

地球温暖化からみた水文環境の変化

森 和 紀*

Changes in Hydrological Environment from the Viewpoint of Global Warming

Kazuki MORI*

Abstract

Changes in the components of hydroclimatological characteristics including precipitation, evapotranspiration, and runoff over the last 100 years were investigated in the Kiso, Nagara, Ibi, and Kumozu River Basins as a case study. Annual precipitation in the study basin has tended to decrease since the first half of the 1970s. On the other hand, the smooth trend curve indicates that annual evapotranspiration has increased over the long term, especially since the 1980s. Smoothed secular changes in the difference between annual values of precipitation and potential evapotranspiration are analogous to those of annual precipitation. The average annual runoff ratio for each year has also shown a tendency to decrease during the last few decades. It is pointed out that the notable characteristics of current frequency-magnitude distributions in annual precipitation are both a reduction of intervals of hydrological extremes and an increase of range in each year. Under conditions of extreme meteorological events that increased air temperature in the summer of 1994, river water quality showed a remarkable change compared to its average value in a normal year. The most striking feature due to high temperature was a very low value for the concentration of dissolved oxygen, especially in July and August. The facts identified in the present study provide a meaningful perspective of the possible consequences of global warming for hydrological processes, and are also useful basic data for evaluating the effects of future climate change on the aquatic environment.

Key words : hydrological environment, global warming, water balance, water quality

キーワード : 水文環境, 地球温暖化, 水収支, 水質

I. はじめに

21世紀に潜在的に不足する資源の第一は“良質で安定した水”であるとの指摘がある今日、水文環境の保全と水資源の持続可能な利用は、危機管理の一環として現代社会が早急に解決を必要とする課題の一つである。因みに、今世紀に地球上で起こりうる大規模な紛争の要因を可能性の高い順に列挙すれば、水資源・石油・宗教・民族・難

民であるとされ、水質汚染と水不足に代表される水文環境の負の方向への変化とそのフィードバックは、今日の国際社会にとって人類の生存を脅かす制限因子の筆頭として捉える必要がある（例えば、Ward, 2002; パーロウ・クラーク, 2003; 浜田, 2003; 村上, 2003）。このように、地球上における水の存在そのものが質と量の両面で大きな関心の的となっている現在、人間活動に伴う水文環境の変化の実態を定量的に把握することは、現実

* 日本大学文理学部地球システム科学科

* Department of Geosystem Sciences, College of Humanities and Sciences, Nihon University

的な社会や地域とのかわりにおいて今後ますます重要になると考えられる。

一方、グローバルな気候変動、とくに地球温暖化が地域の水文環境に及ぼす影響は、量の変化が質の変化に転化することにおいて、その機構の解明におも不確実な要素を多く残す課題の一つであり、事実を検証し要因を明らかにするためには、水循環を中心的な概念に据え、さまざまな時空間尺度における異なる水文気象条件の下での比較研究の成果の集積が必要である。流域規模の水文環境に与える地球温暖化の影響に関する従来の研究は、その主たる着眼点から以下の二つに大別することができる。その第一は陸水の水温・水質に及ぼす影響に関する解析例であり、河川 (Arnell, 1996; Mori, 1998)、および湖沼 (Blumberg and DiToro, 1990; McCormick, 1990) を対象に、地球温暖化に伴う水温構造や水質の変化について検討が加えられている。第二は陸水の賦存量の変化に関する検討事例であり、流域を単位とした河川流量や降雪量の将来予測についての解析があげられる (Kundzewicz and Somlyódy, 1993; Mori, 1996; Kašpárek, 1998)。

基礎資料となる降水量と気温の観測値について、経年変化の地域特性を実測データに基づき把握することのできる時間の長さは、日本では120年程度、西ヨーロッパでは約250年である。水文気象要素の経年変化に関する解析にとっては、日平均気温にみられる新旧データの均質性 (homogeneity) および都市化や観測地点の移動に伴うローカルな影響の判別に関する検討が不可欠である (Lorenz, 2000)。地球規模の変動要因から地域規模の要素を抽出する上での問題点は、利用範囲が近年広がりつつある水文データベースの利用においても共通した事項であると考えられる。

日本の気象官署において1994 (平成6) 年の6月から8月にかけて観測された3ヶ月間の平均気温は平年値より最大で2.0 高く、日照時間が平年値の140%に達するなど、観測史上記録的な高温現象が出現した。一過性であるとは言え、この時の気温上昇が陸水の水温・水質と生態系に影

響を及ぼした事実は、地球温暖化が誘引となって将来引き起こされると考えられる水文環境への長期的な影響を事前に評価することの重要性を示唆するものであった。各河川の水文気象特性を流域単位で把握する上で必要となる降水量と気温については、対象地域を広域的にカバーすることができるような範囲について、個々の観測地点の値に基づく全域の平均値を求めることが重要である。

