総合的な河道追跡モデルの開発とその応用

Development of a synthetic runoff routing model and its application

陸 旻皎¹・本田 諭²

By Minjiao LU and Satoshi HONDA

¹ 正会員 工博 長岡技術科学大学助教授 (〒 940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

² 正会員 工修 JR 東日本旅客鉄道株式会社 (〒 151-0052 東京都渋谷区代々木 2-2-6JR 新宿ビル)

In continental and global scale modelling of land surface processes, stream flow, lateral movement of channel water within a channel network is an important component. It is an indispensable component in a fully coupled atmosphere-ocean-land general circulation models(GCMs). The aim of this study is to develop a synthetic runoff routing model for continental-scale river basins. Considering the resolution of typical GCMs, the model resolution is set to 1.0°. This model is designed to accept runoff generated in grid cells within a river basin, and route them to assigned points through a channel network. In this routing model, three routing schemes, Miller's scheme, kinematic wave model and multi-step multi-reach Muskingum-Cunge scheme are implemented. By applying this routing model to the Changjiang and Mississippi river basin, intercomparison of these three routing schemes is carried out.

Key Words : routing model, routing schemes, intercomparison, Miller's scheme, kinematic wave model, Muskingum-Cunge model

1. はじめに

大陸スケール,あるいは全球スケールの陸面水文過程のモデリングにおいて,河道網における水の水平移動,河道流が重要な要素の一つである。特に,大気・海洋・陸面の結合大循環モデル(GCM)を考えると,欠かすことのできない水文過程の一つであり,いまだ十分に記述されていない。本研究の目的は大陸スケール河川流域に適用できる総合的な河道追跡モデルを開発することである。大陸スケール河川流域とは恣意的ではあるが,本研究では100000km²以上の流域面積をもつ流域を指す。この追跡モデルは流域内で発生した流出を,河道を介して研究対象地点まで追跡するものである。現在の多くの大循環モデルの空間分解能を考慮し,本研究では,追跡モデルの空間分解能を1度に固定する。

このようなモデルは少なくとも以下の意味において必要である。まず,河川流量がもっとも正確に観測されている,空間的に積分された水量であり,世界中の大河川において日常的に観測されている。もし河川網内

における河川水の移動と低減がシミュレートできれば,河川流量により,GCM内の陸面モデル,そしてGCMの計算結果を検証することが可能となる。これは河道網の時間スケールより短い時間スケール(数日から数ヶ月)でGCMの計算結果を検証できることを意味する。

そして,河川流量が海洋モデルの重要な入力であり,海洋の淡水収支そして熱塩循環に影響を及ぼす。特に北極海のような閉鎖性水域において,その影響が極めて顕著で,淡水流入の量およびタイミングが海氷の形成,そして北極圏の気候に大きな影響を及ぼすと考えられている。

三番目として,その水資源管理への応用性がある。水資源管理において,水を必要としている地点での水の量だけでなくその変動も重要である。このような追跡モデルは,GCMによる気候変動の将来予測に基づき,任意地点での水資源の将来予測を行うことができる。

最近では,主要河川の河川流量の季節変動を記述するための簡略化した追跡モデルがいくつか発表された(1),2),3),4),5),6),7),8)。これらのモデルが河川流量の季節変動をより良く再現していると報告されている。Hage-

mann ら¹⁾がいくつかのモデルの特徴を総括している。これらのモデルのほとんどが線形貯水池や単位図などの線形的な追跡スキームを用いている。これらの線形的追跡スキームが、追跡計算の結果の単純たしあわせを可能にし、流域追跡計算を大幅に簡略化する反面、河道流の非線形性を考慮することができない。この線形近似の実用性と精度評価はまだ十分行われていない。また、現象を簡略化したモデルで表現することによって、モデルパラメーターの物理的意味が薄れ、同定が困難になる可能性もある。

本研究では、陸らの河道追跡理論⁹⁾に基づき、プログラムインターフェースを統一し、気候研究でもっとも広く使われている Miller 法⁵⁾ (線形貯水池と同等、以下 LR と記す) の他に、河道流の非線形性を考慮した kinematic wave モデル¹⁰⁾ (以下 KW と記す) と multi-step multi-reach Muskingum-Cunge スキーム¹¹⁾ (以下 MC と記す) を実装し、実行時に切り替えできるモデルを開発する。この理論では、河道網内の各河道の追跡計算は最適追跡順序の制御下で行われ、上流側の河道を先に計算し、合流計算してから下流側の河道の計算を行うことが保証されている。

