

季節変動を再現する河川流量計算モデル の開発と全球水不足評価

DEVELOPMENT OF RIVER RUNOFF MODEL WHICH CAN REPRODUCE
SEASONAL FLUCTUATIONS AND GLOBAL ASSESSMENT OF WATER
SCARCITY, USING THE MODEL

増富祐司¹・花崎直太²・高橋潔³・肱岡靖明⁴・松岡譲⁵
Yuji MASUTOMI, Naota HANASAKI, Kiyoshi TAKAHASHI, Yasuaki HIJIOKA
and Yuzuru MATSUOKA

¹正会員 理修 国立環境研究所 地球環境研究センター (〒305-0051 茨城県つくば市小野川16-2)

²正会員 工博 国立環境研究所 社会環境システム研究領域 (〒305-0051 茨城県つくば市小野川16-2)

³正会員 工博 国立環境研究所 地球環境研究センター (〒305-0051 茨城県つくば市小野川16-2)

⁴正会員 工博 国立環境研究所 社会環境システム研究領域 (〒305-0051 茨城県つくば市小野川16-2)

⁵正会員 工博 京都大学大学院教授 地球環境学堂 (〒615-8540 京都府京都市京都大学桂Cクラスター)

We developed a new global river discharge model by merging existing methods and tuning parameters in the model for better reproduction of observed monthly river discharges. The developed model enabled us to estimate amount of renewable water resource with a spatially finer scale than the previous studies. After verifying the effect of the parameter tuning, we applied the developed model to the assessment of water scarcity. The regions judged to have high risk of water scarcity are Sahara desert, Arabian Peninsula, Indus river basin, the northern part of Chile and California Peninsula. Though the regions judged to have high risk of water scarcity were similar to the results of the previous studies, we additionally succeeded in depicting inhomogeneous distribution of water scarcity risk inside the river basins. Since the developed model estimates monthly renewable water resources, monthly variation of water scarcity can be also assessed.

Key Words : *Global assessment, water scarcity, river runoff model, seasonal fluctuations*

1. はじめに

現在、世界各地で水不足が報告されている。また将来予想される気候変動や人口増加、産業発展は現在の水不足を深刻化させたり、新たな地域で水不足を発生させたりする可能性がある。これに伴い、現在または将来に水不足が深刻な国や地域を同定する数々の研究が行われ、水不足を表す多くの指標が提案されてきた。例えばFalkenmark指標¹⁾、臨界比率²⁾、現状流域利用率³⁾、潜在流域利用率³⁾などである。しかし、これらは長期平均的な年単位の評価指標であり、年々変動や季節変動により生じる水不足や水不足の危険度を表現することはできない。

また、現在まで、多くの水不足評価は国単位や流域単位の空間スケールで行われてきた。国内、流域内で地

形や植生、人口などが空間的に多様であることを考慮すると、より詳細な空間単位で水不足評価を行うことの意義は大きい。

そこで本研究の目的は、月単位あるいは季節変動を再現する全球河川流量計算モデルを開発し、それを用いてより詳細な空間単位で現状の全球水不足評価を行うことである。さらに現在まで利用されてきた年単位、流域単位での評価指標との比較を行い、より空間的・時間的詳細に水不足評価を行うことの意義を議論する。

2. 全球河川流量計算モデルの概要

(1) 全球河川流量計算モデル

本研究では全球規模で月単位あるいは季節単位の水資源評価を目的とした河川流量計算モデルを開発した。本

章ではこのモデルについて詳しく説明するとともに、計算精度の検証を行う。

本モデルは流出量計算モジュール、水需要量計算モジュール、全球河川流量計算モジュールの3つのモジュールから構成される。以下では各モジュールについて順に説明する。

a) 流出量計算モジュール

グリッド単位（1度×1度）の表面流出量、基底流出量を計算するモジュール。本研究では花崎ら⁴⁾によって開発されたBUCKETモデルをベースにした地表面の熱水収支を解くモデルを使用した。本モデルには積雪、融雪等の過程も含まれている。表面流出量 S_s [mm/day]は土中水分保持容量 WHC [mm] (=圃場用水量-しおれ点)を超過した水量で与えられ、本研究では全球150mmと仮定した⁵⁾。また基底流出量 S_b [mm/day]は次式で与えられる。

