

29. リモートセンシングを利用した広域水資源解析

WATER RESOURCE ANALYSIS THROUGH REMOTE SENSING

多田 毅* ・ 沢本正樹*

Tsuyoshi TADA, Masaki SAWAMOTO

ABSTRACT; Modern hydrology is composed of physically detailed and spatially distributed models. Since these models require quantitative, distributed and multitemporal observation data set, remote sensing has become indispensable for hydrology. Many remote sensing techniques have been developed for measurements and estimating of various ground surface characteristics and fluxes. In this paper, these techniques are reviewed from hydrological view point, and an example of water resource analysis is introduced.

KEYWORD; water resource analysis, global hydrology, remote sensing

1 はじめに

治水・利水を目的とした従来の水文学においては、一般に流域単位で観測データの解析が行われてきた。技術者の興味は主として、流域に降った水が、いつ、どの程度、河川に流出してくるかに注がれる。流域は一つのブラックボックスとみなされ、その機構と空間的な広がりとは現実的・物理的な意味を持つ必要がなかった。そこから、学問および計算機の進歩とともに、物理過程を忠実に考慮し、流域内での水の空間的な移動も考慮された精緻な流出モデルに至った。さらに現在は、流域を越えた水循環過程、大気をも含めた水収支が議論され、そしてその成果が流域水収支解析に還元されつつある。本論文では、リモートセンシング技術が水文学でどのように活用されているかを示し、水資源解析への応用例を紹介する。

2 広域水資源解析の現状

近年、地球規模での水・エネルギー循環が地球環境を支配する要因として、極めて重要視されている。その定量的な解析のために気象学・気候学・農学・地理学など様々な分野で精力的に研究が行われており、GEWEX(Global Energy and Water Cycle Experiment), GAME(Global Asian Monsoon Experiment)といった広域の観測実験プロジェクトが進行中である。沖ら[1995a]は、大気の水収支と従来の流域水収支とを組み合わせることで、地球規模の水収支と水循環を明らかにした。また、気象・気候学の分野ではGCM (General Circulation Model, 大循環モデル) が不可欠な道具として利用されており、その水文現象に対する再現性も検討されている[沖ほか, 1995b]。GCMにはすでに陸上生態系モデルを含む地表面水文モデルが組み込まれているが、その精度の向上が、GCM全体の再現性に大きく寄与することが期待されている。例えば、植物の生理的機構

*東北大学大学院工学研究科 Division of Engineering, Graduate Schools, Tohoku University

を考慮したSiB(Simple Biosphere Model)モデル[Sellers *et al.*, 1986]が地表面からのフラックスの算定のためにGCMに組み込まれている。さらに田中ら[1994]は、より詳細に地表面過程を取り扱うためにSiBモデルに改良を加え、都市域や水体を含む複雑な地表面の影響を取り込んだSiBUC(Simple Biosphere including Urban Canopy)モデルを開発した。しかし、これらのモデルに必要な地表面の諸量、大気地表面間の各種フラックス等を全球的に与えることは容易ではない。そのため、地上観測とリモートセンシングとを相補的に利用し、時間的、空間的に連続な観測値を得る努力がなされている。

観測で得られる水文量は、時・空間的に連続して得られないことが多い。一般に、地上観測で得られる情報は空間的に間欠的に、リモートセンシングで得られる情報は時間的に間欠的となる傾向がある。しかし、地上観測データを用いる解析においても、いくつかの瞬間値から、一定期間の連続的データないし平均値を推定する必要がしばしば生じる。逆に、リモートセンシングデータを用いた解析においても、ランドトランスによる検証が不可欠であり、その際従来の手法に対する空間的な拡張が必要となる。これまでは、理論的根拠が希薄なまま様々な手法が用いられてきたが、近年、このような問題に対し系統的な研究が行われるようになってきている[葛葉ほか, 1994]。

