

# 1. 都市環境学の overview

## —都市気象・気候研究における理工学融合に向けて—

飯塚 悟\*

### 1. はじめに

「都市環境」が包括する範囲は、筆者が専門とする建築分野を考えてみても、ヒートアイランドなどの温熱環境問題、大気汚染などの空気環境問題、ビル風などの風環境問題、道路騒音などの音環境問題、日照権などの光環境問題、等々、極めて多岐に渡る。このように多岐に渡る都市環境問題のうち、ここでは都市の温熱環境・風環境(都市気象・気候)にターゲットを絞る。気象・気候学(理学)と建築・土木工学(工学)の共通課題となる都市気象・気候研究を題材として、理学と工学の研究融合について考える。

都市気象・気候に関する研究はこれまで、理論研究、実測・実験研究、数値モデル(シミュレーション)研究を合わせて、筆者1人では全てを把握しきれないほど数多くの研究がある。これまでの代表的な研究の文献名を列挙するだけでも限られた誌面の大部分を埋め尽くしてしまうことになるので、ここでは代表的なレビュー論文・図書を紹介するのに留める。理学の立場からは日下(2008)やKusaka(2008)など、工学の立場からは持田(2003)、一ノ瀬(2003)、大岡(2005)、日本建築学会(2007)など、理学と工学の両者に跨がるものとしてはKanda(2007)などがある。

本稿では、上記のレビュー論文・図書に記述されていることも踏まえつつ、数値モデルを用いた都市気象・気候研究を中心として、理学や工学の研究アプローチの違いは何か、両者を上手く融合するための課題は何か、について考えていきたい。

### 2. 気象・気候学(理学)と建築・土木工学(工学)の研究アプローチの違い

#### 2.1 研究の視点

竹見(2014)が述べているように、気象・気候学(理学)は地球の大きさの視点から、建築・土木工学(工学)は人間の大きさの視点から研究を進めてきている。理学では「自然現象の解明」に主眼を置いているのに対し、工学では「人間社会のための実用化(対策・指針づくり)」に目標を定めていることが多い。

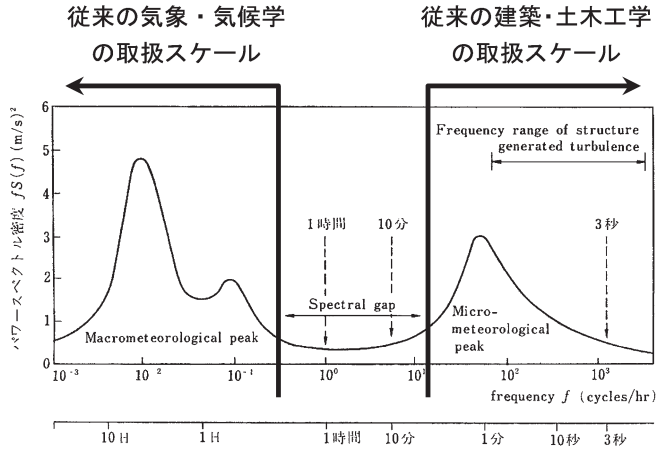
#### 2.2 ダウンスケーリングとアップスケージング

第1図は、教科書等でもよく登場する風速変動のパワースペクトルの図である。従来の気象・気候学と建築・土木工学は、第1図の中央部のいわゆる「スペクトルギャップ」を境として明確なスケール分離が行われ、それぞれ独自に研究が進められてきた。すなわち、従来の気象・気候学では気象擾乱に起因する低周波数帯の変動を主に取り扱い、従来の建築・土木工学では地表面粗度(建築物など)に起因する高周波数帯の変動を主に取り扱ってきた。しかし、近年のコンピュータ性能や並列処理技術の著しい進展により、数値モデル研究においては特に、気象・気候学と建築・土木工学それぞれで取り扱うスケールがオーバーラップしてきている。気象・気候学の数値モデルでは高解像化(ダウンスケーリング)が進み、建築・土木工学の数値モデルでは解析領域の広域化(アップスケージング)が進んできている(竹見・中山2009; Mochida *et al.* 2011も参照)。第2図はダウンスケーリングシミュレーション事例(高橋2011)、第3図はアップスケージングシミュレーション事例(Ashie *et al.* 2009)である。第2図や第3図を見ても分かるように、気象・気候学と建築・土木工学の両者が取り扱うスケールとしてオーバーラップしてきている部分に含まれるのが「都市」スケールである。