$$S_b = \frac{WHC}{\tau} \times \left(\frac{SW}{WHC} \right)^\gamma \quad (1)$$

ここで SW は土中水分量[mm]、 γ と τ [day]は計算流量を観測流量にフィットさせるための最適化パラメーターである。 γ と τ は基底流出量に直接作用するとともに、土中水分量の変化を通じて、間接的に表面流出量や蒸発散量にも作用する。事前のパラメーター感度実験により γ と τ の年流量への感度が高いことが分かっている。最終的に流出量 RO [mm/day]は S_s と S_b の和で与えられる。

計算は全球の1度グリッド別に、3時間刻みで1986年から1995年まで行い、日単位の流出量を出力する。本モジュールの出力は後述の河川流量計算モジュールの入力となる。流出量計算モジュールの入力気候データは全球土壌水分プロジェクト2 (Global Soil Wetness Project: GSWP2) の気象データを使用した。

b) 水需要量計算モジュール

グリッド単位の部門別（家庭、工業、農業）水消費量 $[km^3/day]$ を計算するモジュール。AQUASTAT⁶⁾の国別部門別年取水量報告値 $[km^3/year]$ と、Shiklomanov⁷⁾の地域別の年取水量・年消費量推計値 $[km^3/year]$ より、本研究の計算年（1986年-1995年）の中央年（1990年）の国別部門別年水消費量 $[km^3/year]$ を推計する。その後、家庭部門と工業部門については人口密度図、農業部門については年灌漑水要求量図に応じて、空間分布させる。

1990年の国別部門別水消費量は右段の式(2a)-(2c)により推計した。ここで、 $CS_{n,s,x}$ は国 n 部門 s の x 年の本研究の水消費量推計値 $[km^3/year]$ 、 $WD_{n,s,x}$ は国 n 部門 s の x 年の本研究の取水量推計値 $[km^3/year]$ 、 $CS_Shik_{n,s,x}$ は国 n の属する地域の部門 s の x 年のShiklomanovの水消費量推計値 $[km^3/year]$ 、 $WD_Shik_{n,s,x}$ は国 n の属する地域の部門 s の x 年のShiklomanovの取水量推計値 $[km^3/year]$ 、 $WD_AQUA_{n,s,x}$ はAQUASTATの国 n 部門 s の x 年の取水量推計値

$[km^3/year]$ である。ただしAQUASTATとShiklomanovのデータで使用しているデータの年が異なるのは、データ整備年（AQUASTAT：1998年；Shiklomanov：1990, 1995, 2000年）の違いによる。また式(2c)の指数の0.4は取水量が1995年から2000年まで年率一定で増減すると仮定して与えた。

$$CS_{n,s,1990} = WD_{n,s,1990} \times \left(\frac{CS - Shik_{n,s,1990}}{WD - Shik_{n,s,1990}} \right) \quad (2a)$$

$$WD_{n,s,1990} = WD_{n,s,2000} \times \left(\frac{WD - Shik_{n,s,1990}}{WD - Shik_{n,s,2000}} \right) \quad (2b)$$

$$WD_{n,s,2000} = WD - AQUA_{n,s,1998} \times \left(\frac{WD - Shik_{n,s,2000}}{WD - Shik_{n,s,1995}} \right)^{0.4} \quad (2c)$$

式(2)より推計した1990年の国別部門別水消費量を家庭部門に関してはグリッド世界人口 (Gridded Population of the World: GPW, 2.5分グリッド) のデータを使用し、人口密度に比例して国ごとに空間分布させた。工業部門はKlepper *et al.*⁸⁾の方法に従い、家庭部門に同じくGPWのデータを使用し人口密度75人/ km^2 以上のグリッドを有する国については、人口密度に比例して空間分布させ、その他の国については人口密度が20人/ km^2 以上のグリッドに対し、比例して空間分布させた。農業部門は、花崎ら⁴⁾により開発された灌漑水要求量推計モデルの1度グリッド単位の年灌漑水要求量に比例して空間分布させた。

