

43. 1 KM DEM を用いたグローバル流域データセットの作成と水資源モデルの開発

Global Drainage Dataset using 1km DEM and Water Resource Modeling

越智士郎* ・ 柴崎亮介*

Shiro OCHI*, Ryosuke SHIBASAKI*

ABSTRACT ; In order to discuss about future food production in global scale against the population growth, it is quite important to understand and estimate the water resource availability. Water resource is a restrictive factor to the agricultural activities as well as the human habitability. A drainage model that follows water surface flow according to the slope direction was developed, using 1km DEM – GTOPO30. This paper mainly describes about the algorithm to generate the drainage model. The extracted drainage systems (stream lines) are faithful to the existing stream line data, however corrections are also required to delineate exact catchment boundaries. In combining the drainage model with precipitation data, a simple “run-off model” was examined to some basins in Asia. The model simulates the seasonal dynamics of water resources for the whole basin quantitatively.

KEYWORDS ; DEM, Global, Drainage Model, Water Resources

1 はじめに

世界人口は 20 世紀初頭、約 20 億人であったが、100 年後の 21 世紀の初頭には約 60 億人、2050 年には 100 億人を越える予想されている。人口増加に伴う食糧の確保、水資源の確保は大きな関心事である。食料生産に関していえば、我が国では、19 世紀までの食糧増産は主として耕地面積の拡大によって行われたが、20 世紀のそれは単位面積あたりの収量の増加によるところが大きかった。つまり、19 世紀までに立地条件のよいところが耕地化され、ついで農業技術の進展—新しい作物の作出、品種改良、農薬や肥料の進歩、栽培技術の進歩、さらに灌漑排水や圃場整備などによる農地基盤の整備—が行われた(水文水資源学会, 1997)。現代においても同様の発展段階が発展途上国で繰り返されるかは不明である(むしろ同時に進行しているように思われる)が、いずれにせよ食料生産力を評価するためには水資源量の分布を大陸・地球規模でとらえることが不可欠と思われる。本研究では、1km 全球デジタル標高データである GTOPO30 と気候データ、月別職制指標データなどを利用して、全球レベルで水資源の分布地図を作製することを念頭に、モデルを構築する。

2 グローバル水系モデルの作成

2.1 グローバル水系モデルの概要

流域単位での水資源の活用・管理を含めた土地利用計画を考えようとするならば、それぞれの河川の水資源量・灌漑能力を定量的に把握する必要がある。流域情報とは簡単に言えば、注目する地域がどの流域に含まれ、どのような地形特徴・土地利用(土地被覆)になっているか、また上流域・下流域はどのようなかといった類の情報である。野上(1998)はメッシュデータ上で水がどの方向に流れるかを示す流水線図(Drainage Direction Matirx:(DDM)を作成することができれば、これに関連した各種演算処理が容易に実

* 東京大学生産技術研究所, Institute of Industrial Science, University of Tokyo.

現できるとし、数値標高データ(DEM: Digital Elevation Model)から DDM を作成できる手法を提案している。本論では DDM とそれから自動作成できる流域界データ、流域分割マップなどを“水系モデル”と呼び、水系モデルを発展させ、傾斜や地表面の状況から各メッシュの流出率を考慮し、流域からの流出過程再現させようとしたものを“流出モデル”として意図的に区別した。水系モデルにより各メッシュについて上流・下流を追跡することができるため、コンピュータ上で流域情報を管理するには好都合であり、同時にメッシュ(ラスタ)型のモデルであるため、DEM から求められる地形情報やリモートセンシングデータなどの情報との重ねあわせも容易に実現できる。以下に本研究で開発した水系モデル作成方法を説明する。

2.2 利用データ

(A) GTOPO30

GTOPO30 は米国地質調査所(USGS)-EROS Data Center により作成、配布されている 30 秒(約 1km)メッシュの数値標高データである。そのソースデータは、いくつかの異なる機関により作成されているため精度は一樣でないが、現段階で利用できるで最もメッシュサイズの細かい全球標高データである。