本稿では、1994年夏期に生じた上記の典型的な事象に着目し、気温と日照時間が共に国内で最高値を記録した中部日本 (長野・静岡・岐阜・愛知・三重の5県) を対象地域として選定し、木曾川・長良川・揖斐川と雲出川の流域について考察した。この小論は、メソスケールにおける年単位の降水量・蒸発散量・流出量の長期変動に関する特徴を湿潤温帯気候下に位置するわが国の河川流域を事例に描出すると共に、典型的な気温上昇現象に伴う河川水質の変化を明らかにすることを目的とする。

II. 水収支の各要素の長期変動傾向

1) 年降水量

木曾三川流域 (面積7,486 km²) における1895年以降の年降水量の経年変化を図1の上部に示した (森, 2006)。なお、年降水量の値については、流域全域の代表値としての意味を持つ面積降水量を等値線法により算出し、図化した。反復移動平均値により表わされる長期変化の傾向が示すように、年降水量の変動は5~6組の極大値と極小値の繰り返しによって特徴づけられ、1940年代後期と1970年代前期を境として、それぞれ減少・増加・減少の3期に大別することができる。

同じく図1の下部には、旧ソビエト連邦の国土全域を対象とした旱魃係数の推移を示した (山本, 1993を一部改変)。ここで旱魃係数とは、「少雨高温 (年降水量が平年値の80%以下であり、かつ年平均気温が平年値より1 以上高温) の地域の面積が占める比率」と「多雨低温 (年降水量が平年値の120%以上であり、かつ年平均気温が平年値より1 以上低温) の地域の面積が占

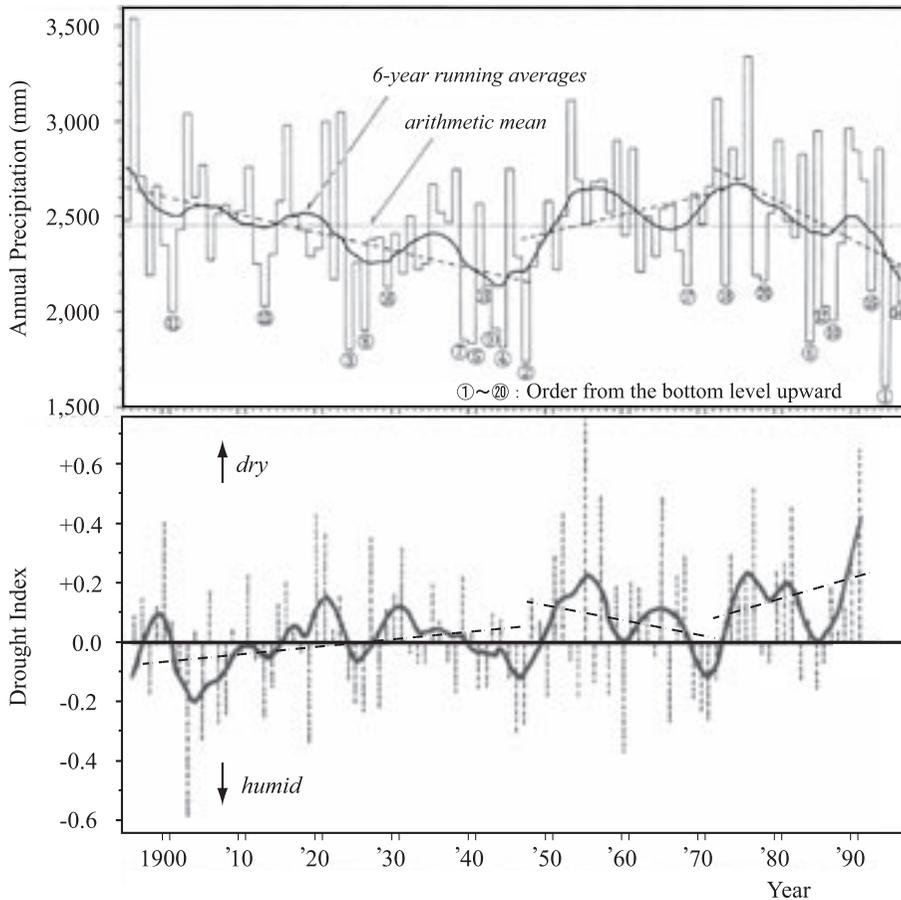


図 1 木曾川・長良川・揖斐川流域における年降水量（上）・旧ソビエト連邦における旱魃係数（下）の経年変化（山本, 1993; 森, 2006）。

Fig. 1 Secular changes in annual precipitation in the Kiso, Nagara and Ibi River Basins (upper), and drought index in the former Soviet Union (lower) (Yamamoto, 1993; Mori, 2006).

