

陸面過程モデルMATSIRO と保水能理論および 集中定数系方程式の統合手法開発

Improvement of Land surface model by combining a rainfall runoff system
associated with a theory of water holding capacity

北海道大学大学院工学院 学生会員 中山裕太 NKAYAMA YUTA
北海道大学大学院工学研究科 准教授 正会員 山田朋人 TOMOHIITO YAMADA

1. はじめに

地球表層における水循環の再現において、大気の流れを担う大気モデル、海洋の循環を担う海洋モデルに対して、陸上での水の流れを担うものを水文モデルという。水文モデルは開発の歴史から大きく二つに分類することができる。

一つは、大気モデルの一部として開発されてきた水文モデルで、陸面モデル (Land Surface Model) と呼ばれる。陸面モデルとは、大気とのエネルギー収支を正確に算定することに重点を置いて水収支を計算するものである。一方、大気モデルを意識せずに開発されてきた水文モデルも数多く存在する。これらは雨水や融雪水が土にしみ込んで川を流下する流出過程の再現を目指すものであり、水の量の推定精度に重点を置いている。陸面モデルと区別するため、これらを流出モデルと呼ぶことにする。以下これらの2種類に分けて特徴を述べる。

陸面モデルとは上述の通り、大気モデルの一部として陸面過程を表現する為に開発利用されてきたものである。大気が必要な下部境界条件は、上向き放射量、運動量フラックス (摩擦)、直接最下層の空気を暖める顕熱フラックス、そして蒸発散量などであり、陸面モデルは大気から放射、気温、湿度、風、降水量などを与えられて、温度や含水量などの陸面モデルの内部変数に応じてそれらの水やエネルギーを配分し、放射、運動量、顕熱、潜熱、そして場合によってはCO₂などのフラックスとして大気下端に輸送される量を算定するものである。

現在でもつかわれている陸面モデルは大きくバケツモデル、生物物理モデル、生物化学モデルの3種類に分類できる。バケツモデル (Manabe et al., 1969) は単純であるが故に利用し易い。しかし、植物被覆が無視されているという問題がある。生物物理モデルは植物被覆を表現する単純なスキームを含むものである。代表的なものに Simple Biosphere Model (SiB; Sellers et al., 1986) がある。GCM と結合し、全体規模でのシミュレーションを行った結果バケツモデルよりも高精度な予測が可能になったとされている (Sato et al., 1989)。生物化学モデルの最新のスキームである Simple Biosphere Model2 (SiB2; Sellers et al., 1996) では植物群落における光合成・気孔抵抗スキームを含んでいる。更に陸面と土壌中の水循環、雪面での融雪過程などをより現実的に表現している。本研究で利用する Minimal Advanced Treatments of Surface

Interaction and Runoff (MATSIRO; Takata et al., 2003) もこの一つである。

流出モデルでは、流出現象の理解、河川計画に必要な流量についての過去の再現や将来の予測等に用いられる。伝統的には河川洪水計画あるいは実時間洪水予測のために構築、利用されてきた。特定の洪水のみを対象とする場合が多く、その場合豪雨データから数日間のみ流量を算定することになり、降水のうち蒸発や浸透などになる分は降雨損失としてあらかじめ観測降水量から差し引いて、残りの有効降雨を入力として与えることになる。代表的なものとして、合理式、単位図法 (Sherman et al., 1932)、貯留関数法 (Kimura et al., 1961)、タンクモデル (Sugawara et al., 1972)、等価素度法などがある。本研究で用いる集中定数系方程式 (山田ら) はこの一種であり、等価素度法を発展させたものである。

また、現在計算機技術やリモートセンシングなどの観測技術の発達により陸面モデル、流出モデル共に変革を遂げている。大きな河川流域をサブ流域や格子に区切り、そうした細かい部分に陸面モデルまたは流出モデルを適用して流出を算定し、河川網情報と河道流下モデルと組み合わせて大河川、大流域の流量を求める分布型モデルの開発がその一つである。分布型流出モデルはパラメータや入力データの推定、準備などに手間がかかる上、データの制約が原因となって空間解像度が制限されてしまうことが多い。更に計算時間も膨大であるという問題もある。しかし、分布型流出モデルでは洪水氾濫に伴う水深分布なども再現するようので、被害推定や浸水地図作成、あるいは治水/浸透施設構築に伴うそうした被害の軽減などをシミュレートすることができるのは非常にメリットが大きい。降雨分布の移動を考慮できる点も長所の一つである。MATSIRO で採用している TOPMODEL (Beven., 1979) はこの一種である。このモデルは、流域をグリッドに分割し、グリッドごとに傾斜、集水面積、浸透能により定義している。これらによって各グリッドの土壌水分量と流域平均土壌水分量を関連付け、流域内の土壌水分量の分布を考慮しつつ、流出や蒸発を算定することを可能にしている。

