グローバルな河川流量データセットの構築と年河川流出量の変動特性の解析

DEVELOPMENT OF A GLOBAL RIVER DISCHARGE DATA SET AND ANALYSES ON THE TEMPORAL VARIATIONS OF ANNUAL RUNOFF

沖　大幹[1]・虫明 功臣[2]

Taikan OKI and Katumi MUSIAKE

[1]正会員　博士(工学) 東京大学生産技術研究所 助教授 (〒106 東京都港区六本木 7-22-1)
[2]正会員　工学博士 東京大学生産技術研究所 教授 (〒106 東京都港区六本木 7-22-1)

A global river discharge data set was developed from various sources. Intensive quality controls were applied for the data, and climatological mean runoff for 30 years from 1961 through 1990 at 431 stations over the globe were estimated based on monthly discharge. The data set covers approximately 40% of land surface excluding Antarctica, and approximately 50% of total discharge from land to sea. Linear trends for the period and the interannual variations associated with El-Niño Southern Oscillation are investigated and their geographical distributions were presented. The data set will be effectively used for validations of global water balance estimates and investigations of global hydrologic cycles.

Key Words : *global river runoff, interannual variations, long term trend, Southern Oscillation Index, gap analysis*

1. はじめに

灌漑や飲用のみならず発電や舟運などのため、河川水資源は世界的に重要であり、温暖化による気候の変化やエルニーニョなど気候の変動に伴う河川水資源の変動を予測することが求められている。しかしながら、そうした直接の社会的要請があるにも関わらず、河川流量の変動に関するグローバルな研究は極めて限られてきていた。これは、気象データの様な国際的データ交換に関する取り決めがないことに加えて、河川流量もしくは水位が時として軍事上重要であること、あるいは国際河川などでは流量情報が国際政治に及ぼす影響が大きいこと等のために、きちんとした測定がなされていてもなかなか流量データが公表されていないからであると考えられる。自国の水資源管理のみを興味の対象とする場合にはそうした閉鎖的なデータ管理でも問題はなかったと思われるが、水資源が食糧生産、ひいては国際的な穀物取引に及ぼす影響や、地球規模の気候変動と地域の水資源変動との関係を調べるためにはグローバルな流量データセットに基づいて調査解析を行う必要がある。

一方、河川流量は広域平均の大気陸域相互作用の結果を精度良く反映している。空間上のほぼ 1 点 (の周囲) しか代表していない通常の地表面フラックス観測に比べると、河川流量は数 10km 四方から数 100km 四方といった広い領域に対応させることが可能であり、現在の大気数値モデルに組み込まれている陸面過程モデルの検証を行うのには空間スケールの適合性が良い。そこで、現在では、各国の数値気象予測モデルや研究機関の気候シミュレーション用の大気大循環モデル (GCM) に組み込まれている陸面過程モデルの検証に、河川流量が利用され始めている。

そこで、地球規模の水循環変動の調査解析、ならびにグローバルスケールの数値シミュレーションの検証用に、流量情報を収集してデータセットを構築した。ここでは主にその品質管理とできあがったグローバル流量データセットの特徴、そして新たに得られた知見について報告する。

2. 流量データの収集と処理

(1) 目的と対象データの絞り込み

これまでに研究として報告されているグローバルな流量データセット[1),2),3)]では、流出量の気候値が提示されてはいるものの、データが存在する期間の単なる平均として気候値が算定されている場合が多い。気候は変動している、という視点に立って研究をする場合には、どの期間の平均値であるかが不明なデータセット

を利用することはあまり適切であるとは言えない。

そこで、本研究では1961年から1990年の平均年流出高データセットをグローバルに整備するという目標を設定した。1961-1990年という期間にしたのは、降水量や気温などの現在の平年値がこの30年に対して定義されているからである。水収支検証の基本単位としては年がふさわしいので、データのquality checkなどには月もしくはそれよりも細かい時間スケールの情報を利用し、最終的には年値に変換した。

できるだけ地球上の陸地を広く覆うよう、また、地域的な広がりができるだけ得られる様に収集したが、グローバルスケールの変動を分解するのに適当であると考えた100,000 km^2 以上の流域面積を持つ河川の流量観測データを重点的に集めた。これは約300km×300km四方、緯度経度約2.5°グリッドに相当する。

