

## 温暖化政策支援モデルのための 全球水資源影響関数の開発

花崎直太<sup>1</sup>, 増富祐司<sup>2</sup>, 高橋潔<sup>3</sup>, 脇岡靖明<sup>4</sup>, 原沢英夫<sup>5</sup>, 松岡譲<sup>6</sup>

- 1 正会員 国立環境研究所 社会環境システム研究領域 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2)
- 2 正会員 国立環境研究所 地球環境研究センター (〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2)
- 3 正会員 国立環境研究所 地球環境研究センター (〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2)
- 4 正会員 国立環境研究所 社会環境システム研究領域 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2)
- 5 正会員 国立環境研究所 社会環境システム研究領域 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2)
- 6 正会員 京都大学大学院 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)

地球温暖化による気温と降水の変化に対して、世界各国の水資源量がどのように応答するかを表す全球水資源影響関数を作成した。まず詳細な全球水文モデルを利用し、現在気候から気温を $-5^{\circ}\text{C}$ から $15^{\circ}\text{C}$ まで、降水量を $-75\%$ から $+200\%$ まで変化させた 252 通りのシミュレーションを行い、各国の水資源量の応答をデータベース化した。利用時にはこのデータベースを参照するだけなので計算機負荷が小さく、操作の度に気候条件が変化する温暖化政策支援モデルへの搭載に向いている。このモデルから得られる国別の水資源量は元の詳細モデルから得られるものと約 $\pm 20\%$ の誤差範囲で一一致し、十分な代替性を示した。

*Key Words: Global warming, Integrated assessment, Emission target, Water resources*

### 1. はじめに

地球温暖化問題の解決には温室効果ガス排出の大幅な削減が必要である。しかし、排出量をいつまでに、どの程度削減すべきか(大気中の安定化濃度と排出削減パス)については、いまだに国際的合意が得られていない。これは将来の社会・経済情勢や気候変化の見通しに不確実性が大きいことに加え、温暖化に関する膨大な科学的知見が集約されておらず、政策担当者に十分活用されていないことが原因となっている。そこで国立環境研究所と京都大学では温暖化政策支援モデル AIM/Impact[Policy]の開発にとりこんできた。このモデルに目標とする安定化濃度を設定すると、経済影響が最小となる排出削減パスが瞬時に計算され、全球平均気温や海面上昇、国別・分野別の影響が時系列で示されるようになっていく。政策決定者は社会経済シ

ナリオや利用する気候モデル(GCM)を変化させて将来の不確実性を考慮しながら、設定した安定化濃度や排出削減パスで経済や分野別の影響をどれくらい軽減できるのか、簡単に評価することができる。

既存の温暖化影響評価は分野別の詳細なモデルを利用したものが多いが、計算機負荷が非常に高く、条件を様々に変化させながら挙動を検討する政策支援モデルへの搭載は現実的ではない。そこでAIM/Impact[Policy]では「影響関数」と呼ばれる手法を利用して影響評価を行っている。これは、あらかじめ詳細モデルを利用して気象条件を変化させた大量のシミュレーションを行い、気温や降水といった気象要素の変化に対する影響量の応答をデータベース化しておき、利用時は計算中の気象条件に最も近いものを読み取る仕組みである。

現時点でグローバルな農業の潜在生産性変化の影響関

数のみが完成しているが<sup>2</sup>、温暖化は世界の水資源にも大きな影響を与えられている<sup>3,4</sup>。そこで、本研究ではグローバルな水資源影響関数の作成を目的とする。そのための方法は以下の通りである。まず詳細な全球水文モデルを利用したシミュレーションを実施し、その結果が現在の国別の水資源量を再現できることを確認する。次に気象条件を変化させた大量のシミュレーションを行い、影響関数を構築する。このときのシミュレーションの妥当性も詳細に検討する。最後に影響関数から得られる国別の水資源量と詳細モデルから得られるものとが一致することを確認する。水資源問題の本質は必要なときに必要な量の水があるかという需要と供給の時間的・空間的バランスにあるが、本研究では第一段階として、平年の国別の年水資源量のみを対象とする。

## 2. 詳細モデルを利用した国別年水資源量

### (1) 現在の全球年流出量の計算

全球水文モデルに全球気象データを与えることにより、緯度経度 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ の空間解像度で全球・平年の年流出量を推定した。全球水文モデルには花崎らの全球統合水資源モデルを利用した<sup>5</sup>。このモデルは緯度経度 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ の空間解像度、日単位の時間解像度を持つ分布型の全球水文モデルである。このモデルは貯水池サブモデル、取水サブモデルなど複数のサブモデルからなるが、本研究では陸面過程サブモデルのみを利用する。このサブモデルは蒸発や積雪の詳細な計算を行い、地表面の熱収支を解くものであり、温暖化時の気象条件の変化が水資源量に及ぼす影響を物理過程に基づいて評価することができる<sup>6</sup>。