一方で、流域平均のパラメータのみしか持たないものを集中型と呼ぶ。集中型は必要とするパラメータが少ない為、観測データが少ない地域にも適用可能であり、計算時間も短いという長所があり、実際の河川計画にも利

用されている。しかし、当然ながら細かい水深分布などを算定することはできない。

陸面モデルと流出モデルは各々独立に研究開発されてきたものである。現在、これら2種を組み合わせるような試みはあまりされていない。陸面モデルは流出に関わる水文過程が他のプロセスと比べて充分適切にモデル化されているとは言いにくい状況にある。加えてグリッド内の不均一性をどのように表現するかという課題がある。一方、流出モデルはエネルギー循環に関する取り扱いが不十分で、植生の取り扱い方などに改良の余地がある。そこで本研究では陸面モデル MATSIRO に集中定数系方程式を組み込むことで、両者の長所を生かした降雨流出過程の開発に取り組む。

2 統合手法、入力データ、対象地域

本研究では、最新のスキームを含む陸面モデルである MATSIRO に集中定数系方程式を組み込み、流出再現精度を向上させることを目的とする。統合に向けた第一段階として、今回は MATSIRO で算出される植生を考慮した非対流性の降雨を基に有効降雨を求め、鉛直浸透流を計算する際に MATSIRO で算定された土壌水分を用いるという手法で結合させる。降雨を非対流性に絞る理由はインプットデータの制約による。本実験においてインプットデータは、AMeDAS と地上気象観測の結果(降雨量、風速、湿度、気温データ等)を 10km² のグリッドに加重平均したものを用いているが、データの解像度がまだ十分でないため、対流性の降雨を観測することが困難であることが原因である。

以下に集中定数系で用いられる方程式を列挙する。

$$\alpha = \frac{k_s i}{D\gamma^{-1}w\gamma} \quad (1)$$

$$m = \gamma - 1 \quad (2)$$

$$\beta = \frac{m}{m+1} \quad (3)$$

$$a_0 = (m+1)\alpha^{m+1}L^{\frac{-1}{m+1}} \quad (4)$$

ここに、 k_s : 飽和透水係数(mm/h), D : 表層土厚(mm), i : 勾配, w : 有効空隙率 $w = \theta_s - \theta_r$ (θ_s : 飽和含水率, θ_r : 残留含水率), γ : 透水性の減少を表わす無次元パラメータ, m : 抵抗則, L : 斜面長(mm), である。いずれも流出計算に用いるパラメータであり、土壌・地形特性から決定される。

$$\frac{dq_s}{dt} = a_s q_s^{\beta_s} (r(t) - q_0 - q_s) \quad (5)$$

$$\frac{dq_r}{dt} = a_0 q_r^{\beta} (q_0 - q_r) \quad (6)$$

$$\frac{dq_0}{dt} = (r(t) - q_0) \frac{q_0 - k_s}{h_s + h_k} - \frac{q_0}{\theta_s - \theta_r} \frac{(q_0 - k_s)^2}{k_s (h_s + h_k)} \quad (7)$$

