

地球温暖化による水需要変化が 水資源管理に与える影響についての考察

ASSESSMENT OF GLOBAL WARMING ON WATER DEMAND AND WATER RESOURCES MANAGEMENT

清水康生*・杉山 裕**・蔵重俊夫*・横江義之**

Yasuo Shimizu, Yutaka Sugiyama, Toshio Kurasige, Yoshiyuki Yokoe

ABSTRACT; Firstly, the authors examine how water demand will change according to the trend of global warming. Based on consideration of seasonal water demand, adequate scenarios are assumed to illustrate water demand amount and seasonal pattern. Then reliability of water supply by reservoir is investigated. Followed to this study, several aspects on water resources management policy are discussed with respect to global warming.

KEYWORDS; Water demand, reliability of water supply, water resources management, global warming

1. はじめに

水資源システムは、水資源を利用する「水利用（水需要）システム」と水文循環システムをインプットとして水資源を安定供給する「水供給システム」に大別される。地球温暖化が水資源システムに与える影響を考える場合、水文循環システムの変化が水供給システムに与える影響の他、水利用システムの変化が水供給システムに与える影響を把握しておくことが水資源を適切に管理していく上では重要な課題である。

本研究は後者の問題に着目し、地球温暖化による需要量の変化について全国の水文条件が異なる地域の需要量データを基にシナリオを作成し、地球温暖化が水資源管理に与える影響について考察したものである。なお、需要量は気候変化、社会経済の変化、さらに風土・文化による影響も受けるため、その変化を定量的に把握すること難しい。しかし、地球温暖化が水資源管理に与える影響を考える場合、需要量変化は重要な要因であるとの認識に立ち、かなり大胆なシナリオを作成した。その結果、地球温暖化による水需要変化が水資源開発施設（以下「施設」という）の利水安全度の低下を招くこと、水需要の発生形態（利用形態）の違いによって利水安全度への影響度合が異なることが明らかなになり、今後の水資源管理を考えていく上では、施設対応だけでなく水利用も含めた水資源システムにおける総合的対応が必要であるとの知見を得ることができた。

2. 地球温暖化の水資源管理への影響

水資源システムを、水資源の源泉である水文循環システムと水資源を利用する「水利用（水需要）システム」、さらに、水文循環システムからの必要な出力を水需要者に提供する「水供給システム」から構成されたと考えると、地球温暖化の水資源システムへの影響構造は図-1のように表すことができる。水供給システムは、さらに、利水システムと水道システムから構成される。同図に示すよう地球温暖化が水資源システムに及ぼす影響にはシステム相互及び各システム内において多様なものがある。例えば、温暖化による水

* (株) 日水コン Nihon Suido Consultants Co., Ltd, ** (株) 建設技術研究所 CTI Engineering Co., Ltd

文循環システムの構造変化、社会・経済システムにおけるエネルギー効率を指向した産業構造の変化、さらに、日々の生活におけるライフスタイルの変化に伴う水需要発生形態の変化などである。一方、水供給システム内においても、例えば水道システムにおける直結給水の導入等によるエネルギー節約^{1) 2)}などが挙げられる。本稿では、これら多様な影響関係の中から水供給システムと水利用（水需要）システムを対象として、水利用システムからの出力である水需要の変化をいくつか大胆に想定することにより、利水システムへの影響内容の分析を行い、今後の水資源管理のあり方について考察を行なう。

