

## 北極圏における分布型水文モデルの適用(2)

## 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 正員 八田 茂実 (Shigemitsu Hata)  
 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)

## 1. はじめに

北極海は、地球の熱循環・水循環を考える上で非常に重要な部分を担っている。北極海は北アメリカ大陸とユーラシア大陸に囲まれており、その集水域は極めて大きく、ここに流入する河川は、世界的な大河川がその大半を占めている。Peterson et al.<sup>1)</sup> は、北極海に注ぐレナ川やエニセイ川などの6つの大河川からの流量が、1936年から1999年の期間で約7%増加したとしている。またYang et al.<sup>2)</sup> は、レナ川流域の1935年から1999年の気温・降水・流量・河川氷厚・活動層厚の資料から、冬期間の流出量が増加していることや融雪流出の時期が早まっているなどの傾向を示すとともに、レナ川流域の水文過程の変化は、主に近年のシベリアの温暖化による凍土の状態と密接に関連していると報告している。

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ためには、長期間にわたって計算を行うことが必要である。八田ら<sup>3)</sup> は、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水文モデルを提案し、観測流量を概ね再現できることを示している。筆者ら<sup>4)</sup> は更に、より広範囲にモデルを適用するために粗視化するとともに、グリッド内の水移動を考慮するためにグリッド集中モデルを導入した。しかしながら、流出成分を流域全体に一樣かつ全期間一定に分離して計算しているなど、将来にわたる温暖化などの影響を考慮することが難しいといった問題がある。

本研究では、レナ川流域を対象に、経験的に扱われてきた部分を極力排除し、将来にわたる温暖化の影響や季節変動にも対応可能な水文モデルの構築を目的とする。

## 2. 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の水文モデルを用いている。図1に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。

## 2.1. 陸面モデル

使用したモデルはYamazaki et al.<sup>5)</sup> によって開発された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。

陸面モデルは、対象流域を0.5°グリッドに分割した各グリッ

ドに適用されている。各グリッドにはClapp & Homberger<sup>6)</sup> 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BMDS<sup>7)</sup> を近距離補完法により日単位のフォーシングデータセットが構築され、陸面モデルへの入力値に用いられている。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。陸面モデルおよび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.<sup>8)</sup> を参照されたい。

この陸面モデルでは、土壌が飽和して発生した余剰水が各グリッドで深度別に計算されており、この余剰水が本研究の流出モデルの入力値となる。土壌層は表層のみ2cm、表層以下の19層は各10cmの計20層に分割されている。図2は陸面モデルで計算された深度別流出量の流域平均値を、地表から2~52cmを上層、52~122cmを中層、122~192cmを下層というように便宜的に3つに分けて各層の流出割合を示した。なお、第1層目である表層は表面流出とみなすものとして、ここには含めていない。図2より、全期間において4月から6月にかけては上層からの流出割合が多く、逆に7月から9月にかけては特に中層からの流出割合が多い。また7月では、観測年によって大きく変動することがわかる。これらのことから、対象としているレナ川流域は、土壌中の深さ方向の流出が季節や年によって大きく変動することがわかる。

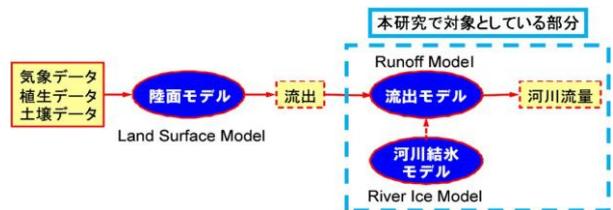


図1. 分布型水文モデルの構成

表1. タイプ別の土壌特性

land-cover types	$k_s (\times 10^6 \text{ m/s})$	$\theta_s$
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

