

「日本における気象学研究に関する現状と将来」

第3回研究会報告

標記の研究会が日本学術会議気象学研究連絡委員会主催の下、気象学会秋季大会前日の1997年10月6日午後、北海道大学百年記念会館において85名の参加者をえて開かれた。今回は最終回に当たり、「陸面過程」と「メソスケール気象」がそのテーマであった。以下に研究会の内容を報告する。

1. 「陸面過程」

近藤純正（東北大学名誉教授）

1.1 はじめに

陸面におけるエネルギーと水の交換過程およびそれと大気との相互作用に関する研究、いわゆる「陸面過程」の研究はその範囲が広範であるので、今回は「地表面の熱収支・水収支」「エネルギー・水循環」「大陸スケールの陸面過程と大気・気候変動」に焦点をおくことにした。そうして、① 現在までにわかっていること、② 現在研究しようとしていること、③ 5～10年以内に解明できそうな内容（将来像・夢）について話していただくように計画した。話題提供者 A（10分間講演）、同 B（3分間講演）、討論者として合計17名の多数を予定した。これは本討論会が「将来像」を含むためであり、多数による今後の活躍が、やがて「将来像」となって実現すると考えたからである。今回の話題提供者と討論者については、1年前からのアンケートによる参加希望者から自薦・他薦をしていただき、それに基づいて決められたものである。

最近、地球上のエネルギー・水の循環が局地的にも地球規模的にも気候とその変動に関して大きな役割を果たしていることが認識されるようになり、「陸面過程」の研究が盛んに行われるようになった。エネルギー・水循環の実態把握のために、観測はもとより、降水過程やエネルギー・物質循環について、より精密なモデル化が必要とされている。このモデル化のためには、基本量に関する観測資料が必要とされているが、

わが国の現状では、この認識に立つ質の高い観測を行っている研究者は、決して多くはない。また、気候変動に関わる長期間の熱・水収支量は 10Wm^{-2} ないしそれ以下の大きさであると考えられている。今後は、各種地表面上での数か月以上の長期間の観測が必要であり、観測の新しい方法や、観測とモデル計算を組み合わせた 10Wm^{-2} 以下の熱・水収支量評価方法を見出すことも重要と思われる。

以下では、話題提供者と討論者の発表概要をプログラム順に記していくこととする。

1.2 主として植生に重点をおく問題

馬淵和雄（気象研究所）「気候モデル用陸面植生モデルの開発とそれによる大気-植生相互作用の解明」は、気候モデルに導入することを前提として開発した、陸面植生モデル(BAIM)の概要と、それを組み込んだ気候モデルによる数値実験例を紹介した。陸面に存在する植物等の物理的・生理的特性を、できるだけ現実的に再現した陸面モデルを大気モデルと結合することにより、大気-陸面間の相互作用を、より現実に近い形で再現することができる。

今後のモデルの開発と数値実験に関する目標としては、BAIMを組み込んだ全球気候モデルおよび局地気候モデルの開発と数値実験、およびこれらのモデルをネスティング手法により組み合わせた数値実験による、全球スケールおよび局地スケールでの大気-植生（雪氷・土壌水分も含む）相互作用の解明などが挙げられる。また、植生動態モデルの開発、およびそれと気候モデルを組み合わせた気候-生態系相互作用の解明も今後の重要な研究課題である。

渡辺力（森林総合研究所）「総合的観測に基づくモデルの検証」は、基礎的な観測資料の蓄積の重要性について述べた。すなわち、植生地における熱・水蒸気輸送を表現するための陸域植生モデルは、1960年代から開発が始まり、1980年代半ばにおけるBATSやSiBの提案によって一応の枠組みが完成した。しかし、モデルに対して植物の特性を反映させるパラメータが、

世界中の多様な植生に対してすべて得られているとは言いがたい。また、季節毎あるいは年毎に変化する環境に対し、植生がどのように応答するかについてはほとんど実測データがない。この現状を打破するには、さまざまなタイプの植生地において総合的な観測を継続的に実施し、データを蓄積していく以外に根本的な解決法はない。

広田知良（北海道農業試験場）「札幌市羊ヶ丘でのフィールド環境と研究」は、よい観測フィールドとして、札幌市羊ヶ丘を紹介した。つまり、長期間のフラックス観測やパラメータ化の研究を行う際の適地は、十分に広く一様で、植生条件や気候条件が変化し、必要な観測精度で連続観測資料が得られる場所である。

