

# 温暖化政策支援モデルにおける 全球水ストレス人口推定モデルの開発と適用

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF A GLOBAL WATER STRESSED POPULATION  
ESTIMATION SCHEME FOR CLIMATE POLICY ASSISTANCE MODELS

花崎直太<sup>1</sup> 増富祐司<sup>2</sup> 肱岡靖明<sup>3</sup> 高橋潔<sup>4</sup>

Naota HANASAKI, Yuji MASUTOMI, Yasuaki HIJIOKA, Kiyoshi TAKAHASHI

<sup>1</sup>正会員 博士 (工学) 国立環境研究所 研究員 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2)

<sup>2</sup>正会員 博士 (地球環境学) 国立環境研究所 ポスドクフェロー (〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2)

<sup>3</sup>正会員 博士 (工学) 国立環境研究所 主任研究員 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2)

<sup>4</sup>正会員 博士 (工学) 国立環境研究所 主任研究員 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2)

A simple scheme to estimate national water stressed population (WSP) was developed for climate policy assistance models. A lookup table approach was adopted to reduce computational load. The WSP was defined as the number of people living in the area where the water resources are less than 1000 m<sup>3</sup>/person/yr. The estimated national WSP agreed well with earlier studies that were carried out with standard, computationally expensive approach. The scheme was incorporated into the AIM/Impact[Policy] model, a climate policy assistance model. The relationship between the stabilization level (SL) of global mean temperature increase and WSP was analyzed. It displayed that the higher SL increased WSP in northern Africa and the Middle East, while the opposite relation was found in the remaining regions.

**Keywords:** Climate change, Global hydrology, Water resources

## 1. はじめに

気候変化が水循環や水資源におよぼす影響の予測はこれまでに数多く行われてきた<sup>1)</sup>。これらの研究は、気候と社会経済人口の将来シナリオに沿って、水循環・水資源モデルを走らせ、将来と現状の差異を示したものが多し。これに対し、水循環や水資源におよぼす影響を一定の値に収めるためには気候変化、あるいはその原因となる温室効果ガスの排出をどの程度までに抑えなければならぬかというアプローチからの研究事例は少ない<sup>2),3)</sup>。

Hijioka らにより開発された温暖化政策支援モデル AIM/Impact[Policy] (以下 AIP) はこうしたアプローチを可能にする数少ないモデルである<sup>4)</sup>。このモデルに将来の大気中の温室効果ガス濃度や全球平均気温の目標値を設定すると、排出削減のために生ずる経済影響が最小となる排出経路が計算され、気温や降水、農業や健康など分野別の影響が世界の国別に時系列で示されるようになって

ている。このモデルを利用すれば政策決定者は経済や分野別の影響を考慮しつつ、温室効果ガス排出量の目標値を検討することができる。

AIP の影響評価は「影響関数」と呼ばれるルックアップテーブルを用いて行われている。これは気候変化に対する影響評価モデルの応答をあらかじめデータベース化しておき、利用時には最も近いものを読み取る手法である。計算機負荷が小さいので、操作の度に気候条件が変化する温暖化政策支援モデルでの影響評価に適している。花崎らは全球水資源モデル H07 を利用し、国別の水資源量に関する影響関数を開発した<sup>5)</sup>。ここで国別の水資源量は重要な情報であるが、その絶対量より水利用量との相対的な関係が重要である。また国内の水資源量分布に地理的偏在がある場合、水資源量の少ない地域における温暖化の影響がより重要であるが、国内の総和を計算する過程で、それらが水資源量の多い地域での変化に打ち消されてしまう問題もあった。

そこで本研究では、一人当たりの水資源量が  $1000\text{m}^3/\text{person}/\text{yr}$  を下回る地域に住む人口を水ストレス人口と定義し<sup>6),7),8)</sup>、影響関数の開発を行った(第2章)。この指標を使うことで、AIP は水逼迫地域での水資源の影響をより効果的に抽出できるようになった。次に、影響関数が元の影響評価モデルを代替するか、主な先行研究の結果を再現するかを検証した(第3章)。最後に、AIP を利用することで、全球平均気温の安定化レベルと水ストレス人口の関係を検討した(第4章)。

