

第2編 地球温暖化の影響

1 はじめに

近年、国内においても国際的にも地球温暖化問題が大きくクローズアップされている。2007年6月のハイリゲンダム・サミットで2050年に少なくとも50%の排出削減を真剣に検討することが確認され、その議論は2008年7月の洞爺湖サミットに引き継がれた。国際的な議論の焦点は、中長期的な温暖化対策の枠組みをいかに作るかであり、複雑で難しい国際交渉が行われている。

地球温暖化対策が21世紀の世界的な課題になった背景には、温暖化の影響の世界的な顕在化があると思われる。ヨーロッパを襲った熱波、ハリケーン・カトリーナの被害、オーストラリアの干ばつなど、今世紀に入って、目に見える異常気象の被害が続いている。また、北極海の海氷の縮小や干ばつによる農業生産への打撃なども毎年報告される。我が国でも、かつてない猛暑の年や集中豪雨、コメの高温障害、熱帯性の生物の北上など、その先触れと考えられる影響が現れている。

気候変動の深刻な影響を回避する方策には、緩和策と適応策という2つがある。緩和策は、温室効果ガスの排出削減と森林などによる炭素の吸収・蓄積を促進することによって温暖化の進行を抑制する対策であり、適応策は、防災や水資源管理などによって気候変動の悪影響を抑えるための対策である。

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）が示した将来の気候予測では、今後20年程度は、どの排出シナリオをたどっても $0.2^{\circ}\text{C}/10$ 年というほぼ同じ割合で気温上昇が生じる。いったん大気中に排出された CO_2 は数十年といった長い期間留まるため、過去の排出による CO_2 が温暖化の推進力になっており、今後20年位は速いペースで温暖化が進行するのである。それでは今から排出削減をしても無駄かというところではなくて、今後の排出削減の努力が、さらに先の長期的な温暖化の進行を左右する。そのため、とりわけ中期的に適応策が必要となる一方、適応策だけで温暖化の影響を解消することは不可能なため、適応策と緩和策とのベストミックスが必要ということになる。

緩和策を進めようとするれば、エネルギー供給やものの生産・輸送・消費のあらゆる分野で大規模な技術革新と経済システムの変更、さらにライフスタイルの変革を必要とする。2050年に60～80%の排出削減といったドラスティックな長期目標は既存の個別対策だけでは達成できず、かつてない技術革新が必要になる。土木界は、建設事業からの CO_2 排出の削減といった直接的な対策から、低炭素型の地域作りという地域社会のあり方の変革まで、幅広い責任を有している。同時に、適応策は、防災や水資源管理、農林水産業、健康をはじめ国民生活の各分野で、気候変動の脅威から人々を守る対策であり、土木分野に深く関連するものである。

こうした対策を進める上で必要となる認識は、今後どのように気候変動が進行し、どのような影響が現れるかである。さらに、将来の影響の程度は、今後の緩和策と適応策の進み具合によって大きく左右される。今後の対策を考える上では、対策あり／対策なしの各種シナリオの下での影響予測が必要になる。地球温暖化影響小委員会では、温暖化対策にとって不可欠なこうした認識をまとめるために、日本への影響を概観し、土木の視点から特に重要な影響を抽出することを任務として、レビューを行った。

2 気候予測の概要

気候変動の予測研究は、多くの国・機関で行われている。それぞれ固有の前提条件やシナリオを用いており、それぞれ過去の再現性や将来予測の精度、特徴等が異なる。ここでは、環境省「地球温暖化影響適応研究委員会」による「気候変動への賢い適応―地球温暖化影響・適応研究委員会報告書」（環境省，2008）に示された、既存の気候予測シナリオに関する最新の知見を中心に、これまでに行われている気候予測の概要を示す。

2-1 IPCC 第4次評価報告書（AR4；IPCC，2007）の気候システムに関する主な知見

(1) 現状の評価

IPCC-AR4 では、観測結果に基づいて、近年の気候変動に関して以下のような内容が報告されている（図 2.1.1）。

- ・ 気候システムの温暖化には疑う余地がない。1906 年から 2005 年までに観測された 100 年間の世界平均の気温上昇値は 0.74°C 。
- ・ 1961～2003 年にかけて世界平均海面水位は年平均 1.8mm の割合で上昇した。また、グリーンランドと南極の氷床の減少が、1993～2003 年の海面水位の上昇に寄与した可能性が非常に高い。
- ・ 北半球及び南半球の両半球において、山岳氷河と積雪面積は平均すると縮小している。
- ・ 大雨の頻度はほとんどの陸域において増加。
- ・ 寒い日、寒い夜及び霜が降りる日の発生頻度が減少、暑い日、暑い夜及び熱波の発生頻度が増加。