(2) データの収集と選別

まず第一のデータソースは世界流量データセンター(Global Runoff Data Centre; GRDC)[4]である。ここでは、1997年夏の時点での索引データに基づき、5,000地点あまりの中から前節の判断基準に基づいて選出した河川について、手元にない80地点に関するデータ提供をさらに依頼してデータを入手し、合計380地点あまりにおける流量データを利用した。

次に多いのは、衛星による地表面気候値算定国際プロジェクトのCD-ROM[5),6)]に含まれる129地点の流量である。これは元々はGRDCから提供を受けたデータの様だが、アメリカの通例のwater year(10月⇒9月)に合わせて編集されている点に注意が必要である。アメリカ国内のデータに関しては、USGSのftpサイトからも入手した。3万地点近くの中から前節の基準に照らし、48地点について新たに日流量データを入手した。また、ロシア科学アカデミー地理研のA. Georgiadi氏からは主に旧ソ連の21地点における流量データを提供してもらった。旧ソ連崩壊後、1990年代以降のデータに関しては地方に散逸していたものを収集してもらい、現在データを整備中である。

さらに、全球水循環エネルギー観測研究計画(GEWEX)傘下の大陸スケール観測計画のひとつであるBALTEX(Baltic Sea Experiment)関連として、スウェーデン気象水文研究所(SMHI)のB. Carlsson氏よりバルト海沿岸10地点の流量データの提供を受けた。

そのほか、山梨大学の竹内邦良先生からは東南アジアの数地点の日/月流量データを、ブラジルのDNAEE(国立電力エネルギー局)のEurides de Oliveira氏からはアマゾン川の日流量データを提供していただいた。

(3) データエラーの修正について

前節に紹介した収集活動によって、合わせて520地点あまりの月流量が揃った。しかし、データソース間の重複もあり、また、あまりに近接している同一河道上の観測点の情報はグローバル流量データベースとしては不必要なので、緯度経度1度格子のグローバル河道網情報(Total Runoff Integrating Pathways, TRIP)[7)]上で区別できないほど近距離のものについては、データ期間が長くできるだけ現在に近い地点を優先して残すようにし、他は利用しないことにした。

この重複除去の過程で、データエラーに関するいくつかの問題点が明らかとなった。大きな問題は、同じ地点同じ年月日に対して異なる流量観測値が散見されたことである。明らかに印刷物からデジタル化する際のタイプミスと思われるものもあったが、深刻なのは系統的に違う場合である。片方からのデータが他方よりも全体として約20%大きい場合などはおそらく何らかの慣習単位系からSI単位系への換算のミスだと思われるが詳しい理由は不明である。すべて10倍違うケースは明らかに位取りの問題だと思われる。水位-流量曲線を全面的に見直し、過去のデータに関してもそれによって変更されていた場合もあった。一方で、日流量から月流量へ変換する際の平均化プログラムに不適切な点があると推定されるエラーも見いだされた。

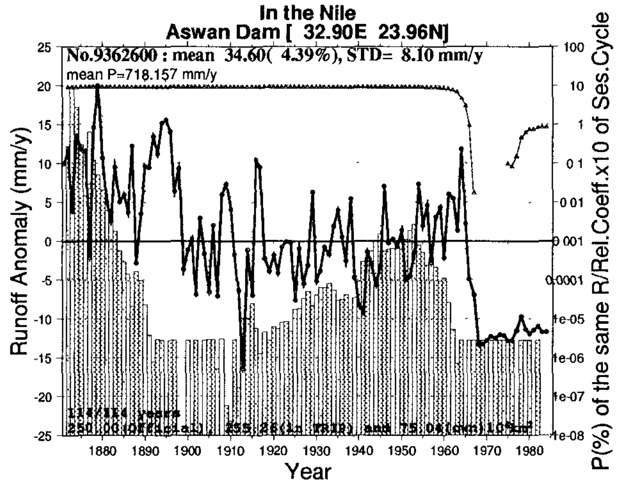
もうひとつの問題は流域面積である。異なるデータソース間で違う値を示すこともあったが、TRIP上の面積とあまりにも掛け離れている場合も少なからずあった[7)]。これらの多くについてはタイプミスであろうと推測して修正したが、ミスがあっても本来の値と大きくは違わない場合には気づかずにそのままになっている可能性がある。

