

## 第 3 章 水環境・水資源分野

## 《目次》

<b>3.1 影響のメカニズム</b> .....	<b>2</b>
(1) 影響のメカニズムの構成要素.....	2
(2) 影響のメカニズム.....	3
<b>3.2 現在把握されている影響</b> .....	<b>4</b>
(1) 降水量・積雪量の変化.....	4
(2) 河川水.....	7
(3) 湖沼・ダム湖.....	9
(4) 地下水.....	10
(5) 気候変動の進行に伴い、懸念される事象の既存類似事例...	12
<b>3.3 将来予測される影響</b> .....	<b>13</b>
(1) 河川水.....	13
(2) 湖沼・ダム湖.....	15
(3) 地下水.....	16
<b>3.4 脆弱性の評価</b> .....	<b>17</b>
(1) 脆弱性の評価手法の例.....	18
(2) 脆弱性評価における課題.....	20
<b>3.5 適応策</b> .....	<b>21</b>
(1) 適応策メニューとその体系.....	21
(2) 適応策の選択・実施にあたっての考え方.....	25
(3) 適応策を実施する上でのバリア.....	25
(4) 適応策として参考にできる既存の事例・政策.....	27
(5) 適応策の評価手法に関する研究動向.....	29
<b>3.6 今後の課題</b> .....	<b>30</b>
(1) 影響の把握.....	30
(2) 脆弱性の評価.....	30
(3) 適応策.....	31

※図表・写真等の使用に際しては、出典を必ず明記いただけますようお願いいたします。

※ **要通知!** 印のある図表・写真は使用にあたり執筆者等への連絡が必要のため環境省に問合せ願います。

※ **要許諾!** 印のある図表・写真は使用にあたり学会等、引用元の使用許諾等が別途必要ですのでご注意ください。

### 3.1 影響のメカニズム

#### (1) 影響のメカニズムの構成要素

水環境・水資源分野における温暖化影響のメカニズムを構成する要素を、表 3-1 に示す。

表 3-1 影響のメカニズムの構成要素

気候要素の例	気温上昇、降水パターンの変化（平均雨量増加、降雨変動増大、豪雨の頻発、積雪量の減少等）、海面上昇、台風の大型化 等
自然的要素の例	水温上昇、水質の変化、融雪時期の早まり、河川流量の変化（融雪期の河川流量の減少等）、水田・稲等の蒸発散量増大、植物プランクトンの増殖、湖内循環の変化、地下水の塩水化、塩水の河川遡上 等
社会的要素の例	田植え時期の早まり、その他作物植え付け時期の変化、飲料水等の水需要の変化、節水機器の普及 等
影響の例	渇水リスクの増大（取水制限・給水制限等）、河川取水障害、災害時の長期断水、豪雨による洪水被害の増大、ゼロメートル地帯での高潮災害、濁水・異臭・重金属や栄養塩類の溶出等の水質障害、地下水利用上の支障、水域の生態系の劣化 等

(2) 影響のメカニズム

水環境・水資源分野における温暖化影響のメカニズムの全体像を図 3-1 に示す。

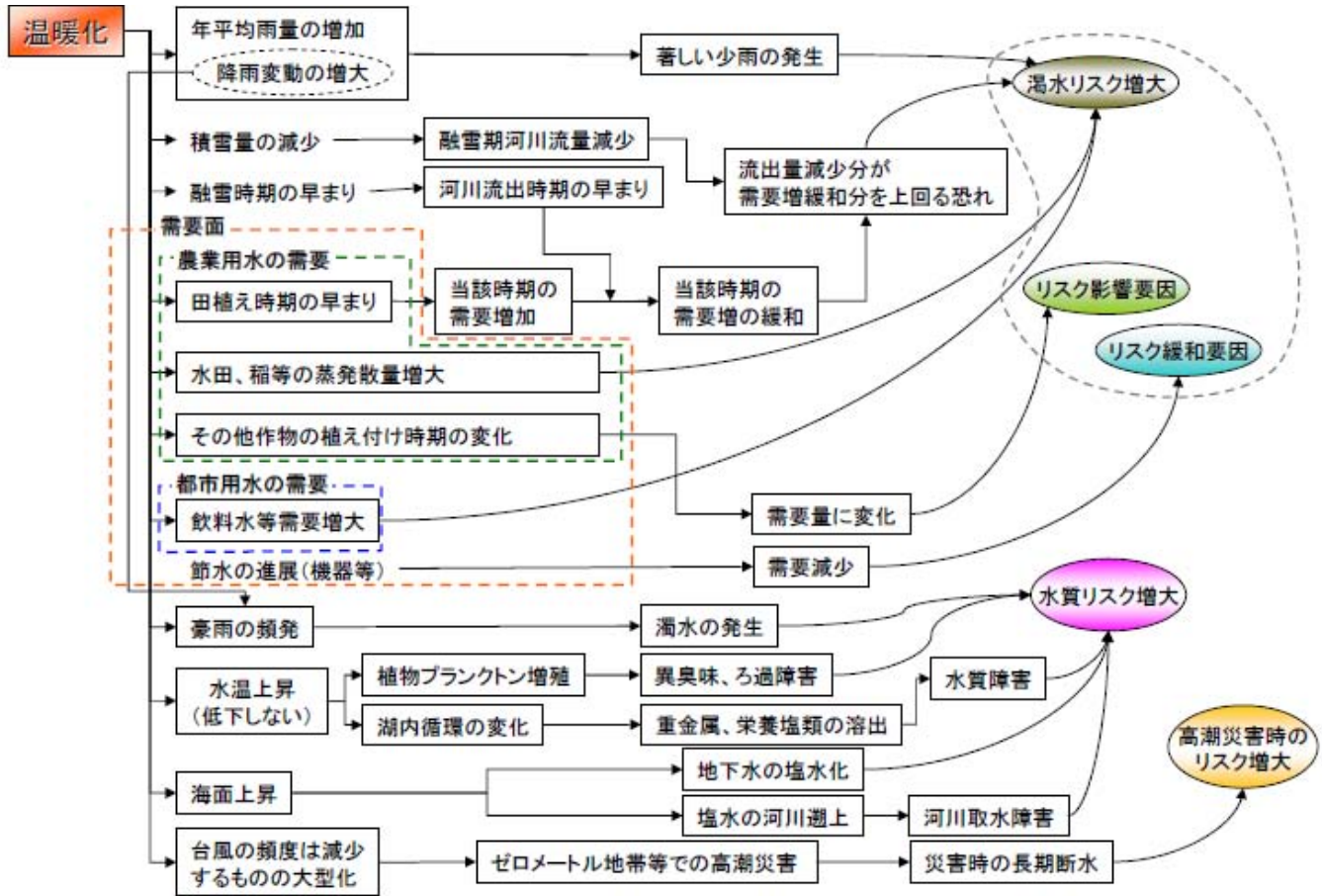


図 3-1 気候変動による水環境への影響相関図 (国土交通省, 2007)

### 3.2 現在把握されている影響

水環境・水資源分野において表れる渇水、水温上昇、水質悪化等の事象は、現時点において必ずしも気候変動の影響と断定できるわけではない。しかし、将来、気候変動が進行すれば、これらの事象が頻発する可能性があり、それによって甚大な被害が及ぶことも憂慮されている。このため、本節では、「3.3 将来予測される影響」や「4. 適応策」の検討に資するよう、気候変動による影響であるかどうか現時点で明確には判断し難いが、その可能性が高いと考えられる事象、気候変動が進行すればさらに増加すると考えられる事象も含めて扱うこととした。したがって、本節の「現在把握されている影響」は、気候変動の影響として観測された事例ではないことに留意が必要である。

以下では、最初に降水量・積雪量の変化の傾向を述べ、次に「河川水」「湖沼・ダム湖」「地下水」の水源タイプ別に事例を整理した。また、影響事例として、渇水、洪水、水質悪化など自然環境への影響と、断水、時間給水、飲み水被害など社会的影響の2つのタイプが想定されるが、ここではいずれも扱っている。

#### (1) 降水量・積雪量の変化

##### 1) 降水量の年変動幅の増加

年降水量は、近年、極端に少雨の年が増えているとともに、少雨の年と多雨の年の年降水量の開きが次第に大きくなりつつあり、年変動が大きくなる傾向が認められる（図 3-2）。

豪雨に関しては、このような年変動の傾向によりもたらされる影響と、1日、1時間等の極めて短い時間スケールの豪雨の発生によりもたらされる影響がある。近年、時間雨量 50mm 以上等の短期集中型の豪雨の頻度も増加する傾向にある。年変動の傾向と短期的な現象の双方に着目する必要がある。

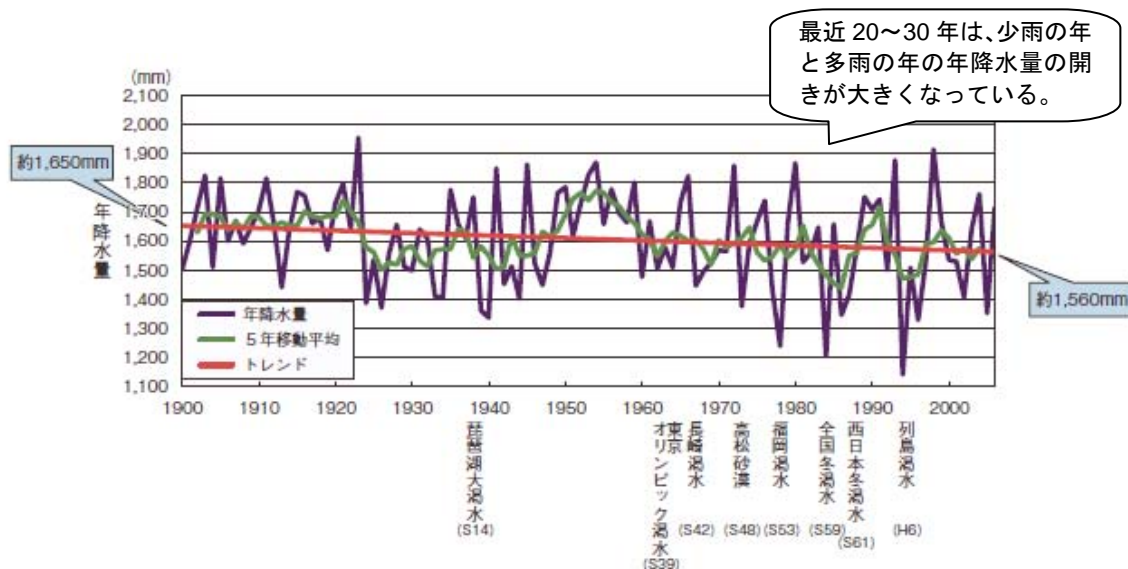


図 3-2 年降水量の変動状況（国土交通省，2007）

渇水の最近の例として、例えば、2005 年は、4 月以降、西日本を中心に降水量の少ない状態が続いた。4~6 月の 3 ヶ月間降水量は、東海地方から九州地方にかけての多くの地点で平年の 20~50% 程度となり、54 地点で最小値を更新する渇水が生じた。（図 3-3）。

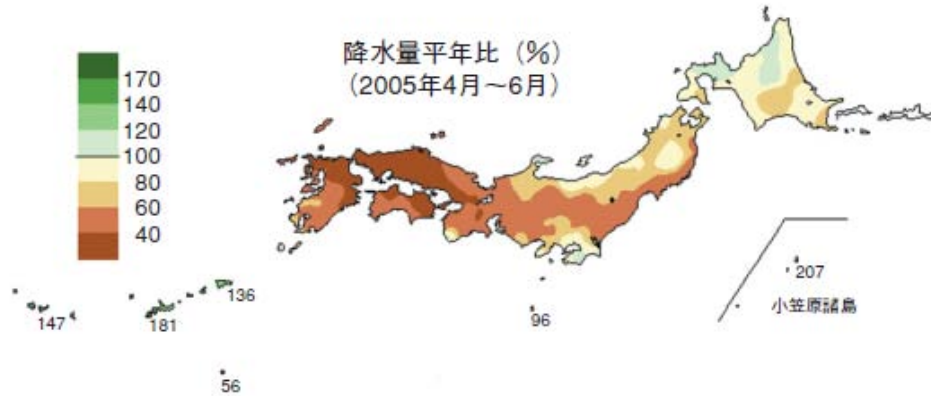


図 3-3 3ヶ月間降水量（2005年4～6月）平年比図（国土交通省，2006）

## 2) 豪雨の増加

近年、集中的に雨が降る事例が多くなってきていることも、災害に対処するという観点から懸念される変化である（内閣府, 2007）。全国に約 1,300 箇所ある気象庁のアメダス観測点でのデータを基に、強い降雨の発生頻度を 10 年単位で整理した結果が図 3-4 であり、1 時間に 50mm 以上、100mm 以上という強烈な雨の発生回数が近年明らかに増えている。豪雨は災害につながる。最近の 10 年を見ると、表 3-2 に示すように日本の各所で顕著な災害が起こっている。

こうした近年の豪雨の増加が、温室効果ガスによる温暖化によるものと科学的に判断するにはまだ検討を要する状況にある。しかし、今後 21 世紀中に、東アジア域では強い降水が増加する可能性がかなり高く、熱帯低気圧に伴う極端な降雨と強風が増大する可能性が高いとの気候予測が IPCC 第 4 次評価報告書第 1 作業部会報告書により示されていること、我が国が元々風水害、土砂災害を受けやすい地理的特性を持っていることを考えれば、災害につながる事象の増加傾向には十分な警戒と備えを怠らないことが求められる。

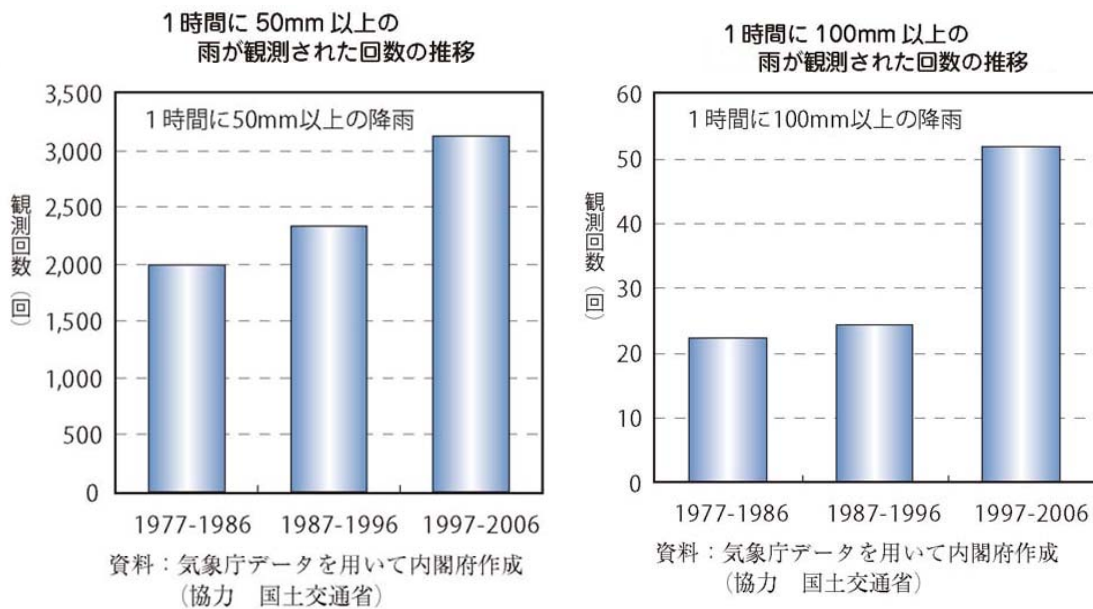


図 3-4 日本における強い雨の観測回数の経年変化（内閣府，2007）

表 3-2 最近 10 年に生じた代表的な豪雨災害等

2000 年：東海豪雨
2003 年：九州北部を中心とした梅雨前線豪雨（遠賀川、福岡市街）
2004 年：新潟や福井等での梅雨前線豪雨（刈谷田川破堤、足羽川破堤）、観測史上最多の 10 個の台風上陸と各地での被害（円山川破堤）
2005 年：東京 23 区内における時間雨量 100mm を超える猛烈な雨による浸水被害、台風 14 号災害（大淀川、五ヶ瀬川）
2006 年：中部、中国、九州地方における梅雨前線豪雨（川内川、天竜川）