める比率」との差と定義される値である。比較対象とする地域スケールには大きな差異があるものの、木曾三川流域における年降水量の変化傾向と旱魃係数の経年変化とを1890年代以降の約100年間について相互に対照させると、先に指摘した3期に大別される年降水量の減少・増加と旱魃係数の上昇（乾燥化）・低下（湿潤化）とはそれぞれ年代の上で整合していると判断される。なお、中央アジアの乾燥地域に位置するアラル海やアイディン（艾丁）湖・エビ（艾比）湖等の湖沼にお

いて近年報告されている湖水位の顕著な低下現象は、灌漑用水としての取水量の増加に伴う流入河川の流量減少が大きな要因となって生じている人為的な要素が大きく（渡辺, 2004; 綿抜ほか, 2006）気候変動による結果とは区別して考察する必要がある。

10年単位で算出した年降水量の変動比（各10年単位の標準偏差に対する全統計期間102年間の標準偏差の値）を指標に経年変動の特徴について検討してみると、1960年代後半以降は変動比

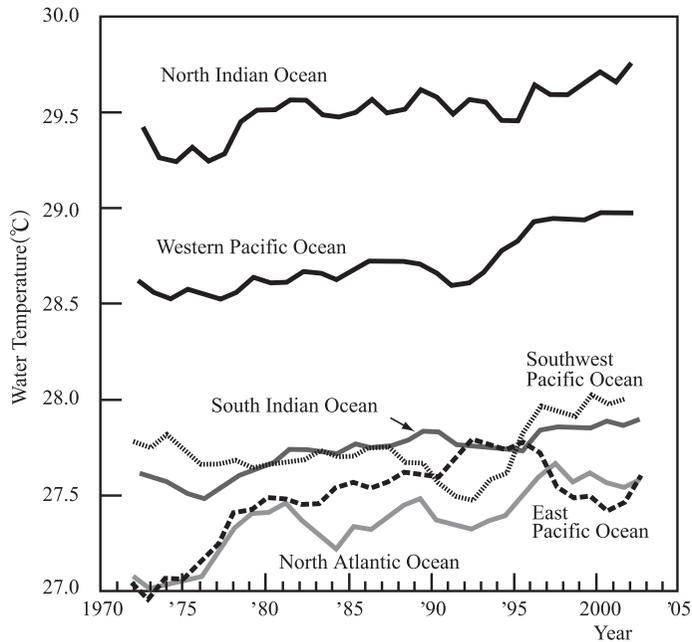


図2 主な海域における熱帯低気圧発生期の海面温度の経年変化 (Webster *et al.*, 2005)。

Fig. 2 Secular changes in sea-surface temperature during the respective tropical cyclone seasons for the principal ocean basins (Webster *et al.*, 2005)

が 1.0 を超える値が継続しており、とくに 1980 年代後半からの 10 年間には既往最大値である 1.3 が記録されていることがわかる (森, 2000)。年降水量の時系列分布にみられるこれらの特徴は、近年、年降水量の極値が生じる生起頻度の増加と変動幅の増大が顕著となりつつある事実を表わすものである。図 1 の上部には合わせて、年降水量の既往最小値からの順位が 20 位まで表示されており、1970 年代以降に少雨の生起頻度が高いことは、中緯度を中心に陸域において近年認められる降水量の減少傾向との共通性があるものと考えられる。

一方、地点降水量でみた極大値の記録には熱帯低気圧の挙動が大きく関与しており、2005 (平成 17) 年 8 月 25 日から 8 月 29 日にかけてマイアミとニューオーリンズ両市に上陸したハリケーン Katrina による甚大な被害は今なお記憶に新

しい。日本近海においても、2000 年以降における台風の日本列島への接近数は過去の平均値を上回っており (気象庁, 2005) 熱帯低気圧の発生数と発達規模の増大には近年における海面水温の上昇が深くかかわっていると考えられる。図 2 は、全球規模で実施されている海水温の観測結果に基づき、熱帯低気圧が発生する世界の主な海域別に、夏期の海面温度の経年変化を移動平均値により示したものである (Webster *et al.*, 2005)。図から明らかなように、1990 年代以降、熱帯低気圧発生域における海面温度は上昇傾向にあることが読み取れ、熱帯低気圧の発生頻度・成長との因果関係が示唆される。