明らかなエラーについては修正できるものは修正し、GRDCを含めたデータ提供機関に報告を送ったり不一致に関して問い合わせたりしているが、返答がなく原因が不明な場合もある。その際には信頼度が高いと思われる機関からの新しい方のデータを信用することにした。この様にして地点を選別した結果、467地点が残った。

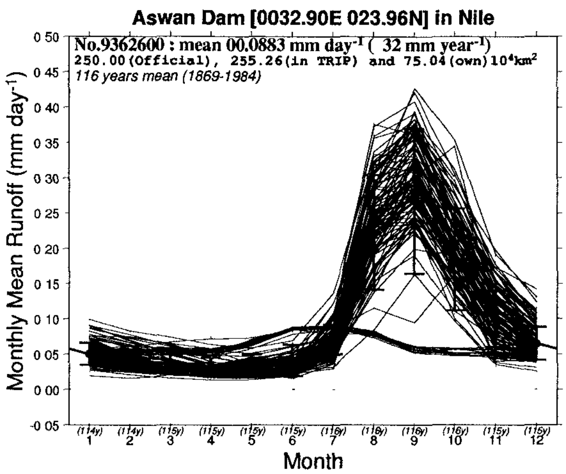
(4) 人為的影響に関する考え方

通常の水文流出解析などにあたっては、流域内の土地被覆分布とその変遷や人為的影響を考慮するのが現在では当たり前である。しかし、グローバルに河川流量を取り扱う場合には、必ずしもそうした情報をすべて入手することができるとは限らない。

そこで、時系列解析を行い、流況が不自然に大きく変化した場合を探しだし、変化が大きく明らかに人為的であると判断された場合には変化後のデータのみを



Figure–1 Checking annual runoff at Aswan Dam, Nile river. Solid line is the anomaly of annual runoff (mm/y). Triangle plots are the relation coefficeints of mean seasonal cycles between before and after the year. Bars indicate the probality that the average annual runoff before and after the year are the same.



Figure–2 Monthly mean runoff at Aswan Dam, Nile river.

利用することとした。純粋に水循環の物理過程を調べたい場合には人為的変化が影響を及ぼす以前のデータに興味が集まるかも知れないが、現実の自然を調べる、あるいは数値的に再現する、という立場からは人為的影響を含めたその後のデータこそが重要であると思われる。

データチェックは、各流量データをある年を境にそれ以前とそれよりも後の年の 2 つに分類し、両者が同じ平均値を持つとみなせるかどうかで判断した。前者を $x_i(i=1\ldots N_x)$、後者を $y_i(i=1\ldots N_y)$ として、両者の分散が異なると考えた場合には、標本分散を $v^2(x) = \frac{1}{N_x}\Sigma_{i=1}^{N_x}(x_i-\overline{x})^2$ として

$$t = \frac{\overline{x}-\overline{y}}{[v^2(x)/N_x + v^2(y)/N_y]^{(1/2)}} \quad (1)$$

で t を定義すると、この t は近似的に自由度νが

$$\nu = \frac{[\frac{v^2(x)}{N_x} + \frac{v^2(y)}{N_y}]^2}{\frac{[v^2(x)/N_x]^2}{N_x-1} + \frac{[v^2(y)/N_y]^2}{N_y-1}} \quad (2)$$

である Student の t 分布に従う[8]。この t とνを用いて $\overline{x}$と$\overline{y}$との差が有意であるかどうかを判断した。

Figure–1 はアスワンダムでの流量に対する適用例である。太い折れ線が年流出高を示し、棒グラフがその年以前の平均年流量とその年より後の平均年流量とが同じである確率を示す。統計的検定を待つまでもなく明らかに 1968 年ごろに流量が大きく減少していることがわかる。この時よりも前と後の年平均流量が同じである確率は 1.0×10^{-8}以下であり、両者が同じであるという仮説は棄却される。実際、この時期はアスワンハイダムの建設に対応している。

△がついた細い折れ線は、その年以前とその年より後のすべての年の平均月流量季節変化同士の相関係数 (×10) を示す。やはり 1968 年ごろを境に季節変化が大きく異なっていることがわかる。Figure–2 は 100 年以上にわたる月流量をすべてプロットしたものであるが、9 月に高いピークを持つ季節変化が 1968 年以前であり、6〜8 月にかけて低く緩やかなピークを持つ季節変化がそれよりも後に対応している。この様に、大規模なダムなどが建設されると流量ピークが乾季 (の終り) にシフトし、また年々の変動も小さくなっている様子が他の地点でも見られた。

