

世界の大河川と海洋における水収支

The Water Balance of the Oceans and the Large Rivers in the World

沖 大 幹*・虫 明 功 臣*

Taikan OKI and Katumi MUSIAKE

1. はじめに

気候変動が流域水循環に及ぼす影響を考慮するためには地球規模の水循環過程におけるその流域の水収支の特徴・位置づけを知ることが基本的に重要である。しかしながら、流域平均の年降水量と年流出量とについてさえ世界の主要河川について系統的に調査した例は少なく、現在でも昭和初期に著された宮本武之輔の『治水工学』に示された値が引用されていたりする。世界中の多数の雨量観測点や流量観測点のデータを収集して処理することは従来多大な労力を必要としたが、現在では各種の情報が比較的容易に入手・解析できる。これは計算機能力の増大や自記記録測器の開発普及のみならず、全世界的な経済発展によって多くの国で継続的な観測が維持されるようになってきたこと、さらには近年の“地球環境問題”に象徴されるように国際協力の重要性が認識されてデータが広く公開されるようになりつつあるからである。本研究では現在入手可能な河川流域および海洋の水収支に関するデータを用いて年間水収支、特に降水量に対する蒸発量の割合をグローバルな水循環の視点から明らかにする。

2. 世界の河川水収支データ

まず、NGDC (National Geophysical Data Center) が作成・編集した全球5分メッシュデジタル標高データ (ETOPO5) を平均して全球2.5° (約300km) メッシュの地表面地形データを作成し、さらにもとの ETOPO5 のコンターマップや世界地図を参照しながら2.5°の各メッシュを河川流域に分類した。ここでは流域面積が100,000km²以上の70河川を識別している。これらの河川流域で全陸地面積の約55%を占めている。

降水量についてはやはりデジタルデータで配布されている0.5°メッシュの月降水量¹⁾を平均して使用した。この降水量分布は主に1920年～1980年の地上観測データ

*東京大学生産技術研究所 第5部

を収集し、quality check によって全球24,635地点を選んで経度緯度0.5°メッシュに内挿したものである。海洋上については航海日誌の天気概況と降水量との相関関係から算出している。風の影響や雨量計の濡れ、そして雨量計での蒸発などによる降水量観測の過小評価や雪の移動による増減などの効果を補正しているため、得られた全球的な降水量は従来の推定値よりも大きめであり、全球平均で1,123mm year⁻¹となっている²⁾。

河川流量については GRDC (Global Runoff Data Centre) のデジタルデータを利用した³⁾。GRDC は WMO の賛助のもと旧西ドイツのサポートを受けて長期間の流量データの国際交流を行うために運営されている。どちらかと言えば自然科学的に水文流出解析が可能な流域を対象としているが、大河川についてもその河川を代表するような河口付近の流量観測地点での値は登録されており、各河川でもっとも流域面積の大きい観測地点での値をその河川の代表値とし、水収支の算定にあたってはこの代表観測地点での流出高が2.5°メッシュで表現された流域内全体にあてはまるものとした。資料期間は河川によって大きく異なり、短いものでは3年間分しかなかったり、あっても欠測ばかりだったりするが、地点によっては100年間以上の月流量がある。

3. 世界の河川水収支算定結果

3.1 海陸別の水収支

各種デジタルデータを2.5°メッシュに統一して重ね合わせ、海陸別に集計した結果が表-1である。ここでの流出量 (D_i) は水蒸気収束量から大気水収支⁴⁾により算定しているがこの D_i には内部流域の流出量が含まれていないので、その総量は全陸地から海洋への流出量とは一致していない。Masuda⁵⁾がまとめた表と比べると次のような特徴がある。

- 陸地の面積が広く、特にアジアの面積が $5 \times 10^{12} \text{m}^2$ 多い。その分大西洋やインド洋が小さくなっている。赤道上に収束する分は計算の便宜上南半球に算入し

表1 各海陸別の年間水収支

$-\nabla_H \cdot \vec{Q}$, P , E , D_r はそれぞれ大気水蒸気収束量, 降水量, 大気水収支から算定した蒸発量および陸から海洋への流出量の年総量を示し, 単位面積当たりの水柱高(左側)と質量(右側)で示している.