(B) 水系データ

今回開発したアルゴリズムにより、水系(流路)は、DEM だけから自動的に決定されるが、一部に本来の流路と大きく外れる場合が生じる。DCW(Digital Chart of the World)に含まれる Browse data (カバレッジ名:DN)は小縮尺図(1/31,000,000)から抽出された水系図であり⁵⁾、位置精度としては十分とはいえないが、大河川の大まかな流路を知ることができるため、今回は DN データを自動発生させた流路の修正のための補助データとして用いることとした。

2.3 アルゴリズム

水系モデルの作成は、(A) DEM を用いた水系モデルの自動発生プロシジャーと(B) 既存水系データを参照した流路の修正のプロシジャーの 2 つの過程により処理した。

(A) DEM を用いた水系モデルの自動発生

水系モデルは、各メッシュが下流方向への流出方向(以下、流向)をもった単純なモデルである。流向は普通は各メッシュの周囲 8 メッシュの中から、最急下方斜面の方向を選び決定される。一般に斜面方位と言う時は、最急勾配斜面方位をさすことが多く、その場合下り斜面とは限らないので注意が必要である。流向決定時に生じる問題は、周囲 8 メッシュの中に下り斜面が存在しない場合である。これには次のような場合が考えられる。

- 平坦地で、3x3 メッシュ内に標高差がない場合。
- 盆地上で実際には下流へ通じる流路があるのに、DEM のサイズなどでデフォルメされ、流路が見えない場合。
- 砂漠や内陸の湖などで海までの流路をもたない場合。
- DEM 自体の誤差の場合。

本研究で開発したアルゴリズムより、上記のすべての問題が解決できる。ただし、(c)については、該当する砂漠・内陸湖の位置が決定できなかったため設定していない。つまり、対象エリア内の全メッシュは海洋あるいは画像辺端部に注ぎ込むような流路をもつことにした。アルゴリズムの説明は次のとおりである(図-1 参照)。

A-1 flag の設定 対象エリアの全メッシュに flag データをたてる。本研究では海洋とエリアの辺端部を“flag=0”に設定した。flag が 0 でないメッシュは最終的に flag0 のメッシュに注ぎ込むように流線が決定される。(A-2 流線方向(流向)初期値の設定) 対象メッシュと周囲 8 メッシュの勾配を計算し、最急下り斜面方向を流向の初期値に設定する。例えば、流向を図-2 に示すように ID 番号(数字)で代表させる。周囲 8 メ

ッシュの中に下り斜面がない場合は、ID 番号 5 を初期値として与える。(A-3 流向の確定)flag=k(初期値は k=1)の全メッシュについて、流線方向をたどる。flag=0 をもつメッシュに到達すれば、たどった流路は、すべて flag=0 に置き換える。途中、流向が「5」のメッシュに到達し、流路を絶たれた場合は、flag は変更しない。(A-4 流向の修正)flag=k の全メッシュについて、周囲 8 メッシュを走査し、flag=0 のメッシュが存在すれば、初期流向に関わらず、流向を flag=0 を持つメッシュの方向に置き換える。置き換えを行ったメッシュの数(num)を記録する。(A-5 修正個所の有無の確認) num≠0 の場合、k は再び(A-3)から繰り返す。num=0 の場合、flag=k のまま残されているメッシュはすべて flag=k+1 に置き換え、処理すべき対象 flag を k+1(k=k+1)として(A-3)から繰り返す。(A-6 プロシジャーの終了)k>max となるようであれば、すべてのメッシュについて、流向の確定・修正処理が終了したことになるので、プログラムを終了する。

(B) 既存水系データを参照した流路の修正

上記プロシジャーにより、DEM データだけから水系モデルを作成することは可能であるが、一部既存の水系図と流路が大きく異なる個所が見られる。これには次のようなものがあてはまる。

- 広大な平坦地域-例えば揚子江・黄河河口平原。
- 流域形状が細く、DEM の誤差などによって主たる流路が隣接する流域に含まれる場合 - 例えば揚子江，メコン川，タンルウィン川(ミャンマー名)の 3 河川が中国雲南省で並走している箇所。
- このような場合、できるだけ既存の地図が示す流路に合うように、図-3 に示したプロシジャーにより処理した。