Figure–1 を良く見ると、平均値が前後で同一であると見なせる確率が 1900 年ごろにも下がっている。これはちょうどアスワンダムの建設に対応しているが、貯留量 $169\times10^9m^3$ のアスワンハイダムとは異なり、貯留量が $5.0\times10^6m^3$ のアスワンダムには流量の季節変化を変えるほどの影響力はなかったものと考えられる。

この様に、平均値の同一性の検定と、季節変化などを参考にして、明らかに流況が異なっていると考えられるデータについては分割して最新の期間のみを利用することにした。そうした地点は、Volta 川、Syr-Darya 川、Paraguai 川、Saskatchewan 川、Thelon 川、Columbia 川、Ebro 川、Belaya 川などの 10 数地点にのぼった。実際にはほぼすべての河川で人為的影響を受けていると思われるが、こうしたチェックで検知できないほどの変化は無視して良いものと考えている。

(5) 欠測に対する考え方

1961〜1990 年の気候値を求めようとする場合に問題となるのは、流量データの場合、長期にわたる欠測があったり、あるいは限られた期間の情報しかなかったりすることである。厳密に言えば、30 年間のうち例え

Table–1 Summary for each continent. Number of stations used, total area, mean record of the data set, annual mean of total discharge, and annual mean runoff are presented.

Continents	No.	Year	Area 10^6km^2	Discharge m^3/s	Runoff mm/y
Africa	23	16.5	11.6	60861	165
Asia	37	16.3	19.2	165682	272
S.America	18	17.6	10.7	284420	841
N.America	27	20.3	10.5	57495	173
Oceania	8	18.4	1.6	1677	34
Europe	47	23.8	6.1	46260	239
Total	160	19.5	59.7	616394	326

ば欠測が10%、すなわち3年以下である地点を利用するべきであろうが、前節で選ばれた467地点中148地点しかこの条件は満たしていない。そこで、次のような条件を満たす地点については残すことにした。

(i) 集水面積が10,000km^{2}以上であること

(ii) データ平均と、線形回帰を当てはめてデータ補完した場合の平均値との差がデータ平均の25%以内もしくは10mm/y以内であること

(iii) 最低4年以上はデータが揃っていること

(iv) データ平均値の信頼度が100%以内であること。

ただし、全球土壌水分プロジェクトの対象年である1987-88年に観測データが揃っている地点については無条件に採用した。線形回帰のあてはめは年Yに対して流量Rを回帰する$R = a + bY$とした。通常の河川ではデータ平均の25%という閾値で充分であろうが、乾燥地河川ではデータ平均5mm/yに対して線形回帰を当てはめた場合の平均が7mm/yといった地点があり、これは100mm/yと120mm/yの差よりも軽微であると判断されるので、相対誤差と絶対誤差の両方を基準として設けた。最低記録期間については、現在良く知られている年々変動がエルニーニョに伴う南方振動でその周期が2〜4年であるので、4年あれば最小限必要な年数に足りると判断した。年流量の正規分布を仮定すると、データ平均$\overline{R_d}$、不偏分散から求めた標準偏差$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{(N-1)}\Sigma_{i=1}^{N}(x_i - \overline{x})^2}$、データ年数$N$から平均値は95%の信頼区間で$\overline{R_d} \pm (2\hat{\sigma}/\sqrt{N})$に入ると考えられるので、データ平均値の相対誤差は

$$相対誤差 = 100 \times \frac{2\hat{\sigma}/\sqrt{N}}{\overline{R_d}} \ (\%) \qquad (3)$$

であるとした。しかし、この相対誤差は年数のみならず、年流量の自然変動の大きさにも深く関係しており、欠測による誤差だけを反映しているわけではない。従って、あまりに相対誤差が大きいもの(100%以上)だけを除外することにした。実際、すでに知られているように、オセアニアの河川流量の変動は他の大陸に比べて大きく[9]、年々変動の標準偏差が平均年流出量よりも大きい地点さえあった。

