

30. 全球河道網データの作成と分布型流出モデルの適用

Delineation of Global Channel Network and its Applications to Hydrological Analysis of
Continental Scale Large Basins

陸 旻皎¹・早川典生²・本田 諭³

Minjiao LU, Norio HAYAKAWA and Satoshi HONDA

Abstract: The objective of this study is to develop a channel routing model to take into account the attenuation of runoff in channel networks of continental scale basins. Channel networks showing the flow direction of runoff, and the optimal routing order keeping the routing be carried out from upstream channels to downstream channels are derived from geographic information at 1-degree resolution. A distributed routing model using multi-step multi-reach Muskingum-Cunge scheme is newly developed and implemented. It is applied to major continental scale basins including Chang Jiang River and Mississippi River. The runoff over these basins are computed from ISLSCP data set by using XinAnJiang rainfall runoff model, and then routed to the hydrological stations along these rivers. The computed and observed hydrographs are compared. It is shown that the runoff concentration within channel networks of these basins take one to six months. This shows the importance of routing model in hydrological analysis of seasonal water and heat balance.

KEYWORDS: *Muskingum method, river routing, digital channel network, continental scale large basin, land surface hydrological processes*

1. はじめに

長期的な水資源管理を行う上で、気候システム解明に基づく気候変動の予測・モニタリングは不可欠である。現在、気候システム解明に向けて大気大循環モデル (GCM : General Circulation Model) を用いた研究が精力的に進められているが、ほとんどの GCM では陸域における表面流出の河道内の集中が考慮されていない。一方、現実における河川は陸域最大の水輸送の経路であり、海域へ淡水を供給している。この淡水供給が海面付近の塩分濃度、海水そして気候システム全体に大きな影響を及ぼしている可能性が指摘されている。本研究は、分布型流出モデリングの技術を大陸スケール大流域に適用し、流出の河道における集中を物理的に表現することを目的としている。流域内各地点で発生した流出の河道内の集中過程を表現することにより、世界中の大河川の河川流量を用いて陸面水文モデル、あるいは気象モデルの中で使われているパラメタリゼーションを検証することが可能になる。

本研究では、まず数値地理情報から陸域をメッシュに分割した時の各メッシュの流出経路を示す全球数値河道網を作成するアルゴリズムを開発する。気象モデルの空間分解能がコンピューター技術の進歩に伴って高くなっていくことを考慮し、スケーラブルなものを目指しているが、既往の研究例や使用する気象データの分解能を考慮し、本研究では、全球を経度緯度 1 度メッシュでカバーする場合の数値河道網を作成する。

最後に著者らが提案した分布型水文モデリングシステム^{1),2),3)}を用いて分布型流出モデルを構築し、典型的な大陸河川である長江と Mississippi 川を対象に、ISLSCP データセットに含まれる全球水文気象データを用いて 1987,1988 年の水文流出解析を行う。

¹ 地球フロンティア研究システム Frontier Research System for Global Change, Seavans North 7F, 1-2-1 Shibaura, Minato 105-6791 Japan.

² 長岡技術科学大学 Nagaoka University of Technology, 1603-1 Kamitomioka, Nagaoka, Niigata 940-2188 japan

