

V-16 水文データの乏しい流域での水資源評価手法の開発

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平14～平17

担当チーム：水文チーム

研究担当者：深見 和彦、猪股 広典

【要旨】

雨量観測データや流量観測データといった基礎的な水文データが乏しい流域において水資源について評価する手法の開発を行った。具体的には、1948年以降を対象として全球規模で整備されているものの空間分解能が粗くてそのままでは水文解析に使いにくい気象再解析データをダウンスケーリングすることで、過去の降雨分布を再現する手法の開発、および、現時点で利用可能な人工衛星による雨量観測データの河川流域における流出解析への適用性検討を行った。前者では、全球について入手可能な再解析データを入力し、 0.1° メッシュまで降雨データの空間分解能をダウンスケールするための非静力学気象数値モデルを開発し、メコン河流域において地上雨量データと比較することにより同モデルによる降雨量時空間分布の再現精度の検証を行った。衛星から観測した雨量データの適用性検討では、衛星雨量データを流出モデルに入力して計算された流量値と観測値との比較を行なうことで検証を行った。ここでは、大流域に対して適用実績が豊富な流出解析モデル：BTOPMCを用いたメコン河流域での検証と、中規模程度の流域に対して適用性の高い土研分布モデル Ver.3を用いたプルサット川流域（メコン河につながるトンレサップ湖への流入河川流域の一つ）での検証を行った。

キーワード：非静力学気象数値モデル、流域水循環モデル、衛星雨量データ

1. はじめに

日本の一級河川では、古くから雨量計の設置や流量観測が行なわれ水文データが収集されてきた。その水文データを基にして河川計画の策定を行なってきた経緯がある。それに対して発展途上国では雨量計の設置や流量観測を行なう資金が不足しており基礎的な水文データを収集できない状況にある国が多い。また近年、洪水をはじめとした水に関する災害はそのような水文観測が十分に行なわれていない国、地域で発生する傾向にあり、大きな問題となっている。

このような状況に鑑みて、本研究では上述のような水文観測データが乏しい流域において水資源について評価する手法の開発を行った。ここでは大きく以下の二つの手法の開発・検討を行なった。

1. 非静力学数値気象モデルによる降雨量評価手法
2. 衛星で観測された雨量データの適用性検討

1.については、富山大学への研究委託も実施しながら土木研究所で独自に非静力学数値気象モデル（以下、PWRI-NHM）を開発し、メコン河流域に対して適用した。空間分解能が 2.5° であるNCEP/NCARの再解析データをモデルに入力し、 0.1° メッシュまでダウンスケールした。ここでのモデル適用流域はメコン河とした。

2.については、大規模流域としてメコン川流域、ま

た中規模流域としてトンレサップ湖の支流の一つであるプルサット川流域の二つを試験流域として扱った。それぞれの流域に対して流出モデルを適用し、入力雨量データとして衛星雨量データを与え、計算された流量で検証を行った。流量での検証を行った理由としては、上記の二つの流域は雨量観測が十分に行なわれていないため衛星雨量の精度を検証するためのデータが不足しているためである。それに加えて地上雨量データと衛星雨量データの単純な比較を行なうと、点雨量データと面積雨量データという性質の違いに起因して大きな誤差が生じることが知られているためである^{1), 2), 3)}。

非静力学数値気象モデルを用いた手法の検証結果は地上観測雨量データと良い一致を示しており、手法の妥当性を示した。また、衛星雨量データの適用性検討においても手法の有用性を示すことができた。

2. PWRI-NHMによる降雨量評価手法

2.1 PWRI-NHMの概要

非静力学モデルの支配方程式は運動方程式、連続式、熱力学方程式および気体の状態方程式から構成される。非静力学モデルは一般に計算の安定性が問題になる。これは運動方程式に移流項が含まれていることが原因である。そこで、PWRI-NHMでは安定化有限要素法

④を導入して移流項を高精度かつ安定して計算できるように開発した。従来の非静力学モデルでは計算時間刻みを小さく取る必要があったが今回開発したPWRI-NHMでは、安定化有限要素法の導入により長い計算時間間隔でシミュレーションを実行することが可能となった。有限要素法の導入のために、従来はグリッドで行なわれていた計算空間分割を四面体で分割した。(図1)

また、従来は再解析データからネスティングや最初期化といった手法を用いて初期条件を作成していた。しかし、十分な精度が得られなかったため4次元データ同化により再解析データの同化を行なった。

雲微物理モデルは、暖かい雨について Kessler モデル⁵⁾、冷たい雨について Rutledge and Hobbs モデル⁶⁾を適用した。ここで、雲微物理モデルを一つのシステムと考え、システムの動特性をカルマンフィルターを用いて表現した。またカルマンフィルターを用いることでシステムに含まれるシステム誤差の統計的性質も考慮することができる。

なお、PWRI-NHMの開発に当たっては、一部を富山大学(総合情報基盤センター奥村弘講師)に研究委託を実施することで、効率的かつ迅速な開発・検証を行うことができた。

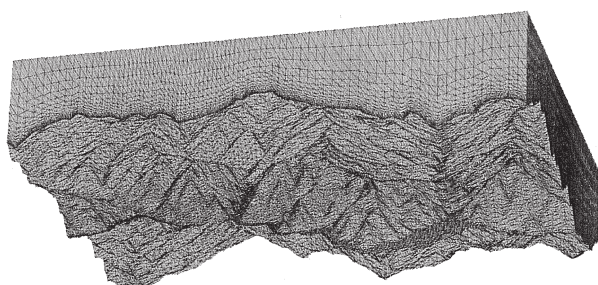


図1 四面体による計算空間分割(従来の正方体グリッドによる計算領域分割ではなく、四面体で領域分割を行うことで地表面の形状をより正確に表現できる。)

