

9. 各国の生活用水使用量の要因解析と将来予測

Analysis and forecast of domestic water use in various countries

荒巻 俊也*・鈴木 学**・花木 啓祐***

Toshiya ARAMAKI*, Manabu SUZUKI**, Keisuke HANAKI***

ABSTRACT; In order to assess the sustainability of water use, it is necessary to forecast not only the water availability in future, but also change of water demand in future. There are various sectors in water use, and domestic sector does not consume much water comparing with other sectors, such as agriculture. However rapid urbanization happens in developing countries, rapid increase of domestic water demand is expected in urban areas of developing countries. In this study, several indices in a country scale were examined and factors affecting the difference of per capita water use were investigated for developing the forecasting model of domestic water use in various regions in the world. Per capita GDP converted by Purchasing Power Parity (PPP) and urban population ratio were extracted as major factors, and two types of forecasting model for future water demand were developed. Assuming two scenarios of economic development, these models were applied and domestic water use in 2015 and 2030 were estimated in various countries.

KEYWORDS; Domestic water use, GDP/PPP, Urban population, Forecast, Country

1 はじめに

発展途上国の人口増加と生活水準の向上は、水の使用量を爆発的に増大させると予想される一方で、アジア、中部ユーラシア、中近東、アフリカなどには現状でも慢性的な水不足に悩む国々が数多くある。世界の各地域において今度どの程度の水が利用できるのか、どの程度水が必要になるのか、を精度よく予想することは、われわれ人類の持続可能な発展を考えるうえで重要な課題と言える。

水資源のアセスメントにおいて、降雨－流出－蒸発、といった水文過程のメカニズムについてはよく研究がなされており、先進国と比較して十分な土地利用や気象観測に関するデータが得られないような途上国や全地球レベルでも、それらの過程をモデル化して利用可能な水資源量を各地域毎に定量化する試みがなされている。一方で、水の使用量については、農業、生活、工業がその主たるものであるが、これを全球レベル、あるいは途上国の各地域において精度よく予想できるモデルについては開発が進んでいないのが現状である。

セクター別に考えると、ほとんどの国や地域において農業部門の水使用量が全水使用量の大部分を占め、水資源のアセスメントを行ううえで農業部門の水使用を予測することが最も重要となる。一方で、生活用水についても農業用水ほど使用量は大きくないものの、途上国においては人口増加と経済発展による生活用水の急速な増加が予想されており、各地域毎に将来の人口増や経済発展に伴ってどの程度水が必要となるのかについて正確に予測しておく必要がある。

* 東京大学先端科学技術研究センター Research Center for Advanced Science and Technology, Univ. of Tokyo

** 東京大学工学部都市工学科 Dept. of Urban Engineering, Faculty of Engineering, Univ. of Tokyo

*** 東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻 Dept. of Urban Engineering, Graduate School of Engineering, Univ. of Tokyo

われわれは、世界各地における生活用水の使用量の将来予測を行うことを目的として、生活用水使用量に影響を与えるさまざまな因子と水使用量の関係の解析し、生活用水使用量の予測モデルを構築する作業を行っている。本報では、世界各国の生活用水使用量とそれに影響を与えると予想されるいくつかの要因についてその関係を解析した結果を示すとともに、因果関係の強かった要因を用いた予測式を作成して、各国の生活用水使用量の将来予測を試みた結果を報告する。