### 3) 積雪量の変化

北日本日本海側、東日本日本海側、西日本日本海側で平均した年最深積雪の 1962～2004 年までの経年変化を図 3-5 に示す。この図をみると、すべての地域において、1980 年代はじめの極大期から 1990 年代はじめにかけて大きく減少しており、それ以降やや増加傾向がみられるものの、1980 年以前に比べると少ない状態が続いていることがわかる。この減少の程度は東日本日本海側、西日本日本海側で大きい。特に西日本日本海側では 1980 年代半ばまでは年平均比 200%を超える年が出現していたものの、それ以降は全くあらわれていない。

全期間を対象として算出した 10 年あたりの長期変化傾向は北日本日本海側、東日本日本海側、西日本日本海側においてそれぞれ、 $-4.7\%$ 、 $-12.9\%$ 、 $-18.3\%$ となっており、東日本日本海側、西日本日本海側で有意な減少傾向が認められる（危険率 5%）。

この主な要因として、北日本から西日本にかけて冬平均気温が 1980 年代後半に顕著に上昇したことで、東日本日本海側、西日本日本海側では降水が雪ではなく雨となる場合が多くなったこと、また、同期間における冬季の降水量が有意（危険率 5%）に減少している東日本日本海側では、降水量自体が減少していることが挙げられる。

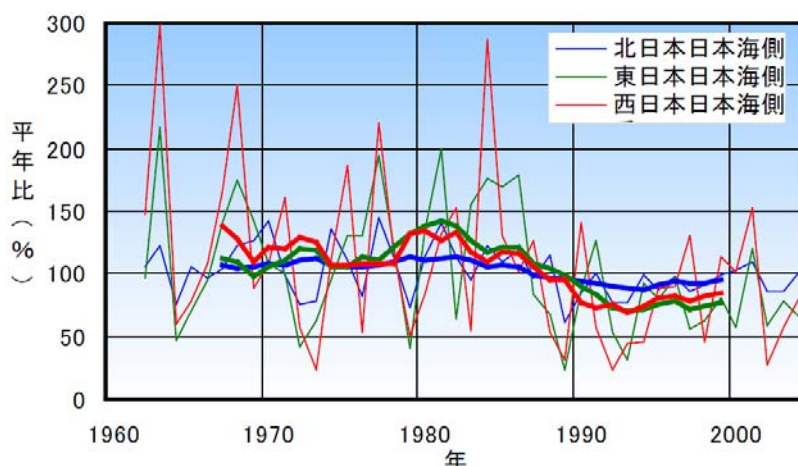


図 3-5 日本の年最深積雪年平均比の経年変化（気象庁，2005）

凡例：各地域とも、細い線は年々の値、太い線は 11 年移動平均値



**コラム：気温上昇、積雪の増加で北海道東部の野良芋が繁茂**

北海道十勝地方では温暖化によって、野良芋の繁茂が問題になっている。従来は馬鈴薯の収穫後に残された芋が、冬季に土壤凍結した際に凍死していた。土壤凍結には、極低温であり、かつ積雪が少ないことが必要となる。北海道農業研究センターの鮫島良次氏の報告によると、近年では、取り残しの芋が凍死せず、野良芋化し、春先に雑草化する問題が顕著になっており、これは温暖化の影響（気温の上昇、積雪の増加）により土壤凍結が起きないことが要因の一つと推測されている。「野良イモは後作の生育を阻害するほか、ジャガイモシストセンチュウなどの病害虫密度を高めることにもつながる。野良イモの除去は翌年夏の人力除草時に行うが、塊茎を確実に引き抜く必要があり、多大な時間を要している。」（鮫島, 2008）

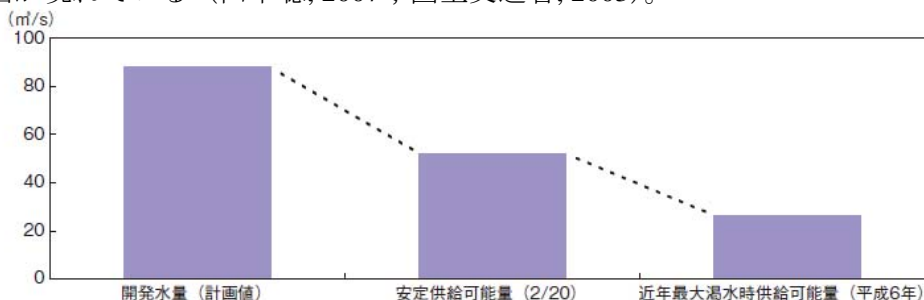
この問題に対して、圧雪による凍結の促進や除草剤などの対応が取られているが、新たなコストが生じている。積雪の増加は、一見水資源を新たに生み出すように見られるが、その土地にすでに適応した農業スタイルの変更を強いることになる。

**(2) 河川水**

**1) 水量**

(1)の「1) 降水量の年変動幅の増加」において述べた変動幅の増大は、河川水量の年ごとの変動幅が増大していることを意味する。一方、河川水量が少ないときに水を供給し水利用に支障が出るのを防ぐダムは、通常は、代表的な 10 年間の中で雨が 1 番少ない年（利水基準年と言う）でも水利用に支障が出ない河川水量を確保できるように貯水池容量が決められる。その利水基準年は、現在日本で使用されているダムの半分以上で、1956 年から 1975 年の間に設定されており、近年の降水量変動を反映したものにはなっていない。

このことがもたらす課題について、木曾川水系の完成あるいは建設中のダム群を用いた例示を図 3-6 に示す。この図をみると、計画当時の開発数量（計画値）では、代表的な 10 年間の中で一番厳しい渇水年にも毎秒約 88m<sup>3</sup> の利用できる水量を生み出すよう計画されたダム群が、最近 20 年の降雨や河川流量で評価した場合、安定的に供給可能な量としては計画値の 6 割程度しか供給できていないことがわかる。また、近年の気象データを基にした代表的な 10 年間の中で一番厳しい渇水年における供給可能量は、計画値の約 4 割程度しか供給できないことがわかる。ここには、ダムを計画・建設した段階で確保したはずの渇水対応能力が、気候変動によって、最近では有意に低下しているという構図が現れている（山本聡, 2007；国土交通省, 2003）。



(注) 木曾川水系における水資源開発基本計画資料をもとに作成

開発数量 (計画値) : 昭和 20 年代前半～昭和 40 年代後半の気象データを基にして、10 年間で 1 番厳しい渇水時に対応できるように計画し建設されたダム等の開発水量

安定供給可能量 (2/20) : 近年の 20 年間で 2 番目の規模の渇水時において、河川に対してダム等による補給を行うことにより、年間を通じて供給が可能となる水量のこと。

近年最大渇水時供給可能量 : 近年の気象データを基にした 1/10 渇水時相当における供給可能水量

**図 3-6 最近の降水量変動の増大が渇水対応能力に与える影響の分析例(木曾川水系のダム群対象)**  
(国土交通省, 2007)

## 最終稿

なお、国内各地における河川流量の変化やそれに伴う社会的影響については、以下の事例が報告されている。

筑後川に関する報告（河村ら，2004）では、大渇水の年であった 1978 年及び 1994 年では、中・下流域における平水流量<sup>1</sup>以上の流量が 10 年確率渇水年をかなり下回り、特に最大日流量が著しく小さくなるなどの厳しい渇水であった。また、筑後川に関する別の報告（神野ら，2005）では、2002 年の少雨（特に夏季（6～9 月）は平年の 42%（443mm））により、最大 55%の取水制限が発生し、利水に大きな影響が及んだとされる。

東北地方の米代川水系に関する研究（石井ら，1998）では、夏季の渇水時流量は、降水量、気温に加え、森林量（もしくは森林バイオマス量の蓄積）も影響しており、河川の水枯れについては、夏季の高温及び森林量の増大が一因となっているため、更新に伴う森林の伐採は、渇水緩和機能および干渉防止機能に役立つ場合もあるとしている。

## 2) 水温・水質

気候変動に伴う気温上昇や渇水により、河川水の水温・水質に変化が生じ、これが水利用や水域の生態系等に影響を及ぼすことが想定される。

既存の報告（尾崎ら，1999）では、9 年間にわたる国内の 34 の一級河川の水質データとその流域の気象データ（AMeDAS）を併せて、流域内最下端の河川水質（水温、BOD、DO、DO 飽和度、SS、pH）への影響を統計的に解析している。その結果から、いずれの地域でも、気温と各水質項目の相関には季節差が見られること、特に夏場には気温と水温に強い正の相関（傾き 1.4）が見られ、これは強い短波輻射の影響であることが指摘されている。また、冬場に比べて、夏場では、その他の多くの水質項目でも相関が強く（1℃上昇に対して、BOD で 1.10 倍）、これは生物活動が活発化するためと推測している。一方、降水量と各水質項目との相関は、水温以外には見られず、影響は小さいと考えられる。

森（2000、2007）は、気温上昇による降水量の減少を想定し、1994 年夏期における木曾川の事例を用いて、河川水温と気温の月平均値の間に有意な相関が認められることを指摘している。そして、流域の保水力があり、無降雨での流量が十分に確保されている河川<sup>2</sup>を除き、地球温暖化は河川水温の上昇に影響することを示している。

また、香川県環境森林部環境政策課（2007）は、県内の 5 河川（財田川、土器川、綾川、香東川、鴨部川）について、1979～2005 年までの 27 年間に観測した水温測定結果の年平均値の変化を調べた結果、各河川とも年平均水温は上昇傾向にあり、その上昇率は 0.012～0.065℃/年であったことを報告している。水温上昇は、都市活動からの廃熱や河川流量低下などにも影響されるため、単純に地球温暖化に影響された結果とは判断できないが、温暖化影響を認識するために、河川水温モニタリングデータが解析された事例である。

さらに、埼玉県越生町<sup>おこせまち</sup>において、1996 年 5 月から 6 月にわたり発生したクリプトスポリジウム<sup>3</sup>水系集団感染（患者数 8,000 名以上）において、気温の変化が影響している可能性が報告されている（遠藤ら，2006）。最高気温が摂氏 25 度を超えると、飲水行動が変化し飲水量が 10 倍になるという仮定をおくと、集団感染の顕在化を定性的に説明できそうであるというものである。水源における病原体の相対的に高い濃度での存在と、浄水処理の不備あるいは瑕疵とが同時に生じている場合、気温の上昇により、需要側において飲水行動が変化して大規模集団感染の発生の引き金につながる

<sup>1</sup> 河川の日流量を 1 年を通じて小さい方から大きい方へ整理したとき、1 年を通じて 185 日はこれを下回らない流量。河川の流況を示すための指標の一つ。

<sup>2</sup> 直接流出量（降雨が土壌に浸透せずに直接河川に流出する水量）に対して、基底流出量（無降雨時の低水流出する水量）が量的に大きな比率を占める流域の河川。源流域に森林などの地下水涵養域が多く比較的なだらかな流域の河川が該当する。

<sup>3</sup> クリプトスポリジウムは、人の小腸の上皮細胞に寄生し増殖する原虫であり、感染後 4～10 日後に下痢や腹痛、38℃を越えない発熱、食欲不振、嘔吐などの症状が出る。水道水や食品を介した集団感染が問題となる。



## 最終稿

おそれもあるという事例である。相対的に高い気温が長期に継続するような気候になった場合、水に関する社会基盤システムの弱い部分（脆弱性）が顕在化するおそれがあり、水資源社会基盤システムの強化が必要となる。

### (3) 湖沼・ダム湖

#### 1) 水量

気候変動によって極端な渇水や豪雨が増えると、湖沼・ダム湖の水量に変化が生じ、これが水利用や水域の生態系等に影響を及ぼすことが想定される。

琵琶湖では、1994年9月、渇水によって観測史上最低水位となる B.S.L.<sup>4</sup>-1.23m まで水位が低下した。また、1995年5月には、洪水により B.S.L.+0.93mにまで水位が上昇した。近年では、2000年9月に B.S.L.-0.97m、2002年には9月から12月の長期にわたって同-0.9m 前後の低水位を記録する（最低水位は同-0.99m、11月1日）など、渇水が頻発し、水位低下の度合いも大きくなってきている（滋賀県琵琶湖研究所, 1996）。

神奈川県では、1996年に、1967年以来29年ぶりの渇水に見舞われた。まず、1995年8月以降の記録的な少雨により、相模湖・津久井湖・丹沢湖の貯水量が大幅に減少し、県営水道、横浜市営水道、川崎市営水道、横須賀市営水道は、1996年2月26日から5%、3月4日から10%の取水制限を実施し（県営水道、横浜市営水道、横須賀市営水道は同率の給水制限も実施）、一部地域で断水が発生する等の影響が出た。4月に入ってからはまとまった降雨があり、4月24日に取水制限が解除されたが、6月に入っても空梅雨のため雨が降らず、相模湖・津久井湖・丹沢湖の貯水量が満水時の40%を切ったため、県営水道、横浜市営水道、川崎市営水道、横須賀市営水道は、7月5日から5%、11日から10%の取水制限及び給水制限を実施し、一部地域で断水が発生するなどの影響が出た。その後、7月20日から台風の影響による大雨があり、7月23日に取水制限が解除された。気候変動により大きな渇水の頻度が増える場合には、このような取水制限・給水制限、断水等の社会的な被害がもたらされることも考えられる（神奈川県ホームページ）。

さらには、伝統行事・文化財等への影響も想定される。例えば、諏訪湖の伝統行事である「お神渡り<sup>5</sup>」は、「明海（結氷せず）」及び「お神渡りなし」の記録の頻度が1951年以降急速に増加しており、現時点では気候変動が要因であるかどうか定かではないが、気候変動が進行すれば、このような現象も増えるものと考えられる（新井ら, 2000）。

#### 2) 水温・水質

気候変動に伴う気温上昇や渇水により、ダム湖・湖沼の水温・水質に変化が生じ、これが水利用や水域の生態系等に影響を及ぼすことが想定される。

福島ら（1998）は、17年間にわたる水質観測資料をもとに、霞ヶ浦における水質に気象が及ぼす影響を解析し、気温1℃上昇に伴い、水温は0.75～0.96℃、CODは0.92～1.7mg/L、SSは3.9～11.9mg/L上昇していたことがわかった。また、流入河川水温がダム貯水池水温に与える影響についての予測モデルが構築されているが、その流入河川水温は移動平均気温との相関が高いと指摘されている（藤田ら, 2006）。