現実の河川では貯水池操作や取水が行われているので、陸面過程サブモデル以外にも結合したモデルを利用する方が現実的だと考えられる。しかし、貯水池操作や取水は水需要と連動するため、不確実性の大きな社会経済要因をシミュレーションに取り込む必要がある。また影響関数の作成に必要なシミュレーションの試行も飛躍的に増えてしまう。よって本研究では陸面過程サブモデルのみを利用した。シミュレーションに現実性を求めるなら、入念に検討した少数のシナリオを使って、詳細モデルを利用した水資源シミュレーションを行えばよい。

全球気象データには陸面過程モデルの相互比較プロジェクトである2nd Global Soil Wetness Project (GSWP2)の提供するものを利用した<sup>7</sup>。これは全球を緯度経度 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ の空間解像度で、1986-1995年を3時間単位でカバーする気象データである。短波放射、長波放射、気温、比

湿、風速、気圧、降雨量、降雪量の8項目からなり、入念な精度検証が行われたものである。本研究では平年を解析対象とするため、10年平均した3時間データを作成し、これを現在気候のデータとみなした。

陸面過程サブモデルを利用して1986-1995の全球河川流量の再現実験を行った結果、世界の主要な37の流量観測地点のうち、約40%の流域で年流量の誤差が $\pm 20\%$ 以内に、約65%の流域で $\pm 50\%$ 以内に収まるところが示された<sup>8</sup>。この結果は、現在世界最高精度のデータセット<sup>9</sup>に比べても大きな遜色がなかった。本モデルを用いた流量再現実験で大きな誤差が出るのは乾燥地、半乾燥地、および極域の一部である。これらの地域では、発生する流出量が小さく、河道や湿地からの蒸発、取水、凍土などの諸要因に影響を受けやすいため、先行研究でも流量シミュレーションの精度が悪い地域である。しかし水資源量の大部分を発生させる温帯、熱帯域の流出量のシミュレーションは妥当なので、今回の研究への応用は可能であると判断した。

### (2) 現在の国別水資源量の計算

現在国別に入手可能な水資源量のデータは限られており、その中でAQUASTATは最もよく利用されるものの一つである。AQUASTATは各種の統計を編集したもので、国別の水資源量は河川流量の観測値を元に以下のように推定されている<sup>10</sup>。まず、一つの河川が一つの国だけを流れる場合は、流域内の全ての流出量をその国の水資源量とみなしている。左右岸の関係にある国際河川については、それぞれに50%ずつ配分されると仮定している。上下流の関係にある国際河川については、エジプトとスーダンの間にあるような二カ国間の水資源量の配分が明記された条約がある場合はそれに従い、それ以外の場合は流量の観測値を利用し、上流から流れ込む河川流量を自国の水資源量、下流に流れ去る河川流量を下流国のために残す水資源量としている。AQUASTATは、この手法が絶対的でも普遍的でもないと認めているが、現在入手できる情報量を考慮した実用的な仮定だとしている。流域ごとに水資源量を定義することは比較的容易であるが、流域界を無視して国境で水資源量を配分するのは人為的な要素が大きく、たとえ統計データと事例に基づいたとしても困難である。

AQUASTATの手法は流量の観測値が必要なため、本研究のシミュレーションでは踏襲できない。取水を含むシミュレーションを行う手法も考えられるが、水需要の推定が必要で、社会経済面の不確実性が大きく実施が困難である。

表-1 4グリッドからなる仮想的な河川において $\alpha$ を変化させたときの水資源量

グリッド	源流	中上流	中下流	河口
流出量	1.0	1.0	1.0	1.0
$\alpha=1.0$	1.0	1.0	1.0	1.0
$\alpha=0.5$	0.5	0.75	1.0625	1.6875
$\alpha=0.0$	0	0.5	1.125	2.375

表-2 流出量が極端に分布する4グリッドからなる仮想的な河川において場合に $\alpha$ を変化させたときの水資源量

グリッド	源流	中上流	中下流	河口
流出量	1.0	1.0	0.0	0.0
$\alpha=1.0$	1.0	1.0	0.0	0.0
$\alpha=0.5$	0.5	0.75	0.5625	0.1875
$\alpha=0.0$	0	0.5	1.125	0.375

そこで、 $1^\circ \times 1^\circ$ の空間解像度で得られた全球の流出量を、以下のアルゴリズムに従って河川網を流下させることにより、上下流の関係を考慮しながら国別の年水資源量を推定した。全球の河川網データには Total Runoff Integrating Pathways (TRIP)を利用した<sup>11)</sup>。これは全球を緯度経度  $1^\circ \times 1^\circ$ の空間解像度でカバーする河道網データである。

