

土 木 研 究 所 資 料

地球温暖化が水資源に及ぼす影響に関する考察

平成9年3月

建設省土木研究所
ダム部水工水資源研究室

Copyright ©1997 by P. W. R. I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P. W. R. I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

地球温暖化が水資源に及ぼす影響に関する考察

水工水資源研究室	室長	柏井 条介
	主任研究員	角 哲也
	研究員	安達 孝実
	研究員	宮井 貴大

要 旨

全世界的に地球環境問題に対する関心が集まり、中でも地球温暖化が注目されている。地球温暖化現象により全球規模でさまざまな影響が人間社会に生じると予想されており、水資源に対しても大きな影響が生じるものと考えられている。

地球温暖化現象が水資源に与える影響を考える場合、水文循環の変化を人間に係わる需要と供給の両面から考察することが必要となる。

本資料は、地球温暖化現象が水資源に及ぼす影響を供給面および需要面から評価したものであり、河川流況・ダム容量・利水安全度といった水資源供給に対する影響を把握するとともに、特に都市用水を対象に水資源需要量に対する影響を現状をふまえて評価し、供給面と需要面を総合的にとらえた上で、21世紀に向けての水資源計画・管理に対する基礎資料とするものである。

キーワード： 地球温暖化、水資源、水供給、水需要、温暖化シナリオ、気温上昇、降水量変化

目 次

1. はじめに	1
2. 目的・研究方針	3
2.1 本研究の目的	3
2.2 地球温暖化に関する現状の知見	3
2.3 地球温暖化による影響の評価	5
2.3.1 供給量への影響の評価方法	5
2.3.2 需要量への影響の評価方法	6
2.3.3 供給量・需要量への影響を考慮した渇水強度変化の評価方法	7
3. 水資源供給に対する温暖化の影響について	9
3.1 観測データに基づく影響の検討	9
3.1.1 現状の把握	9
a. 過去100年間の気候特性（温暖期と寒冷期の抽出）	9
b. 温暖期と寒冷期の降水量特性の比較	9
c. 温暖期と寒冷期の降水パターンの比較	11
3.1.2 温暖期と寒冷期でのダム運用の相違と温暖化の影響	13
a. 対象ダムにおける貯水池流入量特性の相違	13
b. 対象ダムにおけるダム運用特性の相違	14
3.2 温暖化シナリオに基づく影響の検討	17
3.2.1 ダム流域における温暖化の影響	17
a. 対象ダムにおける流域特性の相違	17
b. シナリオに基づいた温暖化の影響	20
(1) 温暖化シナリオによる流況の比較	20
(2) 温暖化シナリオに基づいた水資源の安全度評価	24
(3) 1/10安全度を確保するのに必要なダム容量の比較	25
3.2.2 流域全体における温暖化の影響	31
a. 対象河川でのダムによる水資源開発状況	31
b. シナリオに基づいた温暖化の影響	34
(1) 気温上昇による水資源賦存状況への影響	34
(2) 気温上昇による開発すべき水量への影響	35

4. 水資源需要に対する温暖化の影響について	39
4.1 現状の把握	39
4.1.1 全国レベルでみた気温と都市用水使用量の関係	39
4.1.2 気温と用途別水使用量の関係	42
4.2 気温を用いた都市用水使用量の関数近似	44
4.3 温暖化による増加需要量の推計	47
4.3.1 需要量推計モデル	47
4.3.2 温暖化後の気温分布の仮定	48
4.3.3 温暖化シナリオの策定	49
4.3.4 シナリオに基づいた水需要量の推計	50
5. 地球温暖化による水資源供給・水資源需要への影響を考慮した渇水強度の変化について	53
5.1 モデルダム及びモデル水系の概要	53
5.2 対象とする温暖化シナリオ	54
5.3 モデルダムにおける水資源供給・水資源需要特性	54
5.3.1 モデルダムにおける水供給特性	54
5.3.2 モデルダムにおける水需要特性	55
a. 上水道用水需要特性	55
b. 灌漑用水需要特性	56
5.3.3 温暖化による渇水強度の変化	57
a. 通年でみた場合の渇水強度の変化	57
b. 気温上昇期間を限定した場合の渇水強度の変化	63
6. まとめ	69
6.1 地球温暖化が水資源供給に及ぼす影響	69
6.2 地球温暖化が水資源需要に及ぼす影響	70
6.3 地球温暖化による水資源供給・水資源需要への影響を考慮した渇水強度の変化	70
6.4 今後の課題	71
参考文献	72
あとがき	74

図 一 覧

図-3.1	年平均気温の経年変化(～1989年)	10
図-3.2	年平均降水量の経年変化(～1989年)	10
図-3.3.1～3.3.4	期間降水量の比較	11
図-3.4.1～3.4.2	地域別2日降水量発生頻度	12
図-3.5	各期間における連続無降雨日数の超過確率	13
図-3.6	モデルダムにおける10年平均のダム流入量の流況曲線	14
図-3.7	モデルダムにおける寒冷期と温暖期の流量差の比率(寒冷期を正)	14
図-3.8.1～3.8.2	モデルダムにおける各代表流量及び全流量に対する比率	15
図-3.9	タンクモデル模式図	15
図-3.10.1～3.10.2	モデルダムにおけるダム運用計算図	16
図-3.11	A～Cダムの流況曲線(100km ² 当たり換算値)	18
図-3.12.1～3.12.3	A～Cダムの半旬流量・確保流量曲線(100km ² 当たり換算値)	19
図-3.13.1～3.13.3	A～Cダムの不足累加量曲線(100km ² 当たり換算値)	21
図-3.14	A～Cダムの不足累加量と河川利用率の関係(1986～1987)	22
図-3.15	Cダムの流況(CASE 2, 11)	23
図-3.16	A～Cダムの流況曲線比(10年平均)(CASE 2 / CASE 11)	23
図-3.17	A～Cダムのダム運用計算結果(CASE 2, 5, 8, 11)	24
図-3.18.1～3.18.3	A～Cダムの年間有効降水量比率(CASE 2, 11)	26
図-3.19.1～3.19.3	A～Cダムの月別有効降水量比率(CASE 2, 5, 8, 11)	27
図-3.20	A～Cダムの渇水生起回数(CASE 2, 5, 8, 11)	28
図-3.21	A～Cダムの渇水生起日数(CASE 2, 5, 8, 11)	28
図-3.22.1～3.22.12	A～Cダムの必要容量(CASE 1～12)(河川利用率30～60%)	29
図-3.23.1～3.23.12	A～Cダムの単位流域面積当たりの必要容量 (CASE 1～12)(河川利用率30～60%)	30
図-3.24.1～3.24.4	A～Bダムの不足%日(CASE 1～12)(利水安全度1/10・1/30)	31
図-3.25	対象河川諸元	33
図-3.26	利根川・淀川の上工水開発状況	35
図-3.27.1～3.27.2	各河川の水資源賦存量変化(CASE 1～12)	35
図-3.27.3～3.27.4	各河川の水資源賦存量変化率(CASE 1～12)	35
図-3.28.1～3.28.2	各河川の水資源利用率変化(CASE 1～12)	36
図-3.28.3～3.28.4	各河川の水資源利用率変化率(CASE 1～12)	36
図-3.29.1～3.29.2	各河川の新規開発容量変化(CASE 1～12)	36
図-3.30.1～3.30.2	各河川の新規開発用量変化の対現状比(CASE 1～12)	37

図-4.1.1～4.1.12 12都道府県における平均気温と水使用量変動指数の関係	40
図-4.2 12都道府県における平均気温での水使用量変動指数の相違	41
図-4.3 12都道府県における1～2月の平均気温と水使用量変動指数平均値の関係	41
図-4.4.1～4.4.3 3都市の水使用量原単位と日平均気温の関係	42
図-4.5.1～4.5.3 3都市の月平均気温と水使用量変動指数の関係	43
図-4.6.1～4.6.6 3都市の用途別にみた月平均気温と水使用量変動指数の関係	44
図-4.7.1～4.7.3 3都市の日平均気温と水使用量原単位の近似式	46
図-4.8 温暖化による水需要量増加推計の考え方	47
図-4.9.1～4.9.6 3都市の年間気温分布(通年・期間別)	48
図-4.10 温暖化シナリオ(シナリオ1～3)	49
図-4.11.1～4.11.3 温暖化による年間水需要量の変化	51
図-4.12.1～4.12.3 温暖化による一日最大水需要量の変化	51
図-4.13.1～4.13.2 3都市の平均気温と水需要量の増加率	52
図-4.14.1～4.14.3 3都市の各季節でみた水需要量の増加率	52
図-5.1 モデルダム近傍都市における日平均気温の年平均分布	54
図-5.2 モデルダムにおける各CASEの年平均有効降水量比率	55
図-5.3 上水道用水使用量原単位と月平均気温の関係	56
図-5.4 灌漑期における地域別日蒸発散量と平均気温の関係	56
図-5.5.1～5.5.6 Type A・Bの渇水強度(気温上昇期間:通年)	58
図-5.6.1～5.6.6 Type A・Bの渇水強度の対現状比(気温上昇期間:通年)	59
図-5.7 降水量変化に伴う渇水強度の変化	60
図-5.8.1～5.8.6 降水量変化に伴う渇水強度の変化比率	61
図-5.9 供給・需要への影響による渇水強度変化	62
図-5.10.1～5.10.6 Type A・Bにおける各CASEの渇水強度	62
図-5.11.1～5.11.3 供給への影響と需要への影響の比率	63
図-5.12.1～5.12.9 Season A)～C)における各CASEの渇水強度	65
図-5.13.1～5.13.9 Season A)～C)における各CASEの渇水強度の対現状比	66
図-5.14.1～5.14.6 Season A)～C)における降水量変化に伴う渇水強度の変化比率	67
図-5.15 気温上昇期間による渇水強度変化	68
図-5.16.1～5.16.6 気温上昇期間による渇水強度の変化比率	68

表 一 覧

表-3.1	気温及び降水量収集地点(59地点)	10
表-3.2	モデルダムのタンクモデル係数	15
表-3.3	A~Cダム諸元	17
表-3.4	A~Cダムの降水量・流入量・蒸発散量(1981~1990)	18
表-3.5	温暖化シナリオ(CASE 1~CASE12)	22
表-3.6	A~Cダムのタンクモデル係数	22
表-3.7	対象河川諸元	32
表-3.8	各水系の開発状況	34
表-3.9.1~3.9.2	各河川の蒸発散量補正係数(CASE 1~12)	35
表-4.1	各期間における気温と水使用量変動指数の定式化(1965.4~1991.12)	41
表-4.2	3都市における水使用量の多項式近似	45
表-4.3	3都市における水使用量近似式係数の同定結果	46
表-4.4	3都市における気温分布の基本統計値	49
表-5.1	モデルダム下流基準地点での必要流量	53
表-5.2	上水道用水・灌漑用水・維持流量の計算方法	57

1. はじめに

1. はじめに

近年、地球環境問題として、オゾン層の破壊や二酸化炭素等の温室効果気体の増加による地球温暖化、酸性雨などが大きな社会問題となってきた。これらの問題は全球規模で、様々な影響を人間社会に及ぼすことが予想されているが、中でも、地球温暖化は我が国の水資源に大きな影響を与えるといわれている^{1)~8)}。地球温暖化は、太陽からの入射光は通すが、地球からの赤外線放射を吸収する二酸化炭素やフロンなどのいわゆる温室効果気体が増加し、地球の外へ熱が逃げるのを妨げるために、地表の気温が上昇する現象である。1980年代より地球規模の気候変化に関する研究は数多く行われており^{1)~8)}、例えば気候変動に関する政府間パネル（IPCC）2次報告²⁾によれば、温室効果気体の抑制に対して特段の対策を講じなければ、地球全体の平均気温は2100年に約2℃上昇するとされている。

このような気候変化が、我が国の水資源計画・管理にどのような影響を及ぼすのかを検討する必要があるが、地球温暖化が日本規模の水文気象に及ぼす影響は、現在までの知見では十分といえず、特に流域規模のスケールでの降水量や降水パターンにどのような影響を与えるかは、未だ不確定な部分が多い。

総合的な水資源体系は、水文的水循環・水資源供給・水資源需要の3要因から構成されと考えられるが、地球温暖化現象は、各要因及び要因相互に複雑に関係することが予想される。そこで、水資源への影響を考える場合には水循環の各過程における変化を人間に係わる需要と供給の両面から考察することが必要である。

ここでは、河川流況・ダム容量・利水安全度といった水資源供給に対する温暖化の影響を把握するとともに、特に都市用水を例に水資源需要量に対する温暖化の影響を現状をふまえて評価し、供給面と需要面を総合的にとらえた上で、21世紀に向けての水資源計画・管理に対する基礎資料を作成することとする。

2. 目的・研究方針

2. 目的・研究方針

ここでは、地球温暖化現象が水資源に及ぼす影響の把握に関する本研究の目的を説明する。さらに、IPCC 報告^{1)~2)}等を参考に、現状での地球温暖化についての知見を整理するとともに、本研究の進め方を説明する。

2.1 本研究の目的

総合的な水資源体系は、水文的水循環・水資源供給・水資源需要の3要素から構成されと考えられる。地球温暖化現象が水資源体系に及ぼす影響としては、地球温暖化現象による気温上昇やそれに伴う降水量変化等の水文的水循環の変化、気温上昇に伴う地面からの蒸発散量の変化やそれに伴うダム貯水量の減少等の水資源供給面での変化、気温上昇に伴う水需要量の増加等の水資源需要面での変化等が挙げられる。そこで、この影響を把握する場合には、水循環の各過程における変化を人間に係わる水資源供給と水資源需要の両面から考察する必要がある。

ここでは、河川流況・ダム容量・利水安全度といった水資源供給面に対する温暖化の影響を把握するとともに、特に都市用水を対象に水資源需要量に対する温暖化の影響を現状をふまえて評価する。その結果をもとにして、地球温暖化による水資源供給面及び需要面への影響を考慮した水利用者に対する渇水強度の変化を検討し、今後の水資源計画・管理に対する基礎資料を作成することを目的とする。

2.2 地球温暖化に関する現状の知見

これまでに地球温暖化については広範囲な研究・分析が行われており^{1)~28)}、これまでの気象・水文データ等を用いて多くの予測がなされている。

気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 2次報告 (1996)²⁾では、以下に示すような気候の系統的变化が確認されとしている。

- ・ 全球平均地上気温は19世紀以降、0.3~0.6℃上昇した。1990年以降に追加された利用可能なデータと再解析が、この増加の推定範囲を大きく変えることはなかった。
- ・ 1860年以降、すなわち測器観測記録のある期間では、ここ数年は一番暖かった。
- ・ 一般に夜間の気温上昇量の方が、昼間の気温上昇量よりも大きい。
- ・ 地域的にみると、北大西洋のように寒冷化している地域もいくつかあるが、冬と春において中緯度にある大陸では最近の温暖化は最も大きくなっている。特に、寒い地域において、北半球の高緯度にある陸上で降水量が増加してきている。
- ・ 全球海面水位は過去100年に10~25cm上昇し、この海面上昇の大部分が全球平均気温の上昇に関係している。また、一部の地域では大雨時の降雨強度の増加等の気象現象の極端化が観測されている。
- ・ 気候の変動性ないし極端な天候現象が、20世紀において全球的に一貫して顕在化してきたかどうかを決定する適当なデータはない。地域的な規模では、いくつかの極端な現象と気候の変動性を示す指標 (例えば、いくつかの広い地域で霜が少ないこと、米国の隣接するいくつかの州で極端な現象に伴う降水の割合が増加していること) に変化が起きている明らかな証拠がある。これらの変化の

あるものは変動性が増加してきた傾向にあり、あるものは減少してきた傾向にある。

- ・1990年から1995年中頃にかけての温暖時期（エルニーニョが持続等）は過去200年の状況から考えて異常であった。

さらに、IPCC 2次報告²⁾では、19世紀以降の気候を解析し、人為的影響による地球温暖化が既に起こりつつあることを確認したとしている。さらに、同報告では植生、水資源、食糧生産、洪水・高潮、健康影響の視点から、大気中の二酸化炭素濃度倍増時の地球温暖化の影響を予測している。水資源関連の予測は以下のとおりである。

- ・2100年の中位の予測として、全球レベルで約2℃の平均気温の上昇があり、地域により極端な高温等の気候変化の可能性がある。
- ・気候変動は地球規模での水循環を増大させ、地域ごとの水資源へ重要な影響を与え得る。総降水量、降水頻度、降雨強度、連続無効雨日数等の降水に係わる変化は、ただちに流出量の大きさと時期、干ばつ等の強度に影響する。また、気温と降水量の比較的小さな変化でも、蒸発散と土壌水分量に大きな影響を及ぼし、特に乾燥・半乾燥地帯においては比較的大きな流出量変化をもたらす可能性がある。
- ・現存する山岳氷河の1/3～1/2が今後100年間に消滅する可能性があり、氷河と積雪の減少が河川流量の季節変化や水供給に大きな影響を及ぼす可能性がある。特に、春期の流出水を減少させ、冬の流出水を増加させる傾向がある。

なお、これらの予測は特定地域に対しては不確実性を伴うため、特定地域の予測については更なる検討が必要であるとしている。

また、気象庁に設置された気候問題懇談会温室効果検討部会^{3)～5)}では、地球温暖化の影響を次のように報告している。

- ・気温上昇に伴い大気中の水蒸気量が増加し、全球平均気温の1.2～3.0℃の上昇に伴い、全球平均降水量及び蒸発散量は2～9%それぞれ増加する。
- ・対流性降水の増加により、強い降水強度の生じる確率が高くなり、降水域の集中化が起きる。
- ・中緯度多雨地帯は特に北半球で極方向にずれ、全般的に高緯度で洪水が増加する。
- ・気候モデルによって降水量の変化の地理的分布の予測結果の間に差が大きい。
- ・積雪域、海水域が減少、後退する。
- ・雪解けが早く始まり、その後地表面からの蒸発の盛んな時期が長く続く。
- ・中高緯度夏期の土壌水分の変化は、春先の土壌水分が多い（少ない）場合、夏期の土壌水分は現在より減少（増加）する結果になっている。結果的にはモデル間に違いはあるが、夏期後半の土壌水分の減少を予測する結果が多い。

同様に、わが国に対する温暖化の影響を以下のようにまとめている。

- ・冬季の寒気の吹き出しが弱まる傾向にある。
- ・夏のアジアモンスーンが強まる傾向にある。
- ・夏のアジアモンスーンの開始時期については、現在のところ早まるかどうかについては結論できない。

・梅雨、台風はともに我が国にとって大きな影響を持つが、その動向については今後の検討課題である。

また、電力中央研究所報告²⁰⁾では地球温暖化について、全球レベルのGCMモデルの予測結果を用いて、さらに日本列島全域程度を対象とするRegCMモデルにより、日本国内における地域的特性を、現状と二酸化炭素倍増時の気温・降雨量の変化について試算し、以下の知見を得ている。

・地上気温は高緯度地方の方が温度上昇度が高く、その傾向は冬季に強く表れる。

・日本列島全域の平均的な気温上昇量は夏季に約4.89℃、冬季に6.48℃、年間で5.74℃となっている。地域的な温度上昇量については、次の特徴が確認されている。

・冬季の北日本（北海道・東北地方）で気温上昇量が非常に大きく、北海道では1月の上昇量は約13℃、東北では約7.5℃となる。

また、降水量への影響については、次の知見が得られている。

・全国的に各地の降水量は増加し、年平均で13～26％増加する。また、秋季・冬季の増加量が大きく、15～60％増加する。

この予測はIPCC 2次報告²¹⁾よりもやや高めの気温上昇量を与えているものの、高緯度地域での気温上昇が顕著なことで一致している。

また、建設省土木研究所水文研究室では、メソスケール水文－気象モデルを用いた分析^{20)～21)}で、季節的・地域的に相違はあるとしながらも、二酸化炭素倍増時の予測に関して以下の知見を得ている。

・二酸化炭素倍増時には、日本全域で年平均気温は2～5℃上昇する。特に、北海道で気温の上昇が著しく、九州・四国では気温はそれほど上昇しない。

・二酸化炭素倍増時には、日本全域で年間降雨量は減少傾向にある。

こうした気候変動による水資源の安定供給への不確実性の増大に対処する方策として、世界的には、既存の給水施設における効率的な水管理、節約を促進し水使用量を抑制する適切な水需要管理、洪水・干ばつの監視予測システムの改善、特に熱帯地域における集水域の修復、融雪や暴風雨のパターンの変化による過剰流量を捕捉・貯留するための新しい貯水能力の確保等の総合的な取り組みが進められようとしている。

2.3 地球温暖化による影響の評価

本報告では、地球温暖化に関する以上のような知見をふまえ、温暖化による日本の水資源への影響を、供給面への影響及び需要面への影響の両面から検討を進める。

水資源供給への影響の検討では、地球温暖化による水資源への影響要因として、気温上昇による降雨量の変化・流域の蒸発散量の変化をとりあげ、気温上昇に伴う水資源供給量（賦存量）へのインパクトを把握する。また、水資源需要への影響の検討では、特に都市用水をとりあげ、気温上昇に伴う都市用水需要量へのインパクトを把握する。詳細は次節以降で説明する。

最後に、水資源供給・需要の両面から地球温暖化の影響を渇水強度の観点からとりまとめ、供給面及び需要面の双方をふまえた温暖化による水資源への影響を総合的に考察する。

2.3.1 供給量への影響の評価方法

温暖化による水資源供給量への影響は以下の手順に従って検討を進めた。なお、①、②はこれまでの実績

値をもとに検討を行ったもの、③、④は現在値をもとに温暖化シナリオを設定して検討を行ったものである。

①現状の把握

過去100年間を対象とした気温特性をまとめ、将来における気候変化時の予測の一手法として、これら100年間の中から温暖な時期10年と寒冷な時期10年をそれぞれ抽出し、各時期の降水量特性・降水パターンを整理する。

②温暖時期と寒冷時期でのダム運用の相違と温暖化の影響

①で整理した温暖時期と寒冷時期を対象期間として、モデルダムを対象に、貯水池流入特性・ダム運用の相違を計算し、気温差の相違との関係について検討を行う。ここで対象とするモデルダムは四国瀬戸内側に位置し、ダム流域472.0km²を有する。

③地域特性の異なるダムにおける流入特性の相違と温暖化の影響

地域特性の異なる九州北部・四国瀬戸内側・東北太平洋側に位置し、流域面積18.9, 28.0, 740.0 km²を有する3ダムを対象に、現状での流域特性を明らかにし、温暖化シナリオに基づいた気温変化・降水量変化によりダム流入特性がどのような影響を受けるかについて検討する。シナリオとして設定した各CASEに対して貯水池での流況・水資源の安全度を比較検討するとともに、一定の安全度を確保するための必要容量の比較検討を行う。

④対象河川でのダムによる水資源開発状況と温暖化の影響

日本における主要流域から7河川を抽出し、現在のダムによる水資源開発状況を把握する。さらに、温暖化シナリオに基づいた気温変化・降水量変化により、各河川の水資源賦存状況の変化・開発すべき容量の変化を比較検討するとともに、利水安全度を変化させた場合にどのような温暖化の影響を受けるかについて比較検討を行う。

2.3.2 需要量への影響の評価方法

水需要には、都市用水・農業用水等、種々のものがあり、温暖化による影響もその利用目的により異なると思われるが、本検討では以下の手順に従って検討を進めた。

①現状の把握

全国レベルおよび都市レベルでみた都市用水使用量と気温との関係を実際の給水量データから明らかにする。さらに、都市レベルにおいて、用途の相違による水使用量と気温との関係についても検討を行う。

②気温を用いた水需要量の定式化

①で得られた結果をもとに、水使用量≒水需要量とし、日本の都道府県を対象に気温と都市用水需要量の関係を定式化する。また、係数の同定値から水需要量の年間変動の地域特性を明らかにし、得られた地域特性に応じて分類を行う。さらに、各分類を代表する都市を抽出し、都市レベルについても同様の定式化を行う。

③温暖化による増加需要量の推計

対象都市ごとに、現状の年間の気温分布特性を整理する。また、この結果を踏まえて、需要量推計モデルを構築する。さらに、温暖化後の気温分布を仮定し、シナリオとして設定した各CASEに対して都市用水需要量の推計を行うとともに、温暖化の影響について比較検討を行う。

2.3.3 供給量・需要量への影響を考慮した渇水強度変化の評価方法

温暖化による水資源供給・需要への影響を個別に分析した結果をふまえ、それらの影響を同時に考慮した場合の温暖化の影響を、水利用者に対する渇水強度の観点から総合的に評価し、特に全体における、供給面と需要面への影響の割合について考察を行う。ここで対象とするモデルダムは四国瀬戸内側に位置し、ダム流域28.0km²を有する。

①モデルダムに関する諸元の把握

モデルダムに関する諸元、モデルダム近傍都市の気象特性、下流基準地点における必要流量をまとめ、渇水強度分析のための条件を整理する。

②温暖化による水供給量変化の把握

温暖化による水供給量の変化として、2.3.1③、④と同様に、ダム流入量・基準地点流入量がどのような影響を受けるかについて検討する。

③温暖化による水需要量変化の把握

気温上昇が水需要量の変化に及ぼす影響を検討する。ただし、ここでは上水道用水とともに灌漑用水についても検討対象に加える。

上水道用水については、2.3.2同様に需要量≒使用量として、モデルダム流域の実績使用量原単位と月平均気温の関係を定式化し、これを用いてモデルダム流域での上水道用水必要流量を平均気温の関数として示す。

灌漑用水については、水田用水の必要減水深をもとに、蒸発散量が気温上昇の影響をうけるものとして、モデルダム流域での灌漑用水必要流量と気温上昇の関係を把握する。

④温暖化による渇水強度変化の分析

②～③の結果をもとに、温暖化による水資源供給・需要への影響を同時に考慮した場合の各CASEの渇水強度を、シナリオに基づいて計算する。これをもとに、気温上昇、降水量変化が水供給、水需要にそれぞれどの程度の割合で影響を及ぼすのか、また、水供給に対する影響と水需要に対する影響が、全体としての渇水強度の変化に及ぼす割合についても考察を行う。

3. 水資源供給に対する 温暖化の影響について

3. 水資源供給に対する温暖化の影響について

本章では、気温と水供給量についての基礎的な分析を行い、温暖化が進行した場合の水供給量の大きさを定量的に推計することを試みる。

まず、日本における過去100年間の観測データから温暖期と寒冷期を設定し、各期における降雨特性を整理する。そして、各期間における降雨特性の相違がダム運用にどのような影響を与えるかを検討する。

次に、気温上昇量及び降水量変化量を変化量とする温暖化シナリオを作成し、これらシナリオに基づいて、ダム流域及び流域全体における温暖化の影響を検討する。

ダム流域については、対象3ダムの流出モデルを作成し、各ダム流域の流域特性の相違を把握する。その結果をもとに、シナリオに基づいて流況・水資源安全度・ダム容量の比較検討を行うとともに、温暖化の影響を利水安全度から評価する。

流域全体については、ダムによる水資源開発状況を対象7河川で把握し、その結果をもとに、シナリオに基づいて、温暖化による水資源賦存状況・開発すべき容量への影響を比較検討する。

3.1 観測データに基づく影響の検討

ここでは、観測データをもとに温暖期と寒冷期の降水特性を把握し、その降水特性がダム運用にどのような影響を及ぼしているかについて検討を行う。

3.1.1 現状の把握

ここでは、日本各地の気象官署の気温観測データ²⁰⁾をもとに、温暖期と寒冷期を抽出し、その期間の降水特性を比較する。

a. 過去100年間の気候特性（温暖期と寒冷期の抽出）

検討の対象とした気温及び降水量は、表－3.1に示す59地点での観測資料である。このうち、全国年平均気温の算定に用いた資料は降水量資料のみを収集した12地点を除く47地点における月平均気温であり、資料収集期間は各地点の観測開始から1989年までである。この47地点での月平均気温の単純平均値から求めた全国年平均気温及び10年移動平均値の経年変化を図－3.1に示す。図より、10年移動平均値は1904～1913年で最小、1978～1987年で最大となった。それぞれの期間の全国年平均気温の10カ年平均値は13.58℃及び14.54℃である。なお、10年間の平均を用いて温暖な10年と寒冷な10年という形で検討を行ったのは、わが国の水資源計画が10年1位（20年2位）の渇水を対象に計画を策定しているからである。

b. 温暖期と寒冷期の降水量特性の比較

上述の温暖期（1978～1987年）と寒冷期（1904～1913年）の降水量の特性を把握するために、以下の検討を行った。

まず、表－3.1に示す59地点における観測開始から1989年までの日降水量データを収集し、そのデータを用いて全国平均の年降水量及びその10年移動平均値を求めた。それらの経年変化を図－3.2に示す。同図より、温暖期と寒冷期の10年移動平均を比較すると、温暖期の平均降水量（1512.73mm）が寒冷期の値

表-3.1 気温及び降水量収集地点 (59地点)

地域	観測地点 (下線は降水量データのみの収集地点)								
北海道	旭川	網走	札幌	帯広	根室	寿都	函館		
東北	青森	秋田	宮古	山形	石巻	福島			
関東	宇都宮	前橋	熊谷	水戸	甲府	銚子	東京	横浜	
北陸	新潟	金沢	伏木	長野	松本	飯田			
中部	高山	岐阜	名古屋	津	浜松				
近畿	福井	京都	彦根	神戸	大阪	和歌山	敦賀		
中国	境	浜田	下関	広島	岡山				
四国	松山	高知	徳島	多度津					
九州	厳原	福島	佐賀	大分	長崎	熊本	鹿児島	宮崎	名瀬
沖縄	石垣島	那覇							

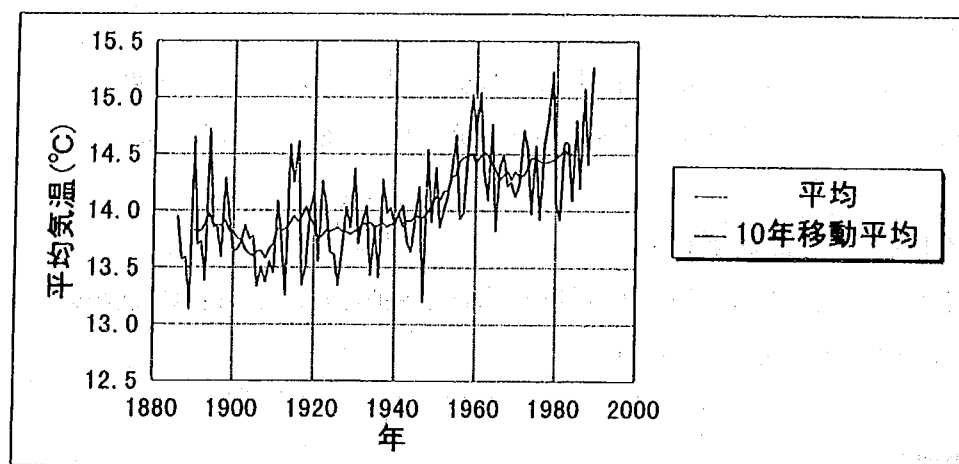


図-3.1 平均気温の経年変化 (～1989年)

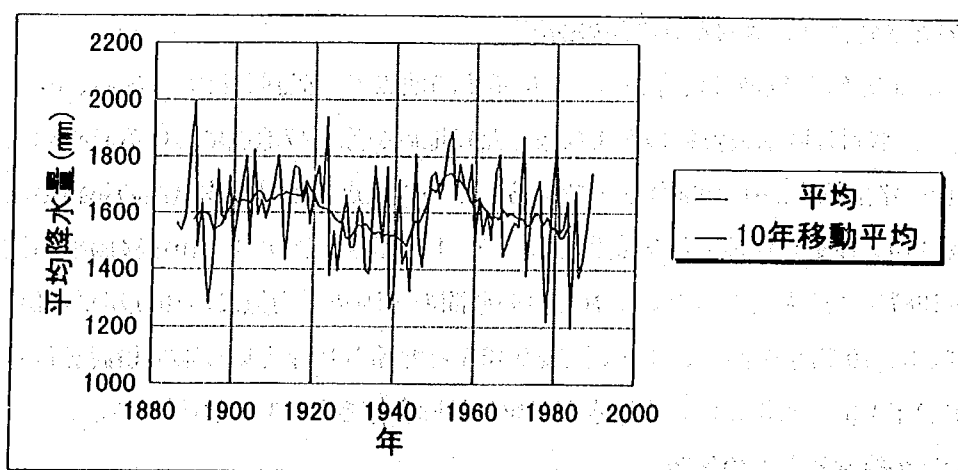


図-3.2 年平均降水量の経年変化 (～1989年)

(1633.52mm) より少ないことがわかる。これは、気温上昇量 0.96°C に対して、降水量が7.39%減少することを示している。また、それぞれの10年間の期間中の降水量の変動をみると、温暖期の方がばらつきが大きい。

次に、我が国における水需要の多い時期は一般に暖候期である5～9月であり、ここでは年間及びこの5ヶ月間を対象に期間降水量を比較する。

夏季に発生した既往渇水時の降水量の変化をみると、空梅雨と夏季の好天の断続により渇水となり、台風時の秋季の大雨で解消される例が多く見受けられる。従って、5～9月の総降水量だけではなく、前半の梅雨期にどれだけの降水量があるかが需要の多い時期の渇水である夏型渇水に関する降水特性の整理として重要であると考えられる。

以上より、期間降水量の整理は5～9月の他に、5～7月、8～9月、また、と比較のための通年の合わせて4つの期間について各観測地点毎に行った(図-3.3.1～3.3.4)。これらの図から、年間降水量及び5～9月の降水量とも、温暖期が寒冷期に比べて、多くの地点で下回っていることがわかる。また、8～9月の降水量の差が5～7月に比べてより顕著であり、梅雨期より夏季の旱天期の方が降水量の差に大きく影響していることがわかる。

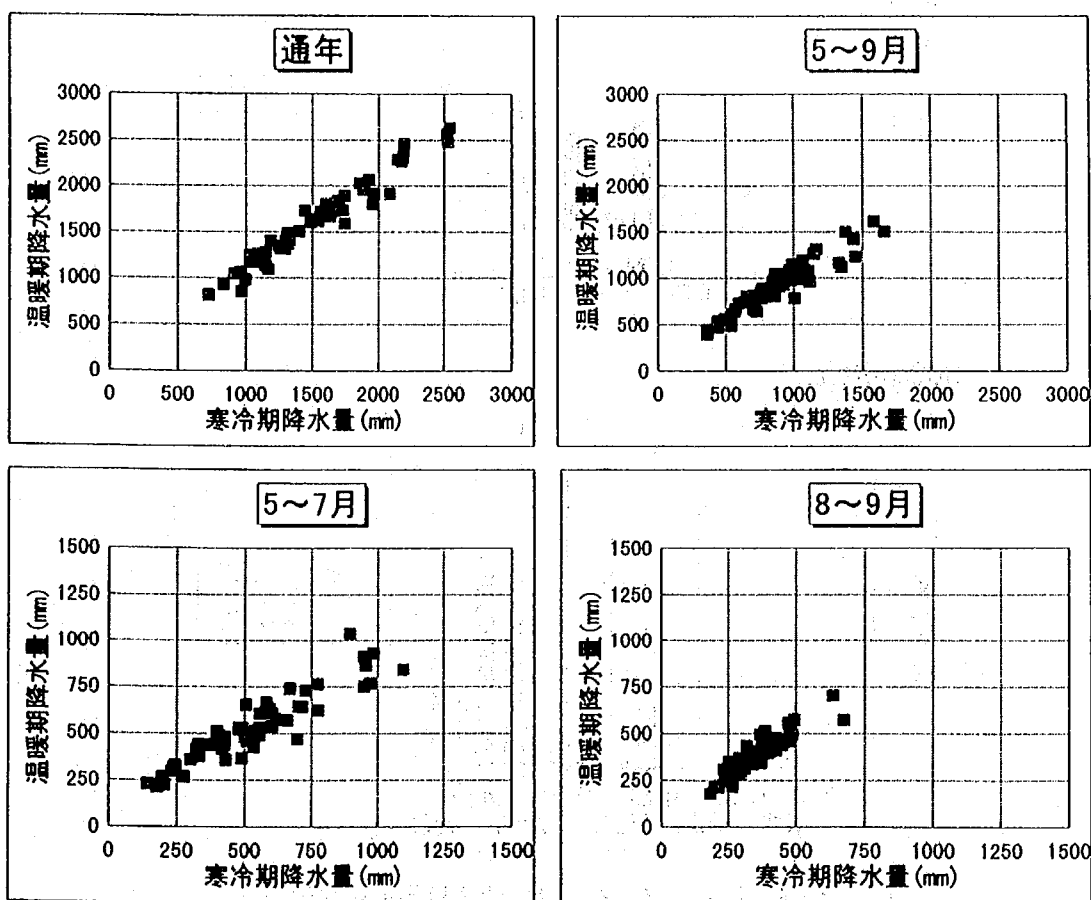


図-3.3.1～3.3.4 期間降水量の比較

c. 温暖期と寒冷期の降水パターンの比較

上述の日降量資料を用いて、表-3.1に示す各地域ブロックごとの2日降水量の生起回数を階級別に整理して、温暖期(1978～1987年)と寒冷期(1904～1913年)での豪雨の生起状況の比較を行った。各ブロックごとの2日降水量の生起回数は、各観測地点の2日降水量の生起回数を求め、これらの単純平均値とした。