³ 東日本旅客鉄道株式会社 East Japan Railway Company

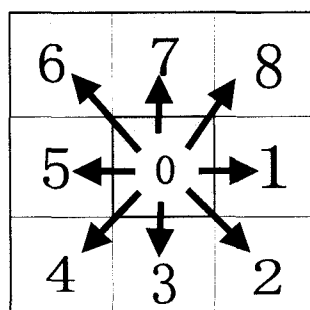


図-1 メッシュの流出方向の定義

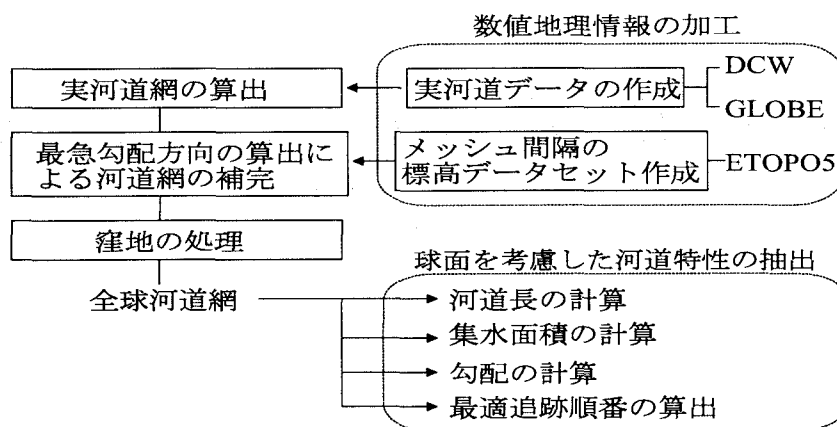


図-2 全球数値河道網の算出手順

2. 全球数値河道網の算出

本研究における河道網とは、各メッシュで発生した流出の流れ方向に流路を想定し、全メッシュを仮想の河道でつないだ、海域までの集中経路を示すものである。メッシュからの流出の経路として 図 1 に示す周囲 8 メッシュの方向を考え、各メッシュからの流出は一方向に限定する。

(1) 河道網算出手順

全球河道網算出のフローを 図 2 に示す。本研究では水域の位置を経度緯度のベクターデータとして記録した DCW (Digital Chart of the World) と全球陸域の標高を約 30 秒間隔で表現した GLOBE (Global Land One-km Base Elevation) を用いて、各メッシュの流出方向を算出するアルゴリズムを新たに提案する。

このアルゴリズムを適用した河道網算出の手順を以下に示す。

a) 実河道データセットの作成

DCW に含まれる水体に関するデータは河川の位置、そして大河川および湖の水際線から構成されている。データが非常に高密度であるが、すべての河道が正しく接続されている保証はない。数値河道網の算出に使用するためには

- データ量が大きく、処理効率が悪い；
- 河幅の大きな河道や湖沼の水際線などが含まれている；
- 経度緯度の位置情報のみで高さ方向の表現がなく流れ方向が決定できない。

などの問題点を有している。

そこで本研究では、作業の効率を考え河道データから大流域(陸域の約 7 割をカバー)を抽出するとともに、以下の 3 段階の処理を施すことで河道位置情報(以下、実河道データセット)を作成することにした。

- (1) プログラム処理：地理情報システム ARC/INFO によってエクスポートされる DCW データは、水域の位置を表す一繋ぎの線データとその線データに付加された認識番号とで構成される。本研究では、まず、各線データに関しては接続状況、長さなどの情報を抽出し、データベース化した。そして、このデータベースを元にプログラム処理により上流端の微小な支流(片側のみ接続があり長さが短い)と孤立した湖沼(流入がなく線データの両端点が同一)を削除した。
- (2) 手作業：プログラム処理によって自動的に判断することができない流入のある湖沼や川幅の大きな河道の水際線を地理情報システムを用いて修正する。ここでは、ARC/INFO を使用した。地図と確認しながら、手入力で大河川の中心線をデジタイズし、普通の線データに、また湖沼等の水体は中心点に置き換え、接続関係を修正した。

