

分布型水文モデルの Lena 川流域への適用

Application of A Distributed Hydrological Model to The Lena River Basin

苦小牧工業高等専門学校
北見工業大学
海洋研究開発機構地球環境観測研究センター
東北大学大学院理学研究科
名古屋大学大学院生命農学研究科

○正会員 八田茂実 (Shigemi HATTA)
正会員 早川 博 (Hiroshi HAYAKAWA)
朴 昊澤 (Hotaek PARK)
山崎 剛 (Takeshi YAMAZAKI)
正会員 太田岳史 (Takeshi OHTA)

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要素となっている。北極海は北アメリカ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い。ユーラシア側から北極海に流入する主たる河川は Lena 川・Yenisei 川・Ob 川といった世界的な大河川であるのに対し、北アメリカ側の大河川としては Mackenzie 川が挙げられるものの、集水面積・年平均流量ともにユーラシア側の 3 河川の 1/5 程度である。このため、ユーラシア側に位置するこれらの河川流量の変動は地球規模での熱循環・水循環に大きな影響を与えるものと考えられる。

本研究では、北方圏における水循環の現状の把握と環境変動による水循環特性の変動を予測することを最終的な目的としている。その先鞭として、本報告では Lena 川流域を対象に、重要な検証項目となる河川流量を分布型水文モデルによって再現した結果を報告する。

2 対象流域の概要

本研究で対象とした流域は、Lena 川流域である。Lena 川は Baikal 湖北側にそびえる山脈に発し、途中主要な支川である Aldan 川、Vilui 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、主河道長が約 4400km の大河川である。図-1 に流域の概要を示す。流域内では 40 地点程度流量観測点が設置され、日単位の流量資料が得られている。本研究では、Kusur 地点 (流域面積 243 万 km²) を最下流に設定し、内部の支流流域として、Aldan 川流域・Vilui 川流域・Lena 川上流域の 3 流域を設定した。各支流流域の諸元は表-1 に、また、図-1 に各流域の流量観測点および気象観測点の配置状況をあわせて示す。また、流域周辺の気象データは GAME CD-ROM No.8¹⁾ に収録されている Baseline Meteorological Data in Siberia (BMDS) を使用した。

図-2 は 1986 年～2000 年の各流量観測点における月間流出高の平均値を示したものである。いずれも 6 月の融雪出水が流出のピークとなっている。流域南部から開始する融雪洪水は下流側の結氷部を破壊しながら流下するため、下流側ほど融雪洪水によるハイドログラフの立ち上がりは急激なものとなる。流域南部の山岳地帯が支流流域となっている Aldan 川・Lena 川上流域では、8～9 月の降雨による影響も見られる。しかし、高緯度地方ではこの期間に降雨が少ないため、最下流である Kusur 地点では 8～9 月の流出高が前記の 2 流域よりも低下している。尚、Vilui 川流域 (#3329 地点) は他の 2 流域よりも明らかに流出高が低下している。

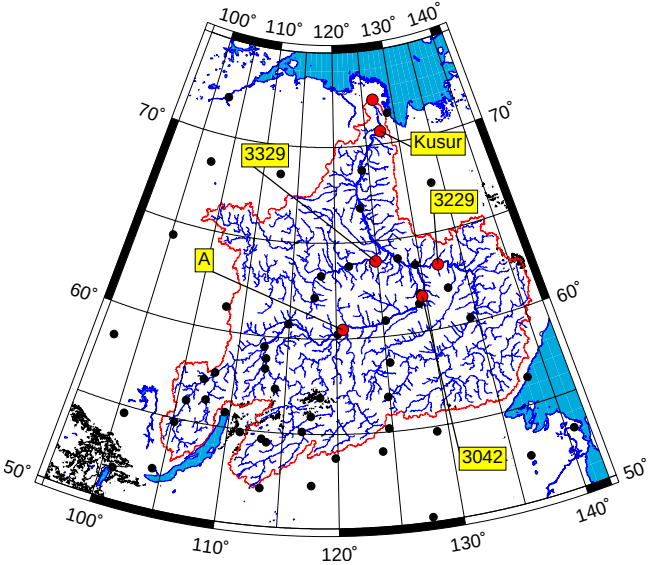


図- 1 Lena 川流域の概要 (数字は支流流域の流量観測点，黒丸は BDMS に収録されている気象観測点を表す)

表- 1 各支流流域の諸元

	point No.	Basin Area(km ²)
Aldan	#3229	696000
Vilui	#3329	452000
upper Lena	#3042	897000

