

論文の内容の要旨

論文題目 大気 - 陸面結合データ同化システムの開発と適用による豪雨の短期予測の精度向上と降水の季節予測に向けた基礎研究
(Development of a coupled atmosphere and land data assimilation system and its application for basic studies on short-term and seasonal prediction of rainfall)

氏 名 瀬戸 里枝

全球規模の急激な気候変動にさらされている近年、より効果的な治水利水に向けて、正確な気象予測とそれに基づく適切な対応が社会的に求められている。水管理に必要な予測の時空間スケールには、最適な貯水池操作のための、「数時間後にどの河川流域に豪雨が生じるか」といった短期予測のスケールと、また、「今年の夏はどの地域で豪雨が頻発し、どの地域が渇水に見舞われるか」といった季節予測のスケール、そして、何十年後までにどのような気候になりどのようなインフラが必要かという気候変動予測のスケールがあるが、いずれもその精度は実際の水管理に使えるレベルには達していない。

短期予測については、初期値の精度が予測精度に大きく影響し、特に陸地での豪雨の位置を正しく予測するための初期値作成の手法が不足している。一方で、季節予測については、対象地域の気候メカニズムの理解を反映したモデル開発やデータ解釈による予測精度の向上が必要であるが、これまでの季節予測では海洋と大気の相互作用に比較的偏った解釈がなされ、モデルでの陸面の扱いの精度が低いものであり、これらは短期予測と季節予測のそれぞれにおける大きな障害の一つであった。両者の問題解決に共通して重要なのは、大気と陸面とその相互作用を適切に表現できる、大気-陸面結合系のシステム開発と、それに基づく現象理解である。本研究では、短期予測と季節予測に焦点を絞って、大気-陸面の結合系で衛星観測データを同化するシステムという共通のツールの開発・改良を通して、異なる二つのスケールでの予測精度の向上を目指す。

短期予測精度向上に向けては、降水域の位置の予測に焦点を当て、陸上の雲を直接同化するという発想で、陸面と同時に雲を含めた大気要素の同化を行うシステムの開発と評価を行った。雨の量がある程度正確に予測できても、河川流域内に生じるかどうかで水管理は劇的に変わってしまうため、洪水予測・警報システムや貯水池操作の最適化を実現するには、まずは降水がどの河川流域に生じるのかという細かい位置の予測が極めて重要とな

る。

雲はマイクロ波リモートセンシングによって全球で広く観測することが可能であり、水蒸気・風など他の様々な大気場の同化と比較して、雲の同化は対流や降水の生じる位置が精度良く推定できるため、あらゆる地域での洪水予測に有効な降水予測の実現が期待される。しかし、特に社会への影響の大きい陸上の雲については、陸面からの射出が雲に比べて強く、不均一性も高いため、その上の微弱な雲のシグナルを直接精度良く捉えることは容易ではなく、現業モデルにおいても、衛星による雲の観測・同化は海洋上でしか行われていないのが現状である。陸上の雲を衛星で観測し同化するには、陸面状態、特に射出を決定付ける土壌水分の不均一性をまずは適切に表現し、陸面射出を背景情報として取り除くことで、その上の雲の微弱なシグナルを抽出する必要がある。

本研究では、陸面と陸上の雲の同化を同時に行う初のデータ同化システム CALDAS (*Rasmy et al. 2011*) のシステム構成を基に、より汎用性の高い気象モデル WRF を結合し、雲の形成・発達に重要な要素である水蒸気・気温を、雲に加えて同化できるよう改良を加えた CALDAS-WRF を開発した。CALDAS-WRF は陸面データ同化部分の評価のために、まずチベット高原に適用し、陸面状態と大気への下部境界条件としてのエネルギーフラックスや大気プロファイルの改善を確認した。次に行った CALDAS-WRF の関東への適用と評価では、あるべき雲を生成し、余計な雲を除去することに成功し、雲の分布を非常に良く再現することが確認された。また、同化による雲の生成に対応して、局地的に物理的整合性の取れた大気場が生成され、降水の位置も高精度に再現された。更に、降水の時間変化の再現精度も向上した。雲や降水の持続と強度の再現には、水蒸気と気温の同化による環境場の再現が非常に重要な役割を果たした。しかし、降水の継続時間はまだ不十分であり、その原因と考えられる大規模場と雲の鉛直分布の再現性の向上が今後の課題である。