札幌市内の南東部に位置する羊ヶ丘には北海道農業試験場と森林総合研究所北海道支所がある。ここは1000 haを越える広大なフィールドで自然林の広がる森林、牧草地、畑地等の様々な植生で構成されている。また、季節変化も明瞭で冬季は雪に覆われ、年最低気温は -20°C 近くとなる。逆に夏季は梅雨がなく、最高気温が 30°C を越えることもある。このような環境が職場の中にあるため、陸面過程の研究を行う上で好都合であり、大部分の陸面過程の研究やパラメータ化ができる。過去には、例として、福本・広田（1994）の裸地面熱収支・土壌水分・地温の長期観測とパラメータ化の研究や、広田・粕淵（1996）による森林・草地・麦畑での土壌水分の長期同時観測等がある。今後も、この羊ヶ丘の特徴を生かし、特に植生を対象とした研究を進めていきたい。

松島大（東北大学）の「リモートセンシングを用いる地表面フラックスの推定方法」では、いわゆるリモートセンシング（以下「リモセン」と略記）観測の新しい方向性について述べた。つまり、陸域のあらゆる地域で特別微気象観測を行うことはできない。そのような地域に対しては、リモセンを利用して地表面フラックスの推定を行うことになる。植生地では、熱赤外放射を用いた地表面計測値をそのまま顕熱や蒸発散量を評価するための地表面温度とするのは適切でない。最近では、植被内の鉛直温度分布を考慮してリモセンから適切な地表面温度を推定する方法の研究がある（例えば、Brutsaert and Sugita, 1996；Matsushima and Kondo, 1997）。これらの研究は水平一様な植被面に対するもので、このような植被面で通常行われている渦相関法や傾度法による地表面フラックス観測において代表的な水平スケールは1km程度である。一般に用い

られているリモセンデータの中ではNOAA-AVHRRの水平格子間隔は1.1 kmなので、これらの研究は水平一様性が確保された格子点のデータにはすぐに応用できる。

一方、陸域のフラックスを把握する上で水平スケール10 km程度が適切な場合や、衛星データの格子間隔が5～10 kmに及ぶ場合もある。10 kmスケールでは、特に日本のような地形や土地利用形態では水平一様性が確保されることはまれである。1→10 kmへのスケールアップの際に、次の問題が生じる。(1) 非一様地表面の陸面過程モデルの構築および地表面放射温度の評価、(2) 検証データ (ground truth) の測定方法。(1)については、非一様地表面におけるフラックス推定の試みはあるものの (Kustas and Humes, 1997)、適切な陸面過程モデルの構築まで含めた研究はまだ見当たらず、今後の重要な課題となる。(2)については、例えば、土壌水分量が10kmの格子内で分布をもつ場合、格子内の潜熱フラックス分布には大きな較差が生じうる。このような場合、水平方向に稠密なフラックス観測を行うか、あるいは、係留気球・航空機等で大気側の熱または水蒸気収支を求める、等の方法が考えられる。いずれにせよ、集約的な地上でのフラックス計測とリモセンとの同期観測、場合によっては数値実験も併用して、有効なパラメータ化を得ることが今後の課題である。

討論として、近藤純正が「観測・解析資料集の刊行の奨励」を行った。

1.3 主として雪氷・凍土に重点をおく話題

山崎剛（東北大学）「雪氷の絡む陸面の熱・水収支」は、主に積雪、植生プラス雪氷、凍土の問題に触れた。ただし、氷河、氷床の問題は除いた。現在までに積雪地の熱収支問題（融雪を含む）は熱交換係数、アルベド、流域を対象とする流出モデルを中心に研究が進んでいる。また、植生地での積雪期の熱・水収支についても、無着雪状態はここ5～10年で観測・モデル化とも急速に進んだ。現在の課題は厳寒地向けの積雪モデルの開発、着雪や凍土の熱・水収支への影響の実態把握とモデル化である。これらはGAMEシベリアやチベットと密接に関係している。今後はルーチンデータから凍土地帯での融雪後を含めた土壌水分や、樹木への着雪量を推定する方法を確立し、年間を通した水・熱収支が評価できる方向へと進むであろう。目標とする精度は、現在の放射量の観測精度からして、1時間間隔で 10 Wm^{-2} である。

大畑哲夫（滋賀県立大学）は「寒冷圏の陸域システムの研究」について述べる予定であったが、当日は欠席した。予定の内容は次の通りであった。寒冷圏の陸域過程の特徴は、雪氷の存在のほか、特有の植生、地形や地表面状態および地理的位置から生じている。興味の対象は、気候変動に伴う陸域状態と水・エネルギー循環、言い換えれば陸域システムの応答、特に蒸発、貯留、流出の配分の変化である。また、研究コミュニティにおけるダイナミックな研究の推進が必要であり、(1) 長期間の良質なデータの取得、(2) データセットの共有化、(3) 学際的・組織的研究、に力を入れる必要がある。

