

世界の都市人口の変化に影響を与える 水ストレス度の変化の特徴

北村 友叡¹・石塚 正秀²・津田 守正³・紀伊 雅敦⁴・中村 一樹⁵

¹学生会員 香川大学大学院 工学研究科安全システム建設工学専攻 (〒761-0301 香川県高松市林町2217-20)

E-mail: s16g410@stu.kagawa-u.ac.jp

²正会員 香川大学准教授 工学部安全システム建設工学科 (〒761-0301 香川県高松市林町2217-20)

E-mail: ishizuka@eng.kagawa-u.ac.jp

³正会員 土木研究所主任研究員 水災害リスクマネジメント国際センター

(〒300-2621 茨城県つくば市南原1-6) E-mail: mori-tsuda@pwri.go.jp

⁴正会員 香川大学准教授 工学部安全システム建設工学科 (〒761-0301 香川県高松市林町2217-20)

E-mail: kii@eng.kagawa-u.ac.jp

⁵正会員 香川大学助教 工学部安全システム建設工学科 (〒761-0301 香川県高松市林町2217-20)

E-mail: knaka@eng.kagawa-u.ac.jp

世界全体の人口は増加傾向にあり、とくに都市部への人口集中が進むと予想されている。人が生活する上で水は必要不可欠であり、都市人口の増加により、都市で利用される水量の増加が考えられるが、都市人口の将来推計に関して水資源量の制約を考慮した研究はない。本研究では全球水資源分布を考慮し、都市人口の変化に影響を与える水ストレス度の変化の特徴について明らかにすることを目的とする。水ストレス度の指標として、*FMI* (ファルケンマーク指数) と *WAR* (annual water withdrawal to availability ratio) を用いた。その結果、 $WAR > 1$ の国において、水資源開発が盛んに行われていることが分かった。このことから、*WAR* だけでは真の水ストレスを評価することはできないが、逆に、水資源開発・管理への指標として適用できることが分かった。

Key Words : *FMI, WAR, Water recycle, Population growth*

1. はじめに

現在、世界全体の人口は増加傾向にある。とくに都市部への人口集中が進み、2030年には世界人口の約60%が都市部で生活すると予想されている¹⁾。人が生活する上で水は必要不可欠なものであるが、水資源の分布は地域的な偏りが大きく、地球温暖化が進むと、この偏りはより大きくなるといわれている。また、都市人口が増加するにつれて、都市で利用される水量も増加することも考えられるが、都市人口の将来推計に関して水資源量の制約を考慮した研究はない。本研究では、全球水資源分布を考慮し、都市人口に変化を与える水ストレス度の変化の特徴について明らかにすることを目的とする。

2. 研究の手法

(1) 研究のコンセプト

人が生活する上で水は無くしてはならないものであり、生活に必要な最低限の水を利用できない地域あるいは国

では、人口増加の抑制または拡散が予想される。そこで、本研究では、高い水ストレスが社会経済に与える影響として、人口増加の抑制を仮定した。水ストレス度と人口の関係の概念図を図-1に示す。取水量は農業・工業・生活用水から構成され、そのすべてが人口の影響を受けている。一方で、地球温暖化による気候変動により、気温上昇や降水分布の変化が生じることで水資源量が変動する。そして、取水量と水資源量が水ストレス度に影響を及ぼす。

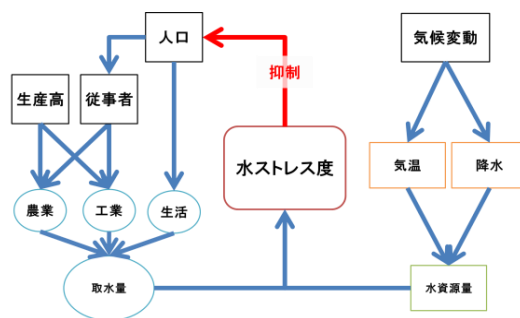


図-1 水ストレス度と人口の関係に関する概念図

(2) 水ストレス度の算出方法

本研究では、国ごとの全球水ストレス度として二つの指標を用いる。1つは *FMI* (ファルケンマーク指数) である。これは、ある国・地域において1人当たり1年間に利用可能な水資源量 (*PWA*: per capita annual water availability) の多寡によって水不足の程度を表現する指標である (式 (1))²⁾。

$$PWA = \text{年間水資源量} \div \text{人口} \quad \dots \dots (1)$$

PWA が 1,700 m³ を必要な最低値として設定し、これを下回る国・地域は「水ストレス状態」にあるとする³⁾。さらに、1,000 m³ を下回った場合には「水欠乏」、500 m³ 以下の場合には「絶対的水欠乏」とみなす。