3. 構築されたデータセットの概要

前節までに示した吟味の結果、431地点が最終的に1961-90年の気候値算定用に選ばれた。同一河川中に複数の観測地点がある場合もあるので、河川数では160河川となる。これらあわせて約6×10^{7}km^{2}の集水面積を持ち、南極を除く陸地の約40%をカバーしている。各160河川のもっとも河口に近い地点の流量を用いてそれらの面積重みつき平均流出高を大陸別、およびデータセット全体に対して求めた結果がTable–1である。各大陸ごとの流量をPerry et al.[3]と比較すると、AfricaやSouth America、そしてEuropeはほぼ同程度の推定値となっているが、AsiaやNorth America、OceaniaではTable–1の値はPerry et al.のFigure 2よりも少なくなっている。これは、我々が流域面積の大きな河川を主に対象としたのに対して、Perry et al.が流量の大きさを基準として収集したためである。GRDCカタログ中に含まれていても小河川であることとデータ期間が短いために入手していない河川が年平均流量1,000m^3/sのものだけで14地点あり、うち6河川約10,000m^3/s分がカナダの河川であった。また、インドネシアやパプアニューギニアの河川は面積自体は小さいにも関わらず極めて流量が多いが、我々のデータセットには全く含まれていない。この領域では主要8河川だけでも20,000m^3/sを越える流出量が観測されており、今後収集の必要がある。

今回のデータセットの全平均流出量は326mm/yであった。これは、世界の70の大河川に対する水蒸気収束量(長期間平均では流出高に等しくなる)300mm/y[10]にほぼ等しい。一方、全大陸への水蒸気収束量244mm/y[10]は12.6×10^{5}m^3/sに相当し、本データセット中の全流出量約6.2×10^{5}m^3/sでは地球上の全河川流出量のほぼ半分を把握していることになる。

