋上面のセルに配分した。

表３０　東京都GISの建物用途と人工排熱用途区分の対応表

東京都GIS用途分類			人工排熱用途区分
分類	建物主用途	建物用途コード	
公共用地	官公庁施設	111	事務所
	教育文化施設	112	学校
	厚生医療施設	113	その他
	供給処理施設	114	対象外
商業用地	事務所建築物	121	事務所
	専用商業施設	122	店舗
	住商併用建物	123	1F分店舗、2F～3F住宅（戸建）、4F以上住宅（集合）
	宿泊･遊興施設	124	ホテル
	スポーツ･興行施設	125	店舗
住宅用地	独立住宅	131	住宅（戸建）
	集合住宅	132	住宅（集合）
工業用地	専用工業	141	事務所
	住居併用工場	142	1F分事務所、2F～3F住宅（戸建）、4F以上住宅（集合）
	倉庫運輸関係施設	143	対象外

表３１　川崎市 GIS の建物用途と人工排熱用途区分の対応表

コード	内容	対応する東京都GIS用途分類	人工排熱用途区分
0	用途不明	不明	対象外
10	住宅	独立住宅	戸建住宅
20	集合住宅	集合住宅	集合住宅
30	店舗併用住宅	住商併用建物	各階層の用途に応じて設定
41	店舗併用集合住宅(宿泊施設)	住商併用建物	各階層の用途に応じて設定
42	店舗併用集合住宅(娯楽施設)	住商併用建物	各階層の用途に応じて設定
43	店舗併用集合住宅(遊戯施設)	住商併用建物	各階層の用途に応じて設定
44	店舗併用集合住宅(上記以外)	住商併用建物	各階層の用途に応じて設定
50	作業所併用住宅	住居併用工場	各階層の用途に応じて設定
60	業務施設	事務所建築物	事務所
71	商業施設(A)	専用商業施設	商業建物
72	商業施設(B)	専用商業施設	商業建物
73	商業施設(C)	専用商業施設	商業建物
80	宿泊施設	宿泊・遊興施設	ホテル
91	娯楽施設(A)	宿泊・遊興施設	ホテル
92	娯楽施設(B)	宿泊・遊興施設	ホテル
93	娯楽施設(C)	宿泊・遊興施設	ホテル
101	遊戯施設(A)	宿泊・遊興施設	ホテル
102	遊戯施設(B)	宿泊・遊興施設	ホテル
110	商業系用途複合施設	専用商業施設、宿泊・遊興施設	各階層の用途に応じて設定
120	官公庁施設	官公庁施設	事務所
131	文教厚生施設(A)	教育文化施設、厚生医療施設	その他
132	文教厚生施設(B)	教育文化施設、厚生医療施設	その他
141	運輸倉庫施設(A)	倉庫運輸関係施設	対象外
142	運輸倉庫施設(B)	倉庫運輸関係施設	対象外
150	重化学工業施設	専用工場	事務所
160	軽工業施設	専用工場	事務所
171	サービス工業施設(A)	専用工場	事務所
172	サービス工業施設(B)	専用工場	事務所
180	家内工業施設	専用工場	事務所
191	処理施設(A)	供給処理施設	対象外
192	処理施設(B)	供給処理施設	対象外
193	処理施設(C)	供給処理施設	対象外
200	農業施設	農林漁業施設等	対象外
210	防衛施設	その他	対象外

※併用・複合用途の場合、階層別に用途が設定されている

表３４　地域冷暖房の熱源システムの分類

分類		エネルギー源	機器構成	蒸気	冷水	温水
A		ガス	CGS+SB+SR	○	○	—
B	B-1	ガス	SB+SR	○	○	—
	B-2	ガス	SB	○	○	—
C		ガス・電気	CGS+SB+SR+TR	○	○	—
D		ガス・電気	SB+SR+TR	○	○	—
E		ガス・電気	CGS+SB+SR+TR+BF	○	○	—
F	F-1	ガス・電気	SB+SR+TR+BF	○	○	—
	F-2	ガス・電気	SB+TR+BF+HP+HPX	○	○	—
	F-3	ガス・電気	SB+ +BF+HP+HPX	○	○	○
G		電気	TR+BF+HP+HPX	—	○	○
H		電気	HP+HPX	—	○	○

CGS:コージェネレーションシステム、SB:蒸気ボイラ、SR:蒸気吸収式冷凍機、
TR:ターボ冷凍機、BF:蓄熱槽、HP:空気熱源ヒートポンプ、HPX:熱回収ヒートポンプ

表３２　横浜市 GIS の建物用途と人工排熱用途区分の対応表

大分類	中小分類	コード	東京都GISの主用途	人工排熱用途区分
住居系地域	独立専用住宅	1110	独立住宅	戸建住宅
	集合住宅	1120	集合住宅	集合住宅
	住居系付属建物	1130	－※1	対象外
業務系地域	事務所建物	1210	事務所建築物	事務所
	通信報道施設	1220	事務所建築物	事務所
商業系地域	専用商業店舗	1311	専用商業施設	商業建物
	商住併用施設(1)	1312	住商併用建物	各階層の用途に応じて設定※2
	専用飲食店舗	1313	専用商業施設	商業建物
	商住併用施設(2)	1314	住商併用建物	各階層の用途に応じて設定※2
	専用サービス店舗	1315	専用商業施設	商業建物
	商住併用施設(3)	1316	住商併用建物	各階層の用途に応じて設定※2
	卸売市場	1320	供給処理施設	対象外
	宿泊施設	1330	宿泊・遊興施設	ホテル
	遊技施設	1341	宿泊・遊興施設	商業建物
	商住併用施設(4)	1342	－※1	各階層の用途に応じて設定※2
	遊興施設(1)	1343	宿泊・遊興施設	商業建物
	遊興施設(2)	1344	宿泊・遊興施設	商業建物
	興行施設	1345	スポーツ・興行施設	商業建物
	スポーツ施設1	1346	スポーツ・興行施設	商業建物
工業系地域	家内工業施設	1411	専用工業	事務所
	サービス工業施設A	1412	専用工業	事務所
	サービス工業施設B	1413	専用工業	事務所
	軽工業施設	1414	専用工業	事務所
	重化学工業施設	1415	専用工業	事務所
	工住併用施設	1420	住居併用工場	各階層の用途に応じて設定※3
	研究施設1	1430	事務所建築物	事務所
	危険物施設	1440	供給処理施設	対象外
官公庁施設地域	官公庁施設(1)	1510	官公庁施設	事務所
	官公庁施設(2)	1520	官公庁施設	事務所
	研究施設2	1530	教育文化施設	事務所
公共公益系施設地域	教育施設(1)	1611	教育文化施設	学校
	教育施設(2)	1612	教育文化施設	学校
	教育施設(3)	1613	教育文化施設	学校
	文化施設	1620	教育文化施設	学校
	コミュニティー施設	1630	教育文化施設	学校
	文化教養施設	1640	教育文化施設	学校
	宗教施設	1650	教育文化施設	対象外
	医療施設(1)	1661	厚生医療施設	その他
	医療施設(2)	1662	厚生医療施設	その他
	社会福祉施設	1670	厚生医療施設	その他
	スポーツ施設2	1680	スポーツ・興行施設	商業建物
暫定利用地	展示住宅	1710	屋外利用地・仮設建物	対象外
	仮設建物	1720	屋外利用地・仮設建物	対象外
用途不明地	用途不明建物(1)	1810	不明	対象外
	用途不明建物(2)	1820	不明	対象外
都市運営施設地区	道路施設	1910	－※1	対象外
	鉄道施設	1920	倉庫運輸関係施設	対象外
	埠頭施設	1931	倉庫運輸関係施設	対象外
	船客ターミナル施設	1932	倉庫運輸関係施設	対象外
	航空施設	1940	倉庫運輸関係施設	対象外
	一般駐車施設	1951	倉庫運輸関係施設	対象外
	駐輪施設	1952	倉庫運輸関係施設	対象外
	バス施設	1953	倉庫運輸関係施設	対象外
	倉庫	1954	倉庫運輸関係施設	対象外
	物流施設	1955	倉庫運輸関係施設	対象外
	供給施設	1961	供給処理施設	対象外
	処理施設	1962	供給処理施設	対象外
農業・漁業用地	農業施設	3110	農林漁業施設	対象外
	漁業施設	3120	農林漁業施設	対象外
複合施設(商業系)	商業・業務系複合施設	4350	－※1	各階層の用途に応じて設定
	業務・商業・住居系複合施設	4360	－※1	各階層の用途に応じて設定
複合施設(工業系)	工住複合施設	4420	－※1	各階層の用途に応じて設定
複合施設(公共系)	公共系複合施設	4690	－※1	事務所
複合施設(公共住居系)	公住複合施設	4700	－※1	各階層の用途に応じて設定

※1：東京都 GIS に直接対応する用途なし
※2：各階層の用途が全て併用用途の場合は 1F 分商業建物、2F 戸建住宅とする
※3：各階層の用途が全て併用用途の場合は 1F 分事務所、2F 戸建住宅とする

表３３　地域冷暖房計画区域の熱源システムおよび供給延床面積

区域番号	区域名称（東京都[1]）	事業所名（(社)日本熱供給事業協会）	タイプ	供給面積[2]（千㎡）
1	西新宿	新宿新都心	C	2,223
2	丸の内二丁目	丸の内二丁目	B	712
3	大手町	大手町	D	1,925
4	東池袋	東池袋	D	616
5	青山	青山	B	214
6	内幸町	内幸町	D	874
7	赤坂	赤坂	B	128
9	東銀座	東銀座	B	113
10	品川八潮	品川八潮団地	B	408
11	光が丘	光が丘団地	F	994
12	芝浦	芝浦	A	400
13	西新宿六丁目	西新宿	H	614
14	銀座二・三丁目	銀座2・3丁目	G	44
15	丸の内一丁目	丸の内一丁目	B	386
16	西池袋	西池袋	D	428
17	新川	新川	G	204
18	日比谷	日比谷	G	239
19	赤坂六本木	赤坂・六本木アークヒルズ	D	430
20	神田駿河台	神田駿河台	G	185
21	芝浦四丁目	芝浦4丁目	G	249
22	銀座五・六丁目	銀座5・6丁目	G	77
23	霞ヶ関三丁目	霞ヶ関三丁目	B	319
24	八重洲日本橋	八重洲日本橋	B	150
25	箱崎	箱崎	H	280
26	西新宿一丁目	西新宿一丁目	B	358
27	紀尾井町	紀尾井町	B	100
28	南大井六丁目	南大井6丁目	D	158
29	東品川二丁目	天王洲	D	494
30	竹芝	竹芝	F	226
32	蒲田五丁目	蒲田駅東口	B	52
33	北青山二丁目	北青山二丁目	F	141
34	銀座四丁目	銀座四丁目	B	63
35	明石町	明石町	A	266
37	虎ノ門四丁目	虎ノ門四丁目城山	D	168
38	有楽町	有楽町	B	677
39	歌舞伎町	新宿歌舞伎町	C	83
40	用賀四丁目	用賀四丁目	D	82
41	恵比寿	恵比寿	A	391
42	赤坂五丁目	赤坂五丁目	C	117
43	初台淀橋	初台・淀橋	E	397
45	東京国際フォーラム	東京国際フォーラム	C	212
46	錦糸町駅北口	錦糸町駅北口	F	253
47	京橋2丁目	事業所登録なし	H	51
48	後楽一丁目	後楽1丁目	H	295
49	西新宿六丁目西部	西新宿六丁目西部	H	89
50	新宿南口西	新宿南口西	F	365
51	新宿3丁目東	事業所登録なし(未建設)	計画中	－
52	本駒込二丁目	本駒込2丁目	G	150
54	広尾一丁目	広尾一丁目	B	74
55	臨海副都心	東京臨海副都心	F	1,687
56	田町駅東口	事業所登録なし	B	162
57	新宿南口東	新宿南口東	E	228
58	大崎一丁目	大崎1丁目	G	299
59	虎ノ門二丁目	虎ノ門二丁目	B	187
60	品川東口南	品川東口南	E	337
61	永田町二丁目	永田町二丁目	F	251
62	蒲田五丁目東	蒲田五丁目東	A	127
63	晴海一丁目	晴海アイランド	G	415
64	渋谷道玄坂	渋谷道玄坂	E	127
65	六本木1丁目	事業所登録なし	F	不明
66	汐溜北	汐溜北	C	720
67	品川駅東口	品川駅東口	C	595
68	新砂三丁目	事業所登録なし	B	50
69	東品川四丁目	東品川四丁目	A	363
70	六本木六丁目	六本木ヒルズ	A	727
71	キャノン下丸子本社	事業所登録なし	C	不明
72	北千住駅西口	事業所登録なし(未建設)	E	－
73	赤坂九丁目	事業所登録なし(未建設)	計画中	－
74	豊洲三丁目	事業所登録なし(未建設)	計画中	－

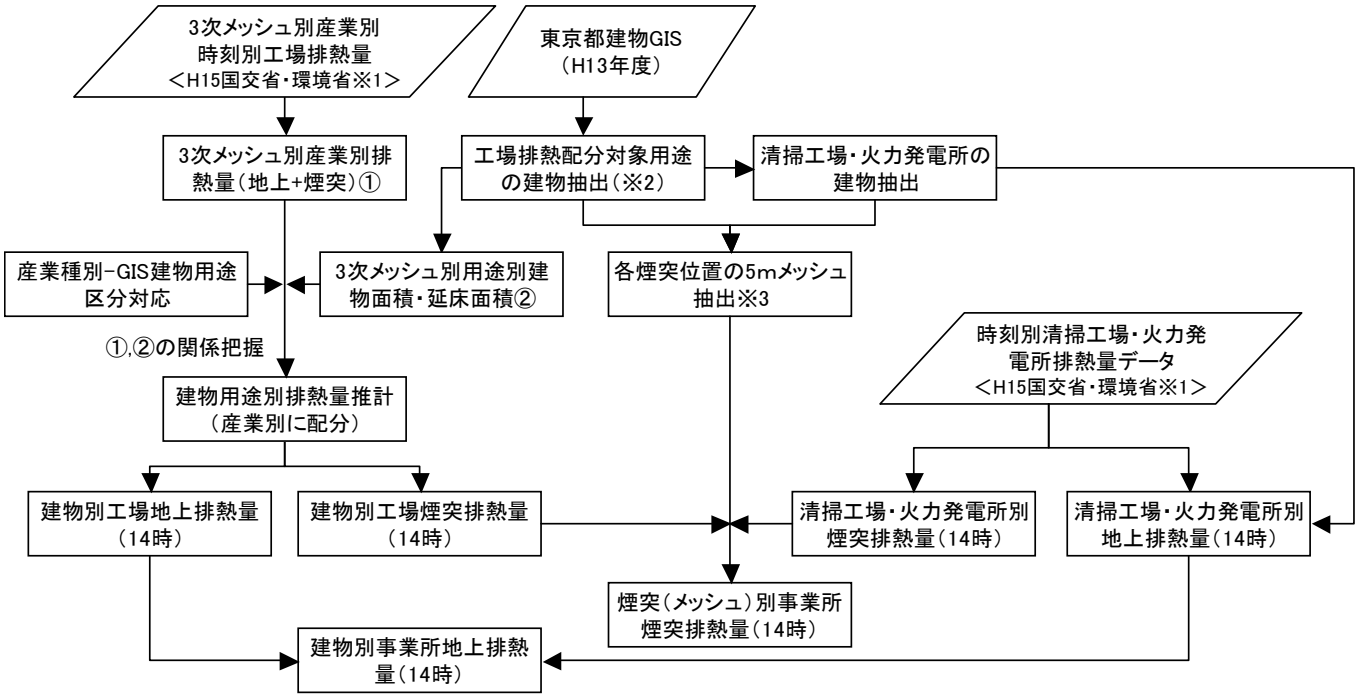
1）東京都地域冷暖房計画区域一覧（平成16年3月）
2）出典：「熱供給事業便覧平成16年度版」（社）日本熱供給事業協会　ほか

４．６．６　工場からの排熱

3 次メッシュ別の工場排熱データや清掃工場・火力発電所毎の排熱データを活用して、図４０の流れで建物各棟に人工排熱（顕熱、潜熱）を配分した。清掃工場・火力発電所については、東京都GISの建物データから該当する各建物を抽出した。各事業所の煙突については、東京都GISデータでは捉えられていないため、航空写真等により位置および形状を把握して別途オブジェクトを作成した。また、各事業所について煙突高さについての調査を行った。そして、各事業所の排熱データを建物各棟に与えた上で、地上排熱（燃焼炉近傍の排熱）については、各棟の屋上面位置のセルに配分し、煙突排熱については煙突頂部位置のセルに配分した。煙突側壁からの熱の散逸は無視した。

その他の工場（事業所）からの排熱については、東京都 GIS の建物データを用い、前出の既往調査による3次メッシュ別産業種別毎の排熱を当該3次メッシュ内に存在する対応用途の建物属性（建物面積、延床面積）に応じて各棟に配分し、地上排熱については各棟の屋上面位置のセルに配分し、煙突排熱については煙突頂部位置のセルに配分した。

以上より求めた建物排熱および工場排熱を建物各棟に付与した場合の 14 時の顕熱分布の例について図４１～図４２、潜熱分布の例について図４３～図４４に示す。また、それらの排熱の排出位置について図４５および図４６に示す。



※1：国土交通省・環境省：平成 15 年度 都市における人工排熱制御によるヒートアイランド対策調査報告書、2004.3
※2：小規模なものを除くため、建物面積 100 ㎡以上の建物を抽出（地域冷暖房施設は除く）
※3：煙突の位置・形状データは航空写真を参考にして作成

図４０　事業所排熱（地上、煙突）の推計フロー

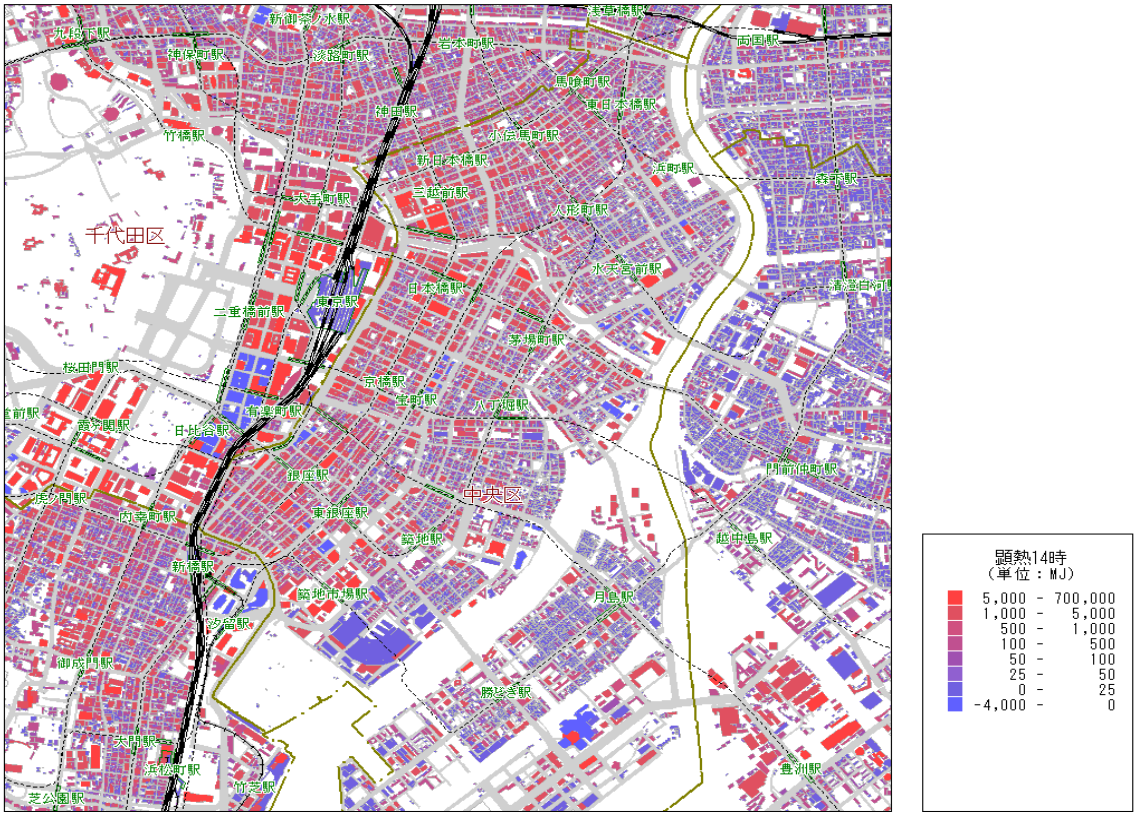


図４１　建物各棟からの顕熱分布例（14 時）その１

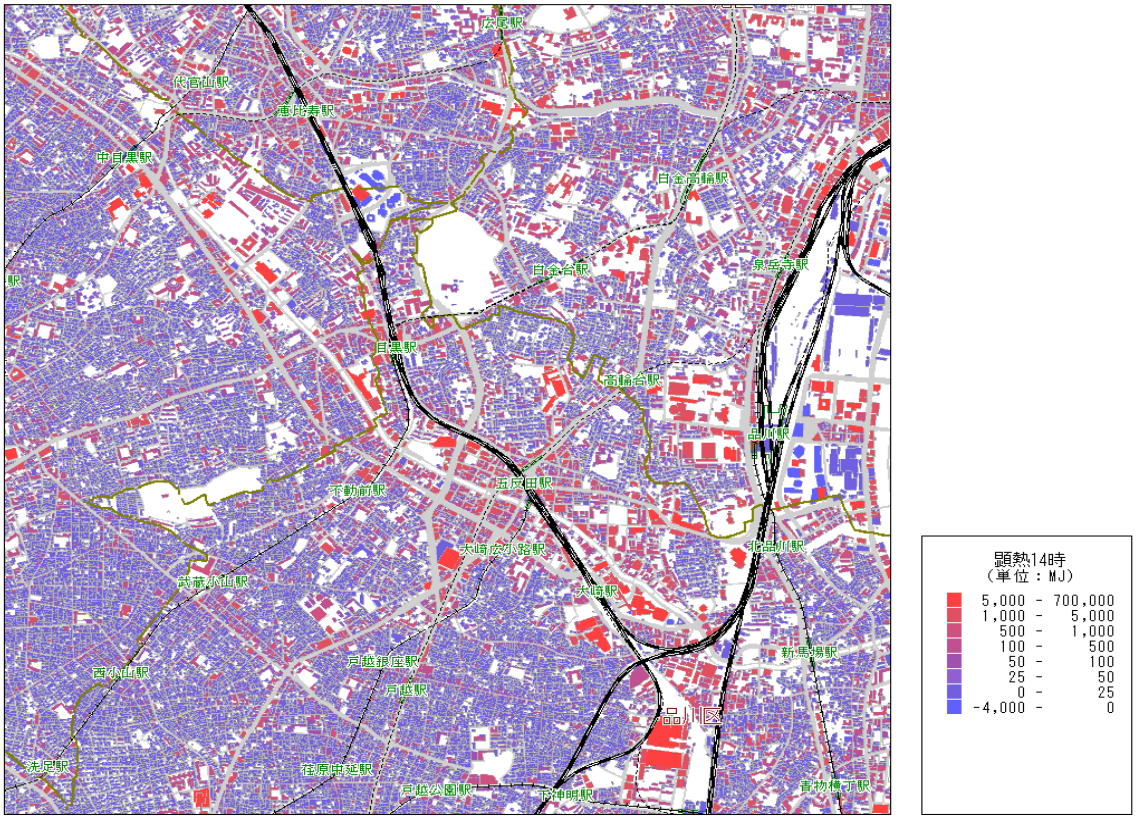


図４２　建物各棟からの顕熱分布例（14 時）その２

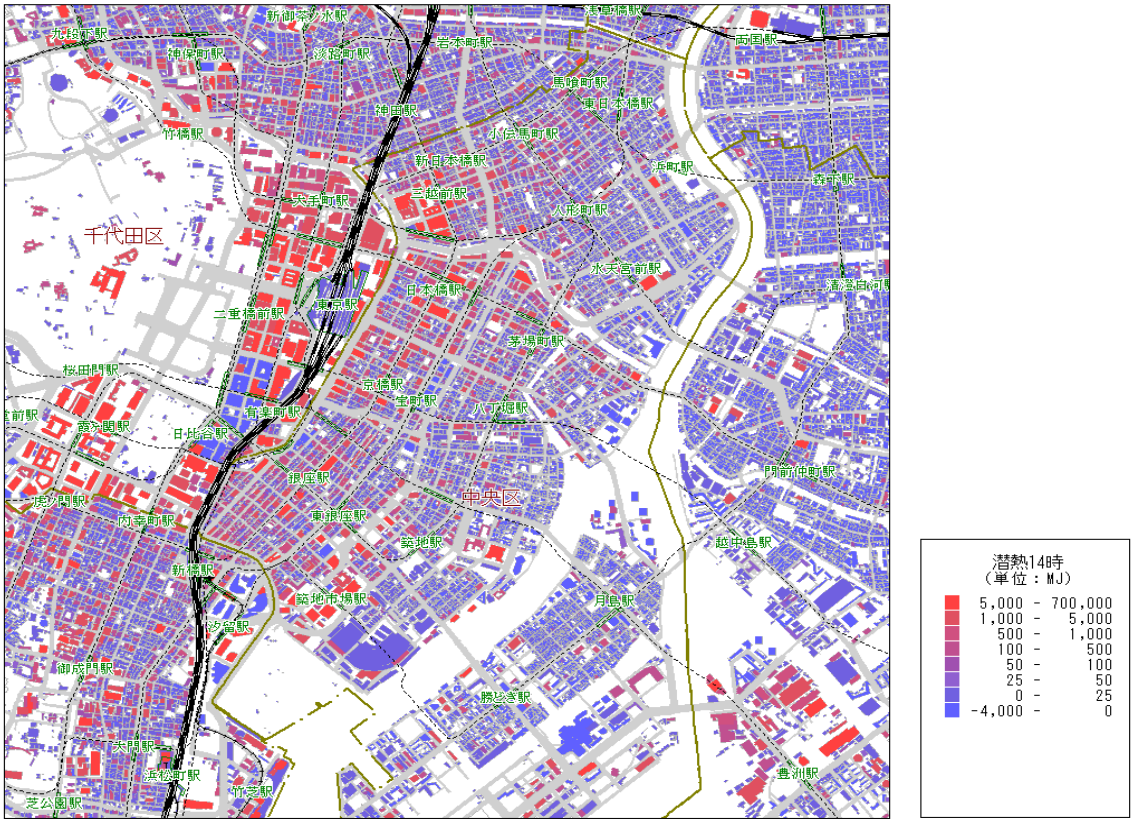


図４３　建物各棟からの潜熱分布例（14 時）その１

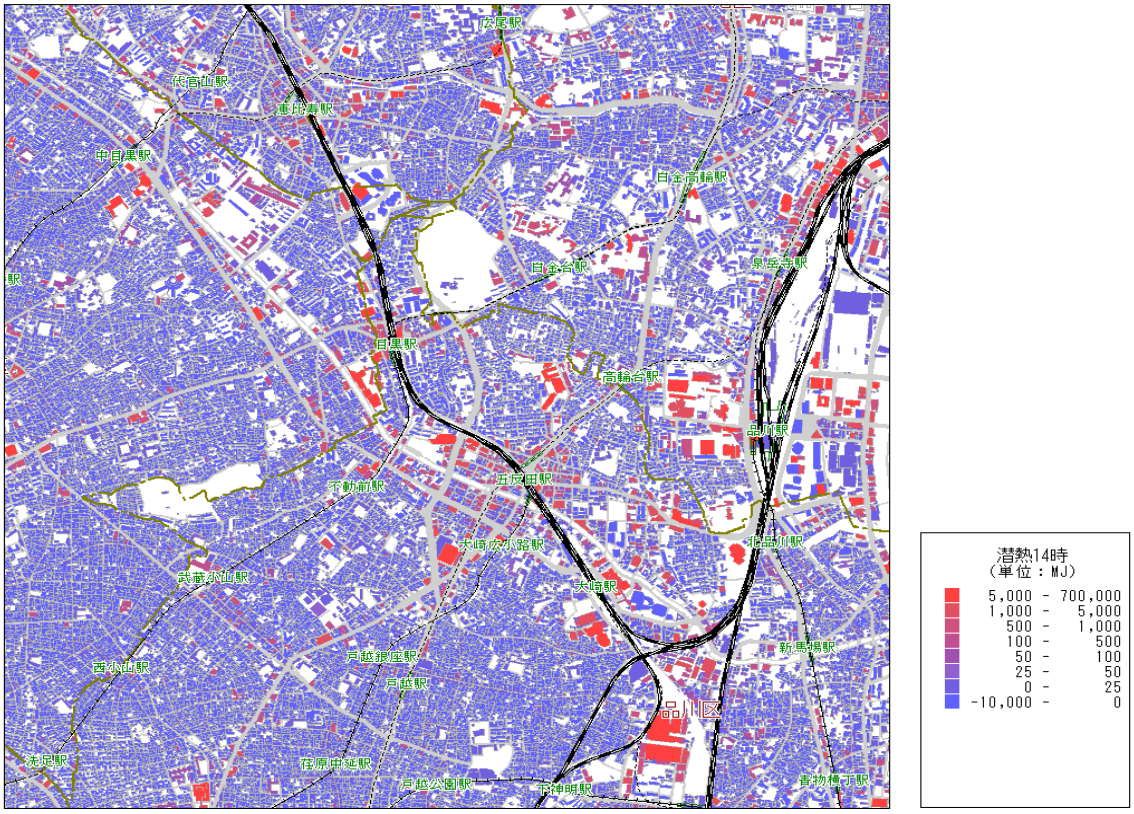


図４４　建物各棟からの潜熱分布例（14 時）その２

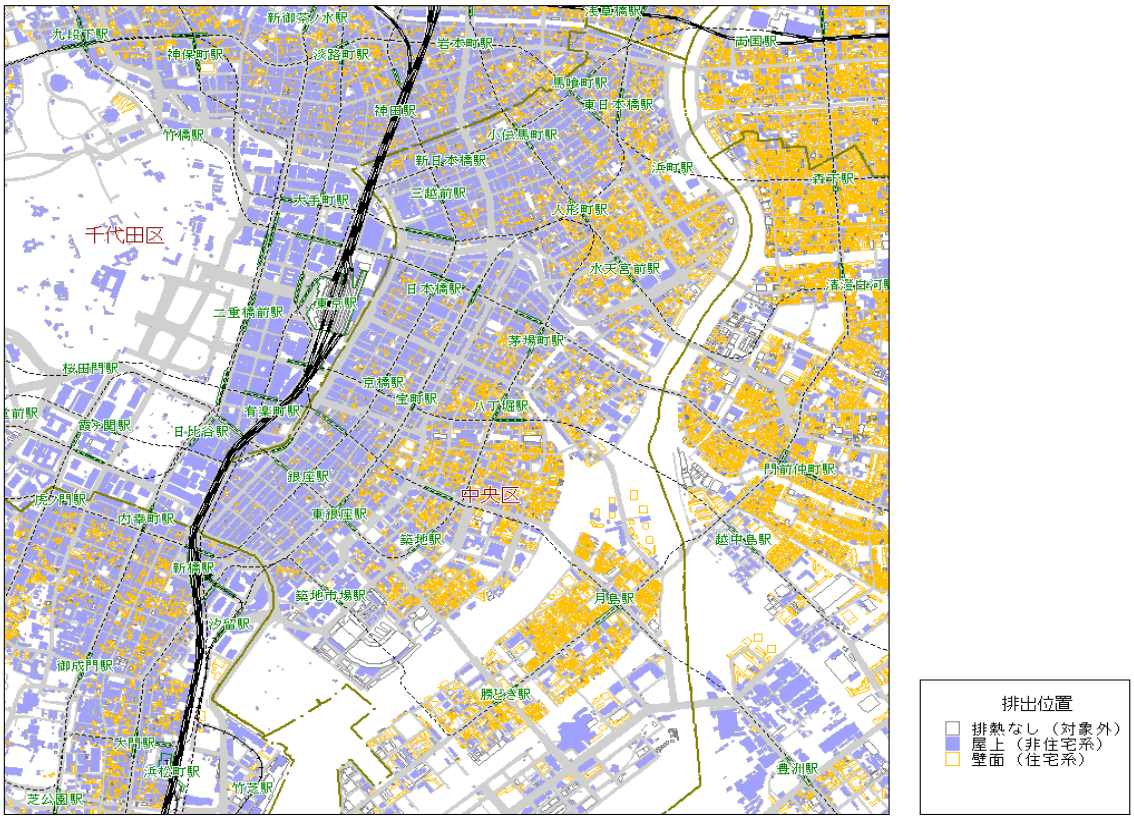


図４５　建物各棟からの排熱の排出位置（その１）

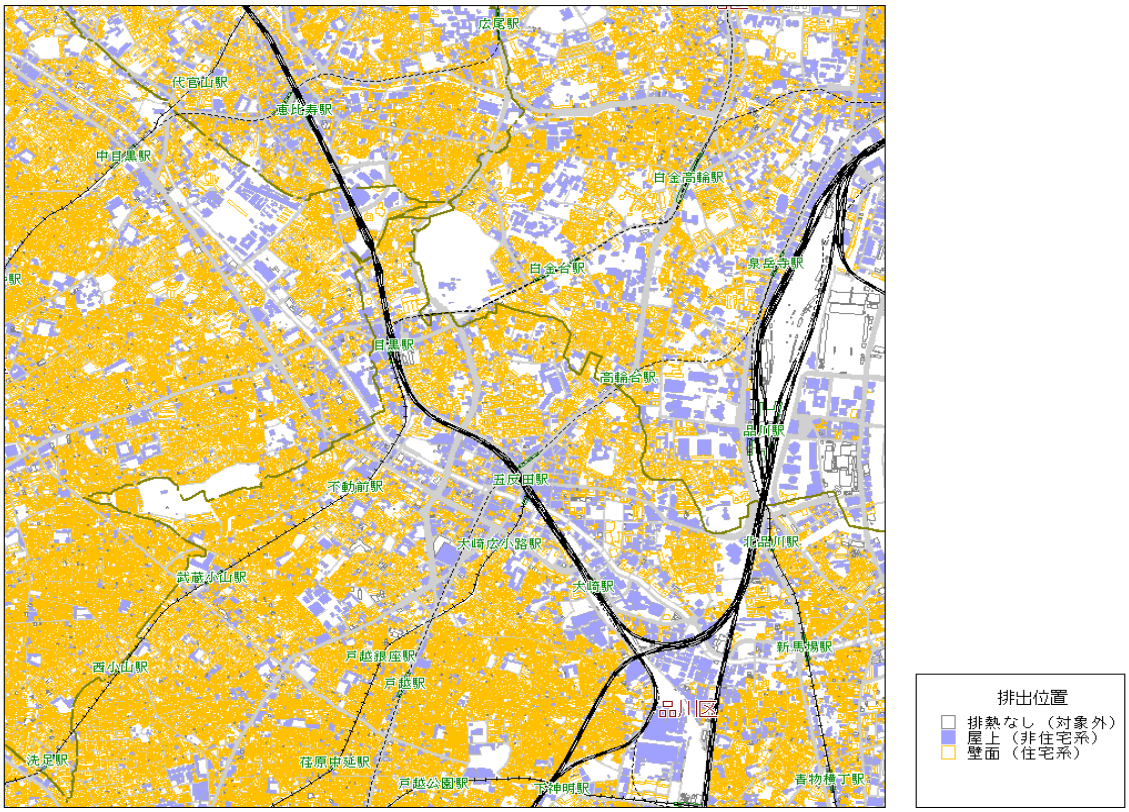


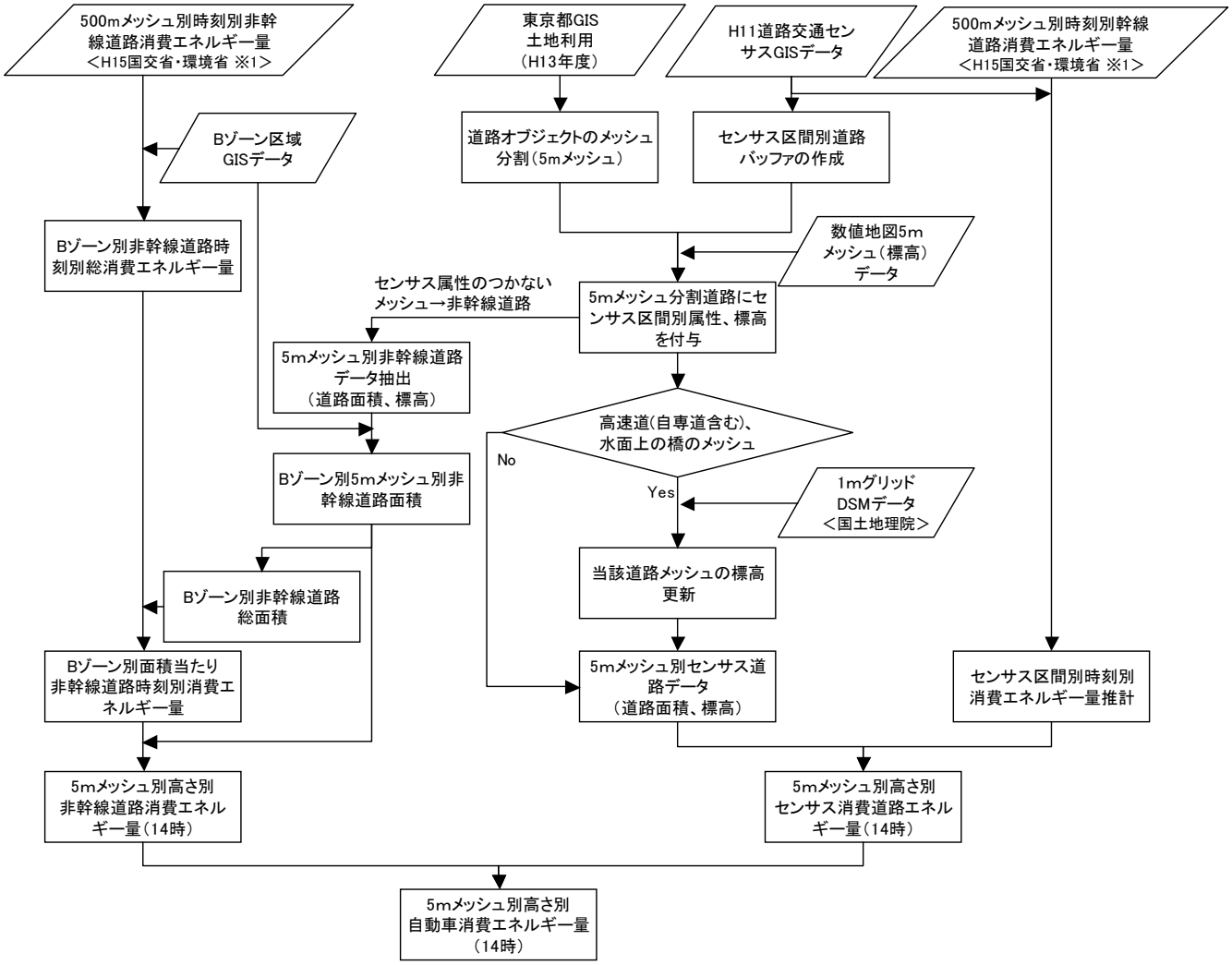
図４６　建物各棟からの排熱の排出位置（その２）

４．６．７　自動車排熱

5m メッシュ別高さ別の自動車走行の消費エネルギーによる 14 時の排熱（顕熱、潜熱）を図４７に示す流れで推計した。時刻別自動車消費エネルギー量（顕熱、潜熱）データを活用して、自動車排熱を次のように推計した。幹線道路は平成11年度道路交通センサス調査道路(センサス道路）の区間別の線形 GIS データと前出の調査による幹線道路（センサス道路）の自動車排熱量データからセンサス区間別の時刻別排熱量（顕熱、潜熱）を求めた。また、非幹線道路は前出の調査による非幹線道路における自動車排熱量データと道路交通センサス調査のＢゾーンの区域オブジェクトにより、Ｂゾーン別の時刻別排熱量（顕熱、潜熱）を求めた。

また、これらの排熱を立体的にメッシュ配分するため、次の方法で 5m メッシュ別高さ別の道路データを作成した。

東京都内については、東京都 GIS の土地利用データ（23 区：平成 13 年度、多摩地域：平成 9 年度）より抽出した道路オブジェクトを 5m メッシュで分割し､5m メッシュ分割道路データを作成した。神奈川県内については横浜市、川崎市の都市計画 GIS（横浜市：平成 9 年度、川崎市：平成 14 年度）の土地利用データから東京都内と同様に 5m メッシュ道路データを作成した。埼玉県、千葉県内については、国土数値情報 2500（空間データ基盤）の道路線および街区区域データを用いて、道路線によるバッファと街区区域（道路部分が抜けた領域）から道路



※1：国土交通省・環境省：平成 15 年度 都市における人工排熱制御によるヒートアイランド対策調査報告書、2004.3

図４７　自動車排熱（消費エネルギーベース）の推計フロー

オブジェクトを作成し､5mメッシュで分割した。

上記の道路メッシュデータにおいて幹線道路と非幹線道路を区分するため、平成 11 年度センサス道路線形の GIS データを用いて、各センサス区間の車道幅員相当(高速:車線数×3.5m、一般道:車線数×3.25m)のバッファオブジェクトを作成し、そのバッファに含まれる道路メッシュを抽出してセンサス区間の属性を与え、区間属性が付与された道路メッシュを幹線道路とし、残りの道路メッシュは全て非幹線道路として設定した。

路面高さについては、東京 23 区内は国土地理院の数値地図 5mメッシュ標高データ、その他の地域は数値地図 50mメッシュ標高データにより与えた。なお、数値地図 5m メッシュ標高データの標高値は、首都高速等の高架橋位置では橋下の地盤面の高さ、渡河橋位置では水面のため高さはエラー値となっている。そこで、これらの位置のメッシュについては、概ね 1mグリッドで地表面や建物の凹凸を把握できる国土地理院提供の航空機レーザー測量データ(1mグリッド DSM)を利用して、最上位の路面高さを付与した。図４８および図４９に 5m メッシュ別の路面高さ(自動車排熱高さ)分布を示す。

そして、幹線道路については、前述のセンサス区間毎の自動車排熱量データとセンサス道路メッシュデータ(道路面積、高さ)により、センサス区間毎の顕熱、潜熱(14 時)を当該センサス区間の道路メッシュに道路面積に応じて配分し、5m メッシュ別高さ別の顕熱、潜熱(14 時)を求めた。非幹線道路については、前述の B ゾーン別の非幹線道路からの自動車排熱量および B ゾーン別に集計した非幹線道路メッシュ面積より、B ゾーン毎に単位道路面積当たりの排熱量を求め、各々の非幹線道路メッシュ面積に応じて排熱を配分し､5m メッシュ別非幹線道路からの顕熱、潜熱(14 時)を推計した。最終的には両者を合算し､5m メッシュ別高さ別自動車顕熱、潜熱(14 時)を求めた。

