

## 論文の内容の要旨

### 論文題目 INCORPORATING ENERGY AND WATER BUDGETS INTO EVAPOTRANSPIRATION ESTIMATION IN HYDROLOGICAL MODELING

水文モデルの蒸発散評価に対する熱・水収支的視点の導入

氏名 シルバ アミラ  
SILVA, AMILA

この数年、気候モデルのサブモデルである地表面スキーム (LSS) が数多く開発されてきた。LSS は、大気と陸面の間でのエネルギー、水、運動量の交換を、エネルギー交換過程での植生と土壌タイプによる違いを考慮にいれて、算出する。一方、分布型の物理過程に基づく水文モデルでは、流域における水文過程を他のモデルよりも詳細かつ潜在的に正しく記述している。さらに、対象とする流域について利用可能な情報と知識を最大限扱うことができる。このモデリングは、地理情報システム (GIS) とリモートセンシングの2つの大きな技術によってサポートされる。

この10年間、水文モデルの研究には大きな進展があった。水文モデルの開発の過程で、蒸発散の計算には、土壌水分の状態、植物の根の分布と深さに関する情報を取り込むことで部分的に物理過程を考慮した経験的な方法に基づいてモデリングが行われてきた。しかし、土壌からの蒸発と植物から蒸散の配分割合によるキャリブレーションが必要な経験的な定数がある。通常この2つの蒸発についての観測が実際にないため、定数の決定は面倒である。気象予測や気候モデルで使われる現在のLSSにある一つの大きな問題は、大流域の河川流量の再現ができないことである。これは、水の収支と移動を計算する際の上部（浸透）と下部（基底流出）での境界条件の表現が十分でないことに起因する。一方、実用化されている（伝統的な）水文モデルでは、LSSと同じ空間スケールで作動し、河川流量の再現が可能である。

この研究の目的は異なるモデリング手法における蒸発量の推定について分析することであり、以下のステップからなる。1) 気象データを用いた蒸発量の推定 2) 2つの気象観測タワーを用いた蒸発量の流域スケールにおける空間変動の推定 3) 点スケールでの蒸発量の推定とパラメータの感度解析 4) 様々な蒸発量推定手法の検討 5) エネルギーの効果を考慮した水文モデルに向けた蒸発量推定手法の提案

蒸発量の推定には長い歴史があり、現在用いられている方法論は過去の経験から得られた結果である。2種類の標準的な蒸発量、すなわち、可能蒸発量と「代表的な植物被覆からの蒸発量」がある。また、蒸発量の推定法は、水収支に基づくかエネルギー収支に基づくかで、大きく2通りに分けられる。水収支を考慮する場合に用いられるのが、ライシメータやパン蒸発計であり、それぞれに、限界とともに潜在的な利用可能性を持っている。

エネルギー収支に基づくものには何種類かあるが、本研究で用いるのはPenmanによる方法と、Penmanの方法から、Kimberly(アイダホ州)における空気力学的パラメータを元に季節変化を修正した方法である。この方法は、エネルギー利用可能量と蒸発の空気力学的影響を結合していることから、一般に「結合法」と呼ばれる。千葉県海老川流域の前原における気象観測タワーでの観測から求めた気象学的パラメータを使い、結合法により「代表的な植物被覆からの蒸発量」を求めた。気象観測データは、1997年2月、5月、6月、7月におけるものが、10分間隔で利用可能である。同じく結合法を用いて、同一流域にある2つの気象タワーでの観測から「代表的な植物被覆からの蒸発量」の空間分布を調べた。

2つの観測タワーは、わずか3 kmしか離れておらず、前原(1つ目の観測点)は、二和(2つ目の観測点)に比べて、海に近く標高も低い。「代表的な植物被覆からの蒸発量」にもっとも影響するパラメータは、相対湿度であることが分かった。2つの観測点での推定の違い(18%)のほとんどを説明可能である。パラメータの時間方向の感度も、様々な間隔で時間平均したパラメータを用いて2つの点での時間のずれの影響も調べ、もとの結果と合わせて分析した。

