

H-4 アジア地域における環境安全保障の評価手法の開発と適用に関する研究

(3) アジア地域における水需給の将来予測と対策に関する研究

独立行政法人国立環境研究所

社会環境システム研究領域 環境計画研究室

原沢英夫・高橋潔

熊本大学法学部*

有吉範敏

慶應義塾大学大学院政策メディア研究科**

西岡秀三

*:平成11年度のみ参画、**：平成12年度のみ参画

(研究協力機関)

京都大学大学院工学系研究科

松岡 譲

平成11～13年度合計予算額 33,374千円

(うち、平成13年度予算額 10,639千円)

[要旨] 人口増加、工業化、灌漑面積の増加といった様々な原因により、水資源不足は世界各地において深刻な問題となりつつある。本研究では、気候変化を考慮した中長期の水需要と利用可能な水資源量の予測を行ない、渇水リスクの高い地域や気候変化に対して脆弱な地域を抽出する方法を検討した。その方法を2050年～2059年の9年間を対象として適用し、水需要と利用可能な水資源量の比(需給比率)を推計し、水資源の逼迫度を流域ごとに評価した。その結果、中国のアムール川・長江では人口増加と工業化を反映した水需要増加傾向のため水資源が現状より逼迫する、ガンジス川流域では急激な水需要増加が見込まれるが同時に気候変動による流出量の増加も見込まれるため需給比率で見た水資源の逼迫度としてはあまり変化しない、ミシシッピ川流域やナイル川流域においては流出量の年々変動が現状よりも大きくなる、といった流域ごとの水資源逼迫度の定性的な将来見通しを示すことができた。

さらに、需要推計モデルを改良し、2030年までを対象期間として、アジア太平洋地域各国のより詳細な水需要推計を行った。将来の水需要の決定因子として、工業部門についてはGDP、農業部門については灌漑面積、家庭部門については給水人口を用いた。決定因子の将来変化については、過去の実績値をもとにした回帰によって設定した。国連環境計画の「第3回地球環境見通し」で検討された「現状傾向発展型」、「政策改革型」、「地域孤立型」、「大変革型」の4つの社会経済発展パターンについて推計を行ったところ、3部門計の水消費量で比較した場合、どの地域においても地域孤立型が最も需要の伸びが大きいと見積もられた。部門別に見ると、工業部門については現状傾向発展型の水消費量がもっとも大きく、農業部門については急激な人口増加と遅い技術進歩速度を反映して地域孤立型の水消費量がもっとも大きい。

[キーワード] アジア地域、水資源、水需要、水不足、シナリオ分析

1. はじめに

人口増加、工業発展、灌漑農業の拡大といった人間活動のダイナミックな変化に伴い、水資源の不足とそれに起因する様々な環境問題が世界規模で顕在化してきている。途上国において今後とも人口が増加し続け工業化が急激に進展するという発展型シナリオを前提とした場合、水需要

の増加により、さらに深刻な水不足が広範な地域にわたって起こりうることを懸念され、将来の経済発展の制約因子にもなり、21世紀には限られた水資源をめぐる紛争が頻発するようになるという予測も行われている。

そのような悲観的な水資源問題の将来像が強調される一方で、実際には、水需要の将来像は人口変化や経済発展等の社会的背景の将来見通しに応じて全く異なったものとなる。将来の社会的背景がどのようになるかは、自由選択性・不確実性を持つため、将来に生起・選択しうる多様な発展ケースを前提として検討する必要がある。同様に、水需給の問題を論ずる際にも、自由選択性・不確実性に配慮した評価が必要であり、致命的な損害を回避出来る社会発展の方向性、またその発展の方向性の中で問題解決の為にとるべき具体的方策を客観的に検討するための手法・ツールの開発が急務となっている。

また、人為的な温室効果ガス排出により引き起こされる気候変化は、これも人口や経済等の社会的背景の将来見通しに大きく依存するが、降水・蒸発の空間的・時間的パターンを変化させるため、世界各地域の水資源量(水の供給)を大きく変化させうると考えられている。この影響は、地域によっては、社会経済変化による水需要変化以上に重要な水資源問題のファクターになるかもしれない。

水資源問題は、問題の表裏両面を成す需要または供給のどちらか一方についてのみ検討を行っても効率的な問題解決への道筋を提示することは出来ず、需給両面について総合的な評価を行う必要がある。しかしながら、社会的な注目度の高さにも関わらず、地球規模を対象として需給両面について総合的な評価を行う研究の数はいまだ少なく、知見の集積が求められている。本研究はそのような問題背景・社会的要請に応じ、地球規模の水資源問題を諸状況(気候変動や社会経済変化)の将来変化を考慮しつつ需給両面から検討するための手法を開発し、またその手法を適用して地球規模の水需給評価を行うものである。

2. 研究の目的

本研究は、中長期的将来を対象期間として、アジア地域を中心とした地球規模の水資源問題を、将来の水需要変化と利用可能な水資源量の両面から総合的に評価し、将来的に水資源が不足する地域を見出すことを目的とする。より具体的には、経済発展、人口変化等の社会経済因子に基づく水需要変化予測、ならびに、人為起源の温室効果ガス排出を原因とする気候変動を勘案した利用可能な水資源量予測を行うためのモデルを開発・改良し、そのモデルを複合的に利用することにより様々な将来の発展パターン・政策選択の下での水資源問題の起き方を評価する。

3. 研究方法と結果

(1) 水資源問題の評価スキーム

図1は本研究で用いられた水の需要、供給、および需給バランスの推計・評価スキームを示す。機能的に大別すると、需要量推計モジュール(左上部)、供給量推計モジュール(流出推計モジュール、左下部)、需給バランス評価モジュール(右部)に分けて考えることができる。需要量推計モジュールでは、水需要の現状推計量、人口推計、経済発展シナリオ等から各流域における将来の水需要を推計する。流出推計モジュールでは、グリッド気候情報と地表面情報に基づき流出量を推計し、流域内で潜在的に利用可能な水量を推計する。将来のグリッド気候情報は、GCMを

用いた温暖化実験の計算結果に基づいて作成する。さらに、需給バランス評価モジュールでは、流域単位で集計された利用可能水量と需要量の比を水需給の逼迫度を示す指標として用い、将来の水需給バランスの動向を定性的に把握する。

本研究では、水資源問題の将来評価を遂行するために、各モジュールの開発・改良、入力データ収集、全体モジュールの統合等の作業が並行的に行われた。本報告では、作業手順を追い、開発されたモジュールとそれを適用した評価結果について順に説明する。まず3（2）において、全球を対象とした水資源評価のために開発した需要量推計モジュールと関連したデータ収集について説明する。また、開発したモジュールを用いて2050年を対象年、全球を対象地域として行った水需要推計の結果を示す。

次に3（3）において流出推計モジュールの開発とその入力データである気候シナリオの開発について説明する。ここでは、開発したモジュールを用いて2050年代を対象時期、全球を対象地域として行った流出推計の結果を示す。さらに3（4）では、水需給のバランスを評価し水資源が逼迫する地域を検出するための指標について説明し、3（2）と3（3）で示された需要・供給の将来推計の結果をもとにして、流域別に将来の水需給状況について評価する。3（5）では、アジア地域を対象として収集したより詳細な水需給関連情報を用いて将来の水需要推計が行えるように、3（2）で説明した水需要推計モジュールを改良し、その改良された水需要推計モジュールを適用することにより、国連環境計画による「第三回地球環境の見通し」で設定された4つの将来発展パターンに対応する将来の水需要見通しの計算を国別に2032年を対象期間として行った結果を示す。