図５０と図５１に 5m メッシュ別の自動車からの顕熱(14 時)の例を示す。

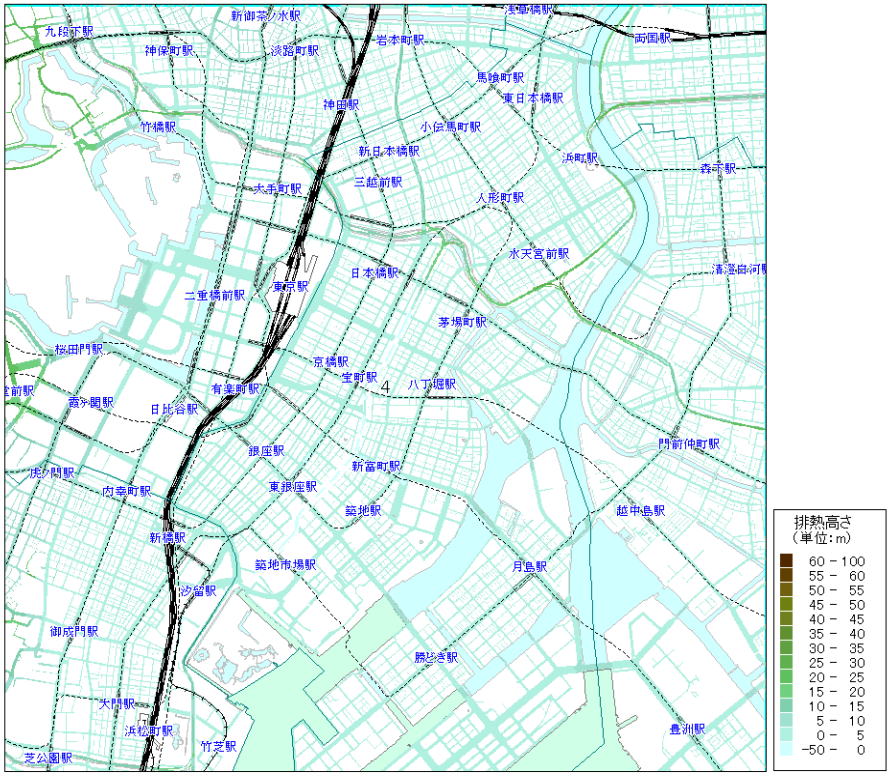


図４８　5mメッシュ別路面高さ（自動車排熱高さ）の例

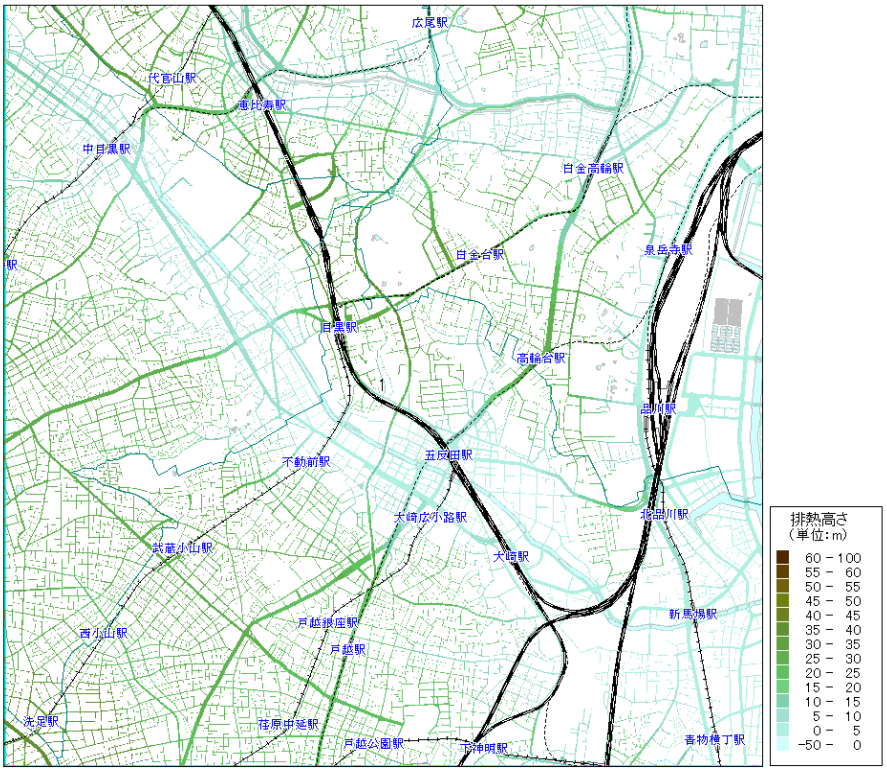


図４９　5mメッシュ別路面高さ（自動車排熱高さ）の例

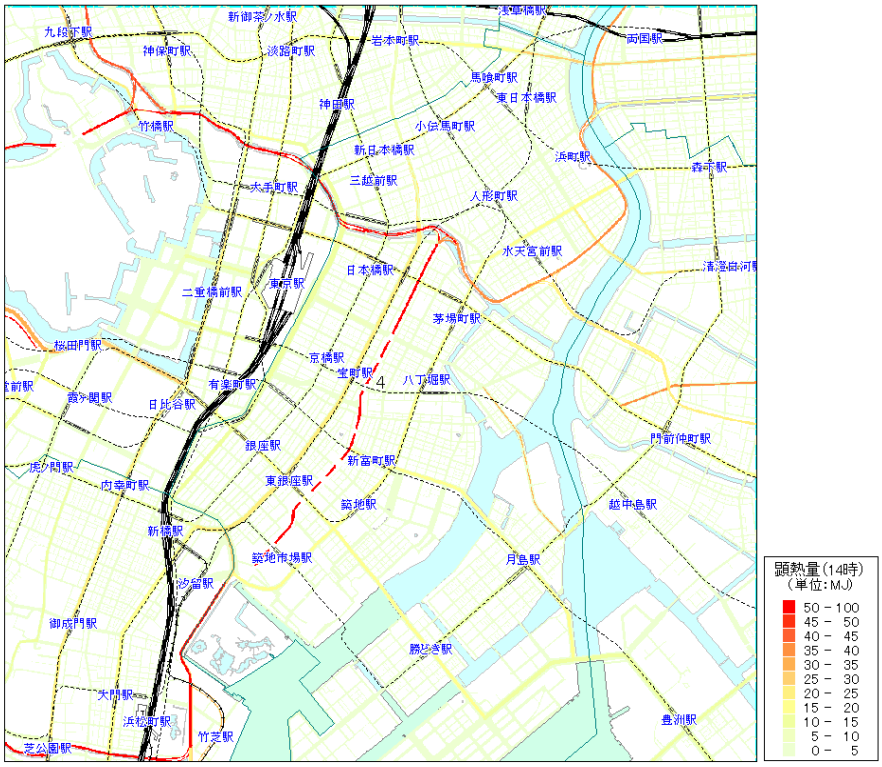


図５０　5mメッシュ別の自動車顕熱（14時）の例

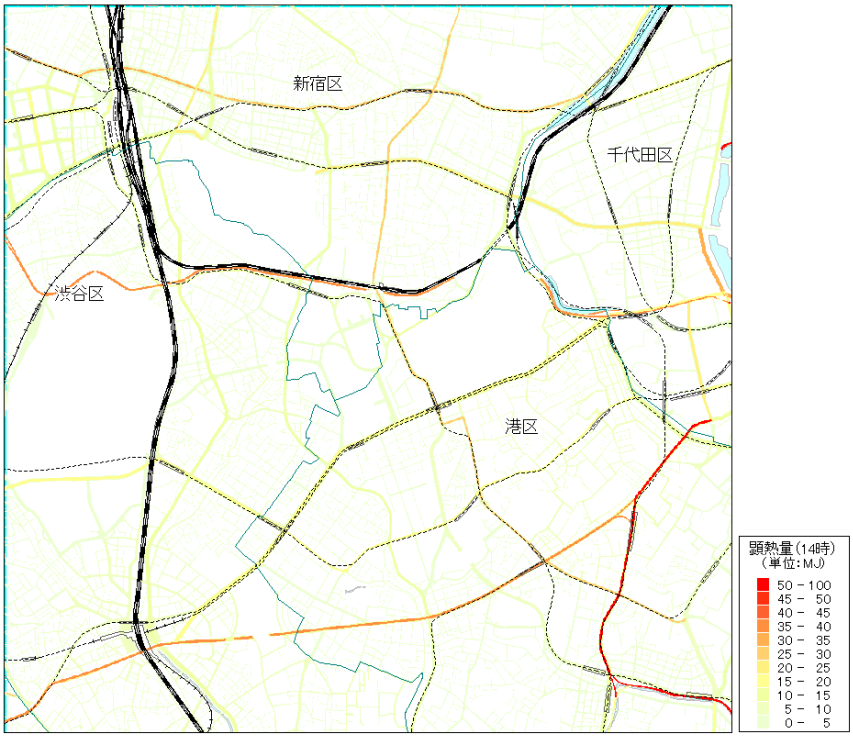


図５１　5mメッシュ別の自動車顕熱（14時）の例

４．６．８　メッシュ別人工排熱の例

前項までに求めた建物（地域冷暖房施設を含む）、工場、自動車からの排熱を合計した 5m メッシュ別高さ別の人工排熱データを任意の水平面、鉛直面について描画した事例を示す。

図５２と図５３に地盤面直上もしくは地盤面を含む解析セルに与えた人工排熱（顕熱 14 時）の水平分布を例示する。なお、水平面については地形の凹凸による影響を除くため、地盤面からの相対高さに変換して描画している。

図５４に示す断面について人工排熱の設定状況を述べる。対象にしたのは総延長 5km の領域である。この領域を西から 1km 毎に(1)～(5)の 5 領域について分割し、それぞれの鉛直断面における人工排熱（顕熱 14 時）の例について図５５～５９に示す。

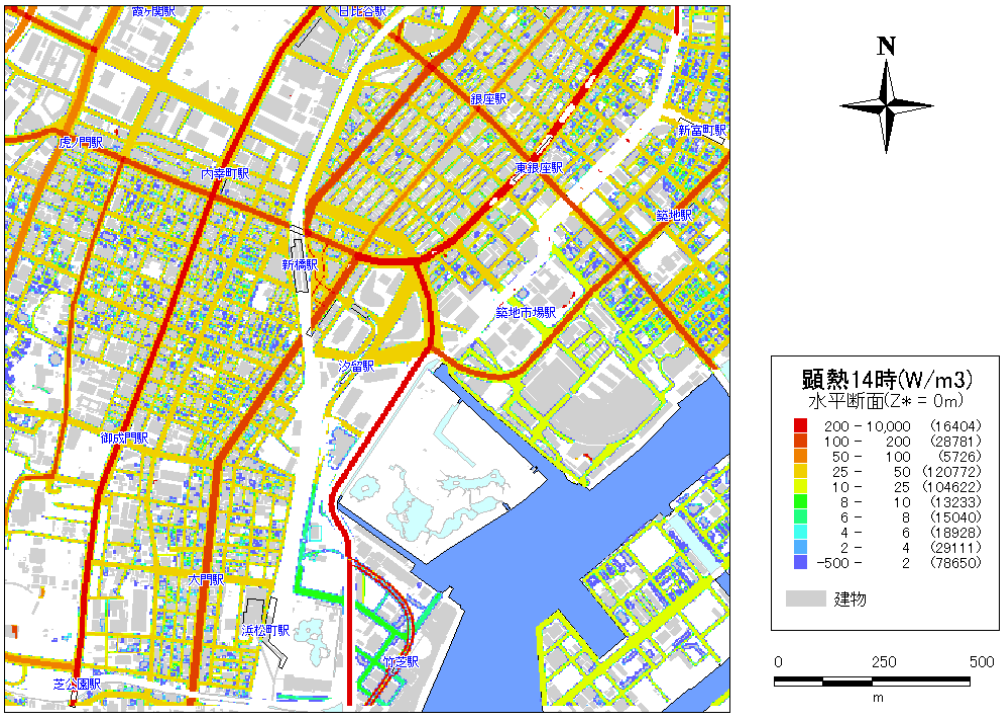


図５２　地表面近傍における人工排熱（顕熱 14 時）の例

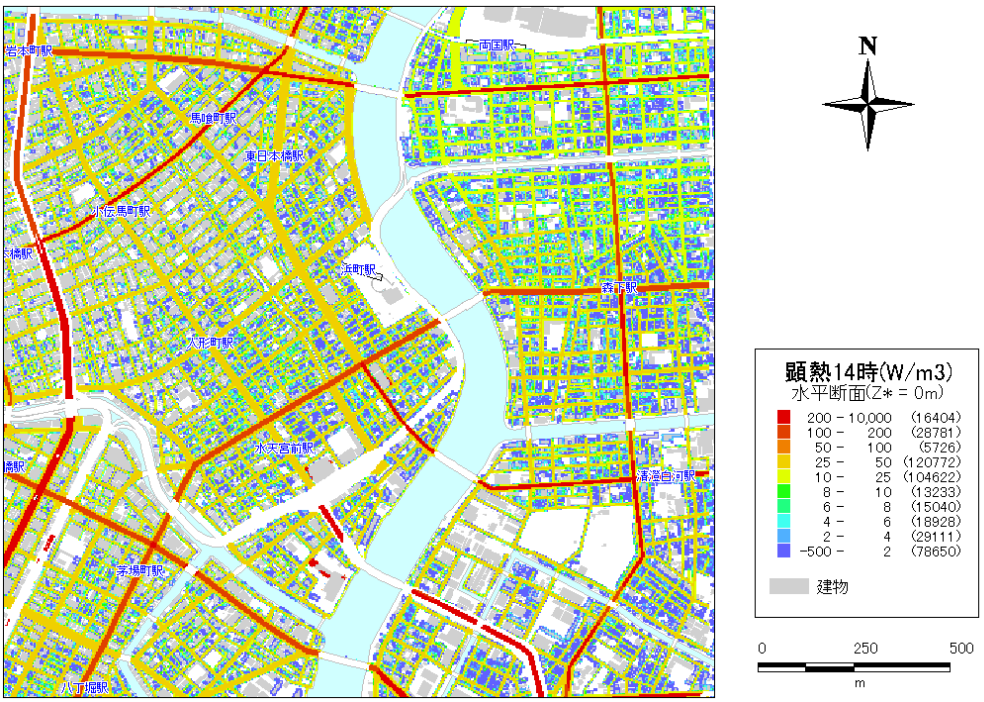


図５３　地表面近傍における人工排熱（顕熱 14 時）の例

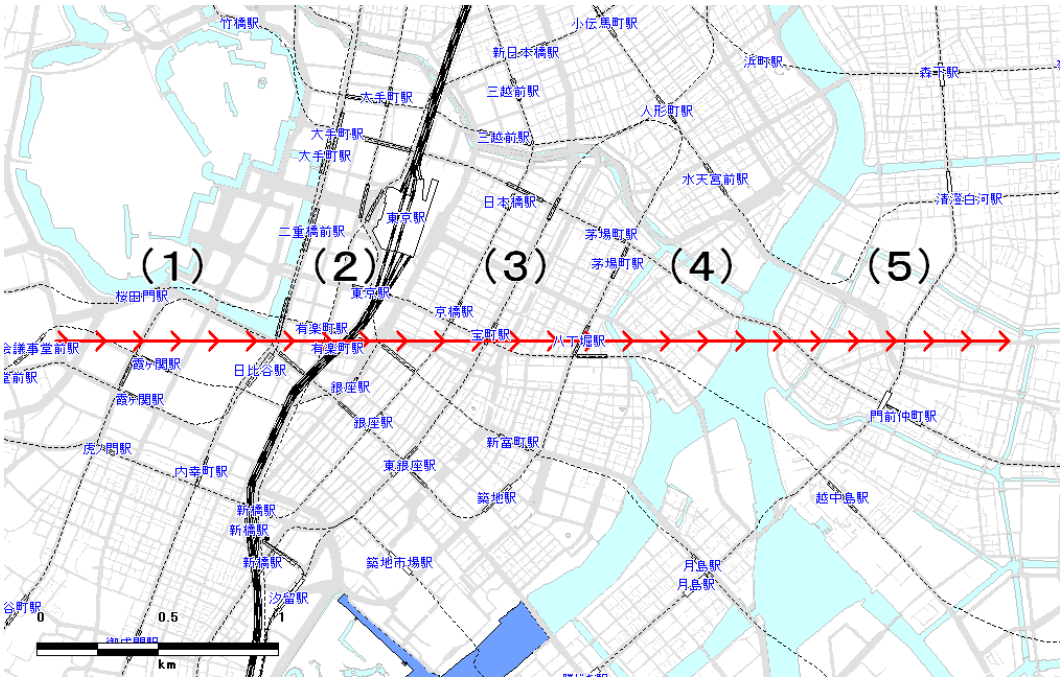


図５４　断面位置

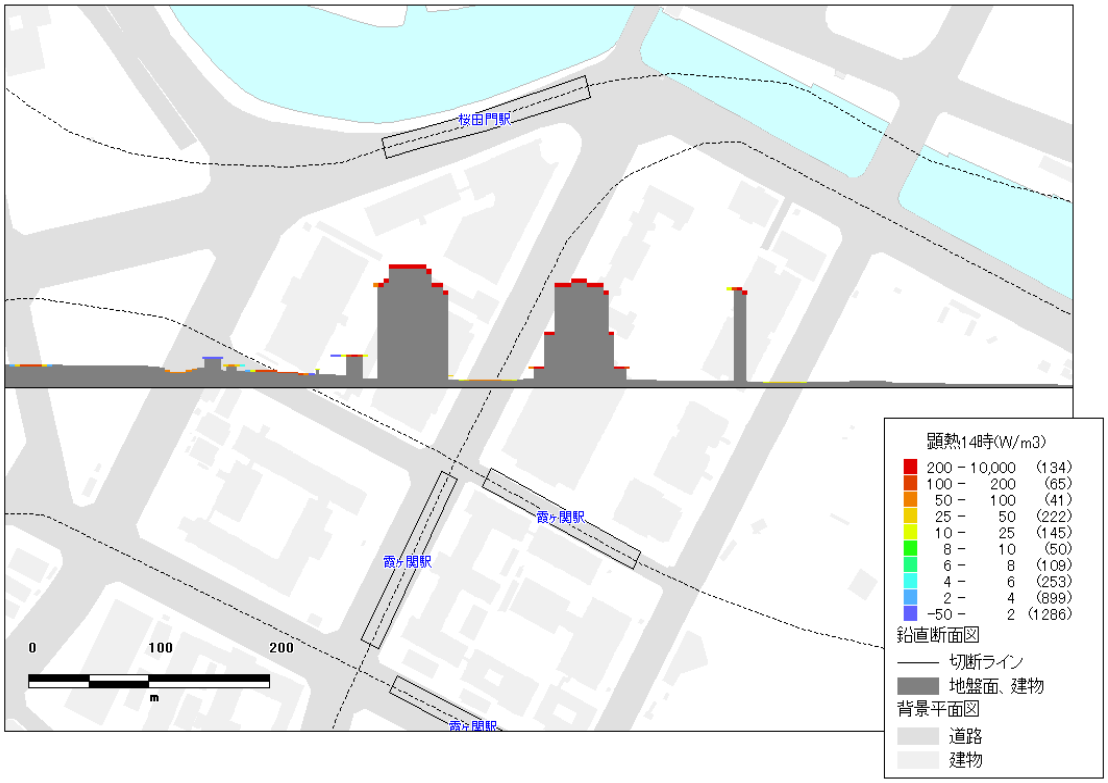


図５５　5m メッシュ別人工排熱量（顕熱 14 時）の例（西→東方向の鉛直断面）(1)

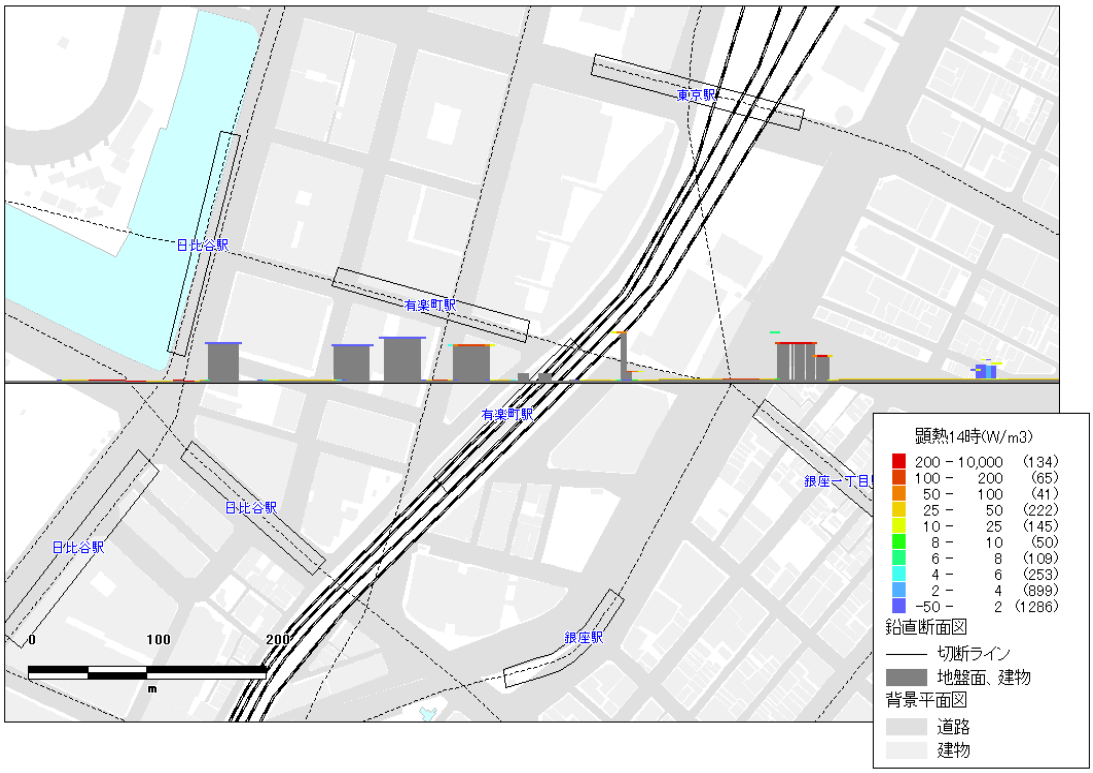


図５６　5m メッシュ別人工排熱量（顕熱 14 時）の例（西→東方向の鉛直断面）(2)

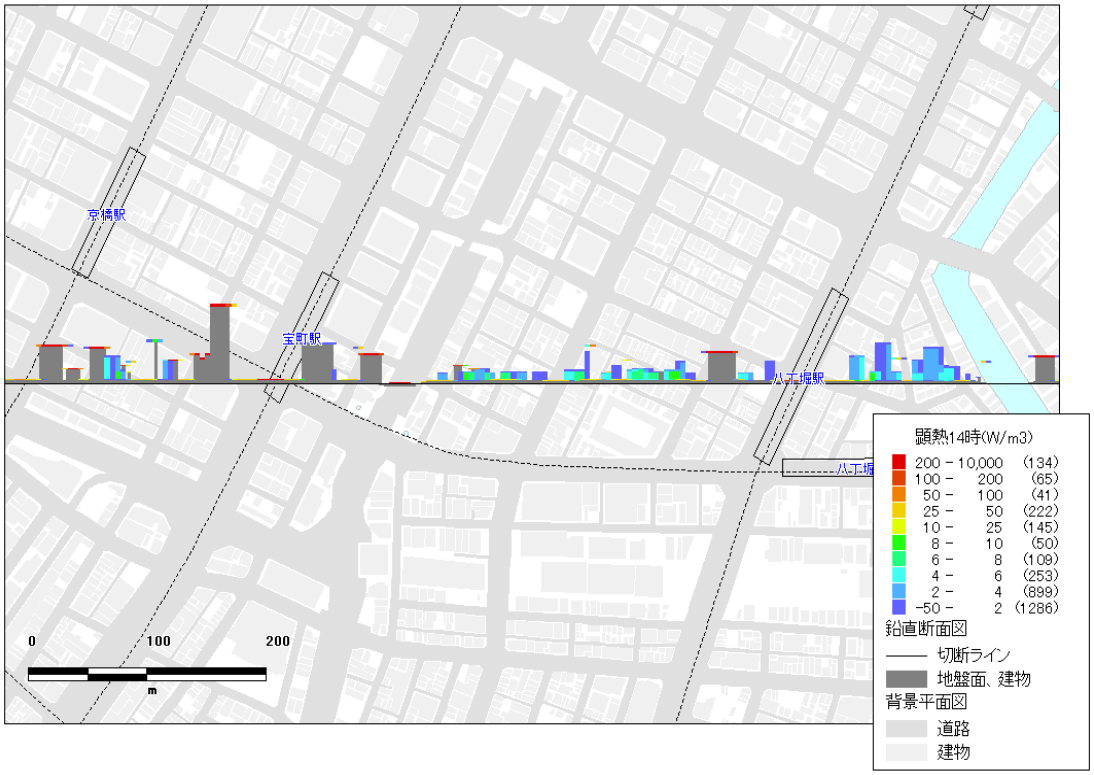


図５７　5m メッシュ別人工排熱量（顕熱 14 時）の例（西→東方向の鉛直断面）(3)

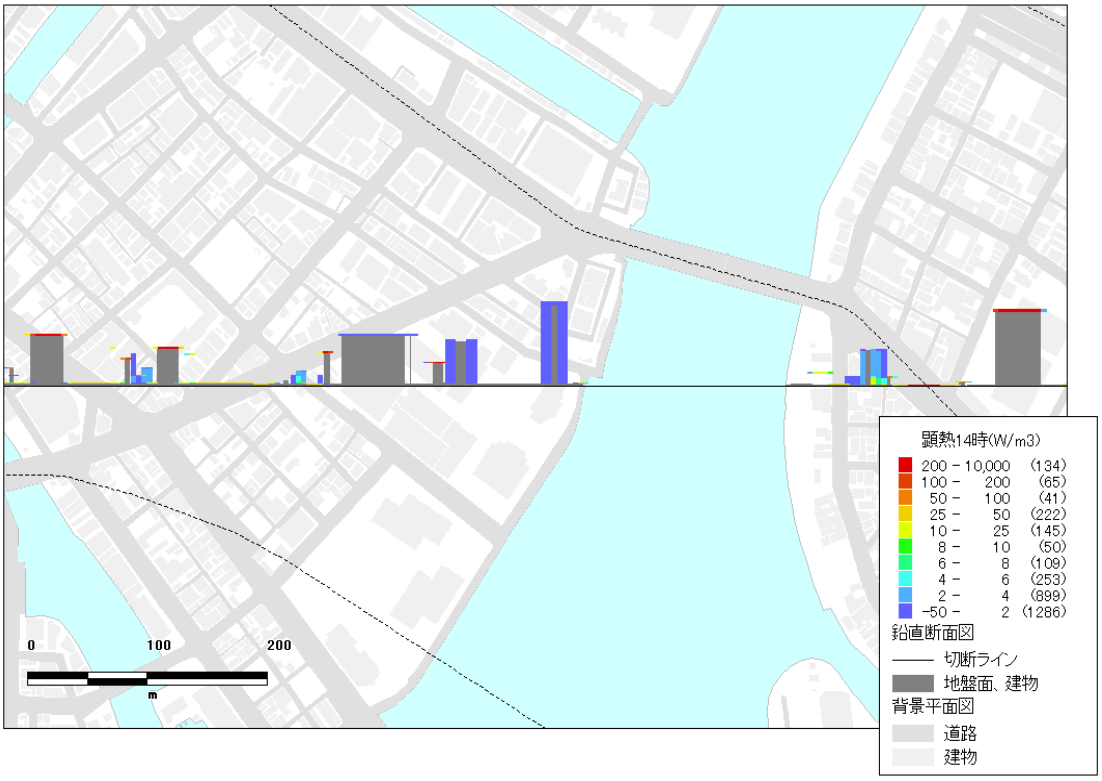


図５８　5m メッシュ別人工排熱量（顕熱 14 時）の例（西→東方向の鉛直断面）(4)

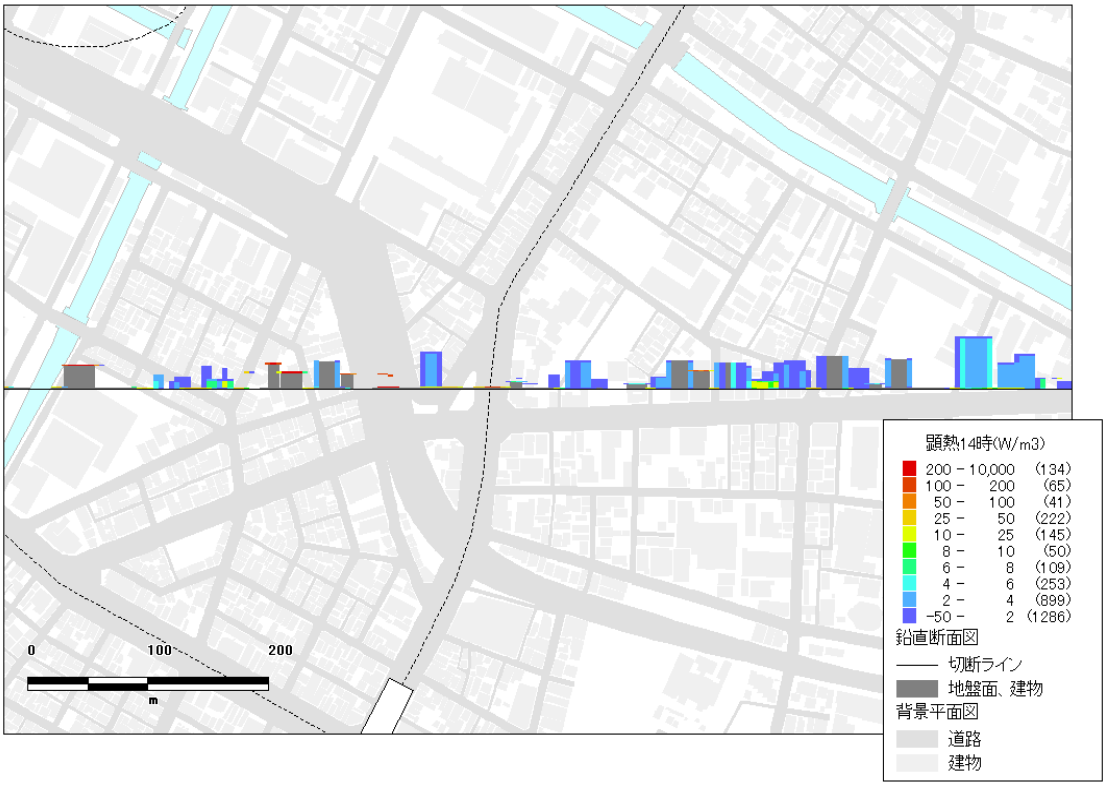


図５９　5m メッシュ別人工排熱量（顕熱 14 時）の例（西→東方向の鉛直断面）(5)

５　東京 23 区全域を対象にした気温、風速分布の大規模数値解析

５．１　概要

５．１．１　解析領域

図６０は解析領域を示したものである。CFD の解析領域をパネル（ｃ）において標高の分布と共に表す。CFD 解析の対象領域は、東京 23 区全域を含む 33km 四方であり、周縁に東京都内市部、神奈川県、埼玉県、千葉県、東京湾の一部を含む。日本平面直角座標第Ⅸ系(世界測地系)では次に示す範囲である。

Ｙ座標値(東西方向)：-25,000m～8,000m

Ｘ座標値(南北方向):-52,500m～-19,500m

また、鉛直方向には標高 0m～500m の解析領域を設定している。

実際の解析で使用した領域は 33ｋｍ四方の領域に対して東西南北に袖領域を設定している。袖領域を設定したのは、境界付近において建物が存在する場合、体積占有率が小さくなり、メソスケール解析結果から風速を境界値に与えると連続の式との関係より風速の計算値が境界付近において過大になる恐れがあるからである。袖領域は東西南北にそれぞれ 1500m ずつとし、袖領域の標高は 33ｋｍ四方の境界付近の標高を用いて地面が連続するよう均一に設定し、地表面は断熱、断湿とした。

袖領域を含めた全体の解析領域は 36000m ×36000m×500m、格子数 7200×7200×100 である。格子の総数は 51.84 億（ただし、袖領域および地盤・建物の占有部分を含む）であり、著者の知る限り都市環境問題の数値解析としては世界最大規模である。

CFD の解析領域(パネル(ｃ))の周辺状況は、メソスケールモデルの解析領域と共に同図のパネル（ａ)、(ｂ）に示してある。

５．１．２　解析の流れ

今回の解析における全体の流れを図６１に示す。現状もしくは開発計画に即したメッシュデータおよび境界条件を整備して解析プログラムの入力とし、気温、風等の環境要素を出力する仕組みである。本解析システムから得られる環境情報は、都市開発事業者等が地域計画を検討する際の基礎資料になる。

なお、CFD 解析は定常で実施している。その

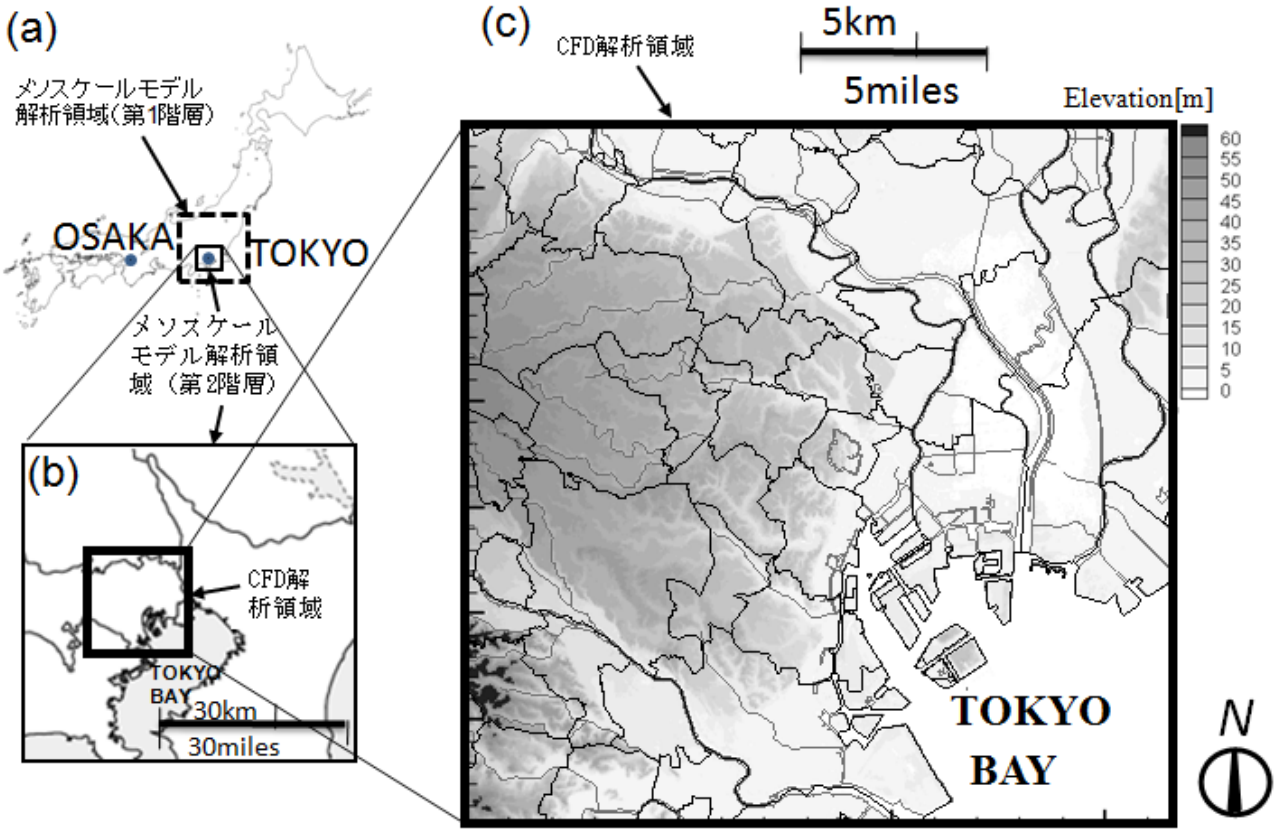


図６０　解析領域

際、上空および側面の境界条件として、気温、風速、圧力などの物理量を知る必要があるが、これらはメソスケールモデルによる1日計算を事前に実施しておき、当該日時の物理量を抽出・補間する。地表面や建物表面の日向日陰は、地盤・建物で形成される3次元都市形状と太陽位置から解析セル毎に判定する。1次元熱伝導非定常モデルから被覆毎、日向日陰毎に表面温度の日変化を求め、当該日時の表面温度を解析セル毎に固定する。

５．１．３　計算の実行

33ｋｍ四方と言う広域を対象とするため、マルチグリッド的な立上げ計算を実施する。

・4倍粗視化ケース：格子幅 20m、格子数 1800

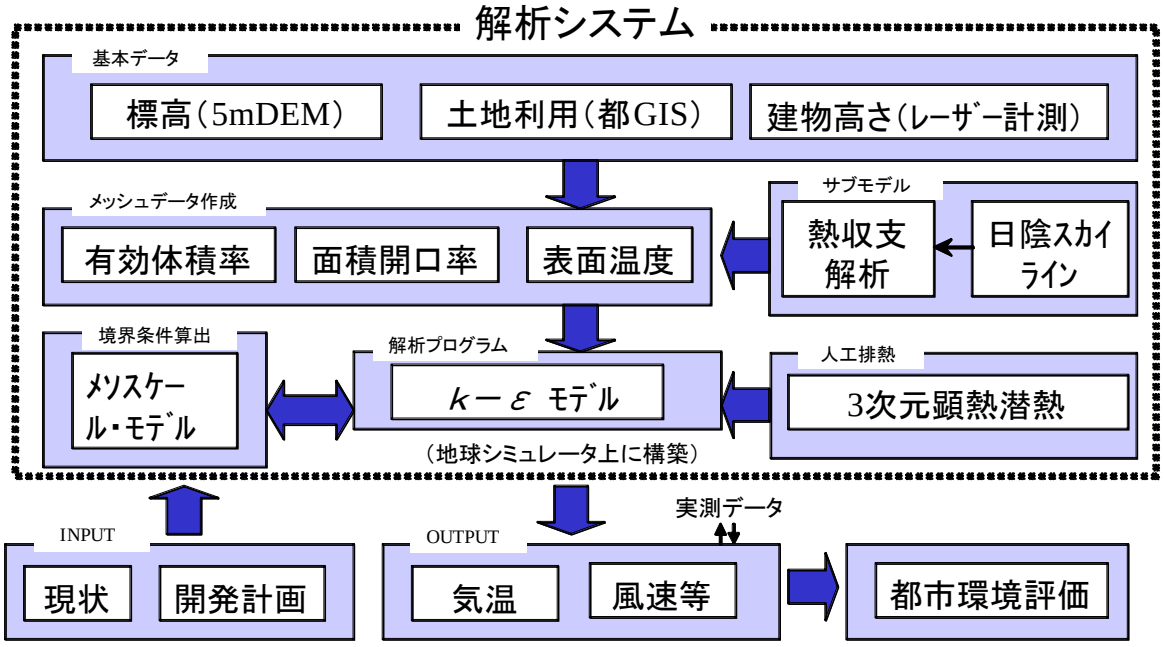


図６１　解析の流れ

表３５　「LOCALS」のモデル構成

基礎式	力学	完全圧縮モデル/非圧縮モデル
	鉛直方向	非静力学モデル/静力学モデル
	水蒸気	水蒸気保存の式
水平座標系		ポーラーステレオ座標、またはX-Y座標
鉛直座標系		地形準拠座標　z *
乱流モデル		MELLOR-YAMADAのLEVEL2.0
地表面温度		地中7層熱伝導モデル(陸上)/強制復元法(海上)の併用
接地境界層		モニン・オブコフの相似則による運動量、熱量、水蒸気量
放射モデル（短波）		雲の散乱・吸収(STEPHENSの方法) オゾンによる吸収(Lacis & Hansen，分布はGREENの関数) 日射の透過率(Kondratyev) 水蒸気による吸収(MaCumber)
放射モデル（長波）		水蒸気の射出率(Atwater) CO2の射出率(Kondratyev)
初期条件		親モデル初期値の空間内挿，各種観測データ
境界条件		Sponge Layer(拡散Damping，Rayleigh Damping)
空間差分		エネルギー保存スキーム(菊池・荒川)
時間差分		Euler-BackwardとImplicit法の併用
降水過程		LinのCOLDRAINモデル

備考　放射モデル(短波)、(長波)は大気部分を扱う。

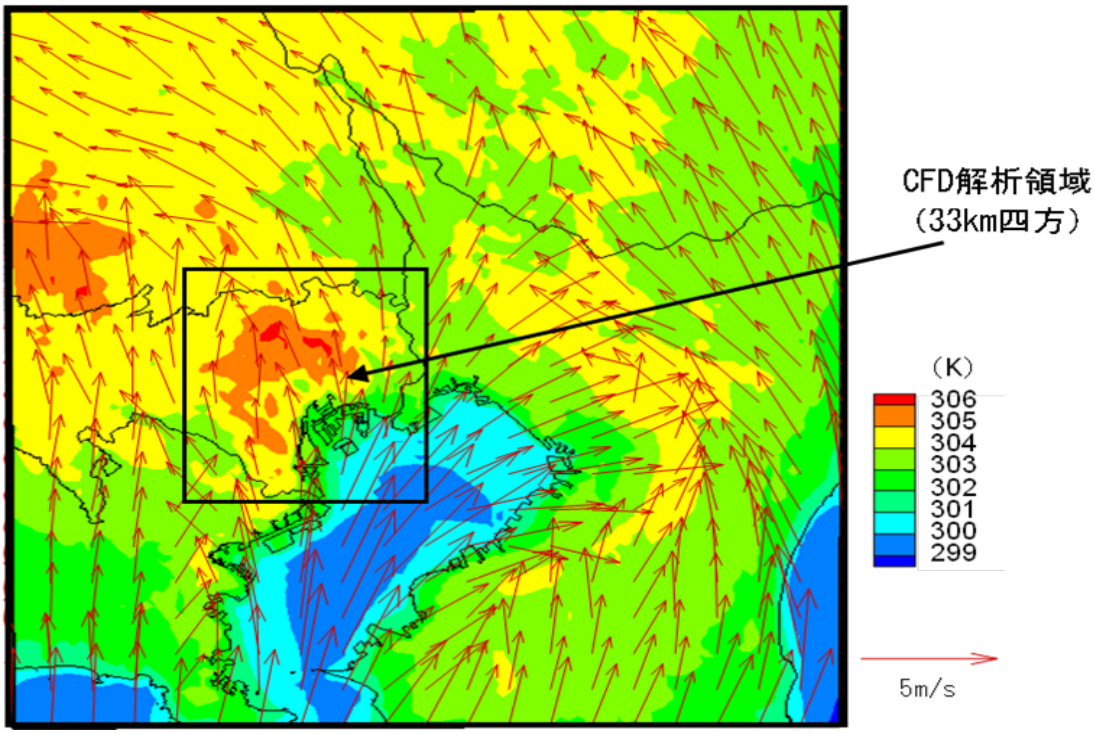


図６２　メソスケール解析結果
2005 年 7 月 31 日 14 時（第 2 階層、地上 10m）

×1800、3000 ステップ
・2 倍粗視化ケース：格子幅 10m、格子数 3600×3600、5500 ステップ

最終段階の計算における計算格子幅、クーラン数、計算ステップは次のように設定する。
・水平格子幅：5m
・鉛直格子幅：地表面第 1 セルを 1m とし、鉛直方向に徐々に拡大した（鉛直格子幅の最大値：10m）。
・クーラン数：5
・計算ステップ数：3100 ステップ

「地球シミュレータ」での使用ノード数は 300 ノード（30PE×80PE＝2400PE）である。計算時間は 16 時間である。

CFD 解析の解析対象日時は 2005 年 7 月 31 日 14 時である。

５．１．４　メソスケール解析

上記の CFD 解析を実施するに当たり、境界条件を与えるためメソスケール解析を実施する。用いた計算ツールは「LOCALS（Local Circulation Assessment and Prediction System)」である。「LOCALS」は伊藤忠テクノソリューションズが開発した局地気象評価予測システムであり、約 2 日先までの気象予測、大気中の物質拡散予測、大気環境アセスメントなどに利用されている[47]。表３５に「LOCALS」のモデル構成を示す。

今回は 2 階層ネスティングによる解析を行っている。第 1 階層は RSM-GPV データを初期値とし、格子間隔 4.5km、水平領域約 300km 四方におけるシミュレーションを実施した。GPV（Grid Point Value）とは気象庁で収集・作成され、（財）気象業務支援センターを通じてほぼリアルタイムでオンライン配信されている気象予報データである。GPV には解像度や地域が異なるいくつかのモデルがあり、その一つである RSM（Regional Spectral Model）は日本領域で緯度 0.2 度、経度 0.25 度の解像度を有する領域モデルである。

第 2 階層は格子間隔 1km、水平領域約 100km 四方であり、第 1 階層の気温、風速、湿度等の計算結果を 1way の境界条件で与えた。図６０（ａ）（ｂ）にメソスケール解析を実施した領域を示す。解析対象日は 2005 年 7 月 29 日から 8 月 6 日までの全 9 日間で関東地方においては夏日が連続する期間であった。

図６２は CFD 解析の対象日時（2005 年 7 月 31 日 14 時）におけるメソスケール解析の結果

を示したものである。

５．２　解析結果

５．２．１　500m メッシュ平均

（１）平面分布

解析結果が膨大であるため、建物を含む詳細な描画は避けて 500m メッシュ平均による分布を検討する。体積占有率を考慮して流体部分について 500m メッシュで平均化を行い、解析領域全体の気温分布を表したのが図６３である。標高の値を参照し、異なる地上高さのデータを抽出・表示している（地上 2m、10m、50m、100m）。地上 2m において陸上では 30～33℃になっているのに対して海上の気温は 27～28℃である。南風が吹いているため、北方に高温域が形成されている。

同様にスカラー風速について図６４に示す。地上 2m の分布を見ると、海上では 5m/s 以上であるのに対して東京 23 区の風速が全体的に 1m/s 以下に低下している。地上 10m では低風速の領域が都心を中心にして現れる。地上 50m、100m においてもその傾向はあまり変わらない。その理由として、建築物の影響が考えられる。

流体の体積占有率の分布について図６５に示す。地上 2m においては、体積占有率が 60%以下になる領域が多いことがわかる。地上 10m では体積占有率は都心を除くとほとんどが 60%以上の値を示す。さらに、地上 50m、100m になると全体的に体積占有率の値が 90%以上になるが、高層建築物が多数存在する都心ではこれより小さい値を示す。荒川添いにおいても都心ほどではないが、高層建築物の影響で若干数値が小さい箇所が見られる。

図６６は比湿の平面分布を表したものである。地上 2m、10m の比湿は海上の値に比べて小さく、特に都心から下流域にかけて比湿が低下している。地上 50m、100m においては海上の値がやや小さくなるが、都心から下流域にかけて比湿が低い傾向は変わっていない。

図６７は鉛直方向の風速の平面分布を表したものである。地上 2m、10m では鉛直方向の風速の値は極めて小さい。地上 50m、100m においては値が高度と共に大きくなり、卓越風に沿って上昇流と下降流が交互に筋状に連なった分布を形成している。

（２）鉛直断面分布

鉛直断面分布について 4 つの断面位置について説明する。具体的には（ａ）Y=-22000～-21500m、（ｂ）Y=-13000～-12500m、（ｃ）Y=-4000～-3500m、（ｄ）Y=5000～5500m である。地盤もしくは建物については白く表示する。図６８は気温の鉛直断面分布を南北方向で示したものである。地域毎の温度境界層の発達状況がわかる。図６９はスカラー風速の鉛直断面分布である。弱風域が地上から上空に形成される場合がある（例えば（ｃ）の X=-32500m 付近）。そのような箇所では温度境界層の発達が大きい。図７０は比湿の鉛直断面分布である。海上付近（低高度）の比湿は比較的高いが、陸上では地上から上空に渡って値が低い。

５．２．２　気温および風速分布の特徴

（１）東京 23 区全域

東京 23 区全域の気温分布を図７１に示す。これは、地上 10m における気温データを間引かずにコンター表示したものであり、建物周辺から地域全体の気温分布が詳細に表現されている。地上 10m の高さに存在する建物は GIS データを用いて薄い灰色で着色されている。この時間帯はほぼ南風が卓越しており、北方の風下になるに従い気温が高くなる。特に、練馬から埼玉にかけて気温が高い。一方、解析領域の右側の臨海部では気温が相対的に低いことがわかる。同様の傾向は観測により確認されている。例えば、図７２は東京都の定点観測網 METROS（Metropolitan Environmental Temperature and Rainfall Observation System；首都圏環境温度・降雨観測システム）による同日同時刻の東京 23 区の気温分布[48]を示したものであり、臨海部では内陸に比べて気温が 1℃程度低い。

気温の計算結果を細かく見ると、部分的に高温な領域が縞状に形成されていることがわかる。この縞状の高温域（thermal stripe）は南北に存在しており、地域の風向に沿って分布している。

（２）5km 四方領域

図７３は、水平の気温分布について 5km 四方領域を拡大して示したものである。thermal stripe は地上 10m、地上 2m 共に見られるが、地上 10m の方がより明確に現れている。そし

て、幹線道路沿いに thermal stripe が形成されていることが注目される。幹線道路では交通量が多く、建物も密集する。そのため、人工排熱が大きく、建物壁による風の遮蔽効果も作用する。これらの要因が地域で集積することにより気温形成に影響したと考えられる。また、太い thermal stripe の周辺には細い thermal stripe が引き寄せられるように存在している。太い thermal stripe の周辺に熱が収束することを意味する。

