

2. 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

竹見 哲也*

1. はじめに：都市大気の流れ

大気の流れは、秒の単位から年の単位まで、身近な1 m未満の単位から地球の大きさ（一周約40000 km）の単位までといったように幅広い時間・空間のレンジで変動している。私たちの日常の生活空間は、地球の大気の中でも最も底の部分にあたる大気境界層と呼ばれる大気の層の内部に存在している。大気境界層の厚さは、地域・季節・時刻によってさまざまに変化するが、日本では1 kmから2 km程度が典型的な値である。したがって、私たちが暮らす生活空間（数mから数十m）は大気境界層の中でもさらに底のほうに位置している。

都市は私たちの生活空間を水平方向のみならず高さ方向にも拡大させている。特に人口や産業が集中する大都市においては、空間を効率的に利用するため、地表面を境に上下に都市空間を拡張しており、地下空間の深層化や広域化とともに、ビルの高層化と高層ビルの密集化がますます進行している。東京に建設されたスカイツリーは、都市空間の高さ方向の拡張の象徴的な建築構造物と言える。

このような大都市空間での大気の流れは、一般的な大気境界層で見られる大気の流れとはかなり異なるものと言えるのではないだろうか。大都市以外の一般的な大気境界層は、家があり、道路があり、農地があり、草地があり、森林があり、また川があったり地面に起伏があったりといったように、大気境界層の厚さと比べるとずっと地物の凹凸が低いもので構成されており、地球をめぐる大気の流れの影響がさまざまな形で生活空間のスケールに現れる。一方で大都市のビル

群の内部での流れは、ビルの高さが境界層の厚さに比べて無視できないくらいの高度に達するため、ビル群内部ではビル群上空の流れが大きく変容を受けた形態をとる。ときにはビル風と呼ばれる街区スケールで局所的に風が強まる現象が発生することもある。このように大都市での大気の流れは、人工的な構造物や日々の産業活動の影響を受けて、通常の大気境界層で見られる大気の流れと比べて特有の性質を持っている（例えば Belcher 2005; Fernando 2010; Fernando *et al.* 2010）。

したがって、都市の大気を考える上で、ビルやその他の人工構造物の存在を無視することは到底できない。一方で、ビルや人工構造物の存在が、気象学において都市大気を取り扱うことを困難な問題にしている。従来は、気象学、特に大気境界層の研究分野においては、一様かつ平坦な地表面上で形成される境界層を相手にしてきた。一様とは似たような形状の地表面が広がっていることであり、平坦とは建物や植生の高さ（粗度）は境界層の厚さに比べると無視できるくらいに低く凹凸が小さいということである。粗度とは、大気にとっては、おおまかには私たちが地面に触れたときの砂粒や小さな石のざらざらとした感触を与える程度の存在としてのみ捉えてきたのである。これが従来の気象学の立場であった。

一方、粗度を無視できない物体として捉える立場からは、気象学とは別に研究が進んできた。土木工学・建築学・機械工学・化学工学・環境工学など工学の分野では、公共構造物や居住空間を造る立場、流体力学を応用する立場、大気汚染の問題に対処する立場などから、都市大気の諸問題に係り合ってきた。地球の大きさの視点から見るか人間の大きさの視点から見るかによって、気象学（理学）の分野と工学の分野はこれまで長い間、それぞれ独自に研究が展開されてきたと

* 京都大学防災研究所。
takemi@storm.dpri.kyoto-u.ac.jp
© 2014 日本気象学会

言えるであろう。もちろん、個別には共同で研究が進化した例も存在する。しかし、大勢としては都市大気の研究において理学と工学の連携や協力はこれまでの積極的であったとは言えない。

しかし、近年の課題対応型のプロジェクトによる研究の活発化によって、都市大気を対象として学際的な取り組みが増加し、理学と工学の連携や協力が拡大しつつある。この傾向は都市大気にのみ限ったものではない。地域規模や地球規模での環境問題に対処するためには、もはや単一の分野のみでは解決できないほどに問題が複雑化し深刻化していることの表れであろう。様々な分野の研究者の共通認識として、それぞれの個別の分野がこれまで培ってきた知識や知恵を多数の分野で共有し、関連する分野が相互に学び合いながら共同で問題の解決にあたる必要がある、というものがあると言える。