	Area 10^{12} m^2	$-\nabla_H \cdot \vec{Q}$ mm year^{-1}	P	E	$-\nabla_H \cdot \vec{Q}$ $10^{15} \text{ kg year}^{-1}$	P	E	D_r
Asia	52.6	177	765	588	9.3	40.2	30.9	
Europe	11.0	144	725	581	1.6	8.0	6.4	
Africa	27.5	-57	784	841	-1.5	21.5	23.0	
N.America	27.7	263	709	446	7.3	19.6	12.3	
S.America	19.3	415	1,600	1,184	8.0	30.9	22.9	
Australia	10.7	54	915	861	0.6	9.8	9.2	
Antarctica	14.1	112	620	508	1.6	8.8	7.1	
Japan	0.7	309	1,752	1,444	0.2	1.3	1.1	
70 rivers	91	220	914	693	20.1	83.6	63.5	
Continents	163	165	852	688	27	139	112	
N.Pacific	76.6	99	1,685	1,585	7.6	129.1	121.5	8.0
S.Pacific	99.1	-64	1,396	1,460	-6.4	138.4	144.8	3.2
N.Atlantic	43.5	-282	1,120	1,402	-12.3	48.7	61.0	5.4
S.Atlantic	45.8	-193	808	1,001	-8.9	37.0	45.9	6.1
Indian Ocean	70.8	-126	1,192	1,318	-8.9	84.4	93.3	0.1
Arctic Ocean	10.6	185	325	140	2.0	3.4	1.4	3.7
Oceans	346	-78	1,273	1,350	-27	441	468	26
Global	509	0	1,138	1,138	0.0	580	580	

たので, 南北太平洋はその分ずれている.

- アフリカにおける負の値がおかしい. このため, 大気水収支から算定した蒸発量が降水量を上回ってしまっている.
- アジアおよび北アメリカの値は従来の大気水収支法による結果に比べて大きく, 流域水収支法による結果に近くなっている.
- 海洋については, FGGE/ECMWF データに基づいた結果とほぼ同様である.

降水量に着目すると, 陸上の平均降水量は 850 mm year^{-1} 程度であり, 海洋上の $1,270 \text{ mm year}^{-1}$ に比べるとかなり小さい. しかしながらその分布には偏りがある. 南アメリカの降水量が約 $1,600 \text{ mm year}^{-1}$ ときわめて高い値を持ち, 全体の平均を押し上げていることがわかる. これに匹敵する値を持つのは海洋でも北太平洋のみである. 流出量もやはり南アメリカで 400 mm year^{-1} と大きく, 他では $100 \sim 200 \text{ mm year}^{-1}$ 程度しかない. 残差としての蒸発量も南アメリカが圧倒的に大きく, 他の陸上での数 100 mm year^{-1} を大きく引き離している. このように, 降水・蒸発・流出という過程を地球規模で考えると, 南アメリカの領域において量的にはもっとも活発な水循環が行われていることがわかる.

日本とみなした陸地のみを平均した値を見ると, 日本

の降水量はまさに北太平洋の海洋上並であり, 通常の陸面に比べるときわめて大きい値であることがわかる. 通常考えられている日本の河川の流出量に比べると水蒸気収束量は 300 mm year^{-1} とかなり小さく算定され, 結果として大気水収支から求めた蒸発量が大きくなってしまっている.

また, 本研究で取り扱った70の河川流域の平均を全陸面の平均と比べると, 流出量および降水量は多めだが, 蒸発量は全陸地の平均値とほぼ同じ 700 mm year^{-1} になっている. 流出量の絶対値が降水量や蒸発量よりも小さいため結果としてその差が拡大して, 全大陸からの流出量の約75%がこの70の流域からもたらされ, 他の陸上に降る約 $55 \times 10^{15} \text{ kg year}^{-1}$ のうちの約 $49 \times 10^{15} \text{ kg year}^{-1}$ は蒸発してしまうことになる. これは年降水量の約90%が蒸発してしまうことに相当し, この(年流出量)/(年降水量)を年平均の蒸発効率とすると, 70河川平均では約70%, 陸地全体では約80%である. ここでは世界の主な大河川を選択して取り扱っているため, 降水量がやや多い陸地では蒸発効率が低い, もしくは流出率が大きい領域に大河川が分布しているということが言えよう. もちろん大河川があるために流出率が大きくなっているという説明もできる.