さらに、このような時・空間的な拡張に関わる問題は、観測値だけでなく、モデルを構築する際にも避けて通ることはできない。多くのパラメータと微気象観測データを必要とする精密なモデルを、そのまま全球にわたり適用することは不可能であるし、逆に、全球を対象とした荒いモデルを用いて、流域規模の実用的な流出解析を行うこともまた、非現実的である。したがって、対象とする水文現象のスケールを整理し、それに合わせてモデルおよびデータのスケールアップ・ダウンを慎重に行う必要がある。また、大気大循環モデルと、より詳細な陸面水文モデルとを結合するというような、異なるスケールを持つモデル同士を接続する際の整合性にも同様な配慮が求められる。仲江川ら[1994]は、マクログリッドスケールの物理量を算定する際にサブグリッドスケールの不様性を考慮する必要があることを示し、さらにサブグリッドの各種物理量の分布を考慮することができるモデルを提案しており[仲江川ほか, 1995]、今後スケール問題を扱う際の有効な指針となることが期待される。

3 リモートセンシングデータの水文学への応用

3.1 地表面温度・気温

衛星から観測される熱赤外の波長帯の放射は、その大部分が地表面からの放射成分によって占められる。すなわち、熱赤外域の光学センサは地表面の熱放射を測定していることになるため、放射輝度から輝度温度、地表面温度へと換算することが可能である。可視・反射赤外の波長帯の放射は、その大部分が太陽光の地表面での反射成分で占められている。すなわち、可視・反射赤外域の光学センサで測定された放射輝度は、地表面の反射率へと換算することが可能である。

これらのデータを水収支解析で利用するために、さらに、限られた時刻での観測値からの日変化・季節変化の推定、地表面温度と気温の関係[たとえば Vidal, 1991 など]、放射温度とアルベドの相互関係の検討[たとえば Vukovich, 1987 など]、などに関する研究が行われている。

3.2 土壌水分

近年のリモートセンシング技術において、様々な手法で土壌水分を観測し得ることが示されているが、現時点で様々な条件下においても定量的な測定が可能なのは、マイクロ波を用いるもの

だけである [Hall *et al.*, 1995]. しかし能動型センサの場合、土壌水分以外にも地表面粗度の影響が極めて大きいため、土壌水分だけでなく、粗度・植生といった地表面の状態の情報も同時に解析する必要がある。マイクロ波を用いた土壌水分の測定については [Engman *et al.*, 1995] に詳しい。

3.3 植生

植物の葉は、葉内のクロロフィルによって赤色域の光を多く吸収し、逆に細胞の構造などによって近赤外域の光を多く透過・散乱させる。したがって、衛星から観測される両波長帯の輝度差が大きいほど、対象領域に含まれる緑の葉が多いと考えられる。この性質を利用して、正規化植生指標 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) が定義された。 $NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$ ここで、*NIR* は近赤外域の反射率、*RED* は赤色域の反射率である。NDVI と植物の葉面積指数、光合成有効放射量などとの関係が確認されており [Sellers, 1985, 1987], 植生による地覆分類 [たとえば Tucker *et al.*, 1985 など], 植物生産力のモニタリング等 [たとえば Goward, 1989 など] に広く利用されている。

3.4 蒸発散量

リモートセンシングを利用した蒸発散量推定手法を大きく分けると、熱収支モデルに対し境界条件として熱赤外面像から得た地表面温度を与えるもの、地表面温度と気温との差を蒸発散量に関連づけるもの [たとえば Taconet *et al.*, 1986 など], 地表面温度と植生指標との関係を蒸発散による表面温度低下と関連づけるもの [たとえば Nemani *et al.*, 1989 など], 植生指標と蒸発散量との間接的な関係を統計的に議論するもの [たとえば Running, 1988 など] などが挙げられる。リモートセンシングを利用した蒸発散量の推定法に関しては、[川島, 1991][佐渡, 1994] に詳しい。

3.5 積雪量

雪は広い波長帯にわたり極めて高い反射率を持ち、またその表面形状、性状などが非積雪域とは著しく異なる。そのため、リモートセンシングによって積雪の有無を判別することは比較的容易であり、光学センサ、能動・受動型マイクロ波センサなど、様々な手法で積雪域を抽出することが可能である。

ところで、水資源解析のためには、積雪によって貯留されている水量を知ることが重要である。ところが現在のところ、積雪深・雪密度の鉛直分布といった深さ方向の情報を光学センサ・能動型マイクロ波センサによって観測することは困難であることから、リモートセンシングによって積雪域・積雪面積を把握し、地上での観測データと標高データなどから積雪深分布・積雪水量などを推定することが多い [たとえば 風間ほか, 1995]。しかし小池ら [1996] によって、マイクロ波放射計を用いて広域の積雪深分布を算定し得ることも示されている。

