

都市域の風通しとヒートアイランド緩和

環境研究グループ 上席研究員 足永 靖信

目次

- I はじめに
- II 風の道の分類
- III 地球シミュレータを用いた高解像度ヒートアイランド解析
 - 1) 解析の流れ
 - 2) 数値モデルの修正
 - 3) 解析対象および解析日時
 - 4) 境界条件となる気象データの整備
 - 5) メッシュ入力データの整備
 - 6) 気温、風の計算結果
 - 7) 実測結果との比較
- IV 都市空間の風通しについて
 - 1) 夕留の超高層ビル群の話題
 - 2) 研究プロジェクトの紹介
 - 3) 計算精度について
- V おわりに
- 謝辞
- 参考文献

I はじめに

ヒートアイランド対策には二つの視点がある。一つ目の視点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人工排熱があり、これらを低減することが第一である。これまで、緑化や高反射仕上げ等による表面温度の低減¹⁾²⁾や室外機への水散霧による顕熱抑制³⁾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。

もう一つの視点は発生した熱を都市空間で澱ませないことである。そのためには、風通しを良くすることが重要になる。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上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⁴⁾。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マイクロに再現する解析は実質困難であった。

図1はヒートアイランドの数値モデルについて整理したものである。都市空間の風通しの検討を行う場合、メソスケールモデルはモデル原理やメッシュ解像度の関係から適用が難しい⁵⁾。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⁶⁾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。筆者らはヒートアイランド現象の予測に $k-\epsilon$ モデルの適用を図る上で、単独建物や建物群を対象にした風洞実験データとの比較検証を重ね、準備作業を実施してきた⁷⁾⁸⁾⁹⁾。

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と言える。我が国で開発された超並列ベクトル計算機の地球シミュレータは、平成14年3月から運用され、その主記憶容量と演算処理速度において運用開始時点で世界最大の規模と能力を持つ設備である。地球シミュレータをはじめとするいくつかのスーパーコンピュータは、10~20km メッシュによる全球解析を可能とし、気候変動予測において大きな役割を果たしている¹⁰⁾¹¹⁾。図2は世界のスーパーコンピュータの発達の経緯を示したものであり、対数的に性能が向上していることが解る¹²⁾。

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。広域スケールへの応用に向けて、標準 $k-\epsilon$ モデルに対してコリオリ力、温位等を考慮した式の修正を施した。そして、東京都心10km四方を水平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述べる。

II 風の道の分類

「風の道」の考え方は、環境先進国のドイツで生まれた。シ

ュツットガルト等の内陸都市では、「風の道」を保全することにより、都市周辺の山地で発生する冷気流を都市内に導く施策を実施している。これは、ヒートアイランド現象の緩和というよりも大気汚染を主体とするものであると聞く。

一方、我が国の大都市の多くは、海風が吹く臨海部に立地しており、気候風土もヨーロッパとは随分異なる。夏季日中において海風の温度は市街地より3~5℃程度低いことが知られており、海風を含めて都市の風通しを良好に保つことはヒートアイランド対策の一つとして期待されている。山地で発生する冷気流は、夜間放射により山頂近くで冷やされた空気が重力により低所をつたって斜面を流下する現象であり、冷気流の厚みはシュツットガルトの場合50~70mと言われている。それに対して