次に年単位の消費量 $[km^3/year]$ から日単位の消費量 $[km^3/day]$ を推計する方法を説明する。家庭部門、工業部門については毎日、等量の水を消費するとし、グリッドごとの年単位の水消費量から日単位の水消費量を推計した。また農業については、グリッドごとの年灌漑水要求量を花崎ら⁴⁾のモデルより得られる月灌漑水要求量に比例させて分配し、各月内では毎日等量の水を消費するとし、日単位の水消費量を推計した。

水需要量計算モジュールで推計された日単位の消費量は、c)で説明する河川流量計算モジュールの入力となる。

c) 河川流量計算モジュール

流出量計算モジュールと水需要量計算モジュールの出力を入力とし、世界流域データベース (Global Drainage Basins Database: GDBD⁹⁾) の単位流域ごとに河川流量を計算するモジュール。GDBDは全世界を平均流域面積 $2000km^2$ 弱の単位流域に分割し、分割された流域別に上流域面積、河道長、流量観測所の位置などの情報を含んでいる。

河川流量計算モジュールではまず流出量計算モジュールで計算されたグリッド別（1度×1度）の流出量 RO を、GDBDの単位流域に含まれる各グリッドの面積で重み付けして集計し、単位流域ごとの流出量 RO' $[m^3/s]$ を計算する。その後、Vörösmarty *et al.*¹⁰⁾の方法に従い、河道

に直接流入するもの ($\phi \times RO'$) と、単位流域内に貯留されるもの ($(1 - \phi) \times RO'$) に分けられる。ここでの貯留量 $D[m^3]$ は、単位流域内のため池や窪地貯留、地下水を通して河川に流入する水を表現するために導入したものである。本研究ではこの ϕ を Vörösmarty *et al.*¹⁰⁾ と同じ 0.5 に設定した。また単位流域の貯留量 D からは、その貯留量に比例して、河道へ流入があるとし、この比例係数 β を $0.0167/86400[s^{-1}]$ に設定した。河道貯留 $S[m^3]$ への流入量 $Q_{in}[m^3/s]$ は、単位流域からの流出量 ($\phi \times RO'$) と流域貯留 D からの流入量 ($\beta \times D$) と上流単位流域からの流入量 $Q_{out}[m^3/s]$ の和から、水需要計算モジュールで計算される単位流域内の消費量 CS' [m^3/s] を差し引いたものである。 CS' は水需要計算モジュールで計算されたグリッド別の日別水消費量 CS を流出量と同様に GDBD の単位流域ごとに計算して得られる。水消費量を差し引く際、河道貯留への流入量 Q_{in} がマイナスになる場合は、その分を流域貯留 D でまかなうことにする。それでも足りない場合は消費できないものとした。

各単位流域からの下流単位流域への流出量 Q_{out} は Miller *et al.*¹¹⁾ の方法に従い線形貯留関数により与えた。このときの比例係数は流速 $K[m/s]$ を河道長 $L[m]$ で割ったものとなる。河道長 L は GDBD より得られた値を利用した。また本研究では流速 K を観測流量にフィットさせる最適化パラメーターとした。図-1 にアマゾン川河口付近 (Obidos) を例にとり、 K を変化させたときのハイドログラフの変化を示す。 K の変化がハイドログラフのピークの流量や位相に影響を及ぼすことが分かる。

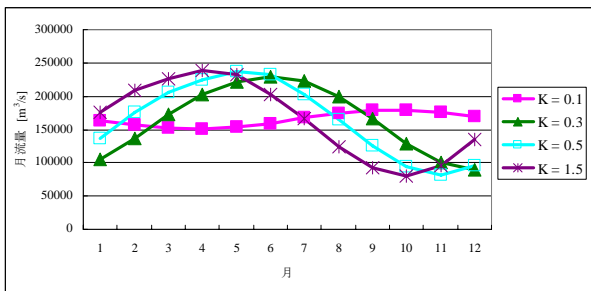


図-1 アマゾン川河口付近(Obidos)における流速 $K[m^3/s]$ の変化に対するハイドログラフの変化

以上の河川流量計算モジュールを式にしてまとめると以下ようになる。

$$\frac{dD}{dt} = (1 - \phi) \times RO' - \beta \times D \quad (3a)$$

$$\frac{dS}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad (3b)$$

$$Q_{in} = \phi \times RO' + \beta \times D + \left(\sum_{\text{上流単位流域}} Q_{out} \right) - CS' \quad (3c)$$