（３）気温場と風速場の関係

鉛直断面の様子を表したのが図７４である。上昇流と下降流が交互に形成されており、水平方向の渦の大きさは 1～2km である。上昇流が発生する場所の気温は下降流が発生する場所に比べて高い。気温と風速は相互に影響し合っていると言える。通常のメソスケールモデルを用いた解析の場合は、計算格子が粗いためここで示したような循環構造を知ることは難しいと考えられる。

不安定な大気中で水平流れが生じる場合、対流の渦が水平方向に発達して組織流れ（Organized Flow）を形成することがあり、気象分野では水平ロール渦（Horizontal Roll Vortex）と呼ばれており [49]、その概要を図７５に示す [50]。水平ロール渦の存在は卓越風向に沿って上昇流の領域に形成される筋状の雲により可視化される場合がある。しかし、都市域を対象にしたストリーク現象（縞状の分布構造を伴う流れの状態）の観測事例 [51]は少なく、今後の研究蓄積が待たれる。

（４）東京都心臨海部

「地球シミュレータ」による解析結果から東京都心臨海部のデータを抽出して、10km 四方領域における気温、風の状況について述べる。図７６は東京都心臨海部（10km 四方）の建築土地利用を示したものである。この領域における気温、風速の分布を異なる標高で示したのが、それぞれ図７７、図７８である。高層市街地において、弱風域が形成されており、その影響が風下域で見られること、また弱風域において周辺より高温になっている様子がわかる。

５．３　広域 CFD 解析の事例集

「地球シミュレータ」による広域 CFD 解析から、いくつかの地域について計算結果を建物配置や土地利用と共に 3 次元的に描画する。検討対象とした地域と解析結果の概要は以下の通りである。

・ 隅田川（図７９）

（ａ）に隅田川周辺領域の土地利用を示す。（ｂ）では、地面付近の風の場合、蛇行する隅田川に沿って流れている様子がわかる。（ｃ）において河川上の気温は周辺より 1～2℃低くなっている。（ｄ）は隅田川周辺を拡大した土地利用である。気温、風速を示したのが（ｅ）である。建物Ａの周辺にオープンスペースが確保されており、河川からの風が流入した箇所では気温が低下している。

・目黒川（図８０）

（ａ）に目黒川周辺領域の土地利用を示す。（ｂ）ではＶの字状の目黒川において右方（海岸方向）と左方（内陸方向）に分岐して風が流れている。（ｃ）に示す目黒川周辺の気温分布では、河川に沿って低温域が形成されており、河岸に位置する大崎などの市街地で気温が周辺より約 1℃低くなっている。

・皇居（図８１）

皇居周辺の土地利用を（ａ）に示す。（ｂ）では、皇居において右方（有楽町）からの風と左方（国会議事堂）からの風が流入している。赤坂御用地から外苑にオープンスペースが形成されており、風が連続的に流れている。（ｃ）の気温分布において、皇居、赤坂御用地、芝公園などの大規模緑地において周辺の市街地より 2℃程度気温が低い。

・ 汐留・有楽町（図８２）

（ａ）は汐留、有楽町周辺の土地利用である。（ｂ）（ｃ）は地上付近の風速、気温の分布である。隅田川、浜離宮、日比谷公園などの水、緑の空間では気温が低い。また、汐留の超高層ビル群、建物Ｂ（有楽町）の周辺においても緑地と同様に気温が低下している。汐留地区では建ぺい率が低く、海からの風が敷地において流入するため風通しが良い。敷地を通り抜けた風は、汐留周辺の幹線道路や線路上を吹走する風と合流して有楽町に向かう。建物Ｂ（有楽町）

では地上付近において風が周囲に発散しており、ビル壁面において風が吹き下りていることがわかる。その結果、気温が低下している。

（ｄ）（ｅ）は標高約 50m の風速、気温の分布である。汐留の超高層ビル群を迂回する強い流れが生じており、建物高さ制限が設けられている銀座地区の上空を通過して有楽町の方面に向かっている。汐留の高層ビル群の後流域では風速が減衰し、新橋の周辺において気温が1℃程度上昇している。超高層ビル群による気温への影響範囲は約 1km であり、超高層建物の高さの約 5 倍である。

・臨海部のライフライン施設（図８３）

臨海部に位置するライフライン施設周辺の土地利用を（ａ）に示す。（ｂ）（ｃ）は風速、気温の鉛直断面を表したものである。煙突からの排熱によりその箇所の気温上昇が著しいが、地上付近への熱的影響は小さい。一方、建物付近における放熱（人工排熱および対流顕熱）は地上付近の気温場に影響が大きい。

・赤坂・六本木・恵比寿（図８４）

（ａ）は赤坂・六本木・恵比寿の土地利用である。同地域の標高約 90m における風速、気温の状況を（ｂ）（ｃ）に示す。赤坂、恵比寿、渋谷などの密集市街地では風が収束しており、上昇流が生じている。そのような地域では気温が高く、高温域は卓越風に沿って南北方向に存在し、密集市街地から密集市街地に連なるように分布している。建物Ｃについては下降流の領域に位置しており、比較的冷たい風が風上から流れてくる。建物Ｃの周辺土地利用を拡大して示したのが（ｄ）である。（ｅ）の風速、気温の分布図を見ると、周辺に比較して低温であることがわかる。

・ 新宿・渋谷・四谷（図８５）

新宿、渋谷、四谷周辺の土地利用を（ａ）に示す。（ｂ）は同地区の風の流れと気温である。新宿御苑、代々木公園、青山霊園、神宮外苑などのオープンスペースにおいて風通しが良く、風下の市街地に流入している様子がわかる。（ｃ）（ｄ）はその一部を拡大したものである。代々木公園からの風が市街地に入り込み気温を低下させている様子や青山霊園から神宮外苑に通り抜ける風の状況がわかる。新宿の超高層ビル群について（ｅ）（ｆ）（ｇ）に示す。超高層ビル群の地上付近（標高約 40m）において温度上昇は緩慢で、気温は周辺よりむしろ低くなる傾向が見られる。標高約 80m では傾向が異なり、超高層ビル群とその風下の気温は周囲より高くなる。

５．４　地域類型化

５．４．１　概要

今回の計算結果から地域的特徴を導くために以下の手順で地域の類型化を試みた。

①土地利用、建物用途別床面積、人工排熱（顕熱・潜熱）、地上 10m と地上 100m における気温、風速を 500m メッシュで集計する（66×66=4,356 メッシュ）。気温、風速のメッシュ平均の算出にあたっては体積占有率で重み付けを行う。

②上で求めた 500m メッシュ毎の集計値を用いて主成分分析を行い、主成分毎の寄与率を定量化する。

③主成分得点を用いてクラスター分析を実施し、地域類型化を行う。

５．４．２　主成分分析

分析対象にしたのは 24 項目である。表３６に成分行列の算出結果を一覧する。第 5 主成分までの累積寄与率は 64.9%であった。第 1 主成分の成分行列は、気温（地上 10m）、建ぺい率、建物高さ、オフィス床面積、集合住宅床面積で正の値、スカラー風速（地上 10m）、水面面積率で負の値を示すことから、住宅市街地の開発の度合いを代表するものと考えられる。第 2 主成分の成分行列は、建物高さ、オフィス床面積で正の値、標高、一戸建て床面積で負の値を示すことから、臨海部の高層化を代表するものと考えられる。

主成分得点の分布について第 1 から第 5 まで順番に図８６から図９０に示す。第 1 主成分得点が高い地域は都心および周辺の住宅地に広く存在する。第 2 主成分得点については都心と新宿、池袋等の拠点的な箇所で数値が高い。第 3 主成分得点は湾岸部、河川、緑地において値が大きくなる。

５．４．３　クラスター分析

第１主成分から第５主成分までの得点についてクラスター分析を実施した。クラスター中心を一覧したのが表３７である。類型Ⅰは第 1、第２主成分得点が高く、都市開発が進んだ地域であると考えられる。類型Ⅱは第 3、第４主成分得点が高く、工場の排熱がやや大きい他は成分行列から特徴的な傾向を読み取ることは難しい。

図９１は類型化の結果を地理的分布図で表したものである。地理的分布と成分行列を踏まえ、各類型の地域的特徴は以下のように整理することができる。

類型Ⅰ　高層建築物が存在する地域
類型Ⅱ　事務所、住宅、工場の混在地域
類型Ⅲ　緑、河川が多い地域
類型Ⅳ　戸建て、集合住宅を中心とする市街地
類型Ⅴ　臨海部に立地する工場地域
類型Ⅵ　海を中心とする地域

５．４．４　上空と地上付近の気温差

（１）気温差と風速比の関係

図９２（ａ）は気温差と風速比の関係について4,356メッシュを全てプロットしたものである。地域類型毎にプロットの形状を区別している。縦軸は、地上 10m の気温から同位置（緯度、経度）の地上 100m の気温を引いた値の500m メッシュ平均値である。横軸には、同様に 500m メッシュ平均の地上 10m の風速に対する同位置（緯度、経度）の地上 100m の風速の比率をとっている。次式のように風速比が高まると気温差が小さくなる傾向が見られる。

$$T_{10} - T_{100} = -2.255\left(U_{10}/U_{100}\right) + 3.140 \quad (r^2 = 0.6119) \qquad (226)$$

ここで、U_{10}：スカラー風速（地上 10m）[m/s]、U_{100}：スカラー風速（地上 100m）[m/s]、T_{10}：気温（地上 10m）[K]、T_{100}：気温（地上 100m）[K]。

風速比１前後で気温差は 1℃に収束しており、気温低減率と同程度になっている。このような地域は類型Ⅵが該当する。一方、風速比が小さい箇所では上下温度差は 4～5℃に達している。このような地区は類型Ⅰに数多く見られ、都市の高密化が地域の風通しと気温に影響したと考えられる。

（２）グロス建ぺい率と気温の関係

グロス建ぺい率と気温差の関係を図９２（ｂ）に示す。両者の間には明瞭な正の相関関係が見られる。

$$T_{10} - T_{100} = -0.03355 \times \text{グロス建ぺい率}[\%] + 1.115 \quad (r^2 = 0.6803) \qquad (227)$$

回帰直線の傾きから、グロス建ぺい率 10%の増加は気温差の拡大 0.3℃に相当する。グロス建ぺい率の増加に伴い、建物の高層化も含めて市街地が過密化し、緑地の減少、人工排熱の増大、換気効率の低下等の要因が重なるためと考えられる。

５．４．５　鉛直分布

各類型の代表的な地区における鉛直分布について検討する。今回取り上げたのは以下の地区である。

類型Ⅰ　新宿
類型Ⅱ　板橋
類型Ⅲ　石神井
類型Ⅳ　足立
類型Ⅴ　施設（湾岸のライフライン施設）
類型Ⅵ　東京湾

図９３は各地区の圧力の鉛直分布を示したものである。水平 500m メッシュで平均化しているため、ほぼ静水圧に分布している。もちろん、建物周辺では強い偏在性を伴うと考えられる。また、水平位置により 500Pa 程度数値が異なる。

図９４は体積占有率の鉛直分布である。ここで、地上高さとは各地区の平均標高からの偏差である。新宿を除いて地上 30m 以上では建物がほとんど存在しないことがわかる。

風速比の鉛直分布を図９５に示す。ここで、風速比とは地上100mの風速に対するその高さの風速の比である。施設（Ⅴ）、東京湾（Ⅵ）では地上付近の風速比が他の地区よりも大きく 0.5 以上の値になっている。新宿（Ⅰ）の風速比は板橋（Ⅱ）、石神井（Ⅲ）、足立（Ⅳ）と比べて地表面近傍では大きく、地上 30m 以上では逆に小さい。

同様に気温差について示したのが図９６である。東京湾（Ⅵ）において気温低減率相当の温度差が見られる。施設（Ⅴ）では施設からの排熱により地上 30～40m（屋上付近）および

地上 100m（煙突高さ）において温度が上昇している。新宿（Ⅰ）の気温差を見ると、板橋（Ⅱ）、石神井（Ⅲ）、足立（Ⅳ）、施設（Ⅴ）と比べて地表面近傍では最も小さいが、地上 30m 付近で数値が増加しており、地上 30m 以上では他の地区を上回っている。

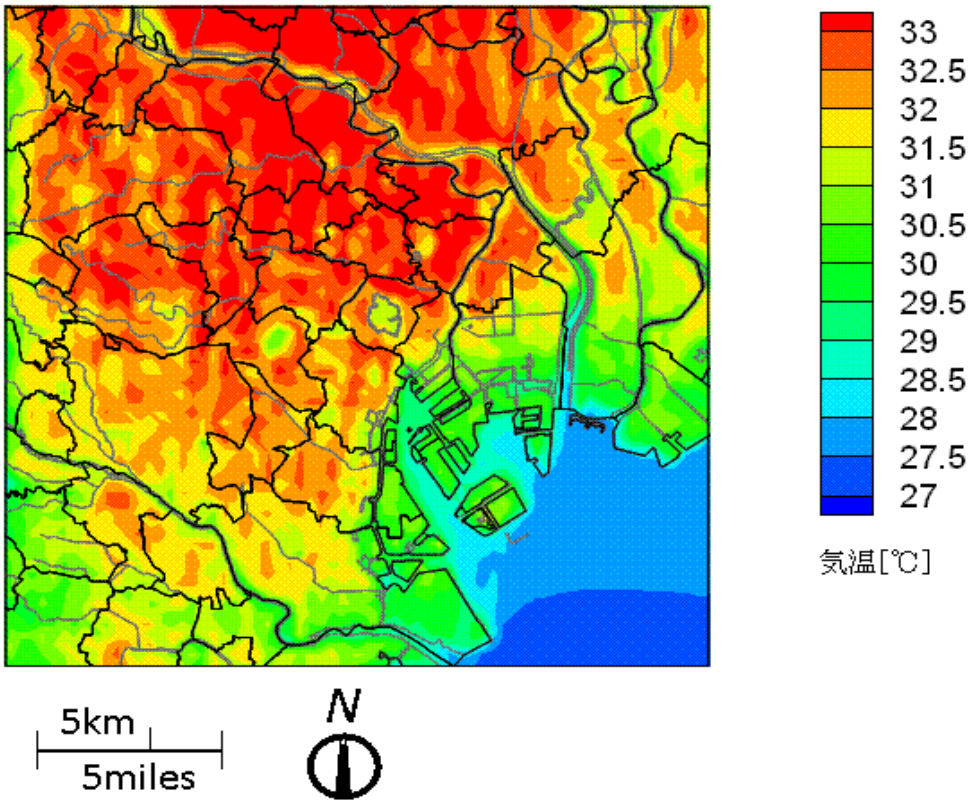
５．５　考察

５．２の結果から、東京 23 区において筋状に気温が形成される傾向が確認された。これは、直下の土地利用構成と共に大気の 3 次元的流れが気温場に影響していることを意味しており、広域 CFD 解析により都市域の温度場の特性として初めて明らかにされたものである。筋状の高温帯は幹線道路などの高密地帯において上昇流を誘引し周辺の放出熱をも収束させながら、さらなる温度発展につながる可能性がある。一方、都市内の大規模緑地においては上空の空気を地上に引き込み、風下の周辺領域ににじみだしている様子が計算結果から確認された。これらの事例は都市境界層における熱拡散の動態を、建物レベルの微視的な立場から解明する上で重要な情報を含んでいると考えられる。

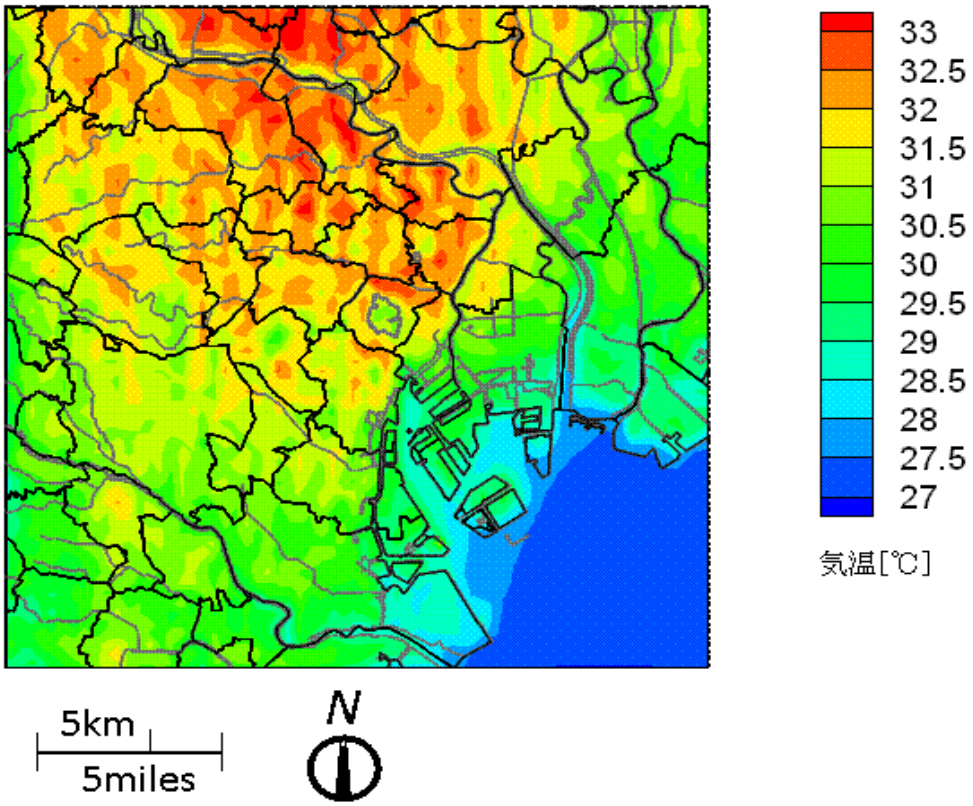
次に建物の形態と風通しの関係について考察する。５．４で述べた通り、グロス建ぺい率 10%の増加は、上空 100m の気温を基準として地上付近の気温上昇 0.3℃に相当することが示された。このことは、市街地におけるオープンスペースの創出が風通しと気温低下に有効であることを示唆する。地上部を緑化すれば効果は高まる。５．３および５．４の結果から、新宿等の高層市街地の気温は、地上付近では周辺より低くなる傾向が見られた。床面積確保のために、ある程度高層化を図りつつ、地上近傍を解放することで都市の気温低下につながる可能性が考えられる。一方、高層市街地の上空やその風下領域においては温度上昇する場合があるため、その熱的影響についても検討する必要がある。

建物が河川や緑地の周辺に位置している場合は、気温低下に伴い冷房需要を削減する効果が期待される。ただし、風向きや建物配置により気温低下の程度は異なる。特に河川周辺で建物が密集している地域では、河川からの風の通り抜けが得られていない事例がいくつか見られた。

５．３のライフライン施設の事例で示した通り、上空における放熱は地上付近の気温にはほとんど影響していない。また、新宿等の地域冷暖房の導入地区においては、放熱が潜熱によって賄われるため建物形態の効果も相まって気温が低下する傾向が見られる。ただし、湿気が上昇する可能性がある。排熱の集約化、潜熱化の影響について検討する必要があると考えられる。