また、「20 世紀半ば以降に観測された世界平均気温の上昇のほとんどは、人為起源の温室効果ガス（GHG）の観測された増加によってもたらされた可能性が非常に高い」と、人為起源の GHG の増加が温暖化の原因とほぼ断定している。

(2) 将来予測

IPCC AR4 では、SRES シナリオに基づく地球温暖化による気候変動の将来予測結果が示されており、そのうち主な変化は以下のとおりである。

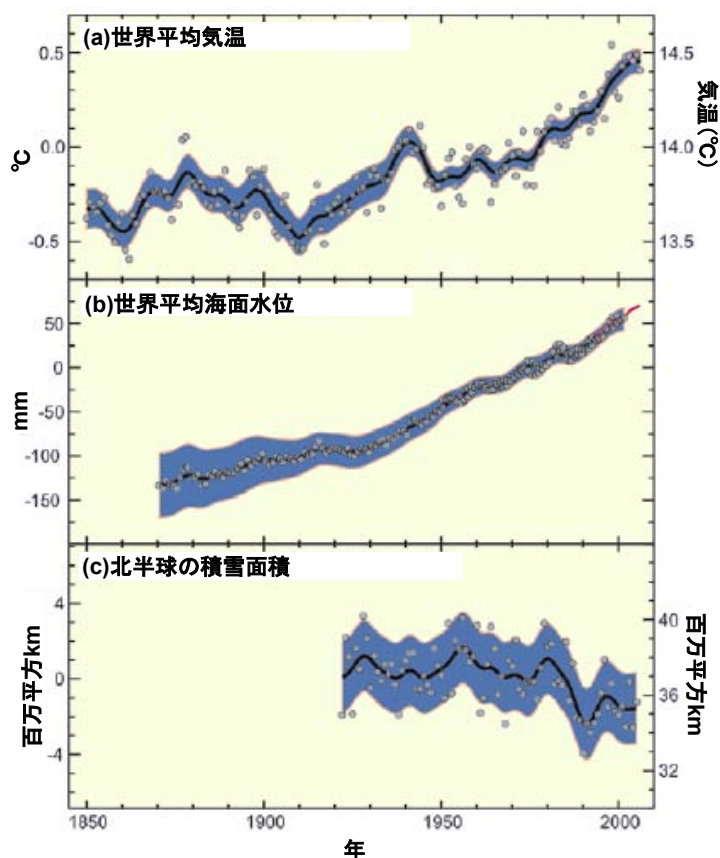


図 2.1.1 世界平均気温、世界平均海面水位、北半球の積雪面積
(1961～1990 年の平年値との比較) (IPCC, 2007)

1) 気温

今後 20 年間は 10 年あたり約 0.2°C の割合で上昇すると予測されている。また、2090～2099 年の世界平均地上気温は、1980～1999 年の平年値と比べて $1.1\sim 6.4^{\circ}\text{C}$ の範囲で上昇すると予測されている（図 2.1.2）。

2) 海洋

2090～2099 年の世界平均海面水位は、1980～1999 年の平年値と比べて $0.18\sim 0.59\text{m}$ の範囲で上昇すると予測されている（表 2.1.1）。また、大気中の二酸化炭素濃度の増加は海洋の酸性化を引き起こし、21 世紀には世界平均の海面の pH は $0.14\sim 0.35$ 減少すると予測されている。

3) 降水量

高緯度地域では増加する可能性が非常に高く、一方、ほとんどの亜熱帯地域においては減少（A1B シナリオで 2090-2099 年の降水量が 1980-1999 年の平年値と比べて最大で約 20% 程度減少）する可能性が高いとされている（図 2.1.3）。

4) 極地への影響

特に大きな影響が予測され、すべての SRES シナリオにおいて、北極域及び南極域の海水が縮小すると予測されている。特に、北極海の晩夏の海氷は、21 世紀後半までにほぼ完全に消滅するとの予測もある。