2) 蒸発散量

図 3 は、伊勢湾に流出する一級河川雲出川の流域を対象に、1890 年以降における年蒸発散量の長期変化の様相を、年平均気温の変化と共に図

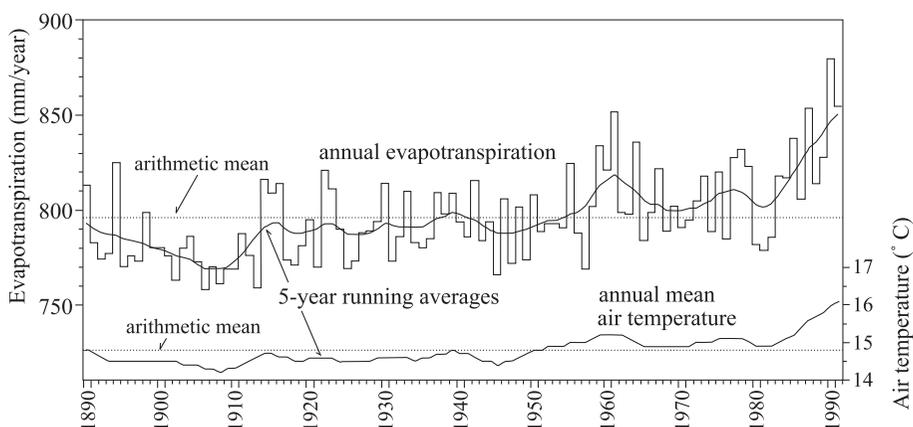


図 3 雲出川流域における年平均気温と年蒸発散量の長期変化 (森, 2000)。

Fig. 3 Long-term changes in annual mean air temperature and annual evapotranspiration in the Kumozu River Basin (Mori, 2000).

示したものである (森, 2000)。蒸発散量の算出にあたっては、1 年を単位として植生の密な湿潤地域に適用することが可能な Thornthwaite (1948) の方法により、月平均気温を基礎資料として求めた。対象地域における年蒸発散量の値は 758 ~ 880 mm の範囲内にあり、算術平均値は 796 mm である。反復移動平均値による平滑化された傾向曲線が示すとおり、年蒸発散量は約 100 年間の統計期間を通じ増加傾向にあることがわかる。さらに細かくみると、算術平均値を大きく下回る期間が 1910 年代前半まで続いた後、1950 年代半ばまでの約 40 年間は、大きな変動を伴わない平均値よりやや低い値の時期が継続した。しかし、それ以降については、1960 年代初期に極大値が出現した後に増加に転じ、とくに 1980 年代以降に認められる増加傾向が顕著な特徴である。

観測データを入手することが可能な年代より以前に遡ることのできるさまざまな時間尺度における気温の復元は、気候変動を解明する前提の基礎資料として重要である。図 4 は、古気温の復元に関する多くの手法の一例として、北半球の温帯と亜寒帯を対象に、年輪に基づき明らかにされた西暦 800 年以降における気温の長期変化を平年

値との偏差として表示したものである (伊藤, 2003 に加筆)。図中には合わせて、諏訪湖で御神渡りが記録された期日が表示されており、とくに 1700 年代以降における両指標は比較的良好な整合を示す。諏訪湖の結氷日数と冬期の平均気温の間には有意な相関の認められることが指摘されており (新井, 2000)、15 世紀まで遡ることのできる御神渡りの記録は、気候変化に関する継続的な資料として極めて貴重である。

3) 流出量

年流出量の値は、水収支の対象とする時間の長さを十分に長くとることにより、年降水量 [P] と年蒸発散量 [ET] との差として算出することができる。なお、計算に際しては、降雪と融雪の影響を排除するため、4 月から翌年 3 月にかけての 12 ヶ月間を 1 水文年として設定した。水収支を構成するこれら 2 要素の差から求めた年流出量 [P-ET] を指標に、雲出川流域における 1890 年以降の経年変化を図 5 に示す (Mori, 1996)。図中には、年単位にみた水収支各要素の対応関係が理解できるよう、年降水量・年蒸発散量の経年変化についても合わせてグラフ化した。水収支に基づく年流出量の算術平均値は 934 mm であり、年降水量の変動幅に対し年蒸発散量のそれが相対

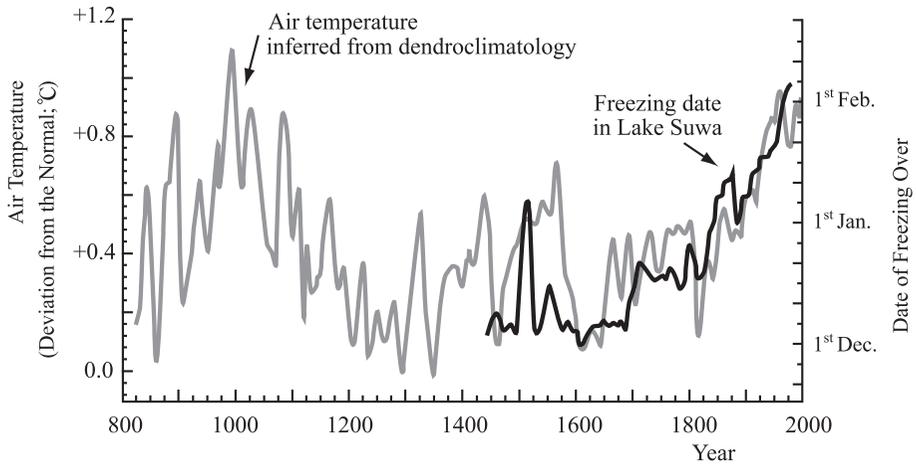


図 4 温帯および亜寒帯の気温と諏訪湖における御神渡り観測日の長期変化 (伊藤, 2003 に加筆).