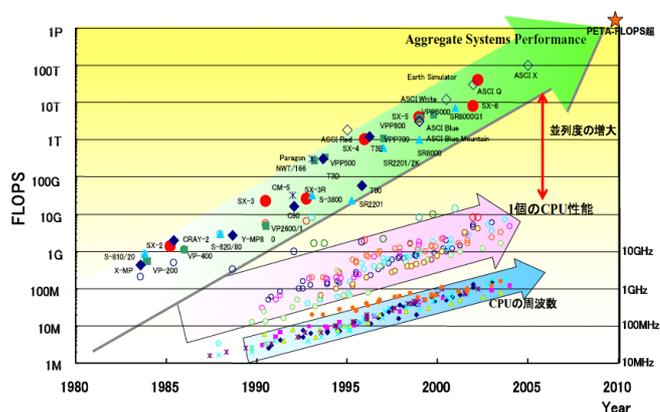


図2 スーパーコンピュータのピーク性能の変遷

モデル名称	分解能	計算負荷	モデルの特徴	主な入力条件
メソスケールモデル	粗	小	粗度を有する平坦面として一括	土地利用（市街地、田畑、海、山等）に関する物性値（熱伝導率、蒸発効率、粗度、アルベド等）や人工排熱を設定
都市キャノピーモデル	中	中	建物群をバルクに表現可能	建築群の条件（建ぺい率、建物高さ、空調システム等）や、土地被覆構成に関する物性値（熱伝導率、蒸発効率、アルベド等）を設定
CFD	密	大	建物等の形状・配置を表現可能	形状・配置（建物、道路、樹木等）や、個々の土地被覆に関する物性値（熱伝導率、蒸発効率、アルベド等）を設定



図1 ヒートアイランド数値モデルの分類

海風は、海と陸の温度差を駆動源として市街地全域を面的に覆うように循環する現象であり、海風の厚みは東京では300mに達する。このように冷気流と海風の発生の原因、スケールは全く異なる。

ヒートアイランド緩和において海風の活用を考える際、「風の道」を立体的にとらえる必要がある。図1に風の道の分類を示す¹³⁾。地表面付近の風が上空の海風と同じ方向で海岸から街路・河川等を通じて流入するもの(タイプI)、上空を流れる海風が街路・河川沿いの建物群に誘導されて方向を変えて地表付近を流れるもの(タイプII)、超高層建物(群)により風下側に弱風域が形成されるとともに上空の冷気の誘引による低温域が形成されるもの(タイプIII)の3つである。

III 地球シミュレータを用いた高解像度ヒートアイランド解析

1) 解析の流れ

今回の解析における全体の流れを図4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。大規模数値解析に当たり、解析プログラムは地球シミュレータ上に構築した。120ノード解析で、ベクトル化率98.801%、並列化効率63.06%、ピーク性能20.3%である。

2) 数値モデルの修正

台風が北半球で反時計回りの渦を巻くのは、風が台風の中心に向かって進む際にコリオリ力を受けるためであると言われている。ヒートアイランド循環においてもコリオリ力の影響が無

視できないと考えられる。ヒートアイランド循環の水平スケールは30~50km程度と言われており(NIINO, 1987)、今回の10km四方解析ではコリオリ力を考慮することにした。

今回の解析範囲の上空500mになると乾燥断熱減率(=1.0°C/100m)の関係から気温は気圧により数°C変化すると予想される。通常のCFD解析においては圧力による熱的影響を考慮していないので、メソスケール解析の結果をそのまま使うことは出来ない。そこで、圧縮性流体方程式を導入することにより温位を取り扱うCFD解析を実施し、気象モデルの計算結果をCFD解析の境界値として適合させる。

3) 解析対象および解析日時

解析対象は東京都心臨海部の10km四方である。図5に解析対象の標高を示す。計算安定のため1,000m幅の袖領域を含む水平12km四方、高さ500mの解析領域を設定した。袖領域を