$$Q_{out} = \frac{K}{L} \times S \quad (3d)$$

(2) パラメーター最適化と計算精度の検証

パラメーター最適化は観測流量に計算流量がフィットするようにモデルのパラメーター (γ , τ , K) を選択して行う。花崎¹²⁾と岡田¹³⁾の研究を参考に予め与えたそれぞれのパラメーターで $3 \times 3 \times 8 = 72$ 通り ($\gamma = 1.0, 1.5, 2.0$, $\tau = 50, 100, 200$, $K = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.7, 1.0, 2.0$) の流量を計算し、その中から以下のようにして最適な値を選択した。 γ , τ の 9 通りの組み合わせの中から観測と計算の平均年流量の誤差が小さいものを 3 つ選び、その中で観測と計算の最低流量月が一致し、かつ最低流量の誤差が一番小さい K を選択する。このとき、観測の最低流量月に一致する計算の最低流量月がない場合、観測の最低流量月の前後一ヶ月で一致するものの中から、最低流量の誤差が一番小さいものを選択した。それでも観測の最低流量月に一致するものがない場合は、観測の最高流量月に同じことを繰り返す。最終的に観測の最低流量月と最高流量月の前後一ヶ月に一致する計算の最低流量月、最高流量月がない場合、年流量の誤差が一番小さい K を選択した。本研究でこのように特に最低流量に着目したパラメーター最適化の行うのは、本研究が低水流量に関する水資源評価を目的しているからである。また γ と τ により年流量を決定するのは K の変化による年流量の変化が小さいためである。

最適化に利用する観測流量は、世界流出量データセンター (Global Runoff Data Center : GRDC) が配布する月流量観測データから以下の条件に合う各流域の最下流の流量観測所を選択した。①上流流域面積が 10000km^2 以上、②計算期間 (1986 年-1995 年) で観測欠損月がない年が 1 年以上存在する、または 1970 年以降で 5 年以上の観測欠損月のない年がある。これにより選択された流量観測所は全球で 356 点あった。

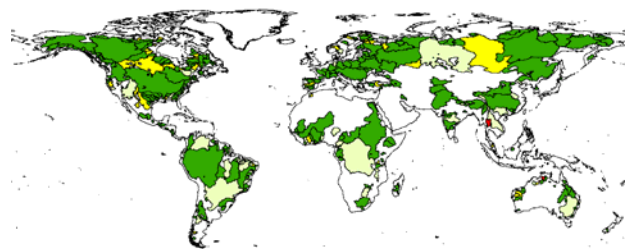


図-2 パラメーター最適化による精度の向上

図-2 にパラメーター最適化を行った流域における精度の向上を示す。ここではデフォルトのパラメーターセットとして花崎ら⁴⁾が適用している $\gamma = 20$, $\tau = 100$, $K = 0.5$ と、最適化パラメーターセットを用いて計算され

る年流量、最低流量月を比較した。全356点の観測所のうち70%強の254点において年流量の誤差が減少し、かつ最低流量月については、同じかもしくは向上した。残りの102点中の99点に関しては年流量もしくは最低流量月の一致度が向上もしくは同じだった。最後の3点については年流量の誤差が増大し、最低流量月の一致度も悪くなった。一致度の低下は年流量が大幅に違う流域で起きており、このような流域に対しては別のパラメータ最適化アルゴリズムを検討する必要があると考えられる。また図には示されていないが最低月流量の誤差は356観測所中212点において減少した。

次に最適なパラメータセットを用いて流量計算を行った場合の計算流量の精度について検討する。図-3に計算された全球水資源量（海又は内陸湖に流出する年流量）を他の研究の計算結果とともに示す。全球水資源量に関しては他の研究とほぼ同等な値が得られたことがわかる。

