

グローバルな河川モデルのための 河道網の自動構築

THE AUTOMATIC CONSTRUCTION OF A RIVER NETWORK MAP
FOR GLOBAL SCALE RIVER MODELS

山崎 大¹・沖 大幹²・鼎 信次郎³
Dai YAMAZAKI, Taikan OKI, and Shinjiro KANAE

¹学生会員 東京大学生産技術研究所 大学院修士課程 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

²正会員 博士(工学) 東京大学生産技術研究所 教授 〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

³正会員 博士(工学) 東京大学生産技術研究所 准教授 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

A global scale river model is useful for climate simulations, validation of land surface models, and water resources assessment. However, there was no perfect method which can automatically construct an acceptable global river network map needed by global river models. This paper proposes a new algorithm of the automatic construction of a global river network map using 1km resolution hydrological datasets. Derived river network map can represent realistic river network, and it does not require any manual corrections. This algorithm can also generate datasets of river channel length, elevation of rivers from 1km resolution hydrological datasets considering sub-grid scale river topology. Improving the accuracy of the river network map and river topology datasets, the new algorithm has possibility to use for higher resolution and more complex river and hydrological cycle modeling.

Key Words : *Global River Model, River Network Map, Upscaling, DEM, Sub-grid scale topography*

1. はじめに

グローバルな河川モデルは当初、陸域からの流出を海洋まで輸送する過程を再現することで、気候モデルにおける水循環を閉じさせることを目的に開発された¹⁾。その後、気候モデルの陸面過程のバリデーション²⁾³⁾や水資源アセスメント⁴⁾に応用されるようになり、グローバルな河川モデルは水文・水資源分野の研究に不可欠なものとなっている。

グローバルな河川モデルの大多数は、流下過程と河道網から構成され、全球を多数のグリッドに区切って河川流量を再現する^{1) 2)}。流下過程は各グリッドの河道内貯留量から主として貯留関数法を用いて流量を算定し、河道網は各グリッドで計算された流量の流下先グリッドを示すことで全球の主要な河川を再現している。

河川流量を適切に再現するためには、現実の河川をよく表現する河道網が必要である。そこで、河道網を精度よく構築するための様々なアルゴリズムが、10年以上にわたって研究されてきた。最も基本的な河道網の構築アルゴリズムは、グリッドの平均標高を用いて隣接するグリッドへの斜面勾配を計算し、最も急な斜面を作るグリッドに向けて流下方向を決定する最急勾配法である¹⁾

⁵⁾。しかし、グローバルな河道網では解像度が粗いため、グリッド平均標高が現実の河川の流下方向を決める地形と一致しているとは限らず、構築された河道網は現実の河川を正しく表現できなかった。そのため、最急勾配法で推定した河道網を手作業で修正して、現実的な河道網を再構築する必要があった⁵⁾。そこで、Fekete⁶⁾はUnited States Geological Survey: USGSによるグローバルな1km解像度の表面流向データHYDRO1kを用いて、より高解像度の河道網から粗い解像度のグローバルな河道網を構築する「アップスケーリング」と呼ばれる手法を提案した。アップスケーリング手法は、高解像度の河道網を入力データとして使用することで、従来の最急勾配法より精度の高いグローバルな河道網を構築することを可能にした。その後、Doell⁷⁾、Olivera⁸⁾、舛谷⁹⁾等によって、アップスケーリングの手法に改善が加えられ、グローバルな河道網を構築するアルゴリズムの精度は向上していった。しかし、これらの改善されたアップスケーリング手法を用いても、現実の河川を正しく表現する河道網を構築するまでには至らず、依然として手作業による河道網の修正が必要であった⁷⁾。

構築された河道網が、現実の河川を正しく再現できないのは、複数の河川が1グリッド内に存在する場合に

アップスケールの精度が低下するためであると、既往の研究で示されている¹⁰⁾。そこで本研究では、河道網データにおける流下先グリッドの記述変更に工夫をすることで、河川が密な地域でも現実的な河道網を自動構築できるアルゴリズムを提案する。まず2章において河道網構築アルゴリズムを詳細に説明し、3章で自動構築された河道網の特徴を述べ、最後に4章にまとめを記す。

