

水文気候の季節性から推定される 環境用水のグローバル必要量

GLOBAL ESTIMATION OF ENVIRONMENTAL FLOW REQUIREMENT BASED ON RIVER RUNOFF SEASONALITY

白川直樹¹
Naoki SHIRAKAWA

¹正会員 工博 筑波大学講師 システム情報工学研究科構造エネルギー工学専攻
(〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

Environmental flow requirement is estimated in global scale. The estimation is based on 0.5 degree grid river network dataset and river runoff calculation result provided by IIS, University of Tokyo. The whole world is divided into 4 groups by river runoff seasonality. For wet and seasonal dry region, flood pulses are also taken into account. Base flow is supposed to be 10% of mean monthly flow, except for wet months (>10 mm/month) which 30% of mean monthly flow is applied. Flushes are supposed to account for 1/3 of base flow. In extremely dry months (<1 mm/month), no environmental flow is required. As a result, global averaged value turned out to be 88.17mm or 26% of total runoff.

Key Words : *Environmental flow requirement, water resources assessment, river environment*

1. はじめに

世界各地の河川マネジメントにおいて、環境用水が新たな懸案事項に浮上している。一口に環境用水と言っても地域の事情によりその必要性はさまざまな形をとって現れるが、環境用水の確保が河川流域管理の中で必要となる文脈は主に二つある。一つは国民の環境意識が高まって自然環境の保全や復元が相対的に価値を増す中で、自然復元事業の目的を達する手段の一つとして流量の操作が行われる場合である。この文脈では、自然復元の目的は何らかの形で既に定まっており、流量（およびその変動）と各自然環境要素の関係がマネジメントに必要な情報となる。

このような意思決定を助ける研究とは、流量と生物の関係や流量と水質の関係などを局地的に深く掘り下げてできるだけ確度の良い予測を行うことである。現在環境流量についてみられる研究も、この立場から行われているものがほとんどである。それは、実務的な必要性もさることながら、きちんと社会に受容されうる結果が出てくると信頼されているからであろう。このような問題が意識される地域はすでにある程度の豊かさを享受していることが多く、集約的に資金と人材を投入することができるという恩恵もあるし、また問題の性質上しっかり

した自然科学的方法論に基づいて実験や観測や計算がなされるため、検討過程も結論も意思決定者の説明責任にかなうレベルに達することを期待しても悪くはない。

もう一つの文脈は、水資源政策において環境を利水者の一員に認めようというものである。ここではせいぜい「国民の福祉を最大化する」という程度の曖昧な目標しか設定されておらず、物理的・自然科学的な因果関係に加えて他用水とのトレードオフ関係や費用と効果の比較など社会的要因が大きく効いてくる。そもそもなぜ環境用水が必要なのか、どれくらい必要なのか、どれくらいの効果があり、国民の福祉をどれだけ向上させるのか、といった段階から議論を起さねばならないはずであるが、それらにきちんと答えをだすことはほとんど不可能である。

この立場、水資源利用者としての環境という観点からの研究は、それほど積極的に行われていない。そこには不確定な要素があまりに大きく、自然科学的なアプローチはそれほど有効でないとみられているからかもしれない。水資源配分という行為自体が、簡単に理屈で割り切れるものではないことも事実である。しかし環境用水はすでに表-1にみるように水資源配分において抜き難い存在感を発揮するようになっているケースもあり¹⁾、現実はどう進んでいる。完全な答えを与えることはできなくとも、いろいろな側面から検討を行っておくことは

表-1 カリフォルニア州の水資源需給計画
(California Water Plan (1998)より)

		平均年	渇水年
需 要 側	都市用水	12.5	12.4
	農業用水	31.5	32.3
	環境用水	37.0	21.3
供 給 側	地表水	65.0	43.4
	地下水	12.7	16.0
	再使用	0.4	0.4
需要－供給		2.4	6.2