琵琶湖では、1994年の渇水期間の夏季には、北湖の表層水温が平年より高く、水温躍層<sup>6</sup>の形成が強くなったこと、渇水のため河川からの栄養塩類・懸濁物の流入が少なく、表層水はきれいに見

<sup>4</sup> 琵琶湖基準水位

<sup>5</sup> 「お神渡り」とは冬に湖水の氷結面の一部にできる盛り上がった氷堤のこと。気温が下がると氷が収縮して裂け、そこに下の水が上がって結氷し、気温の上昇に伴って氷が膨張して、裂け目の氷が持ち上げられ、それが道のように続いている現象。諏訪湖では諏訪大社上社から男神が下社の女神のもとへ通った道筋といわれている

<sup>6</sup> 水温躍層とは、太陽により温められた表層水と冷たい深層水の間が存在する、水温が急激に変化する層のこと。水温躍層を境にして上層(表層)と下層(深層)では密度が大きく異なるため、ほとんど水が交流することはなく、水質的に異なる環境が作り出される。

## 最終稿

えるが（透明度は 9～14m と例年に比べ高い）、目に見えない躍層付近ではクロロフィル-a 濃度のピークがあり、水温躍層付近で植物プランクトンが増殖していることが報告されている。また、速水・藤原（1999）は、滋賀県の観測データをもとに琵琶湖の水温上昇の傾向を明らかにしている。気温の上昇速度（0.07℃/年）に比べて、湖水温の上昇は高く、その傾向は湖底ほど顕著である（0.123℃/年）ことを指摘している。水温上昇による微生物活性の増加に伴い、貧酸素化の懸念増加、水温上昇に伴う飽和溶存酸素濃度の低下、冬季間の短縮による水温成層期の長期化など酸素供給の不足による湖底の貧酸素化に拍車をかける可能性を指摘している。

富栄養化については、全国の管理ダムにおける水質観測データおよび水質障害発生記録をもとにした検証によって、年平均気温が 10℃ を越えると、急激にアオコ発生確率が上昇する傾向が見られたとしている（草場ら、2007）。小河内ダムのケーススタディ報告（北澤ら、2007a、2007b）では、湖水流動・水質モデルによって再現性良くアオコの鉛直分布を表している。また、流入河川の水温上昇、夏季のダム湖の表層放流により、アオコの発生が促進されるとしている。

さらに、気温上昇だけでなく渇水（降雨量減少）によっても湖沼水質の変化がもたらされた例として、琵琶湖の例や宍道湖の例がある。1994 年の琵琶湖渇水では、夏季（6～8 月）の降水量が 208mm で、琵琶湖水位は最低のマイナス 123cm を記録した。水位低下時においては、植物プランクトンの栄養塩摂取及び強固な成層形成により下層からの N、P 補給が少なく、低濃度で推移し、秋口には北湖の透明度が高くなっていった。一方、浅い南湖では湖水の停滞と赤野井湾からの汚濁負荷により高めの推移となり、秋口までに 27 日連続でアオコが発生した。（松居ら、1997）、（山中ら、1995）、（大槻ら、1995）、（滋賀県琵琶湖研究所、1996）。同じく 1994 年の渇水の際、宍道湖においては、塩分濃度が上昇した結果、底層水が貧酸素化し、それによって湖底からの栄養塩の溶出が促され、赤潮の被害が拡大した（橋谷ら、1995）。

## (4) 地下水

### 1) 水量

地下水に関しては、気候変動により渇水の頻度が増加した場合、代替水源として地下水利用が増加し、過剰採取によって地盤沈下をもたらし等の影響が想定される。

1994 年の渇水の影響により、西日本では 1,180 万人が断水や給水減圧に悩まされた。80% 近くの水質環境観測所で 1993 年よりも水質が悪化する観測結果が出た。さらに、地下水の利用によって地盤沈下が増加した。表 3-3 に濃尾平野（名古屋周辺地域）の例を示す。気候変動により大きな渇水の頻度が増えれば、このような影響も生ずる可能性が考えられる。

表 3-3 渇水による地下水利用の増加と地盤沈下（名古屋周辺地域）

濃尾平野（名古屋周辺地域）			
年	沈下量 2cm 以上	沈下量 1～2cm	備考
1992	2	76	1,500 箇所の観測地点中
1993	0	0	
1994	69	545	
1995	1	19	
1996	3	36	

（原沢ら、2003）

## 最終稿

### 2) 水温・水質

地下水の温度は様々な要因によって影響を受ける。地球温暖化に起因する地下水温上昇に関しては、アラスカ・北米各地で観測・解析が行われており、広範囲に地球温暖化の影響が表れていることが示されている。日本では、東京都に位置する深井戸の地下水鉛直分布の測定から、地表面温度の上昇に伴い熱輸送が地中深くまでに及び、地下水温を上昇させていることが明らかになっている（谷口他, 1996）

また、水質に関しては、地球温暖化による海面上昇に伴い、沿岸部での地下水の塩水化が起こることが想定されている。地下水を重要な水資源としている沿岸地域にとっては、塩水化は深刻な温暖化影響となる。神野・広城ら（2006）では、千葉県の上総砂丘に形成されている淡水レンズの縮小と塩分濃度の上昇例、感潮域からの塩水浸入促進に関する指摘がなされている。我が国の沖積平野沿岸部での地下水利用に関しては、小規模自治体の水道、工場用水、個人事業、農・水産業への塩水化の影響を指摘している（塩化物濃度の基準は、水道では 200mg/L、農業用水では水稲で 500～700mg/L とされている）。

**(5) 気候変動の進行に伴い、懸念される事象の既存類似事例**

本図は、(1)～(4)において挙げられた事例の一部を地図上に示す形で作成したものである。個々の事例は、様々な要因が想定され、現時点で必ずしも気候変動による影響とは断定できないが、気候変動が進行すればさらに類似の事象が増加する可能性があると考えられる事例である。

事例の色は、水源タイプ（河川、湖沼・ダム湖、地下水）の違いを示す。

- 緑色：河川の水量、水質等に関する事例
- 水色：湖沼・ダム湖の水量、水質等に関する事例
- 橙色：地下水の水量、水質等に関する事例

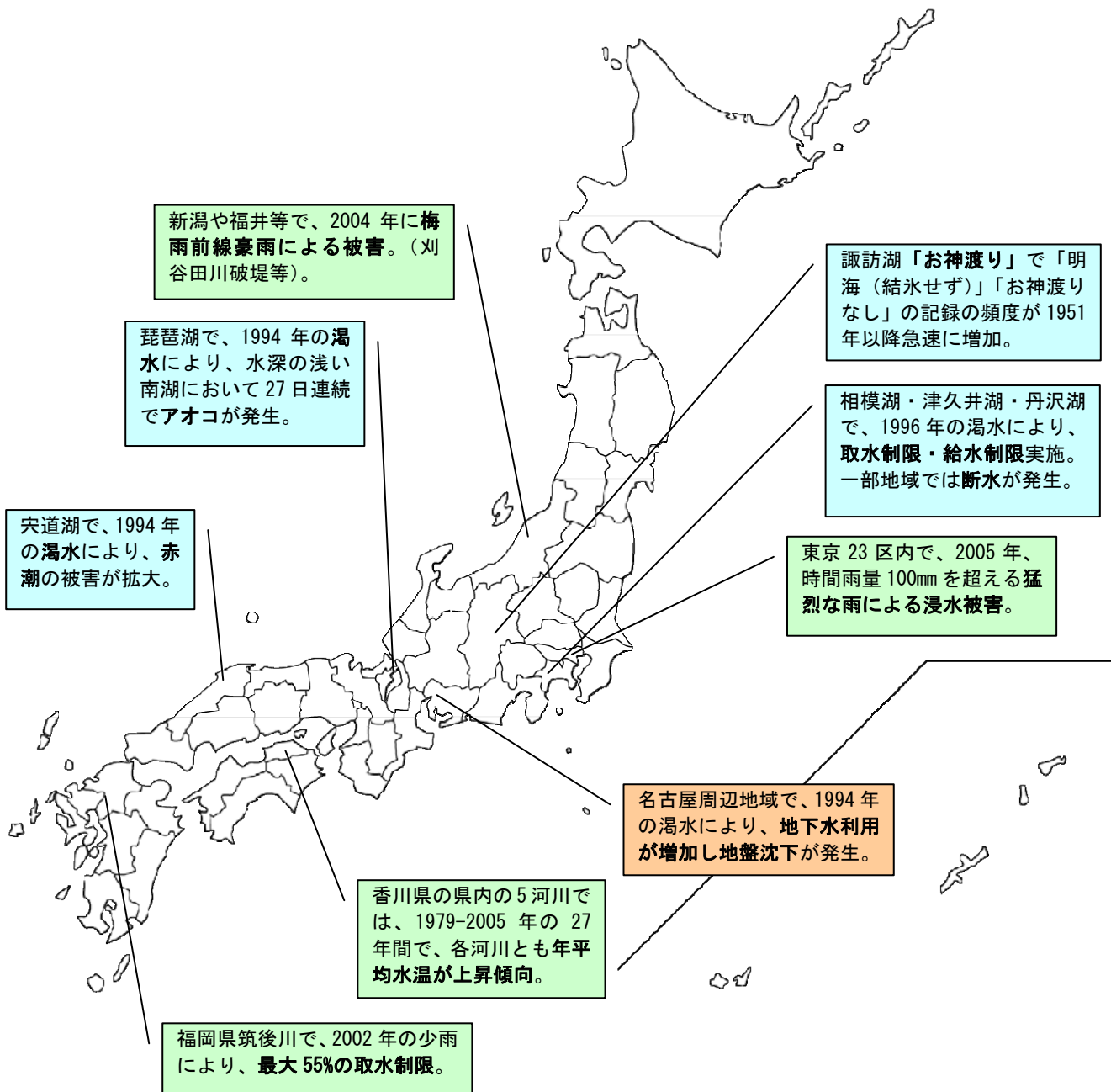


図 3-7 気候変動の進行に伴い、懸念される事象の既存類似事例

### 3.3 将来予測される影響

水環境・水資源分野において将来予測される影響について、水源のタイプ別に以下に整理する。

#### (1) 河川水

##### 1) 水量

##### ① 渇水リスクの可能性

現時点における気候予測の限界から、精緻な政策議論に今そのまま用いることには慎重さを要するが、気候変動予測と水文流出モデルを組み合わせ、将来の気候変動が水資源確保にもたらしうる課題について有用な情報を得ようとする試みがなされている。国土技術政策総合研究所は、「気候変動が水資源に与える影響評価委員会」（水文・水資源学会）の下で、利根川流域を対象に、河川流量の年間変動パターンが、現在（1981～2000年の平均）と約100年後の将来（2081～2100年の平均）とで相対的にどう変化するかを試算している（川崎将生, 2005）。それによると、源流域の積雪量が大きく減るという予測結果が主因となって、矢木沢地点（利根川源流からの水量を代表する地点）において、融雪期に生じる最大流量が現在に比べて将来（約100年後）はかなり減少し、最大流量の発生時期が約1ヶ月程度早くなり、冬季は現在に比べて流量が増加する。

この変化傾向は、代かきなどの農業用水の需要期における河川流量が減少すること、その分だけダムからの補給水量が増大することを意味する。また、増大する冬季流量や早まる融雪水がその時期の貯水池を満水状態にしやすくなるので、ダムに貯留できず有効に利用できないまま流れてしまう河川流量が増大することも意味する。したがって将来は、農業用水の需要期以降少雨が続き、現在以上に渇水の発生が懸念されることになる（図3-7参照）。

以上からわかるように、我々が依存している水資源確保システムは、年間流量変動の基本パターンを前提に成り立っている部分がある。温暖化が水資源確保に与える影響については、年降水量の年ごとの変動や少雨事象だけでなく、こうした基本パターンの変化にも目を向けておく必要があり、その意味で、積雪量の減少は、比較的是っきりした温暖化影響であることと合わせ、注視すべき代表的な事象と言える。

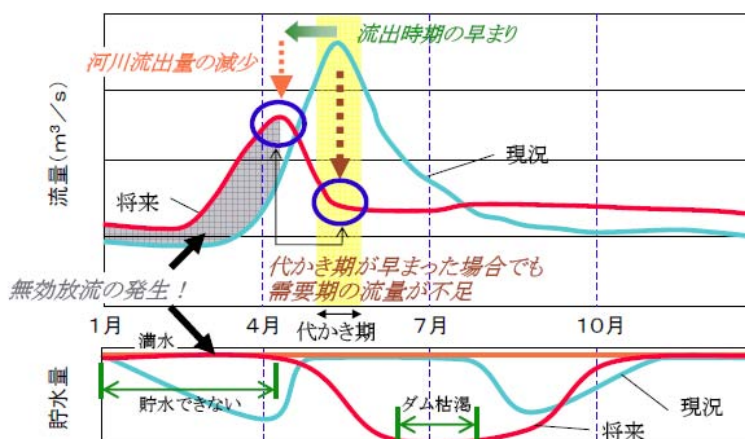


図3-7 気候変動による少雪化が河川流量の年間変動パターンと水資源確保に与える影響についての説明（後者への影響はダム貯水量で表現）（国土交通省，2007）

### ②洪水リスクの可能性

代表的な極端現象である集中豪雨や大雨の発生状況が、地球温暖化とともに日本周辺において具体的にどのように増大するかは、防災上極めて重要な予測ターゲットとなる。しかし、こうした極端現象を含む分解能の高い気候予測については、急速な進展が図られている最中であり、現段階ではまだ予測結果に不確実性を伴う。それでも、本事象の政策上の重要性に鑑み、気候変動の予測計算を豪雨に伴う災害リスク等の検討に役立てようとする試みがなされている（国土交通省 社会資本整備審議会河川分科会 気候変動に適応した治水対策検討小委員会）。

そこでは、代表的な温室効果ガス排出シナリオの下で気候モデル（RCM20、GCM20）を用い、100年後の日本における年最大日降水量の現在に対する増加率を求め（計算値同士で比較）、今後さらに予測精度の向上が必要とした上で、1.1～1.3倍、最大で1.5倍程度の（洪水を起こすような降雨事象に関する）降水量の増加率を見込むことが妥当としている。さらに、GCM20の予測結果から算出した、各地域における100年後の年最大日降水量の変化率から、現計画の治水安全度がどの程度低下するか、全国82水系の一級河川について試算を行っている。

それによると、現計画が目標としている治水安全度は、200年に1度程度の場合は90～145年に1度程度、150年に1度程度の場合は22～100年に1度程度、100年に1度程度の場合は25～90年に1度程度となり、発生頻度が高くなる。このことから、将来の降水量の増加により、現計画が目標としている治水安全度は著しく低下することになり、浸水・氾濫の危険性が増えることを明らかにしている（国土交通省, 2007）。

気候予測モデルの進展を適切に組み込んで、今後さらに検討の精度を上げていく必要はあるものの、温暖化に伴う気候変動が、今まで我が国において進めてきた治水対策の効果を減じ、ようやくに獲得してきた安全・安心な国土づくりを後退させる可能性があることは、今後の治水対策のあり方の検討において重要な課題として認識すべきと言える。