2. 河道網の自動構築アルゴリズム

(1) 構築する河道網データセット

本研究では、河道網の自動構築アルゴリズムを用いて、河川モデルで流量計算を行うために必要な以下のデータセットを構築する。

- 各グリッドの流下先グリッド番号を記述し、全球の主要な河川を表現する「河道網データ」。
- 河床勾配や貯留関数法における時定数を計算するための、流下先グリッドまでの距離を記述した「河道長データ」。河道の勾配や時定数は、流下過程における流量計算に必要である^{1) 2) 11)}。
- 河床勾配を計算するのに必要な、各グリッドの標高を記述した「河川標高データ」。
- 河川モデルで再現された河川流量を観測値と比較するために、河道網データ上の流量観測点の位置を示した「流量観測点データ」。

(2) 入力データ

本研究では、Masutomi(2007)による Global Drainage Basin Dataset: GDBD¹²⁾から、1km解像度の表面流向データを、河道網構築のための入力データとして使用した。表面流向データは各セルにおける流下方向を北・北東・東・南東・南・南西・西・北西の8方向で示している。同じくGDBDから、Global Runoff Data Center: GRDCの流量観測点をGDBD表面流向データのセル上に配置した流量観測点データを、観測点位置データを構築するために使用した。流量観測点データはGRDCの流量観測点の位置をGDBDのセル番号で示している。また、USGSによる30秒解像度の標高データGTOPO30を、河川標高データを構築する際に用いた。

なお本研究では、入力データであるGDBDと構築する河道網を区別するために、1km解像度のGDBDの格子を「セル」、構築する河道網の格子を「グリッド」と記述する。

(2) 河道網の自動構築アルゴリズム

a) 河道網データ

図1に河道網データを構築する手順を示した。ここでは、1度解像度の河道網を構築する場合の手順を、北緯30度東経100度付近のメコン川・サルウィン川・長江が近接して流れる地域を例に説明する。図1の赤色の河川はGDBDの表面流向データから上流流域面積が1000km²以上のセルを抽出したものであり、赤色が濃いほど上流流域面積が大きいことを表す。図中の格子は構築する河道網のグリッドを示す。ただし、GDBDのセルは1度解像度のグリッドに比べて非常に小さいので、格子状に示されていない。河道網データ構築の手順は以下の通りである。[1]各グリッドに有効領域を定める(図1a:円で囲まれた青色の領域)。本研究では各グリッドに内接する円の内側を有効領域とした。有効領域を定めるのは、アップスケールの際にグリッド中心部を流れる河川のみを考慮することで、構築される河道網の精度を高めるためである。[2]各グリッドの有効領域の内側にあるGDBD表面流向データのセルの内、最大の流域面積を持つセルをグリッド代表セルとする(図1a:小さな円)。[3]各グリッドのグリッド代表セルからGDBD表面流向データを下流へ辿っていき、下流にあるグリッド代表セルを見つける(図1b:紺色の矢印)。下流にグリッド代表セルが存在せず、GDBD表面流向データの河口に辿りついた場合は、そのグリッドは河口グリッドであるとする。[4]流下先のグリッド代表セルを含むグリッド番号を、流下先グリッド番号として河道網データに書き込む(図1c:青色の矢印)。

b) 河道長データ

次に河道長データとして、各グリッドのグリッド代表セルと流下先グリッドのグリッド代表セルの間の河道長(図1b:矢印で結ばれたグリッド代表セル間における赤色の河川の長さ)を計算した。GDBD表面流向データ上の河川の長さは、表面流向が北・東・南・西のときは次の

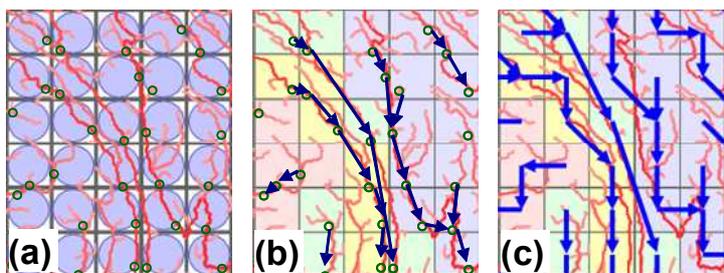


図1：河道網データの構築手順 赤色は1km解像度GDBD表面流向データの河川位置、(a)の青色の円は有効領域、(a)(b)の緑色の円はグリッド代表セル、(c)の青色矢印は構築された河道網を示す。