本研究では、ETOPO5 から作成した全球 1 度 x 1 度 DEM と DCW の河道位置データから全球 1 度 x 1 度河道網を作成し、その中から、本研究の対象流域である長江流域および Mississippi 流域の河道網を抽出し、それぞれの最適追跡順序を定めた。これらのデータを用いて追跡モデルを構築し、流出を長江の大通と Mississippi 川の Memphis 水文観測所まで追跡計算し、実測ハイドログラフと比較するとともに、実装した 3 つの追跡スキームの相互比較を行い、それぞれのスキームの特徴を明らかにする。

2. モデルの基本構成

本モデルはグリッド型モデルで、流域を 1 度 x 1 度のメッシュに分割する。いままでの現地調査およびデータ解析¹³⁾から、メッシュサイズが数百メートル以上であれば、水文過程をメッシュ内水文過程とメッシュ間水文過程とに分けることができる。メッシュ内水文過程はメッシュ水文モデルによりメッシュごとに表現でき、メッシュ間の相互作用は無視できる。一方、メッシュ間水文プロセス、ここでは河道流は本研究で開発する河道追跡モデルを用いて、河道網の構造を考慮して計算する。以下に河道追跡モデルの詳細を示す。

3. 総合的な河道追跡モデル

河道追跡スキームの他に、河道網の構造も洪水波形に大きな影響を及ぼす。上流側の河道の計算を行ってから合流処理し、下流側の計算を行わなければならない。線形追跡スキームを用いた追跡モデルが唯一の例外で、

$$Q_{n,m}(t) = \sum_{i,j} Q_{i,j}(t) \quad (1)$$

で計算できる。ここで、 t は時間、 $Q_{n,m}(t)$ はメッシュ (n, m) での河川流量、 $Q_{i,j}(t)$ は上流メッシュ (i, j) からの寄与で、そのメッシュの流出と応答関数の畳み込み積分で得ることができる。これは追跡計算を大幅に簡略化するが、複数個の地点の流量を求めようとしたときに、個々の地点の応答関数を用意しなければならない。このようなやり方は柔軟性を欠き、効率的ではない。

本モデルでは、河道網内のすべての河道の情報が、河道網構造に基づいて求められた特殊な順番、最適追跡順序⁹⁾に従って、テキストファイルに記録されている。このファイルの各行に、一つのメッシュの情報が入っている。これらは、メッシュの行番号、列番号、入力バッファ番号、出力バッファ番号、河道勾配、河道長、メッシュの集水面積、メッシュ自身の面積、メッシュ中心の標高、メッシュ斜面の勾配と向きが入っており、河道追跡だけでなく、メッシュ水文モデルにもっとも基礎的な情報を格納している。ここで入出力バッファ番号は、流量時系列を記憶するバッファと呼ばれる一次元配列の番号であり、ひとつの河道の追跡計算の際のバッファリングで以下のように使われている。

1. 入力バッファ番号のバッファから上流河道からの流入時系列を読み込み、そのバッファを 0 で埋める。
2. そのメッシュで計算された流出量と上流からの流入とを合わせ、河道上流端への流入時系列を得る。
3. 追跡スキームを用いて、流量を上流端から下流端へ追跡計算する。
4. 得られた下流端の流量時系列を出力バッファ番号のバッファへ足し合わせる。

最適追跡順序とバッファリング技術により、下流側の河道の追跡計算がその上流河道の追跡計算と合流処理後に行われることが保証される。最適追跡順序どおり、流域内のすべてのメッシュの流出量を追跡計算し、バッファリングすれば、流域全体の追跡計算が完了す

る。また、計算中のメッシュの番号をチェックすれば、任意地点での流量時系列が得られる。

上記の技術を用いることにより、個々の河道の上流端の流量時系列を下流端へ追跡計算し、下流端での流量時系列を求める追跡スキームが河道網構造と独立となり、統一したプログラムインターフェースを用意しておけば、種々の追跡スキームの実装が簡単にできる。本モデルでは、以下の3つのスキームを実装した。

- Miller 法 (LR)⁵⁾
- kinematic wave モデル (KW)¹⁰⁾
- multi-step multi-reach Muskingum-Cunge 法 (MC)¹¹⁾