温暖期と寒冷期について、2日降水量150mm以上及び300mm以上の生起頻度を整理した結果を図-3.4.1～3.4.2に示す。2日降水量150mm以上の場合でみると、北海道・中国・九州及び沖縄の各地域では温暖期が寒冷期よりも発生回数が多いのに対して、他の地域は寒冷期が温暖期よりも発生頻度が高いことがわかる。2日降水量300mm以上の場合でみると、東北・関東・近畿及び九州の各地域では温暖期が寒冷期よりも多いのに対して、他の地域は寒冷期が温暖期よりも発生頻度が高い。その発生頻度は各地域とも150mm以上の場合の約1/8以下となり、北海道・北陸の各地域では0となっている。以上のように、2日降水量が多い豪雨の発生頻度は全国的にはばらつきがあり、温暖期の方が頻度が高い地域もあることがわかる。

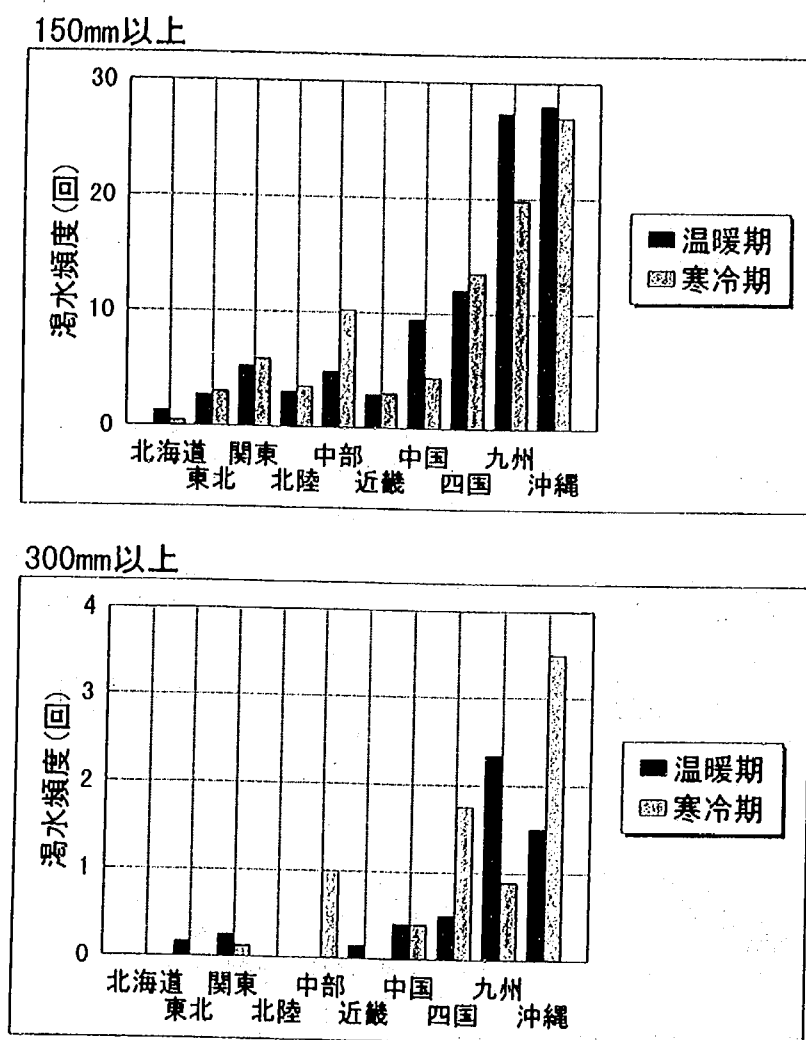
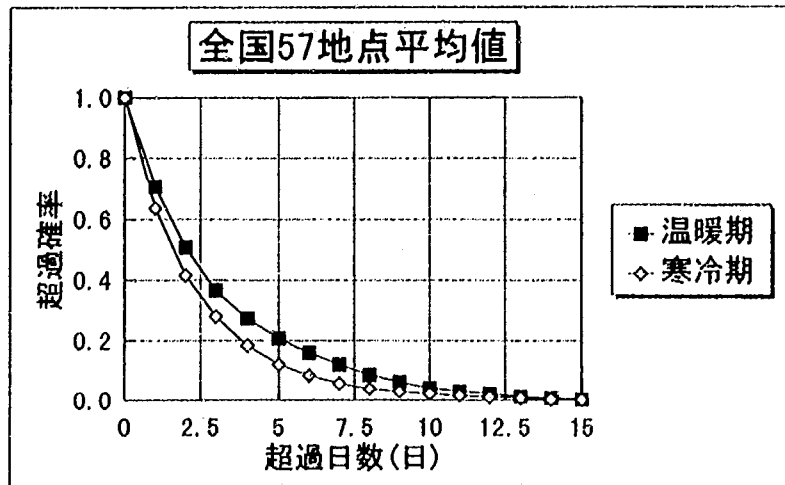


図-3.4.1～3.4.2 地域別2日降水量発生頻度

また、日降水量資料を用いて連続無降雨日数の超過確率の分析を行った。図-3.5は全国57地点における各時期の平均超過確率分布である。図より温暖期の超過確率が寒冷期の確率を上回っていることがわかり、同様の傾向が、多くの地点で確認されている。以上より、若干の地域差はあるものの、温暖期の方が年平均降水量が少なく、連続無降雨の確率が高くなる傾向があるため、より渇水に対する危険性が高いと考えられる。



図－ 3.5 各期間における連続無降雨日数の超過確率

なお、ここで得られた温暖期に関する降雨特性は、先の報告等^{1)～8)}で予想されている温暖化が進行した場合の全球レベルでの特性と総降水量が少なくなる点で異なっているが、現状では日本レベルでの予想が十分ではなく、将来的によりこれら現象面における検討が進められるものとして、本検討では3.1.1により得られた温暖期と寒冷期における気温・降水量特性を用いて次節以降の検討を進める。

3.1.2. 温暖期と寒冷期でのダム運用の相違と温暖化の影響

ここでは、前述の温暖期と寒冷期を対象として、対象期間の平均気温がダム運用にどのような影響を及ぼすかについて検討を行う。

a. 対象ダムにおける貯水池流入量特性の相違

まず、モデル流域を対象に、温暖期・寒冷期の両時期で流出計算を行い、ダムの補給計算から渇水の危険度について検討を行った。対象とするモデルダムは四国瀬戸内側に位置し、ダム流域472km²、残流域1030km²の流域である。流出解析で用いた降雨は、ダム地点での観測期間が十分長くないので、最寄りの気象官署のデータ²⁹⁾を用いた。ただし、寒冷期10年に含まれる1912年には欠測の期間があるので、代わりに1914年を寒冷期に含めることとした。

図－ 3.6 に各期間の10年平均のダム流入量の流況曲線を示す。これより、ほぼ全期間において、寒冷期の流量が温暖期を上回ることがわかる。図－ 3.7 に寒冷期の流量に対する（寒冷期－温暖期）の流量差の比率を示す。これをみると、温暖期と寒冷期で最高31.14%の流量差があり、特に平水（185位）流量で30.11%となった。他の代表流量では、豊水（95位）流量で20.00%、低水（275位）流量で20.09%、渇水（355位）流量で15.34%の差が確認された。また、図－ 3.8.1～3.8.2 に各代表流量及び全流量に対する割合を示す。これからも、10位・30位の流量ではその相対的な差は小さく、平水・低水流量でその相対的な差が大きいことがわかる。そのため、流量が小さい状況において、温暖期の方が寒冷期よりもより渇水耐性が低くなると考えられる。

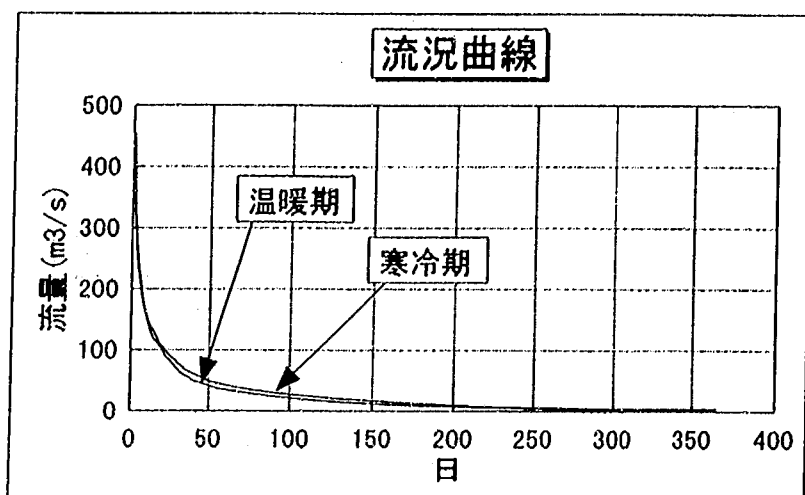


図-3.6 モデルダムにおける10年平均のダム流入量の流況曲線

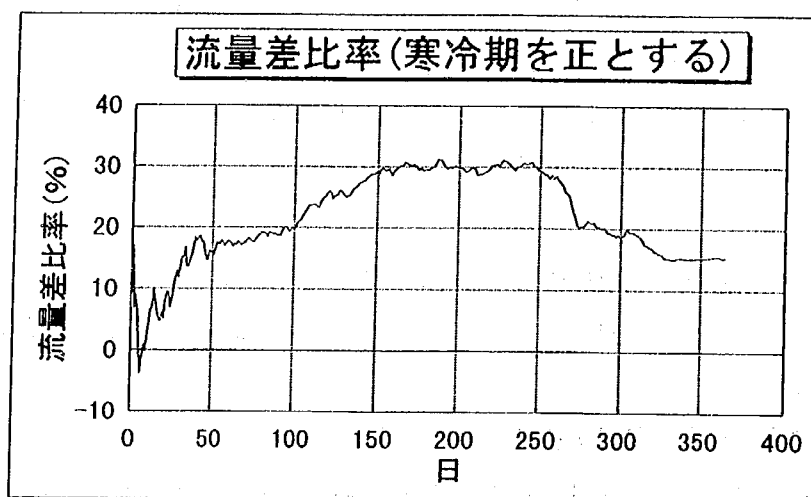
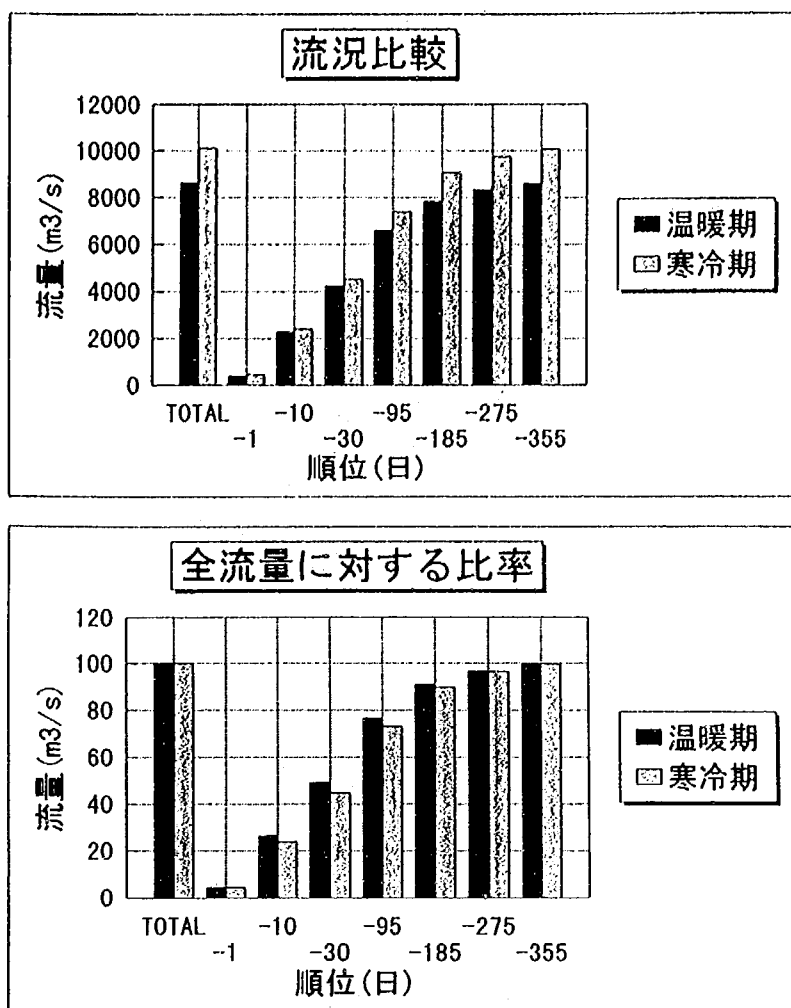


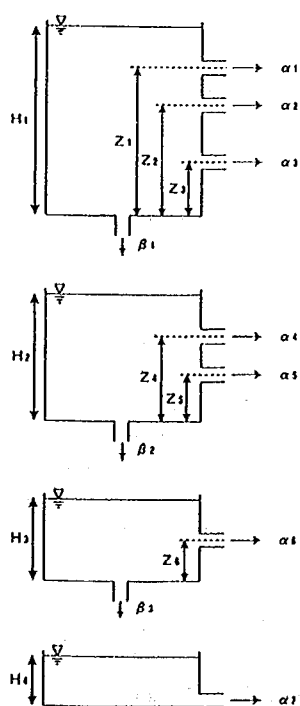
図-3.7 モデルダムにおける寒冷期と温暖期の流量差の比率（寒冷期を正）

b. 対象ダムにおけるダム運用特性の相違

3.1.2. a. で計算した流況をもとに、ダムの運用試算を行った。ダム流域・残流域の流出解析にはタンクモデル（図-3.9・表-3.2に係数を掲載）を用い、降雨は同一の気象官署のデータ²⁰⁾を用いた。ダム下流基準地点の必要流量は、図-3.10.1～3.10.2に実線で示すとおりである。この必要流量に対して、残流域からの流出量では不足する場合に、ダムから補給するものとした。10年の最初にはダムは満水であるとして、温暖期・寒冷期の10年間を連続計算した。同図には各期の10年1位の流況悪化（渇水）時のダム運用計算図が示されている。現実のダムでは、渇水時には貯水量に見合った利水補給の制限を加えるのが一般的であるが、本検討では空水になるまで無条件に補給を続けた。温暖期10年と寒冷期10年を比較すると、空水になる頻度は温暖期10年が3回、寒冷期10年が1回、10年通算での空水日数は温暖期10年が75日、寒冷期10年が51日となった。不足％日は温暖期10年が3535.42％日、寒冷期10年が2628.28％日となり、温暖期10年の方が渇水にさらされる危険度が高いといえる。



図－3.8.1～3.8.2 モデルダムにおける各代表流量及び全流量に対する比率

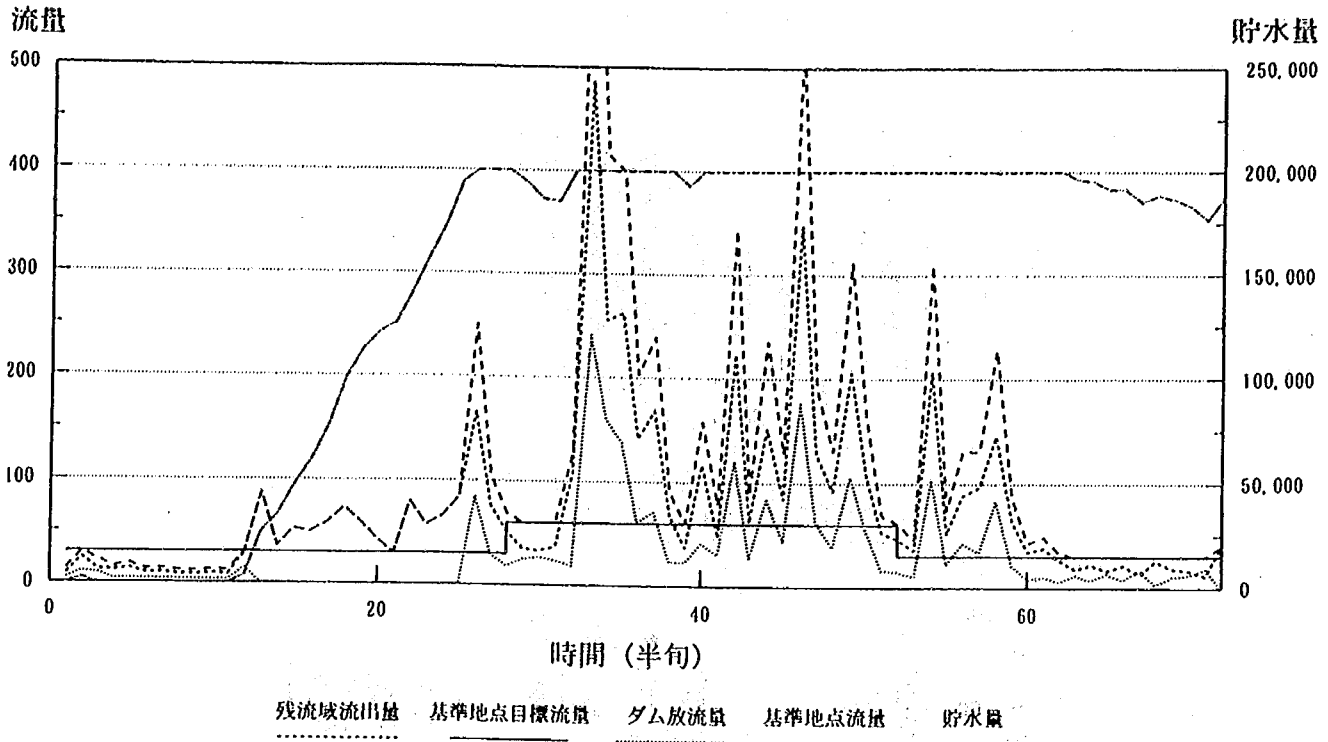


表－3.2 モデルダムのタンクモデル係数

タンク	パラメータ	モデルダムの係数
1層	$\alpha 1$	0.060
	$\alpha 2$	0.100
	$\alpha 3$	0.400
	$\beta 1$	0.250
	$Z 1$	0
	$Z 2$	30
	$Z 3$	50
	$H 1$	6
2層	$\alpha 4$	0.030
	$\alpha 5$	0.060
	$\beta 2$	0.040
	$Z 4$	5
	$Z 5$	50
	$H 2$	37
3層	$\alpha 6$	0.040
	$\beta 3$	0.016
	$Z 6$	60
	$H 3$	59
4層	$\alpha 7$	0.001
	$H 4$	864

図－3.9 タンクモデル模式図

寒冷な10年1位の渇水



温暖な10年1位の渇水

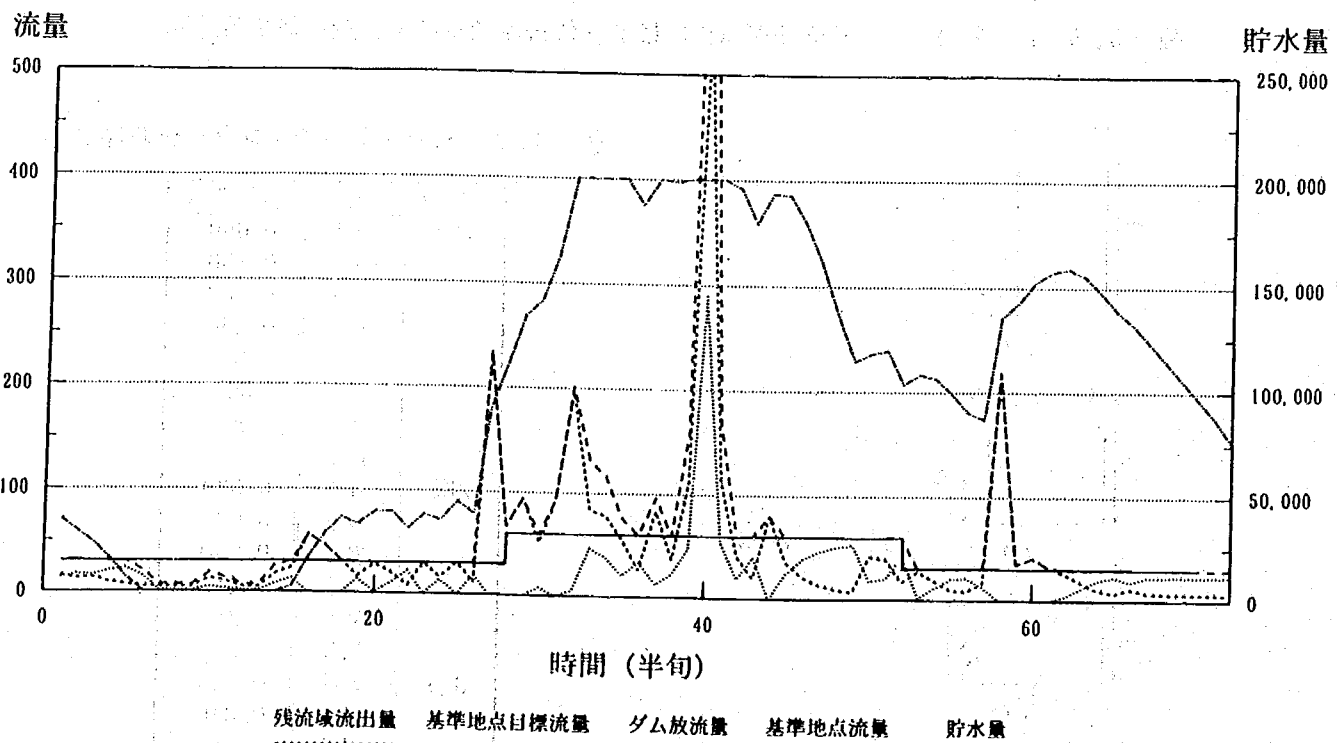


図 3.10. 1 ~ 3.10. 2 モデルダムにおけるダム運用計算図

3.2 温暖化シナリオに基づく影響の検討

3.1では、過去の実績値より温暖期、寒冷期をそれぞれ抽出して、その特性分析に基づく検討を行ったが、ここでは、気温上昇・降水量変化を変化要因とした温暖化シナリオを作成し、ダム流域及び流域全体における温暖化の影響を検討する。

3.2.1では、ダム流域のスケールで流域特性を把握し、温暖化シナリオを具体的に適用した場合の流況・安全度・ダム容量を比較検討する。3.2.2では、流域全体のスケールでダムによる水資源開発状況を把握し、温暖化シナリオを適用した場合の水資源賦存量・開発すべき容量を比較検討する。

3.2.1 ダム流域における温暖化の影響

ダムの存在する地域特性の相違に着目し、日本の中から地域特性の異なる3流域を対象とした温暖化の影響を検討する。最初に各ダムの流域特性を河川流況・河川利用率等から把握し、その結果を踏まえて、各ダムの温暖化による影響を検討し、地域特性の相違が及ぼす影響を検討する。

a. 対象ダムにおける流域特性の相違

ここでの対象流域は、九州北部（Aダム）・四国瀬戸内側（Bダム）及び東北太平洋側（Cダム）の3流域（表－3.3）である。A～Cダムの選定理由は、上流にダムが存在しないこと、データ蓄積年数が多いこと、各ダムの気候区分が異なることである。

表－3.3 A～Cダム諸元

ダム	ダム名		Aダム	Bダム	Cダム
諸元	都道府県名		長崎	香川	岩手
	流域面積	(km ²)	18.9	28.0	740.0
	年降水量 10年平均	(mm)	2654.3	1264.4	1225.8
	年流入量 10年平均	(m ³ /s)	472.8	657.8	7865.2
	年蒸発量 10年平均	(mm)	483.9	196.7	307.5
	年平均気温 高度補正	(°C)	15.6	13.4	13.7
	ダム天端標高	(EL. m)	227.0	263.2	220.0
	利水容量 洪水期	(m ³)	970,000	5,475,000	12,100,000
	非洪水期	(m ³)		7,200,000	101,800,000
	不特定補給量	(m ³ /s)	1.430	0.720	
	上水道補給量	(m ³ /s)	0.140	0.209	
	利水容量/年流入量*86400	(%)	2.4	32.2 42.4	1.8 15.0
	利水容量/全補給量*86400	(日)	7.2	68.0 90.0	
	近傍アメダス地点		長崎(84496)	滝宮(72121)	遠野(33671) 盛岡(33421)
仮想	流域面積	(km ²)	18.9	28.0	740.0
ダム	残流域面積	(km ²)	94.5	140.0	3700.0
諸元	ダム利水容量	(m ³)	1/10確率	1/10確率	1/10確率
	確保期間		5/1～10/31 11/1～4/30	6/20～9/20 9/21～6/19	5/15～9/3 9/4～5/16
	確保流量 利用率30%	(m ³ /s)	3.100 1.550	1.546 0.773	59.485 29.742
	確保流量 利用率40%	(m ³ /s)	4.134 2.067	2.061 1.031	79.313 39.656
	確保流量 利用率50%	(m ³ /s)	5.167 2.584	2.577 1.288	99.141 49.571
	確保流量 利用率60%	(m ³ /s)	6.201 3.100	3.092 1.546	118.969 59.485

表－3.4に、各ダムの1981～1990年の10年間のダム地点の年平均降水量²⁰⁾、ダムへの流域からの年平均流出高、年平均蒸発散量（＝年降水量－年流出高）、流域面積及び灌漑期間を示す。年降水量はAダムが圧倒的に多く、次いでBダム、Cダムの順であるが、年流出高でみると、Aダム、Cダム、Bダムの順になる。

表-3.4 A～Cダムの降水量・流入量・蒸発散量 (1981～1990)

対象ダム	Aダム			Bダム			Cダム		
流域面積	18.9km ²			28.0km ²			740.0km ²		
灌漑期間	5/1～10/31			6/20～9/20			5/15～9/3		
年	ダム 降水高 (mm)	ダム 流入高 (mm)	蒸発散高 逆算値 (mm)	ダム 降水高 (mm)	ダム 流入高 (mm)	蒸発散高 逆算値 (mm)	ダム 降水高 (mm)	ダム 流入高 (mm)	蒸発散高 逆算値 (mm)
1981	2472.0	2557.26	-85.26	1053.0	431.01	621.99	1568.0	1351.83	216.17
1982	2569.0	2095.82	473.18	1322.0	649.82	672.18	1153.0	931.00	222.00
1983	2863.0	2165.85	697.15	1099.0	469.92	629.08	1273.0	971.67	301.33
1984	2037.0	1377.65	659.35	823.0	305.76	517.24	1060.0	860.12	199.88
1985	3096.0	2487.77	608.23	1168.0	476.06	691.94	1019.0	627.81	391.19
1986	2729.0	2233.97	495.03	887.0	338.41	548.59	1242.0	721.73	520.27
1987	3243.0	2688.96	554.04	1420.0	627.33	792.67	1183.0	823.52	359.48
1988	2493.0	2040.32	452.68	1330.0	632.11	697.89	1091.0	844.73	246.27
1989	2589.0	2036.21	552.79	1618.0	932.29	685.71	1136.0	801.61	334.39
1990	2362.0	1930.65	431.35	1924.0	1205.56	718.44	1533.0	1249.17	283.83
平均	2645.3	2161.44	483.86	1264.4	606.83	657.57	1225.8	918.32	307.48

注) ダム流入量 = (日平均流入量) × (かんがい期間日数)

図-3.11に100km²あたりに換算した流況曲線を示す。Aダムは他のダムに比べて年降水量が多いこともあり、豊水流量(95位)から平水流量(185位)にかけての流況が非常によい。BダムとCダムを比較すると、流域面積の影響もあると思われるが、平均年洪水量には大きな相違がないにもかかわらず、Cダムに比べてBダムの方が低水時の流況がかなり悪いことがわかる。これは年間の降水量としては差がなくても、蒸発散量が大きく異なるため、水資源として利用可能な量(水資源賦存量)に大きな地域差があることを示し、ダムによる水資源開発も地域間の相違があることがわかる。

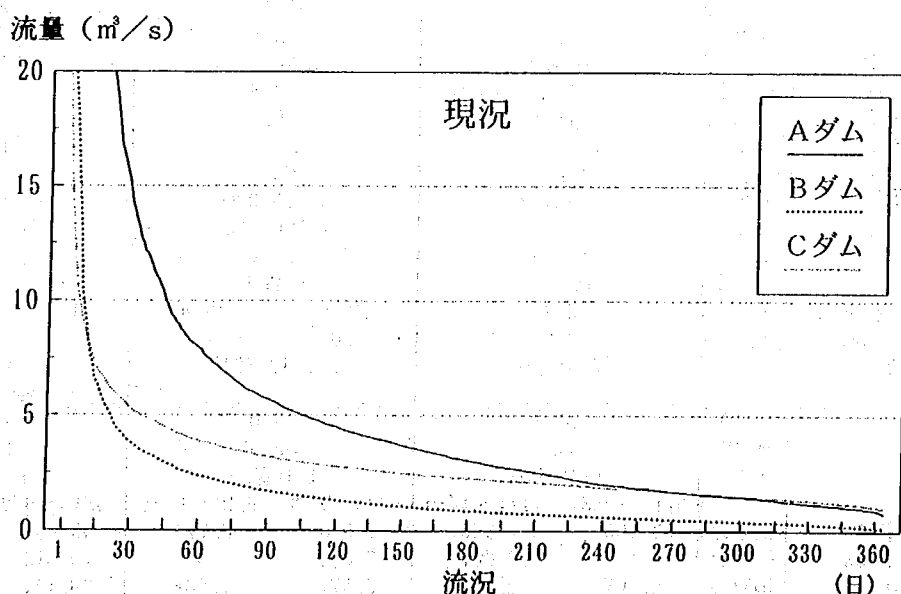
図-3.11 A～Cダムの流況曲線 (100km²当たり換算値)

図-3.12.1～3.12.3に、A～Cダム地点でのそれぞれ100km²あたりに換算した半旬流量と河川利用率(基準値点で年間確保すべき量/年間総流出量)30～60%の割合で求めたその地点の確保すべき流量(以下、確保流量という)の関係で示す。1986～1987年の2年間を例に各ダムの特性をみると、Aダムは6～7月の

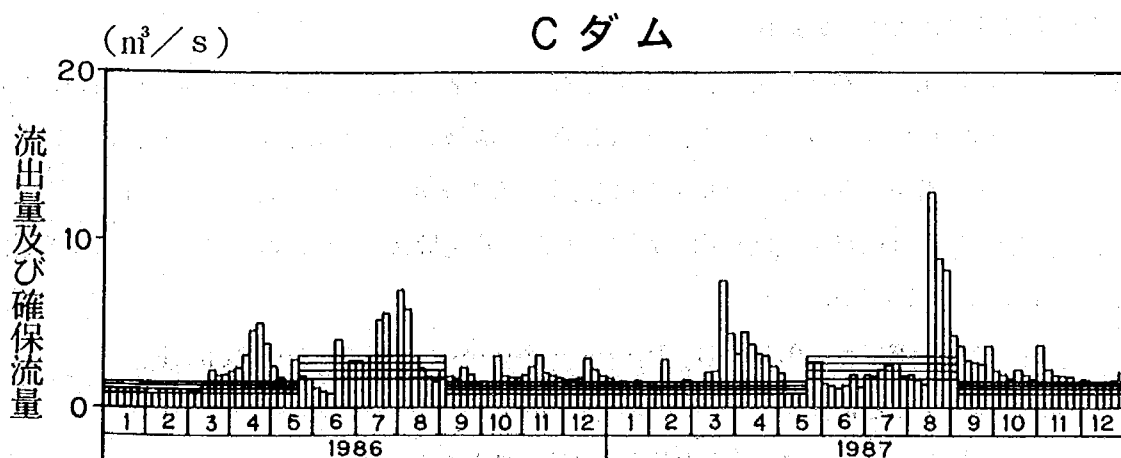
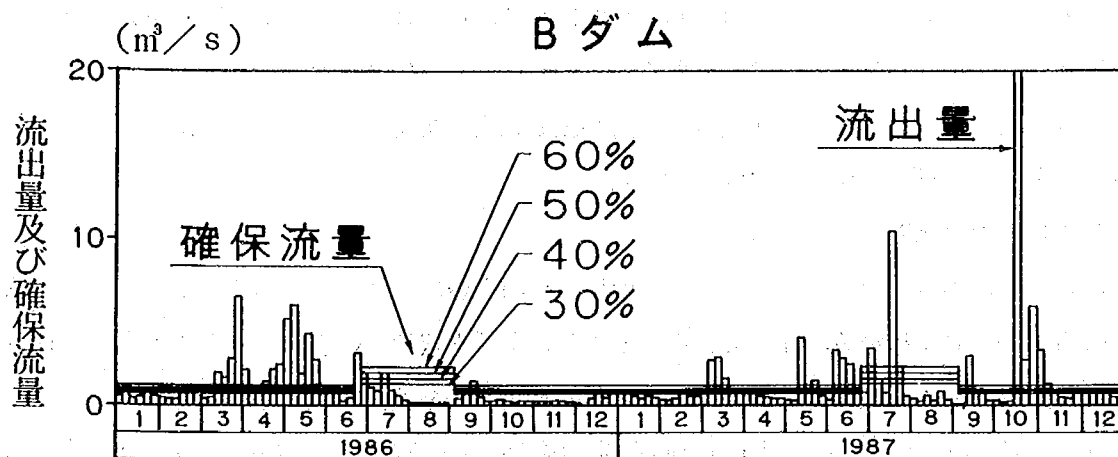
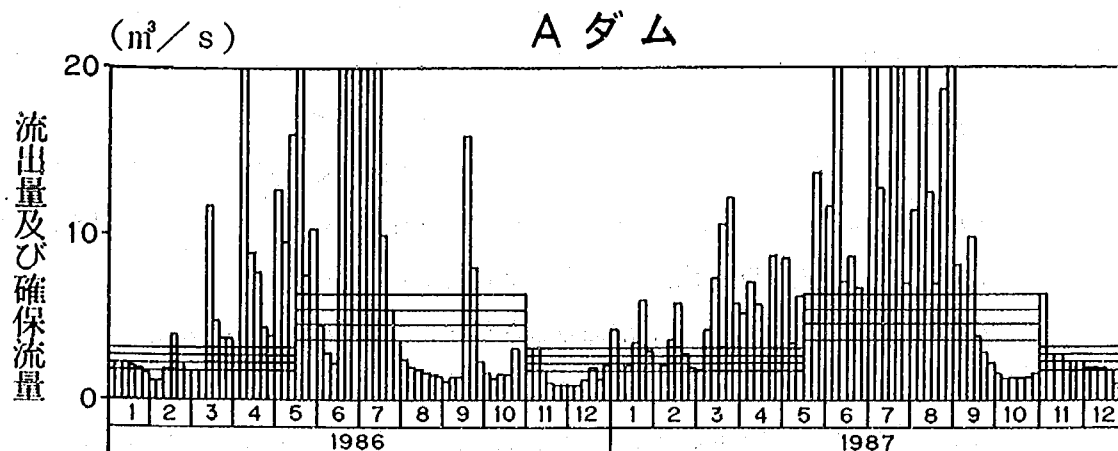


