# ヒートアイランド現象の解析とその対策技術の総合的評価のための Software Platformの開発と解析事例

Development of Software Platform for Total Analysis of Urban Heat Island

村上周三,東大生研,158-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1 Cw404, murakami@iis.u-tokyo.ac.jp 持田 灯,東北大学,980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 06, mochida@sabine.pln.archi.tohoku.ac.jp Kim Sangjin,東大生研,158-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1 Cw404, kimsj@iis.u-tokyo.ac.jp 大岡龍三,福井大学,910-8507 福井市文京 3-9-1, ooka@anc.anc-d.fukui-u.ac.jp 吉田伸治,東京大学大学院,158-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1 Cw404, shinji@iis.u-tokyo.ac.jp Shuzo MURAKAMI, I.I.S., University of Tokyo, Cw404, 4-6-1, Komaba, Meguro-Ku, Tokyo 158-8505, Japan Akashi MOCHIDA, Tohoku University, Aoba 06, Aoba-Ku, Sendai 980-8579, Japan Sangjin KIM, I.I.S., University of Tokyo, Cw404, 4-6-1, Komaba, Meguro-Ku, Tokyo 158-8505, Japan Shinji YOSHIDA, University of Tokyo, Cw404, 4-6-1, Komaba, Meguro-Ku, Tokyo 158-8505, Japan

Urban climate is related to various phenomena in various scales. In this paper, a new concept integrating the sub-models for various phenomena into a total simulation system is proposed as a software platform for the analysis of urban heat island. A case study of the analysis of urban climate in Tokyo is occurred. The accuracy of numerical analysis based on the platform is examined by comparing its results with measured data

# 1. はじめに

著者等はこれまでに人間スケール<sup>1)</sup>、建物スケール<sup>2</sup>、都 市スケール<sup>3)</sup>等の各スケールの風環境あるいは温熱環境の解 析手法開発を個別に行ってきた。しかし、実際の環境は各種 スケール内の各種の物理プロセスが有機的に連結して形成 されている(Fig.1)。特に、都市環境のように極めて多くの 要因が関連する複雑な現象の解明を試みる場合、関連する要 因の多さと、各要素間の相互作用の複雑さにより、個別の研 究者がその全体を考慮した予測・評価を行うことは不可能に 近い。これに対して、例えばヒートアイランドをいかに解決 するかというような政策的問題において、適切な意志決定が なされる前提として、多くの要因を組み込んだ総合的なシミ ュレーションに基づいて関連する要因のそれぞれの寄与率 或いは貢献度を定量的に把握することが求められる。



(2) City block scale (microscale)

Fig.1 Various physical elements which participate in formation of urban environment on mesoscale and microscale



Fig.2 Prototype of software platform for the total analysis of urban heat island

本研究では都市スケールの環境(メソスケール気候)、市 街地・建物スケールの環境(ミクロスケール気候)、ホ ギー消費等のモデル化に関する最近の成果を組み込み、これ らの相互作用の結果として生じる都市気候を総合的に解析 することを可能とする Software Platform の Prototypeの開発を 行った。本稿ではその目的、構成および解析例を紹介する。

#### 2. Platform の機能

Platform とは様々な要素が複雑に関係する現象を総合的 に解析するため、

対象とする現象を構成する様々な要素に対する解析ソフト(solver)や、

関係する既存の data-base (入力条件、検証データ等)

を橋渡しするための基盤フレームである。この Platform 上で は対象となる問題に応じて必要な既存のソフト (existing legacy code)や data-base を選択し組み合わせてシミュレーシ ョンを行うことにより、総合的な予測・評価が可能となる。

従って、連成シミュレーションを円滑に運用するための Platform は次のような機能が必要とされる。

```
対象とする個々の問題(要素)を解析するための" solver "、
対象とする問題に応じて必要とされる " data-base "、
```

solver, data-base 間の input/output の " interface "、

問題に応じて必要な要素技術 (solver, data-base 等)を適切 に抽出し、組み合わせて解析を実行する "コンサルティング 機能"

大規模な Platform を円満に運用するためには、特にの interface 部での変数のやり取りを容易にすることが重要である。本研究では、これを実現するために CORBA (Common Object Request Broker Architecture)等の最新の software 工学の 成果の利用を念頭において基本設計を行った。

# 3. Platform の構成

Fig.2 にヒートアイランド現象の総合解析のための

Platform の Prototype の概要を示す。図の左端の部分(input) にはヒートアイランド改善のための各種シナリオ(改善策) を示す。 緑化等による都市気温の低下、 人工廃熱の減少、 都市の換気・拡散の促進等の様々な対策のシナリオを入力 することにより、右端の output として、 都市環境の実態、 エネルギー消費、 CO<sub>2</sub>排出量等が予測される。図の下端 は各種サブモデルで、この中には人体生理モデルや植生キャ ノピー<sup>4)</sup>、建物キャノピー、エネルギー消費<sup>5)</sup>等のサブモデ