\* 名古屋大学大学院環境学研究所。

s.iizuka@nagoya-u.jp

© 2014 日本気象学会



第1図 風速変動のパワースペクトル (村上 (1984) から抜粋・一部追加)。

2.3 粗度・キャノピーモデルと建物解像

気象・気候学のダウンスケーリングにしても、建築・土木工学のアップスケリングにしても、当然のことながら、お互いが取り扱うスケルを完全にカバーするものではない (第2図は建物・街区スケルまでのダウンスケーリングとなっているが、これは特別な事例)。気象・気候学で都市スケルを取り扱う場合、都市の存在がさらに大きなスケルの自然現象に及ぼす影響を把握することに主眼が置かれている。つまり、都市上部が主たる興味の対象である。このような状況のもと、気象・気候学では都市を粗度もしくは単層/多層キャノピーモデルとして取り扱い、それらの開発研究が進められてきた。領域気象モデル Weather Research and Forecasting (WRF;

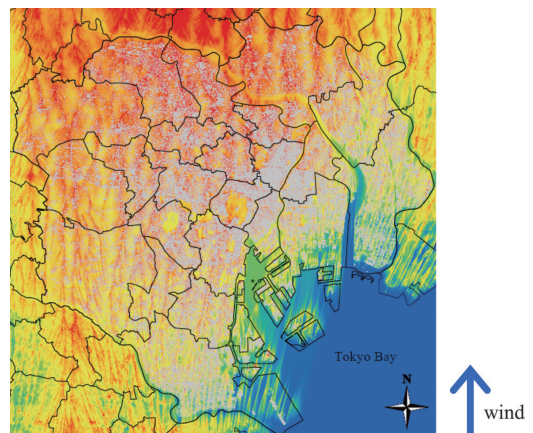
Skamarock *et al.* 2008 ; 日下 2009) に標準搭載されている Kusaka *et al.* (2001) の単層キャノピーモデルは代表的な都市モデルの1つである。

建築・土木工学においても、平岡ほか (1989), 丸山 (1989) など、先駆的で優れたキャノピーモデルの開発研究がある。しかし、建築・土木工学で主として興味の対象となるのは人間スケルであり、それは都市内部にある。都市キャノピーモデルでもキャノピー内部の分布を知ることはできるが、その分布は大きく平均化されたものであり、人間スケルで見るとは曖昧すぎて滑らかすぎるものとなっている。つまり、建築・土木工学では建築物を正しく解像することが基本となる。第4図は筆者らが行った建物解像シミュレーションの一例である。

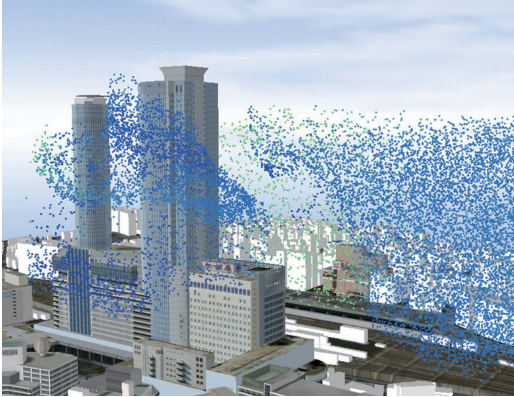
本節のタイトルからは話が少しずれるが、自然か人間かという理学と工学の軸の違いは、それぞれで扱う温熱環境評価指標の違いにも表れている。気象・気候学ではその指標の1つとして、International Organization for Standardization (ISO) や Japanese Industrial Standards (JIS) の規格となっている Wet Bulb Globe Temperature (WBGT) がよく用いられる。この指標は、放射 (短波・長波)、気温、湿度、風速の4つの物理要素から求められる。一方、



第2図 真夏の東京都心部の温熱環境シミュレーション (3次元温度分布) (高橋 2011)。



第3図 東京23区全体の温熱環境シミュレーション (2005年7月31日14時、高さ2m) (Ashie *et al.* 2009)。



第4図 名古屋駅高層建物周辺の気流（ビル風）解析（飯塚 2011）。

建築・土木工学では、それらの4物理要素に人間側の情報（代謝量や着衣量）を加えた指標（例えば、Standard New Effective Temperature (SET\*：標準新有効温度) (Gagge *et al.* 1986)) が使用されることが多い。工学ではさらに、温熱快適性評価のための人体モデルの開発研究も進んでいる（例えば、吉田 (2011) 参照）。