単位：ton acre-feet

必要だろう。

もはや水資源政策に何らかの形で環境用水を取り入れることは喫緊の課題となりつつあるといえるが、とくに危惧されるのは、自然復元の一部としての環境流量という観点は主に先進国で挙がる問題なのに対し、水資源配分における環境用水という観点は発展途上国にも容赦なく決断を迫ることである。そして、しばしば途上国の水資源問題には国際援助などを通じて先進国の論理が入り込むので、自然条件の異なる地域の水思想や環境思想が途上国の政策を左右してしまう恐れがある。水資源問題の社会性が強調されればされるほど、自然条件と切り離して「解決策」や「改善策」が論じられてしまう危険が大きい。

そこで本研究では、自然条件の差異を反映しながら環境用水が水資源配分に占める位置を明らかにすることを目指す。自然条件として注目するのはとりあえず気候条件とし、湿潤－乾燥の軸を中心に据える。

2. 環境用水に作用する自然条件

環境問題は世界一様ではない。自然条件の面からみても、変動がゆるやかで一次生産力が小さく、ひとたび破壊した自然がなかなか回復しない乾燥地・半乾燥地（ヨーロッパ、オーストラリアなど）の自然環境問題と、自然そのものが自己破壊と再生を繰り返すような激しい変動特性をもち、時間的・空間的に多様な生物生息環境が提供されている湿潤地（アジアモンスーン地帯、熱帯など）の自然環境問題は同列に論じることができない。

また水資源にしても、最大の水利利用者たる農業において天水を頼りにし、保水が最大の懸案となる中耕農業地帯（ヨーロッパなど）に対してアジア稲作地帯では除草に最大の労力が払われる除草農業地帯であり、取水よりも排水が懸案となる地域が多いという違いがある。いわゆる「Too little water problem」が常に頭をよぎる西

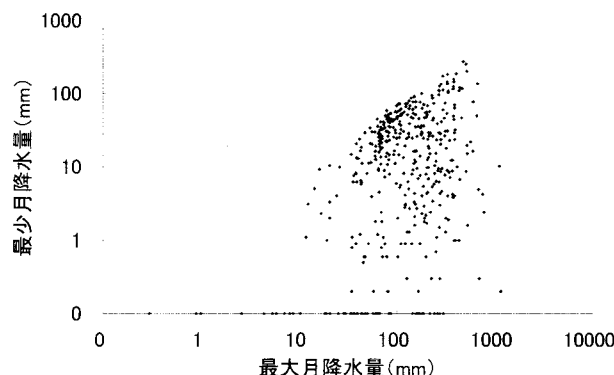


図-1(a) 世界各地の最大・最少月降水量（平年値）

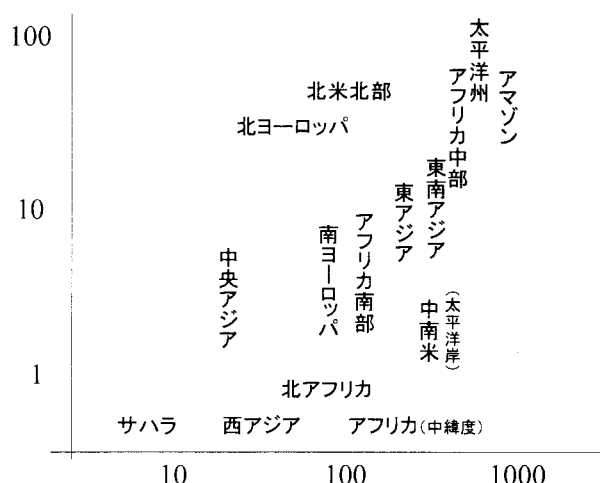


図-1(b) 最大・最少月降水量の地域別分布

北ヨーロッパに対し、「日照りに不慣れ」とまで言われる東アジアでは水量のもつ意味もおのずと異なってくる。

このように、水資源に関する社会的要因は、その多くを自然条件に拠っている。自然生態系はもちろん自然条件に支配されているので、その土地の自然条件は環境用水にとって二重に大切な意味をもつ。

理科年表記載の世界437地点の月別平均降水量をもとに、最大値と最小値の散布図をとったものが図-1(a)である。地方別のおおよその分布が図-1(b)である。おおまかに言って、①一年中乾燥した地域、②一年中湿潤な地域、③最大降水量と最少降水量の差が小さく、安定した地域、④雨季と乾季の差がはっきりしている地域、の4つに分類することができよう。