季節予測精度向上に向けては、アジアモンスーンを筆頭に、全球規模の気候と関連が強いとされる春先から夏季にかけてのチベット高原による大気加熱の解析を通して、モデルにおける陸面過程の再現性を向上させることの重要性を示した。大気圏中層に位置するチベット高原の陸面の存在は総観スケールから全球規模の現象に大きな影響を与えるものと指摘されているが、これまで主に使われてきたデータにおける陸面の影響やそれによる大気加熱の扱いの精度は、他と比べてとても低い。本研究では、陸面の再現性が向上した陸面データ同化システムと、貴重な現地観測データを利用して、チベット高原上の大気加熱プロセスの定量的な解析をメソスケールと総観スケールの関連も含めて行った。

ラジオゾンデの観測データからは、チベット上空ではプレモンスーン期の気温は、数日スケールの上昇と下降を繰り返しながら平均的には上昇しているということが明らかになった。その気温の上昇期と下降期に分けた大気加熱の鉛直構造は、両者のそれらを反転したような典型的な構造を示した。上昇期では 200hPa 程の高度までは加熱されているが、その上空は冷却されているという特徴が見られ、下降期にはその反対の構造が見られた。

この大気加熱の鉛直構造とその季節進行のメカニズムを解析するため、陸面データ同化システムの出力を用いた熱収支解析を行い、潜熱加熱、鉛直移流、水平移流、放射による加熱のそれぞれの寄与を細かく明らかにした。その結果、プレモンスーン期には下層の鉛直移流、中層の潜熱輸送、上層の水平移流の三層構造がはっきりと見られ、それぞれは、対流による顕熱輸送、潜熱輸送、総観スケールの循環に伴う暖気の水平移流によるものと示された。上空では雲の蒸発による大気の冷却が生じており、それが卓越することで上層の大気は正味で冷却されていることも示された。更に、気温の下降期の大気加熱の鉛直構造の反転は、偏西風の蛇行に伴う寒気の移動によること、モンスーン期には、総観スケールの大気場が変化し、チベット高原が形成されることに伴って、上層の水平移流が妨げられる一方で、対流活動が上層まで達し、加熱が顕熱と潜熱の二層構造になるということが明らかになった。

以上の解析から、チベット高原上の大気加熱に対する、顕熱・潜熱とチベット高原外からの移流による加熱のそれぞれの寄与が詳細に明らかになり、メソスケール、総観スケールの現象による加熱が共に寄与していることが分かった。それと同時に、チベット高原上の対流による熱の輸送が 200hPa の上空まで広く大気を加熱しており、これを考慮せずにチベット高気圧の強さを精度良く予測することは難しいと考えられ、チベット高原の重要性が間接的に示された。しかし、実際のモンスーンなどの年々変動に陸面状態の年による違いがどの程度影響しているかを示すことによって、陸面の重要性を更に直接的に強調することが今後必要である。

水管理には短期予測と季節予測の精度のどちらかが低くてもそれは大きな障害となり、両者がともに向上することで相乗的な効果を発揮することができる。本研究は、大気-陸面結合データ同化システムという共通のツールを通して、水管理に重要な雲・降水の位置の予測と降水傾向の季節予測の精度向上に取り組んだものであるが、今後、気候メカニズム（における陸面過程の重要性）の理解に基づいたモデル改良とそれによる適切な季節予測、そして短期予測の統合的な利用で水管理に資する予測システムを構築したい。