3. 温暖化による水需要の変化

3. 1 水需要の用途分類

人々の日々の生活に関わる水需要は次のように大別される。

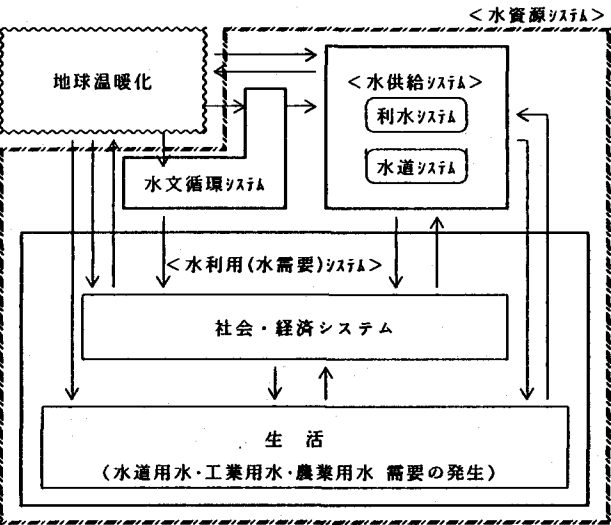


図-1 地球温暖化の水資源システムへの影響

温暖化による水需要への影響は、日常の生活レベルの需要、工業生産の場合からの需要及び農業生産のための需要の各々において発生することが予想される。温暖化の影響は、図-1に示したように直接的なものと温暖化の対策の結果、生ずる間接的なものが考えられる。すなわち、水道用水と農業用水の需要への影響については比較的直接的であるのに対し、工業用水需要の場合にはエネルギー消費の多面的な評価の結果として必要な水需要が生じてくるものと考えられる。このため、工業用水需要への温暖化の影響は極めて想定が困難であるといえる。このようなことから本稿では水道用水と農業用水を対象として温暖化による需要への影響を考察する。

3. 2 水需要への影響

(A) 水道用水

水道用水への影響を既存の水需要データから論ずるには、まず、気温と水需要量とが相関を有するということを検証しなければならない。このため、名古屋市における昭和54年度から平成元年度までの11年間の水需要量（日単位給水量）と同市における気温（日最高、日平均）とのクロスプロット図を図-2に示すよう作成した。これらの図より、いずれの気温データの場合にも気温が上昇すると需要量が増加するという正の相関が認められる。特に、最高気温と需要量とは相関が高く、気温が高くなる程、1度上昇当りの需要量増加も大きくなっている。このように、ある地域における水需要量は気温条件により大きく変化すること

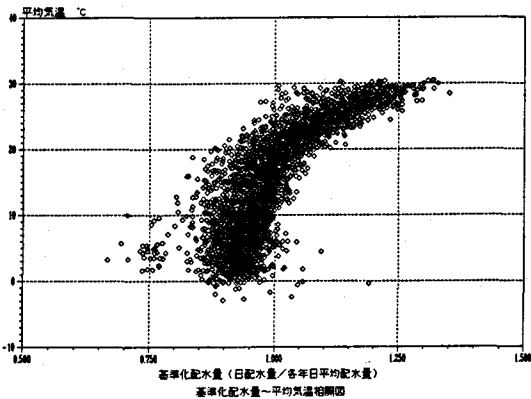


図-2 (1) 平均気温と水需要量（日配水量／各年日平均配水量）の相関図

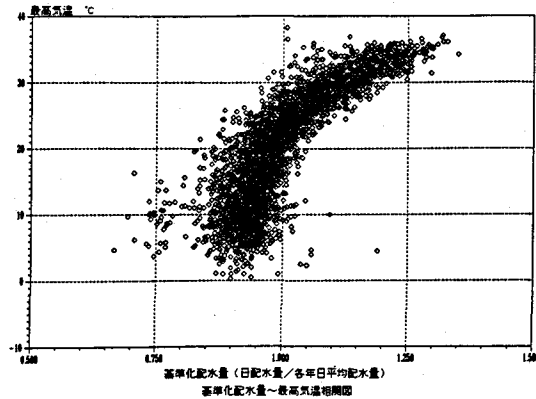


図-2 (2) 最高気温と水需要量（日配水量／各年日平均配水量）の相関図

がわかる。では、異なる気温条件を有する地域の水需要は水量の大きさのみが異なっているのでしょうか。この点について以下に考察する。北海道から沖縄までの20の都道府県の県庁所在都市における29年間（昭和36年～平成2年）の平均気温と平成元年度の平均需要量（有収水量原単位）を整理し、各地域における気温と需要量⁵⁾との対応関係を図-3に示した。気温と需要量とは正の相関を示していることがわかる。気温と需要量との関係を1次関数で表示すると図中に示す回帰式が得られた（決定係数は0.28）。同式より、地域の平均気温が1℃上昇すると原単位が7.4リットル増加するものと解釈することができよう。ただし、分析の対象とした各地域の水需要の大きさは当然のことながら気温条件のみで決まるものではなく、地域の風土・自然、社会・経済及び歴史・文化等によって変化するものである^{4) 6)}。気温とはあくまでそれらを形成するための、またはそれらの特色を示す1要因であることに留意する必要がある。