討論として、八久保晶弘（北海道大学低温科学研究所）は「積雪層構造を気象データから予測するモデルについての提案」を行った。すなわち、積雪の層構造予測モデルは、積雪地帯の熱収支特性を決める上で重要である。気象要素から積雪内の温度・密度・含水率などの鉛直プロファイルを予測する、という観点から、これまで手薄となっていた素過程のうち、特に液体水の関与する現象（ぬれ雪・みず道・氷板など）について観測・実験とモデル化を今後は重点的にやりたい。

1.4 主として大陸スケールでの大気陸面相互作用

江守正多（国立環境研究所）は「広域土壌水分の時間変化と大気フィードバックの効果」について講演した。GCMによる実験結果をもとに、広域な陸面水文過程を簡単なシステムとして捉えることを試みた。その結果によれば、陸面水文過程は蒸発と流出の特性により変動の基本的な時間スケールが決まるが、降水などを通じた大気のフィードバックがこれに大きく影響する。すなわち、蒸発-降水のフィードバックが強い場合、蒸発過程による土壌水分アノマリの減衰は打ち消され、流出過程がアノマリの減衰に重要な役割を果たす可能性がある。このように、大気陸面相互作用を広域の水収支とフィードバック過程をもとに大掴みに捉えることが今後の重要なアプローチの1つになると考える。

篠田雅人（東京都立大学）は「陸面状態の偏差は季節を越えて持続するか：乾燥地域の気候変動」を発表する予定であったが、不在で中止した。予定内容は次の通りであった。気候変動に対する陸面過程の役割は特に乾燥地域で重要である。乾燥地域では、短期間の雨期に降った水分の多くがその直後の蒸発によって大気へ還されており、モデル研究でも降水・蒸発過程における正のフィードバックが強く働きやすいことが指

摘されている。それでは、土壌水分・植生などの陸面状態の偏差がどのように生成・維持され、それがどのように大気に影響しているのであろうか。雨期の降雨によってもたらされた陸面状態の偏差が、乾期を経過して翌年の雨期へ伝わる現象と、それがさらに気候変動に及ぼす影響について、現場観測・衛星観測・客観解析データをもとに検討した。

沖大幹（東京大学生産研究所）は「大気陸面河川海洋結合モデルへ向けて」と題して講演した。適切な外力（降水量や放射量）と適切なパラメータが与えられれば、最新の陸面過程モデルは、大陸スケールでは観測値をそれなりに再現することができる。モデル化として取り残されているのは河川による水の水平輸送である。大気・陸面相互作用が敏感である半乾燥域において、上流の流出が下流において蒸発する効果は見逃せない。また、高緯度において、海水生成を通じて流出変動が気候変動に及ぼす影響も無視できないだろう。

討論として、高藪出（気象研究所）は「陸面プロセス研究と客観解析データ」について述べた。すなわち、陸面プロセス研究に必要な「大気」客観解析データとは何か？について、日ごろ考えている点をまとめた。

1.5 降水過程、局地境界層と関連する話題

安田延壽（東北大学）は「乾燥域と湿潤域の混在効果」について発表した。植物の葉の気孔は、葉面全体が濡れている場合のほぼ20%に相当する蒸散を起こす。従来、都市域では生態学的観点から「鎮守の森型」森林が評価されてきた。しかし、蒸散量の点からは異なる結果を得た。同じ森林面積率、例えば、1%の場合を想定する。大都市の1か所に森林がかたまっている場合、森林からの蒸散量は、森林面積率があたかも2倍になったごとく増加する。森林が1か所にかたまらず、数～数10 m 毎に散在する場合には蒸散量はさらに多く、5倍になる。この効果はオアシス効果に由来するもので、大気・陸面過程において重要な要素である。大陸上では、数10～100 km 規模の湿潤域と乾燥域が混在している。今後は、このようなスケールではどのような結果になるか、大気境界層上部をも含めて検討したい。

山本晋・近藤裕昭・村山昌平・三枝信子（資源環境研究所）は「都市や植生を含む広域の熱・物質輸送のシミュレーション」について発表した。関東及び中部地方を想定して、大気と陸面間の熱・水蒸気・CO₂の交換・輸送過程をシミュレーションする。現状の資源環

境研究所メソスケールモデルでは植生等地面条件による顕熱と潜熱の分配の違いをボーエン比で与えている。研究のねらいは森林・草地等での観測結果にもとづき植生と大気熱・水蒸気・CO₂交換量の時空間的変動モデル（プリミティブなもの）を構築して、メソスケール数値モデルに組み込み、植生の物質輸送への影響を事例的に見積もることである。

