

北極圏における分布型水文モデルの適用

Application of A Distributed Hydrological Model to The Arctic Region

苫小牧工業高等専門学校専攻科 ○学生員 小野寺政憲 (Masanori ONODERA)
 苫小牧工業高等専門学校 正会員 八田 茂実 (Shigemi HATTA)
 海洋研究開発機構 朴 昊澤 (Hotaek PARK)
 東北大学大学院理学研究科 山崎 剛 (Takeshi YAMAZAKI)
 名古屋大学大学院生命農学研究科 山本 一清 (Kazukiyo YAMAMOTO)

1 はじめに

北極圏のシベリア地域は温暖化の影響が顕著に現れると考えられており、既に気候・生態系・永久凍土などに多くの変化が起きつつある。この温暖化が水循環に及ぼす影響を把握し、過去から未来にかけての変動を検討するには、水循環モデルの役割が非常に重要である。一方、こうした地域にも都市や集落が存在し、シベリア地域における河川流量の変動は彼らの生活に大きな影響を及ぼす。このため、温暖化に伴う河川流量の変動を人々の生活に身近な時間単位で再現することが重要であり、週単位・日単位程度の精度を有した水文モデルが必要になると考えられる。八田ら¹⁾は、北極圏のレナ川流域を対象に陸面モデルに流出モデルと河川結氷モデルを加えた分布型水文モデルを提案し、長期間に渡って日単位流量を概ね再現できることを示した。しかし、設定した河道網のグリッドサイズが小さいため、長期間かつ他流域への展開が難しいといった問題がある。

このような観点から、本研究では北極圏のレナ川流域およびコリマ川流域を対象に、現況の流出を日単位程度の精度長期間かつ他流域に展開可能な水文モデルを構築することを目的とする。

2 対象流域の概要

本研究で対象とした流域は、レナ川流域およびコリマ川流域である。レナ川はバイカル湖北側にそびえるスタノヴォイ山脈に発し、途中主要な支川であるアルダン川、ヴィリュイ川を集めながら北極海へ流れ込んでいる。流域面積は 249 万 km²、主河道長が 4,400km の大河川である。レナ川流域は、その大半が永久凍土で覆われている点で他のシベリアの大河川とは異なる。コリマ川はコリマ山脈に発し、途中でオモロン川などの大きな支川をあわせて北極海に注いでいる。流域面積は 64 万 km²、河道長が 2129km である。図-1 にレナ川流域およびコリマ川流域の概要を示す。

3 分布型水文モデルの概要

本研究では、対象流域で緯度方向に降雨分布が大きく異なること、また降雨が時空間的に大きく変動することを考慮して分布型的水文モデルを用いることとした。図-2 に分布型水文モデルの構成を示す。水文モデルは、植生の影響や積雪・凍土などを取り扱うことのできる陸面モデルと、陸面モデルにより計算される土壌からの流出水を河道網上で洪水追跡する流出モデルの 2 つによって構成される。以下ではそれぞれのモデルについて概説する。