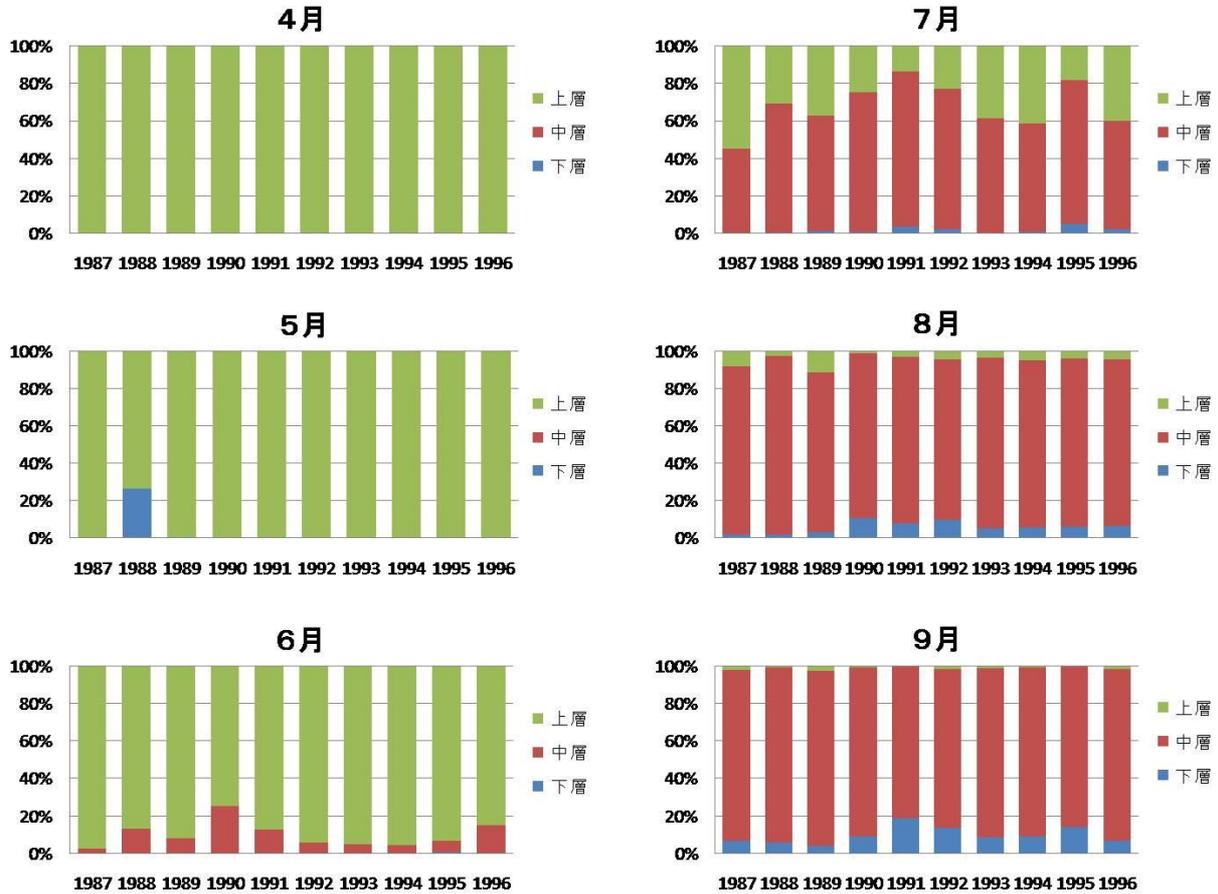


図2. 土壌中の深度別流出量割合 (1987年-1996年)

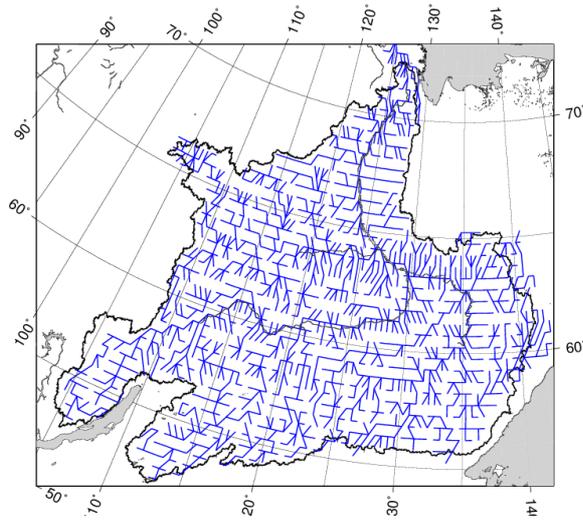


図3. レナ川流域の0.5°グリッドの河道網

## 2.2. 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ている。この洪水追跡には、陸ら<sup>9)</sup>の河道追跡スキームを採用し、Oki et al.<sup>10)</sup>が全球を対象に作成した0.5°グリッドの河道網を介して流域下流端までの洪水流の追跡を行った。図3に、レナ川流域の0.5°グリッドの河道網を示す。洪水流の追跡には、kinematic wave法を採用し、河道は矩形断面とし、河道幅は集水面積の関数で与えている<sup>3)</sup>。