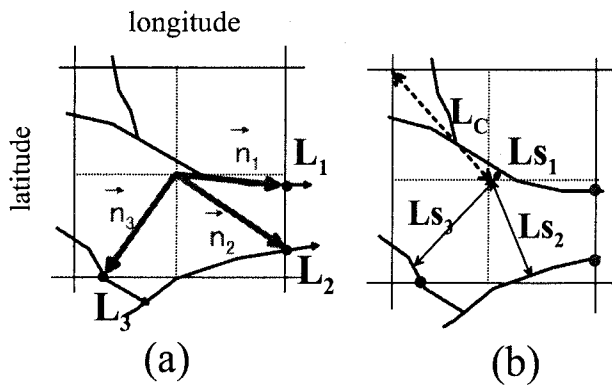


図-3 メッシュ流出方向の算出

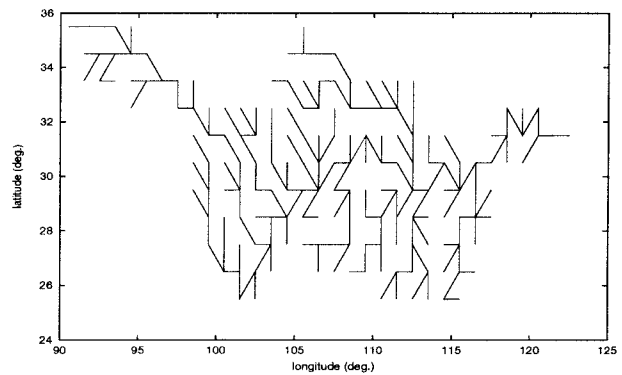


図-4 長江流域の空間分解能 1° 数値河道網

(3) 流れ方向の付加：上記の処理により湖沼や水際線が削除され、すべての河道が河道の中心を表す線データによって表現されるようになる。次に、線データの流れ方向を付加する必要があるが、ここでは空間分解能 30 秒の GLOBE 標高データセットを利用し、データ点に最寄りの標高値を与えるが、GLOBE データの無い地域では空間分解能 5 分の ETOPO5 の標高データを内挿して与える。

また、流れ方向を決定するためにはこの標高値を利用するのが自然であるが、GLOBE データで付加した標高では下流側の座標ほど低い標高を持つことが保証されていない。本研究では標高データを重視しつつ、流れ方向の衝突が起きないように決定する以下のアルゴリズムを考案した。

1. 標高と接続状況から、河道網の最上流となる線データをリストアップする。
2. 標高順に並び替えた最上流リストから 1 つ選択する。
3. 上流から最下流（標高データにおいて海域と判定される）まで追跡し、通過する線データをスタックに入れる（push）。
4. 海域へ達したら河道長を計算し、最短経路ならば保存する。
5. 他のルートが見つかるまでスタックからデータを取り出す（pop）。見つかったら、3 へ。スタックが空になったら 2 へ。

ここでいうスタックはコンピューター科学で良く使われているデータ構造であり、机の上に本を積んで行くようなものである。後から入れたものを先に取り出す先入れ後出しの特徴を有する。

以上の処理により、各最上流から海までの最短経路が算出され、上流から下流への流れ方向を定める。

b) 実河道データセットを用いたメッシュ流れ方向の算出

上記のアルゴリズムにより作成された実河道データセットを用いて、以下のアルゴリズムにより、各メッシュの流出方向を算出する（図 3 参照）。ここではじめて空間分解能依存性が導入されるが、本研究では、メッシュサイズを 1° とした。

まず、当該メッシュに含まれる河道データを抽出し、メッシュ外へ流出するものについてはメッシュ境界線との交点（流出点）の座標を求め、メッシュ中心から各流出点座標への単位ベクトル（ $\vec{n}_i$ ）を算出する。

この単位ベクトルに流出点座標へ集まる河道の合計長さ（ L_i ）とメッシュ内の河道位置による重み（ w_i ）を用いて重み付き平均単位ベクトル（ $\vec{n}$ ）を算出する。具体的には、

$$\vec{n} = \frac{\sum \vec{n}_i \times L_i \times w_i}{\sum L_i \times w_i}, \quad w_i = \exp -3 \times \frac{Ls_i}{L_c} \quad (1)$$

ここで Ls_i は流出点に流れ込む河道とメッシュ中心点との最短距離、 L_c はメッシュ中心から角までの距離である。

次に、周囲 3×3 メッシュのうち当該メッシュからの流出経路が通過するメッシュをチェックし（通過メッシュを定義）、上記の平均ベクトル（ $\vec{n}$ ）の向きに最も近いものを流出方向として決定する。

