

3章 淡水資源とその管理

目次

要旨	3
3.1 はじめに.....	4
3.2 現在の感受性、脆弱性	6
3.3 将来の傾向の想定	13
3.3.1 気候要因	13
3.3.2 非気候要因.....	16
3.4 重要な将来の影響と脆弱性.....	18
3.4.1 地表水.....	18
3.4.2 地下水.....	23
3.4.3 洪水と渇水.....	26
3.4.4 水質	29
3.4.5 浸食と土砂輸送	32
3.5 コストと他の社会経済的側面	34
3.6 適応：実践、施策と制約.....	46
3.6.1 適応策とはなにか.....	46
3.6.2 適応策の原則	48
3.6.3 適応策の実践.....	49
3.6.4 適応策と適応力の限界.....	50
3.6.5 不確実性とリスク：不確実性下での意思決定.....	51
3.7 結論：持続可能な開発へ向けた示唆.....	53
3.8 重要な不確実性と研究の優先順位	55

要旨

気候変動がもたらす淡水システムとその管理への影響は、主に、これまで観測／予測されている気温の上昇・海面上昇・降水量変動の増大によるものである(確信度がかなり高い)。世界の人口の6分の1以上が氷河や積雪に依存した河川流域に住んでおり、河川流量の季節変化、年流量に対する冬季流量比の増加、氷河や積雪による水貯留量の減少による低水流量の減少に影響を受けるだろう(確信度が高い) [3.4.1、 3.4.3]。海面上昇は、地下水や入江が塩水化される地域を広げ、結果的に沿岸地域で人間および生態系が利用できる淡水量を減少させるだろう(確信度がかなり高い) [3.2、 3.4.2]。降水強度と降水量変動の増加は、多くの地域で洪水および渇水の危険性を上昇させると予測されている(確信度が高い) [3.3.1]。

気候変動が淡水に与える影響は、半乾燥帯および乾燥帯において特に大きい(確信度が高い)。

これらの地域の多くでは(例：地中海周辺・アメリカ合衆国西部・アフリカ南部・ブラジル北東部)、気候変動による水資源の減少に影響を受ける(確信度がかなり高い) [3.4、 3.7]。既に水資源が貧困している地域では、地下水涵養量の大幅な減少が予測されているため、降水量変動の増大による地表水の利用可能量の減少を補うことは難しい(確信度が高い) [3.2、 3.4.2]。そのような地域では、急速な人口増加と水需要の増加によって、しばしば脆弱性が増している(確信度がかなり高い) [3.5.1]。

水温の上昇・降水強度の増加・低水流量期間の長期化は、さまざまな形で水質汚染を悪化させ、生態系・人間の健康・水管理システムの信頼性や管理コストに影響を与える(確信度が高い)。

これらの汚染とは、土砂・栄養塩・溶存有機物・病原体・殺虫剤・塩類・温度汚染を含む[3.2、 3.4.4、 3.4.5]

気候変動は、既に存在する水関連インフラの機能および操作方法・水管理手法に影響を与える(確信度がかなり高い)。

気候変動が淡水システムに与える影響は、人口増加・経済活動の変化・土地利用の変化・都市化などによるストレスを、さらに増大させる(確信度がかなり高い) [3.3.2、 3.5]。世界的には、主に人口増加と裕福層の増加のために、今後数十年の水需要は増加する可能性が高い。地域的には、気候変動に基因する灌漑用水需要の大幅な増加が予測される(確信度が高い) [3.5.1]。現在の水管理手法は、気候変動が水供給の信頼性・洪水リスク・健康・エネルギー・水圏の生態系に与える負の影響を相殺するには不十分である(確信度がかなり高い) [3.4、 3.5]。現時点での気候の変動性に対応するために水管理方法を改善することは、

将来の気候変動への対応をより簡単にする(確信度がかなり高い) [3.6]。

いくつかの国や地域(例：カリブ海諸国・カナダ・オーストラリア・オランダ・イギリス・アメリカ・ドイツ)では、予測されている水循環の変化やその不確実性を考慮しており、水問題への適応策と危機管理はすでに実施されている。(確信度がかなり高い)。

IPCC の第 3 次報告書の段階から不確実性は考慮されてきたが、《第 4 時報告書では》その理解は深まっており、また、不確実性を考慮するための新たな手法(アンサンブル手法)が開発されている(確信度がかなり高い) [3.4、 3.5]。それにもかかわらず、流域スケールでは、降水量・河川流量・水位の定量的な予測は、まだ不確実な部分を残している(確信度がかなり高い) [3.3.1、 3.4]

気候変動が淡水システムに与える損害は、それによる便益を上回る(確信度が高い)。

全ての IPCC 加盟国・地域(3-16 章参照)において、気候変動は淡水資源と淡水生態系に正味で負の影響を与える(確信度が高い)。流出が減少すると予測されている地域では、水資源をもとに供給されているサービスの価値が下がる可能性が高い(確信度がかなり高い) [3.4、 3.5]。他の地域では、年間流出量が増加する便益もあるが、降水量変動の増大と流出量の季節変化が水供給・水質・洪水リスクに与える負の影響によって、その便益は打消される(確信度が高い) [3.4、 3.5]。

3.1 はじめに

水は全ての生命に欠かせないものである。水はほぼ全ての人間活動に必要である。安全な水へのアクセスは、全ての人間が有する権利とされており(国連経済社会文化権利委員会、2003)、安全な飲み水と衛生へのアクセスの拡大は、ミレニアム開発目標に取り込まれている(UNDP、2006)。淡水資源の持続可能な開発は、地域規模(例：EU、2000)や世界規模(国連、2002・2006；世界水会議、2006)で重要性が認識されており、これらに対応する科学の枠組みは「統合的水資源管理」である。

図 3.1 は、(量と質の両方において)人間活動が淡水資源に与える影響と、人間による淡水資源管理を概念的に示している。人為起源の気候変動は、淡水システムへのストレスの一部に過ぎない。気候と淡水システムは複雑な関係で影響を及ぼしあっている。システム内の 1 つの変化は、システムの他部分の変化も引き起こす。例えば、広大な湿地を干拓することは、水分のリサイクル機構を変化させ、地域的な境界条件が大規模循環より支配的な特定の月における降水量を減少させる(Kanae、2001)。反対に、気候変動は淡水の量と質に、平均値と変動幅の両面で影響を与える(例：洪水・渇水にとまなう水の利用可能量

の変化・変動)。水利用は気候変動によって影響を受けるが、人口・ライフスタイル・経済・技術の変化からもより大きな影響を受ける。とりわけ、世界最大の水利用分野である灌漑農業を左右する食料需要は、水利用に与える影響が大きい。水利用や水循環の顕著な変化は、(水供給や洪水・渇水に影響を及ぼすので) 水資源管理において適応策が求められる。第3次影響評価報告書の第2作業部会(TAR ; IPCC、2001) では、気候変動が水循環と水資源に与える影響に関する知見を、2000年までの文献に基づいて示した(Arnell et al、2001)。これらの知見は次のようにまとめられている。

- ・ 多くの地域で、河川流量が減少または増加しているという、顕著な傾向がある。
- ・ 気候変動が河川流量と地下水涵養に与える影響は地域ごと・シナリオごとに異なっており、ほとんどは予測されている降水量の変化に従っている。
- ・ 河川流量のピークは、雪解けが早くなるため多くの地域で春から冬に移り、夏と秋の流量は減少する可能性が高い。
- ・ 氷河は引き続き後退する可能性が高く、多くの小氷河は消失する。
- ・ 一般的に、水質は水温の上昇により悪化する可能性が高い。
- ・ 洪水の規模と頻度はほとんどの地域で増大する可能性が高く、低水流量は多くの地域で減少する可能性が高い。
- ・ 世界的には、人口増加と経済発展の結果として水需要は増加するが、いくつかの国では水利用効率の上昇により水需要は減少する。
- ・ 気候変動が水資源に与える影響は、システムの特長・システムに対するストレスの変化・水資源管理体制の発達・気候変動に対する適応策の選択によっても変化する。
- ・ 管理がなされていないシステムは、気候変動に対して最も脆弱である可能性が高い。
- ・ 気候変動は過去にない傾向の発生・新たな不確実性の付加をもたらす、現在の水資源管理体制に障害をもたらす。
- ・ 気候変動への適応力の分布は、世界で不均一である。

これらの知見は、現在までの評価で確認されたものである。この内のいくつかは更に発展しており、また新たな知見も加えられている。この章では、おもに第3次影響評価報告書の後に出版された論文をもとに、気候変動が淡水資源とその管理に与える影響をまとめていく。社会経済的な側面、適応策の問題、持続可能な発展のための示唆も盛り込まれている。この章では、淡水資源の管理にとって重大である液体の状態で存在する陸域の水に焦点を当てる。気候変動が水資源に与える影響の様々な側面とそれに関係する脆弱性が[3.4]に、水利用への影響が[3.5]に示されている。観測されている気候変動の傾向のより詳細な情報については1章を、寒冷地域における淡水資源については15章の[15.3、15.4.1]を、また雪氷圏については第4次影響評価報告書1巻(Meehl et al、2007)の10章[10.3.3]を、降水・蒸発散・土壌水分への影響については[10.3.2.3]を参照すること。水温の上昇が

水圏の生態系に与える影響は、2巻4章[4.4.8]で、河川流量の変化が水圏の生態系に与える影響に関する知見は3章[3.5]に示されている。水質・水量の変化に伴う健康への影響は8章に取り上げられており、淡水に関する地域的な脆弱性は9-16章で議論されている。

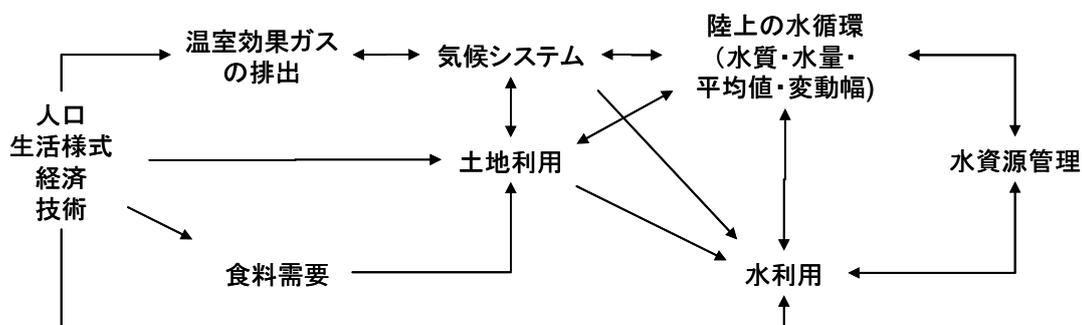


図 3.1 人間活動が淡水資源とその管理に与える影響
気候変動は多数のストレスのうちの1つに過ぎない
(Oki、2005に基づく)

3.2 現在の感受性、脆弱性

気温の上昇により、大気の水保持能力・大気への蒸発量は増大し、これはより強い降水やより多くの渇水が起こるなど、気候の変動性が高くなることを促進する (Trenberth et al、2003)。水循環は加速する (Huntington、2006)。どんな地域でも、増加幅は異なるものの1年のうちいつの季節においても、気温が上昇すると期待されている一方で、降水量は地球全体として、また多くの河川流域において、上昇すると期待されている。しかし減少する流域も多い。さらに、第4次影響評価報告書1巻10章[10.3.2.3] (Meehl et al、2007) で見えてきたように、降水量は上昇する季節もあれば、減少する季節もある。このような気候変動は地球淡水システムの全てに変化を引き起こす。

表 3.1 に見るようにすでに過去数十年間の気候に起因する傾向が観測されているものもあるが、地下水のように近年気候変動によってその状態が変化したかを断定できないものも多い。この数十年の間、非気候要因 (図 3.1) が淡水システムに強い影響をおよぼしてきた。これは結果として水質汚染・川のせき止め・湿地の干拓・流量の減少・地下水位の低下 (灌漑が主な原因) を招いてきた。これらに比べると、気候に関連した変化は小さかった。しかしながら、気候変動の兆しをもっと明らかになってくる未来においては違ってくる可能性が高い。

現在の気候に対する脆弱性は、気候の変動性、特に降水量変動に強く関連している。そうした脆弱性は半乾燥地域、および乾燥地域の低所得の国々でもっとも大きい。そうした国々では、降水量や河川流量が2、3ヶ月の間に集中し、年々変動が非常に大きい(Lenton, 2004)。このような地域ではもし深井戸や貯水池で貯留された水が不足すれば、気候の変動性に対して非常に脆弱である。さらに非気候要因によってストレスを受けている河川流域は、気候変動に脆弱になる可能性が高い。しかし、気候変動に対する脆弱なのはそうした地域だけではない。というのも水関連インフラ（例：堤防や水道システム）は安定した気候状態に合わせて設計されてきており、気候変動に関連する不確実性はようやく水資源管理分野においてようやく考慮され始めたばかりであるからである（[3.6]参照）。以下の段落では現在の地球淡水システムの要素の気候感度が議論されており、また地域の脆弱性が気候変動によって悪化する可能性が高いと考えられるような、例となる地域に関して焦点を当てて述べる。（図 3.2）。

観測された気候に関連した傾向	
降水	北緯30° 以北の陸域で1901年から2005年の期間で増加している。 南緯10° から北緯30° の陸域で1970年代以降減少している(WG I AR4、3章要旨)。 降水強度は増大している(WG I AR4、3章要旨)。
雪氷圏 積雪 氷河 永久凍土	多くの地域で、特に春に減少している(WG I AR4、4章要旨)。 ほとんど全ての場所で減少している(WG I AR4、4章[4.5])。 0.02mm/y(アラスカ)から0.4mm/y(チベット高原)の範囲の速さで溶けている(WG I AR4、3章要旨;本稿15章[15.2])。
地表水 河川流量	ユーラシア大陸では増加している。顕著に増加している流域もあれば、減少している流域もある。(本稿、1章[1.3.2])。 北アメリカとユーラシアでは春の流量のピークはより時期が早くなっており、冬の基底流量(◇平水時の流量)も増加している(本稿1章[1.3.2])。
蒸発散量 湖	実蒸発散量が上昇している地域もある。(WG I AR4、3章[3.3.3])。 水温が上がっている。顕著に水位が上下している湖もある。また湖面が氷結は減っている(本稿1章[1.3.2])。
地下水	気候に関連した長期傾向の証拠はない(本稿1章[1.3.2])。
洪水と渇水 洪水	気候に関連した長期傾向の証拠はない(本稿1章[1.3.2])。しかし、洪水による被害は増大している(本節)。
渇水	より乾燥した地域では1970年代以降、より激しい渇水に見舞われた(本稿1章[1.3.2];WG I AR4、3章要旨)。
水質	気候に関連した長期傾向の証拠はない(本稿1章[1.3.2])。
浸食と土砂輸送	気候に関連した長期傾向の証拠はない(本節)。
灌漑用水の需要	気候に関連した長期傾向の証拠はない(本節)。

表 3.1 地球淡水システムのさまざまな要素の気候に関連して観察された傾向。参考箇所はこの巻の1章と15章、第4次影響評価報告書3章(Trenberth et al、2007)と4章(Lemke et al、2007)。

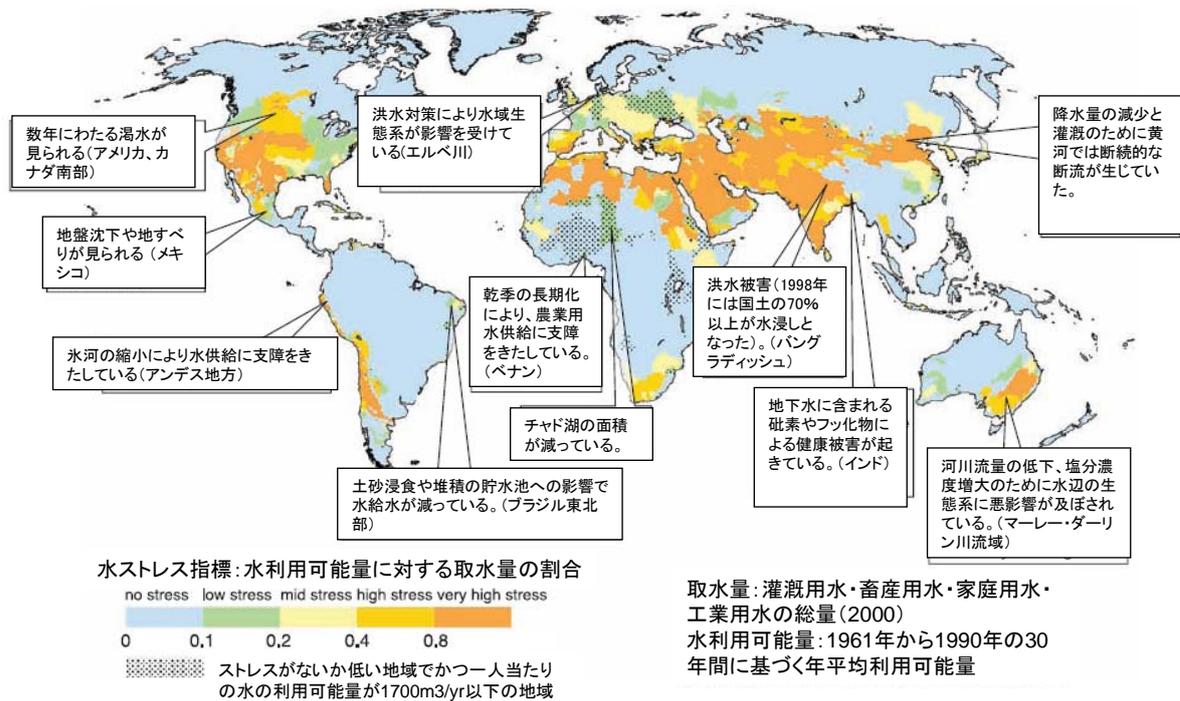


図 3.2 淡水資源の現在の脆弱性、とその管理の例。背景の地図は水ストレスを示す (Alcarno et al、2003a を基に作成)。本文の気候変動への関係の項を参照。

地表水と流出の発生

河川流量や湖や湿地などの地表水の気候変動に伴う変化は、降水量や時期と強度の変化 (Chiew、2007)・雪解け・降水が雪としてふるか雨としてふるかのどちらかか依存する。温度・放射量・大気湿度・風速の変化は可能蒸発散量に影響を与え、それは、降水量のわずかな増加を打ち消し、降水の減る影響は助長される。その上、大気中の二酸化炭素濃度の増加は直接的に植物生理を変化させ、蒸発散に影響をもたらす。多くの実験研究 (Triggs et al、2004) やグローバルモデルによる研究 (Leipprand and Gerten、2006 ; Betts et al、2007) によると、蒸発散量は減少を示し、そして、二酸化炭素濃度が高くなり植物の成長が早まる影響は蒸発散量の減少量のごく一部を打ち消すにとどまることを示している。Gedeny et al (2006) は 20 世紀を通して世界の河川の流出量が 3%増加したことを、二酸化炭素によって引き起こされた植物の蒸発散量の減少 (5%) が原因だと考えた。もしこの効果がなければ、雨の変化によって流出量を 2%減少させていたであろう。しかしながら、降水の時系列観測は非常に不確実であることなどの理由により、この原因特定は非常に不確実なものである。

流域生態地理学、水文地質学的特徴や湖や地下水貯留量次第で同じ気候要因に対しても異

なる流域は違った反応をする。

いくつもの世界中の湖はここ最近の 10 年間で、主に人間の水利用のために面積が小さくなっている。そのいくつかの事例に関しては、降水量の減少もまた、顕著な原因の一つである。例えば、チャド湖がその一例であり、1960 年以降主に人間の利水や灌漑用水のために減少してきた (Coe and Foley, 2001)。多くの湖や湿地にとって、もし気候変動により水利用可能性が減少するのなら、気候変動は生態系にも負の影響を与える可能性が高い。

地下水

一般的に地下水システムは気候変動に対して、地表水システムよりもゆっくりとした反応を示す。地下水の水位は降水量よりも温度により強く関連するが、浅い帯水層や暖かい期間においては温度がより重要となる。

