

「地球変動のメカニズム」

平成10年度採択研究代表者

小池 俊雄

(東京大学大学院工学系研究科 教授)

「大気－陸域相互作用のモデル化と衛星観測手法の開発」

1. 研究実施の概要

本研究は、大気－陸域相互作用における科学的不確実性の部分に焦点を当て、包括的な衛星観測システムを国際的な共同研究体制を基盤に、グローバルな検証実験と比較研究によって、(1)大気－陸面相互作用の中で鍵となるプロセス解明、(2)新しい地球観測衛星を用いたグローバルモニタリングシステムの確立、(3)モデルのグローバルな適用の可能性の検証、を達成しようというものである。

これまでに(1)の目的に対して、地球エネルギー・水循環観測研究アジアモンスーン観測実験(GAME)で取得されたデータおよび本研究でチベット高原とタイに新たに設置した自動観測装置(気象、土壌水分)のデータを用いた解析を行うとともに、チベット高原とタイにウィンドプロファイラ、電波音響サウンディング装置、ライダー、ゾンデ観測装置などを設置して、平成15年度実施予定の集中観測の予備実験を行った。

(2)の目的に対しては、地上マイクロ波放射計による土壌水分観測、積雪観測、降雪観測を、それぞれ米国アイオワ州エイム、米国コロラド州フレージャー、日本福井県で実施して、衛星用アルゴリズムのための放射伝達方程式の確認およびパラメータ設定を行った。さらに、土壌水分、積雪のアルゴリズムを、平成14年5月4日に日米共同で衛星Aquaで打ち上げられたマイクロ波放射計(AMSR-E)データに適用し、チベット高原観測および全地球統合水循環強化観測期間プロジェクト(CEOP)モンゴルおよびシベリアのリファレンスサイトのデータを用いて検証し、良好化結果を得た。

(3)の目的については、前年度までに開発された衛星データと陸面スキームを組み合わせた土壌水分と地温のデータ同化システムを発展させ、米国アイオワ州エイムで得られたデータを用いて植生効果を考慮した陸面データ同化システムを開発し、良好な性能を有することを確認した。また、一次元の陸面スキームに地表水や地中水の水平2次元方向の流動モデルを組み込んだ準3次元陸面スキームを開発した。

本研究で主として利用する予定であった2機の衛星が平成14年度成功裡に打ち上げられ、先に打ち上げられたAMSR-Eを用いた研究に着手し、良好な結果を得ることができ、研究全体を順調に進めることができた。

本研究は、世界気候研究計画(WCRP)におけるCEOPの立案、実施を実質的にリードしてき

た。一方、衛星データのみならず、本研究対象領域のチベット高原、タイを含む世界36箇所のリファレンスサイトのデータ、9つの数値気象予報機関のモデル出力を利用する体制が整ったことは、チベット高原、タイで成し遂げた本研究を地球規模の適用する可能性を得たという意味において本研究にとって大変重要な展開の機会を与えた。また、これらの研究活動が契機となって日本政府と共同で、平成14年年8～9月にヨハネスブルグで開催された首脳級の『持続可能な開発のための世界サミット(WSSD)』にて地球規模の水循環変動の統合的な観測の重要性を指摘して国際世論を形成し、地球水循環の観測、理解、情報共有の推進を実施計画書に盛り込むことに貢献した。さらに平成15年3月の第3回世界フォーラムでは、世界の水管理の多様性、統合的水管理、地球環境変動と水資源などについて議論し、『閣僚宣言』に気候変動の影響を含む地球規模の水循環の予測及び観測に関する科学的研究を推進し、データ共有のための情報システムを発展させることに貢献した。このように本研究は科学的成果に加えて、社会的貢献度も高い。

2. 研究実施内容

GCMグリッドスケールと大陸スケールの陸面での多様性が大気-陸面相互作用に与える影響を定量的に理解し、多様性を考慮した普遍的な鉛直輸送スキームを開発するために、本研究では、多様な大陸上にグリッドスケールの集中観測領域を複数設定し、それぞれの観測領域においてその領域の特徴的な気候条件下で、衛星と地上集中観測により、地表面水文状態、フラックス、大気状態の空間分布を様々な空間スケールで計測して、その実態を把握するとともに衛星観測手法の確立を目指すこととした。次にそれぞれの領域での空間平均化手法を取り込んだ鉛直輸送スキームを開発し、それらを異なる気候条件下で相互に比較することによって、包括的で普遍的なスキームを開発し検証するという手法を採用している。

