

# 水文地形解析の広域展開

## —大陸から地球規模でのデータ分析—

山崎 大

標高データから河道ネットワークや流域界などを抽出する水文地形解析は、GISを用いた分析の代表例である。水文地形解析は一般的には研究や業務に必要な基礎的情報を整備するために対象とする単一の流域で用いられるが、近年では大陸から地球規模で水文地形データを整備する研究も行われている。本稿ではGISに関連する先進的な研究の例として、水文地形解析を広域に展開する際の課題を整理するとともに、最先端研究においてグローバルかつ高精度でのデータ分析を実現するための工夫を紹介する。また広域水文地形データの活用事例および今後の展望をまとめた。

キーワード：水文地形解析，地球規模，ビッグデータ

### 1. はじめに

標高などの地形データから地表面流向・流域界・河道ネットワーク・集水面積といった河川水文情報を抽出する「水文地形解析」は、GISを用いたデータ分析の代表例の一つである。水文地形解析は、降雨・蒸発散・河川などの地球上のあらゆる水の貯留と移動を扱う水文学（すいもんがく）をはじめとして、土木工学・地理科学・地球科学など幅広い分野で用いられている。過去の河川水文に関する研究や業務では、地形図などから河道位置と流域界を手作業で抽出して整理し、降雨量を各集水域に分配して河川流量や水収支の解析を行うというアナログな手法が用いられていた。GISとデジタル標高モデル（Digital Elevation Model: DEM）を用いて河川水文情報の抽出をコンピューター上で容易に解析できるようになったことは、水文学をはじめとした河川や水循環を扱う分野にとって非常に大きなブレイクスルーになったといえる。

GISを用いた水文地形解析は、単一（もしくは少数）の河川流域に対して実施することを想定している。多くの研究や業務では、地形解析や河川シミュレーションの対象とする地域が決まっており、GISはその対象地域において研究に必要な水文地形データを整備するために用いられる。GISの水文地形解析を用いた研究例として、水資源アセスメント・流域環境評価・洪水リスクモデリングなどが挙げられる。

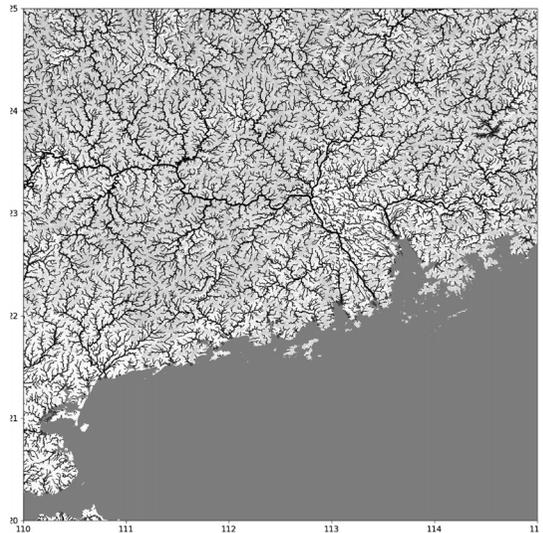


図1 広域水文地形データの例（中国 Pearl River 河口付近における河道ネットワーク）  
ここでは集水面積  $5\text{ km}^2$  以上の河川のみを表示しているが、元は  $90\text{ m}$  解像度のラスターデータである。（Yamazaki et al. [1] より改変）

近年はグローバルな高精度標高データが開発されたことを受けて、より広域を対象とした水文地形データを整備する研究が行われている。本稿ではGISに関連する最先端研究の一例として、大陸スケールや地球全域を対象とした水文地形データの広域展開の事例を紹介する。なお、広域水文地形データの例として、中国 Pearl River の河道ネットワークを可視化したものを図1に示した。

広域を対象にした水文地形データ開発は、その元になる広域標高データが公開されたタイミングで実施さ

やまざき だい  
東京大学生産技術研究所  
〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1  
yamadai@iis.u-tokyo.ac.jp