洪水と渇水

主に天気や水に関連する災害の被害は人口や経済成長よりもとても早く増大していて、これは気候変動の負の影響の表れだと考えられる (Mills, 2005)。しかし、ここ数 10 年の間では気候に関連した洪水の長期傾向の明確な証拠はない (表 3.1; Kundzewicz et al, 2005; Schiermeier, 2006)。しかし、観測された降水強度の増大 (表 3.1) や他の観測された気候変動 (例: 冬のヨーロッパの西風パターンが雨の多い低気圧配置を導く) は、気候が洪水発生にすでに影響を及ぼしているかもしれないことを示唆している。(Kron and Bertz, 2007)。世界的には、この 10 年 (1996 年~2005 年) の内陸の重大な洪水災害の件数は、10 年当たりで見て、1950 年から 1980 年の 2 倍大きくなっている。一方で、経済的被害は 5 倍大きくなっている (Kron and Bertz, 2007)。洪水の被害が上昇傾向にあることの主な要因は社会経済学要因 (例: 脆弱な地域での人口や富の増加や土地利用の変化) である。洪水はアフリカやアジア、それにヨーロッパではもっとも報告されやすい自然災害であり、これは、他の全ての自然災害より多くの人々 (平均で、1 億 4000 万人/年) に影響を与えている (WDR, 2003, 2004)。バングラディッシュではこの 20 年間で三つの大規模な洪水が起こり、1998 年には国土の 70% もの土地が浸水した (Mirza, 2003; Clarke and King, 2004)。いくつかの流域 (例: ドイツのエルベ川流域) では洪水の危険性増大に対して構造物等の建設により洪水防護システムを強化した結果、川岸や水辺の生態系へ有害な影響が見られる (Wechsung et al, 2005)。

渇水は天水農業生産物や、生活・工業・農業用の水供給に影響を及ぼす。地球上のいくつかの半乾燥地域、半湿潤地域 (例: オーストラリア (11 章[11.2.1]参照)・西アメリカ・南カナダ (14 章[14.2.1]参照)・サヘル (Nicholson, 2005)) では、より強度が増した、数年にわたる渇水に苦しんでいる。それは、今後気候変動により増えると予想される渇水の発

生に対する、これらの地域の脆弱性を強調している。

水質

湖や貯水池において、気候変動の影響は主に水温の変動によるものであり、それは直接的には気候変動から、間接的にはエネルギー部門の冷却水需要の高まりによりおこる熱汚染の増加から、結果として生じている。この影響の結果、酸素の状態・酸化還元電位¹（レドックス電位）・湖の層構造・混合率・生物相の発達に影響を与える。というのもそれらは、全て温度に依存するためである（4章参照）。水温が上昇することで、生分解に使われる溶解酸素量が減少し、川の自浄作用に影響を与える。こうした傾向はカナダ、ブリティッシュコロンビアのフレーザー川の水温から見出されている。河川内で水温が 20°C を越える河道区間はこれまでより長くなり、それは鮭の生息数が減り始める境目の温度と考えられている（Morrison et al, 2002）。さらに、激しい降雨が増加することで、より多くの栄養塩や病原体・有毒物質が水体に流される。Chang et al (2001) はチェサピーク-デラウェア湾地域で、降水量の増加により川からの窒素負荷が最大 50%増加すると報告している。

気候変動に関連する多くの病気は、水を飲んだり、汚染された水で灌漑された穀物を消費したりすることで、水を介して伝染されうる（8章[8.2.5]）。給水の中に病原体がいるかどうかは極端な降水の発生と関係づけられてきた（Yarze and Ghase, 2000 ; Curriero et al, 2001 ; Fayer et al, 2002 ; Cox et al, 2003 ; Hunter, 2003）。帯水層において、ウイルスの含有量と極端な降雨に関連があるかもしれないことが分かっている（Hunter, 2003）。アメリカでは 20% から 40% の水に起因する病気の発生が極端な降雨に関係している可能性がある（Rose et al, 2000）。乾燥期の水質に対する影響はまだ十分に研究されていないが（Takahashi et al, 2001）、水利用可能量が低いと希釈されにくくなるのは明らかである。

世界規模で見ると、地下水中の砒素やフッ化物による健康被害が他の化学物質による被害よりも深刻である（United Nations, 2006）。その影響が見られる地域は、インド・バングラディッシュ・中国・北アフリカ・メキシコ・アルゼンチンであり、1 億人以上の人々が砒素中毒やフッ素沈着症（フッ化物の過度の摂取により歯や骨におこる病気）に悩まされている（United Nations, 2003 ; Clarke and King, 2004 ; 13章[13.2.3]参照）。

沿岸域は水に乏しいにもかかわらず（全世界の再生可能な水供給の 10% 以下である）（Small and Nicholls, 2003 ; Millennium Ecosystem Assessment, 2005b）、世界人口の 4 分の 1 が住んでおり、著しい人口増加が進行中である。帯水層からの過度の取水による塩水の浸

¹ 環境中の酸化還元電位の変化とは例えば、酸化（好気性）状態から還元（嫌気性）状態に移動するなど、そこで起こる反応の変化を意味している。

入は、海水面の上昇の影響によってさらに悪化することが予想され、今まで以上に高い塩分濃度の増大や淡水の利用可能性の低下をもたらす (Klein and Nicholls, 1999; Sherif and Singh, 1999; Essink, 2001; Peirson et al, 2001; Beach, 2002; Beuhler, 2003)。塩水は河口域や河川に影響を及ぼす (Kington et al, 1992; Mulrennan and Woodroffe, 1998; Burkett et al, 2002; 13 章を参照)。地下水涵養の減少によってもたらされる地下水の塩化もまた内陸の帯水層 (例: カナダのマニトバ) などで見られる (Chen et al, 2004)。

水質の問題やその影響は、特に微生物や病原体の含有量に由来する問題において、先進国と途上国で種類や大きさが異なる (Lipp et al, 2001; Jimenez, 2003)。先進国では、洪水に関連し、水に起因する病気は適切に整備された水と公衆衛生サービスによって押さえ込まれている (McMichael et al, 2003)。しかし、これは発展途上国ではそうも行かない (Wisner and Adams, 2002)。残念なことに、コレラやサルモネラの例外を除いて、水や排水中の微生物の含有量と気候変動との関係性の研究は、途上国において、ある特定の原生動物類や、寄生虫などの重要な病原体には焦点をおいてこなかった (Yarze and Chase, 2000; Rose et al, 2000; Fayer et al, 2002; Cox et al, 2003; Scott et al, 2004)。アフリカ・ラテンアメリカ・カリブ海諸国の都市の給水の 3 分の 1・アジアの都市の給水の半分以上は渇水の時期には運営が中断することがある (WHO/UNICEF, 2000)。これは供給システムの水質に悪い影響を及ぼす。

浸食と土砂輸送

降雨量と降雨強度は水の浸食に対する気候変動の影響を左右するもっとも重要な要因であり (Nearing et al, 2005)、それらは斜面の安定性・河床の変化・土砂輸送などを含む多くの地形学的なプロセスに影響する (Rumsby and Macklin, 1994; Rosso et al, 2006)。データが乏しく、また気候は浸食や堆積物の移動を引き起こす唯一の要因ではないので、過去において、浸食や土砂輸送の気候に関連した傾向があるという証拠はない。脆弱な地域の例としてはブラジル東北部を見出すことができる。ここでは、貯水池における堆積が水貯水量を顕著に低下させていて、その結果水供給も減少している (De Araujo et al, 2006)。そして降雨強度の増加による浸食の増大はこの問題を悪化させるだろう。急な丘の斜面の住居、特に発展途上国での大都市における非公式居住地域 (< =スラム街 >) (United Nations, 2006) は水による浸食や地滑りの増加に対して脆弱である。

水利用・水利用可能量・水ストレス

人類の水利用は灌漑用水がもっとも多く、その使用量は世界全体の取水量のほぼ 70% を占めていて、また世界全体の消費的水利用 (すなわち下流で再利用できない水量) の 90% 以上を占めている (Shiklomanov and Rodda, 2003)。工業化したいくつかの国々を除いて世界のほとんどすべての国々では、人口・経済の成長、生活スタイルの変化、水供給シス

テムの拡大により水利用はこの数十年間で増えてきている。水の利用、特に灌漑用水の利用は一般的に温度とともに上昇し、降雨とともに減少する。過去において、水利用の気候に関連した傾向があるという証拠はない。これは、水利用は主に気候に関係のない要因に影響されているという事実や、概していい水利用データが少なく、特に時系列での水利用データの乏しさに起因する。

地表の水源や浅い地下水の井戸からの水利用可能量は河川流量の季節や年毎の変動に依存し、安全した水供給は季節毎の低水流量で決定される。雪が支配的な流域では、気温が高いと河川流量が低下し、夏の水供給を減らす (Barnett et al, 2005)。例えば、アンデス山脈沿いの南アメリカの川の河川流域では、氷河が小さくなってきている (Coudrain et al, 2005)。半乾燥地域では気候変動は河川流量がほとんどもしくはまったくない乾季を引き伸ばすかもしれない。そうすると、貯水池や真相地下水に頼ることが出来ない水利用者にとって影響は非常に大きい。(Giertz et al, 2006)。

現在、多くの河川流域において人類と自然の生態系は水不足に悩んでいる。世界規模の評価では、水のストレスを抱えている流域は、一人当たりの水利用可能量が $1000\text{m}^3/\text{yr}$ 以下 (長期間の平均の流出量に基づいて) であるか、あるいは長期間の年平均流出量に対する取水量の比が 0.4 より高いことのどちらかにより定義される。これらの地域は、アフリカ・地中海地方・中近東・南アジア・中国北部・オーストラリア・アメリカ・メキシコ・ブラジル東北部・南アメリカの西海岸部にみられる (図 3.2)。このような過酷な問題にさらされている流域に住む人の人口は 14 億人から 21 億人にも及ぶと推定されている (Vorosmarty et al, 2000 ; Alcamo et al, 2003a, b ; Oki et al, 2003a ; Arnell, 2004b)。水の欠乏する地域では、人々や生態系は、気候変動により減少し変動性の増した降水量に対して特に脆弱になっている。例えば、中国、黄河流域では (Yang et al, 2004)、貯水池によって容易に得られるようになった灌漑用水の消費量の増加と、この半世紀間のエルニーニョ南方振動 (ENSO) 現象に関連する降水量の減少が重なった結果、水不足が起きている (Wang et al, 2006)。灌漑用水の多いオーストラリア、マリー・ダーリング川流域では湿地への水の流入量の減少や灌漑用水の利用に起因する高い塩分濃度に苦しんでおり、それはまた、水辺の生態系に影響を与えている (Goss, 2003 ; また 11 章[11.7]も参照せよ)。

現在の適応策

2006 年にメキシコで開かれた第四回世界水フォーラムでは、関わっているグループの多くが統合的水資源管理の下で気候変動を包括的に扱うことを要請した。(世界水会議、2006) いくつかの国々 (例：カリブ海諸国、カナダ、オーストラリア、オランダ、イングランド、アメリカ、そしてドイツ) では、淡水システムへの気候変動の影響を考慮した水部門における適応のリスク管理の実践がすでに行われている。([3.6]と比較せよ)。

3.3 将来の傾向の想定

2章では気候変動の主な要因に関するいくつかのシナリオと、その影響を示した。本章では、21世紀の主たる要因に着目し、それら淡水システムの駆動要因が将来どのように発達すると予測されているかを示す。気候要因と非気候要因は区別される。非気候要因の将来の傾向に関する想定は、気候変動に対する淡水システムの脆弱性を見積もるために、また気候要因と非気候要因の相対的重要性を比較するために不可欠である。

3.3.1 気候要因

将来の予測

水利用可能量の最も支配的な気候要因は降水量・気温・可能蒸発散量（地表面での正味放射・大気湿度・風速・気温によって決まる）である。気温は、特に降雪が主となる流域や沿岸域（海面での気温の影響による）で重要となる。

以下の、将来の気候変動に関する要約は第1次作業部会、第4次影響評価報告書（WG I AR4）10章（Meehl et al、2007）より引用した。IPCC 排出シナリオに関する特別報告書（SRES ; Nakicenovic and Swart、2000）に基づくと、工業化以前と比較して2020年までに世界平均地表面気温では、最も起こる可能性が高いのは1°C程度上昇である。21世紀末までにはA2排出シナリオで最も起こる可能性が高いのは3から4°C、B1で2°Cの上昇である（図10.8）。温暖化予想の地理的パターンは、北半球高緯度陸域で昇温が最も激しいことを示している（世界平均昇温のおよそ2倍）（10章、政策決定者向け要約、図10.9参照）。昇温は北極圏を除いて冬季より夏季に大きくなると見積もられている（図10.9）。可能蒸発散量はほぼ全ての地域で増大する可能性が高い（図10.9、10.12）。世界の平均海面水位の上昇量は今世紀中に14から44cmに達すると見られている（10章、政策決定者向け要約）。気候変動によって平均降水量は世界的に増加する。最新の気候モデルは高緯度地域と熱帯（例：南西モンスーン地帯や大西洋熱帯地域にかけて）では降水量は増加し、亜熱帯（例：アフリカ北部からサハラ北部にかけて）では減少すると予測する傾向がある（図10.9）。

程度の違いはあるが、気温は一年のうちどの季節でも上昇すると見られている一方で、降水量は増加する季節もあれば減少する季節もある。確かな事実として、将来の降水量変動は大きくなる（Trenberth et al、2003）。ヨーロッパにおける極値降水変化に関する近年の研究（Giorgi et al、2004 ; Raisanen et al、2004）では、平均降水量は減少する傾向があるところさえも、日単位の降水強度は概ね増加するという事に同意している。（Christensen、Christensen、2003 Kundzewicz et al、2006）。ヨーロッパでは雨天の日数は減少すると見られており（Giorgi et al、2004）、西、中央ヨーロッパの冬季を除いて

は乾季の拡大につながる。南部を除いたヨーロッパほぼ全域での強い降水の日数の増加は予測されてきた。(Kundzewicz et al, 2006)。SRES A1B、A2、そして B1 シナリオの九つのモデルからなるマルチモデルシミュレーションは、年間の最大連続晴天日数 A1B と A2 でのみ増加する一方で、A1B と A2 では降水強度は激しく増大し、B1 でも少し増加することを示している。(WGIAR4 図 10.18)。

不確実性

目標年次の長さによって気候変動の予測の不確実性も増加する。近い将来(例:2020年代)では気候モデルの不確実性に最も左右されるが、一方で長期の予測では排出シナリオの選択による不確実性が極めて顕著になる(Jenkins and Lowe, 2007)。

大気大循環モデル(GCM)は、将来の気候変動を引き起こすいくつかの複雑な過程を考慮する上で有効な手段である(Karl and Trenberth, 2003)。しかしながら、近年 GCM による予測はモデル化の過程で顕著な不確実性にさらされており(Mearns et al, 2001; Allen and Ingram, 2002; Forest et al, 2002; Stott and Kettleborough, 2002)、そのため気候の予測を水文学的影響の研究に組み込むことは容易ではない(Allen and Ingram, 2002)。結合モデル相互比較プロジェクトでは18の GCM の出力が解析された(Covey et al, 2003)。ほとんどの GCM による計算結果では降水シミュレーションを観測値と一致させることは困難だが、気温シミュレーションは一般によく一致する。このような不確実性が、GCM 直接出力を利用した際の河川流量のシミュレーションに偏りを生み出す(Prudhomme, 2006)。

同じ排出シナリオのもとでは、GCM によって異なる変化の地理的パターンを示し、淡水資源の最も重要な要因である降水量の予測において特にそれは顕著になる。Mheel et al (2007) によって示されているように、気温の変化の予測は降水量の変化の予測よりもはるかに一致する(WGIAR4, 10章, 図 10.9)。21世紀末までの降水量変化では、マルチモデルアンサンブル平均がインターモデルの標準偏差を上回るのは高緯度地域においてのみである。幾つかの地域にわたって、モデルは降水量の変化の兆候を否定している(Murphy et al, 2004)。不確実性を減少させるために、例えばマルチアンサンブルの結果(Murphy, 2004)など、様々なモデルパラメータによる複数の GCM からの多数の出力や、ひとつの GCM (climatepredictoin.net より; Stainforth et al, 2005) の数千の出力を使用する、といった方法がよく推奨される。これにより将来の変化の条件付確率シナリオの構築が可能になる(例: Palmer and Raisanen, 2002; Murphy et al, 2004)。しかしながら、そのような多数の集合は、淡水資源への影響の研究の取り組みにおいて実際に用いることは難しい。そのため、シナリオを用いて地域的な変化の幅を正しく示すことが出来なかったにも関わらず、特に海面気圧と降水量はアンサンブル平均を代わりによく用いる(Murphy et al, 2004)。ひとつの代替手段は幾つかの GCM からのわずかな出力を考慮することである(例:

世界規模では Arnell (2004b)、では流域規模 Jasper et al (2004))。

気候変動の淡水資源に対する影響の不確実性は、主に降水量の入力の不確実性によるもので、温室効果ガス排出 (Doll et al, 2003 ; Arnell, 2004b) や気候感度 (Prudhomme et al, 2003)、水文モデル自体 (Kasper, 2003) の不確実性の影響は少ない。イギリスの 2 つの流域 (Kay et al, 2006a) における洪水統計の不確実性の原因の比較から、不確実性の最大の原因は GCM の構造にあり、次いで排出シナリオ、最後に水文モデル化にあるという結論が導かれた。イギリスの月平均流量と低水流量の統計から、同様の結論が Prudhomme と Davies (2007) によって得られている。

変化する気候要因の淡水への影響に関する研究への導入

ほとんどの、淡水への気候変動の影響に関する研究は、例えば IPCC Data Distribution Centre (www.ipcc-data.org) などから得られる、長期間での月々の数値の平均の変化に基づいた降水量や気温の変化しか考慮していない。多くの影響研究において、今日の状態と矛盾のないシナリオを得るために、観測された気候データの時系列を、気象要素 (◇雨や気温など) の計算された変動に適合させている。この調整は、気候モデルの偏りは現在と将来の対象期間に同規模で現れるという想定のもとで、GCM の誤差の最小化を目的としている。これは、観測値と気候モデルによって算出された現在の値との差異が大きい、降水量の予測において特に重要である。モデルの出力は偏りが生じることがあり、流出水の変化は過小評価されうる (例 : Arnell et al, (2003) アフリカ, Prudhomme (2006) イギリス)。年々の、あるいは日々の気候変数の変動性の変化は水文的影響研究の計算に取り入れられないことがしばしばある。このことは将来の洪水や渇水、灌漑用水要求量の過小評価につながる。

GCM の出力を利用することのほかの問題として、GCM (典型的には数 100 キロメートル) と水文過程との空間格子スケールの不一致がある。さらに、グローバルモデルの解像度は極端な現象を引き起こす、現実的な循環パターンのシミュレーションを除外してしまう (Christensen and Christensen 2003 ; Jones et al, 2004)。これらの問題を解決するため、GCM の出力を時間的空間的解像度により詳細にするためのダウンスケール手法が発展してきた (Giorgi et al, 2001)。大規模な気候と小規模な気候の物理的、力学的関連にもとづいた力学的ダウンスケール技術 (高解像度領域気候モデル) と、大規模な大気の変動性と、観測された日々の地域的な天気の変動性の経験的関連性を用いた統計的ダウンスケール手法である。統計的ダウンスケールは、現在の気候によって決定された統計的関連性が、気候の変化した将来においても有効であるという想定をしている。ダウンスケール技術はモデラーが日々の変動性の将来の変化を組み込み (例 : Diaz-Neito and Wilby, 2005)、また将来の水資源管理のための河川流量の、確率的な情報提供の枠組みに適用することを可能

にするだろう (Wilby and Harris, 2006)。これらのアプローチは、水資源予測に影響を与える不確実性の、異なる原因ごとの相対的重要性を定量化する助けとなる。

3.3.2 非気候要因

多くの非気候要因が、世界規模で淡水資源に影響を及ぼしている (国連、2003)。量と質の両面で、水資源は、土地利用の変化・貯水池の建設や管理・汚染物質の排出・水や排水の取り扱いによって影響を受けている。水利用は、人口の変化・食物消費・経済政策 (水の価格設定を含む)・技術・ライフスタイル・淡水生態系の価値に対する社会の見識等によって左右される。気候変動に対する淡水システムの脆弱性もまた水管理に左右される。統合的水資源管理体制への移行は世界中で進行し (国連、2002 ; 世界銀行、2003 ; World Water Council、2006)、それは資源や生息地としての水を、政策決定の中心にすることが期待されている。これは、気候変動にたいする淡水システムの脆弱性を軽減させる可能性が高い。