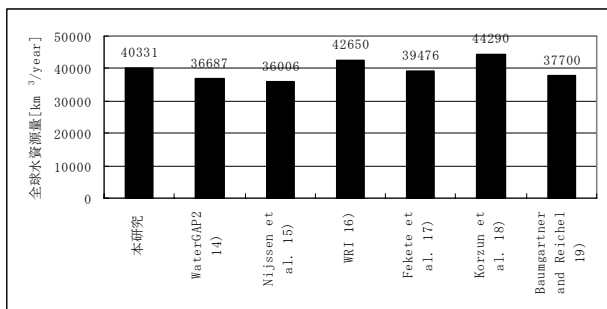


図-3 全球水資源量の既往の研究との比較

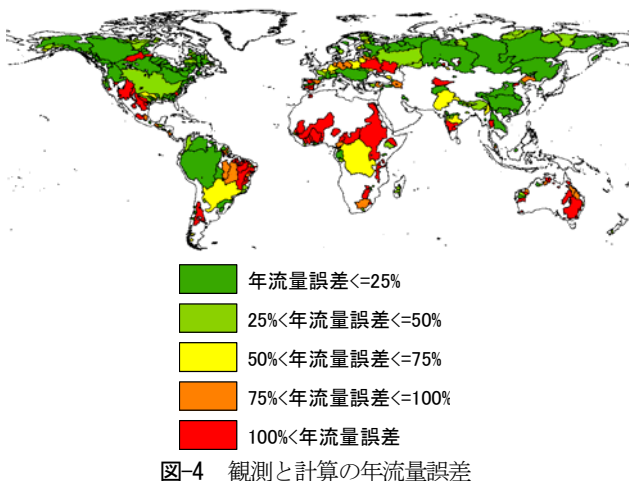


図-4 観測と計算の年流量誤差

さらに図-4にパラメータ最適化が行われた流域ごとの計算年流量と観測年流量の誤差を示す。北アメリカ大陸、ブラジル東部を除く南アメリカ大陸、東ヨーロッパを除くユーラシア大陸の大部分でよい一致が示されている。アフリカ大陸、オーストラリア東部、ブラジル東部、東ヨーロッパでは一致度が悪い。一致度が悪い地域の多くは乾燥地帯に属しているが、どの流域も流量

が過大に出ており、これは入力気候値の降水量が過大であったり、モデルで計算される蒸発散量が過小であると考えられる。前者については、ヨーロッパにおいて入力気候値GSWP2の降水量が過大であることが指摘されている。また後者に関して現在本モデルでは蒸発散量をバルク式により求めているが、その係数（バルク係数）を全球で一定にしているため、これを植生分布等により空間的に変化させることで精度を改善できる可能性がある。また多くが乾燥地帯に属していることから、河道や流域の貯留量からの蒸発散の効果等も考慮する必要があると考えられる。

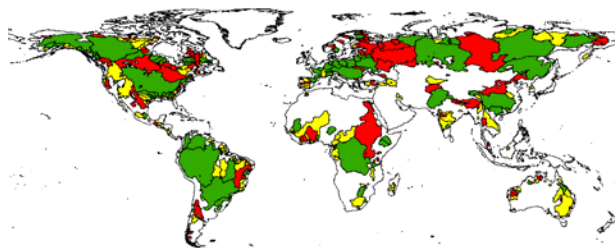


図-5 観測と計算の最低月流量の誤差及び観測と計算の最低流量月のずれ

最後に図-5に最低流量月の一致度を示す。多くの流域で最低流量月が良く一致しているのが見取れる。ただし、ボルガ川、ナイル川、エニセイ川といった大河川で一致度がよくない。ボルガ川、ナイル川では年流量の一致も悪いので、流出モデルの改良が必要であると考えられる。またエニセイ川では年流量の誤差は1%と良いが、ハイドログラフの形に影響を及ぼす融雪過程やパラメータ選択アルゴリズムの改良が必要だと考えられる。