つぎに、*WAR* (annual water withdrawal to availability ratio) を用いる (式 (2))。

$$WAR = \text{年間取水量} \div \text{年間水資源量} \quad \dots \dots (2)$$

これは、年間水資源量に対する年間取水量 (生活、工業、農業用水取水量の和) の比で表され、人間活動と気候に関する長期的な変化を反映できる。

(3) 利用データ

年間の水資源量および取水量のデータには、FAO (Food and Agriculture Organization) の AQUASTAT を利用した⁴⁾。これは世界の 200 ヶ国を対象に 1962~2013 年の約 5 年おきのデータが提供されている。しかし、年間水資源量のデータは長期的に変化が無く、取水量データは欠損が多い。

人口データには、World Bank が提供するデータを利用した⁵⁾。これは世界の 248 の国または地域を対象に 1960~2014 年の毎年のデータが提供されている。

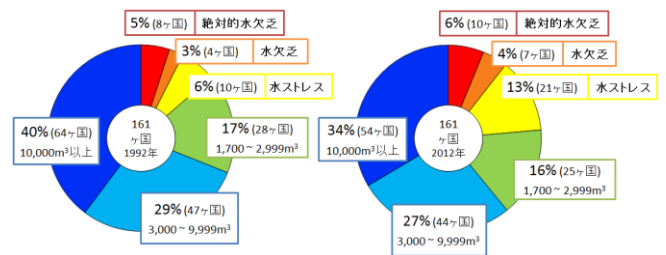
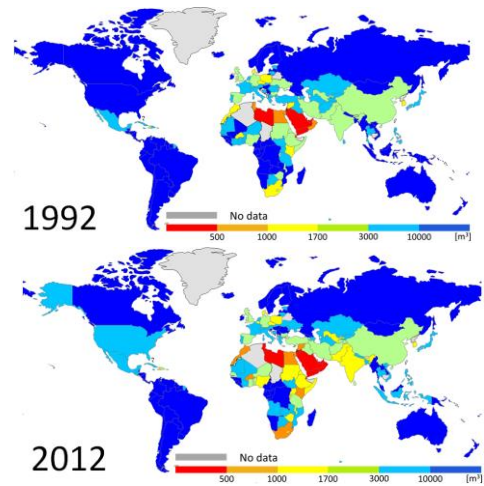


図-2 一人あたり利用可能な年間水資源量 (*PWA*) にもとづく *FMI* の国別分布と割合 (1992 年, 2012 年)

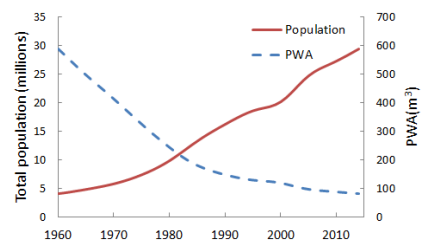


図-3 サウジアラビアにおける人口 (実線) と *PWA* (破線) の長期変化

3. 結果と考察

(1) *FMI* を用いた水ストレス度

図-2 より、1992 年では、*PWA* が 500 を下回る水ストレス度の最も高い絶対的水欠乏状態の国はアフリカ北部のリビア、アフリカ東部のジブチ、中東のサウジアラビア、イエメン、イスラエル、ヨルダン、クウェート、アラブ首長国連邦であった。全体として水ストレス下にある国は 22 ヶ国 (約 14%) である。それに対して、2012 年では、絶対的水欠乏状態の国が全体的に増加しており、南アジア域でも水ストレス度の高まりがみられた。水ストレス下にある国は 38 ヶ国 (約 23%) であり、1992 年からの 20 年間で 16 ヶ国 (約 10%) 増加した。これは、世界的な人口増加が原因であり、毎年ほぼ横ばいの水資源量に対してその利用者である人口が増加したことで、1 人当たりの利用可能な水資源量が減少したためである。

(2) 水ストレス度が人口変化に与える影響

PWA の小さいサウジアラビアに注目して、人口と

PWA の長期変化を調べた (図-3)。1965 年時点において、絶対的水欠乏状態にある。しかし、人口は 1960 年と比較して 2012 年には約 6 倍に増加しており、*PWA* は減少し続けている。つまり、より厳しい水ストレス下においても人口は増加しており、水ストレスの増加が人口抑制に影響を与えていないことが分かった。このことは、生活の質 (QoL: Quality of Life) の低下を引き起こしていると考えられる。また、この傾向は他の絶対的水欠乏にある国すべてにあてはまった。