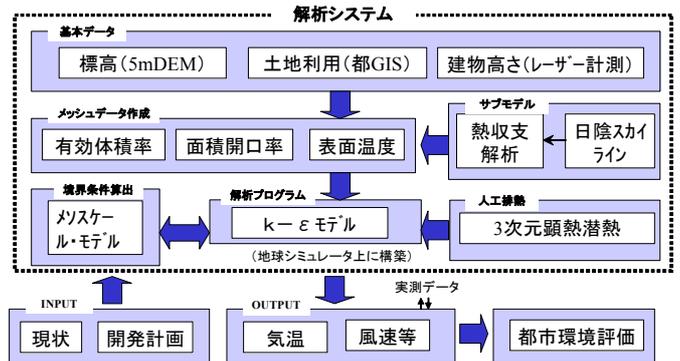


図4 解析の流れ

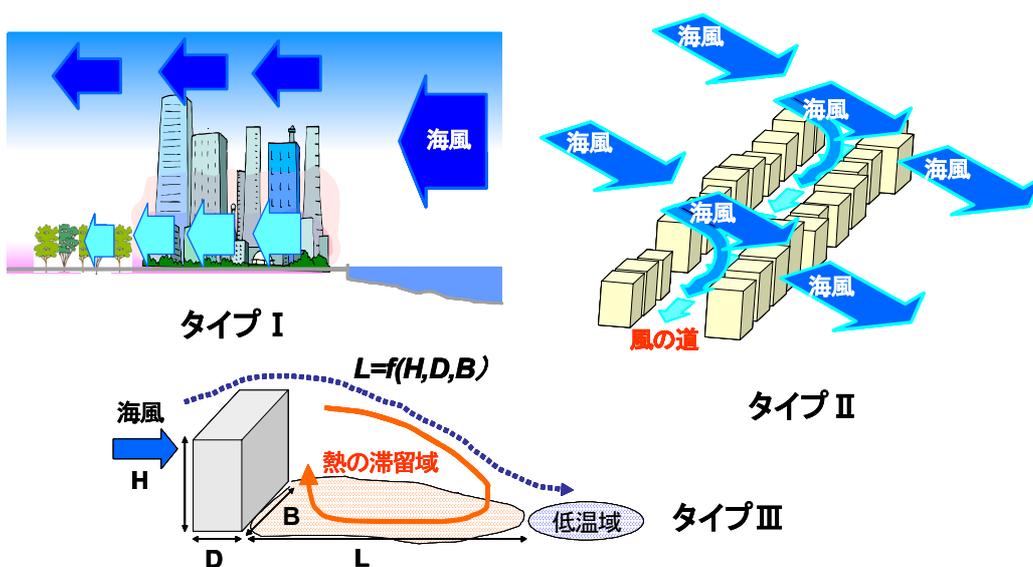


図3 「風の道」の分類(湾岸観測検討会)

含む総メッシュ数は5.76億である。

解析日時は2005年7月31日14時である。この時期とした理由は、熱環境が最も厳しい夏期日中を想定することと、この時期に大規模な観測が実施されており、本稿の後半において観測結果との比較を行うためである。観測の概要は既報を参照されたい¹⁴⁾。

4) 境界条件となる気象データの整備

CFD解析に先立ち、2階層ネスティングのメソスケール解析を実施し当該日時における気象データを整備した。第1階層(水平領域約300km四方、格子間隔4.5km)を気象庁RSM-GPVデータから初期・境界値を与えて解き、第2階層(水平領域約100km四方、格子間隔1km)の気象データを1wayネスティング解析で求めた。解析期間は2005年7月30日の21時から7月31日の24時である。当該日時におけるメソスケール解析結果を図5に示す。なお、メソスケール解析には伊藤忠テクノロジーソリューションズ株式会社のLOCALS¹⁵⁾を用いた。

5) メッシュ入力データの整備

数値モデルへ、都市域の建物や地盤の幾何的情報を受け渡す必要がある。国土地理院の航空機レーザー計測データを用いて建物高さを建物毎に把握し¹⁶⁾、東京都GISデータから建物位置