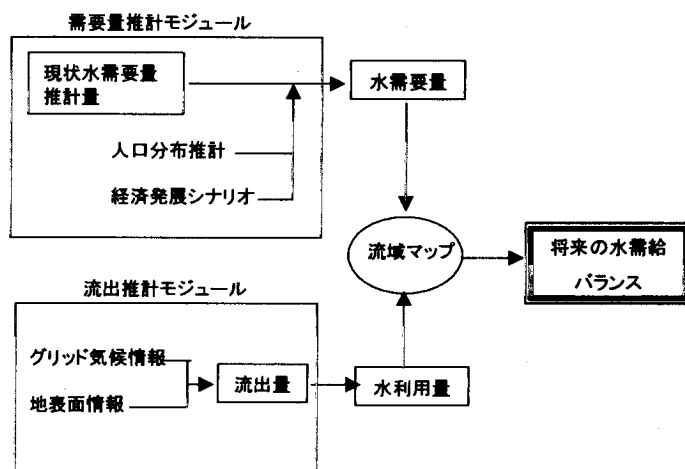


図1 水需要、供給、需給バランスの評価スキーム

(2) 需要量推計モジュールの開発と2050年の世界の水需要推計

① 需要量推計モジュール

需要量推計モジュールにおいて、水需要は家庭、工業、農業の3部門に分類され、それぞれについて需要量推計が行なわれる(図2)。各部門について、まず人口変化と経済活動の規模拡大ならびに将来の水利用効率の向上に関するシナリオに基づき、各国毎に需要水量が推計される(図2の上部)。次に、人口の空間分布と土地利用分布に基づき、その需要水量の空間分布を推計する(図2の中央部)。最終的に、その空間的な推計値を流域ごとに集計し、各流域の需要水量とする(図2の下部)。ここでは、開発したモジュールと2050年の水需要推計を行うために仮定した社会経済因子について説明し、その後2050年を対象として行った水需要推計の結果を示す。

② 各国水需要推計モデル(図2の上部)と2050年の推計に用いられた社会経済シナリオ

まず、水需要将来推計のベースラインとして、1990年時点における各国各部門別の需要水量データベースを構築した。データソースとしては、複数の統計資料^{1),2)}を比較・統合して用いた。

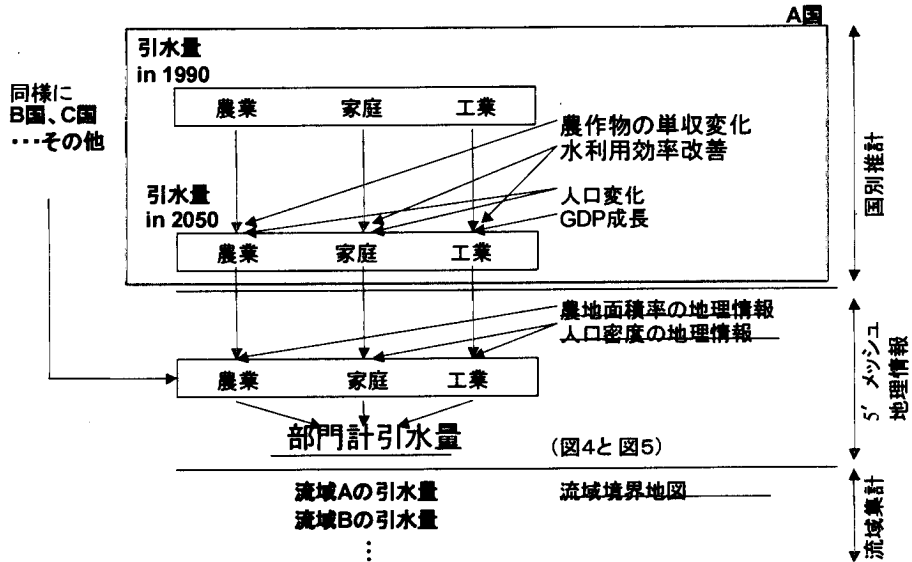


図2 水需要推計モジュールのアウトライン

次に、将来推計のために、部門別に異なる推計方法を適用した水需要推計モデルを作成した。家庭部門の各国需要水量は、人口をドライビングフォースとし（人口比例）、さらに水道普及率（一般的に水利用量を増加させる）や節水技術（水利用量を減少させる）を包括的に説明する一人あたり水利用の将来変化傾向を勘案することにより推計した。工業部門については、各国のGDPをドライビングフォースとし、さらに水利用効率改善シナリオに従い割り引かれるとした。農業部門については、ドライビングフォースは家庭部門と同様に人口とし、単収増加に応じた割引を考慮して水需要を推計した。農業部門を例に挙げ、水需要将来推計式を以下に示す。ここで最後の項($Y_{i,1990}/Y_{i,2050}$)は、農作物単収変化の逆数であり、水利用効率改善に相当する。

$$ADEM_{i,2050} = ADEM_{i,1990} \times \frac{POP_{i,2050}}{POP_{i,1990}} \times \frac{Y_{i,1990}}{Y_{i,2050}}$$

$ADEM_{i,y}$: y年i国の農業部門水需要
 $POP_{i,y}$: y年i国の人口
 $Y_{i,y}$: y年i国の平均農作物単収

表1 2050年における家庭部門の一人あたり水利用変化と工業部門の水利用効率改善係数（1990年を1とした場合）

地域	家庭部門	工業部門
北米	0.798	0.613
西欧	1.000	0.886
OECD 太平洋諸国	1.010	0.487
旧ソビエト	1.233	0.696
東欧	1.385	0.709
アフリカ	1.500	0.921
ラテンアメリカ	1.640	0.701
中東	1.951	0.938
中国および アジア社会主義国	1.667	0.699
南・東南アジア	2.278	0.763

人口の将来シナリオには世界銀行による中位推計を用いた。家庭部門の一人あたり水利用変化シナリオ、工業部門の水利用効率改善シナリオは、ストックホルム環境研究所による研究³⁾を用いた。表1に2050年の需要推計に用いた1990年からの水利用効率改善係数を示す。農業部門の単収増加について、先進国では2010年まで年率1%の増加、2010年以降年率0.5%の増加、途上国では2010年

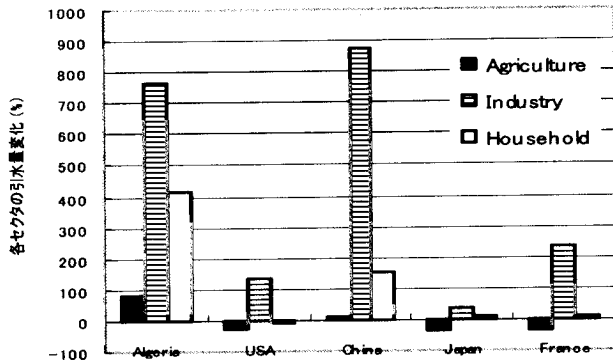


図3 2050年までの部門別水需要変化 (1990年水需要量と比べた変化率)

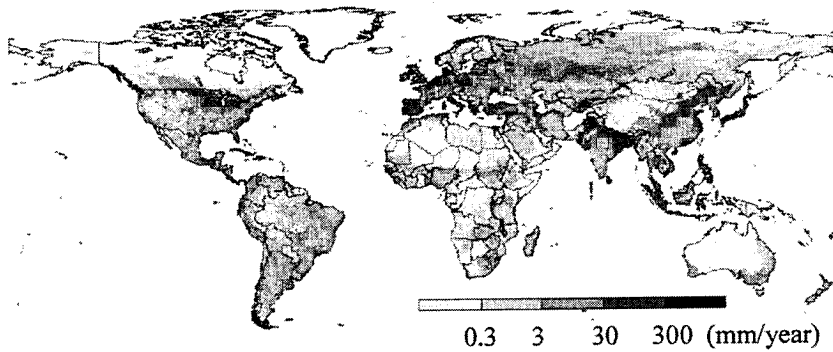


図4 1990年の水需要量密度 (mm/year, 3部門計)

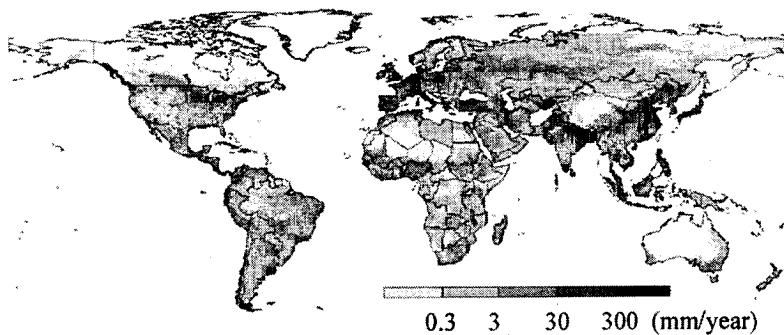


図5 2050年の水需要量密度 (mm/year, 3部門計)