海洋についてみると, 太平洋において南北の差が大きい

研 究 速 報

くなっている。すなわち、平均値ではほぼ大気との間において降水量と蒸発量に差がないが、北太平洋では降水が過剰であり、逆に南太平洋では蒸発が過剰である。河川流入量 (D_r) を考慮すると、太平洋において北から南へ正味の水の年輸送が行われていることが推定される。これは Bryan ら⁶⁾の結果を用いて Wijffels ら⁷⁾が推定した結果とはまったく逆である。大西洋については逆に北大西洋の方が蒸発過剰であり、北極海の降水過剰がすべて北大西洋に入るとしてもまだ南から北への淡水輸送が行われていることになる。これも Wijffels らの結果とはまったく逆である。Bryan ら⁶⁾の結果は他の結果とはかなり異なるため⁸⁾、そのデータを用いた Wijffels らの結果よりは本研究の結果の方がより真値に近いことが期待できる。

3.2 世界の大河川の水収支

流域を識別した70河川のうち Tegwani 川および Yana 川では有効な河川流量資料がなく、Brahmaputra 川および Irrawaddy 川では降水量に匹敵する河川流量が算定されたためこれらを省き、66河川について地上観測流量を用いて年間水収支を算定した結果が図1である。それぞれの円は各河川流域の河口位置に配してあり、大きさが降水量を、黒い部分が流域水収支から算定される蒸発量の割合を表している。熱帯付近では降水量の絶対値が大きく蒸発効率は50%前後であるのに対して、亜熱帯域では降水量の大半が蒸発となり、ほとんど流出して

いない。さらに高緯度になると降水量自体が相対的に小さくなり、蒸発効率も下がって流出率が30%程度となっていることがわかる。年降水量に対して流域水収支から算定される蒸発量の散布図を示したのが図2である。プロットは30°S-30°Nの領域にある河川と30°よりも極側にある河川とが区別されていて、中高緯度河川流域では年降水量が1,000mm以下に分布してほぼその70%程度が蒸発している。これに対して低緯度河川流域には乾燥地から熱帯雨林までを含むので年降水量の幅も広く、年降水量が約1,000mm以下の場合には年降水量がほぼすべて蒸発しているが、それ以上になると年降水量が増えても年蒸発量はあまり増加しない傾向を示している。これは水の供給が蒸発量を規定している乾燥した流域と可能蒸発量で表される様な熱エネルギーの供給が蒸発量を規定している湿潤な流域との違いを明瞭に示しているものだと考えられる。

3.3 大気大循環と流域水収支

陸面上の5°四方の領域平均での年降水量と年蒸発量の散布図を図3に、各緯度帯について東西方向に平均化した陸面の水収支を図4に示す(影の棒グラフは各緯度帯における陸面の割合を表している)。図3では図2と同様に1,000mm year⁻¹付近で年蒸発量が頭打ちとなっているようすがわかる。図4には比較のため流域水収支から求めた年蒸発量を河口位置の緯度にプロットしており、ばらつきは大きいものの大気水収支法から求めた年