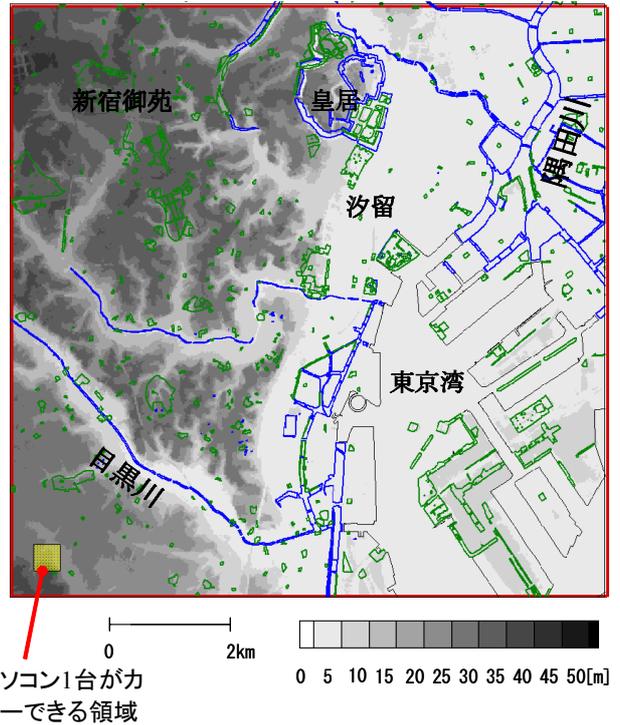
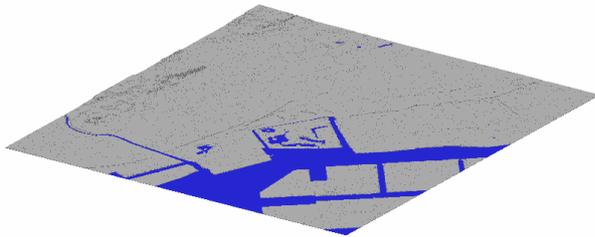
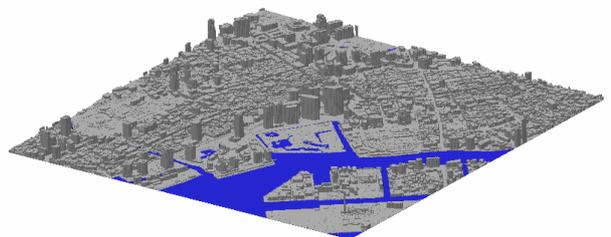


図5 地球シミュレータによるCFD計算領域(10km四方、図は標高を表す)



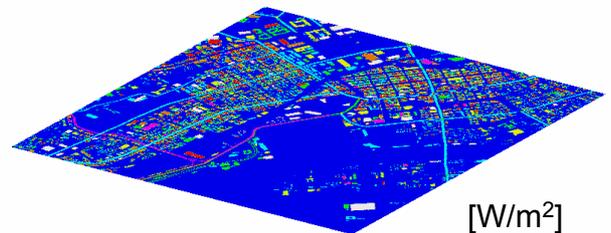
(a) 地形



(b) 建物



(c) 土地利用



(d) 人工熱

図6 メッシュ入力データ

をポリゴンで抽出することにより各解析メッシュにおいて有効体積率および界面での面積開口率を算出した。

河川については、GISデータの用途が水面である領域を行政区内外で陸水域と海水域に分類する。陸水域の標高は直近の陸域メッシュの標高値から3m低い値に設定し、海水域の標高は0mと設定する。更に陸域のうち国土地理院5mDEMで水面に分類されている橋梁や公園緑地内の水面についても陸水域として設定する。なお、蓋掛河川については、河川上部の地表位置の標高及び土地利用を設定する。東京都GISデータでは、寺社等の緑地が「公共用地」と分類されていたり、「緑地」と分類されている土地が樹木地なのか芝生や草地なのか区別がつかない。そこで今回は、東京都が整備している1990年代の現存植生デジタルデータを用いて「樹木」に分類されるデータを抽出した。

人工排熱は顕熱潜熱を区別して建物、道路交通、工場の発生源毎に集計を行った。人工排熱原単位は、筆者らの報告¹⁷⁾、国土交通省、環境省の報告書¹⁸⁾に基づき、夏期の平均的な人工排熱原単位の日変化データから、時刻14時のものを活用した。各メッシュに含まれている建物の屋上、壁面、路面の面積を計上し、表3に示す用途毎の排熱位置を考慮して3次元の人工排熱データをメッシュ整備した。

メッシュ入力データのイメージを図6に示す。

6) 気温、風の計算結果

地域の分布状況を概観するため地上100mの風速分布を図7に示す。夏季の日中の解析であり、全体的には南風が卓越しているが、東京湾上に比較して陸域の気流分布は熱的な対流、地形・建物による影響も相まって複雑なものになっている。図中には超高層建物の存在が確認できるが、特にその風下領域の風速が水平約1kmに渡って低下していることが解る。特に新宿、大手町、汐留では超高層建物が集中しており、低風速の領域も大きいことが分かる。