この流域は元々降水量が少ないうえ、上流部には #3329 地点の流域面積の 1/3 を占めるダム流域が存在するため、人為的な影響もかなり含まれているものと考えられる。

3 分布型水文モデルの概要

本研究で採用した水文モデルは、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で合成する流出モデルの 2 つのモデルによって構成される。以下にそれぞれのモデルについて概説する。

3.1 陸面モデル

使用した陸面モデルは、山崎ら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²⁾。2LM の概念図を図-3

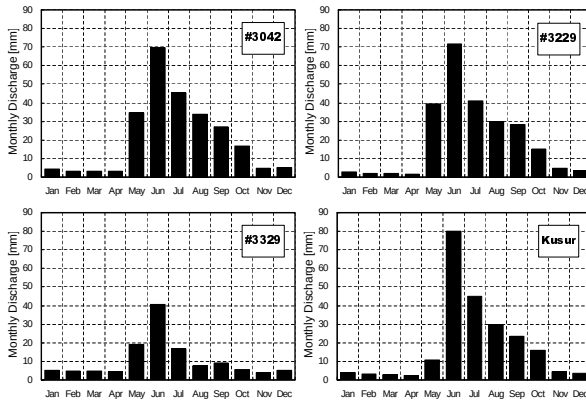


図- 2 Lena 川の月間流出高 (1986-2000 年の平均)

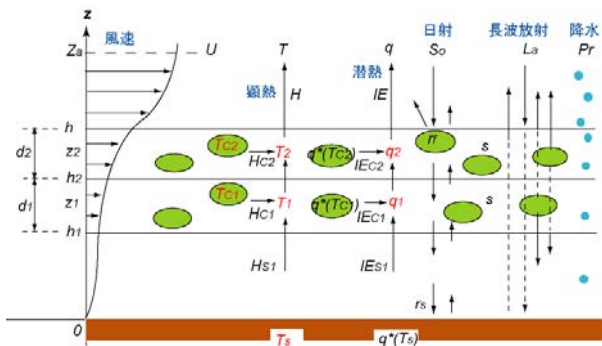


図- 3 植生 2 層モデルの概念図

に示す。植生サブモデルに関して、森林上 (C2) と森林内 (C1) での水・エネルギーフラックスは、次式によって計算される。

$$C \frac{dT_{Ci}}{dt} = S_{Ci} + L_{Ci} - H_{Ci} - LE_{Ci} \quad (i = 1, 2) \quad (1)$$

ここで、 T_{Ci} は各層のキャノピ温度、 S_{Ci} と L_{Ci} は吸収される日射量と長波放射量、 H_{Ci} は顕熱フラックス、 LE_{Ci} は潜熱フラックスである。 LE_{Ci} の中で大気からのフォーシングに対して植物の生理的反応を表す気孔コンダクタンス gs は以下の Jarvis 型モデルによって与えている。

$$gs/g_{smax} = f_1(PAR) f_2(T_a) f_3(VPD) f_4(\theta) \quad (2)$$

$$f_1(PAR) = \frac{PAR}{PAR + 1/a} \quad (3)$$

$$f_2(T_a) = \left(\frac{T_a - T_{min}}{T_0 - T_{min}} \right) \left(\frac{T_{max} - T_a}{T_{max} - T_0} \right)^{\frac{T_{max} - T_0}{T_0 - T_{min}}} \quad (4)$$

$$f_3(VPD) = 1 / \left[1 + \left(\frac{VPD}{D_{50}} \right)^b \right] \quad (5)$$

$$f_4(\theta) = 1 - \exp[k(\theta_{min} - \theta)] \quad (6)$$

ここで、 g_{smax} は最大気孔コンダクタンス、 PAR は光合成有効放射量、 a は $PAR = 0$ の時の傾き、 T_a は気温、 T_0 は最適温度、 VPD は飽差、 D_{50} は g_{smax} の 50% の時の VPD 、 b は曲率、 θ は土壌水分量、 θ_{min} は気乾含水率、 k は定数である。これらの各パラメータは、ヤクーツク (東シベリア)、

