

投稿論文 (和文)
PAPERS

地球温暖化による流域水文応答の変化に関する数値実験

宝 馨*・小尻利治**

地球温暖化により河川流域の水文応答(降水流出)がどのように変化するかを定量的に評価する数値実験の手順を提示した。温暖化シナリオとして、「年間一様シナリオ」と、世界の代表的な大気循環モデル(GCM)のアウトプットを参考とした「季節変化シナリオ」を設定した。琵琶湖南部の野洲川流域(387km²)において、等価CO₂濃度が現状の1.25, 1.5, 1.75, 2.0倍となる時点想定して、年最大流量や豊水・平水・低水・渇水流量、再現確率流量、渇水の持続性・頻度・深刻さ、月単位流量などの平均値や各種統計量を求めた。

Key Words : global warming, hydrologic simulation, water resources sensitivity

1. 序 論

(1) 研究の背景

地球温暖化の影響が様々な分野で懸念され、温暖化防止の施策が種々議論されている。WMO(世界気象機関)とUNEP(国連環境プログラム)は、1988年に気候変動に関する政府間パネル(IPCC, The Intergovernmental Panel on Climatic Change)を組織した。IPCCは1990年夏に報告書を提出し^{1),2)}、その時期に合わせた形で第2回世界気候会議が1990年秋に開催された³⁾。こうした動きに並行して、1986年から1989年にかけて米国(環境保護庁, EPA)では、地球温暖化が人類社会のあらゆる分野に及ぼす影響を包括的かつ詳細にとりまとめている⁴⁾。

わが国では、政府が1990年10月に「地球温暖化防止行動計画」を定め、1991年1月には名古屋で「地球温暖化アジア太平洋地域セミナー」が開催された。これらを研究面でフォローアップする目的で1991年3月にはアジア太平洋地域における地球環境温暖化問題に関する研究ワークショップが、環境庁国立環境研究所地球環境研究センターにおいて行われた。

土木学会でも、1990年4月には学会誌で「地球環境とシビルエンジニア」という特集を組み、同年の全国大会の研究討論会で「地球温暖化への対応と戦略」というテーマを取り上げた。学会内では、各常置研究委員会内の分科会や小委員会において個別に地球環境問題に取り組んで来たが、1991年6月には、衛生工学委員会、エネルギー土木委員会、海岸工学委員会、環境システム委員会、水理委員会の合同で「地球規模環境問題に関するミニワークショップ」を開催した⁵⁾。こうした内外の流れを受けて1992年度より地球環境委員会を設置し、学会全体としての総合的な取り組みを始めたところである。

気候の温暖化を含む地球環境変化の問題には現在のところかなりの不確実性が含まれてはいるが、今後それぞれの時点でなされる種々のシナリオ設定⁶⁾のもとで、各分野で実行可能な予測を随時行い、起こり得る最悪の事態に備えておく必要がある。

(2) 水文・水資源分野の研究状況

水文・水資源の分野においては、総合的な報告書として、米国で気候変動の水資源への影響に関してとりまとめたもの⁷⁾がある。IPCCの第2作業部会は、各国への水資源の影響予測を概括的に報告している⁸⁾。

わが国では、水文・水資源に関する総合的な報告書の類はまだないが、建設省土木研究所では、既存の降水量データを寒候期と温候期に分けて分析したもの^{9),10)}、温暖化の水文循環への影響を検討したもの^{11),12)}、ダムの運用に与える影響について考察したもの¹³⁾があり、大学においては、筆者ら^{14),15),16),17),18),19)}、田中丸・角屋^{20),21)}、安藤・合田²²⁾が、温暖化に伴う河川流域の流量変化を検討している。

1992年2月には、建設省土木研究所において、地球環境変化が流域レベルの水文・水資源に与える影響に関する日米合同会議が行われた。また、1992年8月に日本学術会議で開かれた第4回水資源に関するシンポジウムでは、「地球環境の変化と水資源」という論文募集課題が新たに設けられ、上述の論文^{12),13),18),19),21),22)}などが発表された。

(3) 研究の目的

本研究は、地球が温暖化するという仮説のもとに、わが国の河川流域の水資源が将来どのように変化するかを、定量的に明らかにする水文学的数値シミュレーションの手順を提示する。

不確実性の大きい地球温暖化の問題に対して、簡単で明確な仮定(温暖化シナリオ)を導入し、既存の流出モデル(蒸発散モデルを含む)と水文データを活用して、なる

* 正会員 工博 岐阜大学助教授 工学部土木工学科
(〒501-11 岐阜市柳戸1-1)

** 正会員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科

べく解析者(筆者ら)の主観が入らないような形で数値実験を行っている。したがって、ここで採用した方法は、長期流出モデルとある程度の期間長の水文データを有する河川流域であれば直ちに実行できるので、河川流況に関する温暖化影響の比較研究を行うのに有用であろうと思われる。こうした検討を重ねてゆくことにより、わが国における数十年オーダーの近未来の水資源に関わる計画や施策に何らかの示唆を与えることができるのではないかと考える次第である。

なお、本論文は、年間一様シナリオ(後述)を取り扱った筆者らの既報^{14),15),16),17)}に、世界の代表的な大気大循環モデル(GCM)のいくつかのアウトプットを参考とした季節変化シナリオに基づく結果を付け加えて整理し直したものである。

2. 方法

(1) 想定する温暖化シナリオ

全球平均の地上温度の上昇量は、温室効果気体の現在の増加傾向が続き、等価二酸化炭素濃度が倍増する頃には、1.2~3.0℃と推定されている²³⁾。温室効果気体が現在の増加率で増え続けるとすれば、等価二酸化炭素濃度は、2030年頃に1958年(ハワイのマウナ・ロア山(4169m)の中腹(約3400m)の観測所において二酸化炭素観測が開始された年)の濃度の倍になる。したがって、1958年を基準にして2030年頃に1.2~3.0℃の昇温が考えられる。また、現在の増加量がそのまま続くとすれば、2060年頃にこの昇温が考えられる。

このような温暖化認識の現状のもとで、以下のような仮定を設ける。

1. 等価二酸化炭素濃度の増加シナリオは上述の増加率維持の方を採用する。
2. 温室効果気体の増加による気温上昇は、1958年から1990年までの間では微小であるとして無視し、1991年より線形的に増加し2030年までの間に ΔT ℃であるとする。
3. 植生や土地利用の流域条件は変化なしとし、流出モデルのパラメタは現状のままとする。
4. 気温は、流出過程では蒸発散のみに影響するものとする。
5. 降雨シナリオとして、降水量は目標時点における気温の ΔT ℃の上昇に伴い最終的に ΔP %増加するものとし、その増加は線形とする。全球平均降水量は、1.2~3.0℃の気温上昇に伴い2~9%増加すると言われているが、局所的には減少する場所もある。

以上の仮定に基づいて、ここでは、温暖化シナリオに二通りの考え方を導入する。一つは、温度変化量 ΔT およ

び降水量変化率 ΔP が年間通じて一様とするシナリオであり、「年間一様シナリオ」と呼んでおく。日本付近での昇温は、全球平均の昇温と同程度と言われているので、 $\Delta T=3.0$ ℃とする。また、降水量変化は $\Delta P=-10\sim 10\%$ とする。