(B1 修正対象流域の決定) 流域 A, B, C を決定する。流域 A は修正前には流域 C に含まれてしまっているが(図-5a:青色線)，既存データ(図-5a:赤色線)などから流域 B に含まれるのが妥当と判断する。(B2 Flag の設定) 流域 B の各メッシュには flag=0 を設定し、流域 A の各メッシュには処理(A-2)で求めた流向初期値を代入する。流域 A だけを対象に、プロシジャー(A)と同様の処理を行うと、流域 A は流域 B に流れ込むことになる。図-5b は修正後の水系図である。流路が変更され、DN データ(赤色線)と矛盾しない流路に変更された様子を見ることができる。

(B) 精度について

表-1 に本研究で作成した水系モデルから計算された 10 流域について、流域面積と最長流路長の算出結果を示し、同時に理科年表に掲載されている数値と比較した。メッシュサイズは X(緯線)方向を緯度 θ ($\neq 90$)では $0.93/\cos(\theta)\text{km}$ ($0.93=\text{赤道半径 } 6378\text{km} \times 30 \text{ 秒}$)とし、Y(経線)方向を 0.93km (一定)とした。距離の算

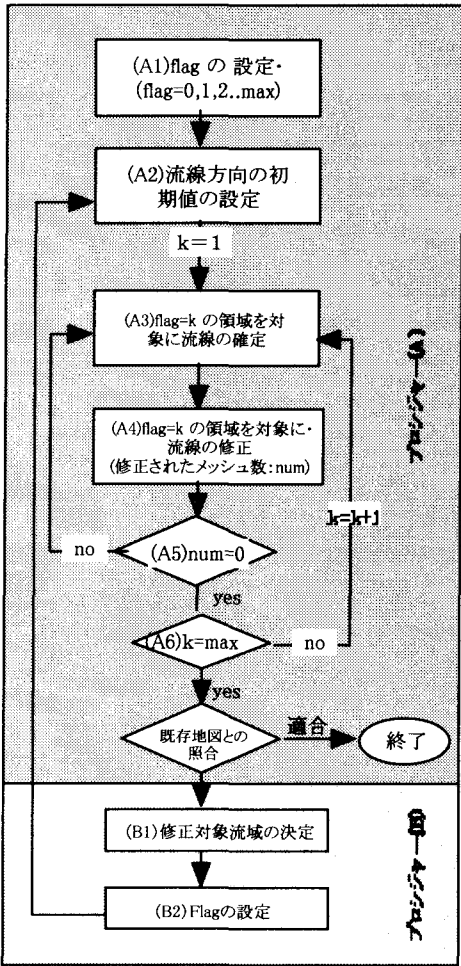


図-1 水系モデル作成アルゴリズム

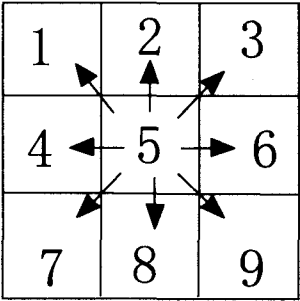


図-2 流向と流向 ID

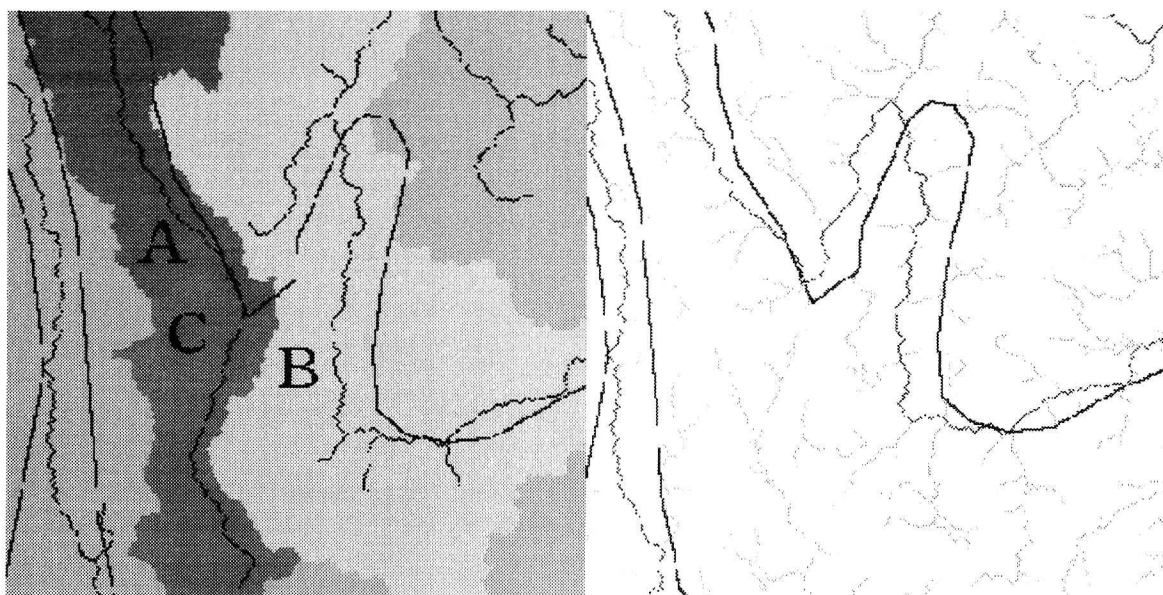


図-3 修正対象流域の決定(左：修正前 右：修正後)
(赤：DCW-DN データ)(青：修正前流路)(緑：修正後流路)

定には上下・左右への距離はそれぞれ、Y 方向・X 方向のメッシュの幅とし、斜め方向への距離は、メッシュの対角線の長さを当てはめた。メッシュ面積はメッシュサイズに対応させている。算出した流路長は統計値と比較して-4%から 47%の幅があり、多くの河川で理科年表に掲載されている数値より長くなった。これは流域モデルでは河口からの距離がもっとも遠いメッシュのまでの距離を流路長としたのに対して、統計値は地図上の河川の長さを計測したものと考えられる。しかしながら、1 メッシュ内で蛇行している河川であっても、水系モデルの中では、直線とみなすのでメッシュあたりの流路長は過小評価されることもあり、両者を比較して真値を議論するのは難しい。