2 生活用水使用量に影響を与える要因とその情報の収集

2.1 既存の事例

生活用水使用量の予測は、上下水道の施設計画を策定するに当たって必ず行われてきた。施設計画における予測では、中長期的な水使用の変動を予測する必要がある。これらの多くは、時系列の傾向による予測か、人口あるいは世帯数の増減と水需要量原単位を用いた予測がほとんどである。ただし、水需要量原単位の設定についてはさまざまであるが、世帯人数や世帯収入を説明変数とした回帰式により水需要量原単位を予測している例もある。また、気候や限界価格、補助金額、実収入を因子として世帯あたり水需要量原単位を予測している研究例（Billings et al., 1998）もある。さらには、水道料金と水使用量の関係について経済学的な側面から多くの研究が行われており、生活用水需要予測を行うソフトウェアも開発されている（Baumann et al., 1997）。このソフトウェアの中では、家庭用と業務用、公共用、その他に生活用水の用途を分けて、世帯収入や平均世帯人数、世帯密度、最高気温、降水量、Cooling degree days、水道料金（基本分と従量分）などの要素から、水需要量を予測するようなモデルを構築している。上水道の運用、とりわけ配水計画にあたっては、時間スケールの短期的な変動を予測することが重要となる。これらについても、気候、曜日などさまざまな因子を考慮した予測が行われている。

しかし、ここで述べてきたモデルの多くはある一つの都市・地域を対象とした予測であり、世界のさまざまな地域において普遍的に予測できるモデルとは言い難い。全球レベルでの水の需給バランスの評価という観点から、各国・地域のレベルで水需要を予測する試みも始められているが、これまで述べてきたような地域・都市ごとの水消費量の違いを説明するうえで十分なモデルであるとは言い難い状況である。

地球規模の水需要予測に関する研究では、世界銀行の国別の需要水量と人口推計の値を用いて、地域別に水利用効率改善係数および一人当たり水利用変化シナリオという値を設定し、2050～2059年の9年間を対象として気候変動を考慮した中長期での水需要予測を行い、現在と比べた渇水の起きやすさの定性的な変化を調べた研究がある（高橋ら、2000）。また、各国の一人当たりGDP（説明変数）と一人当たり生活用水使用量（従属変数）から一人当たり水使用量を予測する式を構築し、経済発展シナリオおよび人口推計から2025年における各国の水使用量を予測するという調査も行われている（Seckler et al., 1998）。

2.2 生活用水使用量に影響を与える要因

生活用水使用量に影響を与える因子を検討するうえでは、まず水利用のうちどの部分を対象とするのかを明確にする必要がある。図1に示すように、水利用における量を表す言葉には、水需要量、水使用量、水消費量の3つの量が考えられる。水需要量は利用者の潜在的な水利用であり、生活様式や気候などにより地域による違いがあるものと思われるが、水資源や水の価格の制約などを受けていない量である。水使用量は経済状況や水資源の制約などの影響を受け

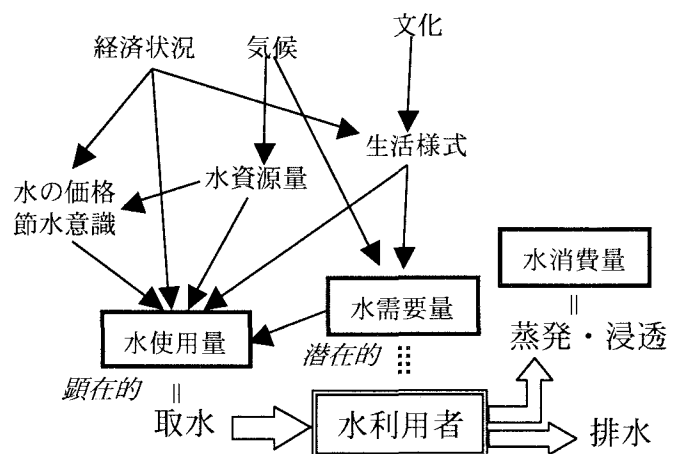


図1 生活用水使用量に影響を与える因子

て、実際に取水される水の量である。水消費量は利用により失われる水であり、生活用水の場合この量は使用量に比べて小さな値になるものと考えられる。水資源のアセスメントにおいては、実際に使う水の量という観点からは排水された後の水は下流において再度利用されることもあるため水消費量をベースに考えた方がよい場合もあるが、質の劣化を考慮した場合必ずしも再度利用されないこと、一般的な統計データは水使用量という形でしか得られないことが多いことから、ここでは水使用量を基準として、影響を与える要因の解析を行うこととする。