#### 2.4 時間変動と時間平均

気象・気候学と建築・土木工学では空間の捉え方が異なるだけでなく、時間の捉え方も大きく異なる。近藤 (2014) が指摘しているように、特に気象学の場合、防災予報のために時間変化の解析や予報が重要となる。一方、建築・土木工学では空間的な変化は明確でなければならないが、時間変化については一般に変動の幅が分かればよく、平均値として取り扱われることが多い。

### 3. 数値モデル研究における理工学融合の課題

近年、数値モデル研究における理工学融合として、気象・気候学の数値モデルと建築・土木工学の数値モデルを結合したダウンスケーリング/アップスケーリングモデルの開発が大きな注目を集めている。Murakami *et al.* (2003) のモデル開発（モデル名称：Local Area Wind Energy Prediction System; LAWEPS）はその先駆的なものである。しかし、前章で述べたように、気象・気候学と建築・土木工学の間には幾つかの大きな隔りがあり、両者の数値モデルをシームレスに結合するためには様々な課題が依然として残されている。その中でも、①物理過程の整合

性、②乱流の取り扱い、③予報変数の整合性、の3つは大きな課題となっている。

#### 3.1 物理過程の整合性

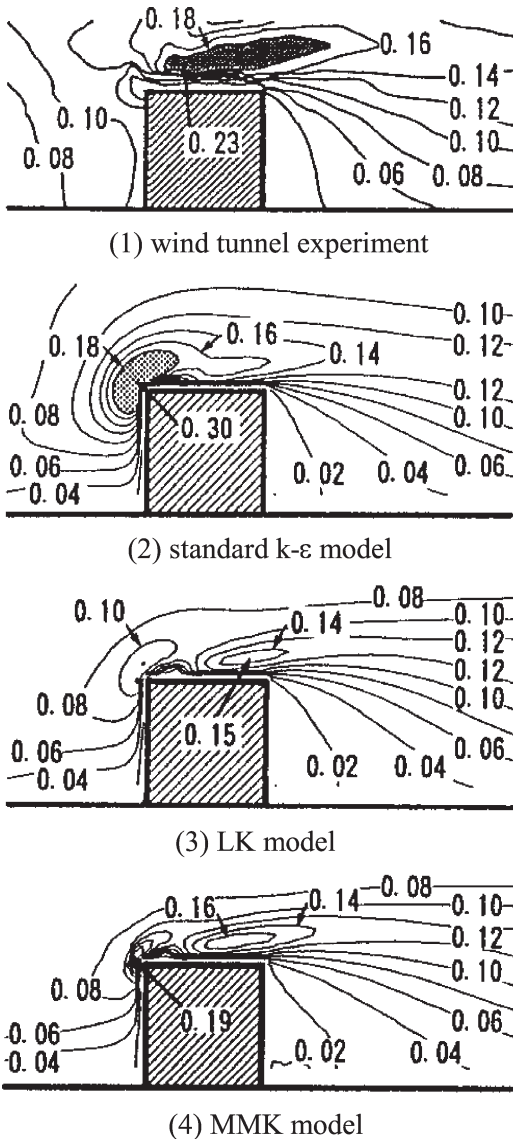
気象・気候学の数値モデルは放射、雲や雨など、様々な物理過程を含むマルチフィジックスモデルとして開発されてきている。一方、建築・土木工学の数値モデルは乱流や対流熱輸送のみに主眼が置かれて開発が進められてきた。したがって、両者のシームレスな結合を考える場合、建築・土木工学のモデルではその時空間分解能に応じた様々な物理過程を新たに導入する必要がある。

その昔、気象・気候学のモデルの予測精度は（誇張した大げさな言い方であるが）倍半分の誤差でも許される、建築・土木工学のモデルの予測精度は数パーセント以内の誤差でなければ許されない、ということを目にしたことがある。しかし、だからといって、気象・気候学のモデルが粗っぽいというのではなく、気象・気候学のモデルではマルチフィジックスを取り扱わなければならないという困難があり、その全てにおいて高い精度を求めることは難しい。その数値モデルとのシームレスな結合を考える場合、建築・土木工学のモデルにおいても同じ困難に直面することになる。

#### 3.2 乱流の取り扱い

気象・気候学と建築・土木工学の両者の数値モデルを結合する場合、建築・土木工学のモデルの境界条件（入力条件）の設定は気象・気候学のモデルの出力結果に基づくことになる。しかし、相対的に格子解像度の粗い気象・気候学のモデルの結果から建築・土木工学のモデルで必要となる微細な変動成分（乱流統計量）を生成することはできない。建築・土木工学のモデルの境界条件（入力条件）として必要となる微細な変動成分をどのように再現して組み込むかについても、気象・気候学のモデルと建築・土木工学のモデルのシームレスな結合の大きな課題の1つとなっている。微細な変動成分の生成に関してはこれまで、風洞実験の再現など、理想的な条件下を対象として、Kondo *et al.* (1997), Lund *et al.* (1998), Maruyama *et al.* (1999), Iizuka *et al.* (1999), 片岡・水野 (1999) など、精力的に研究が進められてきた。しかし、未だ実現に十分適用可能な生成手法はなく、今後の研究の進展が待たれている。