Fig. 4 Long-term changes in air temperature in temperate and subpolar regions, and observed data for " O-miwatari " in Lake Suwa (modified from Ito, 2003).

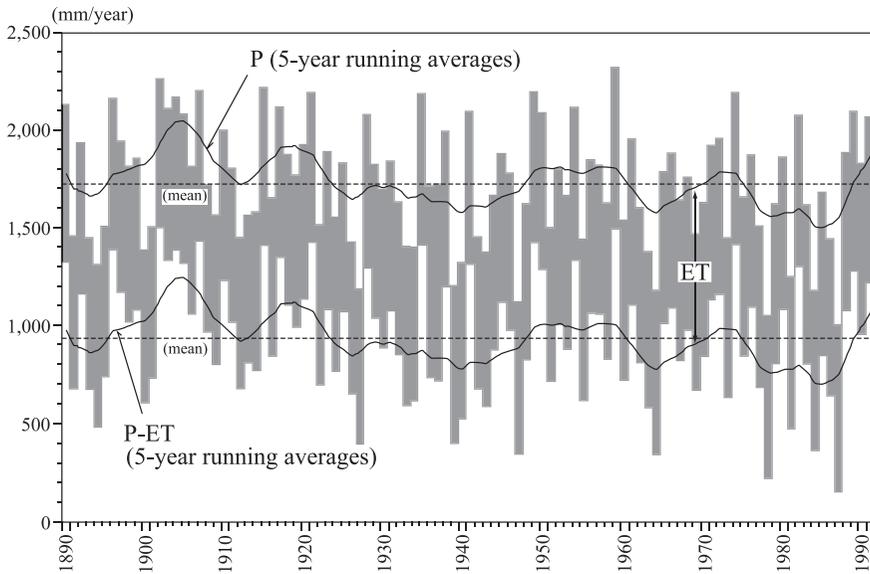


図 5 雲出川流域における年降水量 [P] と年流出量 [P-ET] の経年変化 (森, 1996).

Fig. 5 Secular changes in annual precipitation [P] and annual runoff [P-ET] in the Kumozu River Basin (Mori, 1996).

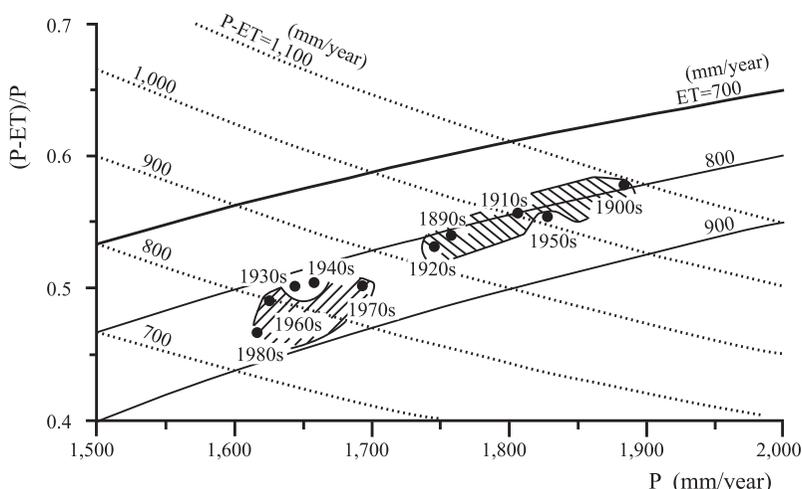


図 6 雲出川流域の 1890 年以降における 10 年単位の平均値でみた年流出率 $[(P-ET)/P]$ と年降水量 $[P]$ との関係 (森, 2000 に加筆)。

Fig. 6 Relationship between annual runoff ratio $[(P-ET)/P]$ and annual precipitation $[P]$ in the Kumozu River Basin for the average value of each decade since 1890 (modified from Mori, 2000).