また、流域面積についても-13%から 43%の幅がある。この中で、インダス川流域については、流路長・流域面積とも 40%以上過大に算定されたが、これはチベット高原域の流域のほとんどがインダス川の流域に計上されたためである。市販の地図より、この地域は下流への流路を持たない特殊な地域であることを確認したが、インダス川・ブルマプトラ川流域との流域界も不明瞭なため、今回は修正することなく将来別の情報を得た場合に検討することにした。このように、作成した水系モデルから算定できる流路長、流域面積は既存の統計値とは若干異なることとなるが、その差違の原因および既存統計値の算出根拠も不明であり、今後の検討課題である。また、同種の流水線図は、USGS がすでにインターネット上に公開しているので、こちらも参照されたい。

表-1 流路長と流域面積

流域	流路長(km)			流域面積(km ²)		
	算出値	統計値	差	算出値	統計値	差
1(揚子)	6,279	6,300	0%	1,892,313	1,808,500	5%
2(西江)	2,182	1,960	11%	408,357	N.A.	-
3(紅河)	1,248	N.A.	-	125,063	N.A.	-
4(メコン)	4,814	4,020	20%	754,922	800,000	-6%
5(チャ)	1,205	N.A.	-	168,656	N.A.	-
6(タン)	4,079	2,410	69%	437,294	N.A.	-
7(イラ)	2,016	2,090	-4%	375,113	430,000	-13%
8(ブル)	3,630	2,900	25%	547,502	1,730,000	-12%
9(ガン)	2,454	2,510	-2%	978,722	1,730,000	-12%
10(イン)	4,268	2,900	47%	1,369,040	960,000	43%

統計値は理科年表(1994 年度版)より引用

<http://edcwww.cr.usgs.gov/landdaac/gtopo30/hydro/index.html>

3 グローバル水資源モデル

3.1 モデルの概要

大陸あるいは全球規模の水文・水資源シミュレーションでは、流域、気候特性が地域的にかなり分布する。簡便かつ物理的根拠に基づいたモデルと関連情報の適切な組み合わせにより蒸発散、土壌水分あるいは表面流出量の算定をする。