5) 東アジア地域の気温、降水量

1961～1990 年の平年値と比べた東アジアの地上気温変化の予測値を参照すると、2010～2039 年の年平均気温は $1.4\sim 1.5^{\circ}\text{C}$ 程度の範囲で、2040～2069 年の年平均気温は $2.5\sim 3.6^{\circ}\text{C}$ 程度の範囲で、2070～2099 年の年平均気温は $3.4\sim 6.1^{\circ}\text{C}$ 程度の範囲で上昇するものと推測される。また、1961～1990 年の平年値と比べた降水量変化の予測値を参照すると、2010～2039 年の夏季（6～8 月）及び冬季（12～2 月）の期間

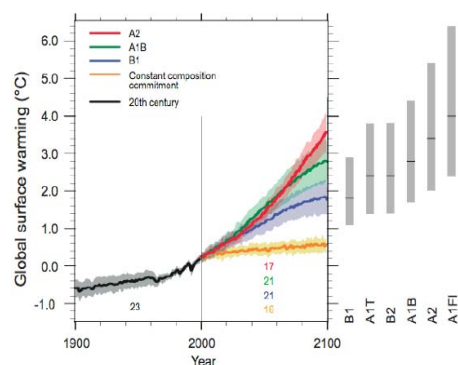


図 2.1.2 排出シナリオ別の 2090～2099 年の世界平均地上気温の上昇
(1980～1999 年の平年値との比較) (IPCC, 2007)

表 2.1.1 排出シナリオ別の 2090～2099 年の世界平均海面水位の上昇

Sea Level Rise (m at 2090-2099 relative to 1980-1999)	
Case	Model-based range excluding future rapid dynamical changes in ice flow
B1 scenario	0.18 – 0.38
A1T scenario	0.20 – 0.45
B2 scenario	0.20 – 0.43
A1B scenario	0.21 – 0.48
A2 scenario	0.23 – 0.51
A1FI scenario	0.26 – 0.59

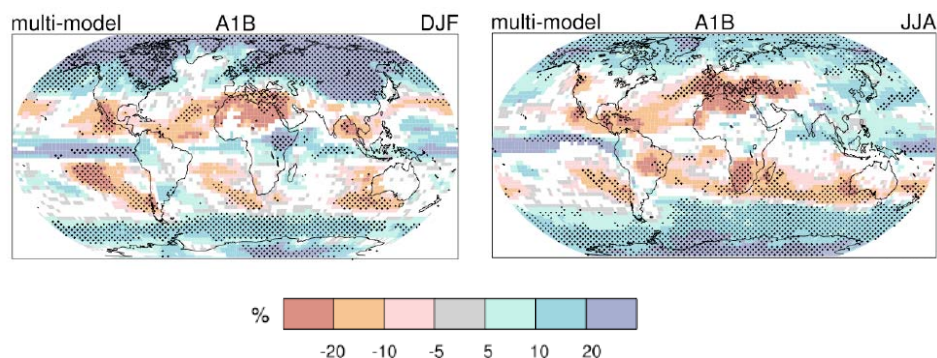


図 2.1.3 2090～2099 年の降水量の相対的な変化割合
(1980～1999 年の平年値との比較、A1B シナリオ) (IPCC,

降水量はそれぞれ2～3%、5～6%程度の範囲で、2040～2069年の期間降水量はそれぞれ5～8%、10～13%の範囲で、2070～2099年の期間降水量はそれぞれ8～14%、15～21%の範囲で増加すると予測されている。

2-2 日本の気候予測

(1) 現状

気象庁では、1974年以来5年ごとに「近年における世界の異常気象と気候変動—その実態と見通し—」（通称：異常気象レポート）を刊行し、異常気象、地球温暖化などの気候変動、その他の地球環境の現状や変化の見通しについての見解を公表している。7回目となる「異常気象レポート2005」（気象庁、2006b）では、日本の気候変動等の現状として以下の内容が示されている。

1) 気温

近年、平均気温の上昇傾向が認められている。日本の年平均気温は1980年代後半から高温が続いており、特に1990年代に入ってから顕著な高温となった年が多い。統計を開始した1898年以降での年平均地上気温が高かった上位5年は全て1990年以降である（図2.2.1）。