環境用水の流量要素は、平常時流量（年間最低確保流量）、特定期流量、攪乱パルス（出水、洪水、渇水）、そしてそれらの変化率に分けられる。先ほどの地方分類でいう①と③は年間を通して確保されるべき平常時流量が環境用水の主要部分となろう。②と④では攪乱を引き起こす出水・洪水が河川環境の自然なリズムを生んでいる可能性があり、④では季節的な乾燥も意味を持っている可能性がある。洪水が河床の攪乱や高水敷の更新に重

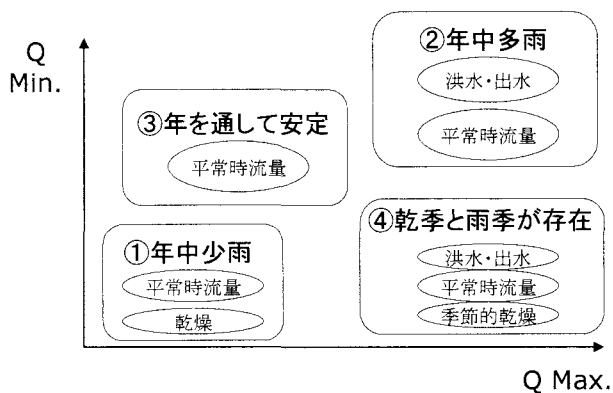


図-2 気候条件と考慮すべき流量要素

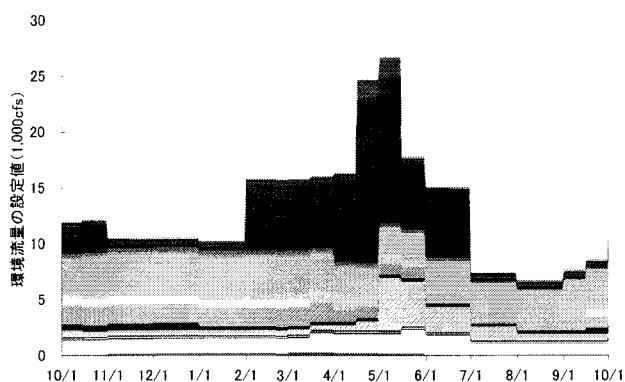


図-3 米国California州における環境用水設定値. 各地点毎の流量値を色別にし、単純に積み上げて示した.

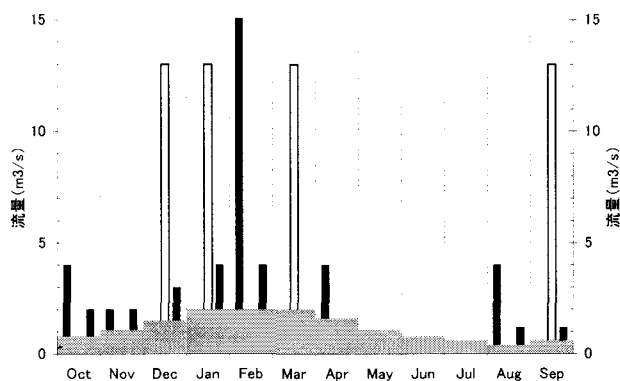


図-4 南アフリカ共和国Mhlathuze川における環境用水設定値. 灰色がbaseflow, 黒塗りの柱は2日間, 白抜きの柱は3日間継続出水を表す. 2月の最大出水(黒塗り)は45m³/s.

要な役割を果たしていることは再三指摘されているし、季節的乾燥が生態系の維持に役立っている例はオーストラリアなどで報告されている。

こうしたことから、気候条件(乾湿)からみた環境用水の地域性は図-2のように整理される。ただし図-1は降水量でみたものであるが、蒸発散量と河道流下を考慮に加える必要がある。