的に小さいことにより、年流出量の経年変化の特徴は年降水量に支配されていることがわかる。

次に、上記の手法により得られた年流出量 $[P-ET]$ に基づき、年流出率 $[(P-ET)/P]$ を計算した。各年の年流出率の値を 10 年ごとに平均し、対応する 10 年単位の年降水量 $[P]$ の平均値との関係、およびその推移を明らかにすることを目的に図 6 を作成した (森, 2000 に加筆)。この図の中で、年流出量 $[P-ET]$ は右下がりの平行な点線によって、年蒸発散量 $[ET]$ は右上がりの実線によってそれぞれ表示されている。図に示されるように、過去 100 年間ににおける年流出率の各 10 年単位の平均値は、統計期間初期の 1890 年～1920 年と終期の 1960 年～1980 年の対極的な二つのグループに分かれており、年流出量と年流出率の両要素が相対的に近年低下傾向にあることが認められる。降雨 流出過程に関するこのような経年変化の特徴は、希釈機能の低下に伴う河川水質への影響を示唆するものと考えられる。

続いて、河川流量の経年変化の傾向を観測値に

基づき検討する。先に述べた年降水量の経年的な減少傾向は、直接流出との関連性が比較的低い低水ないし湧水の河川の流況に相対的に大きな影響を与えられられる。図 7 には、木曽川 (国土交通省定常第一種犬山流量観測所) における年平均流量と低水流量・湧水流量の 1951 年以降の変化を、いずれも比流量として表わした (各年の「流量年表」に基づき図化)。流量の長期間にわたる変化の要因について考察するにあたっては、流域における土地利用の変化や下水道普及率に代表される人為的な影響に関する検討を欠かすことができないが (Wilhite, 2004)、直線で回帰される低水比流量と湧水比流量は共に経年的に減少傾向にあることを示しており、前述の水収支に基づく流出量の長期変化と整合する結果が認められる。

III . 高温・少雨が河川水質に与える影響

気温の上昇現象は、一般に降水量の減少に伴伴される場合が多い。河川水質に及ぼす気温上昇の影響を明らかにする目的で、前述した 1994 年夏期における木曽川の事例について、水質の平均的

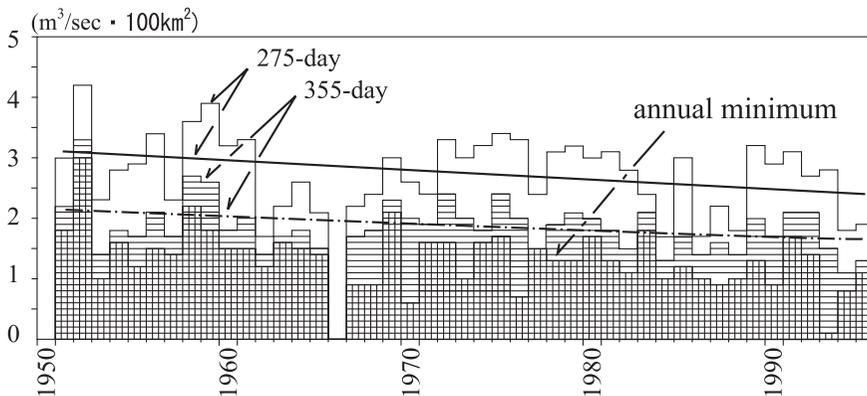


図 7 木曽川における比流量の経年変化(「流量年表」のデータに基づき作成)。

Fig. 7 Secular changes in specific discharge of Kiso River (drawn based on original data from "River Discharge Year Book of Japan").

な性状と月単位で比較検討することを試みた。河川水温と気温の月平均値の間に有意な正の相関が認められることから判断できるとおり (Webb, 1992) 基底流出が直接流出に対し量的に大きな比率を占める流域を除けば、地球温暖化は河川水温の上昇に明らかな影響を与えるものと考えられる。

図 8 には、木曽川 (国土交通省犬山水質観測地点) における月平均流量と河川水の BOD・溶存酸素・懸濁物質の周年変化を、1994 年と 1984 ~ 1993 年 10 年間の平均値とを比較する形で図示した (国土交通省の資料に基づき作成)。1994 年には、夏期を中心とする BOD の上昇 (図 8b) と溶存酸素の低下 (図 8c) が現れ、河川水質の悪化が顕著に生じたことが読み取れる。これに対し、懸濁物質については、少雨に伴う出水頻度の減少により、むしろ濃度が低下した事実 (図 8d) が認められた。1994 年夏期に観測された河川水の溶存物質濃度の上昇については、流量の減少 (図 8a) による希釈機能の低下もその一つの要因ではあるが、前述の溶存酸素濃度の低下については、気温上昇と日射量増加に伴う河川水温の上昇が大きな影響を及ぼしたものと考えられる。水温が高くなるにつれて水中に含有される酸素量が減少することに加え、水温上昇は還元に伴う酸素消費量を増加させることから、結果的に溶存酸素濃