アルゴリズムはTRIPを利用し、上流から下流に向けて式(2)で算出する年水資源量Wを引き抜きながら年流出量を流下させていくというものである。各グリッドからの流出量Oは以下のように表される。

$$O_{i,j} = R_{i,j} + I_{i,j} - W_{i,j} \quad (1)$$

ここでRは計算対象グリッドの年流出量、Iは上流からの流出量、Wは年水資源量である。添え字のi,jはそれぞれ緯度i、経度jのグリッドのデータを示すものとする。グリッド毎の年水資源量Wは以下のように定義する。

$$W_{i,j} = \alpha R_{i,j} + I_{i,j} \frac{n_{i,j}}{n_{\max,i,j}} \quad (2)$$

ここで $\alpha$ は全球一律の係数、nは源流グリッドを1とし河口グリッドまで順に増えていく整数値で $n_{\max}$ は河口グリッドでの値である。式(2)の右辺第一項は自己のグリッドで発生する流出量による水資源量、右辺第二項は上流からの河川流量による水資源量である。第二項は上流ほど下流の水利用に配慮して取水量を制限することを仮定している。

このアルゴリズムから得られる水資源量の計算値の性質を理解するため仮想的な流域を考えよう。4グリッドからなる仮想的な河川があり、源流、中上流、中下流、河口

と直列につながっているとす。式(2)の $n_{\max}$ は4である。各グリッドから発生する年間流出量は1.0とする。 $\alpha$ を0、0.5、1.0と変化させたときの各グリッドの水資源量を示したものが表-1である。まず $\alpha$ を1.0にした場合、すなわち自己のグリッドで発生した流出量をすべて取水してしまう場合、各グリッドの水資源量は流出量と等しくなる。一般に河川は上流部が山地で人口も水利用も小さく、下流部が平地で人口も水利用も大きいことを考慮すると、この水資源量の配分は現実的ではない。次に $\alpha$ を0.0にした場合、すなわち自己のグリッドで発生した流出量をすべて下流に流してしまう場合、水資源量は源流でゼロで、下流に向かって急激に増えていく。この自己グリッドで発生した流出量をすべて下流のために残すという配分も現実的ではない。そこで本研究では恣意的だが、この中間として $\alpha=0.5$ とおいた。このとき表-1に示すように、上流から下流への水資源の移転が起こり、少なくとも $\alpha=1.0$ や $\alpha=0.0$ よりも現実的な配分となる。ここで、式(1)(2)を解くと水資源量は $\alpha$ に関して線形なので、 $\alpha=0.5$ のときの各グリッドの水資源量は $\alpha=1.0$ と $\alpha=0.0$ のときの中間値となる。

ここで表-2のように、上下流で流出量に極端な分布がある場合についても考えておく。河口グリッドは流出量に乏しいため、上流からの河川流量への依存度が高いと考えられるが、このアルゴリズムでは河口に配分される水資源量は小さい。ナイル川下流域のエジプトなどはこのケースに相当し、スーダンとの二カ国条約により人為的に割り当てられている現実の水資源量に比べ、本研究の推定値は著しく小さくなってしまふ。これらの特殊なケースについての対処は今後の課題である。

最後に  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ の国境データ<sup>12)</sup>を利用して国別の年水資源量を推定した。もとの気象データの空間解像度が緯度経度  $1^\circ \times 1^\circ$ と粗いため、島嶼国などでは国土面積が過小評価されてしまう傾向が見られた。そこで実際の国土面積のデータを利用し、面積による国別水資源量の補正を行った。

本研究では地下水を直接扱っていないが、世界全体では全取水量の15%、約600-700 km<sup>3</sup>/yrを地下水から取水していると推定されている<sup>13)</sup>。ただし、この統計の地下水は浅層で河川水との交換性が高いものと、深層で再生性の低いものを含んでいる。このうち、浅層の地下水に関しては、本研究における流出量が降水から蒸発を除いた残差として算出されているため、間接的に流出量に含まれているとみなすことができる。深層の地下水はモデルで扱えないが、これは枯渇が心配される持続可能性が低い水資源であり、本研究の対象とする長期の水資源量評価からは除外してもよいと判断した。