2.2 NCEP/NCAR 再解析データについて

NCEP/NCAR 再解析データは、NCEP(米国国立環境予測センター)とNCAR(米国大気研究センター)が共同で作成している全球の気象データアーカイブである。NCEPが開発した数値気象モデルに、NCARが収集した各種の気象データを同化して作成されている。空間分解能は 2.5° 、鉛直8層で、時間分解能は6時間である。含まれる物理量は、気温、雨量、風速(水平、鉛直)、相対湿度、比湿である。データは1948年から現在までのものが利用できる。

2.3 計算条件

対象領域:メコン河流域を含む次の領域

東経 95° ~東経 115°

北緯 5° ~北緯 25°

計算期間:2000年5月~10月

計算出力単位:1日

メッシュサイズ: 0.1° までダウンウスケール

2.4 検証用雨量観測所

メコン河流域で得られた約290地点の雨量観測データをスプライン補完でメッシュ化した。観測所の位置を図2に示す。

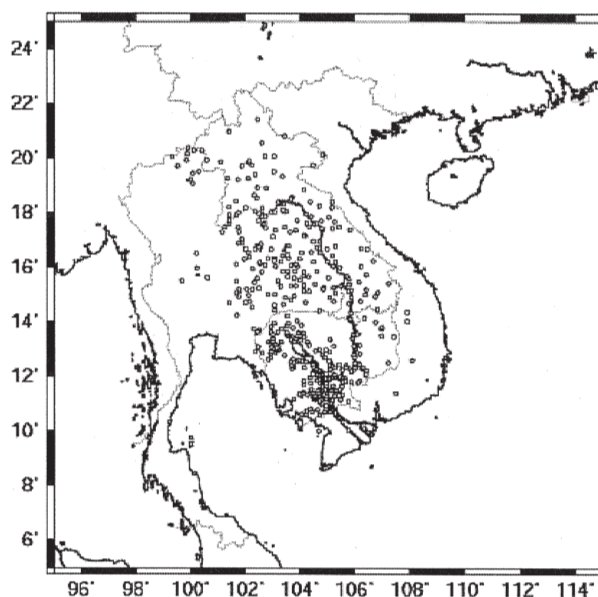


図2 メコン河流域の雨量観測所位置

2.6 計算結果

以上の条件を基にして復元された雨量データと観測雨量との比較を図3から図8に示す。計算結果は観測結果と良く一致しており、開発した手法の高い安定性と妥当性が示された。なお、地上雨量との比較だけではなく、計算雨量を流出解析への入力データとして用いることで河川流量データを介した面積雨量としての評価を行うことが今後の課題である。

3. 衛星で観測された雨量の適用性検討

3.1 概要

近年、熱帯降雨観測衛星TRMMに搭載されているTMIセンサ、アメリカ軍事気象衛星DMSPに搭載されているSSM/Iセンサ、Aqua衛星に搭載されているAMSR-Eといったマイクロ波放射計で観測される輝度温度データを降雨強度に変換するアルゴリズムが開