もう一つの考え方は、世界の代表的な大気大循環モデル(GCM, General Circulation Models)の等価 CO_2 濃度倍増時のアウトプットに基づく季節変動を考慮したもので、文献^{1),7)}に掲載されているDJF(12~2月)およびJJA(6~8月)のchange in surface air temperatureとchange in precipitationの予測マップを日本中央部の点で目視により読み取ったものである。その間の季節(3~5月と9~11月)の値はそれらを単純に内挿した。ただし、change in precipitationについてはmm/dayで与えられているものを日本の年平均降水量がおおよそ1800mmであるとしてパーセント表示する。すなわち、+1mm/dayならば1年365mmであるから $\Delta P=+20\%$ となる。こうして得たシナリオを「GCM季節変化シナリオ」と呼んでおく。なお、GCMの略称は以下の通りである⁴⁾。

CCC: カナダ気候センター Canadian Climate Centre

GISS: ゴダード宇宙研究所 Goddard Institute for Space Studies, NASA

GFDL: 地球物理流体力学研究所 Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, NOAA

UKMO: 英国気象局 United Kingdom Meteorological Office

NCAR: 米国大気研究センター National Center for Atmospheric Research (Community Climate Model 1)

CCC, UKMOシナリオは文献¹⁾のpp. 165-168に掲載されたマップから、GFDL, GISS, NCARシナリオは文献⁷⁾のpp. 66-69のマップから読み取って定めたものである。GCM季節変化シナリオをまとめるとTable 1のようになる。なお、結果的に、GFDLとUKMOは同一のシナリオとなった。また、CCCは、 $\Delta T=3.0$ ℃、 $\Delta P=-20\%$ の年間一様シナリオに相当する。

文献⁷⁾のpp. 110~111には、これらのGCMの比較表が載せられている(CCCは含まれていない)。 CO_2 が2倍になるという仮定のモデルでは、GFDLは地理条件が理想化された陸地と海洋のみで地形は考慮していない。GISS, NCAR, UKMOは地理・地形ともに現実的(realistic)な条件を設定している。UKMOは鉛直方向に5層のモデル、それ以外は9層のモデルである。水平空間分解能は、GFDLが緯度方向 $\Delta\Phi=4.5^\circ$ 、経度方向 $\Delta\lambda=5^\circ$ 、NCARは、 $\Delta\Phi=4.5^\circ$ 、経度方向 $\Delta\lambda=7.0^\circ$ 、GISSは、 $\Delta\Phi=8^\circ$ 、経度方向 $\Delta\lambda=10^\circ$ となっている(UKMOは同様の記載なし)。これらのモデルでは日本近辺の格子点はたかだか数点にすぎず、日本列島を陸地とみなしているかどうか不明である。なお、これらはすべて1988年以前の条件設定であり、現在なおさらに詳細なモデルが構築されつつある。

Table 1 GCM 季節変化シナリオ

シナリオ名		12~2月	3~5月	6~8月	9~11月
CCC	ΔT	3.0	3.0	3.0	3.0
	ΔP	-20	-20	-20	-20
GISS	ΔT	3.0	3.0	3.0	3.0
	ΔP	0	-5	-10	-5
GFDL/ UKMO	ΔT	5.0	4.5	4.0	4.5
	ΔP	+10	+10	+10	+10
NCAR	ΔT	5.0	4.0	3.0	4.0
	ΔP	0	+10	+20	+10

最近、温室効果ガス抑制の施策が全世界的にとられようとしていることもあって、前述の昇温予測は下方修正(スローダウン)するような見方が出てきている。したがって、2030年に年間一様シナリオの $\Delta T = 3.0\text{ }^\circ\text{C}$ (GCM季節変化シナリオではそれ以上)の昇温というのは最も昇温の激しいシナリオ設定と言えなくもないが、ここでのやり方の場合、2030年を「等価CO₂濃度倍増時(2×CO₂)」、2000年、2010年、2020年をそれぞれ「1.25×CO₂」、「1.5×CO₂」、「1.75×CO₂」と読み替えることができるので、もう少し温度変化の小さい場合の結果として、これらの中途時点の結果を参照することができる。

(2) 対象流域

琵琶湖南部の野洲川流域(387km²)を対象流域とする。この流域を選んだのは、降雪が比較的少ないこと(後述の流出計算には融雪出水は陽には考慮していない)、降水量データが入手しており、流出モデル、蒸発散モデルの検討が既になされている²⁴⁾ことによる。また、急激な開発・都市化などが今の時点では予想されない。そのような流域変化が予想される場所ではその効果も以下の解析に取り込む必要があり、問題が複雑化する。

(3) 数値実験の手順

Step 1: 降水量増減シナリオに基づく日単位雨量の発生

N 年間の過去の降雨データの系列を1年毎に区切り、それらが互いに独立であると仮定し、繰り返しを許してランダムに並べ替えて将来(予測時点 K 年先まで)の降雨とする。そのとき、降雨量を年次的に引き伸ばして、目標時点で $\Delta P\%$ の増加となるようにする。すなわち、第 i 年後($1 \leq i \leq K$)の降雨系列(模擬生成された予測降雨系列) $\{R_i^*\} = \{r_i^*(1), r_i^*(2), \dots, r_i^*(365)\}$ は、過去の降雨データから乱数発生によって選び出された第 j 年($1 \leq j \leq N$)の観測降雨系列 $\{R_j\} = \{r_j(1), r_j(2), \dots, r_j(365)\}$ によって以下のように与えられるものとする。

$$\{R_i^*\} = \alpha_i \times \{R_j\} \quad \dots (1)$$

ここに、 $\alpha_i = 1 + \frac{\Delta P}{100} \times \frac{i}{K}$ である。流域内の6地点(東寺、春日、甲賀、大河原、新田、笹路)で共通にデータの存在する期間1963~1980年($N = 18$ 年間)のものを用い

て1991年から2030年まで($K = 40$ 年間)の日雨量系列を発生させる。

Step 2: 温度上昇シナリオに基づく日単位流量の発生

流出計算には野洲川全流域タンクモデルを用いる²⁴⁾。このモデルは、4段タンクモデルを6個並列したもので、6個のモデルからの流量を同一の重み付けをして合算することにより野洲地点流量とする。6個のタンクモデルには、それぞれ、東寺、春日、甲賀、大河原、新田、笹路の6地点の日雨量系列を入力する。蒸発散による損失は以下のように取り扱う。地域蒸発散量推定式として、観測可能な説明変量(いずれも彦根気象台観測の月別平均値で1977~1981年のデータ)を用いて、次のような重回帰式が得られている(重相関係数: 0.726)²⁴⁾。これにより、各タンクモデルから蒸発散による損失を差し引く(上段のタンクから順に3段目のタンクまでから差し引き、4段目からは差し引かない)。

$$Y = 1.5694 + 0.0079X_1 + 0.038X_2 - 0.1061X_3 - 0.0096X_4 \quad \dots (2)$$

ここに、 Y : 地域蒸発散量(mm/日)、 X_1 : 日射量(cal/cm²/日)、 X_2 : 気温×日照時数(°C・時間/日)、 X_3 : 降雨量(mm/日)、 X_4 : 湿度(%)。説明変数 X_1, X_2, X_4 に関係する日射量、気温、日照時数、湿度の値については、彦根気象台でデータを閲覧・転写し、全日射計が変更された1971年以後1980年までの10年間の平均値を採用した。ただし、気温については月別の平年値(1951~1980年の平均)を用いることとした。これらの値を(2)式が求められた1977~1981年間の平均値と比較し、大差ないことを確かめている。月別の値は、文献¹⁸⁾に示されている。「2030年に $\Delta T = 3.0\text{ }^\circ\text{C}$ で、それまで線形的に気温上昇が生じる」という気温上昇シナリオにより蒸発散が経年的に増加することになる。なお、流出モデルの各タンクの初期貯水量はすべてゼロとした。以下の検討においては、2000年まで9年分の助走期間があるので、初期貯水量の影響はほとんどない。なお、(2)式の値が負となる場合は、 $Y = 0$ として、流出計算を行った。