NCARが開発した地表面モデル(LSM)と、東京大学生産技術研究所で開発された水文モデルであるIISDHMを比較して、モデリング手法の違いを検討した。水文モデルのモデリング、とくに蒸発散の推定における熱収支を考慮することの影響を評価した。IISDHMは、遮断蒸発量、植物を通じた蒸散量、土壌からの蒸発量、そして可能蒸発量を計算する。可能蒸発量は、土壌水分、葉面積指数(LAI)、植物の根の分布、根の深さなどの土壌と植物の特性を考慮した蒸発量の限界である。一方LSMは、エネルギーの分配と水の利用可能量を考慮している。二和観測点での、点スケール観測(6月1日と9月10日)に、LSMを適用し、その際に、一般的に求められたパラメータと点ごとに求められたパラメータの両方を実行させた。

一般的なパラメータ(とくに土壌の水文的パラメータに基づくテクスチャ)を用いた場合には、期待されたほどの精度が得られなかった。一般的なパラメータを用いた場合には、土壌水分と土壌温度の検証は不可能である。しかし、ローカルなパラメータ(観測点において採取された土壌サンプルから求めた水理特性)を用いた場合には、現実に近い土壌水分と温度の変化を求めることが可能であった。

この2つに加え、地中への熱量の比較から、モデルを用いて水とエネルギーの分配を評価することは可能だと言える。多くのLSMのように、顕熱、潜熱、地中への熱の分配が求まる。

潜熱は、さらに、遮断蒸発、蒸散、地面からの蒸発に分けることができる。これらの要素は、全利用可能なエネルギーの分配であり、利用可能な水の量、すなわち水収支、によって異なる。水収支は、全流入量(降雨)の各部分からなる。

直接利用可能でないパラメータの最適化は、いかなる方法でも必要である。この場合も例外ではない。土壌の水文特性に関するものはすべて利用可能で、未知であるのは、わずかなパラメータ、特に熱伝導度と比熱という土壌の熱特性に関するもの、蒸発量推定にとって重要なパラメータである「最適な含水量」だけである。簡潔な誤差計算と最適化手法を用いて、シミュレーションに最適なパラメータが選択された。土壌水分と土壌温度の誤差に最も感度が高いのは、「最適な含水量」である。飽和土壌水分量は、土壌水分の推定にとくに高い感度を持つ。最適化されたこれらのパラメータの下でLSMが推定した蒸発量の各成分を、水文モデルの結果の参照用に用いた。

地表面モデルと水文モデルによる蒸発量推定の比較は、LSMに合わせてチューニングされたパラメータによって行われた。まず、水文モデルによる全蒸発量は、LSM に比べて小さいことが分かった。水文モデルでは、3つの基本的かつ経験的なパラメータにより、蒸発量の各成分（土壌からの蒸発、蒸散、遮断蒸発）の配分が計算される。パラメータのうち2つは、様々な植物や土壌タイプを対象とした既往の研究により推定されている。代表的な値は文献値である。良くチューニングされたパラメータにより、水文モデルで求めた蒸発量の各成分の配分は、LSM のそれに近づいた。水文モデルのこうした各成分への配分は、LSM をもとにした適切な蒸発量の配分（それは従来の水文モデルでは不可能であった）を得たあとで初めて可能になる。

この研究によって、水文モデルにおける蒸発量の各成分の配分のパラメタリゼーションの方法が提案された。これは、詳細な気象データが利用可能でない、水文モデリングの際に有効である。前述の目的を達成するために、提案された方法を LSM の推定に必要なパラメータがそろった様々な植生タイプに拡張していくことが必要である。様々な土地被覆での研究を行うことで、水文モデルでの蒸発量推定に必要なパラメータセットの作成が可能になり、より適切な蒸発量の推定が行える強固な分布型水文モデルが利用可能となる。