$$\frac{dh_s}{dt} = r(t) - q_0 - q_s \quad (8)$$

$$(h > D) q_* = q_0 = q_*|_{h=D} \quad (9)$$

$$(0 \leq h \leq D) r(t) < k_s \quad q_0 = r(t) \quad (10)$$

$$q_T = q_s + q_r \quad (11)$$

q_s : 飽和・不飽和側方流に関する流出高(mm/h), q_r : 表面流に関する流出高(mm/s), q_T : 全流出高(mm/h), q_0 : 鉛直浸透流(mm/h), h_s : 湛水深(mm), h_k : 湿潤線での毛管不圧(mm), h : 飽和・不飽和側方流の水深(mm), r : 有効降雨(mm/h)である。表面流はマニング則をとり、抵抗則 $m_s = 2/3$, $\alpha_s = i^{1/2}/n$ で表わされ、表面流に関する流出パラメータ a_s および β_s が求まる。ここで、 n は斜面表層における Manning の粗度係数である。(5)式は表面流出、(6)式中間流、(7)式は土壌表層への鉛直浸透流、(8)式は湛水深をそれぞれ表わす。また、(9)式は水深が表層土層厚を越えた以降、降雨の鉛直浸透量は一定となること、(10)式は飽和透水係数が降雨強度よりも大きいとき、鉛直浸透量は降雨強度と一致すること、(11)式は全流出高を示している。これらの式から流出量を求める。

$$u(t) = r(t) \int_0^R S(h_c) dh_c \quad (12)$$

$$S(R) = (1 - ab)\delta(R) + 2ab^2 \frac{\sinh(bR)}{\cosh(bR)} \quad (13)$$

u : 有効降雨(mm/h), r : 降雨(mm/h), R : 総降雨量(mm), h_c : 保水能(mm), S : 保水能分布(1/mm) である。(8)式は有効降雨、(9)式は保水能分布をそれぞれ表わし、入力となる有効降雨の算定に用いる。

MATSIRO 内の植生を考慮した降雨、土壌水分はそれぞれ以下の方程式から求められている。

$$\frac{dw_{c(w)}}{dt} = I_r - D_r - E_{i(w)} \quad (14)$$

$$\frac{\partial \theta_w}{\partial t} = \frac{\partial F_w}{\partial z} + S_w \quad (15)$$

$$F_w = K \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - 1 \right) \quad (16)$$

ここに、 $w_{c(w)}$: 樹冠貯留水量(kg/m²/s), I_r : 降雨の遮断量(kg/m²/s), D_r : 樹冠流下降雨量, $E_{i(w)}$: 樹冠からの蒸発量(kg/m²/s), θ_w : 土壌水分(m/m), F_w : 鉛直方向土壌水分フラックス, S_w : 根による吸上げ・流出, K : 透水係数(m/s), ψ : マトリックポテンシャルの総和, である。(14)式が樹冠の影響を考慮した雨量、(15)式のリチャーズ方程式から土壌水分量を算定する。 F_w は(16)式の通り、鉛直方向の水利ポテンシャルの勾配から求める。

今回導入した手法の有用性を確認するため、実際のダム流域における出水を対象として降雨流出計算を行う。実験の適用流域は、利根川水系渡良瀬川上流 78km に位置する多目的ダム、草木ダム流域である。流域面積は 254km² であり、全体的に山地流域である。対象とする出水は 2002 年 7 月 9 日の出水(総降雨量:403mm, 流出率: 0.58, 初期土壌水分量: 0.45, 損失雨量曲線:乾燥)とする。