Step 3: 降水流出シミュレーション

Step 1とStep 2を M 回繰り返し、年度毎に流況曲線や濁水の持続性・頻度・深刻さなどを求め、温暖化による流況の変化を抽出する。

Step 4: 温暖化なしの場合のシミュレーション

気温変化なし($\Delta T = 0$)、降水量変化なし($\Delta P = 0$)とした場合、すなわち、自然条件が経年的に定常(トレンドなし)の場合についても同様の解析を行い比較する。

3. 結果と考察

1回のシミュレーションについて、1991年から2030年の各年ごとに流況曲線を描くことができる。すなわち、各年365日の日流量系列を大きい順に並べて、 Q_1, Q_2, \dots, Q_{365} を得る。各温暖化シナリオごとに、このシミュレーションを $M = 1000$ 回繰り返し得られる1000ケースの日流

Table 2 各温暖化シナリオのもとでの将来10年ごとの平均的流況

		(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)	(G)	(H)	NCAR	GFDL/UKMO	GISS	CCC
	ΔT	3	3	3	3	3	0	3	0	3~5	4~5	3	3
	ΔP	-10	-5	0	+5	+10	0	0	0	0~+20	+10	-10~0	-20
2000 (1.25× CO ₂)	1	0.95	0.97	0.99	1.02	1.04	1.00	170.7	171.6	1.06	1.04	0.96	0.92
	2	0.94	0.97	0.99	1.02	1.04	1.00	107.5	108.3	1.07	1.04	0.95	0.91
	3	0.95	0.97	0.99	1.02	1.04	1.00	86.4	87.1	1.07	1.04	0.96	0.92
	30	0.89	0.93	0.96	1.00	1.04	1.00	10.1	10.5	1.05	1.02	0.92	0.89
	50	0.89	0.92	0.95	0.99	1.03	1.00	5.8	6.1	1.04	1.01	0.92	0.90
豊水流量	95	0.85	0.89	0.93	0.97	1.02	1.00	2.69	2.89	1.00	0.98	0.89	0.90
平水流量	185	0.83	0.87	0.91	0.96	1.01	1.00	0.89	0.97	0.96	0.96	0.87	0.90
低水流量	275	0.89	0.92	0.94	0.97	1.00	1.00	0.58	0.61	0.98	0.97	0.91	0.94
濁水流量	355	0.90	0.93	0.95	0.98	1.00	1.00	0.53	0.56	0.98	0.98	0.93	0.95
2010 (1.5× CO ₂)	1	0.90	0.95	0.99	1.03	1.08	1.00	168.5	170.4	1.12	1.07	0.92	0.84
	2	0.89	0.94	0.98	1.03	1.08	1.00	109.1	110.8	1.16	1.08	0.90	0.82
	3	0.90	0.94	0.99	1.03	1.08	1.00	89.8	91.1	1.15	1.08	0.92	0.83
	30	0.79	0.86	0.93	1.00	1.08	1.00	10.2	11.0	1.10	1.04	0.84	0.78
	50	0.78	0.84	0.91	0.98	1.07	1.00	5.8	6.4	1.08	1.02	0.83	0.81
豊水流量	95	0.71	0.79	0.86	0.95	1.03	1.00	2.67	3.09	0.99	0.96	0.79	0.80
平水流量	185	0.67	0.74	0.83	0.91	1.01	1.00	0.85	1.04	0.94	0.92	0.75	0.80
低水流量	275	0.77	0.82	0.88	0.94	1.00	1.00	0.56	0.63	0.96	0.94	0.82	0.87
濁水流量	355	0.79	0.84	0.89	0.95	1.00	1.00	0.52	0.58	0.96	0.94	0.84	0.88
2020 (1.75× CO ₂)	1	0.86	0.92	0.98	1.05	1.11	1.00	175.7	178.5	1.18	1.10	0.89	0.76
	2	0.84	0.91	0.98	1.05	1.12	1.00	110.5	113.0	1.23	1.11	0.86	0.75
	3	0.84	0.91	0.98	1.05	1.12	1.00	90.2	92.0	1.22	1.11	0.88	0.74
	30	0.70	0.79	0.90	1.00	1.11	1.00	9.6	10.8	1.15	1.06	0.78	0.68
	50	0.67	0.77	0.87	0.98	1.10	1.00	5.4	6.2	1.11	1.03	0.76	0.70
豊水流量	95	0.59	0.70	0.80	0.92	1.05	1.00	2.40	3.00	0.99	0.95	0.70	0.70
平水流量	185	0.54	0.64	0.75	0.88	1.02	1.00	0.76	1.01	0.91	0.89	0.64	0.70
低水流量	275	0.67	0.75	0.82	0.91	1.00	1.00	0.52	0.63	0.95	0.91	0.74	0.80
濁水流量	355	0.68	0.75	0.83	0.92	1.00	1.00	0.49	0.58	0.95	0.92	0.75	0.81
2030 (2.0× CO ₂)	1	0.80	0.89	0.98	1.06	1.15	1.00	164.5	168.5	1.25	1.14	0.84	0.68
	2	0.78	0.87	0.97	1.07	1.17	1.00	103.9	107.2	1.32	1.16	0.81	0.66
	3	0.79	0.88	0.97	1.07	1.17	1.00	84.3	86.6	1.31	1.15	0.83	0.66
	30	0.62	0.73	0.86	1.01	1.15	1.00	9.3	10.8	1.23	1.08	0.70	0.59
	50	0.59	0.70	0.83	0.98	1.12	1.00	5.3	6.3	1.15	1.04	0.69	0.61
豊水流量	95	0.48	0.61	0.75	0.90	1.08	1.00	2.26	3.02	1.01	0.95	0.61	0.60
平水流量	185	0.44	0.55	0.68	0.84	1.02	1.00	0.70	1.03	0.88	0.85	0.55	0.61
低水流量	275	0.58	0.67	0.77	0.88	1.00	1.00	0.49	0.64	0.94	0.88	0.67	0.73
濁水流量	355	0.59	0.68	0.78	0.89	1.00	1.00	0.46	0.58	0.94	0.89	0.68	0.74