度の低下が引き起こされることとなる (例えば、Jacoby, 1990)。

溶存酸素濃度の低下に影響を与える水温以外の因子としては、好氣的条件下における有機物の分解に伴う酸素の消費、アンモニアの硝化作用によって除去される酸素量の増加があげられる。地球温暖化が河川水の溶存酸素に及ぼす影響に関するシミュレーションの結果によれば (Jenkins *et al.*, 1993) 汚濁が比較的進行していない河川においては、水温が上昇する夏期に溶存酸素濃度が低下することが報告されている。

IV. 地球環境のキーワードとしての水循環 まともに替えて

本稿では、地球規模の気候変動が地域の水文環境に与える影響を、とくに河川流域を単位とする水収支の各要素、および河川水質の変化との関連性に着目して考察した。河川の水文特性に及ぼす地球温暖化の影響は、第一の局面として中緯度の陸域における降水量の減少と蒸発散量の増加が引き起こす河川の流量・流出率の低下、二次的には流量の減少と水温の上昇に伴う水質の悪化が指摘される。調査対象とした中部日本の河川流域に関する検討結果によれば、とくに 1980 年代以降、年降水量の減少に加え年流出率も低下傾向にあり、賦存量の変化がもたらす水質への影響が予見

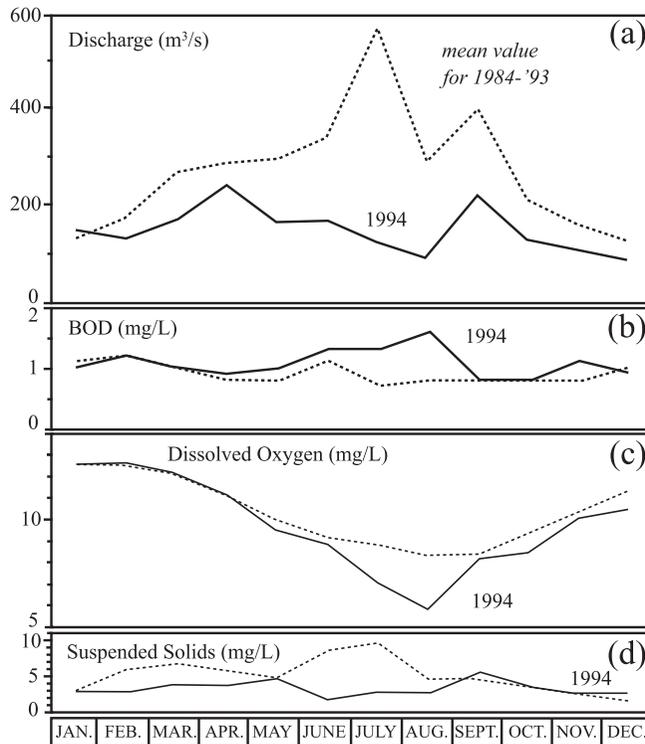


図 8 木曾川における流量 (a) と BOD (b)・溶存酸素 (c)・懸濁物質 (d) の年変化に関する 1994 年と平年との比較 (国土交通省の資料に基づき作成)。

Fig. 8 Annual changes in discharge (a) and water quality, including BOD (b), dissolved oxygen (c) and suspended solids (d) of the Kiso River in 1994, compared to those in normal years (drawn based on original data by Ministry of Land, Infrastructure and Transport).

される。1994 年における典型的な気温上昇期の河川水質には、溶存酸素濃度の低下に代表される水質の悪化現象が認められた。事例研究から得られる結果の普遍化を図ることが本研究課題の解明にとってとくに重要であり、時間の尺度に比し、空間スケールの拡張がより大きな意味を持つものと考えられる。

現代社会が抱える地球環境にかかわる課題の多くは、技術的な側面のみでは解決が困難であり、地域の自然特性や環境を総合的な視点で捉えることの重要性が以前にも増して大きくなりつつある (Mori, 2007)。現在のこのような潮流の中にあつて、科学の細分化と専門化が学術の高度化を可能

にした一方、水循環に関する研究分野に代表されるように、従来の学問体系のみではその本質を明らかにすることが困難な事例も多くみられることとなった。確かに、専門分野の細分化は自然科学に共通した必然の途ではあるが、同時に自然科学と社会科学の融合を基盤とする隣接科学間の連繋、および総合と統括の重要性も今改めて問い直されている。気候変動に伴う水循環過程の変化とフィードバックは、その本質を明らかにする上において学際的側面が必要とされる典型的な課題の例であり、地域が現実的に抱える地球環境問題の解決には、水循環の機構解明の必要性が今後一層高まるであろう。

謝 辞

拙稿を執筆する機会を与えていただいた本特集号編集委員会に対し深甚の謝意を表すると共に、適切なコメントをいただいた匿名の査読者にお礼申し上げます。作図の技法については、茶山真也氏（日本大学大学院総合基礎科学研究科、現・アジア航測（株））の協力を仰いだ。ここに記して感謝します。