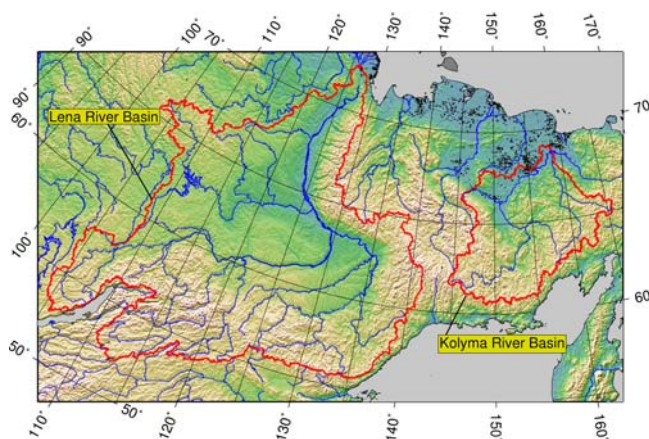


図- 1 対象流域の概要

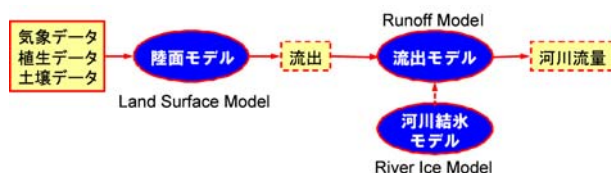


図- 2 分布型水文モデルの構成

3.1 陸面モデル

使用したモデルは Yamazaki et al.²⁾ によって提案されている 2 層モデル (2LM) と呼ばれるもので、植生上下 2 層、積雪、土壌のサブモデルから構成される。植生サブモデルは、森林上と森林内での水・エネルギーフラックスを考慮したモデルとなっている。積雪サブモデルは寒冷地で発達するしもぎらめ雪を考慮できる多層の積雪モデルにより、温度、密度、含水量のプロファイルを計算し、積雪および融雪のプロセスをモデル化したものである。土壌サブモデルでは、土壌での凍土の融解・凍結熱を見かけの熱容量を大きくする形で考慮した多層モデルにより土壌と大気間の水・熱移動をモデル化している。この陸面モデルでは土壌が飽和して発生した余剰水が計算され、この余剰水が次の流出モデルの入力値となる。

3.2 流出モデル

本研究では流出モデルとして、河道網上の洪水追跡によるモデルを採用した。単位河道での洪水追跡には、陸ら³⁾の河道追跡スキームを採用し、メッシュ標高値から作成した

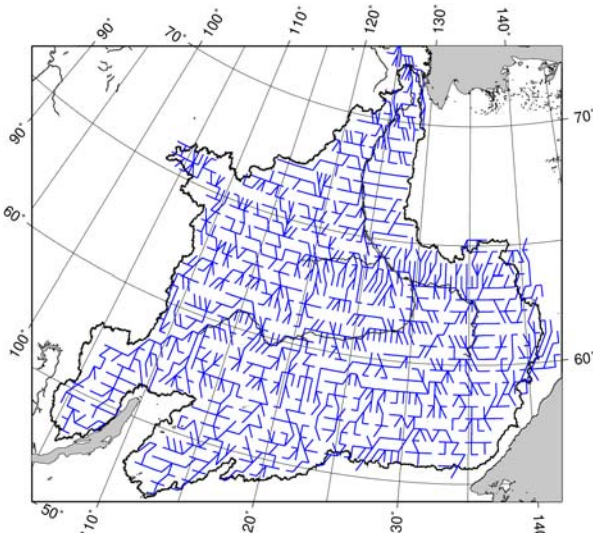


図-3 レナ川流域の0.5度グリッドによる河道網

河道網を介して流域下流端までの洪水流の追跡を行う。洪水流の追跡には、kinematic wave法を採用した。なお、河道は矩形断面とし、河道幅は集水面積の関数で与えることとした。流出モデルが陸面モデルから受け取った流出水 q_{in} は、土壌の流出過程を考慮するために一定割合 α_s を与えて、直接流出成分 $\alpha_s q_{in}$ と基底流出成分 $(1 - \alpha_s) q_{in}$ の2成分に分けて考えた。この α_s は八田ら¹⁾ が実測流量が再現できるよう試行錯誤的に求めた0.7の値を採用した。この2つの流出成分がグリッド内の河道に至るまでの変換過程のモデル(以降「グリッド集中モデル」と呼ぶ)は、山田⁴⁾ が斜面流出過程を集中化して導出した次式のような貯留関数型のモデルを用いた。

$$\frac{dq_*}{dt} = \alpha_0 q_*^\beta (r - q_*) \quad (1)$$

ここで、 q_* は流出高、 α_0 および β は流域流出特性パラメータ、 r は降雨強度である。直接流出成分に Manning 則、基底流出成分に Darcy 則を用いると上式は以下のように表される。

$$\frac{dq_*}{dt} = \frac{5}{3} \left(\frac{\sqrt{i}}{nL} \right)^{3/5} q_*^{2/5} (r - q_*) \quad (2)$$

$$\frac{dq_*}{dt} = \frac{k_s i}{L \theta_s} (r - q_*) \quad (3)$$

ここで、 i は斜面勾配、 L は斜面長、 n は粗度係数、 k_s は飽和透水係数、 θ_s は空隙率である。

一方、対象流域では冬期間河川は結氷し、春先の解氷とともに大きな洪水を引き起こすという重要な流出特性を有する。河川氷は水面に浮いている状態、河岸に固定されている状態もあり、これらを考慮に入れて全流域でモデル化することは困難である。このため本研究では、河道中の水量から結氷厚の増分に見合う水量をその地点に保留し、結氷厚が減少すれば減少に見合う水量を上流からの流入量に加えて流下させる。そして、水面にも壁面と同じ粗度を与えて非結氷部分を流下させることとした。