### (3) 現在の国別水資源量の検証

得られた国別水資源量を世界の水資源に関する統計データ AQUASTAT<sup>10,14)</sup>と比較した結果を図-1に示す。水資源量の上位50ヶ国(年間水資源量130km<sup>3</sup>/yr以上の諸国)についての誤差は概ね±40%以内に収まることが示された。2(1)で示した現時点の流量シミュレーションの精度を考慮すると、モデルが現在の水文過程と国別水資源量を概ね再現できることが示された。また、 $\alpha$ の設定による推定精度への感度は、少なくとも年間の水資源量が130km<sup>3</sup>/yrを超える主要国に関しては小さいことが示された。ただし、本研究の水資源量はAQUASTATよりも小さくなる傾向がある。世界の総水資源量の推定値は36,000 km<sup>3</sup>/yrから44,000km<sup>3</sup>/yrまでのばらつきがある<sup>9)</sup>。本研究は若干小さな39,000km<sup>3</sup>/yrであるのに対し、AQUASTATは大きめの44,000km<sup>3</sup>/yrである。しかし、AQUASTAT以外に世界の全ての国を対象にした信頼性の高い水資源の統計データがないこと、観測河川流量をベースにした先行研究間を比較しても数千km<sup>3</sup>/yr程度のばらつきが発生していることから、本研究の過小評価傾向は許容範囲にあるとみなした。ただし、最近の研究では40,000km<sup>3</sup>/yrを下回る推計結果が出されることが多いことを考慮すると<sup>9)</sup>、AQUASTATは若干過大と言えるかもしれない。40%以上過小評価された諸国にはペルー、チリ、エクアドル、ネパールなど山岳地域が多く含まれるが、これらの地域では降水の地形効果を考慮することなどにより、今後改善が期待できると考えられる<sup>15)</sup>。また40%以上の誤差を出した国の中にヨーロッパ諸国が2カ国含まれるが、GSWP2の降水データがヨーロッパの中高緯度で降水量を過大評価する傾向に起因しているかもしれない。

### (4) 将来の国別水資源量の計算

次に詳細モデルを利用して温暖化時の国別水資源量を推定した。まず計算対象としたのは温暖化が最も進展する21世紀末の2090年付近である。利用した気候シナリオは国立環境研究所・東京大学気候システム研究センター・地球環境フロンティア研究センターが開発した大気海洋結合モデルMIROC3.2高解像度版にSRES A1B排出シナリオを与えた結果である。この気候シナリオを選定した理由は空間解像度が緯度経度約1.125°×1.125°と詳細で、GSWP2と同じ項目についてデータを入手可能であったからである。この気候シナリオは2001-2100年の100年をカバーするが、20世紀を再現した1900-2000年の計算結果も入手した。

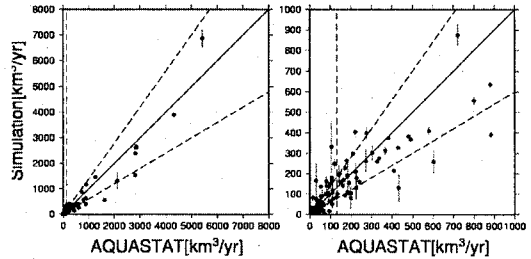


図-1 AQUASTAT(横軸)と詳細モデル(縦軸)による国別水資源量の比較。右図は左図の一部拡大。破線は±40%の誤差範囲を示す。鉛直の破線より右のプロットは国別水資源量上位50ヶ国を示している。エラーバーは式(2)において、 $\alpha$ を0から1まで変化させた場合の軌跡を示す。

これらを利用し、将来の3時間単位の気温および降水シナリオを作成した。まずデータを緯度経度1°×1°に変換し、気温と降水について1986-95年の10年平均(GCMの現在気候)と2086-2095年の10年平均(GCMの将来気候)の月平均データを作成した。将来の3時間データは、気温に関してはGSWP2の現在気候にGCMの将来気候と現在気候の偏差を月単位で加えた。降水に関しては同じく両者の変化率を月単位で掛けた。この将来気候値の作成の仕方は先行研究でもよく利用されている<sup>4)</sup>。

$$T_{2086-95,m,d,h} = T_{1986-95,m,d,h}^{GSWP2} + (T_{2086-95,m}^{GCM} - T_{1986-95,m}^{GCM}) \quad (3)$$

$$P_{2086-95,m,d,h} = P_{1986-95,m,d,h}^{GSWP2} \times \min\left(\frac{P_{2086-95,m}^{GCM}}{P_{1986-95,m}^{GCM}}, 3.0\right) \quad (4)$$

ただし、 $T_{1986-95,m,d,h}^{GSWP2}$ 、 $P_{1986-95,m,d,h}^{GSWP2}$ はそれぞれGSWP2による1986-95年平均の3時間単位の気温と降水を示す。右肩の添え字GCMはMIROCの結果であることを、右裾の添え字2086-95は2086-95年平均であることを示す。温暖化により、日周期や日々変動も変化すると考えられるが、本研究では季節変動性(月単位)の変化のみを対象とした。これ以外の気象要素の値は、将来もGSWP2の現在気候と変わらないと仮定した。得られた流出量を利用し、国別水資源量を計算した。