大陸スケールで水資源を定量的に評価するためには、作成した水系モデルを流出モデルへと展開する必要がある。ここで、流出モデルとは、降雨を各メッシュに与え、流出する水量データを水系モデルにあてはめ、実際に地表面を移動する水の流れを再現するモデルを考えている。筆者らは以前に小流域(100km²程度)を対象に流出モデルを提案し、次の事項について検討している。

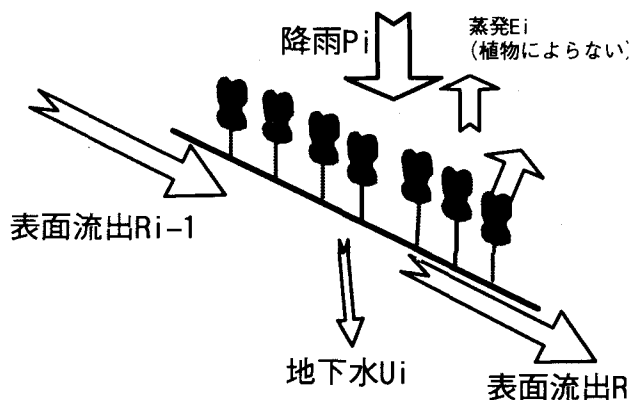


図-4 水文モデル概念

- ・斜面傾斜，土地被覆，土壌(地質条件)と流出率(降雨に対する表面流出の割合)

- ・斜面傾斜，水量とメッシュ間を移動する流速の関係

大陸スケールで流出モデルを作成するには上記条件について、メッシュサイズに対応した変更を考慮するとともに、新たな項目(例えば融雪の問題や蒸発散の問題)も考慮しなければならない。宝・小島(1998)は NOAA 画像から算出した NDVI から月蒸発散量の推定式として、

森林： $E_t = 211.95 \cdot NDVI - 7.75$

耕作地： $E_t = 265.96 \cdot NDVI - 17.89$

都市域： $E_t = 150.59 \cdot NDVI + 5.19$

として、日本の中部地方での事例研究に当てはめている。今回、全球で利用できる類似の関係式として適当なものが見つけれなかったため、本研究ではこの関係式を使い蒸発散量を推定した。

また、今回利用した降雨・土地被覆・蒸発散の各データは月単位であり、将来も気象データや土地被覆情報(NOAA データを想定)は月単位の方が入手、作成が簡便なため、水資源量も月単位で考えられるようにした。月単位での水資源は次のように考えた(図-5 参照)。

単純化するために、1 月に 1 つのメッシュから 1 の水量が流出(図-8a)し、そのまま増減なく 1 ヶ月間に 3 メッシュだけ

下流に移動したとすると、<図-8b>の状態となり、これを 2 月の水量の初期水量データと呼ぶことにする。

一方、水資源としては途中に通過したメッシュそれぞれで 1 の水量の利用が可能であるので、水資源量としては各メッシュに通過した水量の積算値とするのが適当と考えた。今回、非常に単純な仮定であるが、次のような条件を設定している。

- 1) 各月の雨量として“Leemans & Cramer EIASA Climate Map”(メッシュサイズ 30 分)の降水量データを与える(図-9)。
- 2) 流出率は土地被覆の条件により与えた。
- 3) 移動距離は一律 600 メッシュ分とした。これは約 600km に相当し、時速約 2km である。移動速度については河道を移動するものと、土壤中を移動するもので全く移動の特徴が異なるが、今回は流域全体の代表値として一律に時速 2km として仮定した。