まで年率 1.4%の増加、2010年以降0.7%の増加⁴⁾、中国では 2000 年まで 1.015%、2005 年まで 1.007%、2010 年まで 1.004%、それ以降は 0.5%と仮定をおいた⁵⁾。

図3は、同シナリオに基づき推計された 2050 年までの部門別水需要変化 (1990 年水需要量と比べた変化率)を、いくつかの国について示したものである。

る。

現状からの変化傾向の概略を見ると、人口が安定傾向にある先進国では工業部門の需要水量のみが増加する。家庭部門については大きくは変化せず、農業部門については減少傾向がある。比べて、途上国においては、人口増加と経済発展を反映して、工業部門の増加と農業・家庭部門の増加が同時に起こる。部門シェアとしては、工業部門の伸びが大きい。

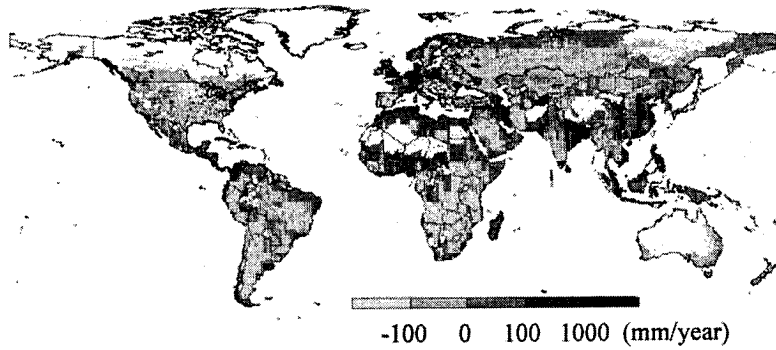


図6 水需要量密度の変化
(2050年－1990年、mm/year, 3部門計)

③需要水量の空間分布の作成 (図2の中央部)

水需要量密度 (単位面積あたり水需要量) は、家庭部門については、各国需要水量推計を GPW 人口分布推計^⑥により空間的に重み付けて推計した。工業部門については、Klepper

らの方法^⑦に従い、人口密度 75 人/km²以上のグリッドを有する国については、国内工業需要水量がそれらのグリッドに人口密度に比例して分布すると仮定した。その他の国については、人口密度 20 人/km²以上のグリッドに同様に国内工業需要水量が分布すると仮定した。これは、都市域 (人口密集地帯) に工業が集中していることを表現するものである。農業部門については、リモートセンシングデータと統計資料による農地面積データを連繫して推計したグリッド農地面積率データ^⑧に比例すると仮定して分布を推計した。将来的には信頼できる灌漑面積データが利用可能になった段階で、農地面積データと置き換える必要がある。図4と図5は、それぞれ1990年と2050年における各国各部門水需要量推計に基づき作成された水需要量密度 (mm/year, 3部門計) の空間分布である。白い部分は、水需要密度が極めて小さい地域を示している。中国東部、東南アジア、インド、日本、合衆国東部、欧州などで、需要水量密度が極めて高い地域が存在する。そのうち、中国東部とインドは、21世紀前半の急激な需要増加傾向の結果として極めて需要が高くなる。また、図6は1990年から2050年までの単位面積あたり水需要量の変化を示している。白い部分は、水需要密度が1990年および2050年の両時点において極めて小さい地域を示している。中国、インド、東欧、中欧において大きな増加が見られる。米国や西欧諸国といった先進国においては、水需要は若干減少する。

(3) 表面流出量推計モジュールの開発と気候変動下の2050年代における流出量推計

①表面流出量推計モジュール

表面流出量の推計には、0.5° × 0.5° の空間解像度の月平均気候データと地表面データを入力として、低温時の積雪を考慮したうえで、有効降雨 (降水量－蒸発散) のうち土中に保持できる最大水分量 (野外容水量) を超過した分を表面流出量とするバケツモデルを用いた。実蒸発散は、Penman 法による月平均潜在可能蒸発散 (PET) と土壌中の水分飽和度の関数として計算した。各グリッドに適用されたモデル基本式を以下に示す。詳細については、AIM(1996)^⑨で説明している。

(A) 流出量

$$RO_m = \max(SM_{m-1} + P_m + RS_m - PS_m - ET_m, 0)$$

(B) 土壌水分の蓄積

$$SM_m = SM_{m-1} + P_m + RS_m - PS_m - ET_m - RO_m$$

(C) 積雪

$$SP_m = SP_{m-1} - RS_m + PS_m$$

(D) 土壌水分の飽和度に応じた蒸発散の決定

$$\text{if } SM_{m-1} + P_m + RS_m - PS_m \geq PET_m$$

$$ET_m = PET_m$$

$$\text{if } SM_{m-1} + P_m + RS_m - PS_m < PET_m \text{ and } SM_{m-1} \geq FC/2$$

$$ET_m = P_m + RS_m - PS_m + (PET_m - P_m - RS_m + PS_m) \times (2 \times SM_{m-1} / FC - 1)$$

$$\text{if } SM_{m-1} + P_m + RS_m - PS_m < PET_m \text{ and } SM_{m-1} < FC/2$$

$$ET_m = 0$$

ここで、 RO_m はm月の表面流出量(mm)、 ET_m は蒸発散(mm)、 PET_m はPenman法により推計された潜在可能蒸発散(mm)、 SM_m は土壌水分(mm)、 P_m は降水量(mm)、 SP_m は積雪深(mm)、 RS_m は融雪深(mm)、 PS_m は降雪深(mm)、 FC は野外容水量(mm)である。

②現状(1990年近辺)の気候入力データ

Penman法によるPET推計の入力データとしては、日平均気温、日内気温較差、雲量、風速、昼夜風速比、地表面アルベド、標高を用いた。現在気候の日平均気温～風速については、LINKプロジェクトによる1961年～1990年の30年平年月平均値を用いた¹⁰⁾。昼夜風速比はISLSCP¹¹⁾による1987年・1988年の6時間おき風速を基にして準備した。地表面アルベドには、Matthewsの季節毎アルベドを時間内挿して各月データを作成した¹²⁾。また、降水についてもLINKによる平年月平均値を用いた。

・将来の気候シナリオの開発

気温～風速ならびに降水の将来気候データについては、前に説明したLINKによる現在の平年月平均値(観測値)に、GCMの温室効果ガス濃度1%漸増実験による1961年～1990年の30年平年月平均値(計算値)から同実験による205x年の月平均値(計算値)への差分を加える(雲量、風速、降水については変化比を乗ずる)ことによって作成した。データの制約から、昼夜風速比とアルベドは現状から変化しないとした。将来気候シナリオ作成に用いた方法の例として、2055年8月の平均気温のシナリオ作成のために各グリッドに適用された式を以下に示す。

$$T_{2055,8} = \frac{\sum_{y=1961}^{1990} TL_{y,8}}{30} + \left(TG_{2055,8} - \frac{\sum_{y=1961}^{1990} TG_{y,8}}{30} \right)$$

$T_{y,m}$: y年m月の月平均気温シナリオ
 $TL_{y,m}$: LINKによって開発されたy年m月の月平均気温
 $TG_{y,m}$: GCMによって計算されたy年m月の月平均気温

単一のGCMを用いることによるバイア

スを避けるために、IPCCデータ配布センターにおいて提供される7つの漸増実験のうち、カナダ気候センター(CCC)、マックスプランク研究所(ECHAM4)、東大気候システムセンター

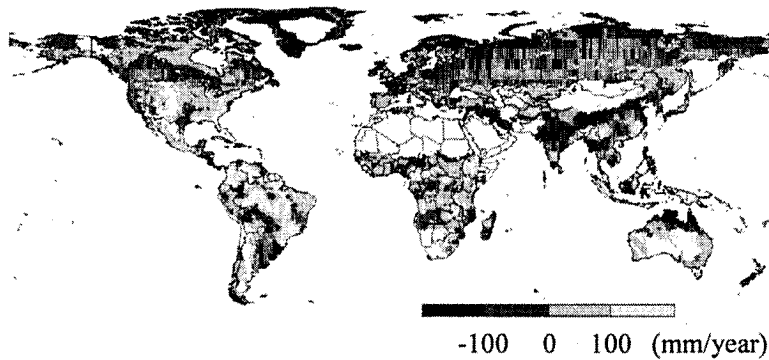


図7 表面流出量の変化 (mm/year, CCC 気候モデル, 2050年代平均-1980年代平均)