2 章 (本章) では SRES シナリオに焦点を当て、人口・経済活動・土地被覆・土地利用・海面水位を含む非気候要因の将来的な発達の概観を示す。本節では、所要な淡水にかぎった要因の仮説について論じる。貯水池建設や廃止・排水の再使用・脱塩・汚染物質の排出・排水処理・灌漑などの水利用要因である。

現存する 45000 の巨大なダムと比較すればその数は少ないであろうが、途上国では今後も新たな貯水池が建設されていく可能性が高い (World Commission Dams、2000 ; Scudder、2005)。先進国ではダムの数は変化しない可能性がかなり高い。さらに、いくつかの先進国ではダム廃止の議論がなされており、フランスとアメリカではすでに廃止されたダムもある (Gleick、2000 ; Howard、2000)。環境用水要求量を考慮すると貯水池操作の修正が必要となり、そのため人類の水資源利用が制限されるかもしれない。

将来の排水利用や脱塩の増大は、半乾燥地帯及び乾燥地帯での増加する水供給のメカニズムに適している (Ragab and Prudhomme、2002 ; Abufayed et al、2003)。脱塩にかかるコストは減少してきており、内陸都市への水供給の選択肢として考えられている (Zhou and Tol、2005)。しかし、海洋生物の影響、脱塩過程で使用したほかの化学物質を含んでいる可能性のある、高度濃縮された海水の安全な処分や、高いエネルギー消費などの問題が未解決のまま残されている。これらはコスト面や二酸化炭素排出に負の影響を持ち、脱塩技術の発展を阻害しかねない (Cooley et al、2006)。

排水処理は水質の重要な要因であり、途上国・先進国双方での排水処理の増大は将来の水

質を改善する可能性が高い。EU では、例えばより効率的な排水処理は、都市排水指令と **European Water Framework Directive** の要求によって、河川に流入する点源栄養塩を減少すべき、とされている。しかし、微小な有機汚染物質（例：内分泌物質）は地表水と地下水で高濃度化すると見込まれている。それは、将来、途上国と先進国双方で化学物質の生産と消費が増大する可能性が高く（Daughton、2004）、それらの汚染物質のうちいくつかは現在の排水処理技術では取り除かれないからである。途上国では栄養塩・重金属・有機微小汚染物質の点源排出は増加すると見られている。大雨が降れば、非点源排出も全ての国で増加しうる。

地球規模の汚染物質排出の定量的シナリオは窒素に焦点を置きがちで、もっともらしい将来像の幅が広い。ミレニアム生態系評価のシナリオは、世界の窒素肥料使用は、2000年に90Mt だったのに対し、2050年までには110から140Mtに達すると見ている（ミレニアム生態系評価、2005a）。4つのシナリオのうち3つが、総窒素負荷は世界規模で増大としているが、一方第4のシナリオ、テクノガーデン（SRES B1シナリオに近い）では、現在と比べて大気窒素堆積が減少するため、淡水システムへの総窒素負荷は低下している。農業からの栄養塩と殺虫剤の流出拡散は、今後も先進国において水質の重要な問題となる可能性が高く、途上国ではさらに増大する可能性がかなり高いため、水質に決定的な影響を及ぼす。

水利用の最も重要な要因は人口と経済発展、そしてまた社会の水の価値に対する認識の変化である。後者は、灌漑用水供給より生活用水・工業用水供給が優先される問題や、節水技術や水の価格設定の適用の程度の問題にも言及している。4つのミレニアム生態系評価シナリオ全てで、2050年の人口当たりの国内水使用量は世界の全ての地域でほぼ等しく、100 m³/yr、すなわち2000年のヨーロッパ平均程度になるとしている（ミレニアム生態系評価、2005b）。これは使用量がサブサハラアフリカ（5つの要因から）では非常に大きく増大し、人口当たりの国内水使用がいつそう減少すると見られている先進国を除いた全ての地域でわずかに増大するという想定をしている（OECD）。これらのシナリオに加えて、他にも多くの将来の国内の産業用水利用に関するもっともらしいシナリオが存在しており、それぞれ大きく異なっている（Seckler et al、1998；Alcamo et al、2000、2003b；Vorosmarty et al、2000）。

将来の灌漑地域の範囲は、作付け強度、灌漑用水利用効率と並んで将来の灌漑用水利用の支配的な要因である。国連食糧農業機関（FAO）農業予測によると、途上国（世界の灌漑面積の75%）では、灌漑地の作付け強度を1.27から1.41crops/yrにあげ、灌漑用水利用効率をわずかに上昇させながら、灌漑面積が2030年まで0.6%/yrの割合で拡大していく可能性が高い（Bruinsma、2003）。この見積もりは気候変動を考慮していない。新たな灌漑用

地の多くは南アジア、中国北部、中近東や北部アフリカなどすでに水ストレスにさらされている地域に予定されている。しかし、4つのミレニアム生態系評価のシナリオでは、世界成長率が2050年までわずか0から0.18%であり、灌漑地域の拡大ははるかに少ないと予測されている。2050年以降はGlobal Orchestration（世界市場主義シナリオ：SRES A1シナリオに近い）を除いた全てのシナリオで灌漑面積は一定、あるいはやや減少するとみられている（ミレニアム生態系評価、2005a）。

3.4 重要な将来の影響と脆弱性

3.4.1 地表水

第3次影響評価報告書以来、気候変動が河川流量に及ぼす影響に関する100を越える研究が科学雑誌に発表されてきた。そしてさらに多くの研究が内部報告書で報告されている。しかし、研究は未だにヨーロッパ・北アメリカ・オーストラリアに強く集中する傾向がある。実質的にほぼ全ての研究が、気候モデルシミュレーション結果をシナリオとして入力した水文モデルを使用していて、そのうちの多くはSRESに基づいたシナリオを用いている（例：Hayhoe et al, 2004；Zierl, Bugman, 2005；Key et al, 2006a）。多くの世界規模での評価（例：Manabe et al, 2004a, b；Milly et al, 2005；Nohara et al, 2006）は河川流出の気候モデルシミュレーションを直接用いているが、推定される変化の信頼度は20世紀の流出量を正確にシミュレートすることはまだまだ出来ない気候モデルの能力に依存してしまう。

第三次報告書以来の方法論的な進歩は、気候モデル規模から流域規模へのそれぞれ異なるダウンスケール手法による結果の調査（例：Wood et al, 2004）、シナリオを作ったり、水文モデルを動かしたりするために地域的な気候モデルを使う研究（例：Arnell et al, 2003；Shabalova et al, 2003；Andreasson et al, 2004；Meleshko et al, 2004；Payne et al, 2004；Key et al 2006b；Fowler et al, 2007；Graham et al, 2007a, b；Prudhomme, Davies, 2007）、観測された気候データにシナリオを適用する方法の研究（Droque et al, 2004）、評価された気候変動の影響における水文モデルの不確実性の影響の調査（Arnell, 2005）などに集中している。一般に、これらの研究は、同じ情報源（全球気候モデル）から異なった方法でシナリオを作り出すことは気候変動の影響評価において本質的な違いを引き起こしうるが、水文モデルの不確実性はモデリングの手順でのミスや気候シナリオの違いよりも小さいかもしれないことを示している。しかし、将来の河川流量の不確実性に最も大きく寄与しているのは、シナリオを得るために用いられるGCM間の差異である。

図 3.3 から、A2 排出シナリオと第三次報告書で使われた異なる気候モデル下での、将来の気候変動による 2050 年代までの長期的な年平均河川流出への世界中の影響の兆候をみることが出来る (Arnell、2003a)。明らかに、大河川の流域においてさえ、異なった気候モデルからの気候変動シナリオは、将来の流出変動の大きく異なった予測という結果を招きうる (例：オーストラリア、南アメリカ、南アフリカ)。

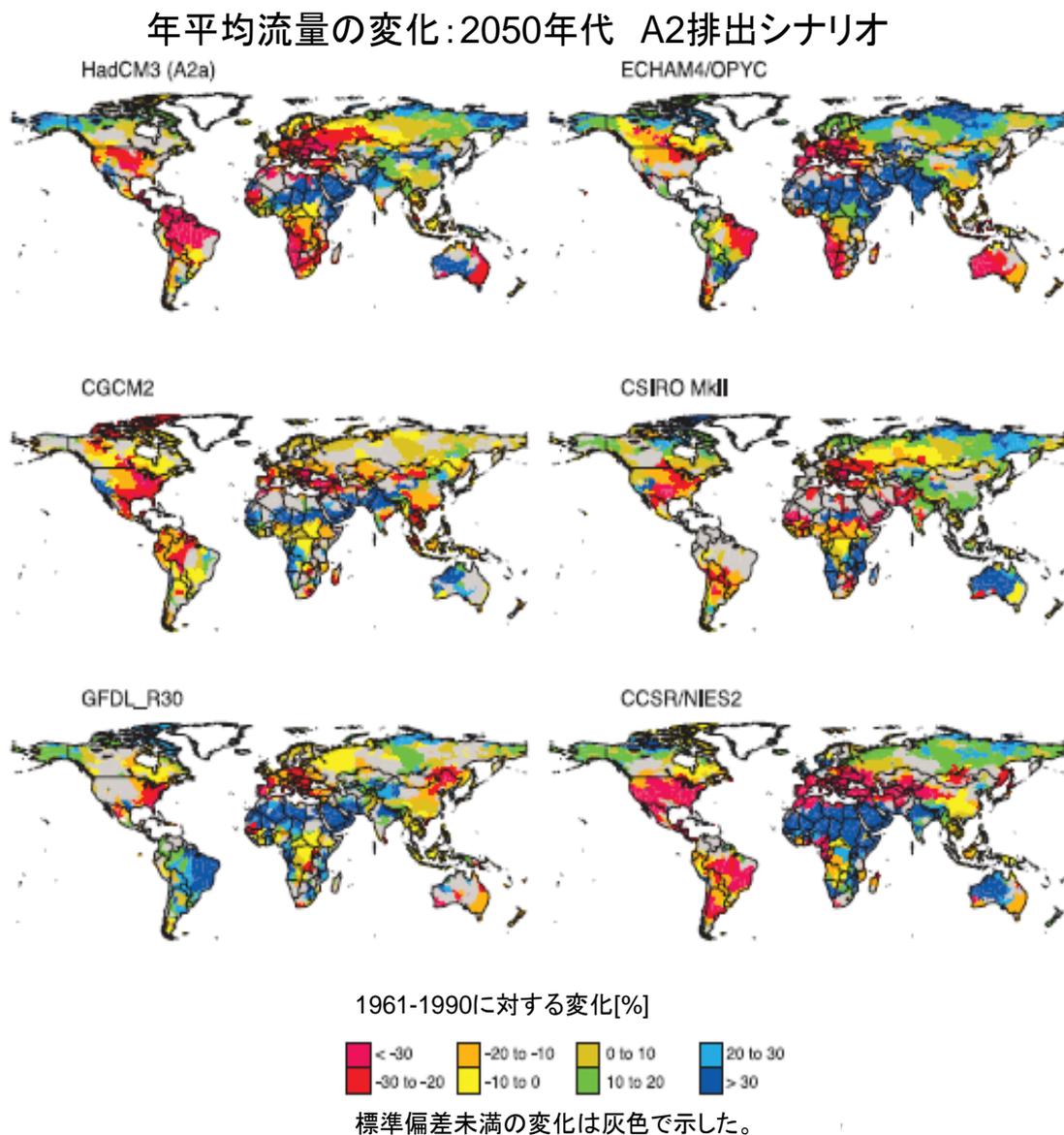


図 3.3 SRES A2 シナリオと異なった気候モデル下での 2050 年代までの年平均流出の変化 (Arnell、2003a)

図 3.4 は (12 の異なる GCM からの) 24 系統の気候モデルのアンサンブル平均に基づく SRES A1B シナリオでの、2050 年までの平均流出の変動を示している (Milly et al, 2005)。ほぼ全てのモデル実験では、少なくとも北アメリカやユーラシアの高緯度帯での 10~40%の増加という流出変動の方向性において合致している。これは Nohara et al (2006) による同様の研究の結果とも合致していて、その研究は北半球高緯度帯を除く全ての地域において、21 世紀の終わりまでの (19 の GCM からの) アンサンブル平均による流出の変動は標準偏差よりも小さいということを示している。より高い不確実性で、流出は湿潤熱帯地域で増加すると予想されうる。(10~30%) モデル間でのかなり強い合致が見られる流出の減少が顕著な地域には地中海・南アフリカ・アメリカ合衆国西部/メキシコ北部がある。一般に、20 世紀後半から 2050 年までの間に流出の減少する地域は拡大する (Milly et al, 2005)。

水文的影響の研究における非常に確固とした研究成果は、温暖化は現在雪としての冬の降水量の多い地域で河川流量の季節性の変動を引き起こすというものである (Barnett et al, 2005)。これはヨーロッパアルプス (Eckhardt, Ulbrich, 2003; Jasper et al, 2004; Zierl, Bugmann, 2005)・ヒマラヤ山脈 (Singh, 2003; Singh, Bengtsson, 2004)・北アメリカ西部 (Loukas et al, 2002a, b; Christensen et al, 2004; Dettinger et al, 2004; Hayhoe et al, 2004; Knowles, Cayan, 2004; Leung et al, 2004; Payne et al, 2004; Stewart et al, 2004; VanRheenen et al, 2004; Kim, 2005; Maurer, Duffy, 2005)・北アメリカ中部 (Stone et al, 2001; Jha et al, 2004)・北アメリカ東部 (Frei et al, 2002; Chang, 2003; Dibike, Coulibaly, 2005)・ロシアの領土全域 (Shiklomanov, Georgievsky, 2002; Bedritsky et al, 2007)・スカンディナヴィアとバルト海地域 (Bergstrom et al, 2001; Andreasson et al, 2004; Graham, 2004) での予測の中に見られる。その影響は (降雪がより限られている) 海拔の低いところで最も大きく (Jasper et al, 2004; Knowles, Cayan, 2004)、そして多くのケースでピーク流量は少なくとも一ヶ月早く起こっている。冬季の流量は増加して夏季の流量は減少する。

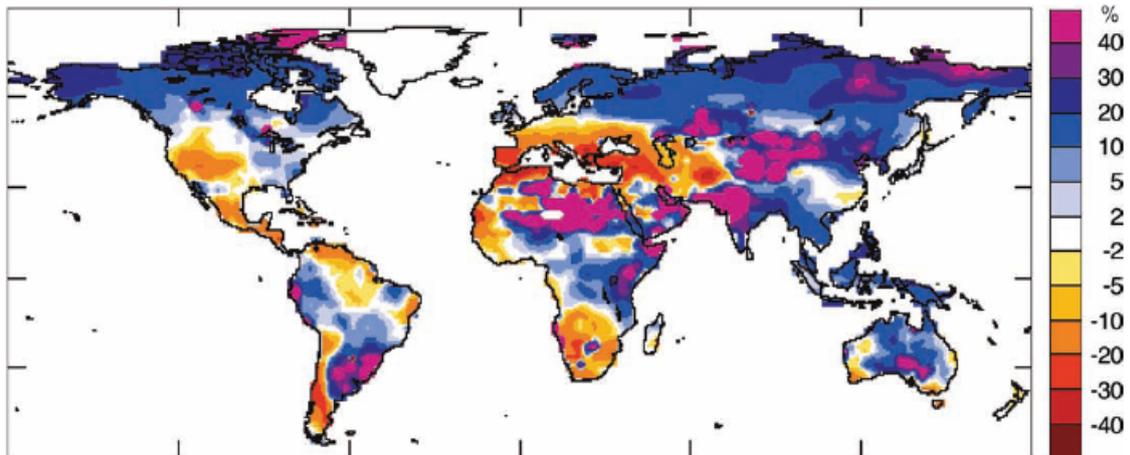


図 3.4 SRES A1B 排出シナリオと 12 個の気候モデルのアンサンブル平均に基づく、百分率表示での 1900～1970 年に対する 2041～60 年までの年流出の変動。Macmillan Publishers Ltd 「Nature」 の許可により再掲載 (Milly et al, 2005)、copyright 2005

多くの氷河流域、とりわけヒンズークシュヒマラヤや南アメリカのアンデスの河川では夏季は氷河の融解によって支えられている (Singh, Kumar, 1997 ; Mark, Seltzer, 2003 ; Singh, 2003 ; Barnett et al, 2005)。気温の上昇は氷河の融解の増加を引き起こす。Schneeberger et al (2003) は 2050 年までに北半球の氷河のなかには質量が 60%までに縮小することもあるという一例をシミュレートした。(1 章を見れば分かるように) これらの氷河が地球温暖化によって後退するので、河川流量は短期的には増加するが、氷河が融解することの寄与は今後数十年で次第に減少するだろう。

降雪が少量もしくは全くない地域では、流出の変化は、気温の変化よりも降水の変化により深く依存する。降雨が支配的である流域の研究 (Burlando, Rosso, 2002 ; Evans, Schreider, 2002 ; Menzel, 2003b, 2004a ; Boorman, 2003a ; Booij, 2005) における全体的な結論は、ピーク流量を示す季節にはより流量が多くなり、低水流量の季節にはより流量が少なくなるか乾期が延長することによって、流量の季節性が増大するというものである。大抵のケーススタディではピーク流量や低水流量の時期の変動はほとんどないが、東アジアでのモンスーンの開始が早くなり、中国でのピーク流量の時期を早める (Bueh et al, 2003)。

湖面水位の変動は主として、河川からの流入量、湖面への降水量、湖面からの蒸発の変動によって決まる。北アメリカの五大湖の影響評価は、21 世紀の終わりまでに -1.38~+0.35m の水位変動を示している (Lofgren et al, 2002 ; Schwarts et al, 2004)。Shiklomanov と Vasiliev (2004) は、カスピ海湖面水位が 0.5~1.0m の範囲で変動すると提言している。

Elguindi と Giorgi (2006) による 他の研究では、カスピ海の湖面高さは、主に蒸発量の上昇によって 21 世紀の終わりまでに約 9 m 下降すると見積もられている。いくつかの湖の湖面水位は流入と流出の均衡の変動を示している、ある短期的なシナリオのもとでは、ビクトリア湖の湖面水位は初めのうちは蒸発量の上昇が降水量の変動を打ち消して下降するが、その後降水量の上昇の効果が蒸発量の上昇の効果を上回るために上昇する (Tate et al, 2004)。

冬の気温の上昇は北部地域の水体が氷の状態が存在する状況をかなり変動させる。ロシアの State Hydrological Institute による 2010 年から 2015 年までと 1950 年から 1979 年までとの氷層を比較する研究では、シベリアの河川の氷層の持続期間が 15~27 日短くなり、氷層の最大厚さが 20~40% 薄くなることを示している (Vuglinsky, Gronskaya, 2005)。

モデルによる研究は、ライン川流域 (Pfister et al, 2004)、ミシガン州東南部 (Barlage et al, 2002)、ペンシルベニア州 (Chang, 2003)、エチオピアの中央部 (Legesse et al, 2003) では、土地利用変化による年間流出への影響が気候変動と比べて小さいということを示している。しかし、オーストラリア南東部 (Herron et al, 2002) や、インドの南部 (Wilk, Hughes, 2002) といったその他の地域では、土地利用による効果と気候変動による効果はより類似している可能性がある。オーストラリアの例では、気候変動は植林によって引き起こされた流出の減少をかなり悪化させる可能性がある。