ルなどが含まれる。太い黒枠の中が Platform の本体である。 本体の上半分は各種シナリオや data-base を、CFD 解析を行 うための境界条件や初期条件として整備する部分である。本 体の下の部分が Prototypeの心臓部で、ミクロスケール気候、 メソスケール気候の solver、エネルギー消費や CO<sub>2</sub> 排出の予 測モデル等で構成されている。本研究ではメソスケールの気 候解析のための乱流モデルとして Mellor-Yamada のレベル 2.5<sup>60</sup>を採用し、ミクロスケールの気候解析のためのモデルと しては著者らが開発した改良 k- モデル<sup>2),7),8)</sup>を選定し、こ れらのモデルに基づくメソからミクロに至る多段階 Nesting 機能を持つプログラムを開発した。

# 4. 本研究で開発した Prototype の Software 上の特徴 1) 各要素間の関係の分析と階層化

現実の気象の変動に伴って動的に変化するエネルギー需 要と省エネルギー効果(Fig.1)を時間・空間のマルチスケー ルで総合的に評価するためには、Fig.2 に示すような様々な 要素のモデルが必要である。従って、個別の研究者の成果を 有機的に結合したシステムを構築する必要がある。本研究で は都市の温熱環境に複雑に関与する要素間の関係をオブジ ェクト指向分析により階層化し、solver、data-base 間の interface を介して最新の研究成果を速やかに組み込みながら 遂時、改善、増強することが可能となる様にシステムの基本 設計を行った。

# 2) 高速化

本研究では、後述するようにメソスケール 3 段階、ミク ロスケール3段階の計6段階のNestingを可能とするプログ ラムを開発した。これらの各スケール間の気候解析では、タ イムスケールが大きく異なり、同一の時間差分間隔 t で解 析を行おうとすれば、膨大な計算時間を必要とする。本研究 では、メソスケールにおける 3 段階の Nesting 及びメソスケ ールからミクロスケールへのデータの引き渡しは、大スケー ルから小スケールへの One Way とし、ミクロスケールのみで Two Way Nestingを採用した。メソスケールからミクロスケ ールへのデータの引き渡しを One Way とすることにより方 程式系の異なるメソスケールとミクロスケールの2種類のプ ログラムの接続が容易になり、システムが単純化され、誤り の入る余地を少なくすることが可能となった。また、メソス ケールの解析では陽解法を、ミクロスケールの解析では SIMPLE 法による陰解法を採用することにより、ミクロスケ ールの解析において、メソスケールの陽解法から要請される t の制限を受けなくなり、計算を高速化することが可能と なった。また、反復法系の高速行列解法として、対称行列と なる圧力のポアソン式に ICCG 法<sup>9)</sup>、移流拡散方程式に ILU/BICGSTAB 法<sup>10)</sup>を用いた。

# 5. 解析例

- 5.1 解析概要
- (1) 解析領域・メッシュ分割

本研究で開発したメソスケール3段階、ミクロスケール 3段階の計6段階のNesting Systemを用いた解析例を以下に 示す。Fig.3にNestingの各段階のgridの解析領域を、Table1 にそれぞれの計算領域の広さ及びgrid分割を示す。ミクロス ケールの解析領域としては、解析結果の精度を検討するため

Table 1 Computational domain and grid arrangement

Grid	Size of domain	Grid number	Horizontal grid
	$(X \times Y \times Z)$	$(X \times Y \times Z)$	size
Grid A	480km×400km×9.6km	60×50×49	
Grid B	96km×96km×9.6km	48×48×49	8km ~ 500m
Grid C	32km×32km×9.6km	64×64×49	(mesoscale)
Grid D	2km×2km×500m	32×37×14	
Grid E	700m×620m×300m	58×73×29	100m ~ 1m
Grid F	145m×65m×154m	78×41×28	(microscale)



に、文献 11)で実測結果を報告している東京都北区赤羽団地 とその周辺の領域を選定した。

# (2) 解析条件

文献 11)の実測時期に対応する 1999 年 8月 3 日、4 日を 対象とした。メソスケールの解析は 8月 3 日の太陽高度に基 づき午前 6 時からスタートし、その後 33 時間の時間積分を 行った。ミクロスケールの解析は 8月 4 日の 14 時 30 分のメ ソスケールの結果を境界条件として定常計算を行った。

