

分布型水文モデルの Lena 川流域への適用 (2)

Application of A Distributed Hydrological Model to The Lena River Basin

苫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ため、Lena 川流域を対象に、北方圏の河川流量を適切に推定できる水文モデルの構築を目的としている。

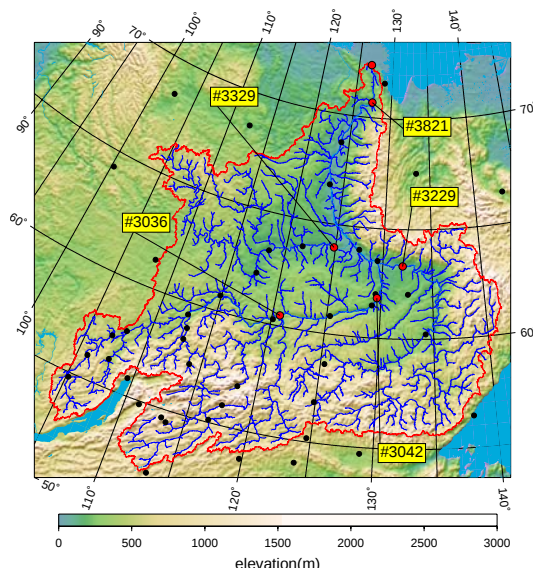


図- 1 Lena 川流域の概要 (数字は支流の流量観測点, 黒丸は BMDS に収録されている気象観測点を表す)

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 km^2 、主河道長が約 4400km の大河川である。Lena 川流域は、他のシベリアの大河川に比べ流域の大半が永久凍土に広く覆われている。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 km^2 、図-1 中の #3821 地点) 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～2003 年の各流量観測点における月間流出高の平均値を標準偏差とともに示したものである。対象流域では 5～6 月に融雪流出が観測され、年最大流量は 5 月下旬から 6 月上旬に観測されている。融雪のタイミングによっては最大流量が 5 月あるいは 6 月に発生するため、いずれの流域でも 5～6 月での標準偏差が大きくなる。また、冬季間 (10～4 月) の流出量は夏期 (5～9 月) にくらべると極端に小さくなっている。これは、凍土に覆われた流域では中間流の貯水容量が小さいため、冬期の基底流は小さく、夏期の流出は大きくなるためである²⁾。支流流域別に見ると、Aldan

表-1 各支流流域の諸元

River	Station ID	Basin Area(km ²)
Aldan	#3229	696000
Vilui	#3329	452000
upper Lena	#3042	897000

川・Lena 川上流域では、8~9 月に流域南部・東部の山岳地帯の降雨の影響により、夏期の流出量も大きく現れている。降雨は年変動が大きいため、この期間の流出量の標準偏差も大きくなる。高緯度地方では降水量が小さいため、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。また、Vilui 川流域 (#3329 地点) は他の 2 流域よりも夏期流出量が小さく、冬期流出量が多くなっているが、これは夏期の降雨が小さいことに加えて、上流の Chernyshevskiy 付近 (63.03N, 112.47E) にある最大貯水容量 35.9km³ のロックフィルダムの影響によるものである³⁾。

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の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

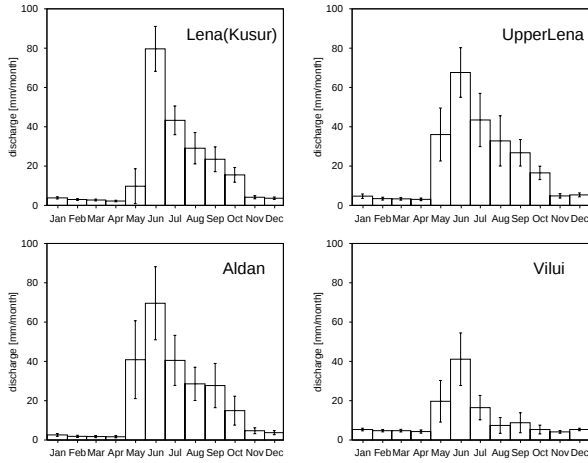


図- 2 Lena 川の月間流出高 (1986-2000 年の平均)