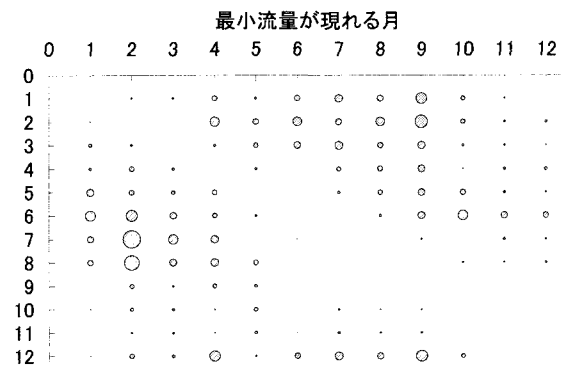
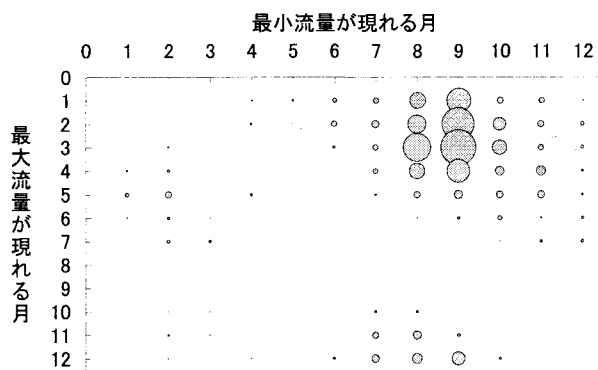
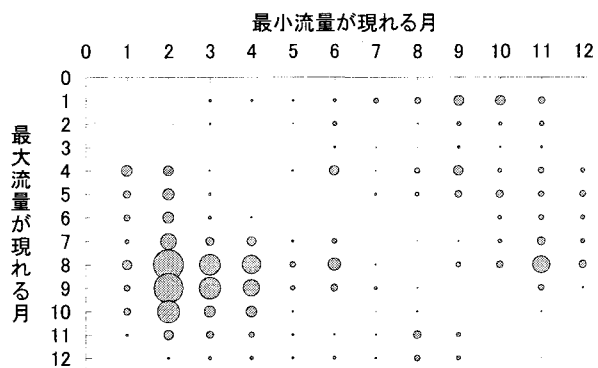
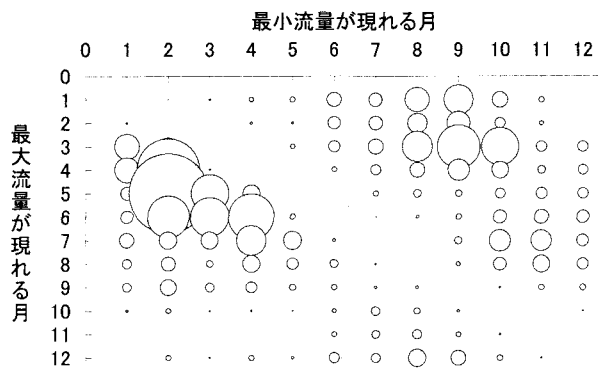