メソスケール

風速の初期値は実測時の赤羽団地内の観測点(Fig.3(2)の 中の measuring site)の観測データを基に、地上 37m より上 では南南東風で風速 3.65m/s とした(注1)。メソスケールの 最大 grid (Grid A)の上空ではこの条件を境界条件としても 用いた。

#### ミクロスケール

ミクロスケールの Grid D の境界値や初期値はメソスケー ルの Grid C の計算結果から与えた(注2)。

# 5.2 解析結果

#### (1) 風速分布

#### メソスケール解析

Fig.4 に計算開始時刻から 33 時間後の 8 月 4 日の 15 時の 高さ 100m における風速ベクトルの水平分布を示す。既往の 観測結果<sup>12)</sup>に見られる同時刻の海風の関東平野への流入を よく再現している。風速値に関しても、計算結果は、山岳の 影響のある地域を除いて、2~5m/s 程度の値となり、観測結 果<sup>12)</sup>とほぼ一致している。

# ミクロスケール解析

Fig.5 に 8 月 4 日 14 時 30 分の Grid E の風速ベクトルの水 平分布(崖上の領域の高さ 1.5m)を示す。流入風は南南東 風であるのに対し、団地棟間(Grid F の領域)では、ほぼ西 風となっている。Fig.6 に Grid F の高さ 1.5m における風速ベ クトルの水平分布を、Fig.7 に同領域内の高さ 1.5mのスカラ 一風速の水平分布の計算結果を示す。また Table 2に Grid F 内の団地棟間の1点(Fig.7 中の測定点)における 8 月 4 日 14 時 30 分付近のスカラー風速及び風向の実測値と計算値の 比較を示す。計算結果では Grid F の団地棟間の風向は実測結 果とよく対応している。また風速についても、計算結果では 測定点において約1.5m/s の値を示すのに対し、実測結果では 測定点での平均値(14 時~15 時)が1.7m/s 程度であり(Table 2) よく対応している。

# (2) 温度分布

Fig.8 に Grid F 内の地表面温度分布の計算結果を、Table 3 に実測結果との比較を示す。草地日照部の地表面温度がやや低いものの実測値と計算値は良く一致している。

# (3) SET\*の分布

Fig.9 に高さ 1.5m における 14 時 30 分の温熱快適性指標 SET\*(Standard Effective Temperature)<sup>13)</sup>の分布を示す。この 結果では解析時刻において SET<sup>\*</sup>の値は約 30 ~42 であり、 夏季の屋外温熱環境が劣悪であることを示している。

#### 6. まとめ

(1) メソスケール、ミクロスケールにおける都市の風環境、 温熱環境とエネルギー消費に関係する様々な要素に関する 最新のモデル化を組み込み、且つヒートアイランド現象を総 合的に解析し、その対策技術を評価するための Software Platform の Prototype を作成した。

(2) 本研究で開発した Platform を用いた 6 段階の Nesting によるメソ・ミクロ連成解析を行い、ミクロスケールの解析結果を文献 11)の実測結果と比較した。実測結果と数値解析結果の対応は良好であり、数値モデルの信頼性を確認することができた。

(3) 本研究では東京地方における風環境の解析事例を紹介し



**Fig.5** horizontal distribution of velocity vectors (Grid E, at the height of 1.5m, 3:00 p.m.)



Fig.6 Horizontal distribution of velocity vectors (Grid F, at the height of 1.5m)



**Fig.7** Horizontal distribution of scalar velocity (Grid F, at the height of 1.5m) [m/s]

# Table 2 Comparison between field measurement and CFD prediction for wind direction and wind velocity (measuring point : of Fig 7)

	Field measurement (average of values between 2.00  pm = 3.00  pm)	CFD prediction ( at 2:30 p.m. )
Wind direction Wind velocity	283 ° (west wind)	278 ° ( west wind 1 52 m/s



Fig.8 Distribution of ground surface temperature (Grid F) [ ]

	Asphalt		Grass		Building wall	
	Sunny	Shade	Sunny	Shade	Building A	Building B
	place	of tree	place	of tree	(SE wall	(NW wall
			_		surface)	surface)
Point (Fig.8)	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Field	46.3	36.5	36.7	29.7	35.0 - 36.0	40.5 - 41.5
measurement						
CFD	45.9	38.3	33.6	29.0	32.0 - 35.5	40.0 - 41.5
prediction						

 
 Table 3 Comparison of surface temperature on ground and building walls [ ]



Fig.9 Horizontal distribution of SET\*

(Grid F, at the height of 1.5m) [] たが、今後は、ヒートアイランド問題を含めその実用化の普 及活動を進めるとともに、アジアの諸都市も含めた他の都市 における検討も行っていきたいと考えている。