気温が需要に影響を与えるのは需要量の「大きさ」に対してだけであろうか。図-2に示した地域を「北日本」、「中日本」及び「南日本」に分け各ブロックから、「北海道」、「愛知県」及び「鹿児島県」を代表県として選定し、各地域の水需要の変化を月別平均原単位の推移から分析する。昭和56年度から平成2年度までの原単位の推移を図-4に示す。同図より読み取れることは、夏期にピークが発生するような季節変動があること、また、いずれの地域でも経年の需要量増加が認められることである。ここでは、月別の需要波形の特色をさらに詳しく調べるため、経年変化の影響を連関比率法⁶⁾により除去し、月単位の需要量発生のパターンを需要量変化の指数として表わした。図-5に「北日本」、「中日本」及び「南日本」の各需要の周期変動を指数表示した。各地域の変動特性は以下のとおりである。

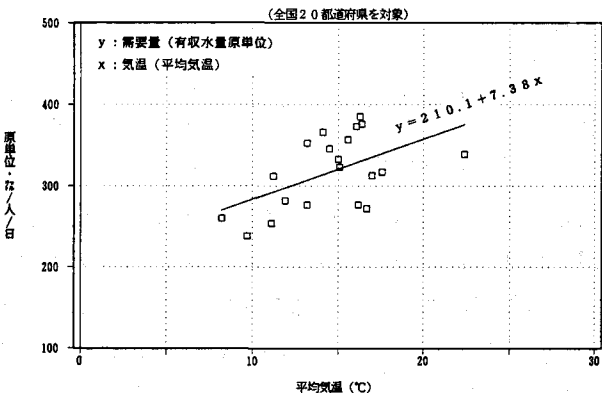


図-3 平均気温と有収水量原単位

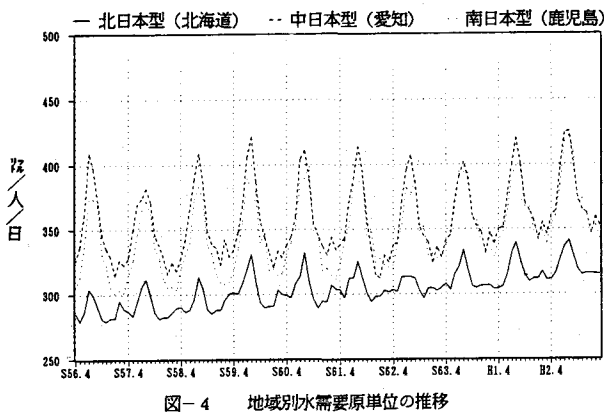


図-4 地域別水需要原単位の推移

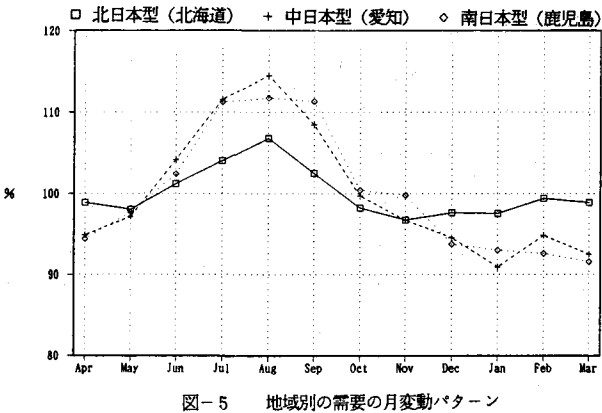


図-5 地域別の需要の月変動パターン

- 北日本型：需要の変化が年間を通じて小さい。需要の月別変動指数では最大107%、最小97%で変動幅は10%である。
 - 中日本型：8月に需要のピークを生じ、1月に最低となる。需要の月別変動指数では最大115%、最小91%で変動幅は24%である。
 - 南日本型：7月から9月にかけて需要の大きい時期が連続する。需要の月別変動指数は最大112%、最小92%で変動幅は20%である。
- 北日本型は寒冷地域での需要発生パターンを、中日本型は温暖地域を、南日本型は亜熱帯性に近い温暖地域でのパターンを示していると解釈できる。このように、平均気温の大きさは需要の大きさだけでなく、需要発生のパターンにも影響していると考えられる。