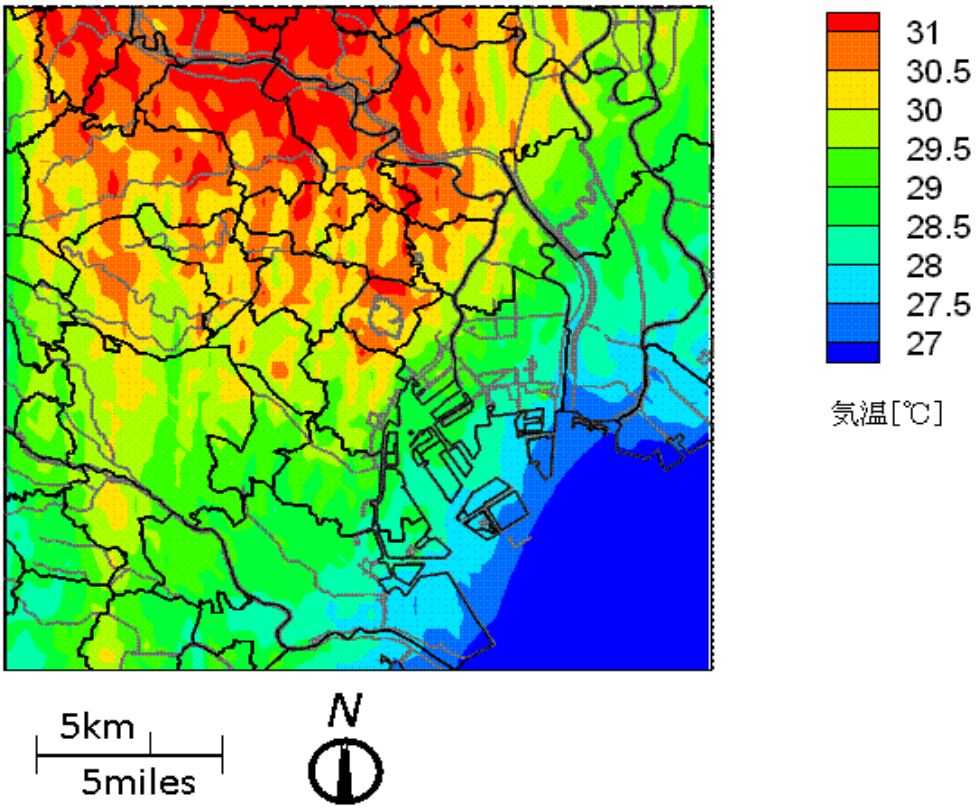


（ａ） 地上 2m

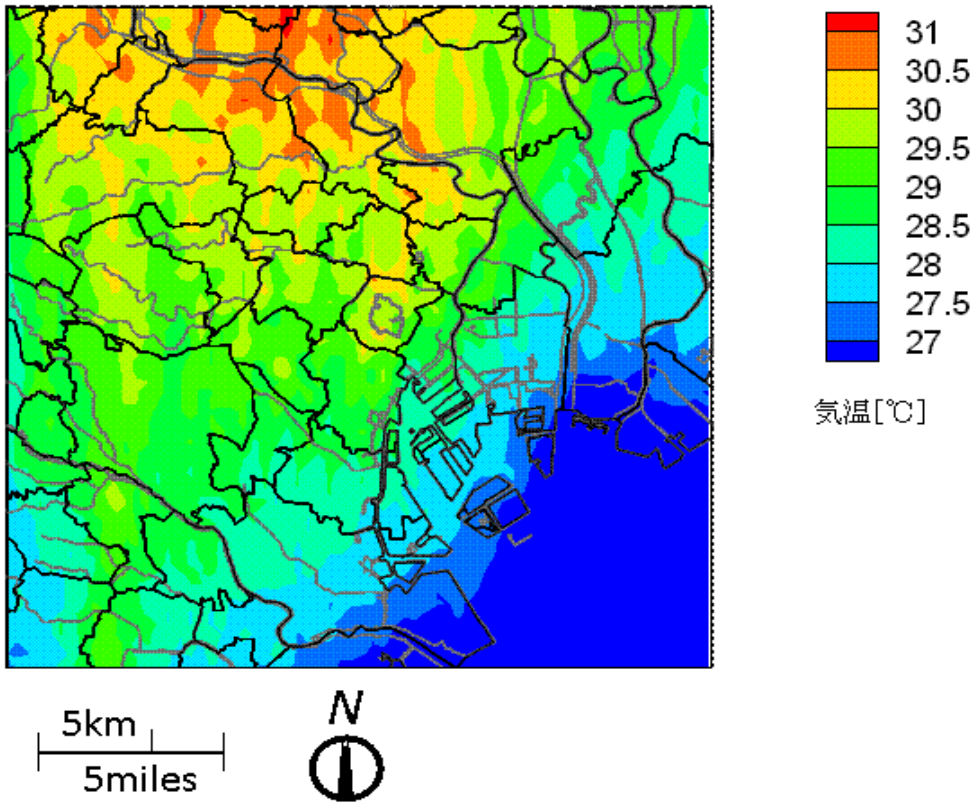


（ｂ） 地上 10m

図６３　気温の分布（500m メッシュ平均）
2005 年 7 月 31 日 14 時

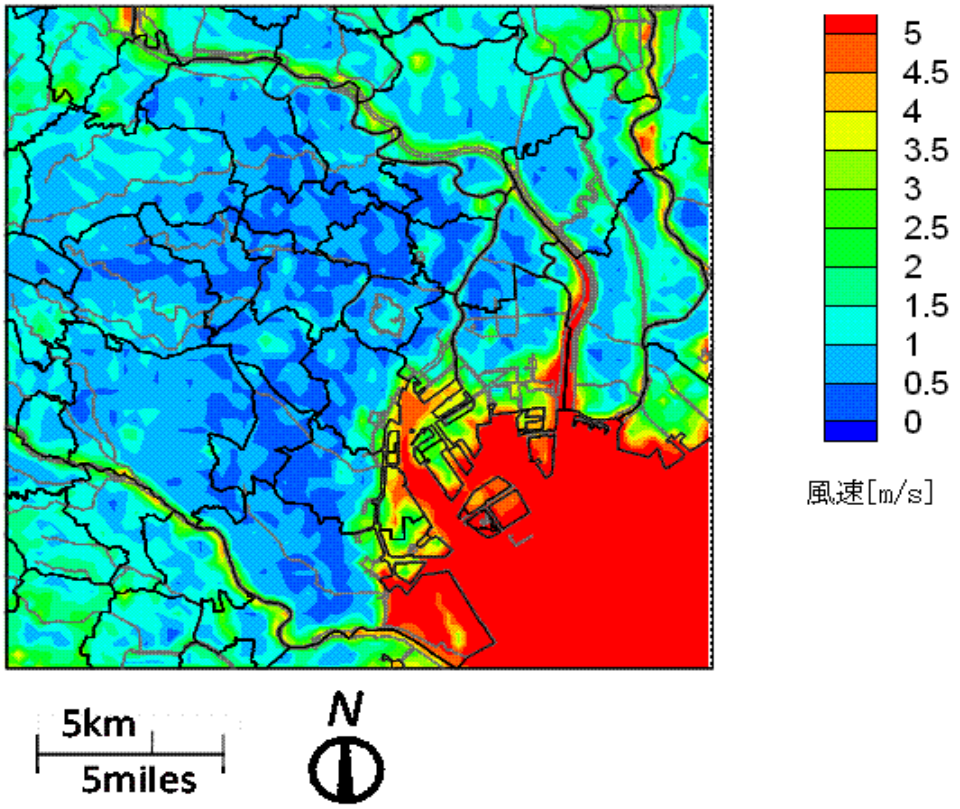


（ｃ）地上 50m

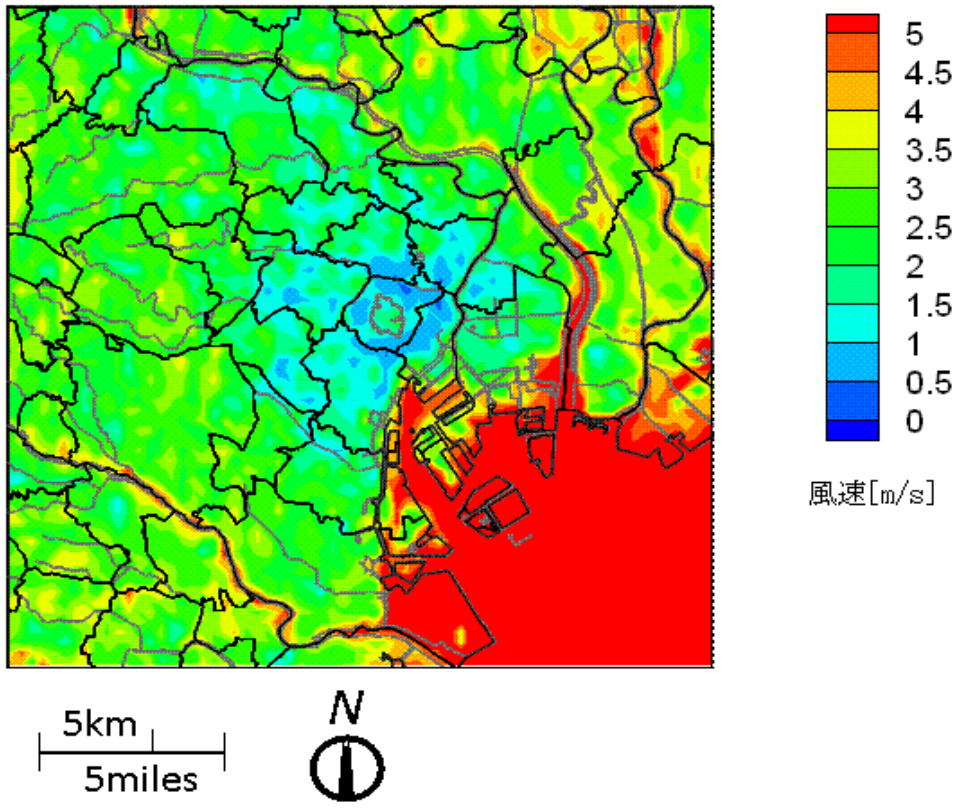


（ｄ）地上 100m

図６３　気温の分布（500m メッシュ平均）　　続き
2005 年 7 月 31 日 14 時

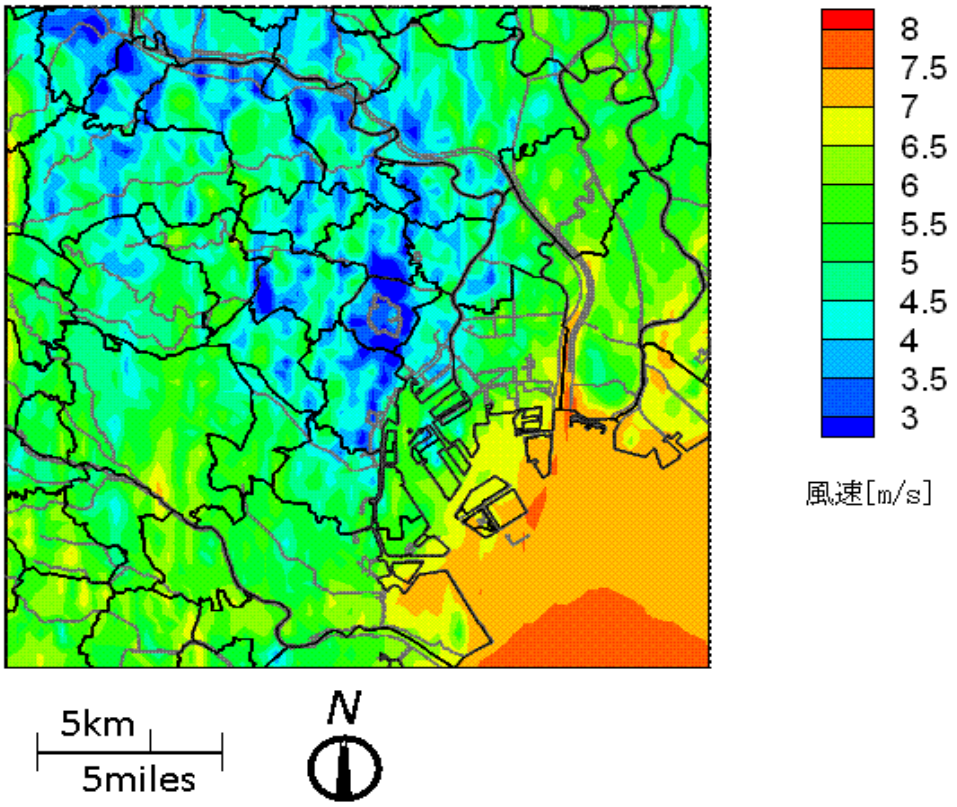


（ａ）地上 2m

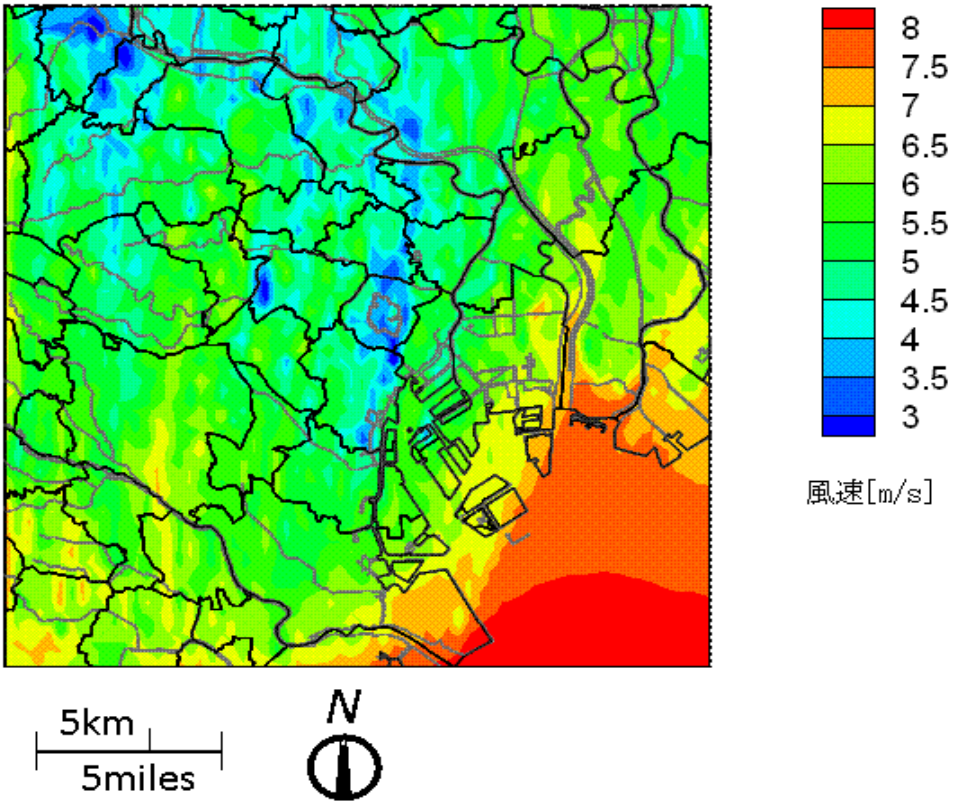


（ｂ）地上 10m

図６４　スカラー風速の分布（500m メッシュ平均）
2005 年 7 月 31 日 14 時

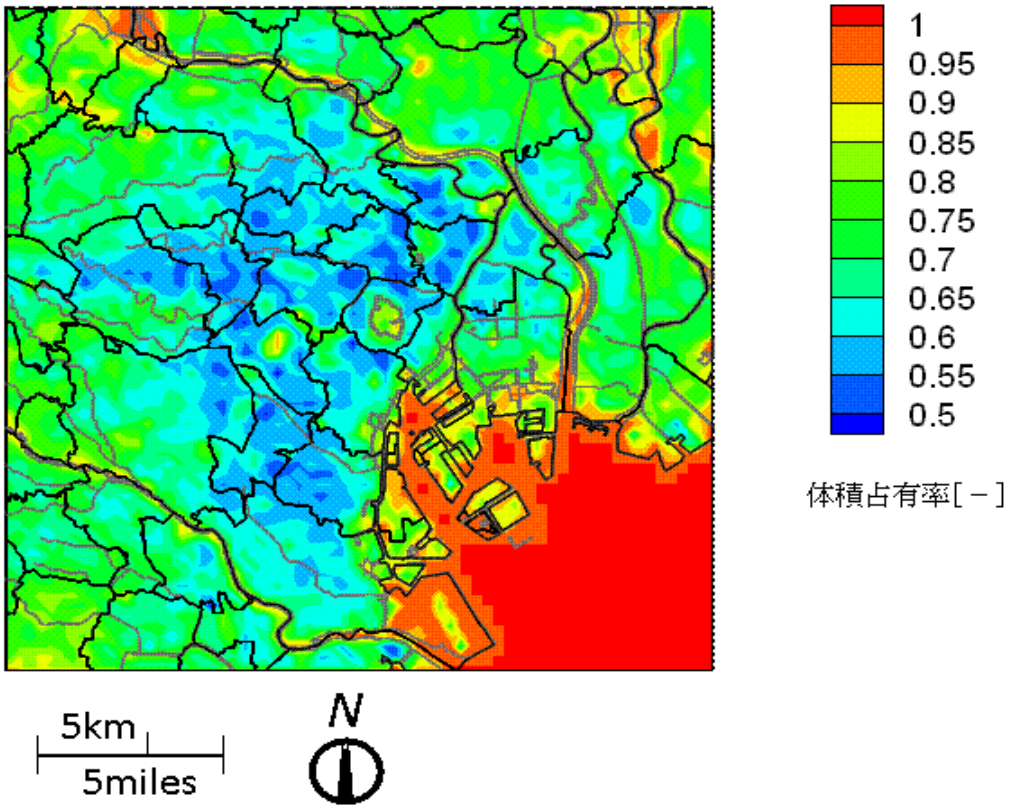


（ｃ）地上 50m

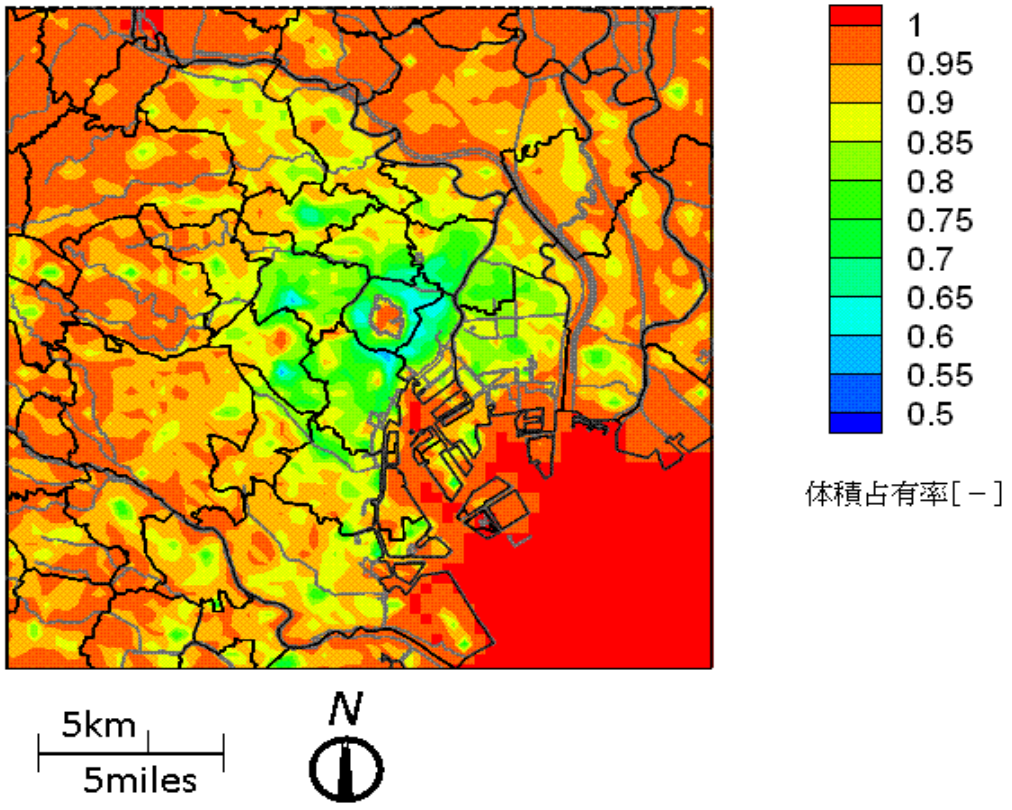


（ｄ）地上 100m

図６４　スカラー風速の分布（500m メッシュ平均）　続き
2005 年 7 月 31 日 14 時

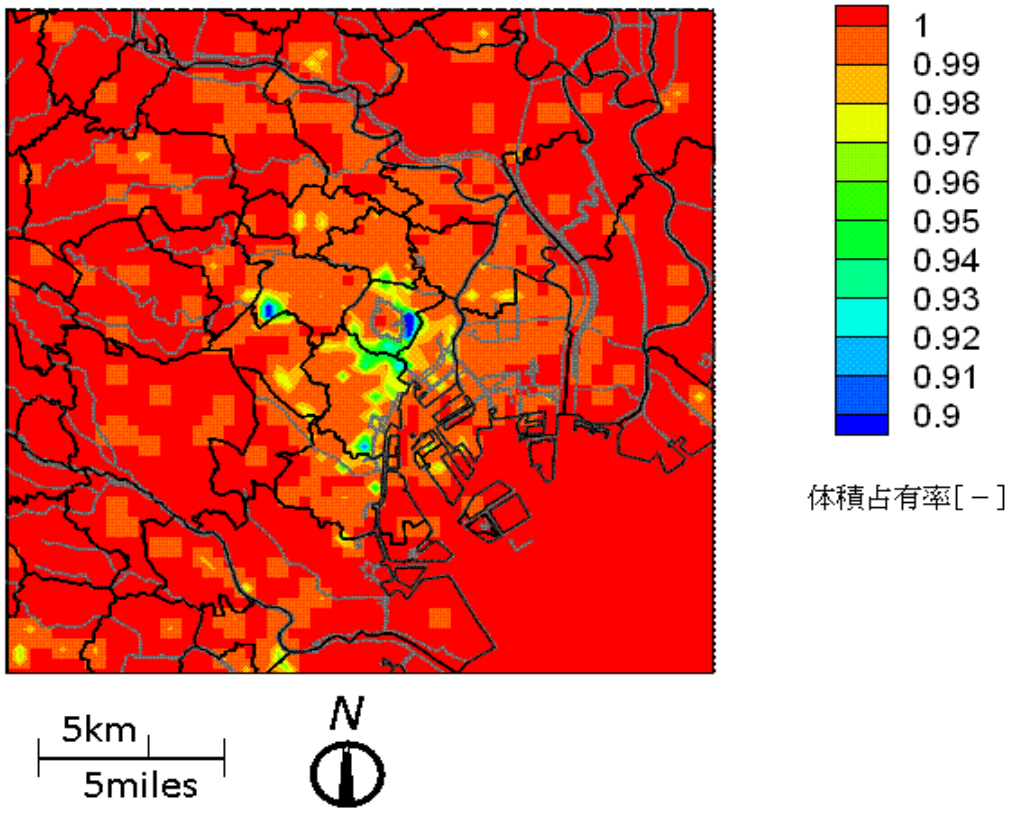


（ａ）地上 2m

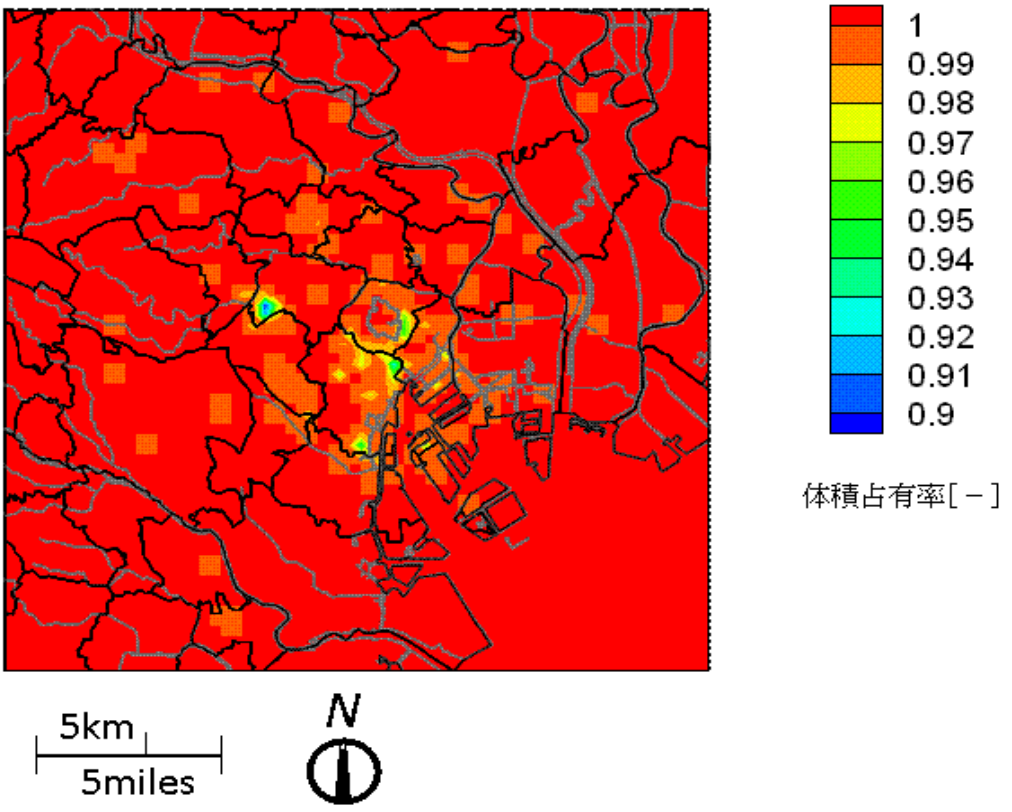


（ｂ） 地上 10m

図６５　体積占有率の分布（500m メッシュ平均）
2005 年 7 月 31 日 14 時

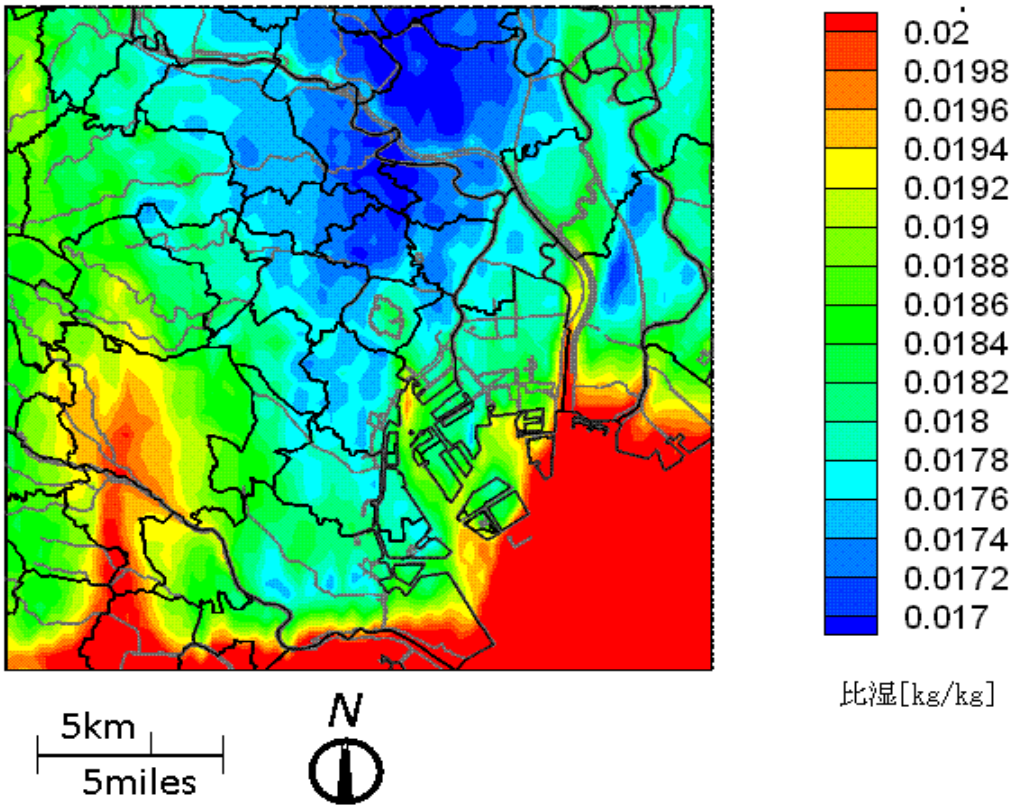


（ｃ）地上 50m

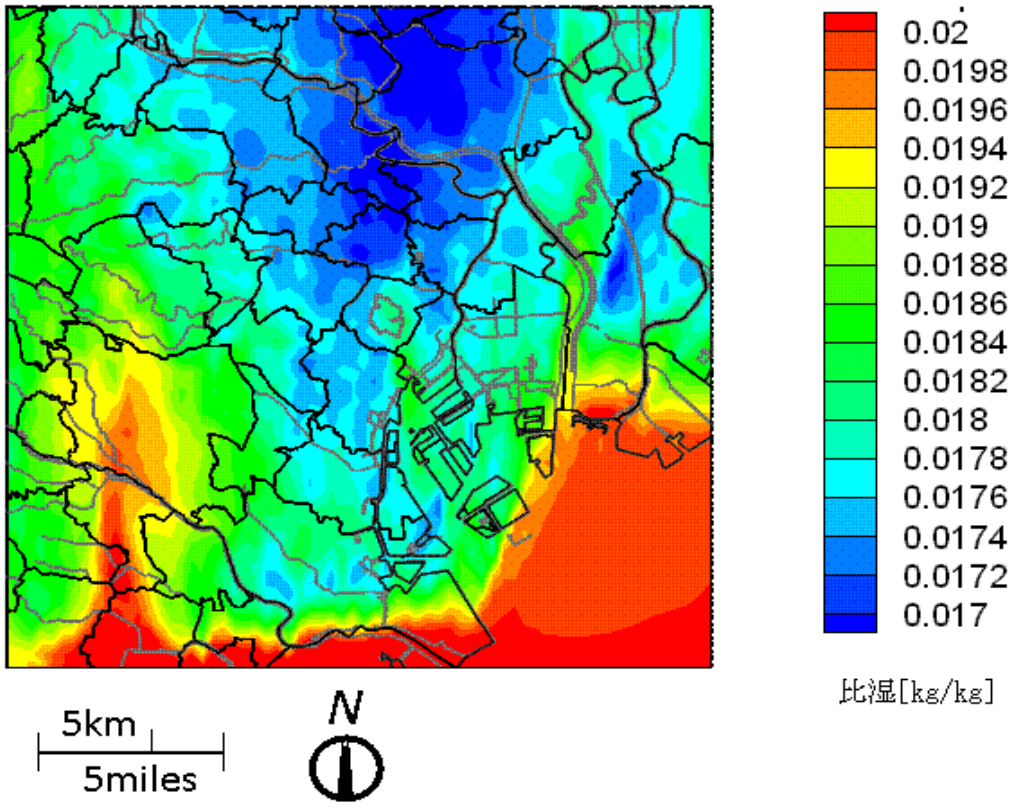


（ｄ）地上 100m

図６５　体積占有率の分布（500m メッシュ平均）　続き
2005 年 7 月 31 日 14 時

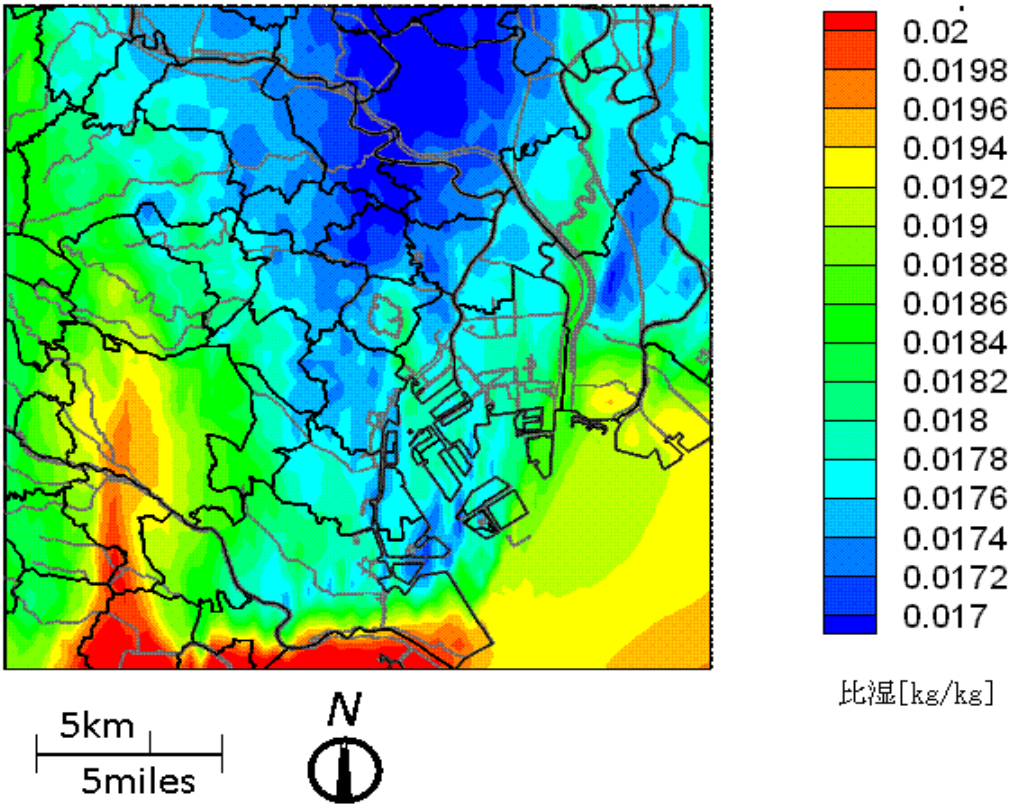


（ａ）地上 2m

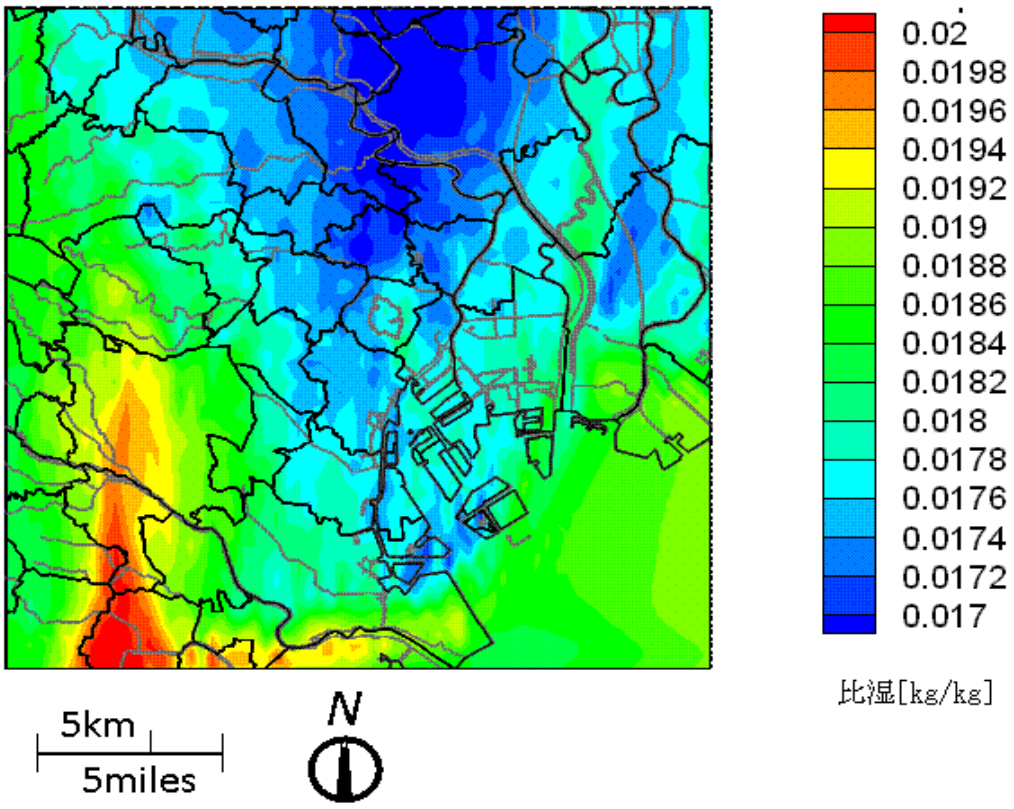


（ｂ）地上 10m

図６６　比湿の分布（500m メッシュ平均）
2005 年 7 月 31 日 14 時



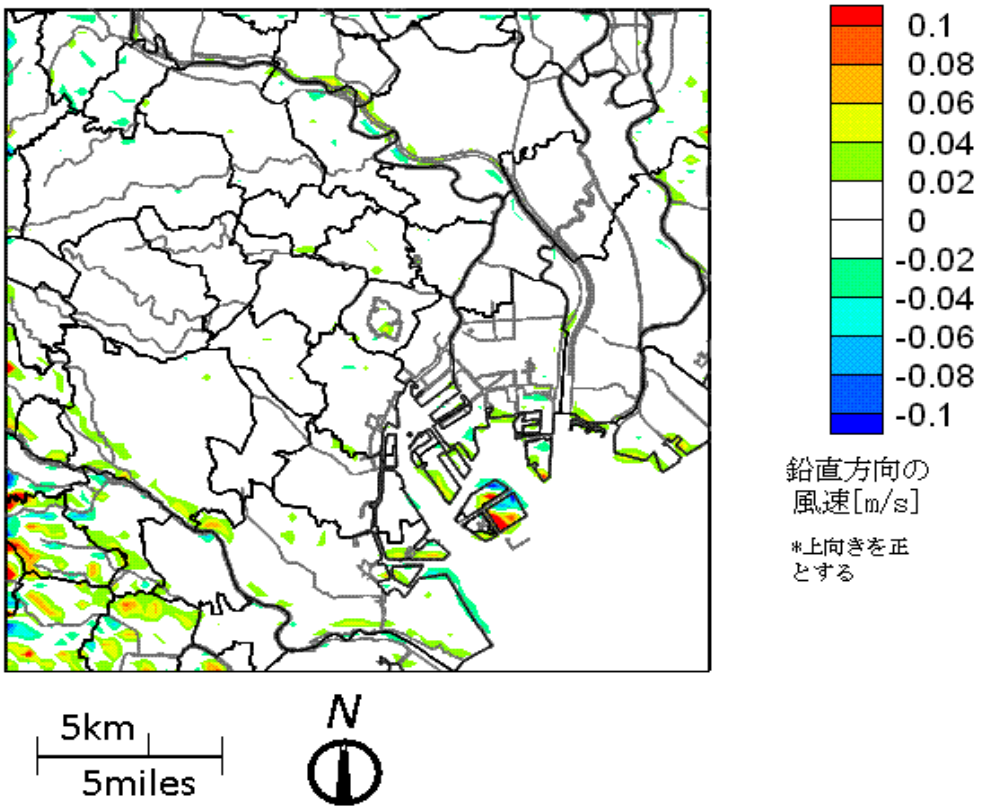
（ｃ）地上 50m



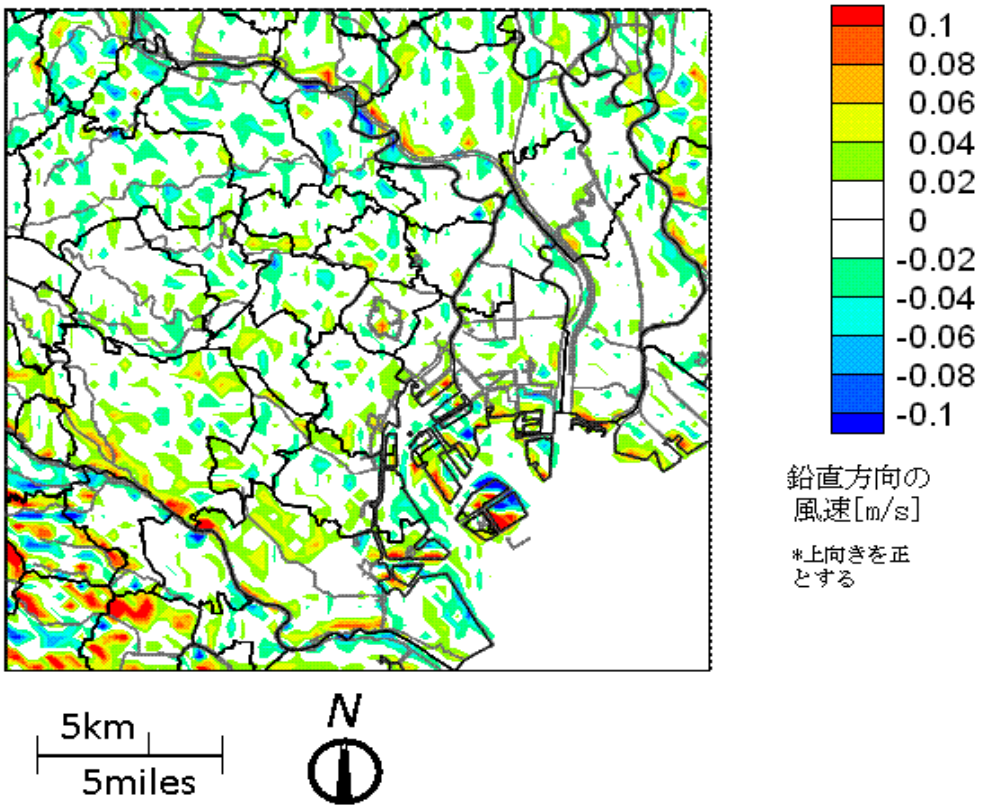
（ｄ）地上 100m

図６６　比湿の分布（500m メッシュ平均）続き

2005 年 7 月 31 日 14 時

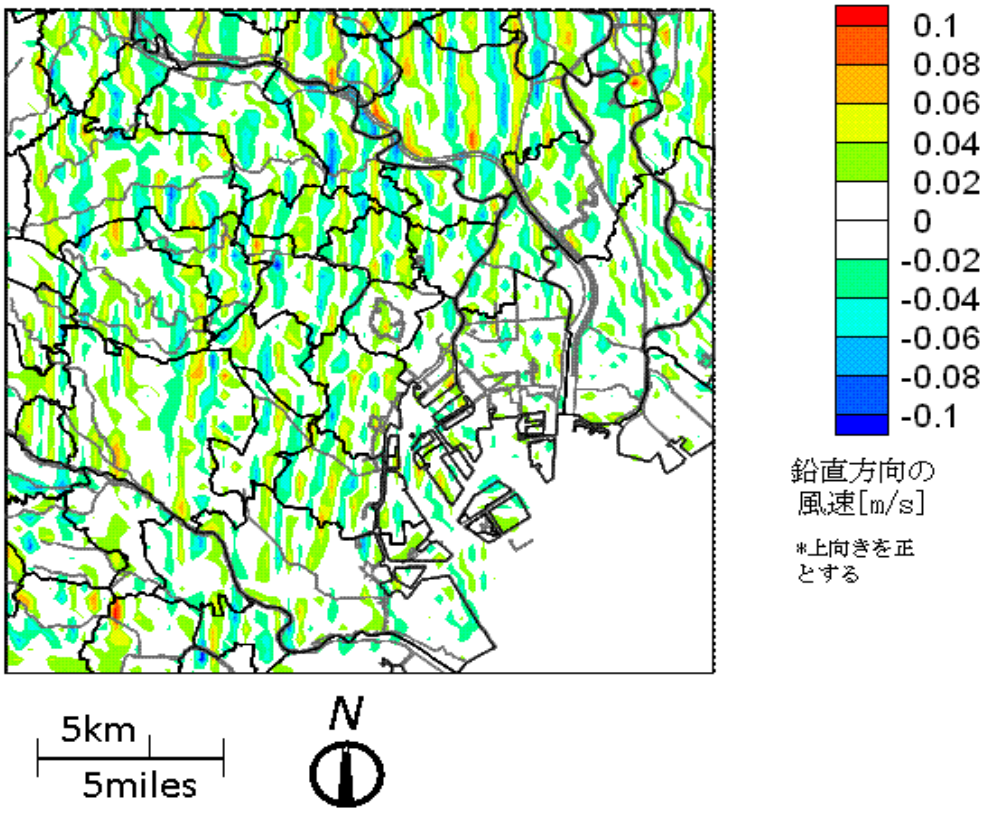


（ａ）地上 2m

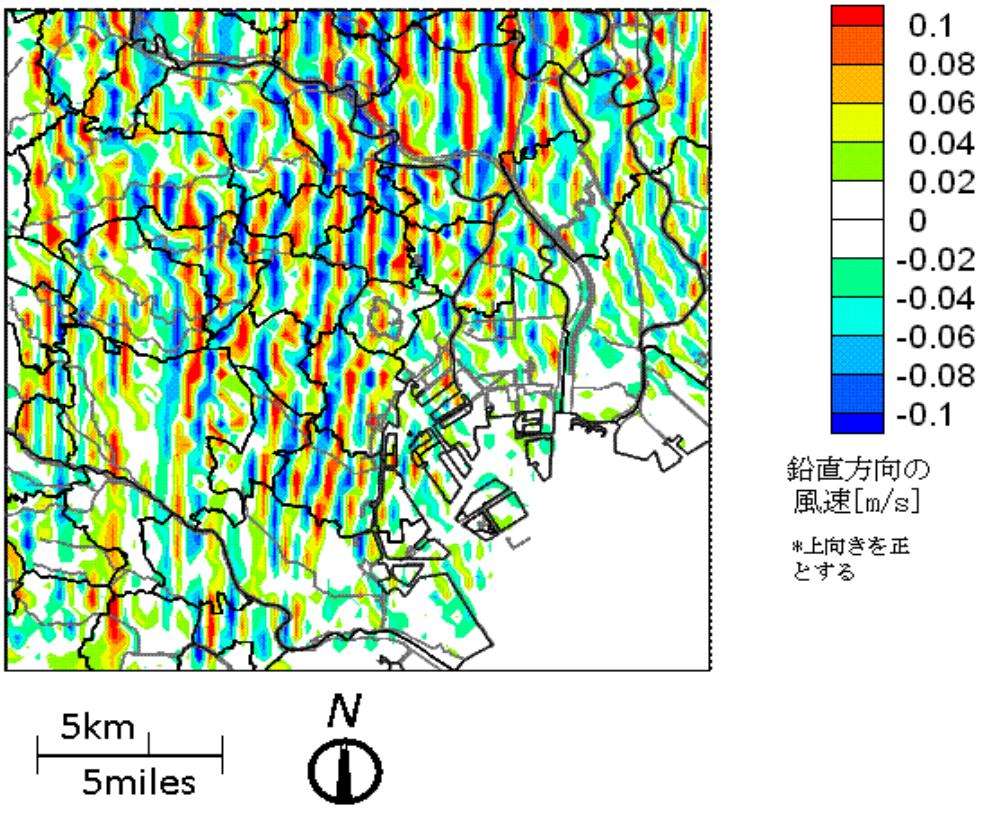


（ｂ）地上 10m

図６７　鉛直方向の風速の分布（500m メッシュ平均）
2005 年 7 月 31 日 14 時



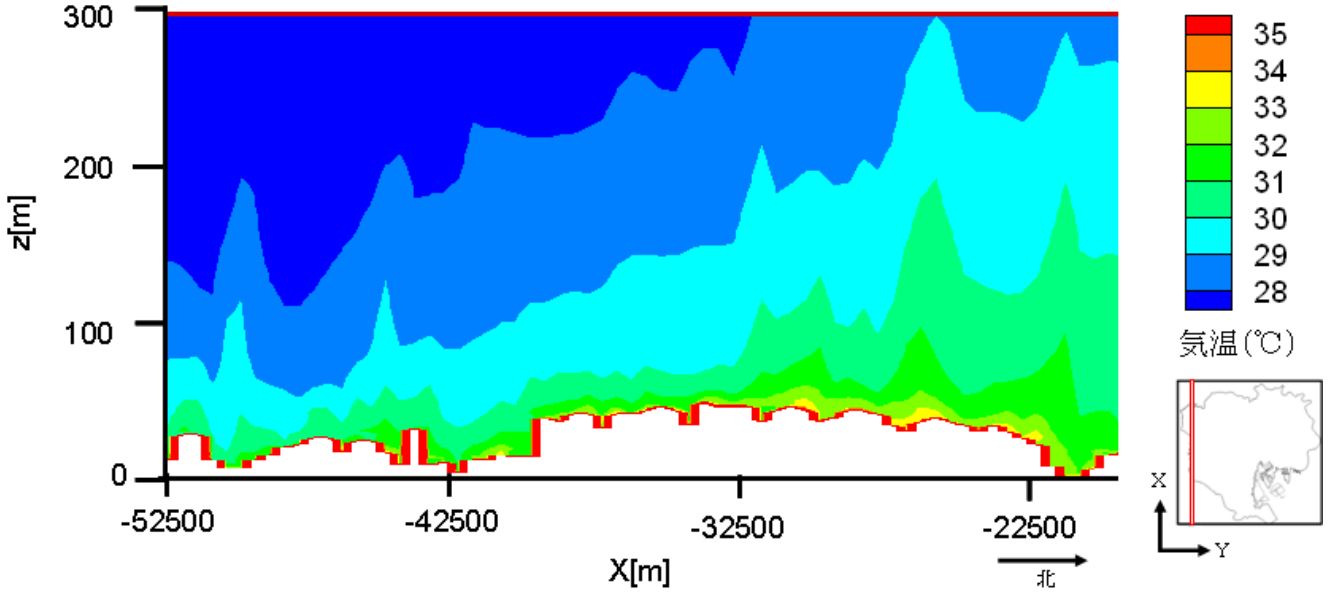
（ｃ）地上 50m



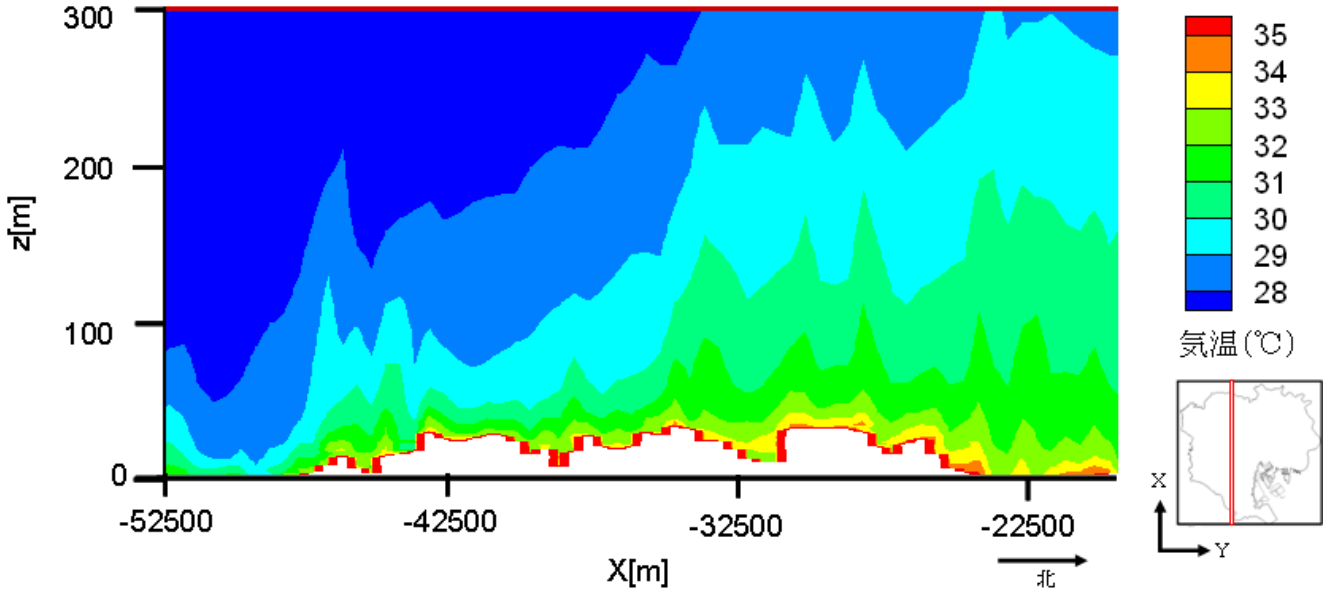
（ｄ）地上 100m

図６７　鉛直風速の分布（500m メッシュ平均）　続き

2005 年 7 月 31 日 14 時

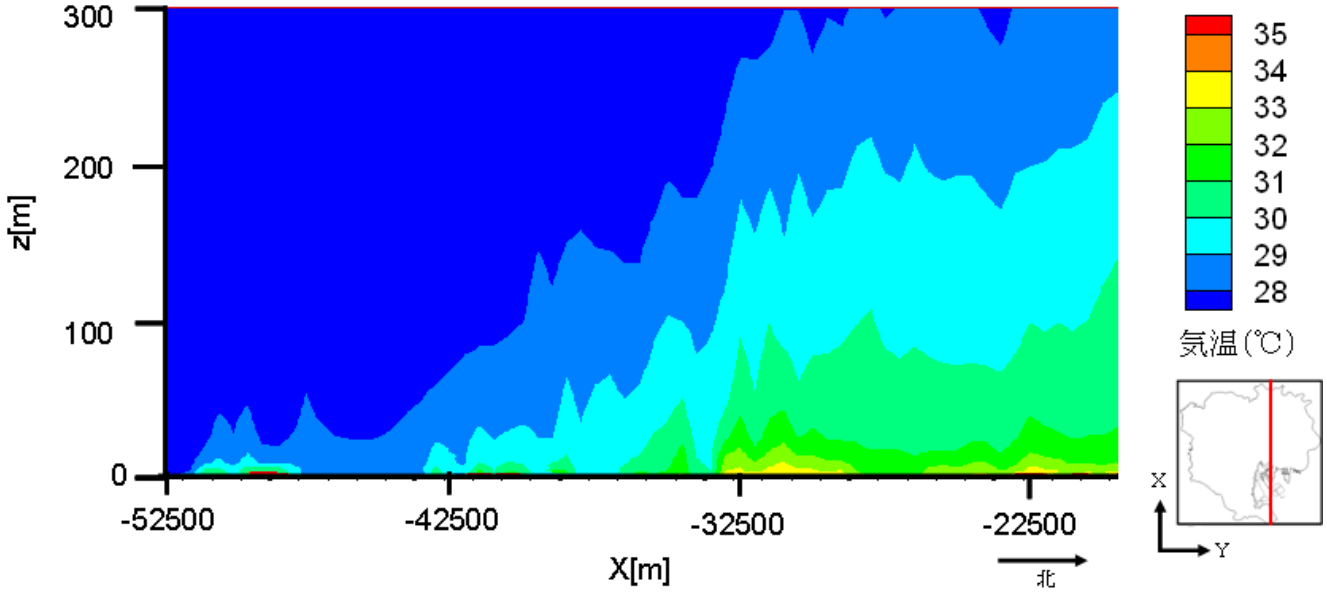


（ａ） Y=-22000～-21500m

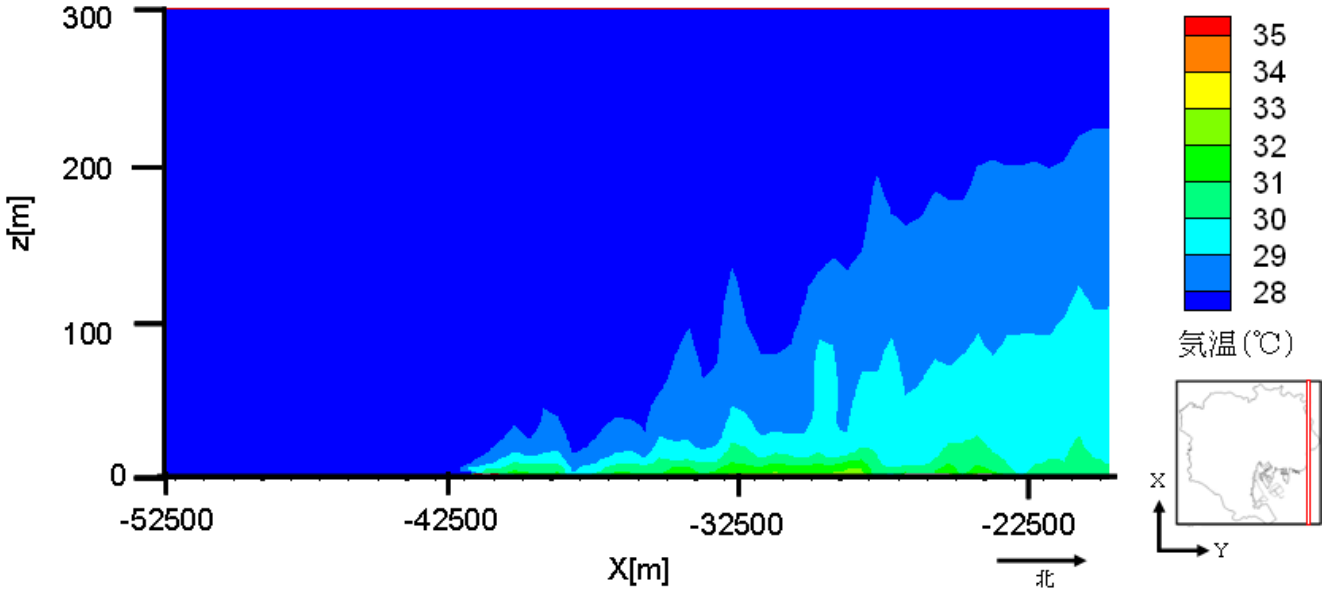


（ｂ） Y=-13000～-12500m