ここでは、都市大気の流れをどのように取り扱うのかという点について気象学の立場から考えてみる。さらに、竹見・中山(2009)でレビューした気象モデルと工学モデルの両者を用いた都市大気の流れや乱れの融合解析について、その後の展開について若干触れる。ただし、都市のモデル化や気象モデル・工学モデルの融合解析手法について網羅的に解説するのが趣旨ではなく、ここでは、気象物理学の教育を受けメソスケール気象学を専門とする者からのひとつの視点として都市大気を考えてみたい。したがって、表題について偏った見解となっているかもしれない。都市のモデル化についてはKanda(2007)や日下(2008)に詳細に解説されているので、そちらを参照してほしい。

2. 都市のモデル化

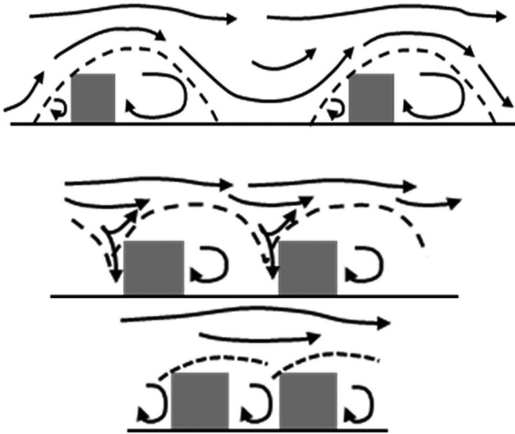
気象学の伝統的な見方から都市大気を考えると、都市は地面の凹凸が大きく粗度長が大きな地表面として捉えられ、大気が郊外から都市域へ流れると都市域では、大気境界層において内部境界層と呼ばれるサブ構造が形成されるものとして特徴づけられる。内部境界層の平均的な流れや乱れの構造は多くの観測研究によって明らかにされており、ヒートアイランドのような都市特有の熱構造の詳細も明らかになってきた。

一般に大気境界層の流れの平均的な鉛直構造は、成層が中立である場合には、地面付近の接地層においては対数分布則が成り立つ。流体力学においては、平板上の流れでは、対数分布則が成立する層よりも下層において、粘性の効く粘性底層の存在があるとされてい

る。しかし、実際の大気は極めて乱れた状態にあるので、粘性底層が観測されることはない。よって、中立成層の実大気の場合では、接地層内において対数分布則がよく成立するのである。都市の大気を考える場合には、都市を大きな粗度を持つ流体力学的に粗な面として捉えると、粗面での境界層の流れに関する知識が都市の流れを考える上で参考になる。Bottema(1997)は、粗面での境界層の平均的な流れの鉛直構造の概念を示している。対数分布則が成立する surface layer (接地層)の下部に地面粗度の影響を強く受けた roughness sublayer (ここでは粘性底層との対応から粗度底層と訳す)が存在する。粗度底層では風速の鉛直勾配が比較的小さくなっているのが特徴である。粗度の影響により、鉛直方向の運動量の交換が活発になり、風速が一様化されているためである。

次に、実際の都市にみられるような複雑な粗度配置による風の水平構造の特徴を見てみる。第1図は粗度の高さとその間隔に応じた流れのパターンを示している(例えば Hussain and Lee 1980; Oke 1988; Shao and Yang 2005)。流れ方向に対して、粗度の高さが粗度の間隔よりも十分小さい場合には、風上側の粗度による流れの影響は風下側の粗度の流れ場に影響を与えない(isolated roughness flow)。粗度の間隔が粗度高さに比べて小さくなると、風上側の粗度による流れが風下側の粗度の流れ場に干渉するようになる(wake interference flow)。粗度がさらに近接して配置するようになると、境界層の流れは粗度の間隔への流入が抑制され、粗度の上部を通過するような形態をとる(skimming flow)。各流れパターンでの平均風速プロファイルについては Wieringa(1993)にも述べられている。

第1図は、流れ方向と鉛直方向の2次元断面で見た粗度と流れパターンの概念を示しているが、さらに流れと直交方向の粗度の長さの次元を加えた3次元的な粗度の配置と流れパターンについても先駆的な研究があり、Oke(1988)や Hunter *et al.*(1990)などにまとめられている。粗度の配置の違いによる流れの形成パターンの違いは、流体力学的にも大変興味深い。第1図で示したような粗度の高さや配置の違いによる流れパターンの構造との関係については、流体力学的な観点から理論や解析モデルによる研究がなされてきた(例えば Raupach 1992; MacDonald *et al.* 1998; Shao and Yang 2008)。これらの理論や解析モデルが、実際の都市でどのように現れるのかについて観測



第1図 粗度の高さや間隔に応じた流れパターン (Oke 1988). (上) isolated roughness flow, (中) wake interference flow, (下) skimming flow.