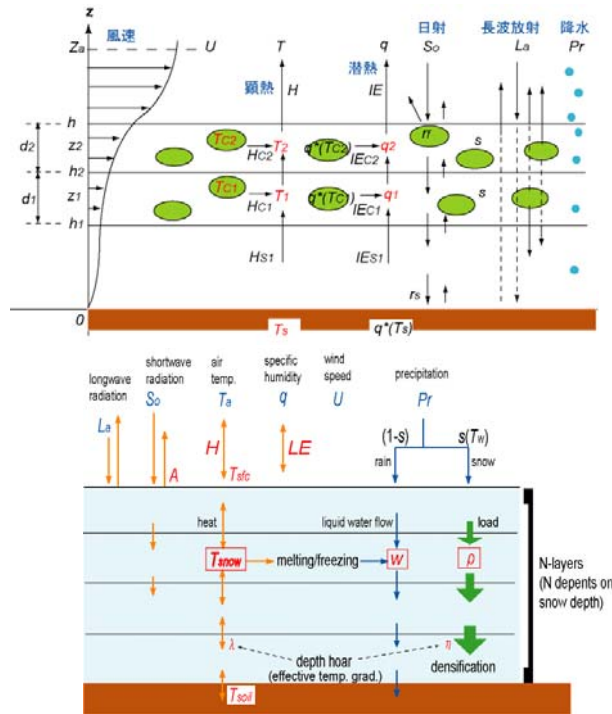


図- 3 陸面モデルの概念図

考慮して分布型的水文モデルを用いることとした。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)で、植生上下2層、積雪、土壌のサブモデルから構成される⁴⁾。2LMの概念図を図-3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。

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

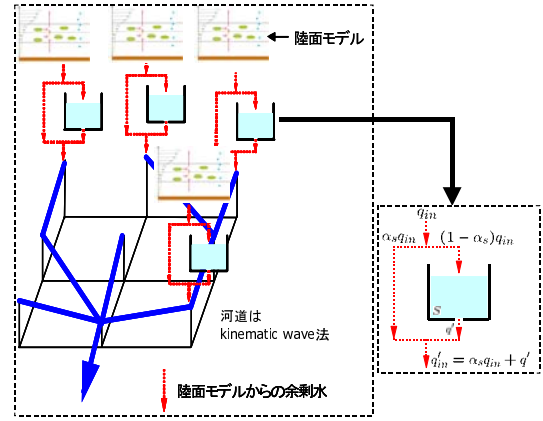


図- 4 流出モデルの概念

ここで、 T_{Ci} は各層のキャノピー温度、 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。

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

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

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

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

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

ここで、 gs_{max} 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 gs_{max} 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)、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個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。

一方、単位河道での洪水追跡には、陸⁵⁾の河道追跡ス

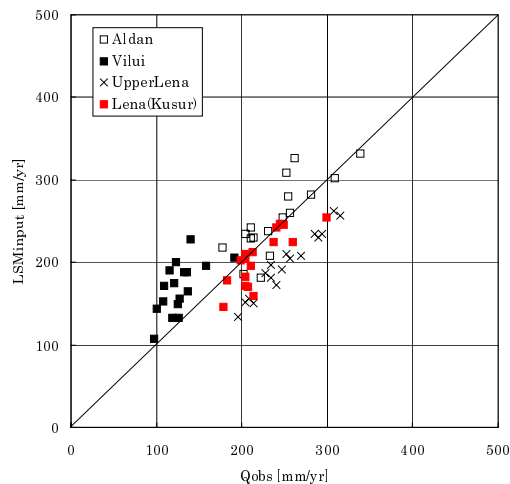


図- 5 陸面モデルによる流域平均流出量と河川流出量の比較 (1986-2003)

キームを採用し、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、kinematic wave 法を採用した。具体的には、図-4 に示すように、単位メッシュからの流出 q_{in} を一定割合 α_s で直接流出成分 $\alpha_s q_{in}$ と基底流出成分 $(1 - \alpha_s) q_{in}$ に分け、直接流出成分と線型貯留関数を介した基底流出成分をメッシュ中心に集中させて河道に流入値を与えるものとし、横流入は考慮していない。