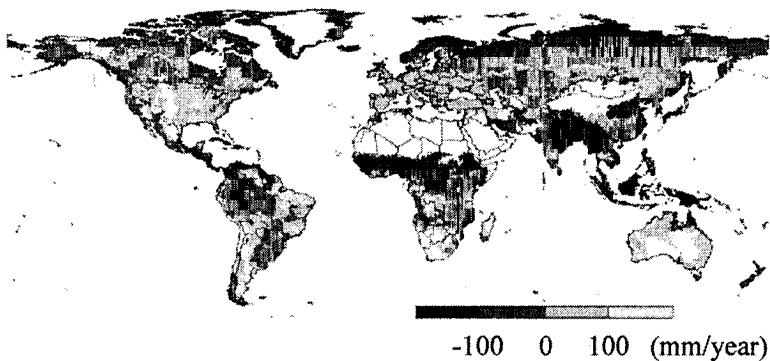


図8 表面流出量の変化 (mm/year, ECHAM4 気候モデル, 2050年代平均-1980年代平均)

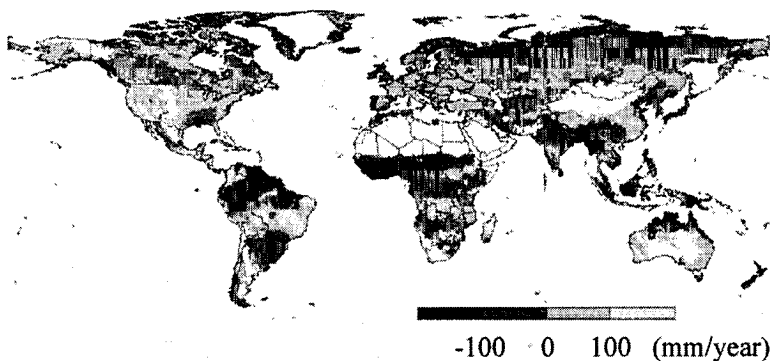


図9 表面流出量の変化 (mm/year, NIES/CCSR 気候モデル, 2050年代平均-1980年代平均)

環境研究所 (CCSR/NIES) の3実験を選択して気候シナリオを作成した。漸増実験出力の空間解像度は2~5°と非常に粗いため、シナリオ作成に際して張力付スプラインにより0.5°に補間した。このシナリオ作成方法により、2050年~2059年の各年について気候シナリオが得られ、GCMにより予測される将来の気候の年々変動幅を反映した影響評価が可能になる。

③将来の表面流出量の推計

図7、8、9は、それぞれCCC気候モデル、ECHAM4気候モデル、CCSR/NIES気候モデルによる温室効果ガス1%漸増を仮定した遷移実験結果に基づき計算した流出量の変化(2050年~2059年の10年間の平均流出量-1981年~1990年の10年間の平均流出量)である。白く示されたグリッドは、1980および2050両年代においてともに流出がほとんど見られない地域である。これらの結果図から、どの気候モデルの結果に基づいてもシベリアでは全域において若干の流出増加があることがわかる。また、インド亜大陸における大きな流出増加も共通の傾向として見てとれる。一方、中央アフリカや南米の北部については、モデルによりまったく異なる結果が得られている。このことから、将来の流出量変化の空間分布は、用いる気候モデ

ルの計算結果によって大きく異なるということがわかる。

(4) 需給比較

①需給比率

将来の気候変化に起因する流出変化と、社会因子変化に起因する需要変化により、水資源の逼迫度が現状に比べて定性的にどのように変化するかを評価するために、流域ごとに需給比率（需要水量／流出量）を計算した（図 1 の右部）。3（2）と3（4）で推計された将来水需要と流出量の空間分布は、標高データから推計された $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ の空間解像度を持つ流域分割地図 TRIP¹³⁾に基づいて流域ごとに集計され、需給比率の計算に用いられた。Alcamo ら¹⁴⁾によると、需給比率が 0.2 より小さい場合には渇水がほとんど起きないが、それを超過すると渇水が起きる可能性がある。しかしながら、この指標は水源に還流された水の再利用を明示的には考慮しておらず、渇水の起き方を正確には示すことができない。渇水問題の生起をより適切にあらわす指標の開発が今後行われる必要がある。

②需給比率の推計結果

図 10a-10l はそれぞれ、アマゾン川(南米)、ラプラタ川(南米)、ミシシッピ川(北米)、ナイル川(アフリカ)、オビ川(西シベリア)、ボルガ川(東欧)、ドナウ川(中欧)、アムール川(中国東北部)、長江(中国南部)、ガンジス川(南アジア)、ブラマプトラ川(南アジア)、メコン川(東南アジア)について 2050 年～2059 年の需給比率の年々変動を示したものである。アマゾン川流域では、CCSR/NIES シナリオおよび ECHAM4 シナリオにおいて 2050 年代の流出量が増加し、一方 CCCma シナリオでは減少する。オリノコ川といったその他の南米北部に位置する河川流域においても同様の傾向が見られる。この地域において流出量は豊富であるため、2050 年において水需要が増加した場合でも需給比率は低い。ラプラタ川流域では、図 7～9 によるとどの気候モデルシナリオにおいても流出量が増加すると予測されるにも関わらず、2050 年代の需給比率は現状に比べて大きくなる。これは、この地域で、水需要の増加が流出の増加を上回るためである。ミシシッピ川流域では、流出量の年々変動が現在よりも大きくなると予測された。ナイル川流域では、流出量は河川上流域（中央アフリカ）の降水量によって支配される。図 7～9 から見て取れるように、流量は CCCma シナリオでのみ減少すると予測され、その結果図 10d で示される高い需給比率の予測が得られた。この地域では、ECHAM4 シナリオを除くシナリオについて、2050 年代に流量の年々変動が現在より大きくなることが予測された。シベリアと東欧に位置する河川については、流出量の増加を反映して、需給比率は 2050 年代の方が現状にくらべて小さくなる。ドナウ川流域では、現状においても需給比率は 0.55 程度と需要に対して十分に豊富な水量ではないが、2050 年代にはさらに渇水ストレスが高まることが予測されている。その傾向は CCSR/NIES モデルを用いた推計で特に強く現れている。中国のアムール川と長江の流域では、現状においても需給比率は比較的高い。急激な人口増加と工業化を反映した水需要増加傾向のため、需給比率はさらに高くなると予測されている。ガンジス川流域では、流出量の増加傾向が人口増加と経済発展による水需要の増加傾向に打ち消され、需給比率はあまり大きく変化しない。CCSR/NIES モデルはこの流域で、ほかの 2 つのモデルとは異なった挙動を示す。メコン川やブラマプトラ川流域では、水需要の増加を反映して需給比率は増加すると予測されるが、その比率は依然それほど高くはならないであろう。