乱流に関しては、Wyngaard (2004) が「スペクトルギャップ」の領域（第1図参照、Wyngaard (2004) はこの領域を「terra incognita（未踏の大



第5図 建物周辺気流解析における乱流パラメタリゼーションの開発・性能検証(乱流エネルギーの鉛直分布の比較)(Mura-kami and Mochida 1999; 村上 2000).

地)」と呼んでいる)における新しいパラメタリゼーション(乱流モデル)の必要性も指摘している。乱流パラメタリゼーションの開発に関しては、Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations (RANS) モデルにしても、Large-Eddy Simulation (LES) にしても、DES (Detached Eddy Simulation) を含む RANS/LES ハイブリッドにしても、建築・土木工学

ではこれまでに数多くの研究蓄積がある。第5図は、建築・土木工学における乱流パラメタリゼーションの開発・性能検証の先駆的な事例の1つである。同図(1)は風洞実験、(2)は $k$ (乱流エネルギー)と $\epsilon$ ( $k$ の散逸率)の2方程式型乱流モデル(標準 $k-\epsilon$ モデル)、(3)はLaunder and Kato (1993)による改良 $k-\epsilon$ モデル、(4)は村上ほか(1995)による改良 $k-\epsilon$ モデルの結果である。同図(2)の標準 $k-\epsilon$ モデルの結果で見られる建物風上コーナー部の乱流エネルギーの過大評価が(3)と(4)の改良 $k-\epsilon$ モデルでは大幅に抑えられ、(1)の風洞実験に近い結果となっている。第5図はほんの一例であるが、建築・土木工学でこれまでに蓄積された知見や技術は「スペクトルギャップ」における新しい乱流パラメタリゼーションの開発においても大変有効に活用できると考えられる。

### 3.3 予報変数の整合性

気象・気候学の数値モデルと建築・土木工学の数値モデルでは、前節で述べた乱流パラメタリゼーション(乱流モデル)の違いなどで予報変数が異なっていることが多い。しかし、両者の数値モデルをシームレスに結合するためには、神田(2014)も指摘しているように、気象・気候学のモデルと建築・土木工学のモデルの垣根を外して共通化を目指す必要がある。

### 4. 最後に

本稿では、数値モデルを用いた都市気象・気候研究を題材として、理学と工学の研究融合に関して筆者なりに考えていることを簡単にまとめた。ただし、筆者のバックグラウンドは建築(工学)であり、内容的に偏りがあることは否めない。また、理工学の研究融合の先にあるものは研究成果の社会普及・社会貢献であるべきだと筆者は考えている。そのために、行政関係者や市民の方々を含めて広く議論していくことも必要である。

### 参考文献

- Ashie, Y., K. Hirano and T. Kono, 2009: Effects of sea breeze on thermal environment as a measure against Tokyo's urban heat island. Proceedings of the 7th International Conference on Urban Climate, Yokohama, 4pp.
- Gagge, A. P., A. P. Fobelets and L. G. Berglund, 1986: A standard predictive index of human response to the thermal environment. ASHRAE Trans., 92, 709-731.