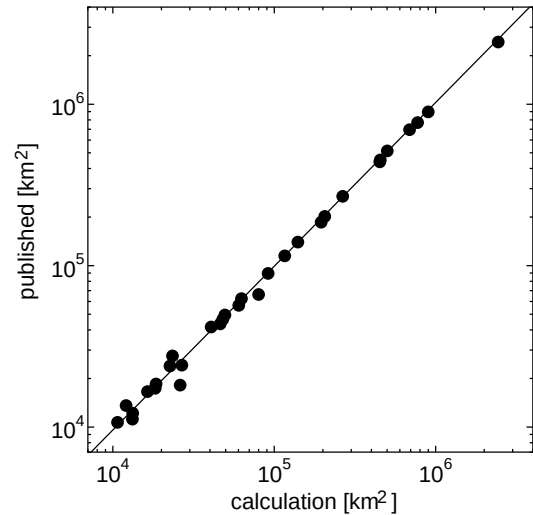


図- 4 河道網モデルによる内部流域の集水面積の再現性と公表されている集水面積の比較

母子里 (北海道)、瀬戸 (愛知) で行われている気象、水文、森林生理生態測定の間葉レベルでのコンダクタンス測定値から決定した。

更に積雪サブモデルは寒冷地で発達するしもざ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、積雪及び融雪のプロセスをモデル化したもので、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融点付近で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。

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。流域モデルとなる河道網は、計算時間を考慮して $5' \times 5'$ グリッドとした。河道網の算出にはアメリカ地球物理データセンター (NGDC) が提供している空間分解能 $2'$ の標高値である ETOPO2 とアメリカ地質調査所 (USGS) が提供している主要な河道位置を表す Hydro-1K Stream data set for Asia を利用した。当初は空間分解能 $5'$ の標高値である ETOPO5 を直接利用する予定であったが、ETOPO5 ではメッシュ間の標高差がほとんどなく、適切な河道網が得られなかったため ETOPO2 の利用に切り替えた。このため、ETOPO2 から $5' \times 5'$ の DEM を再構成し、Hydro-1K の河道位置が $5' \times 5'$ メッシュの中央を通るよう変換し、早川によって提案されている手順³⁾ でグリッド型の流域河道モデルを作成した。図-4 は、このようにして得られた河道網による内部流域の集水面積と各地点で公表されている集水面積を比較したものである。図より、作成した河道網は妥当なものと考えられる。

一方、単位河道での洪水追跡には、陸⁴⁾ の河道追跡スキームを採用し、メッシュからの流出量をメッシュ標高値から作成した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、単位メッシュからの流出をメッシュ中心に集中させて河道に入力値を与えるものとし、横流入は考慮していない。さらに仮想流路を広幅矩形断面と

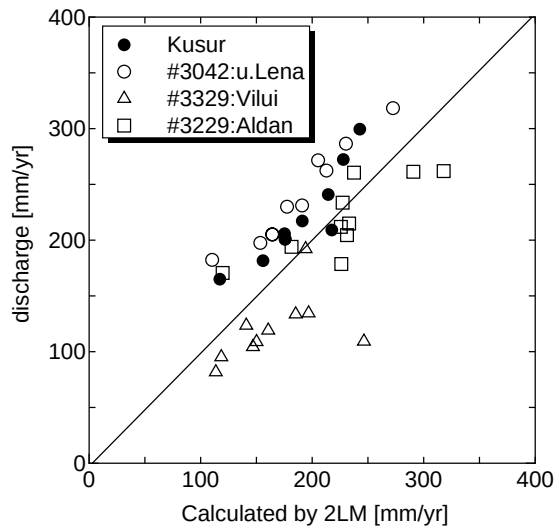


図-5 陸面モデルによる流域平均流出量と河川流出量の比較 (1986-1995)

仮定し、抵抗則に Manning 則を用いると、kinematic wave 法の基礎式は以下のように簡略化できる。

$$\frac{\partial Bh}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

$$Q = \frac{Bh^{5/3}i^{1/2}}{n} \quad (8)$$

ここで、 B は河道幅、 h は水深、 i は河床勾配、 n はマンニングの粗度係数、 Q は流量である。上式の特性曲線は

$$\frac{dQ}{dt} = 0 \quad (9)$$

$$c = \frac{dx}{dt} = \frac{5i^{0.3}Q^{0.4}}{3n^{0.6}B^{0.4}} \quad (10)$$

となり、流量 Q が減衰なしに速度 c で下流に伝播することを示している。つまり、実際の計算では、陸面モデルで計算されたメッシュごとの流出量を河道網モデル上流端への入力として与える。そして単位河道における各流量の伝播時間計算し、その下流端への到達時刻を求める。更に到達時間に従って流量を再配分し、下流端での流量時系列とすると同時に、接続する次の河道への流入量として計算を進めることになる。