本研究では、オブジェクト指向プログラミング言語 C++ を用いることにより、プログラムインターフェースを統一し、個々のスキームをモジュール化している。これによりモデル実行時にスキームを選択すれば、指定されたスキームが初期化され、その後のすべての処理を行うようになっている。データの入手可能性と要求される計算精度を考慮して選択することができる。

(1) Miller 法

Miller 法では、河川水が代表速度 (c) で上流端から下流端へ移動するとしている。つまり、

$$O(t) = I(t - t_{lag}) \quad (2)$$

$$t_{lag} = \frac{L}{c} \quad (3)$$

である。ここで、 I が河道上流端の流入量、 O が下流端の流出量で、 L が河道長で、 t_{lag} が洪水の伝搬時間である。上流側の流量時系列を t_{lag} だけ遅らせて、再配分すれば下流端での流量時系列を得ることができる。代表速度 (c) はパラメータで、パラメータ同定が必要である。最近のいくつかの研究^{3),5),6)}では、メッシュの地形特性と関連づける試みがある。

(2) Kinematic wave モデル

本モデルでは、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投入するので、横流入を考えなくて良い。Kinematic wave 近似を用いると、St. Venant 方程式が

$$\frac{\partial Bh}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

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

となる。ここで、 B が河道の中、 h が水深、 R が径深、 i が河床勾配、 n がマンニングの粗度係数、 Q が河川流

図-1 Stability condition of Muskingum method.

量である。河道断面を広幅矩形断面とする場合に、洪水波の特性曲線が

$$\frac{dQ}{dt} = 0 \quad (6)$$

$$c = \frac{dx}{dt} = \frac{5}{3} \frac{i^{0.3} Q^{0.4}}{n^{0.6} B^{0.4}} \quad (7)$$

となる。ここで、 c は洪水波伝搬速度である。これは流量 Q が減衰なしに、速度 c で下流へ伝搬していることを意味する。このスキームでも、流入量を伝搬速度に従って遅らせて再配分すれば下流端の流量時系列を得ることができるが、伝搬速度の差によって追い越し現象が発生する可能性がある。本研究では、追い付いた時点で二つの流量を合併させて一緒に下流へ移動させるように処理している。Miller 法と比べ、流量の違いによる伝搬速度の違いを考慮することができるが、洪水波の河道における減衰を表現することはできない。河床勾配の小さい大河川で問題になる可能性がある。

(3) Multi-step multi-reach Muskingum-Cunge 法

大陸スケール流域の下流部では、河床勾配がかなり小さくなる。Kinematic wave 近似が成立しなくなる可能性が大きくなり、河道内における洪水波の減衰が顕著になる。本モデルでは洪水流の拡散波近似となる Muskingum-Cunge 法を実装している。しかし、特定の河道区間での利用と異なり、分布型河道追跡モデルでは、最上流側の河道から最下流端の河道まで、河川流量の時空間変化が極めて大きく、Muskingum 法のパラメータ K 、 X の値が予測できない。 K 、 X と時間ステップ Δt の組み合わせによって、流域のどこかで、Muskingum 法の良く知られている”負反応”(negative drip) を起し、

下流へ伝搬し、計算を不安定にすることも考えられる。すべての河道、すべての時間ステップにおいて図1に示す Muskingum 法の安定条件を自動的に満たす計算法が必要である。ここでは、陸らの multi-step multi-reach Muskingum-Cunge 法¹¹⁾を採用している。この方法では、安定条件を満たすように、河川流量に応じて、時間ステップと河道区間を分割して、以下の式で追跡計算を行っている。

$$O_{i+1} = C_1 I_{i+1} + C_2 I_i + C_3 O_i \quad (8)$$

$$C_1 = \frac{\Delta t - 2KX}{2K(1-X) + \Delta t}$$

$$C_2 = \frac{\Delta t + 2KX}{2K(1-X) + \Delta t}$$

$$C_3 = \frac{2K(1-X) - \Delta t}{2K(1-X) + \Delta t}$$

ここで、 I と O は分割された河道区間の上流端と下流端の流量で、下つき添字 i と $i+1$ は分割された時間ステップの始まりと終りを示す。 C_1, C_2 と C_3 は追跡計算用係数で、 $C_1 + C_2 + C_3 = 1$ である。 K, X は Muskingum 法の係数で、Cunge の方法¹²⁾

$$K = \frac{L}{c} \quad (9)$$

$$X = \frac{1}{2} - \frac{l}{2L} \quad (10)$$

$$l = \frac{\bar{Q}}{Bci} \quad (11)$$

で求める。ここで、 $\bar{Q}$ が分割された河道区間の平均流量、 l が特性河道長である。時間ステップと河道長分割の詳細については、陸ら¹¹⁾を参照されたい。