## 3. 水資源影響関数を利用した国別水資源量

### (1) 影響関数の作成

詳細モデルを利用し、入力気象データを次のように変化させてシミュレーションを行い、影響関数を作成した。まず現在の3時間単位の気象データについて、気温を全球・通

年一律に-5°Cから15°Cまで1°C刻みで21通りに、降水を同じく-75%から+200%まで12通り変化させることにより、合わせて252通りの気象データを作成した。つまり、式(3)と(4)の右辺第二項を月単位・GCMの空間分布ではなく、年単位・全球一律に変化させたと考える。このとき気温と降水データ以外の短波放射、長波放射、比湿、風速、気圧のデータは現在の3時間データ(GSWP2の値)を利用した。得られた流出量データを利用し、国別の水資源量を計算し、データベースとして保存した。

AIM/Impact[Policy]がこのデータベースを活用する仕組みは以下の通りである。まずユーザ操作により全球平均気温とGCM(気候と降水の変化の空間的分布パターン)が決定されると、国別の気温偏差と降水変化率が計算される。作成されたデータベースの中から気温変化と降水変化の組み合わせが最も近い4つのデータの幾何平均を取ることにより、国別の水資源量が得られる。

この実験設定には2つの大きな検討課題がある。第一に気温と降水の上下限と刻み幅の妥当性である。第二にこうして影響関数から得られた結果と詳細モデルのそれが一致するかどうかである。それぞれについて検討する。

## (2) 気温と降水の上下限と刻み幅の設定

気温と降水の上下限の設定の妥当性を検討するため、将来の気候シナリオで、気温と降水が現在値に比べてどれくらい変化するかを解析した。解析対象としたのは、気候変化が最大になるSRESA2シナリオ<sup>10)</sup>の2081-90年、および最小になるSRESB1シナリオ<sup>10)</sup>の2001-10年である。IPCCの第4次評価報告書にA2気候シナリオを提供した18のGCM(B1は20)について、世界の251の国の気温偏差および降水変化率を求め図示したのが図-2である。現在気候としては1981-90年の10年平均を利用した。

全データの気温偏差は-3.75°Cから+15.0°Cまで、降水量変化率は-99.9%から+7425%までであった。ただし降水量が+200%以上になるのは全91580ケース中わずか132ケースしかなく、無視できると考えた。よって、気温は5°Cから+15°Cまで、降水量は-100%から+200%まで変化させれば、AIM/Impact[Policy]が参照する2001年から2100年までのほぼ全ての気象条件を網羅するデータベースが構築できることが示された。ただし気温が8°Cより上昇するものは97ケース(全体の0.1%)しかなく、仮にこれらを見捨てるならば、全体の計算量を35%削減できることが分かったが、気温が現在値と大きく乖離した際の影響関数の安定性を見るため、+15°Cまでの領域について計算を行った。

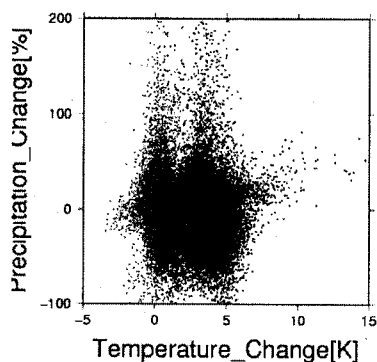


図-2 年平均気温の偏差および年平均降水量の変化率を国別・念別々にプロットしたもの。グレー：SRES B1シナリオにおける2001-2010年の20のGCMの予測値。黒：SRES A2シナリオにおける2081-90年の18のGCMの予測値

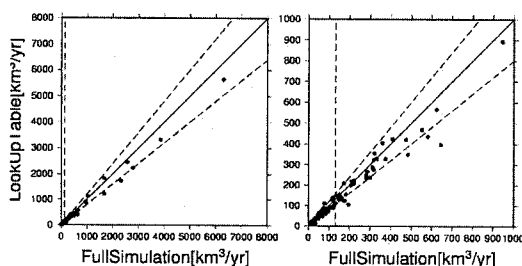


図-3 詳細モデル(横軸)と影響関数(縦軸)による国別水資源量の比較。右図は左図の一部拡大。破線は±20%の誤差範囲を示す。鉛直の破線より右が水資源量上位50ヶ国のプロットである。

## (3) 影響関数の検証

次に影響関数が詳細モデルの代替となりうるか否かを検討する。検討対象とするのはAIM/Impact[Policy]でGCMにMIROCを、解析期間に2086-95年の平均を、気温偏差と降水変化率を計算する際の現在気候に1986-95年の平均をとった場合である。詳細モデルを利用した2086-95年の国別の水資源量を横軸に、影響関数を利用したものを縦軸に取り、プロットしたものが図-3である。

プロットは概ね±20%の範囲範囲内に収まり、影響関数は詳細モデルの代替になることが示された。ただし影響関数から得られた水資源量は詳細モデルのそれに比べて若干過小になる傾向が見られる。水資源量上位50ヶ国で20%以上の過大評価となったのはボリビアの1国のみで、20%以下の過小評価となったのはアメリカやインド、マダガスカル、モザンビーク、ベネズエラなど9ヶ国ある。