れてきた。地球全域を対象とした初期の DEM として USGS (アメリカ地質調査所) の GTOPO30 [2] が 1996 年に公開され、それをもとに地球全域を対象にした 1km 解像度の水文地形データセット USGS Hydro1k [3] が 2000 年に整備された。その後、スペースシャトルからのレーダー観測によって高解像度の全球デジタル標高モデル SRTM DEM [4] が NASA によって 2005 年に公開され、それを入力データとして 3 秒 (約 90m) 解像度の全球水文地形データ HydroSHEDS [5] が GIS を用いて 2009 年に整備された。近年では筆者を含む研究チームが、国土地理院の基盤地図情報の標高データから日本全域をカバーする水文地形データ Japan Flow Direction Map [6] を開発したほか、衛星 DEM から複数誤差成分を除去した高精度全球標高データ MERIT DEM [7] に水面マップなどさまざまな地理情報を組み合わせて新たな全球水文地形データ MERIT Hydro [1] を 2019 年に公開している。

これらの大陸から地球規模の水文地形データは、気候変動予測に用いられる大気-海洋結合大循環モデル (いわゆる気候モデル) において陸域から河川への淡水流出をモデル化する河道網として、また地球全域を対象とした水資源アセスメントや洪水リスク評価を行う全球河川モデルの基礎情報としてなど、グローバルな水循環や地球システムに関わる研究で幅広く利用されている。また、地球上のすべての河川流域を包含することから、グローバルな研究だけではなく、途上国などのデータが限られた地域を研究対象とするときにも活用されている。HydroSHEDS や MERIT Hydro のような既存の水文地形データを利用することで、GIS などを用いた基礎情報整備という研究開始時の手間のかかる作業を省略することができるため、高精度かつ高信頼な全球データは河川水文に関する研究分野で重宝されている。

ただし、前述したように GIS ソフトウェアに実装されている水文地形解析ツールは、基本的には単一流域や小規模な地域への適用を前提に設計されているために、大陸から地球全域をカバーする水文地形データの構築は決して容易な作業ではない。本稿では、水文地形データ解析の基礎的な計算フローに触れつつ、グローバルなプロダクト整備における工夫を GIS 関連研究の最先端の事例として紹介する。

## 2. 水文地形解析の基礎：単一流域への適用

水文地形解析は、基本的には地表面の標高を 2 次元のメッシュで表すデジタル標高モデル (DEM) を入力

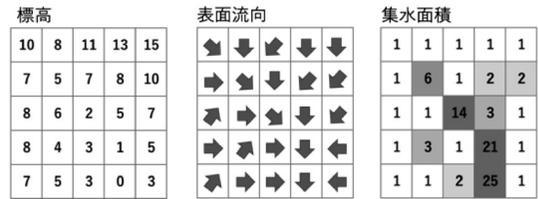


図 2 表面流向と集水面積計算の概念図

データとして、河川ネットワークと流域界を抽出するものである。ArcGIS による水文地形解析の詳細は、ESRI 社の公式 Web ドキュメント [8] にまとめられているが、以下に手法の概要を説明する。

まず、各ピクセルにおいて地表面の水が流れる方向 (表面流向, Local Drainage Direction) を、標高データから隣接 8 ピクセルへの地形勾配を計算し最も勾配が急な方向を流下方向として選ぶことで定める。ここでは各ピクセルに一つの下流ピクセルが定義される。隣接する八つのピクセルから一つ下流ピクセルを決めるという特徴から「D8 メソッド」と呼ばれている手法である。これによりピクセル間の上流下流関係が定まるので、ピクセル面積を上流から足し合わせることで各地点の集水面積が求まる。さらに、ある集水面積を閾値とすることで河道ピクセルを定義して、河道ネットワークを抽出できる (図 2)。また、あるピクセルの上流側ピクセルの集合を流域界として抽出する、河川ネットワーク構造から河川次数 (河川の大きさの指標) を定義するといった解析も可能になる。