生活用水に影響を与える要因としては、前節の研究例で取り上げられたのは、GDP や世帯収入といった経済的な因子、気温や降水量などの気候因子、水道料金などの価格、1世帯当たりの人数などの生活様式的な因子などであった。これ以外にも、例えば入浴、調理スタイルなど文化的な違いや上下水道の普及状況などインフラに関するもの、水資源の逼迫度や水に対する意識など、さまざまなものが考えられる。また、これら因子の間にも相関関係が予想されるものが多く、特に経済状態は上下水道の普及などのインフラや水の価格や意識といったものと関連が深いものと思われる。

ここでは、人口、経済・生活水準、気候、上下水道普及率、水道料金、世帯人員数、家電普及率など影響を与えると考え得る因子について可能な限り国別のデータを可能な限り収集し、生活用水使用量との関係を解析することとした。

2.3 国別データの収集

因果関係を解析するうえでは、要因となる情報についても途上国を含めた多くの国の情報があることが望ましい。よって、収集された要因に関する情報のうち、多くの国のデータがあり、かつその質が均一と思われる要因についてのみを対象として以降の解析を行った。

具体的に対象とした要因は、一人当たり水資源賦存量、人口関連指標（人口密度、都市人口率）、経済関連指標（一人当たり GDP、一人当たり購買力平価 (PPP) 換算 GDP (GDP/PPP)）である。これらの情報のうち、人口関連指標は国連のデータを、経済関連指標は世界銀行のデータベースを、水資源賦存量については、「World Resources 2000-2001」(World Resources Institute, 2000) のデータを用いた。

また、生活用水使用量のデータについても World Resources Institute のデータを用いたが、各国の淡水関連データの対象年が国によって違うため（多くは 1987～1995 年の間）、要因に関する情報についても水使用量のデータの対象年と同じ年のデータを解析に用いることとした。なお、生活用水使用量のデータとして合計 144 カ国のデータを収集したが、そのうち Mauritania のデータについては、一人当たりに換算した場合に 1,345 (L/d) と非常に大きな数字となるため、外れ値として解析には用いなかった。

3 一人当たり水使用量とさまざまな影響因子の関係

3.1 人口関連指標についての解析

人口関連指標（人口密度、都市人口率）と一人当たり生活用水使用量の国ごとの散布図を図 2 に示す。人口密度とは相関関係が見られなかったが、都市人口率とは相関関係が見られた ($r=0.70$)。都市人口率が 30% 以下の場合、一人当たり生活用水使用量は 100 (L/d) 以下であり、多くの国では 50 (L/d) 以下となっていた。都市人口率が 50% を超えると一人当たり生活用水使用量は国により大きく違っているが、ほとんどの国で 100 (L/d) を超えていた。

3.2 経済関連指標についての解析

経済関連指標（一人当たり GDP、一人当たり GDP/PPP）と一人当たり生活用水使用量の国ごとの散布図を図 3 に示す。購買力平価換算をした方が相関が高くなることが示された。GDP/PPP が 10 千ドル以下の国々では、GDP の増加とともに水使用量が増加する傾向があるが、10 千ドル以上の国ではほとんど増加していないことが示された。