## 2. 方法

### (1) 全球水資源モデルとデータ

影響関数を作成するために利用したのは全球水資源モデル H07 である<sup>9),10)</sup>。このモデルは全球気象データを主入力データとして、地表面の熱水収支、河川の流下、農業用水需要の推定などの計算を行い、河川流量、灌漑用水需要量などを空間解像度  $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ 、時間解像度日単位で計算するモデルである。ただし、本研究では年河川流量の出力のみを利用した。

基準となる現在の全球気象データには The 2<sup>nd</sup> Global Soil Wetness Project の B1 データを利用した<sup>9)</sup>。変数は気温、相対湿度、風速、気圧、短波放射、長波放射、降雨量、降雪量の8項目である。空間解像度は  $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ 、期間は 1986-1995、時間解像度は3時間である。

将来の全球気象データには Coupled Model Intercomparison Project 3 (CMIP3)<sup>11)</sup>のデータを利用した。これは複数の全球気候モデル (Global Climate Model, GCM) に Special Report on Emission Scenarios (SRES)<sup>12)</sup>に基づく共通の社会経済人口シナリオを与えて将来気候のシミュレーションを行い、作られたものである。

GCM の出力する気温や降水量には系統的な誤差 (バイアス)があるため、Alcamo らの手法に従って除去した<sup>7)</sup>。まず GCM の気温と降水量のデータを現在(1961-90)、2020年代 (2011-2040)、2050年代 (2041-2070)、2080年代 (2071-2100) の4期間、各30年分用意した。次に月別に30年平均した。その後、空間解像度を  $1.0^\circ \times 1.0^\circ$  に変換した。続いて、気温については、月別に2020年代・2050年代・2080年代と現在との差を、降水については比を求めた。最後に、現在の全球気象データの1986-1995年の時系列データに月ごとに気温の差を足し、降水の比を掛けた。つまり、月単位未満の変動成分は現在気候と同一で、温暖化による30年平均の月単位の変化成分だけが、気温と降水に上乘せされた。この他の変数は現在気象と同じとした。

一人当たりの水資源量を求めるに際して必要な全球人口データは Shen らを利用した<sup>8)</sup>。空間解像度は  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  で、SRES の4つのシナリオに基づき、1990年から2100年までの110年間をカバーしている。

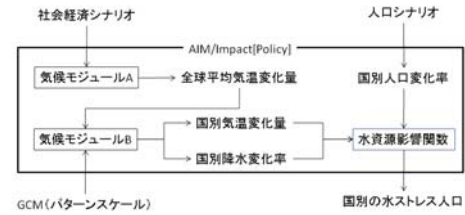


図-1 AIP の概念図

### (2) 全球水資源モデルの将来シミュレーション

次に H07 を標準的な設定で走らせて、気候変化に伴う水ストレス人口の予測シミュレーションを行った。ここでは Alcamo らの設定<sup>7)</sup>に従い、対象とする期間は2020年代、2050年代、2080年代の3期間、利用する GCM は HadCM3 モデルと ECHAM5 モデルの2種類、社会経済人口シナリオは SRES A1B (高成長社会シナリオ) および A2 (多元化社会シナリオ) とした。これらに対応する将来の全球気象データを H07 に入力し、平均年河川流量を求めた。ここで河川流量を水資源量とみなし、各シナリオの期間平均の人口で除すことで、空間解像度  $1.0^\circ \times 1.0^\circ$  で一人当たり水資源量を求めた。最後に、一人あたりの水資源量が  $1000\text{m}^3/\text{person}/\text{yr}$  を下回るグリッドの人口を国別に集計し、水ストレス人口を算出した。