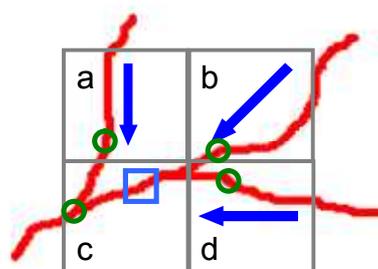


図2：流量観測点の配置の例 水色の四角を観測点の位置とすると、観測点の流量はグリッドbとdの流量の和となる。

セルまでの距離を1km、北東・南東・南西・北西のときは次のセルまでの距離を $\sqrt{2}$ kmとした。そして、各グリッドのグリッド代表セルから、流下先グリッドのグリッド代表セルまで、GDBD表面流向データを下流へ辿っていき、表面流向データ上の河川長さの総和を計算した。

c) 河川標高データ

より現実的な河川の勾配を表現するために、グリッドの平均標高ではなく、グリッド代表セルに近傍の標高を河川標高データとして使用した。まず、GDBD表面流向データの各セルにおける標高として、GTOPO30の30秒解像度標高データのうち最も緯度経度が近い点の標高を与える。そして、各グリッドのグリッド代表セルから東西・南・北にそれぞれ3km以内の距離にあるセルの内、最も標高が低いセルの標高を各グリッドの河川の標高とした。グリッド代表セルの標高をそのまま河川の標高としないのは、GTOPO30とGDBDで河川の位置がずれている場合があるためである。その場合、グリッド代表セルの標高が実際の河川の標高とずれるため、後述する負の標高差を生じやすくなる。これを避けるために、グリッド代表セル近傍でもっとも低い標高を河川の標高として抽出することとした。

d) 観測点位置データ

図2に河道網データ上に配置された流量観測点の例を示した。水色の四角をGDBD表面流向データ上に配置された流量観測点とすると、流量観測点における流量はグリッドbとグリッドdの流量の合計となるべきである。既往の研究では流量観測点はグリッド上に配置され、そのグリッドにおける流量を観測点の流量としていたが、それでは図2のように複数グリッドの流量の和を評価しなければならぬ場合に正しく対応できず、河道網データを修正して流量観測点を配置する必要があった。そこで、

表1：ルックアップテーブル形式で表された観測点位置データ

観測点番号	上流グリッド(1)	上流グリッド(2)	上流グリッド(3)	...
1	(121,23)	(121,24)	-	...
2	(64,23)	-	-	...
3	(240,76)	(241,76)	(240,77)	...
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

観測点位置データは、流量観測点の直上流にあたるグリッド番号を記載したルックアップテーブル形式で記述するとした(表1)。流量観測点の位置をルックアップテーブル形式で表すことにより、河道網データを修正することなく、全ての観測点を構築した河道網上の正しい位置に配置することができる。流量観測点における流量を求めるには、ルックアップテーブルに記載されたグリッドを参照し流量の総和をとればよい。

3. 構築された河道網の評価

(1) 河道網データの特徴

図3に自動構築アルゴリズムを用いて構築した1度解像度の河道網データの東アジア部分を示した。GDBD表面流向データのうち1000km²以上の上流流域面積を持つセルを赤色で、構築された河道網を青色で、海岸線または内陸湖を緑色で示した。また、流域ごとにグリッドを色分けして表現した。本研究のアルゴリズムで構築される河道網データの最大の特徴は、河道網データにおける流下先グリッドを示す方式である。既往の研究では、各グリッドで北・北東・東・南東・南・南西・西・北西の8方向の流下方向を用いて流下先グリッドを指定していた¹⁾⁵⁾。しかし、本研究で構築する河道網は各グリッドの流下先グリッドをグリッド番号で直接指示している。この方法を用いると、流下先グリッドが隣接する必要がなくなるために、河川が密な地域でも河道網を適切に構築することができる。図3の北緯30度東経100度の付近の拡