図-3.12.1～3.12.3 A～Cダムの半旬流量・確保流量曲線 (100km²当たり換算値)

流出量が多い。Bダムも他の月と比較して6～7月の流出量が多いが、Aダムに比較して少なく、1987年10月に台風と思われる大きな出水があり、1986年と1987年ではその流況が大きく異なっている。Cダムは3～4月にかけての融雪と思われる流出量が他の月に比べ大きいのが特徴である。

この流況の相違をわかりやすくするために示したのが実流量の確保流量に対する不足量の累加曲線（図－3.13.1～3.13.3）である。ただし、余剰流量がある時はその余剰分を累加量より差し引き、同様に1986～1987年の結果を示した。Aダムでは梅雨期を中心とした夏期に不足累加量が0となるパターン、Cダムは融雪期と8～9月の出水で回復されるパターンが繰り返されるが、Bダムは台風期の出水の有無によってそのパターンが異なっている。

また、図－3.14に1986～1987年の不足累加容量の最大値を河川利用率との関係で整理したものを示す。Aダムは利用率が40%を超えると、Cダムは50%を超えると累加量の増加が著しく、Bダムは比較的一定の増加量となっている。図－3.13.1～3.13.3からわかるように、Aダムでは1986年の8月から9月上旬の渇水と9月下旬からの渇水があり、利用率30・40%は8月から9月上旬の渇水の影響が大きい、利用率50・60%では9月下旬からの渇水の影響が大きくなっている。これは利用率を高めることで前半の渇水後の回復がなされない状態で、後半の渇水が連続したため生じたものである。Bダムでも1986年後半の渇水と1987年7月後半の渇水で同様の現象がみられる。

b. シナリオに基づいた温暖化の影響

日本において年間の河川流況を支配しているのは、梅雨や台風の降雨量であり、積雪のある地域では降雪量および融雪量がこれに加わる。従って、地球温暖化による水資源への影響を考える場合、これらが地球温暖化の進行によりどのような影響を受けるかを解明する必要がある。

ここでは、一般にいわれている気温上昇と降水量の両者の変化を考慮した温暖化シナリオを作成し、そのシナリオに基づいて気温上昇量と降水量の変化量がダムによる水資源開発にどのような影響を及ぼすかを検討した。地球温暖化シナリオは表－3.5に示すとおりで、気温上昇量と降水量の変化量をパラメータとしている。

(1) 温暖化シナリオによる流況の比較

各流域に対して、流出モデルとして4段のタンクモデル（表－3.6に係数を掲載）を用い、日単位で流出計算を行った。また、Cダムについては降雪があるので、流域を約250m四方のメッシュに分割し、各メッシュの降雪・積雪・融雪を考慮したモデルを適用し、タンクモデルへの入力はこのモデルにより各メッシュに対して求めた融雪量と降雨量を流域平均した値とした。蒸発散量（E）に関しては、（3.1）式に示す気温から求めるHamon式より算出した。

$$E = 0.14 D_0^2 P, \dots \dots \dots (3.1)$$

ここに

D_0 : 日照時間（12時/日を1とする）

P : 日平均気温に対する飽和絶対湿度（g/m³）

式（3.1）の定数は、海外の実測値から求められたものであり、我が国で、そのまま用いると大きい値を示すといわれている。ここでは式（3.1）に補正係数 α を乗じて、補正を行うこととした。 α は、年間降水高と年間流出高の差である損失高が蒸発散高に等しいと仮定して、Hamon式の感度分析を行って算出

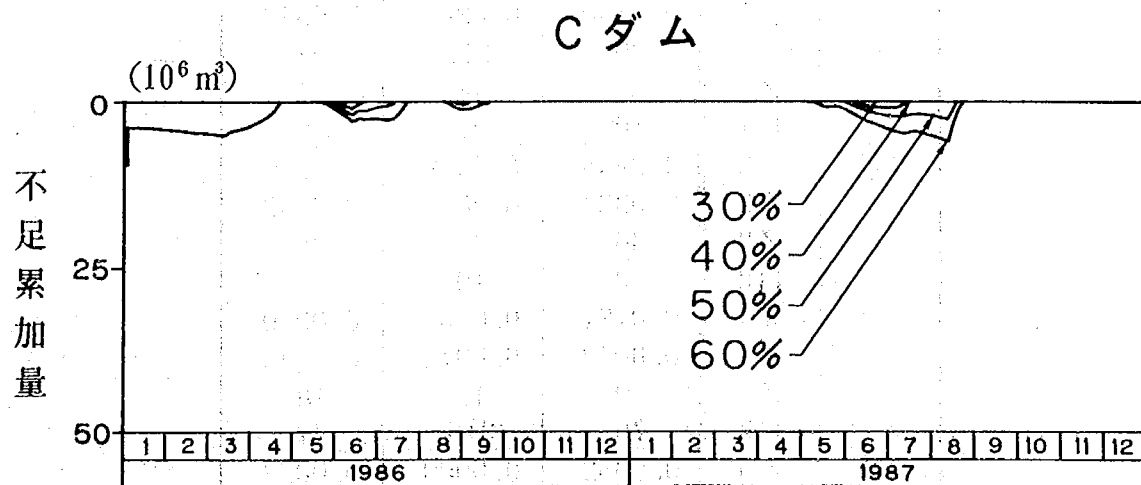
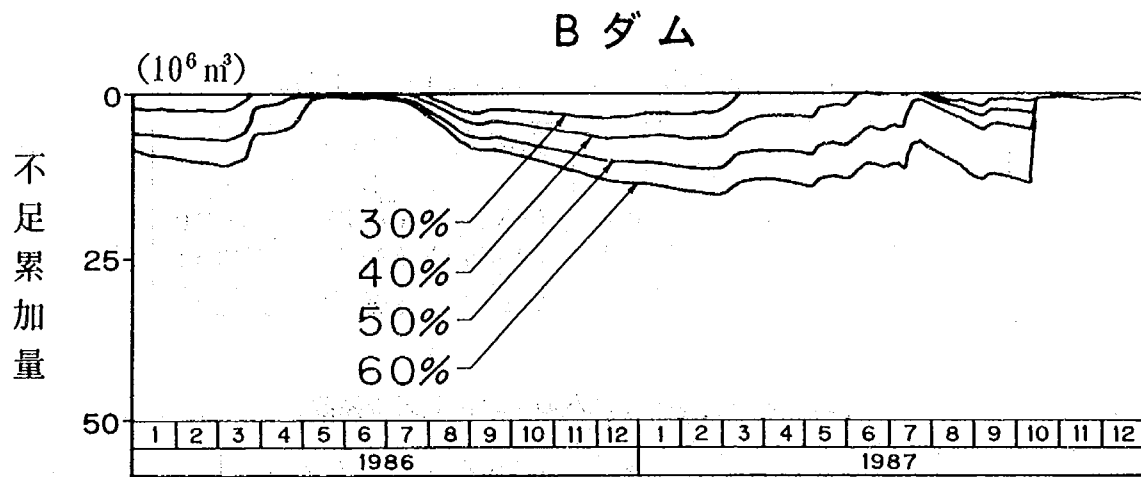
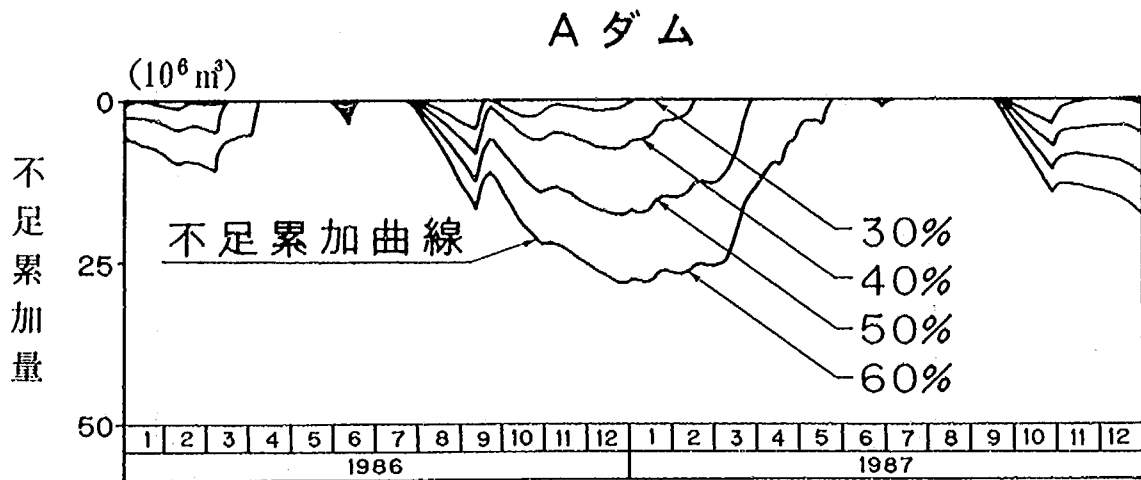


図-3.13.1～3.13.3 A～Cダムの不足累加量曲線 (100km²当たり換算値)

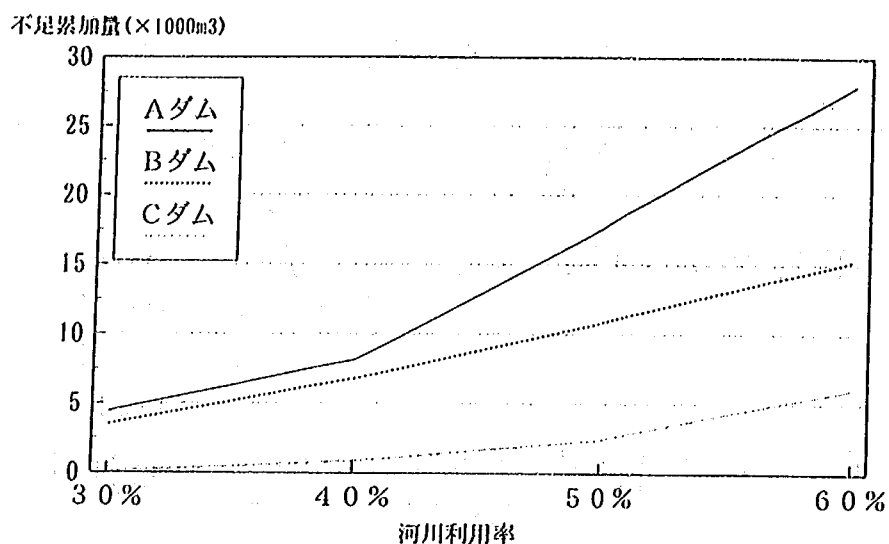


図-3.14 A～Cダムの不足累加量と河川利用率の関係 (1986～1987)

表-3.5 温暖化シナリオ (CASE1～CASE12)

		気温上昇量(°C)			
		0	1	2	3
降水量 変化 (%)	-10	CASE1	CASE4	CASE7	CASE10
	0	CASE2	CASE5	CASE8	CASE11
	10	CASE3	CASE6	CASE9	CASE12

表-3.6 A～Cダムのタンクモデル係数

タンク	パラメータ	Aダム	Bダム	Cダム
1層	$\alpha 1$	0.4176	0.6309	0.2001
	$\alpha 2$	0.1787	0.2020	0.0774
	$\beta 1$	0.0750	0.0286	0.0943
	Z1	80	124	68
	Z2	27	47	14
	H1	10	27	10
2層	$\alpha 3$	0.0998	0.3959	0.0253
	$\beta 2$	0.0334	0.2064	0.0259
	Z3	30	2	26
	H2	40	10	40
3層	$\alpha 4$	0.0121	0.0034	0.0040
	$\beta 3$	0.0042	0.0078	0.0040
	Z4	29	12	18
	H3	75	315	77
4層	$\alpha 5$	0.0052	0.0009	0.0023
	H4	257	129	659

した。なお、 D_0 、 P_i は月平均可照時間・月平均気温から値を決定し、同一月で一定としている。その結果、A～Cダムの補正係数は順に0.587, 0.883, 0.490である。気温の上昇は、蒸発散量と、Cダムのみ降雪と融

雪に影響を及ぼすものとし、降雨（降雪）に関しては、現在の降水パターンは変化せずに量だけが変化するとした。また、気温上昇のみによる影響を把握するため、ここでは降水量変化がないCASE 2, 5, 8, 11を対象とした。

図-3.15にCダムのある年のCASE 2（現況）とCASE11（降水量変化なし・気温3℃上昇）の流況を比較して示す。現況では冬期（12～3月）の降雨が雪になり、積雪として流域に貯留されるのに対し、気温が3℃上昇すると雪から雨に状態が変化するため、ただちに流出していることがわかる。また、融雪期も当然早くなり、また、融雪出水の流量も流域の積雪量が少ないことから減少している。

図-3.16に各ダムにおけるCASE 2とCASE11の10年平均の流況曲線の比を示す。図より、A及びCダ

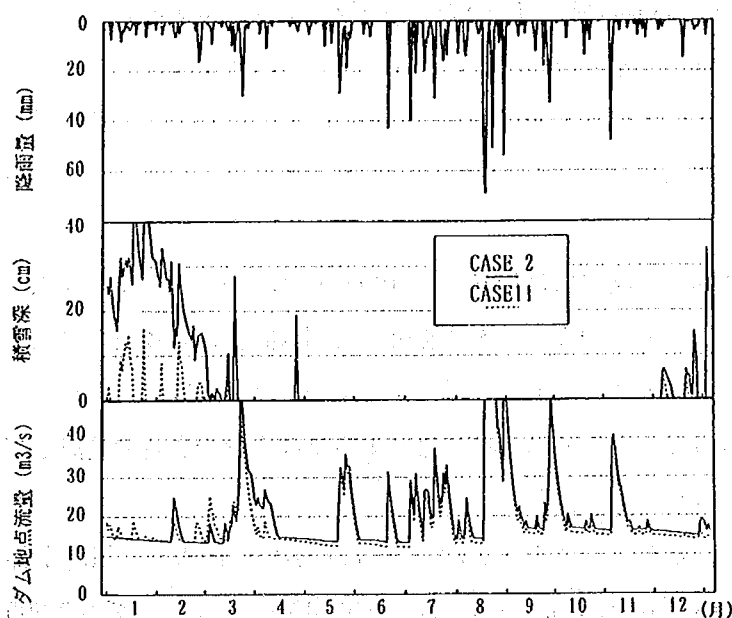


図3.15 Cダムの流況 (CASE 2, 11)

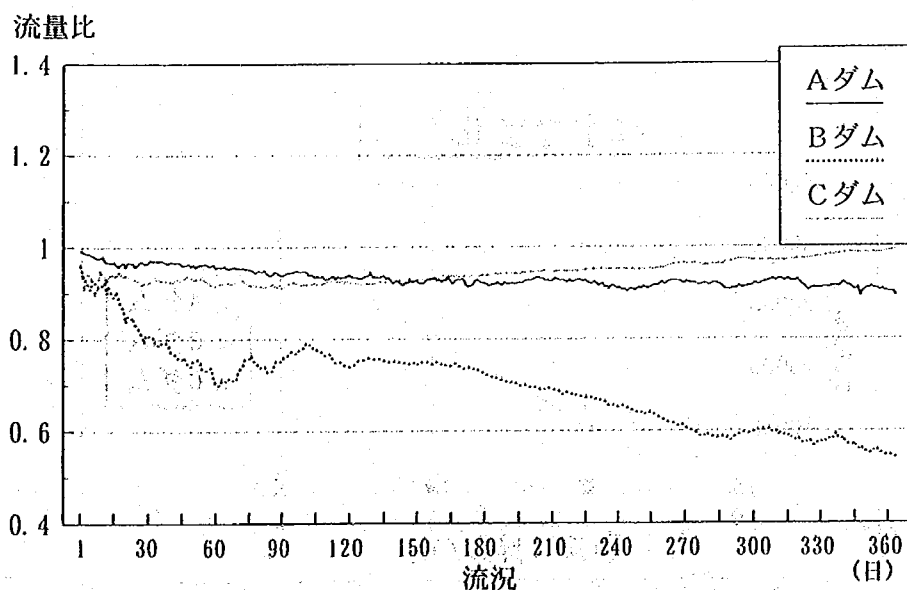


図-3.16 A～Cダムの流況曲線比 (10年平均) (CASE 2 / CASE11)

ムでは流況変化が全体的に小さいが、Bダムでは30位以降の流量比が0.8以下となっており、渇水流量付近では流量比が0.6程度まで下がる。これより、対象3ダムの中でBダムが温暖化の影響が一番深刻であると予想される。

なお、Cダムで渇水流量付近の流量比の相違が小さい。これは、現況（CASE 2）では3月後半の流域にはまだ降雪があって融雪が始まる前に年最小流量がみられることが多いが、気温上昇によりこの時期の降雪が降雨に変わるとともに、融雪の時期が早くなり、年最小流量の発生する時期が夏期に移動するためと考えられる。

(2) 温暖化シナリオに基づいた水資源の安全度評価

ここでは前述の条件・流況のもとで、ダムによる水資源開発への影響を検討した。各ダムは表-3.3に示す流域面積を持ち、ダムから利水補給を行う際にその放流量を決定する下流基準地点は、その上流域がダム流域の6倍（ダム流域も含む）を持つ地点とし、残流域からの流出量は、ダム流域の5倍とした。また、その確保すべき流量は、灌漑期：非灌漑期＝2：1で、1981～1990年の流出量に対して、河川利用率が40%となるように算出した。この条件はA～Cダムを同一条件で比較するために設定したものであり、実際の条件とは多少の相違がある。

以上の条件で、1981～1990年の流況に対して、1/10の利水安全度（1/10の利水安全度とは10カ年第1位の渇水に耐える容量を持つことで、10カ年の流量を用いた利水計算から算出された最大の容量を指す）が確保できるように利水容量を算出した。さらに、その利水容量に対して表-3.5に示す温暖化シナリオに基づいてダムの運用計算を行った。ここでは、温暖化による気温上昇の影響の検討を目的としたため、CASE 2, 5, 8, 11を計算対象とした。

運用計算結果を不足%日で評価したものを、図-3.17に示す。図より、気温上昇とともに不足%日は増加し、気温3℃上昇時に、Aダムで2966.3%日、Bダムで40482.8%日、Cダムで605.8%日に達することがわかる。なお、不足%日とは、基準地点の確保流量に対して不足する流量が確保流量に対する割合を日単位で累加するもので渇水の大きさを表す指標である。

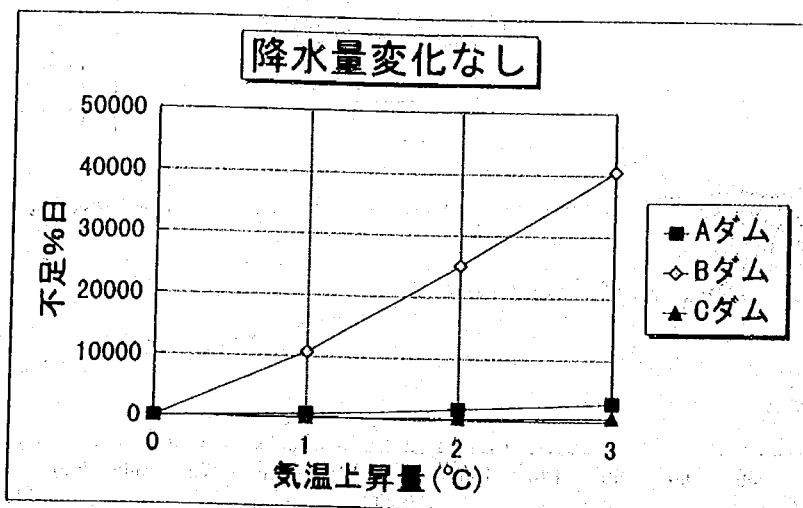


図-3.17 A～Cダムのダム運用計算結果（CASE 2, 5, 8, 11）

また、図-3.18.1～3.18.3に各ダムの年間有効降水量比率、図-3.19.1～3.19.3に月別有効降水量比率の関係を示す。各ダムの有効降水量比率の平均値を計算するとBダム(0.4799)・Cダム(0.7492)・Aダム(0.8171)の順となっているが、気温上昇に伴う蒸発散量の増加のため、気温上昇とともに有効降水量比率は減少し、気温3℃上昇時(CASE11)ではBダム(0.3803)・Cダム(0.7002)・Aダム(0.7824)と低下し、特にBダムでの低下が顕著となっている。このように、有効降水量比率の低い順に不足%日が大きくなり、気温上昇による影響が深刻となることがわかる。

図-3.20に気温上昇に対する渇水生起回数の変化を示す。各ダムでの生起回数は、Aダム(0, 2, 2, 2回: CASE 2, 5, 8, 11の順)・Bダム(0, 8, 16, 18回: 同)・Cダム(0, 2, 3, 4回: 同)である。図より、気温の上昇に伴って渇水生起回数は段階的に増加すること、有効降水量比率の低いダムでの渇水生起回数が多いことがわかる。また、Bダムの渇水生起回数が多いのは、ダム容量を決定する10年第1位渇水と第2位及び第3位が接近しているため、気温上昇による流況の変化がこれらの渇水全てに影響していることも理由の一つと考えられる。

図-3.21に気温上昇に対する渇水生起日数を示す。各ダムでの生起日数は、Aダム(0, 19, 45, 69日: CASE 2, 5, 8, 11の順)・Bダム(0, 166, 399, 588日: 同)・Cダム(0, 10, 21, 35日: 同)である。これからも前述と同様のことがいえることがわかる。

(3) 1/10安全度を確保するのに必要なダム容量の比較

ここでは、1/10安全度を確保するのに必要なダム容量を検討する。対象はA～Cダムとし、適用する温暖化シナリオはCASE 1～12の全CASEとする。各CASEに対し、河川利用率を30～60%に変更して容量を求めた。なお、連続渇水のため貯水池の回復が見込めなかったCASEについては解が存在しないため、算出不能とした。

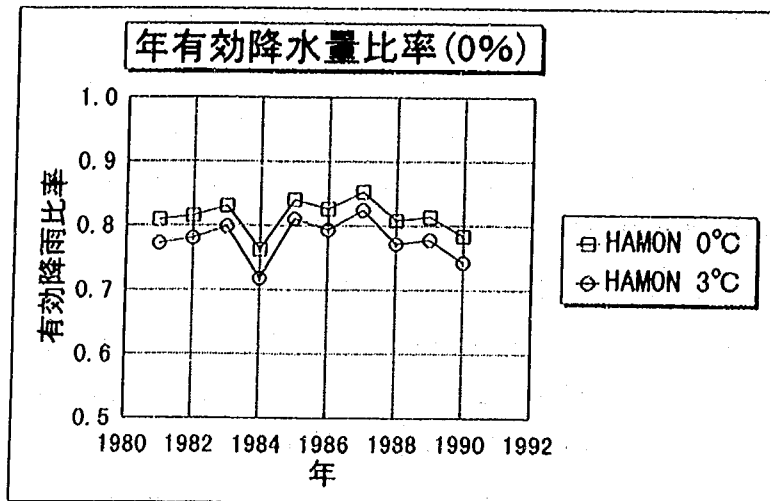
図-3.22.1～3.22.12に各ダムの必要容量の計算結果を示す。さらに、流域面積の影響を除くため、表中に算出された値を各ダムの流域面積で除し、単位面積当たりの必要容量で検討することとした。その計算結果を図-3.23.1～3.23.12に示す。

図より、A～Cダムとも降水量の減少・気温の上昇・河川利用率の増加に伴い、1/10安全度を確保するための単位面積当たりダム容量が増加することがわかる。この3要因の中で、単位面積当たりのダム容量増加に主たる影響を及ぼす要因は各ダムにより異なるが、河川利用率が高くなると、1/10安全度を満足するダム容量を確保できないCASEが生じ、降水量の減少・気温上昇の影響が大きくなることがわかる。

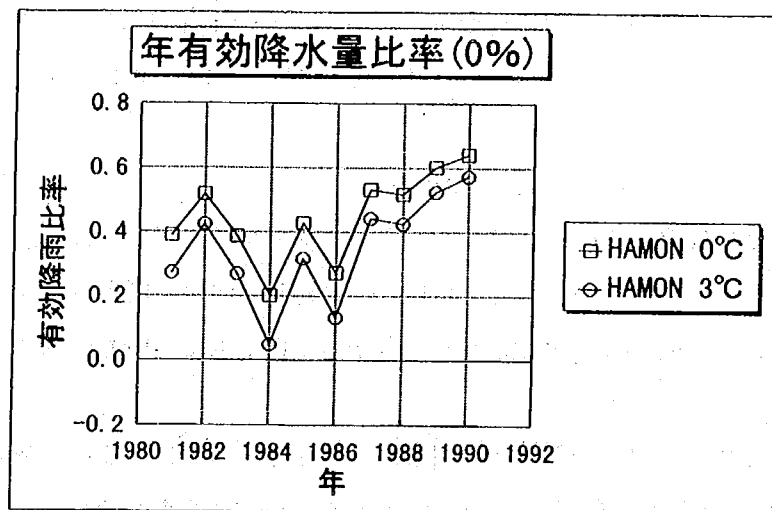
降水量の減少のみの影響では、Aダムは河川利用率30, 40%で1.4, 1.2倍に、Bダムでは同条件で2.2, 2.5倍に、Cダムでは河川利用率40～60%で3.6, 1.6, 1.3倍に達する。また、気温上昇のみの影響(3℃)ではAダムでは河川利用率30～50%で1.4, 1.2, 1.4倍に、Bダムでは河川利用率30%で3.8倍に、Cダムでは河川利用率40～60%で2.9, 1.4, 1.2倍に達する。

以上から、降水量の減少・気温の上昇・河川利用率の増加の3要因のいずれかにより1/10安全度を達成するための条件が厳しくなると、指数的に単位面積当たりの必要ダム容量が増加することがわかる。また、流域面積の小さいAダム(18.9km²)・Bダム(28.0km²)はCダム(740.0km²)と比較して、同一条件での単位面積当たりの必要ダム容量が大きくなり、条件を達成できない領域が存在する。これより、流域面積の小さ

Aダム (18.9km²)



Bダム (28.0km²)



Cダム (740.0km²)

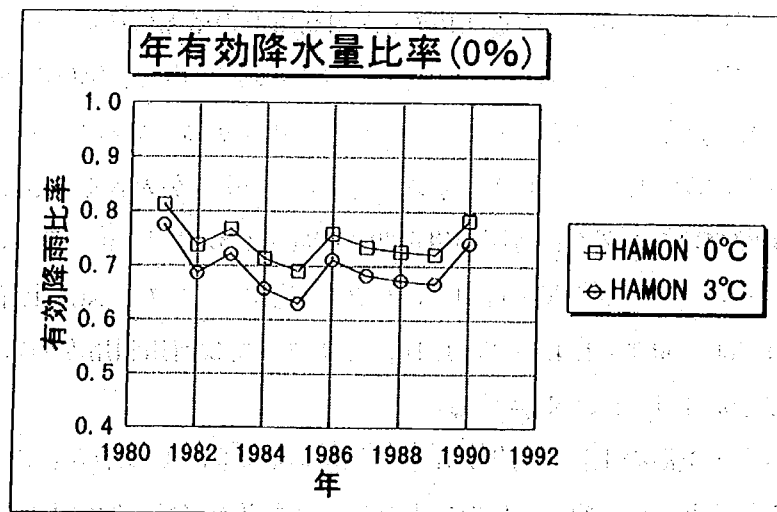
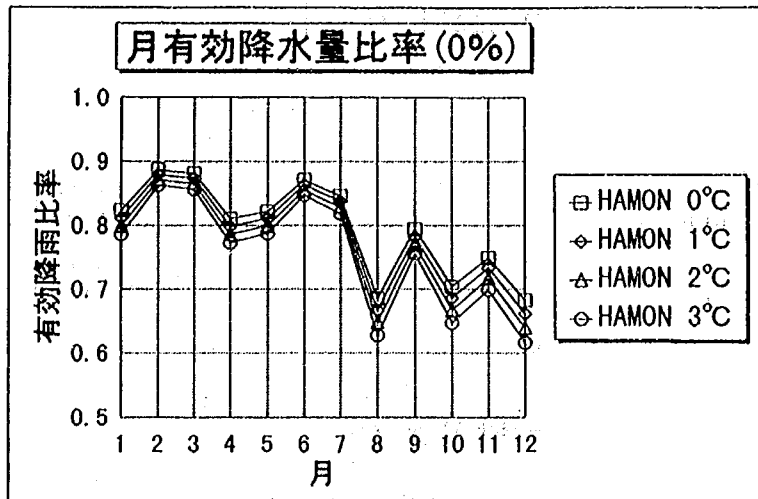
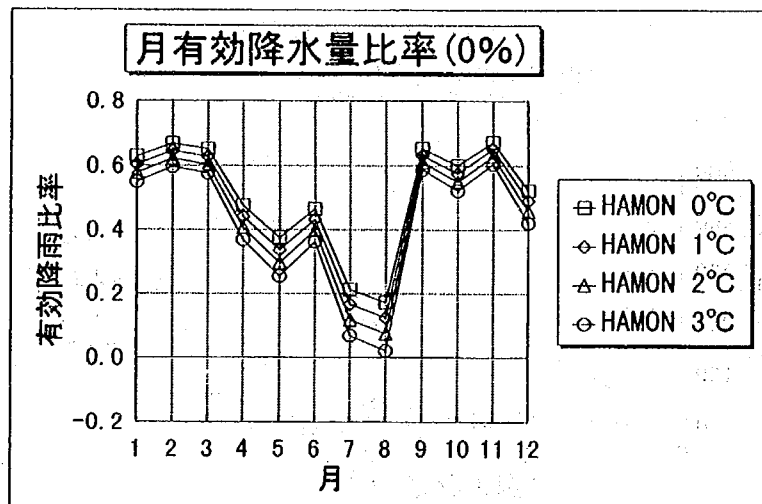


図-3.18.1~3.18.3 A~Cダムの年間有効降水量比率 (CASE 2, 11)

Aダム (18.9km²)



Bダム (28.0km²)



Cダム (740.0km²)

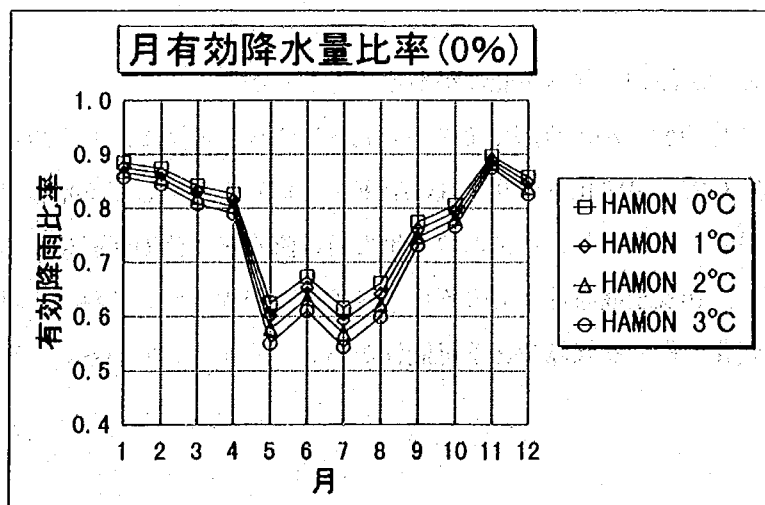


図-3.19. 1～3. 19. 3 A～Cダムの月別有効降水量比率 (CASE 2, 5, 8, 11)

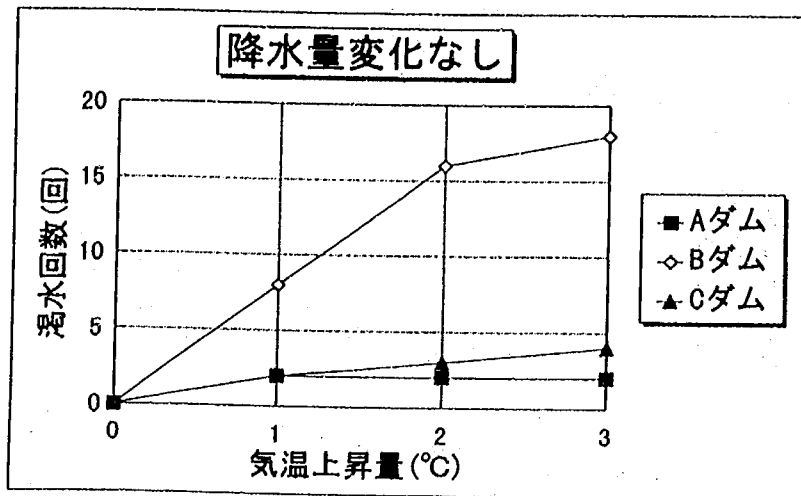


図-3.20 A～Cダムの渇水生起回数 (CASE 2, 5, 8, 11)

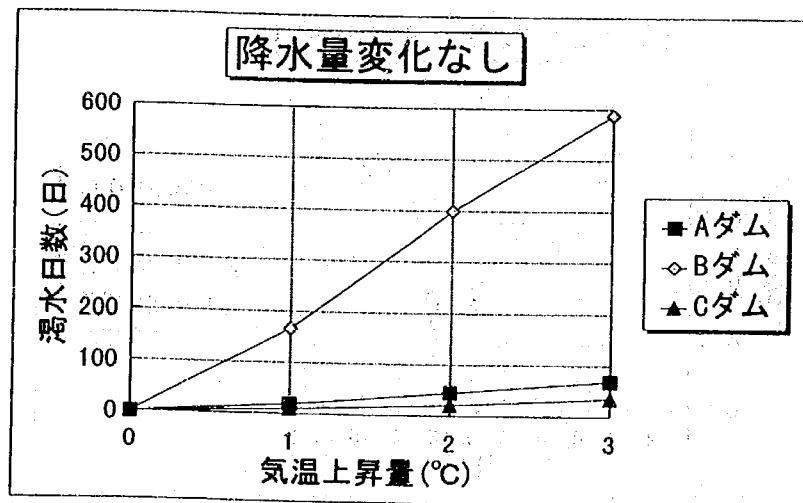
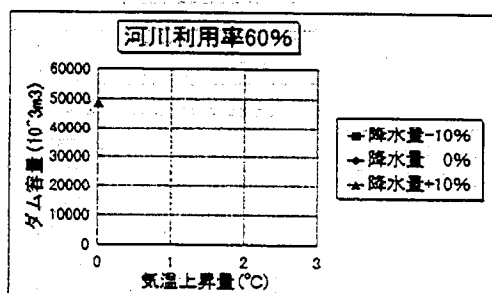
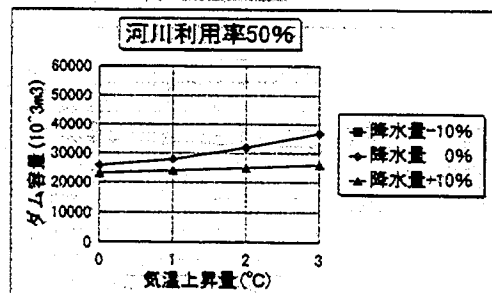
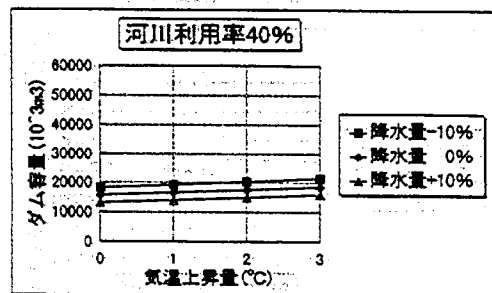
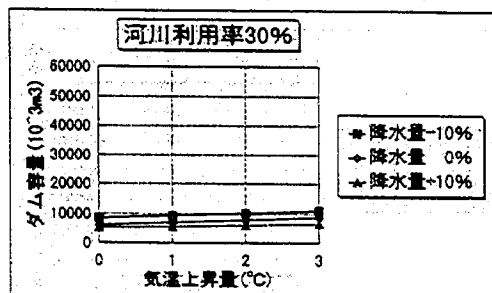