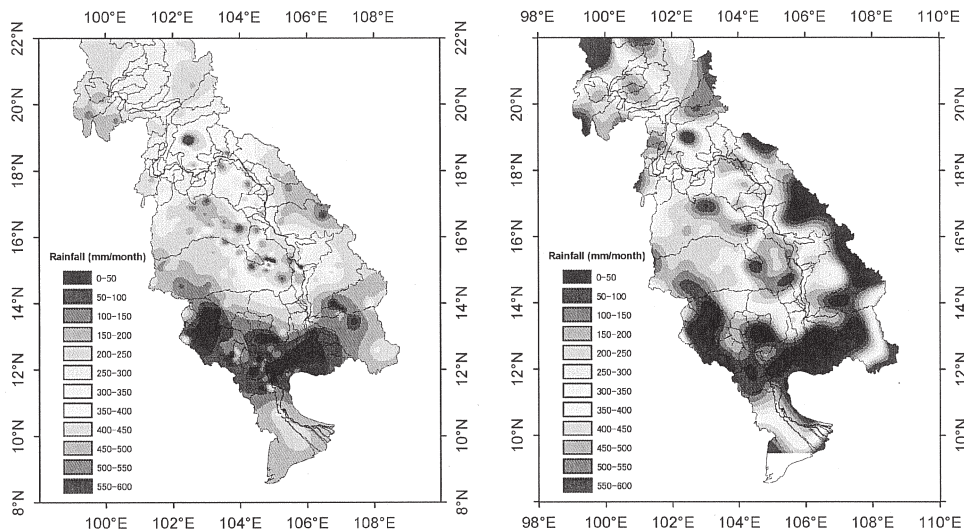


図3 観測値 (左) と計算値 (右) 2000年5月 月雨量

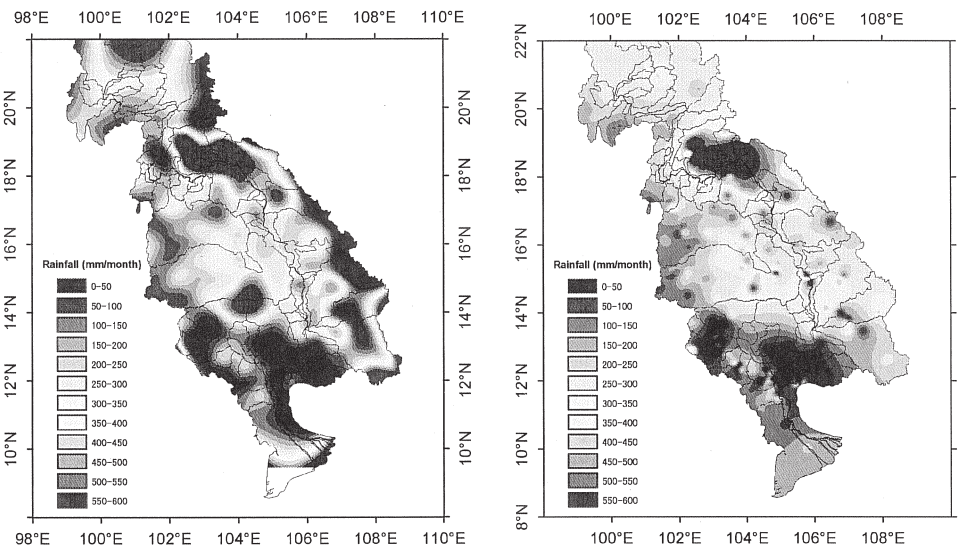


図4 観測値 (左) と計算値 (右) 2000年6月 月雨量

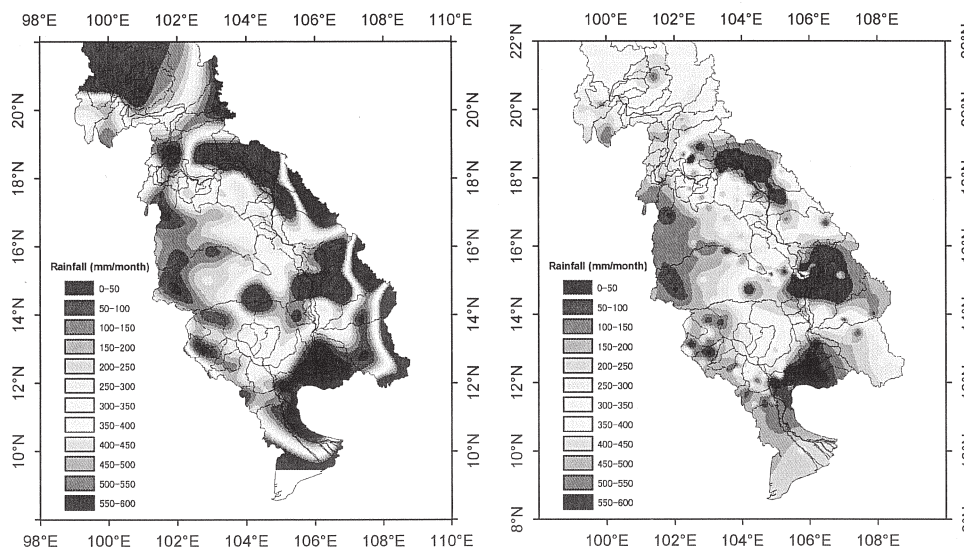


図5 観測値 (左) と計算値 (右) 2000年7月 月雨量

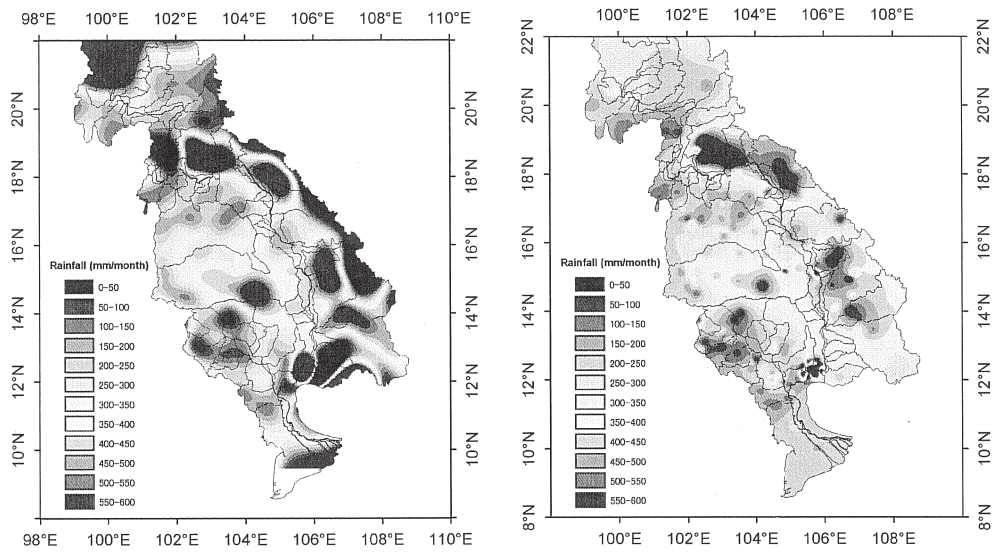


図6 観測値 (左) と計算値 (右) 2000年8月 月雨量

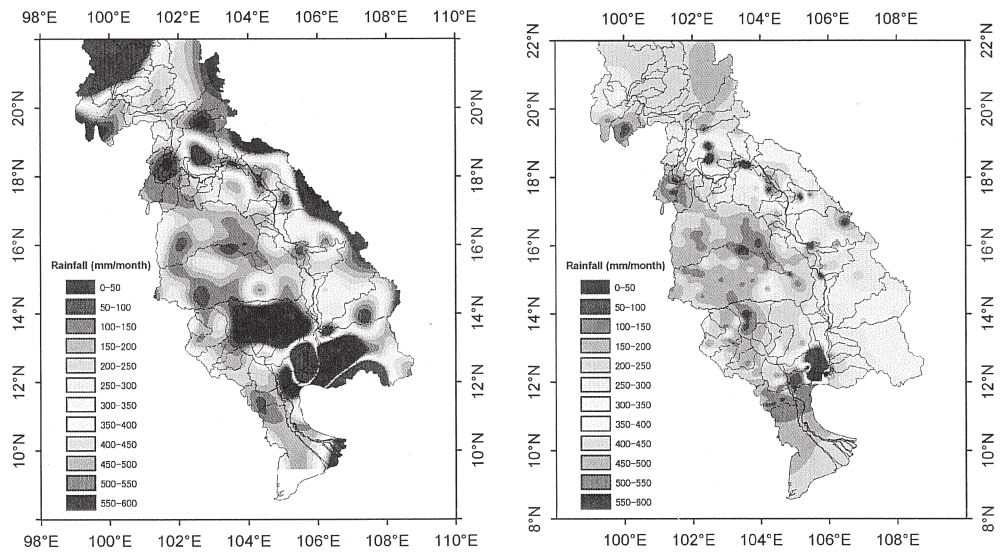


図7 観測値 (左) と計算値 (右) 2000年9月 月雨量

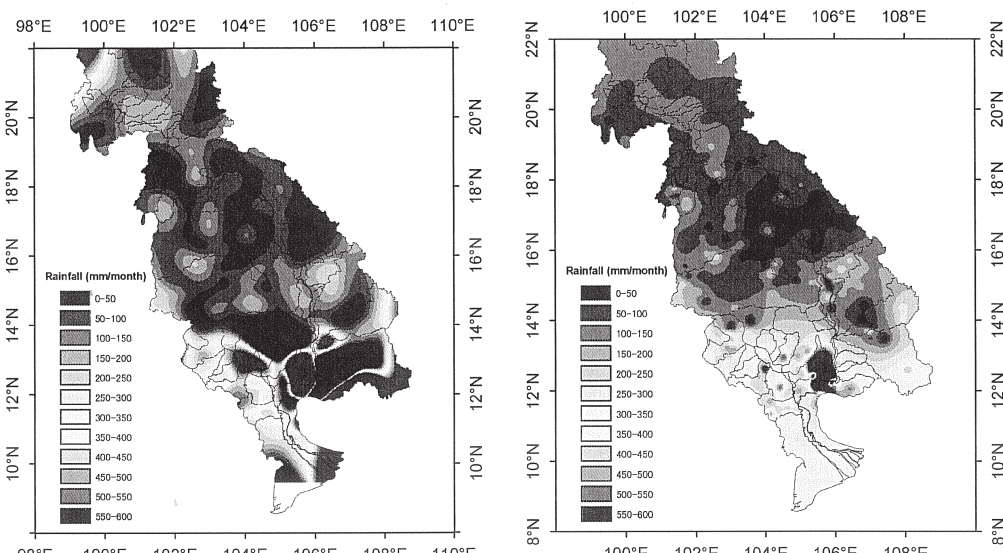


図8 観測値 (左) と計算値 (右) 2000年10月 月雨量

発されてきている。7,8)衛星からの観測が可能になることで、雨量計が十分に設置されていない発展途上国においても雨量が把握できる。しかし、TMI、SSM/I、AMSR-Eの観測の走査幅はそれぞれ760km、1400km、1450km程度であり、また対象とする地域の上空を通過する回数も多くはないため、一つのセンサの観測から得られている情報は水資源評価を行うためには十分ではない。そこで、欠測部分を最小限に抑えるためこれらのマイクロ波放射計のデータを重ね合わせた全球の雨量分布図が近年作成されてきている。時空間分解能の違いや使用している衛星データに違いがあるため雨量分布図は一つではなく、いくつかの機関がそれぞれの雨量分布図を作成しているのが現状である9),10)。