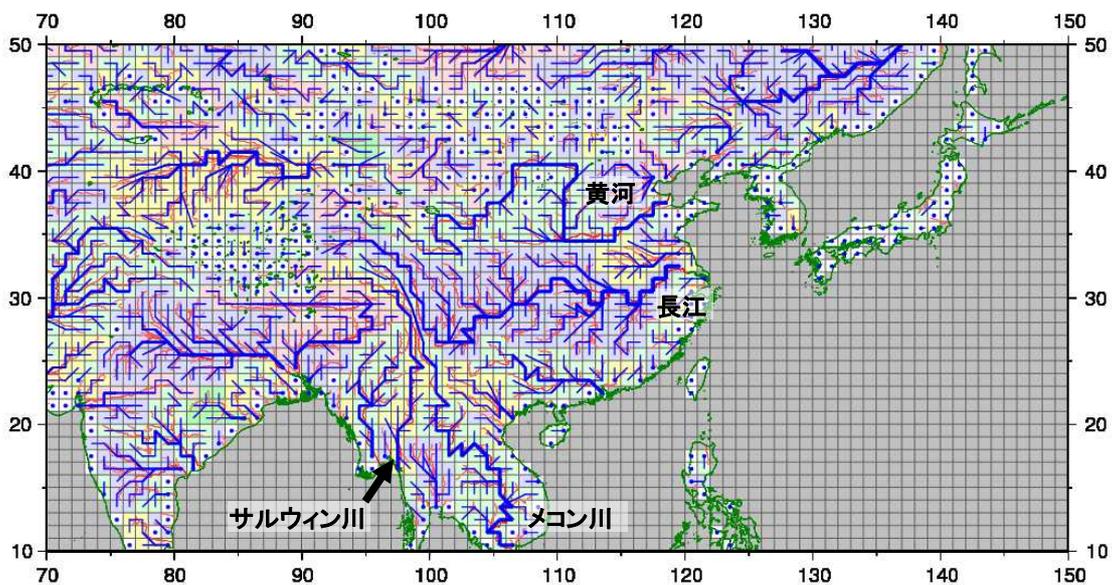


図3：構築された1度解像度の河道網（東アジア付近） 赤色はGDBD表面流向データから抽出した河川、青色は構築した河道網、緑色は海岸線および内陸湖を示す。流域ごとにグリッドを色分けして示している。

大図である図1cを参照すると、2グリッドの間にメコン川・サルウィン川・長江の3つの河川が流れているのが分かる。このような場合、8方位で流下方向を指示する河道網では、いずれかの河川を1グリッド移動させる修正を施して上流下流をつなげる必要があった⁷⁾。しかし、本研究のアルゴリズムで自動構築した河道網データでは、それぞれの河川が途切れることなく適切に表現されていることが分かる。また、図1bによると、本研究の自動構築アルゴリズムを用いると、各グリッドの流下先グリッドは必ず同一の河川の下流に含まれることが分かる。この特徴のために、Doell⁷⁾やOlivera⁸⁾のアップスケーリング手法で構築した河道網データに見られるような、ある河川の上流が別の河川に吸収されてしまうというエラーが発生せずに、正確なアップスケーリングを行うことができる。

(2) 上流域面積の再現性

図4は、構築した1度解像度の河道網の上流域面積と、GDBD表面流向データから計算された上流域面積とを比較したものである。構築した河道網から計算した各グリッドの上流域面積を横軸に、構築した河道網の上流域面積と各グリッドのグリッド代表セルにおけるGDBD上流域面積との差を縦軸に示している。また、上流域面積ごとの相対誤差の絶対値の平均を赤線で示した。GDBD表面流向データから、河道網が正しくアップスケールされていれば、両者の上流域面積は近い値を取るため、縦軸のばらつきは小さくなる。