図-3.21 A～Cダムの渇水生起日数 (CASE 2, 5, 8, 11)

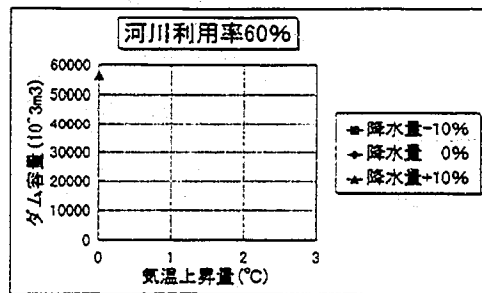
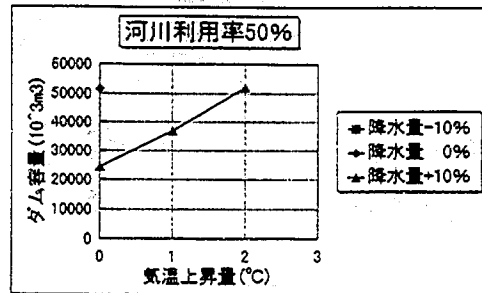
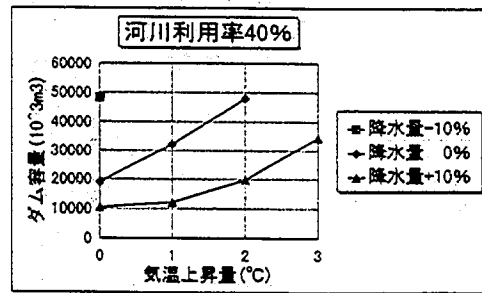
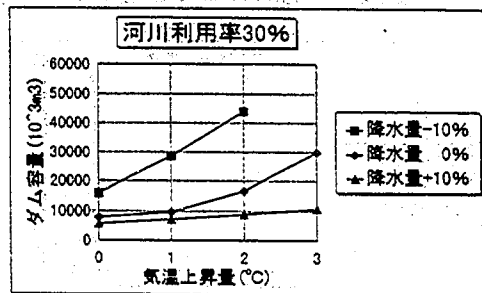
い小規模ダムで温暖化の影響が深刻になる可能性があることがわかる。

また、上述の分析で温暖化の影響がより深刻であったA～Bダムを対象に、1/30安全度・1/10安全度を確保するダム容量に固定して、温暖化シナリオ (CASE 1～12) を適用して不足%日を算出した結果を図-3.24. 1～3.24. 4に示す。これより、各ダムの不足%日は降水量変化の状態によらず、気温上昇によって指数的に増加し、特に1/10安全度条件下での不足%日の増加が大きい。これは、計画時にダム容量を大きく設計することで、温暖化の影響を軽減できる可能性があることを示している。

Aダム・10年第1位渇水を対象



Bダム・10年第1位渇水を対象



Cダム・10年第1位渇水を対象

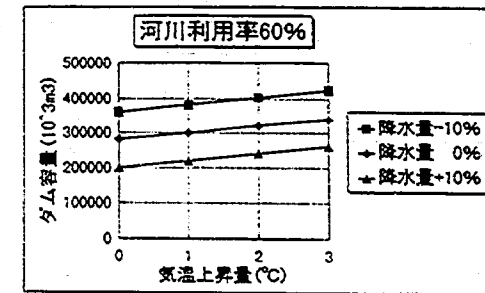
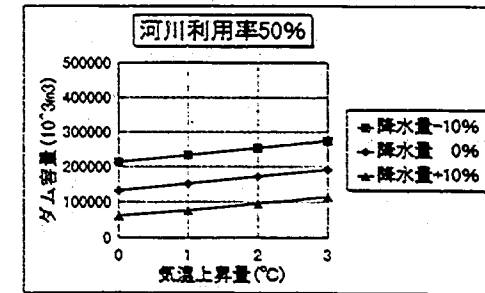
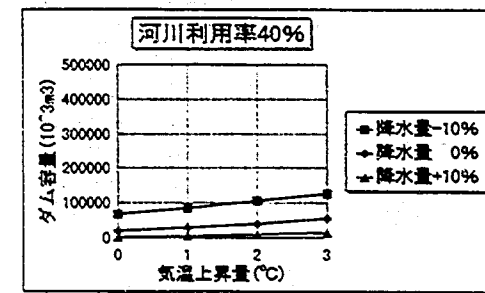
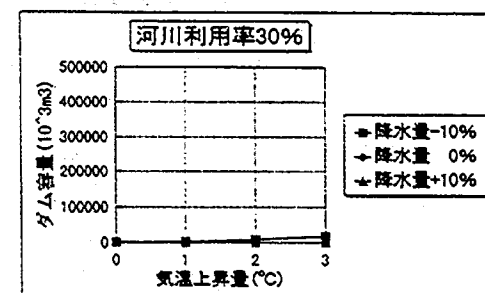
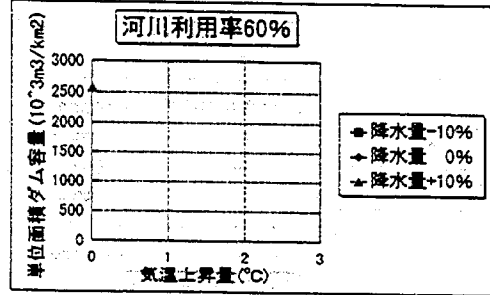
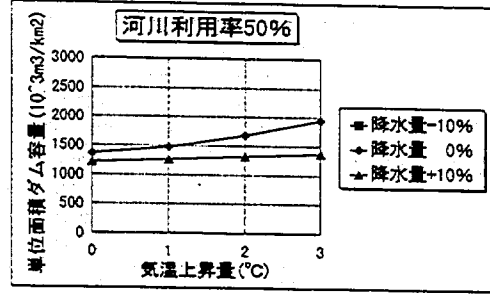
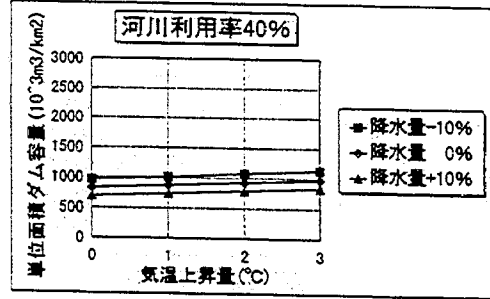
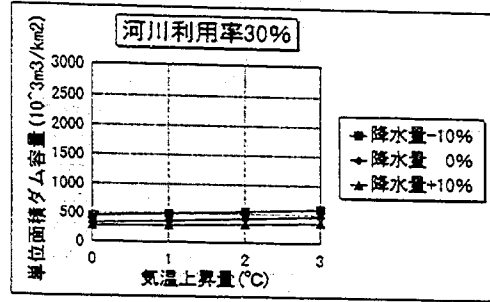
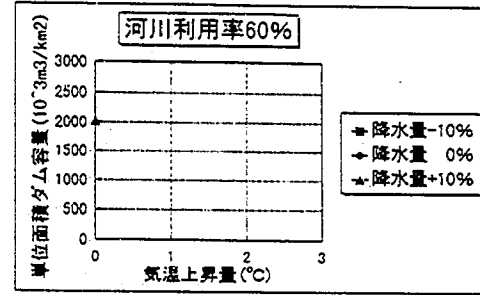
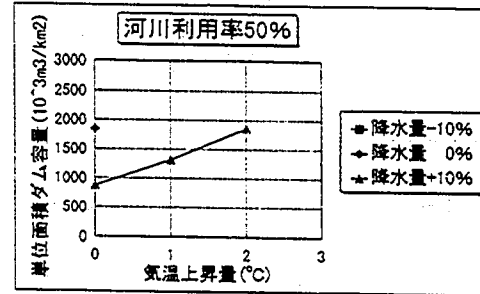
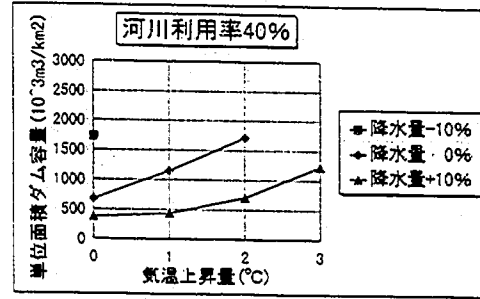
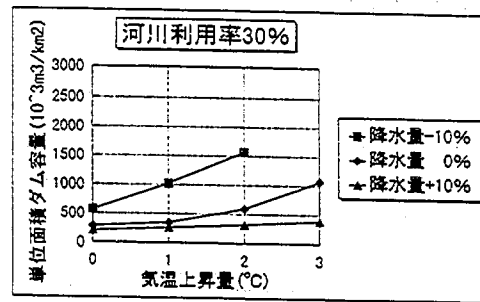


図-3.22. 1～3.22.12 A～Cダムの必要容量 (CASE 1～12) (河川利用率30～60%)

Aダム・10年第1位渇水を対象



Bダム・10年第1位渇水を対象



Cダム・10年第1位渇水を対象

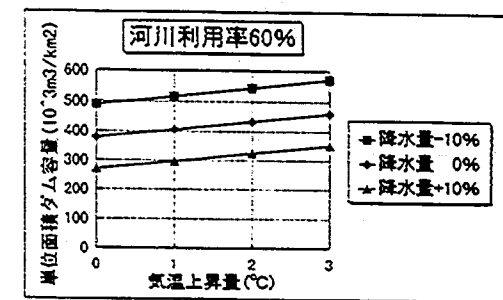
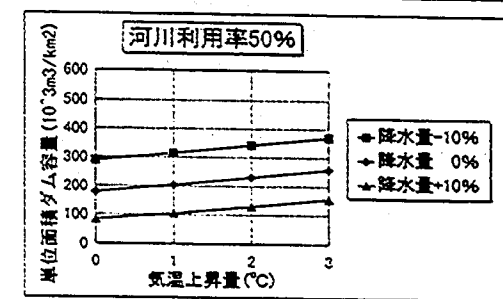
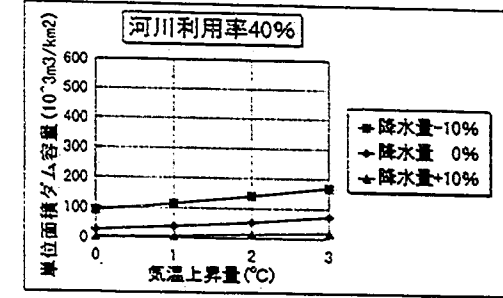
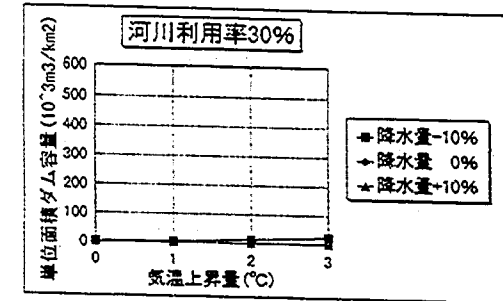
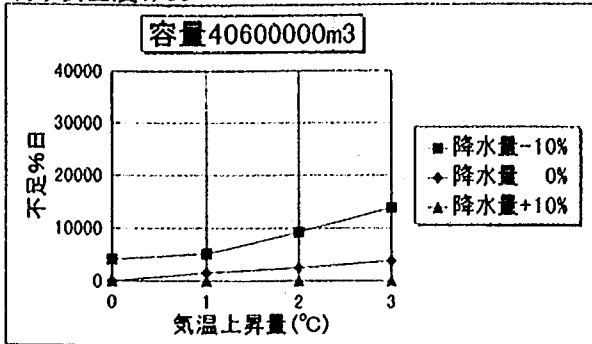


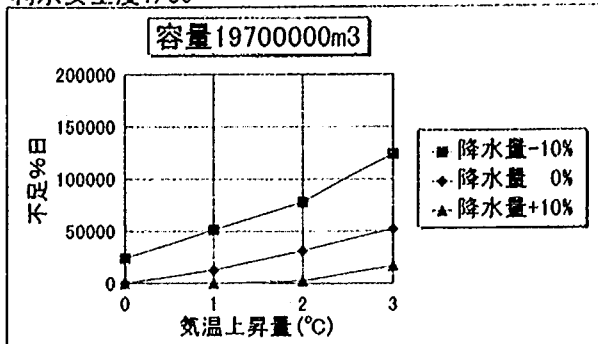
図 3.23. 1 ~ 3.23.12 A~Cダムの単位流域面積当りの必要容量 (CASE 1 ~ 12) (河川利用率30~60%)

Aダム・流域面積18.9km²

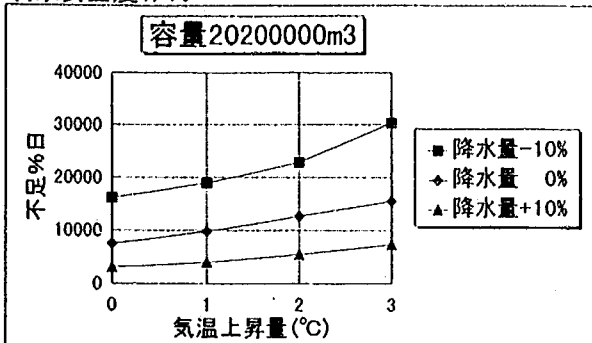
利水安全度1/30

Bダム・流域面積28.0km²

利水安全度1/30



利水安全度1/10



利水安全度1/10

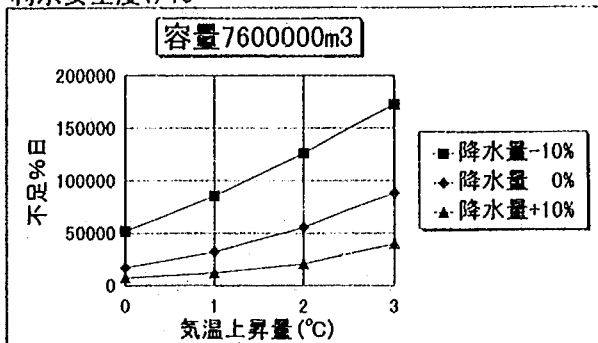


図-3.24. 1～3.24. 4 A～Bダムの不足%日 (CASE 1～12) (利用安全度1/10・1/30)

3.2.2 流域全体における温暖化の影響

わが国では河川利用率をはじめとする水資源利用率が地域によって大きく異なるため、地球温暖化の進行に伴って水資源が受ける影響を評価する場合、その地域が現在どのような水資源の開発レベルであるかによって、その影響が大きく異なることが予想される。

ここでは、各地域の代表的な流域について、現在の水資源の状況及び水利用の状況を整理し、気温上昇時の影響について分析を行う。対象河川は北上川・利根川・木曽川・淀川・太田川・吉野川・筑後川の7河川で、各河川に対し、平水年・渇水年を対象として検討を進める。なお、対象河川の選定の際、年流出に対して積雪・融雪の影響が大きいと考えられる地域は除外した。

a. 対象河川でのダムによる水資源開発状況

表-3.7に全国の主要水系で求めた流域平均年降水高とその流域からの平均年損失高・それらの差として求めた年流出高、また年使用高と、それが年流出高に占める割合を河川利用率として示す。さらに、表には流出高で評価した1/10の渇水時の降水量等も併記している。図-3.25にはこれらを模式的に示し、さらに取水量については用途別に内訳を示した。

流出高を算出した地点上流の流域平均降水量は、その流域の雨量観測所のデータから単純算術平均法もしくはティーセン法で算出し、流出高の算出地点は流域全体の流出高が評価できるよう、上流で取水された水がその地点を通過せずに流出することができる限り少ない地点とした。なお、上流にダム等がある場合は、日々の流況はダムによる流水調節の影響を受けるが、年間で評価した場合にはその影響は少ないと考えられ

表-3.7 対象河川諸元

渇水年

No.	地区名	流域面積 km ²	降水高 (mm)	流出高 (mm)	損失高 (mm)	使用率 (%)	使用高 (mm)	蒸発散量 (mm)	蒸発散量 比率
11	北上川	11281	1420	1030	390	15.3	158	414	0.9420
23	利根川・荒川	21466	894	501	393	66.5	333	480	0.8188
37	木曽川	4956	1955	1306	649	33.5	437	591	1.0981
41	淀川	9811	1442	901	541	73.1	659	614	0.8811
60	太田川	2544	1621	1078	543	24.2	261	586	0.9266
65	吉野川	3216	1967	1608	359	29.7	477	504	0.7123
71	筑後川	4189	1332	714	618	53.8	384	542	1.1402

平水年

No.	地区名	流域面積 km ²	降水高 (mm)	流出高 (mm)	損失高 (mm)	使用率 (%)	使用高 (mm)	蒸発散量 (mm)	蒸発散量 比率
11	北上川	11281	1607	1296	311	12.0	158	414	0.7512
23	利根川・荒川	21466	1251	781	470	43.0	333	480	0.9792
37	木曽川	4956	2551	1935	616	23.0	437	591	1.0423
41	淀川	9811	1820	1303	517	51.0	659	614	0.8420
60	太田川	2544	2087	1654	433	16.0	261	586	0.7389
65	吉野川	3216	2510	2254	256	21.0	477	504	0.5079
71	筑後川	4189	2200	1670	530	23.0	384	542	0.9779

る。年使用高については、実績取水量が報告されているものについてはその値を、最大値で整理されているものについては当該領域・当該利水目的毎の実績値／最大値で補正して集計した。

河川利用率を年使用高／年流出高と考えると、対象河川の河川利用率は平水年で12～51%、渇水年で15～73%と値にばらつきが見られるが、淀川（平水年51%・渇水年73%）・利根川（同43%・67%）のような開発の進んだ河川で利用率が高くなる傾向があることがわかる。また、平水年と渇水年の河川利用率の差は、淀川（+22%）・利根川（+24%）・筑後川（+31%）が高いのに対し、北上川（+3%）・太田川（+8%）は低くなっている。このことは、渇水時の河川利用率の上昇は、通常の河川利用率が高い河川においてより顕著であることを意味している。なお、表中の損失高は流域の蒸発散量と考えることができるが、既存の文献と比較した結果⁹⁾、平水年で50.8～104.2%、渇水年で71.2～114.0%と若干低い値を示した。

さらに、表-3.8に各水系の全利水容量と建設省所管の近年竣工したダム及び現在建設・計画中で1993年から10年以内に完成予定のダムの内、新規上・工水の開発を行っているダムの上・工水容量とその開発水量を示す。利根川を例とすると、全利水容量が59,660万m³（1992年現在）で、表-3.4に示す年間取水高333mmをまかなっており、近年では新規に上・工水を1m³/s開発するのに約1,023万m³の容量が必要となることがわかる。

また、図-3.26に、経年的に上・工水開発が進んでいる利根川・淀川の上・工水新規開発水量の合計値とダム上・工水容量の合計値の変遷を示す。上・工水のみを対象としたのは、期別の変動が少ないためである。図より、水資源開発が進むにつれて新規1m³/s開発容量が大きくなることがわかる。

一般に、水資源利用率の上昇に伴って新規1m³開発容量が増加するといわれている。表-3.8をみる限り、水系間で特に明確な相関はなく、河川の流域面積・ダム数等の地域要因が大きく関係していると考えられる。

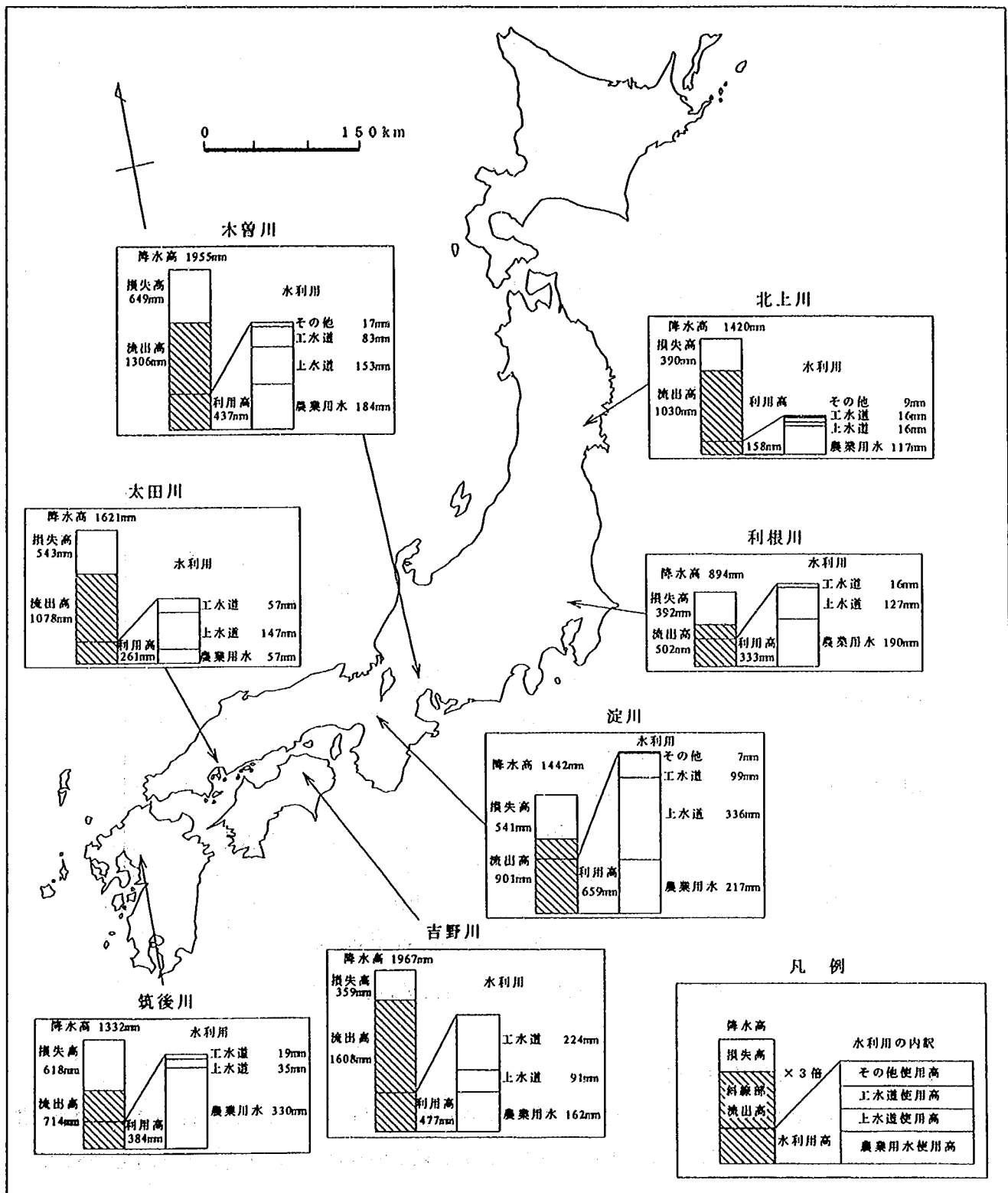


図-3.25 対象河川諸元

表-3.8 各水系の開発状況

河川名	現在竣工ダム	近年竣工及び建設・計画中のダム				
	全利水容量	上工水容量	上工水開発水量		上工水1m ³ /s開発の必要容量	対象ダム数
	(10 ³ m ³)	(10 ³ m ³)	(m ³ /日)	(m ³ /s)	(10 ³ m ³)	
北上川	267140	13527	146900	1.70	7956.0	5
利根川・荒川	596606	173000	1461040	16.91	10230.5	4
木曽川	287181	36400	446700	5.17	7040.4	2
淀川	90492	50100	1106860	12.81	3910.7	6
太田川	1564	23550	464000	5.37	4385.2	2
吉野川	211210	103900	2022620	23.41	4438.3	2
筑後川	70096	2430	72662	0.84	2889.4	2

1) 建設省資料より上工水専用の容量を持つダムについてまとめた
 2) 淀川については琵琶湖総合開発事業が行われたが、ここでは含めていない

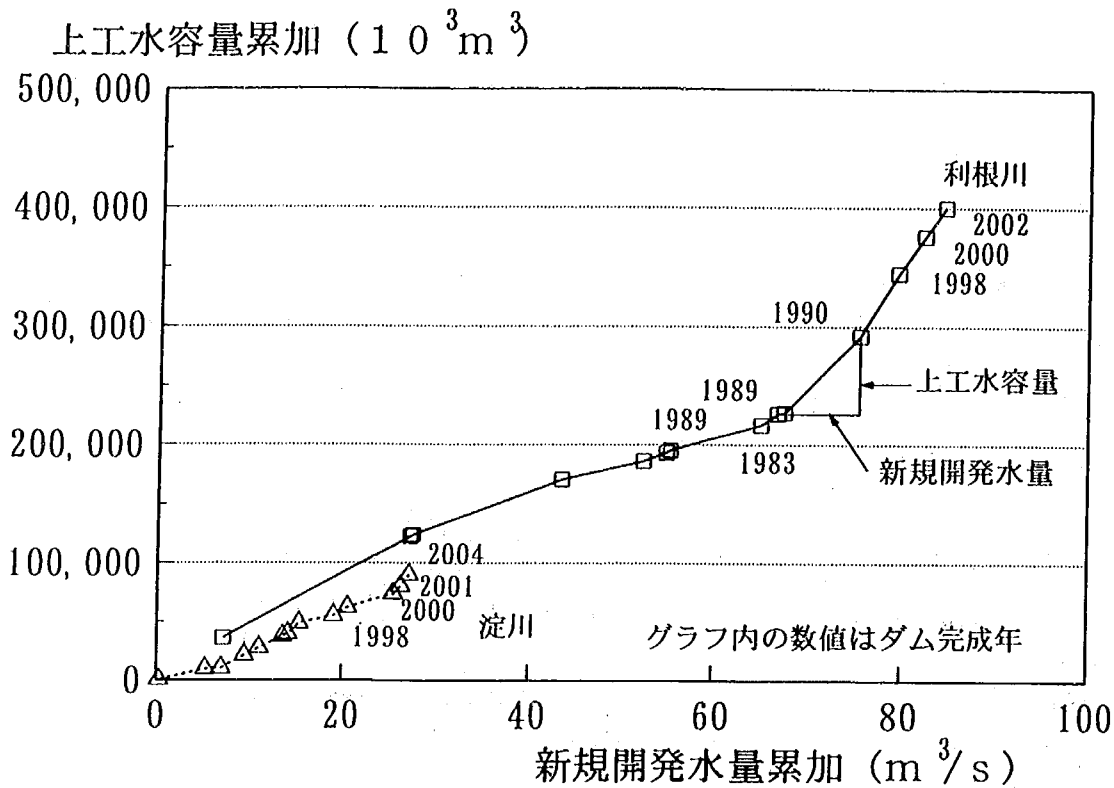


図-3.26 利根川・淀川の上工水開発状況

b. シナリオに基づいた温暖化の影響

ここでは表-3.5の温暖化シナリオのうち、温度上昇量を評価するCASE 2, 5, 8, 11を対象に検討を進める。評価の具体的内容としては、気温上昇による水資源賦存状況の変化、気温上昇による開発すべき容量の変化とする。

(1) 気温上昇による水資源賦存状況への影響

各流域について、Hamon式により月平均気温から年間の可能蒸発散量を求め、表-3.7で算出した年蒸発散量(=年損失量)を補正するための補正係数を算出した(表-3.9.1~3.9.2)。このHamon式と補正係数を用いて、気温が1~3℃上昇した場合の蒸発散量を算出した。

図-3.27.1~3.27.4に各流域での水資源賦存量の変化を示す。水資源賦存量は降水高と損失高の差と

表-3.9.1~3.9.2 各河川の蒸発散量補正係数 (CASE 1~12)

Hamon式による年間蒸発散量

気温 上昇	降水量変化		
	-10%	0%	+10%
0℃	597.2	642.5	774.9
1℃	634.9	681.9	822.5
2℃	675.0	722.7	871.5
3℃	715.5	766.2	923.1

Hamon式による年間蒸発散量補正比率

気温 上昇	降水量変化		
	-10%	0%	+10%
0℃	1.000	1.000	1.000
1℃	1.063	1.061	1.061
2℃	1.130	1.125	1.125
3℃	1.198	1.193	1.191

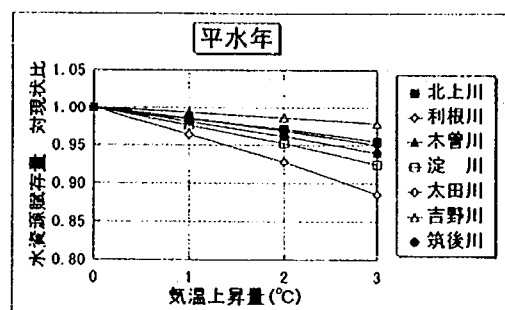
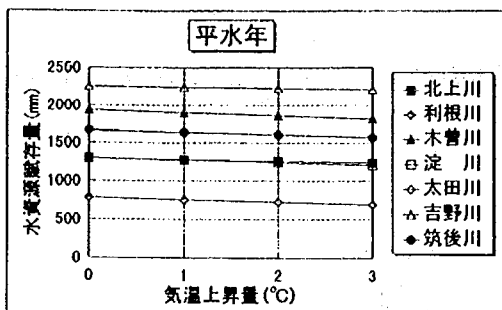
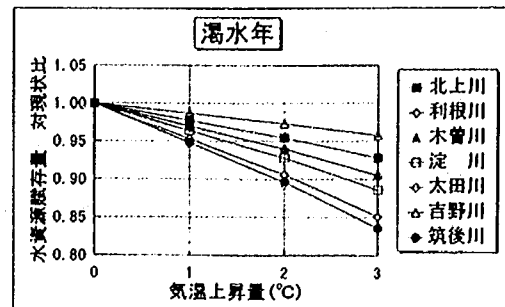
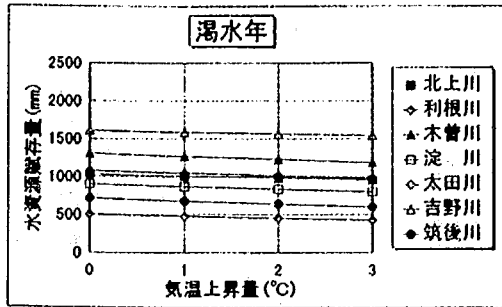


図-3.27.1~3.27.2

各河川の水資源賦存量変化 (CASE 1~12)

図-3.27.3~3.27.4

各河川の水資源賦存量変化率 (CASE 1~12)

し、Hamon式を用いて算出した蒸発散量を損失高としている。水資源賦存量は各河川とも渇水年の方が平水年よりも小さく、現状比で0.428~0.795となっている。また、水資源賦存量は気温上昇量が大きいほど減少率が高く、CASE11においては平水年で0.886~0.978・渇水年で0.836~0.958となり、渇水年の方が平水年よりも影響が大きいことがわかる。

この時、水需要が変化しないとすると水資源利用率は図-3.28.1~3.28.4のようになる。水資源利用率は使用高を流出高で除した値を百分率で示している。現状の水資源利用率は平水年で12.2~50.6%・渇水年で15.3~73.1%となり、渇水年の方が利用率が高い。また、平水年・渇水年とも気温上昇量が大きいほど利用率が高くなり、CASE11では渇水年(1.2~11.6%)の方が平水年(1.2~5.5%)よりも利用率増加が顕著となっている。また、利用率の高い河川で気温上昇による影響が大きく、CASE11(渇水年)で利根川が11.6%・淀川が9.4%と高い値を示している。

なお、一般に水資源利用率の変化は水需要量の変化を意味するが、ここでの検討では、水需要が変化せずに水資源賦存量のみが変化することとし、結果的に利用率が変化すると考えている。

(2) 気温上昇による開発すべき水量への影響

次に、地球温暖化に伴う気温上昇が開発すべき水量にどのような影響をもたらすかについて検討を行う。

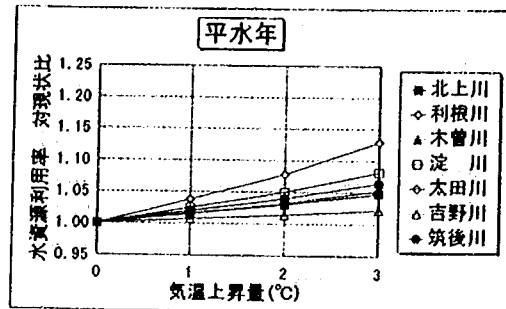
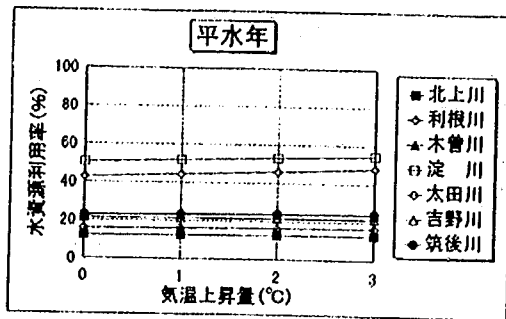
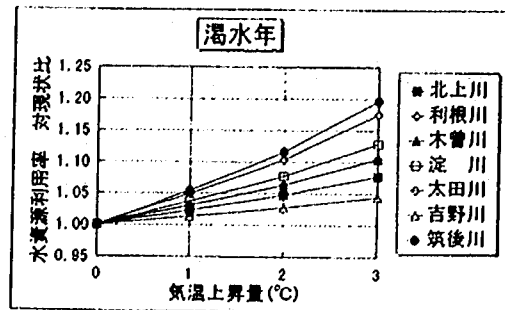
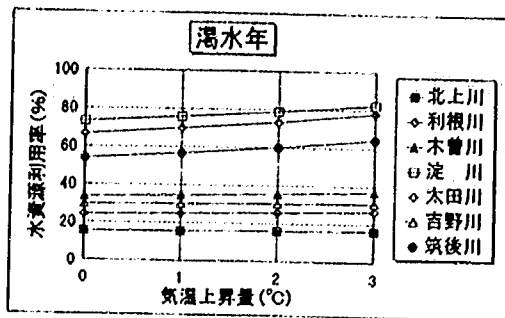


図-3.28.1～3.28.2
各河川の水資源利用率変化 (CASE 1～12)

図-3.28.3～3.28.4
各河川の水資源利用率変化率 (CASE 1～12)

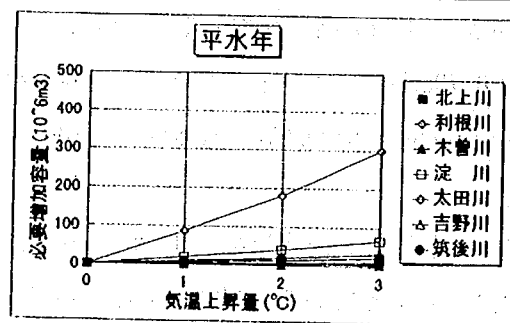
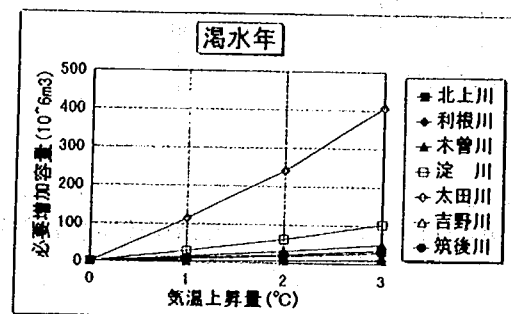