### ③国内各地の予測事例

国内各地における予測事例としては、以下の例が報告されている。

北海道では、畑地の灌漑用水と防除用水<sup>7</sup>の両方が増加し、水需要量が増加する。将来の土地利用の変化や作目の変化を無視すれば、現在の地域ごとの畑地利用面積からそこでの水資源の需要変化量を試算できる。北海道全体では、7,235万 $m^3$ の新たな用水が必要と試算される。温暖化の影響は植食性昆虫などの害虫の世代数の増加、分布圏の北への拡大および越冬生存率の向上などが予想され、これに応じた栽培体系・防除手段の検討も必要となる。

利根川流域は、首都圏の水供給の大部分を支えており、気候変動による少雪と空梅雨によって深刻な渇水になる可能性が高い。実際、2007年は少雪であり、代掻き期以降のダムの貯水容量は少なく、渇水が危惧された。春季、梅雨期の降雨によって渇水は生じなかったが、同様の不安を毎年感じるようになるかもしれない（建設通信新聞, 2007年）。

同じく利根川上流域では、RCM（気象研究所が開発したGCMの一種）の計算結果によると、年間流出量が増加するが、融雪量の減少などによりダムの必要容量は2億 $m^3$ 増加する。これを全てのダムで貯えることは困難であると指摘されている（藤原ら, 2006）。

気候モデルによる将来予測では、首都圏の洪水リスクが増加すると予測されている。これは、都市域の資産価値が大きいため、同一の被害でも都市域の経済損失が大きいためによる。渇水についても積雪水資源の減少から、農地だけでなく都市域の水供給に問題が出ることが予想されている（佐藤ら, 2008）。

北九州においては、過去の渇水の経験から、中・下流域において平水流量以上の流量は10年確率渇水年をかなり下回るような状況が起り得ると考えられる（河村ら, 2004）。また、夏季におい

<sup>7</sup> 植食性昆虫などの害虫の防除のために必要となる水の総称



## 最終稿

て降水量が平年の 40%程度に落ち込んだ場合、最大 55%の取水制限の発生も考えられる（神野ら, 2005）。

九州北部から中部にかけての地域では、2030 年頃には水田の蒸散量が約 20%増加し、潜在的な水不足にさらされる。つまり、少雨の年には現在よりもひどい渇水に直面する危険性があるといえる（九州沖縄農業研究センター, 2006）。

### 2) 水温・水質

9 年間にわたる国内の一級河川についての水質データおよび流域内気象データ（AMeDAS）を統計的に解析した結果（尾崎ら, 1999）から、国内全域における傾向として、特に夏場において、気温 1°C 上昇に対して、水温は約 1.4°C 上昇すると考えられる。これに伴い BOD は、生物活動の活発さに由来し、気温 1°C 上昇に対して、BOD で 1.10 倍になると推測される。

また、水文流出モデルと熱収支モデルを組み合わせた数値計算によれば、宮城県の名取川流域の場合、気温の上昇に伴う下流の水温上昇が激しく、積雪が重要な役割をもつことが指摘されている（白岩ら, 2006）。気温の上昇に伴い、積雪域の下流地域の河川水温が加速度的に増加することによる生態系への悪影響が懸念される。

## (2) 湖沼・ダム湖

### 1) 水量

GCM による将来気候では、豪雨の増加が指摘されており、これに伴う斜面災害の増加が報告されている。斜面崩壊は、河川中の土砂輸送量を増加させ、ダムの堆砂量を増加させる。ダムの堆砂は、貯水容量の減少をもたらす、洪水調整や水供給の能力を減少させる。ダムの堆砂量は斜面崩壊の確率に対して指数関数的に増加するため、気候変動によって堆砂量は増加する可能性がある（秋本ら, 2008）。

### 2) 水温・水質

浅い湖沼として霞ヶ浦を対象とした研究では、気温 1°C 上昇に伴い、水温は 0.75~0.96°C、COD は 0.92~1.7mg/L、SS は 3.9~11.9mg/L 上昇すると予測されている（福島ら, 1998）。また、全国の管理ダムにおいて得られたデータから、年平均気温が 10°C を越えると、急激にアオコ発生確率が上昇すると予測されている（草場ら, 2007）。

Komatsu ら（2007）は、GCM A2 シナリオを基に、島地川ダム湖の水質・水温の予測を行っている。その結果によれば、2090 年代には 1990 年代に比べて 10 年平均水温が 3.4°C 上昇（表層で 3.8°C、深層で 2.8°C）し、これが夏場の水温躍層生成期間の延長を招き、さらに水温躍層の深度が深まるとしている。これにより有機物の好気分解が進み、DO<sup>8</sup>低下が促進され、それとともに湖底からのリン溶出が増加して深層におけるリン濃度が増加する。結果的に、循環期における表層でのリン増加となり、プランクトン増加を招くこととなる。

琵琶湖でも、気温上昇に伴う水温上昇によって、夏期におけるプランクトンの増加が予測されている（Hassan ら, 1998）。

<sup>8</sup> 水中に溶解している酸素の量のことで、水質汚濁状況を測る代表的な指標の 1 つ

**(3) 地下水****1) 水量**

気候変動によって海面が上昇すると、淡水レンズ<sup>9</sup>が縮小し、地下水利用可能量が減少する（神野ら, 2006）。また、海面上昇が海岸帯水層への塩水侵入とゼロメートル地帯での地表面湛水を加速させることを実験的に検証した研究例がある（増岡ら, 2005）。一方で、塩水侵入が海面上昇に伴い助長される点については、土地利用や人口の変化の方が影響力として大きいことも指摘されている（S. Priyantha et al., 2006）。

さらに、海面上昇は、地下水中の任意の2点間での地下水の流動の差の減少を引き起こし地下水流出量の減少をもたらす可能性が予想されるが、これは研究が始められてまだ間がない分野である（谷口, 2005）。

**2) 水温・水質**

水温に関しては、気候変動に伴い、地下水温が上昇することが指摘されている（池田ら, 1999）。

水質に関しては、海外の事例であるが、Reynolds et al. (1992) や Murdoch et al. (1998) によると、ウェールズ中央部の渓流水、ニューヨーク州・ビスケット川源流域では、温暖化や乾燥化により河川集水域の硝化活性が増加して、土壌中の硝酸イオンが溶出し、渓流水や河川水の硝酸イオン濃度が増加しているとの報告がなされている。また、豪雨頻度の増大により、地下水への硝酸態窒素の溶脱及び大きな分散が生じて硝酸態窒素濃度が上昇する可能性があるとの報告もある（杉田ら, 2006）。一方で、都市郊外域の地下水の硝酸態窒素濃度に関しては、温暖化影響だけでなく、人為的な窒素負荷も関わっていることに留意が必要である。小倉（2005）によると、東京府中市の湧水では、人為的な土壌への負荷が低減されたこととあいまって、湧水温度は約0.8℃上昇したものの、硝酸イオン濃度は徐々に低下していることも報告されている。

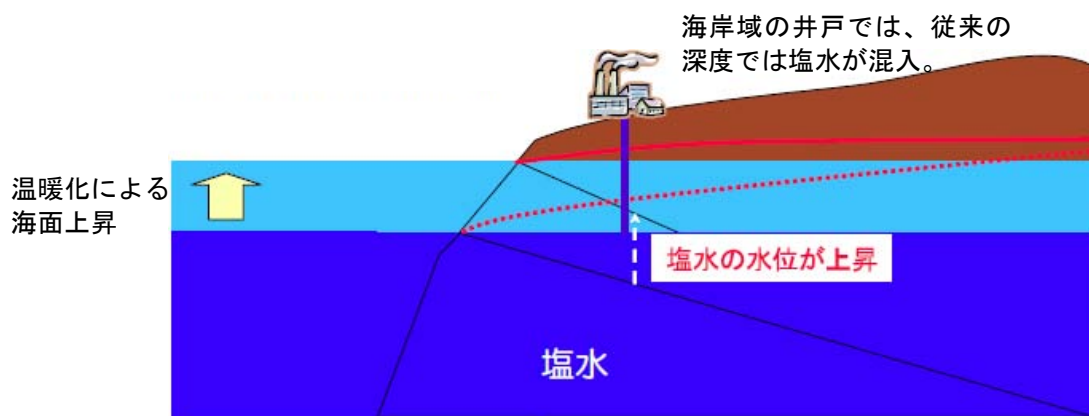


図 3-8 気候変動が地下水に及ぼす影響（地下水塩水化）（国土交通省, 2007）

<sup>9</sup> 淡水レンズとは、透水性の土質の地下で、海水と淡水の比重差から、地下水（淡水）が海水（塩水）の上にレンズ状の形で浮いているものをいう

### 3.4 脆弱性の評価

水環境・水資源分野における脆弱性は、自然的脆弱性と社会的脆弱性とに大別される。それぞれの脆弱性の特徴は、以下のように整理できる。

**表 3-4 水環境・水資源の持つ脆弱性**

自然的脆弱性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 降雨や降雪は不安定かつ不確定である</li> <li>・ 淡水資源は地球上で偏在しており、かつ、その偏在は容易に移動する</li> <li>・ 水の量と質、気温の変化は、自然生態系に大きな影響を与える</li> <li>・ 循環系であるがゆえに、水環境・水資源は、一部の変化が全体に影響を及ぼす</li> </ul>
社会的脆弱性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 水は、人間の衛生的環境を維持するための素材であるが、疾病を伝播する媒体でもある</li> <li>・ 上下水道などの社会基盤システムはそれぞれの地域で、基本的に必要量のみに対応して設計されており、降水量の大きな変動など外的変動への適応力は小さい</li> <li>・ 上下水道など社会基盤システムは、自然災害（地震、洪水、濁水、津波、火山噴火など）の影響を受けやすい</li> <li>・ 同じ水資源に複数の水利権がある場合、水量の変動などが容易に社会的不安定要因になる</li> </ul>

(大垣, 2008 より改変)

自然的脆弱性は、自然現象に基づく根本的な脆弱性のため、適応策を講じることは難しい。一方、社会的脆弱性は、比較的、適応策を講じやすい。

これらの自然的脆弱性、社会的脆弱性を総合的に評価する上で必要となるデータは、まだ十分に整備されておらず、また、評価のための具体的手法・ツールも未開発の状況にある。これらのデータの整備、手法・ツールの開発は今後の研究課題である。

次項「(1) 脆弱性の評価手法の例」では、上記を前提に、まず、水環境・水資源分野において脆弱性の評価を行う上で重要な考え方・視点について述べるとともに、主に社会的脆弱性のうち、農業用水、生活用水等の水需要の側面からみた脆弱性に着目して、既存の知見やそれらから推察される事項を整理する。

**(1) 脆弱性の評価手法の例****1) 水環境・水資源分野の脆弱性評価において重要となる視点**

脆弱性評価に関しては、「平均値」の変化（平均的な年間変動パターンの変化を含む）を対象にする場合と、集中豪雨や少雨などの「極端事象」の変化を対象にする場合とで、その基本的なアプローチが異なってくると考えられる。前者については、各地域において、人間活動と水資源・水環境とをつなぐ諸システム（以後「水システム」と呼ぶ）が現在までの「平均値」を前提に成立していると考えられ、「平均値」のズレが新しい事態を生み出す可能性があることから、水システムに及ぼす温暖化影響、それへの対処の難易度を把握しておくことが重要である。冬季の豊富な積雪がもたらす融雪水を前提にした水資源確保システムへの影響（3.3 将来予測される影響の(1)河川水の①渇水リスクの可能性の事例）、稲作の形態に及ぼす影響、気温上昇に伴う生活用水の変化、水温上昇等による湖沼水質と形成パターンの変化、海面上昇に伴う地下水の塩水化などがこの代表例と言える。他方、そうした「平均値」は、日本の中でも地域ごとに大きく異なっており、各地域で平均値に応じたシステムが形成されている。したがって、影響や特に難易度の検討においては、ある地域で今後向かうと予測される平均値に似た状況をすでに有している（あるいは経験している）別の地域の水システムを、地理条件や社会経済状況の違いに留意しつつ部分的にでもリファレンスとすることが、机上検討中心にならざるを得ない予測計算・評価を補完する実際的手法として有用と考えられる。また、各地域での対応策の実施がより広い圏域全体として、あるいは異なる目的を持つ対応策の間で不整合とならないかを把握し、不整合への対処の難しさを評価するという、地域および分野を横断する総合的な視点からの検討も必要になる。気温上昇による育成障害を防止するために苗の移植日をずらすことと、融雪水減少に対応した水資源確保策との関係などはこの一例である。

後者の「極端事象」の変化に関しては、次のことが言える。我が国は、極端事象がもたらす脅威（水害、土砂災害、渇水など）に直面してきており、施策対応の長い蓄積がある。したがって、脆弱性評価に当たっては、まずは、この過程で用いられてきた危険度（あるいは安全度）評価法を、温暖化に伴う外力変化の予測を適切にインプットした上で活用するのが順当である。その評価法は大きく次の2つに分けられる。

- ①重大な被害や支障が生じない極端現象のレベル（確実に対応できる変動幅、あるいは被害や支障が生じる確率など）
- ②そのレベル（変動幅）を越えた極端事象が発生した時に起こりうる被害や支障とその社会経済上のダメージの大きさおよびそこから回復力など

治水分野で例示すれば、大きな氾濫・浸水が起こらないですむ最大の洪水規模の発生確率（3.3 将来予測される影響の(1)河川水の②洪水リスクの可能性の事例）が①にあたり、それを超える規模の洪水が発生した際に起こりうる氾濫状況とそれがもたらす被害、その社会経済上の損害などが②に当たる。そして①は、たとえば「年超過確率 1/100 の洪水を安全に流す河川整備」「代表的 10 年間で一番の少雨年にも大きな渇水の害をもたらさない水資源開発」というような形で、防災や水資源確保に関わるインフラ整備の目標設定において重要な役割を果たしてきた。

ただし、こうした経緯もあって、①に属する評価法は、現状（あるいはその時々）の防災システムや水資源確保システムの持つ脆弱性をきめ細かく把握するという観点からはまだ十分とは言えず、今までの技術的蓄積の上に立って、また急速に進展する気候予測技術の取り込み方とともに、高度化を図っていく必要がある。また、上記②については、洪水・高潮・津波・土砂災害・火山に関するハザードマップの整備・普及が進み、また最近、中央防災会議「大規模水害対策に関する専門調査会」が洪水氾濫による死者数、孤立者数、浸水継続時間に関する被害想定をとりまとめる（内

## 最終稿

閣府, 2008) など、施策的にも重点が置かれるようになってきた。①と組み合わせ温暖化影響という視点を入れて、評価手法の高度化を一層進める必要がある。

### 2) 水需要の側面からみた脆弱性

#### ① 農業用水

積雪水資源の減少については、数値計算によって小雪年と多雪年の積雪水資源量差を代掻き期の農業用水量で比較し、考察した。(那須ら, 2007)。稲作地帯の新潟や秋田で膨大な積雪水資源の損失が認められるが、そもそもの積雪量が多いので小雪時でも十分に農業用水をまかなうことができる。一方、北上川流域のような太平洋側は、代掻き期の農業用水が不足しており、小雪年には大きな渇水問題が生じる。つまり、積雪水資源の脆弱性としては、太平洋側流域の脆弱性が大きいといえる。

#### ② 工業用水

境田 (1988) によると、東京都の過去データを基に 2.0°C の気温上昇で 2.4% の使用量増加が見込まれるとしているが、近年、日本においては回収率 (再利用水利用) が約 80% 程度の高い割合で推移している。また、淡水補給量はここ 20 年ほど減少傾向となっている (梶田, 2005)。また、温暖化に伴う主要業種の変化、業種内での利用量変化は、その他の経済情勢変化に伴う変化量に比べて非常に低いと考えられ、温暖化による工業用水需要量への影響は小さいと考えられる。