による研究もなされている。Grimmond and Oke (1999) は、実際の都市建物の粗密度を表現するために粗度の配置の粗密さのパラメータ (粗度密度 λ_p : 単位面積あたりに占める粗度の平面面積の割合¹⁾) を用い、粗度密度に対する粗度長 (z_0) やゼロ面変位²⁾ (z_d) の関係を示した。観測データからも、粗度長は粗度密度が小さい時には粗度密度とともに増加するが、粗度密度があるところまで増加すると粗度長は逆に小さくなっていくことが示されている。粗度の間隔が小さくなり、粗度の上空を通過する流れが卓越することで実質的な粗度の影響が小さくなってしまふのである。MacDonald *et al.* (1998) や Shao and Yang (2008) はこのような性質を解析的にモデル化したのである。

このように観測・理論・解析により示された粗度の配置と流れのパターンとの関係は、粗度の高さを一定と仮定した場合 (または一定とみなしてよい場合) に得られるものである。ヨーロッパの都市では、建物高さは一律に近い分布をしている。Ratti *et al.* (2002) は、ヨーロッパとアメリカ合衆国での都市における建物高さやそのばらつきを調べ、ヨーロッパの都市ではアメリカの都市の場合に比べて建物高さのばらつきが極めて高いことを定量的に示した。建物高さの平均値はロサンゼルスでの場合のほうがロンドンやベルリンでの場合よりも3倍以上も高く、一方で建物高さのばらつき度合いはロサンゼルスでの場合がロンドン・ベルリンでの場合の3倍以上に達する。Naka-

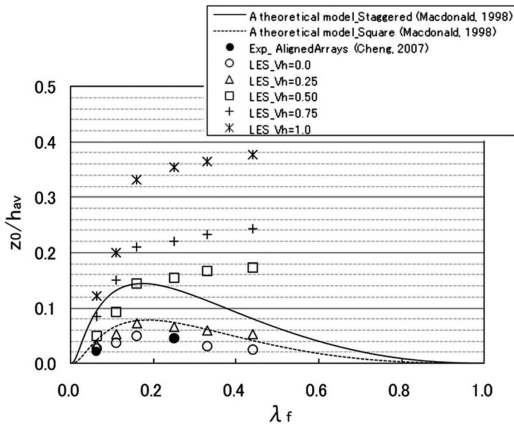
yama *et al.* (2011) は、2 m 分解能の建物高さのデータを用いて東京の都市形態の解析を行い、Ratti *et al.* (2002) で調べられた都市の場合と東京での建物高さ分布の特徴を比較した結果、東京での平均的な建物高さはヨーロッパの都市と同程度で顕著に高くはないものの、建物高さのばらつきの大きさはロサンゼルスの場合と同程度に大きいことを示した。

このように、都市は国や地域が違えば個性も異なる。ヨーロッパの都市での大気の流れの場合には第1図で示した特徴を共有しているものと考えられる。しかし、東京やアメリカの大都市では建物の高さが一律に分布するという仮定は明らかに成り立たない。急速に経済発達を遂げているアジア諸国の大都市もおそらく東京と似たような都市構造を持っているであろう。したがって、建物高さが一律に分布しない都市における風の振舞いは、都市形態を模したモデルによる風洞実験や理論・数値実験、実際の都市での観測や実際の都市の建物を解像した数値シミュレーションにより調べる必要がある。次節では、建物高さにばらつきがある場合を対象とした数値シミュレーションによる研究成果について述べる。