- 平岡久司, 丸山 敬, 中村泰人, 桂 順治, 1989: 植物群落内および都市キャノピー内の乱流モデルに関する研究 (その1) 乱流モデルの作成. 日本建築学会計画系論文報告集, (406), 1-9.
- 一ノ瀬俊明, 2003: 土木環境システムとしてのヒートアイランド研究の来しかた行くすえ. 環境情報科学, 32(3), 8-12.
- 飯塚 悟, 2011: 気候変動適応研究推進プログラム「フィードバックパラメトリゼーションを用いた詳細なダウンスケールモデルの開発と都市暑熱環境・集中豪雨適応策への応用」. [http://www.mext-isacc.jp/staticpages/index.php/report\\_iizuka\\_j](http://www.mext-isacc.jp/staticpages/index.php/report_iizuka_j) (2013.10.8閲覧).
- Iizuka, S., S. Murakami, N. Tsuchiya and A. Mochida, 1999: LES of flow past 2D cylinder with imposed inflow turbulence. Proceedings of 10th International Conference on Wind Engineering, 2, 1291-1298.
- Kanda, M., 2007: Progress in urban meteorology: A review. J. Meteor. Soc. Japan, 85B, 363-383.
- 神田 学, 仲吉信人, Alvin Christopher Galang Varquez 2014: 都市の集中豪雨の数値シミュレーションと対策. 天気, 61, 362-370.
- 片岡浩人, 水野 稔, 1999: 流入変動風を用いた三次元角柱周りの気流解析. 日本建築学会計画系論文集, (523), 71-77.
- 近藤裕昭, 2014: 都市の温熱環境シミュレーションと健康影響の評価. 天気, 61, 349-355.
- Kondo, K., S. Murakami and A. Mochida, 1997: Generation of velocity fluctuations for inflow boundary condition of LES. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 67-68, 51-64.
- 日下博幸, 2008: 都市気候モデリング研究の取り組みと今後の課題. 天気, 55, 227-240.
- Kusaka, H., 2008: Recent progress on urban climate study in Japan. Geogr. Rev. Japan, 81, 361-374.
- 日下博幸, 2009: 領域気象モデル WRF について. ながれ, 28, 3-12.
- Kusaka, H., H. Kondo, Y. Kikegawa and F. Kimura, 2001: A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: Comparison with multi-layer and slab models. Bound.-Layer Meteor., 101, 329-358.
- Lauder, B. E. and M. Kato, 1993: Modelling flow-induced oscillations in turbulent flow around a square cylinder. Proceedings of the Forum on Unsteady Flows, ASME FED, 157, 189-199.
- Lund, T. S., X. Wu and K. D. Squires, 1998: Generation of turbulent inflow data for spatially-developing boundary layer simulations. J. Comput. Phys., 140, 233-258.
- 丸山 敬, 1989: 粗度要素の抵抗および体積変化を考慮した  $k-\epsilon$  モデルによる乱流境界層の数値計算. 日本建築学会構造系論文報告集, (404), 75-81.
- Maruyama, T., W. Rodi, Y. Maruyama and H. Hiraoka, 1999: Large eddy simulation of the turbulent boundary layer behind roughness elements using an artificially generated inflow. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 83, 381-392.
- 持田 灯, 2003: 重要論文のレビューとリスト 都市気候変動. 日本建築学会総合論文誌, (1), 128-133.
- Mochida, A., S. Iizuka, Y. Tominaga and I. Y. F. Lun, 2011: Up-scaling CWE models to include mesoscale meteorological influences. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 99, 187-198.
- 村上周三, 1984: 第3章「風論」. 木村建一, 吉野正敏, 村上周三, 森山正和, 荒谷 登: 新建築学大系8 自然環境, 彰国社, 127-236.
- Murakami, S., A. Mochida and S. Kato, 2003: Development of local area wind prediction system for selecting suitable site for windmill. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 91, 1759-1776.
- Murakami, S. and A. Mochida, 1999: Past, present, and future of CWE: The view from 1999. Proceedings of 10th International Conference on Wind Engineering, 91-104.
- 村上周三, 2000: CFDによる建築・都市の環境設計工学. 東京大学出版会, 443pp.
- 村上周三, 持田 灯, 近藤宏二, 1995: 改良  $k-\epsilon$  モデルによる2次元建物モデル周辺気流の数値計算. 生産研究 (東京大学生産技術研究所所報), 47, 107-111.
- 日本建築学会, 2007: ヒートアイランドと建築・都市対策のビジョンと課題 (日本建築学会叢書5). 220pp.
- 大岡龍三, 2005: ヒートアイランドの研究の状況. 空気調和・衛生工学会誌, 79, 369-376.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X. Y. Huang, W. Wang and J. G. Powers, 2008: A description of the Advanced Research WRF version 3. NCAR/TN-475+STR, NCAR Technical Note.
- 高橋桂子, 2011: マルチスケールは地球世界の明日を見通すか. 日本機械学会誌, 114, 535-540.
- 竹見哲也, 2014: 都市のモデル化と都市大気乱流の数値シミュレーション. 天気, 61, 343-349.
- 竹見哲也, 中山浩成, 2009: 微細規模大気流れの気象モデルとCFDモデルの融合解析. ながれ, 28, 13-20.
- Wyngaard, J. C., 2004: Toward numerical modeling in the "terra incognita". J. Atmos. Sci., 61, 1816-1826.
- 吉田伸治, 2011: 多分割人体体温調節モデルを用いた屋外温熱環境CFD解析. ながれ, 30, 87-96.