同様に地上100mの気温分布を表したのが図8である。海から市街地に向けて低温の領域が形成されていることを確認出来る。しかし、低温の領域の市街地への到達状況は場所により異なっている。気温分布で見ると超高層建物の手前までは低温になっているが、超高層建物の存在により海風が遮断されて、その風下領域で気温が上昇している様子が解る。内陸に入るとつれて気温は全体的に上昇している。内陸に超高層建物がある場合においても、その風下領域の気温は高くなる傾向が見られる。以上のように、地上100mでは気温、風共に超高層建物の影響が大きいことが解った。ただし、地表レベルを含め今後詳細な

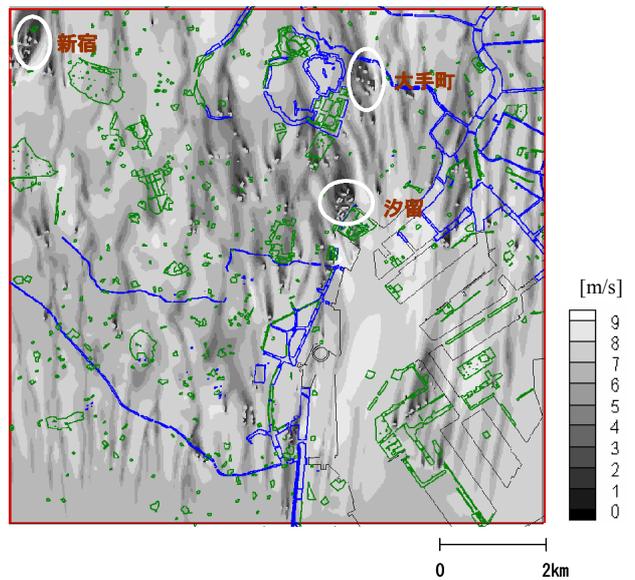


図7 地上100mの風速分布（夏季日中）

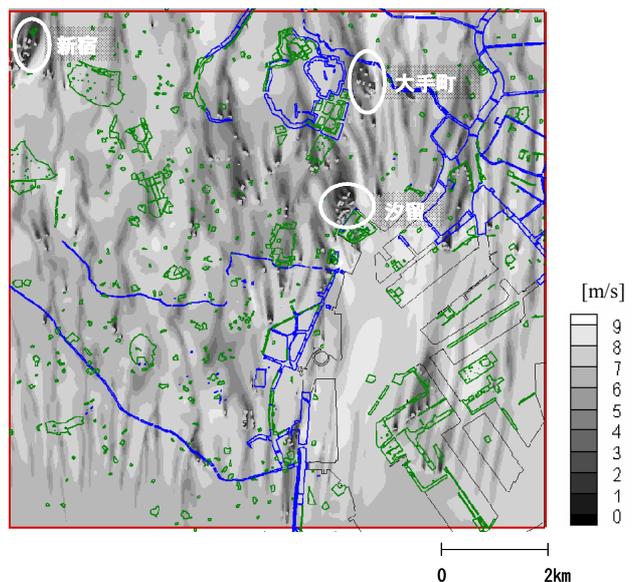


図8 地上100mの気温分布（夏季日中）

検討が必要である。

7) 実測結果との比較

河川沿いの風観測と今回の数値計算の結果（高さ3.5m）を比較したのが図9である。今回の条件において日本橋川のN1、N2、目黒川のM2、M3、M4では河川沿いに風が流れることを実測と数値計算で確認した。橋本らは名古屋市において現地調査を行い、運河沿いの風の流れを実測で確認したが、卓越風向によっては運河沿いの風向は複雑に変化することを指摘してい