### (3) AIP モデル

AIP は図-1 に示すように、気候と水資源影響関数の2つのモジュールからなる (AIP は多くのモジュールからなるが、本稿では水資源影響に関係するもののみを示した)。まず、AIP の気候モジュールはユーザが設定した条件に応じた全球平均気温変化量を計算する。次にパターンスケール手法を利用し、全球平均気温変化量を国別の気温変化量と降水量変化率に変換する。これは式(1)に示されるように、GCM の全球平均気温の上昇量 ( $\Delta T'_{GM}$ ) とその時の気候変化の地理的分布 ( $\Delta V'_{i,j}$ ) の関係が、任意の全球平均気温の変動 ( $\Delta T_{GM}$ ) に対して維持されることを仮定している。

$$\Delta V_{i,j} = \Delta V'_{i,j} / \Delta T'_{GM} \cdot \Delta T_{GM} \quad (1)$$

将来の人口変化は、ユーザが選択した SRES シナリオに基づいて生成される。こうして得られた、国別の気温変化量、降水量変化率、人口変化率の3つの説明変数から国別に用意された影響関数 (ルックアップテーブル) を介して各種の温暖化影響を推定する。

AIP の地域分割単位は国である。しかし、面積が大きい国の場合、気温や降水の絶対量と変化量にも大きな空間偏在がある。特に降水の空間偏在は水ストレス人口への感度が高いことが分かったため、人口密度の高い中国とインドは、それぞれ34と35の行政区に分割した。ただし、出力時においては行政区の総和を求めることで、

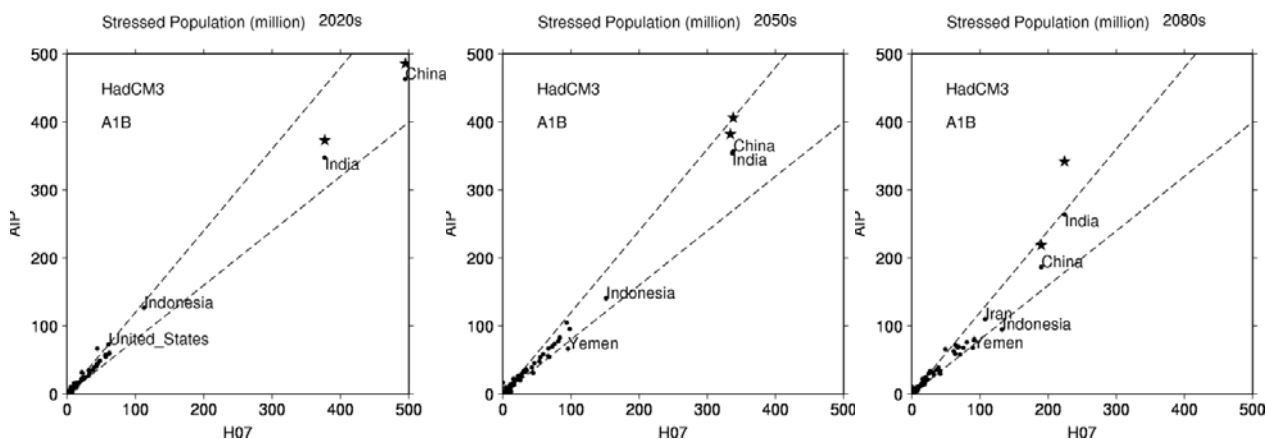


図-2 全球水資源モデルH07(横軸)と温暖化政策支援モデルAIP(縦軸)による国別のストレス人口の比較。左から2020年代、2050年代、2080年代。GCMにHadCM3、社会経済人口シナリオにSRES A1Bを利用した場合。破線は±20%の誤差を示す。星印はインドと中国を行政区に分割しなかった場合を示す。

国単位で出力した。また、将来人口データは行政区別に得られなかったため、国と同一の人口増加率を用いた。人口が都市域に流入する効果などを取り入れることは今後の課題である。

#### (4) 影響関数作成シミュレーション

影響関数を作成するためのシミュレーションは花崎らの先行研究を改良したものである<sup>9)</sup>。まず、現在の全球気象データを1986-1995年の10年間について用意した。次にこの気象データの気温と降水量を、全球の全てのグリッド、期間中の全ての3時間データについて、一律に変化させた。ここで気温を-5°Cから15°Cまで1°C刻みで、降水量を25%から300%まで25%刻みで変化させることにより252の気象データを作成した。この変化範囲はCMIP3の将来気候シミュレーションの解析から求められたもので、この変化幅に、基準期間(1980年代)から21世紀後半(2080年代)までの国別の気温変化量と降水量変化率のシミュレーション結果の99.9%が収まる<sup>9)</sup>。この252通りの気象データをH07に入力することにより、空間解像度1.0°×1.0°で252通りの平均年河川流量を得た。