(B) 農業用水

農業用水の需要量は地域の気候、土壌、作付け内容等により量的にも期間的にも大きく異なる。温暖化が進行することは土壌条件を除きいずれの条件をも変化させることになるため、需要への影響は一概には論じられないものである。このような点を十分承知したうえで以下のように考える。農業用水の需要量は水田用水、畑地用水、畜産用水及び養魚用水に大別されるが、水田用水の需要発生は灌漑期間中でも代かき期、田植期、分けつ期、幼穂形成期、出穂開花期及び落水期等に分けられる。期間中の需要量を比較すると代かき期と幼穂形成期で需要が大きくなる。実績値として奈良県の紀の川からの農業用水取水量の平均値（昭和54年～62年）を月別に指数表示すると120（6月）、80（7月）、140（8月）、60（9月）となっており、概ね先述の生育段階別の需要が生じていると考えられる。このような農業用水需要に対して気温の上昇は、蒸発散量の増大を招き、減水深を大きくし、その結果、需要量が増加するという影響を生ずる。

3. 3 需要変化の想定

地球温暖化による水需要の変化について想定する。温暖化のレベルはIPCCの1次評価報告書⁷⁾に示されている内容を前提と考え、2℃及び3℃の上昇を仮定する。ここでは温暖化による需要への影響を「需要量全体への量的変化」と「需要が発生する月別パターンの変化」に分けて以下のように想定する。

(A) 需要の量的変化の想定

① 都市用水

平均気温が2℃上昇すると14.8リットル、3℃上昇すると22.1リットルの原単位の増加が見込まれる。これは原単位の各々4.6%と7.0%増加に相当している。本稿ではこれら2つのパターンを想定する。

パターンA：気温が2℃上昇した場合の需要量増加倍率を1.046とする。

パターンB：気温が3℃上昇した場合の需要量増加倍率を1.070とする。

② 農業用水

気温上昇にともない蒸発散量が増大すると考え、減水深の20%増加を想定する。有効雨量の変化については考慮しない。

(B) 需要パターンの変化の想定

① 都市用水

温暖化を検討する地域として「北日本」と「中日本」を考え、各々次のようなパターン変化を想定する。

☐ 「北日本型」→「中日本型」

☐ 「中日本型」→「南日本型」

② 農業用水

水田用水の灌漑期間の現況を6月～9月、温暖化後を4月～9月と想定する。温暖化後の灌漑期間中の需要発生パターンは現況のパターン（指数表示で、6月：120、

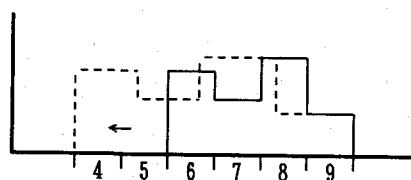


図-6 農業用水需要パターンの想定

7月：80、8月：140、9月：60）を引き延ばして半旬単位で設定する（図-6参照）。

(C) 基本ケースの設定

温暖化の利水安全度への影響について、(A) (B)で述べた条件を組み合わせ、いくつかの検討ケースを設定することとなるが、それらと比較する基本ケースについて以下に示す。

☐ 北日本型：都市用水については、北日本型の月別需要パターンを想定し、需要量倍率は1.0とする。農業基本ケース用水は6月～9月にかけて灌漑が行われるものとし、その期間は実績の月別需要が生ずると考える。

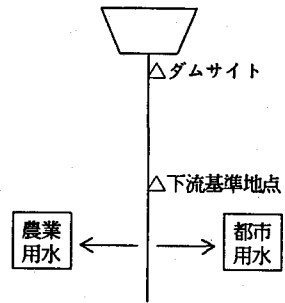
☐ 中日本型：都市用水については、中日本型の月別需要パターンを想定し、需要量倍率は1.0とする。農業基本ケース用水は6月～9月にかけて灌漑が行われるものとし、その期間は実績の月別需要が生ずると考える。

4. 利水安全度への影響

4. 1 計算条件

(A) 水収支計算モデル

水収支計算モデルは図-7に示すとおり1ダム1需要地域とした。需要用途は農業用水と都市用水で構成される。基準地点は、ダムサイトと下流基準地点であり、ダムサイトでは河川維持流量のみを確保し、下流基準地点ではダムサイトと同量の維持流量を確保した上で農業用水を確保し、次に都市用水を確保する。