上記の説明は理想的な条件についてであり、実際には入力標高データから勾配を求めるだけでは河川ネットワークを抽出できない場合がほとんどである。たとえば、標高データに窪地が存在すると、表面流向が窪地内の最低標高点に集まってしまうため窪地領域が河川流域に含まれなくなってしまう。実際の河川流域内には多数の窪地があり、水は地表面ではなく一度地下に浸透してから地中を通して下流に流れ出る場合も考えられ、小さな窪地は流域に接続して含めるほうが妥当なケースが多い。また誤差によって現実には存在しない窪地が標高データに含まれている可能性もある。さらに、標高データの解像度が十分ではない場合は細い谷や水路が表現できないので、データ上ではそのような狭窄部の上流側が窪地と扱われてしまうという問題も発生する。

窪地の存在による誤差に対処するため、GIS による水文地形解析では「窪地処理」という手法が用いられる。窪地処理は、窪地領域内部のピクセルの標高をも

ち上げることで窪地を除去するアルゴリズムである。水文地形解析が単一の河川流域のみを対象とする場合は、流域内には窪地は存在しないと仮定してすべての窪地を自動的に埋める処理を行う、もしくは小さな窪地は自動で一括処理したうえで大きな窪地が現実是否存在するかを確認しながら一つ一つ対応を判断する、などさまざまな方法がある。いずれの場合も対象範囲が極端に大きくない限りは、多少の手作業が必要な場合でも窪地を取り除いて河道ネットワークを適切に抽出することは作業コスト的にも十分可能である。

窪地処理のほかにも、より精密に水文地形解析を行うためのさまざまな工夫が提案されている。たとえば、平坦地では標高データのノイズの影響が相対的に大きくなるために、標高データのみから水路の位置を適切に抽出することが難しい。これに対処するため、水路位置データを補完的に用いて、水路周辺のピクセル標高を下げてから表面流向を求める Stream Burning という方法がとられることもある [9]。また、現実の最上流部では水路ネットワークが明確に形成されずに、水が地表または地下を斜面に並行する方向に長距離流下するという場合もあり、流下方向を隣接 8 セルに限定する D8 メソッドでは適切に集水面積などを評価できない場合もある。最上流域での適切な地形解析は土砂災害の分析などでは非常に重要であり、これを解決するために流下方向を限定しない D-Infinity メソッドを用いて水文地形解析ができる TauDEM [10] のような GIS のアドオンツールも開発・公開されている。

このように、解析対象流域の特徴や研究目的に応じて追加的なツールの利用が望まれる場合もあるが、いずれの場合も単一（もしくは少数の）流域を対象に水文地形解析を行う場合には GIS は非常に強力なツールであるといえる。河川水文研究に必要な GIS ツールは一通り揃っているのに、水文地形データの整備という事前準備作業については自分でプログラムを書かなくとも既存 GIS を利用することで、研究のより本質的な部分に効率的に時間を割くことが可能になると期待できる（もちろん、水文地形解析における問題はすべて解決されていないので、解析手法そのものを高度化する研究は現在でも取り組まれている）。

### 3. 水文地形解析の大陸から地球規模の展開

#### 3.1 広域での水文地形データ整備の課題

単一の河川流域を対象にする場合と異なり、大陸や地球全体といった大きなスケールでの水文地形解析は膨大なコストが必要な作業となる。一つ目の課題とし

ては、複数の河川流域の境界を適切に表現する必要がある点があげられる。単一河川流域を対象とする場合は、流域範囲で切り出した標高分布を入力データとして解析を行えば、流域境界は必然的に現実的なものとなるが、複数流域を含む広域で解析を行う場合は河川流域境界も解析によって求める必要があり、入力標高データの誤差などに影響を受ける。このため計算結果を都度確認して、現実的な河川流域境界が抽出されているかを解析者が確認する必要がある。特に乾燥域では多数の内陸河川が存在し、現実の窪地と誤差による凹領域（データ上での窪地領域）を判定することに膨大な労力が必要となる。