ここで、各国の国内の人口分布パターンが将来にわたって変化しないことを仮定し、現在の全球人口データを、全球の全てのグリッドについて、現在の50%から600%まで50%刻みで一律に変化させて、12通りの人口データを作成した。252通りの平均年河川流量を、それぞれ12通りの人口で除すことにより、3024通りの一人当たり水資源量を空間解像度1.0°×1.0°で得た。簡便のため、上流の取水が下流の水資源量に与える影響などは無視した。ここで、それぞれについて一人当たり水資源量が1000m<sup>3</sup>/person/yrを下回るグリッドを求め、その人口を国別に積算し、水ストレス人口とした。これらの計算設定に関する議論は4.3で述べる。

このようにして、気温が-5°Cから15°Cまで、降水量が

25%から300%まで、人口が50%から600%まで変化することに対応した国別の水ストレス人口に関する影響関数(ルックアップテーブル)が作成された。

### 3. 検証

#### (1) 影響関数の検証

まず、前章(3)-(4)で示されたAIPを利用して求めた各国の水ストレス人口が、前章(1)-(2)で示されたH07を利用して求めたそれを代替するかを調べた。GCMにHadCM3を、社会経済人口シナリオにSRES A1Bを利用した場合の、国別の水ストレス人口をプロットした結果が図-2である。

気候変化が比較的小さい2020年代はもとより、大きくなる2050年代、2080年代においても、おおむね誤差が±20%以内に収まることが示された。特に水ストレス人口が5000万人を超える主要国でも良好な対応が見られる。紙面の都合上示さないが、GCMにECHAM5を、社会経済人口シナリオにA2を利用した場合も同様の性能を示した。この結果から、国別の水ストレス人口に関する影響関数は全球水資源モデルH07をよく代替できることが示された。

ここで、前章(3)で示した、中国とインドでの行政区分割の効果を検討する。図-2の星印で示したのが、分割を行わなかった場合の結果である。分割した場合に比べて、誤差が大きくなることが分かる。この理由はインドについては次のようになる。このGCMと社会経済人口シナリオの組み合わせの場合、年降水量の小さい西部では温暖化に伴って降水量が増加するため(例えば2100年のRajasthan州は1990年比44%増加)、水ストレス指標が緩和する方向に向かう。しかし、インドを行政区別に分割しない場合、年降水量の大きい東部の降水量変化率が国

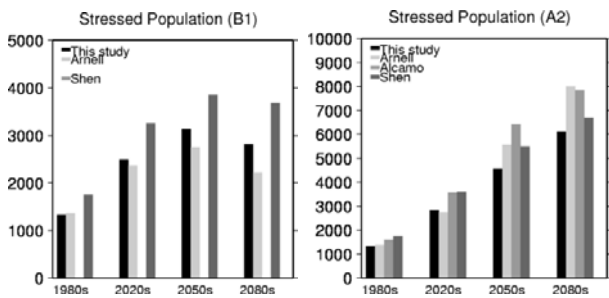


図-3 本研究と先行研究の全球の水ストレス人口の比較。左からSRES B1 シナリオ, A2 シナリオ。

平均の降水量変化率(2100年で3%増加)を支配するため、西部での降水量増加が反映されなくなる。このためH07では現れる西部の水ストレス人口の減少が、AIPでは現れないことになり、影響関数の過大評価となってしまうのである。