3. 全球水不足評価

本章では2章で説明した河川流量計算モデルを利用して全球を対象に水不足評価を行う。まず本研究で“水不足”とはその月の消費量が流量を上回った月のことをいう。そして水不足評価指標として、計算期間中（1986年 - 1995年）の水不足頻度を用いた。すなわち120ヶ月のうちの何ヶ月が“水不足”月であるかを計算した。本研究ではこの水不足頻度を月単位水不足頻度と呼ぶ。ただし本研究における“水不足”とは持続的な水利用を考慮したものであり、河川水のような再生可能な水資源量に対する“水不足”である。よって化石地下水に依存しているような地域では、厳しい“水不足”になる可能性があることに注意が必要である。図-6に全球月単位水不足頻度図を示す。サウジアラビア、サハラ砂漠周辺地域で

広範囲に水不足頻度が高い地域があるのがわかる。その他、インダス川流域、カリフォルニア半島、チリなどに月単位水不足頻度が高い地域がある。これらの地域は年単位の水不足評価を流域別に行っても同じように水不足地域と同定される。しかし本研究の単位流域別評価では流域内の水不足頻度の空間的差異が示される。例えば、Alcamo *et al.*²⁰⁾の評価によると、サハラ砂漠からサウジアラビア、中東、インダス川流域、インド、チベットから中国に掛けて、高い水不足地域が隙間なく続いている。本研究の結果によると、流域内で異なる人口分布や地形等に左右され流域内にも水不足頻度の大きいところと小さいところが生じることが示された。

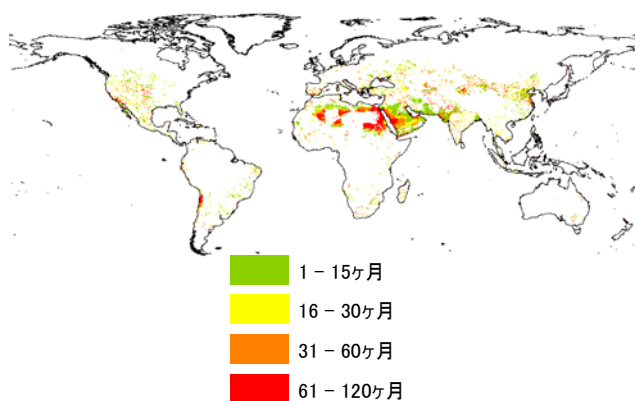


図-6 月単位水不足頻度 (1986-1995年: 120ヶ月)

次に年単位の評価と月単位の評価でどのような違いができるかをみるために、単位流域ごとに年単位の水不足指標 (年水消費量/再生可能資源量: 本論文でこの指標を年単位水不足指標と呼ぶことにする) を計算した。同じモデル結果を用いているので、水不足地域が大きく異なる場所はなく、細かな違いはあるものの、ほとんどの地域は一致していることが分かった。しかし例えばチリのある単位流域 (Cascabeles 川流域) では月単位水不足頻度が 60 ヶ月以上あるにもかかわらず、年単位水不足指標では 0.25 より小さい値となっている。このような年単位と月単位の指標の差異がどのようにして生じるかを見るために、図-7 にこの単位流域の平均月流量と水消費量を示す。図-7 より水消費量は月流量に比べ非常に小さく、すべての月で流量を下回っていることがわかる。また流量の季節内変動が大きく、6月から9月に掛けては非常に大きな流量があるのに対し、10月から5月の間の流量はかなり小さいことがわかる。6月から9月にかけて非常に大きな流量があるために年単位水不足指標で評価するとそれほど大きな値にならないことがわかる。一方、10月から5月の期間は水不足を起こしやすいと考えられ、例えば小さい年々変動でも多くの月で水不足が起こる可能性がある。これをみるために、図-8、図-9 にそれぞれ計算期間 (1986年 - 1995年) の計算年流量の時系列と各月の水不足頻度を示す。図-8 からは

大きな年々変動があることがわかる。また図-9 より 10月から5月に水不足が頻繁に起こっていることがわかる。このようにこの単位流域では季節変動に加え大きな年々変動により、二つの指標の値に大きな差異が生じたと考えられる。

