

## 第26回「メソ気象研究会」の報告 —21世紀の境界層研究の役割と課題—

### 1. はじめに

境界層研究の発展の歴史を振り返り、これからの役割と課題を探ることをテーマに、第26回メソ気象研究会が、日本気象学会2006年度春季大会の前日の2006年5月20日(土)に気象庁講堂で開催された。

26回を数えるメソ気象研究会でも、境界層がテーマに挙げられたのはまだ2回目である。また、最近の学会大会で境界層と銘打たれたセッションはわずか1つで、境界層への関心は低いように筆者は感じていた。ところが今回、200名近い参加者があったり、都市境界層の立体観測計画の紹介が飛び入りであったり、学会大会2日目には専門分科会があったりと、境界層への関心と期待は決して低くないことがうかがえた。これは、境界層研究者の責任の重さも表すと言える。

講演はまず、境界層研究に長年携わってこられた近藤純正氏にその変遷をまとめていただいた。続いて、都市境界層の最近の話題を日下氏と山田氏に、雲・降水過程に果たす大気境界層の役割を木村氏に、最後は近藤裕昭氏に今後の境界層研究の展望と課題を述べていただいた。近藤純正氏を除くと講演者は主にモデルに携わる方々であったため、内容はモデル研究に偏ってしまったが、上述の観測計画の紹介や総合討論を通してモデリングと観測との連携の重要性も再認識され、観測研究者にとっても収穫はあったと思っている。以下の報告から会場の雰囲気伝われば幸いである。

中西幹郎 (防衛大学校地球海洋学科)

### 2. これまでの境界層研究—私の研究を中心に— て、そして温暖化問題—

近藤純正 (東北大学名誉教授)

気象学の基礎は100年ほど前にできており、Rayleigh 散乱 (1871年)、Planck の黒体放射 (1900年)、表層海洋内の Ekman スパイラル (1902年)、

Prandtl の境界層理論 (1904年)、Mie 散乱 (1908年) などがある。大気境界層の研究は1915年の G. I. Taylor による大西洋上の高度1000 m までの温度拡散係数の算定がはじまりであろう。

太平洋戦争の戦後復興にともない水資源・電力不足という社会情勢の中で、筆者が始めたのは十和田湖蒸発の研究である。大気安定度の影響を考慮する必要から KEYPS 式が生れ、野外観測によって特に安定なとき KEYPS 式は成り立たないことが分かり、プロファイル関数の実験式を使うことになる。

1959年の伊勢湾台風による高潮災害、1960年代の冬期東シナ海低気圧の発達による首都圏の交通麻痺や海難事件が契機となって、数値天気予報の精度向上という社会的要請から、国際協力研究「気団変質実験研究 AMTEX」が計画される。「バルク法」の精度向上のために、数々の基礎研究を行いバルク法が完成し、東シナ海の日々の広域海面熱収支分布を知ることができた。AMTEX 終了後も、多くの追加研究から、このバルク法は十分な精度をもつことを確認した。

1980年に起きた戦後最大の大冷害と、1983年の東北地方多地点山林火災一斉発生事件により、各種地表面のパラメータ化と、盆地冷却、複雑地形の研究を行なうこととなる。裸地面パラメータ化によれば、乾燥砂漠の蒸発量は風速にほとんど無関係であること、気候学的水収支関係は土壌種類と雨の降り方で決まること、新しいポテンシャル蒸発量の導入によって水収支データがよくまとまることがわかった。

地球温暖化による気温上昇は、これまで言われているほど大きくないことが田舎観測所データからわかってきた。近年、気象観測所の周辺環境は悪化し、都市化や陽だまり効果の影響を受けて、広域における自然状態を知ることが困難になってきている。観測露場の周辺環境の変化によって気温や風速がどのようになるか、今後は数値シミュレーションによっても明らかにする必要がある。