## (2) AR4 再現性の検証

次にAIPが推定する全球の水ストレス人口が、最新の科学的知見であるIPCCの第4次評価報告書(AR4)<sup>1)</sup>に掲載された推定値をどの程度再現するかを検証した。本研究が対象にしたのは、AR4に引用された6つの文献である。ただし、そのうちの3つは古く、利用している社会経済人口シナリオがSRESに基づいていないため、除外した。残りの3つにおいて<sup>6, 7, 8)</sup>、GCMにHadCM3を用いた場合の全球の水ストレス人口は共通して出力されていたため、この結果を検証の対象とした。社会経済人口シナリオはSRES B1およびA2、期間は1980年代、2020年代、2050年代、2080年代の4期間である。AIPによる全球の水ストレス人口と、AR4に引用された3つの文献によるそれとを比較したのが図-3である。

本研究で推定された全球水ストレス人口はB1・A2シナリオ共に、現在から将来の4期間を通じ、先行研究とよく一致することが示された。ただし、本研究の推定値は先行研究より系統的に小さい。これは、一つにはH07では先行研究と比べて陸地の少ない全球海陸分布地図が採用されており、海岸沿いの人口(1995年時点で世界の総人口の8%が)が計算に反映されていないこと、また、3つの文献の空間解像度がいずれも $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ であるのに対し、H07のそれは $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ と少し粗い。このため、人口と河川流量の空間分布が平滑化され、一人当たり水資源量の閾値を超えるグリッドが相対的に減り、水ストレス人口が小さくなるのが原因だと考えられる<sup>10)</sup>。

## 4. 安定化レベルと水ストレス人口

### (1) 全球平均気温の安定化レベル

前章までに、AIPを使った水ストレス人口の検証が行われた。この章ではAIPを利用し、全球平均気温の安定

化レベルと水ストレス人口の関係を検討する。

本研究では、 $0.0^{\circ}\text{C}$ 、 $+2.0^{\circ}\text{C}$ 、 $+4.0^{\circ}\text{C}$ の3種類の安定化レベルを検討する。 $0.0^{\circ}\text{C}$ とは参照実験で、1980年代の気候が21世紀末まで続くという設定である。 $+2.0^{\circ}\text{C}$ と $+4.0^{\circ}\text{C}$ は、22世紀末までの全球平均気温の上昇量(産業革命前を基準とする)の上限値である。21世紀中の全球平均気温上昇の経路はAIPによって計算される。陸上の全球平均気温の時系列を図-4aに示す。パターンスケールに利用したのはGCMにHadCM3、社会経済人口シナリオにSRES A1Bを与えたときの将来の全球気候データである。この結果得られた陸上の全球平均降水量を図-4bに示す。ちなみにAIPではCMIP3の任意のGCMに差し替えて計算を行うことが可能である。将来の人口はFIX、A1、A2の3種類について検討した。FIXとは参照実験で、1980年代の人口が21世紀末まで続くという設定である。A1、A2はそれぞれSRESによる21世紀の人口シナリオである。世界人口の時系列を図-4cに示す。

計算期間は2000年から2100年までである。計算間隔は10年とし、気候データも10年平均値を利用した。AIPは国単位での出力が可能であるが、本研究では世界をアジア、FSU(旧ソビエト連邦)、ラテンアメリカ、アフリカ北部と中近東、OECD諸国、サブサハラアフリカの6つの地域に集計して解析を行った。

## (2) 結果

アフリカ北部と中近東、サブサハラアフリカ、全球について、水ストレス人口の時系列を示したのが図-5である。まず、いずれの地域においても、人口シナリオが水ストレス人口の主要な動向を決め、全球平均気温の安定化が副次的な変化しかもたらさないことが分かる。たとえばサブサハラアフリカにおける $+4^{\circ}\text{C}$ 安定化の場合、2100年時点で、A2の人口シナリオは参照実験(安定化気温 $0.0^{\circ}\text{C}$ かつ人口FIX)より7.3億人水ストレス人口を上昇させているが、その時の $0.0^{\circ}\text{C}$ と $+4.0^{\circ}\text{C}$ の安定化レベルの差異は1.1億人である。