ここでは、使用する雨量分布図を選定し、その適用性について検討した。検討では、雨量分布図を地上の雨量計のデータと直接比較することができればよい。しかし、地上観測雨量が不足している上に地点雨量データである雨量計のデータと面積雨量データである衛星の雨量データを単純比較すると大きな誤差が生じることが一般的に知られている1),2),3)。よって衛星雨量データを流出モデルに入力し、計算された流量と観測値を比較することで評価した。流量データが得られており、また流出モデルの構築も行なわれているメコン河とプルサット川をここでは対象流域とした。

3.2 メコン河流域での検証

3.2.1 流出モデル

メコン河流域での検証には、山梨大学に協力を仰ぎBTOPMC (Block wise of TOPMODEL with Muskingum-Cunge method) を使用した。BTOPMCは大中規模流域での適用を目標としてTakeuchi¹¹⁾、菟ら^{12),13),14),15)}が中心となって開発した分布型流出解析モデルである。本モデルは、数値地形モデル (DEM:Digital Elevation Model) を基に流域擬河道網をはじめとする地形を再現し、これにTOPMODELを拡張した拡張ブロック型TOPMODELにより海外

の中・大規模河川流域への適用性を目的とした流出発生モデルを利用する。また、各河道における流量はMuskingum-Cunge河道追跡モデルにより算出される。

本モデルの特徴は、チューニングパラメータが比較的少ないこと、各パラメータはGIS情報を基に推定することができること、パラメータは各グリッドおよび各サブ流域形状のブロックに与えるために流域内の空間的な不均一性の考慮が可能である点などがある。

3.2.2 入力データ

BTOPMCでは、モデルに入力する諸データを作成するために標高データや土地利用データが必要となる。ここでは、標高データとして全球について入手可能なGTOPO30 (米国地質調査所) を、土地利用データとしてGLCC (米国地質調査所) を利用してパラメータの一次推定を行なった。BTOPMCはGTOPO30やGLCCのような全球について入手可能なデータを基にしてパラメータの設定が可能であるため、全世界で適用しうるモデルであると言える。