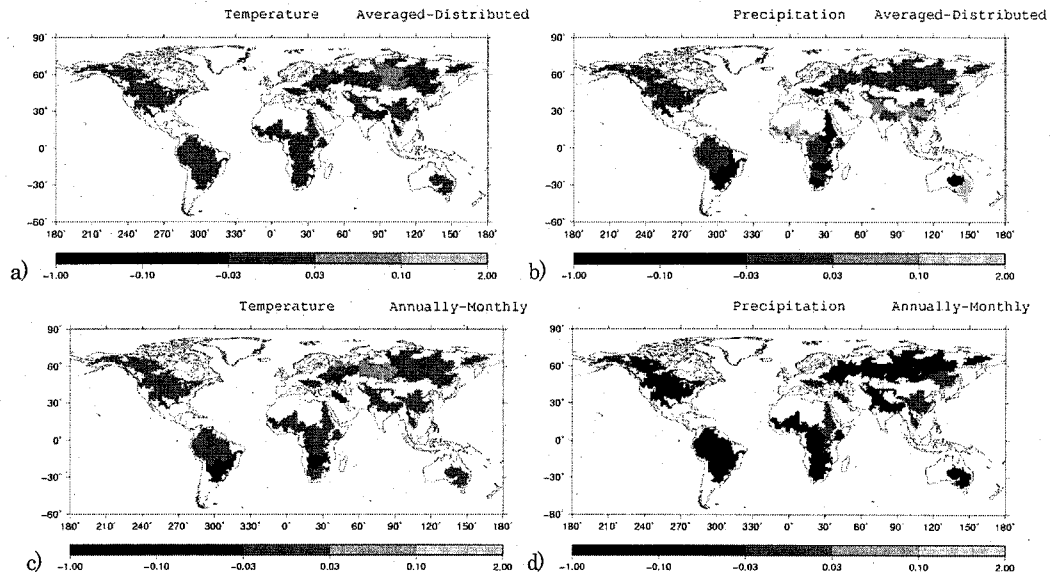


図-4 a)気温をグリッド単位で変化させた場合と流域単位で変化させた場合の流出量の偏差を正規化したもの。 b)降水をグリッド単位で変化させた場合と流域単位で変化させた場合の偏差。 c)気温を月単位で変化させた場合と年単位で変化させた場合の偏差。 d)降水を月単位で変化させた場合と年単位で変化させた場合の偏差。

#### (4) 国単位および年単位で変化させた影響

影響関数から得られる水資源量がなぜ詳細モデルよりも過小になるのかについて原因を考察しておく。詳細モデルと影響関数の違いはいくつかあるが、前者が気温偏差と降水変化率を月単位・グリッド単位で変化させているのに対し、後者は年単位・国単位で変化させていることが最も大きいと考えられた。

そこで、まず気温と降水を国単位で変化させた影響について考察する。国際河川における水資源の配分の不確実性を除去するため、世界の流域面積上位 50 河川の流域別の解析で代替することにする。気温について流域単位で変化させた場合とグリッド単位で変化させた場合の流出量の偏差を取り、正規化して示したものが図-4a、同じく降水について示したものが図-4b である。結果は河口での流量の偏差について示している。まず気温については±3%以上の変化が現れた流域は 3 しかなく、感度が比較的小さいことが示された。次に降水であるが、±3%以上の差異を持つ流域が 18 あることが示された。ただし、過大評価と過小評価はそれぞれ 9 流域ずつで、流出量の差異も 2 流域を除き、±10%未満である。よって影響関数の過小評価の主な原因ではないことが示された。

次に気温と降水を年単位で変化させた影響について考察する。気温について年単位で変化させた場合と月単位で

変化させた場合の流出量の偏差を取り、正規化して示したものが図-4c、同じく降水について示したものが図-4d である。まず気温を変化させた場合であるが、年単位で変化させた場合と月単位で変化させた場合で、±3%以上年流出量に差が現れたのは 6 流域であった。次に降水を変化させた場合であるが、気温に比べて差が大きくなり、±10%以上の顕著な差が現れた流域が北米、南米、アフリカ南部、シベリア、中央アジアからインド亜大陸北部など 15 流域も示された。これらの地域の全てで、年単位で変化させた流出量は月単位で計算されたものに比べて過小となり、前項で示された 20%以上過小評価された諸国の多くはこれらの地域にあることが確認された。よって、影響関数から得られる国別水資源量が詳細モデルに比べて過小になる主な原因は降水変化の季節変化性を無視したことにあると考えられる。この結果は降水変化に対する全球水文モデルの感度が高いことを示しており、影響関数作成時に降水を月別に変化させる必要性を示唆している。しかし、変化率を 25%刻みで-75%から+200%まで 12 通り、月単位で変化させた場合、12<sup>12</sup>回のシミュレーションが必要となり、計算機負荷の観点から実施可能かどうか今後検討する必要がある。したがって、月別変化を取り込むには、今後更なる検討が必要となる。