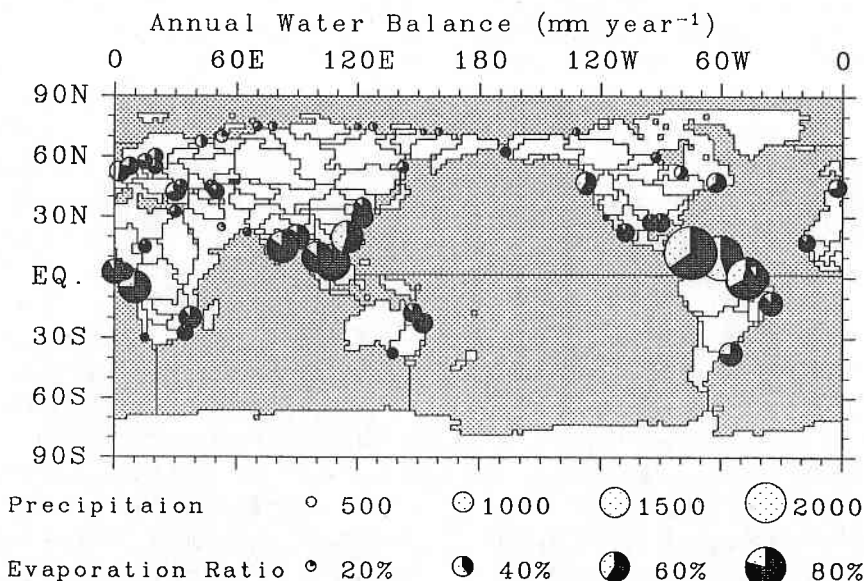


図1 世界の主要河川の年間水収支。円は河川流域の河口に位置し、大きさが降水量、その内の黒く塗りつぶした部分が蒸発量を示す

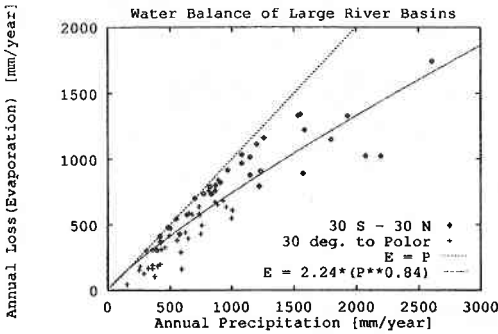


図 2 世界の66の主要河川の水収支をもとに年降水量に対して年蒸発量をプロットしてある。低緯度と中高緯度とは別のマークになっている

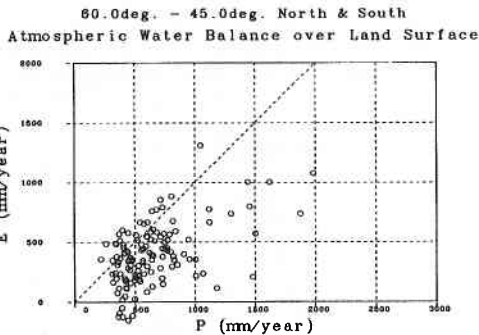


図 3 全球の5°メッシュごとでの年降水量と年蒸発量。両半球60°-45°帯での例

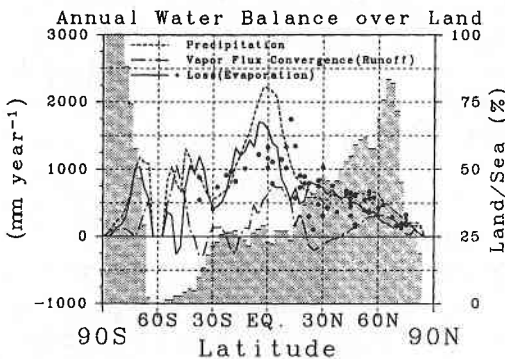


図 4 東西に平均した各緯度帯での平均年水収支。大河川の水収支から算定した年蒸発量もプロットされている

蒸発量とよい一致を示している。また日本(北緯30-40°)近辺の陸面では、東西平均的には年降水量は600mm程度でそのほとんどが蒸発してしまっているこ

とがわかる。逆に日本の平均年降水量(約1,700mm)は図4では熱帯に相当するが、平均的な年蒸発量(約700-800mm)は北緯30-40°近辺の値である。すなわち年蒸発量は緯度的には陸面の平均的な値であるが降水量が熱帯なみに多いため、結果として流出がきわめて多くなっている点が日本の河川流域における年水収支の大きな特徴であると言える。

全球的な気候変動が日本の水資源賦存量に及ぼす影響を評価する場合にはこうした特徴を考慮する必要があるだろう。

謝 辞

本研究の一部は平成4年度文部省科学研究費奨励研究(A) [代表: 沖 大幹] によりました。そして、東京都立大学の増田耕一博士、東京大学気候システム研究センターの松山 洋氏には研究の全般について多大なご協力を得ました。また、本研究で用いたデータは文中に述べた機関および研究者が収集・処理、編集・配布しているものです。ここに記して深く感謝いたします。

(1993年4月22日受理)

参 考 文 献

- 1) D. R. Legates and C. J. Willmott. Mean seasonal and spatial variability in gauge-corrected global precipitation. *International Journal of Climatology*, Vol. 10, pp. 111-127, 1990.
- 2) D. R. Legates. A high-resolution climatology of gagecorrected, global precipitation. In *Proc. Inter. Workshop on Precipitation Measurement*, pp. 519-526, St. Moritz, Switzerland, 1989. WMO/IAHS/ETH.
- 3) 松山洋, 沖大幹. GRDCとそのデータについて. *水文・水資源学会誌*, Vol. 5, No. 2, pp. 65-70, 1992.
- 4) 沖大幹, 虫明功臣, 増田耕一. 大気水収支法による地球規模での年河川流出量の算定. *水工学論文集*, Vol. 36, pp. 573-578, 1992.
- 5) K. Masuda. World water balance; analysis of FGGE IIIb data. In J.S. Theon and N. Fugono, editors, *Tropical Rainfall Measurements*, pp. 51-55. A. Deepak Publ., 1988.
- 6) F. Bryan and A. Oort. Seasonal variation of the global water balance based on aerological data. *J. Geophys. Res.*, Vol. 89, pp. 11717-11730, 1984.
- 7) S. E. Wijffels, R. W. Schmitt, H. L. Bryden, and A. Stigebrandt. Transport of freshwater by the oceans. *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 22, pp. 155-162, 1992.
- 8) 沖大幹, 虫明功臣. 大気水収支法によるグローバルな水循環モニタリング. *生産研究*, Vol. 45, No. 4, pp. 15-22, 1993.