大気中の二酸化炭素濃度の上昇には、蒸発散との 2 つの競合しあう潜在的な関係があり、よって水の均衡と流出とも関係がある。まず、二酸化炭素濃度の上昇によって、植物からの蒸発が起こる器官である気孔が通す水の量が減るので、蒸発量は減少する。二つ目に、二酸化炭素濃度の上昇によって植物の成長が促進されるので葉面積が増加し、よってその地域での合計の蒸発散量が増加する。しかしこの二つの効果の相対的な大きさの関係は植物種によって異なり、また栄養塩の豊富さや、気温変動の効果や、水利用可能量などの他の影響にも依存する。流出における二酸化炭素濃度の効果を説明するためには、水文モデルに動的植生モデルを合体させる必要がある。今少数のモデルがこれを行っている (Rosenberg et al, 2003 ; Gerten et al, 2004 ; Gordon, Famiglietti, 2004 ; Betts et al, 2007) が、それらは大抵 (流域規模ではなく) GCM 規模である。植生均衡モデルは葉面積の上昇が気孔の閉鎖を相殺するかもしれないということを示唆している (Betts et al, 1997 ; Kerg et al, 2002) が、全球動的植生モデルを用いた研究は、気孔の応答が葉面積の増加の影響よりも優勢であるということを示している。二酸化炭素に起因する植生変化を考慮すると、二酸化炭素の濃度上昇 (生理的な要因) による蒸発散量減少の結果として、二倍の二酸化炭素濃度下で全球平均流出が約 5 % 上昇すると見積もられている (Betts et al, 2007 ; Leipprand, Gerten, 2006)。これは、流域スケールでの変動 (図 3.3, 3.4, 3.7)

や、地球規模での流出変化に匹敵する（もしくはさらに大きい）かもしれない。例えば、全球平均流出は、143 個の二倍の二酸化炭素濃度の GCM シミュレーションのアンサンブル平均において、気候変動のみによって 5~17% 上昇すると算出されている (Betts et al, 2006)。

3.4.2 地下水

主に水の使用が全世界で増加するために、将来地下水の需要は増加する可能性が高い。その他に、全体的な降水量変動の増加と降雪が支配的な流域での低水流量の減少による地表水利用可能量の低下を埋め合わせる必要性という理由もあり得る (3.4.3 参照)。

気候変動は、地下水涵養率、すなわち再生可能な地下水資源や地下水位などに影響を与える。しかし先進国と発展途上国のどちらにおいても、現在の涵養量、地下水位に関する知識でさえ乏しい。気候変動が、水文学的に繋がっている地表水と帯水層の関係にどのように影響を与えているかという問も含めた、気候変動の地下水への影響の調査はほとんど行われていない (Alley, 2001)。(河川と帯水層が水文学的な強い繋がりを持ち、地下水涵養率が低いという) ある特定の条件下では、河川水位の変化が地下水涵養の変化よりも地下水位に強い影響を与える (Allen et al, 2003)。気候変動の結果として、世界の多くの帯水層では春の涵養が冬の方に移動し、夏の涵養は減少する。高緯度地域では、永久凍土の融解が地下水位と地下水の質の変動を引き起こすだろう。気候変動は植生の変動を引き起こし、それも地下水涵養に影響を与えるかもしれない。また、洪水の頻度と規模の増大によって、激しい雨や洪水が地下水涵養の源である特定の乾燥、半乾燥地帯では、地下水涵養は増加するかもしれない。半乾燥地域の基岩の帯水層は、亀裂や溶解細孔への降水の直接の浸透によって涵養される。また、沖積世の帯水層は主に洪水によって涵養される (Al-Sefry et al, 2004)。従って、地下水涵養の気候変動の影響を評価するには、降水量変動や、氾濫地域の変動の影響を含めるべきである (Khiyami et al, 2005)。

全球的な水文モデルの結果によれば、(全球で平均化された時) 地下水涵養は全体の流出の増加を上回らないレベルで増加する (Doll, Florke, 2005)。全体の流出 (地下水涵養と即時性の表面流と中間流の和) が参照気候基準である 1961~1990 年までから 2050 年代までに (SRES A2 シナリオに対する ECHAM 4 による結果では) 9% 上昇すると計算されている。一方で地下水涵養は 2% しか増加しない。調査された 4 つの気候シナリオでの計算結果では、地下水涵養はブラジル北東部、アフリカ南西部、地中海の南端に沿って 70% 以上の劇的な減少をする (図 3.5)。これらの全体での流出が減少する地域では、地下水涵養の減少率は、全体での流出の減少率よりも大きく、それは半乾燥地域では地下水涵養は日降水量がある閾値を越えない限りは起こらないというモデル推定のためである。しかしこ

の研究では、日降水量の変動の増加が考慮に入れられていない。地下水涵養が 2050 年までに 30%以上増加する地域には、サヘル、近東、中国北部、シベリア、アメリカ西部が含まれる。乾燥地域での地下水位の上昇は大抵の場合有益であるが、例えば市街地や農業地域では（土地の塩類化、湿化などの）問題を引き起こすこともあり得る。図 3.5 の 4 つのシナリオを比較することによって、低排出ならば地下水涵養の顕著な変動は引き起こされないことや、スペインやオーストラリアのようなある特定地域では 2 つの排出シナリオによる違いよりも、2 つの気候モデルによる違いの方が大きいことなどが分かる。

様々な帯水層の地下水への気候影響に関する研究で、地域に特有な結果を示しているものは少ない。結合された地下水と土地のモデルをベルギーの流域に用いることによって、夏の少雨と冬の多雨を予測するいくつかの気候シナリオでは、将来の地下水涵養と地下水位の減少が予想されている（Brouyere et al, 2004）。イングランド東部での白亜質の帯水層への気候変動の影響はこれと同様であると思われる。夏には、地下水涵養と河川流量は 50%程度にまで減少すると予想されていて、それは潜在的に水質の問題と地下水取水の制限を引き起こしうる（Eckhardt and Ulbrich, 2003）。カナダ南部での限られた白亜質の帯水層の降水、気温、地下水位に関する歴史的な分析に基づくと、地下水位の降水量との相関関係は、気温との相関関係よりも強いということが分かる。しかし、特に特定の層が薄い所において、気温が上昇すると地下水位の気温に対する感度が上昇する（Chen et al, 2004）。より高緯度の地域では、（成長環境の改善と蒸発散の増加による）生体量と葉面積の増加という要素によって、地下水と流出の気温上昇に対する感度はより強い。湿潤なアメリカ北東部では非常に大きい帯水層があるために、気候変動は 2030 年から 2100 年までの間に地下水涵養・地下水位・湿地・潜在的水供給量・低水流量などに様々な影響を及ぼすと計算された。それらの兆候や規模は地下水モデルの入力を算出するために用いられる気候モデルに強く依存する（Kirshen, 2002）。

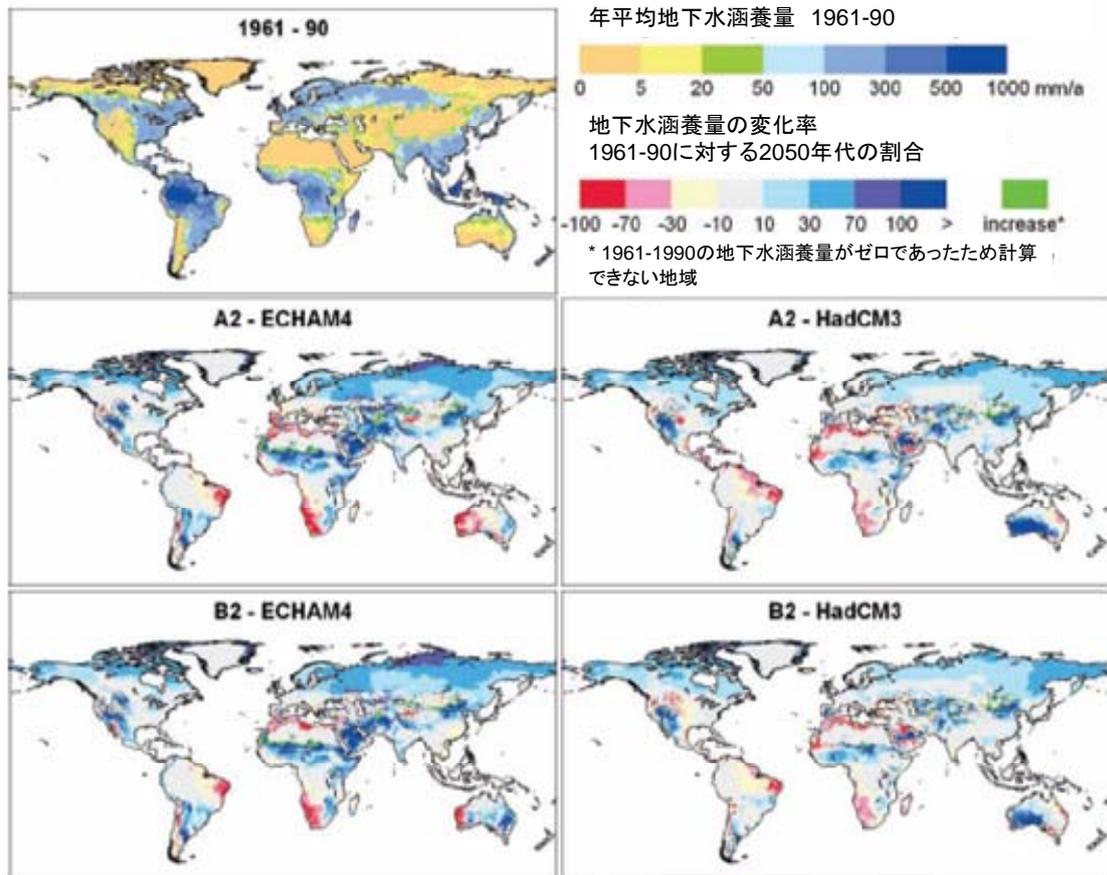


図 3.5 長期的な年平均拡散地下水涵養における気候変動の影響の計算結果。現在（1961～1990年）から2050年代（2041～2070年）の間の30年平均での地下水涵養の百分率変化。全球水文モデル WGHM によって計算される際、それぞれ2つの IPCC 温室効果ガス排出シナリオ A2、B2 を用いた4つの異なる気候変動シナリオ（気候モデル ECHAM4、HadCM3 によって算出された気候シナリオ）を適用した（Doll、Florke、2005）

気候変動は、蒸発散の増加による地下水の塩水化と同様に、海水の帯水層への浸入に強い影響を持っている可能性が高い。海面水位の上昇は沿岸域の帯水層で塩水の淡水地下水への浸入を引き起こし、それゆえ逆に、地下水資源にも影響を与える。インドの海岸沖の2つの小さくて低平なサンゴ礁の島においては、淡水の薄い層の厚さはたった0.1mの海面水位上昇で、25mから10mと36mから28mに減少すると計算された（Bobba et al、2000）。どの地下水涵養量の減少も海面水位上昇による影響を悪化させる。内陸の帯水層では、地下水涵養量の減少は近接する塩水帯水層からの塩水浸食を導き（Chen et al、2004）、半乾燥、乾燥地域での蒸発散の増加は浅い帯水層の塩化を招くかもしれない。

3.4.3 洪水と渇水

気候の温暖化に伴い気候の変動性が大きくなるにつれて、洪水および渇水のリスクは増加する (Wetherald and Manabe, 2002 ; Table SPM2 in IPCC, 2007)。洪水と渇水に影響する気候要因および非気候要因はいくつもあるため、そのリスクの発現はいくつかの要素によっている。洪水には河川洪水・鉄砲水・都市洪水・下水道洪水があり、その原因としては強いかつ／または長期的な降雨・融雪・ダムの決壊・流氷や土砂崩れによる流れの堰きとめがある。洪水は降水の強度・量・タイミング・河川や流域において先立つ条件 (例：雪氷・土壌特性・堤防やダム・貯水池の有無) による。氾濫原に人間が進出することや洪水対策計画の欠如は (訳者加筆：洪水による) 被害を受ける危険性を高める。

渇水とは気象的渇水 (降水量が平均よりはるか下)・水文的渇水 (河川・湖沼・地下における流量が小さいあるいは水位が低い)・農業的渇水 (土壌水分が小さい)・環境的渇水 (以上の組み合わせ) を指す。渇水の社会経済的影響は自然状態と人間の相互作用、例えば土地利用および土地被覆の変化、水需要および水利用の変化などから生じうる。過剰な取水は渇水の影響を悪化させうる。

気候モデル予測間で一致する確固とした結果の一つは、気温の上昇により極端な降水が起こりやすくなる可能性は非常に高いということだ (3.3.1 を参照)。降水強度はほとんどすべての地域で増加するが、平均降水量も増加する中高緯度地域においては特に顕著に増加する (Mheer et al, 2005、WGI AR4、Chapter 10、Section 10.3.6.1)。これは鉄砲水および都市洪水のリスクに直接的に影響する。雨水排水路は気候変動による降水強度の増加に適応できるようにしなければならない (Waters et al, 2003)。低緯度地域および中緯度内陸地域の夏季における渇水が増加する可能性が高い (WGI AR4、Summary for Policymakers、Table SPM.2) が、モデルの陸面構成によって変動しやすい。HadCM3 GCM と SRES A2 シナリオを用いた Burke et al.による 2090 年の見積もりは、特に湿潤化する地域や乾燥化する地域があること、全体としては基本的に乾燥化傾向にあることを示している。例えば、全球で極端な渇水下にある陸面地域の割合は 10-30 倍に増える、つまり現在の 1-3% から 2090 年までに 30% になる、と予測されている。100 年間の極端な渇水イベントの数と渇水平均期間は 2090 年までにそれぞれ 2 倍と 6 倍に増える可能性が高い (Burke et al, 2006)。南欧における夏季における降水量の減少は気温上昇を伴い蒸発要求を促進するため、必然的に夏季における土壌水分の減少につながり (Douville et al, 2002)、渇水はより頻繁により激しく起こることとなる。

気温が上昇するにつれて、降水量が雪でなく雨として降る可能性は秋季と冬季において気温が 0°C に近い地域において特に高まる (WGI AR4、Summary for Policymakers)。融雪

の時期は早まり、量は減ることが見込まれており、融雪水が水源となっている流域において水需要が最大となる夏季と秋季に渇水リスクが増える可能性がある (Barnett et al, 2005)。

地球上の人口の 6 分の 1 以上が氷河や雪塊の融水に水供給を頼る中、将来の水利用可能量について見積もられた変化は高い確信度で予測されすでにいくつかの地域において示されており、そのもたらす結果は不利であり厳しいものとなるだろう。乾季における水供給として氷河の融水に頼る度合いの強い地域において、渇水問題が予測されている (Barnett et al, 2005)。多くの小さな氷河、例えばボリビア・エクアドル・ペルー (Coudrain et al, 2005) は今後数十年間の間に消え、人や生態系に悪影響を与えるだろう。アンデスでは氷河の融水が長い乾季の間河川流と何千万という人々の水供給を支えている。氷河の急激な融解は河川の洪水や氷河融水による池の生成を引き起こす可能性があり、突発的な洪水への深刻な脅威となる可能性がある (Coudrain et al, 2005)。ヒンズークシュヒマラヤ氷河のすべてはここ 20 年間の間に減少した。それゆえ、中国とインドの何億という人々が頼るヒンズークシュとヒマラヤの氷河融水が水源となっていた地域の水供給は負の影響を受ける (Barnett et al, 2005)。

SRES A1 シナリオと似た IPCC IS92a 排出シナリオ (IPCC, 1992) において、洪水および渇水リスクの顕著な変化はヨーロッパの多くの場所で見込まれている (Lehner et al, 2005b)。洪水頻度の高まる傾向にある地域は北欧と東北欧であり、南欧と東南欧は渇水頻度の顕著な増加が示されている。これは ECHAM4 と HadCM3 両 GCM で計算された気候変動の結果である。両モデルの概算は 2070 年代までに現在の 100 年の再現期間を持つ規模の渇水はスペインやポルトガルの一部、東フランス、ポーランドのヴィスワ川、トルコ西部 (Figure 3.6) において平均して 10 年以下の再現期間となるという点で一致している。2080 年代までにイギリスの一部において、雨量が全体的に増加する一方で融雪洪水のピークが減少することを示す研究もある。

最近のある研究結果 (Reynard et al, 2004) は、すべてのシナリオにおいて頻度の高まりが見込まれていた以前 (第 3 次影響評価報告書以前) の評価と比較して、現在のイギリスにおける洪水頻度の将来変化に関する推定がはっきりと異なることを示している。気候変動による洪水の強度と頻度といった状況への影響は使用される GCM と融雪の影響の重要性と流域特性および場所に依拠しており、正の影響も負の影響も与えるという点で気候変動による影響の不確実性が再確認される (Reynard et al, 2004)。

カナダのオンタリオにおける Cunderlik and Simonovic (2005) の感度実験は融雪によって引き起こされる洪水の減少を算定し、降雨によって引き起こされる洪水の増加が予想された。年間最大流量の変動性は増加すると見積もられた。

Palmer and Raisanen (2002) は GCM 出力結果の対照標準と二酸化炭素が 2 倍となる時期の冬季降水量の差を分析した。ヨーロッパにおいて非常に湿潤な冬季となり、アジアにおいて非常に湿潤なモンスーン季節となるリスクの大幅な増加が見られた。北部における全冬季降水量が正常値の標準偏差の 2 倍以上となる確率はヨーロッパの大部分で大幅に増加し（5 倍から 7 倍になる）、冬季における洪水災害がその結果もたらされる可能性が高いと見込まれている。

Milly et al. (2002) は世界の 16 の大きな流域のうち 15 の流域について、二酸化炭素が 4 倍に増える結果、対照実験における 100 年の極値流量（月単位）を超える頻度が高まることを見込まれることを論証した。予測に大きな不確実性があるが、現在 100 年確率洪水とされている洪水（対照実験）はより頻繁に、2-5 年ごとで起こる地域さえもあると見込まれている。しかしながら、温和な地域の多くでは、融雪による春季洪水への影響は平均的に減少する可能性が高い (Zhang et al, 2005)。極端現象が同時に起こる可能性の将来変化についても考慮され、その例としては土壌水分と洪水リスク (Sivapalan et al, 2005)、河川洪水と高潮 (Svensson and Jones, 2005) がある。

極端現象が人間の福利に与える影響は適応能力の低い国々において過剰に発生する可能性が高い (Manabe et al, 2004a)。バングラデシュの洪水域は、全球気温が 2°C 上がることによって少なくとも 23-29% 増加すると見込まれている (Mirza, 2003)。2080 年代までに世界人口の 20% 近くが温暖化する中で増加する洪水災害の影響を受ける可能性が高い流域に住んでいる (Kleinen and Petschel-Held, 2007)。

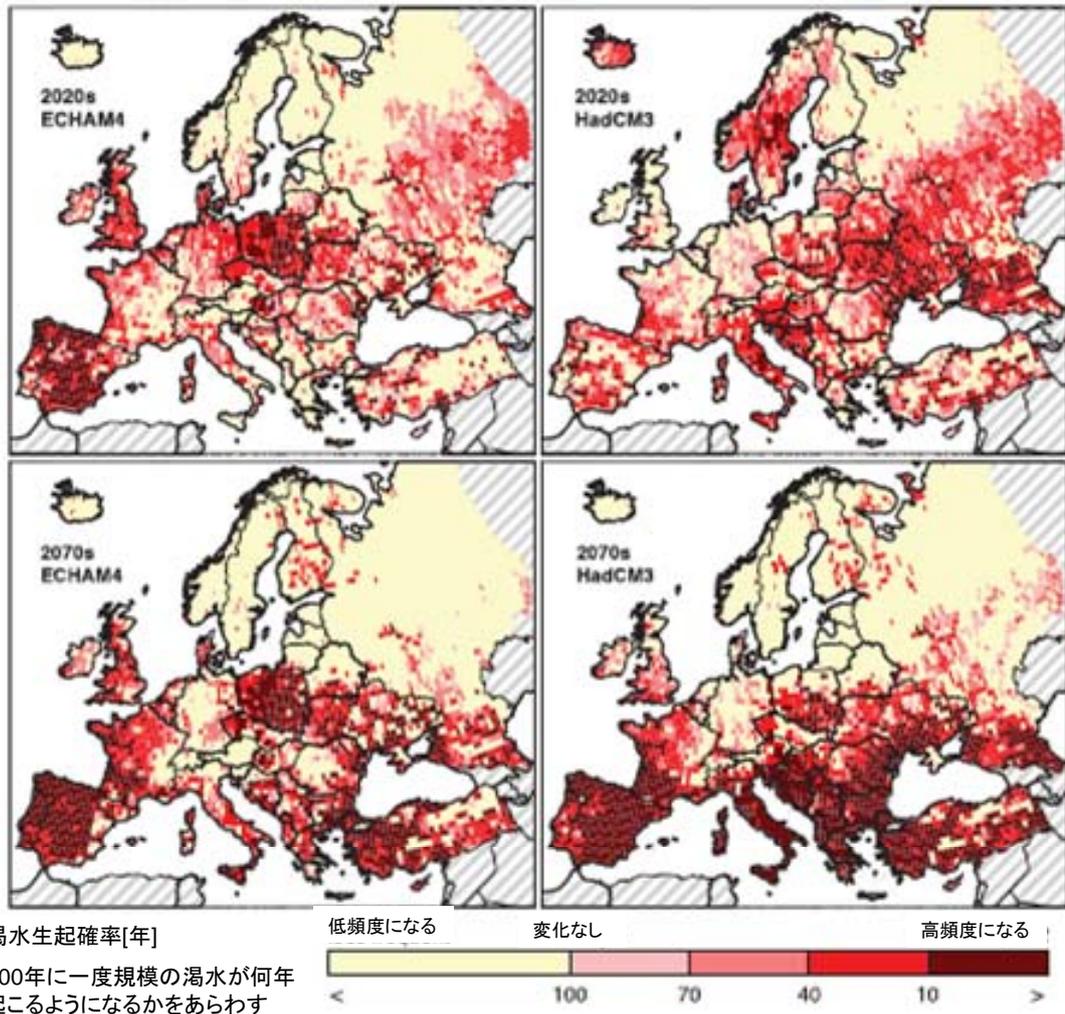


図 3.6 100 年確率渇水の変化を表す。1961 年と 1990 年の気候と水利用についての比較および 2020 年と 2070 年のシミュレーションに基づく (ECHAM4 と HadCM3 GCM による、IS92a 排出シナリオおよび特段の対策活動をしない場合の将来シナリオの場合)。数値は WaterGAP 2.1 により計算された (Lehner et al、2005b)。