二つ目の課題として、入力する地形データの精度があげられる。大陸や地球全域を対象とした水文地形解析では、広域をカバーする衛星観測 DEM を中心に用いる必要があるため、高精細な地形データが得られる流域を対象とする場合よりも標高の誤差が大きくなる。また、グローバル標高データの解像度も 100 m 程度と粗いため、山岳域の渓谷や細い水路が正確に表現されておらず、河道ネットワークの抽出に支障をきたす。

このように広域での水文地形解析には多くの困難が伴うものの、その先駆けとしてグローバルな水文地形データ HydroSHEDS が、NASA が 2005 年に公開した衛星標高データ SRTM DEM を入力データとして GIS を用いて 2009 年に公表された。HydroSHEDS の開発は、着手からプロダクト完成までに 5 年程度の期間を要した非常に壮大なプロジェクトであった。対象領域が地球全域と非常に大きいだけでなく、衛星標高データの精度の制約のために、GIS の水文解析ツールで表面流向と河道ネットワークを抽出したあとで、地図などで現実の河川と齟齬がないかを確認して都度修正する必要があったためである。地図などで得られる河川の情報と比較して、間違いがある場合はインプットとなる標高データの窪地を埋める、河道にそった標高を下げる、流域界の標高を上げるといった修正が手作業で行われた。膨大な作業量と丁寧な検証プロセスを踏んでいるため、2009 年にリリースされた HydroSHEDS は研究者の間でも信頼度が高く、多くの研究で基盤情報として利用されている。

しかし、HydroSHEDS の構築には多大な作業コストが必要であったこともあり、データのアップデートを行うことが困難であるという問題もある。HydroSHEDS の発表以降、新しいグローバルな衛星 DEM や水面データが登場したが、それらを地球規模の水文地形解析に用いることは難しい状況であった。また、地球上すべ

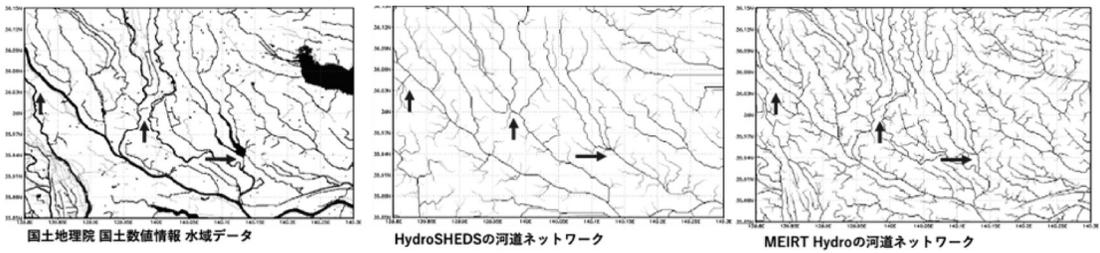


図3 利根川・鬼怒川・小貝川合流点付近の河道ネットワーク  
 左: 国土数値情報の水域マップ, 中: HydroSHEDS の河道ネットワーク, 右: MERIT Hydro の河道ネットワーク. 矢印は河道ネットワークに顕著な差が見られる地点を示す.

ての地域で小河川までを含めて河道ネットワークが正確に表現されているかを確認することは実質的に不可能であるため、HydroSHEDS の精度には限界があるといえる。例として図3に利根川・鬼怒川・小貝川合流点の河道ネットワークを示した。HydroSHEDS は利根川本流を表現しているが、江戸川の流路が表現されておらず、小貝川と鬼怒川も途中で合流しているのが確認できる。

### 3.2 より効率的かつ高精度な広域水文地形解析

地球全域を対象とした洪水シミュレーションや衛星水循環モニタリングといった最先端の科学研究では、より高精度な河川地形情報が求められるようになり、前節で挙げた HydroSHEDS の問題が顕在化するようになった。そこで筆者らの研究チームは、最新の衛星観測データを用いてより高精度な広域水文地形データを開発する研究を進めてきた。

