

都市流域内人口密度を用いた世界の都市における水ストレス度の算定 -イスラエルにおける事例解析-

香川大学大学院工学研究科
香川大学工学部
香川大学工学部
公財) 地球環境産業技術研究機構
土木研究所水災害リスクマネジメント国際センター
香川大学工学部

学生会員 ○北村友叡
正会員 石塚正秀
正会員 紀伊雅敦
非会員 林 礼美
正会員 津田守正
正会員 中村一樹

1. はじめに

現在、世界全体の人口は増加傾向にある。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¹⁾。また、人口が増加するにつれて、利用される水量も増加するが、国レベルでの水ストレス度では、水ストレスの上昇が人口の増減に影響しているとはいえないことが示された²⁾。そこで、本研究では、都市に着目し、都市における水ストレス度の算定を目的とする。

2. 研究の手法

(1) 都市人口の長期変化

本研究では、高い水ストレス度下にあり、かつ必要なデータを取得できる国としてイスラエルに着目した。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-1)。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-2)。イスラエルの総人口の変化は都市人口の変化と強い関係がみられ、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。

(2) 都市流域内人口密度の定義

本研究では、都市流域内人口密度 $\rho_{u,r}$ を以下のように定義する。

$$\rho_{u,r} = \frac{P_u}{A_r} \quad (1)$$

ここで、 P_u は河川流域に接続する都市人口、 A_r は対象とする都市が抱える河川流域 (後背流域) の流域面

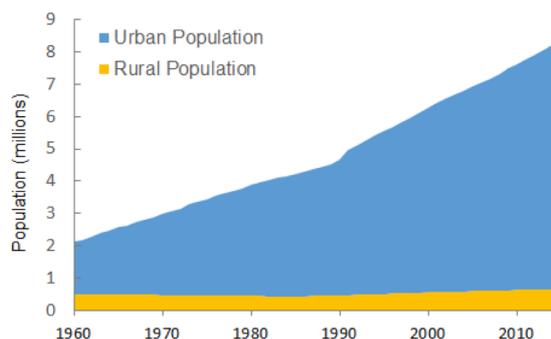


図-1 イスラエルにおける都市人口と地方人口の長期変化

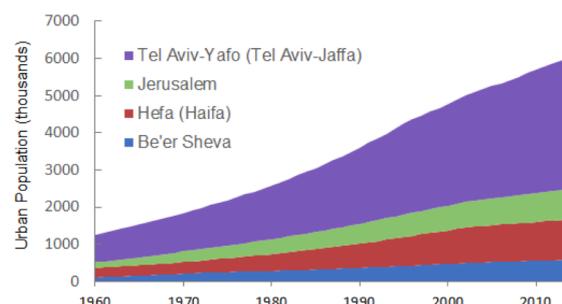


図-2 イスラエルにおける4都市の人口の長期変化

積である。

(3) 流域面積の算定方法

都市において利用できる水源として、都市に流入する河川流域に着目する。都市流域の算定には、都市エリアデータ (都市の範囲の位置情報) と地理標高データを必要とする。都市エリアデータに GCG05³⁾、メッシュ情報は世界流域データベース (Global Drainage Basin Database: GDBD)⁴⁾ を利用した。解析には ArcGIS ver.10.3.1 を用いた。

(4) 水ストレス度の算出方法

国毎の全球水ストレス度として、FMI (ファルケンマーク指数) を用いる。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 (2))。

$$PWA = \frac{W}{P} \quad (2)$$

ここで、年間水資源量 (水資源賦存量) を W 、人口を P とする。 PWA が $1,700 \text{ m}^3$ の場合が、ストレスなく水を利用するために必要な最低値として設定されており、これを下回る場合は「水ストレス状態」にあるとする。さらに、 $1,000 \text{ m}^3$ を下回った場合には「水欠乏」、 500 m^3 以下の場合には「絶対的水欠乏」とみなす。

3. 都市毎の水ストレス度の算定 (イスラエル)

(1) 都市流域の算出結果

対象とした4都市に流入する河川を抽出した結果、エルサレム以外の3都市で4つの河川を確認できた (図-3)。それぞれ、ハイファを流れる Kishon River、テルアビブを流れる Yarkon River・Ayalon River、ベ

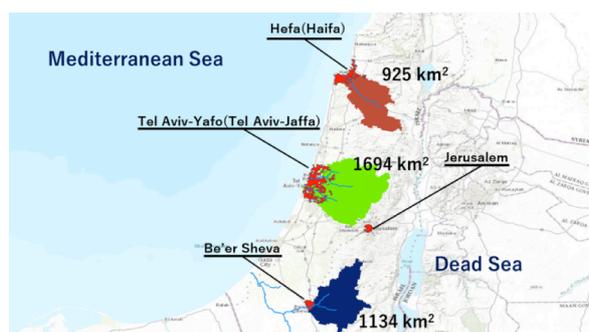


図-3 イスラエルにおける4都市の都市流域図(赤色で示した範囲が第2(4)節の方法で算出した都市を示す。)