本稿を取り纏めるに際し、2005～06年度日本学術振興会科学研究費補助金・基盤研究（C）「降雨流出過程の長期変動と地域特性に関する自然地理学的研究」（課題番号：17500706、研究代表者：森 和紀）を使用した。

文 献

- 新井 正（2000）地球温暖化と陸水水温．陸水学雑誌，**61**，25-34．
- Arnell, N. (1996) *Global Warming, River Flows and Water Resources*. John Wiley & Sons, Chichester.
- バロウ, M.・クラーク, T. 著, 鈴木主悦訳 (2003) 「水」戦争の世紀, 集英社.
- Barlow, M. and Clarke, T. (2002) *Blue Gold: The Fight to Stop the Corporate Theft of the World's Water*. Stoddart Publishing, Toronto.
- Blumberg, A.F. and DiToro, D.M. (1990) Effects of climate warming on dissolved oxygen concentration in Lake Erie. *Trans. Am. Fish. Soc.*, **119**, 210-223.
- 浜田和幸 (2003) ウォーター・マネー 石油から水へ世界覇権戦争．光文社．
- 伊藤公紀 (2003) 地球温暖化 埋まってきたジグソーパズル．日本評論社．
- Jacoby, H.D. (1990) Water quality. in *Climate Change and U. S. Water Resources* edited by Waggoner, P.E., John Wiley & Sons, New York, 307-328.
- Jenkins, A., McCartney, M.P. and Sefton, C. (1993) *Impacts of Climate Change on River Water Quality in the United Kingdom*. Department of Environment, Institute of Hydrology, Wallingford.
- Kašpárek, L. (1998) *Regional Study on Impacts of Climate Change on Hydrological Conditions in the Czech Republic*. T.G. Masaryk Water Research Institute, Prague.
- 気象庁編 (2005) 近年における世界の異常気象と気候変動 その実態と見通し (VII) 異常気象レポート 2005．財務省．
- Kundzewicz, Z. and Somlyódy, L. (1993) *Climate Change Impact on Water Resources A Systems View*. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg.
- Lorenc, H. (2000) *Studies on 220 Years of Air Temperature Data Set for Warsaw (1779-1998) and Estimation of Multi Year Tendencies*. Institute of Meteorology and Water Resources, Warsaw.
- McCormick, M.J. (1990) Potential changes in thermal structure and cycle of Lake Michigan due to global warming. *Trans. Am. Fish. Soc.*, **119**, 183-194.
- Mori, K. (1996) Long term trends in the water balance of central Japan. in *Regional Hydrological Response to Climate Change* edited by Jones, J.A.A. et al., Kluwer Academic Publishers, Amsterdam, 409-416.
- Mori, K. (1998) Recent trend of annual precipitation and its effect on river water quality: A case study. *Proc. Int. Symp. on Hydrology and Water Resources; Environment, Development and Management in Southeast Asia and the Pacific*, 319-324.
- 森 和紀 (2000) 地球温暖化と陸水環境の変化 とくに河川の水文特性への影響を中心に．陸水学雑誌，**61**，51-58．
- 森 和紀 (2006) グローバル気候変動に対する地域水文環境の応答．日本水文学会誌，**36**，151-156．
- Mori, K. (2007) The mitigation of flood disaster in the delta area: A case study. *Geojournal*, (in press)
- 村上雅博 (2003) 水の世紀 貧困と紛争の平和的解決にむけて．日本経済評論社．
- Thorntwaite, C.W. (1948) An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.*, **38**, 55-94.
- Ward, D.R. (2002) *Water Wars Drought, Flood, Folly, and the Politics of Thirst*．Riverhead Books, London.
- 渡辺 斉 (2004) 水の警鐘 世界の河川・湖沼問題を歩く．水曜社．
- 綿抜邦彦・都留信也・秋吉祐子・増子隆子 (2006) 21世紀の水とコメ 地球における水の循環と循環型食糧「コメ」．北星堂書店．
- Webb, B.W. (1992) *Climate Change and the Thermal Regime of Rivers*. Department of Geography, University of Exeter, Exeter.
- Webster, P.J., Holland, G.J., Curry, J.A. and Chang, H.R. (2005) Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment. *Science*, **309**, 1844-1846.
- Wilhite, D.A. (2004) Drought. in *International Perspectives on Natural Disasters Occurrence, Mitigation, and Consequences* edited by Stoltman, J.P. et al., Kluwer Academic Publishers, Dordrecht., 147-162.
- 山本龍三郎 (1993) 地球異常 気候激変時代への警告．集英社．

(2007年2月19日受付, 2007年4月3日受理)