#### ③ 生活用水

柏井ら (1997) は、これまでの気温と生活用水使用量の相関を元にモデルを構築しており、平均気温 3°C 上昇で生活用水使用量は、1.2~3% 増加すると見込んでいる。また、地域別 (旭川、名古屋、那覇) によって影響が異なるとしている。また境田 (1988) は、東京のデータに基づいた予測において、1.5°C 上昇で 2%、2°C で 3% 前後の増加と予測している。以上をまとめると平均気温が 2~3°C 上昇すると、1~3% 程度の増加となる可能性がある。

しかし、日本においてはこのところ一人当たり生活用水使用量が漸減している (梶田, 2005)。全国的には人口も頭打ちとなっているので、日本国内での生活用水使用量は減少分の方が大きいと考えられる。また節水機器の普及は、今後の減少傾向に一役買うと考えられる。中川ら (2008) によると、節水機器の普及により、2025 年には現在より 6%~15% の減少が見込まれる。

以上のことを考慮すると、生活用水使用量は現在に比べて増加する可能性は低く、脆弱性は低いと考えられる。懸念材料としては、温暖化とは別の driving force であるが、人口の偏在化による局地的な水需要増大が挙げられる。大坂谷ら (2006a, 2006b) によると、札幌に比べ福岡では、渇水体験により増加傾向が抑制されるといった報告があり、水需要量は柔軟的に水供給量に対応すると考えられ、温暖化に対する脆弱性は低いと考えられる。

### (2) 脆弱性評価における課題

脆弱性評価のための手法・ツール等に関する課題について、以下に整理する。

脆弱性評価を机上検討だけに頼るには限界があること、とりわけ極端事象が発生した時に起こりうる被害の大きさやそこからの回復力の評価には、自然外力に対する人間の側のダイナミックな応答という非常に幅の広い複雑な事象を考慮することが求められるので、実際に起こった極端現象による様々な被害等の実態と影響を分析し、評価法の高度化に役立つ共有知見として継続的に蓄積していくことが肝要である。洪水や渇水などがもたらす被害、影響、教訓等は、地域によって、また時代の推移とともに多様な形態をとりうるので、様々なケースを分析し、それぞれに見られる脆弱性のエッセンスを掘り起こしておくことの意義は大きい。こうしたことを通じて、地域社会の持つ災害対応能力などの評価法を加えていくことも、適応策の検討に役立つ脆弱性評価という観点から重要である。

脆弱性の評価において、もう一つ重要な課題は社会経済状況等、人間の側の長期トレンドの設定である。これには、例えば人口、経済成長、食糧自給率、土地利用状況などを代表例として挙げることができ、国内だけでなく、国際的な状況と密接な関係を持つ項目もある。これらについて長期的な見通しを立てることは困難であり、このことは、気候変動予測の現段階における不確実性と相まって、脆弱性評価を難しいものにする。これは、地球温暖化への対応が最終的には100年オーダーの長期にわたる取り組みになることによる。このため、複数の幅広いシナリオを設定し分析する、気候変動の見通しと社会経済状況の推移を見据えた順応的対応を基本にするなど、長期予測が本質的に難しいことを理解して評価を行っていくことが基本になる。その上で、場合によっては、脆弱性が小さくなるシナリオを見出し、その状況のある程度積極的に作り出す方策を検討するなど、温暖化対応の時間スケールと社会経済状況の変化の時間スケールが大きくは変わらないことに着目した適応策の案出につなげることも考えられる。

また、水需要の側面からみた脆弱性の評価という観点では、工業用水需要量に関して、研究例が非常に少ないことが問題として挙げられる。生活用水需要量についても、経済状態による影響が考えられるが、研究例が非常に乏しい。このような水需要の側面からの脆弱性評価の研究蓄積も課題となる。

リスク（確率）や資源量等の観点から脆弱性を評価する手法の開発も課題となる。リスクや脆弱性の定義・評価手法については、様々な観点があり、統一されておらず、「温暖化に対するリスク」の定義を確立する研究が望まれる。その際、社会科学的な分析手法による成果を活用することも重要となる。

さらに、脆弱性評価の結果を分かりやすく伝える手法という点では、脆弱性をコストによって表現をする（単に金額だけでなく、家計に占める割合で示すなどの工夫も必要となる）、あるいは、OECD世界環境白書で用いられている信号表記（赤、黄、青）等のように、一般市民にもわかりやすい表現方法に留意することが重要となる。



## 3.5 適応策

### (1) 適応策メニューとその体系

IPCC 第4次評価報告書第2作業部会報告書では、水需給の適応オプションの表が示されており、水供給・水需要対策のそれぞれについて以下のオプションを挙げている。

#### <水供給>

- 地下水の調査と汲み上げ
- 貯水池とダム建設による貯水容量の増加
- 海水の脱塩
- 雨水貯留量の拡大
- 河川敷の侵略的な外来植物の除去
- 水の転用

#### <水需要対策>

- 再利用水による水利用効率性の向上
- 農事暦、作付穀物（輪作）、灌漑法、作付面積を変えることによる灌漑需要の低減
- 農作物（バーチャルウォーター）輸入による灌漑用水の低減
- 持続的な水利用のための伝統的な水管理手法の振興
- より高い付加価値で水利用に配分できるような水市場利用の拡大
- 水の保全を促すための測定と価格決定など、従量制等の経済的インセンティブの利用拡大

(IPCC, 2007)

ここでは、上記の IPCC の「水供給」「水需要対策」の二つに、「水環境管理」「治水対策」を加えた4つの項目ごとに、我が国における適応策の具体的なメニューとして想定されるものを示す。なお、治水対策については、水環境・水資源分野における適応策の大きな一つの柱であるが、その具体的なメニューそのものについては、「第5章 防災・沿岸大都市分野」において詳細に既存知見の整理が行われているため、ここでは省略し、基本的な方向性について言及するにとどめる。

また、ここで挙げる適応策のメニューは、気候変動影響に対する適応策として考え得るオプションを参考情報として示したものであり、必ずしもこれらの施策の導入を推奨するものではない。実際の選択に際しては、地域の様々な状況や制約等を考慮して検討される必要がある。

# 最終稿

## 1) 水供給

適応策メニュー	内容
雪ダムによる融雪流出の調整	ダイナマイト等を用いて渓谷に雪をため、融雪流出の期間を延ばす（宮本ら, 1990）。これは一部の地域では雪崩対策と組み合わせて利用されているが、水資源の目的のみでは高価な適応策となる。交通障害やスキー場の安全管理と抱き合わせの視点が必要である。
人工降雨、人工降雪による渇水対策	実地実験に流域水管理も含めた総合研究が気象研究所を中心に進められている（科学振興調整費, 2005 年度～）。これも高額であるが、費用便益解析とあわせて必要なときに利用できるオプションである。
積雪貯留期間を長期化するための常緑樹の植林	樹冠遮断 <sup>10</sup> の影響で、冬季の地面積雪量は、落葉樹林の方が常緑樹よりも多いが、消雪は常緑樹林の方が遅くなる。これは常緑樹の樹冠によって、日射が遮られることと風による熱交換が抑えられることが原因である。（泉ら, 2006）
ほ場内地下水水位制御システム	適作地域が北方に遷移し、農地の利用形態や用水計画の変更にともない、田畑輪換及び農地汎用化を目的とした水利用対策技術が有効である（小前, 2007）。これは、暗渠排水と地下灌漑の両方の機能を兼ね備えた施設を利用したものであり、水田から畑地または異なる作物への変換が容易である。
渇水対策としての導水、排水管理システムの導入	筑後川においては、1978 年及び 1994 年の渇水において、給水制限日がそれぞれ 287 日、295 日と、非常に大きな影響を受けた経験から、福岡導水、排水管理システムの導入、市民レベルの節水努力により、その後の対応が進み、平成 14 年の渇水（年間 1,661mm という小雨年、特に夏季（6～9 月）には、平年の 42%（443mm）にとどまった）の際、最大 55%の取水制限となったが、福岡都市圏では給水制限に至らなかったとしている（神野ら, 2005）。
海水の淡水化	技術的解決法として海水淡水化の導入が考えられるが、その障壁となるコストに関しては、回収率 60%以上の高圧・高回収逆浸透システムで 25%のコスト低減が可能であり、その他にも、製塩淡水化複合システム化によって 30%弱、前処理簡略化で 30%程度のコスト低減が出来るという報告（太田, 1999）がある。また沖縄の海水淡水化事業においては、夜間電力の有効利用、薬注率の見直し、膜管理の効率化による膜交換費の低減といったコスト低減化策をすすめている（奥村正明, 2002）。
地下ダム	地下ダムは建設費用が高額であることと地下水資源に依存するので適用できる場所が限られる。観光地などの生産性が高い、ある程度の降雨が期待できるなどの条件が必要である。
水道原水の特性の総合評価とこれに適した浄水プロセスの選定	水道技術研究センターを中心に実施された e-WaterII プロジェクトのなかで、さまざまな視点から水道原水の水質について統計解析を行い、水質の分類や総合的な汚濁指標の提案を行い、原水水質に適した浄水プロセスとの関係を整理している。結果として、温暖化に伴う水質変化に対して、水道原水の水質特性を総合的に評価した上で、将来の原水水質条件に応じた最適な浄水プロセス選定を検討する上で役立つ知見が提供されている。
深層地下水と浅層地下水の使い分け	深層地下水は、良質で安定した水源となる一方で涵養量以上に揚水することで地盤沈下が生じるため、水質面では劣るものの比較的豊富な浅層地下水を都市用水など飲料用を含めた生活用水以外の水利用用途に活用することで、渇水時におけるストック型水資源の深層地下水を保全することが適応策として考えられる。
水源涵養域の森林保全と深層地下水の保全	地下水は、涵養域－流動域を経て水利用のある地域へつながるといふ空間的な広がりがある。特に深層地下水は長い涵養プロセスを経て利用されていることから、この保全には、遠方の水源涵養域における長期的な視点での森林保全・管理が重要な適応型の対策となりえる。

<sup>10</sup>葉や枝に積雪がとらわれること

## 最終稿

適応策メニュー	内容
地盤沈下の抑制のための深層地下水の利用制限（揚水規制、課金制度など経済手法による間接的な抑制、代替用水確保等）	久山ら（2007）は、アジアの諸都市において水需要が増加する状況のなかで、気候変動により利用可能な水資源量が減少するなど、都市の水資源をとりまく状況を考慮して、地下水の水資源としての重要性を指摘している。揚水規制や代替水道の確保により地下水を貴重な安定水源として活用することなど、都市における持続可能な地下水管理に関する政策提言を行っている。地下水利用抑制には、過剰揚水に伴う地下水水位の低下や地盤沈下、塩水化のリスク低減にも効果がある。地下水利用抑制には、揚水規制による直接的な抑制、課金制度による経済手法による間接的な抑制、代替水の確保などがある。
下水処理水の再利用	温暖化への対応として直接的な対応策ではないが、今後の都市環境における水路が有するうるおい・安らぎをもたらす機能、ヒートアイランド現象緩和機能、災害時のライフラインとしての防災機能、地域コミュニティの再生への寄与など多目的な機能に着目し、その水源として、下水再生水や、地下街・地下鉄等の地下構造物への浸出水、雨水貯留水など、都市特有の水源の有効活用が想定される。
雨水貯留の普及と雨水浸透による地下水涵養	
都市域におけるトンネルなどへの浸出水の活用	

## 2) 水需要対策

適応策メニュー	内容
水運用の改善	耕地面積減少などをふまえた農業用水の水道用水などへの転用を進める。
農地の集約・水利権の再配分	日本の水の約 60%は農業用水であり、この効率的な利用が将来の水資源確保に必要である。減反や耕地の減少は進むが、農地を集約して、水利権の再配分を考える必要がある。
渇水時に地域で柔軟に水を融通し合う制度・仕組みの導入	東北地方の例としては、渇水時に周辺地域と協議し、水を融通し合う「番水制」を実施することで急場を凌ぐことが有効としている（青森県土木部河川課, 2000）。
市民レベルの節水努力	筑後川においては、1978年及び1994年の渇水において、給水制限日がそれぞれ287日、295日と、非常に大きな影響を受けた経験から、福岡導水、排水管理システムの導入、市民レベルの節水努力により、その後の対応が進み、平成14年の渇水（年間1,661mmという小雨年、特に夏季（6～9月）には、平年の42%（443mm）にとどまった）の際、最大55%の取水制限となったが、福岡都市圏では給水制限に至らなかったとしている（神野ら, 2005）。
節水意識の向上、節水機器の普及	家庭用水使用量は、節水機器の普及により、2025年には現在より6%～15%の減少が見込まれる（中川ら, 2008）。価格調整による需要の抑制効果については、年々その効果が小さくなっている（1965年には価格弾力性が0.19であったのが、2001年には0.05）ことがデータから見られている。（村瀬ら, 2005）
漏水防止対策	水道管の漏水防止対策は水資源の有効利用といった面だけでなく、上水に関わる二酸化炭素排出量を削減する効果（例えば、東京都では、漏水率を11.1%から4.2%へ減らしたことで、21,700t削減に相当）も見込めるとしている（東京都水道局, 2007）。

## 3) 水環境管理

適応策メニュー	内容
富栄養化対策	富栄養化対策としては、アオコフェンスが有効としているもの（北澤ら, 2007a）、湖内の下層の濁度水塊を濁度の高い状態で放流するような流動制御が有効であるとするもの（三宅ら, 2005）、選択取水設備の適切な運用が水温、濁度管理に有効であるという報告（梅田ら, 2006）がある。
温暖化および海面上昇に伴う地下水塩水化対策	塩水浸入阻止型地下ダム、雨水や河川水の地下水涵養、地下貯留空洞の建設、脱塩プラント設置、地下水塩水化の監視体制の確立などが示

	されている。 沿岸域のため池や運河、河口堰による淡水湛水域などの涵養域は、塩水侵入に対して有効である。特に降雨量の少ない地域の効果が大きい。(宮城ら, 2007)
海面上昇による地下水への塩水侵入防止のための不透水壁設置	効果的である一方、地表湛水が発生しやすくなることが実験的に検証されている。(増岡ら, 2005)
地下ダムによる地下水塩水化の防止	地下水への塩水侵入を防ぐ。コストが高いが観光地などの資産価値の高い地域では有効である(宮古島の例)。

#### 4) 治水対策

水害や土砂災害などを引き起こす大雨、集中豪雨は代表的な極端現象である。前述のように、我が国はこの極端事象がもたらす脅威(水害、土砂災害など)に直面してきており、その分、施策対応の長い蓄積がある。こうした脅威に備えることの本来の重要性と、施策適用の実績・課題を十分踏まえた上で温暖化に伴う外力変化への適応策を検討していくことが肝要である。

気候変動に適応した治水対策については、国土交通省の社会資本整備審議会河川分科会において、広範な検討が行われている。ここでは、その検討内容を参考にしつつ、水環境・水資源分野における適応策の全体像を考える上でも重要と考えられる事項の要点を記す<sup>11</sup>。