図６８　気温の鉛直断面分布（500m メッシュ平均）
2005 年 7 月 31 日 14 時

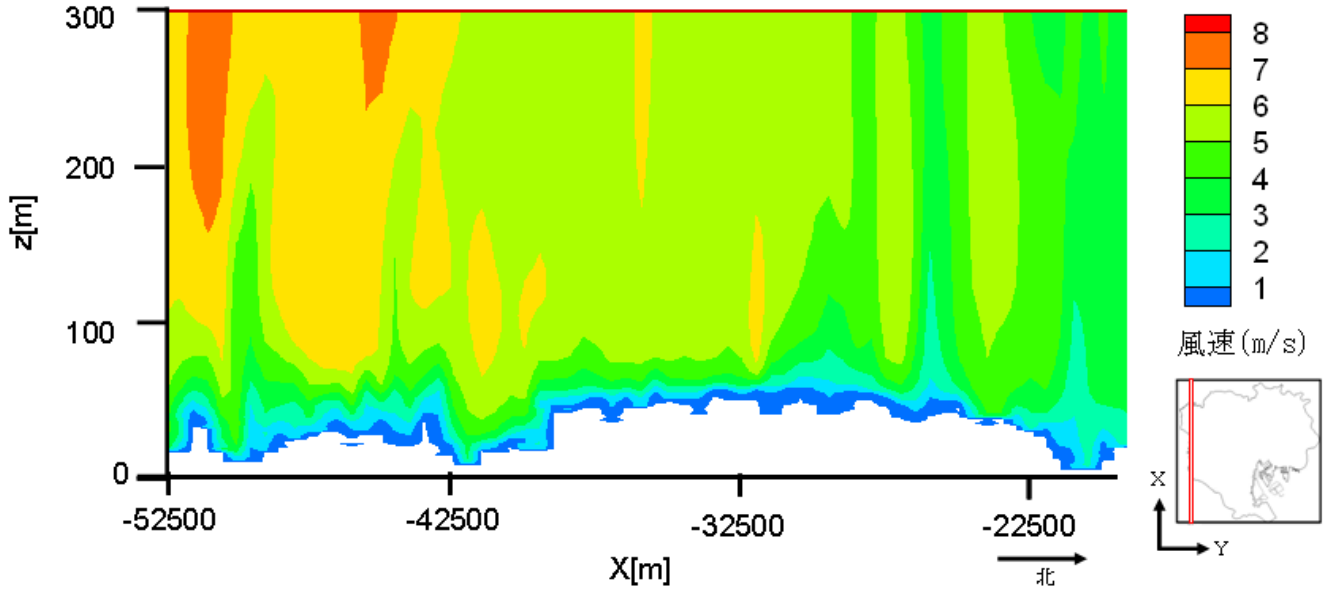


（ｃ） Y=-4000～-3500m

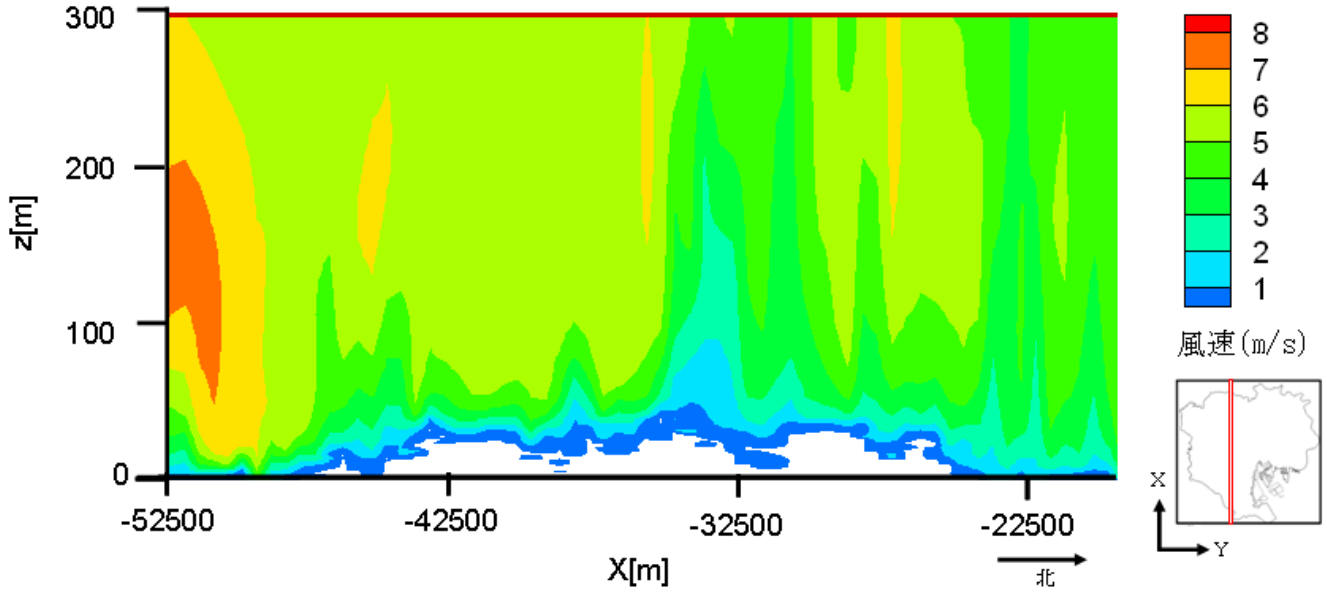


（ｄ） Y=5000～5500m

図６８　気温の鉛直断面分布（500m メッシュ平均）　続き
2005 年 7 月 31 日 14 時

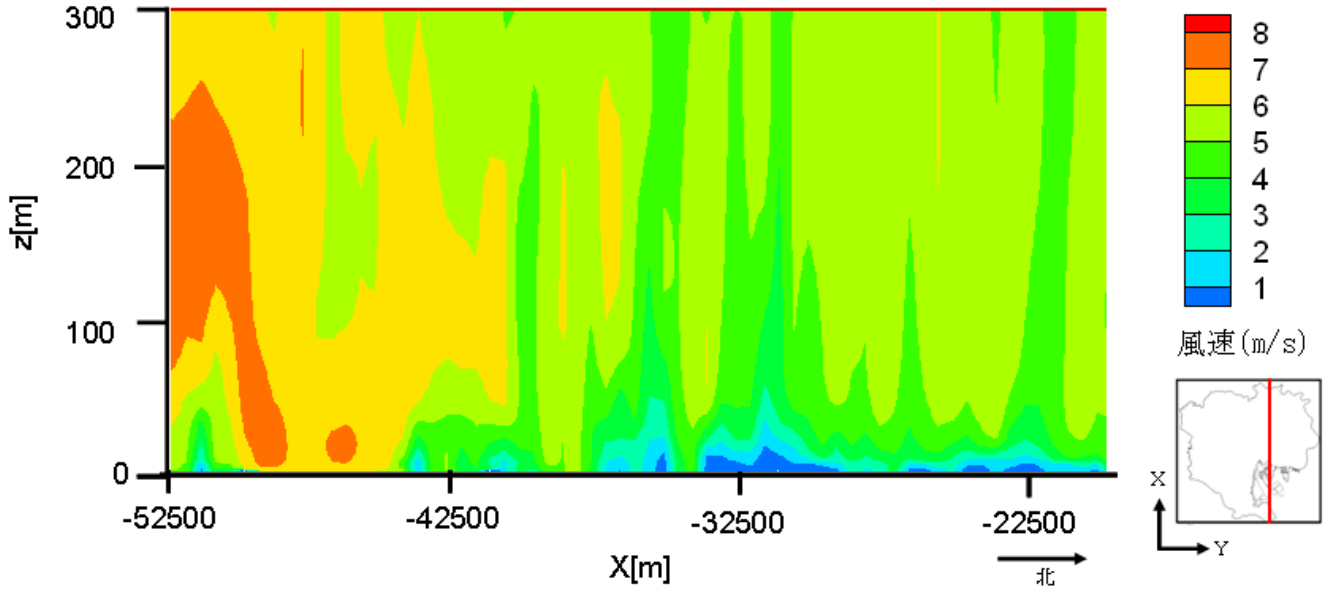


（ａ） Y=-22000～-21500m

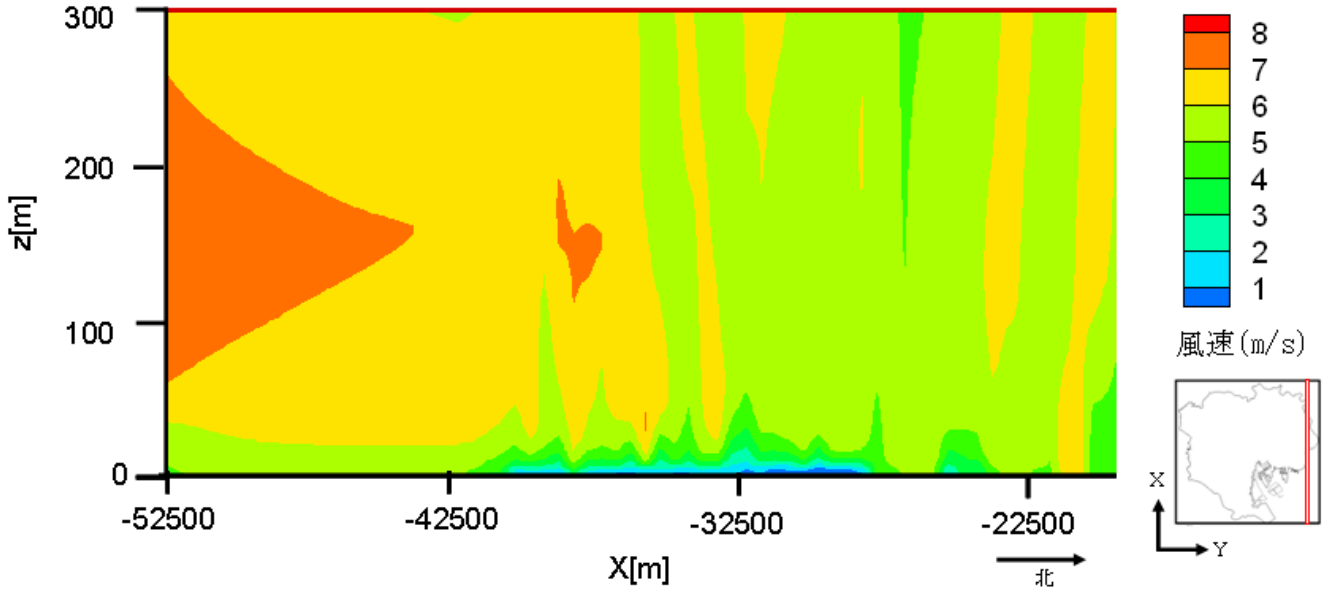


（ｂ） Y=-13000～-12500m

図６９　スカラー風速の鉛直断面分布（500m メッシュ平均）
2005 年 7 月 31 日 14 時

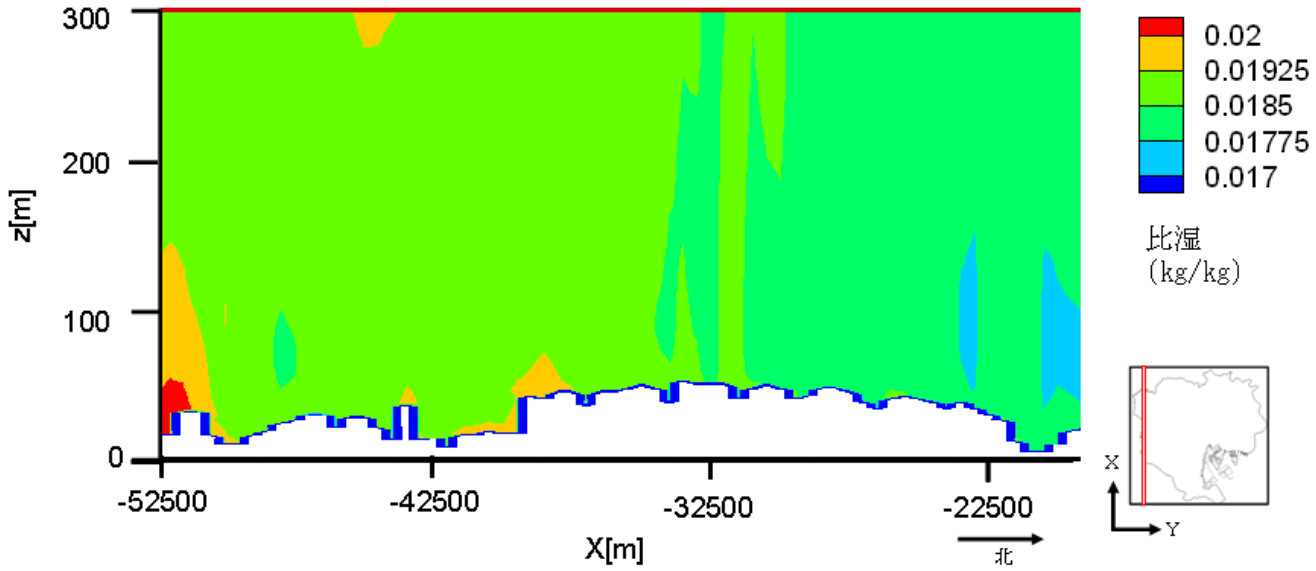


（ｃ） Y=-4000～-3500m

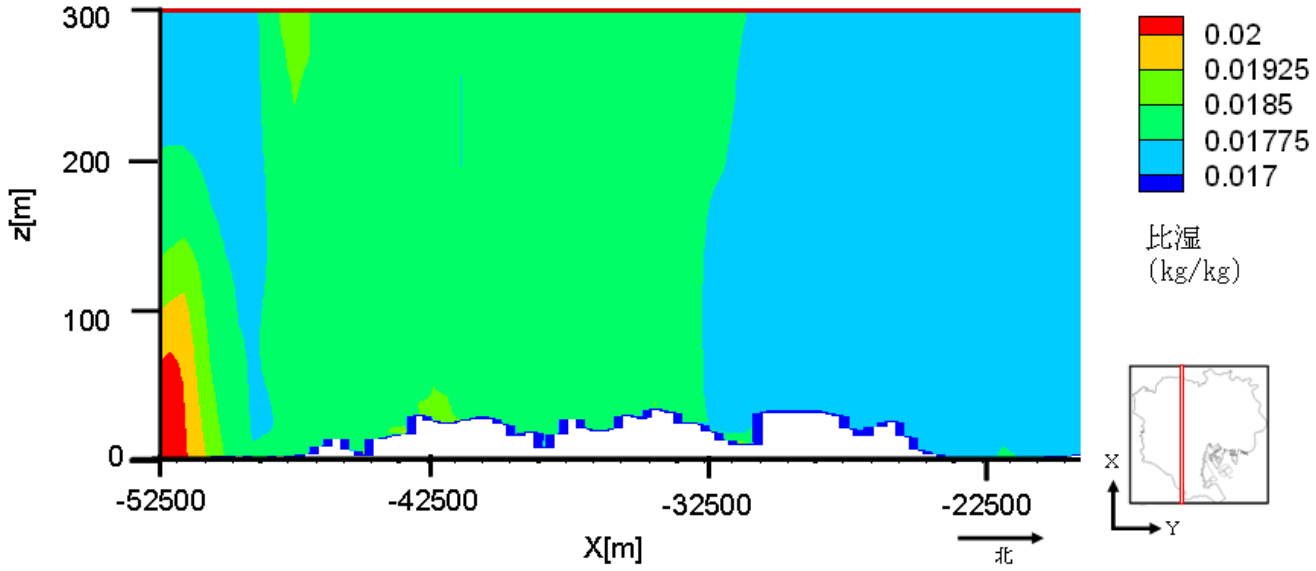


（ｄ） Y=5000～5500m

図６９　スカラー風速の鉛直断面分布（500m メッシュ平均）　続き
2005 年 7 月 31 日 14 時

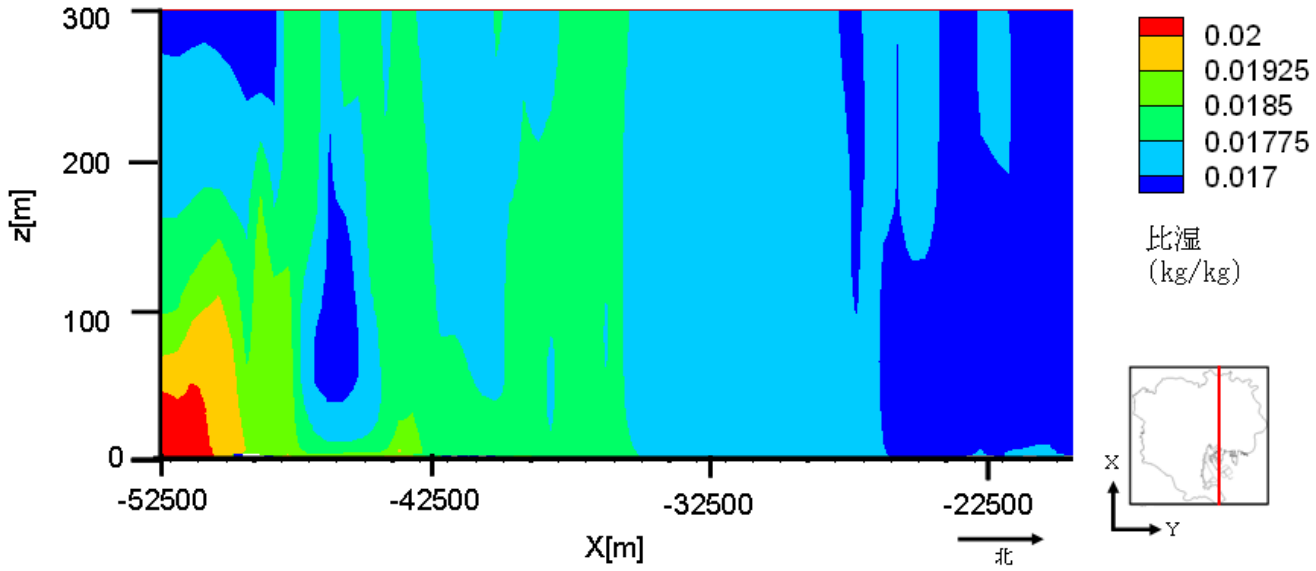


（ａ） Y=-22000～-21500m

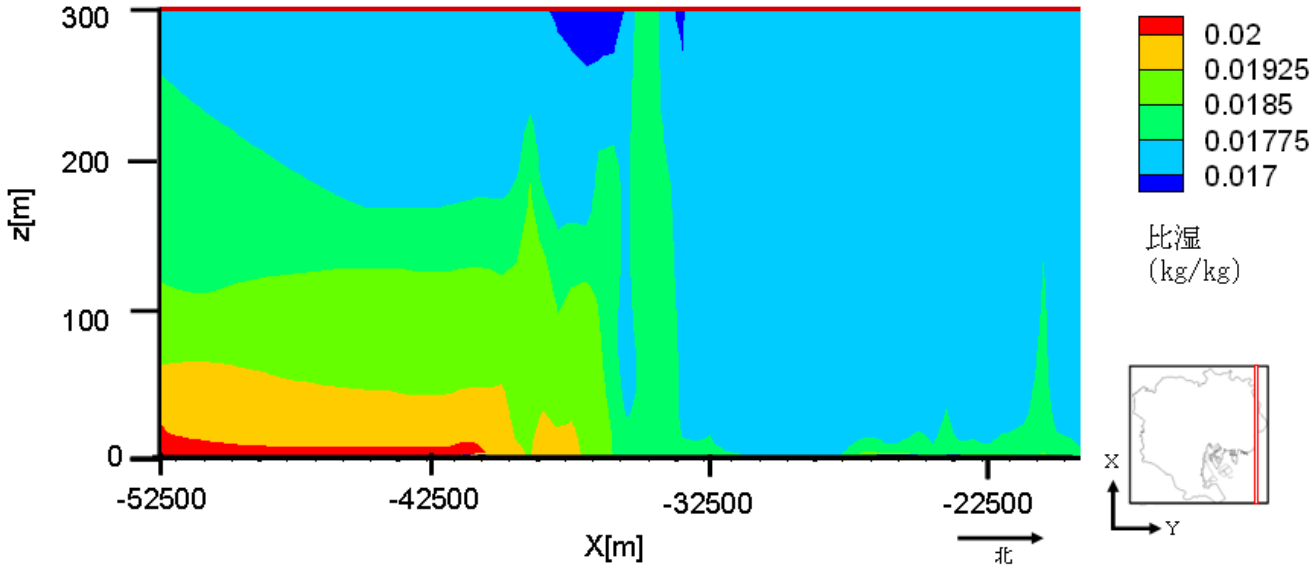


（ｂ） Y=-13000～-12500m

図７０　比湿の鉛直断面分布（500m メッシュ平均）
2005 年 7 月 31 日 14 時



（ｃ） Y=-4000～-3500m



（ｄ） Y=5000～5500m

図７０　比湿の鉛直断面分布（500m メッシュ平均）　続き
2005 年 7 月 31 日 14 時

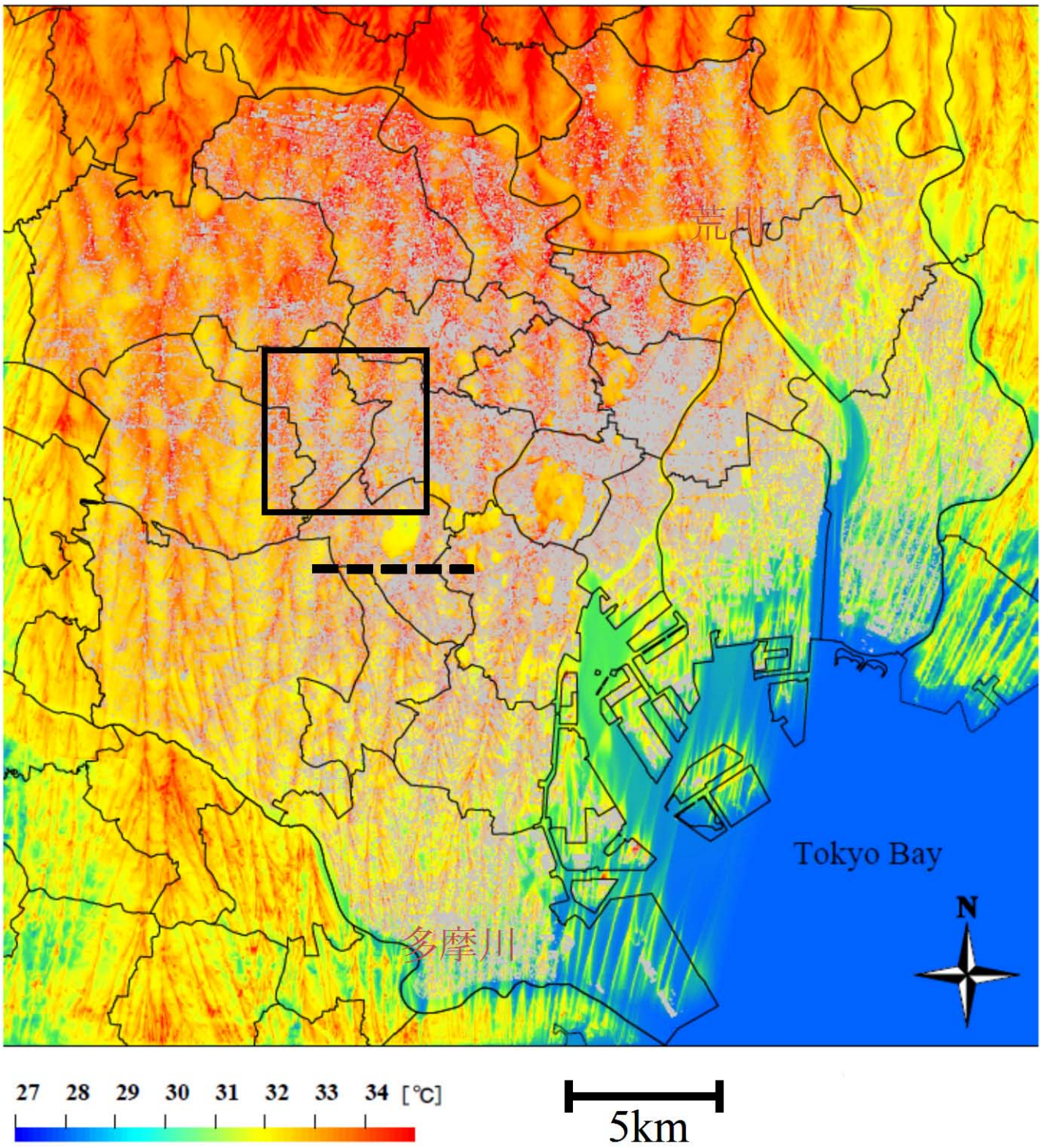


図７１　東京 23 区全域の気温分布（地上 10m）
2005 年 7 月 31 日 14 時

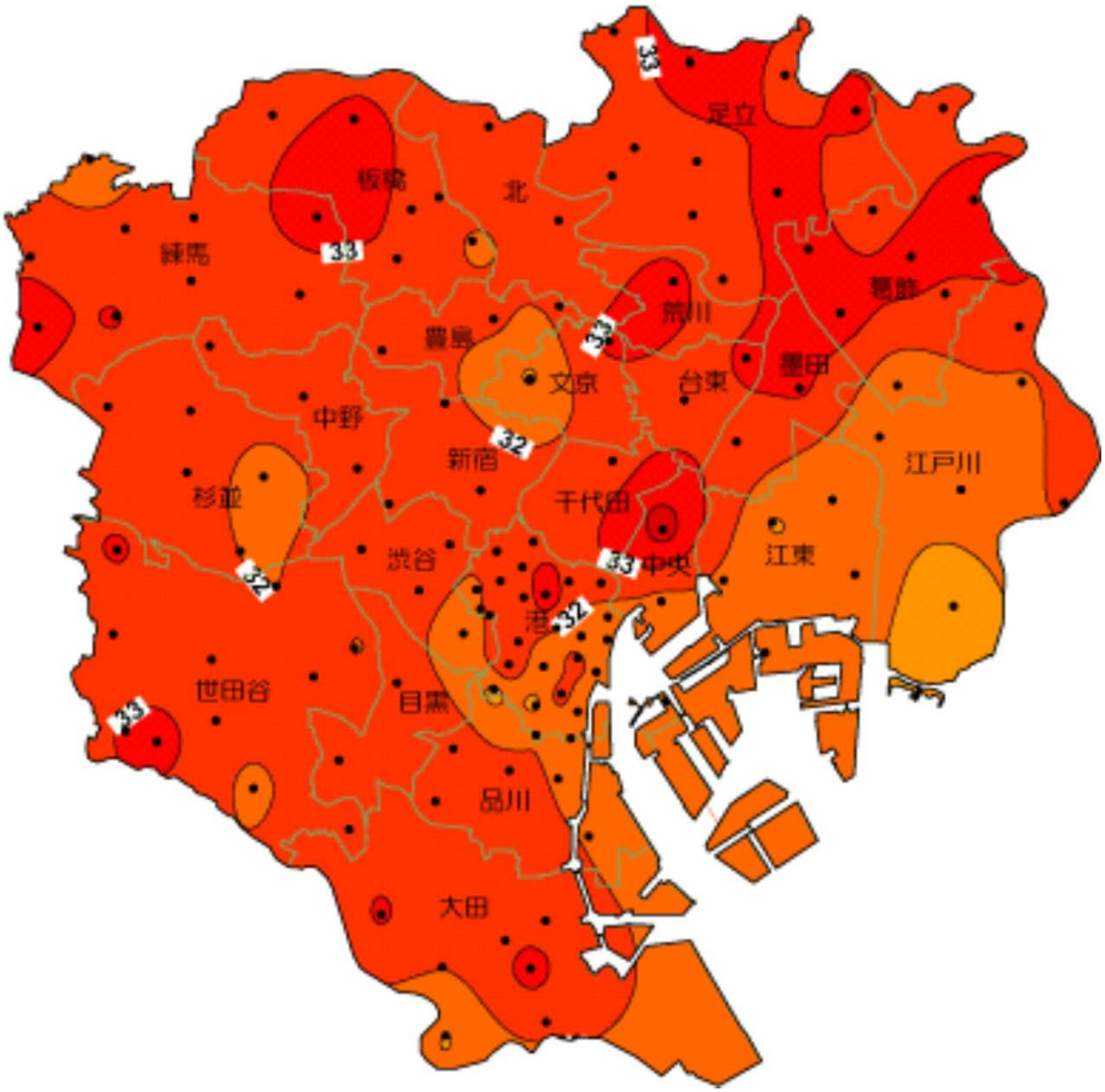
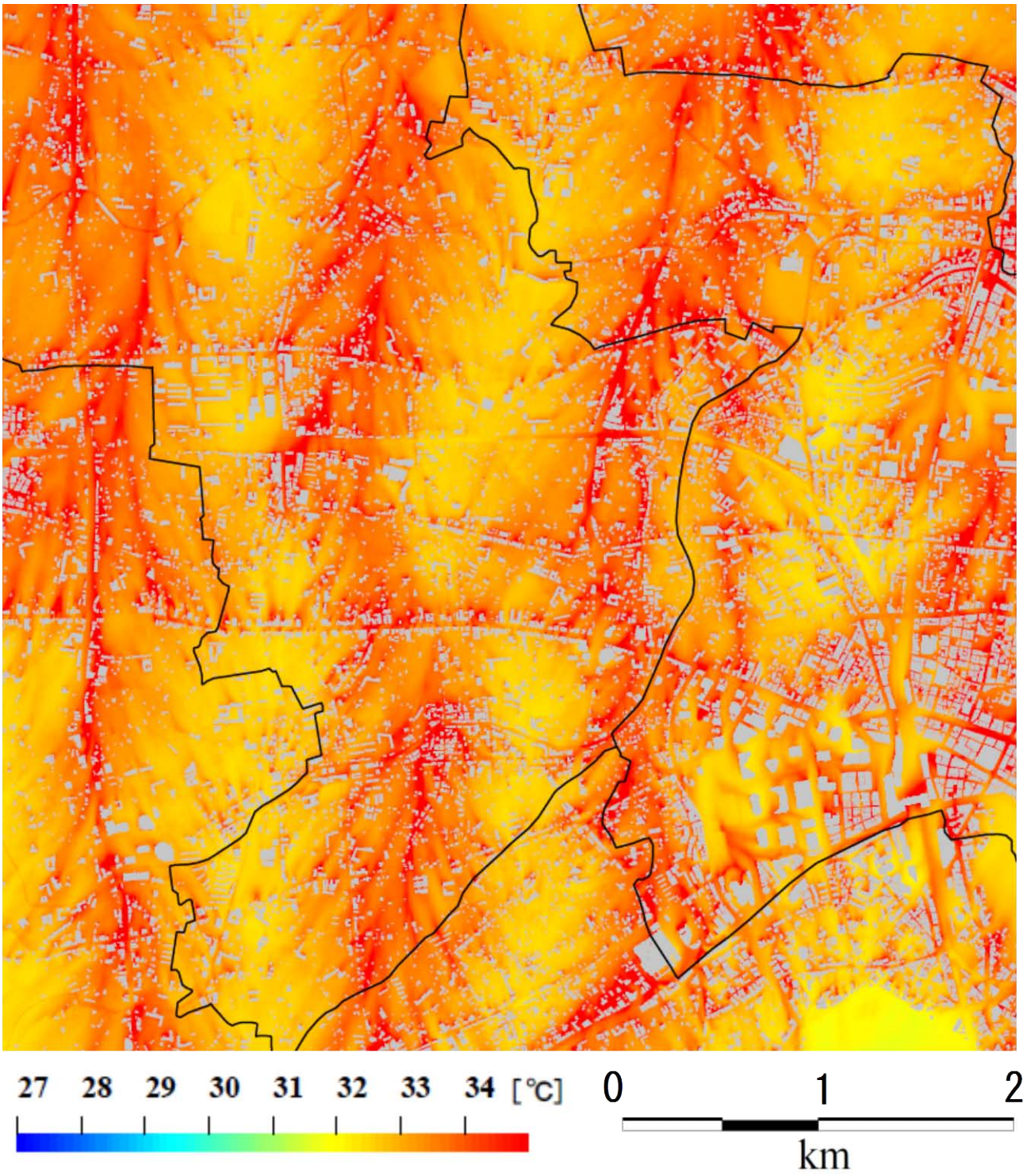
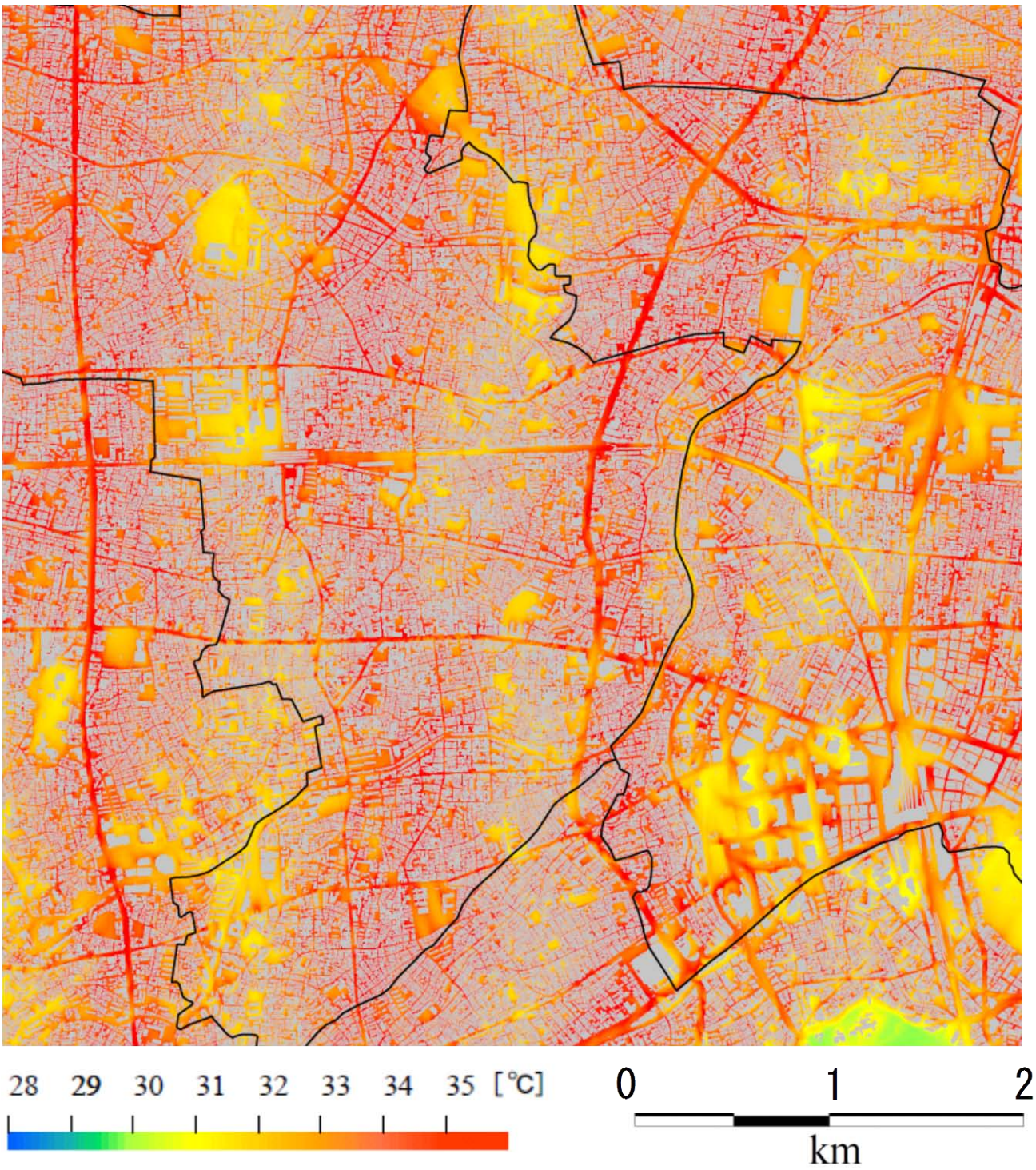


図７２　METROS の観測による東京 23 区の気温分布（東京都）
2005 年 7 月 31 日 14 時



（ａ）地上 10m

図７３　気温分布の事例（図７１の実線で囲んだ矩形領域）
2005 年 7 月 31 日 14 時



（ｂ）地上 2m

図７３　気温分布の事例（図７１の実線で囲んだ矩形領域）　　続き
2005 年 7 月 31 日 14 時

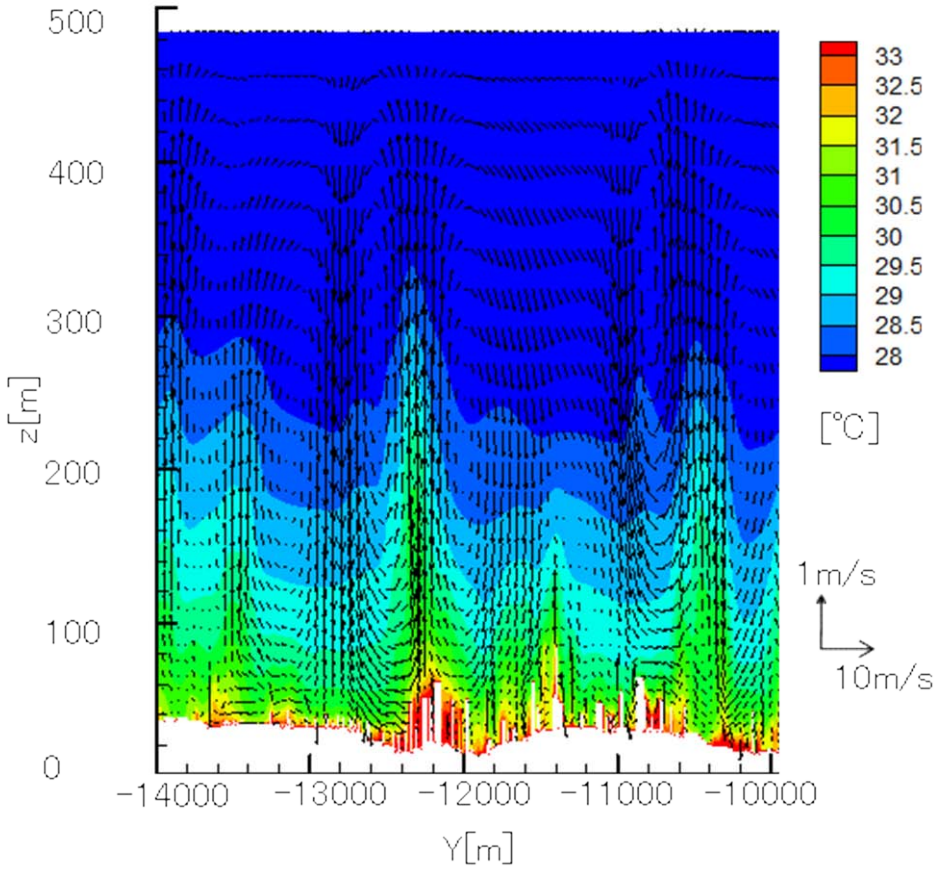
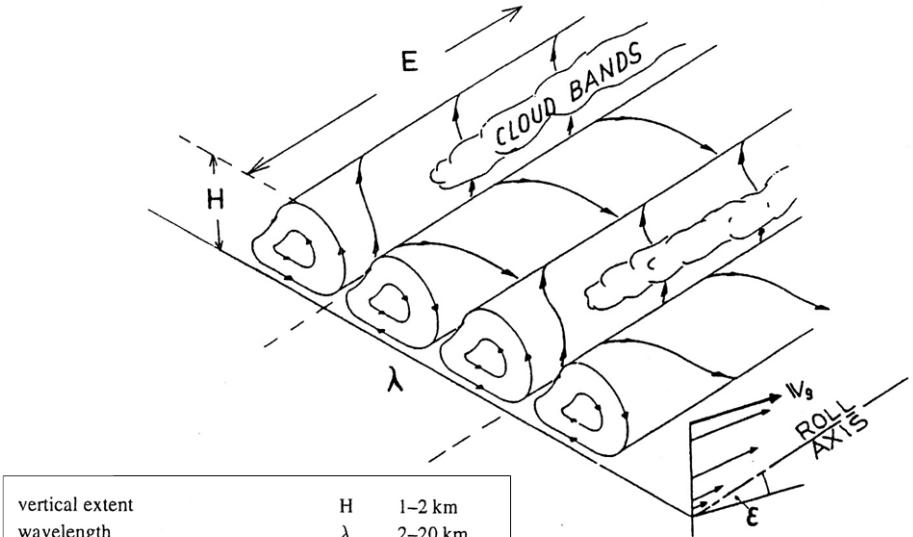


図７４　気温、風速の鉛直断面分布（図７１の点線部分）
2005 年 7 月 31 日 14 時



vertical extent	H	1–2 km
wavelength	λ	2–20 km
aspect ratio	λ/H	2–15
downstream extent	E	10–1000 km
orientation of roll axis to mean wind	ε	–20° to +30°
life time	τ	1–72 h

図７５　水平ロール渦

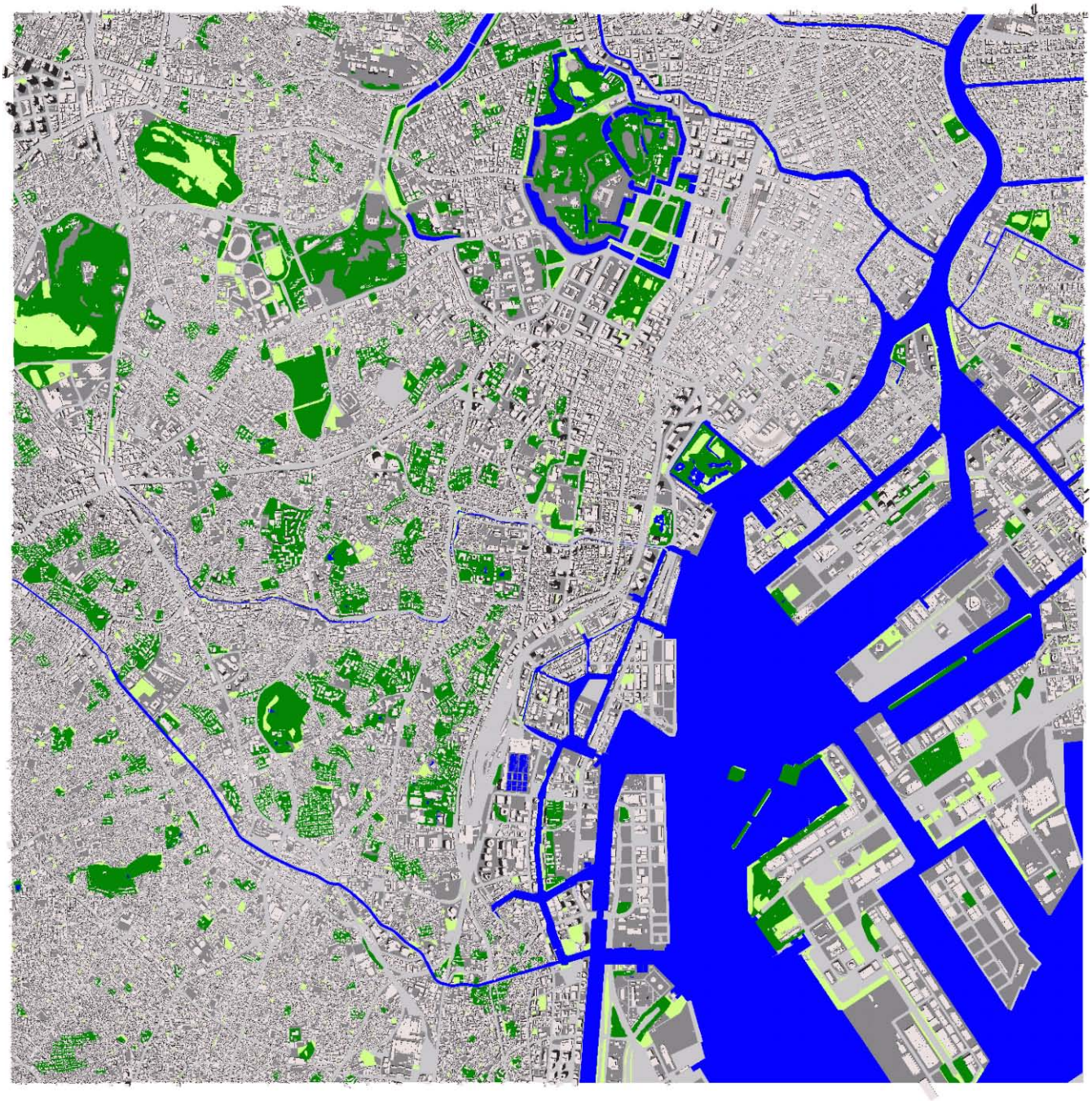
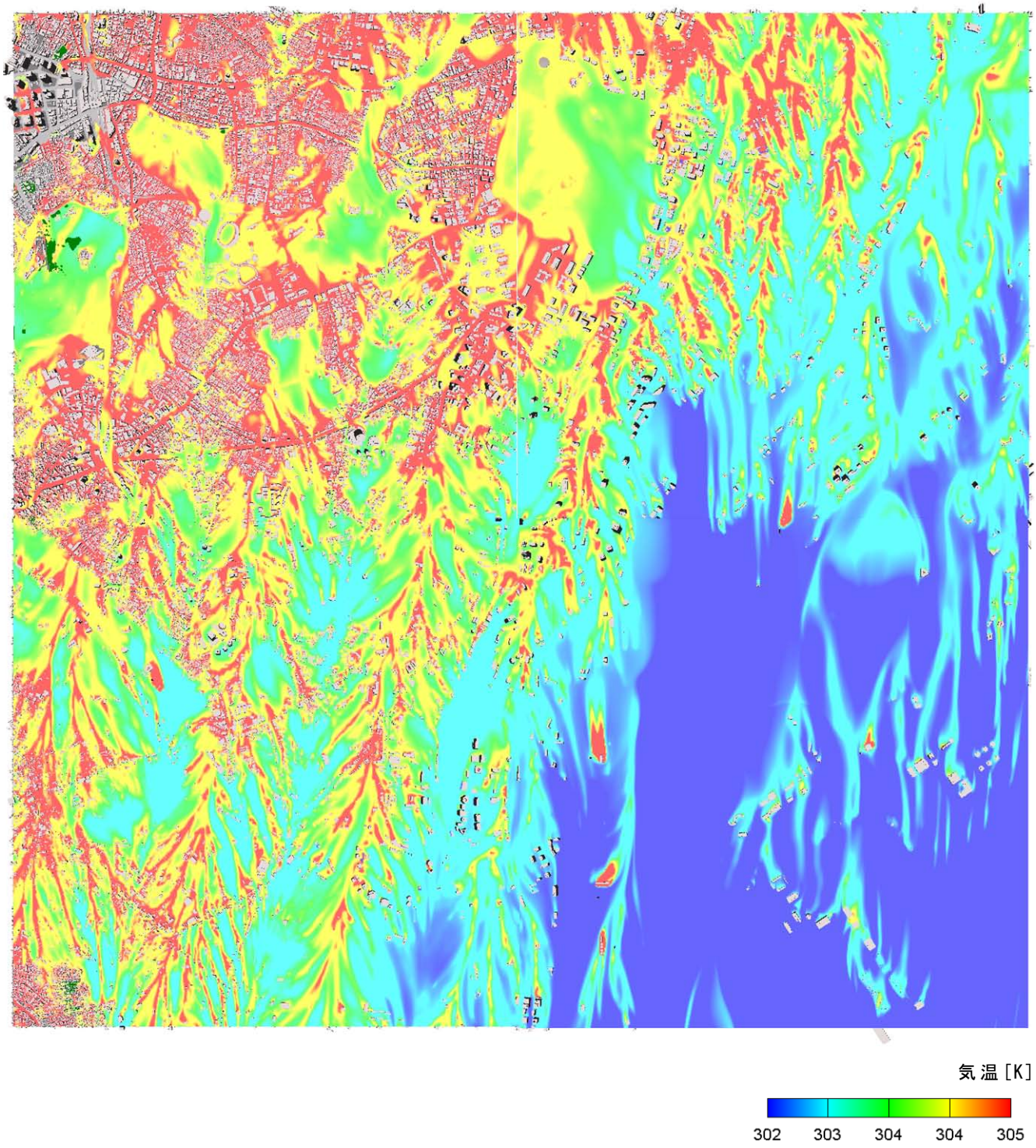
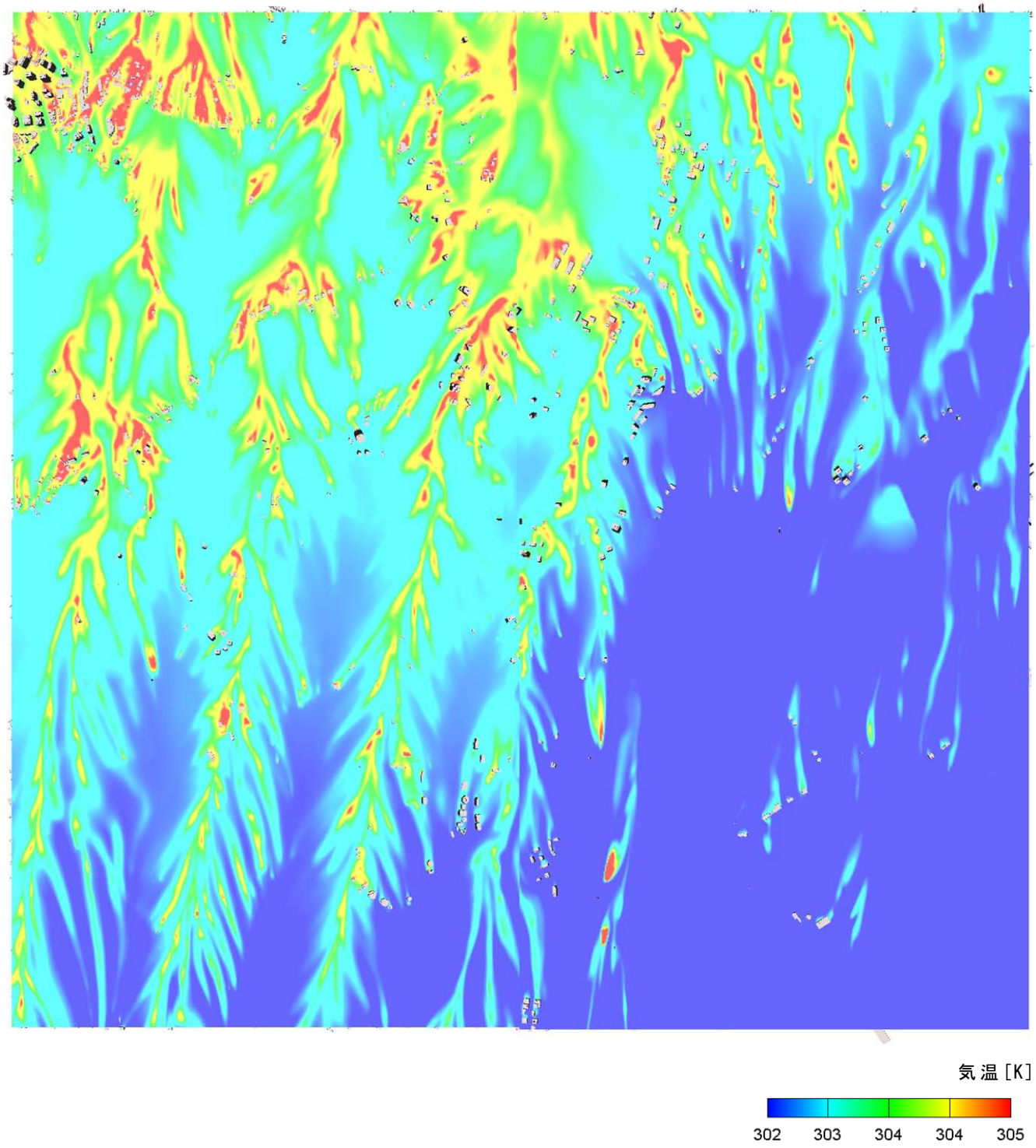