図-3.29.1～3.29.2
各河川の新規開発容量変化 (CASE 1～12)

ところで、温暖化によって蒸発散量が増加（降水量は変化しないと仮定）し、水資源賦存量が減少すると、結果的には水資源利用率が増加することとなる。そこで、ここでは簡単のため、水資源賦存量は増加せず水需要が増加して、結果的に水資源利用率が同じになる状態と等価であるとする。この仮定に基づいて、気温上昇による水資源の目減り分を、水資源利用率を介して、必要な新規開発容量に置き換えたものが図-3.29.1～3.29.2である。新規開発容量は平水年・渇水年ともに値を算出しているが、1/10安全度の確保を

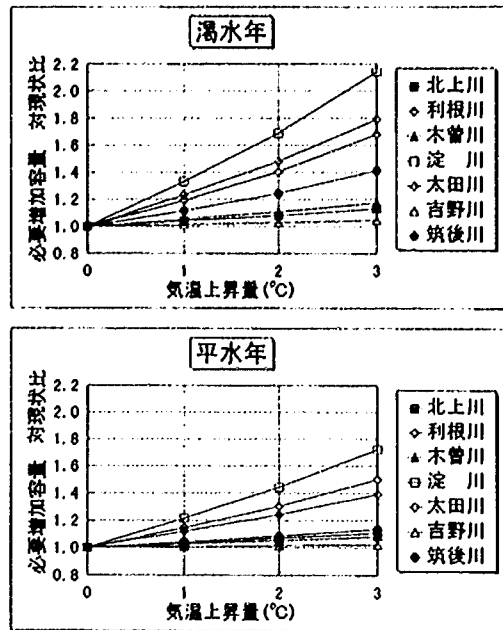


図-3.30.1～3.30.2
各河川の新規開発容量変化の対現状比 (CASE 1～12)

考慮して、渇水年を対象とした新規開発容量をもとに議論を行う。なお、表-3.8には、各河川における現在の全利水容量を示している。

図より、新規開発容量は気温上昇とともに増加量が大きくなることがわかる。また、CASE11における増加量は9.6～406.2 ($\times 10^6 \text{ m}^3$) となっており、河川利用率が高く現状での開発水量が大きい利根川 (406.2)・淀川 (103.3) で大きい値を示す。また、この2河川は蒸発散量が高い (利根川37.6%・淀川で28.4%)。このことから、蒸発散量の大きい流域では、同一の安全度を確保するために必要となる新規開発容量が大きく、温暖化による気温上昇の影響が大きくなることがわかる。

これを対現状比で示したものが図-3.30.1～3.30.2である。必要容量を対現状比にすることで、流域規模の影響を除くことができる。図より、利根川(1.68)・淀川(2.14)の他に筑後川 (1.41)・太田川 (1.79) で高い値を示している (CASE11)。筑後川・太田川では現状の利水容量が小さいため (太田川： $12.4 \times 10^6 \text{ m}^3$ ・筑後川 $70.1 \times 10^6 \text{ m}^3$) であると考えられる。

以上のように、地球温暖化が水資源に及ぼす影響を評価するには、温暖化による水資源賦存量の変化を把握するとともに、現状での水資源開発レベルに基づいて、一定の利水安全度を維持するために温暖化によって新たに必要となる水資源開発量について検討する必要がある。ここでは、温暖化の進行と必要な新規開発容量の関係を求めたが、現状における開発が進んだ河川利用率の高い河川でより大きい値を示すことがわかった。

4. 水資源需要に対する 温暖化の影響について

4. 水資源需要に対する温暖化の影響について

本章では、都市用水を対象に気温と水需要量の関係についての基礎的な分析を行い、温暖化したときの需要量の増加量を定量的に推計することを試みる。最初に、気温と都市用水需要量の関係を定式化するために、気温変化と水使用量の関係を地域的な差異や用途の種別を考慮して分析し、同定された関係式の各係数について地域的な特性から考察する。次に気温の分布形について分析を行い、温暖化後の気温分布に仮定を設けることにより温暖化シナリオを作成し、温暖化が都市用水需要量に与える影響について検討を行う。

4.1 現状の把握

都市用水を対象として、気温と水使用量の関係について検討する。ここでは、全国レベル・都市レベルでその関係を把握するとともに、都市レベルを対象として都市用水の用途別特性についても検討する。

4.1.1 全国レベルでみた気温と都市用水使用量の関係

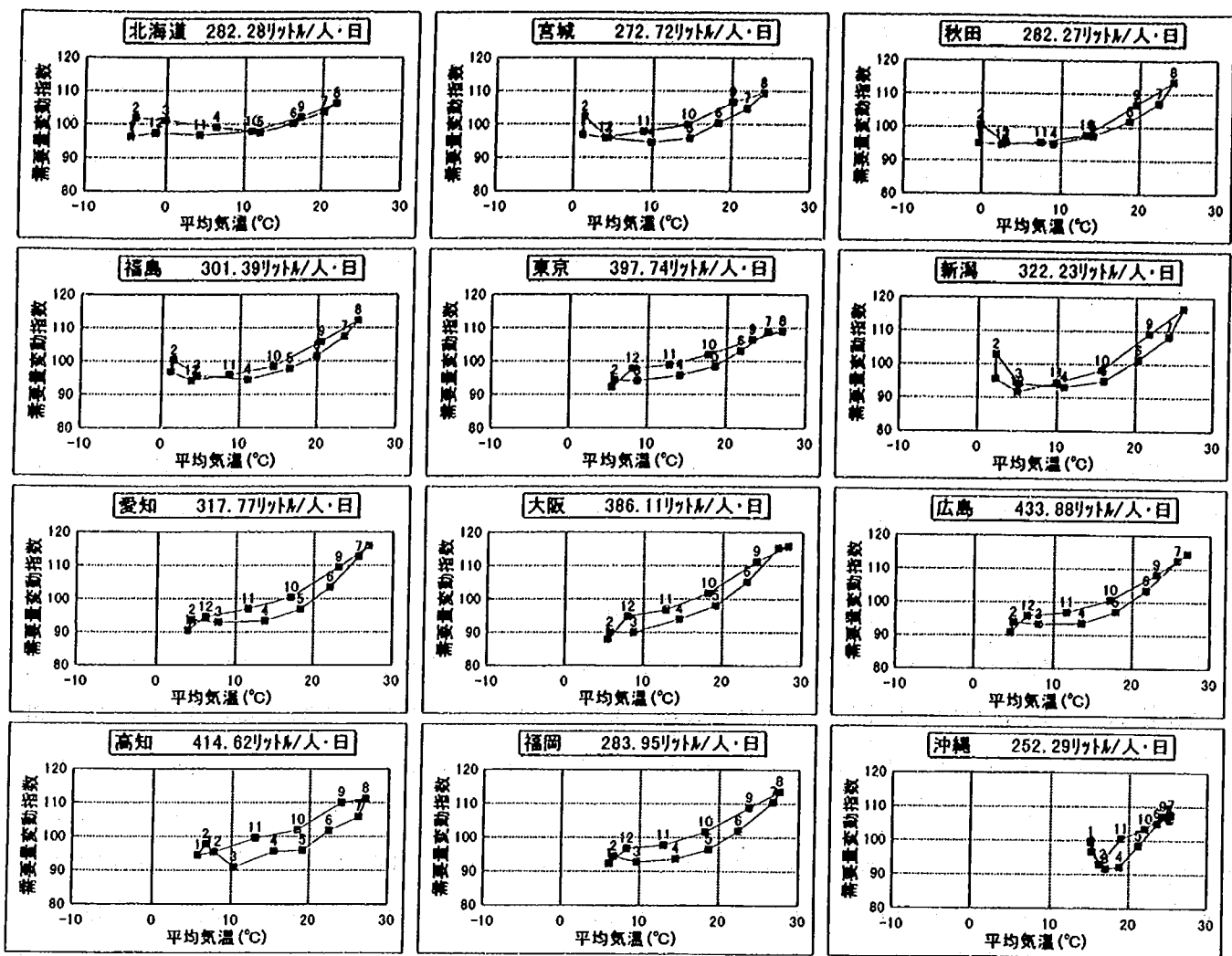
気温と都市用水使用量の関係の地域的な相違を把握するため、北海道から沖縄県までの全国の12の都道府県を選定し、これらについて月単位水使用量と気温の関係を分析する。月別使用量は1965～1991年の27年間の上水道給水量（水道統計より収集）³⁰⁾を用い、気温は県庁所在地の月平均気温²⁹⁾を用い分析を行う。

分析に際し、給水人口の増加による水使用量への影響を除くため、月別水使用量を給水人口で割り戻し、原単位として扱うものとする。また、ライフスタイルの変化等による長期的な使用量増加の影響を除くため、連還比率法（link-relatives-methods）³¹⁾で基準化した月別変動指数（年平均を100とした指数）を求めた。気温については、分析期間が30年程度と温暖化の時間スケールと比較して小さいため、観測値をそのまま月単位で平均化する。以上より気温と使用量の関係を調べるが、気温の増加・減少と使用量の増加・減少の関係を変化の履歴を含めて調べるため、水使用変動指数を縦軸に気温を横軸にとり、各都道府県ごとに図－4.1.1～4.1.12に示す気温・使用量曲線（Temperature-Demand Curve 以下T-D曲線と称する）を作成した。

同図より次のような特徴が整理される。

- ①T-D曲線は程度の差はあるが気温上昇期（2～8月）と気温下降期（8～1月）の両方でともに下に凸な形状を呈している。すなわち、水使用量と月平均気温には正の相関がみられ、概ね7～8月に使用量が最大、12～4月に使用量が最小を示す。
- ②同一気温であっても、気温上昇期と気温下降期では水使用量の大きさに差があり、上昇期よりも下降期の方が大きい。
- ③冬期（1～2月）において、水使用量が増加する地域がある。

これらは、ともに水使用者の水使用行動に関係しており、②については行動が気温の変化よりもある時間遅れを伴っている（水使用行動に慣性力がある）ためと推察されるが、その検証には水使用構造まで踏み込んだ検討を行う必要がある。ここでは、温暖化による水使用量の変化を検討することが主題であり、①～③に整理される気温と水使用量の関係の特徴のうち、気温上昇期と気温下降期の水使用量の相違、冬期におけ



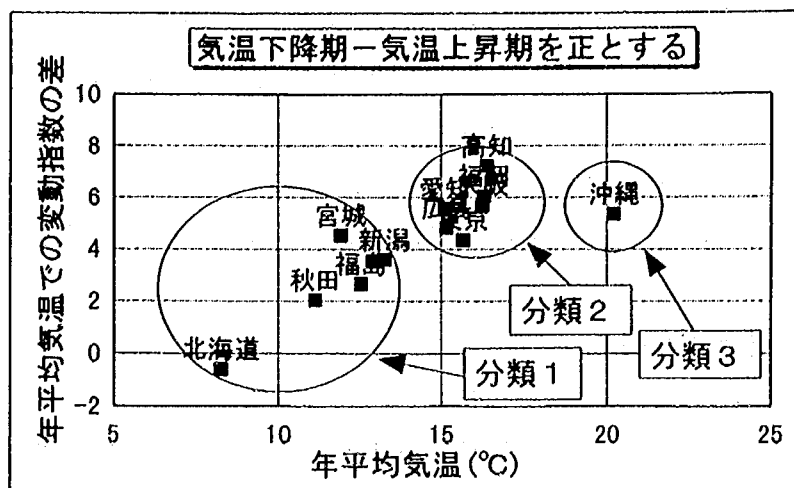
図－4. 1. 1～4. 1. 12 12都道府県における平均気温と水使用量変動指数の関係

る水使用量の変化等の特性を用いて、全国を複数の地域に類型化することを試みる。

図－4. 2 に各都道府県の気温上昇期（2～8月）と気温下降期（8～1月）に一回ずつ出現する年平均気温を示す月における水使用量変動指数の相違を示す。水使用量変動指数の相違を検討するため、気温上昇期と気温下降期における月平均気温と水使用量変動指数の関係を2次の近似式で示し（表－4. 1）、その近似式から水使用量変動指数の相違を算出した。気温上昇期と気温下降期の水使用量変動指数の相違が大きいほど、下降期の水使用量が上昇期と比較して大きくなることを示す。さらに、図－4. 3 は冬期に着目して1～2月のみの水使用量変動指数を整理したものを示している。これらをみると、水使用量に与える気温分布特性は概ね、

- A) 北海道、東北・北陸地方
- B) 東北・北陸を除く本州、四国、九州地方
- C) 沖縄

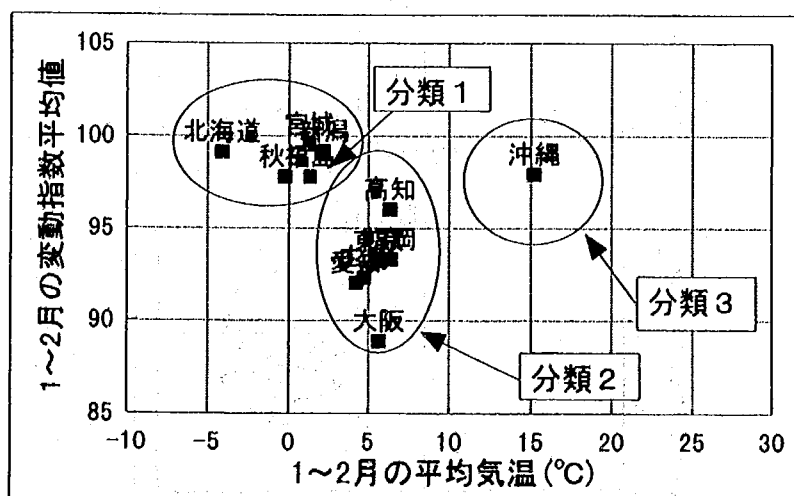
の3区分に分類される。分類A) は1～2月の水使用量変動指数が高く、冬期での水使用量の増加が認められる地域である。分類B) は1～2月の水使用量が増加しない地域である。分類B) で示した地域は気温上



図－4.2 12都道府県における年平均気温での水使用量変動指数の相違

表－4.1 各期間における気温と水使用量変動指数の定式化 (1965. 4～1991. 12)

都道府県	気温上昇期(2月～8月)			気温下降期(8月～1月)			通年(1月～12月)		
	$y=ax^2+bx+c$			$y=ax^2+bx+c$			$y=ax^2+bx+c$		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
北海道	0.0370	-0.558	100.070	0.0235	-0.065	96.304	0.0272	-0.260	98.069
宮城	0.0839	-1.758	103.460	0.0298	-0.154	96.562	0.0584	-0.999	100.060
秋田	0.0727	-1.233	99.580	0.0465	-0.358	95.124	0.0580	-0.772	97.243
福島	0.0779	-1.571	102.050	0.0459	-0.519	96.561	0.0608	-1.025	99.150
東京	0.0432	-0.655	96.431	-0.0024	0.786	89.403	0.0235	-0.029	93.425
新潟	0.1094	-2.497	106.420	0.0630	-0.812	95.841	0.0855	-1.657	101.120
愛知	0.0829	-1.655	99.990	0.0287	0.136	90.882	0.0555	-0.760	95.284
大阪	0.0598	-0.836	92.795	0.0105	0.796	84.996	0.0387	-0.136	89.573
広島	0.0751	-1.458	99.504	0.0260	0.137	91.451	0.0522	-0.714	95.647
高知	0.0828	-2.141	107.060	0.0143	0.348	91.900	0.0481	-0.893	99.119
福岡	0.0790	-1.812	102.960	0.0230	0.149	91.928	0.0518	-0.873	97.616
沖縄	0.2373	-8.295	166.050	0.0526	-1.038	100.200	0.1804	-6.045	146.050



図－4.3 12都道府県における1～2月の平均気温と水使用量変動指数平均値の関係

昇期と気温下降期で、同一気温での水使用量に大きな差異があるという特徴を持つ。分類C) は他地域と比較して年平均気温が高い地域である。分類C) の地域は1～2月の水使用量変動指数が高く、冬期に水使用量が増加するという特徴を持つが、分類A) と分類C) でその理由が異なると考えられる。

なお、月別でみた年間最大・最小の需要量の差は、A) で9.9～25.1%、B) で16.8～27.8%、C) で15.9%であり、特にB) の中でも都市化の進んだ愛知・大阪では25.3～27.8%と大きくなっている。

4.1.2 気温と用途別水使用量の関係

ここでは、気温と都市用水使用量の関係を都市レベルでのデータをもとに、用途別に詳細に検討を行う。対象都市は先述の分類A)～C) に属する北海道旭川市・愛知県名古屋市・沖縄県那覇市の3都市を選定した。図-4.4.1～4.4.3に各都市の日平均気温と水使用量の関係を示す。データ収集期間は、旭川市は1983～1993年、名古屋市は1979～1990年、那覇市は1987～1993年である。

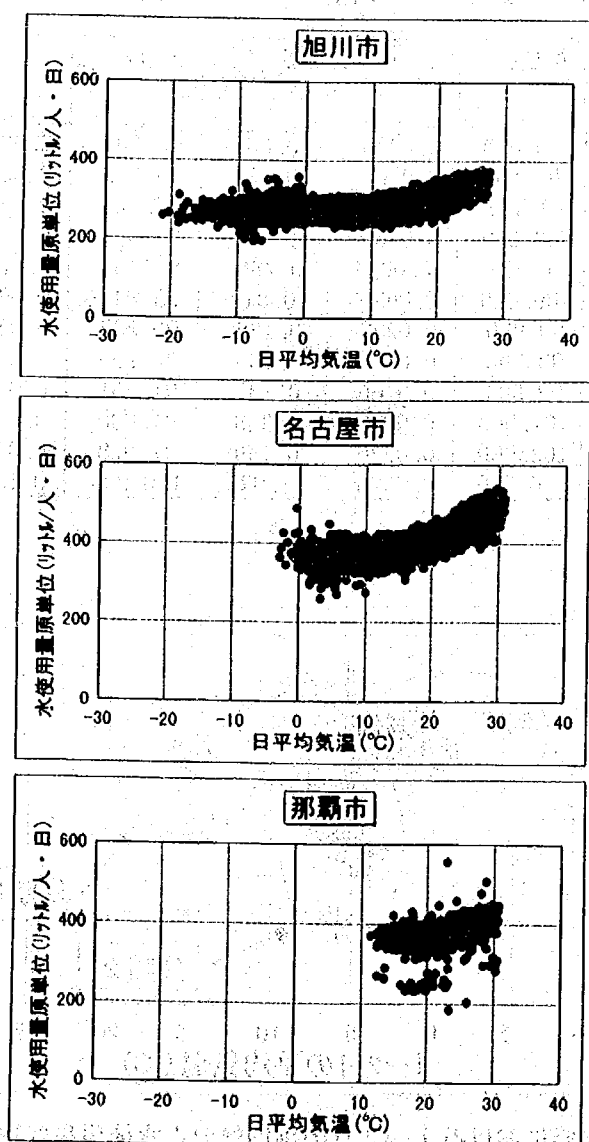


図-4.4.1～4.4.3 3都市の水使用量原単位と日平均気温の関係

なお、日単位水使用量は、各年度の給水人口に増加の影響を考慮して各日の給水人口を算出し、その値で割り戻して、原単位とすることにより人口増加の影響を除いている。さらに、渇水による給水制限時及び事故時のデータは除いた。

図より、日平均気温と水使用量原単位には正の相関がみられること、同一気温における水使用量原単位にはばらつきがみられることがわかる。また、図-4.5.1～4.5.3に各都市のT-D曲線を示す。図より各都市とも気温と水使用量原単位に正の相関があること、気温上昇期と気温下降期における同一気温での水使用量原単位に相違があることがわかる。また、旭川市・那覇市は冬期の水使用量の増加が顕著である点、名古屋市は冬期の水使用量の増加が認められないという点で前述の分類A)～C)の特徴と共通し、各代表都市は分類A)～C)の水使用特性を反映していると考えることができる。

次に、図-4.5.1～4.5.3に示した都市用水使用量は上水道使用量の全量であり、使用用途からみると、家庭用水とその他の用水（業務・営業用水、工場用水、その他）から構成されている。そこで、家庭用水とその他用水に分け、気温との関係について比較を行った。データ収集期間は、旭川市・名古屋市が1983

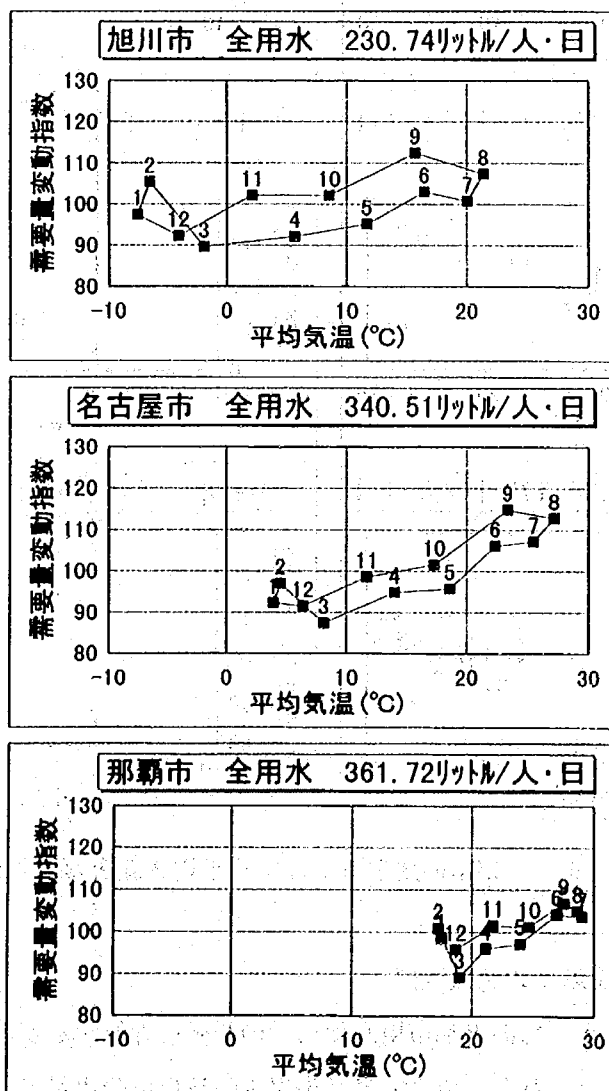
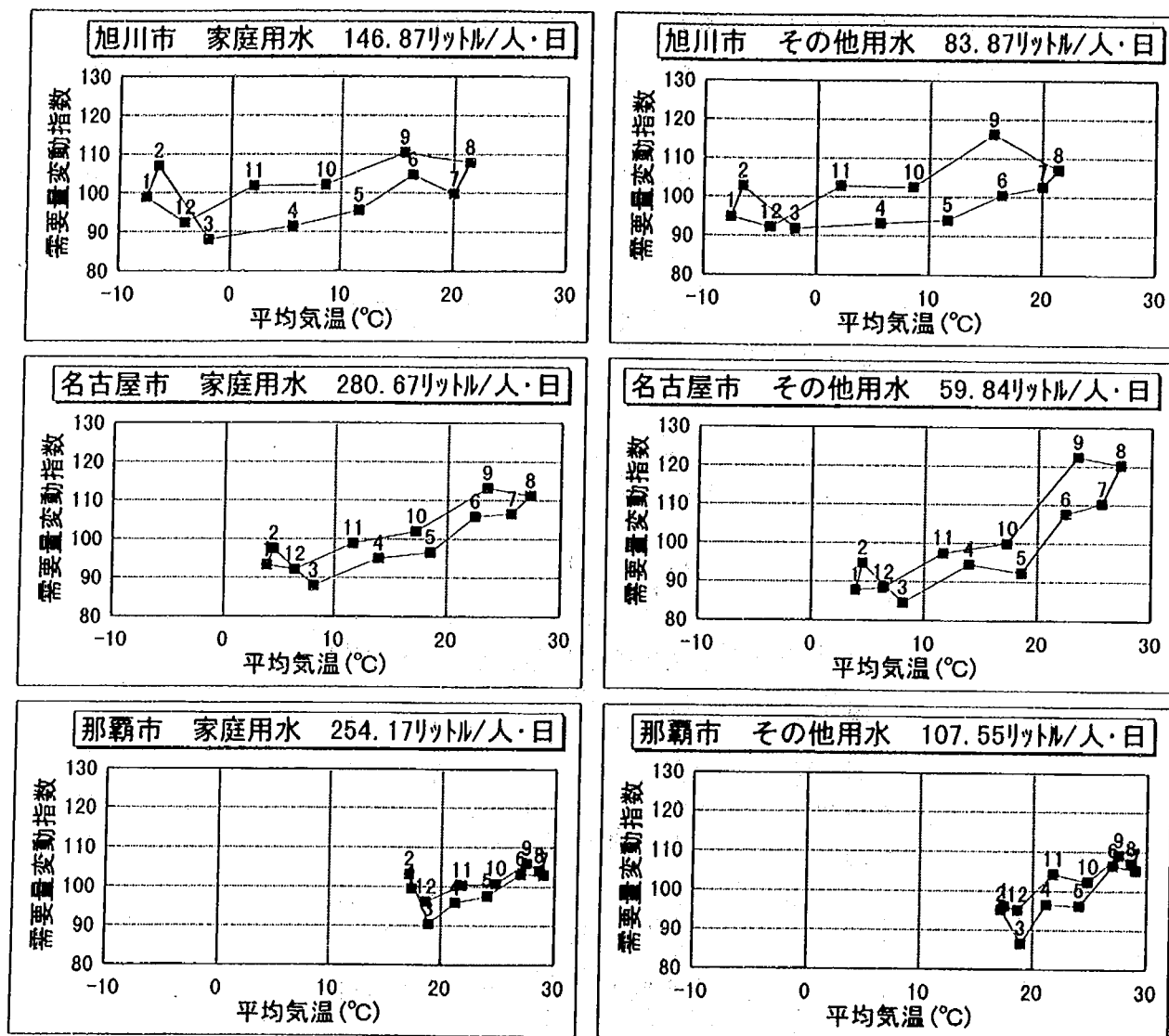


図-4.5.1～4.5.3 3都市の月平均気温と水使用量変動指数の関係

～1993年、那覇市が1985～1993年である。用途は家庭用水およびその他用水とし、都道府県のデータで行った方法と同様に、月単位の水使用量原単位を連還比率法によって基準化して分析を行った。

図－4.6.1～4.6.6に各都市の用途別にみたT-D曲線を示す。図より、家庭用水・その他用水ともT-D曲線がほぼ同様の形状を呈しており、気温が上昇するに従い、水使用量が増加していることがわかる。また、気温下降期の方が気温上昇期よりも、水需要量が大きくなることも図からわかる。

以上より、気温と都市用水使用量の関係については、用途の相違によって特に顕著な差はなく、全体としての水使用行動の特徴は家庭レベルでの水使用行動で概ね代表できるものと考えられる。



図－4.6.1～4.6.6 3都市の用途別にみた月平均気温と水使用量変動指数の関係

4.2 気温を用いた都市用水使用量の関数近似

ここでは、前節の結果を踏まえ、気温と都市用水使用量の関係を近似するとともに、各地域での係数の同定値をもとに地域特性を分析する。なお、以下では都市用水の日単位給水量データをもとに議論を進めることとし、4.1.2.で示した3都市を対象とする。

まず、水使用量を気温の関数として表すことを試みる。4.1で分析したT-D曲線の形状や各都市の日単位給水量と気温の対応関係をみると、直線よりもむしろ下に凸な形状となっている。そこで、水使用量(D)と気温(T)の関係を式(4.1)のように仮定する。

$$D(T) \propto T^2 \dots \dots \dots (4.1)$$

これにより、D(T)は式(4.2)のように表すことができる。

$$D(T) = a(T - T_m)^2 + D_0 \dots \dots \dots (4.2)$$

ここに、係数aは該当気温における単位気温上昇当たりの水使用量変化を決定する係数であり、値が大きいほど気温上昇に伴う使用量の変化が大きくなる。定数D₀(=D(T_m))は水使用量D(T)が最小となる水使用量の大きさを示し、以下ではこれを基準水使用量とする。また、T_mは基準水使用量を与える気温であり、これらa, D₀, T_mを各都市のT-D曲線の特性値としてそれぞれ求め、以下に比較分析を試みた。

表-4.2に各都市ごとに求められたa, D₀, T_mを示すが、これより各都市の特徴を以下のとおり整理することができる。

- ・係数aの最も大きい都市は名古屋市0.22であり、次いで那覇市0.16、旭川市0.06となっている。
- ・基準水使用量を与える気温T_mは、旭川市-4.1℃、名古屋市6.7℃、那覇市12.8℃で低緯度都市ほど高くなっている。これを各都市の平均気温と比較すると、各都市ともT_mが年平均気温に対して約10℃低くなっている。
- ・基準水使用量を示す係数bは、社会構造、水源構成、過去の渇水経験などの地域特性が強く影響することが考えられるが、今回の3都市においては旭川市271ℓ/人/日、名古屋市372ℓ/人/日、那覇市366ℓ/人/日となっており、年平均気温が比較的高い都市で水使用量が大きくなる結果となった。

表-4.2 3都市における水使用量の多項式近似

都市	近似式係数		
	a	D ₀	T _m
旭川市	0.0606	-4.0482	271.21
名古屋市	0.2191	6.6801	372.33
那覇市	0.1618	12.7629	366.15

この結果の妥当性について、実績データの範囲内で検討したものを表-4.3に示すが、これより以下のことがわかる。

- ・回帰式の当てはまりは、名古屋市が最も良好であり、重相関係数は0.85となっている。次いで、那覇市0.66、旭川市0.59である。採用した説明変数によって目的変数を説明することの有意性は、得られた多項式の分散分析の結果からわかるが、偏回帰係数が0という仮説は、いずれも危険率1%で棄却されている。
- ・標準偏回帰係数をみると、平均気温の自乗の項(T²)がいずれの都市でも平均気温の項(T)よりも水使用量に対して影響の大きい項となっている。

図-4.5.1～4.5.3に3都市におけるT-D曲線を、図-4.7.1～4.7.3に3都市における日平均

表-4.3 3都市における水使用量近似式係数の同定結果

都市	説明変数	偏回帰係数	標準偏回帰係数	重相関係数
旭川市	t2	0.0606	0.4108	0.588
	t	0.4950	0.2082	
	定数項	272.22	-	
	分散分析	分散比 $F_0(VR/VE)=1061$ $F(2, \text{無限}, 0.01)=4.61$		$F_0 > F$
名古屋市	t2	0.2191	1.4349	0.846
	t	-2.9272	-0.6190	
	定数項	272.22	-	
	分散分析	分散比 $F_0(VR/VE)=1061$ $F(2, \text{無限}, 0.01)=4.61$		$F_0 > F$
那覇市	t2	0.1618	1.4868	0.658
	t	-4.1301	-0.8375	
	定数項	272.22	-	
	分散分析	分散比 $F_0(VR/VE)=1061$ $F(2, \text{無限}, 0.01)=4.61$		$F_0 > F$

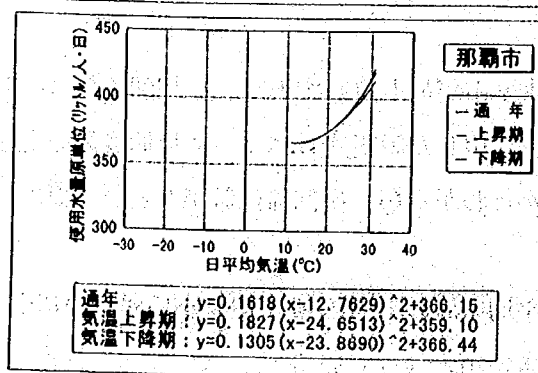
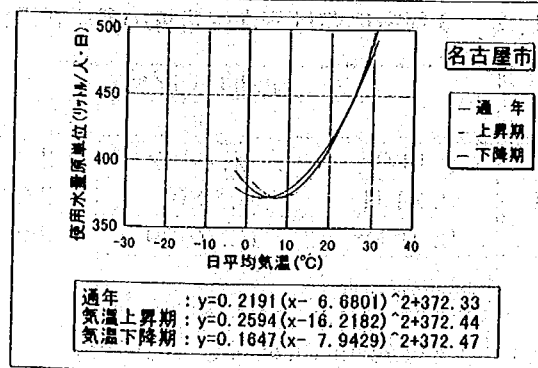
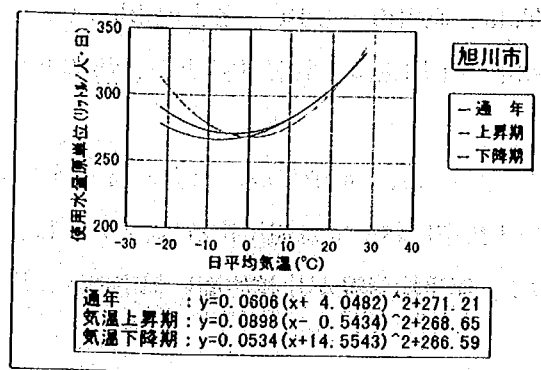


図-4.7.1~4.7.3 3都市の日平均気温と水使用量原単位の近似式

気温と水需要量の関係及び近似式を示す。

また、各都市とも高温域では水使用量が気温 T の自乗に比例することが傾向としてとらえることができるが、低温域では高温域ほどの明確な特徴を確認することが出来ない。図-4.1.1～4.1.12からわかるように、低温域の水使用量増加は一部地域に確認されるものであり、近似式の低温域における妥当性は高温域よりも劣るが、ここでは、低温域・高温域を特に区別せずに気温 T の自乗の関数のままで一本の近似式により評価している。

4.3 温暖化による増加需要量の推計

ここでは、4.2 までで議論した都市用水使用量が都市用水需要量と等しいと考えて、温暖化による水需要量増加の推計を行う。ここに水使用量とは水使用者が実際に使った量を、水需要量とは水使用者が使用を希望する量である。

4.3.1 需要量推計モデル

4.1.2の式(4.2)で示したように気温と水需要量は2次式で対応付けられるが、その係数は地域により異なる。温暖化により気温分布が変化した後の a 、 D_0 の変化を推定するには、気温に着目した事例分析をさらに重ねることが必要であるため、ここでは固定として取り扱い、年間を通じての気温と需要量の関係から図-4.8に示すモデルを考える。同図では現状の気温と水需要量の関係を固定して、温暖化により気温分布形状のみが変化すると考えている。同モデルでは、2次曲線の最小値を与える気温(T_m)を境に単位気温上昇当たりの需要量が増加する気温帯と減少する気温帯に分かれる。需要量の変化量は、温暖化により、この気温帯が T_m に対してどの部分に存在するかという点と2次曲線の係数 a によって決まってくる。