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

陸面モデルを対象地域へ適用するに当たっては、対象地域を $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ メッシュに分割することとした。各メッシュには、それぞれ 8 タイプに分類した植生および土壌特性、更に LAI の季節変化を与え、空間分布を考慮している。また、気象データは 77ヶ所の BMDS を用いて近距離補完法により $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 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、日射量、最高・最低気温、湿度及び風速である。

図-5 は、陸面モデルを 1986 年から 1996 年の 10 年間に適用し、計算されたメッシュ流出量を Lena 川の内部流域ごとに流域平均値 (年値) を求め、観測されている各流域の年

間流出量と比較したものである。Aldan 川流域では、陸面モデルによる流出量と河川流出量はほぼ一致しているのに対し、Lena 川上流域では陸面モデルによる計算値が 40～50mm/yr 程度小さく、Vilui 川では 20～50mm/yr 程度実測流出量を上回っている。この結果は、入力値となる BMDS データが流域面積に対して非常に少ないこと、Vilui 川流域ではダムによる水利用を考慮していない点などが原因と考えられる。しかし、得られるデータの制約が多いながらも、ほぼ満足のいく結果であると考えている。

4.2 流出モデルの適用

前節で計算された陸面モデルによるメッシュ流出量を再配置して流出モデルの入力として流量の算定を行う。計算に際しては、大きな支川流入のない区間で上流と下流に流量観測所のある区間 (図-1 中の A～#3042 区間; 区間長 670km) のについて、上流側 (A 点) の流量を下流させて下流側 (#3042 地点) の流量を再現できるような河道のパラメータ (河道幅 2000m, マニングの粗度係数 $n = 0.05\text{m}^{-1/3}\text{s}$) を設定し、これと同一のパラメータを全メッシュに与えた。それ以外には特別なパラメータの調整は行っていない。また、計算の開始前に 1986 年のデータを用いて 2 回流出計算を行ったうえで、計算終了時の河道網内の流量を初期流量として計算を行っている。尚、河道勾配が逆勾配となる区間については 0.0001 として計算を行った。

図-6 は、3 つの内部流域で観測された流量を入力として与え、最下流の流出量を計算した結果を示している。内部流域の流出量を与えた場合には、本研究で採用した kinematic wave を用いた河道網追跡モデルで流量を再現可能であることを示している。

前述したように、Vilui 川流域は流域面積の 1/3 を占めるダム流域が含まれている。このため、流出量の算定に当たっては、#3329 地点には観測されている流量を入力値として与え、それ以外の部分は陸面モデルで計算される流出量を河道網モデルの入力として与え計算を行った。図-7 はこのようにして得られた 1986 年から 1995 年までの 10 年間の日流出量を算定した結果を示している。図より、計算対象期間では全体として流出量を再現できていることがわかる。しかしながら、現在のところ河道の結氷効果を考慮していないため、融雪出水の開始する時期に、計算流出量のほうが実測流出量よりも早く現れる傾向を有する。

5 おわりに

本研究では、植生・積雪・土壌の熱・水交換を考慮できる陸面モデルと、河道網上の洪水追跡による流出モデルを組み合わせた分布型水文モデルにより Lena 川流域の流出量の算定を試みた。1986 年から 1995 年までの期間に適用し、全体としては流出量を再現できることを確認した。現在のところ、河道の結氷効果を考慮していないため、Lena 川の大きな特徴である春先の洪水の集中と遅れについては再現できていない。今後は、河川の結氷厚、解氷時期の空間分布を推定するとともに、結氷を考慮した河道追跡を行う必要がある。

謝辞: 本研究は科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業 (JST-CREST) 「北方林地帯における水循環特性と植物生態