図-5 河川流量の季節性. 上から、北回帰線以北、赤道～北回帰線、赤道～南回帰線、南回帰線以南において該当するグリッド数を円の大ききで示している。

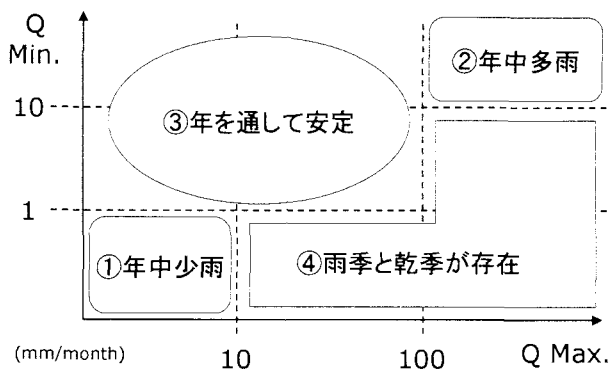


図-6 流出量の季節性による地域区分

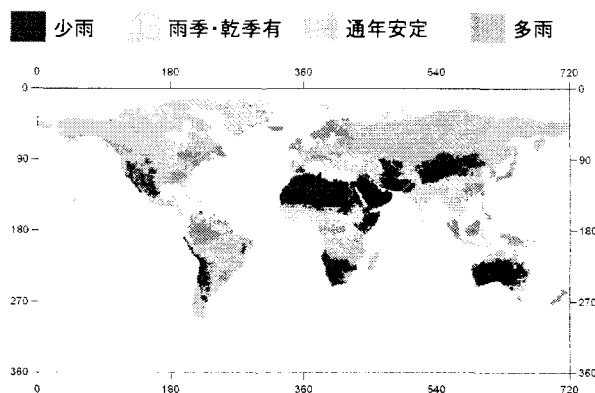


図-7 4区分された地域の分布

表-2 環境流量の基準として年平均流量に対する比を用いている主な国とその基準値 (比)

国名	基準として使用している比率 (年平均流量に対する)
オーストラリア	22%
カナダ	25%
チリ	10%
スペイン	10%
ポルトガル	2.5-5.0%
フランス	新規施設10%, 既存施設2.5%

表-3 本推定で用いた環境流量の設定基準

ゾーン	設定値 (月流出量が)
① 年中少雨	1mm未満: 0 (環境流量無) 1mm以上: 月平均流量の10%
② 年中多雨	月平均流量の30% ×1.33 (出水)
③ 通年安定	月平均流量の10%
④ 雨季・乾季	1mm未満: 0 (環境流量無) 1~10mm: 月平均流量の10% 10mm以上: 月平均流量の30% ×1.33 (出水)

3. 環境用水の確保例

図-3はカリフォルニア州の水資源計画に位置付けられた環境用水である。各地点の要求量を積み上げたグラフであり、わずかながら複数の基準点を持つ河川があるため総量にはあまり意味がない。1ヶ月または半月が基本単位になって季節変動が細かく規定されていることがわかる。また図には示せないが攪乱出水を求めている地点もある。比流量にしてみると、少ない場所で通年0.03-0.10程度、多い場所で0.5-0.7、増水期の最大では6.25という点もある(単位はいずれも $\text{m}^3/\text{s}/100\text{km}^2$)。

図-4は南アフリカ共和国における環境用水設定事例である²⁾。ここでは月ごとの最少流量と出水が明示されている。出水にはピーク流量の他に継続期間も定められており、この例では2日間継続出水と3日間継続出水がある。

このように、月ごとに環境用水を設定することにより季節性をかなりの程度まで再現でき、出水も考慮に入れられる。そこで本論文では月を操作単位とし、平常時流量と出水を考慮した環境用水量の推定を行うことにする。

4. 使用データと地域分類、原単位の設定

東京大学生産技術研究所のGlobal Water Resource

Data Archiveを利用した³⁾。全球0.5度グリッドの河道網(TRIP)、1986~1995年の流出量(GSWP2)、グリッド内人口分布のデータを用いている。ここでいう流出量とは、ダム操作等の人為が加わらない自然流出量である。

使用したデータ(河川流出量)の季節性を調べたのが図-5である。何月に最少流量が生じ、何月に最大流量が生じるかを表している。円の大きさは該当する0.5度グリッドの数である。北半球では5月に最大流量が、2月に最少流量が生じる場所が多く、積雪が水循環に大きな影響を持っていることがうかがえる。しかし南半球ではそのような傾向はみられない。

この流出量データを元に、図-6のように閾値を定めた。カリフォルニア州はじめ各地の環境流量の事例から設定値下限とみられる約 $0.03\text{m}^3/\text{s}/100\text{km}^2$ の比流量に対応する値として月流出量1mm、またわが国の正常流量基準であり諸外国における環境流量の標準的な設定値にもよく現れる $0.3\text{m}^3/\text{s}/100\text{km}^2$ に対応する値として月流出量10mmを判別基準値とする。

最大月流出量が10mm未満で最少月流出量が1mm未満の場所は極乾燥地とみなす。図-7に分布を示すように、アフリカの北部と南部、オーストラリアの大部分、西アジアおよび中央アジア、北米・南米の中緯度西岸部などがこの範疇に該当する。最大月流出量が100mm以上で最少月流出量が10mm以上の場所を湿潤地とした。日本を含む