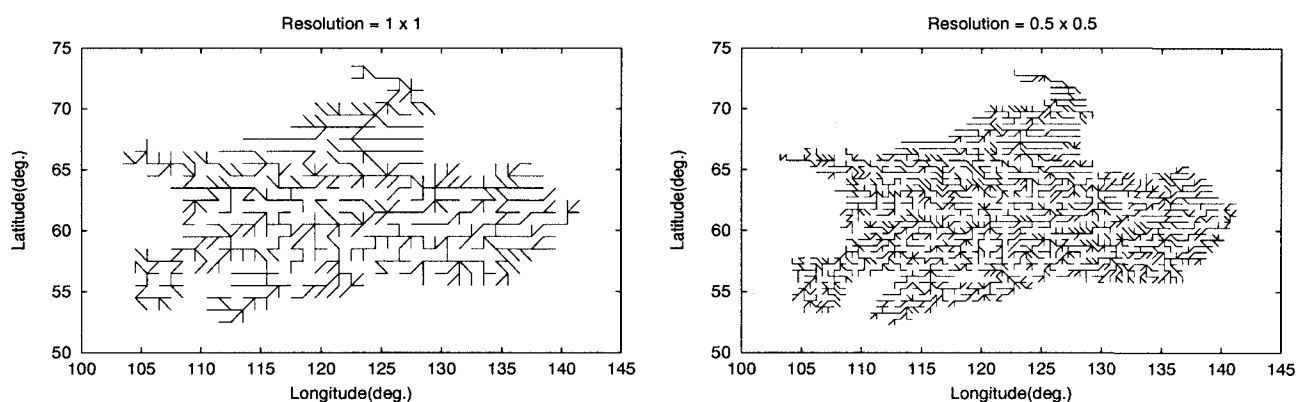


図-5 メッシュサイズの違いに対する河道網作成結果（レナ河）左：1.0°，右：0.5°

c) 標高データセットによる全球数値河道網の補完

上記の計算により、実河道の通過しているかなりのメッシュの流れ方向が決定されるが、実河道データのないメッシュの流れ方向は未定のままである。実河道データ作成の段階で大流域のみを抽出したために、全球陸域をカバーすることが出来ていない。そこで、流出方向の決まっていないメッシュについては、陸・渡辺らによって提案された手法⁴⁾を適用することで残りのメッシュの流れ方向を決定し、全球数値河道網を補完した。

陸・渡部らの方法では、DEMの標高データを用いて、最急勾配方向を計算し、メッシュの流れ方向としている。また、これでも流れ方向が決定されないメッシュについては、一次処理と二次処理を繰り返すことにより処理している。全球の空間分解能1°のDEMの作成には、空間分解能5分で全球をカバーする標高データETOPO5を用いた。メッシュの流出方向は、周囲8メッシュとの標高差と球面を考慮した距離から最も急な勾配となる方向（最急勾配方向）を計算し決定する。最後に、流れ方向の決定できないメッシュについては上記の処理を行った。

3. 全球数値河道網の検証

上記のアルゴリズムによって算出される数値河道網の例として、図4に長江の数値河道網、図5にレナ川の数値河道網を示す。また、レナ川については、左が分解能1°、右が分解能0.5°のもので、計算アルゴリズムが異なる空間分解能の河道を算出できることを示している。各流域において、流出の流れ方向が地図上の河道網と良く一致していることが確認されている。本研究では、さらに得られた全球数値河道網から、各大陸スケール大流域を抽出し、その河道長と流域面積を理科年表の公称値と比較した。図6、図7はそれぞれ流域面積、河道長についての結果である。流域面積については計算値が公称値とほぼ等しくなっているが、河道長については全体的に計算値が公称値を数%下回っている。これらは、計算値がメッシュを基本として算出されており、河道が2つのメッシュを結ぶ直線で表現されているためと考えられる。