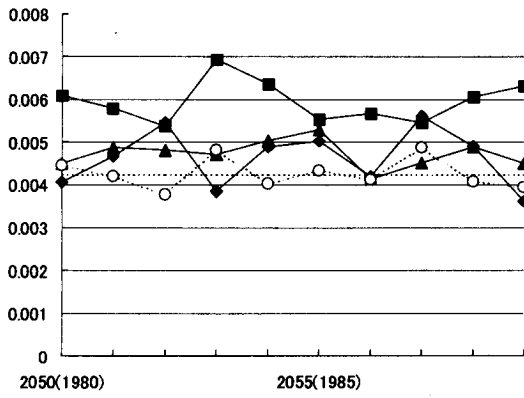


Fig. 10a Amazon

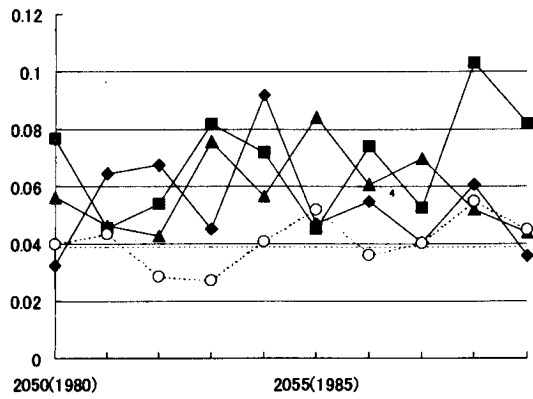


Fig. 10b La Plata

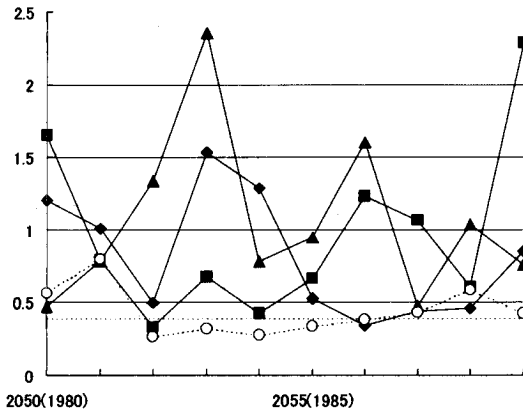


Fig. 10c Mississippi

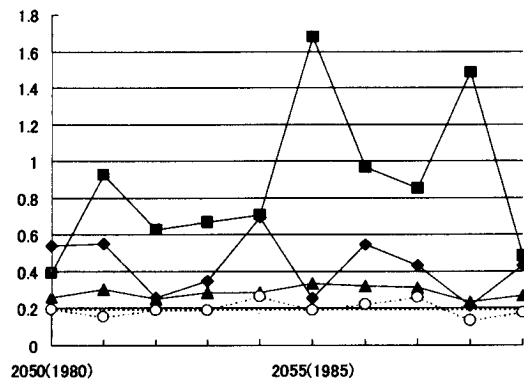


Fig. 10d Nile

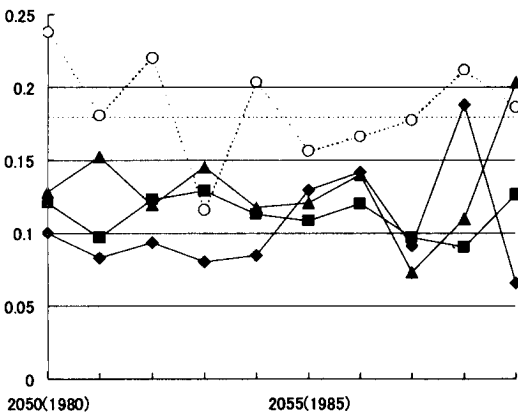


Fig. 10e Ob

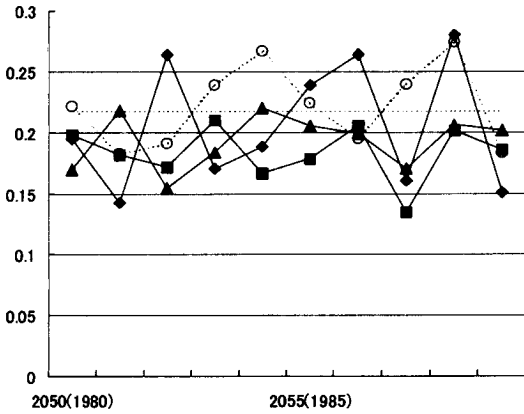


Fig. 10f Volga

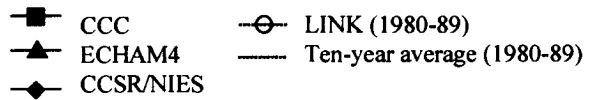


図 10 a~f 需給比率の年々変動

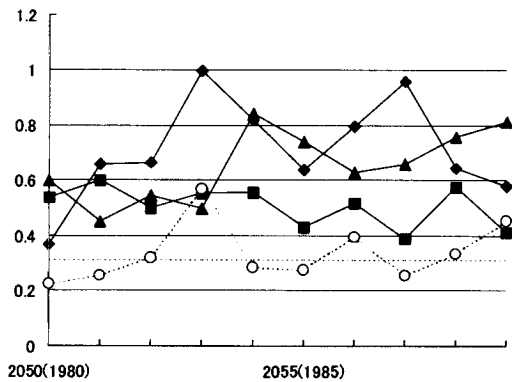


Fig. 10g Danube

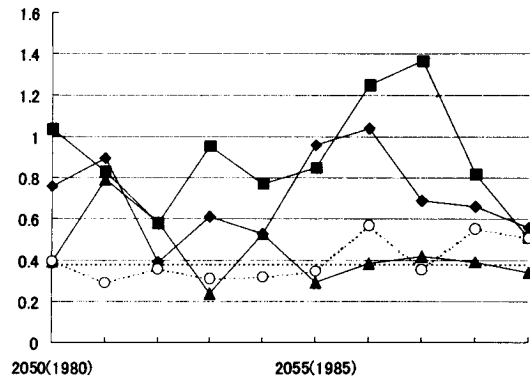


Fig. 10h Amur

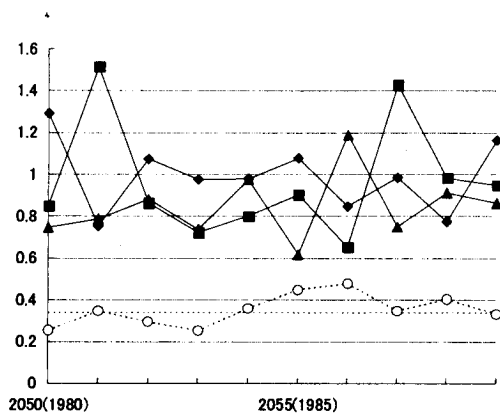


Fig. 10i Changjiang

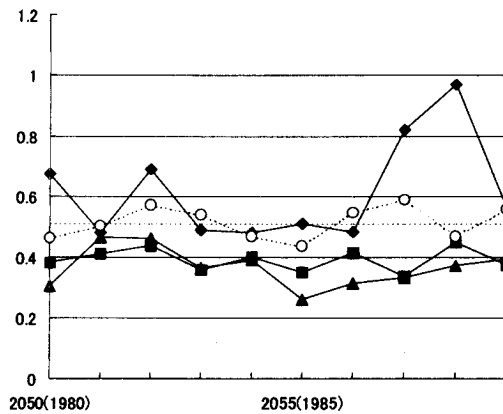


Fig. 10j Ganges

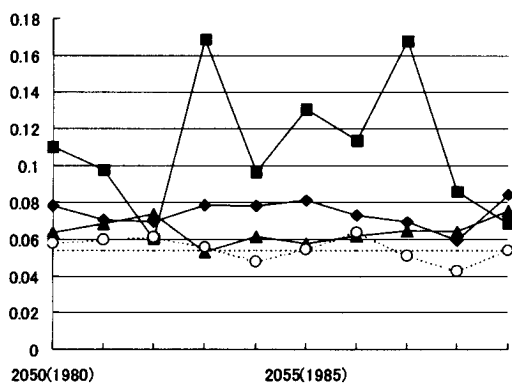


Fig. 10k Brahmaputra

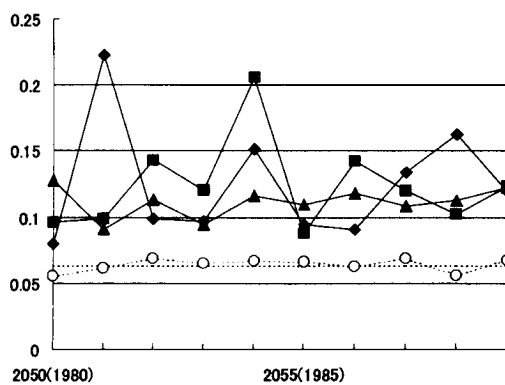


Fig. 10l Mekong

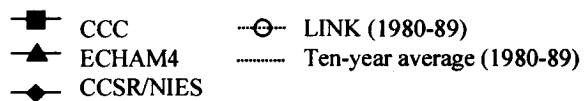


図 10g~l 需給比率の年々変動

(5) 水需要推計モデルの改良とシナリオ分析

①アジア地域に注目した水需要推計

3 (2) で説明した世界全域を対象とした将来の水需要推計モデル開発とそれを用いた将来推計をベースとして、アジア地域に注目して水需要推計の改良を行った。多様な社会経済の発展パターンをシナリオとして取り扱い、各々のシナリオについて人口、経済発展、技術進歩速度、技術普及速度等の違いを反映した水需要の推計をアジア全域について国別に行うために、「現状傾向発展型」、「政策改革型」、「地域孤立型」、「大変革型」の4つの異なる社会経済の発展パターンについて、2030年までを対象期間とした水需要の推計を行った。主たる改良点は以下のとおりである。