図７６　東京都心臨海部（10km 四方）



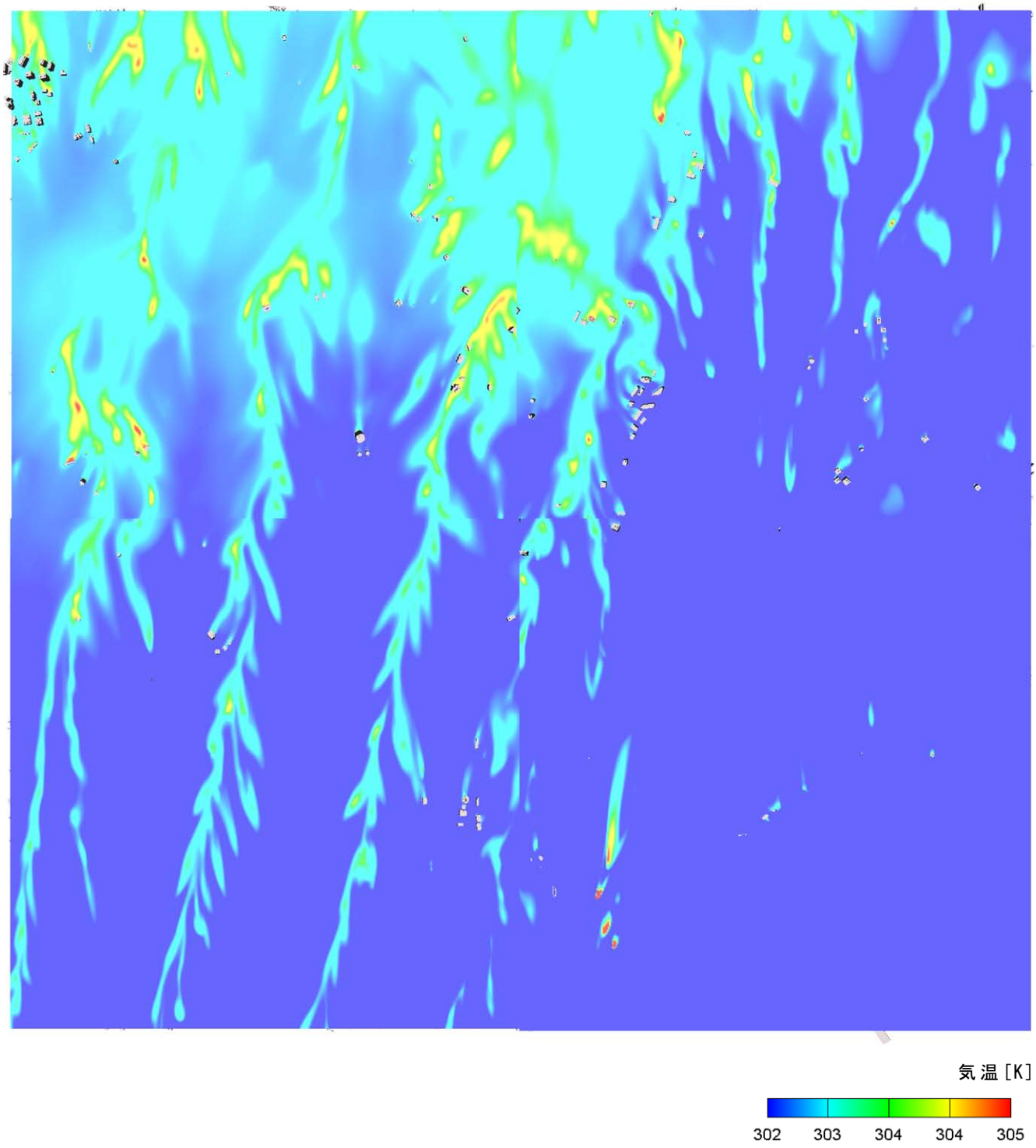
（ａ）標高 34.7m

図７７　東京都心臨海部（10km 四方）における気温分布
2005 年 7 月 31 日 14 時



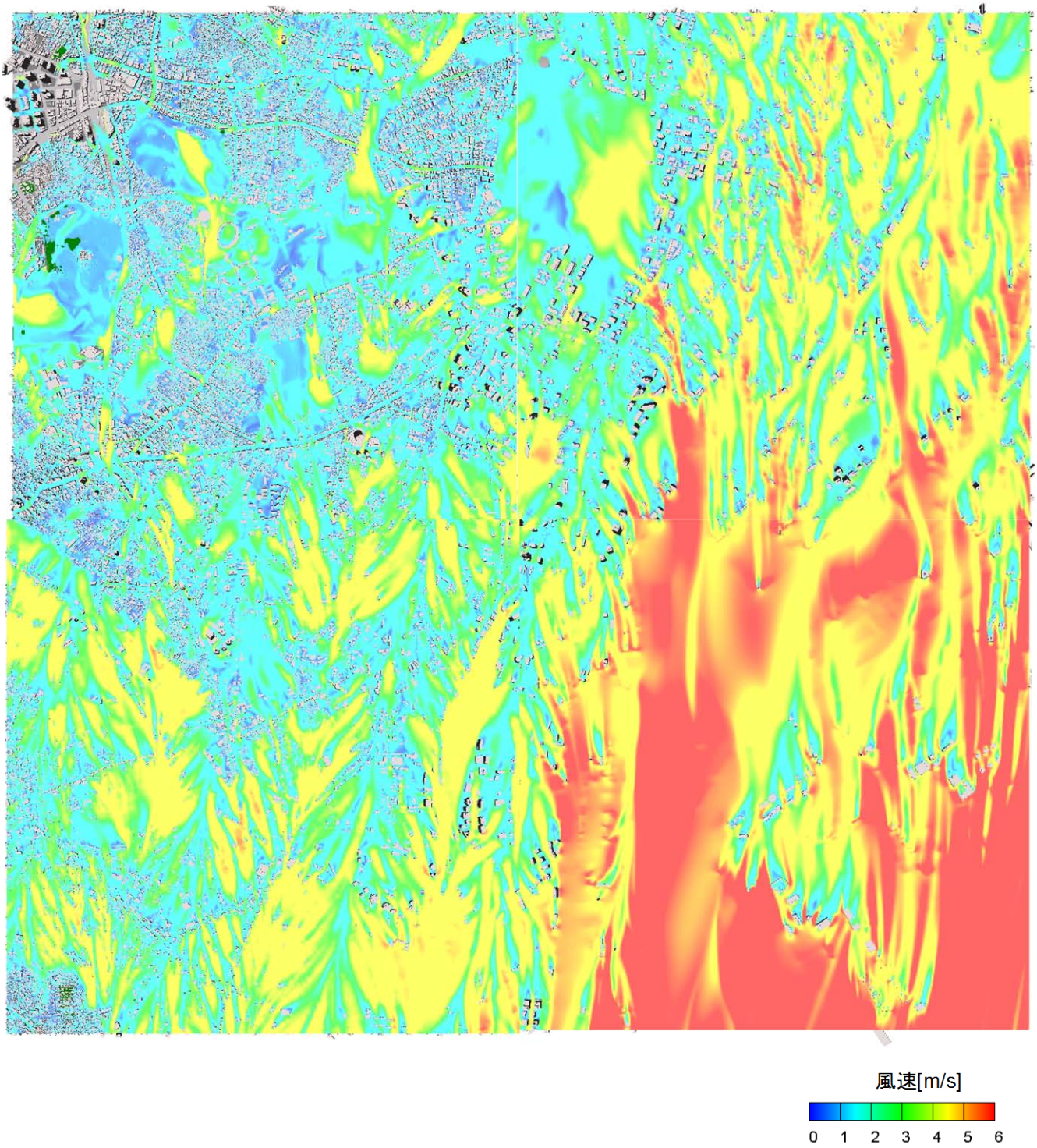
（ｂ）標高 65.1m

図７７　東京都心臨海部（10km 四方）における気温分布　　続き
2005 年 7 月 31 日 14 時



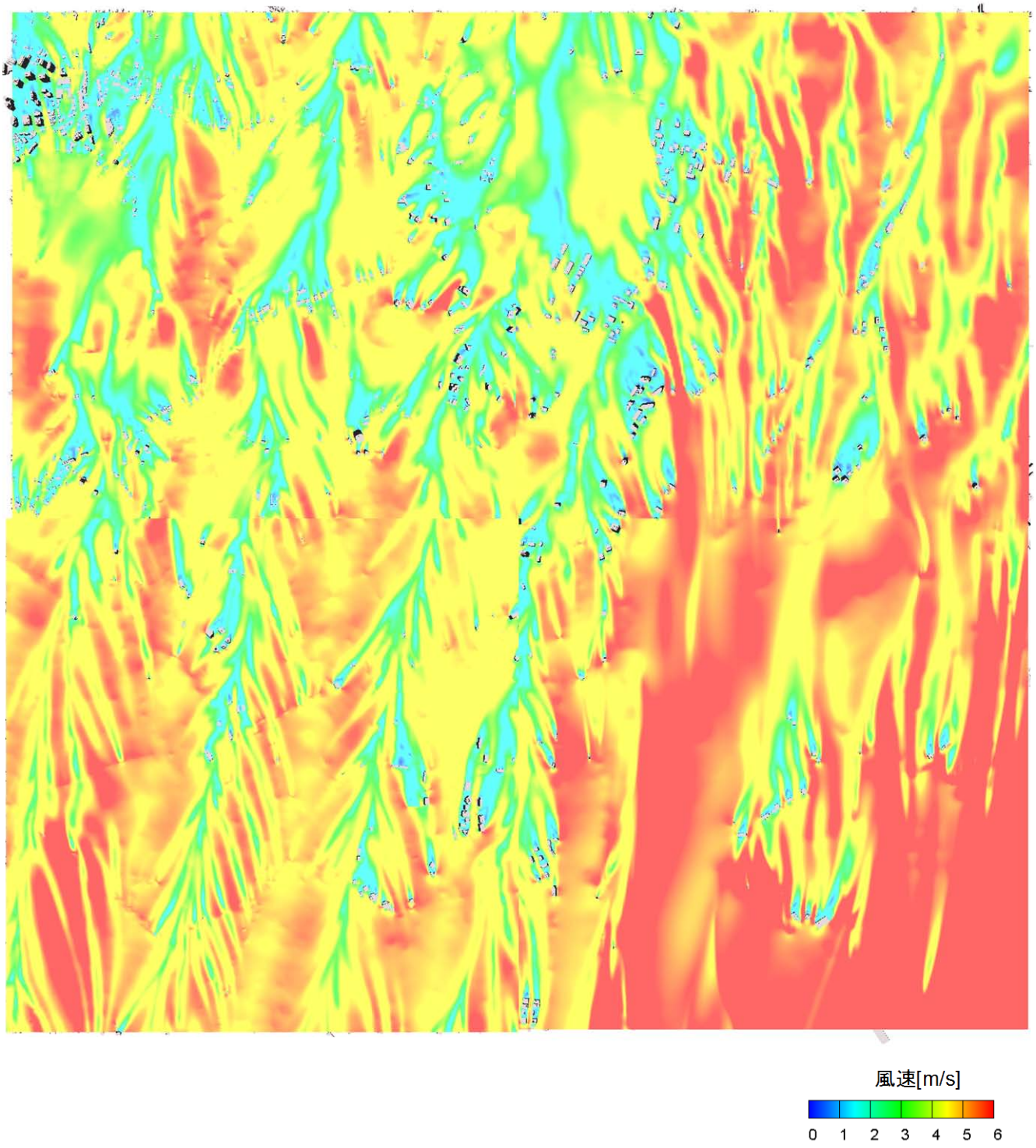
（ｃ）標高 112.6m

図７７　東京都心臨海部（10km 四方）における気温分布　続き
2005 年 7 月 31 日 14 時



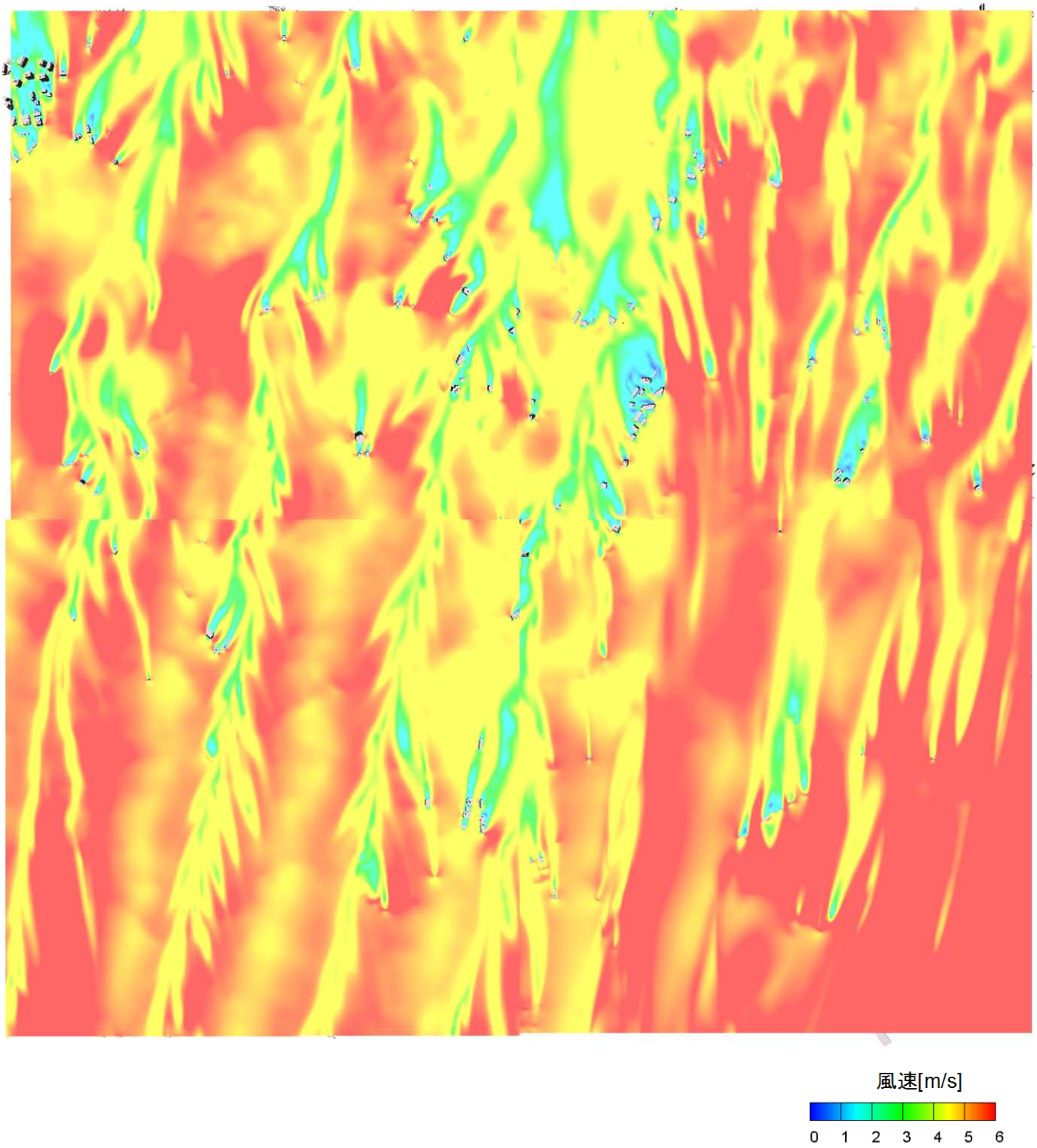
（ａ）標高 34.7m

図７８　東京都心臨海部（10km 四方）におけるスカラー風速分布
2005 年 7 月 31 日 14 時



（ｂ）標高 65.1m

図７８　東京都心臨海部（10km 四方）におけるスカラー風速分布　続き
2005 年 7 月 31 日 14 時

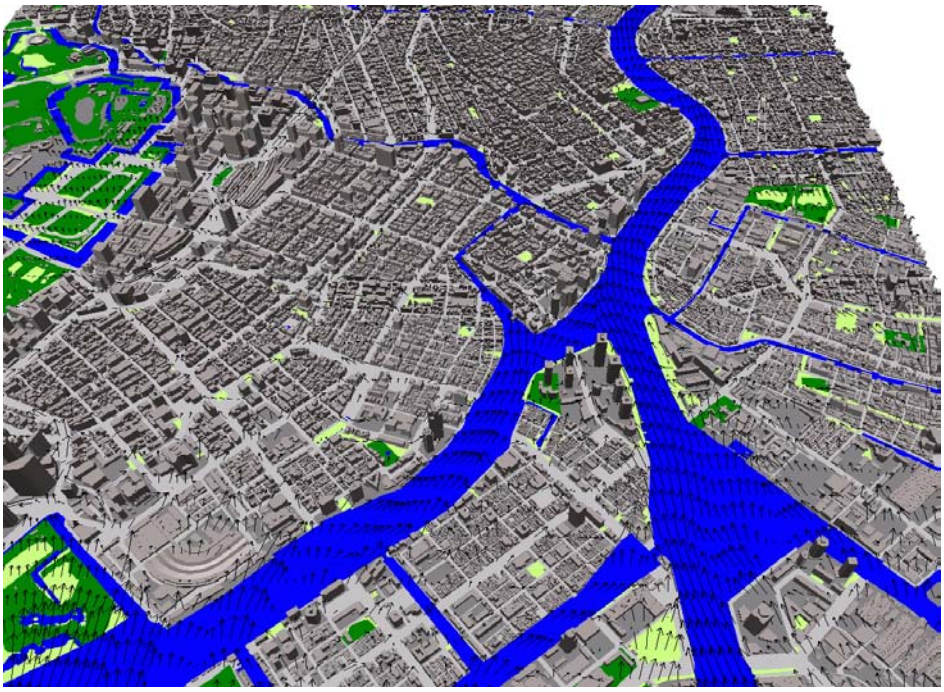


（ｃ）標高 112.6m

図７８　東京都心臨海部（10km 四方）におけるスカラー風速分布　続き

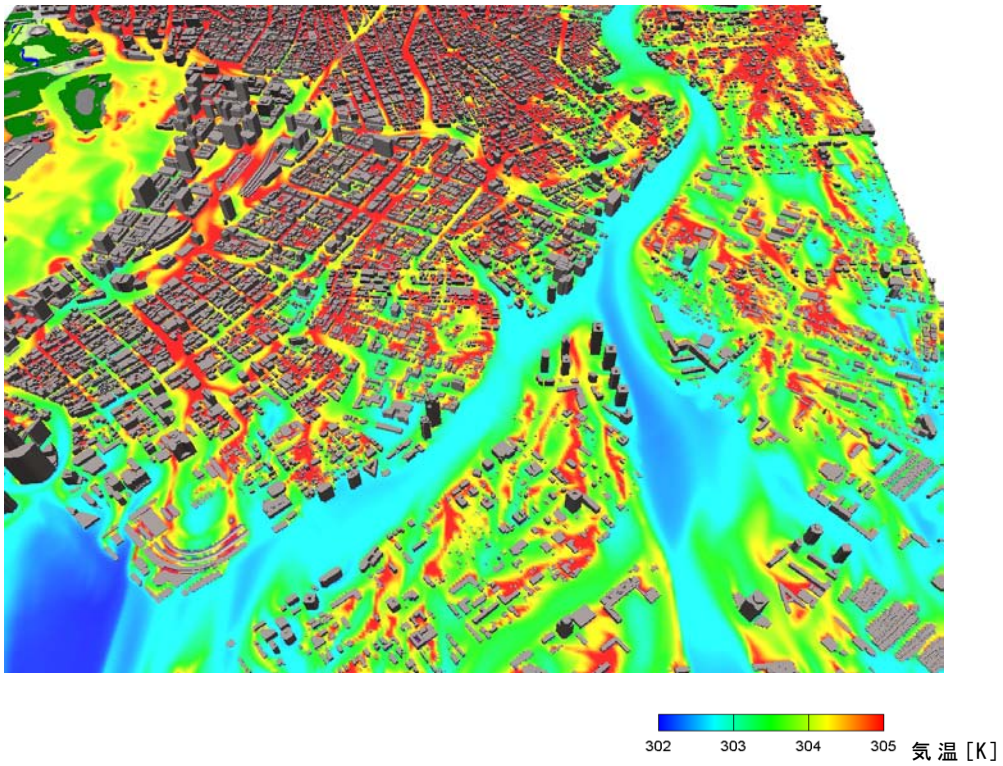
2005 年 7 月 31 日 14 時

（ａ） 土地利用



（ｂ） 風速（標高 11.0m）

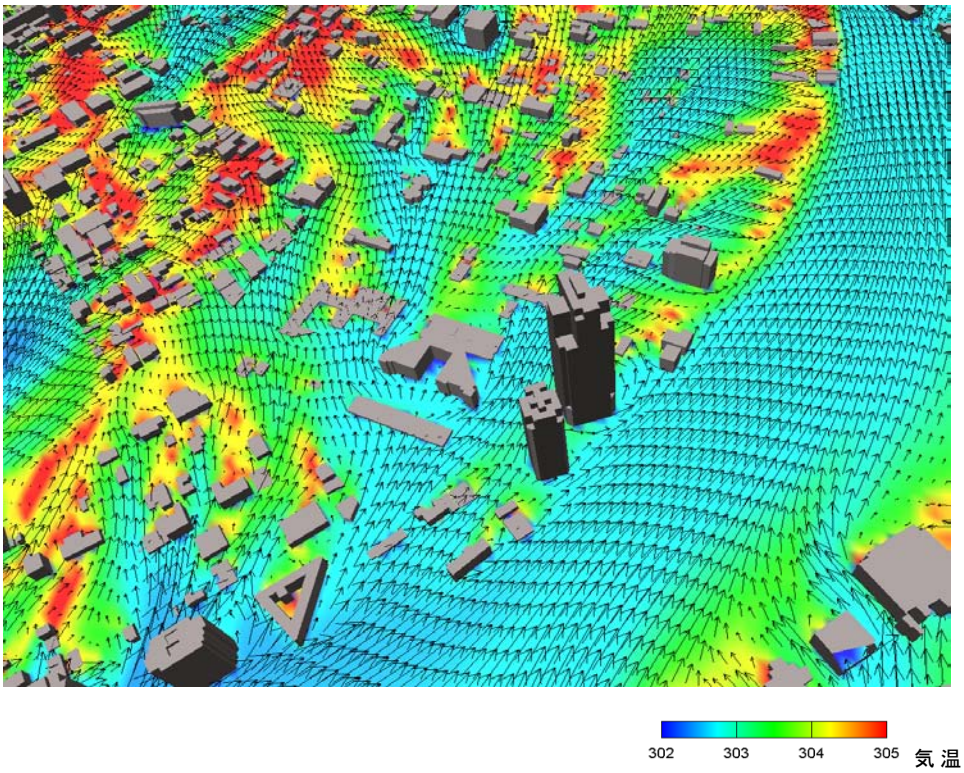
図７９　隅田川
2005 年 7 月 31 日 14 時



（ｃ）気温（標高 11.0m）

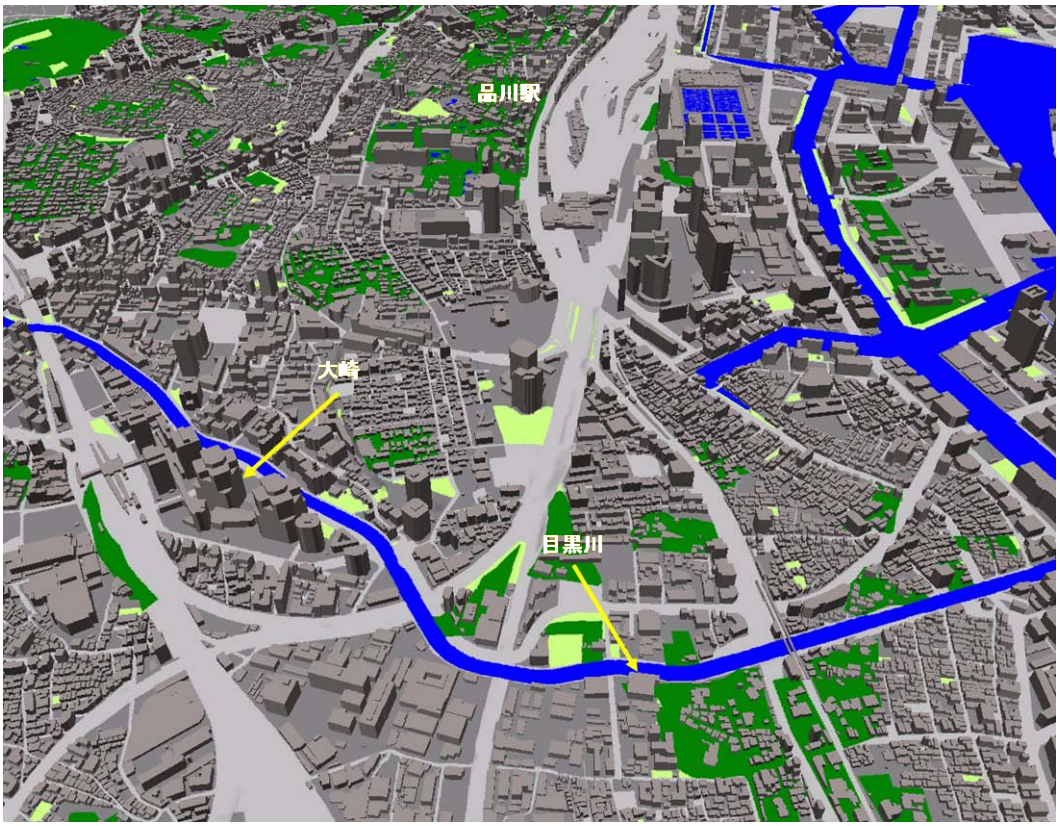
（ｄ）土地利用その２

図７９　隅田川　続き
2005 年 7 月 31 日 14 時



（ｅ）気温（標高 21.5m）・風速（標高 23.2m）

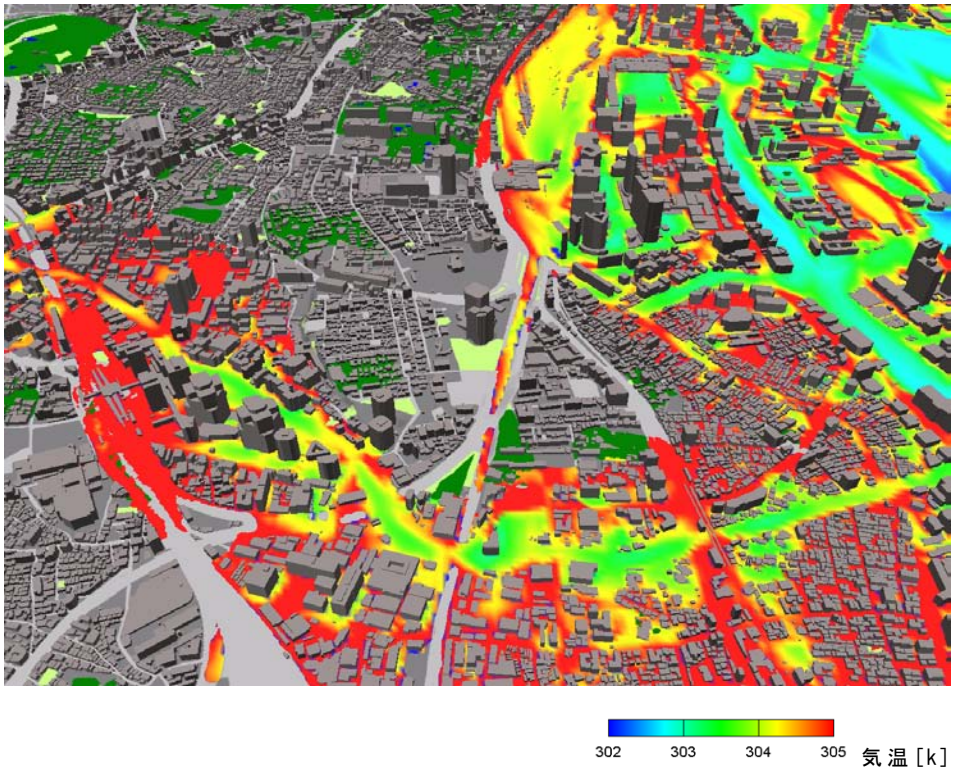
図７９　隅田川　続き
2005 年 7 月 31 日 14 時



（ａ） 土地利用

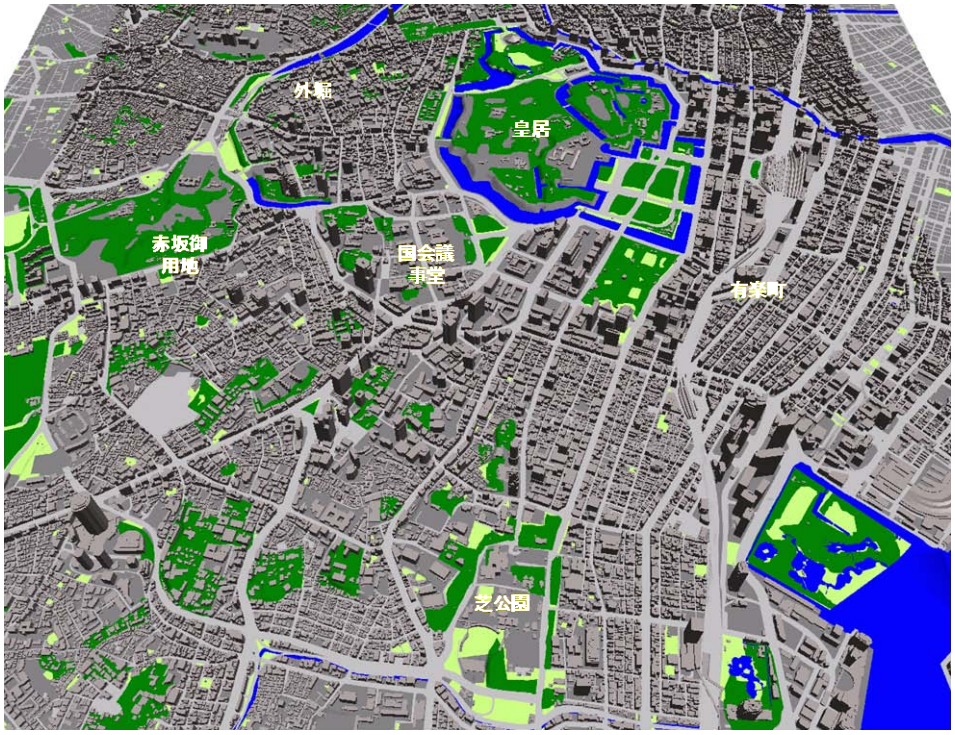
（ｂ） 風速（標高 3.6m）

図８０　目黒川
2005 年 7 月 31 日 14 時

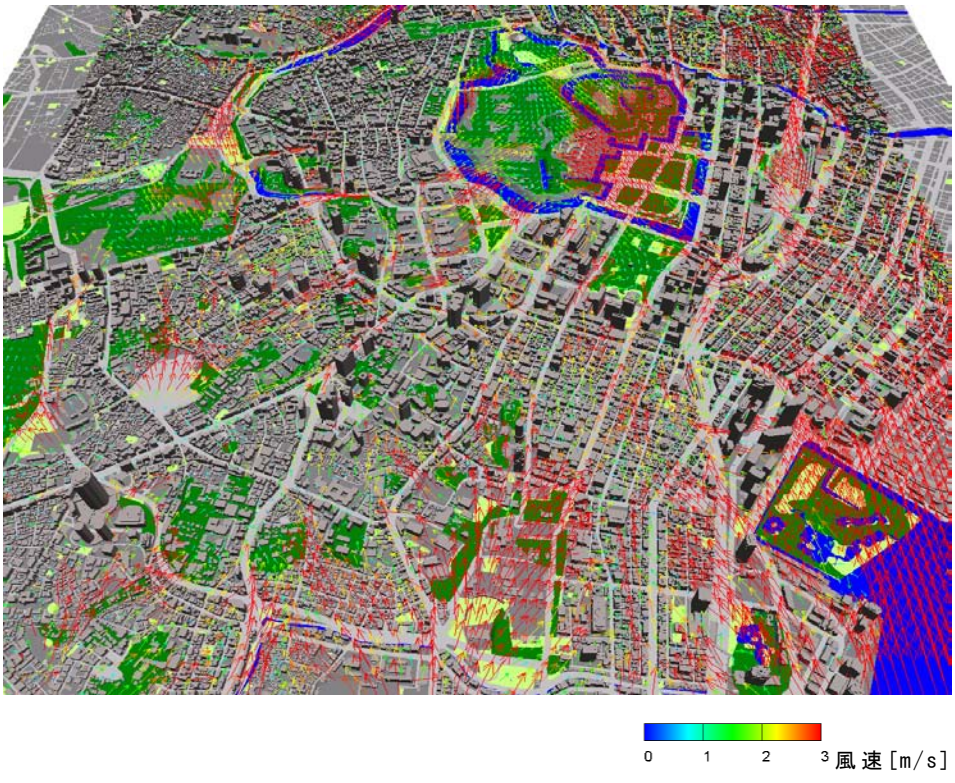


（ｃ）気温（標高 3.6m）

図８０　目黒川　続き
2005 年 7 月 31 日 14 時

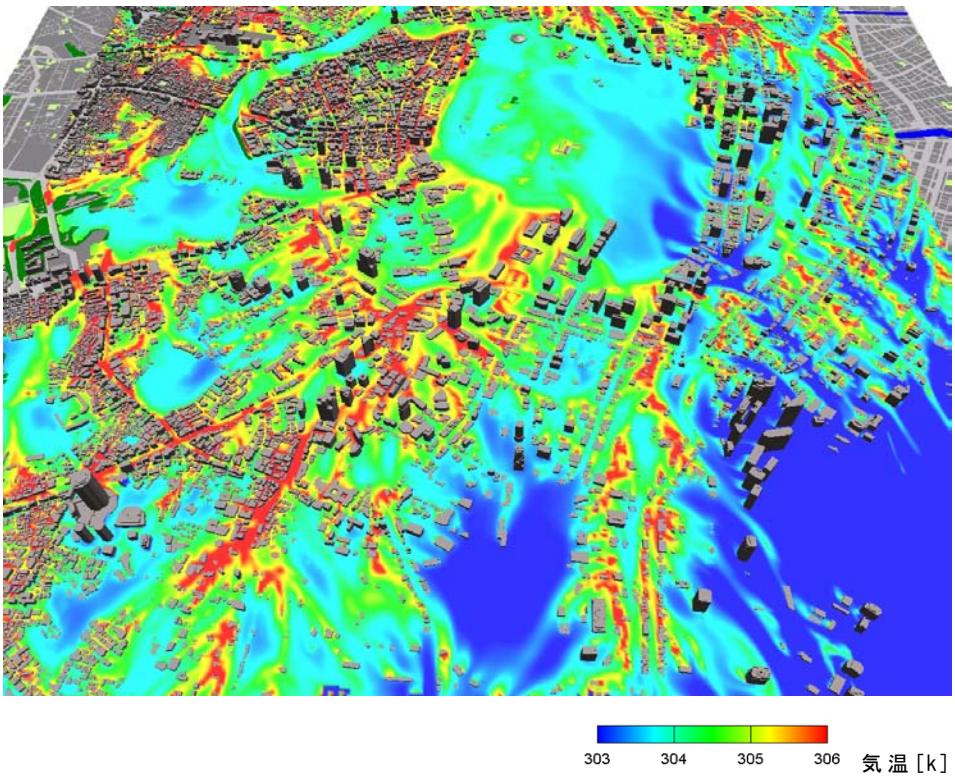


（ａ） 土地利用



（ｂ） 風速（標高 30.6m）

図８１　皇居
2005 年 7 月 31 日 14 時



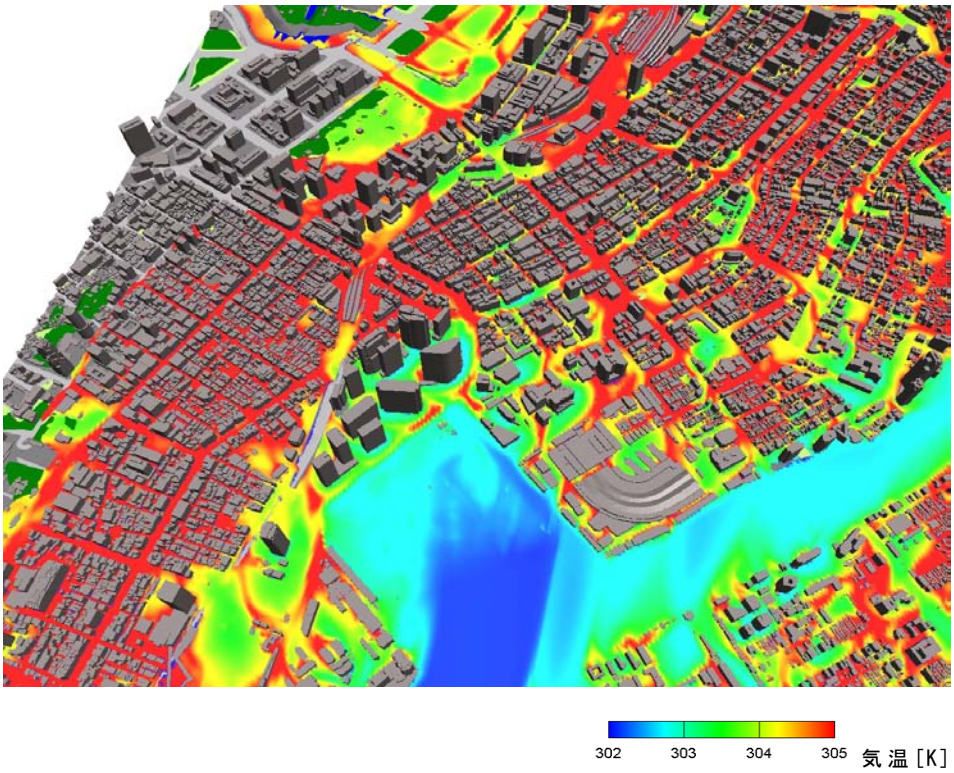
（ｃ）気温（標高 30.6m）

図８１　皇居　　続き
2005 年 7 月 31 日 14 時

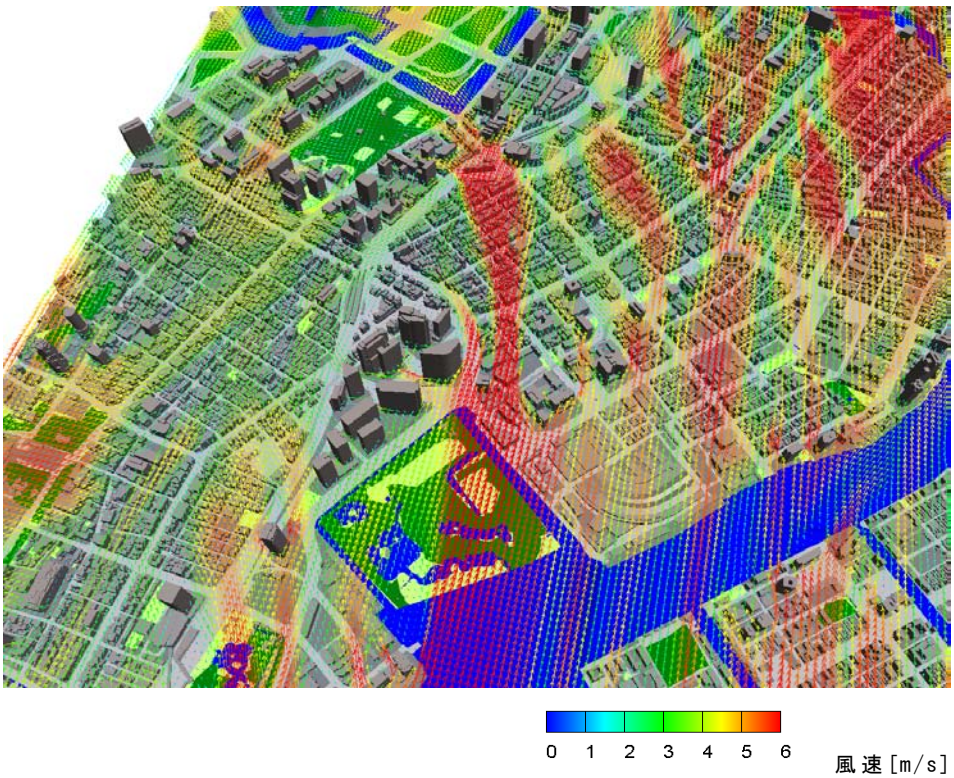
（ａ） 土地利用

（ｂ） 風速（標高 3.6m）

図８２　汐留・有楽町
2005 年 7 月 31 日 14 時

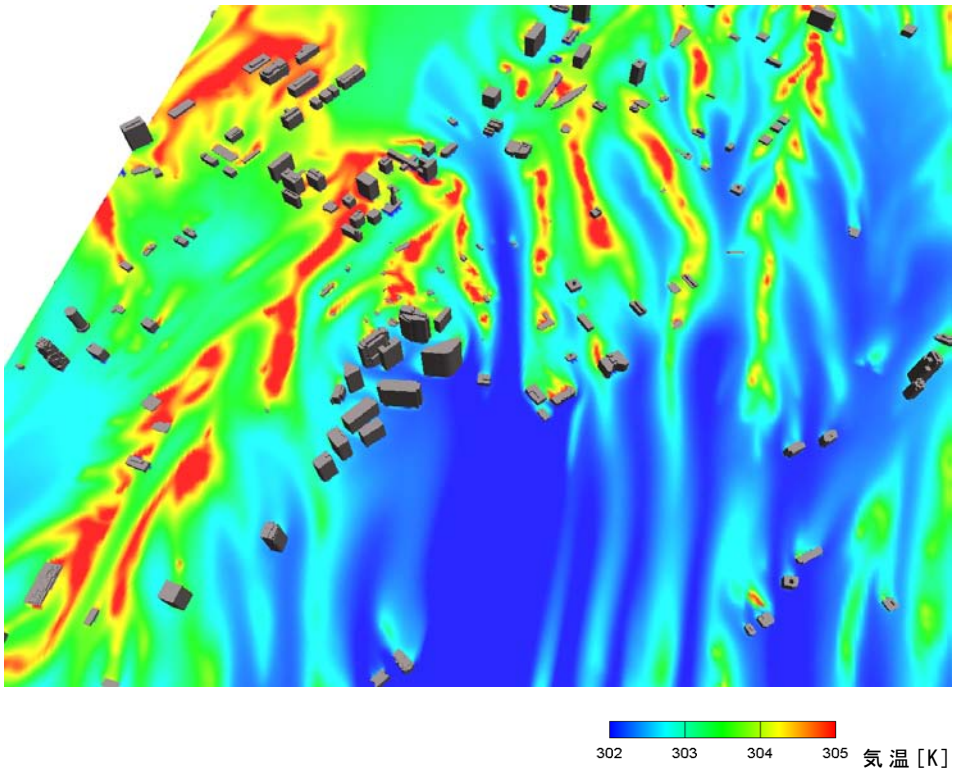


（ｃ）気温（標高 3.6m）



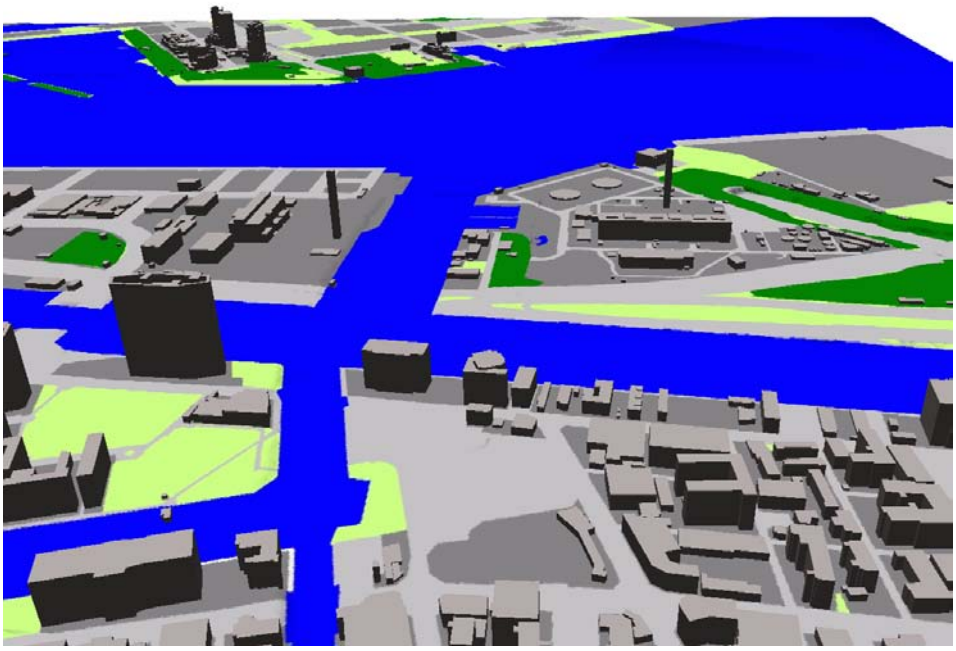
（ｄ）風速（標高 48.5m）

図８２　汐留・有楽町　続き
2005 年 7 月 31 日 14 時

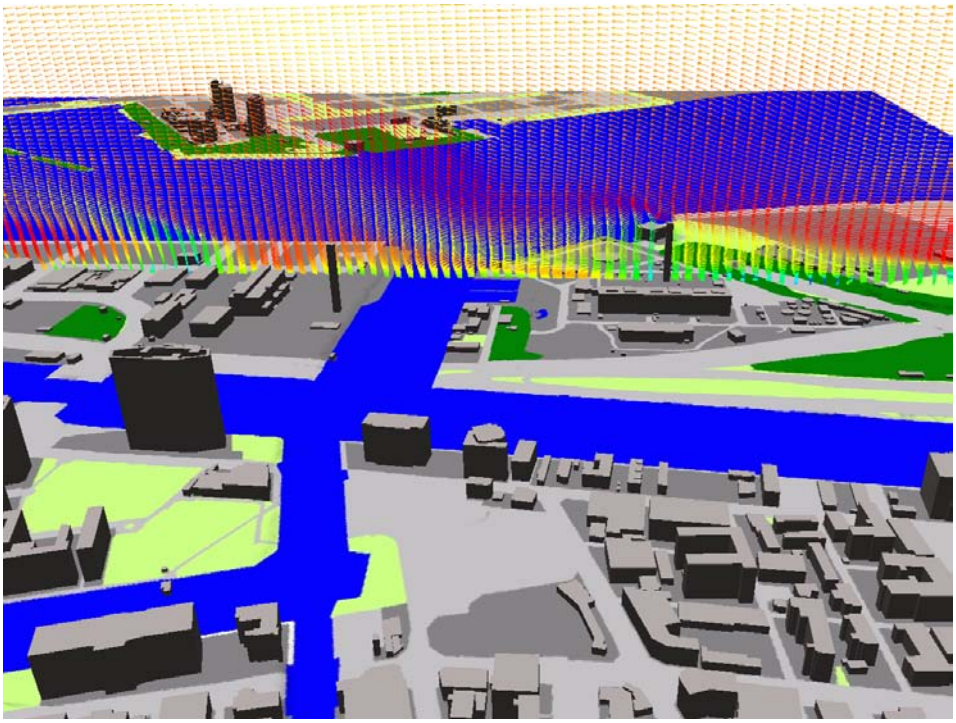


（ｅ）気温（標高 48.5m）

図８２　汐留・有楽町　続き
2005 年 7 月 31 日 14 時

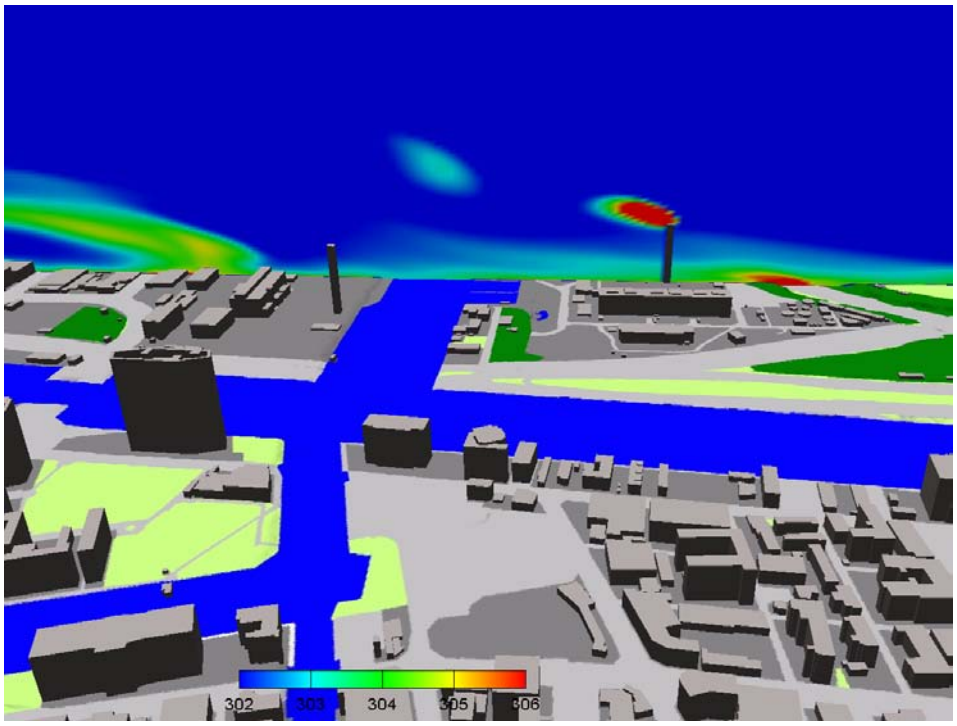


（ａ）土地利用



（ｂ）風速

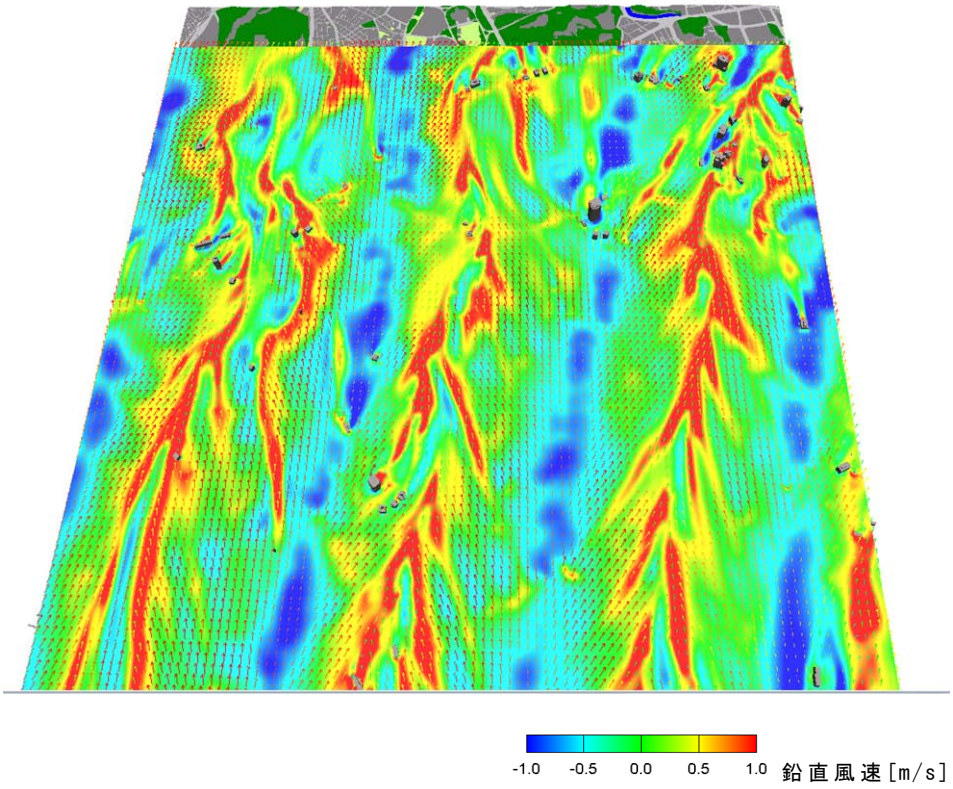
図８３　臨海部のライフライン施設
2005 年 7 月 31 日 14 時



（ｃ）気温

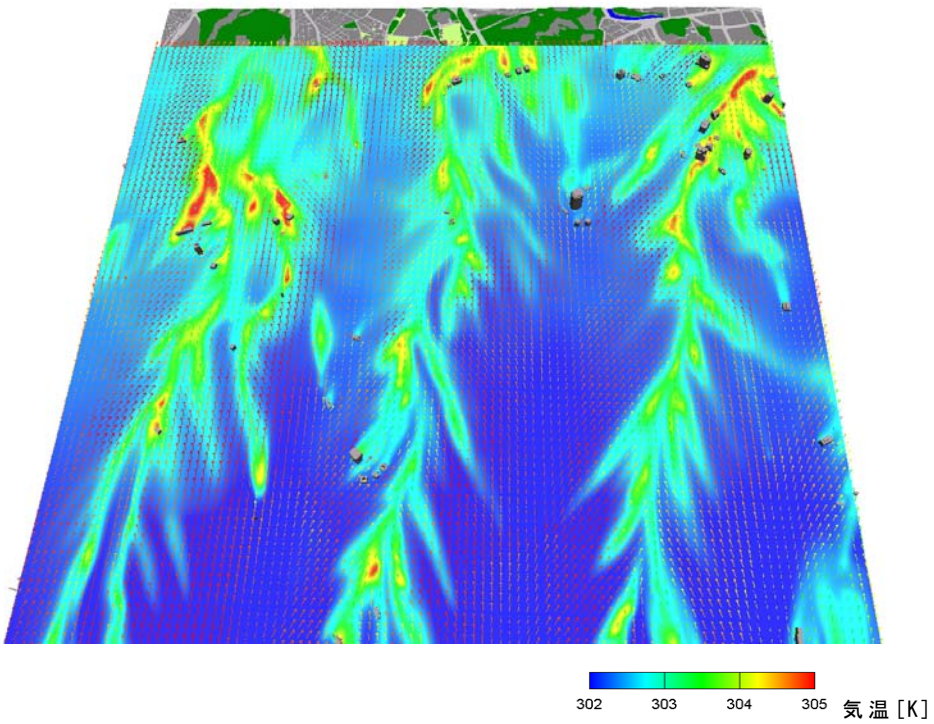
図８３　臨海部のライフライン施設　続き
2005 年 7 月 31 日 14 時