3.4.4 水質

水温の上昇および流出の変動は人間の健康、生態系、水利用に対して不利益な変化をもたらす可能性が高い (Patx, 2001; Lehman, 2002; O'Reilly et al, 2003; Hurd et al, 2004)。河川や湖沼における水位の低下は堆積物や遊離化合物の再浮遊化につながり、水資源に負の影響を与える (Atkinson et al, 1999)。降雨の激化は河川の浸食によって湖沼や流域における浮遊性固形物 (濁度) の増加をもたらす。表面水温の上昇は藻の繁殖を促進し (Hall et al, 2002; Kumagai et al, 2003) 細菌および菌類の量を増加させる (Environment Canada,

2001)。これは塩素処理された飲み水の悪臭や味の悪さおよび毒素の発生につながりうる (Moulton and Cuthbert, 2000 ; Robarts et al, 2005)。加えて、下水処理場においてリンの除去能力を高めたとしても、藻の成長は温暖化に伴い長期的に増加するかもしれない (Wade et al, 2002)。高コストと藻の繁殖の断続性により、水道事業者はこの問題を現在の技術では解決できないだろう (Environment Canada, 2001)。流出量の増加による栄養塩や堆積物の増加は、水位が低下することもあいまって、水質に負の影響を与え (Hamilton et al, 2001)、特別な措置を施さなければ利用できないような水資源となる可能性がある。さらに、水温の上昇は揮発性および準揮発性化合物 (アンモニア・水銀・ダイオキシン・殺虫剤など) の地表水から大気への移動を増進する (Schindler, 2001)。

強い降雨が増加することが予期される地域では、汚染物質 (殺虫剤・有機物・重金属など) が土壌から水体に洗い流される量が増加する (Fisher, 2000 ; Boorman, 2003b ; Environment Canada 2004)。化学肥料と殺虫剤が使用される時期および植生の成長が緩やかな時期と同時的に流出が増加する地域では、流出が増加すると化学肥料と化学合成殺虫剤が水体に流出しやすくなる (Soil and Water Conservation Society, 2003)。また、酸性大気由来の堆積物によって河川や湖沼の酸性化が進むことが予期されている (Ferrier and Edwards, 2002 ; Gilvear et al, 2002 ; Soulsby et al, 2002)。

河川流量が減少する河口や内陸地域においては塩分が増加する (Bell and Heaney, 2001 ; Williams, 2001 ; Beare and Heaney, 2002 ; Robarts et al, 2005)。Pittock (2003) はオーストラリアのムレー・ダーリン川流域の灌漑地域より上流の支流において塩分集積が2050年までに13-19%、2100年までに21-72%進むと算定した。水の二次的な塩水化 (塩分の自然サイクルへの人間の介入作用によるもの) はすでに初期的な塩水化に悩まされている水体に頼る多くの人々をも脅かす。気候がより暑く乾燥する地域においては、乾燥を和らげるための人間活動 (灌漑・水路・貯留量の増加など) は二次的な塩水化状態を悪化させる。水の塩水化は海岸の海水侵入に悩まされている小規模の島嶼国や流出量が減少する亜乾燥帯と乾燥帯地域において主要な問題となると予期されている (Han et al, 1999 ; Bobba et al, 2000 ; Ministry for the Environment, 2001 ; Williams, 2001 ; Loaiciga, 2003 ; Chen et al, 2004 ; Ragab, 2005)。海面水位の上昇により地下水が塩水化する可能性は非常に高い。

極端な降雨の増加により、水由来の疾病は増加する (Hall et al, 2002 ; Hijioka et al, 2002 ; D'Souza et al, 2004 ; 8章も参照のこと)。渇水に悩まされる地域においては、下痢やその他水関連疾病の発生頻度の高まりは水質の悪化を映し出すこととなる (Patz, 2001 ; Environment Canada, 2004)。

途上国においては、公衆衛生の不備・正しい飲料水化過程の欠如・健康状態の悪さにより生態学的水質は低くなっている (Lipp et al, 2001 ; Jimenez, 2003 ; Maya et al, 2003 ; WHO, 2004)。したがって、気候変動は克服するのが難しい新たなストレス要素となる (Magadza, 2000 ; Kashyap, 2004 ; Pachauri, 2004)。残念なことに、気候変動が生物学的水質に与える影響を途上国の視点 (すなわち、途上国の典型的な組織体、排水を食糧生産に使用することの影響、質の低い水が灌漑に利用されている途上国特有の病気ともいえる寄生虫病などを考慮すること) から分析する研究はない (WHO/UNICEF, 2000)。

上水処理場および下水処理場がすでに存在する地域においても、微小生物の多様化は処理場がそれらに対応できるように計画されていないため、脅威となる。例えば、強い降雨に続くクリプトスポリジウムの発生は先進国が上水処理場の浄化過程に 1 段階増やすことを余儀なくさせ、これは事業コストの 20-30% の増加となったが (AWWA, 2006)、これは普遍的な例とは言えない。

水質の改善は将来次のことの結果として行われる可能性がある :

- ・ 水力発電のための貯水の増加 (Kennish, 2002 ; Environment Canada, 2004)
- ・ 海面上昇による海岸域の雨水処理と下水処理による介入作用
- ・ 質の低い水源からの取水の増加
- ・ 帯水層への浸透率の増加あるいは地表水への流出の増加による汚染物質量の増加
- ・ 洪水時の水関連インフラの機能不全 (GEO-LAC, 2003 ; DFID, 2004)
- ・ 極端な降雨による上水および下水処理場の処理能力の超越 (Environment Canada, 2001)
- ・ 汚染された雨水の増加

地表水と地下水の涵養量が減少することが見込まれている地域では、希釈度の低下により水質も悪化する (Environment Canada, 2004)。不運なことに、水質問題がすでに存在していようとも (3.2 を参照のこと)、そのような (◇質の低い) 水の利用が必要な地域もある。例えば、代替水源がなくヒ素またはフッ素を含む水が使われている地域においては、水質が悪化したとしてもその水を消費することが必要かもしれない。

世界人口の 10 分の 1 は排水によって灌漑された作物を消費すると推定されており (Smit and Nasr, 1992)、それはアフリカ、アジア、ラテンアメリカなどの途上国などである (DFID, 2004)。この数字は人口増加や富の増加により増加し、水をより効率的に利用することが必須となる (再利用を含む)。栄養塩の循環型利用の利点を認識しつつ (Jimenez and Garduno, 2001)、質の低い水を再利用することの健康および環境的なリスクを意識することが不可欠である。

途上国においては、脆弱性は適切な情報の欠如・環境の変化に対応する組織制度的な力の弱さ・資源を結集させることの必要性と関連がある。世界全体としては、脆弱性は不確実性の中にある環境変化に対して事前対策を施すことの必要性と関連がある。排水放出（より温かい水においては自浄作用が低下することを踏まえて）、気候の極端状態においても上水および下水処理場を効果的に稼働させること、水の再利用と再生方法を考慮することは再考されなければならないだろう（Luketina and Bender, 2002 ; Environment Canada, 2004 ; Patrinos and Bamzai, 2005）。

3.4.5 浸食と土砂輸送

水の均衡条件の変化は浸食・斜面安定性・水路変化・土砂輸送などの多くの地形学的過程に影響を及ぼす（Rumsby and Macklin, 1994）。水質の地形学的な変化による間接的な結果も存在する（Dennis et al, 2003）。さらに、水文地形学は淡水生息地において影響力のある要素である。

土砂浸食に関するすべての研究は降雨の量と強度の増加は保護策を取らない限り浸食の増進をもたらすと提起している。土壌浸食率は様々な理由から気候の変化に対応して変化することが予期されている。最も直接的な変化は降雨の浸食力である。その他は以下のとおりである：

- ・ 土壌水分状態の変化に伴う植物量生産の変化がおよぼす林冠の変化
- ・ 気温・水分に依存した土壌内微生物の活動・植物量生産率に影響される植物残渣率の変化によって引き起こされた地表面リター被覆の変化
- ・ 浸透および流出の割合に影響を与える降雨環境と蒸発散率の変化が引き起こす土壌水分における変化
- ・ 土壌有機物の集積の減少（より浸食の影響を受けやすい土壌構造につながる）および流出量の増加（土壌表面の稠密遮水化および硬化の増加による）による土壌浸食可能性変化
- ・ 冬季気温の上昇による浸食しない雪から浸食する雨への冬季降水量の変化
- ・ 永久凍土層の融解による浸食されない土壌状態から浸食される土壌状態への変化
- ・ 新しい気候状況に適応するために必要とされる土地利用の変化

Nearing (2001) は 2 つの GCM (HadCM3 と Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis CGCM1) の出力と月雨量と降雨による浸食性（土壌浸食を引き起こす降雨の力）の関係を用いてアメリカにおける降雨による浸食性の潜在的な変化を評価した。予測され

た変化は顕著であり、多くのケースにおいては大きかったが、モデル間の結果は規模と地域的な分布の双方において異なっていた。Zhang et al. (2005) は HadCM3 を用いて降雨による浸食性の潜在的な変化を評価した。降雨による浸食性の増加は 2050 年までに 11-22%増加すると見積もられた。

Micheal et al. (2005) は浸食の潜在的な増加量がドイツの Saxony にある 2 つのサイトにおいて今後 50 年間で 20-60%増加すると推定した。これらの結果はおそらくこの種の評価に含まれる数多くの相互作用の顕著な平易化に基づくものである（変化する気候による生物量生産など）。Pruski and Nearing (2002a) は HadCM3 GCM を用いてアメリカ合衆国の 8 つの場所における 21 世紀の浸食のシミュレーションを行い、浸食に影響する初歩的な物理学的かつ生物学的メカニズムを考慮した。シミュレートされた作物システムはトウモロコシと小麦であった。その結果は浸食過程に影響するいくつかの要素間の相互作用の複雑な傾向を示した。全体としては、降水量の増加が見込まれる場所では浸食は 15-100%増加すると推定された。降水量の減少が見込まれる場所では植物量・流出・浸食の相互作用により結果はより複雑であり、全体としては浸食の増加も減少も起こりうる。

土壌浸食および堆積物の生成に対する気候変動の顕著な潜在的影響は降雪から降雨への変化と結びついている。潜在的な影響は北部の気候において特に重要だろう。冬季における気温の上昇は冬季降水量を雪から雨に変化させ、雨水流出による浸食は増加する。プロセス重視の方法を用いた上記で説明した結果は気温上昇によって雪から雨に変化する影響を組み入れたが、これらの研究は一般的な結果からこの特別な影響を取り出すことはしなかった。表面粗度、土壌の稠密遮水化および硬化などの土壌表面状態の変化は気候の遷移によって変わり、それは浸食率に影響する可能性がある。

Zhang and Nearing (2005) は中央オクラホマにおいて土壌浸食の気候変動による潜在的な影響を評価した。1950 年から 1999 年、2070 年から 2099 年の期間において、月単位の算定は HadCM3 GCM の出力が用いられ、SRES A2 と B2 シナリオ、GGa1 シナリオ（温室効果ガスが毎年 1%の割合で増加するシナリオ）が用いられた。HadCM3 によって算定された 2070 年から 2099 年における El Reno、Oklahoma の年間平均降水量は A2・B2・GGa1 においてそれぞれ 13.6%・7.2%・6.2%減少し、予測浸食量は（不耕起栽培シナリオを除く）A2 は 18-30%増加し、B2 はほぼ変わらず、GGa1 シナリオにおいては 67-82%増加した。GGa1 シナリオにおける浸食の大きな増加はモデルによってシミュレートされた月降水量の大きな変動性および激しい雨の頻度の高まりに帰する。不耕起栽培システム（あるいは耕作地保護）は算定された気候条件のもとで土壌浸食を減少させるには効果的であることが結果により示された。

より複雑な、しかし潜在的に支配的である要素は新しい気候の状況に適応するために必要とされる土地利用の変化である (O'Neal et al, 2005)。農家は作物システムに適応するため、土壌の浸食外力からの影響の受けやすさも変化する。農家の適応とは種まき・耕作および収穫時期・作物種の変化などさまざまである (Southworth et al, 2000 ; Pfeifer and Habeck, 2002)。中央西北アメリカのモデル結果によると、土壌浸食は将来の土地利用変化を要因として増加すると示しており、その大部分は一般的に小麦とトウモロコシの栽培から大豆の栽培に移行するとされるためである。調査地域の 11 のうちの 10 の地域について、1990-1999 年と比較して 2040-2059 年の予測された流出は 10-310%増加し、土壌喪失は 33-274%増加した (O'Neal et al, 2005)。他の土地利用シナリオは異なる結果をもたらすだろう。例えば、改善された保護対策は浸食率を大きく減少することができる (Souchere et al, 2005) 一方で、森林を「切って焼く」過程で皆伐してしまうことは流出と浸食に大きな負の影響を与える。

予期される河川の土砂への気候変動の影響について多くのことはなされていない。Bouraoui et al. (2004) は南フィンランドについて観測された雨量と気温の増加は雪被覆および冬季における流出の増加の原因であると示し、その結果モデル出力の浮遊土砂が増加した。Kostaschuk et al. (2002) はフィジーのサイクロンによって発生した浮遊土砂を量ったところ、計測した流れは非常に高い (容積で 5%ほどの) 土砂濃度であった。エルニーニョ現象による変化によってもたらされたサイクロンの強度の増加が、フィジーおよび南太平洋における土砂の増加をもたらさうと著者らは仮定した。

土壌保全努力について気候変動がもたらす意味という点から考えると、現在の科学的努力の顕著な現実化とは今後ますます保護対策を極端現象に焦点を当ててなされるべきだということである (Soil and Water Conservation Society, 2003)。強い降雨が浸食に与える影響は降雨全体が与える影響と比較して大きく、将来においてこのような激しい雨の頻度が高まるにつれてこの影響は悪化する。

3.5 コストと他の社会経済的側面

気候変動の影響は社会的・経済的コストや便益を伴う。従って、それらを確定するのは困難である。社会的・経済的コストは、損害に対するコストや、(損害を減らしたり、避けたりするための) 適応に対するコストを含んでいる。また、いくつかの地域で水利用可能量が改善されることによってもたらされる便益も含んでいる。さらに、淡水システムに関する将来の気候変動の影響についての不確実性に加え、気候変動のコストを評価するときに考慮されるべき他の悪化因子も存在している。それらの悪化因子は、人口統計的・社会的・経済的發展を含む。気候変動のコストおよび便益は、金

銭的コストの増減や、人間と生態系への影響(例:洪水によって家庭が移住を余儀なくされることや、水生動植物が減ること)を含む、いくつかの形態をとるだろう。これまで、これらのコストは金銭的観点からはほとんど評価されてこなかった。データ不足、評価方法の違い、様々なタイプの水利用(例:農業利用・都市利用・河道内利用)を横断して水利用可能量をどのように配分するかに関する推定の違いへの評価が非常に敏感であるという事実が、気候に関する水資源の変化の影響を定量化する努力の妨げとなっている(Changnon, 2005; Schlenker et al, 2005 ; Young, 2005)。

水供給に関しては、気候変動のコストが便益を上回る可能性がかなり高い。そのひとつの理由として、降水量変動が増加する可能性がかなり高いということがある。適切なインフラ投資や、水と土地利用管理の変化によって、洪水や渇水の影響はやわらげられることができたが、これらの反応は全てコストを伴う(US Global Change Research Program, 2000)。もうひとつの理由は、現在の状況を背景として、水関連の社会基盤やその使用様式や機構が発達してきたことである(Conway, 2005)。金銭的観点のみならず、異なった利益集団の間の潜在的な争いを管理することを含む社会的な影響の観点からも、洪水や渇水の頻度、水利用可能量やその質、水利用可能量の季節変動といったどのような本質的な変化もコストがかかる調節を必要とするだろう(Miller et al, 1997)。

水文学的变化は、ある側面では正の影響を持ち、他の側面では負の影響を持つだろう。例えば、年流出量の増加は、再生可能な水資源の増加によって、河道内と河道外の水利用者の多様性に対する便益を生み出すかもしれないが、同時に増加する洪水リスクによって損害を生み出すかもしれない。最近数十年の南アフリカの南部がより湿潤した条件にあるという傾向によって、洪水で氾濫する地域が増えてきたが、アルゼンチンのパンパ地帯の作物生産量は改良されてきたし、新しい商業的漁業機会が与えられてもきた(Margin et al, 2005 ; 13章参照)。流出量の増加は、浅い地下水面を持つ地域にも損害を与え得た。そのような地域では、地下水面の上昇は農業利用を妨げ、都市部のビルに損害を与えるだろう。例えばロシアでは、浅い地下水面によって引き起こされる現在の年損害は、50〜60億 USドルになると見積もられており(Kharkina, 2004)、将来的に増える可能性が高い。加えて、もし、さらなる流出が高水流量期間に集中すれば、年流出量の増加が容易に利用可能な水資源の増加という便益を導かないかもしれない。

3.5.1 気候変動は水需要と水利用可能量のバランスにどのように影響を与えるか

気候変動が水需要と水利用可能量の間のバランスにどのような影響を与えるかを評価するためには、社会的に価値のあるいろいろな水利用の全てと、これらの利用間の水の配分がどのように変化する可能性が高いかを考慮する必要がある。水は生活用水としてだけでなく、レクリエーション機会を含む、水界生態系や環境的な心地よさをサポートする役割としても価値がある。また、灌漑農業生産や、水力発電、他の工業利用の要素としても価値がある(Young, 2005)。水利用可能量のあ

らゆる変化に対する社会的コストや便益も、変化がこれらの潜在的に競い合っている人間の水需要の各々にどのように影響を及ぼすかに依存している。水利用可能量の変化は、流出の量・変動・季節性の変化に依存する一方で、既存の水関連の社会基盤に対する管理や新しい社会基盤への投資によって修正される。水配分を管理する機構は、水利用可能量の変動の全体的な社会的影響を決定するのに大きな役割を果たすだろう。それは、社会の様々な部門に渡る利益や損失の配分を決定するときも同様である。制度上の設定は国の内部および各国間の両方において顕著に異なり、効率性・公平性・水利用の柔軟性・インフラの発達において、しばしば重要な違いを生む(Wichelns et al, 2002 ; Easter and Renwick, 2004 ; Orr and Colby, 2004 ; Saleth and Dinar, 2004 ; Svendsen, 2005)。

