

## 論文の内容の要旨

論文題目 Development of Land Data Assimilation Scheme by Integrating  
Remote Sensing and Hydrological Modeling  
リモートセンシングと水文モデルの統合化による陸面データ同化スキームの開発

マハデバン パセマセバン  
Mahadevan Pathmathevan

全球気候モデルにおいて地表面物理量，特に影響が長期に渡って持続する土壤水分に関して正確な初期値を与えることは，気候予測および水文過程の予測精度を大いに向上させる可能性を秘めている．長期に持続する記憶効果のため，ある時間における土壤含水量とその空間分布は，その時刻だけでなく，将来の気候状況にも影響を与える．以上のような背景のもと，初期値の改良と，リモートセンシングと現地観測によって得られたデータを用いた土壤水分，土壤温度の鉛直分布，植生変数，フラックス推定のため，1次元変分法を用いた陸面データ同化手法（One-Dimensional Variational Land Data Assimilation Scheme；1DVAR-LDAS）の開発を行った．

本研究では主としてデータ同化手法の作成に取り組んだ．データ同化は，急速な衛星情報の高度化と，衛星情報の継続的な入手が可能であるという運用状況に適した効率的な手法である．現況のデータ同化手法は非常に高速で効率的ではあるが，データ同化の効果は予報時間のうちに失われてしまうために，非常に適しているとは言い難い．本研究では，原理的には現況で運用されている手法より適していると考えられる，変分法を用いたデータ同化手法を採用した．また，費用関数の最小化には従来傾度法が主として用いられてきたが，本研究では新しくデータ同化に焼きなまし法（simulated annealing）を採用した．

土壤からの温度放射は，マイクロ波周波数帯において測定可能な含水量と関連しているため，マイクロ波放射の測定は土壤水分推定に適したリモートセンシングツールとなる．広域に及ぶデータ取得が可能な宇宙からの観測は，空間分布とそのプロセスの時間変化の研究に最適といえる．TRMM/TMIの利用やADEOS-1/AMSRとAQUA/AMSR-Eを組み合わせるの活用は，大気陸面相互作用の日変化の研究において重要な役割を果たすものと考えられる．マイクロ波による土壤水分算定の基礎は，液体である水と乾燥した土壤の誘電特性の差に基づいている．水の大きな誘電率は，電磁場に応じた水分子の電気双極子の配列に起因している．

本研究におけるデータ同化手法では，受動的マイクロ波リモートセンシングによる輝度温度の観測値を陸面モデル(Land Surface Scheme;LSS)である Simple Biosphere Model2 (SiB2)と同化している．陸面モデルをモデルオペレーターとして用い，放射伝達方程式(Radiative Transfer Model;RTM)をオブザベーションオペレーターとして用いた．本

アルゴリズムでは、Very Fast Simulated Annealing (VFSA) という発見的最適化手法を採用し、特別なモデルを用いることなく費用関数の最小化が可能である。VFSA は費用関数全体における最小値やピーク値の発見に際して、非線形性や非連続性に起因する見落としをなくすることができる。

また、陸面予報向上のための 1 次元変分法によるデータ同化手法の利用可能性の検討を行った。第一に、GEWEX Asian Monsoon Experiment (GAME) で行われたチベット高原におけるメソスケールでの現地観測によって得られたデータを用いて、大規模領域への適用を行った。その結果、モデル化の観点から、データ同化手法の実現のために解決すべきいくつかの重要な課題が示唆された；(1)異なる陸面状況下に対する信頼できる RTM の重要性、(2)地表面不均一性と大規模な衛星観測に起因する誤差、(3)地表水の水平 2 次元流動。

上記の結果を受け、放射伝達方程式の改良と、均一な場所での 1DVAR-LDAS の検証を行うために、(a) 東京大学千葉実験場における異なる裸地面、(b) SMEX02 における異なる植生状況という 2 ケースに関して地上設置型マイクロ波放射計による観測を行った。1DVAR-LDAS と放射伝達方程式の適用と検証の結果、改善された結果が得られたとともに、既知のデータのみを用いたシミュレーションからは得られなかった物理学的な知見を得た。

これら二つの観測ののち、比較的粗い解像度の衛星観測データを用いて、高解像度の地表面変数の空間分布および時間変化を推定するためのダウンスケーリング手法（準 4DVAR-LDAS）を採用した。このモデルでは主に、リモートセンシングの観点から、地表面不均一性の影響の表現、すなわちひとつの観測フットプリント内における地表面不均一性の適切なパラメタリゼーションに重点を置いた。これを、地表面変数のパラメタリゼーションと関連したリモートセンシングにおけるパラメタリゼーション手法の表現の出発点とした。モデルの適用によって、特に衛星観測においては、ダウンスケーリングが重要であることが確認された。

準 4DVAR-LDAS の開発に続いて、リモートセンシング、数値地理情報、在来型の現地観測、そして様々な気候モデルの出力等のデータを統合して得られた、改善された初期値を用いた、物理法則に基づいたモデルによる、土壌水分、流出、流量、斜面特性やその他の水文量の空間的かつ時間的な分布の推定を行うために、分布型水文モデル (Distributed Hydrological Model: DHM) の LDAS への導入を行った。土壌水分とその空間分布の算定のためには、水平方向の水文プロセスが影響を与えることが知られている。これは 1 次元 SVAT モデルではモデル化されていない。この影響は、重力によって表流水や地下水の流れの生じる丘陵地では重要である。観測地が周囲より高くなっている場合、地形の変化は大きく、例えばチベット高原のような寒冷な丘陵地帯では、こうした水平方向のカップリングは土壌水分分布の推定に不可欠であるし、地表面モデルに含まれなければならない。この水平方向の流れの影響を考慮するための手法（準 3D-DHM\_1DVAR-LDAS）の開発を行った。なお、1DVAR-LDAS の適用は寄与の同化ウィンドウの初期値の推定に限った。また、

水平方向の流れと本研究のシミュレーションとを組み合わせるために、準 3D-DHM による予測を行った。Mardi 流域への適用はデータ同化アルゴリズムの将来的な運用のデザインと実現に関する重要な結論を示した。