詳細は近藤 (2006) の「研究指針」の「K15. 境界

層研究の変遷と将来」に示してある。

### 3. 都市境界層—都市気候の予測と解析に向けたモデリング—

日下博幸（筑波大学大学院生命環境科学研究科）

1960年代後半にはじまる都市気象モデルのレビューを行った。概要は本報告に載せるには長文であるため、ほかの記事で報告する予定（中西記）。

### 4. 建物周りの境界層—気象モデルと流体力学モデルの結合—

山田哲司（米国 YSA 社）

近年問題になっている都市ヒートアイランド現象、米国9.11テロで見られた都市での煙の拡散現象の理解には、建物周りの気流の解析が可能なCFD（計算流体力学）モデルと局地風のシミュレーションが可能な気象モデルの機能の結合が望まれる。

日変化のある局地風（例えば海風・陸風、山風・谷風）の影響下での建物周りの気流・拡散の予測に、メソ気象モデルの結果を境界条件にして流体力学モデルを走らせる試みもここ数年盛んになってきた。異なるモデルの結合には境界条件、物理方程式の整合性が問題になり、その解決策は見つかっていない。

気象モデルも流体力学モデルもその基本方程式は運動量、質量、乱流エネルギー、内部エネルギー等の保存式である点に注目して、1つの気象モデルあるいは流体力学モデルを使って気象・流体力学の両方の現象をシミュレーションする試みも始まっている。同じモデルを使って建物スケールから地形スケールまでシミュレーションを行うので、異なるモデルを使った場合の整合性の問題は生じない。気象条件は建物周りの気流・拡散に影響するが、逆に建物群の集落である都市が局地気象に与える影響も観測されている。1つのモデルの場合2-way nestingの機能を応用して局地気象と建物による気流・乱流変化の相互作用を再現できるという利点もある。

モデルの機能として水蒸気量、雲量、降水量の予測が望まれる。また、太陽からの短波放射、大気からの長波放射、地面からの長波放射、顕熱、潜熱、地中熱フラックス等の熱収支を考慮して地面の温度の日変化を予測することも重要である。さらに建物周りの気流の剝離、後流の再現機能も望まれる。

ここでは、CFDモデルの手法を用いて剝離・後流に伴う建物回りの圧力と気流の調整を行えるようにメ

ソ気象モデルHOTMACを改良した。また、建物外壁での熱エネルギー収支、室内温度を境界条件として、壁面に直角方向の1次元熱拡散方程式を解いて壁内の温度分布を求めた。

一辺が30mの立方体の建物2個を風向方向に並べた理想的なシミュレーションで、壁・屋上面の気温の日変化が気流・拡散に与える影響を調べた（第1図）。建物周りの気流・拡散は大きく日変化し、風洞実験からよく知られている気流パターンと大きく異なった。

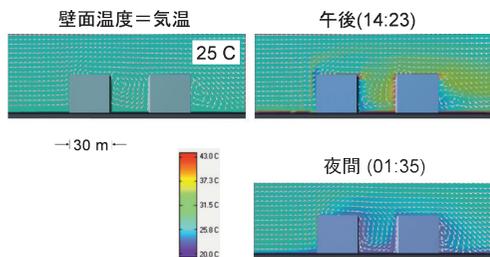
現実の地形を与え、神戸港、六甲山を含む計算領域内の海陸風、山谷風を再現した。ネスティングで一番内部の領域に複数の建物を設置した。局地風の影響を考慮した建物周りの気流・拡散を可視化したアニメーションを作成した（第2図）。