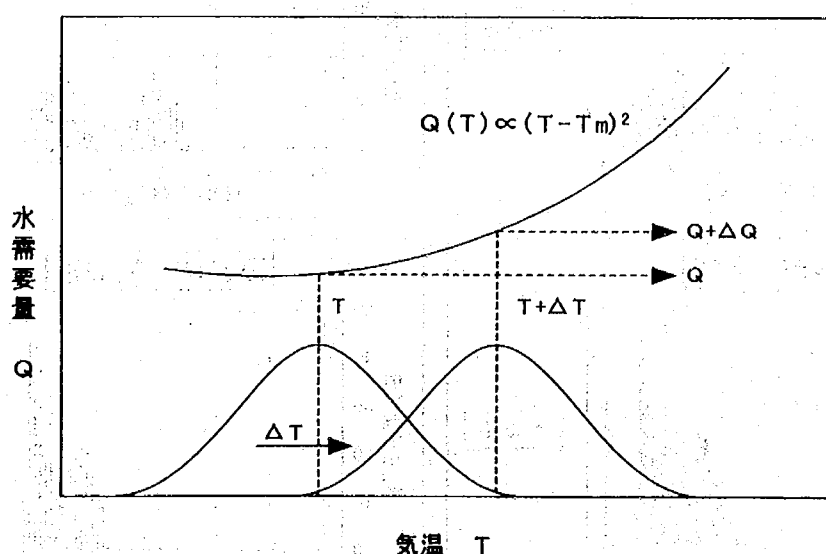


図-4.8 温暖化による水需要量増加の推計の考え方

4.3.2 温暖化後の気温分布の仮定

温暖化が進行した場合、平均気温はおよそ 2°C 上昇すると予測されている²⁾。しかし、年間を通じて気温分布がどのように変化するかは十分な知見がない。図-4.8に示されるように水需要量を推計するには気温分布を仮定する必要があるため、ここでは、まず、旭川市、名古屋市及び那覇市における1965～1994年までの過去30年間の気温データについて 1°C 刻みで気温分布型を調査した。

結果を図-4.9.1～4.9.3に示すが、都市により分布形状は異なるものの、いずれの都市でも年間気温分布は双山型に近い分布型である。これは年間の季節変化によりその分布が異なり、それらが重なってこのような形状を呈していると考えられる。その期間として年間を高温期（5～10月）と低温期（11～4月）に分けてみると（図-4.9.4～4.9.6）、2つの期別分布はそれぞれ正規分布に近く、年平均気温が高いほど2つの期別分布は接近し級間分散が小さくなる。そして、各期の気温のばらつき、すなわち級内分散

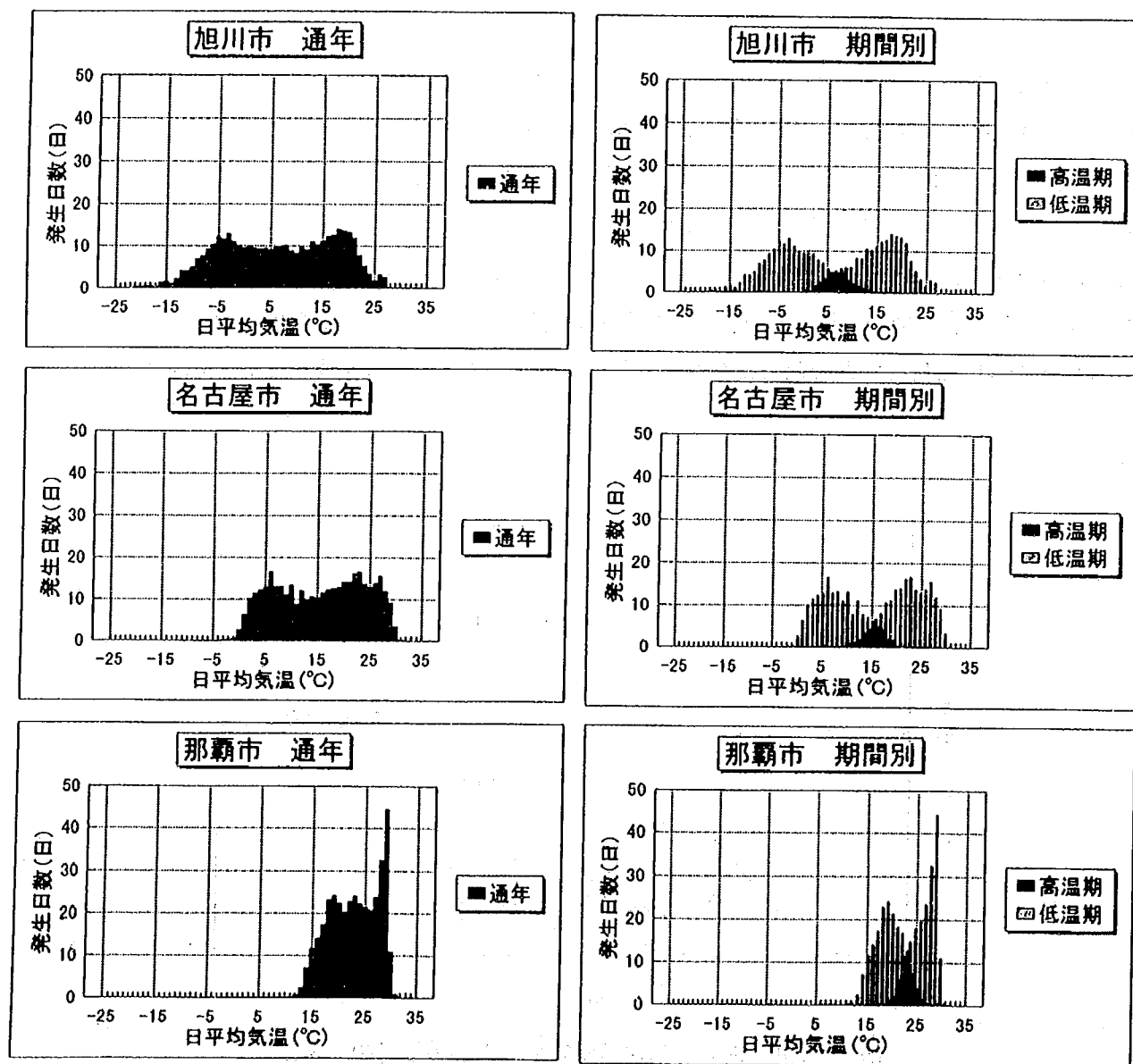


図-4.9.1～4.9.6 3都市の年間気温分布（通年・期間別）

も小さくなる傾向を示す。各都市の平均気温とその標準偏差、級内分散・級間分散を比較したものを表－4.4に示すが、上述のとおり、平均気温が高い地域ほど気温分布が収斂してしてくる傾向があると考えられる。

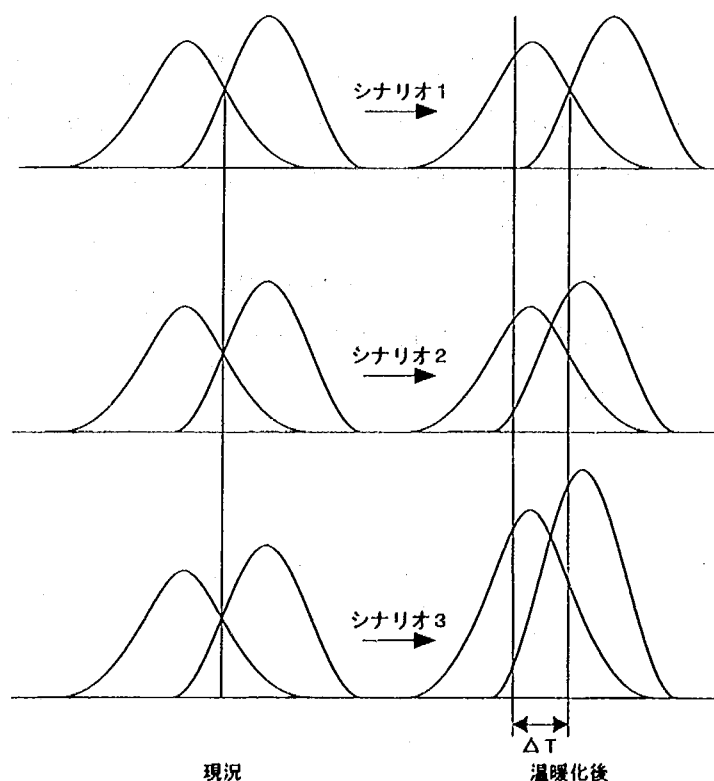
表－4.4 3都市における気温分布の基本統計値

都市	期間	平均気温	標準偏差	級内分散	級間分散	全分散
旭川市	高温期	15.5	5.5			
	低温期	2.5	6.1	33.8	81.6	—
	年間	6.6	10.7	—	—	115.4
名古屋市	高温期	22.3	4.3			
	低温期	8	4.6	20.1	50.5	—
	年間	15.2	8.4	—	—	70.6
那覇市	高温期	26.4	2.3			
	低温期	18.7	3.2	7.8	14.8	—
	年間	22.5	4.8	—	—	22.6

4.3.3. 温暖化シナリオの策定

温暖化後の気温分布型として、次の3つのシナリオを想定した（図－4.10）。

- ①シナリオ1：分布形状は現状のままで、平均気温の温暖化量（ ΔT ）だけ高温部に移動した分布
- ②シナリオ2：現状の気温分布を高温期と低温期に分け、各分布に正規分布を当てはめ、級間分散が小さくなると仮定した分布
- ③シナリオ3：級間分散だけでなく高温期と低温期の2つの分布の級内分散も小さくなると仮定した分布



図－4.10 温暖化シナリオ（シナリオ1～3）

各CASEについて温暖化後の需要量を推計し、温暖化を想定しない場合（実績及び正規分布を仮定することにより求められる需要量）と比較することとする。なお、平均気温上昇量は $1.0\sim 3.0^{\circ}\text{C}$ とする。

4.3.4 シナリオに基づいた水需要量の推計

上述の温暖化シナリオに基づいて、各CASEについて温暖化後の年間需要量と一日最大需要量の増加率を算定する。ここで一日最大需要量とは、図-4.9.1～4.9.3に示した気温の年間発生頻度分布の最高温部の日需要量（高温部側から累積日数が1日となるまでも需要量の積算値）である。なお、正規分布の当てはめの誤差は、年間使用水量が各都市とも1%以下となっている。

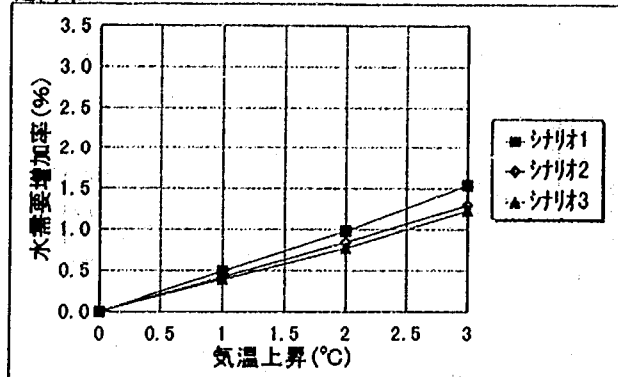
次に、温暖化後の水需要量増加率を図-4.11.1～4.12.3に示す。図-4.13.1～4.13.2は平均気温が 3°C 上昇した場合の水需要量増加率を各シナリオについて整理したものである。図より、以下のことがわかる。

- ・年間需要量の増加率をシナリオ別にみると、現状の気温分布型を固定した場合（シナリオ1）が最も高く、温暖化に伴う気温の収斂性を考慮する（シナリオ2及びシナリオ3）と増加率は低下する。需要量は、最大3.2%（名古屋市）、最低で1.2%（旭川市）の増加を示している。
- ・一日最大需要量の増加率をシナリオ別にみると、年間需要量の場合と同様に現状の気温分布を固定した場合が最も高く、気温の収斂性を考慮すると増加率は低下する。需要量は、最大6.8%（名古屋市）、最低でも2.2%（旭川市）の増加を示している。
- ・年間需要量はどのシナリオでもほぼ一様に増加していくが、一日最大需要量の方は増加傾向に多少の違いが認められる。これは想定した気温分布の最も高温の部分が平均気温の上昇や標準偏差の縮小の影響を受けやすいためと考えられる。

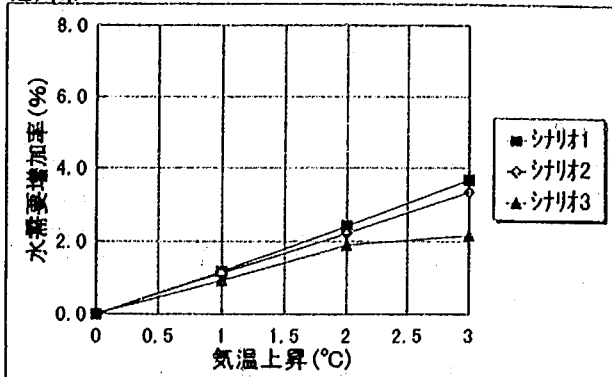
さらに、温暖化による水需要増加量を通年ではなく、季節別に区分して分析した結果を図-4.14.1～4.14.3に示す。なお、温暖化シナリオはシナリオ1を適用し、気温上昇量は $1.0\sim 3.0^{\circ}\text{C}$ とした。また、期間は、春期（3～5月）・夏期（6～8月）・秋期（9～11月）・冬期（12～2月）に分割した。

図より、各都市とも夏期の水需要量増加が顕著であり、年間の水需要量増加に対して最大で1.88倍（旭川市）、最小で1.37倍（那覇市）に達することがわかる。春期・秋期の水需要増加量は秋期の方がやや多くなるものの、年間の水需要量増加とはほぼ同程度であり、また、冬期については、旭川市・名古屋市は温暖化の影響をほとんど受けないこともわかる。

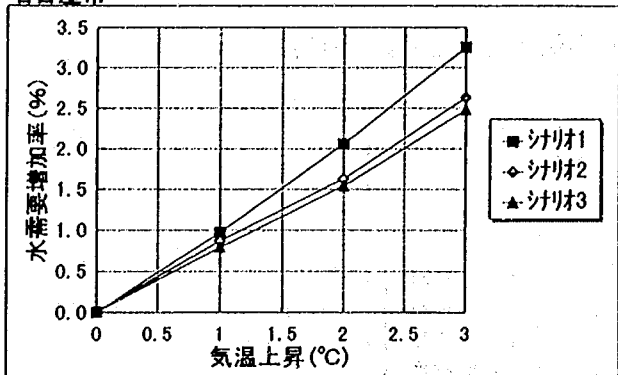
旭川市



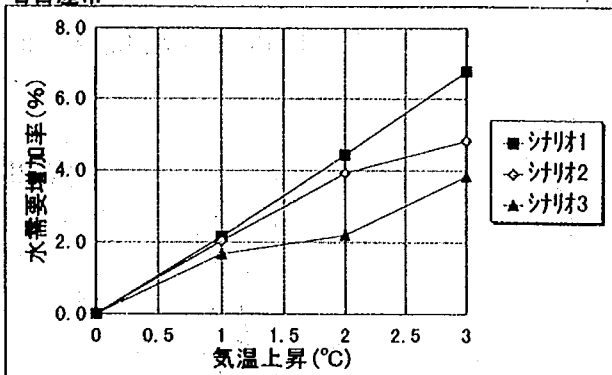
旭川市



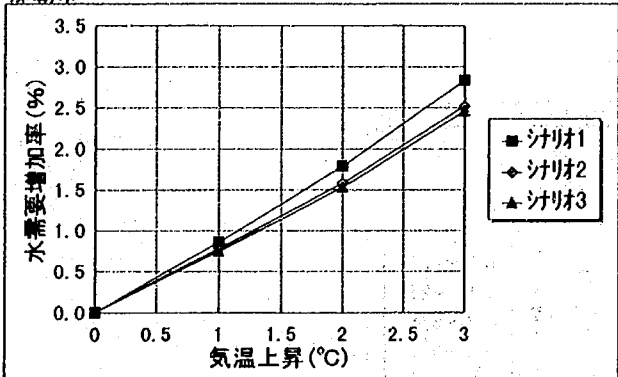
名古屋市



名古屋市



那覇市



那覇市

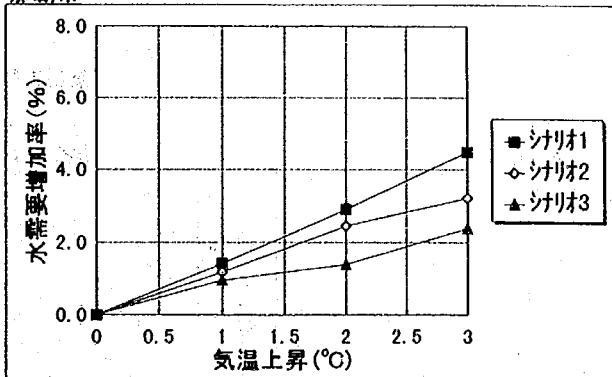
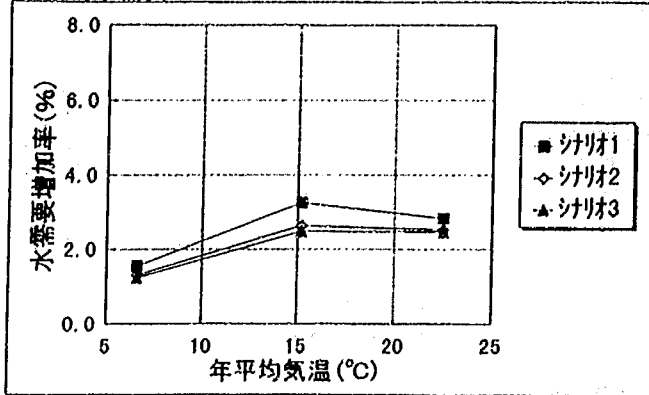


図-4.11.1～4.11.3
温暖化による年間水需要量の変化

図-4.12.1～4.12.3
温暖化による一日最大水需要量の変化

年平均水需要



一日最大水需要

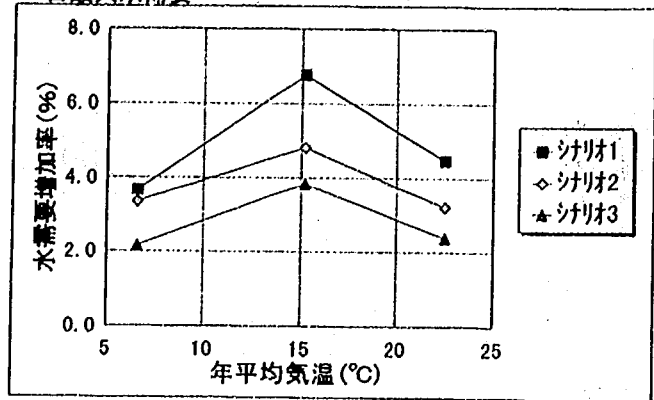


図-4.13. 1～4.13.2 3都市の平均気温と水需要量の増加率

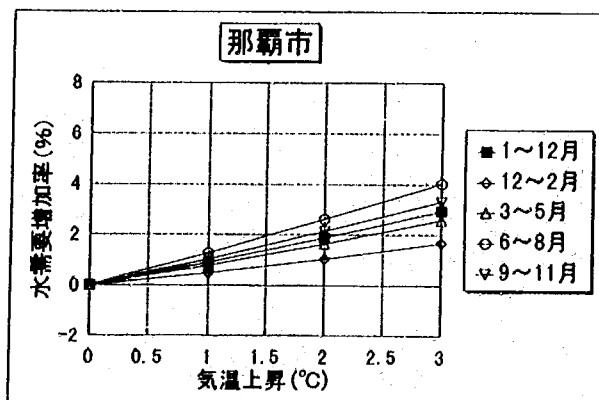
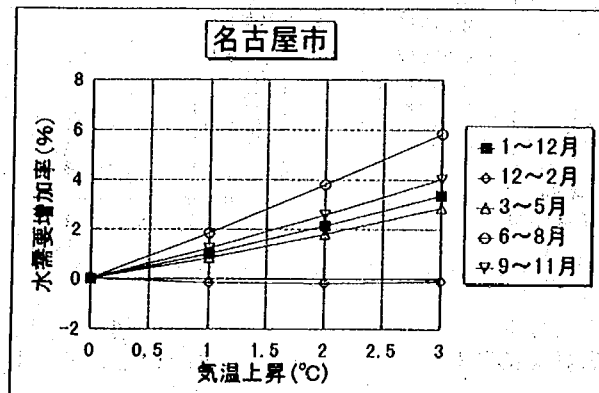
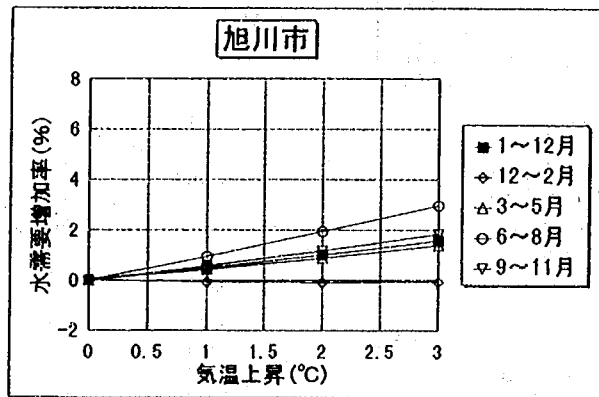


図-4.14. 1～4.14.3 3都市の各季節でみた水需要量の増加率

5. 地球温暖化による水資源供給・ 水資源需要への影響を考慮した 渇水強度の変化について

5. 地球温暖化による水資源供給・水資源需要への影響を 考慮した渇水強度の変化について

3章では水資源供給に対する温暖化の影響を、4章では水資源需要に対する温暖化の影響を個別に分析し、その特性を明らかにした。実際に地球温暖化が進行した場合の影響を把握するには、温暖化による水資源供給・水資源需要の影響を同時に考慮する必要がある。

本章では、3～4章で得られた知見をふまえ、温暖化による水資源供給・水資源需要への影響を同時に考慮した場合の、地球温暖化が水資源に与える影響を渇水強度の観点から比較分析した。なお、検討はモデルダム流域を対象に実施した。

ここでは、まず、モデルダムにおける水供給特性・水需要特性を3～4章の知見をもとに整理する。次に、温暖化シナリオを適用した場合における渇水強度の変化について、水需要への影響の有無による渇水強度の相違を分析し、また、気温上昇期間を限定した場合の渇水強度の相違についても検討する。渇水強度の指標は、不足日数・不足%日・不足%²日を用いた。

5.1 モデルダム及びモデル水系の概要

対象としたモデルダム（流域面積28.0km²）の有効貯水容量は7,975千m³であり、利水容量として5,475千m³が確保され、残流域67.2km²を合わせた下流基準地点において、上水道、灌漑及び不特定用水の補給に利用されている（表－5.1）。

また、ダム地点近傍における気象特性は、年平均気温14.6℃、年平均降水量1144mmである（1981～1990）。図－5.1に日平均気温の年平均分布を示すが、年間でみると台形型分布をとる。また、低温期（11～4月）と高温期（5～10月）の気温分布は正規分布に近い分布形状をとっている。

表－5.1 モデルダム下流基準地点での必要流量

用水種類	期間	流量
上水道用水 (m ³ /s)	通年	0.301m ³ /s
灌漑用水 (m ³ /s)	6/11～6/20	4.310m ³ /s
灌漑用水 (m ³ /s)	6/21～9/20	2.000m ³ /s
維持用水 (m ³ /s)	通年	0.210m ³ /s

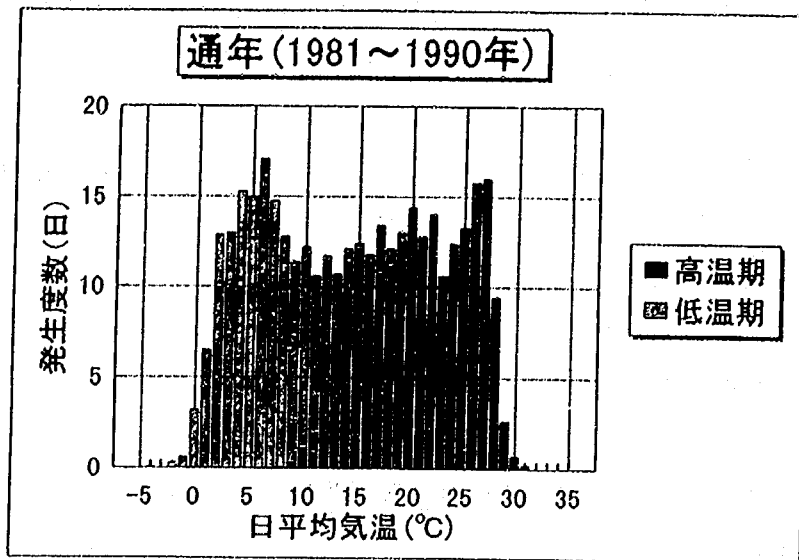


図- 5. 1 モデルダム近傍都市における日平均気温の年平均分布

5. 2 対象とする温暖化シナリオ

本章で対象とする温暖化シナリオは、4章までの検討と同様に、気温上昇量0～3℃・降水量変化-10%～+10%とした。表- 3. 5にシナリオの各CASEを示す。

5. 3 モデルダムにおける水資源供給・水資源需要特性

5. 3. 1 モデルダムにおける水供給特性

気温上昇による水供給量の変化として、ダム流入量・基準地点流量の変化があげられる。ダム流入量・基準地点流量は、流域の蒸発散高・地下浸透高・降水高をもとに算出することができ、以下の通り各要素を算出した。

まず、蒸発散量は、3. 2. 1と同様に式(5. 1)に示すHamon式より算出した。

$$E=0.14 \cdot D_0^2 \cdot P_f \dots\dots\dots (5. 1)$$

ここに D_0 ：可照時間(12時/日を1とする)

P_f ：平均気温に対する飽和絶対湿度(g/m^3)

また、式(3. 1)で行ったものと同様に補正係数 α は、年間降水高と年間流出高の差である損失高が蒸発散高に等しいと仮定して、Hamon式の感度分析を行って算出した($\alpha=0.88$)。

流出量は、日降水量とHamon式で算出される日蒸発散量の差として算出される表面浸透量値をもとに、4層タンクモデルにより流域での流出解析を行い算出した。

なお、気温上昇による蒸発散量の変化量は0～3℃で606.70～783.53mm/年であった。また、図- 5. 2に各CASEの年平均有効降水量比率(%)を示すが、現状を示すCASE 2(気温上昇量0℃・降水量変化0%)では42.28%であるのに対し、気温上昇・降水量減少に伴い比率が低下し、最も条件が厳しいCASE 10(気温上昇量3℃・降水量変化-10%)で最小値(23.87%)を示した。

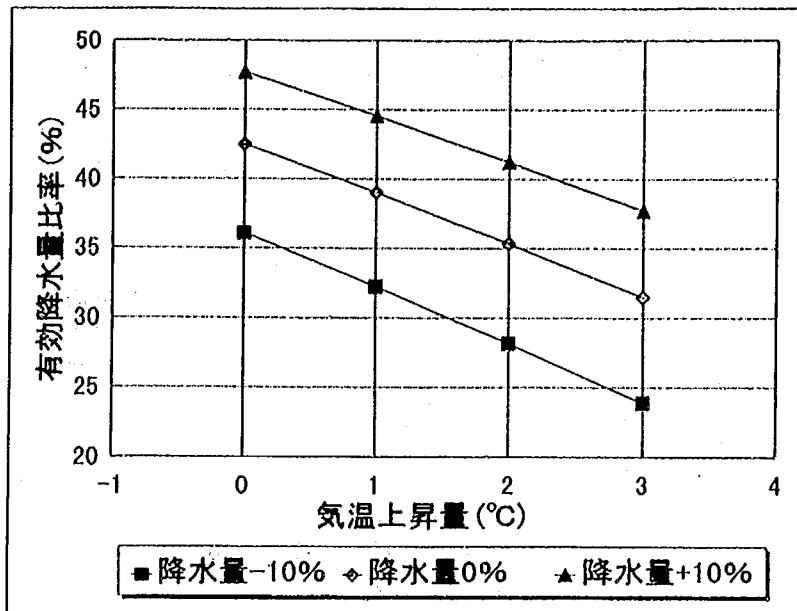


図-5.2 モデルダムにおける各CASEの年平均有効降水量比率

5.3.2 モデルダムにおける水需要特性

a. 上水道用水需要特性

図-5.3にモデルダムにおける上水道用水量原単位と月平均気温の関係を示す。上水道用水量原単位はモデルダムの属する県の月実績給水量を実績給水人口で除したものであり、データは水道統計(1981~1990)³⁰⁾より求めた。また、月平均気温はモデルダムを水源とする下流の受益都市のものであり、アメダスデータ(1981~1990)を用いた。

4章の検討で上水道用水量は日平均気温の自乗に比例することが示されており、今回の対象県でも同様の傾向がみられている。ここでは、モデルダムの受益都市の水需要量とその属する県の月使用量原単位に等しいとして、次式により気温との関係を求めるものとした。

$$y' = 0.1496 (x - 7.2891)^2 + 320.12 \dots \dots \dots (5.2)$$

ここに y' : モデルダム受益都市の上水道用水需要量原単位 (ℓ/人・日)

x : モデルダム下流都市の平均気温 (°C)

式(5.2)の原単位に給水人口を乗じると、モデルダム受益都市の上水道需要量を得ることができるが、この全てがダムから補給されるわけではない。ここでは、ダム計画における年間補給量と受益都市の年平均需要量の比 β を補正係数として、ダムとしての一日当たり需要量 y (ℓ/人・日)を

$$y = \beta \cdot p \cdot y' \dots \dots \dots (5.3)$$

として表すこととした。ここに、 p は受益都市の給水人口である。

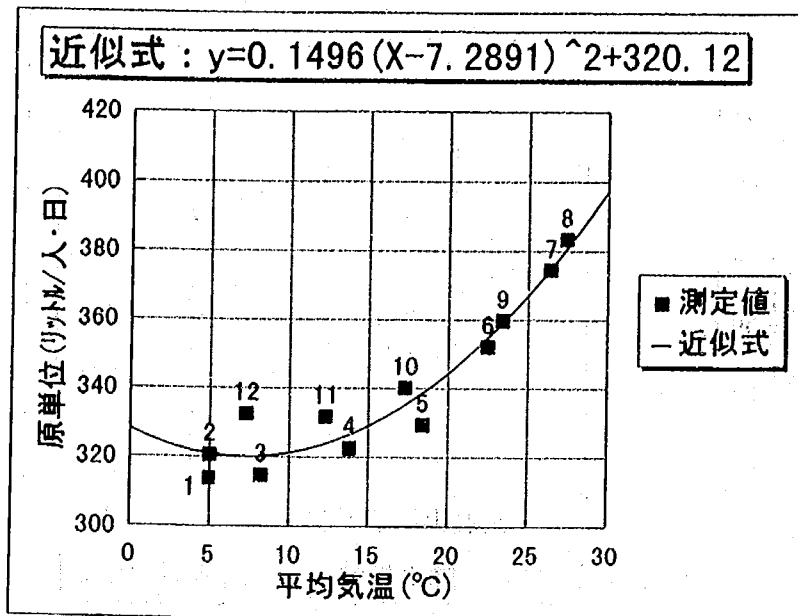


図- 5. 3 上水道用水使用量原単位と月平均気温の関係

b. 灌漑用水需要特性

灌漑用水は水田用水・畑地用水から成り立っているが、我が国での農業は稲作が中心であることから、灌漑用水の水需要特性を水田用水で代表させることとした。水田用水は各水田の減水深をもとに計画されており、減水深は蒸発量（株間蒸発量）・蒸散量（葉面蒸発量）・降下浸透量の和で示すことで、蒸発量と蒸散量の和である蒸発散量は時期的に大差がないとされている³²⁾。

図- 5. 4 に、文献32) から求めた灌漑期の地域別日蒸発散量と平均気温の関係を示す。ここに、日蒸発散量は文献32) 中の各期間の平均値を、平均気温は対象地点が明記されていないため、各地域に所在するア

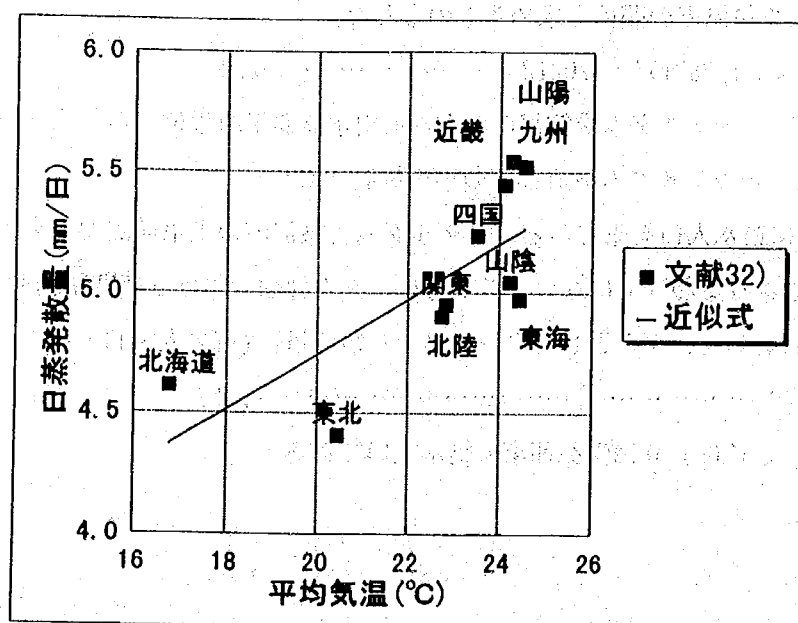


図- 5. 4 灌漑期における地域別日蒸発散量と平均気温の関係

メダス観測点での灌漑期の平均気温を用いた。図－5.4に示す各点の関係を線形近似したところ、式（5.4）の関係を得た。

$$y = 0.1149x + 2.4438 \dots \dots \dots (5.4)$$

ここに y : 日蒸発散量 (mm/日)

x : 灌漑期平均気温 (°C)

ここでは、日平均減水深を20mm/日³²⁾、気温上昇にかかわらず降下浸透量が変化しないと仮定し、式（5.4）から算出した日蒸発散量と降下浸透量の和を気温上昇時の減水深として算出するものとし、気温上昇がない場合とある場合の減水深の比を灌漑の需要量比として計算することとした。

5.3.3 温暖化による渇水強度の変化

a. 通年でみた場合の渇水強度の変化

先述の供給・需要特性を考慮し、温暖化による水供給・水需要への影響を考慮したダム補給流域における渇水強度の検討を行う。渇水強度を示す指標は、不足日数・不足%日・不足%²日とし、1981～1990年のデータをもとに計算を行った。なお、上水道用水・灌漑用水・維持流量およびここでの計算方法は表－5.2に示すとおりであり、維持流量は気温上昇の影響を受けないものとした。また、日平均気温としてモデルダム近傍都市のアメダスデータ（1981～1990）を使用した。

表－5.2 上水道用水・灌漑用水・維持流量の計算方法

用水種類	期間	本分析での計算方法
上水道用水 (m3/s)	通年	日平均気温に依存
灌漑用水 (m3/s)	6/11～9/20	灌漑期平均気温に依存
維持用水 (m3/s)	通年	気温に依存せず