次に各地域の安定化レベルと水ストレス人口の関係を検討する。アフリカ北部と中近東では、安定化レベルが上昇すると水ストレス人口が若干上昇することが分かる。これに対して、サブサハラアフリカでは逆の傾向を示す。全球で見ても、サブサハラアフリカと類似した傾向が見られた。ちなみに、これらの他の4つの地域では、アジアとOECDがサブサハラアフリカ型で、FSUとラテンアメリカでは安定化レベルによる差異が小さかった。

## (3) 考察

前節の前半において、地域の水ストレス人口は人口シナリオに大きな影響を受けることが示された。本研究では一人当たり水資源量が $1000\text{m}^3/\text{person}/\text{yr}$ を下回る地域に住む人口を推計してきた。SRES A2の場合、21世紀

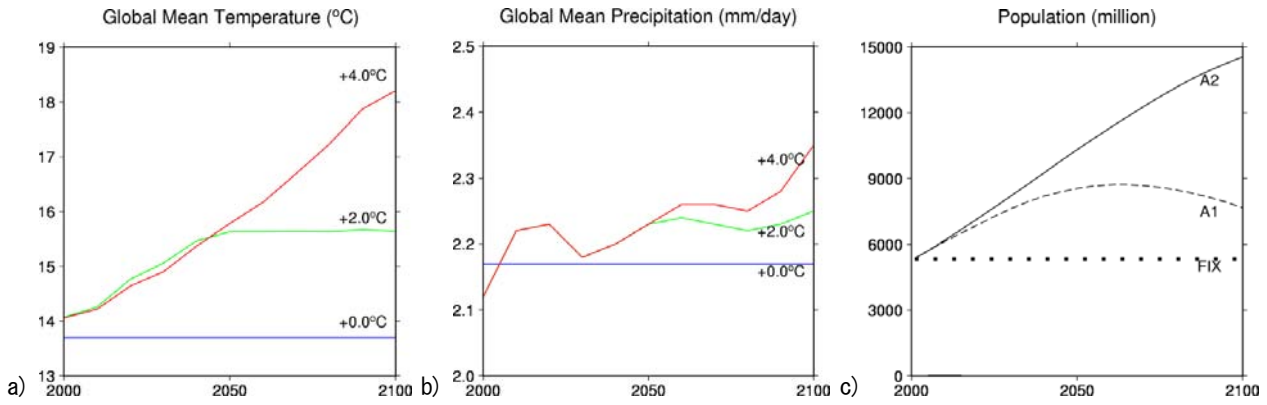


図-4 安定化計算において利用した a) 陸上の全球平均気温, b) 陸上の全球平均降水量, c) 全球人口シナリオ.

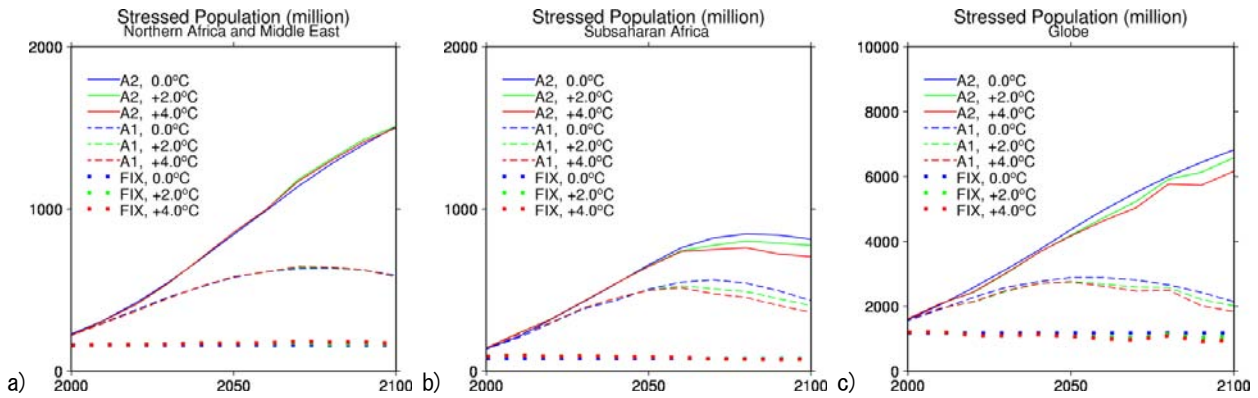


図-5 21世紀中の水ストレス人口の時系列変化. a) アフリカ北部中近東, b) サブサハラアフリカ, c) 全球.