4. 分布型流出モデルの概要

上記の全球数値河道網から大陸スケール流域を抽出し、陸らの分布型流出モデリングシステム³⁾を用いて、その流域の分布型水文モデルを構築することができる。以下にそのモデルの概要について述べる。このシステムでは、陸域を矩形のメッシュに分割して扱うもので、個々のメッシュは上記の河道網によって結ばれ、一つの流域をなす。各メッシュで算出された流出を河道追跡モデルで研究対象地点に追跡計算し、それらの地点のハイドログラフを得る。このシステムを用いれば、メッシュ水文プロセスを表すメッシュ水文モデルと、河道追跡モデルの中の計算スキームを実装することによって分布型水文モデルを構築できるようになっている。以下に本研究で採用しているメッシュ水文モデルと河道追跡スキームを説明する。

(1) メッシュ水文モデル—新安江モデル

降雨と蒸発散量から流出量を計算するメッシュ水文モデルとして、本システムでは、中国で広く使用されている新安江モデル^{5),6),7)}を用いる。このモデルでは、流出はある地点での貯水量が貯水能力を超えた時に発生すると

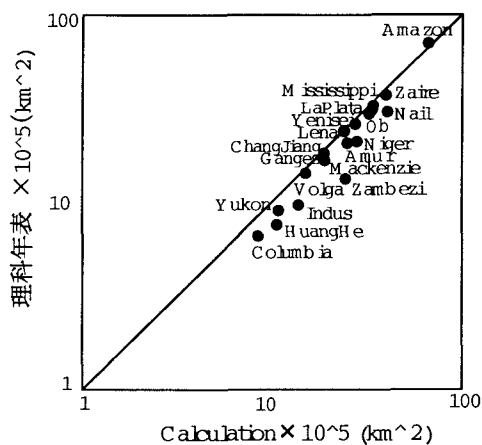


図-6 主要河川を対象とした流域面積の検証

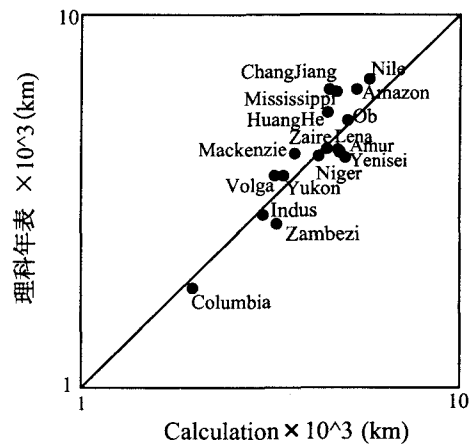


図-7 主要河川を対象とした河道長の検証

考えられている。地点貯水能力に関しては流域内（もしくはメッシュ内）の分布をモデル化している。各メッシュの流出量を直接流出成分と基底流出成分の二成分に分け、基底流出成分は、線形貯水池の調節を経て、直接流出成分とともに河道網への流入となる。また、モデル内では、土壌を上層、下層、深層の3層に分割している。降雨による補給および蒸発散による消耗はともに上層から深層へ順次行われる。このモデルの定式化等については上記の参考文献を参照されたい。

(2) 河道追跡スキーム—Multi-step, Multi-reach Muskingum-Cunge Method

大陸スケールの大河川を扱う場合には、河道での流れをモデル化し、貯留効果や遅れの影響を考慮することが重要である。本研究では、水文学的追跡法の一つである Muskingum 法⁸⁾を元に開発した Multi-step, Multi-reach Muskingum-Cunge 法⁷⁾を用いる。この方法では、河道内の流量と上流端の流入量に応じて、計算ステップの長さ、河道区間の長さを自動分割して、計算の安定条件が満たされるようにしている。また、追跡計算のパラメーターは Cunge 法⁹⁾に基づいて推定している。詳細は陸ら⁷⁾を参照されたい。