- ・ 流域単位の視点による検討(流域内での影響の出方の違いや、流域内での適切な分担)
- ・ 目標の明確化(気候変動により増大する水害等から完全にのがれることは難しいとの認識を持ち、「犠牲者ゼロ」に向けた検討を進めること、首都圏のように中枢機能が集積している地域では国家機能の麻痺を回避することへの重点的な対応に努めるなど、被害の最小化を目指す)
- ・ 河道改修や洪水調節施設の整備等を基本とする「河川で安全を確保するという治水政策」に加え、増加する外力に対する「流域における対策で安全を確保する治水政策」の重層的な実施
- ・ 災害リスクの評価(今後の社会状況や自然環境の変化の中で、気候変動に伴い発生する災害が人的被害を含む社会・経済等に与える影響を災害リスクとして評価し、国土構造や社会システムの脆弱性を明らかにし、この脆弱性を基本にして適切に適応策を選択していく。同時に、適応策の策定、実施に向け、国民や関係機関等にわかりやすい形で災害リスクを示す)
- ・ 予防的措置の重点投資(投資余力が限られている中で、特に脆弱化が予想され、問題になると見込まれる施設あるいは地域、人口・資産や中枢機能の集積する地域における予防的措置へ重点投資)
- ・ 例えば、洪水に関しては温暖化により増大する外力に対し、基本的施設でどこまで対応するかを明確にし、その上で流域における対策(流出抑制策、浸水・氾濫による被害の軽減策、復旧・復興策など)を検討し、起こりうる様々な規模の洪水に対して「犠牲者ゼロ」などの目標達成を図っていく方策をとる。その具体的適応策として、1)地域づくりからの適応策、2)危機管理対応を中心とした適応策、3)施設を中心とした適応策が柱となる。防災施設は、その能力以内の外力に対し、ほとんど被害を出すことなく、また災害への対応能力の差異を顕在化させずにあまねく通常の社会・経済活動の継続を可能にすることから、1)は引き続き重視されるべきである。2)については、社会状況等の変化を踏まえ、経済効率性や利便性に加え、エネルギー利用の効率性や都市内の環境、災害のリスクの軽減を考慮した地域づくりを進めるなど、水災害に適応できる社会を構築していく仕組みを取り入れて行く。3)については、大規模災害に対し、平時における予防的な施設整備とあわせて、危機管理の観点から一体的に対策を講じていく。

<sup>11</sup>国土交通省 社会資本整備審議会河川分科会 気候変動に適応した治水対策検討小委員会 答申案 「水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について」(平成20年5月)の内容の一部を本WGの立場から抽出、要点化したものである。

## (2) 適応策の選択・実施にあたっての考え方

個別具体的な適応策の実施にあたっては、水資源・水環境の量と質の両面において、気候変動の平均的事象への影響に対する適応、及び極端事象への影響に対する適応を一体的に配慮した政策としていかなければならない。また、社会的合意形成、社会的トレードオフの課題への対応、さらに自然生態系への配慮等も求められる。水環境・水資源分野における適応策の選択・実施にあたっての考え方は、次の4点に集約できる。

### 1) 「総合的な水資源管理運営体系」の構築

総合的な水資源管理運営体系は、水の需要者までを含む水資源の関係者全体が連携して構築すべきものである。渇水や洪水のリスクを低下させるため、平常時及び緊急時の両者を想定し、社会基盤システム面、制度設計面の施策を組み合わせたものとなる。

### 2) 需要マネジメントによる節水型社会の構築

生活用水、農業用水、工業用水等、各需要側に対する意識啓発、取組の促進によって節水型社会を構築していくことが重要となる。生活用水に関しては、国民の節水に関する意識高揚と実践の徹底のための広報活動、節水や節水型の機器開発・普及にインセンティブが働く施策の実施等が、農業用水や工業用水等に関しては、再利用率の一層の向上が重要となる。さらに、漏水防止のための老朽化施設等の計画的改築、下水等の再生水・雨水利用など雑用水利用の促進等が重要となる。

### 3) 緊急的な水資源の確保

特に、甚大な被害が予想される極端事象への影響に対する適応として、緊急時における水供給体制の確立が重要となる。危機的に水が不足する地域への水バッグによる輸送や連絡管の整備による水の広域的相互融通、移動式海水淡水化施設による水の供給、多様な備蓄の推進等、予防的観点から多様な水資源確保策を準備しておく必要がある。さらに、水系内の利水者間の水融通のための渇水調整等のあり方のさらなる検討、合理化等、従来の水利用のあり方の改善にも取り組む必要がある。

### 4) 水資源供給施設の徹底活用・長寿命化

既存施設の徹底活用・長寿命化を図りつつ、なお必要な新規の施設についての整備推進を図ることが基本となる。既存施設の徹底活用の一環として、ダムの嵩上げや堆砂の排除、ダム群連携や容量の再編、ダムのオペレーションの高度化等が特に重要な取組となる。

## (3) 適応策を実施する上でのバリア

適応策を実施する上でのバリア（法制度面の課題、技術的課題、経済的課題、知識・情報面での課題）を以下に整理する。

(1)で示したように、水環境・水資源分野における適応策のメニューは多岐にわたっており、これらを実施するには、個別の技術的課題や法制度面の課題、コスト面の課題等があると想定される。

例えば、地下水の塩水化防止に関しては、ストック型の水資源である地下水を確保したり、地下水への塩水浸入を防止する目的で、米国などで人為的に下水の高度処理水を対象に地下水涵養している例（Orange County Water District (OCWD)の Water Factory 21 など）がある。しかし、我が国で

## 最終稿

は、地下水汚染防止の観点から、水質汚濁防止法により、一定の要件を満たす事業場からの有害物質を含む水の地下浸透が禁止されている。これは、再生水の人為的涵養の推進における法制度面の制約・課題の一つと捉えることができる。また、例えば、節水は渇水等の事態に対する有効な適応策の一つであるが、節水機器に関する適切な情報をいかに効果的・効率的に伝達できるか等、知識・情報面での課題がある。海水淡水化のような適応策の場合には、低コスト化に向けてまだ技術開発の余地が大きく、技術的課題、経済的課題の双方を有しているといえる。

さらに、上記のような個別の課題以前のより根本的な部分で、適応策の推進に関わる多様な主体間の合意形成や、適応策間のトレードオフの調整、適応策と緩和策のトレードオフの調整など、適応策であるがゆえに留意しなければならない事項があり、それらは以下のように整理できる。

### ○適応策実施に関する合意形成

基本的に長期にわたって起こる変化への対応であり、また極端現象については、従来も生じていたことから、適応策の必要性について実感がわきにくく、国民の理解を得るのが容易とは言えない。

国民の暮らし方や経済活動などに密接な関係を持つ分野だけに、適応策を遂行する上で、地域間、世代間、種々のセクター間等で利害対立が生じ、これが合意形成を難しくする状況が考えられる。また、極端事象時の適応能力の向上が平時におけるある種の非効率性や快適性の低下につながる構図が考えられ、この場合、施策遂行に対して“素朴な抵抗感”が生じやすい。

### ○適応策間、適応策と緩和策間のトレードオフの調整

適応策の実施が広範なものになるだけに、また、水システムが流域圏単位で深い相互関連性をもって一体的に構成されているために、適応策間でトレードオフ的な関係を持つ場合が考えられる。例えば、極端な豪雨の増加に対応したダム運用等の治水対策と、河川水の安定的利用のための利水対策等との関係で、この例に当たる場合がありうる。また、適応策と緩和策の間についても同様のことが言え、例えば、海水淡水化や未利用水の利用等の適応策が、場合によってはエネルギー消費の増加を伴う等の例もありうると思われる。

### ○影響予測等の限界

気候変動の予測については急速な進展が見られ、温暖化影響の基本的な方向性や懸念すべき範囲は明らかになりつつあるが、それでも、本分野の施策遂行において従来用いてきた情報が主に実績（起こった現象のデータ）に基づく分析をベースにしていることから、それと比べると予測には依然大きな不確実性を伴う。

河川生態系への影響は、気候変動から直接もたらされるだけでなく、その水物質循環系への影響を介す場合も考えられる。加えて適応策の実施に伴う水システムの変更による影響も起こり得るので、現象は複雑で影響予測はさらに難しい。

災害リスクの評価の重要性については既に述べたとおりであるが、影響が広範になるにつれ、従来個々に考えられがちであった異なる種類の災害事象が相互に影響しあい、連鎖的な事象となって増幅する局面が考えられる。このような状況は認知されにくく、影響予測の前提となる想定を難しくする。洪水・高潮氾濫等による水供給機能の低下は、こうした事例の1つである。

以上に例示したバリアは相互に関連して、全体としてさらに適応策実施のハードルを高くする。この克服を考える上では、本分野（水環境・水資源）が元来、私たちの日々の生活や社会経済の基盤に深くかかわるものであり、人間社会の複雑な現実も見据えた絵空事でない検討が求められることを認識しつつ、次のよう視点を持つことが重要と考えられる。

- ・温暖化影響を含む様々な災害等のリスクを、国民、地域住民、専門家、政策決定者など必要とされる場所に、必要なタイミングでわかりやすく見せていく。適応策の実施によるリスクの軽減



## 最終稿

についても同様であり、これにより適応策実施による状況改善効果をわかりやすく提示できるようにする。

- ・温暖化を賢くコントロールし、温暖化影響に賢く適応する人間の行動、地域社会の活動の普及促進をはかり、国民と協働して対策を進める状況を作っていく。そのために、リスクに関する情報を土台に、経済や人間の行動に関する原理も必要に応じて活用する。被災経験を持たず、地域とのつながりが薄い住民が増加し、この点において地域防災力が低下しているというような社会的な変化も十分考慮する。
- ・時間軸を設定し、短期・中期・長期の施策を有機的に連携させながら展開する。そのために、影響出現の時間的变化を組み込んだ、また予測等の不確実性を考慮して様々なシナリオを幅広く吟味できる柔軟な「適応の道筋の全体像」を作成する。その上で、順応的アプローチを採用し、気候変動により生じる種々の自然事象の変化に関する観測データや知見の蓄積に応じてリスク評価を定期的に行い、その時点での社会状況等の見通しと合わせて、対応の道筋を手直しする。このために、気候変動による水関連事象への影響のモニタリングを強化する。
- ・災害等のリスクや対応の道筋の全体像を示しながら、国民、流域住民や利害関係者間での調整や適応策の総合的な取り組みを検討できる場を作っていく。総合的水資源マネジメントに代表されるように、流域圏の水に関連する事象を共通軸として適応策、緩和策の統合化、総合化を図り、相乗効果を発揮させ、国、地方公共団体、その他の公的機関が一貫した姿勢で、しかし柔軟かつ協調的に施策を推進していく状況を作り出す。同時に、地域独自の取り組みを尊重し、全体的施策推進方針との相利的關係を作っていくことも重要である。特に、河川や湖沼、里山、農村景観などに関しては、各地で自然再生や自然との関わりの回復などを目的に、多様な活動が精力的、継続的、内発的に展開されており、本分野の適応策の実践においても重要な役割を果たすと期待される。
- ・国民、住民の日々の関心が水環境・水資源分野の温暖化影響だけにあるわけではないことも理解し、本分野に関わる適応策を、各地域の短期から長期にわたる課題解決のための施策と可能な範囲で連動させていく。特に本分野は、地域づくりと密接な関係を持つので、適応策（や緩和策）と地域の課題解決をつなぐ方策を工夫し、持続可能な新たな社会の構築を図っていく。このようにして、「総合」や「統合」の“概念”だけに頼らず、具体課題解決指向の適応策推進戦略を組み立てていく。

水環境・水資源分野における温暖化影響は、従来から何らかの形で認知されていた脆弱性をあぶり出し、一層高めるものと言え、いきおい適応策は、従来施策群の徹底したバージョンアップと、議論・検討あるいは一部の実施にとどまっていた施策の本格化が柱の1つとなる。温暖化影響をその機会と捉え、いわば「災い転じて福となす」として、懸案解決を加速させ、新たな地域づくりに生かすというプラス思考も重要と考えられる。

さらに、適応策研究において、理論、計画、実施等の様々な過程と、理工学、政策、慣習、世論等の様々な分野の視点が必要である。そして、これらを包括した議論も求められる。現状では、省庁、学会、NGO等も、それぞれの専門分野に特化しており、広範な議論の場が形成されていない。近年、文理融合を促進するような研究グループ（例：リスクマネジメント研究やサステナビリティ学研究）がいくつか立ち上がっているが、適応策の推進においても同様の取組が必要である。

### **(4) 適応策として参考にできる既存の事例・政策**

水環境・水資源分野における適応の具体的な先進事例・優良事例を以下に整理する。既に実施されている事例に加え、研究的要素の強い事例、試行段階・計画段階の事例等も含む。

## 最終稿

### 1) 水の相互融通（東京都、川崎市、埼玉県）

東京都は、非常時における水への安心を高めるため、他州市と水道水を相互に融通する「水の相互融通」の実施に向けた取組を進めている。2007年3月に、川崎市と共同で整備を進めてきた「東京・川崎 登戸連絡管」「東京・川崎 町田連絡管」が完成し、これにより、埼玉県との相互融通に続いて、都県域を越えた水の相互融通が可能となる。

### 2) 下水処理水、雨水、浸出水等の再利用

下水処理水、雨水、トンネル等への浸出水等は、直接飲用には使用できないが、トイレの洗浄水、植栽などへの散水用水、市街地でのせせらぎ等の環境用水、道路清掃や工事用水、あるいは工業用水等として活用可能であり、既にいくつかの自治体で再生水供給事業等が行われている。東京都でも、水資源の有効利用という観点で、再生水利用等が1980年代半ばから実施されている。このような再生水、雨水、浸出水利用は水資源に関する適応策の一つとして挙げられる。

下水処理水に関しては、2004年度末現在、全国の下水処理場での処理水量は年間141億 $m^3$ のほり、その多くは公共用水域に放流されているが、下水処理場内での再利用のほか、電車、トイレ等の洗浄水、工業用水、公園などのせせらぎ復活用水、消火・防火水、農業用水、融雪用水などとして再利用されている量は、241の下水処理場において年間約1.9億 $m^3$ となっている。

以下に、都市用水や農業用水等への下水処理水利用事例を挙げる。

#### ①ため池等への下水処理水利用（香川県多度津町再生水利用計画）

中讃流域下水道金倉川浄化センターの放流水を利用し、高速ろ過・オゾン処理・活性炭吸着等を行い、農業用水、ため池、河川、せせらぎ水路、公園等に高度処理水を供給し、街中にかつてのせせらぎ・水空間を復活させ、ホテルも取り戻そうという計画で、下水処理水を徹底的に循環利用するものである。

#### ②農業用水への下水処理水利用（熊本県熊本市）

熊本市でも処理水を有効利用するため、中部浄化センターでは下水処理水を水田に対し、農業用水として供給している。また各浄化センターにおいても処理過程の様々な部分で処理水を再利用している。農業用水としての再利用率は765万 $m^3$ /年（2004年度）で全国での農業用水としての再利用率の約3分2を占めている。

#### ③雑用水等への下水処理水利用（東京都）

1980年代半ばから東京都においては、水資源の有効利用という観点で、再生水利用等が実施されている。下水を高度処理してきれいになった水を、再開発地域等のビルにおけるトイレの洗浄水として供給するとともに、水の少ない都市の河川にもせせらぎ用水として供給しています。また、冬は温かく夏は外気よりも冷たい下水の特性を活用した冷暖房設備の導入も行われている。雨水や漏出水の再利用としては、鉄道などのトンネルで漏出する地下水を下水に流すのではなく、付近の河川に導水し河川の水質改善や水源涵養に利用している。