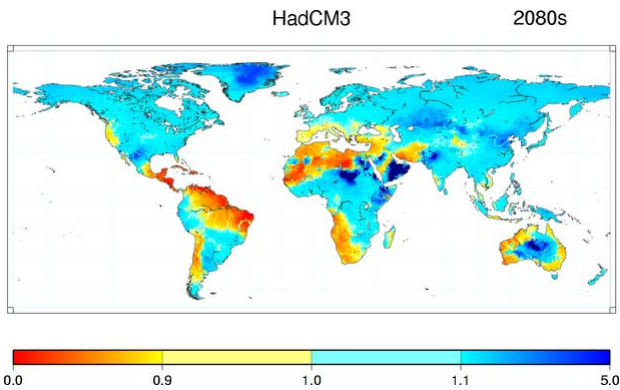


図-6 1980年代に対する2080年代の平均年河川流量の比.

末の世界人口は2000年の約3倍近くに増加する(図-4c). これに対し, 安定化レベル+4.0°Cの降水量の増加は8%(図-4b, 全球の平均年河川流量の増加は14%)である. 降水量も河川流量も地域偏在性が大きく, 局所的に3倍以上になるところもあるが, 平均的には変化率は人口より1-2桁小さい. このため, 水ストレス人口の推計において, 気候変化より人口の影響が卓越するのだと考えられる. 水資源に関するグローバルな温暖化の影響評価において, 人口の影響が卓越することは既にいくつかの文献でも指摘されている<sup>14)</sup>.

また前節の後半において, アフリカ北部と中近東以外の地域において, 安定化レベルが高いほど, 水ストレス

人口が小さくなるという結果が見られた. この原因は図-6に示される. 図-6はHadCM3(社会経済人口シナリオはSRES A1B)による全球気候データをH07に入力して得られた2080年代の全球の平均年河川流量を1980年代に対する比として示したものである. これを見ると, 気候変化によって, 地中海周辺と中近東, 南米の北東部, アフリカの南西部, オーストラリアの沿岸部を除き, 全球の平均年河川流量は増加することが示されている. 本研究では, 平均年河川流量を水資源量とみなしている. このため, 河川流量がほぼ全域で減少したアフリカ北部と中近東以外の地域では, 一人当たり水資源量が増え, 水ストレスが減ったということになる. ちなみに, 南米の北東部などでは一人当たり水資源が豊富で, 河川流量の減少が水ストレス人口の変化に結びつかなかった.

一人当たり水資源量を利用した水資源の影響評価は, AR4でも多数引用されており, 有用な指標として広く認められている. しかし, 河川流量には時間変動があり, 平均年河川流量の増加は, 必ずしも利用可能な水資源量の増加を保証しないことに注意が必要である. 特に, 気候変化は降雨の強度と頻度の変化をもたらすと予測されており, 洪水や渇水の増大が懸念されているが<sup>1)</sup>, こうした負の影響も指標には反映されていない. また, 長期的には水利用効率の変化等が期待でき, その場合は1000m<sup>3</sup>/person/yrを水ストレスの閾値として用いるのが不

適切となりうることに留意する必要がある。この他に本研究では、上流の取水による下流の河川流量の減少を考慮しなかったが、特に乾燥地や乾期においてこの効果は無視できない。

最近、こうした問題を解消する「累積取水需要比」という指標が開発されている<sup>10)</sup>。この指標は、「取りたいときに、取りたい量の水が取れるか」を表すもので、河川流量の年々変動や季節変動を考慮した水資源評価を行うのに適している。しかし、非常に煩雑な計算が必要で、説明変数も増えるため、影響関数を作成するためには、今後多くの課題の克服が必要である。