5. モデルの大陸スケール大流域への適用

本研究では、上記の分布型水文モデルを長江流域と Mississippi 流域に適用し、ISLSCP Initiative I データセットに含まれている 1987 年と 1988 年の水文気象データから長江本川にある 3 つの水文観測所、宜昌、漢口、大同と Mississippi 川本川にある Memphis のハイドログラフを再現することを試みた。長江流域と Mississippi 流域は集水面積、河川長ともに世界有数の大流域である。しかし、下流部では潮汐の影響を受けるために、長江に関しては大同以上の流域を対象とした。

本研究で用いた水文気象データは ISLSCP Initiative I CD-ROM に含まれている 1987 年と 1988 年の月単位の降水量、気温、放射量データである。データの空間分解能が 1x1 度である。本研究では、各メッシュの流出計算に、対応する 1x1 度メッシュのデータ時系列を作成してメッシュ水文モデルに渡している。計算上では、初期条件の影響を避けるために、上記の 2 年間のデータを周期的に用いて 4 年分の計算を時間ステップ 5 日で計算した。各ステップの雨量と放射量はその月の量の 6 分の 1 を、気温はその月の気温を用いた。気温と放射量から Priesley-Taylor の式により蒸発散能を推定している。図 8～図 11 にその結果を示している。また、比較のために Kinematic Wave 法を用いたときの結果を合わせて示している。この図から、いずれの方法も河川流量の季節変動を再現していることが分かる。また、Muskingum-Cunge 法の結果が比較的に滑らかで数日遅れていることもこの図から読みとれる。これは Kinematic Wave 法で表現できない河川水の拡散効果と考えられる。

6. 結論

本研究で DCW 河道データと全球 DEM を用いて数値河道網作成用の河道の位置情報である実河道データセットが作成された。また、このデータセットをベースに異なる空間分解能を持つ数値河道網の作成アルゴリズムが開発され、全球の主要大河川の解像度 1x1 度の数値河道網が数値地理情報から算出することができた。さらに、こ