る¹⁹⁾。更なる計算精度向上のためには、上空風の設定方法に加えて、今回考慮されていない土木構造物の影響等を含めた検討が必要である。

現地観測による気温と計算結果の比較を行ったのが図10である。実測、計算の全体的な傾向は一致している。市街地では気温が高く、緑地、河川では気温は低い。土地利用の相違により実測、計算共に気温の場が影響されているが、面的分布からは沿岸部の気温が低い傾向が現れている。現地計測173地点に該当する気温の計算値を比較すると、RMS誤差は1.1℃であった。評価している高さが、時空間変動が大きい都市キャノピー内に位置することを考え合わせると、良く合致していると言える。

IV 都市空間の風通しについて

1) 汐留の超高層ビル群の話題

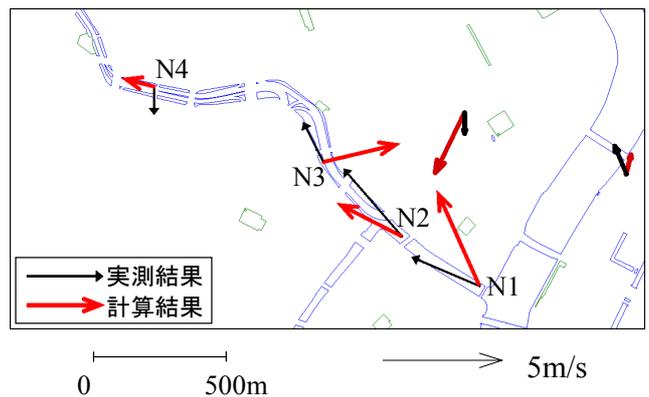
都市域の建物は数、規模共に年々増加してきた。東京都統計資料によると、1994年から2004年の10年間に東京都の建物棟数は335万棟から395万棟に60万棟増、床面積は490km²から595km²に105km²増となっている。個々の建造物の建設が都市スケールで集積することにより、都市の粗度、すなわち風の抵抗が増えていることになる。

近年都心で見られる超高層建築群の開発ラッシュを契機として都市の風通しの問題があらためて注目されるようになった。その代表とも言えるのが東京都心の臨海部で進められている汐留の再開発である。超高層ビル群が景観的に海を臨む立地形態をしており、そびえたつ超高層ビル群の眺望とも相まってこの超高層ビル群によって風の流れが大きく変化し周辺もしくは遠く風下まで高温化するのではないかと懸念されている。

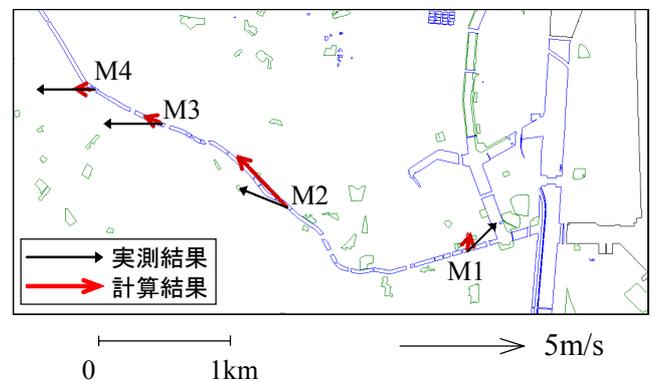
地球シミュレータによる解析結果から、超高層ビル群の周辺の風を詳細に描画してみると(図11)、超高層ビル群では建ぺい率が縮減されており、海からの風が通り抜けている様子が解る。実際に超高層ビル群の敷地内では気温は低く、海からの涼風の恩恵を受けていると言える。一方、その風下に位置している新橋、銀座地区では建物が密集して弱風状態になっており、気温も高い。体感温度は風の影響も受けるので、建物密集地域では人はより暑く感じるというわけである。

2) 研究プロジェクトの紹介

独立行政法人建築研究所は運営費交付金研究課題「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」の一環として、地球シミュレータを用いたヒートアイランドの数値解析に