（ａ）土地利用

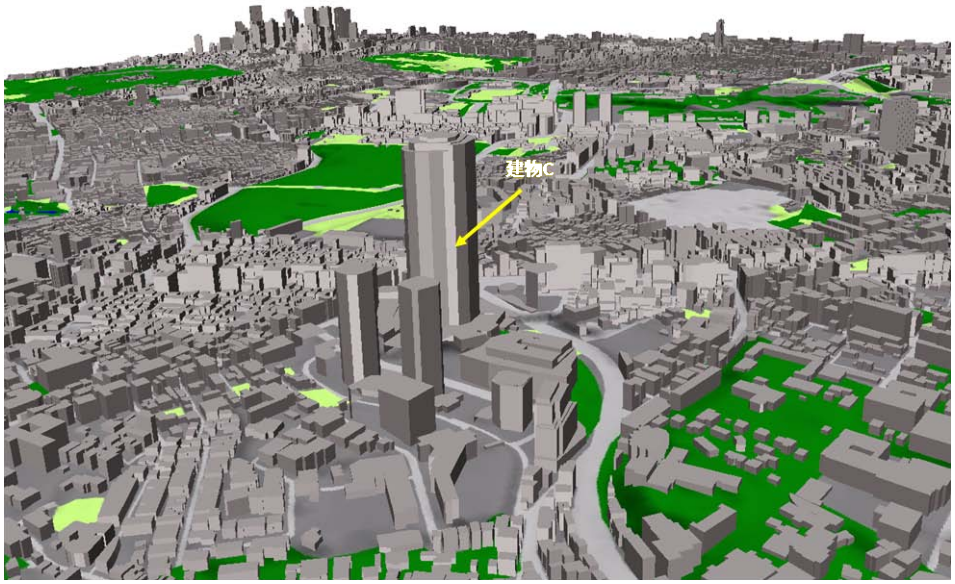


（ｂ）風速ベクトル（u,v）（標高 92.3m）・鉛直風速（標高 88.6m）

図８４　赤坂・六本木・恵比寿
2005 年 7 月 31 日 14 時

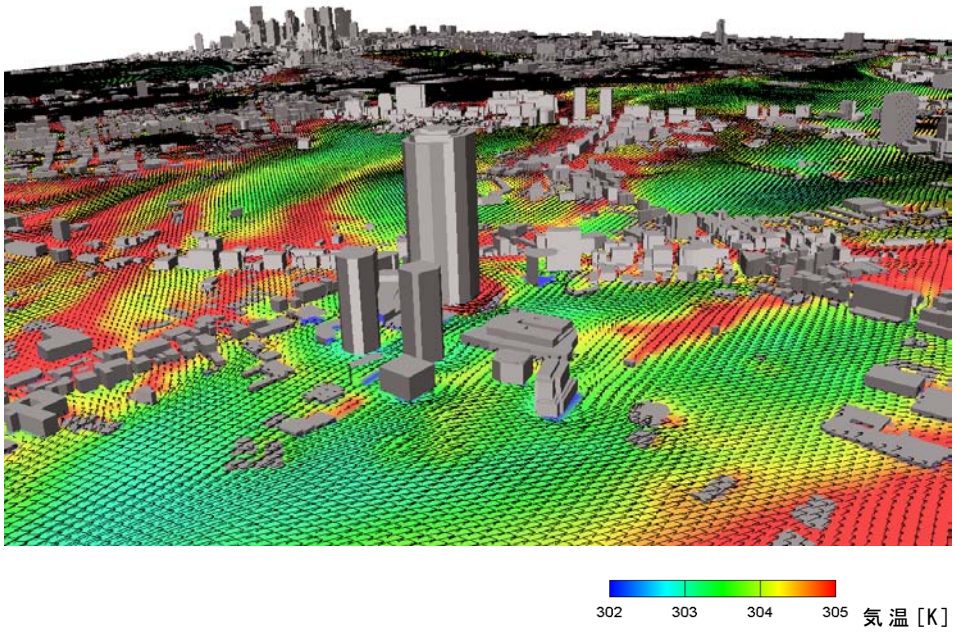


（ｃ）風速ベクトル（u,v）（標高 92.3m）・気温（標高 88.6m）



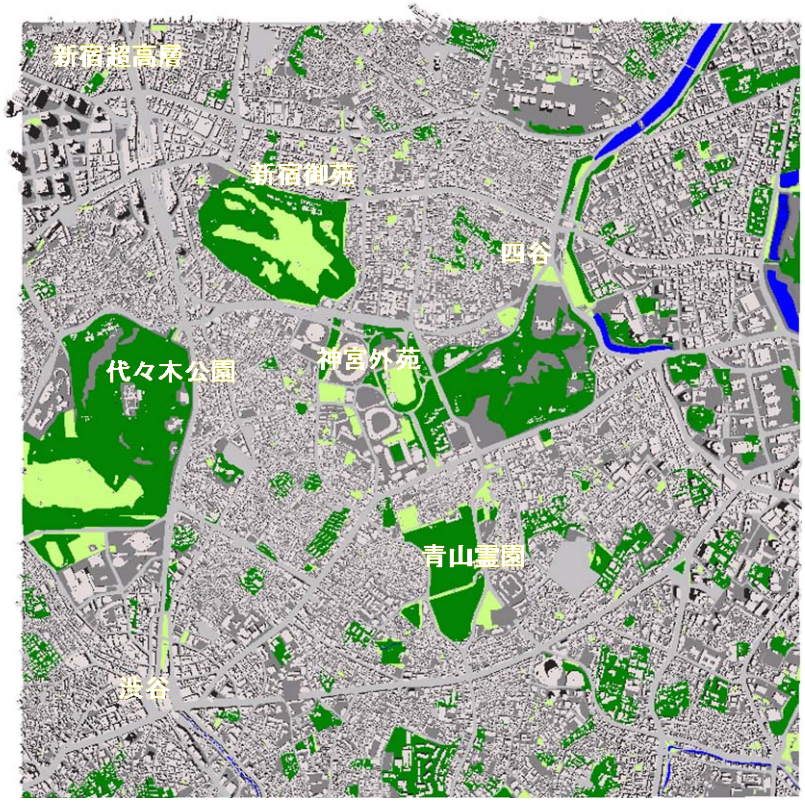
（ｄ）土地利用その２

図８４　赤坂・六本木・恵比寿　続き
2005 年 7 月 31 日 14 時

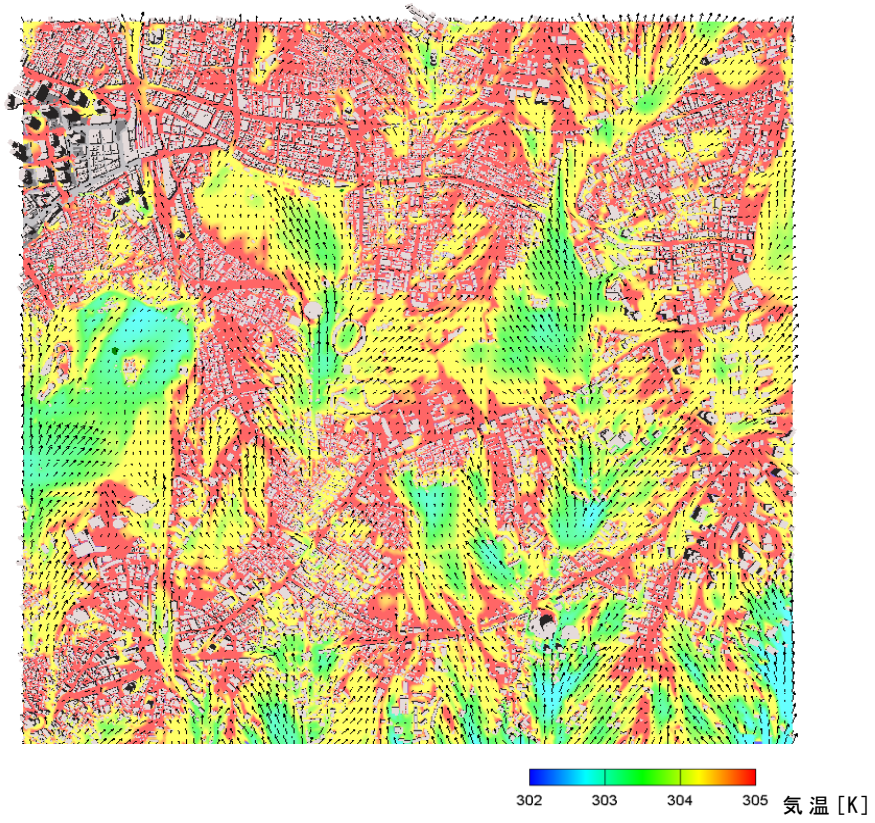


（ｅ）風速ベクトル（u,v）（標高 39.0m）・気温（標高 36.8m）

図８４　赤坂・六本木・恵比寿　続き
2005 年 7 月 31 日 14 時



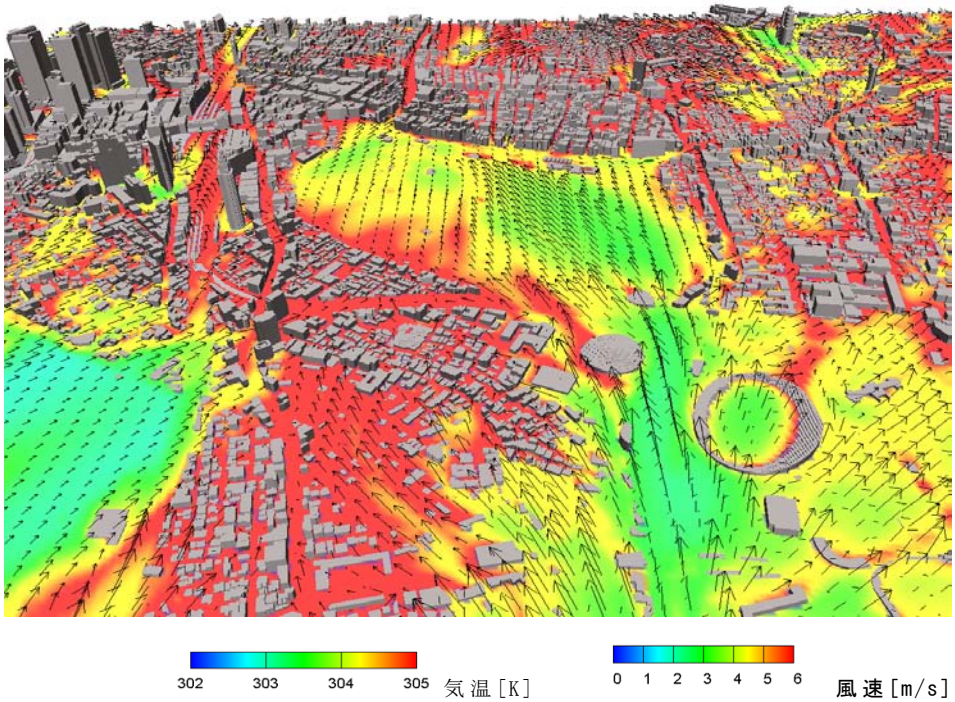
（ａ） 土地利用



（ｂ） 風速ベクトル（u,v）（標高 39.0m）・気温（標高 36.8m）

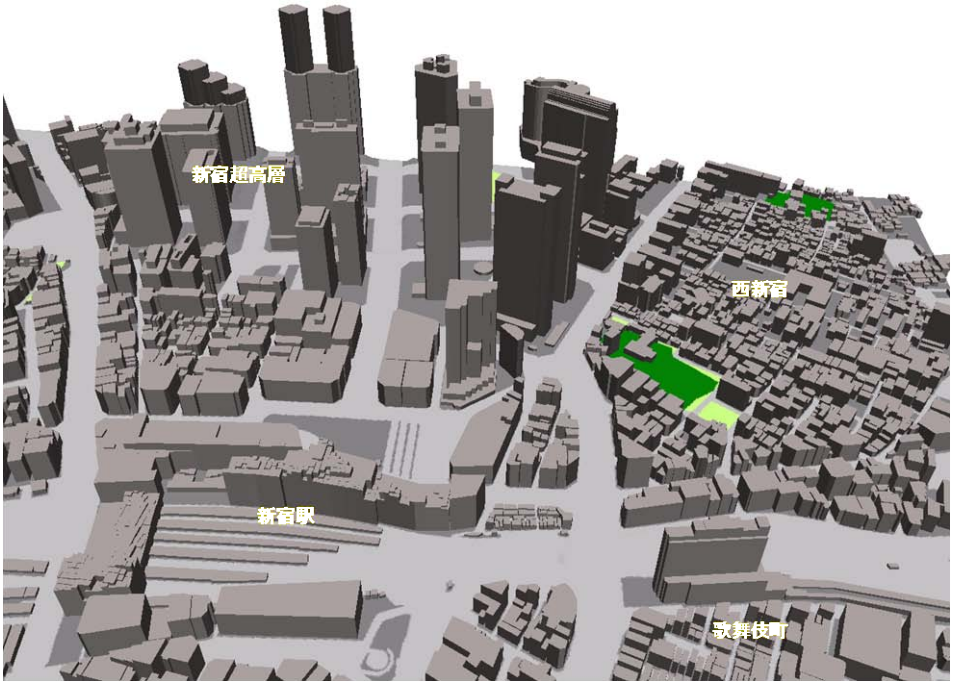
図８５　新宿・渋谷・四谷

（ｃ）土地利用２

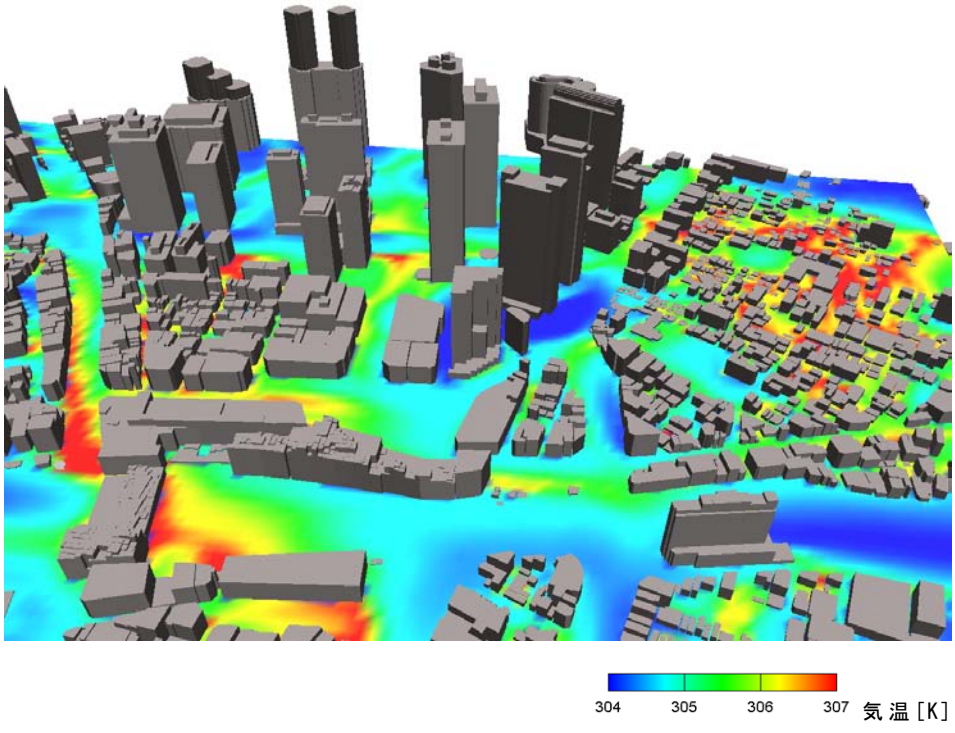


（ｄ）風速ベクトル（u,v）（標高 39.0m）・気温（標高 36.8m）

図８５　新宿・渋谷・四谷　　続き
2005 年 7 月 31 日 14 時

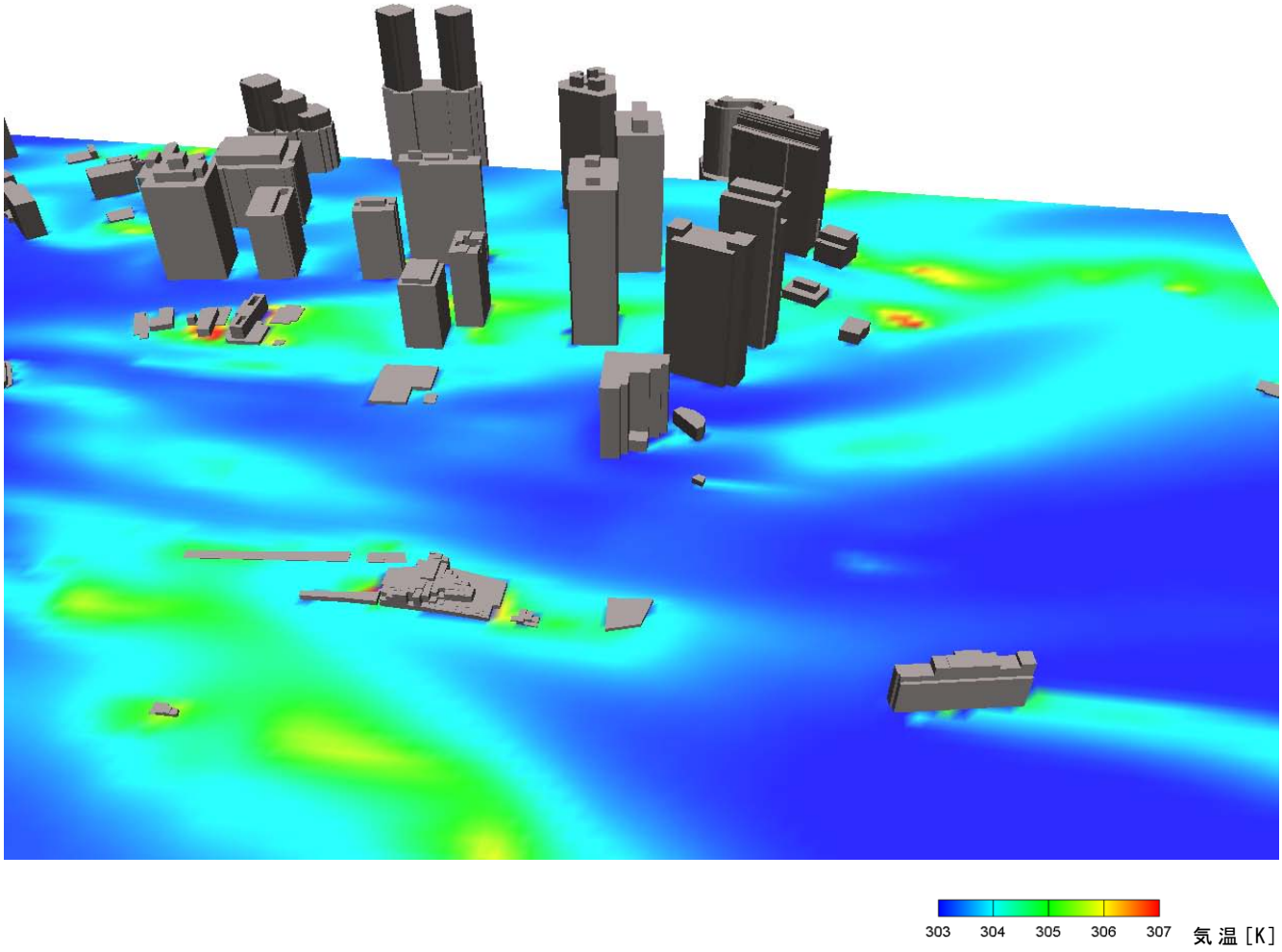


（ｅ）土地利用３



（ｆ）気温（標高 41.3m）

図８５　新宿・渋谷・四谷　　続き
2005 年 7 月 31 日 14 時



（ｇ）気温（標高 77.9m）

図８５　新宿・渋谷・四谷　　続き
2005 年 7 月 31 日 14 時

表３６　主成分分析による成分行列

主成分	1	2	3	4	5
気温（地上10m）	0.8566	-0.3716	0.0951	-0.0258	-0.0296
スカラー風速（地上10m）	-0.9222	0.2019	-0.0476	0.0169	-0.0425
気温（地上100m）	0.7346	-0.4140	0.1934	-0.1499	-0.0170
スカラー風速（地上100m）	-0.7602	0.2759	-0.2221	0.1590	0.0080
標高	0.3603	-0.4462	0.0062	-0.1580	0.2628
建ぺい率	0.8210	-0.1962	-0.2801	0.3429	0.0573
草地面積率	-0.0446	-0.2511	0.5044	-0.5882	-0.0497
水面面積率	-0.7931	0.3583	-0.0958	0.0376	0.0329
樹木面積率	0.1282	-0.3098	0.2863	-0.4499	0.2150
建物高さ	0.6882	0.4433	0.2064	-0.0669	0.0516
オフィス床面積	0.5254	0.6829	-0.0010	-0.1615	0.1310
学校床面積	0.3983	0.0188	-0.0943	0.0750	0.3111
商業床面積	0.4313	0.3422	-0.1788	0.0167	0.1485
ホテル床面積	0.2702	0.4360	0.0289	-0.1722	0.2392
一戸建て住宅床面積	0.4757	-0.5777	-0.3033	0.2862	0.0124
集合住宅床面積	0.6182	-0.0996	-0.2824	0.3187	-0.0275
その他用途床面積	0.2642	0.0849	-0.0770	0.0836	0.3232
排熱対象外床面積	0.0648	0.2213	0.3554	0.2389	-0.1681
建物排熱（顕熱）	0.7004	0.5686	-0.1380	-0.0213	0.1478
建物排熱（潜熱）	0.4043	0.6623	0.0004	-0.2130	0.2640
工場排熱（顕熱）	0.0461	0.1091	0.6734	0.5557	0.1289
工場排熱（潜熱）	0.0233	0.0860	0.6577	0.5269	0.1160
自動車排熱（顕熱）	0.5987	0.2904	0.0244	-0.0515	-0.6542
自動車排熱（潜熱）	0.5828	0.2896	0.0312	-0.0534	-0.6663
固有値	7.357	3.271	1.817	1.692	1.448
累積寄与率[%]	30.7	44.3	51.9	58.9	64.9

表３７　類型毎のクラスター中心

	類型Ⅰ	類型Ⅱ	類型Ⅲ	類型Ⅳ	類型Ⅴ	類型Ⅵ
第1主成分得点	2.22715	0.23511	-0.05368	0.46807	-0.21228	-1.60617
第2主成分得点	3.43060	0.78479	-0.52247	-0.26647	2.33531	0.76730
第3主成分得点	-0.08655	4.30356	0.79634	-0.36192	17.73289	-0.29621
第4主成分得点	-1.05411	3.34843	-1.04121	0.41279	14.36207	0.17105
第5主成分得点	1.05533	-0.23183	0.06921	-0.13280	3.01716	0.08423

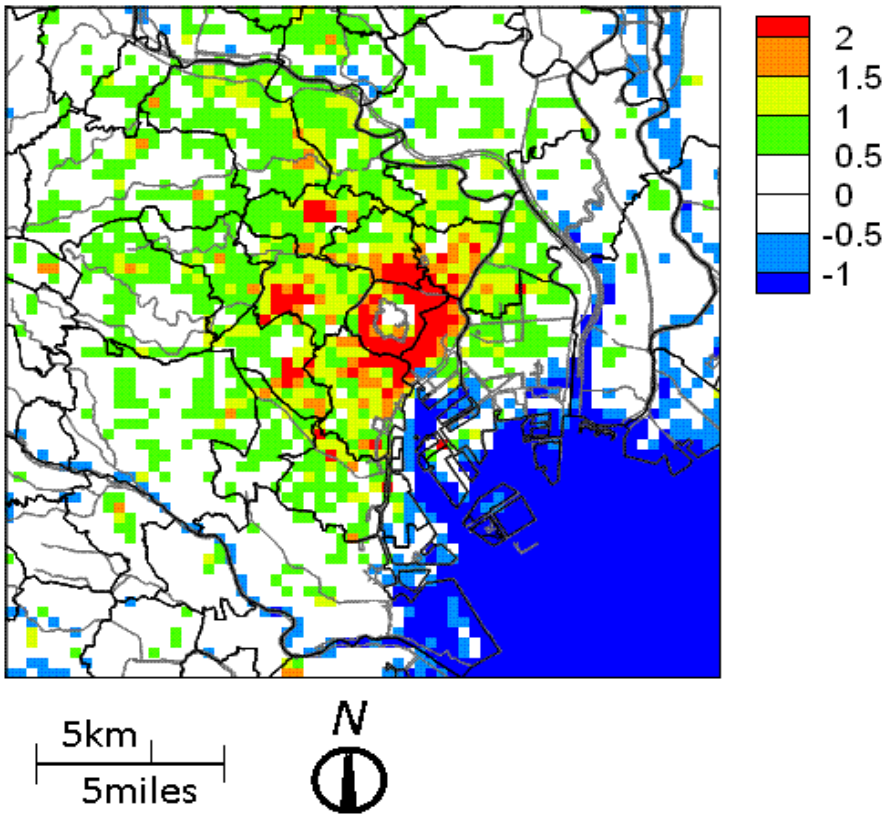


図８６　第１主成分得点の分布

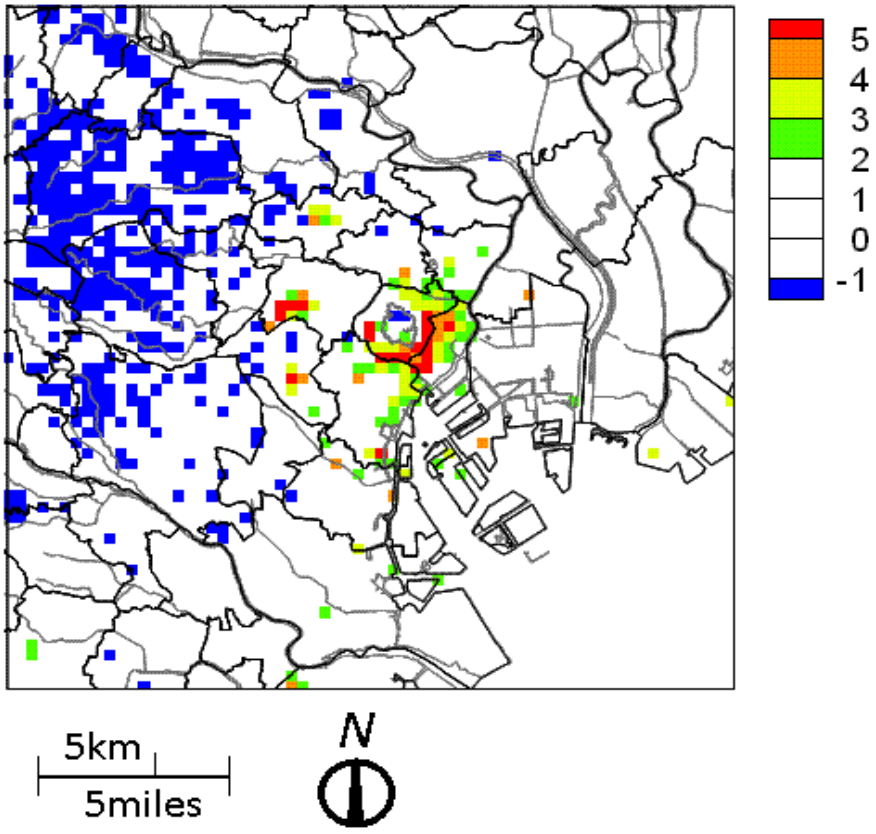


図８７　第２主成分得点の分布

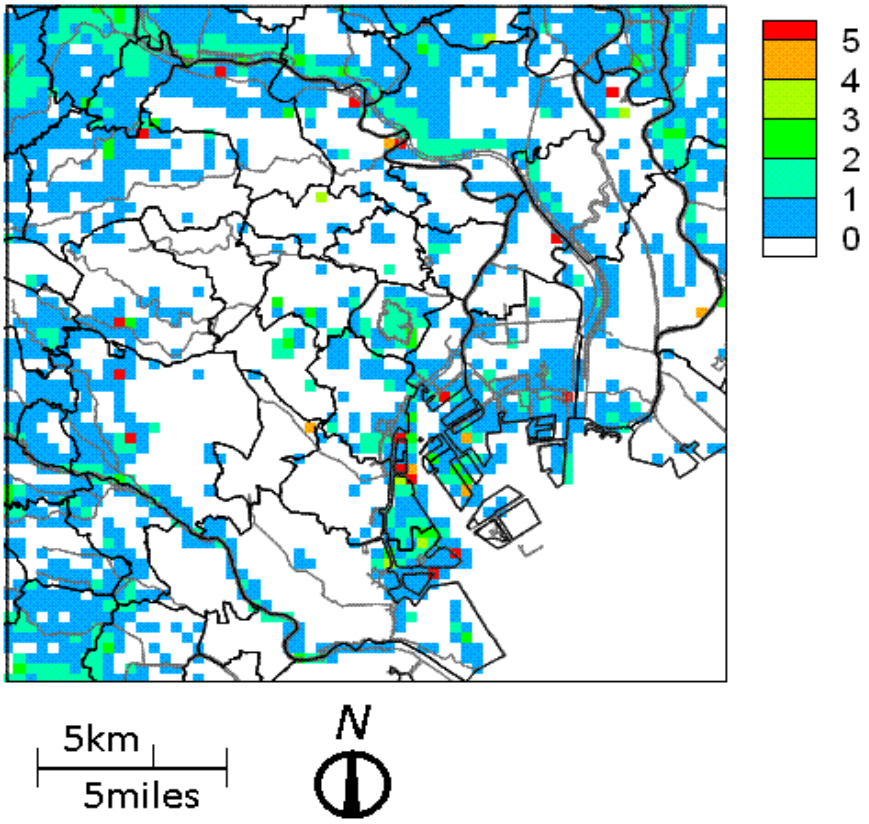


図８８　第３主成分得点の分布

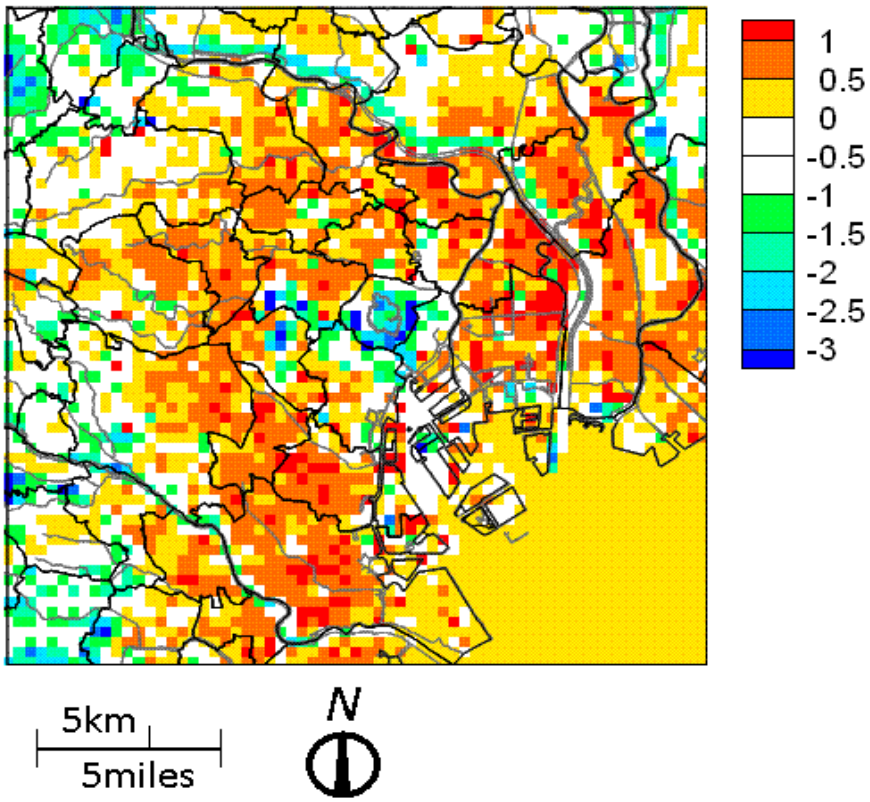


図８９　第４主成分得点の分布

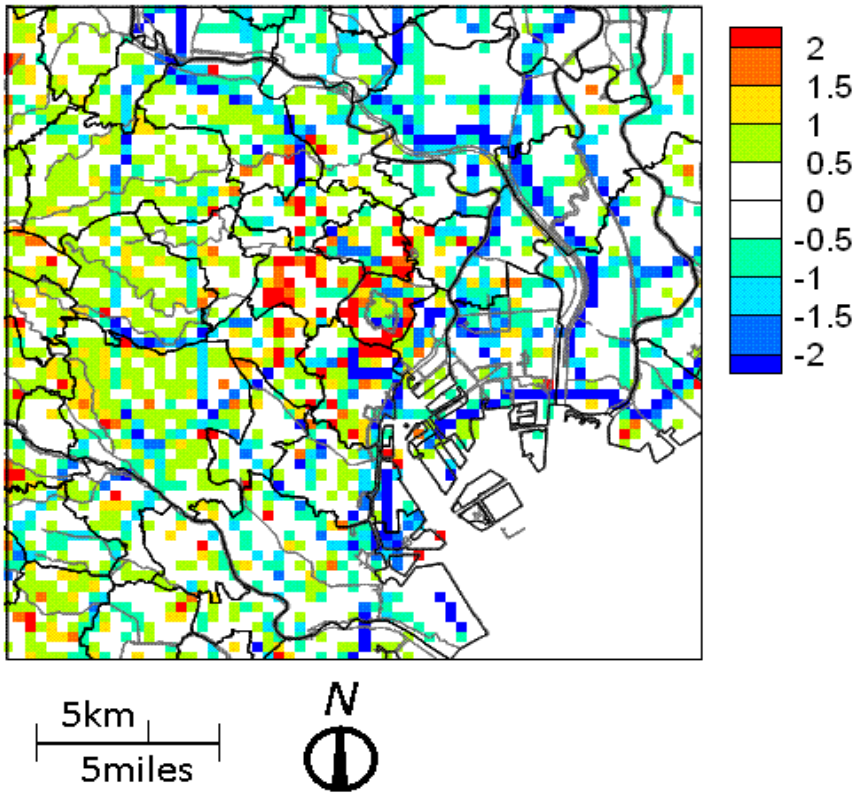


図９０　第５主成分得点の分布

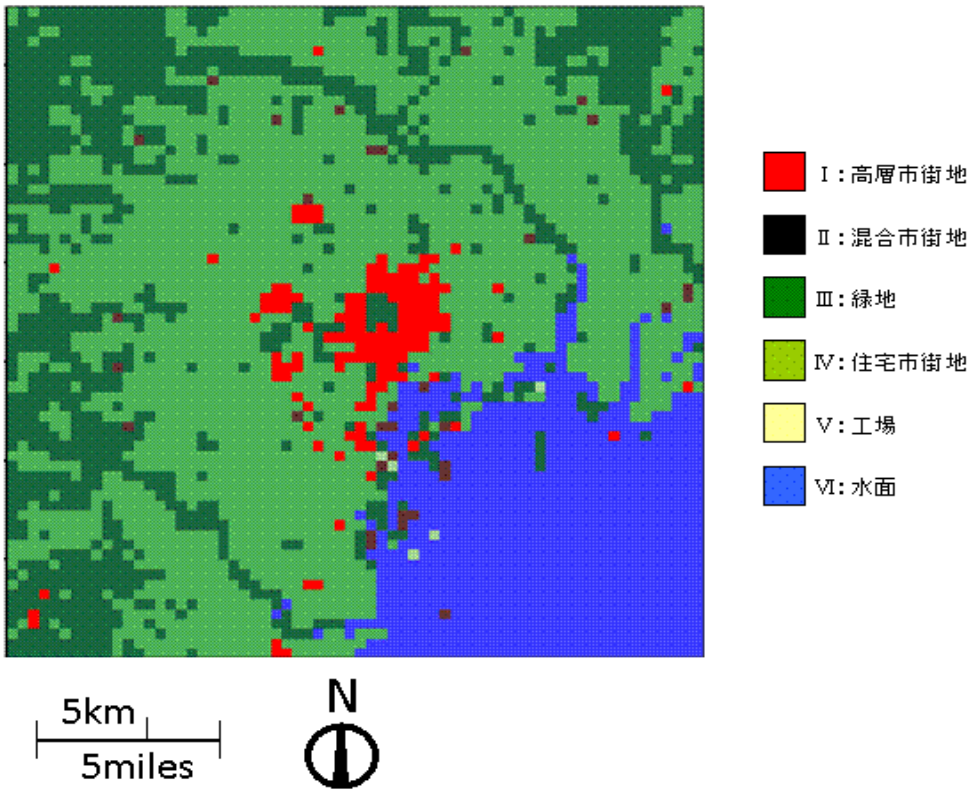
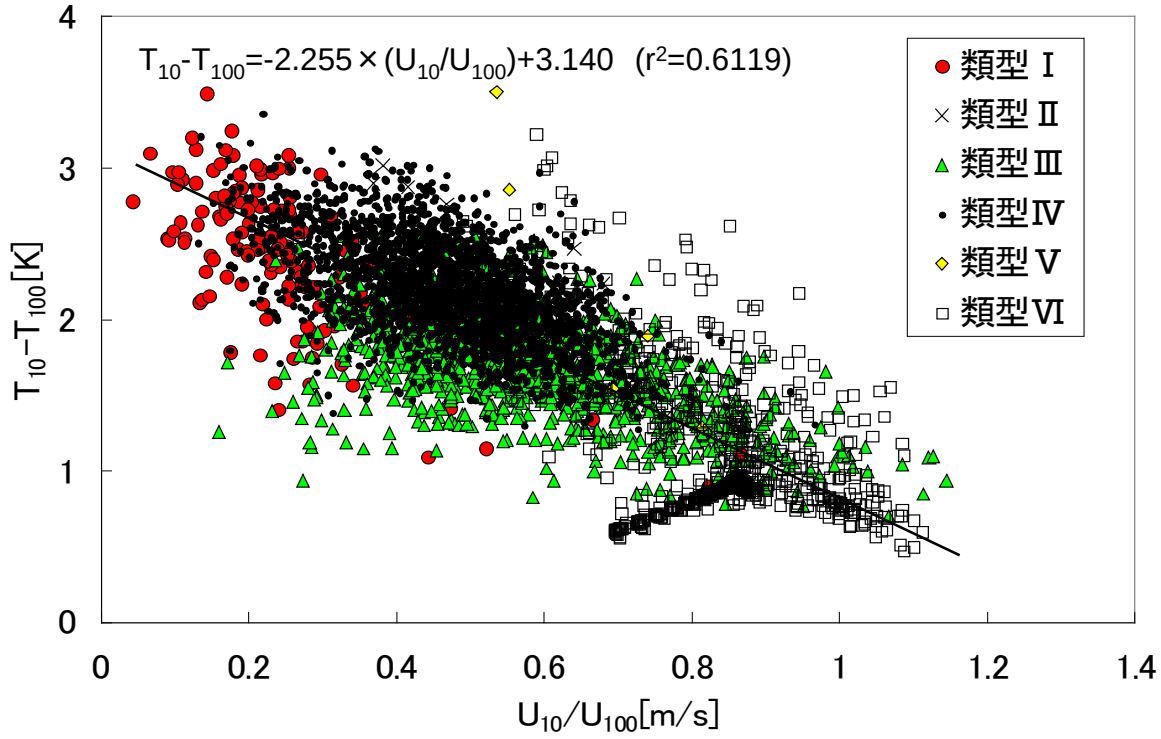
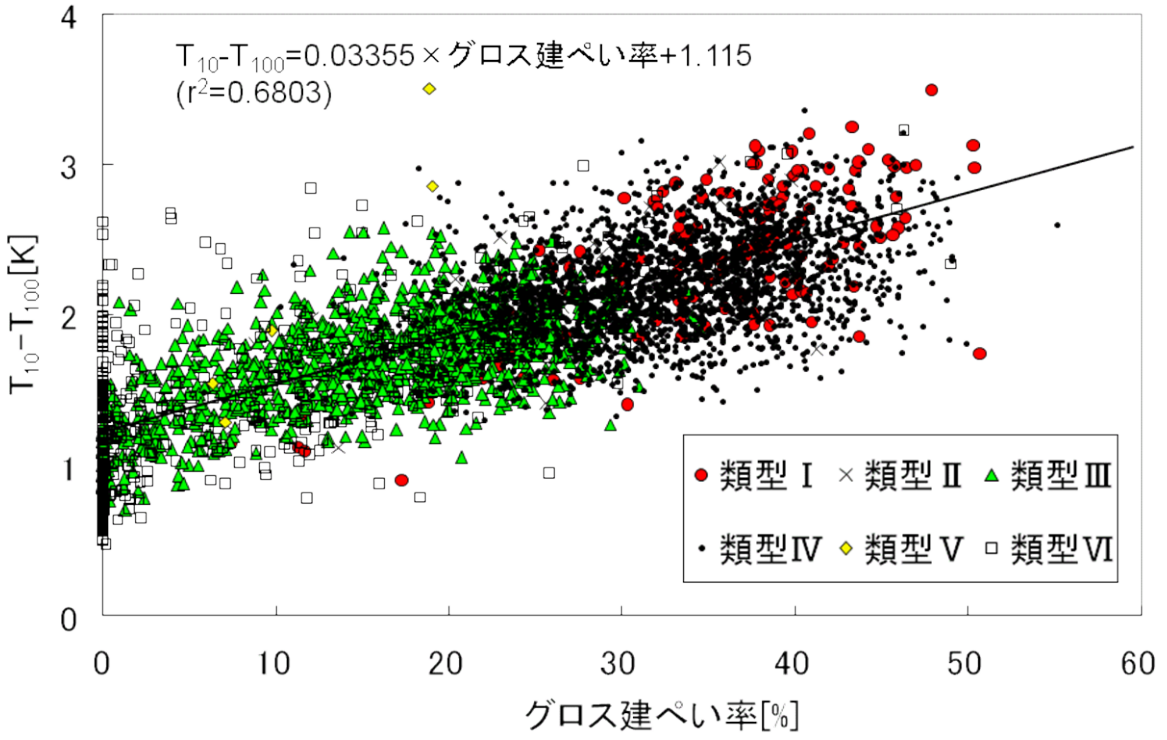


図９１　クラスター分析による地域類型



（ａ）気温差と風速比



（ｂ）気温差と建ぺい率

U_{10}：スカラー風速（地上 10m）、U_{100}：スカラー風速（地上 100m）
T_{10}：気温（地上 10m）、T_{100}：気温（地上 100m）

図９２　上空と地上付近の気温差

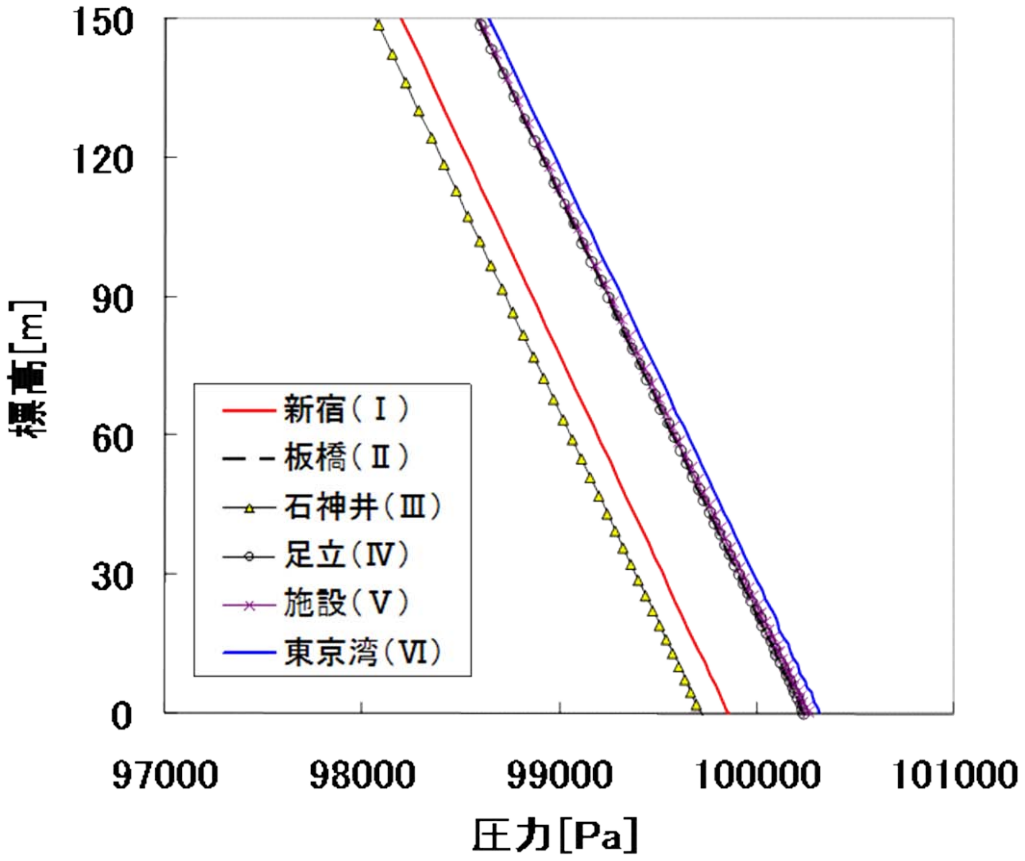


図９３　圧力の鉛直分布

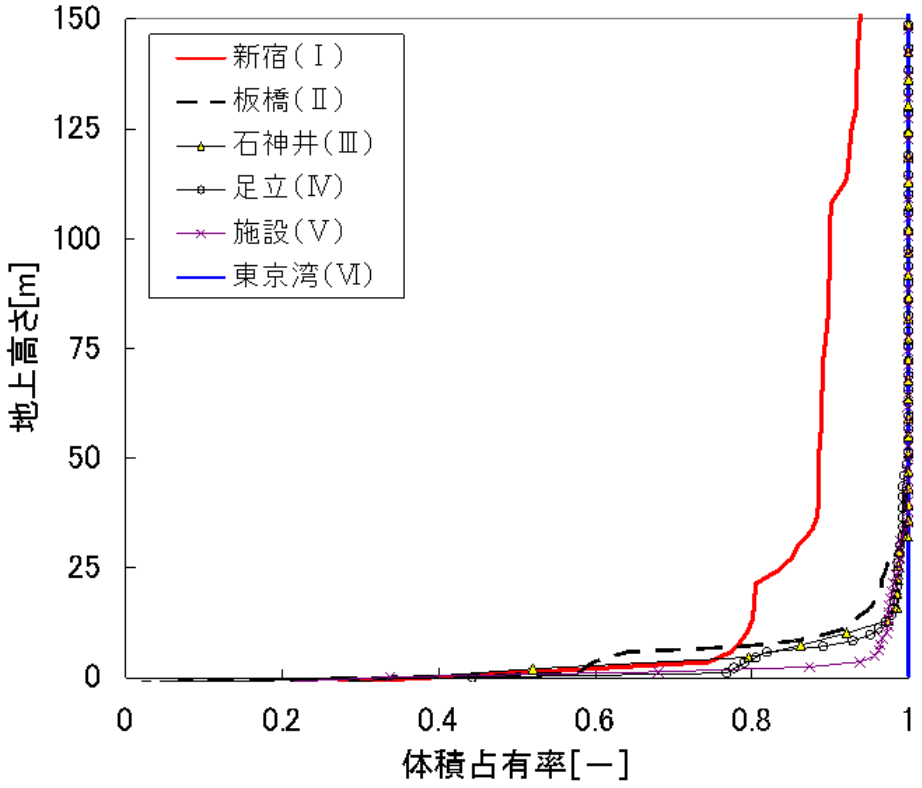


図９４　体積占有率の鉛直分布

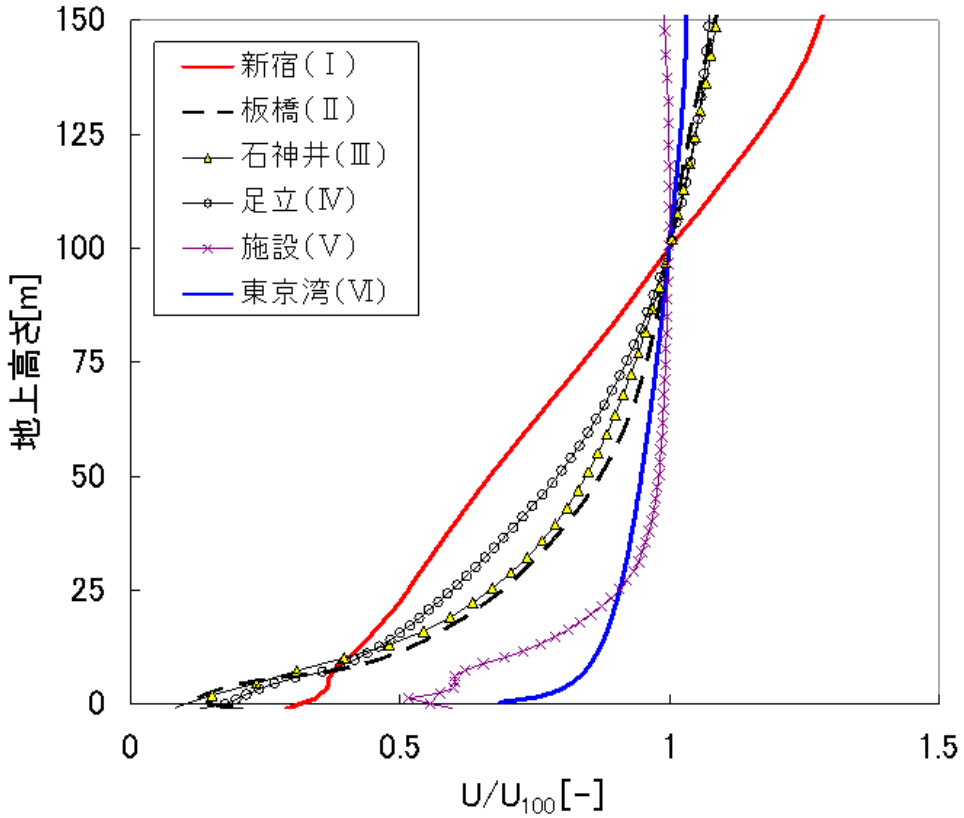


図９５　風速比の鉛直分布

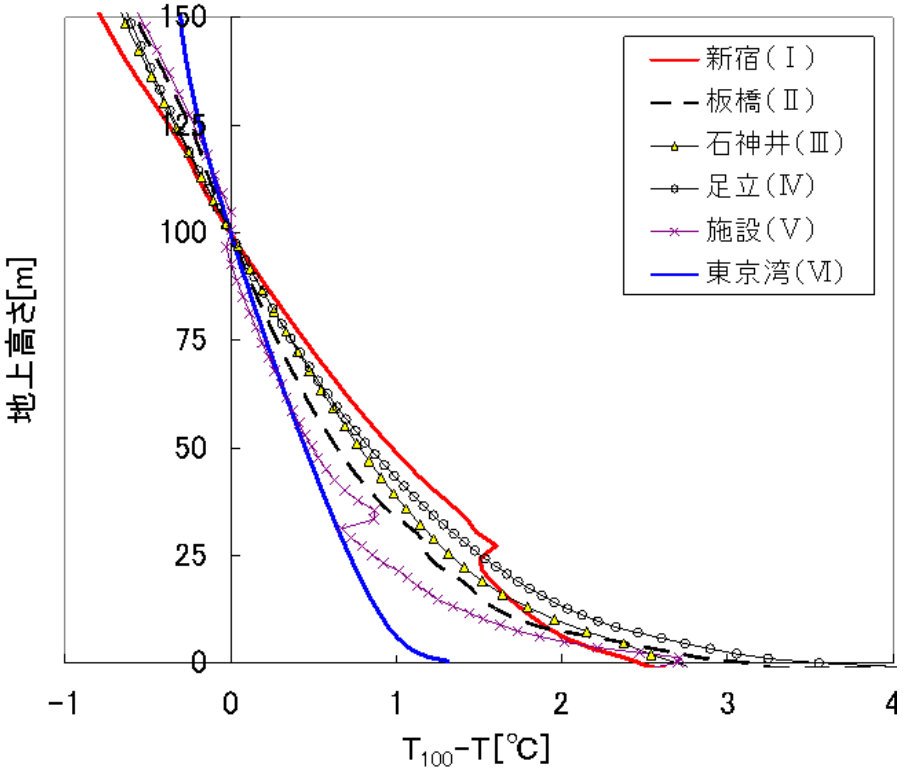


図９６　気温差の鉛直分布

６　得られた成果と今後の課題

本研究資料の内容を取りまとめて以下に示す。

１）広域 CFD 解析に関わる理論的背景や数式を記述すると共に、数値解析方法や並列計算に際してのプログラムの最適化について説明を行った。

２）広域 CFD 解析に必要になる入力データについて、使用したデータソース、整備したデータ項目および加工方法について説明を行い、土地利用や人工排熱の整備状況について事例を紹介した。