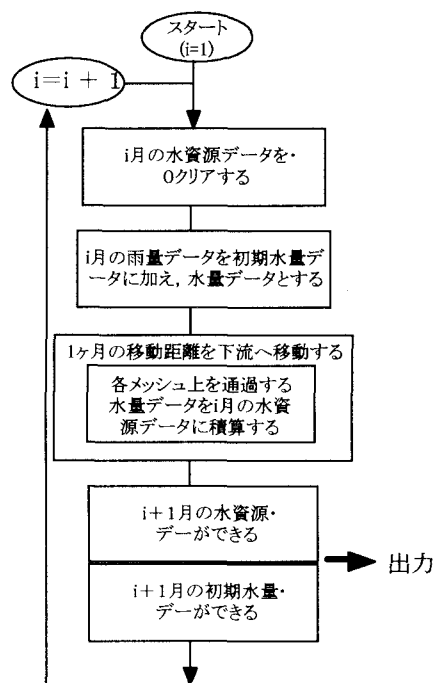


図-5 水資源マップ作成のフロー

3.2 利用データ

前節で準備した 1km 分解能の流水線図に加えて以下のデータを利用した。

(A) 降水量データ

降水量データとして NOAA Global View データセットに含まれる, "Leemans & Cramer EIASA Climate Map"(メッシュサイズ 30 分)を使用し, 流域水資源の季節変動パターンを見るために使用した。

(B) NOAA NDVI データ

月別土地被覆図作成と蒸発散量の推定式に利用するため, 8km 解像度の NOAA/AVHRR データを以下のサイトより入手し, 月別 NDVI 画像を作成し, 土地利用分類, 月別蒸発散データの推定に利用した。

http://daac.gsfc.nasa.gov/elf-bin/gob_AVHRR.tcl

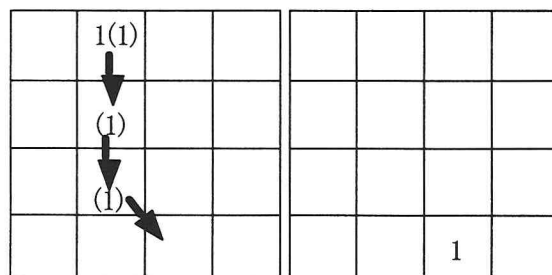


図-6 水量データと水資源データ

水量は 1 ヶ月後右の状態に移動する。水資源はメッシュ上を通過した水量の積算地

4 結果

上記の仮定条件の下, メコン川流域を対象に作成された 12 ヶ月の水資源量を算出した。図-11 は, 1 ヶ月間に 1m² 当たりが利用できる水資源(m³/m²)を 100 x 100 メッシュ(約 10,000km²)の平均値にしてあらし, 流域の概要が把握できるようにした。また図-12 は, 任意に選んだ 3 点(ビエンチャン付近, コンケン付近, メコンデルタ付近)の水資源量の月別変化をグラフで表したものであり, 水資源量の季節変動のパターンがと

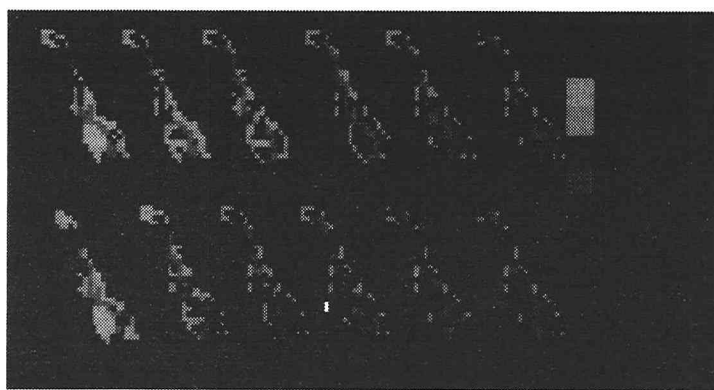


図-7 メコン川流域の水資源の月変化

らえることができ興味深い。絶対値は過大に算定されているが, コンケン地域の水資源量を 1 とした場合, ビエンチャン地域で 10, メコンデルタ地域で 50 の水資源が年間を通して利用可能との結果を得た。今後, 先に述べた検討項目を考慮し, より現実に近いモデルの作成を予定している。

参考文献

- (1)野上道男(1998), DEM(数値標高モデル)から DDM(流水線図)を作成するアルゴリズムの改良と C 言語プログラム, GIS—理論と応用(地理情報システム学会), Vol.6, No.1, pp95-102
- (2)水文水資源学会編集(1997), 水文水資源ハンドブック, p282
- (3)宝・小島(1998), リモートセンシング画像の空間分解能が NDVI 及びそれに基づく蒸発散推定に及ぼす影響, 水文過程のリモートセンシングとその応用に関するワークショップ論文集(社団法人資源協会 地球科学技術推進機構, 水文水資源学会, 土木学会水理委員会共催), pp123-133