(a)日本橋川



(b)目黒川

図9 河川近傍の風速に関する実測と計算の比較

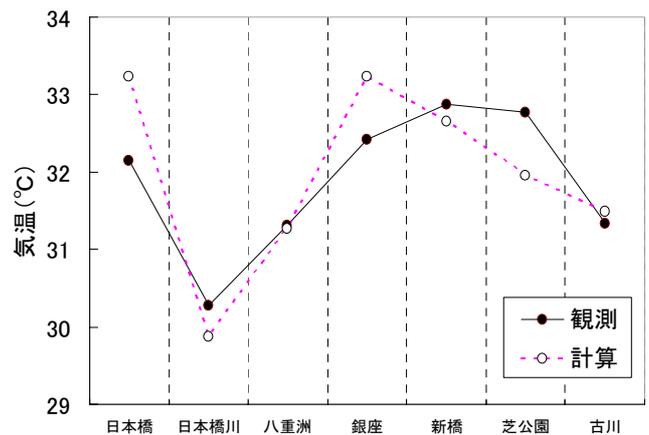


図10 実測と数値計算の比較事例 (2005年7月31日14時)

関する検討を実施してきた。国土交通省総合技術開発プロジェクト「都市空間の熱環境評価・対策技術の開発」では、今後のヒートアイランド対策が効果的に実施できるようにその科学的裏付けとなる現象解明と対策の定量的評価手法等の開発を行うことを目的として平成16年度から平成18年度の3カ年にわたり検討が行われてきた。これらの研究プロジェクトが連携し得られた研究成果の概要は以下の通りである。詳細はホームページを参照いただきたい。

(<http://www.nilim.go.jp/lab/jeg/heat.htm>)

『都市空間における効果的なヒートアイランド対策を検討するために、科学的手法を駆使して、様々なヒートアイランド対策効果を予測できるシミュレーション技術を開発した。』

従来のシミュレーション技術は、ビル風の子防や耐風設計のために都市空間の風の挙動を予測する技術として開発されてきたが、ヒートアイランド対策の検討には、風の挙動に伴う熱の拡散を組み込むことが必要であり、これらの複雑な現象を再現

するには通常のコンピュータの能力では不可能であった。

そこで、世界最速レベルのスーパーコンピュータ（地球シミュレータ）を用いて、その能力を最大限に引き出せるシミュレーション技術を開発した。東京臨海・都心部の10km四方（地表から上空500mまで）を対象に、都市の様々な街並みの気温や風向・風速の分布を、個々の建物や街路が見分けられる細かさ（5mメッシュ）で予測できるようになった。

東京臨海・都心部で実施した大規模実測調査や、詳細な市街地模型を用いた風洞実験等の結果とシミュレーション結果と照合して極めて予測精度が高い技術であることが確認された。さらに、このシミュレーション技術を実用化するために、パソコン上でもシミュレート可能なソフトを開発した。』

この中で、パソコン上でのシミュレーション技術と記載されているが、ソフト自体は地球シミュレータで使っていたものとはほぼ同一である。メモリの制約から計算領域はパソコン1台だと500m四方が限界であるが、通常の再開発規模に近いことか



図11 東京臨海地域における風環境の事例
(CADデータMAPCUBEとの重ね合わせによる)

ら実用的ツールとして期待されている。

3) 計算精度について

数値モデルの検証は通常実測値との比較により行われる。すなわち、注目する物理量（例えば、気温）がどの程度現象を再現するかを確かめるために、True Data（真値、この場合現地における気温の実測値）との差について統計平均をとることになる。そして、精度保証された数値モデルを様々な場面で適用していくわけである。例えば、空調負荷設計では現況再現性に加えて空調負荷に有効な手段の優先度を提示することが重要視されており、材料や設備機器の選択において物理的機構が数値モデルへ正しく組み込まれていれば、工学的利用に際して十分有用であるという見方が出来る。

今回の計算ではRMS誤差が約1°Cであるのに対してヒートアイランド対策による気温や体感温度への影響は0.2~2°C程度であると予想される。そのため、目の粗いものさしで小さい物を測っているような印象を受けるが、物理的モデルは倍精度の有効数字のレベルできめの細かい計算結果をもたらす。工学的用途に限定すればの話であるが、ヒートアイランド対策効果の序列を調べるにはそこそこ有効な方法であると考えられる。