- ・ アジア地域について収集された、より詳細な水需要関連データを利用し、水需要推計モデルの改良を行った。また、現状基準年を1990年から1995年に更新した。
- ・ 取水量 (withdrawal) に加えて、還流を考慮した水消費量 (consumption) も推計した。
- ・ 複数の将来の社会経済発展パターンについて、水需要推計を行った。

本報告では、モデルの改良点について説明し、また4つの異なる将来の発展パターンについて行った水需要推計の結果を示す。

②取水量と水消費量

従来の見積もりでは、取水量 (withdrawal、GROSS・還流を考えない) を需要側の評価指標として用いてきたが、水の需給バランスを評価する際には、取水量ではなく水消費量 (consumption、NET・還流されない純消費量) で評価した方がより実態に即している。家庭・工業部門では、取水した水の大部分は蒸発等により失われることなく還流されるため、取水量が大きくとも消費量は比較的小さい。比べて、農業部門 (灌漑) では、取水量の大半は蒸発により消費される。水消費量で評価するためには、各部門の水利用施設における水の還流率 (= 1 - 消費率) を把握する必要があり、還流率は技術進歩のシナリオに応じて異なったものとなる。

③4つの社会経済発展パターンシナリオ

人口、経済発展、技術進歩について、「現状傾向発展型」、「政策改革型」、「地域孤立型」、「大変革型」の4種類の典型的な社会的背景パターンを設定した。これらの社会的背景パターンは、国連環境計画による「第三回地球環境見通し」で採用されたものであり、それぞれのシナリオで仮定される人口・経済発展・(水利用に関連した) 技術進歩のシナリオ間の相対的な高低は表2のとおりである。

表2 水需要の推計に用いられた4つの社会経済発展パターンシナリオの概要

	現状傾向発展型	政策改革型	地域孤立型	大変革型
人口	中高位	中高位	高位	低位
経済発展	高位	中高位	中位	中高位
水利用効率	中位	高位	低位	中高位

④改良モデルにおける各部門水需要推計の手順

図11は、各部門の取水量・水消費量推計の手順を図に示したものである。まず経済シナリオや人口シナリオならびに技術変化に関する仮定に基づき取水量を算定した後、セクタ別に実消費の率を掛け合わせて水消費を計算し、その和をとって水の消費量を推計する。工業部門の取水量変化の基本的な推進力は経済成長で

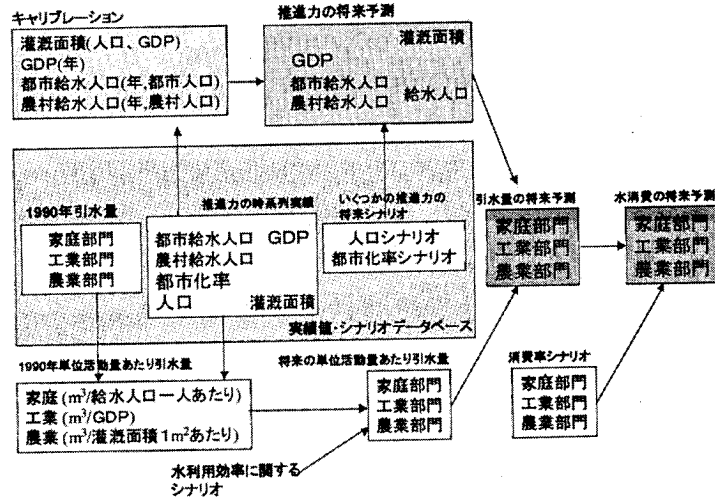


図11 取水量・水消費量推計の手順

ある。GDPに比例して取水量が増加すると仮定する。農業については、灌漑面積比例を仮定し、灌漑面積は人口の対数と一人あたりGDPの対数の関数として過去の時系列実績に基づく回帰推計を行った。家庭部門の基本的な推進力は給水人口の増加であると考えた。給水人口は、過去の給水人口率トレンドと世銀による将来人口推計の関数としてあらわした。給水人口は、各国について都市人口と農村人口に区別して計算した。さらに、基本的な推進力に応じて見積もられた引水需要に、各部門別に社会経済発展パターンシナリオを反映した水利用効率の改善係数を掛け合わせ、将来の取水需要とした。取水量から水消費への換算については、Shiklomanov¹⁵⁾示されている各部門の実消費率をベースとして、将来変化をシナリオ別に仮定した。ただし、工業部門と農業部門については、それぞれ0.16と0.8を地域・シナリオに依存しない消費率とした。これはかならずしも将来に渡り実消費率が低下するとは限らず、その設定が困難であったためである。家庭部門については、水供給システムの集中化傾向（現状では先進国で高く、途上国で低い。シナリオでは「現状傾向発展型」と「政策改革型」で高く、「大変革型」で中位、「地域孤立型」で低いと）を表現した。

⑤改良水需要推計モデルを用いたシナリオ分析の結果

基本的な推進力で説明される各シナリオの取水量推計のおおまかな傾向として、工業部門については、途上国ではGDPの伸び率が大きい現状傾向発展型で最も急増し、政策改革型、大変革型でも大きく増え、地域孤立型では増えるものの他のシナリオに比べてその伸び率は小さい。先進国でもシナリオ間の相対的な順位は変わらないが、どのシナリオも増加の程度は小さい。農業部門については、OECD国（日本、オーストラリア、ニュージーランド）と中央計画経済アジア（中国、モンゴル等）では灌漑面積の飽和を反映して将来に渡り急激な増加が見られない。東南アジア・南アジアは地域相対的には灌漑面積増加傾向が若干強い。家庭部門では、途上国については給水人口率の増加傾向と人口増を反映して、どのシナリオでも増加傾向が見られる。特に地域孤立型では人口の増加率が高いため、相対的に強い増加傾向を示す。先進国は既に高い給

水率と低い人口増加率を反映して弱い増加傾向を示す。

効率改善の仮定について、政策改革型では、推計期間前期（2015年まで）から積極的に効率的な技術が導入され、推計期間後期（2032年まで）には革新的な効率改善技術を利用するとした。大変革型では、推計期間前期においては現状傾向発展型と同レベルの水利用効率改善であるが、推計期間後期には革新的な効率改善技術を利用可能となり現状傾向発展型に比べて効率改善速度が速くなる。現状傾向発展型は、政策改革型や大変革型と比べて推計期間後期の技術進歩が若干遅い。地域孤立型はどの推計時期においても現状傾向発展型に比べて効率改善が遅い。工業部門について、先進国は既に高レベルな水利用効率を導入してきていることから、途上国に比べて将来の水利用効率改善のポテンシャルが低いと考えられる。農業部門については、高効率灌漑の導入にある程度の初期資金投入が必要であることを考慮して、推計期間前期には途上国よりも先進国で高い効率改善が仮定された。また、途上国の大変革型では推計期間前期でも低廉な途上国向け効率改善技術の導入が積極的に行われることを考慮して現状傾向発展型よりも若干高い効率改善が仮定された（政策改革型よりは低い）。

農業部門と家庭部門では、人口増加や水利用効率改善の遅さを反映してどの地域・シナリオでも地域孤立型が最も取水量が大きくなる。工業部門では現状傾向発展型が最も大きい。先進国では地域孤立型（工業生産が小さく、効率改善も小さい）と、政策改革型・大変革型（工業生産はある程度大きく、効率改善も大きい）では大体同じ取水量が予測された。途上国では、経済発展の遅さを反映して地域孤立型が最も小さい取水量を示す。