平成14年度は、(1)フィールド観測によるプロセス研究、(2)衛星による多様な地表面の様々なスケールの情報収集と解析、(3)大気-陸面結合モデルの開発とそのtransferabilityの向上および検証のそれぞれに関して、下記の研究を行った。

(1) フィールド観測によるプロセス研究

① チベット高原で地表面熱・水収支のインバランス

チベット高原での各熱・水フラックス項目を独立して計測した結果、20-30%にもおよぶ収支の不整合が明らかになった。ここでは顕熱フラックス(H)、潜熱フラックス(ℓE)が渦相関法で、また正味放射(R_n)が4要素システムによりそれぞれ観測され、地中熱流量(G_0)が土壌水分と地温プロファイル観測より算定された。チベット高原の地表面は平坦で、背丈の短いまばらな植生に覆われているにもかかわらず、湿潤期の昼間のエネルギー収支収束比 $(H + \ell E)/(R_n - G_0)$ が0.64と極めて小さな値となった。このエネルギー収支不整合問題の原因を明らかにするために、植生の影響を考慮しない土壌面だけの単一要素のエネルギー収支モデルを提案し、地温の観測値と単一要素モデルの計算値の差を最小化するように関連するパラメータである土壌面蒸発抵抗、熱的粗度に対する空気力学的粗

度の比の対数 (KB^{-1}), 地表面放射率をシミュレーティドアニーリング法で最適化した。この最適化されたモデルを用いて算定された正味放射, 地熱フラックス, 顕熱フラックスは観測値とよく一致していたが, 潜熱フラックスのみモデル推定値は観測地に比べて過大評価となった。感度分析の結果, エネルギー収支構成要素の割合は, 最適化期間, 土壌の熱伝導度, 普遍関数の違いには大きな影響を受けないことが示された。そこで, 潜熱フラックスの観測値が過小に計測されているということが判明した。本研究の結果, 赤外線湿度計は特に湿潤期には湿度変動の計測精度が低下し, それが潜熱フラックスの過小計測結果を生む重大な要因の一つであることが示唆された。

② 土壌水分の不均一性が蒸発に及ぼす影響の評価

チベット高原の平坦地で観測された土壌水分の顕著な不均一性は凍土の融解過程と地表面の凹凸の相互作用であることが本研究により明らかにされており, さらに凍土の水・エネルギーフローを表す1次元モデルに地表貯留効果を導入することにより, 不均一性の季節変化を表現できるモデルが開発されている。そこで衛星搭載合成開口レーダを用いた地表面の凹凸分布の算定手法を開発し, その結果を開発したモデルに適用して, チベット高原の4領域で土壌水分の不均一性とその季節変化を計算したところ, 計算値が観測結果を良く再現できることが示された。さらに土壌水分不均一性が領域平均蒸発量算定に及ぼす影響を調べたところ, 土壌水分に対する蒸発効率の非線形性と土壌水分不均一性との相互作用で, 平均土壌水分のみでは領域平均蒸発量の算定に大きな誤差が生じることが示された。これを補正するために, マイクロ波放射計やGCM等で算定される領域平均土壌水分量と地表面凹凸の空間分布特性を用いた領域平均蒸発量の算定の補正手法を開発した。

③ チベット高原での山谷循環, 境界層の発達メカニズムの解明

チベット高原では境界層の発達により風速に顕著な日周変化が見られること, また山谷循環に伴う特徴的な降水系の発達が指摘されている。そこで平成13年度に開発した陸面の影響を考慮した領域モデルをチベット高原を想定した仮想的な鉛直2次元断面に適用して, チベット高原での境界層発達, 山谷循環のメカニズムを調べた。その結果, 一般に言われる日周変化を伴った山谷循環ではなく, 局所的な対流セルが正午から午後にかけて南北の山岳域で発生し, 夕刻になるにしたがってそのセルが南北山岳域から谷部中央に移動し, 中央で合流する現象がみられ, 対流セルの移動に伴って谷部の境界層厚が発達した。これより, 平均的に見ると昼間に山岳域で上昇風, 夜間に谷部で上昇風という山谷循環と傾向は一致するものの, 構造は局所的で背の高い対流セルの移動であることが示され, またこの背の高い対流によって上空の運動量の大きな空気が下層に運ばれるために, 顕著な日周変化が表れることを示す。平成14年8月に試験的に設置されたウィンドプロファイラを用いて1日だけの詳細な風速場の観測データが得られているが, 局所的な対流セルの通過に伴う上昇, 下降風と見られる現象が観測されている。