むしろ、計算の日時の設定について留意した方が良いだろう。通常CFD数値計算は定常状態を仮定して実施される。夏季の日中等に解析日時が限られているケースも多い。しかし、実際は太陽高度により日向日陰は大きく変わり、その日の天候により風向きも多様である。今後は異なる季節、時間についてケーススタディを蓄積する必要がある。

ところで、地球温暖化モデルでは過去100年間の気候変動を再現することを確認した上で、そのモデルおよび付随するパラメータを使って100年後まで計算時間を延長して未来を予想している。IPCCでは世界中の地球温暖化モデルによる計算結果をデータベースで公開しているため、数値モデルの銘柄による計算結果の相違を知ることが出来るようになった。WMO（世界気象機関）では都市気候モデルのライブラリに研究グループによる登録を呼びかけており、計算ツールの公開によりケーススタディの蓄積が急速に進みつつある。実は数値モデルの信頼性を確保することは難題であり、このように各方面で様々な取り組み、工夫が見られるのも事実である。

V おわりに

ヒートアイランド対策は大綱に至る施策上の重要なステップを一巡し、国、自治体による具体的取り組み、制度が推進され

る時期に差しかかっている。今後はヒートアイランド対策を講じた都市計画が現実化し、具体的には街並みや表面仕上げが工夫されることであろう。近い将来、再開された街で一般市民がヒートアイランド対策の効能を体感する場面も増えてくると思われる。ヒートアイランド対策や街づくりの中で、生活の質を高めていくことが一層求められており、都市建築環境の予測評価方法をより充実させていく必要がある。現実の都市の構築にはやり直しがきかないので、仮想の都市を取り扱うことが出来る数値シミュレーション技術を上手に活用していくことが重要である。

今後の検討課題として以下の事項が考えられる。

- ・昼夜間・季節を通じた対策効果
- ・体感評価
- ・地域特性に応じた対策メニューの作成
- ・シミュレーション評価ツールの改良、等

謝 辞

本研究は、独立行政法人建築研究所は運営費交付金研究課題「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」、国土交通省総合技術開発プロジェクト「都市空間の熱環境評価・対策技術の開発」の一環として実施した。数値計算の比較に用いた気温、風速の観測値は、国土交通省国土技術政策総合研究所が実施した東京臨海・都心部のヒートアイランド現象の実測調査によるものであり、共同実施の早稲田大学尾島俊雄教授、首都大学東京三上岳彦教授、日本工業大学成田健一教授にデータ提供していただいた。本研究の実施にあたり、海洋研究開発機構の地球シミュレータを利用した。科学技術振興機構から重点研究支援協力員の支援を受けた。記して深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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

- 5) 近藤裕昭：メソ気象解析からみたマイクロ解析との接続、日本風工学会誌、Vol. 31-NO. 2、pp. 133-136、2006. 4
- 6) 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. 9
- 7) T. Ichinose, Y. Ashie, Y. Hirano and T. Kono: The High-Resolution Numerical Model of Heat Island Phenomena, CGER's Supercomputer Activity Report, Vol.12, pp. 115-121, 2005.3
- 8) 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
- 9) 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
- 10) W. Ohfuchi, H. Nakamura, M. K. Yoshioka, T. Enomoto, K. Takaya, X. Peng, S. Yamane, T. Nishimura, Y. Kurihara and 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
- 11) 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
- 12) 国立環境研究所地球環境研究センターHP (2007. 2. 5 閲覧)、http://www-cger.nies.go.jp/index-j/topics/workshop/w061108/summary/summary_all.pdf
- 13) 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
- 14) 尾島俊雄他：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1~9)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 491-508、2006. 9
- 15) 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 22-5、pp. 405-415、2003. 10
- 16) 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
- 17) 足永靖信、李海峰、尹聖皖：顕熱潜熱の違いを考慮した東京23区における人工排熱の排出特性に関する研究、空気調和・衛生工学会論文集、NO. 92、pp. 121-130、2004. 1
- 18) 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
- 19) 橋本剛、堀越哲美：名古屋市近郊に位置する庄内川および新川の海風の「風の道」としての働き、日本建築学会環境系論文集、第571号、pp. 55-62、2003. 9