3. 粗度モデルによる都市大気乱流の数値解析

Nakayama *et al.* (2011) は、建物の高さが一律に分布しない東京のような都市を想定し、底面が正方形の直方体ブロックを規則的に並べ、ブロック配置の粗密さ (粗度密度) やブロックの高さのばらつき度合いを系統的に変化させて、合計30通りの数値シミュレーションを行い、粗度密度と粗度高さのばらつきという二つのパラメータで流れの構造がどう変わるのかを数値実験として調べた。数値シミュレーションには、ラージ・エディ・シミュレーション (LES) という乱流の主要な成分を陽に表現する数値解析手法を用いた。LESを用いることで、粗度の存在により生成される渦の生成や剝離といった非定常な乱れが精度よく陽に解像される。このため、粗度が複雑に配置して乱れが活発に生じる場合にはLESが適切な数値解析の手法となる。

様々な粗度密度と粗度高さのばらつきの組み合わせのLESの結果から見積もられた粗度長の分布を第2図に示す。この図には、粗度高さが一定の場合での風洞実験の結果 (Cheng *et al.* 2007) および理論解析による数値 (MacDonald *et al.* 1998) とを比較のために示している。図中の V_h は、粗度高さのばらつきの

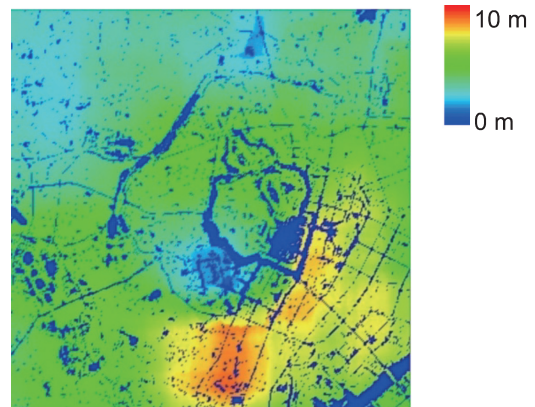
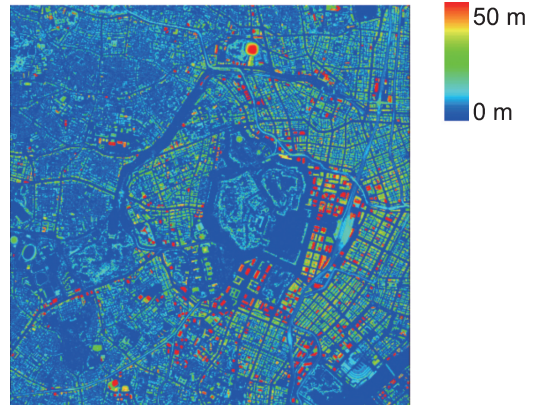


第2図 粗度密度 λ_f ³⁾と粗度長の関係(Nakayama *et al.* 2011). V_h は粗度高さのばらつき度合いを示し、大きいほどばらつきが大きい。黒丸は Cheng *et al.* (2007)による風洞実験結果、曲線(実線および点線)は MacDonalld *et al.* (1998)による理論計算に基づくものを示す。

度合いを示しており、粗度高さの標準偏差を粗度の平均高さで割って規格化した数量として定義している。LESで調べた V_h のレンジは、Ratti *et al.* (2002)や Nakayama *et al.* (2011)が調べたロンドン・ベルリン・ロサンゼルス・東京といった実際の都市の場合の V_h に対応させているため、第2図で示したLESの結果は実際の都市の粗度密度・粗度高さの特徴を反映しているものと想定できる。

$V_h = 0$ の場合は粗度高さが一定の場合に相当し、このLESの結果は粗度高さが一定として理論的に導いた数値や風洞実験の結果と整合的である。 V_h の値が徐々に大きくなって0.5に達すると、LESの結果は MacDonalld *et al.* (1998)の理論や第1図で示される特徴とは異なり、粗度密度が大きくなるにつれて粗度長も大きくなる傾向にあることを示している。この傾向は V_h がさらに大きくなると顕著になる。粗度高さのばらつきが大きい場合でのLESの結果から分かることは、実際の都市において建物の高さのばらつきが大きい場合では、Grimmond and Oke (1999)が求めたような特徴が認められず、したがって粗度高さが一定と仮定している MacDonalld *et al.* (1998)の理論はそのままの形では適用できないということである。