3.6 その他

地表面のあらゆる属性について、リモートセンシングによるモニタリングが試みられている [Hall *et al.*, 1995]。例えば近年、マイクロ波能動センサによる地表面の特性のモニタリングが試みられている [高棹ほか, 1994][立川ほか, 1997]。直接水文学者が利用する機会は少ないと思われるが、大気中の水蒸気量についても様々な測定手法が存在する (たとえば [早坂, 1996][Bevis, 1992] [西上ほか, 1997] など)。

4 広域水資源解析の例

4.1 概要

筆者らは、東北地方全域の水収支を把握することを目的とし、様々な水文要素の面的分布の推定を行ってきた。日本の場合、気象台およびAMeDAS観測網によって、地上の気象要素について詳細かつ信頼性の高いデータが高い時空間密度で入手可能である。そこで、気象資料を用いて補間、推定可能なものについては可能な限りそれらを用いた。しかし、気象観測網は一般に人家のある地域に多く、高標高の山岳地帯には少なく配置されている。そこで、地上の観測網では観測密度が不足するもの、入手可能な気象資料からでは推定が困難なものなどについて、衛星データを用いて補間、推定を行った。

通常、流出解析を行う場合、流量観測のデータから流域からの流出量を算定し、降水量との比率から流出率を、降水量との差から蒸発散量を算定する。しかし、東北地方の流域に適用すると非現実的な流出率が得られる場合が少なくない。その原因として、積雪域での降雪量の過小評価、火山性地形での地下水移動、流量観測精度の問題などが指摘されているが、いずれにしても、両者の差から算出される蒸発散量の精度を高めることは困難である。また、流出率、蒸発散量などの流域内での分布を求めることは、流域出口での流量観測値だけでは不可能である。そこで本研究では、蒸発散量の分布を流出量とは独立に推定し、降水量と推定蒸発散量の差を流出量として、流出率の分布を算定した。

4.2 降水量分布

降水量は、約200点近いAMeDAS観測網のデータを距離重み付き平均法により空間補間し、面的情報へと変換した。しかし、降雪の局地性を考慮するためには、AMeDAS観測網のみでは不十分である。そこで、積雪量の標高依存性に着目し、地上での積雪深調査データとNOAA-AVHRRデータによって観測された積雪域分布データとを組み合わせ、積雪深の分布および積雪水量の分布を推定した[風間ほか, 1995a]。

4.3 蒸発散量分布

蒸発散量の推定は、まず気候学的手法で流域平均蒸発散量を推定し、NOAA-AVHRRデータから算定されたNDVIの時空間分布との関係を統計的に解析することにより、年間を通じてのNDVIと蒸発散量との関係を決定した。次に、この流域単位の解析を複数の流域に対し行い、得られた関係を東北全域に拡張した。そして、月単位NDVI画像データに対し、NDVIと蒸発散との関係式を適用することで、月単位の蒸発散量分布を推定した[Tada *et al.*, 1996]。

4.4 水資源評価

降水分布と蒸発散分布の差から、通常は流域単位で定義される流出率が分布型データとして得ることができる。これらの結果から、緯度・経度、標高、土地利用などと各種水文情報との関係の定量的な評価が可能となった。さらに、同様の手法を朝鮮半島全域に適用することにより、気象資料を入手することが極めて困難な北朝鮮も含めた総合的な水収支解析が可能となった[申ほか, 1995][Shin *et al.*, 1996]。