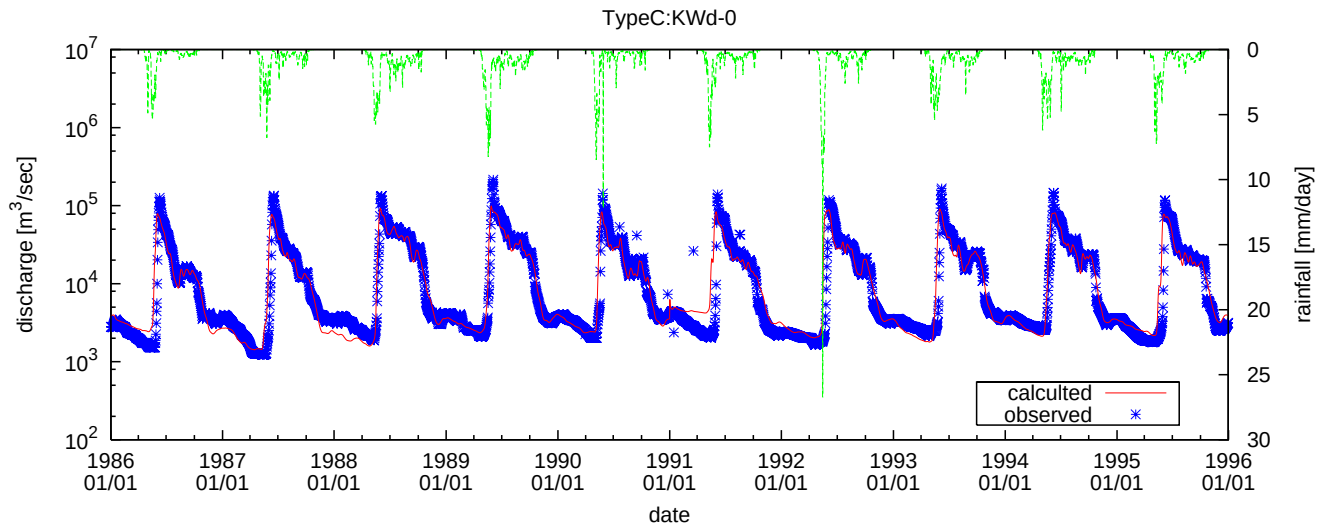


図- 6 内部流域の実測流量を与えた場合の流出量の算定結果 (Kusur 地点)

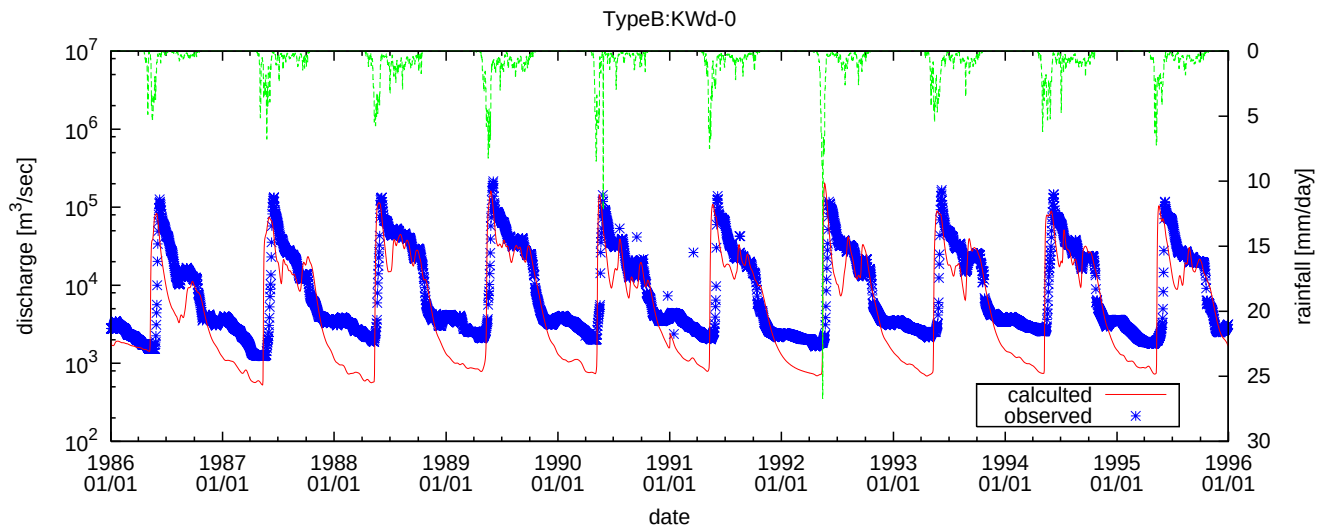


図- 7 Vilui 流域にのみ実測流量を与えた場合の流出量の算定結果 (Kusur 地点)

生理のパラメータ化(「水の循環系モデリングと利用システム」領域, 代表・太田岳史, 平成14年より)」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) Suzuki, R. and T. Ohata, Dataset for Water and Energy Cycle in Siberia Version 1, Published by GAME-Siberia, 2003.
- 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**, 204-515, 2004.
- 3) 早川博, 流域の地形構造を考慮した降雨流出系の確率応答と流域スケールに関する研究, 北海道大学博士論文, 1997.
- 4) 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.