4. モデルの応用

(1) 対象流域とデータについて

本研究では、典型的な大陸スケール流域、長江流域と Mississippi 流域を対象とする。図2と図3がETOPO5 から得られる1度x1度全球DEMとDCW河道位置データから得られた1度x1度全球河道網から取り出した両流域の河道網である。おおむね地図上の河道網と一致している。本研究で用いた流量データの観測ステーション、長江では宜昌、漢口と大通、Mississippi では Memphis の水文観測所も図中に示している。長江流域では東西方向に水が流れて集中しているに対して、Mississippi 流域では、水が南北に流れて集中している。なお、KW 法や MC 法を用いる際に必要な河道網内の各河道の中およびマンニング粗度係数は空間的に大きく変化している。これらに関する詳細なデータがあれば、河道網を忠実に表現したモデル計算ができるが、多くの場合に、流域内数地点での値しか得られない。本

研究では、以下のようなパラメータリゼーション¹³⁾

$$B = B_r \left(\frac{A}{A_r} \right)^\beta \quad (12)$$

$$n = n_r \left(\frac{A}{A_r} \right)^\lambda \quad (13)$$

を用いて各河道の河道巾と粗度係数を推定している。ここで、 B, n と A はそれぞれ各河道の巾、マンニング粗度係数とその集水面積で、 B_r, n_r と A_r はそれぞれ基準地点の河道の巾、マンニング粗度係数とその集水面積で、本研究では、大通と Memphis を長江と Mississippi 流域の基準地点とし、その値を用いる。また、 β と λ はパラメーターで、0.5と-0.314とした¹³⁾。

(2) 追跡計算スキームの相互比較

この比較の目的は本モデルに実装されている3つのスキームの違いを明らかにすることである。そのために、共通な入力データセットと、これらのデータから流出量を計算するメッシュ水文モデルが必要である。本研究では、入力データに ISLSCP Initiative I Global Data Sets¹⁴⁾ (以下 ISLSCP と記す) を、メッシュ水文モデルに2流出成分の新安江モデル¹⁵⁾を用いる。ISLSCP の1度x1度の月単位の降水量、平均気温と純放射量から、5日単位のデータを作成し、Priestley-Taylor の式により、蒸発能力を算出する。5日単位の降水量と蒸発能力データを新安江モデルに入力し、個々のメッシュで流出量を算出した。また、実測流量も月平均流量から5日流量を作成して用いている。計算期間は1987-1988の2年間であるが、初期値の影響を減らすために、この2年間のデータを周期的に使用し、4年分の計算を行っている。図4が長江でのLRの結果である。ここで、Miller 法のパラメーター c に対して、0.25から1.50m/sまで0.25m/s刻みで変化させて最適値を試行錯誤で決定した。この範囲で長江流域では最適値を得ることができなかったが、それ以上速度 c を上げてても効果がないと考え、 $c = 1.5\text{m/s}$ を最終結果とした。図5は長江での各方法の結果で、追跡計算なしの結果も付記してある。なお、LR 法は最適パラメーター時の結果となる。図6と図7は Mississippi 川での計算結果である。図8と図9は Miller 法パラメーター c とそれを用いて得られるハイドログラフと実測ハイドログラフの相関係数を示している。比較のために、追跡計算なし、KWとMCの相関係数(横線)をも記してある。

5. 結果と考察

本研究において、陸らの河道追跡理論⁹⁾を用いて、Miller 法、kinematic wave モデル、multi-step multi-

Channel network of ChangJiang River

図-2 Channel network for the Changjiang River.

Channel network of Mississippi River

図-3 Channel network for the Mississippi River.

図-4 Observed and computed hydrographs at Datong station, the Changjiang River.

図-5 Observed and computed hydrographs at Datong station, the Changjiang River.

図-6 Observed and computed hydrographs at Memphis station, the Mississippi River.