(B) 基本条件

水収支計算を実施する上での基本条件は、表-1に示すとおりである。

(C) 計算ケース

北日本型と中日本型を基本ケースとし、都市用水と農業用水の周期的変化及び需要量変化の組み合わせを考慮し、表-2に示すように、北日本型と中日本型のそれぞれについて6ケースを設定した。

表-1 基本条件一覧表	
ダムの 利水容量	洪水期(6/16~10/15):12,870千m ³ (北日本型) 13,300千m ³ (中日本型) 非洪水期(10/16~6/15):17,280千m ³ (共通)
基準地点	ダムサイト(c.a.=150km ²) 下流基準地点(c.a.=250km ²)
基準地点の 確保流量	ダムサイト:維持流量1.0m ³ /s(通年確保) 下流基準地点:維持流量1.0m ³ /s(通年確保) 農業用水2.0m ³ /s(6/1~9/30,期間内平均値) 都市用水1.0m ³ /s(月別波形状,年間平均値)
計算期間	昭和30年~59年の30年間(半旬計算)

注)確保流量については基本ケースのものを記入した。

表-2 計算ケースと需要量の条件							
ケース	北日本型	0-1	1-1	2-1	2-2	3-1	3-2
	中日本型	0-2	1-2	2-3	2-4	3-3	3-4
都市用水	周期的変化	基本ケース	○			○	○
	需要量変化	基本ケース		○		○	
農業用水	周期的変化	基本ケース	○			○	○
	需要量変化	基本ケース		○	○	○	○

4. 2 計算結果

(A) 利水安全度の評価

以上に示した計算条件に準じて30年間の水収支計算を実施し、ダムの不足発生年数、利水安全度、不足発生年における下流基準地点の不足%・日を整理した結果を表-3にとりまとめた。以下ではこの結果をもとに、地球温暖化が利水安全度に与える影響について考察する。

- ① 基本ケースに対して需要を変化させた場合、北日本型と中日本型に関係なく、すべてのケースにおいて利水安全度が低下する。
- ② 北日本型では、ケース(1-1)で利水安全度は1/7.5となり、その他のケースでは利水安全度が1/3.3まで低下する。この結果から温暖化による需要変化としては周期的変化よりも需要量変化が利水安全度に与える影響が大きいことが解る。
- ③ 中日本型では、ケース(1-2)で利水安全度は1/7.5、ケース(2-3),(3-3),(3-4)で1/3.8、ケース(2-4)で1/3.3となった。北日本型と比較すると多少の違いが認められるものの、相対的な傾向は同じである。
- ④ 不足%・日について30年間平均値で比較すると、利水安全度が低下しているため当然の結果ではあるが、基本ケースに比べ他のケースが増加する。基本ケースに対する比率でみると、北日本型で1.40倍から2.95倍の範囲で増加し、中日本型で1.29倍から2.71倍の範囲で増加している。
- ⑤ 不足%・日を各ケースについて比較すると、北日本型では(1-1),(2-1),(2-2),(3-1),(3-2)の順に増加率が大きく、中日本型では(1-2),(2-3),(2-4),(3-3),(3-4)の順となり、北日本型と中日本型の傾向は同様である。
- ⑥ ただし、基本ケースに対して都市用水の周期を変化させた場合は、北日本型の方が中日本型に比べて増加率が大きい。これは、北日本型の都市用水の需要波形が中日本型及び南日本型のそれに比べ平坦なためである(波形の変化が小さい、図-5参照)。

(B) 貯水池の運用状況による評価

温暖化による需要の変化が貯水池運用状況に与える影響を把握することを目的として、1月1半旬から12

月6半旬の各半旬における貯水量を計算期間内平均した結果を計算ケースごとにプロットし図-8に示す。
この結果をもとに考察を加え、以下にとりまとめる。

- ① 北日本型と中日本型を比較すると、9月から12月における貯水池の回復期で若干の違いが認められるものの、双方の運用状況に大きな違いはない。
- ② 北日本型と中日本型とも、基本ケースに対して農業用水を周期的変化させた場合、4月では貯水池の回復が遅れる。とくに、北日本型のケース(3-1)と(3-2)、中日本型のケース(3-3)と(3-4)ではその影響が大きく、洪水期制限水位の移行時に貯水位が同水位を下回るため、洪水期において貯水位を低下させる要因となっている。
- ③ 逆に8月4半旬から6半旬においては、農業用水を周期的変化させた場合、貯水池の回復が早くなる。北日本型のケース(1-1)、中日本型のケース(1-2)ではこのことによって基本ケースと同程度の貯水位まで回復するが、北日本型のケース(3-1)と(3-2)、中日本型のケース(3-3)と(3-4)では、②に示した要因、さらにその他の需要量の増加も影響して基本ケースと同等の貯水位回復が図られない。