#### ④農業用水への下水処理水利用（沖縄県4市町 国営土地改良事業 地区調査）

2005年度より、沖縄本島南部の4市町（糸満市、豊見城市、南城市、八重瀬町）の島尻地区において、国営土地改良事業で再生水の農業用水利用の地区調査がなされている。約1,600haのサトウキビを基幹作物とする畑作地帯である当該地区では、農業用水を天水に依存しているが、農業用水の確保が急務となっており、このため、那覇浄化センターの処理水から再生水を製造し、農業用水として利用するためのプロジェクトが進められている。このような、適度な窒素、リンの含有が有利となる再生水の農業用水等への利用について検討を進めるべきである。下水道政策研究委員会 流

## 最終稿

域管理小委員会 報告書（案）（2007）においても、農業用水への活用は、農地への施肥量の低減による農地からの面源汚濁負荷の低減に有効であるだけでなく、地球温暖化に伴う水資源の不安定化にも有効であると考えられている。

### 3) 水害対策としての地下調節池（神田川・環状七号線地下調節池）

神田川・環状七号線地下調節池は、神田川の水害対策として洪水 54 万立方メートルを貯留する施設である。平成 1997 年 4 月から供用している一期事業は、今年の台風 22 号において、これと同程度の豪雨であった 1993 年の台風 11 号と比較して浸水被害を激減させ、大きな効果を発揮している。現在、神田川支流の善福寺川からの取水施設を建設しており、2006 年 9 月には洪水の取水ができることになる。これにより、神田川流域がさらに安全になる。

## (5) 適応策の評価手法に関する研究動向

水環境・水資源分野における適応策のコスト、効果（被害軽減効果）、効率（費用対効果）等を評価する手法について、その研究動向を以下に整理する。

佐藤ら（2008）や川越ら（2007）は気候データと災害物理モデルを組み合わせることで国土交通省の治水経済マニュアルによる洪水と土砂災害の被害額の予測を行っている。費用便益の考え方に問題は残るが、コスト面から適応策を考える資料となっている。

地球環境総合評価と呼ばれる経済モデルを核とした幾つかのモデル（例えば RICE や AIM）などが、政策の影響を経済面から評価することができる。ここで取り扱う水資源は主に農業生産であるが、水を従属変数にすることによって数値実験が可能である。水の質については今後の研究の発展が期待される。

## 3.6 今後の課題

### (1) 影響の把握

#### 1) 水資源量への影響の把握

- ・将来における水資源変化の推計を行うに際しては、年降水量等だけでなく、季節単位・日単位での水資源変化の推計を行う必要がある。
- ・気候変動に伴いダムの堆砂量が増える場合は、土砂動態の変化、堆砂量増加による貯水量の低下について検討する必要がある。

#### 2) 水温・水質の変化の把握

- ・豪雨や渇水による河川水質の変化、湖沼における成層と循環の回数の変化、河川水温の変化が生態系に与える影響等についての研究が必要である。

#### 3) 地下水への影響の把握

- ・温暖化に伴う風化作用の促進や土壌微生物活性の増加だけでなく、渇水時における地下水利用の一時的な増大により、地下水への量的、質的な影響が想定される。したがって、深層地下水など長期的な履歴を反映していることを考慮した上で、地下水温や水質のモニタリングを継続的に行い、その時系列評価を行う必要がある。
- ・地下水の窒素や微量汚染物質による汚染は、水利用において重要な懸念事項である。適正な汚染源対策を実施するためにも、地下水の汚染実態と汚染源との関係や影響把握を可能とする地下水流動・水質モデルを活用した研究が必要である。

#### 4) 水利用への影響の把握

- ・渇水や洪水により、水源における濁質成分の増加が予測されるが、それに伴う病原性微生物等の増加、下水管の腐食・硫化、活性炭投入必要量の増加等の影響についての研究が必要である。
- ・長期的な水温の上昇が浄水場における浄水処理性能に影響がないか調査する必要がある。
- ・農業用水に対する温暖化の影響の研究が遅れており、渇水と洪水の両面から検討する必要がある。

### (2) 脆弱性の評価

#### 1) 水利用への影響の把握

- ・脆弱性、適応力の評価に際しては、水資源量だけでなく、水需要量がどのように変化するかについての予測も重要である。
- ・国内の生活用水需要予測では、人口増が見込まれる都市部を除いて、人口減や、節水意識の高まり、節水機器の普及等により、生活用水の国内需要量がどの程度減少するかについての予測に関する調査・情報収集が必要である。
- ・国内の工業用水需要予測では、経済指標との関連に関する研究はあるが、温暖化の視点での研究が必要と考えられる。

#### 2) 脆弱性の評価方法

- ・予測、調査・観測、分析等のそれぞれの面で、気候変化による豪雨などの極端現象の外力の変化をより精度良く把握する手法と、それを組み込んで、災害のリスクを、適応策の検討に資するレ

## 最終稿

ベルで適切に評価する手法を検討する必要がある。中でも、防災施設の安全性や弱点、それらが機能を喪失したときの災害の起こり方について詳細かつ具体的に把握する体系的な手法の開発が必要である。

- ・降水量等の気候要素だけでなく、人間社会側の水災害に対する防御力を考慮した影響評価を行う必要がある。
- ・極端現象に属する評価法は、現状（あるいはその時々）の防災システムや水資源確保システムの持つ脆弱性をきめ細かく把握するという観点からはまだ十分とは言えず、今までの技術的蓄積の上に立って、また急速に進展する気候予測技術の取り込み方とともに、高度化を図っていく必要がある。
- ・自然的脆弱性、社会的脆弱性を総合的に評価する上で必要となるデータは、まだ十分に整備されておらず、また、評価のための具体的手法・ツールも未開発の状況にある。これらのデータの整備、手法・ツールの開発は今後の研究課題である。
- ・脆弱性評価の結果を分かりやすく伝える手法として、脆弱性をコストによって表現をする、あるいは OECD 世界環境白書で用いられている信号表記（赤、黄、青）等のように、一般市民にもわかりやすい表現方法を検討する必要がある。

### 3) その他

- ・脆弱性の定義について、様々な考え方があるので、統一するような研究が期待される。また、その際にも、リスクや確率の概念が必要である。特に定量的に脆弱性を決める手法があれば、汎用性があり包括的に評価することができる。確率表記であれば経済評価なども容易である。金融分野ではリスクオプション分析があるが、災害等への適用が望まれる。

## (3) 適応策

### 1) 基本的な検討課題

- ・適応策間、適応策と緩和策間でのトレードオフ的な関係を整理し、効果的な適応策・緩和策の実施策の検討を行う必要がある。
- ・温暖化影響を含む様々な災害等のリスク、適応策の実施によるリスクの軽減を、国民、地域住民、専門家、政策決定者など必要とされる場所に、必要なタイミングでわかりやすく見せていくとともに、地域間、世代間、種々のセクター間等での利害関係の調整や適応策の総合的な取り組みを検討できる場を作る必要がある。
- ・時間軸を設定し、短期・中期・長期の施策を有機的に連携させながら展開するために、影響出現の時間的変化を組み込んだ、また予測等の不確実性を考慮して様々なシナリオを幅広く吟味できる、柔軟な「適応の道筋の全体像」を作成する。その上で、順応的アプローチの採用、リスク評価の定期的な実施、その時点での社会状況等の見通しと合わせて、対応の道筋の手直しの実施などが必要となる。
- ・国民、住民の日々の関心が水環境・水資源分野の温暖化影響だけにあるわけではないことも理解し、本分野に関わる適応策を、各地域の短期から長期にいたる課題解決のための施策と可能な範囲で連動させていく。特に本分野は、地域づくりと密接な関係を持つので、適応策や緩和策と地域の課題解決をつなぐ方策を工夫し、持続可能な新たな社会の構築を図っていく必要がある。
- ・河川の生態系や土砂動態を含む水・物質循環系への影響、後者を介しての前者への影響、さらには各適応策が重なった場合の影響を予測し、河川生態系の保全や健全な水・物質循環系を考慮した適応策を総合的に検討するための手法を開発することが求められる。

## 最終稿

### 2) 水資源量不足への適応策の検討

- ・水資源量不足に対応した新しい水供給源としてどのようなものがあるか、また、それぞれの可能性について検討する必要がある。例えば、海水淡水化についてのライフサイクルアセスメント的な評価に関する研究、地下水の利用可能性に関する研究などについて情報収集する必要がある。

### 3) 水質悪化への適応策の検討

- ・温暖化に伴うダム湖表層における水質悪化等に対応した、汚染の程度の少ない中層を利用する等の対策の有効性の検証を行う必要がある。
- ・水道水源をダム湖水など表流水に依存しており、その温暖化に伴う水質変動に対応した浄水プロセスを選定することが求められることから、原水水質の将来予測のためにも、流域圏水循環プロセスに水質が評価できる物質循環プロセスが組み合わされた統合モデルの構築が求められる。

### 3) 地下水利用を考慮した適応策の検討

- ・都市域における適正な地下水利用を誘導するためには、流域圏の中での水文水循環量に加えて都市の水利用量の収支を定量的に評価する研究が必要である。
- ・地下水は河川や湖沼のように公共用水域ではなく、公共物としては定義されていない。したがって、都市域における地下水を共有すべき公共的な水資源として位置づけるための概念づくり、法制度、適正管理手法などを含めた研究が必要である。
- ・良質で量的にも安定的なストック型水資源である地下水の保全是重要であるが、現時点では、その涵養域や地下流動域の水の流れを定量的に解析できておらず、都市域の自己水資源としての量的な把握が不十分である。したがって、涵養域を含めた地下水の流動解析と水質変化予測が可能なモデルを構築することが必要である。

### 4) 雨水利用を考慮した適応策の検討

- ・都市域の水源として、再生水とともに雨水も重要なものとなりえる。したがって、治水対策としての雨水貯留や雨水浸透は、同時に雨水利用や地下水涵養としても位置づけられることから、温暖化における都市域の雨水管理を多目的な側面からコストと便益を評価する研究が必要である。
- ・雨水の水資源としての量的安定性、水質安定性、安全性などを統合的に評価することが必要であり、その科学的な知見を水利用者によりわかりやすく明示する研究が必要である。

### 5) 水利用における適応策の検討

- ・慣行水利権<sup>12</sup>や過去に設定された特定水利権<sup>13</sup>の見直しを含め、渇水時における、法規制、価格化等を含む水の配分方法について研究・検討が必要である。
- ・水の配分政策の決定時における合意形成を図る方法に関して、理論的検討を加え、リスクコミュニケーションの視点を含めた汎用性の高いものにしていく必要がある。

### 6) その他（他分野との連携、適応策の経済性評価など）

- ・水資源・水環境分野の適応策は、多くの他分野にも関わる課題なので、農業、自然生態系、経済等、他の分野の研究者、技術者、実務者間の連携のとれた総合的な検討・研究を行う必要がある。
- ・適応策に必要な投資金額の概算を行うなど、適応策の経済性評価を進める必要がある。
- ・全国の社会基盤整備の計画である国土形成計画（全国計画）が2008年に策定されようとしており、この中に気候変動の考え方が反映されるべきである。

<sup>12</sup>河川法制定前から得ていた水を使う権利、主に農業用水

<sup>13</sup>特別な目的に対して利用を許可する水利権

## 最終稿

### <引用文献>

- 秋葉道宏, 国包章一, 2005: 水道における利水障害の発生状況とその対策, 水環境学会誌, 28(5), pp.8-12
- 秋本嗣美, 川越清樹, 風間聡, 沢本正樹, 2008: 土砂崩壊によるダム貯水池の影響評価, 水工学論文集, 第52巻, pp.571-576
- 新井正, 2000: 地球温暖化と陸水水温, 陸水学雑誌, 61巻, 1号, pp.25-34
- 遠藤卓郎, 2006: クリプトスポリジウム集団感染の前兆現象, 厚生労働科学研究費補助金振興・再興感染症研究事業「クリプトスポリジウム等により水系感染症に係わる健康リスク評価及び管理に関する研究(クリプトスポリジウム症等感染リスクの評価手法の確立に関する研究)」(主任研究者: 国包章一(国立保健医療科学院))平成17年度総括・分担研究報告書, 6巻, pp.61-73
- Freshwater Resources Management Project, 2007: Sustainable Groundwater Management in Asian Cities: A final report of Research on Sustainable Water Management Policy, IGES(Hayama, Japan), 157pp.  
<http://enviroscope.iges.or.jp/modules/envirolib/view.php?docid=981>
- 藤田俊司, 和泉恵之, 2006: 水質予測シミュレーションにおける流入河川水温の設定手法(ダム貯水池等の水質保全対策に関する調査研究), H14年度ダム水源環境技術研究所所報, pp.19-25
- 藤原洋一, 大出真理子, 小尻利夫, 友杉邦雄, 入江洋樹, 2006: 地球温暖化が利根川上流域の水資源の及ぼす影響評価, 水工学論文集, 第50巻, pp.367-372
- 福島武彦, 上西弘晃, 松重一夫, 原沢英夫, 1998: 浅い富栄養湖の水質に及ぼす気象の影響, 水環境学会誌, 21(3), pp.180-187
- 古米, 2007: 水質評価委員会の活動について, 「健全な水循環の形成に資する浄水・管路技術に関する研究」成果報告会テキスト, 財団法人水道技術研究センター
- 花里孝幸, 吉岡崇仁, 2000: 陸水学における温暖化研究の現状と展開, 陸水学雑誌, 61巻1号, pp.21-24
- 橋谷博他, 1995: 1994年の渇水と宍道湖の水質, 第60回日本陸水学会講演要旨集, p188
- 橋谷博, 1995: 気象と湖水象との因果関係, 第60回日本陸水学会講演要旨集, p189
- Hassan H. et al., 1998: A modeling approach to simulate impact of climate change in lake water quality: Phytoplankton growth rate assessment, Water Science & Technology, 37(2), pp.177-185
- 速水祐一, 藤原建紀, 1999: 琵琶湖深層水の温暖化, 海の研究, 8, pp.197-202
- 原沢英夫, 西岡秀三, 2003: 地球温暖化と日本 自然・人への影響予測 第3次報告  
IGES Freshwater Resources Management Project, 2006: Sustainable Groundwater Management in Asian Cities: A Summary Report of Research on Sustainable Water Management in Asia, IGES, 97pp.  
<http://enviroscope.iges.or.jp/modules/envirolib/view.php?docid=264>
- 池田光良, 三浦均也, 操上広志, 1999: 地下水温による北海道美々川周辺の地下水流動解析, 応用地質, 40(2), pp.70-85
- IPCC, 2007: 第4次評価報告書 第3章 「表3.5 水需給の適応オプション」
- IRES, 2006: Groundwater Management and Policy: Its Future Alternatives, Volume 6, No.2
- 石井正典, 嘉村多聞, 室岡良伸, 1998: 米代川水系小又川森吉ダム流域の夏期の河川流量と降水量, 平均気温および森林蓄積の関連性, 日本林学会誌, 80(2), pp.98-104
- 泉宏和, 風間聡, 沢本正樹, 2006: 積雪水資源量評価における森林の影響について, 水工学論文集, 第50巻, pp.421-426
- 神野健二, 河村明, 里村大樹, 坂田悠他, 2005: 2002年筑後川渇水の実態と水資源運用, 水文・水資源学会誌, 18(5), pp.539-546
- 神野健二, 広城吉成, 2006: 地球温暖化と地下水塩水化, 水環境学会誌, 29(2), pp.72-76
- 香川県 香川の環境ホームページ(地球温暖化について香川県の状況を調査しました！)  
(<http://www.pref.kagawa.jp/kankyoo/data/0712/071225.htm>)
- 香川県 香川の環境ホームページ(「香川の温暖化」(河川への影響)について)  
(<http://www.pref.kagawa.jp/kankyoo/data/0712/071225/2.pdf>)
- 神奈川県ホームページ(水資源の開発: 平成8年の渇水)  
(<http://www.pref.kanagawa.jp/osirase/01/0104/suigenkaihatu/page20.html>)
- 神奈川県政策部土地水資源対策課ホームページ (<http://www.pref.kanagawa.jp/sosiki/01/0104/index.html>)
- 河川環境管理財団, 2002: 河川整備基金事業「自然的攪乱・人為的インパクトと河川生態系の関係に関する研究」報告書
- 柏井条介他, 1997: 地球温暖化が水資源に及ぼす影響に関する考察, 土木研究所資料, 3478pp.
- 川越清樹, 風間聡, 沢本正樹, 2007: 融雪に起因する土砂災害のリスクモデル, 水工学論文集, 第51巻, pp.367-372
- 河村明, 神野健二, 2004: 渇水及び水資源開発事業による筑後川河川流況の変動特性, 水道協会雑誌, 73(7), pp.2-12
- 川崎将生, 2005: 気候変動が利根川流域の水資源に与える影響検討, 気候変動が水資源に与える影響評価研究調査(国土交通省委託業務成果報告書), 水文・水資源学会, pp.64-140
- 建設通信新聞, 2007: 2007年10月5日付
- 気象庁, 2005: 異常気象レポート2005
- 北澤弘美, 北田真吾, 湯浅岳史, 佐藤親房, 小泉明, 2007: 小河内貯水池における湖水流動・水質モデルの構築, 水道協会雑誌, 76(7), pp.16-30
- 北澤弘美, 富永和樹, 北田真吾, 齊藤滋, 佐藤親房, 小泉明, 2007: 貯水池からの表層放流がアオコ発生に及ぼす影響, 環境工学研究論文集, 44, pp.513-524
- 国土交通省ホームページ 都市・地域整備局下水道部(【香川県多度津町】多度津町再生水利用計画)  
(<http://www.mlit.go.jp/crd/city/sewage/rocal/ikiiki/h17/tadotsu.html>)
- 国土交通省ホームページ 都市水路検討会 中間とりまとめ「懐かしい未来へ～都市をうるおす水のみち～」について  
([http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha05/05/050210\\_.html](http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha05/05/050210_.html))