ここでは、構築した河道網の上流域面積は、地球楕円体を仮定して計算した。各グリッド北端と南端の緯度を ϕ_1 と ϕ_2 、東端と西端の経度を λ_1 と λ_2 とすると、グリッド面積 $S(\phi_1, \phi_2, \lambda_1, \lambda_2)$ は式(1)で与えられる⁹⁾。

$$S(\phi_1, \phi_2, \lambda_1, \lambda_2) = (\lambda_1 - \lambda_2) \left[\frac{\pi a^2 (1 - e^2)}{180} \left(\frac{e \sin \phi}{2(1 - e^2 \sin^2 \phi)} \right) + \frac{1}{4} \ln \left| \frac{1 + e \sin \phi}{1 - e \sin \phi} \right| \right]_{\phi_2}^{\phi_1} \quad (1)$$

ただし、地球半径は $a = 6378.136$ km、地球の離心率は

$e^2 = 0.00669447$ とした⁹⁾。また、GDBD表面流向データはランベルト正積図法で示されているので、GDBD表面流向データの1セルの面積は全て 1km^2 として扱った。

図4によると、構築された河道網とGDBD表面流向データの上流域面積の差は、概ね 40000km^2 に収まっており、二乗平均誤差は 12070km^2 であった。1度解像度の河道網の1グリッドの面積は赤道上で約 10000km^2 であるので、上流域面積の誤差は平均で1~2グリッドであり、妥当な範囲におさまっていると判断できる。構築された河道網の上流域面積が 100000km^2 以下の中規模流域では、上流域面積に対する誤差の割合が大きくなっている。この誤差は、図1cにおいてメコン川とサルウィン川が混在するグリッドが上流域面積の大きいサルウィン川流域として扱われているように、2つの中規模河川が近接して流れている場合、上流域面積が大きい方の河川が小さい方の河川を含むグリッドを吸収してしまうことに起因する。上流域面積が 100000km^2 以上の大規模河川は、同じ規模の河川が近接して流れることが少ないので、上流域面積に対する誤差の割合が小さくなっている。上流域面積が 80000km^2 以上過剰に評価されているグリッドは、図3の黄河流域のように砂漠地帯を流れる河川の流域である。これらの流域では、本来は独立している乾燥地の小規模な内陸河川流域が、グリッドの大きさが荒いために大規模流域に吸収されてしまい、上流域面積の過大評価となっている。

(3) 河道長データの特徴

河道網自動構築アルゴリズムでは、河道長は1km解像度のGDBD表面流向データに基づいて計算したが、従来のモデルでは河道長はグリッド中心間の距離として与えられていた⁹⁾。図5は、構築した1度解像度の河道網のうち河道長が 500km 以上の河川について、GDBD表面流向データから計算した河道長を横軸に、グリッドの中心間の距離から計算した河道長を縦軸に示したものである。

グリッドの中心間の距離は理科年表¹³⁾に基づいて以下のように計算した。地球楕円体を仮定すると、地球上で

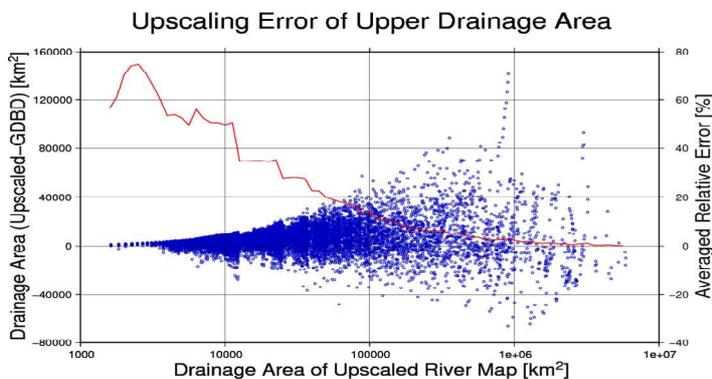


図4：構築された河道網の上流域面積の誤差

構築された河道網から計算した上流域面積を横軸に、1 km解像度の表面流向データから計算した上流域面積との差を縦軸に示した。上流域面積ごとの相対誤差の絶対値の平均を赤線で示した。