渇水強度計算では、気温上昇による水需要量の変化の影響を把握するため、以下の条件を設定した。

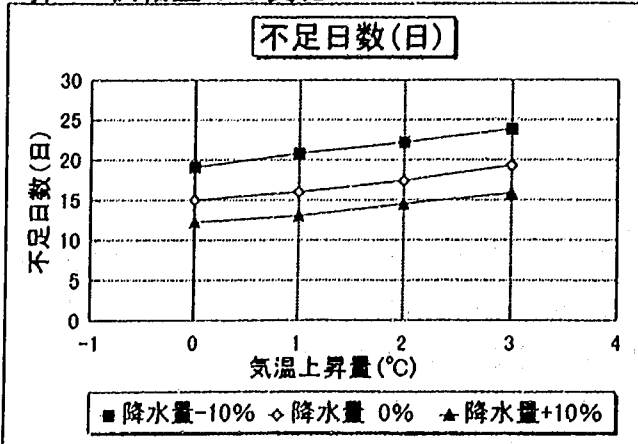
Type A) 気温上昇が水供給にのみ影響を及ぼす場合

Type B) 気温上昇が水供給・水需要に影響を及ぼす場合

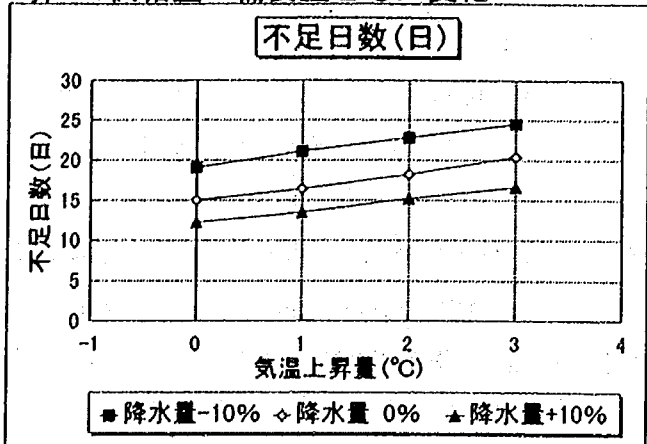
図－5.5.1～5.5.6にType A・Bの渇水強度を示す。図より、各Typeとも降水量の減少・気温の上昇に伴って渇水強度が大きくなることが確認される。また、図－5.6.1～5.6.6に対現状比（CASE 2比）に換算した値を示すが、図より、Type Aでは降水量変化のないCASE 11で渇水強度は約1.3倍、最も厳しいCASE 10で約1.6倍に達することがわかる。需要の影響を考慮したType Bでは、CASE 11で約1.4倍、CASE 10で約1.7倍に達している。また、Type A・BともCASE 12で現状（CASE 2）より厳しい渇水強度となっているが、これは降水量が10%増加しても気温が3°C上昇すれば流域蒸発散による損失が大きく、有効降水量が減少し、渇水が厳しくなることを意味している。また、対現状比をみると、不足日数・不足%日・不足%²日の順に大きくなっており、不足日数とともに不足量が大きくなっている。

次に、降水量変化が渇水強度に及ぼす影響を、Type A・Bの気温上昇0～3°Cのそれぞれに対して、次

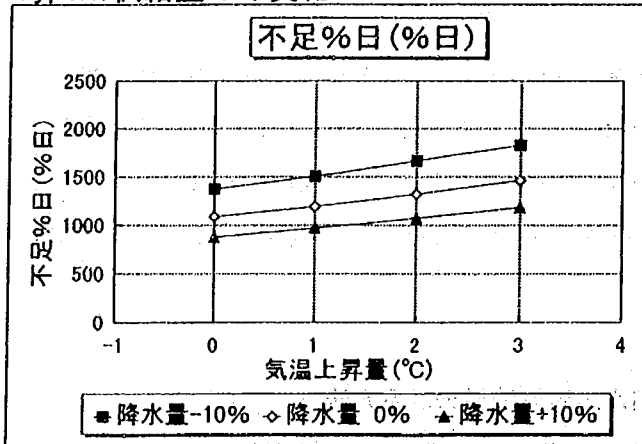
TypeA: 供給量のみ変化



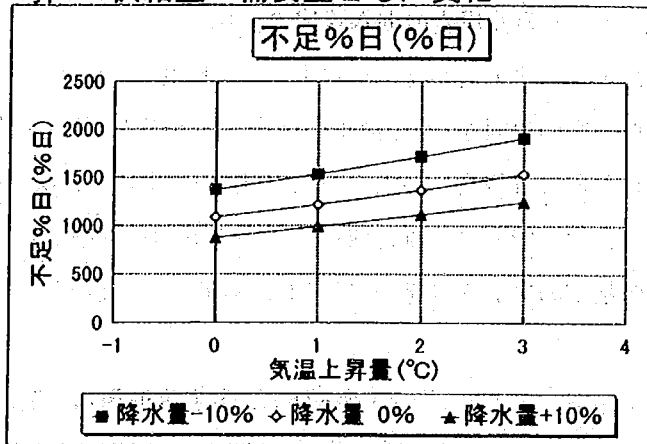
TypeB: 供給量・需要量ともに変化



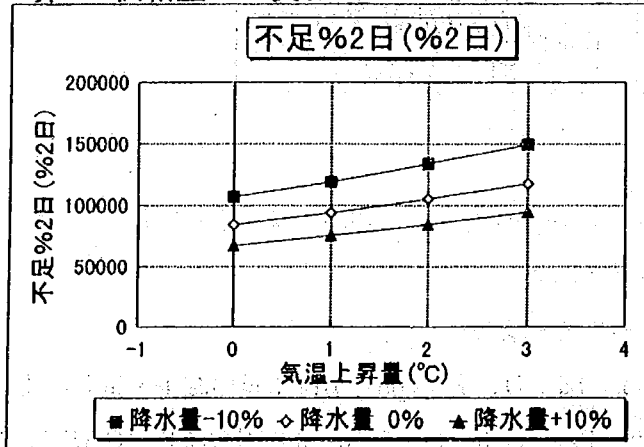
TypeA: 供給量のみ変化



TypeB: 供給量・需要量ともに変化



TypeA: 供給量のみ変化



TypeB: 供給量・需要量ともに変化

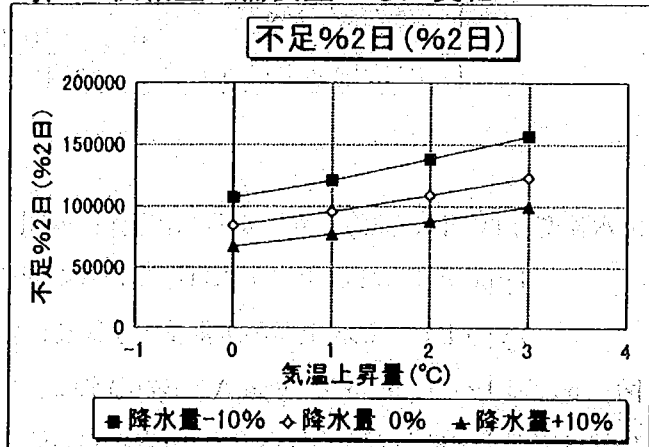
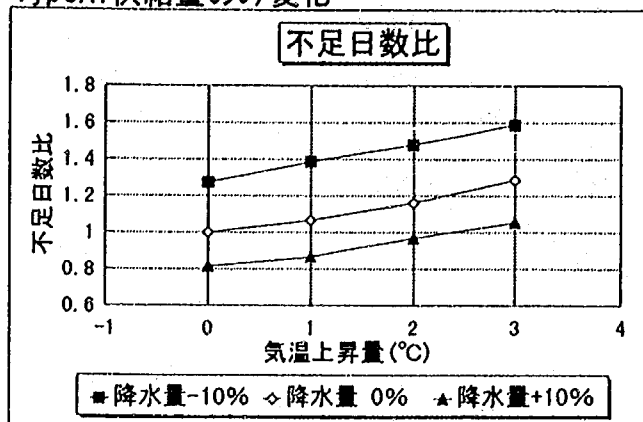
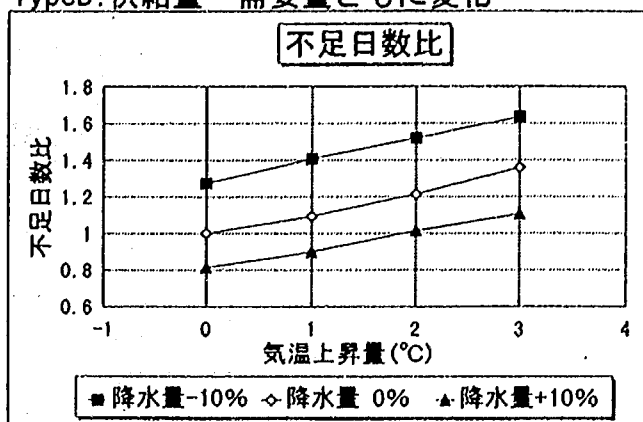


図 5.5.1 ~ 5.5.6 Type A・Bの渇水強度(気温上昇期間: 通年)

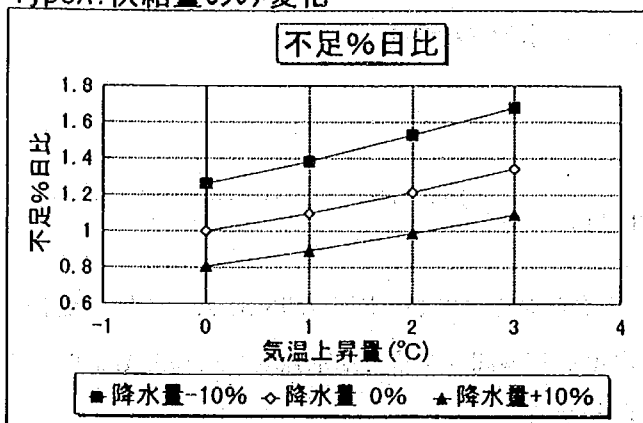
TypeA: 供給量のみ変化



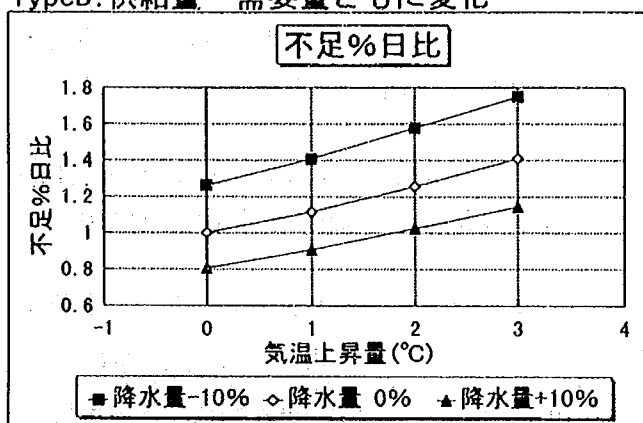
TypeB: 供給量・需要量ともに変化



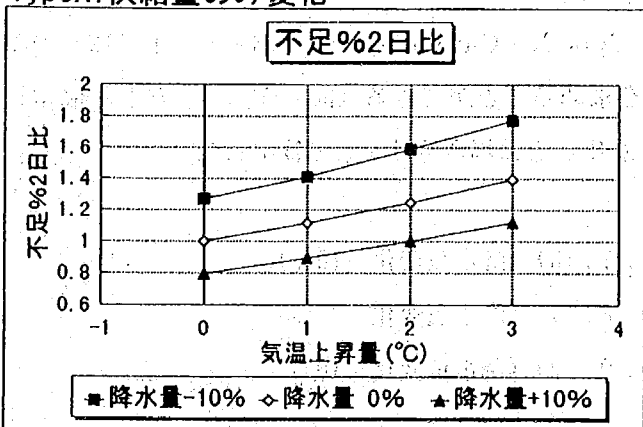
TypeA: 供給量のみ変化



TypeB: 供給量・需要量ともに変化



TypeA: 供給量のみ変化



TypeB: 供給量・需要量ともに変化

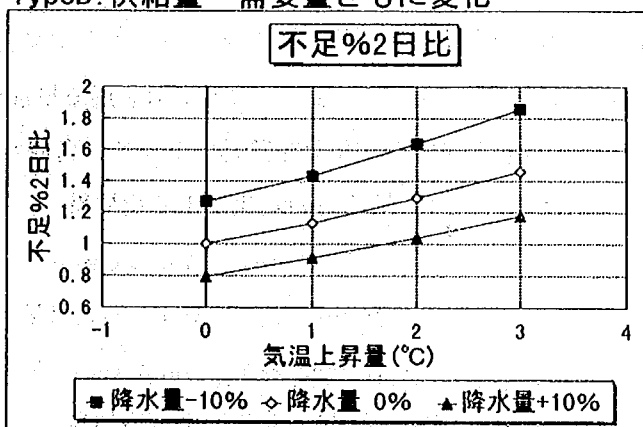


図-5.6.1~5.6.6 Type A・Bの湯水強度の対現状比 (気温上昇期間: 通年)

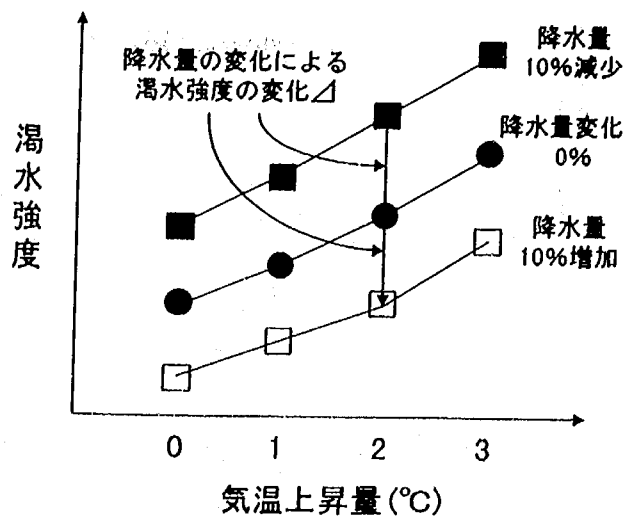


図-5.7 降水量変化に伴う渇水強度の変化

の指標で評価する (図-5.7)。

$$\frac{\text{降水量の変化による渇水強度の変化}\Delta}{\text{降水量変化がない場合の渇水強度 (CASE 2, 5, 8, 11)}} \times 100(\%) \dots\dots\dots (5.5)$$

図-5.8.1~5.8.6に降水量変化が渇水強度に及ぼす影響を示すが、図よりType A・Bとも渇水強度変化の傾向はほぼ同じであり、気温上昇量によらず降水量が10%減少すると渇水強度が約25%増加し、降水量が10%増加すると渇水強度が約19%緩和されることがわかる。

さらに、温暖化による渇水強度の増加を、Type A・Bの結果をもとに、供給量のみの変化による増加と需要量のみの変化による増加に分離することができる。Type X・Case Y (X=A~B・Y=1~12) の渇水強度を $S_{\text{Type X, Case Y}}$ とすると、以下に示す形で増加量を求めることができる (図-5.9)。なお、降水量変化による渇水強度の変化分を除外するため、各降水量変化ごとに場合分けをして算出した。

1) 供給量の変化による増加量

$$S_{\text{Type A, Case Y}} - S_{\text{Type A, Case 1}} \quad (Y=4, 7, 10) \quad (\text{降水量変化}-10\%)$$

$$S_{\text{Type A, Case Y}} - S_{\text{Type A, Case 2}} \quad (Y=5, 8, 11) \quad (\text{降水量変化 } 0\%)$$

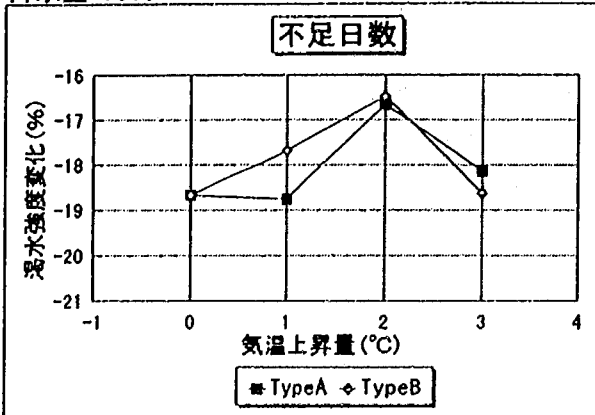
$$S_{\text{Type A, Case Y}} - S_{\text{Type A, Case 3}} \quad (Y=6, 9, 12) \quad (\text{降水量変化}+10\%)$$

2) 需要量の変化による増加量

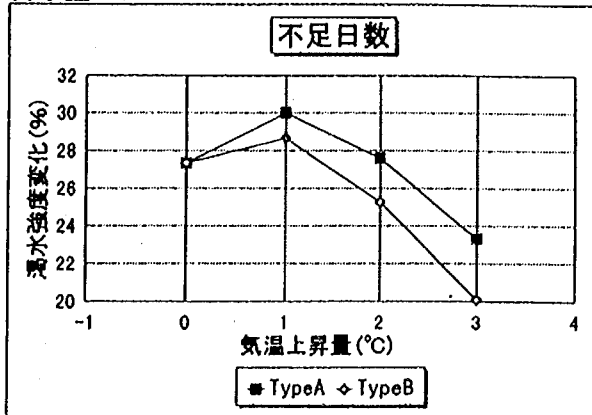
$$S_{\text{Type B, Case Y}} - S_{\text{Type A, Case Y}} \quad (Y=1 \sim 12)$$

図-5.10.1~5.10.6に、1)~2)で算出した増加量を示す。図より、両者とも気温上昇とともに増加するが、供給量の変化がより大きく渇水強度の増加に影響することがわかる。図-5.11.1~5.11.3に、同一のCASEに対して供給量の変化による増加と需要量の変化による増加の比を求めたものを示すが、図より、気温上昇量によらずその比率はほぼ一定であり、降水量が変化しない場合で不足%日はおよそ5:1となった。また、降水量の増減によって需要量の変化による影響も不足%日で6:1から4:1程度まで変化することが明らかとなった。

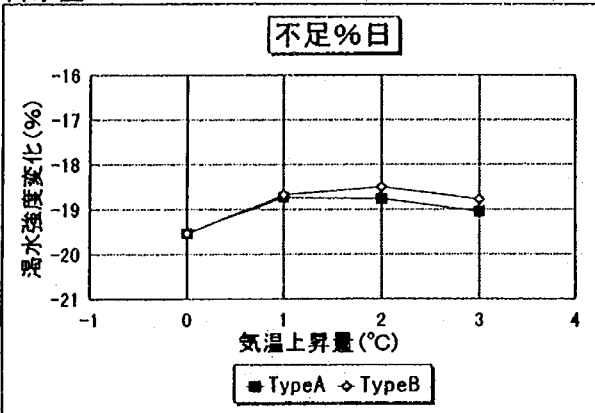
降水量+10%



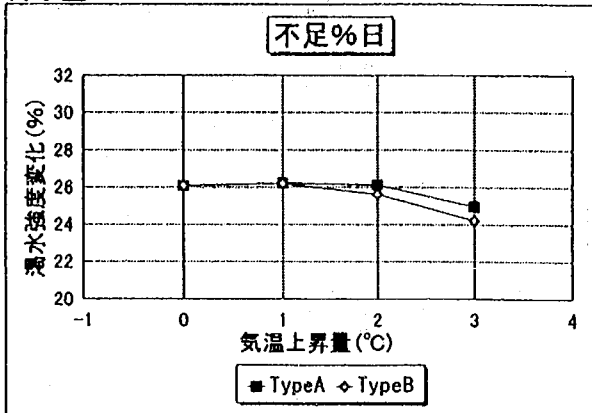
降水量-10%



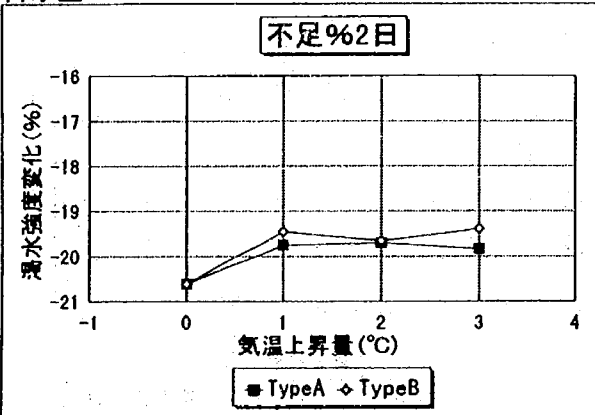
降水量+10%



降水量-10%



降水量+10%



降水量-10%

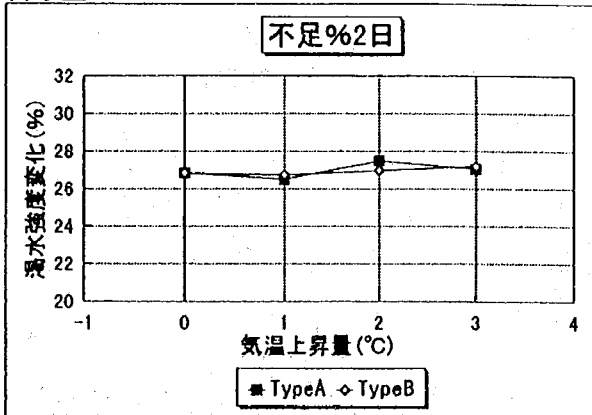


図-5.8.1～5.8.6 降水量変化に伴う渇水強度の変化比率

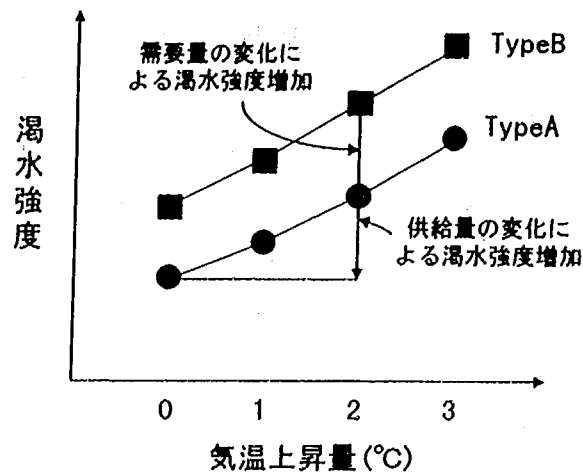
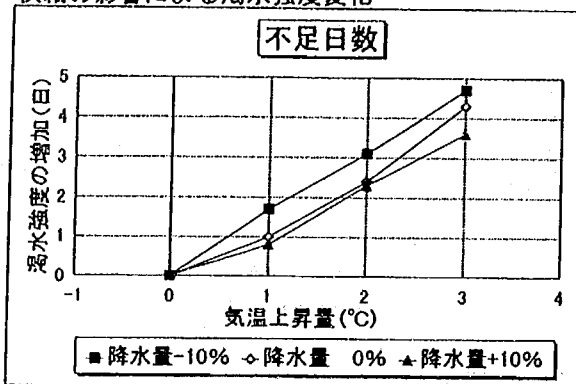
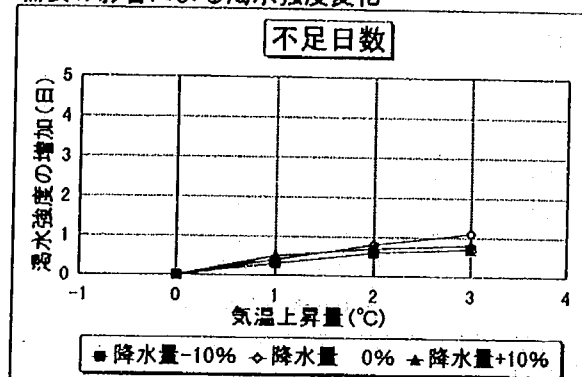


図- 5. 9 供給・需要への影響による渇水強度変化

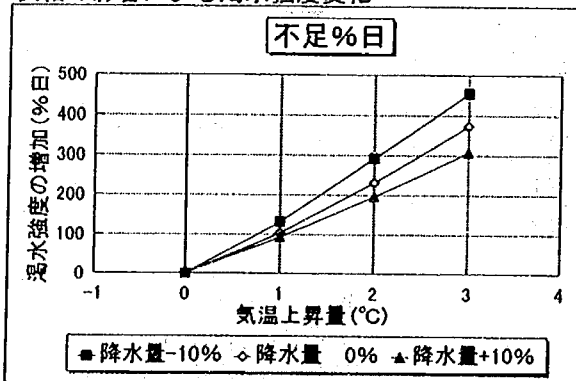
供給の影響による渇水強度変化



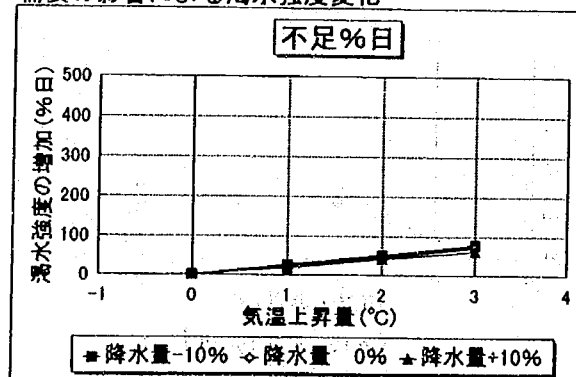
需要の影響による渇水強度変化



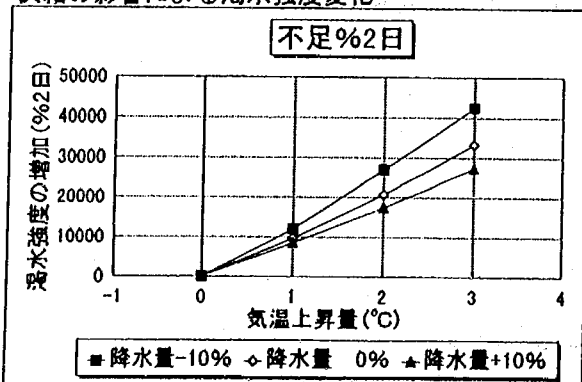
供給の影響による渇水強度変化



需要の影響による渇水強度変化



供給の影響による渇水強度変化



需要の影響による渇水強度変化

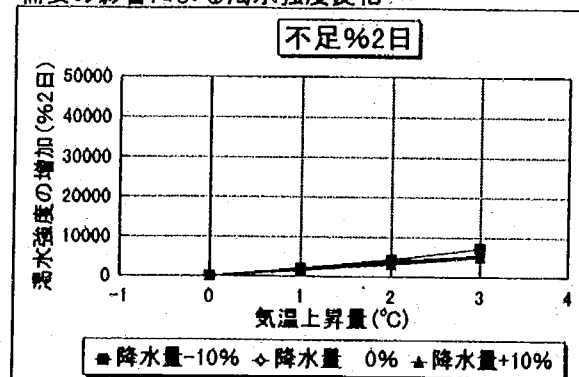


図- 5.10. 1 ~ 5.10. 6 Type A・Bにおける各CASEの渇水強度

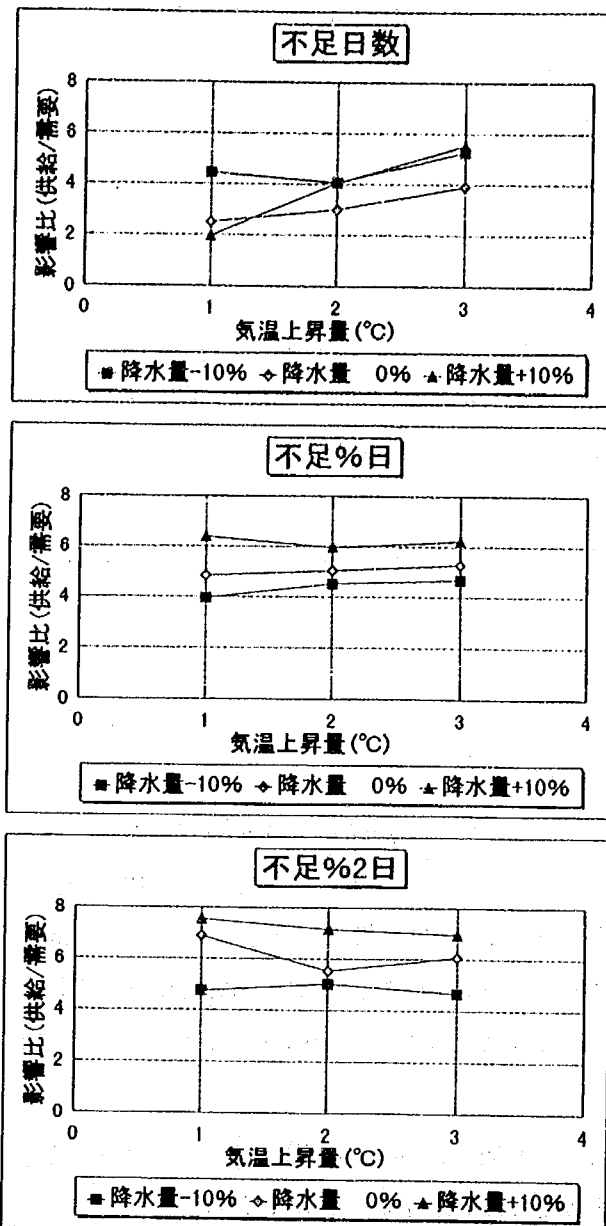


図-5.11.1 ~ 5.11.3 供給への影響と需要への影響の比率

b. 気温上昇期間を限定した場合の渇水強度の変化

ここでは、気温上昇期間を高温期（5～10月）と低温期（11～4月）にそれぞれ限定した場合の渇水強度を求め、通年（1～12月）で気温上昇した場合と比較検討を行う。対象期間は1981～1990年とし、各渇水強度指標は10年平均値とする。

ここでは、気温上昇の影響は水供給・水需要の双方に及ぶType Bで検討を進める。

Type B) 気温上昇が水供給・水需要に影響を及ぼす場合

さらに、気温上昇する期間を以下のように限定する。

Season A) 気温上昇期間が通年（1～12月）の場合

Season B) 気温上昇期間が高温期（5～10月）の場合

Season C) 気温上昇期間が低温期（11～4月）の場合

前掲の図-5.1にモデルダム近傍都市の日平均気温分布を示しているが、高温期・低温期ともに正規分布に近い分布形状をとることがわかる。また、Season B)~C)は高温期と低温期の級間分散がSeason A)に対して大きくなった場合及び小さくなった場合と考えることができる。

図-5.12.1~5.12.9にSeason A)~C)における各CASEの渇水強度を示す。図より、Season A)~B)は気温上昇・降水量減少とともに渇水強度が大きくなっているが、Season C)は降水量減少により渇水強度は大きくなるものの、気温上昇による渇水強度の変化はほとんどみられない。

SeasonX・CaseY (X=A~B・Y=1~12)の渇水強度を $S_{SeasonX, CaseY}$ とすると、 $S_{SeasonX, CaseY} / S_{SeasonX, CaseZ}$ でSeason A)~C)の各CASEに対する渇水強度の対現状比 (CASE2比) が算出できる。図-5.13.1~5.13.9に各CASEの渇水強度の対現状比をSeason A)~C)ごとに示すが、ここでも同様の傾向を確認することができる。

次に、降水量変化が渇水強度に及ぼす影響を、Season A)~C)の気温上昇0~3℃のそれぞれに対して、次の指標で評価する (図-5.7)。

$$\frac{\text{降水量の変化による渇水強度の変化}\Delta}{\text{降水量変化がない場合の渇水強度 (CASE 2, 5, 8, 11)}} \times 100(\%) \quad \dots\dots\dots (5.6)$$

図-5.14.1~5.14.6に降水量変化が渇水強度に及ぼす影響を示す。図より、気温上昇量によらず、降水量が10%減少すると渇水強度が約26%大きくなること、降水量が10%増加すると渇水強度が約19%小さくなることから、Season A)~C)間にはほとんど有意な差はみられないことから、気温上昇期間の如何にかかわらず、降水量変化が渇水強度に及ぼす影響はほとんど同じであることがわかる。なお、渇水強度の指標として用いた不足日数には多少の変動がみられるが、これはモデルダムにおける不足日数の絶対量が小さいためである。

さらに、温暖化による渇水強度の増加を、Season A)~C)の結果をもとに、高温期の気温上昇による増加分と低温期の気温上昇による増加分に分離することができる。

SeasonX・CaseY (X=A~B・Y=1~12)の渇水強度を $S_{SeasonX, CaseY}$ とすると、以下に示す形で示すことができる (図-5.15)。なお、降水量変化による渇水強度の変化分を除外するため、各降水量変化ごとに場合分けをして算出した。

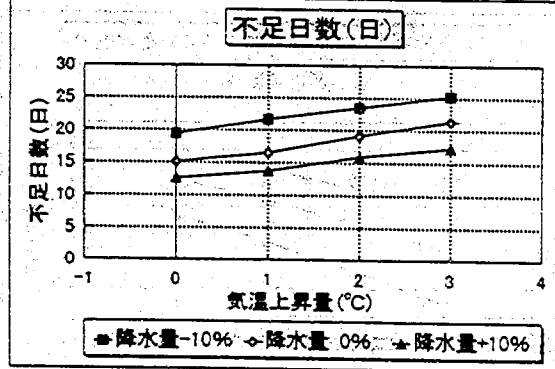
各気温上昇期間の渇水強度増加量

$$S_{SeasonX, CaseY} - S_{SeasonX, CaseZ} \quad (Y=4, 7, 10) \quad (Z=1) \quad (\text{降水量変化}-10\%)$$

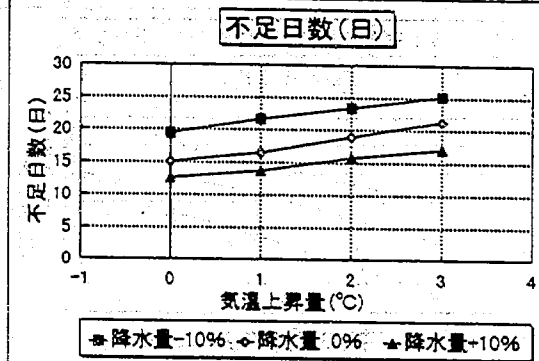
$$S_{SeasonX, CaseY} - S_{SeasonX, CaseZ} \quad (Y=5, 8, 11) \quad (Z=2) \quad (\text{降水量変化}0\%)$$

$$S_{SeasonX, CaseY} - S_{SeasonX, CaseZ} \quad (Y=6, 9, 12) \quad (Z=3) \quad (\text{降水量変化}+10\%)$$