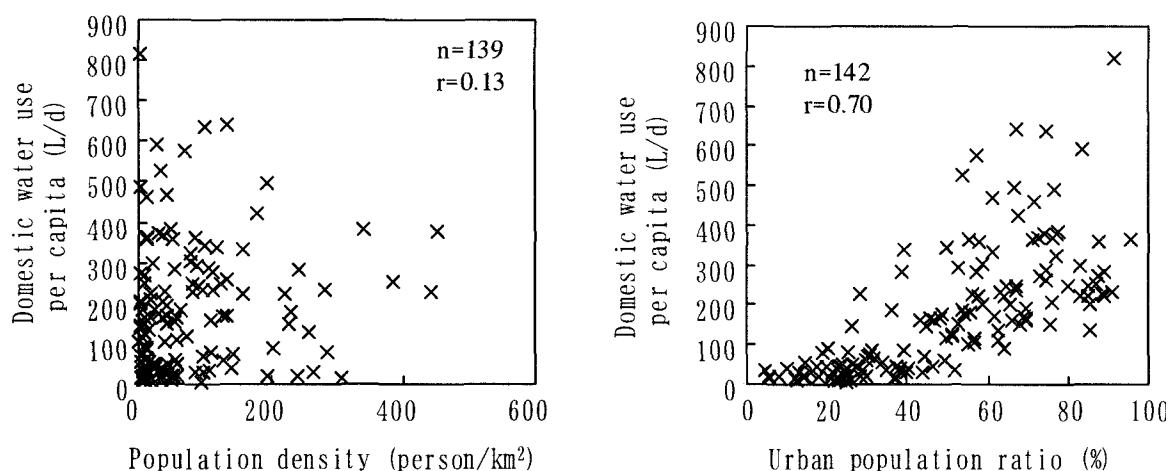


図2 人口関連指標と生活用水使用量の関係

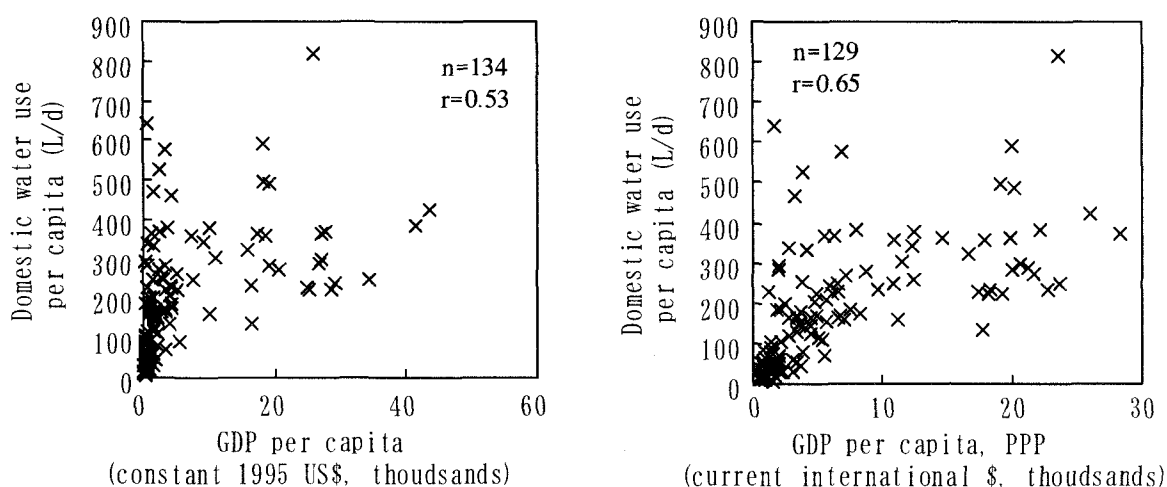


図3 経済関連指標と生活用水使用量の関係

3.3 水資源量についての解析

一人当たり水資源賦存量と一人当たり生活用水使用量の国ごとの散布図を図4に示す。水資源賦存量が多いと水使用量も多いというような関係は見られなかった。この図においてプロットは水資源賦存量が10千(L/d)以下のところに集中していたが、10千(L/d)以下で散布図を作成した場合でも関連性は見られなかった。