桑形恒男（東北農業試験場）は「熱的局地循環による水蒸気輸送と降水過程」を講演した。従来、海陸風や山谷風循環に代表されるような熱的局地循環は局地気象や大気汚染の予測などの立場で研究されてきたが、最近の研究によってこれら循環が陸面上での熱や水蒸気の輸送にとって重要な役割を果たしていることが明らかになった。起伏地形上における日中の熱的局地循環は水蒸気を山岳域に輸送する働きをもっており、山岳域に輸送された湿潤空気は対流性降雨のトリガーとなる。熱的局地循環による水蒸気輸送は、陸域での降水過程や水循環を考える上で解明しなければならない過程の1つであり、今後、湿潤過程まで考慮した数値実験やデータ解析などによって調べたい。

岩倉晋・三上正男・馬淵和雄（気象研究所）は「陸面植生モデル(BAIM)の検証実験」を述べた。より現実的な地表面条件下（1 km²~100 km²の多様な地表面）での大気・陸面間の水・熱交換過程を理解するためには、広域・多様な地表面上のフラックスの真値を知る必要がある。現地でのフラックス観測値とリモセンや航空機などによる広域の値の間には必ずしも整合性は見られず、陸面過程の実態解明や陸面モデルの検証と改良に問題を残している。この問題解明の研究の第一段階として、気象研究所ではシンチロメータを用いた観測および陸面植生モデル(BAIM)の検証準備を行っている。

討論として、シンチロメータによる観測から不均一な地表面上のフラックスの平均値を推定する際に、モン・オブコフの相似則は利用できないのではないかと、という疑問がでた。これに対し、浅沼順（長岡技術科学大学）は「非一様地面上での大気・陸面過程」の研究から、地表面フラックスに非線形的に依存する乱流統計値が、フラックスの非一様分布の影響を受けるために、相似則は成立しない可能性がある、そして、非一様性の影響として、地表面の非一様性のスケールと程度（振幅）がパラメータとして重要ではないかと、この考えを述べた。

1.6 総合討論

まず最初に、近藤純正は「地表面熱収支・水収支量の長期観測のまとめの研究指針」を説明した。長期間（1か月以上）の蒸発量や蒸発散量 E とポテンシャル蒸発量 E_p （近藤・徐，1997）との比を調べてみると、この比は裸地では0~0.95で降水量や土壌の種類に依存するが、森林では0.6~0.9（降水日数に依存）、水田では0.7~0.9、草地や畑では0.5~0.6、夏のツンドラやオアシスでは0.4~0.5程度（観測誤差もかなり含む）である。この違いを明らかにするのに、今後、 E の観測は10%以内の精度で行い、 E/E_p を明記しよう。そうすれば、熱収支・水収支量の気候条件と植生条件による違いがよく見えてくる。

続いて、徐健青（東北大学）は「土壌水分量と土壌の種類」を説明した。現在、世界の各地で土壌水分量の観測資料が収集されている。例えばGSWPなどがある。Kondo and Xu (1997) の調べによると、土壌水分量はごく局所的な土壌の種類によって大きく変わる。すなわち、年間降水量が同じところでも、砂質土壌の含水率（ただし降雨日を除く通常時の値）はローム質土壌の場合より1桁小さい。また、降水量の多い地域では、深さ0.2~0.6 mの土壌水分量はほぼ圃場容水量に近づくが、降水量の少ない地域では、大気の比湿と平衡する平衡土壌水分量に近づく。したがって、土壌水分量の観測と同時に、その地点における土壌の種類も観測も重要である。ここで、土壌の種類とは、大気大循環の計算用に用いられている、例えば100 km格子内の代表土壌とは異なるものである。

1.7 おわりに

当日は講演発表と質疑討論の時間をほぼ同じに取ってあったため、多くの質疑応答があった。上記の講演概要には質疑・応答の内容の一部も含めてある。

参考文献

- Brutsaert, W. and M. Sugita, 1996: Sensible heat transfer parameterization for surfaces with anisothermal dense vegetation, *J. Atmos. Sci.*, **53**, 209-216.
- Hirota, T. and T. Kasubuchi, 1996: Soil moisture observations under different vegetations in a boreal humid climate, *J. Japan Soc. Hydrol. Water Resour.*, **9** (3), 233-239.
- 福本昌人, 広田知良, 1994: 表層土壌水分が裸地面熱収支に与える影響, *水文・水資源学会誌*, **7** (5), 393-401.
- 近藤純正, 徐 健青, 1997: ポテンシャル蒸発量の定義

と気候湿潤度, 天気, 44, 121-129.