(G)/(H)

m³/s m³/s

量時系列から、温暖化による流況変化を調べた。なお、2月29日(うるう年)は簡単のため省いて解析した。

(1) 流況の平均値に関する検討

流況曲線に基づく順序統計量 Q_1, Q_2, \dots, Q_{365} は、それぞれ $M = 1000$ 個ずつ得られる。それらの平均値 $\bar{Q}_1, \bar{Q}_2, \dots, \bar{Q}_{365}$ を求め、温暖化シナリオごとに2000年、2010年、2020年、2030年の時点で整理したのが Table 2 である。上位3位 ($\bar{Q}_1, \bar{Q}_2, \bar{Q}_3$)、第30位 (\bar{Q}_{30})、第50位 (\bar{Q}_{50})、豊水流量 (\bar{Q}_{95})、平水流量 (\bar{Q}_{185})、低水流量 (\bar{Q}_{275})、濁水流量 (\bar{Q}_{355}) について整理した。

この表の列(H)には $\Delta T=0, \Delta P=0$ の場合の流量 (m³/s 単位) が示されている。気温上昇なし、降水量増加なし(経年的に定常)という条件であるから、この列内の各流量値は年次的にあまりばらつかない結果となっている。その左側の列(G)には、 $\Delta T=3.0, \Delta P=0$ の場合の結果を示した。これと列(H)の比が列(C)に示されている。このように、現状(温暖化しないシナリオ)を表す列(H)を基準として、それに対する各シナリオの比を列(A)~(F)に示している。GCM季節変化シナリオについ

ては Table 2 の右4列に同様に整理した。

年間一様シナリオで、降雨条件が現在と変わらず、温度だけが上昇する場合の結果(列(C))より、以下のことが言える。温暖化が進むと、等価CO₂濃度が2倍になる時点(ここでは、それを一応2030年としている)には、豊水流量 \bar{Q}_{95} は25%減、平水流量 \bar{Q}_{185} は32%、低水、濁水流量は20%余の減少となることわかる。高水部 ($\bar{Q}_1 \sim \bar{Q}_3$) は2~3%の減少となる。豊水流量から濁水流量 ($Q_{95} \sim Q_{355}$) の減少が20%を越えるのに比べて、高水部で減少の割合が小さいのは、地域蒸発散推定モデル(2)式において降雨量に関する項が負、気温に関する項が正となっており、負の項の係数の方が大きいため降雨量が多いほど気温上昇による蒸発散量の増加が少なくなることによる。すなわち、流出量が多いときは相対的に降雨も多いはずであるから、気温上昇による蒸発散量の増加は少なく、流出量の少ないときは相対的に降雨も少ないはずであるから、土壌水分(すなわち、タンクモデル中の水深)がある程度存在すれば気温上昇による蒸発散量は増えることになる。

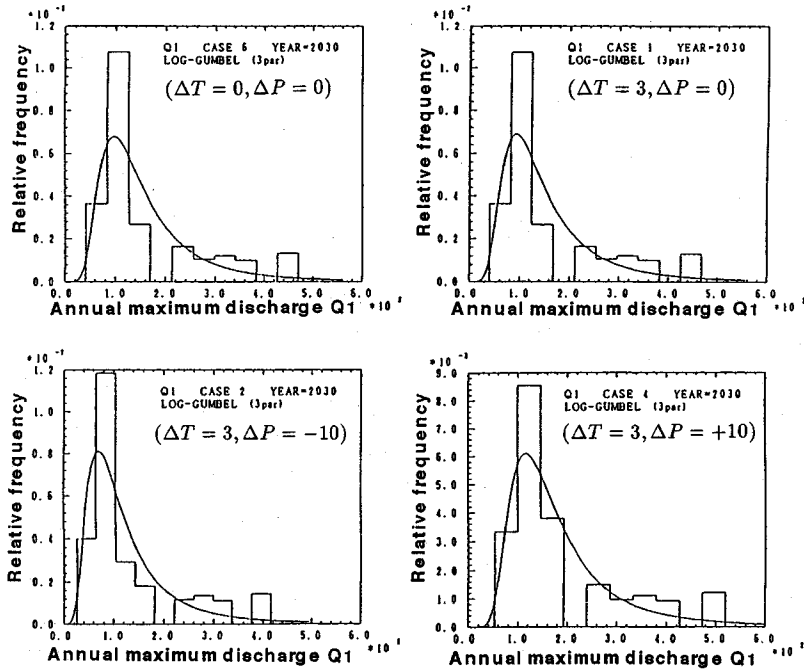


Fig.1 年最大流量 Q_1 のヒストグラム (2030年または $2\times CO_2$)

温暖化し、かつ、降雨が減少する場合には $\Delta P = -5\%$ のとき (列 (B)) を見よ、豊水流量は 39% 減、平水流量以下は 32~45% 減となり、 $\Delta P = -10\%$ のとき (列 (A)) にはそれぞれ 52% 減、41~56% 減となる。また、高水部分 $Q_1 \sim Q_3$ のところの流量の減少率は、 $\Delta P = -10, -5$ に対してそれぞれ 20%、10% 強の減となることがわかる。

温暖化し降水量が増える場合には、 $\Delta P = +5\%$ 程度 (列 (D)) では豊水流量以下の流量において 15% 程度以内の減少を示す。すなわち、この程度の降水量増加があっても、低水部の流況は 3℃ の温度上昇により悪化する。ただし、高水部の流況は 6~7% の増加を示す。

$\Delta P = +10\%$ (列 (E)) では豊水流量以上の領域で 10% 以上の流量増加を示すようになるが、平水流量以下の領域では温暖化なしの場合とあまり変わらない。すなわち、 $\Delta T = 3.0$ ℃ の温暖化があっても、降水量が 10% 程度増加するならば、利水の面での水資源の量には問題はないと言えそうである。この結果は、「温暖化による流出量減少分を相殺するためには、気温が 1℃ 上昇する毎に降水量が約 3% 増加せねばならない」とする米国デラウェア川の結果⁹⁾と符合するが、これは単なる偶然の一致にすぎないであろう。流域が変われば異なる結果が得られよう。ただ、言えることは、温暖化しても降水量が増えれば利用可能水量が増加することもあり得るということである。 $Q_1 \sim Q_{30}$ を見ると 15% 以上の増となっており、むしろ高水部分について治水の観点から問題が大きくなる。これについては後述の極大流量に基づく検討の項

でさらに言及する。

なお、10% の降水量増に対して流量が 20% 程度増加するこのようなケースが生じるのは、以下のような理由による。簡単のため、降水量が 10 単位あったとして、蒸発散等による損失がそのうち 5 単位ある場合を考える。このとき、流量は 5 単位である。気候変動によって降水量が 10% 増え 11 単位になったとする。損失が 5 単位のままであれば流量は 6 単位となり、以前の 5 単位に比して 20% の増となる。温暖化すると一般には蒸発散も増えると思えるが、降水時においてはその変化が少ないとすればこのような理屈で説明できる。数値計算の過程を追跡してこのことを確認している。降雨時は晴天時に比べて蒸発散が減少するという実際の現象が (2) 式により表現されている。

GCM 季節変化シナリオでは、2030 年を見ると、NCAR の高水部が 30% 程度も増加する。これは夏季に $\Delta P = 20\%$ であることによる。また、年間通じて $\Delta P = -20\%$ である CCC シナリオの流況曲線が平均的に 30~40% も低下するなどの特徴がみられる。