3.4 地域別の都市人口比率と生活用水使用量

図5に世界を西ヨーロッパ、東ヨーロッパ&中央アジア、南北アメリカ、東・東南・南アジア&太平洋地域、中東・北アフリカ、中部・南部アフリカの6地域に分け、都市人口比率と一人当たり生活用水使用量に基づいて各国をプロットした。一人当たり生活用水使用量が400(L/d)を超えるような国は南北アメリカの都市人口率が高い国が多く、東欧・中央アジア地域では同じくらいの都市人口率である他地域の国と比較して、水使用量が多いことがわかった。また、都市人口率が低く水使用量の低い国は、中南アフリカとアジアに集中していることが示された。

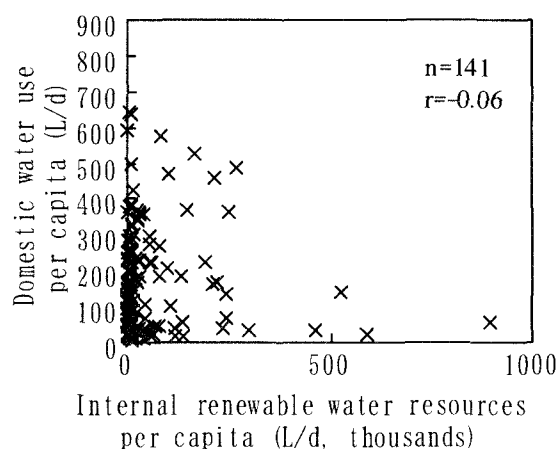


図4 水資源賦存量と生活用水使用量の関係

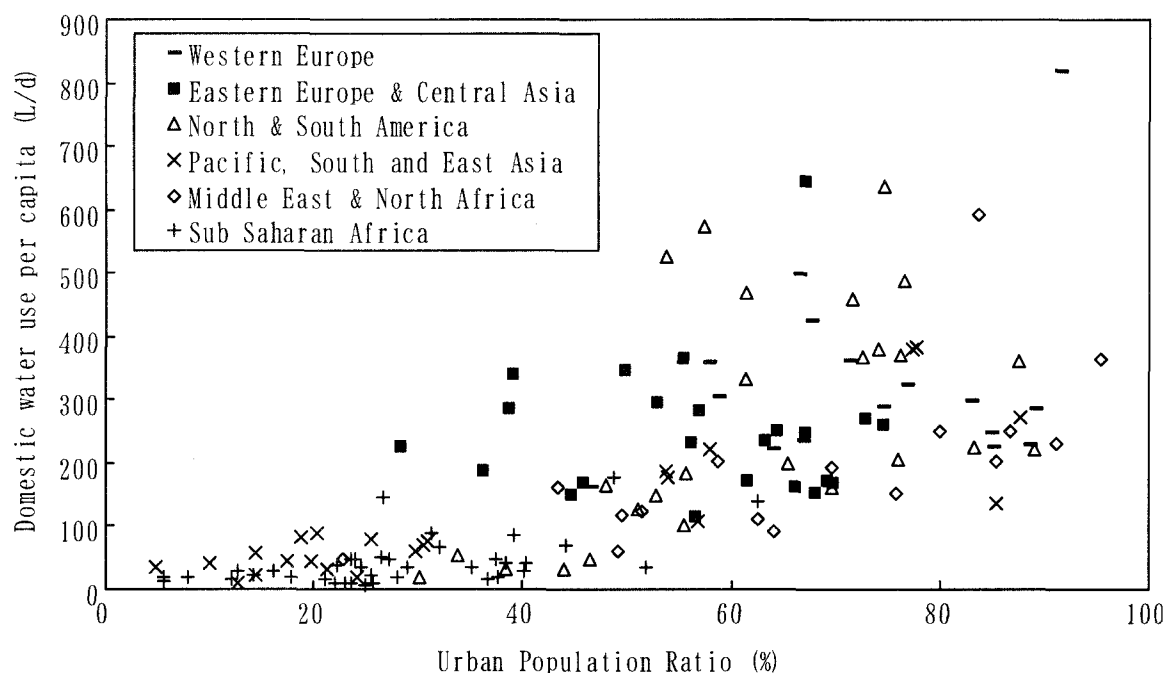


図5 地域別の都市人口率と生活用水使用量

4 各国の水使用量の将来予測

3 で取り上げた要因を用いた予測式を作成し、2000 年、2015 年、2030 年について生活用水使用量の将来予測を行うこととする。

4.1 水使用量の予測モデルの構築

3 で取り上げた要因の中で、生活用水使用量と相関が強かった一人当たり GDP/PPP と都市人口率を説明変数として一人当たり生活用水使用量を予測する予測式を作成した。予測式の作成には、3 種類のデータが全て揃っている 129 カ国のデータを用いた。各要因を対数化した変数などいくつかのケースを試した結果、(1) 式において最も高い自由度調整済み決定係数 ($R^2=0.69$) が得られたことから、この式を用いて一人当たり生活用水使用量を予測することとした。これをモデル 1 とする。

$$\text{モデル 1: } \ln(\text{生活用水使用量(L/d)}) = -0.124 + 0.0199 \times (\text{都市人口率}(\%)) + 0.466 \times \ln(\text{GDP/PPP}(\$)) \quad (1)$$

また、3.2 で示したように GDP/PPP が 10 千ドル以上では一人当たり生活用水使用量と GDP/PPP には明確な関係はないものと考えられたため、10 千ドル以下の国のデータを用いて回帰分析により (2) 式を算出し、10 千ドル以下ではこの式を用い、10 千ドル以上ではこの式の GDP/PPP の部分を 10 千ドルに固定して、都市人口率のみを考慮して一人当たり生活用水使用量を予測するモデルを構築した。これをモデル 2 とする。