3.2.3 計算条件

計算期間：1998年1月1日～1998年12月31日 (1年)

計算時間間隔：日単位

計算領域：北緯7度～34度、東経93度～113度の矩形領域

メッシュサイズ：180秒 (約5km)

3.2.4 衛星雨量

使用する衛星雨量データは、1998年を対象とすることからNASAが提供している3B42 V5および3B42 V6とした。スペックを表1に示す。

3.2.5 解析フロー

まず最初に1972年から1997年の地上雨量データお

表1 衛星情報に基づく降雨量分布データのスペック

Product	Spatial Resolution	Time Resolution	Range	Remarks	Archive
3B42 V5	1	daily	40N-40S	IRのデータを、TMIとPRの複合プロダクトである2B31およびVIRS (TRMM) のプロダクトである1B01でキャリブレーションして作成されたもの。	1998-Present
3B42 V6	0.25	3 Hourly	50N-50S	IRのデータを、TMIとPRの複合プロダクトである2B31、SSM/I (DMSP)、AMSU (NOAA) およびAMSR-E (ADEOS) でキャリブレーションして作成されたもの。	1998-Present

よび流量データを基にモデルパラメータの調整を行った。パラメータ調整地点は Vientian、Nakhon、Phanom、Mukdahan、Yasothon および Pakse の 5 地点とした。その後、1998 年 1 月 1 日から 1998 年 12 月 31 日について地上雨量データ、3B42 V5 および 3B42 V6 を入力し同じく上記 5 地点で検証を行った。地上雨量データとしてはメコン委員会が作成した HYMOS データベースのものを使用した。

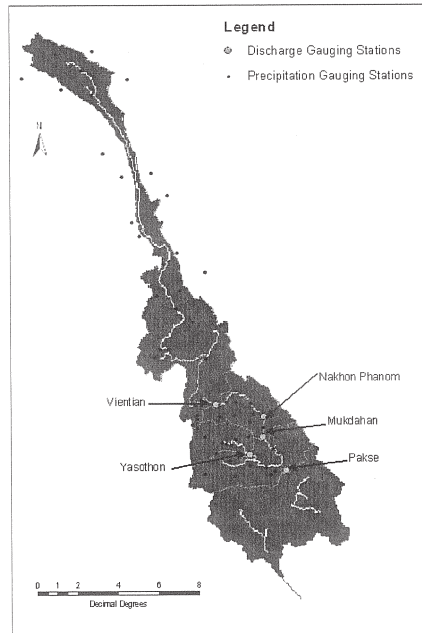


図 9 検証地点の位置

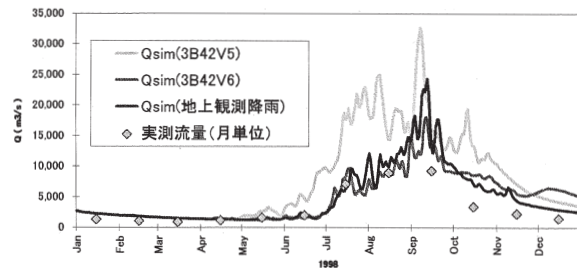


図 12 計算結果 (Vientian)

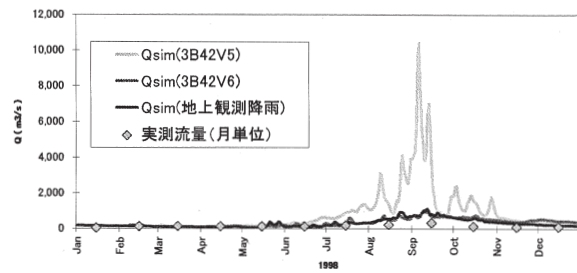


図 13 計算結果 (Yasothon)

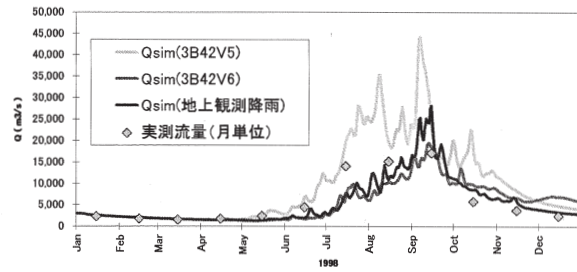


図 14 計算結果 (Nakhon Phanom)

3. 2. 6 検証結果

Vientian、Nakhon、Phanom、Mukdahan、Yasothon および Pakse の 5 地点の計算結果を図 10 から図 14 に示す。

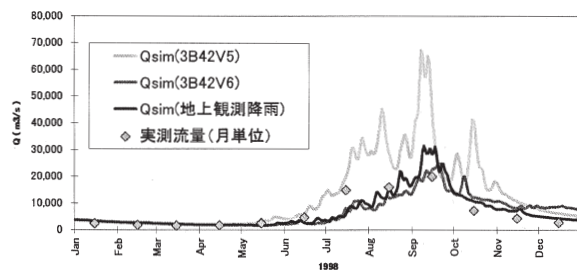


図 10 計算結果 (Pakse)

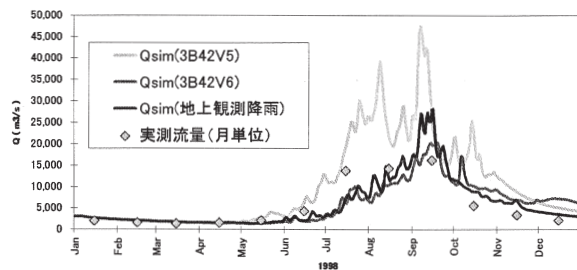


図 11 計算結果 (Mukdahan)