東アジア、東南アジア島嶼部、北欧、米国東部・南部などが該当する。残る範囲のうち、最少月流出量が1mm未満、または最大月流出量が100mm以上に該当する地域を雨季乾季が存在する地域とし、それ以外を安定した地域とした。前者には東南・南アジアやサブサハラ、ブラジルなどがあり、後者には南欧・東欧、中国中部、北米中部などがあてはまる。

こうして4つに分類した各地域には次のような考え方で環境用水必要量を設定・計算した。

まず月流出量が1mm未満の場合（乾季）には、乾燥状態が河川の自然な状況を形成する条件になっていると考え、環境用水の確保を行わない。次に平常時流量には、Tennantが最小限必要な値として推奨している⁴⁾平均流量の10%という目安を用いることとした。これは現状の各事例に照らすとやや緩い値の感もあるが、現実には多くの国が採用している基準でもある（表-2）。ただしここでは年平均流量の代わりに各月平均流量との割合をとる。そして月流出量10mm以上の時期には、Tennantが豊水期の許容値としている同30%を用い、特定期流量に相当するものとした（「通年安定」地域を除く）。

出水攪乱に必要な水量は、図-4の例では12月の攪乱で平常時流量の50%、1月で37%、2月で146%、3月で31%、4月で7%などとなっており、その他の事例も参照して平常時流量の約3分の1と見積もることとした。渇水による攪乱は、乾季の環境流量をゼロとすることで表現されている。これらをまとめたのが表-3である。

5. 計算結果

以上の条件をもって計算を行った結果を図-8に示す。計算は各月について行っているが、紙数の都合上3ヶ月ごとの値を図示している。

グリッドごとの流出量（mm/month）で表現しており、10mm/monthがおおよそ0.386m³/s/100km²にあたる。自然流量をベースにしているのが北半球高緯度地帯などで河川流下の追従がみられるが、東南アジアやアマゾンなど一年を通して量の多い地域もみられる。日本も世界的にみて必要量がかなり大きい。

全球の平均値は5月に最大値14.06mm/monthをとり、最小値は11月の4.30mm/monthである。年間88.17mmという結果になった。モデル上の全球平均流出336mmの約26%にあたる。

6. 考察

主な河川ごとに、求められた環境用水必要量と自然流量を比較して整理したのが表-4である。流域平均値で単位はmmである。Amazon川やCongo川は一年中自然流量の