$$\text{モデル 2: } \ln(\text{生活用水使用量(L/d)}) = -0.960 + 0.0227 \times (\text{都市人口率}(\%)) + 0.570 \times \ln(\text{GDP/PPP}(\$)) \quad (2)$$

モデル 2 では GDP/PPP が高くなった場合に水使用量の伸びを低めに推定することになる。

4.2 人口、都市人口率、GDP/PPP の将来予測

上記 2 つのモデルを用いて将来予測を行うためには、人口、都市人口率、GDP/PPP の将来予測値が必要となる。人口、都市人口率については国連の推計データを用いることとした。GDP/PPP については、各国を世界銀行の分類に基づいて 4 つの分類 (High income, Upper middle income, Lower middle income, Low income) に分けて GDP/PPP の平均値を算出し、過去 25 年分のデータから線形近似と多項式近似により高成長と低成長の経済シナリオを作成した。作成したシナリオをもとに 4 分類毎に平均経済成長率を算出し、各国の現状の GDP/PPP と掛け合わせることで 2015 年、2030 年の GDP/PPP を推定した。分類ごとの 2000～2015 年、2015～2030 年の経済成長率を表 1 に示す。

表1 設定した経済成長のシナリオと平均経済成長率(%)

	High income		Upper middle income		Lower middle income		Low income	
	高成長	低成長	高成長	低成長	高成長	低成長	高成長	低成長
2000-2015 年	2.8	2.5	3.6	2.7	5.8	3.4	8.4	3.1
2015-2030 年	1.7	0.8	4.4	2.7	7.8	3.4	12.8	3.1

4.3 一人当たり生活用水使用量の予測

一人当たりの生活用水使用量をモデル1、2それぞれを用いて予測する。各国において水使用量データの対象年が異なるため、水使用量データの対象年の都市人口率と GDP/PPP をモデルに代入して算出した値を、予測対象年のデータをモデルに代入して得られた値から差し引き、それを実データ（一人当たり生活用水使用量）に加えることにより、2000 年、2015 年、2030 年の一人当たり生活用水使用量を予測した。