表 2 3つの雨量データの流域平均雨量の比較

計算ケース (入力降雨データ)	衛星降雨(①) 3B42V5	衛星降雨(②) 3B42V6	地上降雨(③)
領域降雨量作成方法	1deg グリッド内一定	0.25 deg グリッド内一定	ティーセン分割
領域平均 P (km ³ /year)	995	697	720
領域平均 E (km ³ /year)	560	516	510
領域平均 Q (km ³ /year)	406	219	220

図 10 から図 14 の結果より、3B42 V5 を用いた場合よりも 3B42 V6 を用いた方が 5 地点全てで良い結果が得られている。また 3B42 V6 の計算結果と地上雨量データによる計算結果は雨季の流量ピーク時に誤差が生じるものの、それ以外の期間では比較的近い値を算出している。

流出量の違いが雨量に起因しているものと想定し、3つの雨量データの流域平均雨量を比較した。その結果を表 2 に示す。その結果、3B42 V5 は地上雨量と比較して約 38%も過大に評価しており、その差が流出量の差として現れたものと考えられる。また 3B42 V6 と地上雨量データの差はほぼ同程度の差であり、流出量の算定結果と符合していることが分かる。

この結果より、メコン河流域においては時間分解能および空間分解能が粗い 3B42 V5 は流出現象の再現を行なうことはできないが、3B42 V6 は BTOPMC への入力雨量として十分に有効であることが示された。

3. 3 プルサット川流域での検証

3. 3. 1 流出モデル

プルサット川はカンボジア国内にあるインドシナ半島最大の淡水湖であるトンレサップ湖の支流の一つであり、流域面積は 6,013km² である。この地域は明瞭な雨季と乾季が存在し乾季は概ね 11 月から 4 月、雨季は 5 月から 10 月である。この流域での検証には土研分布モデル Ver.3 を適用した。土研分布モデル Ver.3 は日本の山地森林域での水循環形態を定量的に把握する事を目的として開発された長期型流出モデルであり、日本国内の中規模程度の流域で適用実績がある。開発の母体となっているのは土研分布モデル Ver.1 である。土研分布モデル Ver.1 は流域をメッシュに分割し、各メッシュに対して鉛直に 4 つのタンクを配置し、そのタンクからの流出量を落水線で結ばれている隣のメッシュに移すというモデルである。4 つのタンクは上からそれぞれ表面流出、早い中間流出、遅い中間流出、地下水流出に対応している。土研分布モデル Ver.3 は遅い中間流出および地下水流出に関しては Ver.1 を踏襲し、表面流出および早い中間流出のモデル化を物理過程に基づいたものに置き換えている。具体的には土壌のモデルを Noilhan-Planton の土壌スキームを適用し、地下への浸透量のうち一定割合が早い中間流として流出するものとした。また樹冠遮断を考慮し、蒸発散量を Penman-Monteith 式で算出しており、長期の流出現象を定量的に把握できるように工夫されている。

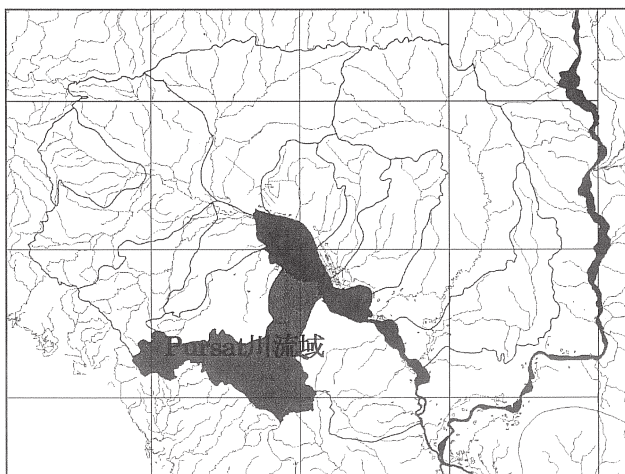


図 15 プルサット川流域

3. 3. 2 入力データ

モデルのパラメータを決定するために必要なデータは GTOPO30 (米国地質調査所) を落水線を始めとする地形データ作成に使用し、GLCC (米国地質調査所) を土地利用データ作成に使用した。また、Digital Soil Map of the World (国連食糧農業機関) を土壌の浸透性を評価するために使用した。BTOPMC 同様に土研分布モデル Ver.3 も全球規模で入手可能なこれらのデータからモデル構築が可能であるため、世界中で適用しうるモデルであると言える。

3. 3. 3 計算条件

計算期間：2005 年 4 月 1 日から 2005 年 12 月 31 日
計算時間間隔：日単位
計算メッシュサイズ：1 秒 (約 2km、1,573 メッシュ)

3. 3. 4 衛星雨量

プルサット川流域には 6 つの雨量観測所が設置されている。しかし、流域面積 6,013km² に対して 6 箇所の雨量観測所では流出計算を行なうにあたって十分ではない。そこでここでは NASA から準リアルタイムで配信されている 3B42RT データを活用して流出解析を行なった。3B42RT をそのまま適用すると誤差を多く含んでいる可能性があるため、地上雨量データからティーン分割に基づいてメッシュ雨量を作成し、その値と衛星データを比較して衛星雨量データに対する補正係数を求めた。補正係数は以下の式で算定した。

$$\text{補正係数} = \text{地上観測雨量} / \text{衛星観測雨量}$$

図 17 に衛星雨量と地上観測雨量の月積算値の比較と補正係数を示す。

3. 3. 5 計算結果

計算結果の検証は Bactrakoun 地点で行った。(図 16)