第2図で示された粗度密度や粗度高さのばらつきと粗度長との関係を利用すると(計算結果のない粗度密



第3図 東京都心部における(上)建物高さの分布、(下)推定される粗度長の分布(Nakayama *et al.* 2011)。

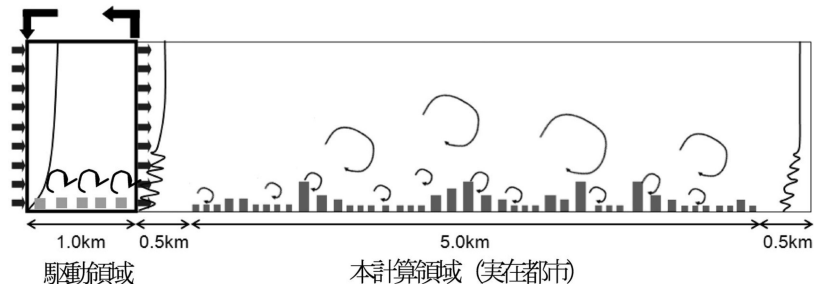
度の場合には線形に補間する)、実際の都市の建物高さデータから粗度密度や粗度高さのばらつきを求めることで、粗度長の水平分布を算出することができる。このようにして、東京都心における建物の高さデータから粗度密度および粗度高さのばらつきをある広がり面積で評価し、第2図で得られた関係を用いて、Nakayama *et al.* (2011)は東京都心部における粗度長の空間分布を求めた(第3図)。この解析から、高層ビルと中低層ビルとが混在する街区では粗度長は大きく算出され、一方、高層ビルまたは中低層ビルがそれぞれ広がる街区では、高層・中低層ビル混在街区に比べて粗度長が小さく見積もられる。このように、第2図でのLESの結果と整合的な分布が得られた。第3図に示すように、東京のように建物高さに大きなばらつきがある都市の場合には、粗度長は空間的に大きく変動することが分かる。

Nakayama *et al.* (2011) は, MacDonald *et al.* (1998) の理論を粗度高さにばらつきがある場合にも適用できるように新しい解析モデル式を提案した。この解析モデルでは, 粗度高さ毎に MacDonald *et al.* (1998) の理論式を用いて粗度長を求め, 粗度高さ毎の粗度長を平均化することで粗度高さにばらつきがある場合に粗度長が計算できるようにしたものである。

様々な建物高度に対応するように多層化することで, MacDonald *et al.* (1998) の理論式を拡張したのである。さらに, Santiago *et al.* (2008) の手法を用いて LES の結果から抗力係数を求め, データのない点での値を補間で求めることにより, 東京都心における抗力係数の分布も推定できた。

このように都市の建物の複雑な分布を粗度長や抗力係数といった物理量として表現することによって, 都市の建物の高さや配置の分布のデータを用いて都市の建物の効果を気象モデルに取り込みやすくなる。複雑な形態をとる実際の都市をどのように単純化してモデル化すべきかについては, 様々な緻密さのレベルがあるであろう。実際の都市での境界層観測を空間3次元的に実施することが容易ではないことを考えると, 数値モデルによるアプローチが有効であろう。数値モデルの中でも LES は, 都市のモデル化と都市における風の数値シミュレーションをする上で必要不可欠な研究ツールであると言える。

Nakayama *et al.* (2011) では都市の建物分布特性を理想化して数値実験を行ったのであるが, 一方で, 実際の気象状況において実際の都市でどのような気流の構造や乱れの構造が出現するかという情報も都市における環境や防災を考える上で必要性が増大している。このためには, 気象状況を把握しつつ都市の建物も陽に表現した数値解析が必要となる。しかしながら, 気象モデルを建物を解像できるほどに高分解能化することは現状では不可能である。そこで建物を解像するためには Nakayama *et al.* (2011) で用いたような数値流体力学 (CFD) モデルを利用するのが現実的な選択肢である。ここで気象モデルと CFD モデ



第4図 気象モデルとLESモデルの結合手法の概念図 (Nakayama *et al.* 2012)。気象モデルの時系列出力を駆動領域の流入境界 (左端) に与え, 駆動領域で生成された乱れ成分を周期的に流入境界に加える。本計算領域の流入境界では気象モデルの出力と駆動領域で生成された乱れ成分とが与えられる。本計算領域には都市の建物形状を陽に与える。