図6はモデル1、モデル2において高成長経済シナリオを仮定した場合の度数分布を示す。モデル1においては2030年に400(L/d)を超える国が多くなっているが、モデル2においてはGDP/PPPが10千ドルを超すと水使用量の伸びは都市人口率のみの関数となるため、200~400(L/d)の国は増えるものの400(L/d)以上となる国は増えていない。日本などの実際の状況を考えると一定程度経済が成長した後は一人当たり水使用量は大幅に増加していないため、モデル2の方が実際の状況をよく表しているのではないかと推察される。

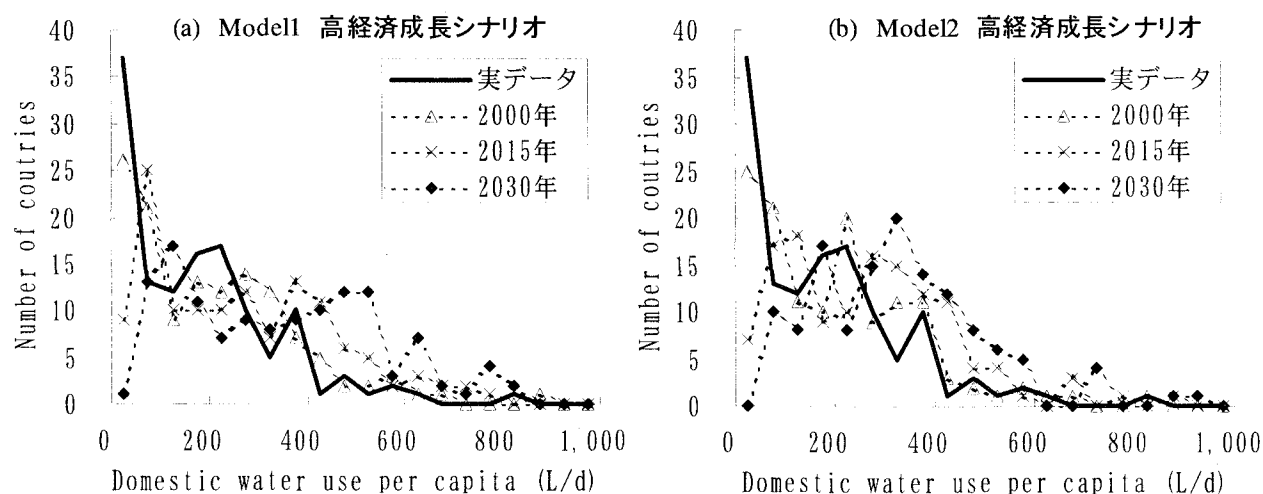


図6 各モデルにおける一人当たり生活用水使用量の予測結果

4.4 生活用水使用量の水資源賦存量に対する比率

4.3で算出した一人当たり生活用水使用量に人口の予測値をかけて生活用水使用量を算出し、各国の水資源賦存量に対する比率を算出した。この比率には農業や工業に利用される水は含まれていないものの、各国の水資源の逼迫度を表す指標になるものと考えられる。

表2に対象とした129カ国の水資源賦存量と生活用水使用量の合計について比率を算出したものを示

す。モデル間ではほとんど差はないが、経済成長シナリオ間では明確な差がある。また、いずれのシナリオにおいても比率は2030年に倍以上となっており、生活用水使用量が飛躍的に伸びていくことが予想される。

モデル2の高経済成長シナリオについて国別に比率を描いたものを図7に示す。南北アフリカ、中東、南アジア、中国などで、比率が高くなっており、これらの国では今後水需給が逼迫していくことが予想される。

表2 129カ国の生活用水使用量の水資源賦存量に対する比率

	モデル1		モデル2	
	高成長	低成長	高成長	低成長
実データ	0.71			
2000 年	0.91	0.91	0.91	0.91
2015 年	1.45	1.35	1.44	1.33
2030 年	2.12	1.80	2.08	1.81