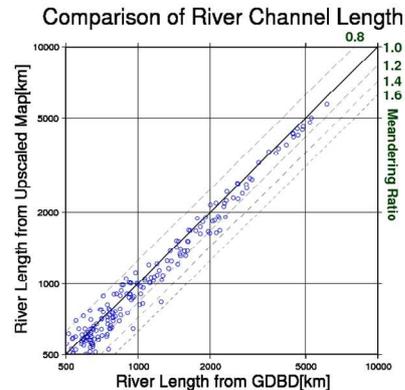


図5：計算方法による河道長の違いの比較

1 km解像度の表面流向データから計算した河道長を横軸に、グリッド中心間距離から計算した河道長を縦軸に示した

緯度 ϕ 経度 λ の点は、式(2)によって地球の中心を原点とする直交座標系(X, Y, Z)に変換される。

$$X = \frac{a \cos \phi \cos \lambda}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}}, Y = \frac{a \cos \phi \sin \lambda}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}}, Z = \frac{a \sin \phi}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}} \quad (2)$$

地球半径 a と地球の離心率 e は式(1)と同一のものを用いた。式(2)より、2つのグリッド中心点の緯度経度を直交座標系に変換し、その間の距離を幾何的に計算することによりグリッド間距離を求めた。

図5よると、グリッドの中心間の距離から計算した河道長は、GDBD表面流向データから計算した河道長を過小に評価している場合と過大に評価している場合があることがわかる。これは、各グリッドにおけるサブグリッドスケールの河川の蛇行の様子が全球で一様でないためである。既存の河川モデルでは、サブグリッドスケールの河川の蛇行を表現するために、蛇行比をグリッド間距離に乗じることで補正を行っていた²⁾。しかし、全球一様の蛇行比を用いていたため、全ての河川の河道長を現実の河道長と一致させることはできなかった。一方で、本研究のアルゴリズムで計算したGDBD表面流向データにもとづく河道長データは、各グリッドにおけるサブグリッドスケールの蛇行の様子の違いを考慮したものである。グローバルモデルで扱う規模の河川は1km解像度未満のスケールではほとんど蛇行していないことを考えると、本研究の河道長データは現実の河道長をよく表現していると言える。

(4) 河川標高データの特徴

本研究で提案する河川網データでは、グリッドの平均標高ではなくGDBD表面流向データのグリッド代表セル近傍の標高を河川の標高として用いている。これは、河川が狭窄部や渓谷を流れている場合、グリッド平均標高が実際の水面の標高よりも高くなるためである。各グリッドの標高データの精度が悪いと、上流グリッドより下流グリッドのほうが標高の高い「負の標高差」を生じる可能性が高くなる。表2は、河川の標高を用いた場合とグリッドの平均標高を用いた場合に生じる負の標高差の数を比較したものである。負の標高差を生じている地点の数は、河川の標高から計算した場合は483地点、グリッド平均標高から計算した場合は1819地点で、河川の標高を用いるほうがより精度よく河川地形を表現できていると言える。GTOPO30標高データの鉛直方向の精度は約30mと見積もられている¹⁴⁾一方で、河川の標高から求めた負の標高差の約60%は標高差10m未満であるので、ほとんどの負の標高差はGTOPO30の標高データのエラーに由来することが分かる。実際に河川モデルを用いて流量計算を行う際は、なんらかの方法で標高もしくは勾配の修正を行い負の標高差を除かなければならない。しかし、本研究のアルゴリズムで構築した河川標高データは既存のグリッド平均標高から計算したものよりも、