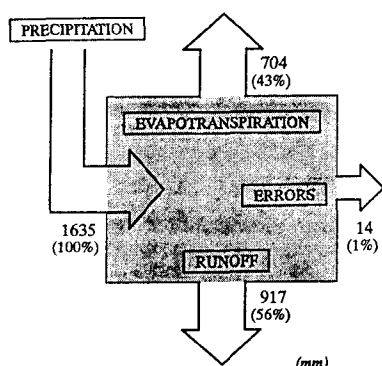


図 4-1 東北地方の水収支

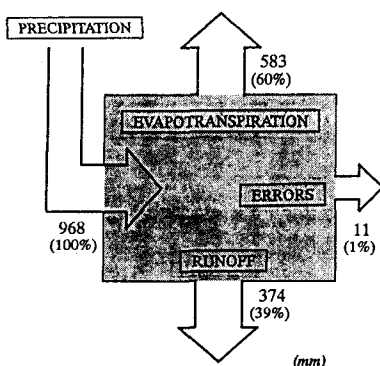


図 4-2 北朝鮮の水収支

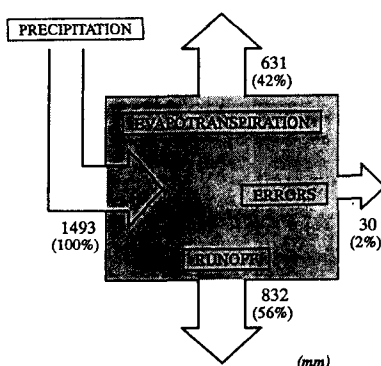


図 4-3 韓国の水収支

5 おわりに

近代水文学は、気象・気候、農林、地理、土木、そしてリモートセンシング技術など、多岐にわたる分野間の垣根を越えた研究体制により、多大な進歩を遂げてきた。日本においても、「これらの研究の効率的な推進を図るためには、各分野の成果を糾合して水文・水資源研究を取り扱う共通の場の設定が必要である。これにより、極めて多様な要素が関与する現象を構造的に把握する新しい学問体系をより一層発展・充実させなければならない」(水文・水資源学会, 1988)として水文・水資源学会が設立され、早くも10年が経過する。そしてこれからは、環境問題という視点から、水文学をも含む、より広範囲にわたる研究協力体制が要請されるであろう。

しかし同時に、各分野における従来の手法への還元も忘れてはならない。現代の天気予報においてもGCMによる数値予報結果を人手によって天氣に翻訳する必要があるのと同様、グローバル・ハイドロロジーの成果を有効に活用するためには、洪水予報、水資源管理などに翻訳する必要がある。さらに、新たな水資源管理技術、環境評価手法の開発などにも精力的に取り組む必要があるだろう。

参考文献

- Bevis, M., S. Businger, T. A. Herring, C. Rocken, R. A. Anthes, and R. H. Ware (1992): GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System, *J. Geophys. Res.*, **97**(D14), 15787-15801.
- Engman, E. T., and N. Chauhan (1995): Status of Microwave Soil Moisture Measurements with Remote Sensing, *Remote Sens. Environ.*, **51**(1), 189-198.
- Goward, S. N. (1989): Satellite bioclimatology, *J. Clim.*, **2**, 710-720.
- Hall, F. G., J. R. Townshend, and E. T. Engman (1995): Status of Remote Sensing Algorithms for Estimation of Land surface State Parameters, *Remote Sens. Environ.*, **51**(1), 138-156.
- 早坂忠裕 (1996): 水蒸気および雲のマイクロ波放射計リモートセンシング, 気象研究ノート, 187, 9-21.
- 風間聡・沢本正樹 (1995): NOAA/AVHRRを用いた積雪深分布および水資源量推定, 水文・水資源学会誌, **8**(5), 477-483.
- 風間聡・多田毅・沢本正樹 (1996a): 衛星データを用いた東北地方の年水収支解析, 水工学論文集, **40**, 81-86.
- 風間聡・沢本正樹 (1996b): 人間活動による損失植生の定量化, 水工学論文集, **40**, 1109-1112.
- 川島茂人 (1991): リモートセンシングによる熱環境, 熱収支, 蒸発散の評価, 天気, **38**(6), 351-362.
- 小池俊雄・塚本賢明・吉本淳一・伊賀崎圭・飯島義之・柴田彰 (1996): 宇宙からの地球環境モニタリングフォーラム論文集, **7**, 26-29.