5 まとめ

本報では、各国の生活用水使用量と関連性のあり
そうな要因のうち、人口関連指標、経済関連指標、
水資源賦存量などを対象として相関解析を行い、都
市人口率や GDP/PPP といった指標との相関が高いこ
とを示した。また、相関解析の結果を用いて2種類
の生活用水需要予測モデルを作成し、それを用いて
2015年、2030年における各国の生活用水使用量の予
測を行った。

本報で示した予測結果は限られたデータを用いて
行った解析に基づくものであり、その精度について
は十分な検討を要するものである。今後は、今回解
析対象とできなかった上下水道普及率などの他の要
因についても解析の対象を拡げていく必要がある。
そのためにも、水使用に関する情報だけでなく、そ
れに関係すると思われる要因に関する情報について
も国際的なレベルで整備していく必要があろう。ま
た、国レベルではなく、より小さな地域や都市のレ
ベルでの解析も必要であろう。

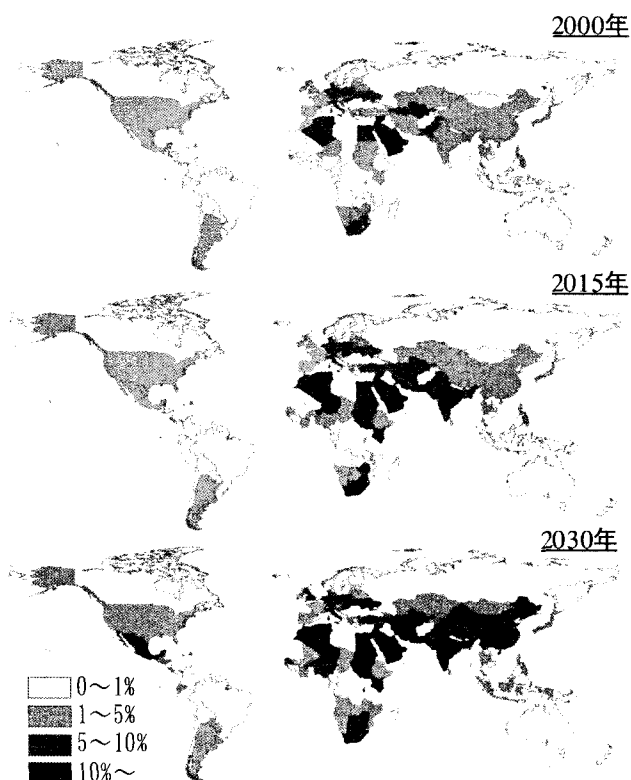


図7 国別の生活用使用水量の水資源賦存量に対する
比率(モデル2、高経済成長シナリオ)

謝辞：本研究を遂行するにあたり、お茶の水女子大学人間文化研究科大瀧雅寛助教授、東京大学学際情報学
府の大瀧友里奈氏にはさまざまなご協力を頂いた。また、科学技術振興事業団戦略的創造研究推進事業「人
間活動を考慮した世界水循環水資源モデル」(代表:沖大幹 総合地球環境学研究所助教授)の支援を頂いた。
ここに記して謝意を表する。

参考文献

- Baumann, D. D., Boland, J. J. and Hanemann, W. M., Urban Water Demand Management and Planning, McGraw-Hill, 1997
- Billings, R. B. and Agthe, D. E., State-space versus multiple regression for forecasting urban water demand, J. Water Resources Planning and Management, 124, 2, 113-117, 1998
- Seckler D., Amarasinghe U., Molden D., Radika de Silva and Randolph Barker, World Water Demand and Supply, 1990 to 2025: Scenarios and Issues, International Water Management Institute, Research Report 19, 1998
- World Resources Institute, World Resources 2000-2001, 2000
- 高橋潔、松岡譲、島田洋子、島村亮「気候変動化での地球規模の水資源評価と渇水対策戦略のためのモデル開発」、第8回 地球環境シンポジウム講演論文集、175-180、2000