加えて、水量は唯一の重要な変数ではない。水質と気温の変動も、都市利用・工業利用・農業利用の価値に重要な影響を持ちうるし、同様に水界生態系にも重要な影響を持ちうる。都市の水利用では、悪い水質に対して実質的な浄化のためのコストが追加されうる。降水強度の増加は、周期的に、濁りの増加と地表水資源の栄養塩と病原体の容量の増加をもたらすかもしれない。ニューヨークに供給している水道施設は、激しい降水を気候変動に関連した主要な関心事のうちの一つと見なしている。なぜなら、そのような事例はいくつかの街の主要な貯水池の濁度を水道施設で取水可能な水質の法的限界の 100 倍まで上昇させ、処理や監視のための多大な追加コストを必要としているからである(Miller and Yates, 2006)。

水需要

水需要には、多くの異なった種類が存在する。これらのうちのいくつかは、互いに直接的に競い合う。なぜなら、ある部門で消費された水は、もはや他の部門での利用はできないからである。その他の場合では、ある程度の水量は流域を流れる間に何度も繰り返し利用されるかもしれない。例えば、河道内の漁場や水力発電所や生活用水利用者に対しては連続して便益を与えられる。部門ごとの水需要は、人口、定住パターン、富、産業活動、技術の変化に応じて何度も変化すると予想される。例えば、急速な都市化は特定のところに集中した重大な水需要の伸びを導く可能性があり、特に乾燥地帯において、安全で購入しやすい生活用水供給をしばしば困難にする(例: Faruqui et al, 2001)。加えて、気候変動はおそらく、実際の利用量(実質的に満たされる各部門の需要)ばかりでなく、望まれる水の利用量(需要)も変化させるだろう。もし気候変動が、需要と関連する、より大きな水不足をもたらすなら、その適応策には、水利用効率を改善する技術変化、需要管理(例:メーターによる計測・価格設定)、および水の権利の交換能力を改善する制度上の変化が含まれるだろう。それらを実行するには時間が必要であり、それゆえそれらは時間が経つにつれ、より効果的になる可能性が高い。それぞれの利用様式に対する水利用可能性は、他の競合する資源の利用によって影響を受けるかもしれないので、人間の水利用に関する気候変動の影響の完全な分析においては、水利用効率の変化の影響や、ある部門から他の部門への水利用の意図的な移転を含む、部門間に渡る相互作用を考慮するべきである。例えば、水の権利の永久的な売却だけ

でなく、短期間の水の賃貸しを含む自発的な水移転は、一般的に農業部門から都市利用や環境利用へ行われ、アメリカ西部では徐々に一般的なことになってきている。これらの水市場取引は、気候変動に対する適応を容易にする役目を果たすと期待できる (Miller et al, 1997 ; Easter et al, 1998 ; Brookshire et al, 2004 ; Colby et al, 2004)。

灌漑取水は全球取水のほぼ 70% を占め、消費的水利用 (利用中に蒸発散する一部の水) の 90% を占める (Shiklomanov and Rodda, 2003)。全球水利用のうち、灌漑農業が支配的であると仮定すると、(単位消費的水利用当たりの作物生産量として定義される) 灌漑水利用の生産性を増加させる経営慣行により、他の人間や環境利用への水利用可能性を大きく増加させることができる (Tiwari and Dinar, 2002)。全ての部門ごとの水需要のうち、灌漑部門は気候変動により最も強く影響を受けるばかりでなく、灌漑手法の有効性の変化により、さらに最も強く影響を受けるだろう。水不足に直面している地域では、灌漑水利用の変化は灌漑水需要の変化、より高い効用をもたらす利用に対する需要 (例: 都市部の需要) の変化、将来の管理の変化、水利用可能量の変化の複合的な影響によって引き起こされるだろう。

一般に、より高い気温と降水量の変動の増加によって、たとえ作物の成長時期における総降水量が同じにとどまったとしても、灌漑水需要の増加がもたらされるだろう。大気中の二酸化炭素濃度が増加した結果として、いくつかの作物に対する水利用効率率は増加し、それによって、単位水利用当たりの作物収穫量 (水生産性 – “more crop per drop” (一滴の水でより多くの作物を)) の割合は増加するだろう。しかし、エジプトのような高温地域では、熱ストレスにより収穫量が減少するにつれて、割合も減少してしまうかもしれない (5 章参照)。

灌漑水利用に関する、気候変動に関連した要因の影響を定量化しようと試みる世界規模の研究は存在しない。最適な成長時期、および収穫量を最大化する灌漑水利用に関する気候変動の影響がモデル化されてきただけであり、灌漑面積の変化と気候の変動性を仮定していない (Doll, 2002 ; Doll et al, 2003)。2つの気候モデルとして SRES の A2、B2 シナリオを適用し、これらの著者たちは、最適な成長時期が多くの灌漑地域で変化するという見出しをした。中国やインドといった、世界中で最も大きな灌漑地域を持つ国々での正味の用水量は、それぞれ 2020 年には排出シナリオと気候モデルに依存して、+2% から +15% および -6% から +5% 変化する。異なった気候モデルでは、世界規模の正味の灌漑用水需要は 2020 年までに 1% から 3% 増加し、2070 年までに 2% から 7% 増加するという、異なった変化を予測している。最も大きな世界規模の正味の灌漑用水需要の増加は、B2 排出シナリオに基づく気候シナリオによってもたらされる。

国家規模では、いくつかの一括した研究が存在する。アメリカでの気候変動に対する農業部門の適応 (つまり、灌漑農業と天水農業の間での転換) に関する 2 つのモデル研究は、様々な気候シナリオにおいて、2030 年を過ぎると灌漑地域と灌漑取水が減少することを予測している (Reilly et

al, 2003 ; Thomson et al, 2005b)。この結果は、気温の上昇による灌漑作物生産量の減少、あるいは降水量の増加による天水作物生産量の増加によって引き起こされる、灌漑農業と天水農業の収穫量の差の減少に関係している。これらの研究は、日降水量の増加する変動を考慮に入れておらず、天水収穫量をおそらく多く見積もり過ぎている。利益最大化条件の下でのイリノイのトウモロコシ灌漑の研究では、年降水量の 25%の減少は、日降水量の標準偏差が倍になった上での年降水量の 15%の減少と、灌漑の収益性に対する効果が同じであることが見出された (Eheart and Tornil, 1999)。この研究はまた、利益を最大化する灌漑水利用は、収穫量を最大化する水利用よりも降水量の変化に対してより強く反応することを示した。また、大気中の二酸化炭素が倍になることは小さな影響しか持たないことも示した。

気候変動の影響が考慮されていなかった FAO の研究 (Bruinsma, 2003) によると、発展途上国において、2030 年までに灌漑取水が 14%増加することが予見されている。しかし、4 つの Millennium Ecosystem Assessment Scenarios では、世界規模での増加はずっと少なく、灌漑面積は、2030 年までに 0%から 6%、2050 年までに 0%から 10%だけ増加すると予想されている。圧倒的な水利用の増加は生活および工業部門で起こる可能性が高く、2050 年までに、14~83%増加する (Millennium Ecosystem Assessment, 2005a, b)。これは、水の価値は生活利用および工業利用においてずっと高くなるであろうという考えに基づいている (特に水ストレスの状況下においてそれは正しい)。

気候変動による生活用水需要 (例: ガーデニング) および工業水需要の増加は、かなり小さい可能性が高い。例えば、ある場所においては 2050 年代までに 5%未満しか増加しない (Mote et al, 1999 ; Downing et al, 2003)。水需要に関する、間接的であり、小さく副次的な効果はビルを冷却するための電力需要の増加である。電力需要の増加により火力発電所を冷却するための取水が増える傾向にあるようだ (7 章参照)。ニューヨークシティでの水利用の統計分析は、25°Cを超えると、一人当たりの一日の水利用は 1°Cごとに 11 リットル (現在の一人当たりの一日の利用の約 2%) 増加する (Photopapas et al, 2000)。

水域生態系のための水利用可能量

全ての生態系のうちで、淡水生態系は、気候変動によって絶滅の危機にある種の割合が最も高い (Millennium Ecosystem Assessment, 2005b)。寒い、あるいは雪が支配的な流域では、気温の増加は、水の温度上昇 (4 章参照) によってだけでなく、水流の変化をもたらすことによっても淡水生態系に影響を与える。例えば、カナダのアルバータ北部では、氷結した河の融解による洪水の減少が、水生生息地の減少をもたらす (Beltaos et al, 2006)。河川流出が季節によって減少する地域では、淡水生態系および沿岸海洋生態系の両方に負の影響が出ると予測されている。イングランド北西部のタイセイヨウサケは気候変動によって負の影響を受けるだろう。なぜなら、産卵期の間の適切な水深 (現在は全期間でその条件が充たされている) が、SRES A2 シナリオの下で

は、2080年代には94%の時期に存在するだけになるからである(Walsh and Kilsby, 2007)。そのような変化は、生態学的流量マネジメントや、EU Habitats Directiveのような環境に関する法令順守に影響を与えるだろう。アメリカ西部で流出が減少する場合、2050年までにサクラメント川およびコロラド川の三角州では、塩分の劇的な増加と、その後の生態系の混乱が発生するだろう。また、コロンビア川水系では、管理者は、春夏のサケの放流か、夏秋の水力発電生産のどちらかを選ばなくてはならない状況に直面するだろう。水政策に関わらず、太平洋北西部における気候変動により、いくつかのサケの種の絶滅が起こるだろう(Barnett et al, 2005)。

海への淡水流入量の変化は、濁り・塩分・層化・栄養塩利用可能量の変化をもたらし、それら全てが、河口および沿岸の生態系に影響を及ぼす(Justic et al, 2005)。ミシシッピ川の河川流出の増加が、メキシコ湾において貧酸素(酸素の不足)現象の頻度を増加させる一方で、ハドソン湾への河川流出の増加はその反対の現象をもたらす(Justic et al, 2005)。群れで巣をつくる水鳥の繁殖には、ある最低年流量が必要なので、オーストラリアのマリー・ダーリン川流域のマクオーリー湿地での鳥の繁殖現象の頻度は、河川流量の減少とともに減っていくと予想されている。気候変動および森林再生は河川流出を減少させる原因となりうるが、2070年までに、10年スケールの気候の変動性による降水量の変化が最も大きな影響を与えると予想することが出来る(Herron et al, 2002)。

社会経済的な活動のための水利用可能量

気候変動は河川流出を変化させる可能性が高く、河道内利用と河道外利用の水利用可能量に重要な影響をもたらす。河道内利用は、水力発電・運河・漁業・レクリエーションを含む。ヨーロッパに対する水力発電の影響は、マクロスケールの水文モデルを用いて見積もられてきた。その結果は、2070年代までに、IS92a 排出シナリオの下で、20世紀末に存在している水力発電所の電力生産ポテンシャルは、スカンディナビアとロシア北部では15%～30%まで増加し、そこでは19%(フィンランド)からほぼ100%(ノルウェー)の間の電力が水力発電によって生産されることを示している(Lehner et al, 2005a)。20%～50%あるいはそれ以上の減少が、ポルトガル・スペイン・ウクライナ・ブルガリア・トルコにおいて算定されており、そこでは10%(ウクライナ・ブルガリア)から39%の電力が水力発電によって生産されている(Lehner et al, 2005a)。ヨーロッパ全体(水力発電の占める割合は20%)では、水力発電ポテンシャルは、2070年代までに7～12%の減少を示す。北アメリカでは、ナイアガラとセントローレンス川での水力発電生産の減少の結果として五大湖の流出の潜在的な減少が生じ、顕著な経済的損失をもたらしえる(Lofgren et al, 2002)。全球気温が2℃上昇するとしているCGCM1モデルの予測では、オンタリオのナイアガラとセントローレンスの水力発電生産は25～35%減少し、2億4000万～3億5000万カナダドル(2002年時の価格)の年損害をもたらすだろう(Buttle et al, 2004)。しかし、HadCM2気候モデルを用いると、水力発電ポテンシャルの小さな増加(+3%)が算定されており、それはおよそ2500万カナダドル/年に値する。気候モデルシナリオの範囲を調査したもう一つの研究は、2℃の全球気温の増加がセントロ

ーレンス川の水力発電容量を 1%～17%減少させうることを見出した(LOSLR、2006)。将来の氾濫期間の増加は、運河をより頻繁に崩壊させ、船舶の载荷を制限する低水流量条件は、ライン川において、現在の気候条件では 19 日であるところが、2050 年までに 26～34 日にまで増加するかもしれない(Middelkoop et al、2001)。

河道外利用は、灌漑取水・生活取水・都市利用取水・工業取水を含み、火力発電のための冷却水を含む。取水のための水利用可能量は、流出・帯水層の状態・および技術的な水供給インフラ(貯水池、揚水井戸、供給網など)の関数である。飲料水への安全なアクセスは、流出レベルよりも技術的な水供給インフラのレベルにより多く依存する。しかし、飲料水への安全なアクセスを改善するという目的は、気候変動の結果として流出が減少する地域では達成するのが困難になるだろう。また、気候変動は水供給部門のための追加的なコストをもたらす。例えば、水位の変動により水供給インフラに影響が及び、それが、より多くの人への水供給サービスの拡張を妨げるだろう。

もし水が大きな地下水層や貯水池から引かれなければ、気候変動に起因する季節ごとの流出形態の変化と経年流出の変動は、長期間の平均年流出量の変化と同じくらい水利用可能量にとって重要になりうる(US Global Change Research Program、2000)。融雪を水源とする流域のうち冬の積雪量が減少している流域に住んでいる人々は、夏秋の河川流量の減少によって負の影響を受けるかもしれない(Barnett et al、2005)。例えば、ライン川では、2050 年代までに夏の低水流量の 5～12%の減少に苦しめられるかもしれず、そのことが、特に火力発電所のための水供給に負の影響を与えるだろう(Middelkoop et al、2001)。エルベ川流域に対する研究によって、実際の蒸発散量は 2050 年までに増加すると見積もられることが示された(Krysanova and Wechsung、2002)。一方で、河川流量、地下水涵養量、作物生産量、そして汚染源の拡散によって引き起こされる公害は減少する可能性が高い(Krysanova et al、2005)。気候変動の下で信頼できる水供給を保証することが要求され、その要求を満たすための追加的な井戸や貯水池に対する投資、および運営コストが、中国において見積もられてきた。このコストは、現在の水ストレスが低い流域(例:長江)では低く、現在の水ストレスが高い流域(例:黄河)では高い(Kirshen et al、2005a)。さらに、水供給コストに対する気候変動の影響は、将来的に増加する。それは増加する気候変動のせいだけでなく、増加する需要のせいでもある。

多くの世界規模の評価(Alcamo and Henrich、2002 ; Arnell、2004b)、国家規模の評価(Thomson et al、2005a)、そして流域規模の評価(Barnett et al、2004)によって、半乾燥および乾燥流域は水ストレスに関して全球の中で最も脆弱な流域であることが示された。もし降水量が減少したら、灌漑水需要は、ほとんどの半乾燥河川流域で支配的な水利用であるため、増加するだろう。また、全ての需要を満たすのは不可能になるかもしれない。例えば、アメリカ西部のサクラメントフォアキン川およびコロラド川の流域の場合、河川流量の変化(ダウンスケーリングされた GCM、つまり National Center for Atmospheric Research)による PCM モデルからの出力によって動

かされる流域スケールの水文モデルによって算出される)は大変大きいので、2020 年を過ぎると、適応した貯水池管理をもってしても、今日の水需要の全て(環境目標を含む)を達成することはできなくなる(Barnett et al, 2004)。さらに、もし需要の増加に応じて灌漑利用を増加させることが許されたら、それは下流における流出と河川流量の減少を増幅させるだろう(Eheart and Tornil, 1999)。Huffaker(2005)は、灌漑効率の実りのある改善を目指すいくつかの政策は、灌漑者が与えられた分水の権利をより大きな土地に広げることを許すだろうと記述している。その意図せぬ結果は、本当ならば再流入してくるはずだった水を下流域から奪う、消費的水利用の増加となりうる。そのような政策は、河川流量が減少している下流域で、灌漑をもはや実現不可能なものにする。

カナダの、ある半乾燥地帯の流域でのケーススタディは、気候変動により水供給と灌漑水需要のバランスがどのように変わるか(囲み記事 3.1 参照)、この変化に伴うコストはどのように見積もられるかを示している。

中国西部では、早まる春の雪解けと氷河の減少が、灌漑農業に用いられる水利用可能量を減少させる可能性が高い(10 章参照)。テキサスの帯水層では、農家の純益は灌漑水需要の高まりと、灌漑用水供給の減少により 2030 年代までには 16–30%減少し、2090 年代までには 30–45%減少すると予測されている。しかし、水利用により生まれる正味の福利は、水利用は産業用水、工業用水が大部分を占めるために 2%以下の減少であると推定される(Chen et al. 2001)。カナダのケーススタディ(囲み記事 3.1 参照)によると、もし気候変動により、淡水供給を海水の淡水化か汽水の淡水化に変更せざるを得ない場合、気候変動によるコストに、淡水化のコストと 0.35 (US\$/m³) から 1.9 (US\$/m³) かかる追加する需要に対するコストが含まれることとなる。現在、淡水化のコストは淡水の塩素処理によるコストが 0.02 (US\$/m³) であるのに対して、海水に対して 1 (US\$/m³)、汽水に対して 0.6 (US\$/m³) かかる(Zhou and Tol, 2005)。エジプト、中国、バングラデシュ、インド、東南アジア(FAO, 2003)の人口密度の高い海岸域では、脱塩にかかるコストは高額となるだろう。

多くの途上国における半乾燥地帯の流域は、人口や水の需要は将来急激に増加すると見込まれること、そして対処能力が低いことにより、先進国の流域に比べ気候変動に脆弱である(Millennium Ecosystem Assessment, 2005b)。対処能力は大きな貯水池や深い井戸のような信頼できる水供給へのアクセスがない農村の人々は特に低い。農村地域の人々は河川の流量やピークのタイミング、地下水の涵養の影響を直に受ける。それゆえ水資源を使い切っていない半乾燥地帯の流域でさえ、気候の変動性の増大は強い負の影響を与える。湿潤な流域では、人々は乾燥地域の人々よりも渇水への対処を準備していないにも関わらず、水の需要や利用可能な量に関する気候変動の影響に対して、容易に対処できる可能性

が高い (Wilhite、2001)。

地球全体における強い水ストレスにさらされる人口の推定結果は、研究により顕著に異なる (Vorosmarty et al, 2000 ; Alcamo et al, 2003a, b, 2007 ; Oki et al, 2003a ; Arnell, 2004b)。人口動態・社会経済・技術変化が多くの時間軸・多くの地域においてより重要な役割を担っている一方で、気候変動は将来の水ストレスに影響を与える要因のうちの一つでしかない。2050年代には排出シナリオ (Arnell, 2004b) の差異よりも SRES の4つのシナリオの人口の予測の差異が、水ストレス流域 (一人当たりの水利用可能量が1000[m³/year]未満の流域と定義) に住む人口に大きな影響を与える。水ストレスの深刻な地域に住む人口は顕著に増えるだろう (表 3.2)。水ストレスが増大する危険性を持つ人口を SRES シナリオの変動幅すべてにあてはめると、2020年代、2050年代、2080年代にはそれぞれ、4億~17億、10億~20億、11億~32億と予測される (Arnell, 2004b)。2050年代 (SRES A2 scenario) には、2億6200万人から9億8300万人が水ストレスと分類されるだろう (Arnell, 2004b)。しかしながら、一人当たり使用可能量の指標を用いれば、気候変動は世界規模での水ストレスを減少させる。これは、流出の増加は、主に東アジア、東南アジアなど、世界で人々の住む地域のうちの多くで激しく集中しており、さらに、主に流量の多い時期に発生している (Arnell, 2004b)。それゆえ、流出の増加は余分な水を蓄えないならば、乾季の問題を軽減しないだろうし、他の地域の水ストレスを軽減しないだろう。

もし水ストレスを人口と気候変動のみの関数として評価するのではなく、水利用の変化も評価するならば、非気候要因 (収入・水利用効率・水生産性・工業生産) の重要性が増加する (Alcamo et al, 2007)。収入の増加は人口の増加よりもより大きな影響を、水利用量と水ストレス (取水者と水資源の比として表現される) に与える。水ストレスは2050年代までに、世界の陸地 (2つの気候シナリオと SRES A2、B2 シナリオを考える) の20%~29%では減少し、62%~76%では増加するとモデル化された。水ストレスの減少の基本的な原因は降雨の増加による水利用可能量の増大である、その一方で水ストレス増大の基本的な原因は取水者の増加である。収入の増加により刺激される国内水利用者数の増加は支配的であることが発見されている (Alcamo et al, 2007)。