(2) 衛星による多様な地表面の様々なスケールの情報収集と解析

① 土壌水分算定アルゴリズムの高度化と衛星検証

植生の効果を考慮したマイクロ波放射計による土壌水分算定アルゴリズムの開発には,

放射伝達方程式の構造および各種パラメータの同定が必要である。そこでNASAの衛星Aqua, NASDAの衛星ADEOS-IIで平成14年度に打ち上げられた高性能マイクロ波放射計AMSR-EおよびAMSRと同じ周波数帯を有する地上マイクロ波放射計を用いた現地観測を行った。観測地点は米国アイオワ州エイムの農場で、米国農務省およびNASAが共同で行ったSMEX2002(soil moisture experiments in 2002)の一環として共同で観測を行った。対象地表面であるトウモロコシ畑と大豆畑の境界に地上マイクロ波放射計を設置し、一部植生を取り払って裸地面を作成し、3種類の地表面を6～7月にかけて植生の成長に併せて観測した。用いた放射伝達方程式は、土壌面放射が植生層の影響で消散して放射計に届く成分と植生層からの射出成分からなり、土壌面粗度パラメータに加えて、植生層の光学的厚さと単一散乱アルベドがモデルパラメータとなる。土壌面粗度パラメータは裸地面観測データ同定して、2つの植生パラメータは各周波数に対して水平、垂直偏波の観測輝度温度データから算定し、それぞれと植生の成長とともに計測した植生水分量との関係を明らかにした。したがって、土壌面粗度を仮定すると、植生層を含んだ土壌水分算定には、未知数として土壌水分、植生水分、地表面温度の三つが含まれ、平成12年度に開発された周波数差指標(ISW)と偏波指標(PI)を用いて算定することが可能である。

このようにして決定されたアルゴリズムをAqua搭載のAMSR-Eに適用し、チベット高原、モンゴルにて観測された土壌水分データを用いて検証したところ、高い精度でアルゴリズムの妥当性が示された。

② 積雪量算定アルゴリズムの高度化と衛星検証

本研究によって平成11年度に開発されたマイクロ波放射計による積雪量算定アルゴリズムは、散乱による消散の周波数依存性を用いて、異なる2周波数によって積雪深と雪温を求めることができる。しかし、これは密度、粒径を仮定したものであり、粒径の大小によって推定精度が左右されることが問題とされていた。そこで本研究では、89.0GHz(H)を含め18.7GHz(V/H)、36.5GHz(H)の3周波数と偏波情報を用いて、積雪深、雪温、粒径を輝度温度データより推定する積雪量算定アルゴリズムを新たに開発し、その妥当性を評価するために、米国コロラド州フレーザーにて地上マイクロ波放射計を用いた観測を平成14年1月より平成15年3月の2冬季間実施した。

地上マイクロ波放射計の不具合が生じて得られたデータはごくわずかであったが、新たに開発したアルゴリズムの積雪深、地温、粒径の算定程度は非常に高いことが示された。

③ 降雪量算定アルゴリズム開発のための集中観測実験の実施

降雪は雪崩や交通障害などの災害を引き起こすとともに、春先の雪解け期に貴重な水資源としても利用される。近年では、地球温暖化が降雪に与える影響もの懸念されている。そこで、AMSR、AMSREで得られるデータを用いて、降雪を定量的に計測する手法を開発して、広域の降雪状況を把握し、予報精度を向上させ、災害防止や水資源の安定利用に役立てようという国際共同研究を本研究が中心となって企画した。国内からは、NASDA、気象庁気象研究所、金沢大学、福井大学などの研究機関や民間企業も参加し、福井空港と三国港に地上観測拠点を構築した。これらの地点には、降雪を観測できる特殊なレーダ、大気

の状態を計測するゾンデ、大気水蒸気量を連続的に観測できるGPS、雲底高度を計測するライダー、衛星と同じ周波数観測が可能な地上マイクロ波放射計などに加え、地上で特殊な画像処理技術によって降雪粒子の特性を定量的に計測する観測機器などが設置され、衛星と同期観測を2月中旬まで実施する。また米国NASAからは、多数のリメートセンサーを搭載した科学研究用航空機P-3が日本に飛来し、この集中観測に参加し、地上、航空機、衛星の三位一体観測が行われた。なお、本観測は豪雪のメカニズムの解明と予報精度向上を目指して、気象庁気象研究所、名古屋大学、科学技術振興事業団などが取り組んでいる100-200kmスケールの集中観測（吉崎プロジェクト）と協力して企画・運営されており、降雪に関してかつてない高精度で包括的な観測データが取得された。現在、取得されたデータをもとに、陸面、大気情報を組みこんだマイクロ波放射伝達モデルの作成、検証を進めている。