土木研究所ではこの地点で水位・流量観測を行っており HQ 式に基づく観測流量値が 2005 年 4 月から得られている。計算結果を図 18 に示す。

図 18 より、観測流量は雨季の最中である 7 月から 10 月ぐらいいかけて基底流量が上がる傾向が見て取れる。これは雨季の開始である 5 月に降った雨が地下に浸透し基底流量として流出しているためと想定される。また雨季が終わる 10 月を過ぎてから低水時の流量が徐々に小さくなっていくのは雨季の頃に地下に溜め込んだ水が遅れて流出しているためと考えられる。そのような特徴が見て取れる一方で、土研分布モデル

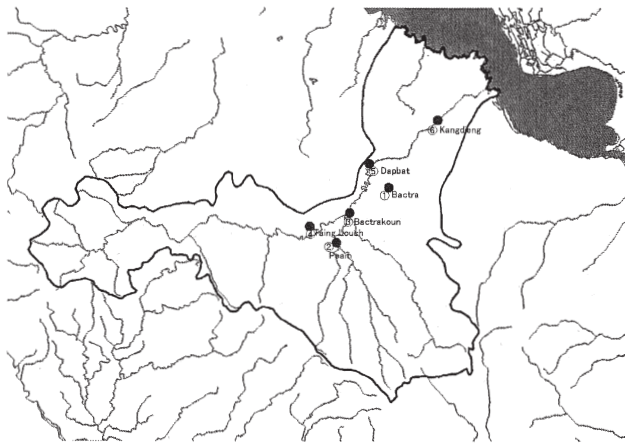


図 16 プルサット川流域の雨量観測所の位置

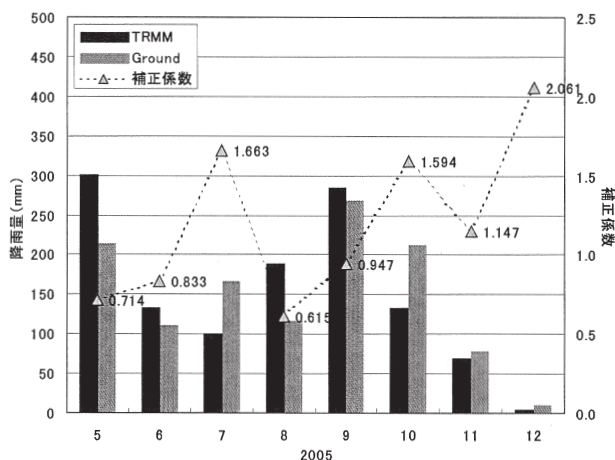


図 17 月毎の比較および補正係数

Ver.3 の結果は基底流量の季節的な変動を良好に再現することが現在のところできていない。これは入力した衛星雨量データの精度に問題があることが推定される一方で、モデルのパラメータ設定がまだ不十分であることも現時点で原因の一つとして考えられる。特に Noilhan-Planton 土壌スキームで計算された地下への浸透量と早い中間流出の比率の設定、遅い中間流出および地下水タンクの各パラメータ設定を改善する必要

がある。この調整を行えば、衛星雨量による流出計算で十分な精度を確保できることが予想される。以上のことから衛星雨量データは地上水文データが乏しい流域における水資源評価手法に利用可能な手段の一つとして有力な選択肢であると言える。

4. まとめ

本研究では、地上水文データが乏しい流域において水資源を評価する手法として、気象数値モデルを用いる手法と人工衛星による観測データを用いる手法の2つの手法の開発・提案を行った。

数値気象モデルの開発では土木研究所で独自に非静力学モデル：PWRI-NHMを開発した（一部富山大学に研究委託）。このモデルに全球規模で整備されている気象再解析データを入力することで、過去の流域スケールでの雨量分布再現を試みた。ここではメコン河流域の2000年雨季を対象として、NCEP/NCAR再解析データをモデルに入力し0.1°メッシュでの雨量分布を再現した。再現結果は良好で、観測結果と良い一致を示した。PWRI-NHMの世界中の任意の河川流域における過去雨量分布再現能力を確認するためには、より長期間での検証のみならず、様々な気候区域での追加検証も必要であるが、その大きな潜在可能性を示すことはできたと考えられる。

一方、人工衛星による雨量観測データの河川流域での流出解析への適用性検討においては、衛星雨量を流出解析モデルに入力して得られる計算流量と観測流量との比較から検証を行った。対象流域はメコン河流域およびトンレサップ湖に流入する支流の一つであるプルサット川流域で行なった。メコン河流域では大規模流域に実績のある分布定数型水循環解析モデル：BTOPMCに対してNASAから提供されている3B42 V5および3B42 V6という二つの衛星雨量分布図を入