- 葛葉泰久・池淵周一 (1994): 蒸発散の時・空間平均化手法開発に関する検討, 京都大学防災研究所年報, **37**(B-2), 253-266.
- 仲江川敏之・沖大幹・虫明功臣 (1994): サブグリッドスケールの物理量分布を考慮したマクログリッド蒸発量の算定, 水工学論文集, **38**, 167-172.
- 仲江川敏之・沖大幹・虫明功臣 (1995): サブグリッドスケールの物理量分布が土壌の水-熱移動に与える影響, 水工学論文集, **39**, 109-114.
- Nemani, R. R., and S. W. Running (1989): Estimation of Regional Surface Resistance to Evapotranspiration from NDVI and thermal-IR AVHRR data, *J. Appl. Met.*, **28**, 267-284.
- 西上泰子・柳沢幸雄 (1997): 人工衛星データによる相対湿度マップの作成, 環境情報科学, **26**(1), 59-67.
- 沖大幹・虫明功臣・松山洋・増田耕一 (1995a): 大気水収支と地球規模の水循環, 土木学会論文集, **521**(32), pp.13-27.
- 沖大幹・虫明功臣・江守正多・沼口敦 (1995b): 大気大循環モデルによる大河川の流域水循環と水収支推定, 水工学論文集, **39**, pp.103-108.
- 佐渡公明 (1994): 衛星データを用いた広域蒸発散量の推定, 水文・水資源学会誌, **7**(4), 315-324.
- Running, S. W., and R. R. Nemani (1988): Relating Seasonal Patterns of AVHRR Vegetation Index to Simulated Photosynthesis and transpiration of Forest in Different Climate, *Remote Sens. Environ.*, **24**, 347-367.
- Sellers, P. J. (1985): Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration, *J. Remote. Sens.*, **6**, 1335-1372.
- Sellers, P. J., Y. Mintz, Y. C. Sud, and A. Dalcher (1986): A Simple Biosphere Model(SiB) for Use within General Circulation Models, *J. Atmos. Sci.*, **43**(6), 505-531.
- Sellers, P. J. (1987): Canopy Reflectance. Photosynthesis and Transpiration II. The Role of Biosphysics in the Linearity of Their Interdependence, *Remote Sens. Environ.*, **21**, 143-183.
- 申士徹・沢本正樹 (1995): 漢江流域における水文量の広域空間特性の解析, 水文・水資源学会誌, **8**(6), 560-567.
- Shin, S, and M. Sawamoto (1996): Evaluation of the Annual Water Balance thorough Vegetation Monitoring, *Proc. of the Int. Conf. on Water Resour. & Environ. Res.*, (1), 635-641.
- 水文・水資源学会 (1988): 水文・水資源学会設立趣意書, 水文・水資源学会誌, **1**(1).
- 立川康人・椎葉充晴・原田真一・高埴琢磨 (1997): 衛星搭載合成開口レーダデータによる空気力学的粗度の推定の試み, 水文・水資源学会誌, **10**(2), 144-153.
- Taconet, O., R. Bernard, and D. V. Madjar (1986): Evapotranspiration over an agricultural region using a surface flux/temperature model based on NOAA-AVHRR data, *J. Clim. and Appl. Met.*, **25**, 284-307.
- Tada, T., S. Kazama, and M. Sawamoto (1996): Estimation of Evapotranspiration Distribution in Tohoku Region, *Proc. of the Int. Conf. on Water Resour. & Environ. Res.*, (1), 627-634.
- 高埴琢磨・椎葉充晴・立川康人・寶馨 (1994): 衛星搭載合成開口レーダによる流域地表面特性の把握に関する基礎的検討, 京都大学防災研究所年報, **37**(B-2), 195-207.
- 田中賢治・池淵周一 (1994): 都市域・水体をも考慮した蒸発散モデルの構築とその琵琶湖流域への適用, 京都大学防災研究所年報, **37**(B-2), 299-313.
- Tucker, C. J., J. R. G. Townshend, and T. E. Goff (1985): African Land-cover Classification Using Satellite Data, *SCIENCE*, **227**, 369-375.
- Vidal, A. (1991): Atmospheric and Emissivity Correction of Land Surface Temperatures Measured from Satellite Using Ground Measurement or Satellite Data, *Int. J. Remote Sensing*, **12**(12), 2449-2460.
- Vukovich, F. M. (1987): Surface Temperature and Albedo Relationship in Senegal Derived from NOAA-7 Satellite Data, *Remote Sens. Environ.*, **22**, 413-421.