３)「地球シミュレータ」を用いて都市環境問題としては世界最大規模の 50 億メッシュの数値シミュレーションを実施し、東京 23 区全域の気温、風速の分布を明らかにした。そして、筋状に形成される気温分布を計算結果から示し、都市上空における風循環の状況と合わせて考察を行った。

４)「地球シミュレータ」の解析結果を用いて、3 次元的に風速や風の状況を可視化することにより、建物と街路周辺における風の流入による気温低減の様子や河川や緑地周辺の冷気のにじみ出しなどの都市形態と気温、風速分布に関する事例集を提示した。

５）計算結果を用いて主成分分析を実施し、500m メッシュで地域類型化を行い、地域の熱的特徴を統計的に導いた。そして、統計分析結果に基づいて風通しの確保が気温低下につながること、オープンスペースの創出が気温低下に有効であることを指摘した。

今後の課題として、考えられるものは以下の通りである。

１）数値モデルの高度化

現実の対流混合層の発達状況を踏まえると今回の解析領域は十分な高さが確保されていないが、CFD 計算は定常であるため日変化を追うにはモデル的に限界がある。将来的にはメソスケールモデルと連成させて今回の都市モデルを定常から非定常の問題に適用できるよう高度化する必要がある。

２）都市エネルギーシステムの評価

数値モデルの高度化に伴い、建物の envelope 負荷を都市総体で算出することができれば、建物の屋上緑化等による気象緩和効果と共に伝熱の変化に伴う冷暖房需要への影響についても検討が可能になると思われる。都市エネルギーシステムの評価に適用することにより、将来的には地域レベルの省エネルギー、省 CO_2 の設計手法にまで発展する可能性がある。

３）都市計画への適用と指針策定

ヒートアイランド対策に関する数値解析事例が蓄積されてくると、建物形態や緑地配置に伴う気象緩和効果が定量的に明らかになってくると考えられる。都市開発事業等で対策立案を策定するための運用方法について整理する必要がある。

謝辞

東京 23 区の広域 CFD 解析において独立行政法人海洋研究開発機構の「地球シミュレータ」を活用した。数値シミュレーションの入力データ作成において、国土地理院による 5m メッシュ標高データ(承認番号　平 21 業使、第 31 号)および航空機レーザーデータ、東京都都市整備局調査資料を使用した。記して感謝の意を表したい。

参 考 文 献

1)気象庁：20 世紀の日本の気候、2002（http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/20th/index.htm、2010 年 2 月 6 日閲覧）

2)H. E. Landsberg: The urban climate, Academic press, 1981

3)東京都都市計画地理情報システムによる

4)国土交通省・環境省：平成 15 年度 都市における人工排熱制御によるヒートアイランド対策調査報告書、2004.3

5)例えば、尾島俊雄編：都市の設備計画、鹿島出版会、1973.6

6)日本学術会議「土木工学・建築学委員会」：対外報告　民生用エネルギー消費量削減に関する政策提言、2007.5

7)足永靖信、東海林孝幸：東京 23 区の用途毎建物高さの集計－航空機レーザー計測データを活用した場合－、空気調和・衛生工学会論文集、No. 115、pp. 51-54、2006.10

8)建築物総合環境性能評価システム CASBEE-HI（ヒートアイランド）評価マニュアル 2006 年度版、財団法人建築環境・省エネルギー機構、2006.7

9)東京都環境局:東京都建築物環境計画書制度マニュアル・第 3 版、2005.9

10)環境省環境管理局：ヒートアイランド対策技術（空冷室外機から発生する顕熱抑制技術）実証試験要領、2004.3

11)日本建築学会編：都市環境のクリマアトラス(気候情報を活かした都市づくり)、ぎょうせい、2000.9

12)Y. Kikuchi, S. Arakawa, F. Kimura, K. Shirasaki, Y. Nagano: Numerical study on the effects of mountains on the land and sea breeze circulation in the Kanto district, Journal of the meteorological society of Japan, 59, pp. 723-738, 1981

13)G. L. Mellor and T. Yamada: Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problem, Reviews of geophysics and space physics, Vol. 20, No.4, pp. 851-875, 1982

14)F. Kimura: Heat flux on mixtures of different land-use surface: test of a new parameterization scheme, Journal of the meteorological society of Japan, 67, pp. 401-409, 1989

15)H. Kondo: A numerical experiment of the “Extended Sea Breeze” over the Kanto plain, Journal of the meteorological society of Japan, 68, pp. 419-434, 1990

16)村上周三、持田灯、Sangjin KIM、大岡龍三：関東地方における土地利用状況の変化と流れ場･温度場の関係－Mellor-Yamada 型の都市気候モデルによる局地気象解析－、日本建築学会計画系論文集、No. 491、pp. 31-39、1997.1

17)近藤裕昭、劉発華：1 次元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（3)、pp. 179-192、1998

18)Y. Ashie, Vu Thanh Ca, T. Asaeda: Building canopy model for the analysis of urban climate, Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 81, pp. 237-248, 1999

19)近藤明、山口克人、上野恵：2 次元大気境界層モデルから導かれた都市キャノピー形状とヒートアイランド強度の関係、大気環境学会誌、34（6)、pp. 422-434、1999

20)萩島理、谷本潤、片山忠久、大原健志：改良・建築−都市−土壌連成系モデル(AUSSSM)による都市高温化の構造解析 第 1 報 モデル理論構成及び標準解、日本建築学会計画系論文集、No. 550、pp. 79-86、 2001.12

21)F. S. Lien, E. Yee, J. D. Wilson: Numerical modelling of the turbulent flow developing within and over a 3-D building array, Part II: a mathematical foundation for a distributed drag force approach, Boundary-layer meteorology, 114, pp. 245–285, 2005

22)日本建築学会：都市の風環境評価と計画―ビル風から適風環境まで、丸善、1993

23)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

24)日本建築学会：建築物の耐風設計のための流体計算ガイドブック、丸善、2005

25)日本建築学会：市街地風環境予測のための流体数値解析ガイドブック－ガイドラインと検証用データベース－、丸善、2007（http://www.aij.or.jp/jpn/publish/cfdguide/index.htm、2010 年 2 月 6 日閲覧）

26)Urbanization of meteorological and air quality

models, COST-728, 2008.5
27)近藤裕昭：メソ気象解析からみたミクロ解析との接続、日本風工学会誌、Vol.31-NO.2、pp. 133-136、2006.4
28)例えば、村上周三、持田灯、加藤信介：風力発電サイト立地選定のための局所的風況予測システム LAWEPS の開発、日本流体力学会数値流体部門誌、第 10 巻、第 4 号、pp. 300-307、2002.11
29)W. Ohfuchi, H. Nakamura, M. K. Yoshioka, T. Enomoto, K. Takaya, X. Peng, S. Yamane, T. Nishimura, Y. Kurihara, K. Ninomiya: 10-km mesh meso-scale resolving simulations of the global atmosphere on the earth simulator. -preliminary outcomes of AFES (AGCM for the earth simulator) -, Journal of the earth simulator, Vol. 1, pp. 8-34, 2004.4
30)鬼頭昭雄：日本、世界の気候変動の現状と予測 2) モデルによる将来の気候変化予測、エネルギー・資源、Vol.27-2、pp. 19-23、2006.3
31)C. W. Hirt: Volume-fraction techniques: powerful tools for wind engineering, Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, Vol. 46 & 47, pp. 327-338, 1993
32)河野仁稔、新野崇一、塚本寛、宮崎康次：血栓・溶血を防ぐ遠心型血液ポンプの形状の改善、日本機会学会流体工学部門講演会講演論文集、2004.11
32)田中良和、古川雅人、井上雅弘、大屋裕二：つば付きディフューザ風車の集風効果に関する数値解析、第 17 回数値流体力学シンポジウム、2003.12
34)近藤靖史、長澤康弘、藤村淳一：湿度による浮力の影響を考慮した室内温熱環境予測室内空気中の水蒸気が空間温度分布に与える影響（その１）、日本建築学会計画系論文集、No. 534、pp. 57-62、2000.8
35)G. Kristof, N. Racz, M. Balogh: Adaptation of pressure based CFD solvers for mesoscale atmospheric problems, Boundary-layer meteorology, Vol. 131, No. 1, pp. 27-29, 2009.4
36)吉田伸治、大岡龍三、持田灯、富永禎秀、村上周三：樹木モデルを組み込んだ対流・放射・湿気輸送連成解析による樹木の屋外温熱環境緩和効果の検討、日本建築学会計画系論文集、No. 536、pp. 87-94、2000.10
37)岩田達明、木村敦子、持田灯、吉野博：歩行者レベルの風環境予測のための植生キャノピーモデルの最適化、第 18 回風工学シンポジウム、pp. 69-74、2004.12
38)小国力、村田健郎、三好俊郎、Dongarra J.J.、長谷川秀彦：行列計算ソフトウェアＷＳ、スーパーコン、並列計算機、丸善、1991
39)H.A.van der Vorst: A fast and smoothly converging variant of Bi-CG for the solution of nonsymmetric linear systems, SIAM, 13, no.2, pp. 631－644, 1992
40)K. Stuben: A review of algebraic multigrid, GMD Report, 69, 1999
41)永野勝尋、秋山実：(2)流体系シミュレーションの高速化, 部会企画セッション 計算科学技術部会「原子力シミュレーションにおける高速演算技術の動向」
42)独立行政法人原子力安全基盤機構：APWR 中性子反射体の冷却性評価、2005.12
43)B. E. Launder: On the computation of convective heat transfer in complex turbulent flows, Transactions of the ASME, Journal of heat transfer, 110, pp. 112-1128, 1988
44)一ノ瀬俊明、下堂薗和宏、鵜野伊津志、花木啓介：細密地理情報にもとづく都市気候数値シミュレーション 地表面境界条件の高精度化、天気、44(11)、pp. 785-797、1997.11
45)井原智彦、相田洋志、吉田好邦、半田隆志、松橋隆治、石谷久：都市熱環境を考慮した高反射高放射塗料導入による建築物の CO2 排出削減効果の評価、第 19 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集、pp. 655-660、2003
46)田口明美、足永靖信、田中稔、山本亨、鈴木理央：都市排熱分析のための地域熱供給施設の熱代謝構造に関する研究、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp. 1009-1012、2002.9
47)谷川亮一：LOCALS™ による風況シミュレーションモデルの開発と風況評価、ながれ、日本流体力学会誌、22(5)、pp.405-415、2003.10

48)東京都環境局ホームページ
（http://www2.kankyo.metro.tokyo.jp/heat2/heat_htm/observation_results/2005summer/tmp2005summer_htm/tmp20050731.htm、2010年2月6日閲覧）
49)小倉義光：メソ気象の基礎理論、東京大学出版会、1997.3
50)D. Etling, R.A. Brown: Roll vortices in the planetary boundary layer: a review, Boundary layer meterology, 65, pp. 215–248, 1993
51)藤吉康志、山下和也、藤原忠誠、中西幹郎：雲科学とＬＥＳ―ドップラーライダーを用いた大気の流れの観測―、気象研究ノート、第219号、pp. 141-165、2008.11

研究発表等（平成 16～21 年度）

1)足永靖信：都市建築空間の広域熱環境解析における工学モデルの適用、ながれ、日本流体力学会誌、第 29 巻、第 1 号、pp. 15-20、2010. 2

2)河野孝昭、足永靖信、田村哲郎：SGS 運動エネルギー方程式の導出と評価－LES フィルター操作に基づく都市キャノピーモデルの構築（その１）－、日本建築学会環境系論文集、No. 648、pp. 227-236、2010. 2

3)伊藤大輔、武田仁、足永靖信 、藤本哲夫：既存の窓面を対象にした遮熱化技術の光学特性及び熱特性の調査と空調負荷削減効果に関する数値計算、日本建築学会技術報告集、第 16 巻、第 32 号、pp. 185-190、2010. 2

4)T. Kono, T. Tamura, Y. Ashie: Numerical investigations of mean winds within canopies of regularly arrayed cubical buildings under neutral conditions, Boundary-layer meteorology, 134, pp. 131-155, 2010

5)K. Cho, T. Kono, Y. Ashie: Large-scale CFD simulation for classification of climatope in Tokyo's 23 wards, Annual report of the earth simulator center April 2008-September 2008, ISSN 1348-5822, The earth simulator center, pp. 57-62, 2009.12

6)足永靖信：都市・建築の風環境の可視化、第 3 回横幹連合コンファレンス、3C4-3、2009. 12

7)Y. Ashie, D. Itoh: Study on the characteristics of solar radiation in the geometrically complex urban spaces by using a spectroradiometer, 2nd international conference on countermeasures to urban heat islands, LBNL, 2009.9

8)K. Kagiya, Y. Ashie: National research project on kaze-no-michi for city planning: creation of ventilation paths of cool sea breeze in Tokyo, 2nd international conference on countermeasures to urban heat islands, LBNL, 2009.9

9)足永靖信：ヒートアイランド緩和と建築都市、建築の研究、194、pp. 15-18、2009. 8

10)足永靖信：ヒートアイランド対策と省 CO2 等効果、2009 年度日本建築学会（東北）地球環境部門パネルディスカッション資料－低炭素社会とヒートアイランド－、日本建築学会地球環境委員会、pp. 5-8、2009. 8

11)足永靖信：都市環境分野、2009 年度日本建築学会（東北）環境工学部門研究懇談会資料－建築環境のシミュレーション技術と将来展望－、日本建築学会環境工学委員会、pp. 57-60、2009. 8

12)伊藤大輔、足永靖信：都市形状の分光アルベドに関する数値シミュレーション、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 727-728、2009. 8

13)河野孝昭、足永靖信、田村哲郎：LES のフィルター操作に対応した空間平均操作による多層型都市キャノピーモデルの運動量輸送方程式の導出、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 949-950、2009. 8

14)藤本哲夫、伊藤大輔、武田仁、近藤靖史、森川泰成、足永靖信：既存の窓面を対象にした遮熱化技術とその性能に関する調査研究　その３ 遮蔽化技術の 2007 年度調査、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 35-36、2008. 9

15)足永靖信、河野孝昭：東京ヒートマップの開発、日本ヒートアイランド学会第４回全国大会予稿集、p. 125、2009. 8

16)伊藤大輔、武田仁、足永靖信、藤本哲夫：開口部遮熱化と空調負荷の関係、日本ヒートアイランド学会第４回全国大会予稿集、pp. 100 -101、2009. 8

17)T. Kono, Y. Ashie, T. Tamura: Derivation of spatially averaged momentum equations of urban canopy model using the concept of the immersed boundary method, The 7th international conference on urban climate, IAUC, 2009.7

18)Y. Ashie: Application of the earth simulator to a climate-sensitive design for the Tokyo bay area, The 7th international conference on urban climate, IAUC, 2009.7

19)D. Itoh, Y. Ashie: Study on the spectral albedo in the geometrically complex urban spaces, The 7th international conference on urban climate, IAUC, 2009.7

20)K. Hirano, Y. Ashie: Comprehensive analysis of urban effects on local climate in Tokyo metropolitan region using an urban mesoscale numerical model, The 7th international conference on urban climate, IAUC, 2009.7

21)Y. Ashie, K. Hirano, T. Kono: Effects of sea breeze on thermal environment as a measure against

Tokyo’s urban heat island, The 7th international conference on urban climate, IAUC, 2009.7
22)伊藤大輔、足永靖信：都市形状の分光アルベドに関するスケールモデル実験と数値計算、日本建築学会環境系論文集、第 74 巻、第 641 号、pp. 863-868、2009.7
23)足永靖信：ヒートアイランドのない街へ－数値シミュレーション技術の活用事例－、ベース設計資料　建築編　前、No. 141、pp. 49-52、2009.6
24)Y. Ashie: Urban climatology application in Japan, Development of eco-city construction based on energy saving and resource recycling techniques, Ubiquitous & ecology city R&D center, 2009.5
25)Y. Ashie, K. Cho, T. Kono : Large-scale CFD simulation of heat island phenomenon in Tokyo's 23 wards using the earth simulator, Berichte des meteorologischen institutes der albert-ludwigs-universitat Freiburg, Nr. 18, 5th Japanese-German meeting on urban climatology, ISSN 1435-618X, University of Freiburg, pp. 147-149, 2009.3
26)足永靖信：ヒートアイランド緩和に資する都市形態の評価手法の開発、建築研究所講演会テキスト、pp. 77-85、2009.3
27)足永靖信、平野洪賓：都心部ケーススタディー、環境浄化技術、Vol. 8、No. 2、pp. 24-28、2009.2
28)Y. Ashie: Urban heat island and mitigation technology, Conference on engineers’ responses to climate change, The Hong Kong institution of engineers, 2009.1
29)K. Cho, T. Kono, Y. Ashie: Large-scale CFD Simulation of Heat Island Phenomenon and Countermeasures in Tokyo, Annual report of the earth simulator center April 2007-March 2008, ISSN 1348-5822, The earth simulator center, pp. 67-72, 2008.12
30)足永靖信、平野洪賓：ニューラルネットワーク分析手法による都市キャノピー幾何情報の推定に関する研究、日本建築学会環境系論文集、第 634 号、pp. 1417-1423、2008.12
31)足永靖信：ヒートアイランドと都市の環境管理、日本冷凍空調学会年次大会 2008、pp. (C211-1)-(C211-6)、2008.10
32)M. A. Matheson, Y. Ashie: The effect of changes of urban surfaces on rainfall phenomenon as determined by a non-hydrostatic mesoscale model, Journal of the meteorological society of Japan, 86-5, pp. 733-751, 2008.10
33)足永靖信、伊藤大輔、藤本哲夫：建築窓ガラス用フィルムの分光特性に関する調査、日本建築学会技術報告集、第 14 巻、第 28 号、pp. 487-490、2008.10
34)伊藤大輔、藤本哲夫、足永靖信：日射遮蔽フィルムの光学的性能の調査研究、日本熱物性シンポジウム、2008.10
35)足永靖信、張洪賓、河野孝昭：東京 23 区を対象にした高解像度ヒートアイランド数値シミュレーション（その１）計算概要、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 897-898、2008.9
36)河野孝昭、張洪賓、足永靖信：東京 23 区を対象にした高解像度ヒートアイランド数値シミュレーション（その２）気温分布の地域的特徴の整理、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 899-900、2008.9
37)張洪賓、足永靖信：都市キャノピー幾何情報の推定におけるニューラルネットワーク分析手法の適用、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 921-922、2008.9
38)藤本哲夫、伊藤大輔、武田仁、近藤靖史、森川泰成、足永靖信：既存の窓面を対象にした遮熱化技術とその性能に関する調査研究　その 1 日射遮蔽フィルムの性能調査、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 261-262、2008.9
39)伊藤大輔、藤本哲夫、武田仁、近藤靖史、森川泰成、足永靖信：既存の窓面を対象にした遮熱化技術とその性能に関する調査研究　その 2 日射遮蔽フィルムの光学的性能の分析、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 263-264、2008.9
40)伊藤大輔、足永靖信：都市形状におけるアルベドの分光特性に関する研究、日本ヒートアイランド学会第３回全国大会予稿集、pp. 98-99、2008.8
41)平野洪賓、足永靖信、谷川亮一：LCOALS-UCSS による首都圏熱環境の解析、日本ヒートアイランド学会第３回全国大会予稿集、

pp. 90-91、2008.8
42)足永靖信、平野洪賓：都心再開発とヒートアイランド緩和、えぴすとら、Vol. 42、建築研究所、2008.7
43)足永靖信：都市のヒートアイランド現象と「風の道」、中学校　社会科のしおり、No.12、帝国書院、2008.7
44)足永靖信：都市のヒートアイランド現象と「風の道」、現代社会へのとびら、帝国書院、2008.5
45)足永靖信：都市再生とヒートアイランド対策（専門分科会「持続可能で安全な都市環境への気象研究の役割」)、日本気象学会2008年度春季大会、2008.5
46)Y. Ashie: Urban environment management and technology, cSUR-UT Series: Library for sustainable urban regeneration Volume 1, Springer, pp. 215-238, 2008
47)T. Ichinose, Y. Ashie, T. Kono: The high-resolution numerical model of heat island phenomena, NIES supercomputer annual report 2006, CGER-I078-2008, pp. 81-89, 2008.1
48)T. Kono, Y. Ashie, T. Tamura: Large eddy simulation of airflow around regular arrays of cubical buildings, APCOM'07 in conjunction with EPMESC XI, APACM/EPMESC, 2007.12
49)K. Cho, Y. Ashie, T. Kono : Thermal environmental effect of route 2 ring road project by numerical simulation with over 400 million meshes, APCOM'07 in conjunction with EPMESC XI, APACM/EPMESC, 2007.12
50)Y. ASHIE, T. Tokairin, T. Kono, K. Takahashi: Numerical simulation of urban heat island in a ten-kilometer square area of central Tokyo, Annual report of the earth simulator center April 2006-March 2007, ISSN 1348-5822, The earth simulator center, pp. 45-49, 2007.10
51)足永靖信：建築研究所におけるヒートアイランドの研究、建築の研究、183、pp. 5-9、2007.10
52)足永靖信：都市環境の数値解析、伝熱、Vol. 46、No. 197、pp. 12-18、2007.10
53)足永靖信：都市空間における熱環境とみどり、都市緑化技術、No. 66、pp. 6-9、2007.9
54)張洪賓、足永靖信、河野孝昭、三上岳彦：都市キャノピーモデルを組み込んだメソスケールモデルを用いた首都圏の熱環境解析、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp. 2333-2336、2007.9
55)足永靖信、張洪賓：首都圏における細密数値情報および国勢統計資料を活用した都市キャノピー幾何情報の整備、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp. 2329-2332、2007.9
56)張洪賓、河野孝昭、足永靖信：東京臨海・都心部におけるヒートアイランド現象の実測調査と数値計算（その18）再開発後ケースの計算結果、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 719-720、2007.8
57)河野孝昭、張洪賓、足永靖信：東京臨海・都心部におけるヒートアイランド現象の実測調査と数値計算（その17）現況ケースの計算結果、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 717-718、2007.8
58)足永靖信、張洪賓、河野孝昭：東京臨海・都心部におけるヒートアイランド現象の実測調査と数値計算（その16）地球シミュレータによる水平1mメッシュ解像度の数値計算、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 715-716、2007.8
59)鍵屋浩司、足永靖信、大橋征幹：東京臨海・都心部におけるヒートアイランド現象の実測調査と数値計算（その13）市街地改造の効果に関するケーススタディー、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 709-710、2007.8
60)阿部敏雄、足永靖信：温度成層風洞を用いたアスペクト比が異なる規則配列の建物周辺における気温場の計測、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 741-742、2007.8
61)河野孝昭、足永靖信：都市キャノピーモデルによる開口部の高反射化が室内外熱環境に及ぼす影響の検討、日本ヒートアイランド学会第2回全国大会予稿集、pp. 114-115、2007.8
62)張洪賓、河野孝昭、鍵屋浩司、足永靖信：大規模数値シミュレーションによる市街地改造の熱環境改善効果研究、日本ヒートアイランド学会第2回全国大会予稿集、pp. 116-117、2007.8

63)足永靖信：ヒートアイランド対策へのスーパーコンピュータ利用の展望、日本ヒートアイランド学会誌、Vol.2、pp. 10-14、2007.8
64)日本建築学会：ヒートアイランドと建築・都市－対策のビジョンと課題－（共著）、丸善、2007.8
65)足永靖信、東海林孝幸、河野孝昭：地球シミュレータを用いた東京都心10km四方における高解像度のヒートアイランド解析、日本建築学会環境系論文集、No. 616、pp. 67-74、2007.6
66)足永靖信：都市域の風通しとヒートアイランド緩和、建築研究所講演会テキスト、pp. 15-23、2007.3
67)T. Ichinose, Y. Ashie, N. Komatsu, T. Kono: Numerical simulation of thermal and airflow field around regularly arrayed buildings, CGER's supercomputer activity report, Vol. 14-2005, CGER-I070-2007, pp. 35-40, 2007.1
68)Y. Ashie, N. Komatsu, T. Kono, K. Takahashi: Numerical simulation of urban thermal environment in the waterfront area of Tokyo, Annual report of the earth simulator center April 2005-March 2006, The earth simulator center, pp. 83-87, 2007.1
69)足永靖信：都市のヒートアイランド現象と地域対策、国有財産管理センター2007冬、季報第59号、pp. 40-102、2007.1
70)足永靖信：第120回講演会「都心のヒートアイランド現象について」、土地総合研究、Vol. 14、No. 4、pp. 132-182、2006.10
71)足永靖信、東海林孝幸：東京23区の用途毎建物高さの集計－航空機レーザー計測データを活用した場合－、空気調和・衛生工学会論文集、No. 115、pp. 51-54、2006.10
72)足永靖信、東海林孝幸：航空機レーザー計測データを活用した東京23区の用途毎建物高さの集計、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp. 1493-1496、2006.9
73)足永靖信、東海林孝幸、河野孝昭：地球シミュレータを用いた東京臨海部における環境の予測、第15回空気シンポジウム「都市空間の換気・通風と風の道」、日本建築学会環境工学委員会空気環境運営委員会、pp. 17-22、2006.9
74)鍵屋浩司、足永靖信、大橋征幹：東京臨海・都心部におけるヒートアイランド現象の実測調査と数値計算（その2）研究の概要と課題、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 493-494、2006.9
75)足永靖信、河野孝昭、阿部敏雄、東海林孝幸：東京臨海・都心部におけるヒートアイランド現象の実測調査と数値計算(その10)地球シミュレータによる計算、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 509-510、2006.9
76)阿部敏雄、河野孝昭、東海林孝幸、足永靖信：東京臨海・都心部におけるヒートアイランド現象の実測調査と数値計算(その11)東京駅・汐留・新橋周辺の計算結果、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 511-512、2006.9
77)東海林孝幸、河野孝昭、阿部敏雄、足永靖信：東京臨海・都心部におけるヒートアイランド現象の実測調査と数値計算(その12)品川駅・目黒川・大崎周辺の計算結果、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 513-514、2006.9
78)M. Matheson, T. Kono, T. Tokairin, Y. Ashie: Coupling an urban canopy model and a non-hydrostatic meteorological model to predict urban heat island phenomena、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 529-530、2006.9
79)足永靖信：ヒートアイランド対策の現状と研究の視点、日本ヒートアイランド学会設立記念特集号、pp. 12-17、2006.7
80)河野孝昭、足永靖信：東京湾沿岸部の5km四方の領域における熱環境の大規模数値解析、日本ヒートアイランド学会第1回全国大会予稿集、pp. 20-21、2006.7
81)Y. Ashie, T. Kono: Numerical simulation of urban thermal environment of the waterfront area in Tokyo by using a five meter horizontal mesh resolution, Sixth international conference on urban climate, pp. 615-618, 2006.6
82)足永靖信、河野孝昭：汐留の再開発に伴う周辺環境の変化、日本風工学会誌、Vol.31、No. 2 (No. 107)、pp. 115-120、2006.4
83)T. Ichinose, Y. Ashie, T. Kono: Numerical simulation of the airflow within and above urban canopies under neutral condition by using the spatially averaged k-ε model considering the effective ratio,

CGER's supercomputer activity report, Vol. 13-2004, CGER-I064-2006, pp. 61-67, 2006.1
84)宮下悠子、瀬野太郎、田村健、増田幸宏、高橋信之、尾島俊雄、鍵屋浩司、足永靖信、成田健一、三上岳彦：東京都心における「風の道」の実態調査（その 1．東京駅周辺）、2005 年度日本建築学会関東支部研究報告集、2006.3
85)天田拓哉、瀬野太郎、田村健、増田幸宏、高橋信之、尾島俊雄、鍵屋浩司、足永靖信、成田健一、三上岳彦：東京都心における「風の道」の実態調査（その２．日本橋川）、2005 年度日本建築学会関東支部研究報告集、2006.3
86)齋田美怜、瀬野太郎、田村健、増田幸宏、高橋信之、尾島俊雄、鍵屋浩司、足永靖信、成田健一、三上岳彦：東京都心における「風の道」の実態調査（その３．品川駅周辺）、2005 年度日本建築学会関東支部研究報告集、2006.3
87)小松信義、足永靖信、河野孝昭、阿部敏雄、一ノ瀬俊明：都市キャノピーモデル検証のための規則的建物配置群周りの熱環境解析、第 55 回理論応用力学講演会講演論文集、pp. 75-76、2006.1
88)Y. Ashie, T. Kono, K. Takahashi: Development of numerical simulation model of urban heat island, Annual report of the earth simulator center April 2004-March 2005, The earth simulator center, pp. 85-88, 2005.12
89)N. Komatsu, Y. Ashie: High resolution analysis of urban heat island phenomenon in Tokyo with earth simulator, The 4th Japanese-German meeting on urban climatology - climate analysis for urban planning -, 2005.12
90)T. Kono, Y. Ashie: Numerical simulation of air temperature within and above urban canopies using the spatially averaged k -ε model, The 4th Japanese-German meeting on urban climatology - climate analysis for urban planning -, 2005.12
91)筧雅行、永野勝尋、足永靖信：市街地熱環境の大規模数値解析、日本機会学会第 18 回計算力学講演会講演梗概集、p. 157、2005.11
92)坂本雄三、小島悦史、足永靖信、今野雅：CFD を利用した樹木のクールスポット効果の数値解析 その１－樹木における放射と蒸散に関する計算モデル、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 689-690、2005.9
93)小島悦史、坂本雄三、足永靖信、今野雅：CFD を利用した樹木のクールスポット効果の数値解析 その 2－クールスポット効果のケーススタディ、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 691-692、2005.9
94)小松信義、 阿部敏雄、尹聖皖、足永靖信：温度成層風洞を用いた規則配置建物群における気温・風速の空間平均データの取得、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 747-748、2005.9
95)河野孝昭、尹聖皖、足永靖信：UCSS による典型街区を対象とした体感温度の算出、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 767-768、2005.9
96)河野孝昭、足永靖信、小松信義：解析システムの構築　都市の風通しによる環境改善効果に関する研究（その１）、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp. 2205-2208、2005.8
97)小松信義、河野孝昭、足永靖信：汐留周辺の熱環境解析事例　都市の風通しによる環境改善効果に関する研究（その２）、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp. 2209-2212、2005.8
98)T. Ichinose, Y. Ashie, Y. Hirano, T. Kono: The high-resolution numerical model of heat island phenomena, CGER's supercomputer activity report, Vol. 12-2003, CGER-I061-2005, pp. 115-121, 2005.3
99)尹聖皖、足永靖信：温度成層風洞を用いた規則配置の建物群における気温計測、2004 年度日本建築学会関東支部研究報告集、pp. 645-648、2005.3
100)河野孝昭、尹聖皖、足永靖信：UCSS による都市キャノピーの熱収支及び温熱環境の検討、2004 年度日本建築学会関東支部研究報告集、pp. 649-652、2005.3
101)足永靖信、ヴタンカ：空間平均処理を施した 3 次元都市キャノピーモデルの開発－都市建築計画における都市気候予測システムの開発　その２－、日本建築学会環境系論文集、No. 586、pp. 45-51、2004.12

102)河野孝昭、足永靖信、尹聖皖、李海峰：都市スケールを対象とした5mメッシュ解像度による風速・気温場のCFD解析、第１８回風工学シンポジウム、pp. 117-120、2004.12
103)日本建築学会編：シリーズ地球環境建築・専門編２　資源･エネルギーと建築(共著)、彰国社、2004.11
104)鍵屋浩司、足永靖信：「市街地形態が熱環境に及ぼす影響の定量的評価に関する研究」について、かんきょう、9月号、 pp. 42-43、2004.9
105)尹聖皖、足永靖信、河野孝昭：超ベクトル並列計算機による都市域の気温および風のCFD解析～東京の5km四方を事例として～、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp. 1035-1038、2004.9
106)足永靖信、田中稔、山本亨：自然系および機器系の由来を考慮した建築設備の排熱のオーダー分析－大規模建物の熱代謝特性に関する研究　その１－、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp.1059-1062、2004.9
107)山本亨、田中稔、足永靖信：実在建物のエネルギー消費実態に基づいた建築設備の排熱の試算－大規模建物の熱代謝特性に関する研究　その２－、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集､pp. 1063-1066、2004.9
108)Y. Ashie: Evaluation and countermeasures on the heat island phenomena, International workshop "Asian approach toward sustainable urban regeneration", Center of sustainable urban regeneration, the University of Tokyo, pp. 393-401, 2004.9
109)森山正和　編：ヒートアイランドの対策と技術（共著)、学芸出版社、2004.8
110)足永靖信、ヴタンカ：UCSSによるヒートアイランド対策効果の定量化の研究－その１　UCSSの概要と体感温度による評価－、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 661-662、2004.8
111)李海峰、足永靖信、ヴタンカ：UCSSによるヒートアイランド対策効果の定量化の研究－その２　都市キャノピーモデルによる夏季の気温形成の考察－、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 663-664、2004.8
112)河野孝昭、足永靖信、ヴタンカ：UCSSによるヒートアイランド対策効果の定量化の研究－その３　関東甲信越地方を対象としたメソスケール解析結果とAMeDASデータの比較－、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 665-666、2004.8
113)河野孝昭、足永靖信：$k-\varepsilon$空間平均モデルを用いた都市キャノピー内及び上空の気流解析、流体力学会年会2004講演論文集、pp. 24-25、2004.8
114)足永靖信、尹聖皖：東京都GISを用いた都市構造の統計分析と気温観測値との関連性、日本建築学会環境系論文集、No. 581、pp. 81-86、2004.7
115)阿部敏雄、尹聖皖、足永靖信：蒸発・日射反射による建物屋上面の冷却効果に関する実験的研究、環境の管理、第50号、pp. 79-84、pp. 2004.6
116)足永靖信：クールルーフとはーヒートアイランドとクールルーフの関係－、月刊PROOF、工文社、pp. 14-15、2004.6
117)足永靖信、尹聖皖：床面を加熱した風洞実験による建物の高層化が気温分布に及ぼす影響に関する検討、日本建築学会環境系論文集、No. 579、pp. 67-71、2004.5

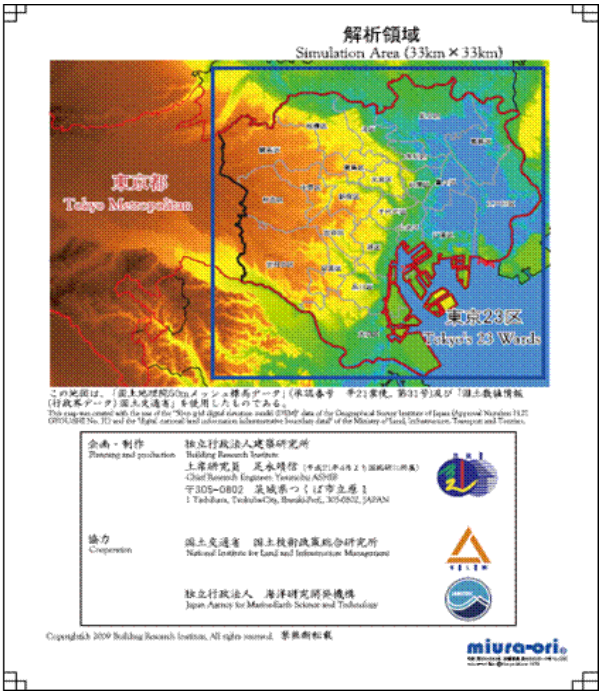
付録説明：東京ヒートマップについて

本研究資料の付録として CD-ROM「東京ヒートマップ」を添付している。「東京ヒートマップ」とは、CFD による東京 23 区全域の熱環境解析結果（解析日時：2005 年 7 月 31 日 14 時）をカラー地図として表現したものである。

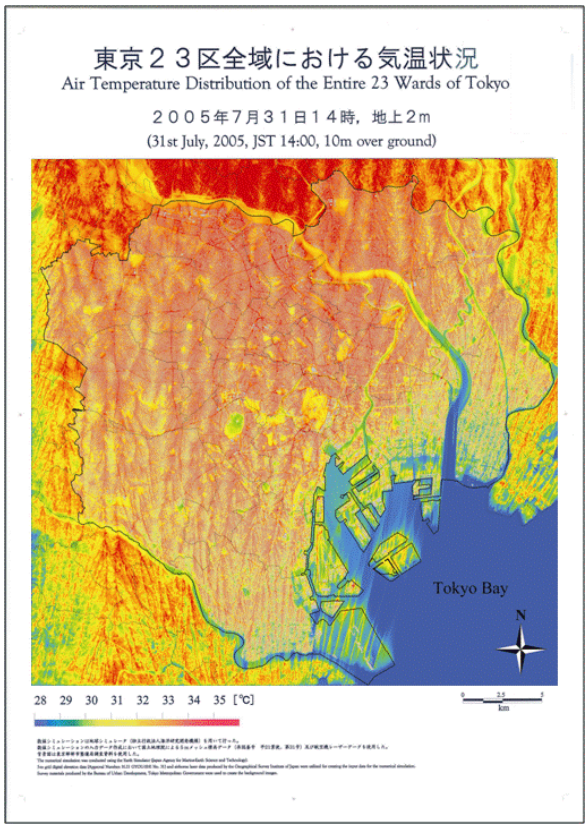
CD-ROM「東京ヒートマップ」の収録内容は以下の通りである。これらは PDF ファイルに作成されており、パソコンで閲覧することができる。

１）表紙（図Ａ．１）
２）裏表紙（図Ａ．２）
３）気温（図Ａ．３）
４）風速（図Ａ．４）

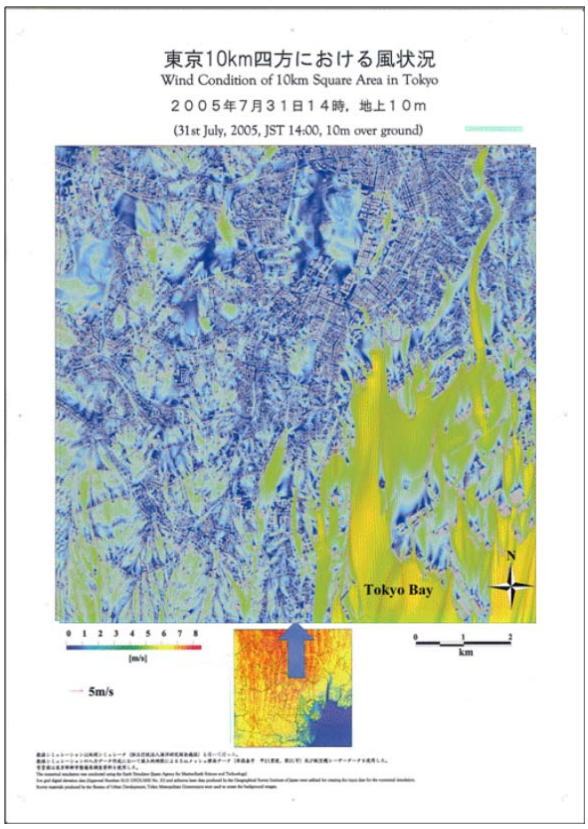
図Ａ．１　表紙



図Ａ．２　裏表紙


東京２３区全域における気温状況
Air Temperature Distribution of the Entire 23 Wards of Tokyo
２００５年７月３１日１４時，地上２m
(31st July, 2005, JST 14:00, 10m over ground)
Tokyo Bay
N
28 29 30 31 32 33 34 35 [℃]
0 2.5 5
km

図Ａ．３　気温


東京10km四方における風状況
Wind Condition of 10km Square Area in Tokyo
２００５年７月３１日１４時，地上１０m
(31st July, 2005, JST 14:00, 10m over ground)
Tokyo Bay
N
0 1 2 3 4 5 6 7 8
[m/s]
5m/s
0 1 2
km

図Ａ．４　風速

◆執筆者

足永靖信（当時、独立行政法人建築研究所環境研究グループ上席研究員、平成 21 年 4 月より国土交通省国土技術政策総合研究所建築研究部環境・設備基準研究室長）
担当:1 章から 6 章および付録(ただし、4.2.3, 4.2.5, 4.4.2, 4.4.3 を除く)

鍵屋浩司（国土交通省国土技術政策総合研究所都市研究部都市開発研究室主任研究官）
担当：4.2.3, 4.2.5, 4.4.2, 4.4.3

◆研究参画者

足永靖信（再掲）
桑沢保夫（独立行政法人建築研究所環境研究グループ上席研究員、平成 21 年 4 月より参画）
鍵屋浩司（再掲）
大橋征幹（国土交通省国土技術政策総合研究所都市研究部都市開発研究室主任研究官）
河野孝昭（独立行政法人建築研究所環境研究グループ専門研究員）
平野洪賓（当時、独立行政法人建築研究所環境研究グループ専門研究員、平成 21 年 4 月より独立行政法人防災科学技術研究所）
伊藤大輔（当時、独立行政法人建築研究所環境研究グループ専門研究員、平成 21 年 9 月よりものつくり大学）
東海林孝幸（当時、独立行政法人建築研究所環境研究グループ研究支援協力員、平成 19 年 5 月より豊橋技術科学大学）
小松信義（当時、独立行政法人建築研究所環境研究グループ客員研究員、平成 18 年 1 月より金沢大学）
尹聖皖（当時、独立行政法人建築研究所環境研究グループ特別研究員、平成 17 年 4 月より釜山大学校）
李海峰（当時、独立行政法人建築研究所環境研究グループ客員研究員、平成 21 年 4 月より佐賀大学）

国土技術政策総合研究所資料
TECHNICAL NOTE of NILIM
No. 583　　March 2010
建築研究資料
Building Research Data
No. 123　　March 2010
編集・発行 ©国土技術政策総合研究所
©独立行政法人建築研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

国土技術政策総合研究所企画部研究評価・推進課
〒305-0804　茨城県つくば市旭 1 番地　電話 029-864-2675
独立行政法人建築研究所企画部企画調査課
〒305-0802　茨城県つくば市立原 1 番地　電話 029-864-2151(代)