表2：負の標高差を生じている地点の数

標高差	～10m	10～100m	100m～	合計
河川の標高	295	10	18	483
グリッド平均標高	433	1048	338	1819

修正しなければならない負の標高差が少なくなる、より精度の高い標高データであると言える。

(5) 観測点位置データの特徴

本研究では、河川モデルで計算された流量を観測値と比較するために、GRDCの流量観測点の河道網上の位置を表した観測点位置データを作成した。図6は構築された1度解像度の河道網上に配置されたGRDCの流量観測点を示す。GDBD表面流向データと流量観測点データから流量観測点の配置を計算した結果、1度解像度の河道網上には2545の流量観測点が配置された。観測点の配置をGDBD表面流向データから計算することで、観測点を一つ一つ手作業で配置していた既往の河道網⁷⁾よりも多数の観測点が配置されている。表3に、配置されたGRDC観測点のうち、主な流域の最下流に位置する流量観測点の緯度経度、GRDCに報告されている上流流域面積、構築した河道網から計算した上流流域面積、上流流域面積の報告値と計算値の差を記載した。ニジェール川流域において40%近い流域面積の過大評価がみられるのは、流域の定義の相異による。GRDCに報告されている上流流域面積には、降水量が少なく流出が観測されないサハラ砂漠が含まれていない一方で、本研究で構築した河道網には十分な降水があった場合に流域に含まれると考えられるグリッドも流域の一部として扱っている。このような流域の定義の差が、ニジェール川流域では流域面積のエラーとして現れている。図3に含まれる他の流域では概ね上流流域面積を正しく評価している。

4. まとめ

本研究では1km解像度のGDBD表面流向データをアップスケーリングして、グローバルな河道網を自動構築するアルゴリズムを提案した。このアルゴリズムでは、既往の河道網で用いられていた8方向で流下先グリッドを示す方法が変わって、グリッド番号で流下先を直接示すという方法で河道網を表現した。流下先グリッドを直接指示することで、下流グリッドが上流グリッド同じ流域

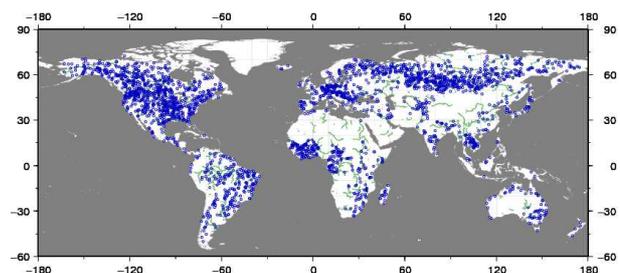


図6：河道網上に配置されたGRDC観測点

表3：主な大規模流域に配置されたGRDC観測点の緯度経度と上流域面積

GRDC-ID	Basin-Name	Station-Name	Lon	Lat	GRDC-Area	Upscaled-Area	Error
3629000	Amazon	Obidos	-55.50	-1.90	4640300	4649151	0.2%
1147010	Zaire	Kinshasa	15.30	-4.30	3475000	3624409	4.3%
4127800	Mississippi	Vicksburg, Miss.	-90.91	32.31	2964252	2999588	1.2%
2912600	Ob	Salekhard	66.53	66.57	2949998	2595416	-12.0%
1362100	Nile	el Ekhsase	31.28	29.70	2900000	3021097	4.2%
2903430	Lena	Stolb	126.80	72.37	2460000	2417014	-1.7%
2909150	Yenisei	Igarka	86.50	67.48	2440000	2478806	1.6%
3265300	Parana	Corrientes	-58.85	27.97	1950000	2131234	9.3%
2906900	Amur	Komsomolsk	137.12	50.63	1730000	1880870	8.7%
2181900	Chang Jiang	Datong	117.62	30.77	1705383	1653357	-3.1%
4208025	Mackenzie	Arctic Red River	-133.74	67.46	1660000	1672189	0.7%
6977100	Volga	Volgograd Power Plant	44.72	48.77	1360000	1377811	1.3%
1734500	Niger	Malanville	3.38	11.87	1000000	1395289	39.5%
4213710	Nelson	above Bladder Rapids	-97.93	54.78	1000000	979346	-2.1%
2846800	Ganges	Farakka	87.92	25.00	935000	892040	-4.6%
3206720	Orinoco	Puente Angostura	-63.60	8.15	836000	808009	-3.3%
4103200	Yukon	Pilot Station	-162.88	61.93	831390	822026	-1.1%
6742900	Danube	Ceatal Izmail	28.73	45.22	807000	775663	-3.9%
4143300	St. Lawrence	Ogdensburg, N.Y.	-75.50	44.70	764600	723315	-5.4%
2180800	Huang He	Huayuankou	113.65	34.92	730036	821419	12.5%
3649900	Tocantins	Itupiranga	-49.35	-5.13	727900	746036	2.5%
4152100	Colorado	Yuma, Ariz.	-114.62	32.73	629100	672220	6.9%
2469260	Mekong	Pakse	105.80	15.12	545000	526584	-3.4%