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。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ている。

また本研究では、陸面モデルで計算される余剰水がグリッド内の河道に至るまでのプロセスを遅れとして考慮する変換過程モデル (以降「グリッド集中モデル」と呼ぶ) を導入している。陸面モデルと流出モデルは、図4に示すようにグリッド集中モデルによって結合される。グリッド集中モデルは、山田<sup>11)</sup>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る。

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



図4. 陸面モデルと流出モデルとの結合

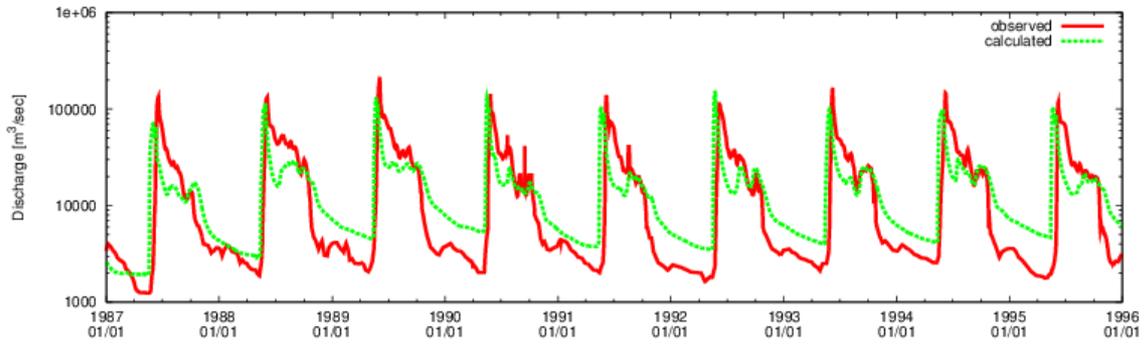


図5. 旧モデルでの流出量算定結果 (1987年-1996年)

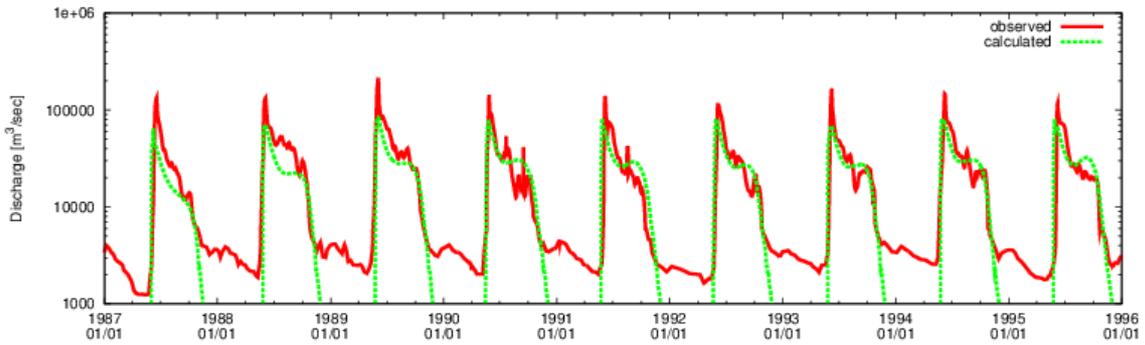


図6. 改良モデルで土壤凍結温度を0°Cとした場合の流出量算定結果 (1987年-1996年)