### 5. 大気境界層—雲・降水過程における重要性—

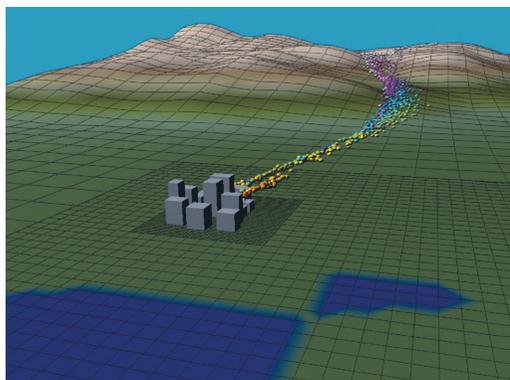
木村富士男（筑波大学大学院生命環境科学研究科）

地表面からの顕熱フラックスにより励起される海陸風循環や山谷風循環はしばしば下層雲を生じ、さらには雷雨などの降水システムを発達させる。これらの雲・降水システムは明確な日変化と極めて顕著な地域性が特徴であり、気候学的には衛星リモートセンシングなどにより容易に把握することができる。最近ではTRMMに搭載されている高空間解像度の雨量レーダーにより、熱帯の海洋大陸などでは、年降水量の大半が日変化を伴う降水である地域が多いことも示されている。局地循環に伴う降水は、水蒸気の水平輸送による可降水量の日変化、いかにすれば対流不安定の日変化が直接的な要因となっていることも明らかになっている（Sato and Kimura, 2005）。一方で、これらの日変化を伴う降水システムの中には、例えばスマトラ島西海岸の西方洋上やカリマンタン島の中央部に見られる深夜から朝にピークとなる降水システムのように、積雲対流のパラメタリゼーションを用いた数値モデルではうまく再現できなかつたり、降水量の地域分布の再現精度にも問題が生じたりするものがある。水資源の変動予測の視点からみると、降水の地域分布の再現やそれを生じさせるメカニズムの解明は極めて重要な課題であり、そのためには境界層における水蒸気の挙動を明らかにする必要がある。

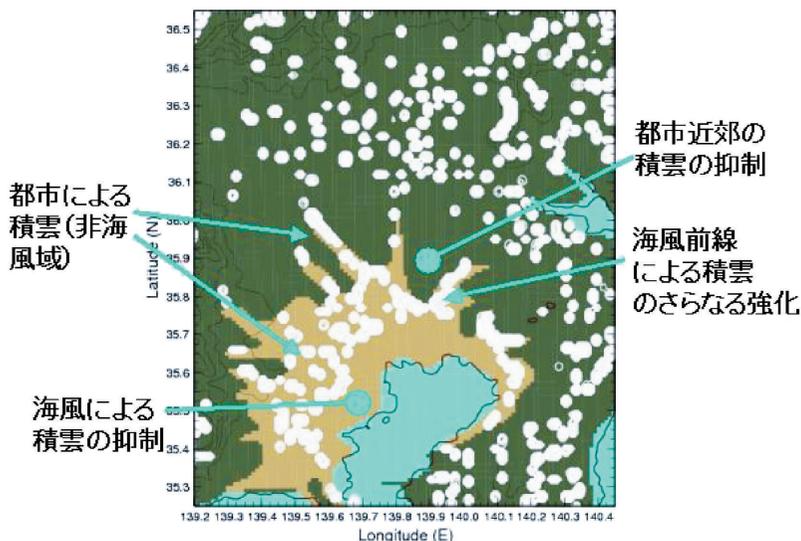
混合層の上端にできる小積雲（晴天積雲）は局地循環がなくても生じる。海陸風などの局地風は小積雲に地域分布を与えていると見ることもできる。第3図は都市気象の数値モデルにより再現された首都圏の下層



第1図 壁面温度の気流分布への影響。



第2図 海風の影響を受けた都市からの拡散。



第3図 都市気象の数値モデルによる首都圏の下層雲 (1000 JST). 簡易都市モデルを導入した領域気候モデル TERC-RAMS (格子間隔 1 km). 白い領域は雲, 黄色は都市, 緑色は植生域。

雲である。主要鉄道に沿って発展した市街地の上空に小積雲が出現しており、海風前線付近の雲も含めて、Inoue and Kimura (2004) で衛星データから解析された雲出現頻度分布とよく一致している。沿線の市街地上空の雲の形成には、ヒートアイランド循環による水蒸気の水平収束効果と都市の上空の混合層が郊外より厚くなり、サーマルがより高高度まで上昇する効果の両方が関係していると考えられる。井上ほか(2004)のMODIS画像と現地の連続写真観測からは、小積雲は寿命が極めて短いなど、サーマルとしての特徴を持っているように見える。ヒートアイランド循環は安定成層でも発達する水平対流であり、サーマルは絶対不安定でのみ発達できる鉛直対流であり、両者は気象学的には異なった概念である。残念ながら、第3図の数値モデルの空間解像度は1 kmと不十分なので両者を区別した再現にはなっていない。水平規模が混合層の厚さと同程度の対流については、サーマルと水平対流、別の見方をすると乱流と局地循環の境界(狭間)の現象とも考えられ、観測的にもモデリング的にも解明が遅れている。ハングライダ―やパラグライダ―などのスカイ・スポーツでは、サーマルのほかアーベント・テルミックといわれるサーマルより弱いがより広い範囲の上昇流が午後の後半を中心に現れることが広く知られており、これも非一様な地表面上に