## 最終稿

- 国土交通省ホームページ「水・物質循環系の健全化に向けた流域管理のあり方について」  
([http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha07/04/041116\\_.html](http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha07/04/041116_.html))
- 国土交通省北陸地方整備局河川部, 2004:平成 16 年 7 月新潟・福島豪雨河川災害速報(その2), 7pp.
- 国土交通省, 2006:日本の水資源平成 18 年版
- 国土交通省, 2007:「気候変動等によるリスクを踏まえた総合的な水資源管理のあり方について」研究会資料
- 独立行政法人水資源機構 琵琶湖開発総合管理所, 2004:琵琶湖沿岸における沈水植物の生育状況の変化と渇水による水位低下の影響, 管内技術研究発表会資料,4pp.
- 国土交通省 社会資本整備審議会河川分科会 気候変動に適応した治水対策検討小委員会, 2008:答申案「水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について」(平成 20 年 5 月)
- 国土交通省 土地・水資源局水資源部, 2003:平成 15 年版日本の水資源について～地球規模の気候変動と日本の水資源問題～(第 1 編)
- 国土交通省 土地・水資源局水資源部, 2005:平成 17 年版日本の水資源について～気候変動が水資源に与える影響～(第 1 編)
- 国土交通省 土地・水資源局水資源部, 2007:平成 19 年版日本の水資源について～安全で安心な水利用に向けて～(第 1 編)
- 国土交通省 土地・水資源局水資源部, 2007:「気候変動等によるリスクを踏まえた総合的な水資源管理のあり方研究会」/同省社会資本整備審議会河川分科会 気候変動に適応した治水対策検討小委員会
- 国土交通省 都市・地域整備局下水道部, 社団法人日本下水道協会, 2007:下水道政策研究委員会 流域管理小委員会 報告書 水・物質循環系の健全化に向けた流域管理のあり方について, 40pp.
- 国土交通省 都市・地域整備局下水道部 社団法人 日本下水道協会, 2007:下水道政策研究委員会 流域管理小委員会 報告書(案) 水・物質循環系の健全化に向けた流域管理のあり方について, 39pp.
- 小前隆美, 2007:地球温暖化対策と農村工学研究, ARIC 情報, No.87, pp.9-10
- Komatsu E. et al., 2007:A modeling approach to forecast the effect of long-term climate change on lake water quality, Ecological Modelling, 209(2-4), pp.351-366
- 熊本市の下水道ホームページ(環境への取り組み) (<http://www.c-gesui.jp/kankyo/sairiyou.html>)
- 草場智哉, 盛谷明弘, 2007:ダム貯水池の富栄養化(アオコ発生)の簡易的な手法の研究, H18 年度ダム資源池環境技術研究所所報, pp.3-9
- 久山哲雄, 片岡八束, 2007:アジア諸都市における地下水利用および規制制度の現状と課題, 水環境学会誌, Vol. 30, No.9, pp.507-510
- 増岡健太郎, 藤縄 克之, 古川 正修, 長野 宇規, 渡辺 紹裕, 2005:地球温暖化による海面上昇がゼロメートル地帯の地下水環境に及ぼす影響に関する実験的研究, 地下水学会誌, 47(1), pp.19-28
- 松居弘吉, 1997:平成 6 年度異常渇水に伴う琵琶湖の水環境(特集 琵琶湖およびその集水域における水問題), 環境技術 26(8), pp.495-501
- 宮城昌和, 風間聡, 沢本正樹, 2007:地下水涵養施設による塩水侵入制御, 水工学論文集, 第 51 巻, pp.451-456
- 宮本博司, 1990:雪ダム事業<小特集>未知の領域への挑戦, 土と基礎, 38(1), pp.37-42
- 森和紀, 2000:地球温暖化と陸水環境の変化—とくに河川の水文特性への影響を中心に, 陸水学雑誌, 第 61 巻 1 号, pp.51-58
- 森和紀, 2007:地球温暖化からみた水文環境の変化, 地学雑誌, 116(1), pp.52-61
- 村瀬勝彦他, 2005:生活用水における水需要構造と価格の分析, 水工学論文集, 49, pp.475-480
- 内閣府, 2007:H19 年版防災白書(第 1 部序章)
- 内閣府, 2008:大規模水害対策に関する専門調査会の開催状況(平成 20 年 3 月 25 日発表)資料 2「利根川の洪水氾濫時の被害想定(概要)」(<http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/suigai/index.html>)
- 内閣府沖縄総合事務局ホームページ土地改良総合事務所(国営土地改良事業 地区調査「島尻地区」の調査報告)  
(<http://ogb.go.jp/nousui/nns/totikairyuu/project/saisei1.pdf>)
- 中川直子他, 2008:水利用機器を考慮した家庭用水使用量予測—東京都におけるケーススタディ, 水文・水資源学会 2008 年度研究発表会(発表予定)
- 那須貴之, 風間聡, 沢本正樹, 2007:地域別に見た気候変動に対する積雪水資源脆弱性, 水工学論文集, 第 51 巻, pp.361-366
- 日本学術会議, 社会環境工学研究連絡委員会, 水資源専門委員会, 2005:洪水・渇水に対する備え, 28pp.
- 日本下水道協会ホームページ (<http://www.jswa.jp/index.htm>)
- 野田浩資, 1994:琵琶湖の水位低下の社会的影響, 琵琶湖研究所所報, 第 13 号, pp.42-45  
[http://www.lberi.jp/root/jp/05seika/syoho\\_bi/13/13-12.pdf](http://www.lberi.jp/root/jp/05seika/syoho_bi/13/13-12.pdf)
- 独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 九州沖縄農業研究センター(温暖化による九州の水田水資源の変化を予測)  
(<http://konarc.naro.affrc.go.jp/press/20060426-1/index.html>)
- 農林水産省, 2007:農林水産省地球温暖化・森林吸収源対策推進本部第 5 回議事資料  
<http://www.maff.go.jp/kankyo/honbu/05/index.html>
- 小倉紀雄, 山本晃一, 2005:自然的攪乱・人為的インパクトと河川生態系, 技報堂出版, 374pp
- 大垣眞一郎:IWA(世界水学会)ワークショップ「気候変動が水道事業に与える影響と適応策」(2008 年 2 月 4 日)発表資料より一部改変
- 太田敬一, 1999:逆浸透法海水淡水化コスト低減方法と課題, 日本海水学会誌, 53(6), pp.412-417
- 奥村正明, 2002:海水淡水化による増水技術, 空気調和・衛生工学, 76(3), pp.251-258
- Orange County Water District ホームページ(Water Factory21) ([http://www.ocwd.org/\\_html/wf21.htm](http://www.ocwd.org/_html/wf21.htm))
- 大坂谷吉行, 青山剛, 2006:二度の渇水を経験した福岡市の都市成長と水需給の関連分析, 日本建築学会技術報告集, 23, pp.421-426

## 最終稿

- 大坂谷他, 2006: システムダイナミクスモデルによる都市成長と水需給の関係分析, 日本建築学会技術報告集, 23, pp.409-415
- 大槻均他, 1995: 琵琶湖・淀川における平成6年大渇水の影響と対策, 水資源・環境研究, pp.96~100
- 尾崎則篤他, 1999: 気候変動が河川水質に及ぼす影響に関する統計的研究, 第33回水環境学会年会講演集, 28
- S. Priyantha Ranjan, So Kazama and Masaki Sawamoto, 2006: Effects of climate and land use changes on groundwater resources in coastal aquifers, Journal of Environmental Management, Vol.80, Iss.1, pp.25-35
- 境田清隆, 1988: 日本における暖候季の水需要の変化(来たる半世紀の気候変動とわが国の食糧・エネルギー・水の予想に関する研究), 気候学・気象学研究報告, 14, pp.78-84
- 鯨島良次, 2008: 今、北海道で起こっていること, 第28回農業環境シンポジウム「温暖化によって何が起こり、どう対応できるのか—農林水産業に与える影響の評価とその適応策—」
- 佐藤歩, 川越清樹, 風間聡, 沢本正樹, 2008: 降雨数値データを利用した気候変動に伴う全国浸水被害額評価, 水工学論文集
- 佐藤祐一, 萩原良巳, 2004: 水資源開発におけるステイクホルダー間のコンフリクト合意形成を考慮した代替案の評価モデルに関する研究, 水文・水資源学会誌, 第17巻6号, pp.635-647
- 滋賀県琵琶湖環境科学センターホームページ, オウミア(研究所ニュース)N0.53, (研究トピック渇水の琵琶湖生態系への影響)(<http://www.lberi.jp/root/jp/05seika/omia/53/bkjhOmia53-1.htm>)
- 滋賀県琵琶湖研究所, 1996: 平成6年度琵琶湖の異常渇水の影響に関する調査研究報告書
- 四国新聞社ホームページ (<http://www.shikoku-np.co.jp/feature/tuiseki/304/index.htm>)
- 白岩淳一, 風間聡, 沢本正樹, 2006: 気候変動による河川水温の影響, 水工学論文集, 第50巻, pp.1063-1068
- 杉田文他, 2006: 降水パターンが硝酸態窒素の溶脱におよぼす影響, 千葉商大紀要, 44(3), pp.13-26
- 相田達也, 2005: 平成17年版日本の水資源について—気候変動が水資源に与える影響, 工業用水, (563), pp.2-22
- Takashi Asano, Franklin J. Burton, Harold L. Leverenz, Ryujiro Tsuchihashi, 2006: Water Reuse: Issues, Technology, and Applications, McGraw-Hill, 1570pp
- 武田博清, 占部城太郎, 2006: 地球環境と生態系, 共立出版, 282pp
- 谷口真人, 2005: 気候変動と地下水, 地下水学会誌, 47(1), pp.5-17
- 東京都ホームページ 報道発表資料 2005年8月掲載(神田川・環状七号線地下調節池(第二期)取水開始)(<http://www.metro.tokyo.jp/INET/OSHIRASE/2005/08/20f8j200.htm>)
- 東京都下水道局ホームページ 刊行物(東京都の下水道2003—これからの下水道事業の取組方針(再生水利用・下水の熱利用)([http://www.gesui.metro.tokyo.jp/kanko/kankou/s\\_of\\_tokyo/13.htm](http://www.gesui.metro.tokyo.jp/kanko/kankou/s_of_tokyo/13.htm))
- 東京都環境局ホームページ 報道発表(東京駅周辺のトンネル地下漏水を立会川に導水します)(<http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/press/60B37200.HTM>)
- 東京都環境局ホームページ 報道発表(JR東北新幹線野駅周辺のトンネルに漏出する地下水を不忍池に導水します)(<http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/press/press2002/60c94100.htm>)
- 東京都環境局ホームページ 報道発表(JR武蔵野線引込線トンネルの地下水を野川に導水)(<http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/press/60a3o600.htm>)
- 東京都水道局, 2007: 東京都水道局環境計画(2007-2009)
- Torsten Grothmann and Anthony Patt, 2005: Adaptive capacity and human cognition: The process of individual adaptation to climate change, Global Environmental Change, 15(3), pp.199-213
- 都市水路検討会, 2005: 懐かしい未来へ～都市をうるおす水のみち～, 15pp  
[http://www.mlit.go.jp/crd/city/sewage/info/tosisuiro/050210\\_01.pdf](http://www.mlit.go.jp/crd/city/sewage/info/tosisuiro/050210_01.pdf)
- 雨水貯留浸透技術協会, 2003: 水循環 貯留と浸透, 第48号 <http://www.arsit.or.jp/usui/naiyou48.htm>
- 雨水貯留浸透技術協会, 2008: 水循環 貯留と浸透, 第66号 <http://www.arsit.or.jp/usui/naiyou66.htm>
- Vladimir Novotny, Paul Brown, 2007: Cities of the Future - Towards integrated sustainable water and landscape management, IWA Publishing, 352pp
- 和田一範, 村瀬勝彦, 富澤洋介, 2005: 地球温暖化に伴う降雨特性の変化と洪水・渇水リスクの評価に関する研究, 土木学会論文集, Vol.796, pp.23-37
- 渡部幹, 2006: 制度からガバナンスへ—社会科学における知の交差, 東京大学出版会
- 山本聡, 2007: 気候変動と水資源について, 河川, 2007-1月号, pp.42-47
- 山中直他, 1995: 1994年の渇水に伴う琵琶湖水質の変動, 環境システム研究, 23, pp.376-381
- 芳村圭, 咲村隆人, 沖大幹, 2006: 2005年9月4日東京市街地浸水災害における気象水文状況分析, 生産研究, 58巻3号, 139-142