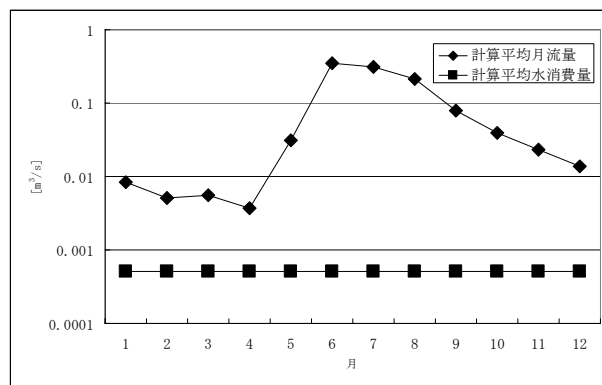


図-7 計算平均月流量と計算平均水消費量 (1986-1995年) ; Cascabeles 流域 (チリ)

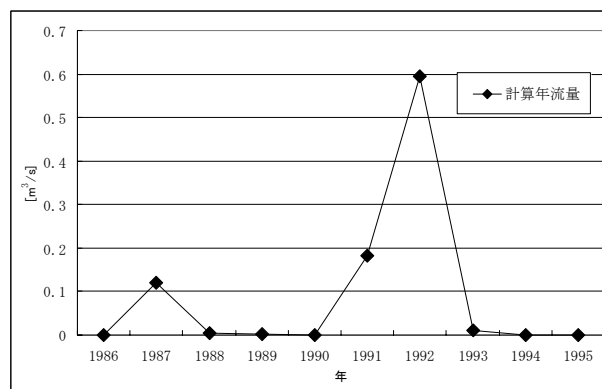


図-8 計算年流量の年々変動 (1986-1995年) ; Cascabeles 川流域 (チリ)

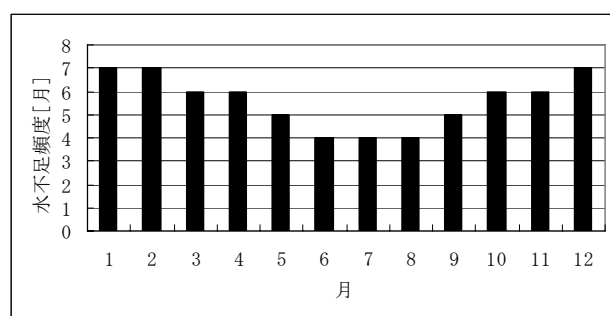


図-9 月別水不足頻度 (1986-1995年) ; Cascabeles 川流域 (チリ)

4. まとめと今後の課題

本研究ではまず季節変動を再現する全球河川流量計算

モデルを開発した。本モデルは既開発のモデルを統合し、さらにパラメーター最適化を行うことにより、高精度に計算流量を観測流量に一致させることが可能である。次に全球を対象に詳細な空間単位で水不足評価を行った。これにより、既存の研究で行われてきた国別、流域別の評価では見られなかった、国内、流域内の地域的特性を考慮した水不足評価を行えるようになった。また月別流量を用いることで、従来の年平均流量を用いた水不足評価ではできなかった季節変動を考慮した水不足評価を行うことができた。

今後の課題としてまず、例えば乾燥地帯で多く見られる計算年流量と観測年流量の誤差が大きな流域に対し、精度よく流量を再現するためのモデル改良が必要である。また、パラメーター最適化のアルゴリズムに関しては、大部分の流域で最適化しないときに比べて精度の向上が見込めるが、精度が落ちる流域が一部存在する。最適化アルゴリズムに改善の余地がある。さらに本モデルにおいて60ヶ月以上水不足という地域が多く存在するが、この原因の一つとしてダムのような大きな貯水池を考慮していない点がある。これに関して現在、ダムを考慮するように河川流量計算モジュールを改良中である。

謝辞：本稿は、主として環境省地球環境研究総合推進費課題「温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究(S-4-1)」および「アジア太平洋統合評価モデルによる地球温暖化の緩和・適応政策の評価に関する研究(B-52)」の研究成果に基づく。