2050年代以降の高い水ストレス下にある人口の変化は排出シナリオによるところが大きい。A2シナリオでは実質的な増加が予測されており、A1、B1シナリオでは世界規模での再生可能な水資源の増加や多少の人口の減少により、増加の速度が緩やかになると予測されている (Oki and Kanae, 2006)。その一方で、季節変動や極端事象発生確率の増加はこれらの影響を相殺する。

	予測人口[100万人]	
	Arner, 2004bより	Arner, 2004bより
Baseline(1995)	1368	1601
2050:A2排出シナリオ	4351~5747	6432~6920
2050:B2排出シナリオ	2766~3958	4909~5166

表 3.2 2050 年前後の、年人口増加と気候変動が水ストレス流域（一人当たりの再生可能な水資源量が 1000 (m³/yr) 未満の地域と定義）に住む人口に与える影響（Arnell、2004b；Alcamo et al、2007）。推定はいくつかのモデル実験のための排出シナリオに基づく。ばらつきは排出シナリオを気候シナリオに変換する様々なモデルやモデルの実験結果に起因する。

囲み記事 3.1 カナダのオカナガンにおける気候変動のコスト

カナダのブリティッシュコロンビアのオカナガン地域は半乾燥地帯であり、流域面積が 8200km² である。その地域における水資源は、予測される気候変動と人口増加による水需要を支えきれないと思われるので、広範囲の適応可能な水分配の手法が求められている（Cohen、Neale、2006；Cohen et al、2006）。灌漑は流域の水利権の発生する総利用可能量のうち 78% を占めている。

図 3.7 は一連の 6 つの GCM のシナリオから、最も悪い場合と最も影響の少ないシナリオにおける変化を年間の水供給・穀物の水需要・トラウトクリークで渇水とみなされる閾値 3000 万 (m³/yr)（現在の年平均流量の 36%）、観測された最大需要の 1000 万 (m³/yr)（Neilsen et al、2004）と共に図示している。渇水の閾値を下回る流量に関しては、当地の水権利者が現在、水利用を禁じている。水供給が渇水となる閾値を下回り、水需要が需要の閾値を越えた年が危険性の高い結果と定義される。6 つのシナリオすべてに対して、需要は増加すると見込まれ、供給は減少すると予測されている。推定される穀物の水需要は HadCM3 における A2 排出シナリオ（2080 年までに需要が現在の観測されている毎年の最大流量を越える）が最も大きく増加している。HadCM3 では危険性の高い結果は 2050 年代には 6 年に 1 回発生し、2080 年代には 3 年に 1 回発生する。A2 排出シナリオでは暖かい気候により穀物の水需要が高まるために、A2 排出シナリオのほうが、B2 排出シナリオよりも危険性の高い結果はより頻繁に発生する。

表 3.3 は、オカナガン流域において、水需要を減らすもしくは水供給を増やすことの出来る、現在利用可能な手法にかかるコストを図示している。これらのコストはコストが最小となる選択と、収量を最大とする作付けスケジュールを比較することで表され、それはちょうど供給される水が 0.35 (US\$/m³)（2006 年の価格）であることと等価である。蓄えられた、もしくは節約された水が単位あたり最も高価となる選択は、水を計測することと水を高い標高に揚水す

ることである。しかしながら、水の扱いに対する要求は、新しい水供給の選択肢に付加的なコストを導入させるだろう (Hrasko and McNeil, 2006)。そのままでも最も満足する結果が期待できるような選択肢はない。

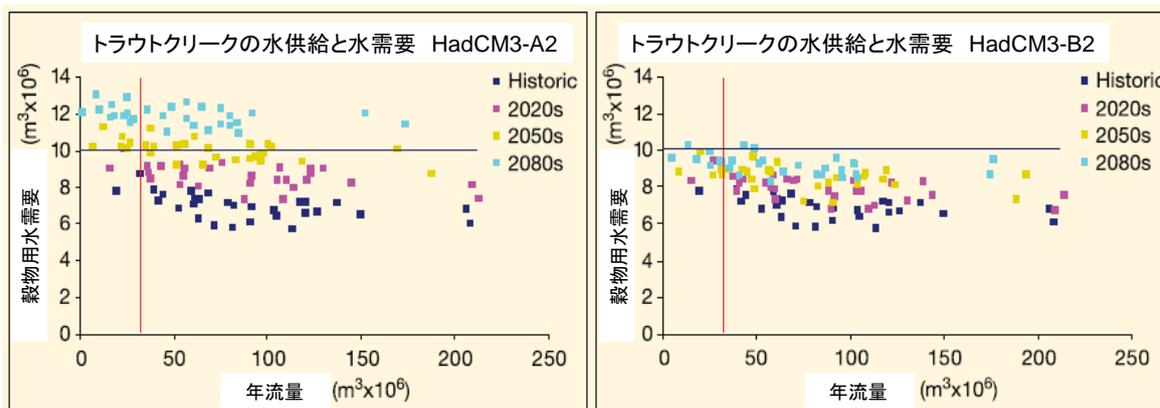


図 3.7 カナダのオカナガン流域のトラウトクリークにおける、年あたりの穀物の水需要と水供給。1961 年から 1990 年にわたってモデル化され、将来 30 年ごとに 3 つに分けた。各点はそれぞれある年を表す。渇水供給閾値は鉛直な直線で表され、観測最大需要は平行な直線で表されている (Neilsen et al, 2004)。

適応策	適応範囲	相対単位コスト	現在の水供給に対する節水・供給率[%]
灌漑期間の調整	大地主から小地主まで	1.0~1.7	10%
公共教育	大規模~中規模コミュニティ	1.7	10%
貯水池	低コスト~高コスト	1.2~3.0	限られている(ほとんどの地域で既に開発されている。)
湖からの汲み上げ	低コスト(バランスしていない貯水槽)~高コスト(バランスした貯水)	1.3~5.4	0~100%
しみだし式灌漑	高需要~低需要な範囲	3.0~3.3	30%
水漏れ検査	平均費用	3.1	10~15%
使用量の計測	低コスト~高コスト	3.8~5.4	20~30%

表 3.3 ブリティッシュコロンビアのオカナガン流域の節水・供給された 1 単位あたりの水の相対コスト (MacNeil, 2004 より抜粋)

3.5.2 気候変動は洪水被害にどのように影響しうるか

将来の洪水被害は居住パターン・土地利用の決定・洪水予報の精度・警報と洪水に反応するシステム・構造物の価値・脆弱な地域 (Mileti, 1999 ; Pielke and Downton, 2000 ; Changnon, 2005) に位置する財産のみならず、気候変動それ自体によって決まるところが非常に大きい。Choi and Fisher (2003) はあるアメリカの流域において、2 つの気候変動シナリオ下 (そのシナリオではそれぞれ年平均降水量が 13.5% から 21.5% 増え、それぞれ年平均降水量の標準偏差には変化を加えずそのままか、比例的に増加させた) で予測を行

った。彼らは洪水被害の時系列に基づき、人口、裕福さの指標、年降水量を予報変数として、構造計量経済学モデル（回帰モデル）を用いた。彼らは、年降水量の平均値と標準偏差が 13.5%増加したならば、洪水被害の平均と標準偏差は 140%以上増加すると予測されることを発見した。推定結果は、人口要因と裕福さの要因の検出力が 82%であり、その一方で、それらに降雨の要因を加えたものの検出力が 89%であることから、洪水による損失は洪水に関するリスクに関連することを示した。また、他の研究ではカナディアン気候センターモデルと IS92 排出シナリオをアメリカの北東部の大都市ボストンにあてはめ、極端な降水イベントにおける潜在的な洪水の影響を調査した (Kirshen et al, 2005b)。彼らは、適応するための投資が行われない場合、洪水により被害を受ける資産および、洪水によるすべてのコストの両方が、気候変動を考慮しなかった場合に比べて、2100 年までに倍になるであろうこと、および、洪水による輸送手段の遅れはより顕著になり、今世紀にわたって厄介なものとなり得ることを発見した。この研究により、洪水の被害の経済的な重大性は、すべての氾濫原に統一的な洪水対策を行うといったような適応作に対して巨大な出費をすることに十分な正当性をあたえると結論付けた。

この発見は 2080 年代のイングランドとウェールズの河川および海岸の洪水（◇高潮など）による被害のシナリオ研究 (Hall et al, 2005) に支えられている。これらは、SRES に似た 4 つの排出シナリオと 4 つの社会経済変化のシナリオというフレームワークと結び付けられている。すべてのシナリオで、洪水の被害は現在の洪水被害管理政策や慣習、構造物が取り変えられなければ、洪水被害は増大すると予測された。B1 タイプの世界において、2°Cの気温上昇は 2080 年代までに、年間の被害額が現在の £10 億に対して £50 億と推定される。その一方で、ほとんど同様の気候変動で、B2 タイプの世界では被害額はたった £15 億である。A1 タイプの世界では、2°Cの気温上昇により、年間被害額は 2050 年代には £150 億となり、2080 年代には £210 億となると予測される (Hall et al, 2005; Evans et al, 2004)。

気候変動の洪水被害に及ぼす影響は、モデルによる現在と 20 年に 1 度の洪水・100 年に 1 度の洪水の再現期間の変化、および、水位と流量の関係（水位と単位時間当たりの流量の関係）と詳細な資産データから決められた現在の洪水の被害により推定された。そのような方法を用いると、大気中の二酸化炭素濃度が二倍になるという条件下では、オーストラリアの 3 つの流域における年平均の直接被害が 4 倍から 10 倍に増えると予測された。(Schreider et al, 2000)

3.6 適応：実践、施策と制約

3.6.1 適応策とはなにか

水利用可能量と需要の変化に適応することは、水管理の中核となってきた。歴史的に、水管理は増加する水需要を満たすことに集中してきた。土地利用が変化しているところを除いて、天然資源の量は慣例的に一定と仮定される。水文学的な設計法は、過去は未来の手がかりという、静的な仮定に伝統的に基づいている。この仮定はもはや通用しない。従って、水関連インフラの現在の設計手順を見直す必要がある。さもなければ、システムは過大に、または、過小に設計され、必要以上のコストがかかるか、性能不足になる。

状況の変化に対応するための変更や水管理の新しい手法は自律的な適応策であり、気候変動に合うように意図的に設計されているのではない。渇水関連のストレスや、洪水、水質問題、増加する水需要は世界各地でインフラ投資と制度変化に弾みをつけている (Wilhite, 2000 ; Faruqui et al, 2001 ; Giansante et al, 2002 ; Galaz, 2005)。その一方で、計画された適応策は特に気候変動を考慮している。そうする際に水管理の計画者が全ての不確実性を解明することは不可能であり、ひとつ、もしくは数個の気候モデルシナリオに基づいて判断するのは賢明ではないことを認識する必要がある。むしろ確率論的な将来の水文変化の評価を使うことで、計画者はリスクと取るべき施策をよりよく評価できるようになるかもしれない (Tebaldi et al, 2004, 2005, 2006 ; Dettinger, 2005)。

統合的水資源管理は、気候変動に対する適応対策を検討する手段となるべきだが、今のところ初期の段階である。成功する統合的水管理戦略には、社会観をとらえること、計画の過程を見直すこと、土地と水資源の管理の調整、水の量と質の関連の認識、地表水と地下水の連結利用、自然システムの保護と復元、気候変動の考慮が含まれる。さらに、統合戦略は情報の流れに対する障害を明確に扱う。完全に統合された手法が常に必要となるわけではないが、統合の適切なスケールは特定のニーズに応える効果的な対策をどの程度促進するかによる (Moench et al, 2003)。特に水管理における統合手法は、競合する水利用者間の紛争を解決する助けになるかもしれない。アメリカ西部のいくつかの地域で、水管理者とさまざまな利害集団が合意に基づいて意思決定を進める方法を試みている。これらの取り組みは地域流域イニシアチブ（先導的な試み）と、計画過程で利害関係者の参加を受け入れるための州主導または連邦支援の取り組みを含む (アメリカ内務省, 2005)。このようなイニシアチブは幅広い要因を考慮し、互いに満足な問題解決を実現するための競合する利害関係者間の交渉を手助けする。コロラド川流域のような大流域の場合、これらの要因はいくつもの時間、空間スケールにわたる (表 3.4)。

時間スケール	課題
不定	絶滅危惧種の保護に必要な流量
長期間	各流域間の配分と流域内関係州間配分
数十年	上流域の(下流への)送水義務
年	ミード湖の貯水量との均一化を達成するためのパウエル湖の貯水義務
季節	暖房と冷房の使用量が最大の月
日、月	洪水調節操作
時間	西部地域電力事業団の発電
空間スケール	
全球	気候の影響、グランドキャニオン国立公園
地域	優先の割り当て(例:コロラド川上流委員会)
州	州内、州外の水域における水市場の異なった合意
地方自治体と地域社会	水やりの日程、水処理、家庭用水

表 3.4 コロラド川流域の統合水管理におけるいくつかのスケールにわたる課題

最近では、水分野で気候変動への適応策に対する関心を高めるために、「水と気候の対話」(DWC) (囲み記事 3.2 参照) のようないくつかのイニシアチブが立ち上がっている。DWC イニシアチブの主な結論は、対話モデルは利害関係者と適応戦略を開発するために重要な仕組みを提供するものである (Kabat and van Schaik、2003)。

囲み記事 3.2. 「水と気候のダイアログ (対話)」から得た教訓

- 「水と気候のダイアログ」(DWC) の目的は、水分野において気候の影響に対する関心を高めることにある。DWC は気候変動に対する脆弱性を軽減する対策を準備するために、流域レベル (レナ、アララ海、黄河、サンペドロ、サンファン、チュケラ、ムレー＝ダーリン、名古屋)、国レベル (オランダ、バングラデシュ)、地域レベル (中央アメリカ、カリブ海の島々、スモールバリーズ、西アフリカ、南アフリカ、地中海、南アジア、東南アジア、太平洋の島々) で、18 の利害関係者の話し合いを始めた。話し合いは先進国でも、発展途上国でもあり、水と気候に関連する脆弱性の議題を幅広く扱った。参加者は、水の専門家、地域社会の代表者、地方自治体、政府、NGO、研究者などであった。
- 結果は実り多く、流域や地域社会で適応策がとられるべきという理由で政府、援助資金供与者、災害救助機関に向けた強いメッセージが発表された。バングラデシュと中央アメリカのスモールバリーでの話し合いでは、村人たちは極端な気候減少がより頻繁におこり、より強くなっていると知っていることを示してきた。また、この話し合いは、バングラデシュ、オランダ、名古屋、ムレー＝ダーリン、スモールバリーズで、適応策が進行中であることも示した。他の地域では、適応策は計画段階で (西アフリカ、メコン) その他の地域ではまだ関心を高める初期段階にある。(南アフリカ、アラ

ル海、レナ川流域)

- DWC は利害関係者と適応戦略を作るために、ダイアログ形式が有望な仕組みを提供することを明らかにした。

3.6.2 適応策の原則

第3次影響評価報告書は供給側と需要側の適応策の相違点を指摘した。その適応策は一連のシステムに適用できる。表 3.5.は平時と渇水時に供給を確保するよう設計された、水資源における適応策をまとめたものである。

供給側	需要側
地下水の調査と汲み上げ	再利用水による水利用効率性の向上
貯水池とダム建設による貯水容量の増加	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
海水の脱塩	農作物(バーチャルウォーター)輸入による、灌漑水の低減
雨水貯留量の拡大	持続的な水利用のための伝統的な水管理手法の振興
河川敷の侵略的な外来植物の除去	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
水の転用	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

表 3.5 水供給と水需要のための適応策（このリストは完全なものではない）

それぞれの施策は供給側でも需要側でもさまざまな長所と短所があり、異なる施策の相対的利益は地域の環境による。しかし大まかに言えば、貯水容量の増大や水路からの汲み上げなどの供給側の施策は、環境に悪影響を及ぼす傾向がある（ただ、多くの場合その影響は緩和できる）。逆に、需要側の施策は個人の活動の積み重ねによるので、実用的な有効性が不確実である。水資源の適応政策とエネルギー消費削減政策にも関連がある。脱塩や多量の水の汲み上げを含む手法のようないくつかの適応策は、エネルギーを大量に消費し、緩和政策と調和しないかもしれない。ヴァーチャルウォーター輸入 (Allan, 1998 ; Oki et al, 2003b)、具体的には農作物の形で輸入により、ある経済的・社会的条件下（例：輸入品を購入できる経済力や農家が他の収入を得ることができるような社会）で国内の水需要を減らすことは適応策になるかもしれない。

適応策は、これらにとどまらない。社会的・文化的・経済的価値・生態系の必要性に関する情報だけでなく、基礎的な地球物理学・水文気象学・環境のデータなどの情報も、効果的な適応策のためには非常に重要である。これらのデータを集め、効果的な観測や早期警報システムのために使うプログラムは適応への重要な第一歩を成すだろう。

アメリカ西部では渇水による短期的な水需要だけでなく、(例えば人口増加による) 長期的な需要変化に適応するために、水市場の取引と農業用水から都市または環境用水への協議による転用がますます用いられるようになってきている (Miller, 2000 ; Loomis et al, 2003 ; Brookshire et al, 2004 ; Colby et al, 2004)。水市場はチリ (Bauer, 2004)、オーストラリア (Bjornlund, 2004)、カナダの一部 (Horbulyk, 2006) でも発展しており、非公式で大抵規制されていないある種の水市場は中東、南アジア、北アフリカでも起こっている (Faruqui et al, 2001)。法律や行政上の手続きや水利権の文書化が、他の水利用者や環境価値を守りつつ、どの程度市場ベースの水の転用を促進するかという点で、国と地方の司法管轄権は大幅に異なる (Miller, 2000 ; Faruqui et al, 2001 ; Bauer, 2004 ; Matthews, 2004 ; Howe, 2005)。実現可能ならば、短期的な転用は柔軟性を与え、都市上水道のような高い価値の水利用の安全性を高めることができるかもしれない。そして状況次第では、さらなる貯水池建設よりも効果があるとわかるかもしれない (Goodman, 2000)。

いくつかの大きな都市水道施設では、気候変動の潜在的影響に対処するための戦略的計画にさまざまな水市場協定を取り込んでいる。これは、ロサンゼルス、オレンジ、サンディエゴ、リバーサイド、サンバーナーディーノ、ベントウーラ地方の都市水道施設に大量の水を供給している南カリフォルニア大都市水域 (メトロポリタン) にも言える。メトロポリタンは最近、パロヴェルデ灌漑区域と 35 年間の選択権付き契約を結んだ。この協定のもとで、この地区の土地所有者はメトロポリタンの要求に応じて最大で谷の農地の 29% までしか灌漑せず、それによって最大 137Mm³ の水をメトロポリタンに供給することに同意している。引き換えに、土地所有者は割り当て面積に応じた一括の報酬と、その年にプログラムに基づいて灌漑しなかった面積に応じた追加の報酬を受け取る。この契約は地域改善プログラムにも資金を供給している (Miller and Yates, 2006)。

増大する洪水リスクの影響を弱めるための施策は、送水システムなどを通じた洪水流の調節と、システムの洪水被害に対する脆弱性の修正の 2 つに分類される。近年、洪水管理政策は多くの国で、防御から洪水と共存するための社会システムの向上へと変わってきている (Kundzewicz and Takeuchi, 1999)。これは、防御政策の実施も含むかもしれないが、高精度の洪水予測と警報、規制、区画化、保険、移住のような政策を含む総合的政策の一環である。それぞれの手法には長所と短所があり、その選択は地域特定であり、すべてを満足させるような、特定の手法は存在しない。(Kundzewicz et al, 2002)。

3.6.3 適応策の実践

第 3 次報告書以来、多くの研究で現実の水管理システムにおける適応策が研究されてきた。

いくつかの研究は、どのような適応策が実現可能かを明確に考慮することなく、ある特定の流域または水管理システムにおける適応の必要性を定めようとしている。例えば、カリフォルニアの流量の季節変動の変化は「カリフォルニアの水利権システムを根本的に変えた」(Hayhoe et al, 2004)。アメリカ合衆国各地での流量の季節分布の変化は「さらなる投資が必要かもしれない」ことを示している (Hurd et al, 2004)。河川流量の季節変動の変化はコロンビア川の管理者に「難題もたらす」(Mote et al, 2003)。ケベック南部での洪水頻度の増加は「重要な管理決定がなされるべき」ことを意味している (Roy et al, 2001)。