2) 異常高温・異常低温・真夏日日数

近年、異常高温の出現数の増加及び異常低温の出現数の減少が認められている。1901～2004年の異常高温及び異常低温の出現数は、20世紀初頭と最近30年間の出現数を比較すると、異常高温が5.8倍に増加した一方、異常低温は約3割にまで減少している。また、熱中症の発症に結びつくような高温日が近年大幅に増加している（図2.2.2）。真夏日（日最高気温が30℃以上）の日数は1980年代以降、猛暑日（日最高気温が35℃以上）の日数も1980年代後半以降増加傾向となっており、猛暑日は最近では1970年代までの約3倍の出現頻度となっている。

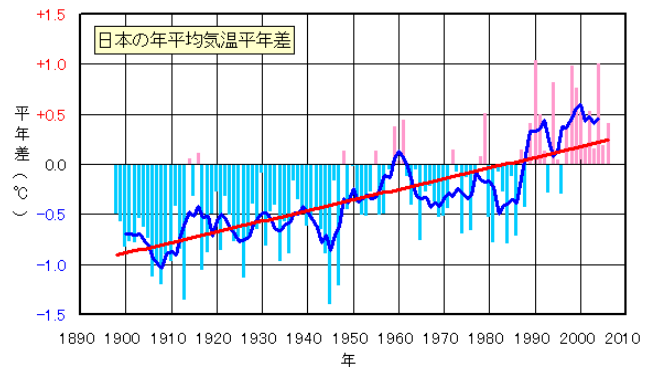


図 2.2.1 日本の各年の平均気温の平年値との差（気象庁、2006a）

青（太線）：平年差の5年移動平均値

赤（太線）：長期的な変化傾向

※平年値は1971～2000年の30年平均値

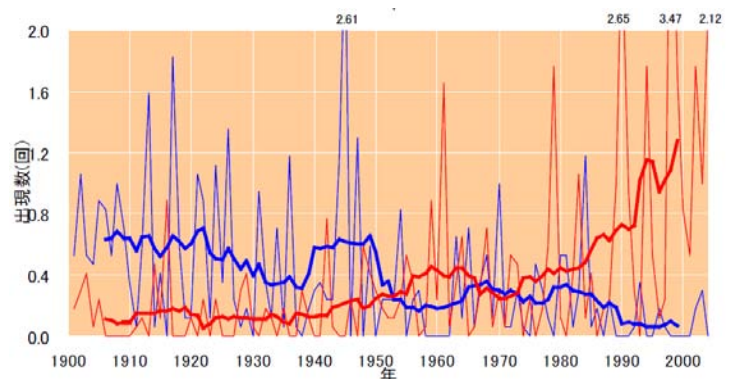


図 2.2.2 日本の異常高温と異常低温の出現数（気象庁、2006b）

赤（細線・太線）：異常高温の出現数

（年間値・11年移動平均値）

青（細線・太線）：異常低温の出現数

（年間値・11年移動平均値）

※値は1地点あたりの平均出現数を示す

（調査に利用した気象官署は17地点）

3) 降雨量・降雪量

近年は降水量の年々変動が大きくなっていることが認められている。全国平均の降水量において 1901～1930 年の平年比の標準偏差は 8.7%であったのに対し、1975～2004 年のそれは 12.3%と増加している。また、降雪量は、気象庁が観測している年最深積雪（前年秋～該当年夏までの最も深い積雪深）の長期的変化傾向（1962～2004 年までを対象として算出した 10 年あたりの長期変化傾向）が、北日本の日本海側、東日本の日本海側、西日本の日本海側のいずれの地域においても、それぞれ 4.7%、12.9%、18.3%の減少となっている。

4) 異常多雨・異常少雨

降水量の変動性が増加していることが認められている。1901～2004 年の異常多雨、異常少雨の出現傾向を見ると、1980 年代以降は異常多雨、異常少雨ともに出現数が増加する傾向にある。

5) 降水強度

弱い降水の減少傾向と強い降水の増加傾向が認められている。日降水量を 10 区分した降水強度別の年降水量の長期変化を見ると、弱い降水階級（階級 1,3）の年降水量は減少し、最も強い降水階級（階級 10）の年降水量は増加している。さらに、日降水量 100mm 以上、200mm 以上の出現数にも増加傾向があり、最近 30 年間（1975～2004 年）と 20 世紀初頭の 30 年間（1901～1930 年）を比較すると、100mm 以上の日数は約 1.2 倍、200mm 以上の日数は約 1.5 倍の増加となっている。

6) 台風

台風の発生数を見ると、1960 年代半ばと 1990 年代はじめにピークが見られ近年は比較的少ない傾向となっており、日本への接近数・上陸数についても発生数と同様の傾向を示している。また、強い台風の発生数を見ると、長期的に増減いずれかに偏る傾向はなく、発生割合も発生数の変動と似た傾向を示している。