エルシェバを流れる Nahal Beelsheba (ワジ川) を表していることが分かった。都市流域面積はそれぞれハイファが 925 km²、テルアビブが 1694 km²、ベエルシェバが 1134 km²であった。都市域に流入する河川を対象とすることで、複数の河川を統合して表現することや、都市域よりも上流側の流域を算定できた。

式(1)で示した A_r は、ある都市に流入する河川流域面積であり、単純な流域面積ではない。例えば、ベエルシェバのように、河川中流域に位置する都市では、都市がある位置よりも上流域における流域面積を算定する必要がある。本手法を用いることで、流域の途中に位置する都市においても、そこに流入する河川流域面積を算定することができる。

(2) 都市における水ストレス度

PWA は式(2)より算定されるが、都市が利用できる水資源賦存量 W を流域面積 A_r 、降水量 R および蒸発散量 E を用いて表すと、 PWA は次式(4)により計算される。

$$PWA = \frac{W}{P} = \frac{(R-E)A_r}{P_u} \quad (4)$$

つぎに、本研究で定義した都市流域内人口密度 $\rho_{u,r}$ (式(1)) を用いると、上式はつぎのようになる。

$$PWA = \frac{(R-E)}{\rho_{u,r}} \quad (5)$$

式(5)を用いて、各都市における PWA を算定した結果を図-4に示す。比較のために、イスラエル国の PWA も合わせて示す。図より、都市における PWA は国全体で算出した PWA と比較して、小さい値となった。具体的には、ベエルシェバ、テルアビブ、ハイファの PWA は国全体に対して、それぞれ 70、18、30%となった。ファルケンマークの定義にしたがうと、 PWA が小さいほど水ストレス度が大きくなることから、水ストレス度を都市毎に算出することにより、国単位で算出した結果と比べて水使用に対するストレスがより高まることが明らかとなった。図-1、2に示したように、イスラエルでは都市人口が1960年代から2010年代にかけて約4倍に増えており、都市単位の水ストレス度でみると、水使用の実情をより反映できると考えられる。なお、エルサレムは高地にあり、かつ、河川流域を後背に持たない算定結果が得られたことから(図-3)、解析の対象から除外した。また、本研究では、 R と E の場所毎の違いはないとし、都市人口は

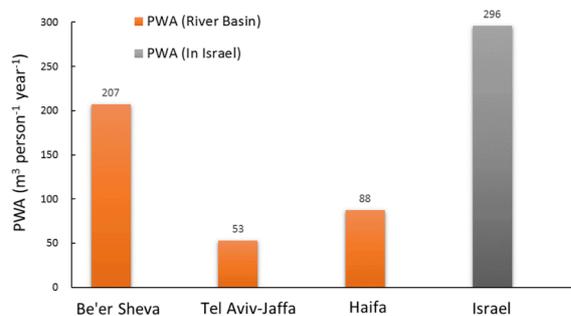


図-4 4都市における PWA 算定結果 (2000年)

2000年の値を用いた。

つぎに、都市間の比較を行うと、テルアビブの PWA が 53 m³ person⁻¹ year⁻¹ と最も小さく、ハイファ、ベエルシェバの順であった。テルアビブは、流域面積が3都市の中で最も大きい(図-3)、人口も多いことから、 $\rho_{u,r}$ が最も高くなった。一方、ベエルシェバは都市の規模(空間的広がり、人口)に対して、後背の流域面積が大きいことから、 PWA が最も大きくなった。

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。本研究では、都市に着目し、都市における水ストレス度の算定を目的とした。その際、都市において利用できる水はその都市が抱える河川流域からもたらされると考え、「都市流域内人口密度」という新たな指標を定義し、都市の水ストレス度を算定した。

イスラエルを対象とした場合、国単位で水ストレス度を算出した結果と比べて、都市単位では水ストレス度が約1.4~5.6倍に高まることが明らかとなった。イスラエルでは都市人口が1960年代から2010年代にかけて約4倍に増えており、都市単位での水ストレス度でみるにより、水使用の実情をより正確に反映できると考えられる。

謝辞:

本研究はJSPS 科研費(15H02869)の助成を受けた。

参考文献:

- 1) 林礼美・秋元圭吾・友田利正: 世界の水ストレス度変化と要因の分析, *Journal of Japan Society of Energy and Resources*, Vol.35, No.4, pp.40-49, 2014.
- 2) 北村友叡・石塚正秀・津田守正・紀伊雅敦・中村一樹: 全球水ストレス度を用いた国別の水利用実態の変動分析, 平成28年度土木学会四国支部第22回技術研究発表会講演概要集, wII-2, jsce7-119-2016, 2016.
- 3) Kii, M., Akimoto, K. and Doi, K.: Random-growth urban model with geographical fitness, *Physica A*, Vol. 391, pp. 5960-5970, 2012.
- 4) Masutomi, Y., Inui Y., Takahashi, K., and Matsuoka Y.: Development of highly accurate global polygonal drainage basin data, *Hydrological Processes*, Vol.23, pp.572-584, 2009.