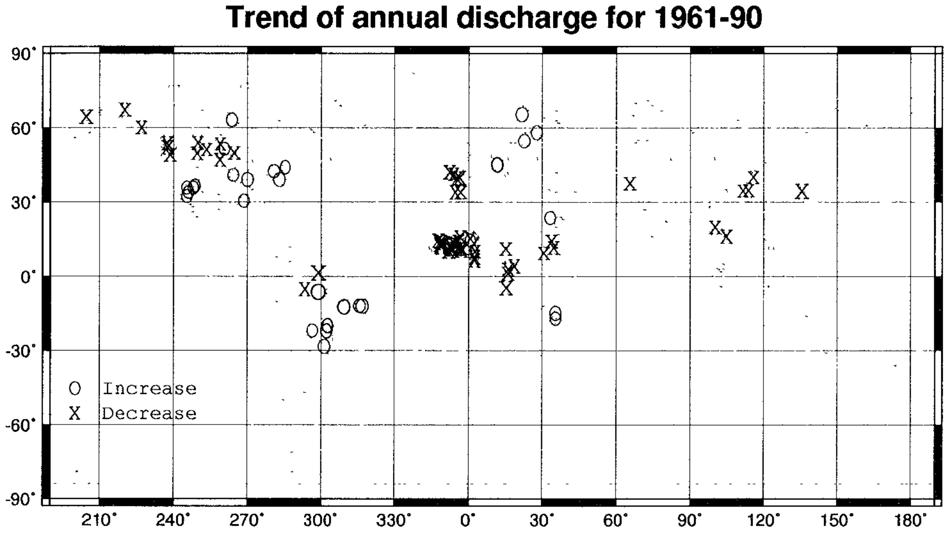
4. 変動特性

(1) 長期変動

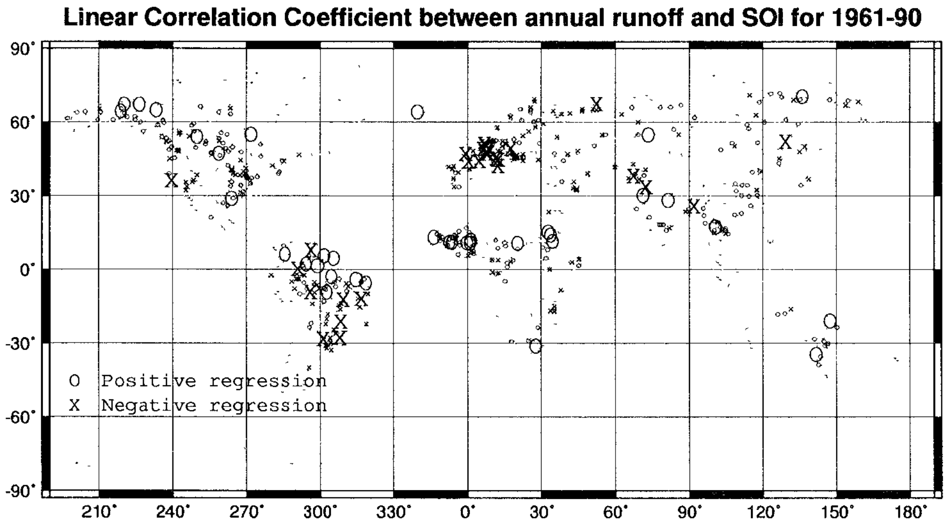
はじめに、長期トレンドについての結果を示す。ここでは、データのquality checkの際とは違い、トレンドの有無の判断基準を設けた。まず、データが対象期間の半分の15年分以上あることとした。$R = a + bY$と線形回帰を当てはめた場合の傾きbの不偏分散は、$\Delta \equiv SS_{xx} - (S_x)^2$、$S \equiv \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{(\sigma_i)^2}$、$S_x \equiv \sum_{i=1}^{N} \frac{R_i}{(\sigma_i)^2}$、$S_{xx} \equiv \sum_{i=1}^{N} \frac{R_i^2}{(\sigma_i)^2}$、を用いて

$$\sigma_b^2 = S/\Delta \qquad (4)$$

から求めた[8]。ここにσ_iはR_iの不確かさで、R_iに比例すると考えて一律に各年流量の15%と置いた。こうしてσ_bが求められると、$b/\sigma_b > 2.0$の時トレンドがない



Figure–3 Trend of annual runoff for 1961-90.



Figure–4 Linear correlation coefficient between annual runoff and SOI for 1961-90. Positive regression indicates runoff is less than normal for El Niño year.

(b=0) とする仮説は95%の有意水準で棄却できる。

棄却された (トレンドがないとは言えない) 地点の分布を Figure–3 に示す。ミシシッピ川やパラナ川など北アメリカや南アメリカの東南部では増加傾向、逆に東北部では減少傾向にあり、中部〜東北ヨーロッパは増加傾向だがアフリカとイベリア半島、アジアでは減少傾向にあることがわかる。西アフリカのニジェール川の流量の長期的減少については別途報告した通り土地被覆変化と密接に関係している可能性がある[11]。

また、各河川の河口にもっとも近い地点で、トレンドが検知された地点だけを集計すると、増加と減少とはちょうどバランスしていた。すなわち、全体としては 1961-90 年で大陸から海洋への流出量にはほとんど変化が見られないであろうということが推定された。

(2) 年々変動

最後に、数年スケールの変動について、特に ENSO(El-Niño Southern Oscillation) との関係について示す。ここではタヒチとダーウインの地上気圧差の偏差に基づく Southern Oscillation Index (SOI) を歴年で平均し、1961-90 年について正規化して各地点の年平均河川流出高との線形相関係数 r を算定した。SOI と流出高が 2 次元正規分布をしていると仮定すると、有効データペア数 N に対して

$$t \equiv r\sqrt{\frac{N-2}{1-r^2}} \tag{5}$$

で算定される t は自由度 $\nu = N - 2$ の Student の t 分布に従うので、この相関係数 r が有意であるかどうかは棄却率 $A(t|\nu)$ を利用して検定することができる[8]。ここで $A(t|\nu)$ は自由度 ν の Student の分布関数である。

Figure–4 には、こうして得られた相関係数の正負の分布を示す。○が正の相関を、×が負の相関を示し、小さい記号は上記 t 検定により相関が 5% の棄却率で有意であるとは認められなかった地点をそれぞれ示す。SOI が負の時がエルニーニョ年に対応するので、正の相関はエルニーニョ年に流出量の少なくなる地点を意味する。

南アメリカについては良く知られる ENSO に伴う降雨パターンを反映して、東北部では正の相関 (エルニーニョ時に乾燥)、その南西部では逆となっている。アフリカのナイル川やニジェール川などには有意な正の相関が認められ、逆にヨーロッパでは負の相関となっている。正負の相関の分布は地域的にまとまっており、意味のある興味深い結果が得られたものと考えられる。今後は、降水量変動との関係や、ラグ相関を調査して、ENSO の観測 (および予測) に基づく流量の予測がどの程度可能であるかを明らかにする必要があるだろう。