(2) 流況のばらつき・分布に関する検討

上述の平均的な流量の議論に加えて、予測流量の分布状況を調べた。1000 回のシミュレーションで得られた 1000 個の流量値がどのようなばらつき・分布をしているのかということである。

各時点での Q_i ($i=1, 2, 3, 30, 50, 95, 185, 275, 355$) のそれぞれについてヒストグラムを描くとともに、それらの

分布を表す統計量(平均値, 標準偏差, 変動係数, 歪み係数, 尖り係数)を求めた。紙数の都合により, 年間一様シナリオについての結果のみを示す。Fig. 1は, 2030年での Q_1 のヒストグラム, Table 3は2030年における各流量の分布の統計量である。

これらの結果を簡単に要約すると以下のようである。Fig. 1を見るとわかるように, Q_1 では, 3℃の昇温による予測流量の分布形(ヒストグラム)は, $\Delta P=0\%$ に対してはほとんど変わらないが, 降水量が増加すると右にスライドし, ばらつきが大きくなる。逆に, 降水量が減少する場合は左にスライドし, ばらつきが小さくなる。これらの傾向は, Table 3からも確認できる。 $Q_1\sim Q_3$ では, 最大極値の理論分布である Gumbel 分布の歪み係数 1.14 に近い値をとっている。尖り係数は, Q_{275}, Q_{355} が正規分布の尖り係数 3 に近く, 図は省略するが, ヒストグラムの形状も対称に近くなっている。

平均値的な議論だけでなく, このような分布の状況を調べておくことは, 極端に大きな(あるいは小さな)流量の発生頻度を捉えることができるので, 水資源計画立案上, 有用な情報を与えることになる。

(3) 極大流量に基づく再現確率流量の変化に関する検討

上述のシミュレーションによって各シナリオ, 各時点ごとに得られた 1000 個ずつの年最大流量 Q_1 について頻度分析を行い, 再現確率流量がシナリオごとにどのように変化するか調べた。

11 種の確率分布モデルを最尤法によって当てはめ, 適合度評価指標に情報量規準(AIC)を採用し, これを最小とするモデル(MAICEモデル)を選ぶ²⁵⁾。こうして得られる確率分布モデル及びその再現確率統計量(T 年確率流量)が温暖化によりどのように変化するか検討する。

2030年の最大流量の分布としては, AICによれば, ほとんどのシナリオに対して対数 Gumbel 分布(3母数)が最も良く, NCARシナリオの場合のみ平方根指数型最大値分布²⁶⁾が良かった。これらの分布に基づいて求めた T 年確率流量($T=30, 50, 100, 200, 300$ 年)の温暖化なしの場合の値とそれに対する各シナリオによる再現確率流量の増減率を百分率で Table 4 に示す。

気温上昇のみのシナリオ($\Delta T=3.0, \Delta P=0\%$)による再現確率流量の変化は, 2030年の時点で50年確率流量が1%増, 100年確率流量が2%増と微増である。降水量変化による影響は, 降水量変化5%に対して3~6%, 降水量変化10%に対して6~12%であった。最も変化が激しかったのはCCCによるシナリオで, 50年確率で23%, 100年確率で20%の減少であった。

(4) 渇水の生起頻度・規模に関する検討

温暖化することにより渇水の生起頻度・規模などがどのように変わるか調べた。ここでいう「渇水」とは, 「流

量 Q がある基準流量 Q^* を下回ること」と定義し, 「流量 Q がある基準流量 Q^* を下回る一連の期間」を渇水期間とし, それを1回の渇水と勘定する。なお, 当該年度(カレンダー年)から次年度にまたがる渇水は, 当該年度の渇水としてカウントする。

基準流量 Q^* の値として, 温暖化なしの場合の低水流量 \bar{Q}_{275} 程度の値を採用することとし, $Q^*=0.629(\text{m}^3/\text{s})=54,382(\text{m}^3/\text{日})$ とした。既報¹⁸⁾では, この渇水の生起頻度, 期間長, 期間内最大不足量, 総不足量, 期間内平均不足量などの変化を調べている。 $\Delta T=0.0, \Delta P=0$ (温暖化なし, すなわち現状)の場合と $\Delta T=3.0, \Delta P=0$ (温暖化あり)の場合について比較し, 2030年になると, 生起頻度は1.5回増加し, 渇水期間長も現状では最大141日であるのが173日まで延びる。また, 期間内総不足量, 最大不足量, 期間内平均不足量の平均は, どれもほぼ倍増となることなどを示した。

ここでは, 同じ基準流量に対して利水安全度指標として次のようなものを取り上げ¹⁷⁾, 各温暖化シナリオに対して, 1991年から2030年までの10年ごとの分析を行った。

- a) 渇水の発生頻度
- b) 基準流量不足発生日数
- c) 総不足量
- d) 不足%・日
- e) 最大不足率
- f) 渇水被害関数

ここで, 不足%・日とは, 第 i 日における流量(取水量), 水の不足率(%表示)をそれぞれ $Q(i), S(i)$ と表示するとき,

$$\sum_{Q(i)<Q^*} S(i) = \sum_{Q(i)<Q^*} \frac{Q^* - Q(i)}{Q^*} \times 100 \dots\dots\dots (3)$$

で定義される。言わば, 水の不足率の累加値(取水制限率の累加値²⁷⁾)である。また, 渇水被害関数とは, 渇水被害を適切に表現しうる関数形であり, 上の記号を使えば,

$$\sum_{Q(i)<Q^*} \{S(i)\}^n \cdot \{Q^*\}^m \dots\dots\dots (4)$$

で定義される。たとえば, $n=2, m=0$ や $n=3, m=0$, あるいは, $n=2, m=1$ の組合せが用いられる²⁷⁾。ここでは, $n=2, m=0$ とする。これはいわゆる「(不足%)²・日」にほかならない。

$M=1000$ 回のシミュレーションにおいて, これらの利水安全度指標を2000, 2010, 2020, 2030年の各時点で求め, その平均値, 最小値, 最大値を求めた。紙数の都合で, 2030年における各指標の平均値を Table 5 に示した。この結果について以下に述べる。

- a) 渇水の発生頻度 この指標では, 各温暖化シナリオによる影響は, あまり反映されず, 温暖化しても, 温暖化しない場合に比べて, 最高でも1.7倍の頻度になった。2

Table 3 流量の分布に関する諸統計量 (2030年または $2 \times \text{CO}_2$)