(3) 大気-陸面結合モデルの開発とそのtransferabilityの向上および検証

① 準3次元陸面スキームの開発

既往の研究により、大気-陸面相互作用の鉛直一次元プロセスを取り扱ったモデルは数多く提案されているものの、地形によってコントロールされる流出過程を記述できるような水平流出成分を考慮したモデルはまだ開発されていない。そこで地形に沿った地表流や中間流出によって定まる土壌水分分布を記述でき、その上で大気モデルや流出モデルと結合可能な水平流出を取り込んだ陸面モデルをチベット高原を対象として開発した。

開発されたモデルは、1)鉛直方向の融解、凍結プロセスを再現するために土壌水分拡散スキーム(SiB2)を改良した修正モデル、2)凍土域へ適用するための2次元飽和流出モデル、3) TS2-IISDHM 内の2次元表面流出と1次元河川流出スキーム、の3つの基本的なサブモデルから構成されている。計算手順は、はじめに1)によって各グリッドセル内の鉛直プロセスを計算し、その結果を踏まえて、飽和層の計算、斜面水平流出、河道流出の順に実行される。

本研究では、1)をチベット高原内の三つの観測地点に適用し、水平流出の影響のない地点において良好な結果を得ることが確認された。次に、2)と3)がそれぞれ代表的斜面と小流域に適用され、その妥当性が示されるとともに、それぞれの領域でシミュレーションを行うことにより、水平流出が土壌水分や鉛直フラックスの空間分布に与える影響を定量的に示すことに成功した。

② 準3次元領域モデルによるチベット高原での大気-陸面相互作用の研究

チベット高原中央部の典型的な地形特徴、すなわち北辺と南辺に東西方向に約6000m級の山岳が連なり、その間に標高4500mの高原が南北300km程度のスケールで広がっているという地形の特徴を踏まえて、簡略化した南北方向の鉛直2次元断面を設定して、本研究で開発した陸面過程を導入した領域モデルを適用した。さらにゾンデ観測から得られた鉛直方向の風速分布を用いて南北方向には一様な風速分布を与えつつける準3次元モデルを用いて、チベット高原での日周変化を伴う大気場を算定したところ、大きな渦度を有する対流セルの発達を再現できた。これは1998年の集中観測時に3次元ドップラーレーダで得ら

れた渦度を有する多数の降水セルの出現と類似の傾向を示しており、チベット高原が大気に与える影響を定量的に把握する上で重要な素過程であると考えられる。

3. 研究実施体制

(1) 陸面スキーム・陸面－大気結合モデル研究グループ

- ① 研究分担グループ長名（所属、役職）
小池俊雄（東京大学大学院工学系研究科，教授）
- ② 研究項目
 - ・陸面スキーム，大気－陸域結合モデルの開発
 - ・陸面水文量の4次元データ同化手法の開発

(2) 衛星観測研究グループ

- ① 研究分担グループ長名（所属、役職）
小池俊雄（東京大学大学院工学系研究科，教授）
- ② 研究項目
 - ・陸面水文量，降水量の衛星アルゴリズムの開発と検証
 - ・陸面水文量，降水量データセット作成

(3) チベット高原観測研究グループ

- ① 研究分担グループ長名（所属、役職）
上野健一（滋賀県立大学環境科学部，助教授）
- ② 研究項目
 - ・チベット高原観測の準備，実施，データセット作成

(4) 熱帯モンスーン地域観測研究グループ

- ① 研究分担グループ長名（所属、役職）
青木正敏（東京農工大学 農学部，教授）
- ② 研究項目
 - ・タイでの観測の準備，実施，データセット作成

4. 主な研究成果の発表（論文発表および特許出願）

(1) 論文（原著論文）発表

- Yang, K., T. Koike, D. Yang, 2003: Surface Flux Parameterization in the Tibetan Plateau, *Boundary-layer Meteorology* 106 (2): 245-262.
- Yang, K. and Koike, T., 2002: Estimating Surface Solar Radiation from Upper-air Humidity, *Solar Energy*, 72(2), 177-186.
- Yang, K., T. Koike, H. Fujii, K. Tamagawa, N. Hirose (2002) Improvement of Surface Flux Parameterizations with a Turbulence-Related Length, *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society* 128, Part B, No.584, 2073-2088.
- N.Hirose, T.Koike, and H. Ishidaira(2002) Study on Spatially Averaged

Evaporation under Soil Moisture Heterogeneity Affected by Permafrost Micro-
topography, Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol.80, No.2,
191-203

(2) 特許出願

なし