これを実現するためには、水文地形解析のアルゴリズムの改良だけでなく、入力標高データである衛星 DEM の誤差を大幅に低減する必要があった。そこで、水文地形解析に先駆けて高精度の全球標高データ MERIT DEM が開発された。ここでは複数の衛星 DEM に、複数衛星データと複数ノイズフィルタリング手法を組み合わせ、複数の誤差成分を分離するというものである。衛星標高データに含まれる縞状や斑点状のノイズ、平均値のバイアス、植生など地表物によるバイアスといった複数誤差成分を分離・除去することで、高精度の標高データを構築した。図4にメコン川デルタにおける誤差除去前後の DEM を示した。開発手法や精度評価の詳細については既述論文 [7] にまとめている。

この高精度全球標高データ MERIT DEM をベースとして、地球全域を対象とした新たな高精度全球水文地形データ MERIT Hydro が開発された [1]。開発にあたっては、将来新たな標高データが登場した際にアッ

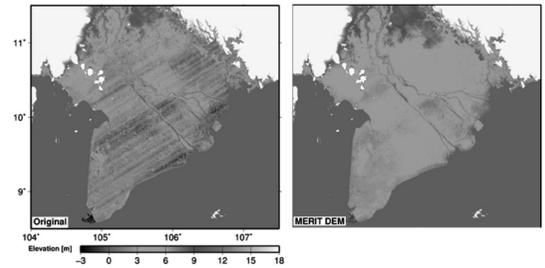


図4 衛星標高データの誤差除去の例  
 左: 修正前の SRTM DEM, 右: 修正後の MERIT DEM.

プデートすることを想定して、手作業を最小限に抑えてほぼすべてのプロセスを自動化することに焦点を当てている（そのため、以下で説明するアルゴリズムは独自開発した Fortran90 と Shell Script で実装されており、GUI (Graphical User Interface) を前提とした GIS ソフトは用いていない。詳細な手法は既述論文 [1] を参照されたい）。

高精度かつ高効率に広域河道ネットワークを抽出するために、MERIT Hydro の構築では標高データに加えて地球規模の水面データを入力データとして用いている。ここでは、Landsat 衛星画像を地球規模で解析した衛星水面マップ G1WBM [11] および GSWO [12] を用いたほか、衛星では捉えられない小河川を表現するために、オープンな地図データである OpenStreetMap から水面を地球規模で抽出した OSM Water Layer [13] を併せて使用した。これらの水面マップを用いて全球標高データ MERIT DEM の水面ピクセルの値を事前に下げしておくことで、表面流向が水域に集まるため適切な河道ネットワークの抽出をサポートできる (図5)。

次の課題は、窪地処理の自動化である。従来の GIS ソフトに実装されているアルゴリズムでは先に窪地処理を行ってから表面流向を計算していたが、MERIT Hydro では先に表面流向を計算したあとにそれを用い

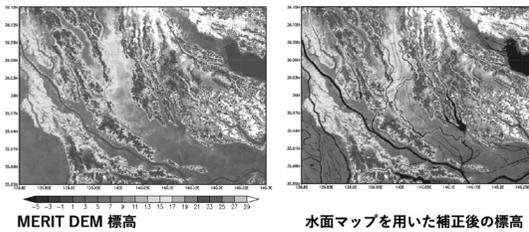


図5 水面マップを用いた衛星標高データの補正  
左：修正前の MERIT DEM, 右：修正後の標高  
(Yamazaki et al. [1] より改変).