表-1 タイプ別の土壌特性⁵⁾

land-cover types	$k_s (\times 10^6 \text{ m/s})$	θ_s
tundra	176.0	0.40
taiga/boreal forest	34.6	0.43
cool deciduous conifer forest	6.95	0.45
cool deciduous broad-leaved forest	6.30	0.42
cool mixed forest	7.20	0.49
grassland	1.28	0.48
permanent wetland	1.03	0.49
permanent snow and ice	7.00	0.45

4 モデルの適用と流出量の算定結果

4.1 陸面モデルの適用

陸面モデルの適用陸面モデルを対象地域へ適用するにあたり、対象流域は0.5度グリッドに分割した。各グリッドには、Clapp & Hornberger⁵⁾ によって8タイプに分類された植生および土壌特性を与え、土壌の空間分布を考慮している。表-1は分類された8タイプの土壌とその特性値である。また、気象データは77ヶ所のBMDS⁶⁾を用いて近距離補完法により0.5度グリッドの日単位のフォーシングデータセットを構築し、陸面モデルへの入力値とした。なお、利用するデータは降水量、日照時間、最高・最低気温、湿度および風速である。陸面モデルへの入力となる植生や土壌特性・気象要素の空間分布の詳細に関しては、Park et al.⁷⁾を参照されたい。

4.2 流出モデルの適用

本研究の流出モデルでは、各グリッドを擬河道で連結した河道網モデルが必要となる。Oki et al.⁸⁾は全球を対象に0.5度グリッドの河道網を作成した。今後予定している他流域への展開を考慮して、0.5度グリッドの河道網を採用した。図-3は、レナ川流域の0.5度グリッドの河道網である。この河道網とこれまでにレナ川で作成している5分グリッドの河道網により、流域内の主要地点の集水面積、流域出口までの距離の分布を比較したところ、いずれもよく一致していることを確認した。

一方、グリッド集中モデル(式-(2),(3))の各係数に関しては、粗度係数は水理公式集を参考に0.7(m-s)を採用した。斜面勾配および斜面長についても実測流量が再現できるように決定し、 $i=10$ 度、 $L=50\text{m}$ とした。飽和透水係数および空隙率は、表-1に示す陸面モデルと同じ値を用いた。

以上のようにして流出モデルをレナ川、コリマ川を対象に1987年から2003年まで連続的に適用した。図-4、図-5はそれぞれレナ川とコリマ川流域の計算結果を1997年-2000年期間について示したものである。実測ハイドログラフに対して、レナ川は融雪期の立ち上がりが早く、コリマ川では融雪期のピーク流量を課題に計算している部分が見られた。また、どちらの流域も冬期の流出量が実測流量に比べて多く出ていることがわかる。これらは、冬期に土壌が凍結し、陸面モデルで余剰水が生じていない状態でも、グリッド集中モデルでは凍結を考慮していないため、河道に流入させ続けているためである。この部分は陸面モデルの状態に大きく依存するため、地中成分の深度別流出量や季節変化に伴う土壌凍結厚の変動を考慮したモデルに修正していく必要がある。

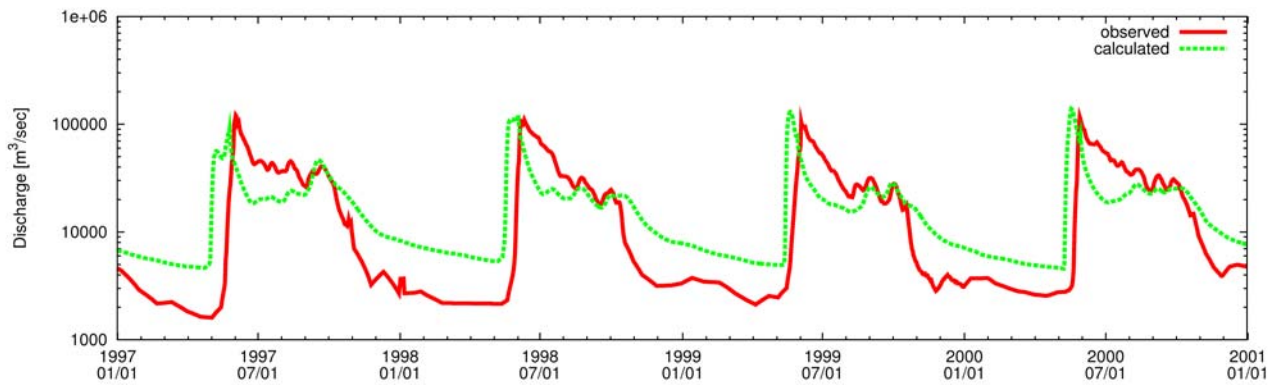


図- 4 レナ川流域の日流出量算定結果 (1997 年-2000 年)