図-7 Observed and computed hydrographs at Memphis station, the Mississippi River.

reach Muskingum-Cunge 法を利用できる総合的な河道追跡モデルが開発された。データの入手可能性および計算結果に対する精度要求に応じて追跡スキームをモデル実行時に選択できるようになる。また、典型的な大陸スケール流域、長江流域と Mississippi 流域にモデルを適用し、各スキームによる計算と実測ハイドログラフを比較し、さらに相互比較を行った。Miller 法はパラメーターに極めて敏感で、長江と Mississippi 川で最適パラメーターに大きな差がある。その原因が明確ではない

ことから、個々の流域で同定が必要と考えられ、全球の追跡モデルを構築する際に大きな問題となる可能性がある。Kinematic wave モデルと multi-step multi-reach Muskingum-Cunge 法は基準地点の河道巾と粗度係数を用いて流域内の各河道の河道巾と粗度係数を推定しているが、両流域とも実測流量を再現している。しかし、両者の違いは小さく、追跡計算なしの結果との差もそれほど大きくない。河道における洪水波の減衰がある程度表現されたものの、それほど顕著ではない。その

図-8 Correlation coefficients of Observed and computed hydrographs at Datong station, the Changjiang River.

図-9 Correlation coefficients of Observed and computed hydrographs at Memphis station, the Mississippi River.

原因として、月単位入力データにおける平滑化の影響が考えられる。今後さらに短い時間スケールでの比較を行う予定である。

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) Hagemann, S. and L. Dümenil (1998): A parameterization of the lateral waterflow for the global scale. *Climate Dynamics*, **14**, pp. 17-31.
- 2) Nijssen, Bart, Dennis P. Lettenmaier, Xu Liang, Suzanne W. Wetzel, and Eric F. Wood (1997): Streamflow simulation for continental-scale river basins. *Water Resources Research*, **33**(4), pp. 711-724.
- 3) G. E. Liston, Y. C. Sud and E. F. Wood (1994): Evaluating gcm land surface hydrology parameterizations by computing river discharges using a runoff routing model: application to the mississippi basin. *Journal of Applied Meteorology*, **33**, pp. 394-405.
- 4) G. W. Kite, A. Dalton and K. Dion (1994): Simulation of streamflow in a macroscale watershed using general circulation model data. *Water Resources Research*, **30**(5), pp. 1547-1559.
- 5) Miller, J. R., R. L. Russell, and G. Caliri (1994): Continental-scale river flow in climate models. *Journal of Climate*, **7**, pp. 914-928.
- 6) Robert Sausen, Silke Schubert and Lydia Dümenil (1994): A model of river runoff for use in coupled atmosphere-ocean models. *Journal of Hydrology*, **155**, pp. 337-352.
- 7) Naden, Pamela S. (1993): A routing model for

continental-scale hydrology. *IAHS Publ.*, (214), pp. 67-79.

- 8) Vörösmarty, Charles J., Berrien Moore III, Annette L. Grace, Patricia Gildea, Jerry M. Melillo, Bruce J. Peterson, Edward B. Rastetter, and Paul A. Steudler (1989): Continental scale models of water balance and fluvial transport: an application to south america. *Global Biogeochemical Cycles*, **3**(3), pp. 241-265.
- 9) 陸旻皎・早川典生・小池俊雄 (1993): 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*, **473**(II-24), pp. 1-6.
- 10) 陸旻皎・小池俊雄・早川典生 (1989): 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), pp. 135-140.
- 11) 陸旻皎・小池俊雄・早川典生 (1999): 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*, **12**(5), pp. 384-390.
- 12) Cunge, J. A. (1969): On the subject of a flood propagation computation method(muskingum method). *J. Hydraul. Res.*, **7**(2), pp. 205-230.
- 13) 陸旻皎・小池俊雄・早川典生・益倉克成 (1991): 分布型流出モデルのための河道特性の評価. *土木学会水工学論文集*, 第35巻, pp. 161-166.
- 14) Sellers, P.J., B.W. Meeson, F.G. Hall, G. Asrar, R.E. Murphy, R.A. Schiffer, F.P. Bretherton, R.E. Dickinson, R.G. Ellingson, C.B. Field, K.F. Huemmrich, C.O. Justice, J.M. Melack, N.T. Roulet, D.S. Schimel, and P.D. Try (1995): Remote sensing of the land surface for studies of global change: Models-algorithms-experiments. *Remote Sens. Environ.*, **51**(1), pp. 3-26.
- 15) Zhao, R-J. (1992): The xinanjiang model applied in china. *Journal of Hydrology*, **135**, pp. 371-381.

(2000. 10. 2受付)