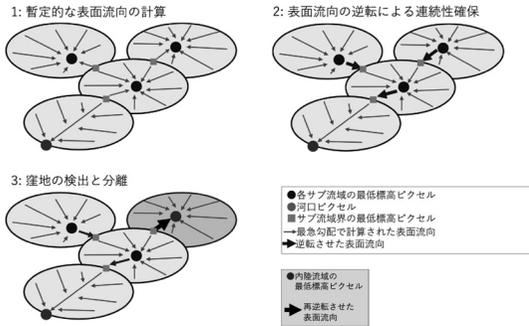


図6 窪地の自動判定アルゴリズムの概要  
(Yamazaki et al. [1] より改変).

て地形を解析し、自動的に実際の窪地と標高データ誤差による凹領域を判別するようなアルゴリズムを開発した。図6に示すように、まず、標高データから暫定的な表面流向を計算するが、この時点では標高誤差などのために、流域が複数の窪地に分割される。窪地の境界にある最も標高が低いピクセルを検出し、そこを通るように境界ピクセルまでの表面流向を逆転させる。この作業を繰り返すと、すべてのピクセルが河口まで接続されたデータが作成される。ここで誤差による凹領域と実際の窪地を区別するために、表面流向を逆転させるのに必要な地形修正量を計算して、それがある閾値より大きい場合は窪地として扱う、という計算手法をとる。この工夫により、HydroSHEDSでは手作業で判別を行っていた窪地処理を、地形修正量という閾値を用いて自動化することができた。ただし、地球上すべての地域で同一の閾値を用いることは実際には機能せず、すべての地域を目視で確認して、現実の窪地(=内陸河川)が適切に表現されているかを確認し、必要であれば地域的な閾値調整などを行う必要があった。

窪地の調整以外にも、標高データや水面マップに間違いが含まれていて適切に河道ネットワークが抽出できないケースも多数存在した。特に入力データの不備に関してはアルゴリズムの改善で対応することが難し

いたために、適切な河道ネットワークが得られるように地球全域で約1,000箇所について修正を行った。なお、データ修正は例外処理としてソースコードに埋め込んでいるため、アップデートのための再計算では自動的に対応できる。

このような多少の例外処理を除いては計算プロセスをほぼすべて自動化しており、GISソフトを用いる場合に求められるマニュアルでの作業が必要ないのが開発したアルゴリズムの利点である。一方で、開発した水文地形データの精度検証には、地図データを地球全域で1,200枚程度の高解像度画像として出力してすべてを目視する、HydroSHEDSをはじめとした既存データとの相違点を可視化する、といった品質確認プロセスを実施している。明らかな河川ネットワークの間違いがないかを確認し、必要であれば入力データやアルゴリズムを修正するというクオリティコントロールを入念に行う必要があった。それでもMERIT Hydroの開発に要した期間は2年程度であり、GISに頼る既存手法よりも大幅に効率化できたと考えられる。また、作業に用いたプログラムやデータは再利用ができるため、標高データや水面マップが更新された際には、今後はより効率的に水文地形データのアップデートを行うことが可能だと期待できる。

地球全域を対象とした水文地形データ整備の研究では、構築手法そのものが厳密であるかよりも整備されるプロダクトが高信頼であることが重視される。なるべく全プロセスを自動化して客観的な手法を提案することを目指しているが、必要に応じて高信頼のプロダクトを作るために入力データそのものを改変することが求められる点が、数学や理論構築を対象とした研究との違いであると考えられる。

MERIT Hydroが表現する河道ネットワーク情報を図1(中国 Pearl River 付近)および図3(利根川・鬼怒川・小貝川合流部)に示した。図3では、既存データであるHydroSHEDSと比較して、MERIT Hydroでは利根川・鬼怒川・小貝川といった小河川が適切に表現されていることが読みとれる。図には示していないがその他の地域でもHydroSHEDSに比べて大幅に河道ネットワーク・流域界・河川地形の表現精度が上がっており、最新の標高データと水面マップの組み合わせによって水文地形データの大幅な精度向上が実現できた。