#### 4. グローバル水資源影響関数の考察

前節で得られた水資源影響関数の例として日本に関する結果を図-5 に示す。気温の上昇（横軸の右向き）とともに水資源量が減少していき（色が濃くなり）、降水の減少（縦軸下向き）とともに水資源量が減少していく（色が濃くなる）ことが分かる。気温の上昇に対する水資源量の減少率と降水の減少による水資源量の減少率の関係は国毎に異なる。気温が現在値に対して3℃上昇した場合と降水量が25%減少した場合でそれぞれ国の水資源量がどれくらい減少するかを示したものが図-6 である。参考として、日本、インド、中国、ロシアをそれぞれJ, I, C, Rとしてプロットした。気温に対する感度はインド、中国、ロシアの順に、降水に対する感度はロシア、インド、中国の順に高くなる。以下に簡単にこの関係を説明しておく。ロシアの主な水資源量は冬期の降雪に由来するが、降雪が積雪として春まで維持されて、一気に融け出した場合、蒸発による損失が小さく、降水量の減少(25%)と水資源量の減少(37%)の乖離が小さい。しかし、気温が上昇し、積雪の融解がおきると、冬期にも蒸発による損失が発生し、急速に水資源量が減少する。インドの主な水資源量は雨期の降水であるが、雨期には流出が蒸発に卓越し、蒸発による損失が比較的小さい。これに対して中国では蒸発が流出に年間を通じて卓越し、蒸発の損失が大きい。

#### 5. 結論と今後の課題

本論文では温暖化政策支援モデル AIM/Impact[Policy]に搭載するためのグローバル水資源影響関数の作成を行った。まず詳細な全球水文モデルを利用したシミュレーションを実施し、その結果が現在の国別水資源量を概ね±40%の誤差範囲内で再現できることを確認した。次に詳細なモデルを利用したシミュレーションを行い、影響関数を作成した。影響関数から得られる国別水資源量と詳細モデルから得られるそれとが±20%の誤差範囲内で一致することを確認し、影響関数から詳細モデルと同等の結果が再現されることを示した。ただし、アメリカや中国などでは詳細モデルによる結果と影響関数による結果に乖離が見られた。これは影響関数作成時に将来の降水データを年一律に変化させたことが原因だと考えられ、今後の検討が必要であることが示された。また、本論文では2086-95年の期間を中心に影響関数の妥当性の検証を行ったが、それ以外の期間についても検討する必要がある。

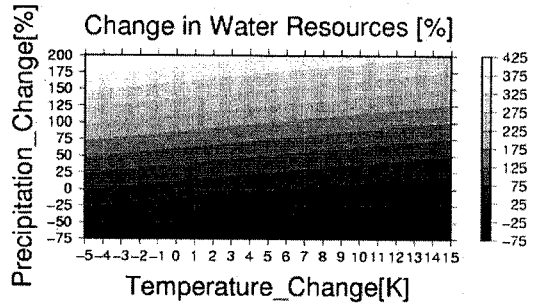


図-5 日本の年間水資源量の気温変化と降水変化に対する感度。気温を-5℃から+15℃まで変化させた場合（横軸）、降水量を-75%から200%まで変化させた場合（縦軸）の水資源量の変化を示す。

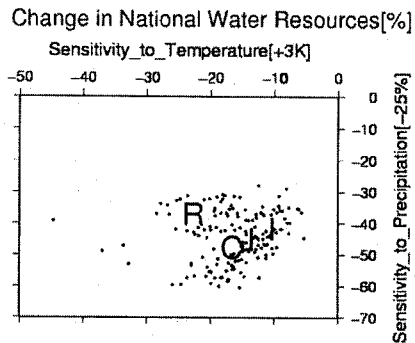


図-6 国別水資源量の感度。気温を+3℃、降水-25%の変化させた場合の水資源量の変化割合を示す。

影響関数が AIM/Impact[Policy]に実装されることにより、依然として政策検討の現場に対して科学的推計の詳細な手順や背景を逐一示すことは困難であるが、温暖化影響の評価結果をより透明性を持って示すことが可能になる。また、これまで分野別に行われてきた温暖化影響評価が AIM/Impact[Policy]に集約されることで、分野間の影響の相互比較ができるようになることが期待される。さらに、長期的な気候安定化目標とそれに至る道筋を、温暖化の定量的影響を考慮しながら検討することが可能になる。