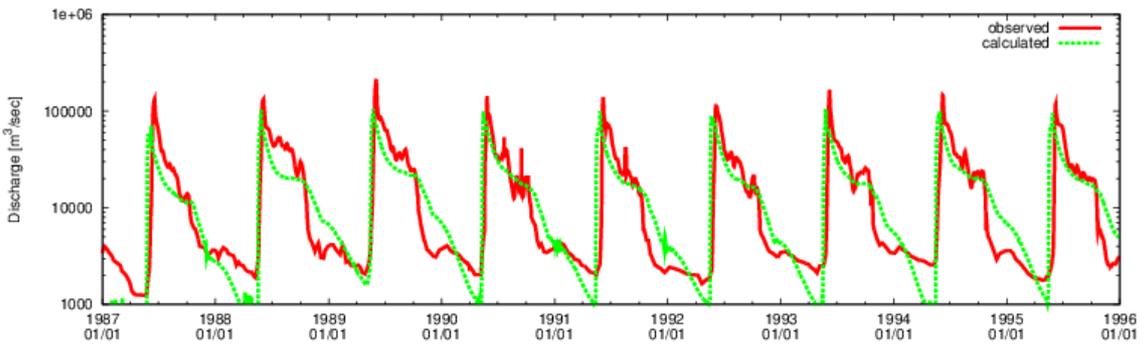


図7. 改良モデルで土壤凍結温度を-1°Cとした場合の流出量算定結果 (1987年-1996年)

ここで、 $q_s$  は流出高、 $\alpha_0$  および  $\beta$  は流域流出特性パラメータ、 $r$  は降雨強度である。

山田<sup>11)</sup>によれば、直接流出成分に Manning 則、基底流出成分に Darcy 則を用いると上式の  $\alpha_0$  および  $\beta$  は次のように表される。Manning 式の場合、

$$\alpha_0 = \frac{5}{3} \left( \frac{\sqrt{i}}{nL} \right)^{3/5}, \quad \beta = \frac{2}{5} \quad (2)$$

Darcy 則の場合、

$$\alpha_0 = \frac{k_s i}{L\theta_s}, \quad \beta = 0 \quad (3)$$

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、 $\theta_s$  は空隙率である。

これまで筆者ら<sup>4)</sup>は計算を簡単化するため、陸面モデルで深度別に計算されている流出水を一旦合計し、その後、観測流量を再現できるように試行錯誤的に求めた一定率を与えて、直接流出成分と基底流出成分の2成分に再分配する方法をとっていた(以降「旧モデル」と呼ぶ)。しかし、図2に示したように、土壤からの流出は、深さ方向に流出に寄与する割合が季節によ

って大きく変動している。今後起こりうる環境変動にも対応するためには、こうした点も考慮する必要がある。このため、旧モデルで行っていた陸面モデルからの流出成分を便宜的に一定割合で分配する方法ではなく、各層で計算されている流出成分それぞれを流出モデルに組み込むこととした。本研究では、深度別に計算されている流出成分のうち、1層目を表面流とみなして Manning 則を適用し、以下の層は地中流とみなして Darcy 則をそれぞれの層に適用した。なお、式(2),(3)の各係数は、飽和透水係数および空隙率については表1の陸面モデルと同じ値を各グリッドに与え、粗度係数は水理公式集を参考に山林の0.7(m-s)を、斜面勾配および斜面長については実測流量が再現できるように決定し、 $i=10^\circ$ 、 $L=50\text{m}$ として全グリッドに一定値を与えている。

さらに冬季期間中については、陸面モデルで計算されている全20層の土壤温度を用いて、土壤凍結についても考慮することとした。具体的には、凍土中も水が移動することが知られているため<sup>12)</sup>、土壤がある温度以下になると土壤凍結が発生し、グリッド集中モデルから河道への流出を停止させるプロセスを組み込むこととした。

### 3. モデルの適用と流出量の算定結果

以上のようにして改良されたモデルをレナ川流域に 1987 年から 1996 年まで連続的に適用した。これまでのモデルとの比較を行うため、旧モデルによって計算した結果を図5に、今回の改良モデルで計算した結果を図6, 7に示す。図6, 7の計算結果は、グリッド集中モデルから河道への流出を保留する土壤温度（凍結温度）の相違によるもので、それぞれ0°C, -1°Cとした場合の結果である。冬期間の流量がやや多めに計算されているものの、全体としては旧モデルによる計算結果は良好である。今回の改良モデルでは春から秋にかけては実測流量を概ね再現でき、特に保留温度を0°Cとした場合では初冬の流量の急激な低下をよく再現している。しかし、冬期間の計算流量は凍結温度を-1°Cに設定した場合は凍結温度を0°Cとしたものよりは改善されるものの、実測流量よりもかなり小さな値が計算されており、冬期流出を再現できているとは言い難い。