2030年 または $2 \times \text{CO}_2$	Q1	Q2	Q3	Q30	Q50	(豊水) Q95	(平水) Q185	(低水) Q275	(渇水) Q355
$\Delta T = 0, \Delta P = 0$									
平均	168.46	107.23	86.64	10.80	6.34	3.02	1.03	0.64	0.58
標準偏差	110.70	55.61	53.55	3.77	2.10	1.10	0.35	0.09	0.08
変動係数	0.66	0.52	0.62	0.35	0.33	0.36	0.34	0.14	0.14
歪み係数	1.43	1.18	1.43	-0.61	-0.58	-0.09	0.39	-0.00	-0.21
尖り係数	4.07	3.58	4.64	2.50	2.87	2.28	1.98	2.90	2.96
$\Delta T = 3, \Delta P = -10$									
平均	135.32	83.40	68.60	6.67	3.76	1.45	0.45	0.37	0.34
標準偏差	100.34	50.72	44.63	2.89	1.58	0.65	0.13	0.06	0.05
変動係数	0.74	0.61	0.65	0.43	0.42	0.45	0.29	0.16	0.15
歪み係数	1.51	1.23	1.39	-0.13	-0.15	0.31	0.89	-0.18	-0.15
尖り係数	4.33	3.57	4.51	1.91	2.11	2.14	2.91	2.65	2.79
$\Delta T = 3, \Delta P = 0$									
平均	164.53	103.92	84.31	9.30	5.28	2.26	0.70	0.49	0.46
標準偏差	111.22	56.13	53.12	3.48	1.93	0.96	0.23	0.07	0.06
変動係数	0.68	0.54	0.63	0.37	0.37	0.42	0.33	0.14	0.13
歪み係数	1.44	1.17	1.43	-0.43	-0.44	0.20	0.63	-0.24	-0.21
尖り係数	4.10	3.50	4.64	2.23	2.50	2.18	2.28	2.73	2.89
$\Delta T = 3, \Delta P = 10$									
平均	193.62	125.30	100.98	12.46	7.13	3.26	1.05	0.64	0.58
標準偏差	121.60	61.64	61.00	4.32	2.49	1.18	0.36	0.09	0.08
変動係数	0.63	0.49	0.60	0.35	0.35	0.36	0.34	0.14	0.14
歪み係数	1.40	1.23	1.39	-0.52	-0.39	-0.08	0.41	-0.08	-0.23
尖り係数	3.93	3.48	4.66	2.48	2.82	2.34	2.09	2.86	2.93

Table 4 再現確率流量の変化 (2030年または $2 \times \text{CO}_2$)

温暖化 シナリオ	リターンピリオド T (年)					
		30	50	100	200	300
(0, 0) [m^3/s]		454	546	696	883	1012
(3, +10) [%]		12.1	11.7	11.3	10.9	10.6
(3, +5)		6.2	6.3	6.5	6.7	6.9
(3, 0)		0.4	1.1	2.0	3.0	3.6
(3, -5)		-5.6	-4.3	-2.6	-0.8	0.2
(3, -10)		-11.6	-9.6	-6.9	-4.2	-2.5
CCC		-24.2	-22.5	-20.8	-17.8	-16.4
GISS		-4.2	-0.1	5.8	12.3	16.3
GFDL/UKMO		12.1	11.9	11.7	11.5	11.4
NCAR		8.4	2.3	-5.9	-14.2	-18.9

度の軽微な渇水よりも1度の長期にわたる渇水の方が問題となることからわかるように、頻度という指標が必ずしも利水安全度を十分に表現できないことに留意する必要がある。

b) 基準流量不足発生日数 この指標では温暖化しない場合に比べて、ほとんどのシナリオで1.3~3.3倍の日数が基準流量を下回るという結果を得た。また、3℃気温が増加しても年間を通して+10%の降水量増加があれば、不足発生日数が減る。

c) 総不足量 温暖化しない時に比べて、2030年における平均値では年間一様シナリオで最高7.6倍、GCM季節変化シナリオで最高14.4倍もの総不足量が発生すること

が分かった。また、ここでも降水量が年間通して10%増加すれば、温暖化しないときより少ない総不足量になるという結果を得た。

d) 不足%・日 温暖化しない場合、平均値で見ると一日あたり4%程度の不足率であるが、年間一様シナリオでは、最高で一日あたり約30%、GCM季節変化シナリオでは、最高で一日あたり約56%の不足が2030年に発生することが予測された。しかし、NCARシナリオにおいては、一日あたり平均約5%程度の不足率にとどまる。なお、温暖化しない場合との比をとれば、Table 5に示されるように、その比の値は総不足量のそれと同じになる。

e) 最大不足率 温暖化しない場合、最大不足率は約12%であるが、温暖化しても降水量が10%増加すれば、それと同程度になる。逆に、降水量が減少すれば、平均値で見ても2030年には40~60%の最大不足率が発生するという結果を得た。

f) 渇水被害閏数 6種類の指標の中でも、各温暖化シナリオの影響が最も顕著に表れた指標である。温暖化しない場合に比べて、年間一様シナリオで最高19倍、GCM季節変化シナリオ(CCCの平均値)で85倍の被害が渇水によって起こることが予測された。

以上の結果は Q^* の決め方にも依存する。 Q^* を小さくとりすぎると、ハイドログラフがその値を下回ることが少なくなり、これらの渇水指標の変化が読み取りにくい。逆に、 Q^* を大きくしすぎると渇水の分析という観点

Table 5 利水安全度の比較 [温暖化なし(0, 0)の安全度とそれに対する比(2030年または $2.0 \times \text{CO}_2$)]

シナリオ	発生頻度 [回/年]	不足発生日数 [日]	総不足量 [m^3]	不足%・日 [%・日]	最大不足率 [%]	渇水被害閾数 [(%) ² ・日]
(0, 0)	7.7	112	77.98×10^4	1434	11.9	145.7×10^4
(3, -10)	1.58	2.39	7.59	7.59	3.96	19.00
(3, 0)	1.72	1.96	3.76	3.76	2.50	6.44
(3, +10)	1.06	0.96	0.95	0.95	0.98	0.68
CCC (3, -20)	1.34	3.33	14.36	14.36	5.25	84.85
GISS	1.65	2.19	5.63	5.63	3.28	11.51
GFDL/UKMO	1.49	1.50	2.05	2.05	1.68	2.39
NCAR	1.31	1.29	1.50	1.50	1.34	1.51

が損なわれる。当該流域の何らかの基準流量(維持流量を含む基準点での需要流量など)を Q^* として採用すればよいが、その場合、流域によっては水需要量の増大による Q^* の経年的増大も考慮に入れる必要も出てこよう。

(5) 月単位流況に基づく検討

前節までは日単位の流況に基づいた検討であったが、本節では月単位流況に取りまとめて水資源の量を検討することにする。各月の流量($M = 1000$ 回のシミュレーションの平均値)を各年次において求め、温暖化しない場合との比較を行った。Table 6は、2010年($1.5 \times \text{CO}_2$ に相当)と2030年($2 \times \text{CO}_2$)における各シナリオの月流量値を、温暖化なし($\Delta T = 0, \Delta P = 0$)の場合の値と比べ、その差を百分率表示したものである。負の符号がついているものは、温暖化なしの場合に比べて流量が減少することを示している。

まず、年間一様シナリオについて見てみよう。温暖化した場合の2030年の夏季の流量は、降水量が10%増加する場合15~20%増加し、降水量が10%減じる場合には30~40%減少する。降水量条件が変わらない場合((3, 0)シナリオ)でも、3℃の温度上昇で10%程度の夏季流量の減少が見られる。 $\Delta T = 3.0, \Delta P = 10\%$ の場合、年間通じて流量は現状より増加しており、Table 2でも見たように、「 $\Delta T = 3.0$ ℃の温暖化があっても、降水量が10%程度増加するならば、利水の面での水資源の量には問題はない」といえる。