(3) *WAR* を用いた水ストレス度

つぎに *WAR* を用いて水ストレス度の分布図を作成した (図-4)。結果は、*FMI* とほぼ同様の傾向が得られた。*WAR* は水資源量に対する取水量の比で表されるため (式 (2))、本来であれば *WAR* は 1 未満となる。しかし、*WAR* が 1 を超える地域はアフリカ北部のリビア、エジプト、中東のサウジアラビア、イエメン、イスラエ

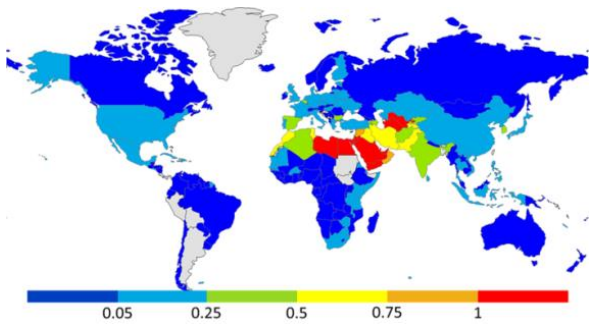


図-4 水ストレス度 (WAR) の国別分布 (2007 年または最新の取水量データを利用 (FAO))

ル, ヨルダン, クウェート, アラブ首長国連邦, 中央アジア南西部のウズベキスタン, トルクメニスタンにみられた。WARが1を超える理由は大きく分けて3つある。1つに化石水(地下水)の利用がある。この化石水は涵養量が小さく石油と同様に使えば無くなる水である。化石水は、本研究で使用した水資源量には含まれていない。つぎに、海水の淡水化である。これはそのままでは利用できない水資源を生産し、利用できる水資源に作り替える。最後に、処理水の再利用である。これは、使用した水を再度利用することで、見かけの水資源量を増加させている。

(4) 高水ストレス度条件下における水利用実態

WAR > 1の地域における水利用の実態を調べるために、イスラエルに着目した。理由は、当該地域の中で唯一の先進国と呼ばれる国であり(OECD: 経済協力開発機構に加盟)、必要な情報が比較的入手しやすいためである。図-5より、イスラエルは1960年に約200万人であった人口が2012年には約800万人となり、50年間で4倍に増加した。WARも年ごとに増加し、2000年頃にWAR=1(取水量と水資源量が等しい)の状態になった。しかし、その後も、人口は増え続け、2013年時点ではWARは1.08までに至っている。つまり、2000年以降は新たな水資源の開発や水不足への対策を行っていることが分かる。

イスラエルは世界で最も乾燥した地域の国の1つであり、人口増加や都市への人口集中を受けて、水利用対策は国レベルの事業として長年技術が培われてきた。その

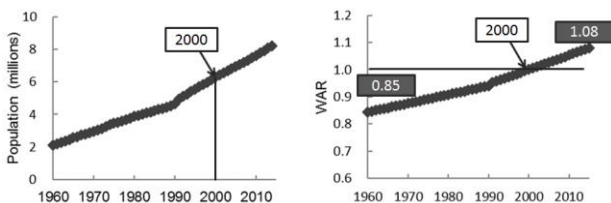


図-5 イスラエルにおける人口(左)とWAR(右)の長期変化

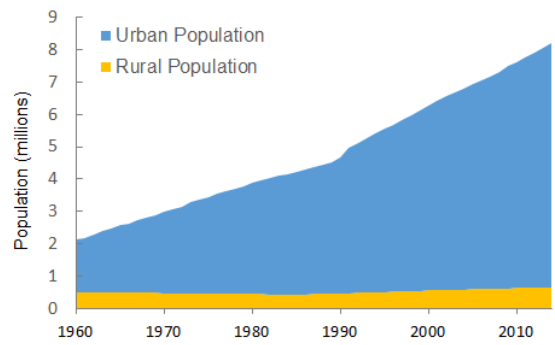


図-6 イスラエルにおける都市人口と地方人口の長期変化

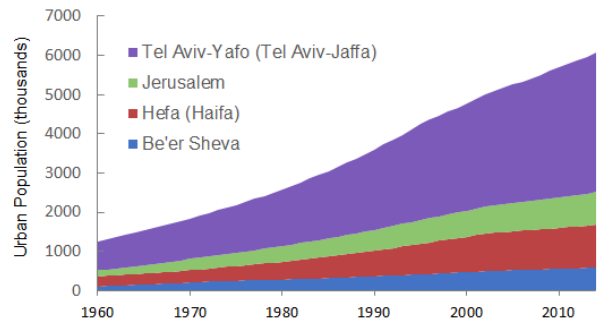


図-7 イスラエルにおける4都市の人口の長期変化

主たるものは、海水淡水化プラントである。2012年時点で世界最大規模の淡水化施設が開設され、国内の全水消費量の内約4割を淡水化水で賄っている⁶⁾。また、同国では下水分野における技術も高く、下水処理された水の80%以上(2012年時点、日本では14%)が農地、灌漑施設、公共庭園などで再利用されている。また、農業にも力を入れており、食料自給率は90%を超える⁷⁾。最近では、南部のネゲヴ(Negev)砂漠の緑化にも力を入れている。