流量の再現結果だけを見れば、旧モデルは計算が容易で、なおかつ全体的に良好な結果を提供できるといった点で有利である。これに対し、今回のモデルは冬期間の再現性に問題は残されているものの、土壤深さ方向の流出割合を季節的に変化させることもでき、将来の気候変動等にも利用できるといった点で有利である。現在、1996年の計算までしか行っていないが、2000年以降の降水量が増加した状態での計算を行い、更に検討を進める必要がある。

本研究の流出モデルの入力値は、陸面モデルで計算されている地表から深さ約2mまでの土中水である。旧モデルでは、これを減衰係数の小さな貯留型モデルで土壤凍結に関係なく長期間流出させることで冬季流量を保証しているのに対し、今回のモデルでは凍結した場合に流出モデルへの入力を保留したため、冬期間の流量が小さな値となった。あくまでモデルでの計算結果であり、新たな観測結果を待たなくてはならないが、場合によっては、地表近くの土壤以外の流出システムを考える必要がある。

### 4. おわりに

本研究では、陸面モデルで計算される土壤からの流出水を入力値として河道網上で洪水追跡する流出モデルによりレナ川流域の流出量の算定を行った。

将来にわたる温暖化の影響や季節・経年変動を考慮するため、

1) 陸面モデルで全20層にわたり計算されている流出成分それぞれをモデルに組み込む

2) 冬期の土壤凍結プロセスを組み込む

こととした。

本モデルを適用した結果、春から秋にかけては実測流量を概ね再現でき、特に保留温度を0°Cとした場合では初冬の流量の急激な低下をよく再現できたものの、冬期間は実測流量よりもかなり小さな値が計算されており、冬期流出を再現できているとは言い難い。しかし別の視点から考えると、陸面モデルで計算されている流域への入力値は、ただ地表から深さ約2mまでの土中水である。そのため冬期間の流出は、別の流出システムを考慮すべきとも考えることもできる。何れにしても、モデルでの計算上の話であり、今後の観測結果を待って更なる改良を加える必要がある。

### 参考文献

- 1) Peterson BJ, Holmes RM, McClelland JW, Vorosmarty CJ, Lammers RB, Shiklomanov AI, Shiklomanov IA, Rahmstorf S. Increasing River Discharge to the Arctic Ocean, *Science*, **298(5601)**, 2171-2173, 2002.
- 2) Yang D, Kane DL, Hinzman LD, Zhang X, Zhang T, Ye H. Siberian Lena River hydrologic regime and recent change, *Journal of Geophysical Research*, **107(D23)**, 4694, doi: 10.1029-2002JD002542, 2002.
- 3) 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.
- 4) 小野寺政憲・八田茂実・朴昊澤・山崎剛・山本一清：北極圏における分布型水文モデルの適用，土木学会北海道支部論文報告集，**67**，B-39，2010.
- 5) Yamazaki T, Yabuki H, Ishii Y, Ohta T, and Ohata T, 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.
- 6) Clapp RB, Homberger GM, Empirical equations for some soil hydraulic properties. *Water Resour. Res.* 14, 601-604, 1978.
- 7) Suzuki, R and Ohata T, Dataset for Water and Energy Cycle in Siberia Version 1, Published by GAME-Siberia, 2003.
- 8) 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.
- 9) 陸旻皎・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.
- 10) Oki T, and Sud YC, Design of Total Runoff Integrating Pathways (TRIP) - A global river channel network, *Earth Interactions*, **2**, 1998.
- 11) 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.
- 12) 所哲也・石川達也・赤川敏：アイスレンズの成長を抑制した凍土透水試験法の提案，地盤工学ジャーナル，vol.5, No.4, 603-613, 2010.