#### 4. 高精度水文地形データの活用と今後の展望

広域を対象とした水文地形データ整備の研究は、デー

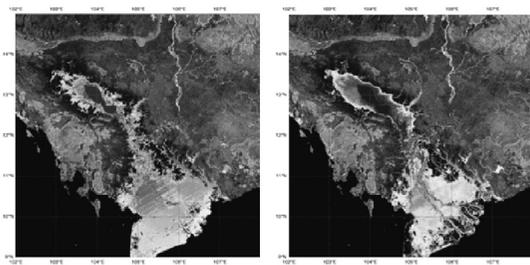


図7 広域水文地形データを用いた洪水シミュレーションで計算された浸水域分布  
左: HydroSHEDSを用いた場合, 右: MERIT Hydroを用いた場合. フルカラーでのアニメーションは筆者らが開発している全球河川水動態モデル CaMa-FloodのWebPage [14] からアクセスできる.

タ開発自体が目的ではなく、それを幅広い分野で活用することを想定している。たとえば水文地形データが精緻化されたことで、それを基礎情報として用いる広域洪水シミュレーションの精度を大幅に向上させ、洪水リスク評価の信頼度を高めることができる。水循環に関する研究以外にも、地形地質分類・生物多様性・考古学などさまざまな分野で用いられる基盤情報の質を高めることが、広域データ整備研究が担う役割であると考えられる。

例として図7に広域水文地形データを用いた洪水シミュレーションによる浸水深さ分布（メコン川下流域）を示している。古いデータであるHydroSHEDSを用いた場合には、標高データの誤差に起因する縞状の非現実的な浸水深さ分布や、標高データの斑点状ノイズの影響が散見されるが、それらは最新データであるMERIT Hydroを用いた場合では改善されている。図7は物理スキームとしては同じ河川洪水モデル [13] を用いて地形データのみを入れ替えてシミュレーションした結果であり、境界条件となる水文地形データの精度が重要であることが確認できる。

しかしながら、現在の水文地形解析の手法は、陸域の水の流れの実態を正確に表現できていないとはいえない。たとえば、流下先を隣接する8ピクセルから一つ選ぶD8メソッドは扱いが簡単ではあるが、デルタ地域における河川に分岐といった複雑な河川ネットワークを表現できない。また、地下トンネルや高架などの水利施設によって水路が立体交差するケースや、カルスト地形などで自然に存在する地下河川なども表現することはできない。計算アルゴリズムの簡便さは保持しつつも、より複雑なネットワーク構造を記述できる数学的手法を取り入れるなど、引き続き手法の改善が望まれる。

また、ArcGISやQGISなど既存のGISソフトとは異なる地理情報解析ツールも登場しており、それらとの連携も必須である。例として、近年Google社が衛星観測データと地理情報データをクラウドサーバー上で解析できるプラットフォームGoogle Earth Engine [15]の無償提供を始めた。Google Earth Engineのサービス開始により、だれでも計算機への金銭的コストを気にせずに、地球全域を対象に高解像度の衛星データを大規模に解析できるようになった。MERIT Hydroの入力データとして使用した水面マップGSWO [12]も、Earth Engine上で過去30年間のLandsat衛星画像300枚以上を解析することで開発されている。また、衛星水面マップを用いて地球規模で河川の幅を計算する [16, 17]といった、既存GISソフトには実装されていないような水文地形解析ツールの開発も進んでいる。

水面や河道幅の広域データは、洪水シミュレーション・水域生態系評価・陸域物質循環などさまざまな研究に必要とされており、既存GISソフトの枠組みで整備された水文地形データと組み合わせることで、さまざまな分野で研究の進展につながりうる。昨今、気候変動や生物多様性をはじめとした地球規模の課題解決の重要性が増してきている。地球全域でいま何が起きているのかをシミュレーションや衛星観測でモニタリングするには、広域水文地形データといった基盤地図が重要な役割を担う。本稿で紹介した地理データ分析によって地図を作る作業は、地味な基礎的研究と捉えられがちだが、幅広い地球科学研究を基礎から支えることで、人類の持続可能な発展に少なからず貢献できると期待される。