一方、冬季の流量は、温暖化し10%降水量が減少する場合40~50%の流量の減少、降水量変化なしの場合でも20%以上の流量減となる。ハウス野菜などの増加で秋季から冬季の水需要が増え、冬季渇水の事例が増えつつあるわが国の昨今の状況を考えると、この時期の水供給には十分配慮しておく必要がある。

2030年のGCM季節変化シナリオを見てみよう。CCCシナリオ(これは、 $\Delta P = -20\%$ の年間一様シナリオに相当する)の場合、年間通じて40%前後の流量減となるが、冬季流量は $\Delta P = -10\%$ の年間一様シナリオよりも、降水が少ないにもかかわらず流量は逆に多くなっている。

夏に比べて冬季は降水量が少なく気温・湿度ともに低いので、この2つのシナリオの蒸発散量の違いはあまり大きくない。CCCは、夏から秋にかけて流出が少ない分下層タンクに貯留された雨水が相対的に多くなって、それが冬から春にかけて遅れて流出してくるのでこのような結果が得られる。

GFDLおよびUKMOシナリオは、 $\Delta P = +10\%$ で、 ΔT が4~5℃である。(3, +10)の年間一様シナリオより一年通じて流量が少なくなっている。いちばん特徴的なのは、NCARであり、夏季に $\Delta P = +20\%$ であるから、6~8月の流量が40%程度以上増大している。わが国のような季節変化の激しいところでは、このような季節性を取り入れた温暖化シナリオの重要性を強調しておきたい。積雪・融雪地域では、特に重要となってくるものと思われる。

(6) 本研究では取り入れなかったことなど

温暖化すると、豪雨はさらに時間的に集中し、渇水は長期化すると言われる。その真偽は不明であるし、大陸ではそうであっても、わが国のような地形の急峻な島国でもその通りであるかどうか今のところわからない。本研究では、日単位の雨量・流量の議論であり、そのような現象は陽には取り扱っていない。もっと短い時間単位(たとえば、1hr~12hrというような)での豪雨の集中化による洪水流量の変化を調べるためには、例えば、1hr単位の雨量・流量を取り扱うことのできる降水流出モデルでの解析が必要となろう。

積雪・融雪はわが国の水資源にとって非常に重要である。本研究では取り扱っていないが、温暖化すると冬季の降水が直ちに流出し、春季の融雪出水が減少することがいくつかの温暖化シミュレーション研究^{(19),(12),(22),(21)}で確かめられている。

温暖化による利水安全度への影響を議論するには、水需要量の変化を考慮する必要がある。温暖化という要因がなくても水需要の予測は難しいが、温暖化がからむと一層難しくなる。本研究では、便宜上、低水流量を基準流量として年内一定値、将来にわたっても一定値としてい

Table 6 月別流出量の比較 [温暖化なし(0, 0)の流量とそれに対する増減の百分率]

年	シナリオ	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
2010年 (1.5×CO ₂)	(0, 0) [百万 m ³]	6.2	6.9	7.3	9.5	7.8	14.5	32.5	17.9	29.9	8.5	4.3	3.8
	(3, -10) [%]	-22	-27	-26	-26	-24	-20	-16	-16	-12	-21	-21	-23
	(3, 0)	-10	-13	-12	-11	-9	-6	-4	-4	-3	-8	-8	-11
	(3, +10)	4	2	3	6	8	9	8	8	7	7	5	3
2030年 (2×CO ₂)	(0, 0) [百万 m ³]	6.0	6.9	7.1	9.4	8.1	14.7	31.7	17.7	28.5	7.9	4.2	3.5
	(3, -10) [%]	-42	-49	-46	-46	-43	-37	-31	-30	-24	-40	-39	-43
	(3, 0)	-20	-25	-23	-20	-17	-12	-9	-8	-6	-15	-16	-21
	(3, +10)	7	5	7	13	15	18	16	18	14	14	11	5
	CCC (3, -20)	-36	-32	-37	-42	-43	-45	-37	-41	-32	-40	-36	-32
	GISS	-24	-24	-33	-33	-31	-35	-30	-31	-15	-28	-28	-27
	GFDL/UKMO	-7	-8	-6	2	5	13	14	11	11	6	4	-6
	NCAR	-24	-30	-29	5	8	45	42	38	14	9	7	-15

る。廣瀬ら¹³⁾は、基準地点必要流量を年内の洪水期と非洪水期で区別し、河川利用率を30%としてダム運用への影響を検討しているが、この基準流量や河川利用率を温暖化によって変えているわけではない。利水安全度変化を評価しようとする場合、上水、工水、農水などの水利用形態の変化を取り込みながら、これらの値をパラメタとして温暖化シナリオに加えていくことも考えられよう。

4. 結 語

1992年2月に、IPCCの第7回会合がジュネーブで開かれ、1990年に出された評価報告書の補足報告書を作成した²⁸⁾。この報告書によれば、気候変動の水文・水資源へ及ぼす影響に関する今後の研究に対する勧告として以下の三つが挙げられている。

- 洪水および早ばつの変動特性がかなり変化するので、工学的設計の前提条件、操作規則、システム最適化、既存及び計画中の水管理システムの緊急時対応計画の再検討が必要である。
- 世界の乾燥及び半乾燥地域を対象として水文的影響の重要性及び水資源管理の脆弱性に関するより多くの研究を行うべきである。
- 結果の比較を可能にするため、気候変動に関する統一された水文学的な感度分析手法を開発する必要がある。

地球温暖化には多種多様な不確定性が含まれている。このような不確定性下で将来の予測を行うには、解析者自身の主観や不確定性がなるべく入らないようにすることが肝要である。その意味で、実績データに基づき、客観的で理解し易い手法が望ましい。こうした観点に立って、水資源に及ぼす温暖化の影響を、わが国の数百 km²程度の面積スケールの河川流域において、感度分析的アプローチによって定量的に把握しようと試みた。現在広く認知されている温暖化シナリオに基づいて、簡単に明確

な仮定・モデル構成を採用した。ここで提示した手法は、流出モデルとある程度の期間長の水文データの存在する流域であれば比較的容易に実行できよう。

このようなやり方を多数の河川流域に適用して、わが国河川流域の温暖化による水文応答変化の特徴を定量的に把握できるはずである。したがって、この方法が上記IPCCの3番目の勧告「統一された水文学的感度分析手法」の基本的枠組みとはなりえないであろうか。さらに、そうして得られる結果と、今後次々に高精度化して提示されるであろう地球環境変化シナリオ(温暖化とは限らない)およびそのアウトプットとをフィードバックさせながら、将来の水資源計画・水管理のあり方を考究してゆく(すなわち、上記勧告の1番目に応える)ことができようか。

IPCCでは、1995年頃に地球環境変化に関する次のレポートをとりまとめる予定のようである。その時にはわが国も、その世界的な立場における意味からも、各方面での研究成果を提出しなければならないであろう。