ルの結合化が必要となる。Nakayama *et al.* (2012) は, Lund *et al.* (1998) の準周期境界条件を簡略化した Kataoka and Mizuno (2002) や Mayor *et al.* (2002) の手法を拡張して, 気象モデルで表現される時間変動を保持しつつ粗度により生成される乱流変動も同時に表現できるような新しい手法を考案し (第4図), 気象モデルとLESモデルを結合した。LESモデルでは, 境界埋め込み法を用いて実際の都市の建物を陽に表現した。本手法を用いて, 2009年台風第18号通過に伴い東京で記録された最大瞬間風速 30.2 ms^{-1} を定量的に表現することを試みた結果, ほぼ同程度の瞬間値を再現することに成功し, また突風率も観測に一致するような結果が得られた。気象モデルとLESモデルを結合させることで実際の複雑な都市空間で生じる風速変動が定量的に表現できる可能性を示したという点で, 複雑地形を含めた複雑地表面上での大気乱流の数値解析といった今後の展開が期待される (竹見2012)。

4. おわりに：理工融合研究について

3節で述べた内容は, 気象学と流体工学との理工融合による研究成果の一例である。Nakayama *et al.* (2012) で行ったような気象モデルと数値流体力学 (CFD) モデルの結合による数値解析手法の構築にあたっては, 気象学からの立場では気象モデルから CFD モデルへのダウンスケール, 工学からの立場では CFD モデルから気象モデルへのアップスケールというのがキーワードとなる。Mochida *et al.* (2011) は, 工学の立場から CFD モデルに気象の影響をどのように取り入れるかという点について考察している。

CFDモデルにどのようにして気象の効果を取り入れるかという立場と気象モデルの結果をどのようにしてCFDに入力するかという立場は、視点は異なるものの情報の流れは気象モデルからCFDモデルへというように同じベクトルの向きになっている。このことから、理学と工学の連携の強化が今後ますます期待される。

理工連携、理工融合という理念は、言うのは易しいが、実行するのはなかなか難しい。著者の個人的なことを言えば、学部から大学院学生の頃は理学部・理学研究科の気象学の専攻に所属していたが、その後奉職した大学では、工学系の学部・大学院の中の船舶海洋工学や建築風工学の分野の研究室に所属し、気象学の境界領域を超えていこうと奮闘してきた（例えば、鈴木ほか 2000；Takemi *et al.* 2006）。船舶海洋工学も建築風工学も気象学とは多かれ少なかれ何かしらの関連性を持っている分野である。船舶の実海域での耐用性を長期的に評価する場合には気象の影響を考慮する必要があるし、建築構造物の耐風性能や建物群内部の風環境を評価する場合にも気象の知識が必要となる。工学系の学科に所属してきたことで、気象学分野の中にいるとなんとなくしか分らなかったことも、気象学分野の外へ出ることで気象学の知識の重要性をあらためて認識した。同時に、相互の理解と関心、信頼感の醸成がなければ、理工連携・理工融合は掛け声倒れに終わってしまうと感じている。

今後は、理工融合にとどまらず、文理融合もますます大事になってくるであろう。災害をもたらす極端現象に対する防災の問題、地球温暖化に伴う環境変動に対する適応の問題、大気汚染など地域環境の問題、放射性物質など危険物質の環境拡散に対する緊急対応の問題など、気象学分野だけでは到底対応することのできない問題がたくさん存在している。こういった諸問題を解決するための課題対応型の研究アプローチをとる場合には、必然的に理工融合・文理融合をせざるをえない。このような融合研究による知の形成において気象学も積極的に貢献すべきである。

後 注

- 1) 粗度を建物として考えると、単位面積あたりの建物の屋根面の総面積の割合を意味する。
- 2) 粗度が大きいと高さの基準面を地面よりも高くして風速を評価する必要がある。その基準面のことをいう。
- 3) 単位面積あたりの建物の風上に面した側面の総面積の比。