イスラエルは全人口に占める都市人口の割合が約92%(2014年時点)と非常に高く、都市に人口が集中している特徴がある。図-6より、1960年以降、地方人口がほぼ一定であるのに対して、都市人口は年々増加していることが分かる。人口が多い都市はテルアビブ、エルサレム、ハイファ、ベエルシェバの4つあり、この4つの都市に総人口の約74%の人々が暮らしている(図-7)。その中で都市人口の最も多いテルアビブでは総人口に占める割合が約43%と大きく、都市という限定された地域に人が密集するため、水ストレス度がより高くなることが予想される。イスラエルの国人口の変化は都市人口の変化と強い関係がみられるが、国人口に占める地方人口の割合が高い国(例えば、イスラエルとほぼ同じ人口のタジキスタン)もある。このような国では、国人口は都市人口を反映していないことから、例えば、河川流域ごとに水ストレス度を算出する必要がある。

4. まとめ

人口増加の影響を受けて、世界各地で水ストレス度は高まっている。しかし、水ストレスが人口増加の抑制に影響しているとは必ずしも言い難い。なぜなら、水資源の乏しい地域では新たな水資源と、高度な水利用の技術を持って状況を改善しているためである。これらの技術を導入すれば、今後、世界各地で発生しうる水不足問題を解消できる可能性がある。しかし、上記で紹介した方法は、導入と運用にあたり非常に多額のコストと高い技術力を必要とし、すべての国において直ちに利用できるものではない。また、淡水化は近隣海域の塩分濃度上昇、下水の再利用は水質に問題を抱えており万能ではない点についても考慮が必要である。

このように、水ストレス度の変化は各国の経済力とも関係しており、水の生産・供給・使用等に関わるコストや農業の生産力・コストとの関係との関係、また、水処理技術の導入に関わる CO₂ 排出、それにともなう気候変動と水ストレス度との相互影響についても考える必要がある。今後、将来の人口変化と水ストレス度変化を予測する際には、各国の経済レベルに応じた水ストレスの増加への対策シナリオを作成する必要があると考える。

謝辞：本研究は科研費（15H02869）の助成を受けている。

参考文献

- 1) United Nations : World Urbanization Prospects : the 2014 revision, 2014.
- 2) Falkenmark, M., Lundquist J. and Widstrand C.: Macro-scale water scarcity requires micro-scale approaches: Aspects of vulnerability in semi-arid development. *Natural Resources Forum* 13(4), pp.258-267, 1989.
- 3) 小寺正一：水問題をめぐる世界の現状と課題, pp.73 - 97, 2010.
- 4) FAO : AQUASTAT database. (2015.7.28 閲覧) .
- 5) The World Bank : World Bank data, <http://data.worldbank.org/indicator> (2015.10.21 閲覧)
- 6) IBTimes : 海から来た水-海水淡水化にかけるイスラエル (2016.1.23 閲覧) .
- 7) JIFA : 日本イスラエル親善協会・特集・日本の中のイスラエル, No.4, (2016.2.15 閲覧) .

(2016.4.22 受付)

CHARACTERISTICS OF WATER STRESS VARIATION THAT EFFECTS ON THE VARIATION OF URBAN POPULATION IN THE WORLD

Tomoaki KITAMURA, Masahide ISHIZUKA, Morimasa TSUDA, Masanobu KII
and Kazuki NAKAMURA

The world population is increasing. In the future, it is expected that urban population particularly increases. Water is essential for human lives. By the increase of urban population, the amount of water used in the urban cities will also increase accordingly. However, no studies that take the constraints of the water resources amount against future estimates of urban population into account were conducted. The objective of this study is to clarify the characteristics of the variation of the water stress level that affects the urban population by considering the global water resources distribution. As indicators of water stress level, the *FMI* (Falkenmark Indicator) and the *WAR* (annual water withdrawal to availability ratio) are used. As a result, countries of $WAR > 1$ conducts water resource development actively. Therefore, although only *WAR* is not applicable to evaluate the actual water stress, *WAR* can be used as an indicator of water resource development and management in each country.