表-3(1) 利水安全度算出結果(北日本型)						
項目	0-1	1-1	2-1	2-2	3-1	3-2
不足発生年数	2	3	8	8	8	8
利水安全度	1/10	1/7.5	1/3.3	1/3.3	1/3.3	1/3.3
不足 % ・ 日	昭和36年	—	128	168	183	227
	37年	3,454	3,631	4,404	4,492	4,564
	39年	—	—	151	191	—
	42年	—	—	1,123	1,186	918
	48年	—	—	5	27	531
	52年	—	225	468	504	1,035
	53年	314	1,430	815	842	2,770
	54年	—	—	68	120	658
	56年	—	—	—	—	20
	平均	126	176	239	251	356
比率	1.00	1.40	1.90	1.99	2.83	2.95

注) 平均は30年間の平均値。比率は基本ケースに対する値。

表-3(2) 利水安全度算出結果(中日本型)						
項目	0-2	1-2	2-3	2-4	3-3	3-4
不足発生年数	2	3	7	8	7	7
利水安全度	1/10	1/7.5	1/3.8	1/3.3	1/3.8	1/3.8
不足 % ・ 日	昭和36年	—	148	154	25	70
	37年	3,440	3,480	4,408	4,468	4,433
	39年	—	—	168	174	—
	42年	—	—	1,164	1,200	781
	48年	—	—	—	29	415
	52年	—	53	519	534	940
	53年	303	1,287	846	861	2,671
	54年	—	—	141	150	504
	56年	—	—	—	—	—
	平均	125	161	246	252	326
比率	1.00	1.29	1.97	2.02	2.61	2.71

注) 平均は30年間の平均値。比率は基本ケースに対する値。

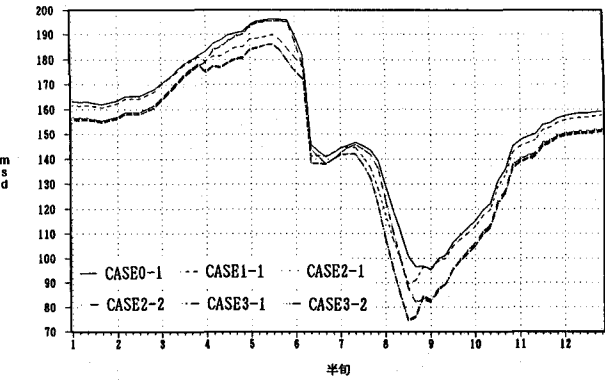


図-8(1)貯水池容量の変化(北日本型)

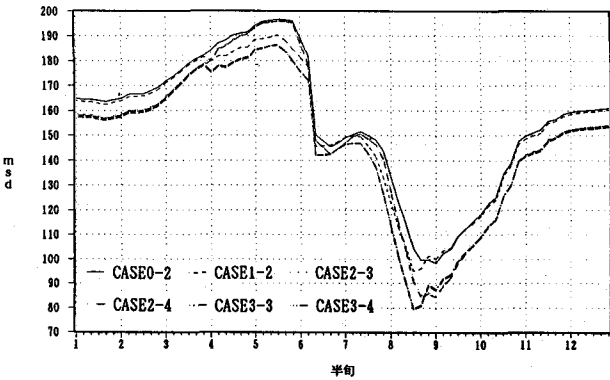


図-8(2)貯水池容量の変化(中日本型)

5. 地球温暖化が水資源管理に与える影響の評価

以上に示した結果から、地球温暖化による水需要量の変化によって施設の利水安全度が低下することが明らかになった。さらに、温暖化が水文循環システム与える変化が施設の利水安全度に及ぼす影響については既往の研究^{8) 9) 10)}によって報告されており、水需要量の変化による利水安全度への影響も考え合わせると、水資源管理に与える影響はより深刻なものと予想される。したがって、現状の利水安全度を維持するためには今後計画する施設に対してはこうした影響量を見込むことが必要となる。しかし、今後の水資源管理を考える上で、利水システムとしては増加する水需要に対応するためにはある程度の施設を建設していく必要があるが、2章で述べた水資源システム全体としての対応の必要性が益々高まっていくものと考えられる。さらに、水資源管理の一元化の必要性も高まるものと考えられる。