ただし、影響関数による評価には限界もある。例えば AIM/Impact[Policy]は国単位で計算を行うため、国内分布を示すことができない。例えば中国では南北で、アメリカでは東西で水資源量が大きく異なるため、詳細な検討には国内の地域分割が必要である。また、本研究では年河川流量を水資源と見なしたが、流量の季節変動や年々変動、ダムなどのインフラの有無も重要な要素である。こうした詳細な検討を行う分野別影響評価をどのように影響関数に組み込んでいくかについて今後検討する必要がある。

謝辞：本研究は地球環境研究総合推進費 S-4「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」（代表：三村信男）および同 B-52「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」（代表：甲斐沼美紀子）の成果の一部である。

#### 参考文献

- 1) Hijioka, Y., Masui, T., Takahashi, K., Matsuoka, Y. and Harasawa, H, Development of a support tool for greenhouse gas emissions control policy to help mitigate the impact of global warming. Environmental Economics and Policy Studies, Vol. 7, No. 3, pp. 331-345, 2006
- 2) 脇岡靖明, 高橋潔, 久保田泉: 統合評価モデルを用いた温室効果ガス安定化濃度目標下におけるイネ・小麦の潜在生産変化の国別影響評価, 環境情報科学論文集, Vol. 20, pp. 19-24, 2006
- 3) Oki, T. and S. Kanae, Global hydrological cycles and world water resources, Science, Vol. 313, No. 5790, pp. 1068-1072, 2006
- 4) Alcamo, J., M. Flörke and M. Märker: Future long-term changes in global water resources driven by socio-economic and climatic changes, Hydrological Sciences-Journal, Vol. 52, No. 2, pp. 247-275, 2007
- 5) 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, Vol. 50, pp. 529-534, 2006
- 6) Manabe, S., Climate and the ocean circulation I. The atmospheric circulation and the hydrology of the earth's surface. Mon. Wea. Rev., Vol. 97, No. 11, pp. 739-774, 1969
- 7) P. A. Dimmeyer, X. Gao, M. Zhao, T. Oki and N. Hanasaki, The second global soil wetness project (GSWP-2), Bulletin of American Meteorological Society, Vol. 87, No. 10, pp. 1381-1397, 2006.
- 8) Hanasaki, N., S. Kanae, T. Oki, K. Masuda, K. Motoya, Y. Shen and K. Tanaka, An integrated model for assessment of global water resources. Part 1: Input meteorological forcing and natural hydrological cycle modules, to be submitted to the Hydrology and Earth System Sciences ([ftp://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/pub/hanasaki/temporary/HESS2007Part1\\_6.doc](http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/pub/hanasaki/temporary/HESS2007Part1_6.doc))
- 9) Döll, P., F. Kaspar, and B. Lehner, A global hydrological model for deriving water availability indicators: model tuning and validation, Journal of Hydrology 270, 105-134, 2003.
- 10) FAO, Review of world water resources by country, Water Reports, 23, FAO, 2003
- 11) T. Oki and Y. C. Sud, Design of Total Runoff Integrating Pathways (TRIP) A global river channel network, Earth Interactions, Vol2, 1998
- 12) Center for International Earth Science Information Network (CIESIN), Columbia University; and Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Gridded Population of the World Version 3 (GPWv3): Population Grids. Palisades, NY: Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC), Columbia University. 2005. Available at <http://sedac.ciesin.columbia.edu/gpw>. (downloaded on 28/Feb/07).
- 13) 松岡謙, 高橋潔: 地球水資源問題の現状と今後, 地球水資源の管理技術, 森澤真輔編, コロナ社, pp1-44, 2003
- 14) FAO, AQUASTAT, 2004 (<http://www.fao.org/ag/agl/aglw/aquastat/main/index.stm>)
- 15) Adam, J.C., E.A. Clark, D.P. Lettenmaier and E.F. Wood, Correction of Global Precipitation Products for Orographic Effects, J. Clim., Vol. 19, No. 1, pp. 15-38., 2006
- 16) Nakicenovic, N. and Swart, R., Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, Cambridge University Press, 2000

## DEVELOPMENT OF A GLOBAL WATER RESOURCES SCHEME FOR CLIMATE CHANGE POLICY SUPPORT MODELS

Naota HANASAKI, Yuji MASUTOMI, Kiyoshi TAKAHASHI,  
Yasuaki HIJIOKA, Hideo HARASAWA and Yuzuru MATSUOKA

A scheme was developed to estimate the change in national water resources under climate change. Using a distributed global hydrological model, 252 sets of simulation were conducted shifting temperature from -5 to +15 degree Celsius, and precipitation from -75% to +200% from current climate, and a database of national water resources under climate change was developed. The scheme requires little computational resources, because it just needs to refer the database. Therefore, it is suited to couple with climate change policy support models in which climate condition varies quite frequently. The output of this scheme agrees well with that of the original detailed model with an uncertainty of  $\pm 20\%$ .