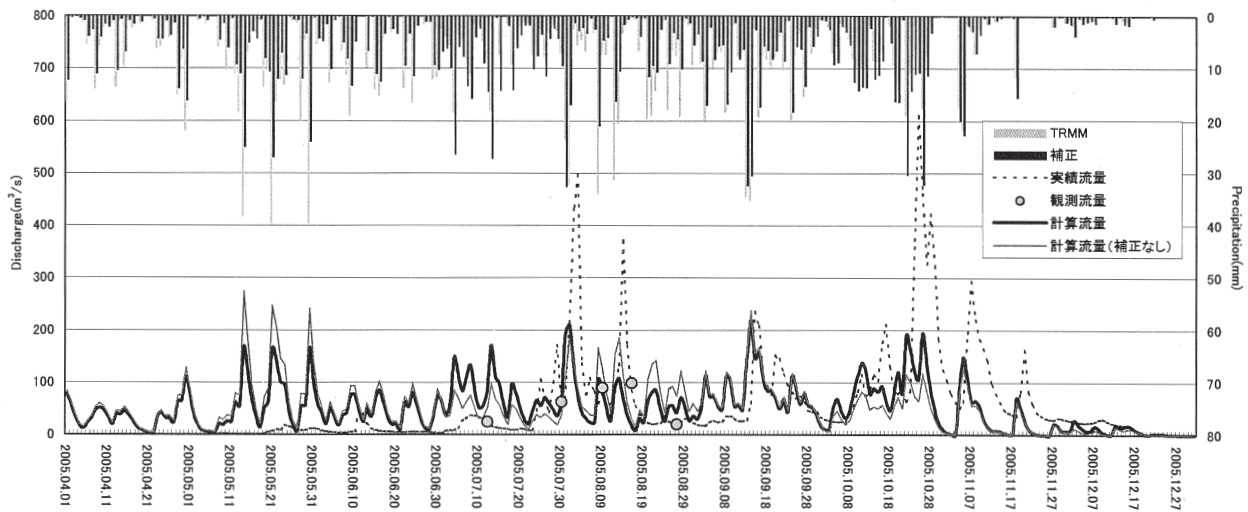


図 18 プルサット川流域での流出計算結果

力して計算を行い、地上雨量データで同じ流出解析モデルによって計算された流量値および観測値と比較した。その結果、時空間分解能が比較的細かい 3B42 V6 は地上雨量データで計算された流量値と近い値を示し、観測値とも近い値を示した。プルサット川流域での検証は、国内中規模流域で実績のある土研分布モデル Ver.3 に対して NASA から提供されている 3B42RT を入力して流量を計算し、観測流量と比較することで実施した。ここでは計算値が観測流量値を現時点で良好に再現できてはいない。その原因は現段階では十分解明されていないが、国内向けに調整された標準パラメータが、現地流域に適合していない可能性もあり、今後の追加検討を必要とする。ここで行ったメコン河およびプルサット川での流域での検証を通じて、衛星雨量データについても、地上雨量観測データが乏しい流域における水資源評価のための基礎資料として有力な選択肢となり得ることが示せたと考える。しかし、衛星雨量データを、近年特に早急な整備が急務となっている flash flood (急激な増水を伴う洪水) の予警報システムのために用いる場合には、その時空間分解能は現時点ではまだ十分とは必ずしも言えない。更なる時空間分解能の向上と精度改善が急務と考えられる。

参考文献

- 1) 橋本：「標本計画法による面積雨量の精度および信頼度の評価に関する研究」、土木研究所報告、第 149 号、pp.1-13、1997 年 9 月
- 2) Grzegorz J. Ciach, Witold F. Krajewski: "On the estimation of radar rainfall error variance", *Advances in Water Resources*, Vol.22, No.6, pp.585-595, 1999
- 3) M. Kitchen, R. M. Blackall: "Representativeness errors in comparisons between radar and gauge measurements of rainfall", *Journal of Hydrology*, 134, pp.13-33, 1992
- 4) Hughes TJR, Franca LP, Hulbert GM: "A new finite element formulation for computational fluid dynamics: VIII. The Galerkin/least squares method for advective-diffusive equations", *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, Vol.73, pp. 173-189, 1989
- 5) Kessler E.: "Models of microphysical parameters and process", *Meteorological Monographs*, Vol.10, pp.26-31, 1969
- 6) S. A. Rutledge and P. V. Hobbs, "The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. VIII: A model for the 'seeder-feeder' process in warm-frontal rainbands", *J. Atmospheric Sciences*, Vol.40, pp.1185-1206, 1983
- 7) Kazumasa Aonashi: "Passive Microwave Precipitation Retrievals Using TMI during the Baiu Period of 1998. Part I : Algorithm Description and Validation", *Journal of Applied Meteorology*, Vol.39, No.12, pp.2024-2037, 2000
- 8) Kummerow C., W. S. Olson, L. Giglio: "A simplified scheme for obtaining precipitation and vertical hydrometeor profiles from passive microwave sensors", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 34, pp.1213-1232
- 9) Robert Joyce et al.: "CMORPH: A Method that Produces Global Precipitation Estimates from Passive Microwave and Infrared Data at High Spatial and Temporal Resolution", *Journal of Hydrometeorology*, Vol.5, pp.487-503, 2004
- 10) <http://trmm.gsfc.nasa.gov/>
- 11) Takeuchi K., Ao Tianqi, Ishidaira H.: "Introduction of block-wise use of TOPMODEL and Muskingum-Cunge method for the hydroenvironmental simulation of a large ungaged basin", *Hydrological Sciences Journal*, 44(4), pp.633-646, 1999
- 12) 敖、石平、竹内：「ブロック型トップモデルおよび M-C 追跡法による分布型流出解析モデルの検討」、*水工学論文集*、第 43 巻、pp.12、1999 年
- 13) 敖、石平、竹内：「Muskingum-Cunge 法を分布型流出モデルへ適用する場合の問題点と対処法」、*水工学論文集*、第 44 巻、pp.139-144、2000 年
- 14) 敖、石平、竹内：「大河川の擬河道網作成における問題点およびその流出解析への影響」、*水工学論文集*、第 45 巻、pp.139-144、2001 年
- 15) Ao T., Takeuchi K., Ishidaira H., Yoshitani J., Fukami K. and Matsuura T.: "Development and application of a new algorithm for automated pits removal for grid DEMs", *Hydrological Sciences Journal*, Vol.48, No.6, pp.985-997, 2003