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 forcing 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 2003 年の 18 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。Lena 川最下流流域では、両者はほぼ一致している。支流域別に見ると、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 $40 \sim 50 \text{ mm/yr}$ 程度小さく、Vilui 川では $20 \sim 50 \text{ mm/yr}$ 程度実測流出量を上回っている。Vilui 川流域ではダムの影響を考慮していないため止むを得ないものと考えられる。一方、図-6 は、流域平均降水量と流出高から求めた各支流域の 1986 年～2003 年の水収支の平均を示している。図によれば、支流域の中では最も温暖な Lena 上流域では、流出高と降水量の差が最も小さくなっている。また、紙面の都合から詳細を示すことはできないが、Lena 川上流域の Bikal 湖付近では年流出高が年降水量とほぼ一致している箇所も

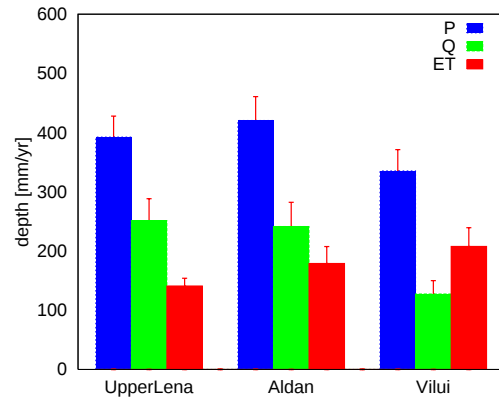


図- 6 流域平均降水量と流出高から求めた各支流域の水収支 (1986-2003)

あり、Lena 川上流域では流出量に対して降水量を過小に評価していることが原因と考えられる。

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、Hydro-1k で実河道の与えられているメッシュは河道部、それ以外のメッシュは斜面部として、それぞれにモデルパラメータを与えた。河道部に関しては、衛星写真から低水時の河道幅を測定し、その地点の集水面積と河道幅の関係を次式のように与えた。

$$B_c = 200A^{0.68} \quad (7)$$

ここで、 B_c は河道部の河道幅 (m)、 A はその地点の集水面積 (km^2) である。また、河道部の粗度は、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 #3036 ~ #3042 区間; 区間長 670km) について、上流側 (#3036 点) の流量を流下させて下流側 (#3042 地点) の流量を再現できるような粗度を選定した。また、斜面部に関しては河道幅にメッシュ幅を与え、等価粗度は水理公式集を参考に 0.7 を採用した。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。

一方、基底流量を与える線形貯留関数の時定数は、Kusur 地点の秋季～冬季の減水部より決定した。直接流出量への配分率 α_s は、冬季間の流量と一致するように試行錯誤的に求め、0.7 を採用した。この値は、Shepelev ら⁶⁾ による、流出に占める凍土中および凍土下からの地下水量の割合が 20 ~ 30% であるとの研究結果ともほぼ一致している。

図-7 はこのようにして得られた 1986 年から 2003 年までの 18 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。図-8 は、18 年間の日流量の平均値の実測値と計算値を各支流域別に比較したものである。全流域で河道の結氷効果を力学的に説明するモデルを組み込んでいないため、計算流出量のほうが実測流出量よりも融雪出水による洪水が早く現れているとともに、秋季の実測値に見られる結氷による急速な流量の低減を再現できていない。この影