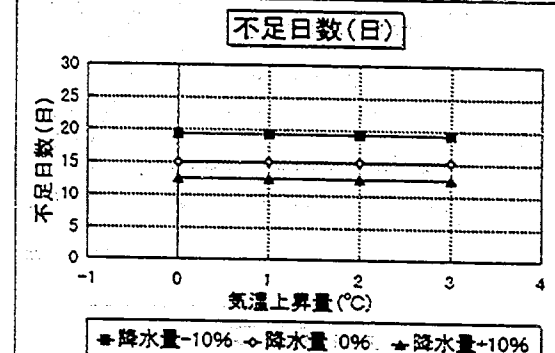
通年・供給量及び需要量ともに変化する場合



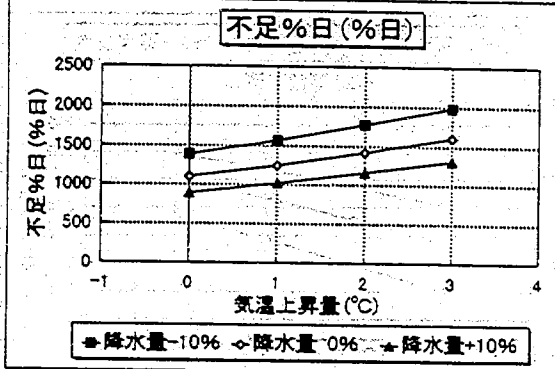
高温期・供給量及び需要量ともに変化する場合



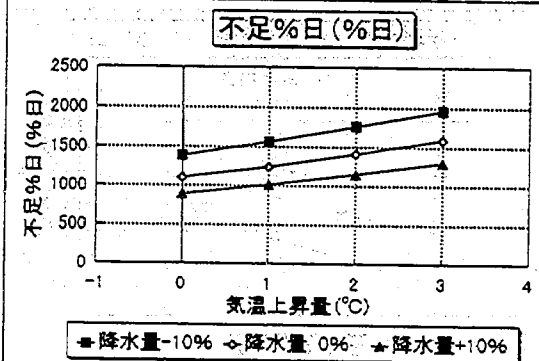
低温期・供給量及び需要量ともに変化する場合



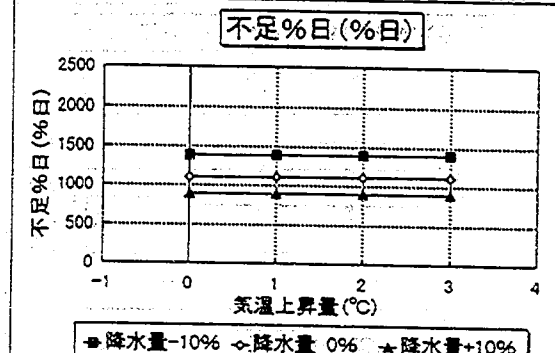
通年・供給量及び需要量ともに変化する場合



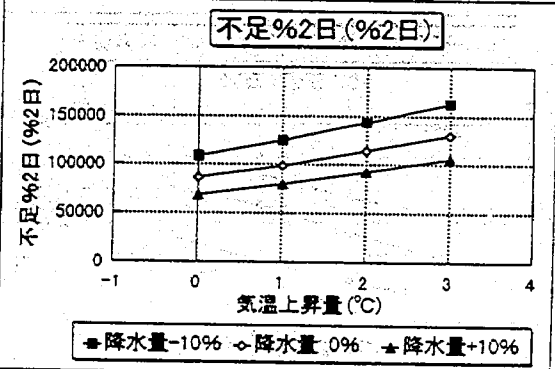
高温期・供給量及び需要量ともに変化する場合



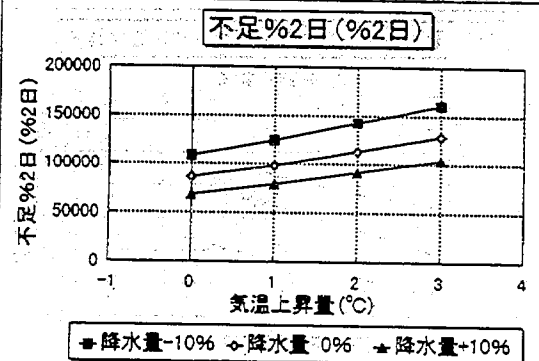
低温期・供給量及び需要量ともに変化する場合



通年・供給量及び需要量ともに変化する場合



高温期・供給量及び需要量ともに変化する場合



低温期・供給量及び需要量ともに変化する場合

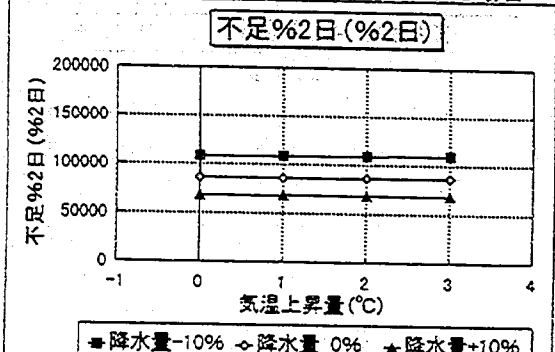
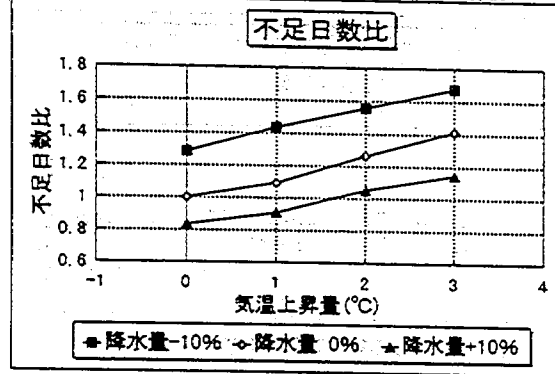
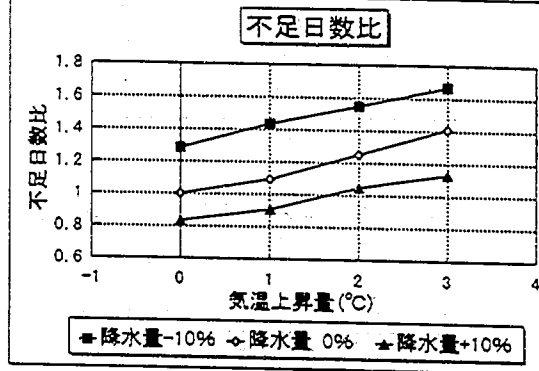


図 5.12. 1 ~ 5.12. 9 Season A) ~ C) における各CASEの渇水強度

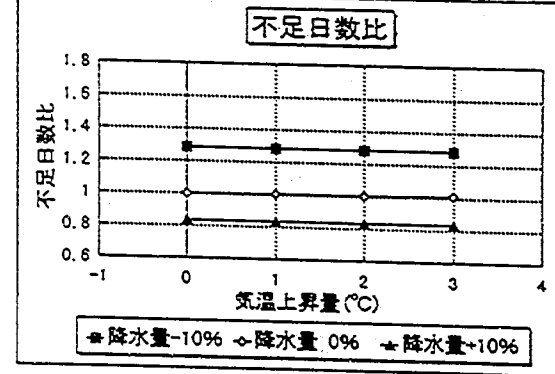
通年・供給量及び需要量ともに変化する場合



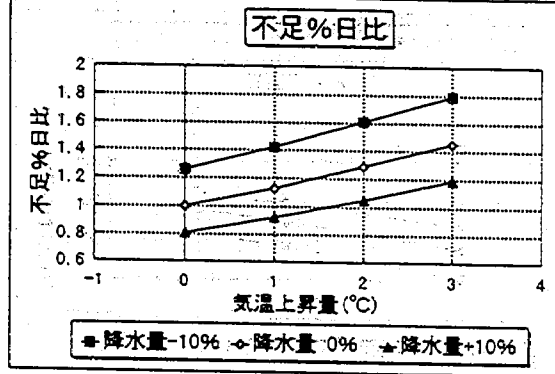
高温期・供給量及び需要量ともに変化する場合



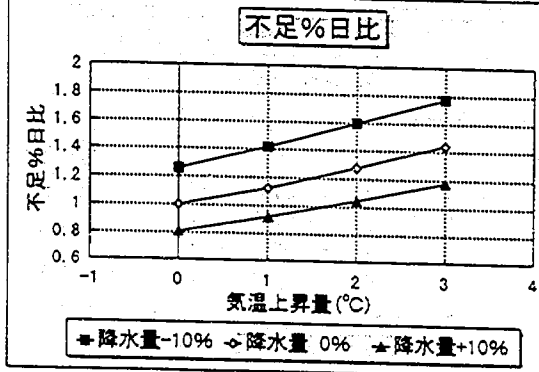
低温期・供給量及び需要量ともに変化する場合



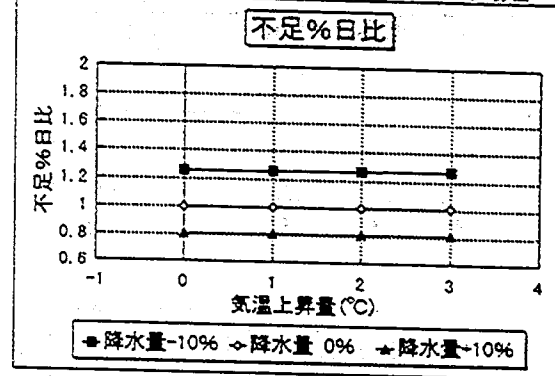
通年・供給量及び需要量ともに変化する場合



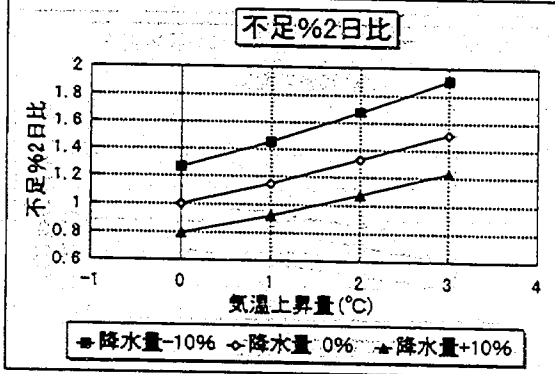
高温期・供給量及び需要量ともに変化する場合



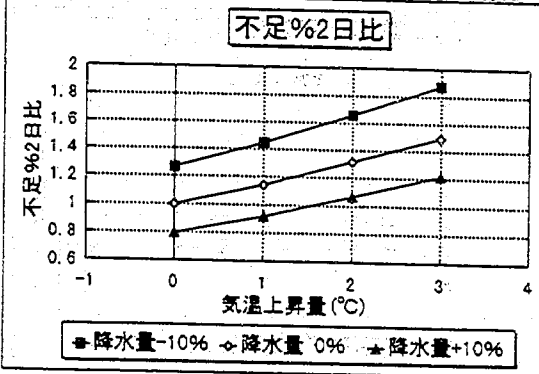
低温期・供給量及び需要量ともに変化する場合



通年・供給量及び需要量ともに変化する場合



高温期・供給量及び需要量ともに変化する場合



低温期・供給量及び需要量ともに変化する場合

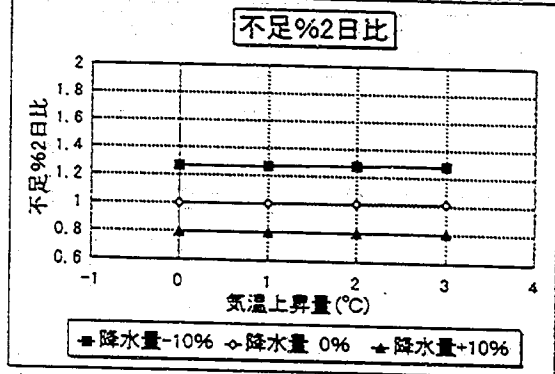
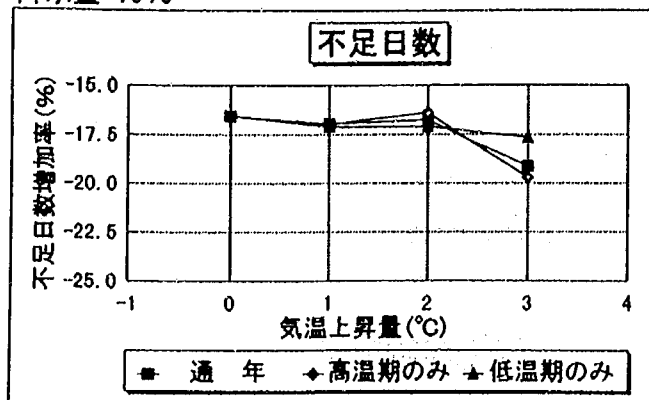
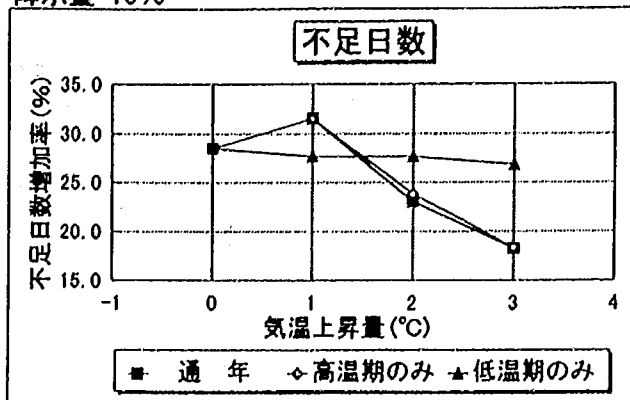


図-5.13. 1～5.13. 9 Season A)～C)における各CASEの渇水強度の対現状比

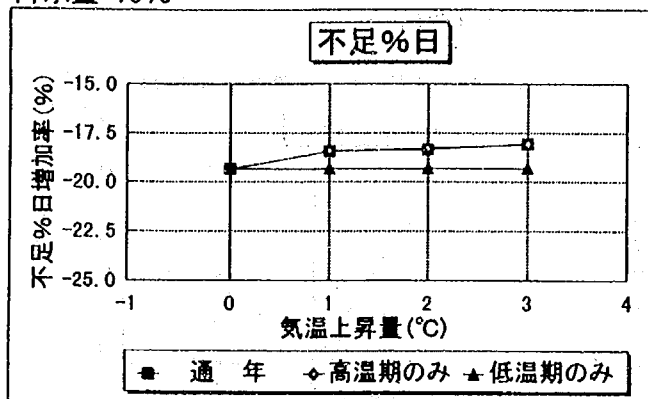
降水量+10%



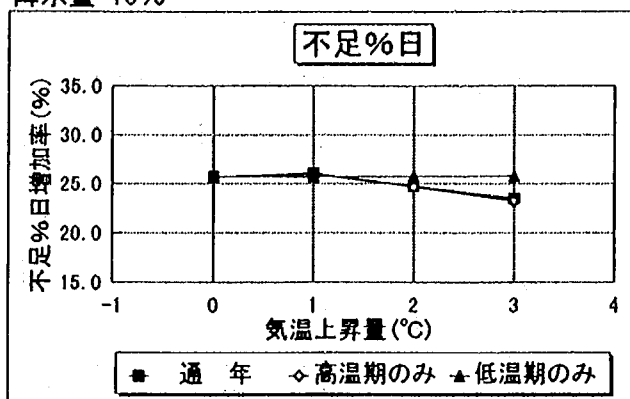
降水量-10%



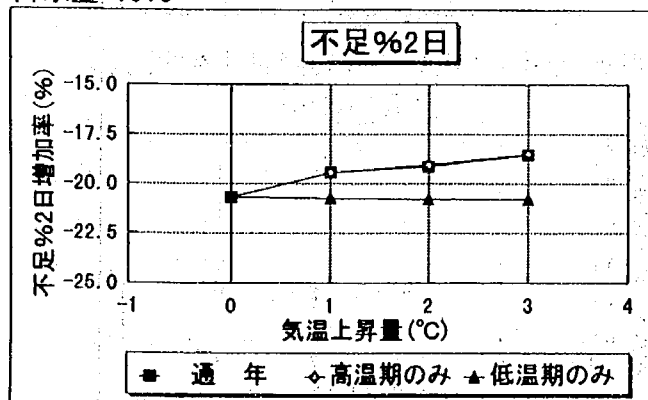
降水量+10%



降水量-10%



降水量+10%



降水量-10%

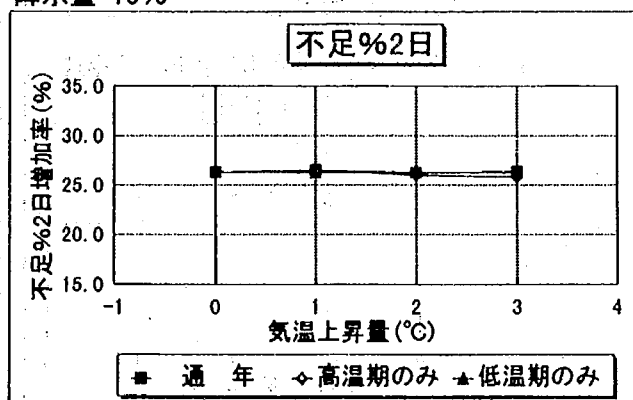


図 5.14.1 ~ 5.14.6 Season A) ~ C) における降水量変化に伴う渇水強度の変化比率

ここで算出した渇水強度増加量をSeason A) 比に換算し、各気温上昇期間における渇水強度の増加比率をそれぞれ算出した。その結果を図-5.16.1~5.16.6に示す。図より、渇水強度増加比率はSeason B) で通年の95%以上となっているのに対し、Season C) では通年の3%程度であることがわかる。これは、渇水強度に大きな影響を与える期間が高温期(5~10月)であることを意味する。低温期は上水道用水・維持流量のみであるのに対し、高温期は灌漑用水も含まれており、各期間の必要流量が異なるので単純な比較はできないが、対象期間(1981~1990)で生起する渇水が高温期を中心に発生していることから、このことが理解できる。また、モデルダムで発生した渇水には継続期間が1年を超えるものがなかったことも、低温期の気温上昇による影響をより小さく表現していると考えられる。

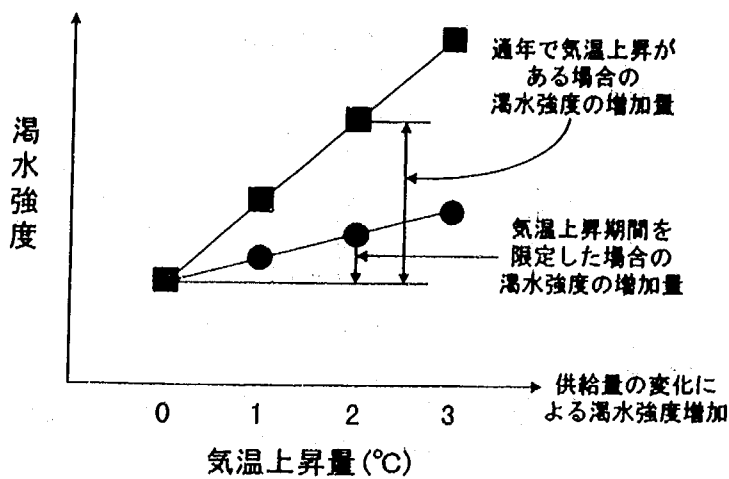
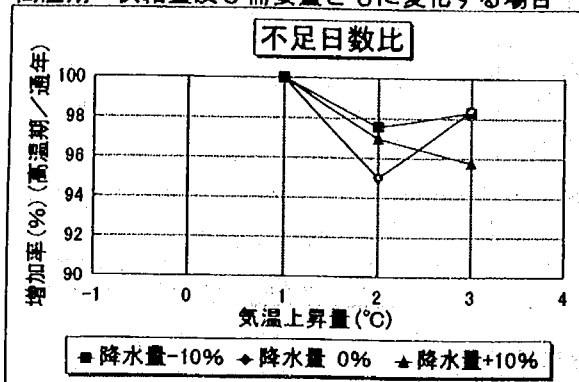
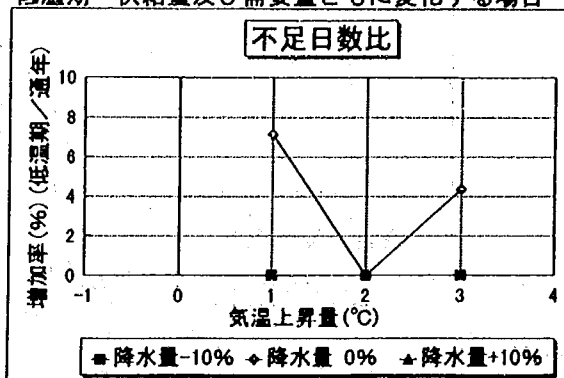


図- 5.15 気温上昇期間による渇水強度変化

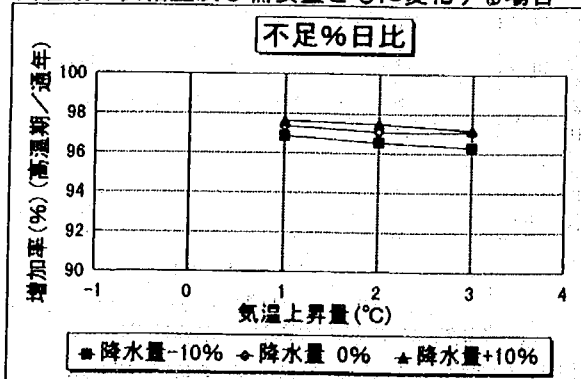
高温期・供給量及び需要量ともに変化する場合



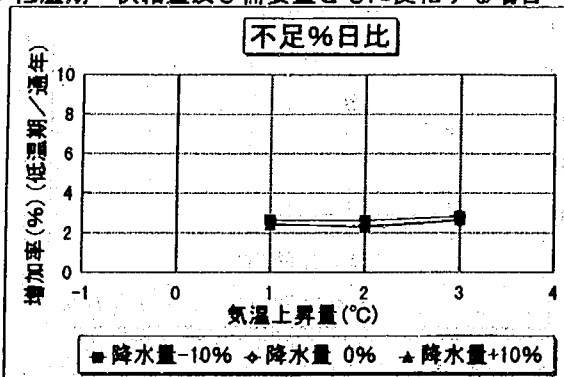
低温期・供給量及び需要量ともに変化する場合



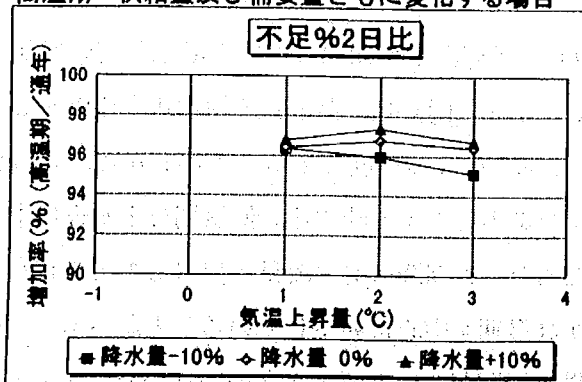
高温期・供給量及び需要量ともに変化する場合



低温期・供給量及び需要量ともに変化する場合



高温期・供給量及び需要量ともに変化する場合



低温期・供給量及び需要量ともに変化する場合

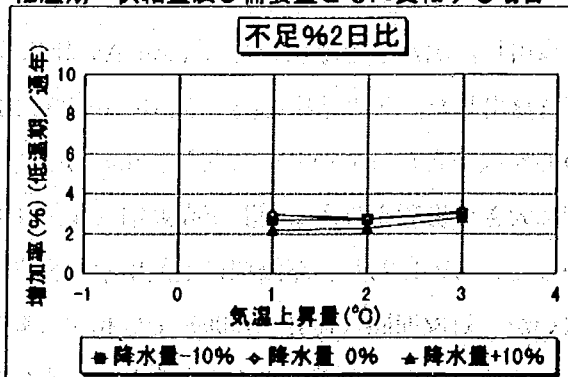


図- 5.16.1 ~ 5.16.6 気温上昇期間による渇水強度の変化比率

6. まとめ

6. まとめ

6.1 地球温暖化が水資源供給に及ぼす影響

地球温暖化が水資源供給に及ぼす影響を、1) 過去の実績を整理し、特徴的な期間を抽出してその差異を求める方法と、2) いくつかのシナリオを設定して、その差異を求める方法について、気温上昇・降水量変化の観点から検討した。

最初に全国の代表気象観測点を対象に現状分析を行い、以下の知見を得た。

- ・過去100年（～1989年）において、温暖期は1978～1987年、寒冷期は1904～1913年であり、各10年間の平均気温は14.54℃、13.58℃と約1℃の差がある。
- ・年間降水量、夏期降水量（5～9月）ともに温暖期が寒冷期よりも少なく、年平均降水量で約7.4%の差が発生する。また、連続無降雨日数の超過確率も温暖期の方が大きく、同一超過確率での無降雨期間は約1.2倍となった。

この温暖期と寒冷期を対象に、気温及び降水量の実績値を用いて、気温差がダム運用に対してどのような影響を及ぼすかを、モデルダムを対象として検討を行った結果、以下の知見を得た。

- ・ダム流入量は温暖期が寒冷期を下回り、特に平水、低水、渇水流量で寒冷期よりも約20～30%減少する。また、温暖期の通算空水日数は寒冷期の1.47倍、通算不足%日も1.35倍となり、気温上昇により渇水強度が大きくなる可能性がある。

次に、温暖化シナリオに基づく検討を、ダム流域のスケール及び全河川流域のスケールを対象に行った。

地域特性の異なる3ダムを対象として、流域特性の相違が温暖化の影響とどのように関係するかを調べた結果、以下の知見を得た。

- ・現状で蒸発散量の大きいダムほど気温上昇による不足日数、不足%日の増加率が大きく、最も渇水強度が強くなったBダム（四国瀬戸内）で約20日/℃/年、約1350%日/℃/年となり、渇水強度が強くなる傾向がある。また、温暖化により気温上昇、降水量減少が生じれば、渇水が連続して生起する可能性が大きくなる。
- ・温暖化により気温上昇、降水量減少が生じれば、同一安全度を確保するための貯水池容量は大きくなる。利水安全度1/10で計算したところ、気温上昇量2℃・降水量変化0%で1.7～3.3倍、また、最も厳しい気温上昇量3℃・降水量変化-10%で現容量の4.1～10.3倍となった。

さらに、水資源利用率が各河川で異なることに着目し、水系の異なる7河川を対象としてダム開発状況と温暖化の影響について検討を行った結果、以下の知見を得た。

- ・温暖化による気温上昇は、現状で蒸発散量の大きい流域でより強い影響を及ぼし、気温が3℃上昇した場合には必要容量が渇水年で1.05～2.14倍に、平水年で1.02～1.72倍となった。しかし、同一安全度を確保するために必要な対現状比でみた新規開発容量は、現状の水資源開発レベルも関係するため、蒸発散量の少ない地域でも温暖化の影響が大きくなる可能性がある。

6.2 地球温暖化が水資源需要に及ぼす影響

地球温暖化が水資源需要に及ぼす影響を、上水道用水を対象に需要特性と気温上昇の関係について整理するとともに、温暖化シナリオを設定して検討した。

最初に全国の都道府県を対象に現状分析を行い、以下の知見を得た。

- ・水需要量は平均気温の2次関数で示すことができ、曲線の傾き a 、曲線の最小値 b 、最小値を与える気温 T_m が地域特性を表す。係数 a は水需要変化量の気温勾配を示すものであり、地域属性により異なる値をとる。係数 b は水需要の最小値（基準水需要量）を示し、都市化の進んだ地域で大きくなる。 T_m は緯度が低い地域ほど高くなるが、平均気温と比較すると T_m が約10℃低い値を示す。
- ・同一気温においても気温上昇期（4～8月）と気温下降期（8～11月）では水需要量に差がみられ、気温下降期の方が5%程度大きくなる。
- ・平均気温と水需要量の関係は、A) 北海道・東北・北陸地方、B) 東北・北陸を除く本州・四国・九州地方、C) 沖縄の3地域に大別され、A) 地域では冬期（1～2月）において水需要量が増加する。
- ・用途別での水需要量特性は用途の相違によって特に顕著な差はなく、全体としての水使用行動の特徴は家庭レベルでの水使用行動で概ね代表できる。

これらの知見をもとに、3都市を対象に、温暖化シナリオに基づいた水需要量の推計を行った結果、以下の知見を得た。

- ・気温上昇が通年であると考えた場合、年間需要量で最大3.2%、一日最大需要量で最大6.8%の増加がある。また、平均気温が最も高い夏期（6～8月）での増加率が最大5.8%と最も大きくなる。一日最大需要量は夏期に発生し、最も水需要量の大きい夏期に気温上昇の影響を強く受ける。

また、日平均気温の年間分布が高温期（5～10月）と低温期（11～4月）の各時期でほぼ正規分布をとることに着目し、気温分布として現状の分布型としたシナリオ1、高温期と低温期の級間分散が小さくなるとしたシナリオ2、さらに、級内分散も小さくなるとしたシナリオ3で気温上昇による影響を検討した結果、以下の知見を得た。

- ・気温上昇による水需要量の増加は大きい順にシナリオ1、2、3となり、気温が3℃上昇した場合にシナリオ1で年平均水需要量が1.5～3.3%増加する。これは夏期の気温上昇が大きい場合に水需要の増加が大きくなることを示しており、年間でみた場合には同一の気温上昇量であっても、夏期の気温上昇量が大きいほど水需要量の増加の影響が大きくなることを意味している。

6.3 地球温暖化による水資源供給・水資源需要への影響を考慮した渇水強度の変化

6.1及び6.2で得た知見をもとに、地球温暖化による水資源供給・水資源需要への影響を同時に考慮した場合の水利用者に対する渇水強度の変化について、モデルダムを対象に検討した結果、以下の知見が得られた。

- ・温暖化が供給量、需要量ともに影響を及ぼす場合には、降水量が変化せずに気温が2℃上昇する場合で、渇水強度（不足日数・不足%日）が対現状比でそれぞれ約1.2、1.3倍に、最も厳しい条件である降水量が10%減少し気温3℃上昇する場合で、渇水強度（不足日数・不足%日）が約1.6、1.8倍となる。

- ・降水量が変化しないとすれば、渇水強度に与える供給量の変化と需要量の変化の影響比率は気温上昇量によらずほぼ一定であり、不足%日で約5 : 1となる。
- ・同一気温上昇量で降水量のみが変化した場合の渇水強度（不足%日）の変化割合は、気温上昇によらずほぼ一定となり、降水量が10%減少すると約25%増加し、降水量が10%増加すると約19%緩和される。
- ・気温上昇期間を通年、高温期（5～10月）、低温期（11～4月）とした場合、降水量変化にかかわらず、通年と高温期の場合には気温上昇とともに渇水強度が大きくなり、低温期のみの気温上昇では渇水強度はほとんど変化しない。これは、モデルダムでは現状でも高温期に発生する渇水が支配的であり、高温期の気温上昇が渇水強度をより厳しくした結果である。

6.4 今後の課題

本資料は、地球温暖化現象が水資源に与える影響を水資源供給および水資源需要から評価したものであり、河川流況・ダム容量・利水安全度という水資源供給に対する影響、水使用量の変化という水資源供給に対する影響を現状をふまえて分析を行った。

温暖化が供給面に及ぼす影響については、温暖化による気候変化に不確定な部分がいまだに多く、ここでは簡単な温暖化シナリオを用いて分析を行った。今後は、台風・梅雨・積雪・融雪といったわが国の水資源を支配する要因が温暖化の進行に対してどのような変化を生じるかを把握するとともに、それぞれの影響を評価する手法を可能な限り取り込む必要がある。さらに、植生の変化・蒸発散量の変化といった水資源供給に間接的に影響を及ぼす要素についても、同様の検討を行う必要がある。

温暖化が需要面に及ぼす影響については、主要都道府県を対象に全国的な分析を行い、その結果をふまえ、都市レベルでの分析を行った。今後は、都市単位の分析事例を増やし、特に水需要構造そのものについての検討を進め、さらに温暖化による水需要構造の変化をも考慮したシナリオを考える必要がある。また、水使用行動の慣性力・履歴性等の影響が水資源需要に大きな影響を及ぼしていると考えられるため、その点についても詳しく分析を行う必要がある。

温暖化に関する研究は、今後さらに詳細に進められると考えられるが、全国的にみた場合には、今回のシナリオで検討した範囲で、概ね変化量のオーダーは把握されたものとする。しかしながら、河川レベル、さらにはダム流域レベルでみた場合には、より大きなインパクトを与える可能性もあり、上記の供給面・需要面への影響に関する課題と合わせて、今後の研究の継続が求められる。

さらに、こうした温暖化による水資源への影響をふまえて、長期的な目標を設定するとともに、これを実現するための総合的なアプローチを確立する必要がある。

〈参考文献〉

- 1) 霞ヶ関地球温暖化問題研究会編訳, IPCC地球温暖化レポート, 中央法規出版, 1991
- 2) IPCC地球温暖化第2次レポート: IPCC(気候変動に関する政府間パネル)編, 中央法規, 1996
- 3) 気象庁編: 異常気象レポート, 大蔵省印刷局, 1989
- 4) 気象庁編: 温室効果期待の増加に伴う気候変化(Ⅱ), 大蔵省印刷局, 1990
- 5) 気象庁編: 地球温暖化監視レポート1991, 1992
- 6) 近藤純正, 中園信, 渡辺力, 桑形恒夫: 日本の水文気象(3), 水文・水資源学会誌 Vol. 5, No. 4, 1992
- 7) Edit. J. T. Houghton, G. J. Jenkins and J. J. Ephraums: CLIMATE CHANGE, The IPCC Scientific Assessment, Report Prepared for IPCC by Working Group I, Cambridge University Press, 1990
- 8) Nigel Arnell: Global Warming, River Flow and Water Resources, WILEY, 1996
- 9) 山川修治: 20世紀の寒冷期・温暖期・変動期における東アジア地上気圧配置の季節内変動と特異性, 地学雑誌, Vol. 98, No. 7, pp. 833-852, 1989
- 10) 丹羽薫, 盛谷明弘: ダム流入量予測のための融雪流出のモデル化, 土木研究所資料第2826号, 1990
- 11) 宝馨, 小尻利治, 牧宏幸, Tan Boon Lay: 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年研究発表会要旨集, pp138-141, 1991
- 12) 田中丸治哉, 角屋睦: 気温上昇が流域水循環に与える影響, 京都大学防災研究所年報第34号B-2, pp 189-207, 1991
- 13) 鈴木雅一: 短期水収支法による森林からの蒸発散量推定, 日林誌, pp115-125, 1985
- 14) 吉野文雄・丹羽薫・石井典夫・盛谷明弘: 寒冷な時期と温暖な時期との降雨特性の比較検討, 水文・水資源学会1990年研究発表会要旨集, pp. 128-131, 1990
- 15) 中澤式仁: 渇水時の水管理に関する計画学的研究, 土木研究所資料, 第1508号, 1979
- 16) 中澤式仁, 今村瑞穂, 石崎勝義, 中村昭: 渇水時の水管理に関する計画学的研究, 土木研究所資料第1508号, 1979
- 17) 池淵周一(研究者代表): 水資源システムにおける安全度概念の定式・定量化と計画論への応用に関する総合的研究, 京都大学防災研究所, 1988
- 18) 森北佳昭, 児玉好史: 異常渇水対策の必要性和その推進について, 第4回水資源に関するシンポジウム前刷集, pp. 251-256
- 19) 建設省土木研究所: 利水計画における流況把握の研究, 第23回建設省技術研究発表会, 1969
- 20) 電力中央研究所: 地球温暖化に伴う東アジア地域の気候変化予測(その1), -NCAR地域気候モデルの適用と性能評価-, 電力中央研究所報告, 1994-4
- 21) 建設省土木研究所, 北海道開発庁開発土木研究所: 地球温暖化による水収支への影響評価に関する研究, GERF研究報告書, 1996
- 22) 寺川陽, 渡辺明英, 藤兼雅和: 地球温暖化による日本域での降水量変化の予測手法-メソスケール水文

- 気象モデルによるアプローチ—, 土木技術資料, 1994—8
- 23) 清水康生, 横江義之, 蔵重敏夫, 杉山裕: 地球温暖化による水需要変化が水資源管理にあたる影響についての考察, 地球環境シンポジウム講演集, pp. 246—253, 1993
- 24) 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考察, 第37回水工学論文集, pp 11—20, 1992
- 25) 与田博恭, 今田俊彦: 地球環境問題と水道事業経営に関する一考察, NSC研究年報No. 1, pp. 279—288, 1993
- 26) 住友恒: 都市における上水需要量の変動特性について—需要の季節変動の分析—, 土木学会論文集報告集, 第197号, pp. 33—42, 1972
- 27) 小泉明, 稲員とよの, 千田孝一, 川口士郎: 多元ARIMAモデルによる水使用量の短期予測, 水道協会雑誌, Vol. 18, No.12, pp. 13—20, 1988
- 28) 渡辺晴彦, 張昇平, 山田良作: ニューラルネットワークによる日水需要量の予測, NSC研究年報, Vol. 18, No. 1, pp. 198—208, 1992
- 29) 気象庁編: 気象庁月報, ~1991
- 30) 厚生省環境衛生局編: 水道統計, 1965~1991
- 31) 根岸卓郎: 理論応用統計学, 養賢堂, pp. 230—233, 1983
- 32) 中川昭一郎: 水田用水量の調査計画法 (その2), 農業土木学会誌, 1966—6

あ と が き

本報告書で取り扱った地球温暖化が水資源に及ぼす影響に関する分析は、供給面への影響に関する分析が平成3年度～平成5年度、需要面への影響に関する分析が平成6年度～平成8年度、供給面と需要面を考慮した渇水強度に関する分析が平成8年度に行われた。これらに関する担当スタッフは以下の通りである。

室長： 丹羽 薫 （平成3～4年度）

高須修二 （平成5年度）

柏井条介 （平成6～8年度）

主任研究員 角 哲也 （平成7～8年度）

上田 悟 （平成6年度）

研究員 廣瀬昌由 （平成3～5年度）

安達孝実 （平成6～8年度）

宮井貴大 （平成3～5年度）

なお、本研究のうち平成3～4年度は水資源開発研究室により行われたものである。また、本報告書の執筆は角哲也・安達孝実が直接担当した。

最後に、本報告書作成にあたって、数多くの方々の御指導並びに御協力を賜りましたことに対し、ここに深く感謝の意を表します。

土木研究所資料第3478号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名 印

土木研究所資料 第3478号

地球温暖化が水資源に及ぼす影響に関する考察