さらに、消費率変化のシナリオを考慮に入れて各部門水消費量をシナリオ別に産出した。図12は消費量推計の例として現状、2032年（地域孤立型シナリオ）、2032年（政策改革型シナリオ）での農業部門の水消費量密度（単位面積あたり水消費量）の空間分布を示している。地域孤立型シナリオでは、高い人口増加率と非常に遅い水利用効率の改善速度を反映して農業部門の水消費量は大きく増加する。制度的な改革や効率的な水利用技術が仮定される政策改革型シナリオでは、状況は改善し、国によっては水消費量密度が減少することがわかる。

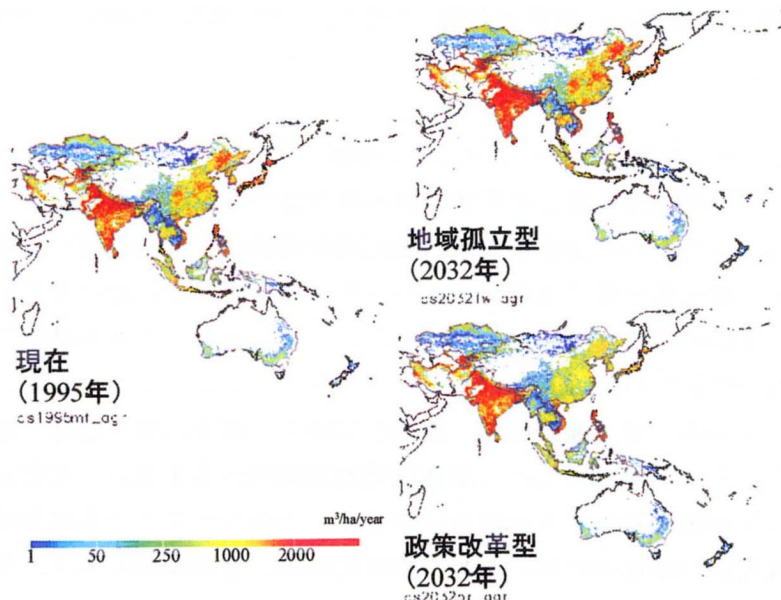


図 12 農業部門の水消費量密度 (左:1995年、右上:地域孤立型 2032年、右下:政策改革型 2032年)

図 1 3 は、2032 年における対 1995 年比水消費量変化を、アジア太平洋地域を 5 地域（アジア太平洋全体を、南アジア、東南アジア、東アジア、中央アジア、オセアニア）に分けて示したものである。同時に地域を構成する各国の変化への寄与率も示されている。どの地域においても地域孤立型>現状傾向発展型>大変革型>政策改革型の順になる。現状傾向発展型シナリオでは、急速な経済発展と高い人口増加率を反映して、水消費量は特に工業部門で増加する。家庭部門においても人口増加を反映して若干増加する。地域孤立型シナリオでは、低い経済成長率のため、非常に遅い水利用効率改善速度を考慮してもなお、工業部門の水消費量は現状傾向発展型シナリオに比べて小さい。しかしながら、消費量の大部分を占める農業部門において、高位の人口増加シナリオに起因する灌漑面積増加と水利用効率改善の遅さを反映して消費量が高くなるため、消費量の 3 部門計で比較した場合に、どの地域においても最も消費量が大きくなると予測されている。政策改革型シナリオでは、制度的改革やその他の方策がとられるため、対象期間の早期よりすべての部門において水がより効率的に利用される。水の消費量はすべてのシナリオの中で最も低いレベルにコントロールされる。このシナリオでも、途上国においてはやはり若干の水消費量増加が見られるが、先進国における水消費量減少の傾向により打ち消される。大変革型シナリオでは、大変効率の良い水利用技術が対象期間の後半に導入される。水消費の増加は緩やかであり、先進国においては水消費の減少が起こる。

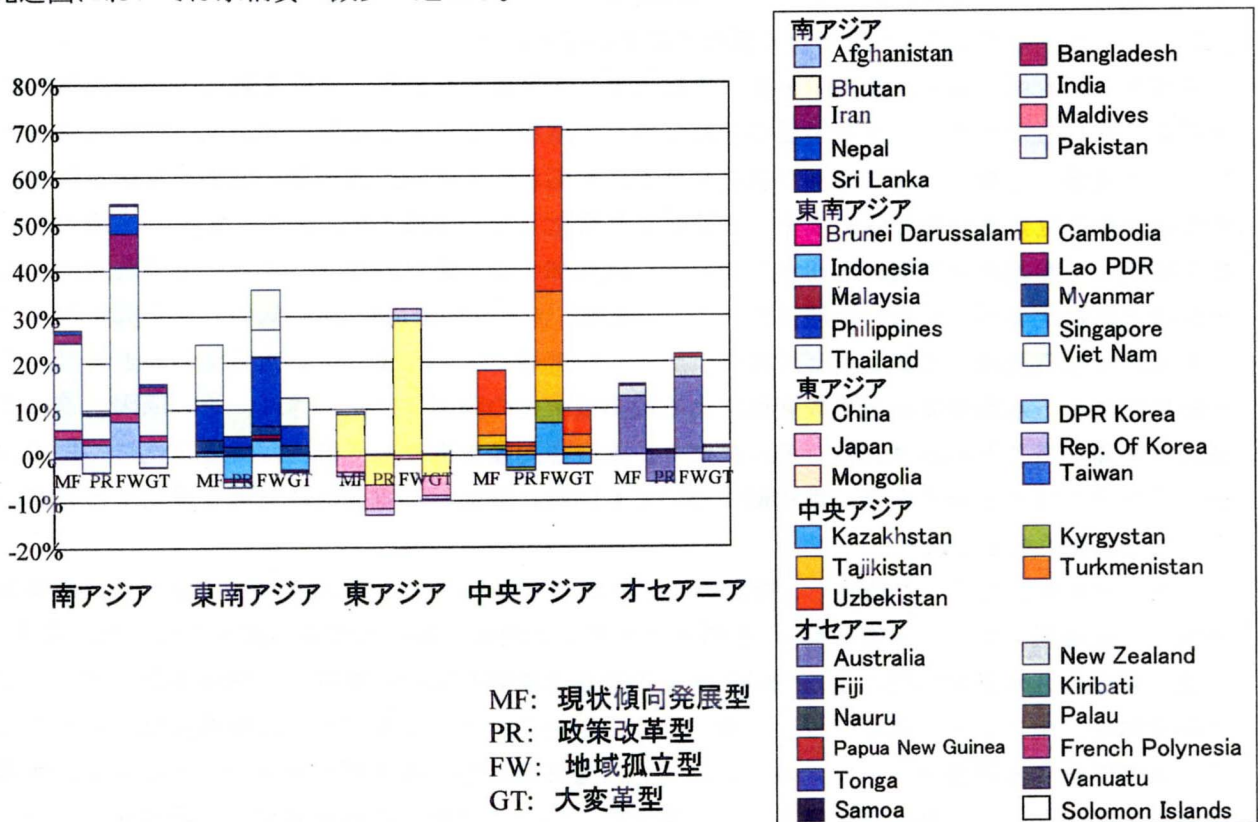


図 13 2032 年における対 1995 年比水消費量変化（アジア太平洋を、南アジア、東南アジア、東アジア、中央アジア、オセアニアの 5 地域に分割して集計。同時に、各地域の変化に占める各国の寄与率も示している。）

4. まとめと今後の課題

本研究では、社会経済因子の将来推計と気候モデルによる将来の気候変化に基づき水の需要と供給を概算する方法を示し、2050年における世界全域の水需給バランス変化を試算した。その試算結果から、各地域における水不足の起きやすさが現状と比べて如何に変化するかを定性的に知ることが出来た。

経済の高成長・急速な技術進歩を仮定した場合、2050年における需要変化の概略としては、人口が安定傾向にある先進国では工業部門の需要水量のみが増加する。家庭部門については大きくは変化せず、農業部門については減少傾向がある。比べて、途上国においては、人口増加と経済発展を反映して、工業部門の増加と農業・家庭部門の増加が同時に起こる。部門シェアとしては、工業部門の伸びが大きい。需要変化を地理的に捉えると、中国、インド、東欧、中欧において、水利用密度（単位面積あたりの引水量）の大幅な増加が予測される。米国や西欧諸国においては既に水利用密度は高いが、将来的には横ばいか若干の減少が予測される。