注 1) 風速の初期値は高さ 37m 以下では 1/4 乗則に基づく平 均風速分布を仮定した。初期温位分布は標高 0m で 26 とし、 高さ方向に 5K/km の温位勾配を与えた。初期水蒸気分布は 高さ 3km までは McClatchey の大気モデルに従う分布を用い て、3km 以上の上空では 0 とした。側面境界条件は各方程式 の拡散項と移流項を無視した鉛直一次元の式を用いた。数値 不安定を避けるため、計算した各変数に対して水平方向のス ムージング処理を加えている。また、上空では吸収層を設け、 7000m から上空に行くに従って、水平方向および鉛直方向の 拡散係数が大きくなるようにしている。

注 2) メソスケールからミクロスケールへのデータの引き渡 しは一方向(One Way)であり、ミクロからメソへのフィー ドバックはない。ミクロスケールのGrid D~Fの間では双方 向(Two Way)Nestingで解析した。Grid Fではモンテカルロ 法<sup>2)</sup>に基づく放射伝熱解析より地表面温度を求め、これを Grid Fの境界条件とした。この場合、建物表面から内部への 貫流熱負荷から空調発熱を算出し、これを窓、バルコニーか ら均一に排出した。また、Grid F は樹木の風速低減、乱流拡 散の増加、短波および長波放射への影響も文献4)のモデルに より考慮している。メソスケールのネスティングでは、大き い領域での計算を行う際に小さい領域の側面境界位置に補 間した値を、ネスティング用境界値として 10 分間隔でファ イル出力し、出力されていない時刻における値は前後の値か ら線形補間により設定した。メソスケールとミクロスケール のネスティングでは、メソスケールの Mellor-Yamada モデル level 2.5 の変数 (q、q<sup>2</sup>1) から k、εを以下のように与えた。

$$k = \frac{1}{2}q^2$$
  
 $\epsilon - \frac{q^3}{B_1 l}$ (但し、B<sub>1</sub>=15.0)

なお、境界部では流速固定とし、補間して得られた値を 領域全体での質量保存則を満たすよう補正した値を与えて いる。また、ミクロスケール同士のネスティングでは、境界 における解の連続性を保つため境界部にオーバーラップ領 域を設け、それぞれの境界位置における補間値を固定値条件 として与え、SIMPLE法の繰り返し計算に反映させている。

# <謝辞>

本研究は新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO) の平成10年度新規産業創造型提案公募事業「高効率の熱交 換・熱拡散促進型の省エネ都市形成手法の開発」(研究代表 者:村上周三)の一環としてNEDOとの共同研究により行った。 富永禎秀助教授(新潟工大)伊香賀俊治博士(日建設計(株)) 近藤裕昭(資源環境研)、玄地裕(資源環境研)、島田昭男(富 士総研)をはじめとする本プロジェクトメンバーに謝意を表 する。

### <参考文献>

- (1) 村上周三,加藤信介,曾潔,日本建築学会計画系論文集, No.515, 69-74, 1999.
- (2) 吉田伸治, 村上周三, 持田灯, 大岡龍三, 富永禎秀, Kim Sangjin, 日本建築学会計画系論文集, No.529, 77-84, 2000.
- (3) 村上周三, 持田灯, Kim Sangjin, 大岡龍三, 日本建築学会 論文報告集, No.491, 31-39, 1997.
- (4) 吉田伸治, 大岡龍三, 持田灯, 富永禎秀, 村上周三, 日本 建築学会大会計画系論文集, No.536, 87-94, 2000.
- (5) 亀卦川幸浩, 近藤裕昭, 日本気象学会秋季大会, 1999.
- (6) Mellor,G.L, and Yamada.T, J of Applied Meteorology, Vol.13, No.7, 1791-1806, 1974.
- (7) 野口康人,村上周三,持田灯,富永禎秀,日本建築学会大 会学術講演梗概集,65-66,1994.
- (8) 近藤宏二,村上周三,持田灯,第 8 回数値流体シンポ, 363-366,1994.
- (9) J.A.Meijerink and H.A. van der Vorst, J.Comp.Physics, 44, 134-155, 1981.
- (10)H. van der Vorst, SIAM J. Sci. Stat. Comput., 13, 631-644, 1992.
- (11)磐田靖子,村上周三,持田灯,大岡龍三,吉田伸治,原山 和也,第13回数値流体力学シンポジウム,187,1999.
- (12)桑形恒男, 近藤純正, 天気, 55~59, 1990.
- (13)A.P.Gagge et al., AHSRAE Transactions, 92(1), 709-731, 1986.