参 考 文 献

- Belcher, S. E., 2005: Mixing and transport in urban areas. *Phil. Trans. Roy. Soc. A*, **363**, 2947-2968.
- Bottema, M., 1997: Urban roughness modelling in relation to pollutant dispersion. *Atmos. Environ.*, **31**, 3059-3075.
- Cheng, H., P. Hayden, A. G. Robins and I. P. Castro, 2007: Flow over cube arrays of different packing densities. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, **95**, 715-740.
- Fernando, H. J. S., 2010: Fluid dynamics of urban atmospheres in complex terrain. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **42**, 365-389.
- Fernando, H. J. S., D. Zajic, S. di Sabatino, R. Dimitrova, B. Hedquist and A. Dallman, 2010: Flow, turbulence, and pollutant dispersion in urban atmospheres. *Phys. Fluids*, **22**, 051301, doi:10.1063/1.3407662.
- Grimmond, C. S. B. and T. R. Oke, 1999: Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form. *J. Appl. Meteor.*, **38**, 1262-1292.
- Hunter, L. J., I. D. Watson and G. T. Johnson, 1990: Modelling air flow regimes in urban canyons. *Energy Build.*, **15**, 315-324.
- Hussain, M. and B. E. Lee, 1980: A wind tunnel study of the mean pressure forces acting on large groups of low-rise buildings. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, **6**, 207-225.
- Kanda, M., 2007: Progress in urban meteorology: A review. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85B**, 363-383.
- Kataoka, H. and M. Mizuno, 2002: Numerical flow computation around aeroelastic 3D square cylinder using inflow turbulence. *Wind Struct.*, **5**, 379-392.
- 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.
- 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.
- MacDonald, R. W., R. F. Griffiths and D. J. Hall, 1998: An improved method for the estimation of surface roughness of obstacle arrays. *Atmos. Environ.*, **32**, 1857-1864.
- Mayor, S. D., P. R. Spalart and G. J. Tripoli, 2002: Application of a perturbation recycling method in the large-eddy simulation of a mesoscale convective internal boundary layer. *J. Atmos. Sci.*, **59**, 2385-2395.
- 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. Aero-*

- dyn., **99**, 187-198.
- Nakayama, H., T. Takemi and H. Nagai, 2011: LES analysis of the aerodynamic surface properties for turbulent flows over building arrays with various geometries. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **50**, 1692-1712.
- Nakayama, H., T. Takemi and H. Nagai, 2012: Large-eddy simulation of urban boundary-layer flows by generating turbulent inflows from mesoscale meteorological simulations. *Atmos. Sci. Lett.*, **13**, 180-186.
- Oke, T. R., 1988: Street design and urban canopy layer climate. *Energy Build.*, **11**, 103-113.
- Ratti, C., S. di Sabatino, R. Britter, M. Brown, F. Caton and S. Burian, 2002: Analysis of 3-D urban databases with respect to pollution dispersion for a number of European and American cities. *Water Air Soil Pollut.: Focus*, **2**, 459-469.
- Raupach, M. R., 1992: Drag and drag partition on rough surfaces. *Bound.-Layer Meteor.*, **60**, 375-395.
- Santiago, J. L., O. Coceal, A. Martilli and S. E. Belcher, 2008: Variation of the sectional drag coefficient of a group of buildings with packing density. *Bound.-Layer Meteor.*, **128**, 445-457.
- Shao, Y. and Y. Yang, 2005: A scheme for drag partition over rough surfaces. *Atmos. Environ.*, **39**, 7351-7361.
- Shao, Y. and Y. Yang, 2008: A theory for drag partition over rough surfaces. *J. Geophys. Res.*, **113**, F02S05, doi:10.1029/2007JF000791.
- 鈴木敏夫, 竹見哲也, 緒方輝久, 2000: 対流圏下層における水蒸気量分布の移動速度と海上風の相関に関する研究. *関西造船協会誌*, (234), 303-308.
- 竹見哲也, 2012: 気象擾乱に伴う突風災害の数値シミュレーション. *計算工学*, **17**(1), 16-19.
- 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.
- Takemi, T., T. Tamura, Y. Takei and Y. Okuda, 2006: Microscale analysis of severe winds within the urban canopy during a period of explosive cyclogenesis by coupling large-eddy simulation and mesoscale meteorological models. *Wind Eng., JAWE*, (108), 165-168.
- Wieringa, J., 1993: Representative roughness parameters for homogeneous terrain. *Bound.-Layer Meteor.*, **63**, 323-363.