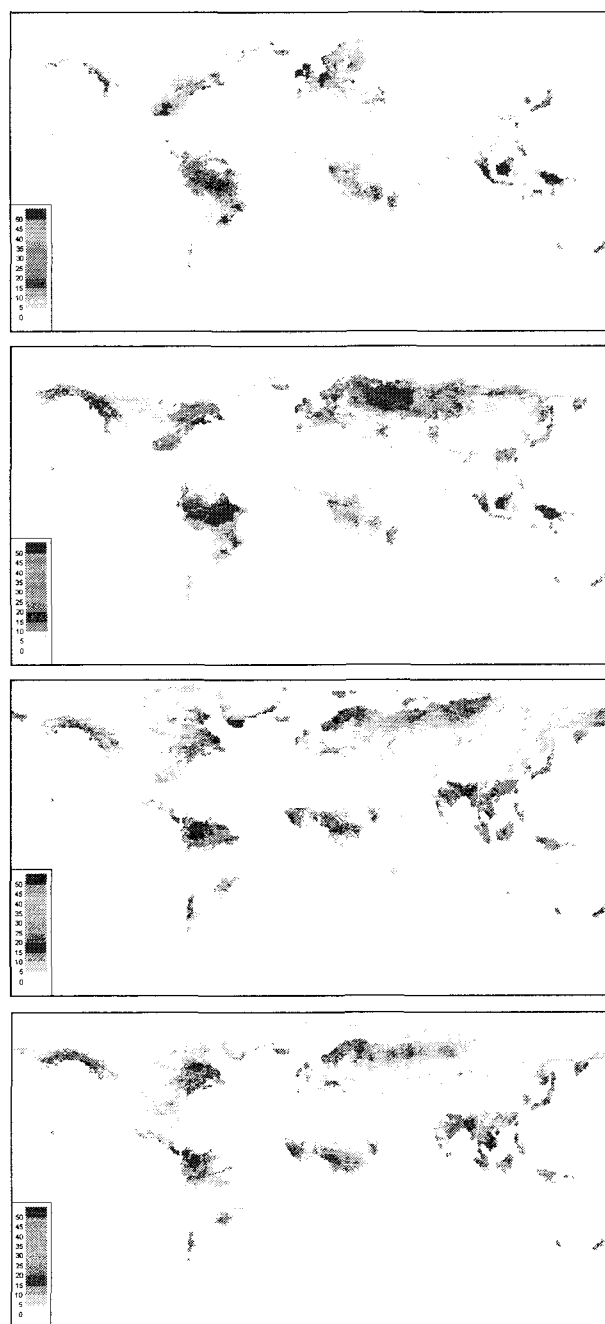


図-8 各グリッドごとの環境用水必要量推定値。上から順に、1月、4月、7月、10月を示す。

約30%、黄河では約10%が必要となっているが、Nile川やMekong川などでは非常に大きな季節変動をもっている。

さて、こうして見積もられた環境用水は、先進国途上国を問わず水資源配分に組み込まれ、他用途の取り分を減少させる。これまで降水から蒸発分を除いた水資源賦存量を基準に計算されていた水ストレスは、環境用水の分を控除することによってさらに厳しい状態に陥ることも予想される。そこで、自然流量からこの環境用水分を差し引いた河川流量を人間社会が使える水量と仮定し、単位水量あたりの居住人口を水ストレスの指標として図化したものが図-9である。人口と人間活動がほぼ飽和に

表-4 主な河川の月毎環境用水量 (mm, 下段は自然流量に対する割合)

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年間
Amazon	33.8 (36%)	37.8 (34%)	45.0 (34%)	42.2 (35%)	35.9 (36%)	25.2 (35%)	18.9 (36%)	13.2 (37%)	9.7 (35%)	10.4 (33%)	14.2 (32%)	20.1 (30%)	306.3 (35%)
Congo	9.6 (22%)	9.1 (20%)	11.7 (22%)	11.6 (21%)	9.0 (22%)	6.6 (25%)	5.8 (26%)	7.7 (27%)	11.0 (28%)	14.3 (27%)	12.6 (24%)	10.8 (23%)	119.8 (24%)
Mississippi	7.8 (23%)	5.7 (17%)	8.3 (20%)	5.7 (17%)	3.5 (14%)	2.6 (14%)	1.9 (12%)	1.5 (14%)	1.5 (12%)	1.4 (11%)	2.0 (9%)	3.7 (11%)	45.6 (16%)
Nile	0.4 (10%)	0.3 (9%)	0.3 (9%)	0.5 (9%)	0.7 (10%)	1.2 (15%)	3.7 (23%)	6.5 (24%)	5.9 (22%)	3.0 (17%)	1.2 (13%)	1.6 (10%)	24.2 (18%)
Parana	9.1 (21%)	10.0 (22%)	11.1 (22%)	7.7 (17%)	6.0 (15%)	4.0 (14%)	4.0 (18%)	2.6 (15%)	2.3 (13%)	2.7 (12%)	4.0 (17%)	5.7 (18%)	69.2 (18%)
Ob	0.3 (8%)	0.2 (8%)	8.2 (24%)	30.7 (31%)	25.4 (34%)	7.6 (31%)	3.0 (24%)	1.9 (21%)	1.8 (21%)	2.6 (24%)	1.1 (16%)	0.5 (10%)	83.4 (29%)
Yenisey	0.3 (9%)	0.2 (7%)	6.2 (19%)	12.0 (23%)	23.4 (31%)	16.9 (32%)	4.3 (22%)	2.1 (16%)	1.8 (15%)	2.1 (19%)	0.7 (11%)	0.3 (9%)	70.3 (25%)
Lena	0.2 (9%)	0.1 (7%)	1.7 (11%)	5.8 (19%)	13.5 (22%)	5.3 (17%)	2.1 (12%)	1.3 (10%)	1.2 (10%)	1.0 (11%)	0.4 (9%)	0.2 (9%)	32.8 (16%)
Niger	0.4 (15%)	0.2 (9%)	0.2 (9%)	0.6 (15%)	2.3 (26%)	4.7 (30%)	9.1 (32%)	18.2 (33%)	19.9 (34%)	11.9 (32%)	3.8 (29%)	1.2 (22%)	72.4 (31%)
Amur	0.4 (10%)	0.5 (8%)	2.4 (12%)	6.3 (18%)	5.0 (19%)	2.3 (15%)	2.6 (12%)	3.0 (12%)	2.8 (12%)	2.6 (14%)	1.5 (15%)	0.8 (13%)	30.3 (14%)
Yangtze	2.5 (20%)	2.2 (14%)	3.6 (13%)	8.1 (21%)	13.1 (29%)	14.9 (26%)	14.1 (23%)	9.0 (19%)	7.5 (16%)	5.3 (16%)	3.3 (15%)	2.3 (16%)	85.9 (20%)
Murray	0.3 (7%)	0.2 (7%)	0.2 (6%)	0.1 (1%)	0.3 (4%)	0.4 (6%)	0.8 (8%)	0.7 (8%)	0.6 (8%)	0.4 (7%)	0.3 (8%)	0.3 (7%)	4.5 (6%)
Mekong	2.0 (24%)	0.5 (11%)	0.4 (9%)	0.5 (10%)	3.7 (26%)	9.9 (24%)	24.4 (31%)	45.3 (35%)	50.9 (35%)	42.5 (35%)	16.3 (34%)	6.5 (32%)	202.8 (33%)
Huanghe	0.2 (8%)	0.2 (8%)	0.3 (9%)	0.3 (9%)	0.3 (9%)	0.6 (10%)	0.8 (9%)	0.7 (8%)	0.5 (9%)	0.5 (9%)	0.3 (8%)	0.2 (9%)	4.7 (9%)