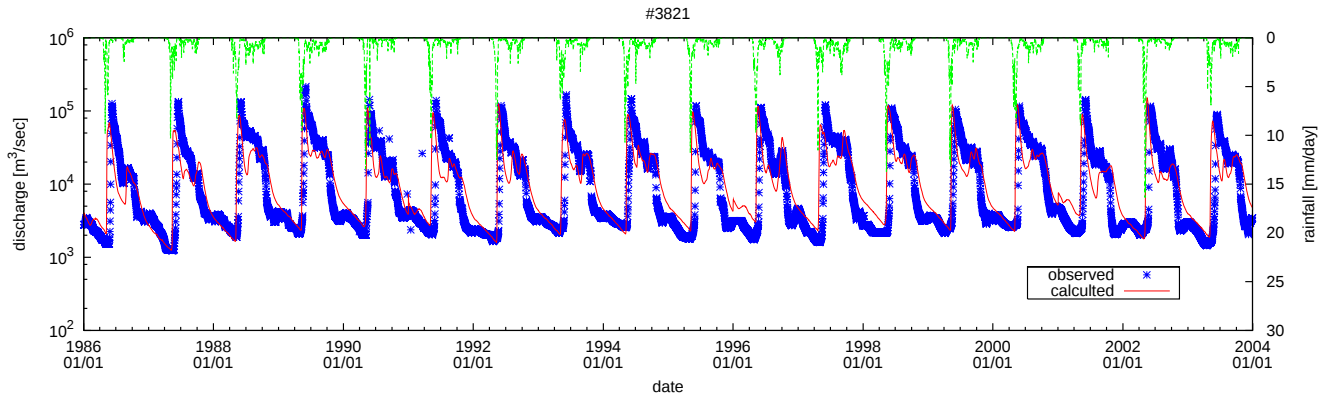


図- 7 Kusur 地点の流出量の算定結果 (1986-2003)

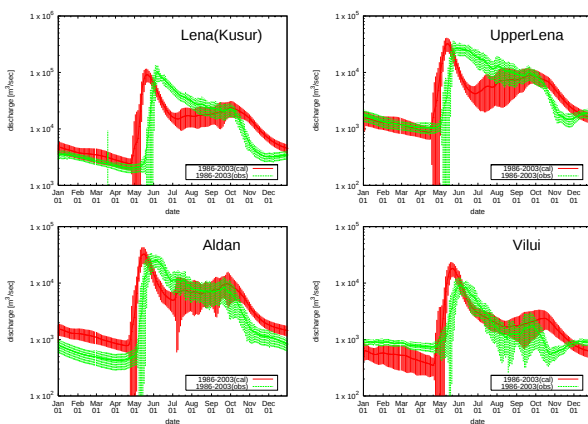


図- 8 1986-2003 年の日平均ハイドログラフの各支流の算定結果 (傍線は標準偏差)

響は、Lana 川最下流で特に大きくなっている。また、冬の低水流量は計算メッシュに配置した貯留関数で与えられるが、試行錯誤的に全流域で一定の定数を与えている。この結果、冬期流出量の多い Lena 川上流に全体が引きずられる形となり、寒冷な Aldan 川、貯水池の影響を受けている Vilui 川では、流出量をそれぞれ過大・過小評価している。また、Lena 川上流域では融雪出水直後に計算流出量が急激に落ち込み、その影響が Lana 川最下流まで及んでいる。

先に示したように、特に Lena 川上流域では、雨量資料やその補間方法の問題、あるいは Bikal 湖付近で流域界が閉じていない可能性も考えられる。これらの点については今後検討すべきである。

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 2003 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。これまで、単年で流出量を再現した報告はあるが⁷⁾、18 年分の流量を再現した例はなく、これは特筆すべきものである。

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、環境変動に伴う流出量の将来予測を行うには、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。また、冬期の河川流量を構成すると考えられる、地中からの流出に関しても、現象の把握とそのモデル化など検討が必要である。

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)」および科学技術振興機構委託研究「北方圏での分布型流出モデルの開発と適用」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) Kane, D.L., The impact of Arctic hydrologic perturbations on Arctic ecosystems induced by climate change, *Global Change and Arctic Terrestrial Ecosystems, Ecol. Stud. Ser.*, **124**, 63-81, Springer Verlag, New York, 1997.
- 3) Ye, B. and Yang, D. and Kane, D.L., Changes in Lena River streamflow hydrology: Human impacts versus natural variations, *Water Resour. Res.*, **39**(7), 1200, doi:10.1029/2003WR001991, 2003.
- 4) 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**, 204-215, 2004.
- 5) 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.
- 6) Shepelev V.V., Tolstykhin O.N., Piguzova V.N., Permafrost hydrogeological conditions of Eastern Siberia Novosibirsk, Science. 187, 1984. (in Russian)
- 7) Ma X., Fukushima, Y., A numerical model of the river freezing process and its application to the Lena River, *Hydrol. Process*, **16**, 2131-2140, 2002.