気候変動の不確定性の大きさゆえ、現在はまだ温暖化による水資源への影響に対する具体的な政策(結果対策)をとるべき時期ではない。現在は、温暖化の原因対策の実行と結果対策のための計画手法研究の時代である²⁹⁾。気候に関する経年的なトレンド(あるいは非正常性)の存在が認識されている状況のもとで、数十年から百年のオーダーの将来を目標時点とする水資源計画を策定するためにどのような情報が必要であるのか。その情報を導出するためにどのような手法がありうるのか。わが国においては、温暖化の影響に関する定量的な検討は緒についたばかりであり、水文・水資源の立場からこうした点に関する議論を深め、基礎的な研究成果をできるだけ早い時期に蓄積・総合していく必要がある。

謝 辞: 本研究の遂行にあたり、彦根気象台防災業務課には、貴重なデータを閲覧・書写させて戴くとともに、データの読み方、観測機器の改変等について詳しく説明して戴いた。数値

計算には岐阜大学情報処理センターのメインシステムを用いた。また、本報告は、文部省科学研究費補助金・総合研究(A), 03302046「地球温暖化のもとでの水資源システムの安全度評価と耐渇水方策に関する総合的研究」(代表・小尻利治)による成果の一部である。ここに記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) IPCC, WMO/UNEP: *Climate Change—The IPCC Scientific Assessment*, J. T. Houghton et al. (eds.), Cambridge University Press, 365pp., 1990.
- 2) 西岡修三(監訳): 地球温暖化の影響予測, IPCC第2作業部会報告書, 中央法規出版, 233pp., 1992.
- 3) Jäger, J. and Ferguson, H.L. (Eds.): *Climate Change: Science, Impacts and Policy*, Proceedings of the Second World Climate Conference, Cambridge University Press, 578pp., 1991.
- 4) 地球温暖化影響研究会(代表・松尾友矩)編: 地球温暖化による社会影響, 技報堂出版, 332pp., 1990.
- 5) 土木学会: 地球規模環境問題に関するミニワークショップ講演集, 84pp., 1991.
- 6) 松岡 謙・森田恒幸・甲斐沼美紀子: 地球温暖化に関するシナリオとモデル解析, 土木学会論文集, 第449号/IV-17, pp. 1~16, 1992.
- 7) Waggoner, P.E. (Ed.): *Climate Change and U.S. Water Resources*, John Wiley & Sons, 496pp., 1990.
- 8) 花木啓祐(訳): 上記訳文献2)の pp. 97-132.
- 9) 吉野文雄: 地球温暖化による水文循環への影響予測, 土木学会誌, 第75巻, 1990年4月号別冊増刊, pp. 18-21, 1990.
- 10) 盛谷明弘・丹羽 薫: 長期観測資料に基づいた温暖化の水資源への影響評価について, 水工学論文集, 第35巻, pp. 647-652, 1991.
- 11) Masukura, K., Yoshitani, J., Yoshino, F. and Kavvas, M.L.: Possible changes of hydrological cycle by greenhouse effect in Japanese rivers, *International Conf. on Climatic Impacts on the Environment and Society (CIES)*, University of Tsukuba, Ibaraki, Japan, Jan. 27 - Feb. 1, 1991.
- 12) 益倉克成・吉谷純一: 気候変化に伴う利根川の流量変動の評価, 第4回水資源に関するシンポジウム前刷集, pp. 751-756, 1992.
- 13) 廣瀬昌由・丹羽 薫・宮井貴大: 地球温暖化がシナリオのもとでの河川流況の解析, 第4回水資源に関するシンポジウム前刷集, pp. 763-768, 1992.
- 14) 宝 馨・小尻利治・牧 宏幸・Tan, B.L.: 温暖化による流域水文応答変化に関する検討, 水文・水資源学会1991年度研究発表会要旨集, pp. 138-141, 1991.
- 15) Takara, K., Kojiri, T., Ikebuchi, S. and Takasao, T.: A simulation study on catchment response change due to global warming, *Environmental Hydraulics*, Lee & Cheung (eds.), Balkema, pp. 1451-1456, 1991.
- 16) 宝 馨・Tan, B.L.: 輪銅兎成: 温暖化による河川流況の統計量分布の変化に関する研究, 土木学会中部支部平成三年度研究発表会講演概要集, pp. 143-144, 1992.
- 17) 宝 馨・牧 宏幸・岡田 裕: 温暖化による渇水の頻度・規模及び利水安全度の変化に関する研究, 土木学会中部支部平成三年度研究発表会講演概要集, pp. 141-142, 1992.
- 18) 宝 馨: 地球温暖化シナリオのもとでの河川流況の解析, 第4回水資源に関するシンポジウム前刷集, pp. 745-750, 1992.
- 19) 小尻利治: 地球温暖化が及ぼす利水システムの安全度への影響評価に関する研究, 第4回水資源に関するシンポジウム前刷集, pp. 11-20, 1992.
- 20) 田中丸治哉・角屋 睦: 気温上昇が流域水循環に与える影響, 京大防災研究所年報, 第34号B-2, pp. 189-207, 1991.
- 21) 田中丸治哉・角屋 睦: 気候変化シナリオに基づく温暖化の流域水循環への影響評価, 第4回水資源に関するシンポジウム前刷集, pp. 757-762, 1992.
- 22) 安藤義久・合田十三夫: 地球温暖化による河川流出への影響評価に関する研究, 第4回水資源に関するシンポジウム前刷集, pp. 739-744, 1992.
- 23) 気候問題懇談会: 「温室効果検討部会」報告について, 気象庁資料, 平成2年7月.
- 24) 琵琶湖総合水管理研究委員会: 水理・水文化部会総括報告書, 昭和59年6月.
- 25) 宝 馨・高棹琢馬: 水文頻度解析における確率分布モデルの評価規準, 土木学会論文集, 第393号/II-9, pp. 151-160, 1988.
- 26) 江藤剛治・室田 明・米谷恒春・木下武雄: 大雨の頻度, 土木学会論文集, 第369号/II-5, pp. 165-174, 1986.
- 27) 山内 彪: 利水安全指標について, 水文・水資源学会誌, 第3巻2号, pp. 3-8, 1990.
- 28) WMO/UNEP, IPCC(環境庁他訳): 気候変動に関する政府間パネル IPCC 補足説明書, 1992年2月(シンポジウム「地球温暖化をめぐる最新の科学的知見」, (1992年5月, 主催:(財)地球・人間環境フォーラム)での配付資料).
- 29) 竹内邦良: 地球温暖化と水資源, 第6回環境工学連合講演会講演論文集, pp. 7-12, 1991.

(1992. 8. 26 受付)

NUMERICAL EXPERIMENTS ON EFFECTS OF GLOBAL WARMING ON CATCHMENT RESPONSE CHANGE

Kaoru TAKARA and Toshiharu KOJIRI

This paper describes the impacts of global warming on water resources in a catchment. The authors assumes some warming scenarios including seasonal condition change based on GCMs' outputs. Using meteorological data and a hydrological model, they conduct rainfall-runoff simulation that produces forty-year prediction of daily streamflow in the Yasu River basin (387 km²) in Japan. The numerical experiments have quantitatively revealed the change of discharge at the stages of 1.25×, 1.5×, 1.75×, and 2.0×CO₂ for each warming scenario and compared it with the result for a non-warming scenario(1.0×CO₂).