近い基準地点としてRhine川の値 (2,452m³/year/人) を比較単位としている。これは環境用水を取り入れつつ養える人口の指標であるが、現状の人口で河川環境に与えている負荷の重大さを示しているのとすることもできる。アフリカ北部、中近東、インダス川、中国北部、ジャワ島などで大きな値がみられる。

7. まとめ

河川流量の季節変動データを元に環境用水必要量の全球推定を行った。0.5度グリッドで月単位の需要量が算出された。また環境用水を控除した河川流量と人口を比較して水ストレスの度合いを見積もった。

謝辞：本研究は独立行政法人科学技術振興機構の戦略的基礎研究推進事業、研究領域「水の循環系モデリングと利用システム」の研究課題「人間活動を考慮した世界水循環水資源モデル」の一部として行われました。ここに記して謝意を表します。

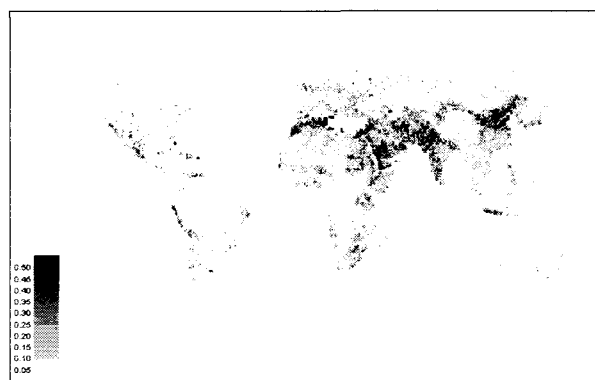


図-9 環境用水を差し引いた状態の水ストレス

参考文献

- 1) Department of Water Resources: *California Water Plan Update Bulletin 160-98*, 1998.
- 2) King, J.M., Tharme, R.E. and de Villiers, M.S.: *Environmental Flow Assessments for Rivers: Manual for the Building Block Methodology*, Water Research Commission, Pretoria, 2000.
- 3) <http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/GW/index.html>
- 4) Tennant, D.: Instream Flow Regimens for Fish, Wildlife, Recreation and Related Environmental Resources, *Fisheries*, Vol.1, pp.6-10, 1976.

(2004. 9. 30 受付)