Kondo, J. and J. Xu, 1997: Seasonal variations in heat and water balances for non-vegetated surfaces, *J. Appl. Meteor.*, 36, 1676-1695.

Kustas, W. P. and K. S. Humes, 1997: Spatially distributed sensible heat flux over a semiarid watershed, Part II: Use of a variable resistance approach with radiometric surface temperatures, *J. Appl. Meteor.*, 36, 293-301.

Matsushima, D. and J. Kondo, 1997: A proper method for estimating sensible heat flux above a horizontal-homogeneous vegetation canopy using radiometric surface observations, *J. Appl. Meteor.*, 36, 1696-1711.

2. 「メソスケール気象」

二宮 光三 (東京大学気候システム研究センター)

2.1 はじめに

近年, リモートセンシング観測を中心にした研究観測, 解析, 高分解能モデルによる数値実験などメソスケール気象の分野でも大きな進展が見られている。6名の方にそれぞれの専門分野を中心にメソスケール気象の現状と将来計画を現在進行形でお話し頂いた。また従来, 防災などの観点から severe or rare event が注目されてきたが, 気候システムやエネルギー循環の観点から普通 (not rare) のメソスケール気象の研究も重要であり, これに関した話題提供も含まれる様お願いした。

2.2 降水物理とメソスケール現象

藤吉 康志 (北海道大学低温科学研究所)

本テーマに限定した主な研究課題としては, (1)メソシステム内の降水形成過程, (2)降水過程と或るスケールを持った組織化された鉛直・水平流との相互作用, (3)メソシステムとリージョナル及びグローバルな水・エネルギー循環との関わりがあげられる。

現在, レーダーやレーザー等の観測技術の進展によって, 数10mの水平スケールを持つ雲の降水生成ユニットが見えてきた。雲物理過程をパラメタライズするという立場からは, そのような際限の無い微細構造をどこまで考慮すべきかは疑問になるところであろうが, より定量的な議論を進めるためのステップと考えるべきであろう。また, リトリバル法の出現以来, 観測とモデルとが急速に近づいてきた。強い対流性降水域と同様に弱い層状性降水域がメソシステムを維持する力学に重要な役割を果たしていること, ドップ

ラーレーダーによるメソ対流系の観測データを用いて Q_1 , Q_2 が求められるようになったのもその成果のひとつである。これまでのところリモートセンシングデータとモデルとは, 現象の解釈上つじつまが合うという意味で比較的相性が良い。しかし, 航空機による雲内観測データとの整合性は必ずしも良くない。計算機やリモートセンサーの発展に見合った雲内直接観測技術向上のための物的・人為的投資が必要である。

もともと, メソスケール雲システムは激しい大気現象をもたらすことで興味を持たれているが, その分だけ再現性がないため, これまでの研究はケーススタディの感が強い。我が国の観測の制限上, メソ β スケールのリージョナルな研究としてはそれで良いと考えているが, 見かけ上再現性のある大きなシステム (低気圧や梅雨前線等) の中での位置づけを明確にすることももちろん重要である。その為には, メソ α スケールをカバーする稠密な観測網を我が国周辺で展開するような, インターナショナルな観測計画の立案が望まれる。

2.3 積雲スケールの現象

新野 宏 (東京大学海洋研究所)

竜巻やダウンバーストを生ずる積乱雲を中心に, 積雲スケールの現象について述べる。メソ α -, β -スケールの擾乱や大規模場との相互作用, 雷については他の講演や1996年春季大会シンポジウム (天気43巻, p. 733~) を参照してほしい。

データの不足はメソ気象に共通の問題である。既存するデータは極力集めて解析したい。気象庁等に集まる貴重なデータを誰もが迅速に利用できるシステムを実現する必要がある。リアルタイムのデータは平素から現象を見る目を養うと共に, 研究観測に不可欠である。米国では数値予報の GPV をもとにメソ数値モデルによる予報を行い, 観測実施の判断を行っている。

積雲の発生予測は一般に難しい。しかし, 地表面近くの収束線などが原因の場合は, 時間・空間分解能の良い地上・高層・ドップラーレーダーなどのデータが入手できれば可能性がある。領域モデルで収束場が表現できる場合は, これにネストした非静水圧モデルで降水バンドが再現され始めている。積雲の形態は環境場のバルク変数に依存するが, 物理量の鉛直分布にも依存する例が知られ始めている。我が国における積雲の環境場の研究は意外に少ない。

最近, スーパーセルは多様な形態を持つことがわかってきた。我が国でも, 盆栽スーパーセルの良質な