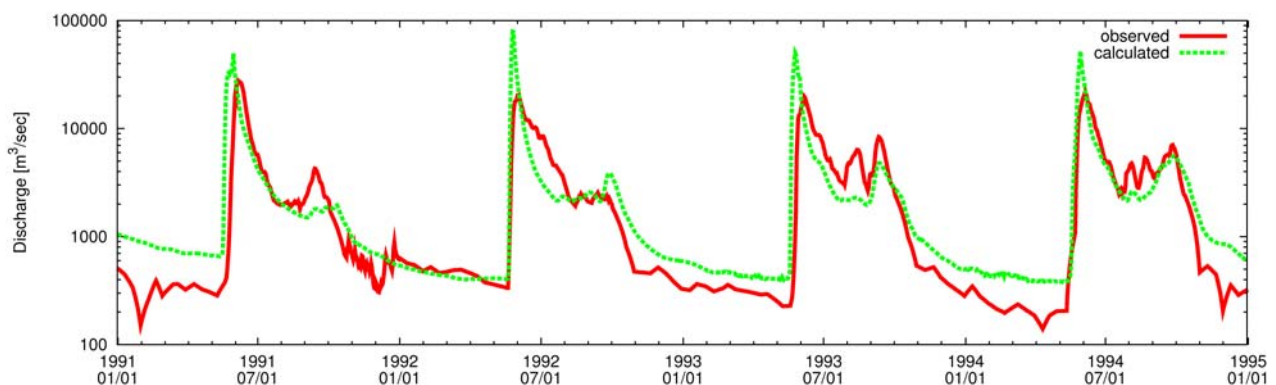


図- 5 コリマ川流域の日流出量算定結果 (1997 年-2000 年)

5 おわりに

本研究では、植生の影響や積雪・凍土などを取り扱うことのできる陸面モデルと、陸面モデルにより計算される土壌からの流出水を河道網上で洪水追跡する流出モデルを組合せた分布型水文モデルによりレナ川流域およびコリマ川流域の流出量の算定を行った。陸面モデルからの流出成分が河道に至るまでの変換過程となるグリッド集中モデルを組み込み、各グリッド内の変換過程を考慮した。モデルを適用した結果、レナ川は融雪期の立ち上がりが早く出ており、コリマ川では融雪期のピーク流量が大きく出ている部分が見られた。また、両流域とも冬期の流量が実測流量よりも多く計算されるなどの問題点を有している。今後は、陸面モデルで計算されている地中成分の深度別流出量や季節変化に伴う土壌凍結厚の変動を取り入れるなど、陸面モデルと一体化するような修正を行う必要がある。

謝辞：本研究は総合地球環境学研究所研究プロジェクト「温暖化するシベリアの自然と人—水環境をはじめとする陸域生態系変化への社会の適応—（代表・井上元）」の支援を得て行われました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 八田茂実・早川博・朴昊澤・山崎剛・山本一清・太田岳史, 分布型水文モデルによるレナ川流域の長期流出解析, 水文・水資源学会誌, **22**(3), 177-187, 2009.
- 2) Yamazaki, T., H. Yabuki, Y. Ishii, T. Ohta and T.

Ohata, Water and energy exchanges at forests and a grassland in eastern Siberia evaluated using one-dimensional land surface model, *J. Hydrometeorology*, **5**, 504-515, 2004.

- 3) 陸旻蛟・小池俊雄・早川典生, 分布型水文情報に対応する流出モデルの開発, 土木学会論文集, **411/II-12**, 139-144, 1989.
- 4) 山田正, 山地流出の非線形性に関する研究, 水工学論文集, **47**, 259-264, 2003.
- 5) Clapp, R.B., Hornberger, G.M., Empirical equations for some soil hydraulic properties. *Water Resour. Res.* **14**, 601-604, 1978.
- 6) Suzuki, R. and T. Ohata, Dataset for Water and Energy Cycle in Siberia Version 1, Published by GAME-Siberia, 2003.
- 7) Park, H., Yamazaki, T., Yamamoto, K., Ohta, T., Tempo-spatial characteristics of energy budget and evapotranspiration in the eastern Siberia, *Agr. For. Met.*, **148**, 1990-2005, 2008.
- 8) Oki, T. and Y. C. Sud: Design of Total Runoff Integrating Pathways (TRIP) - A global river channel network, *Earth Interactions*, **2**, 1998.