3 結果

計算結果を図1に示す。水色の実線が今回導入した手法による流出結果、黒の実線が MATSIRO の流出結果である。図2に観測結果(山田,呉,2011)を示す。

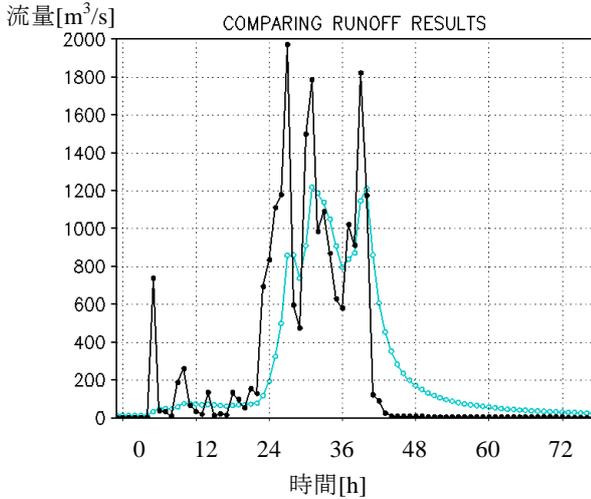


図-1 流出結果,青:改良後,黒:改良前

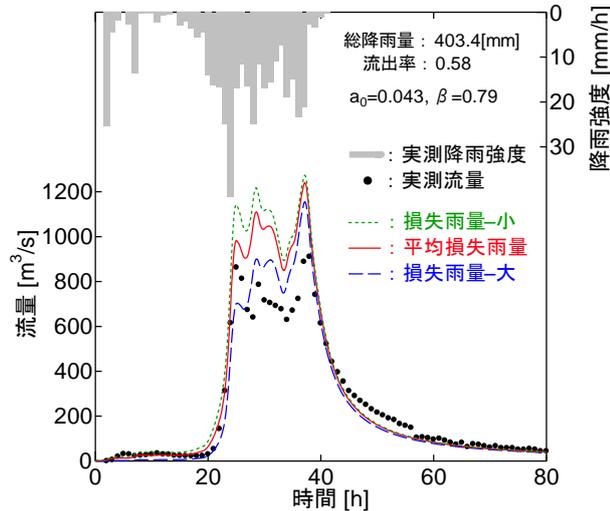


図-2 草木ダム流域における降雨流出計算結果(Case1.), 山田, 呉,2011 : 保水能効果を有する降雨流出予測手法の高精度化に向けた陸面モデルの活用より.

MATSIRO の計算結果では実測値よりも早くピークが訪れており、ピークとは実測値の2倍以上となっている。また出水の低減が急激であり、これは実現象とは異なる傾向である。一方、今回導入した手法を用いた結果ではピーク時期、ピーク値ともに良好な一致を示しており、低減部も十分に再現されている。この結果から本実験で用いた統合手法は有効であると判断できる。ただし、今回は損失降雨大の条件で計算したにも関わらず、損失降雨小の曲線に近くなっており、実際の観測値よりも大きな値をとっている。これは入力データとして現地観測の降雨データ(山田,呉,2011)を用いることで更に改善することが期待できる。

4 結論

実験結果から、集中定数系に対して陸面モデル MATSIRO で算定される植生を考慮した降雨と土壌水分

を用いるという統合手法が、十分な信頼性をもつことを示すことができた。この結果は、こういったモデルの統合が陸面モデルの流出精度向上に大きく寄与する可能性を証明すると同時に、観測データが少ない地域においては、陸面モデルでそれ補える可能性があることを示唆するものである。今回は短期流出のみに絞って統合を行ったが、今後は長期流出に対してもこの方法を適用できるように改良することが必要である。また、集中定数系で用いられるパラメータと地形・土壌・植生などの関係を明らかにし、データの少ない地域にも適用可能にすることも重要である。

謝辞

AMeDAS データを提供して頂いた咲村隆人氏と、研究に関して貴重な助言をして頂いたカリフォルニア州立大学 Davis 校の呉修一先生に、この場を借りてお礼を申し上げます。

参考文献

- (1) Kumiko, Takata, Seita, Emori, Tsutomu, Watanabe, Development of the minimal advance treatments of surface interaction and runoff , Global and Planetary Change 38 (2003) 209 – 222
- (2) 呉修一, 山田正, 吉川秀夫 : 有効降雨の推定に関する研究, 土木学会論文集B, Vol. 65, No. 3, pp.231-245, (2009)
- (3) 呉修一, 降雨流出モデルの普遍的適用にむけた物理的アプローチ, 2008
- (4) 呉修一, 山田正, 既往概念流出モデルの理論的導出, J. Japan Soc. Hydrol. And Qater Resour. Vol.22, No.5, Sep.2009 pp.0-0
- (5) 山田正, 山地流域の非線形性に関する研究, 2002
- (6) 山田正, 小流域における降雨流出機構に関する研究, 1981
- (7) 咲村隆人, 水・エネルギー収支算定に基づく日本域洪水危険度推定手法の開発, 2006
- (8) 近藤純正, 地表面に近い大気の科学, 2000
- (9) 山田朋人, 呉修一, 降雨流出計算手法の精度向上に向けた陸面モデル情報の利用, 2010
- (10) Sherman, L. K. : Streamflow from rain fall by unit-graph method, Eng. News Record, pp.501-508, 1932.
- (11) 菅原正巳 : 流出解析法, 水文講座, 共立出版, 1972.
- (12) 木村俊晃 : 貯留関数法, 土木技術資料, 4.1., 1961.
- (13) Beven, a TOPography based hydrological MODEL, 1979.