5. おわりに

グローバルな大気モデルなどとともに数値的に河川を取り扱う研究には、従来利用されてきた要素の他に

(i) 河川流路網
(ii) 河道流下モデル
(iii) 河川流量データ

が必要であり、いわばこれらがデジタル河川の 3 要素である。ここでは、従来体系的にはなかなか整備されてこなかったグローバルな流量データセットを作成した。データ期間をはっきりさせた点、データの品質管理に特に注意を払った点、さらには地理情報と結び付けられていて流出高の面的分布に変換可能な点などがこのデータセットの特徴である。得られたデータセットに基づいて年河川流出高の時間変動について基本的な解析を行い、30 年スケールの長期トレンドや、エルニーニョ南方振動に伴う年々変動などについてグローバルな分布を示すことができた。今後は、さらに調査解析をすすめ、グローバルな水循環とその変動についてさらなる知見を得たいと考えている。なお、本論文で示したデータセットの利用に関しては第一著者に御連絡いただきたい。

謝辞： 本研究は文部省科学研究費『グローバルな陸面水収支算定値の検証とデータベースの構築』(代表:東京大学生産技術研究所、沖 大幹) ならびに日本学術振興会 未来開拓研究推進事業『環境負荷の影響評価と軽減』(代表:東京大学生産技術研究所、虫明功臣) の成果の一部である。ロシアからの流量データのフロッピーディスクベースでの受け渡しにあたっては、立正大学の門村浩先生ならびに北海道大学の大畑哲夫先生にお世話になりました。ここに記して深く謝意を表します。

参考文献

1) 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.
2) L. Dümenil, K. Isele, HJ Liebscher, U. Schröder, M. Schumacher, and K. Wilke. Discharge data from 50 selected rivers for GCM validation. Technical report, Max-Planck-Institute for Meteorology, Hamburg, 1993.
3) G. D. Perry, P. B. Duffy, and N. L. Miller. An extended data set of river discharges for vlidation of general circulation models. *J. Geophys. Res.*, Vol. 101, No. D16, pp. 21339–21394, 1996.
4) GRDC. Second workshop on the global runoff data centre. Report 1, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Federal Institute of Hydrology, Germany, Kaiserin Augusta-Anlagen 15-17, 56068 Koblenz, Germany, 1992. pp. 96.
5) B. W. Meeson, F. E. Corprew, J. M. P. McManus, D. M. Myers, J. W. Closs, K.-J. Sun, D. J. Sunday, and P. J. Sellers. ISLSCP Initiative I — global data sets for land-atmosphere models, 1987-1988, 1995. Published on CD-ROM by NASA (USA_NASA_GDAAC_ISLSCP_001 - USA_NASA_GDAAC_ISLSCP_005).
6) P. J. Sellers, B. W. Meeson, J. Closs, J. Collatz, F. Corprew, D. Dazlich, F. G. Hall, Y. Kerr, R. Koster, S. Los, K. Mitchell, J. McManus, D. Myers, K.-J. Sun, and P. Try. An overview of the ISLSCP Initiative I — global data sets, 1995. On: ISLSCP Initiative I — Global Data Sets for Land-Atmosphere Models, 1987-1988, Volume 1-5. Published on CD-ROM by NASA. USA_NASA_GDAAC_ISLSCP_001. Overview.doc.
7) T. Oki and Y. C. Sud. Design of Total Runoff Integrating Pathways (TRIP) – A global river channel network. *Earth Interactions*, Vol. 2, , 1998. [Available on-line at http://EarthInteractions.org/].
8) W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery. Numerical Recipes in C (日本語版). 技術評論社, 1993. 丹慶勝市・奥村晴彦・佐藤俊郎・小林誠 (訳).
9) B. L. Finlayson, T. A. McMahon, R. Srikanthan, and A. Haines. World hydrology:A new data base for comparative analysis. In *Proc. Hydrology and Water Resources Symposium*, pp. 288–296. Griffith University, Brisbane, 1986.
10) 沖大幹, 虫明功臣, 松山洋, 増田耕一. 大気水収支と地球規模の水循環. 土木学会論文集, Vol. No.521/II-32, pp. 13–27, 1995.
11) 沖大幹, Y. Xue. グローバルな河川流路網情報 (TRIP) を用いた 1980 年代アフリカサヘルにおける干魃の GCM 実験. 水文・水資源学会 1998 年研究発表会要旨集, pp. 100–101, 1998.

(1998. 9. 30 受付)