おける乱流・局地循環の境界領域の現象の可能性がある。これらの境界領域のプロセス解明は、日変化を伴う雲や降水では極めて重要な役割を演じている可能性があり、今後の発展を期待したい。

6. これからの境界層研究—社会的要請に基づく研究の総合化(本格研究)—

近藤裕昭(産業技術総合研究所)

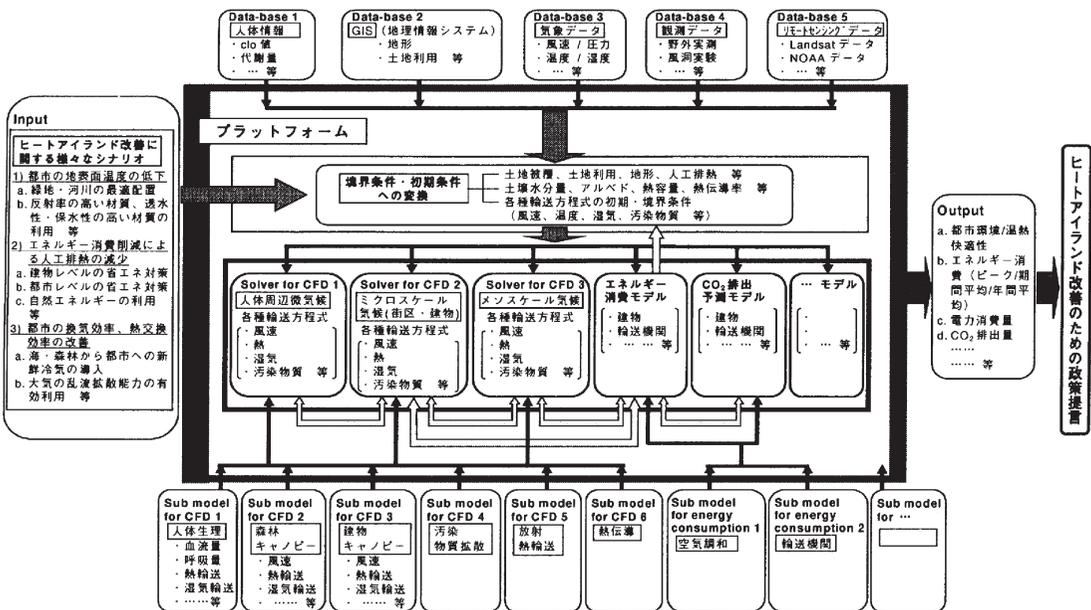
私が都市温暖化関連の研究を本格的に始めた1996年頃、気象の分野では、地表パラメータによって都市を表現するモデルが主流で

あった(例えばKimura and Takahashi, 1991)。一方、建築の分野ではビルまわりの風や温熱環境を詳細に記述できるCFD(計算流体力学)モデルが存在した。しかし気象モデルは都市特有の夜間の高温が表現できず、またCFDモデルでは時間変化を表現することが難しかった。そこで計算負荷が比較的小さく、水平スケール1 km程度の空間平均を考慮する多層の都市キャノピーモデルの開発を始めた。都市の熱環境には、海陸風のようなメソスケールの現象からビルや自動車からの廃熱のような小さいスケールの現象が影響する。また、都市温暖化の原因はOke(1981)の指摘のように多数存在する。このようなマルチスケールで複雑な現象を解析するのに必要なプラットフォームの概念図を、当時東大生産技術研究所の村上周三教授のグループと作成した(第4図、持田ほか, 2000)。複雑な現象を対象とした研究をある程度長い年月をかけて実行していくには、このような到達目標の概念を明確にしておくことが非常に重要である。