謝辞 本研究は科研費(16H06291と21H05002)の成果の一部を紹介したものです。

#### 参考文献

- [1] D. Yamazaki, D. Ikeshima, J. Sosa, P. D. Bates, G. H. Allen and T. M. Pavelsky, "MERIT Hydro: A high-resolution global hydrography map based on latest topography datasets," *Water Resources Research*, **55**, pp. 5053–5073, 2019.
- [2] USGS, Global 30 Arc-Second Elevation (GTOPO30) dat, <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-global-30-arc-second-elevation-gtopo30> (2021年8月26日閲覧)
- [3] USGS, Hydro1k, <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-hydro1k> (2021年8月26日閲覧)
- [4] T. G. Farr, P. A. Rosen, E. Caro, R. Crippen, R. Duren, S. Hensley, M. Kobrick, M. Paller, E.

- Rodriguez, L. Roth, D. Seal, S. Shaffer, J. Shimada, J. Umland, M. Werner, M. Oskin, D. Burbank and D. Alsdorf, “The Shuttle Radar Topography Mission,” *Review of Geophysics*, **45**, RG2004, 2007.
- [5] B. Lehner, K. Verdin and A. Jarvis, “New global hydrography derived from spaceborne elevation data. Eos,” *Transactions American Geophysical Union*, **89**, pp. 93–94, 2008.
- [6] 山崎大, 富樫冨佳, 竹島彰, 佐山敬洋, “日本全域高解像度の表面流向データ整備,” 土木学会論文集 B1 (水工学), **74**, L163–L168, 2018.
- [7] D. Yamazaki, D. Ikeshima, R. Tawatari, T. Yamaguchi, F. O’Loughlin, J. C. Neal, C. C. Sampson, S. Kanae and P. D. Bates, “A high-accuracy map of global terrain elevations,” *Geophysical Research Letters*, **44**, pp. 5844–5853, 2017.
- [8] ArcGIS Desktop, 「水文学解析ツールセットの概要」, <http://desktop.arcgis.com/ja/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/an-overview-of-the-hydrology-tools.htm> (2021年8月26日閲覧)
- [9] M. H. Daniels, R. M. Maxwell and F. K. Chow, “Algorithm for flow direction enforcement using subgrid-scale stream location data,” *Journal of Hydrologic Engineering*, **16**, pp. 677–683, 2011.
- [10] D. G. Tarboton, TERRAIN ANALYSIS USING DIGITAL ELEVATION MODELS (TAUDEM), <http://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5/> (2021年10月29日閲覧)
- [11] D. Yamazaki, M. A. Trigg and D. Ikeshima, “Development of a global ~90 m water body map using multi-temporal Landsat images,” *Remote Sensing of Environment*, **171**, pp. 337–351, 2015.
- [12] J. F. Pekel, A. Cottam, N. Gorelick and A. S. Belward, “High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes,” *Nature*, **540**, pp. 418–422, 2016.
- [13] OSM Water Layer, Surface Waters in OpenStreetMap, [http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~yamadai/OSM\\_water/](http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~yamadai/OSM_water/) (2021年8月26日閲覧)
- [14] CaMa-Flood, Global River Hydrodynamics Model, <http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~yamadai/cama-flood/> (2021年8月26日閲覧)
- [15] N. Gorelick, M. Hancher, M. Dixon, S. Ilyushchenko, D. Thau and R. Moore, “Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone,” *Remote Sensing of Environment*, **202**, pp. 18–27, 2017.
- [16] D. Yamazaki, F. O’Loughlin, M. A. Trigg, Z. F. Miller, T. M. Pavelsky and P. D. Bates, “Development of the global width database for large rivers,” *Water Resources Research*, **50**, pp. 3467–3480, 2014.
- [17] G. H. Allen and T. M. Pavelsky, “Global extent of rivers and streams,” *Science*, **361**, pp. 585–588, 2018.