気候変動を勘案し、2050年代の水供給能として流出量の推計を行った。複数の気候モデルの計算結果に基づいて流出を計算したところ、将来の流出量変化の空間分布は気候モデルの種類に大きく依存することが示された。その中で、シベリア全域において若干の流出増加があるという予測は、気候モデルの種類に依存しない共通の結果として得られた。一方、中央アフリカや南米北部については、モデルによりまったく異なる結果が得られた。

流域別に、流域内需要と流出量の比（需給比率）を計算した結果、気候変動による流出量の増加が見込まれるにも関わらず水需要がそれに増して増加するため水資源の逼迫度が増す流域（ラブラタ川流域）、急激な水需要増加が見込まれるにも関わらず同時に流出量の増加も見込まれるため需給比率で見た水資源の逼迫度としてはあまり変化しない流域（ガンジス川流域）、水需要の増加を反映して需給比率は現状と比べて相対的には増加するが絶対的なレベルとしては将来的にもそれほど需給比率が高くない流域（アマゾン川流域、メコン川流域）、流出量の年々変動が現状よりも大きくなる流域（ミシシッピ川流域、ナイル川流域）というように、水資源の逼迫度は人間活動変化による水需要変化と気候変動による流出量変化の両因子に左右され、その原因構造は流域により異なることが示された。それにより、水資源問題を取り扱う際には需要変化について評価するだけでは不十分であり、供給側についても同時に評価し、総合的に対策を検討する必要があることが改めて示された。

また、需要推計モデルを改良し、複数の社会経済の発展パターン（「現状傾向発展型」、「政策改革型」、「地域孤立型」、「大変革型」）を踏まえたアジア地域の各国水需要の推計を行った。農業、工業、家庭の3水需要部門による2032年での将来水需要を国別に推計し、地域集計（アジア太平洋全体を、南アジア、東南アジア、東アジア、中央アジア、オセアニアに地域分類）したところ、3部門計の水消費量はどの地域においても、地域孤立型>現状傾向発展型>大変革型>政策改革型の順となった。部門別に見ると、工業部門については現状傾向発展型の水消費量がもっとも大きく、農業部門については急激な人口増加と遅い技術進歩速度を反映して地域孤立型の水消費量がもっとも大きい。

以下に今後の課題についてまとめる。

- ・ 流出量推計では降雨と蒸発、流出の水収支を月ごとに計算した。そのため集中的な降雨

を反映した流出が表現できず、現実と比べて蒸発が多め、流出が少なめに計算される傾向がある。日毎の水収支シミュレートのための気候データの整備と将来気候シナリオ開発が必要である。

- ・ 河川流量データが様々な国際機関から入手可能になりつつあるので、流出モデルで用いられるパラメーターの調整に改善の余地がある。水不足に対する供給側からの具体的な対策として、貯水池等における流量調整が考えうるが、現状のモジュールではそれを表現していない。ダム統計の利用により、流量調整の効果を考慮したモデルに改良する必要がある。
- ・ 需要計算について、将来の需要の推計は人口や工業化といった社会経済因子に関するシナリオとともに、将来の水利用効率の改善に関する仮定に大きく左右される。効率改善の程度を所与のシナリオとして与えたが、対策の提言という観点からは効率を改善させる具体的な技術オプションの詳細な費用・効果データベースを整備し、具体的に導入していくべき節水技術のオプションについて示していく必要がある。
- ・ 本研究では、水需要と水供給の両者を勘案して水資源の逼迫度を示す定性的な指標として需給比率を用いた。しかしながら、この指標は水源に還流された水の再利用を明示的には考慮しておらず、また経済状態や社会インフラといった因子も説明していないため、水資源問題の生起を正確には表現できない。より適切に水資源の逼迫度、渇水の発生リスク等を表現する指標の開発が必要である。

5. 引用文献

- 1) 世界銀行(1998): World development report 1998-1999, Oxford University Press, N.Y.
- 2) Gleick, P.H. (2000): The world's water 2000-2001, Island Press, Washington, DC.
- 3) Raskin, P. (1997): Water futures: Assessment of long-range patterns and problems, Comprehensive assessment of the freshwater resources of the world , Vol.3, Stockholm Environment Institute, Sweden.
- 4) Alexandratos, N. (1995): World agriculture: Towards 2010, FAO, Rome.
- 5) 海外経済協力基金開発援助研究所 (1995): Projection of food supply and demand in China and suggestion on agricultural development policy., OECF Discussion Papers No.6 (in Japanese)
- 6) CIESIN(Center for International Earth Science Information Network), International Food Policy Research Institute (IFPRI) and World Resources Institute (WRI) (2000): Gridded Population of the World (GPW), Version 2., Palisades, NY: CIESIN, Columbia University.
- 7) Klepper, Klepper, O. and G. van Drecht (1998): WARiBaS, Water Assessment of a River Basin 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 Rapport 40200.
- 8) Ramankutty, N. and Foley, J.A. (1998): Characterizing patterns of global land use: An analysis of global croplands data. Global Biogeochemical cycles, Vol.12, No.4. p.667-685.
- 9) AIM (1996): Technical structure of AIM/impact model, Interim paper IP-95-06, National Institute for Environmental Studies.
- 10) New, M., Hulme, M. and Jones, P. (1998): Representing twentieth century space-time climate variability. I: Development of a 1961-1990 mean monthly terrestrial climatology, J. Climate, 12,

p.829-856.

- 11) Meason, B.W., Corprew, F.E., McManus, J.M.P., Myers, D.M., Closs, J.W., Sun, J., Sunday, D.J., Sellers, P.J. (1995): ISLSCP Initiative I - Global data sets for land-atmosphere models, 1987-1988, Volumes 1-5, Published on CD by NASA.
- 12) Matthews, E. (1983): Vegetation, land-use and seasonal albedo data sets, Documentation of archived data tape, NASA Technical Memorandum #86107.
- 13) Oki, T. and Sud, Y. C. (1998): Design of Total Runoff Integrating Pathways (TRIP) - A global river channel network. Earth Interactions, 2.
- 14) Alcamo, J., Henrichs, T. and Roesch, T. (2000): World water in 2025, Center for Environmental Systems Research, University of Kassel, Germany.
- 15) Shiklomanov, I.A. (1998): Assessment of water resources and water availability in the world, Stockholm Environment Institute.

[研究成果の発表状況]

(1) 誌上発表

- ① Takahashi, K., Y. Matsuoka, T. Okamura and H. Harasawa: Journal of Global Environment Engineering, 7, 31-45 (2001)

"Development of climate change scenarios for impact assessment using results of General Circulation Model simulations"

- ② Takahashi, K., Y. Matsuoka, Y. Shimada and H. Harasawa: Journal of Global Environment Engineering, 7, 17-30 (2001)

"Assessment of water resource problems under climate change -considering inter-annual variability of climate derived from GCM calculations-"

(2) 口頭発表

- ① 原沢英夫: 平成 11 年度地球環境研究総合推進費公開シンポジウム (1999)

「水資源から環境問題を考える」

- ② 高橋潔, 岡村知忠, 松岡譲, 原沢英夫: 環境システム研究, 27, 521-526 (1999)

「気候モデルのシミュレーション結果を用いた温暖化影響評価シナリオ作成について」

- ③ 高橋潔, 松岡譲, 島田洋子, 嶋村亮: 第 8 回地球環境研究シンポジウム (土木学会), 27, 175-180 (2000)

「気候変動下での地球規模の水資源評価と渇水対策戦略評価のためのモデル開発」

- ④ Takahashi, K., Y. Shimada, Y. Matsuoka and H. Harasawa: IFAC workshop on modeling and control in environmental issues, Aug. 22-23, 2001, Yokohama, Japan (2001)

"Assessment of water resource problems under climate change in a global scale"

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

平成 14 年度環境白書

日経新聞、平成14年6月10日「中国50年後水不足深刻」

(6) その他成果の普及、政策的な寄与・貢献等
なし