さて、多層都市キャノピーモデルをメソスケール気象モデルと結合させて計算し、実測と比較してみると、夜間の気温や風速が都市の中での実測の平均値と合うようになった。しかし、昼間の気温については必ずしも合わなかった。このことをつきつめていくと、日射量計算に使用している気象庁のMSM(メソ

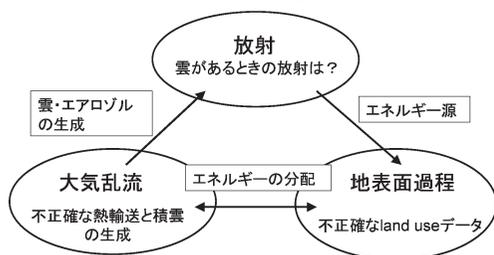
スケールモデル)の予測する雲量が実測と合っていないことが原因であることがわかった(Tokairin *et al.*, 2006)。これは気象庁のMSMだけの問題ではなく、現在のメソスケール気象モデルに共通の問題でもある。日射量は都市熱環境のエネルギー源として最も重要なばかりでなく、光化学大気汚染の反応にも関わる重要な物理量である。そういう意味で言うと私は、メソスケール気象モデルはまだ「実用化」の段階とは言えないような気がしている。

産業技術総合研究所では、実用化研究をターゲットに基礎研究から実用化研究までを一貫して行うことを目標の1つとしており、この流れの全体を「本格研究」と呼んでいる(詳しくは産総研, 2006を参照)。ある有望な基礎研究の成果があってもそれがすぐに実用化につながるわけではなく、実用化までには周辺技術の成熟や他の技術との融合が必要である。そして、この間非常に困難な研究の時期が10~20年も続くことから、この期間のことを「死の谷」などと呼ぶこともある。私はメソスケール気象モデルが現在このような状況下にあるように感じる。大気境界層研究の場合、このような「死の谷」をクリアしていくためには今後どのようにすればよいだろうか。第5図に大気境界層における3つの重要な過程、放射、地表面過程、大気乱流の関係を示す。放射は大気境界層過程のエネル



第4図 ヒートアイランド現象の解析と対策技術評価のための Software Platform の概念図 (持田ほか, 2000)。

### 大気境界層過程を担うもの



3つの過程が密接な関係を持っている。

第5図 大気境界層過程を担う3つの過程。それぞれの過程の誤差がまたその先の過程の誤差の元となる。

ギー源であり、地表面過程はその大気中への分配を支配する。大気中に解放されたエネルギーは大気乱流の元となり、大気乱流は水蒸気等を輸送して雲を作る元となり、雲の存在は地表に到達する放射量を左右する。これらの過程のモデル化では、1つの過程の誤差が次の過程の誤差の元となることは明白であろう。従ってこれらのすべての過程の精度をバランスよく向上させていくことが必要である。そういう意味で、現在は大気境界層過程の総合的研究が必要とされているように感じている。

### 7. 総合討論

メソスケールの大気境界層研究において、いわゆるメソスケールモデルとマイクロモデルが使われている。ここで言うマイクロモデルは(都市、森林)キャノピー内の現象を扱うモデルである。現在、両者を結合する研究が検討されていることから、メソ・マイクロモデル結合の目的と方針を整理する議論が行われた。まず、2つのモデルを結合することの必要性としては、1) 気象モデルがより高解像度化してきたために、より細かい地形影響を考える必要がでてきたこと。2) いわゆるヒートアイランドと都市内の温度分布との関係やそれぞれの違いは、純粋に気象学の視点から見ても興味深い。これを研究するにはメソモデルとマイクロモデルを結合したモデルが必要であることなどが指摘された。また一方で、そもそもメソ・マイクロは人間がつけた区別でありスケールの観点からそれにとらわれることは意味がない、メソ・マイクロの違いは単にスケールの違いではなく、物理モデルの違いも関係する、という意見があった。これに関して乱流過程を表す物理モ