## 5. 結論

温暖化政策支援モデル AIM/Impact[Policy](AIP)において、温暖化による国別の水ストレス人口を推計するための影響関数を開発した。本研究では先行研究に倣い、一人当たり水資源量が  $1000\text{m}^3/\text{person}/\text{yr}$  を下回る地域に住む人口を水ストレス人口と定義した。影響関数を介して推計された水ストレス人口は、全球水資源モデル H07 から推計されたそれとよく一致し、IPCC 第4次報告書に報告された将来の水ストレス人口もよく再現した。世界で広く利用されている水ストレス人口の推計が AIP 上で可能になり、温暖化政策支援へのさらなる貢献が期待できる。次に、AIP を利用して全球平均気温の安定化レベルと21世紀中の水ストレス人口の関係を求めた。この結果、アフリカ北部と中近東において、安定化レベルの上昇とともに水ストレス人口が若干増加するという結果が得られた。これらの地域は現在も水が逼迫している地域であり、気候政策を決定する上で検討すべき要素となりうる。しかし、これ以外の地域では温暖化に伴う降水量・河川流量の増加のため、水ストレス人口が減少するという結果が得られた。これは指標の特性と限界によるものであり、さらなる検討の必要性が強く示唆された。

**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)の成果の一部である。

## 参考文献

1) Kundzewicz, Z. W., Mata, L. J., Amell, N. W., Döll, P., Kabat, P., Jiménez, B., Miller, K. A., Oki, T., Sen, Z., and Shiklomanov, I. A.: Freshwater resources and their management, in: Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by: Parry, M. L., Canziani, O. F., Palutikof, J. P., van der Linden, P. J., and Hanson, C.

E., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 173-210, 2007.

2) Toth, F. L.: Climate Policy in Light of Climate Science: The ICLIPS Project, *Climatic Change*, 56, 7-36, 2003.

3) Füssel, H. M., Toth, F. L., van Minnen, J. G., and Kaspar, F.: Climate Impact Response Functions as Impact Tools in the Tolerable Windows Approach, *Climatic Change*, 56, 91-117, 2003.

4) 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

5) 花崎直太, 増富祐司, 高橋潔, 脇岡靖明, 原沢英夫, 松岡譲: 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, *環境システム研究論文集*, 35, 367-374, 2007

6) Amell, N. W.: Climate change and global water resources: SRES emissions and socio-economic scenarios, *Global. Environ. Chang.*, 14, 31-52, 2004.

7) Alcamo, J., Florke, M., and Marker, M.: Future long-term changes in global water resources driven by socio-economic and climatic changes, *Hydrolog. Sci. J.*, 52, 247-275, 2007.

8) Shen, Y., Oki, T., Utsumi, N., Kanae, S., and Hanasaki, N.: Projection of future world water resources under SRES scenarios: Water withdrawal, *Hydrolog. Sci. J.*, 11-33, doi: 10.1623/hysj.53.1.11, 2008.

9) Hanasaki, N., Kanae, S., Oki, T., Masuda, K., Motoya, K., Shirakawa, N., Shen, Y., and Tanaka, K.: An integrated model for the assessment of global water resources - Part 1: Model description and input meteorological forcing, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 12, 1007-1025, 2008.

10) Hanasaki, N., Kanae, S., Oki, T., Masuda, K., Motoya, K., Shirakawa, N., Shen, Y., and Tanaka, K.: An integrated model for the assessment of global water resources - Part 2: Applications and assessments, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 12, 1027-1037, 2008.

11) Meehl, G. A., Covey, C., Delworth, T., Latif, M., McAvaney, B., Mitchell, J. F. B., Stouffer, R. J., and Taylor, K. E.: THE WCRP CMIP3 Multimodel Dataset: A New Era in Climate Change Research, *B. Am. Meteorol. Soc.*, 88, 1383-1394, 2007.

12) 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

13) Mitchell, T. D.: Pattern scaling: an examination of the accuracy of the technique for describing future climates, *Climatic Change*, 60, 217-242, 2003.

14) Vörösmarty, C. J., Green, P., Salisbury, J., and Lammers, R. B.: Global water resources: Vulnerability from climate change and population growth, *Science*, 289, 284-288, 2000.