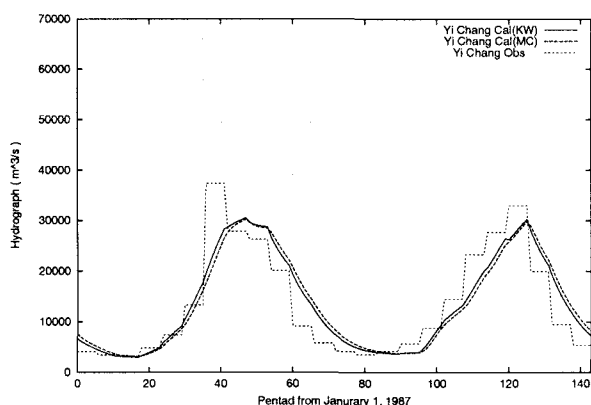


図- 8 長江宜昌の観測と計算ハイドログラフ

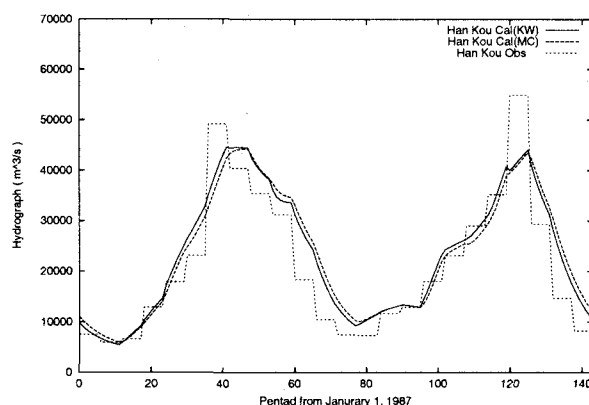


図- 9 長江江口の観測と計算ハイドログラフ

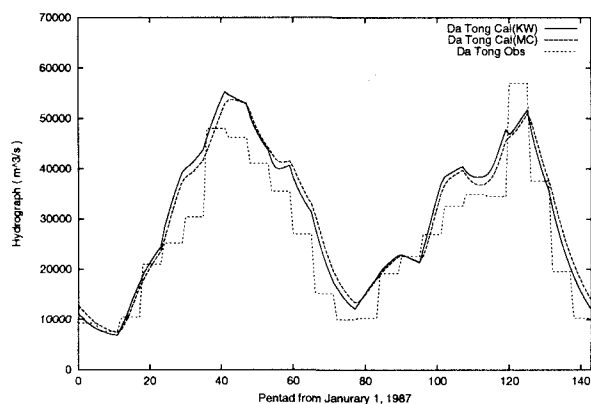


図- 10 長江大同の観測と計算ハイドログラフ

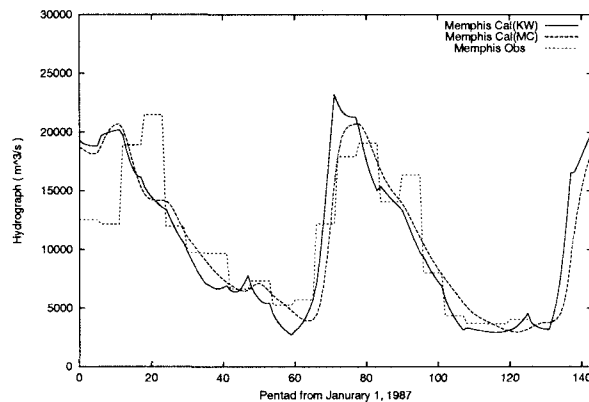


図- 11 Mississippi 川 Memphis の観測と計算ハイドログラフ

これらの数値河道網から、著者らの分布型水文モデリングシステムを用いて、大陸スケールの大河川に適用できる分布型水文モデルを構築することができた。このモデルでは河道追跡に Muskingum-Cunge 法を用いることにより、洪水波の河道網の時間遅れだけでなく、拡散効果をも考慮することができる。本研究では、上記のモデルを長江流域と Mississippi 河流域に適用し、ISLSCP Initiative I データセットに含まれている 1987 年と 1988 年の水文気象データから長江本川にある 3 つの水文観測所、宜昌、漢口、大同、そして Mississippi 川本川にある Memphis のハイドログラフを再現し、実測値と比較していずれの観測所でも、モデルが長江および Mississippi 川の河川流量の季節変動を表現できることを示した。

謝辞

本研究は文部省科学研究費補助金重点領域研究「衛星データの 4 次元同化解析とモデルによる気候システム変動の研究」(代表：東京大学木本昌秀助教授)の補助を受けた。ここに記して深謝を申し上げる。

参考文献

- 1) 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，第 411 号／II-12, pp. 135-142, 1989.
- 2) 陸 旻皎・早川典生・小池俊雄：河道網構造に基づく最適追跡順番の決定法，土木学会論文集，Vol.473/II-24, pp.1-6, 1993.
- 3) Lu, M., Koike, T. and Hayakawa, N.(1996): A distributed hydrological modeling system linking GIS and hydrological models, IAHS Publ. No.235, Application of Geographic Information System in Hydrology and Water Resources Management, 141-148.
- 4) 渡辺浩匡：数値地理情報に基づく全球河道網作成手法の開発と分布型流出モデルの適用，長岡技術科学大学修士論文，1997.
- 5) 趙人俊：流域水文シミュレーション（中国語），1984.
- 6) Zhao R.-J.: The Xinanjiang model applied in China, J. Hydrol., 135:371-381, 1992.
- 7) 陸 旻皎・小池俊雄・早川典生：Multi-step, Multi-reach Muskingum-Cunge 法を用いた分布型水文モデルの開発，水文・水資源学会誌、投稿中。
- 8) Maidment, D.R.(1992): Handbook of hydrology, McGraw-Hill, 10.12-10.13.
- 9) Cunge, J.A.(1969): On the subject of a flood propagation computation method(Muskingum method), J. Hydraul. Res., vol.7, 2, 205-230.