デルとしてはアンサンブル平均モデルとラージエディモデルがあるが、研究対象とする現象ごとに適切なモデルを使うことが必要であろうという議論が行われた。一方で、メソモデルとマイクロモデルの境界領域では現実に使える観測データは限られており、観測による現象把握の一層の努力と、それを踏まえた数値モデルの多様な場における検証の必要性が指摘された。

地球温暖化を正しく見積もるため、気象官署の周辺のローカルな気温上昇を数値モデルで検討することが近藤純正氏から提案された。周辺が都市化したことによる放射や風速の変化については、モデルで評価することが可能であろうとの議論があった。

菅原広史 (防衛大学校地球海洋学科)

### 8. おわりに

僭越ながら今回、コンピーナーを務めさせていただきました。その特権を利用して、おわりに講演を拝聴した感想と私見を述べさせていただきます。

近藤純正氏らの地表面のパラメータ化は多大な成功を取ってきていますが、都市内の温熱環境の再現、ひいてはメソ気象に与える都市効果の表現には不十分と言えます。建物を直接扱う山田氏のような試みも行われるようになりましたが、当面は日下氏や近藤裕昭氏のような都市キャノピーモデルが実用的と考えます。

木村氏からは、成因が鉛直対流(サーマル)なのか水平対流(局地循環)なのか区別が付かないスケールの雲が日変化する降水に影響を与える可能性があるという話があり、近藤裕昭氏からは、そのような雲も昼間の温熱環境を左右するという指摘がありました。

都市キャノピーにしろ、成因未解明の雲にしろ、メソ(局地)スケールとマイクロ(建物)スケールの境界領域に課題が集中していると感じました。その中で、都市キャノピーモデル(地表面過程)が一步進んでいる感がありますので、バランスよい向上のため、改めて私は乱流、放射過程に力を注ごうと思いました。

最後に、気象庁講堂での会場の準備、運営にあたっては、気象研究所の加藤輝之さん(この研究会の世話人の1人)、気象庁の関係各位、菅原広史さんに変なお世話になりました。ここに感謝の意を表します。

中西幹郎 (防衛大学校地球海洋学科)

### 参考文献

Inoue, T. and F. Kimura, 2004: Urban effects on low-level clouds around the Tokyo metropolitan area

- on clear summer days, *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L05103, doi : 10.1029/2003GL018908.
- 井上忠雄, 仲田伸也, 寺島 司, 木村富士男, 2004 : 写真観測と衛星で捉えた都市に出現する対流雲, *天気*, **51**, 653-654.
- Kimura, F. and S. Takahashi, 1991 : The effects of land-use and anthropogenic heating on the surface temperature in the Tokyo metropolitan area : A numerical experiment, *Atmos. Environ.*, **25B**, 155-164.
- 近藤純正, 2006 : 近藤純正ホームページ, (オンライン), 入手先<<http://www.asahi-net.or.jp/~rk7j-kndu/>>, (参照2006-07-05).
- 持田 灯, 村上周三, 金 相進, 近藤裕昭, 島田昭男, 大岡龍三, 2000 : 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 (その1) 概念設計と Prototype System の構成, 日本建築学会2000年度大会学術講演梗概集, D-1, 1099-1100.
- Oke, T. R. (斎藤直輔, 新田 尚訳), 1981 : 境界層の気候, 朝倉書店, 324pp.
- 産業技術総合研究所, 2006 : 本格研究, (オンライン), 入手先<[http://www.aist.go.jp/aist\\_j/research/honkaku/](http://www.aist.go.jp/aist_j/research/honkaku/)>, (参照2006-07-05).
- Sato, T. and F. Kimura, 2005 : Diurnal cycle of convective instability around the central mountains in Japan during the warm season, *J. Atmos. Sci.*, **62**, 1626-1636.
- Tokairin, T., H. Kondo, H. Yoshikado, Y. Genchi, T. Ihara, Y. Kikegawa, Y. Hirano and K. Asahi, 2006 : Numerical study on the effect of buildings on temperature variation in urban and suburban areas in Tokyo, *J. Meteor. Soc. Japan*, (in press).
-