に属することが確実になり、手作業による修正が必要ない現実的な河道網を構築することができた。

また、河道モデルにおける流量シミュレーションに必要な河道長と河川標高に関しても、自動構築アルゴリズムを用いて1km解像度の表面流向データから計算した。河道長に関しては、1 km解像度の表面流向データの河川長さを用いることで、従来のグリッド間距離を用いる手法より流域間のばらつきの少ない河道長データを構築することができた。河川標高に関しても、従来はグリッド平均標高が用いられていたが、本研究では1km解像度の表面流向データを利用して河川の地点標高を抽出した。これにより、サブグリッドスケールの河川地形を考慮した河床勾配が求められるようになった。

本研究で提案した河道網の自動構築アルゴリズムは、河道網構築の自動化と河川地形データの詳細化により、より高解像度かつ複雑な河川モデルを用いた河川流量シミュレーションに応用されることが期待される。

参考文献

- 1) Miller, J. R., Russell, G. L., and Caliri, G.: Continental-Scale River Flow in Climate Models, *J. Climate*, **7**, pp914-928, 1994.
- 2) Oki, T., Nishimura, T., and Dirmeyer, P.: Assessment of Annual Runoff from Land Surface Models Using Total Runoff Integrating Pathways (TRIP), *J. Meteorol. Soc. Japan*, **77**(1B), pp235-255, 1999.
- 3) Hirabayashi, Y., Kanae, S., Struthers, I., and Oki, T.: A 100-year (1901-2000) global retrospective estimation of the terrestrial water cycle, *J. Geophys. Res.*, **110**, D19101, doi:10.1029/2004JD005492, 2005.
- 4) Oki, T., Agata, Y., Kanae, S., Saruhashi, T., and Musiaka, K.: Global water resources assessment under climatic change in 2050

using TRIP, *Water Resources Systems -Water availability and global change*, *IAHS Publ.* **280**, pp124-133, 2003.

- 5) Oki, T., and Sud, Y. C.: Design of Total Runoff Integrating pathways (TRIP) – A Global River Channel Network, *Earth Interactions*, **2**, pp1-36, 1998.
- 6) Fekete, B. M., Vorosmarty, C. J., and Lammers, R. B.: Scaling gridded river networks for macroscale hydrology: Development analysis, and control of error, *Water Resour. Res.*, **37**(7), pp1955-1967, 2001.
- 7) Doell, P., and Lehner, B.: Validation of a new global 30-min drainage direction map, *J. Hydrol.*, **258**, pp214-231, 2002.
- 8) Olivera, F., Lear, M. S., Famiglietti, J. S., and Asante K.: Extracting low-resolution river networks from high-resolution digital elevation models, *Water Resour. Res.*, **38**(11), 1231, doi:10.1029/2001WR000726, 2002.
- 9) 舩谷敬一, 赤井計之, 馬籠純: 格子状儀河道網のスケール変換に関する新しい方法, *水文・水資源学会誌*, **19**(2), pp139-150, 2006
- 10) Reed, S. M.: Deriving flow directions for coarse-resolution (1-4km) gridded hydrologic modeling, *Water Resour. Res.* **39**(9), 1238, doi:10.1029/2003WR001989, 2003.
- 11) Arora, V. K., and Boer, G. J.: A variable velocity flow routing for GCMs, *J. Geophys. Res.*, **104**(D24) pp30965-30979, 1999.
- 12) Masutomi, Y., Inui, Y., Takahashi, K., and Matsuoka, U., Development of highly accurate global polygonal drainage basin data, *Hydrol. Proc.*, **22**, 2008, *in print*.
- 13) 国立天文台編, 理科年表机上版, p643, 丸善株式会社, 2000.
- 14) Denker, H., Evaluation of SRTM3 and GTOPO30 Terrain Data in Germany, *Gravity, Geoid and Space Missions*, **129**, pp218-223, 2005.

(2008. 9. 30受付)