利水システムにおける対応については、新たな施設を確保する以外に施設を効率的に運用するための流水

管理体系の充実も重要である。さらに、地球温暖化を削減するためにはエネルギー問題への対応も図っていく必要がある。たとえば、オールサーチャージ方式を採用している施設について考えると、容量面の対策として非洪水期に利水容量を確保することが考えられるが、この容量を水力発電にも有効利用し、火力、原子力発電の負担を軽減することによって温暖化の削減効果も期待できよう。

水道システムについては、温暖化により利水安全度が低下した場合、利水システムとの調整が必要となる。その際、温暖化に対する水需要構造の弾力性について十分に認識しておくことが、水資源の有効配分を図る上から重要になるものと考えられる。一方、本稿では温暖化の需要への影響を流域内の原単位に対して想定した。しかし、超長期的かつ全国的に考えるとフレーム（人口）の変動は水需要に対して極めて大きな影響を及ぼすことも想定される。この点についても留意しておく必要がある。

なお、地球温暖化による水需要及び水文現象の変化が水資源システムに与える影響については、温暖化現象を水需要及び水文現象の変化に変換する過程での課題が残されるものの、利水安全度が低下するとの問題提起がなされている。しかし、温暖化による気温や降水量の変化量、また温暖化現象自体にも不確定要素が含まれている。さらに、施設の建設整備には10年から20年以上の長い懐妊期間を必要とすることを考えると、超長期先の現象に対して施設計画の意志決定が必要である。温暖化への対応についても同様な意志決定の問題があり、温暖化といった不確実事象による影響を水資源管理（システム）にどのような形で取り組んでいくべきか、いかに意志決定していくべきか、といった問題・課題に対するアプローチも重要な項目であろう。

6. おわりに

本研究では、地球温暖化が水需要量に与える影響をシナリオとして想定し、水需要量の変化が利水安全度に与える影響を把握し、水資源管理への影響を考察した。

本研究から得られた結果から、水需要量の周期的及び量的な変化が利水安全度の低下を招くことが明らかになった。さらに、地域的な需要量の周期パターンの違い（都市用水）によって、需要量の変化が利水安全度に与える影響度が異なることも明らかになった。なお、本研究内容には、需要量の変化の設定に際してかなり大胆なシナリオを設定したこと、また施設の位置や需要規模の違いによっても利水安全度に与える影響が異なること等の課題が残されているが、地球温暖化による水資源管理に与える影響として水需要量の変化が重要な問題であることを提案でき、また今後の水資源管理を考える上での基礎資料を提供することができたと考えられる。

なお、本研究は土木学会水理委員会の水文部会における「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」の研究成果の一部である。

【参考文献】

- [1] 増子敦、今田俊彦、牧田嘉人：水道施設の整備計画に係わるエネルギー有効利用、第43回全国水道研究発表会講演集、pp117-119, 1992.
- [2] 清水康生、森正幸、武石浩三：直結給水対象の拡大を考慮した送配水施設整備計画の事例報告、第44回全国水道研究発表会講演集、pp67-69, 1993.
- [4] 萩原良巳、小泉明、渡辺晴彦：アンケート調査をもとにした都市の水需要構造～家庭用水を対象とする～、地域学研究、第11巻、pp171-183, 1981.
- [5] 萩原良巳、西沢常彦、今田俊彦：家庭用アンケート調査をもとにした水需要構造分析、第2回水資源に関するシンポジウム、pp77-82, 1982.
- [6] 岸根卓郎：理論応用統計学、養賢堂、1983.
- [7] 霞が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. 3.

- [8] 廣瀬昌由、丹羽薫、宮井貴大：地球温暖化が進行した場合に水資源に及ぼす影響に関する考察、第37回水工学論文集、pp201-206, 1993.
- [9] 宝馨、牧宏幸、岡田裕：温暖化による渇水頻度・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、pp143-144, 1992.
- [10] 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、pp11-20, 1992.