参考文献

- 1)Lundkvist, J., and Falkenmark, M.: world fresh water problems-call for a new realism, *Comprehensive assessment of the freshwater resources of the world*, Stockholm Environmental Institute, 1997.
- 2)Raskin, P., Gleick, P., Kirshen, P., Pontius, G., and Strzepek, K.: water futures: assessment of long-range patterns and problems, *Comprehensive assessment of the freshwater resources of the world*, Stockholm Environmental Institute, 1997.
- 3)IWMI(International Water Management Institute): World water supply and demand in 2025, *World Water Scenarios: Analysis*, World Water Council, 2000.
- 4)花崎直太, 鼎信次郎, 沖大幹: Bucket型の陸面過程モデルをベースにした全球統合水資源モデルの開発, 水工学論文集, 第50巻, 2006/09/30.
- 5)Manabe, S.: Climate and the ocean circulation 1, The atmospheric circulation and the hydrology of the earth's surface, *Monthly Weather Review*, Vol.97, pp.739-774, 1969.
- 6)FAO: AQUASTAT, Available online at <http://www.fao.org/ag/agl/aglw/aquastat/main/index.stm>
- 7)Shiklomanov, I.A., and Rodda, J.C.: *World Water Resources at the Beginning of the 21st Century*, Cambridge University Press, 2003.
- 8)Klepper, O., and Drecht, G.: *WARiBas*, Water Assessment of a River Basins Scale, A computer program for calculating water demand and water satisfaction on a catchment basin level; to be used for global scale water stress analysis, RIVM Report 402001009, RIVM, Netherlands, 1998.
- 9)Masutomi, Y., Inui, Y., Takahashi, K. and Matsuoka, Y.: Development of highly accurate global polygonal drainage basin data, Submitting to *Hydrological Processes*, 2006.
- 10)Vörösmarty, C.J., Federer, C.A., and Scholoss, A.L.: Potential evaporation functions compared on US watersheds: Possible implication for global-scale water balance and terrestrial ecosystem modeling, *Journal of Hydrology*, Vol.207, pp.147-169, 1998.
- 11)Miller, G. and Russell.: Global river runoff calculated from a global atmospheric general circulation model, *Journal of Hydrology*, Vol.117, pp.241-254, 1990.
- 12)花崎直太: 人間活動を考慮した全球水循環モデルの開発と世界の水資源の時間変動の推定に関する研究, 東京大学博士論文, 2006
- 13)岡田康: 全球0.5度グリッド河川流路網情報の構築による世界主要河川流量シミュレーション, 東京大学修士論文, 2000
- 14)Alcamo, J., Henrichs, T., Rosch, T.: *World Water in 2025*, Global modeling and scenario analysis for the World Commission on Water for the 21st Century, Kassel World Water Series2, Center for Environmental Systems Research, University of Kassel, Germany, 2000.
- 15)Nijsen, B., O'Donnell, G.M., Lettenmaier, D.P., Lohmann, D., Wood, E.F.: Predicting the discharge of global rivers, *Journal of Climate*, Vol.14, pp.3307-3323, 2001.
- 16)WRI (World Resources Institute): *World Resources 2000-2001*, Oxford University Press, New York, USA, 2000.
- 17)Fekete, B.M., Vörösmarty, C.J., and Grabs, W.: *Global composite runoff fields of observed river discharge and simulated water balances*, Report No.22, Global Runoff Data Centre, Koblenz, Germany, 1999.
- 18)Korzun, V.I., Sokolow, A.A., Budyko, M.I., Voskresensky, K.P., Kalininin, G.P., KonoplyansteV, A.A., Korotkevich, E.S., Kuzin, P.S., Lvovich, M.I., *World Water Balance and Water Resources of the Earth*. UNESCO, Paris, 1978.
- 19)Baumgartner, A., Reichel, E.: *The World Water Balance*, Elsevier, Amsterdam, 1975.
- 20)Alcamo, J., Döll, P., Henrichs, T. Kaspar, F., Lehner, B., Roch, T., and Siebert: Global estimates of water withdrawals and availability under current and future "business as usual", *Hydrological Sciences Journal*, Vol.48, pp.317-337, 2003

(2006. 9. 30受付)