ある環境におけるある適応策の物理的な実現可能性と効果について、多くの研究がなされてきた。例えば、改良された季節予報はカリフォルニアのフォルサム湖における水力発電の気候変動による効果を相殺することが示された (Yao and Georgakakos, 2001)。対照的に、アメリカのコロンビア川流域で研究された適応策のどれも、現在の全ての需要を満たさないままであり (Payne et al, 2004)、発電の維持と魚のための河道内流量維持のバランスを再び協議しなければならない。同様に、カリフォルニアのサクラメントサンウォーキン流域の研究は、需要や予測が変化なしに「現状のシステムの性能を将来維持するのは不可能である」と結論づけている (VanRheenen et al, 2004)。気候変動によってカリフォルニア全体の水管理に生じる影響の概説 (Tanaka et al, 2006) によるとカリフォルニアの水供給システムは気候と人口の顕著な変化に物理的に適応できるようなのであるが、これには費用がかかり、利用者間の顕著な水の移転を必要とし、新しい技術を採用する必要があると結論づけている。ある適応策の実現可能性は状況によって変わる。例えば、カナダのオカナガン流域における水の価格設定の研究は、居住地域と農業地域で成功の可能性が違うことを示している (Shepherd et al, 2006)。

異なる適応策の実現可能性に関する包括的な研究はオランダとライン川流域で行われてきた (Tol et al, 2003 ; Middelkoop et al, 2004)。洪水に対する物理的防御能力は、地理的状况に依存することが分かった (Tol et al, 2003)。場合によっては洪水対策の堤防を建設することが技術的に可能で、その他の場合にはすでに高い堤防が存在しているか、地質工学的条件によって物理的な防御は難しい。ライン川の新しい洪水放水路建設のような根本的な洪水管理対策は、オランダのラインデルタの物理的な洪水リスクを軽減することができるが、政治的に実施が極度に難しい (Tol et al, 2003)。

3.6.4 適応策と適応力の限界

水分野における適応策には、人間の需要を満たすように水文学的な特徴を変化させる手段と、水利用可能量の状態に合うように需要を変化させる手段がある。水の量と質の変化に対する適応策の限界は 4 つの異なったタイプに分類することができる。(Arnell and

Delaney, 2006)

- ・ 1点目のは、物理的な限界である。技術的または制度上の手続きによる悪影響を防ぐことは可能でないかもしれない。例えば、健康や暮らしに深刻な脅威を与えること無しに、なお一層の水需要を減らすことは不可能だろう。また、水温の上昇と関連した水質問題に適応することは不可能だろう。さらに、極端な事例として河川が完全に干上がった場所での適応は不可能だろう。
- ・ 2点目は、物理的に適応可能であったとしても経済的な制約が与えられるだろうということである。
- ・ 3点目は、適応策の取り組みに対して政治的または社会的な限界があるだろうということである。例えば、多くの国々で、水供給機関が新規の貯水池を建設することは難しく、また、サービスの基準を下げることで、不安定な水供給に適応することは政治的に非常に難しいだろう。
- ・ 4点目は、水管理機関の能力と統合的な水管理システムがどのような適応策を実施できるかは、水マネジメントシステムの限界が制限することになるだろうということである。水管理に対する優先度の低さ、機関間での協調不足、国家・地域・ローカル間での緊張状態、非効率的な水統治、そして将来にわたる気候変動による影響の不確実性が、水供給や洪水リスクの変化への適応する組織の能力を抑制する。

(Ivey et al, 2004 ; Naess et al, 2005 ; Crabbe and Robin, 2006)

これらの要因は、一体となって他の決定因子、つまり変化への感度・システムの内部特性（例：教育や知識の入手）、規制や市場の役割のような外部環境と共に、水管理システムの適応能力に影響する。

3.6.5 不確実性とリスク：不確実性下での意思決定

気候変動は、人口や土地利用変化による課題に加えて、水の管理に関する重大で概念的な難題をつきつける。過去の水文学的な状態が将来わたって継続するという仮定（伝統的な仮定）はもはや適切でなく、さらに、気候変動に関する不確実性のために、水管理者は単一の将来予測をも信頼することができない。基調の傾向がわかっていたとしても、次の 20 年 30 年以内に明確な気候変動の影響を検出することは困難である。この小節では、3つの問題を扱う。(1 つ目は) 不確実性の源に関する概念的な理解及び、どのように不確実性の特徴付けを見出すことである。(2 つ目は) どのように水管理者が不確実性の下で気候変動に対して、実際に意思決定をしているかの事例である。(3 つ目は) 不確実性の下での資源管理の異なる方法の評価である。

公表された水資源影響評価の大多数は、ほんの少数のシナリオを利用したものである。そうした影響が各シナリオ間で大きく変化することを証明したが、(◇とはいうものの) 温度に基づく影響(例: 融雪出水の時期と量による河川流量の変化)はより鈍感な傾向(◇シナリオが変わってもあまり変化しない)があり(Maurer and Duffy, 2005)、また、そのために気候変動に直面した水管理のシナリオベースの研究法の使用は広く推奨される(Beuhler, 2003; Simonovic and Li, 2003)。しかしながら、これらには2つの課題がある。第1は、異なる気候モデルに基づくシナリオの広い範囲は、適応可能な計画がほんの少数のシナリオだけにに基づくべきではないことである(Prudhomme et al, 2003; Nawaz and Adeloje, 2006)。シミュレーションされる範囲が完全な範囲を表すという保証がないためである。第2は、個々のシナリオの信頼性を評価するのは難しいことである。しかしながら、気候変動の異なる要因の確率分布を仮定することによって、水文学的な確率分布を構築することは可能である(例: Wilby and Harris, 2006)。とはいえ、結果として構築された確率分布は、初期に仮定した確率分布の影響を受けるだろう。Jones と Page (2001)は、オーストラリアの Macquarie 川流域において、水貯留量や環境流量、灌漑の配分のための確率分布を構築したが、推定された分布が実際には変化要因の確率分布の仮定による影響をほとんど受けなかったことを示した。

オランダ、オーストラリア、イギリス、および米国を含むいくつかの国々の水管理者は洪水と水供給管理において、気候変動の重要性を表立って考え始めるようになった。例えば、イギリスでは、気候変動による影響を反映し、計画洪水規模が20%増加された(Richardson, 2002)。20%という値は初期の影響評価に基づいたもので、推計手法は新規シナリオの公開に順じて見直し中である(Hawkes et al, 2003)。オランダのライン川における15000から16000m³/sへの計画流量の増加に対応する策は、2015年までに実行されなければならない、また、それは気候変動のために、より長期的には18000 m³/sまで計画流量を増加するよう計画されている(Klijn et al, 2001)。イングランドとウェールズの水供給会社は、環境と経済の規制者によって作られた正式な手順を参考に、2004年の彼らの将来の水資源への要求の検討において4つの気候シナリオを用いた(Arnell and Delaney, 2006)。この手順には水供給への信頼に、気候変動がいつ影響を与えるか、そして、実施する背策によってこれらの影響がいつ感じられるかということを試算した会社を巻き込んでいた。(多くの場合、推計された影響は現状の運用にいかなる変化も及ぼさないほど先の話だったけれども、ある程度の強さの影響はより詳細な調査を今必要とするくらい、差し迫っている。) Dessaiらは(2005)、オーストラリアの水供給管理者が、気候変動の重要性(大きさ)が異なるいくつかの仮定の下での、渇水が継続する(将来)可能性に関する情報を与えられた、という事例を示した。彼らは、非常事態計画を打ち出して一時的な水供給を加えるか、水の使用の制限を厳重にするかどうかを判断するために、この情報を使用した。

将来の気候変動予測に伴っている不確実性を克服するためのやや異なった方法は、不確実性に左右されない管理判断手法を採用することである（Stakhiv、1998）。例えば、統合的な水資源管理は柔軟性と適応性の概念に基づいている。そして、それは容易に変更することができる、もしくは変化に左右されない判断手段を用いている。それらのツールは（水の保全、再生利用、表流水、地下水の一体的な消費、および塩水の脱塩を含む）カリフォルニアでの水供給に対する気候変動の脅威に対応する手段として主唱された（Beuhlerら、2003）。同様にして、洪水管理のための弾力的な戦略（川を一時的に氾濫させる、洪水の損失を軽減する）は、不確実性に直面している現在、従来の「抵抗」（保護）戦略より好ましい（Klijnら、2004；Olsen、2006）。

3.7 結論：持続可能な開発へ向けた示唆

気候変動はミレニアム開発目標（MDGs）に直接記述されていないが、7つのMDGsのほとんどは直接的もしくは間接的に水管理と気候変動に関連している（国連開発計画、2006）。いくつかの主要な懸念事項を表3.6に示す。

目標	水への直接的な関連	水への間接的な関連
目標1: 極端な貧困と飢餓を根絶する	<ul style="list-style-type: none"> ・多くの生産活動の要素としての水(例えば、農業、酪農・畜産業、家内工業) ・共有地から生産される魚類や木材収穫、他の食物の持続可能な生産 	<ul style="list-style-type: none"> ・復元された生態系悪化の削減は地域レベルでの持続可能な開発を改善する ・より信頼性のある水供給による、より安価な食糧による都市部での飢餓減少
目標2: 万人に対する教育を達成する		<ul style="list-style-type: none"> ・特に少女に対する、健康の改善と水を運ぶ負荷の軽減による、就学状況の改善
目標3: ジェンダーの公平と女性の権限を促進する	<ul style="list-style-type: none"> ・ジェンダー感覚のある水管理計画の開発 	<ul style="list-style-type: none"> ・改善された水サービスにより、収入のためのより多くの時間と、よりバランスの取れた性別役割につながり、時間浪費と健康への重荷を
目標4: 子供死亡率を減少する	<ul style="list-style-type: none"> ・より良質で適切な量の飲料水へのアクセスと改良された衛生設備により、幼い子供の病的状態と死亡率の主な原因を縮小する 	
目標6: HIV/エイズ、マラリア、他の疾病と戦う	<ul style="list-style-type: none"> ・水へのアクセスと衛生施設の改善は、エイズでHIV/影響を受ける家庭を支え、健康ケアの管理プログラムの影響を改善する可能性がある ・より良い水管理は、蚊生息地とマラリアの伝染の危険性を減らす 	
目標7: 環境の持続可能性を確実にする	<ul style="list-style-type: none"> ・改善された水管理は、水消費量の減少させ、栄養塩と有機肥料を再循環させる ・貧しい家庭のために、改善され、また、生産的な環境衛生施設へのアクセスを確実にする行動 ・貧しい地域社会への水供給と衛生サービスを改善する行動 ・廃水放流量の減少と、スラム街の環境衛生を改善する行動 	<ul style="list-style-type: none"> ・サービス提供の持続性を確実にするための、操作、維持、および費用回収システムの開発

表 3.6 MDGs に資する水分野の潜在的貢献

地球上の多くの地域で、淡水資源への気候変動の影響は持続可能な開発に影響を及ぼし、例えば貧困や子供の死亡率の削減を危機的な状況に追いやるかもしれない。最適の水管理があっても、持続可能な開発への負の影響を避けることができない可能性がかなり高い。図 3.8 に、淡水関連の気候変動の影響が、影響を受けた地域の持続可能な開発への脅威になるという世界の中のいくつかの重要な事例を示す。

「持続可能な」水資源管理は、一般的に、統合的水資源管理によって達成されることを求められる。しかしながら、この言葉の厳密な解釈は様々に異なる。すべての定義は、環境、特に水環境の維持と質を高める、という概念を広範囲に含む。そして、それは競合する使用者や河道内生態系、湿地を考慮している。さらに、水管理政策のより広義の環境的な意

味、例えば土地管理もしくは水環境のための土地政策が考慮されている。政治、社会経済、行政上の仕組みの領域において、水と土地の管理は持続可能な水資源を達成するための重要な構成要素である（GWP、2002；Eakin and Lemos、2006）。

気候変動と持続可能な開発を関連付ける時、エネルギー、公平性、健康、水の統治は主要な問題である。しかしながら、持続性に関する研究のほとんどが気候変動の影響を組み込んでいない（Kashyap、2004）。いくつかの研究では水分野に起因するカーボンフットプリントの計算を取り入れられている。例えば、太陽エネルギーが使われるならば、脱塩は持続可能な水管理の方法と考えることができる。多くの水管理活動と適応策、特に水の汲み上げまたは処理を伴うものは極めてエネルギー集約的である。水管理活動と適応策の実現はエネルギー関連の地球温暖化ガス放出に影響し、そして、エネルギー政策もまたそれに影響するだろう（Mata and Budhooram、2007）。適合策に取り組むことにより、潜在的に不公平な量が生じうる。ある人は様々な利益を得る（例えば公的資金による洪水防護）一方で、ある人は移住により立ち退きなど（例えば新規貯水池の建設などで）負の影響を受ける。

温室効果ガスの排出を減らす緩和施策は、気候変動による水資源への影響を小さくする。洪水または水不足にさらされて、潜在的に影響を受ける人々の数は、シナリオに依存する。例えば、550ppm（産業以前の水準に比例しておおよそ2℃の温度増加をもたらす）の安定化は、気候変動によって悪影響を受けている人々の数を30～50%減らすだけである。

3.8 重要な不確実性と研究の優先順位

流域における水文学的な特性の量的な予測には、かなり大きい不確実性がある。降水量（水システムの基本となる入力）は、現在の気候モデルでは十分信頼性のある計算はされていない。降水量変動は気候変動によって増加することがほぼ確実であるが、同様に融雪に影響する気温の上昇はより確実に見積もられており、そのため雪の影響が卓越した地域では降水量の変動よりも気温の上昇による影響がより強い。

不確実性は、2つのことを示唆する。一つは、適応策の手法が、河川流量や地下水などにおける変化の正確な予測を当てにせずに構築される必要があるということ。もう一つは、今までのところ完成している研究に基づいて、信頼できる方法で気候政策や放出経路の水関連の因果関係を評価することは困難であるということ。これらの不確実性に直面した適応策の研究が必要である。具体的な予測をすることが難しいのに対して、将来の水文特性が変化することは既に知られている。いくつかの国の水管理者は、どのようにして気候変動

の潜在的影響を政策と特定の構想に組み込むかについて、すでに明確に考えている。

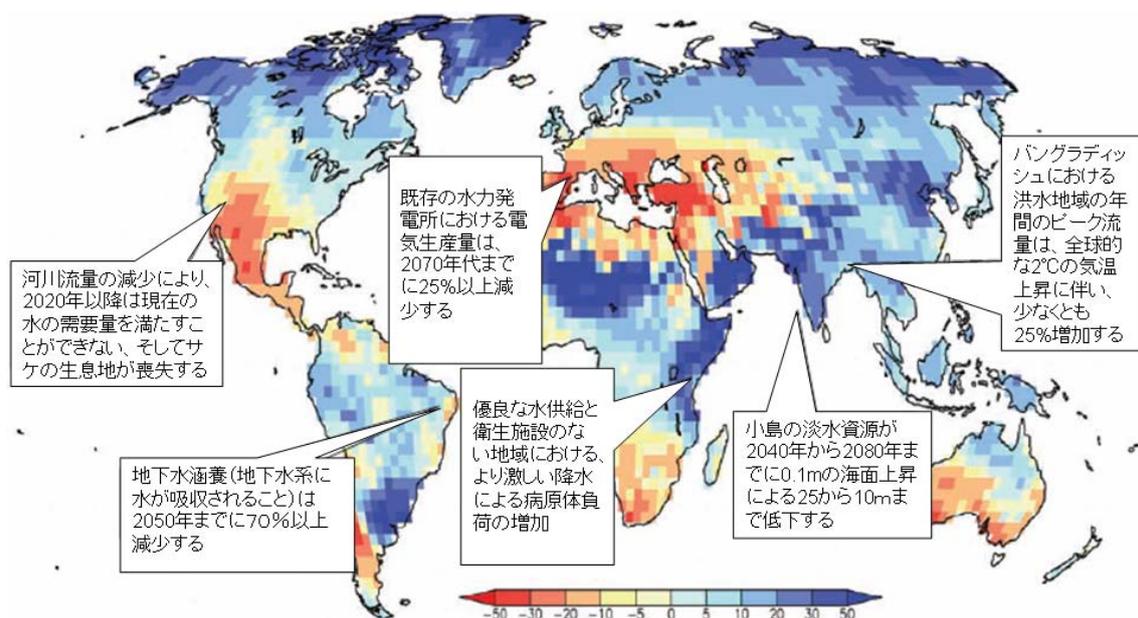


図3.8 持続可能な開発へ影響のおそれがある地域における淡水の将来の気候変動影響地図
 1 : Bobba et al (2000)、2 : Barnett et al (2004)、3 : Döll and Flörke (2005)、4 : Mirza et al (2003)、5 : Lehner et al (2005a)、6 : Kistemann et al (2002)。背景の地図 : 年流出のアンサンブル平均の現在からの変化[%] (1981~2000と2081~2100、SRES A1B排出シナリオ) (Nohara et al、2006に基づく)。

水-気候の相互作用の研究は必須である :

- ・ 気候変動による淡水の資源とその管理への影響 (量的な限界) の理解と評価を改善する
- ・ 適応策に対して責任を有する水管理者への実際的な情報要求を満たす

気候-水の相互作用に関連した研究課題の中でも、以下のような研究が必要である。

- ・ 予測の信頼性を改善するために、不確実性の原因の理解を進めることが必要である
- ・ 大規模な気候モデルと流域規模の間には縮尺の不釣り合いがあり、さらなる解決策が必要である。水は流域で管理され適応策は地域によるが、その一方で全球的な気候モデルは大きい空間的な格子で動いている。適切に評価された領域気候モデルの解像度の向上と統計的ダウンスケーリングにより、水管理により多く関連した情報を作成することができる。
- ・ 気候の変動性における変化の影響は、影響モデルの成果物と統合される必要がある。
- ・ 植生の変化や灌漑のような人類中心の活動を含む土地-利用変化を伴う結合型気候モデルの改善が必要である。
- ・ 水質分野での気候変動影響は十分に理解されていない。特に極端現象の影響に関連して、先進国と開発途上国双方の要求を満たしながら、この分野において研究を拡充する必要

がある。

- ・ 気候変動の影響の経済的側面と水資源に関する適応手段は、実用としてとても重要であるが比較的少ない結果しか利用できるものがない。
- ・ 淡水域での気候変動影響の人的側面指標についての研究は黎明期にあり、そして活発な拡大が必要である。
- ・ 水生生態系（気温のみならず、改変された流量・水位・氷の被覆面積）への気候変動の影響が適切に理解されていない。
- ・ 特に極値の特性と関連した淡水の資源の観察された変化の検出と原因特定は、挑戦的な研究課題である。そして、水系における変化の理由づけ手法は改良の必要がある。
- ・ 水資源管理のために確率的な気候変動シナリオの出現によって新たな研究の課題と機会がある。
- ・ その重要性にも関わらず、地表水資源と比較して、地下水は気候変動の影響評価からほとんど関心を受けなかった。
- ・ 水資源管理は明確に他の多くの政策領域（例えば、エネルギー予測、自然保護）に影響を与える。したがって、異分野横断の適応策を調整する機会がある (Holman et al, 2005a, b)。水に依存する複数の横断的な分野に対して、適応策の評価を実行するためにどのような手段が必要かをはっきりさせる必要がある。

研究における進歩はデータの利用可能性の改善、世界中での観測努力の強化に対する呼びかけ、気候変動によって引き起こされる淡水資源の課題への取り組み、観測ネットワークの縮小傾向の解消次第である。利用可能な観測データへのアクセスを拡大することは、進行中の変化に対する理解を向上させるために必須である。比較的短期の水文学的な記録は自然の変動性の範囲を過小評価し、研究を混乱させる。一方で、長期的な河川流量の再解析は、より広い前後関係での極値と近年の動向を位置づけることが出来る。水の使用・水質・土砂輸送に関するデータはさらに利用困難である。