7) 海面水位

過去約 100 年にわたる日本沿岸の海面水位は統計的に有意な上昇を示していないが、1980 年代後半から海面水位の上昇傾向は続いており、近年は 1950 年前後と並んで過去 100 年で海面水位が最も高い状態にある。2004 年の値は過去 100 年の平均値より 67mm 高く、過去最高記録を更新した。異常潮位（潮位偏差の高い(低い)状態が広範囲に数週間を越えて長期間続く現象）の発生回数の経年変化からは明確な傾向は見られていない。近年、西日本を中心に異常潮位などにより災害が増えている主な要因は、異常潮位の回数の変化よりも平均的な海面水位が上昇していることによる影響が大きいと推定される。

(2) 将来

わが国の将来の気候変化に関する予測情報としては、「異常気象レポート 2005」の主な項目の予測に用いられている RCM20 による温暖化実験結果や、AR4 で取り扱われた 17 研究機関 23 種類の全球気候モデルによる温暖化実験結果（以下、PCMDI データと呼ぶ）などが挙げられる。なお、温室効果ガスの排出シナリオについては、SRES シナリオのうち RCM20 は A2 シナリオを、PCMDI データは A2 シナリオと A1B シナリオ、B1 シナリオの 3 シナリオを想定して、将来予測を行っている。これらのモデルの温暖化実験結果による将来の予測結果を以下に示す。

1) 気温

PCMDI データに基づく整理結果によれば、2070～2099 年の年平均気温は 1961～1990 年の平

年値と比べて 1.3～4.7℃（地域別では 1.2～5.8℃）程度の昇温が生じ、高緯度地域でより昇温が大きくなると予測される。

RCM20 による温暖化実験結果においても、2081～2100 年の年平均気温は 1981～2000 年の年値と比べて 2～4℃程度（北海道の一部で 4℃以上）程度の昇温が生じると予測されており、高緯度地域で昇温が大きくなっている（図 2.2.3）。

2) 真夏日日数・真冬日日数

RCM20 による温暖化実験結果によれば、2081～2100 年の真夏日の出現数の年平均値は 1981～2000 年の年値と比べて全国的に増加（特に九州南部や南西諸島では 25 日以上増加）し、熱帯夜の出現数も全国的に増加（特に九州南部や南西諸島では 30 日以上増加）すると予測される。一方で、真冬日の出現数は全国的に減少（特に北海道の太平洋側やオホーツク海側では 40 日以上減少）すると予測される（図 2.2.4）。

3) 降水量・降雪量

PCMDI データに基づく整理結果によれば、2070～99 年の年降水量は 1961～1990 年の年値と比べて -2.4～16.4%（地域別では -8.4～22.4%）の割合で変化が生じると予測される。

降雪量については、RCM20 による温暖化実験結果によれば、2081～2100 年の年平均降雪量は 1981～2000 年の年値と比べてオホーツク海を除く全ての地域で減少が予測される。特に現在降雪量の多い北海道から山陰にかけての日本海側での減少が大きく、多いところで年間 400mm（水換算）程度の減少が予測される。

4) 無降水日日数

RCM20 による温暖化実験結果によれば、2081～2100 年の無降水日の出現数の年平均値は、1981～2000 年の年値と比べて一部の地域を除いて増加し、特に北日本日本海側及び南西諸島で著しく増加すると予測される。

5) 強い雨の頻度

RCM20 による温暖化実験結果によれば、2081～2100 年の日降水量 100mm 以上の日の出現数の年平均値は、1981～2000 年の年値と比べて太平洋側の一部地域と北海道の一部を除く多くの地域で現在よりも増加すると予測される。また、日降水量 200mm 以上の日の出現数も近畿地方など一部を除く多くの地域でわずかながら増加すると予測される。

6) 台風（熱帯低気圧）

文部科学省の研究計画「人・自然・地球共生プロジェクト」の一環として、気象庁気象研究所や財団法人地球科学技術総合推進機構を中心とする研究グループが、約 20km という非常に高い水平分解能をもつ全球大気気候モデルの開発や数値実験に取り組んでいる。その結果によれば、温暖化により、全球的な熱帯低気圧の年間発生数は現在より減少するが、最大風速が 45m/s を超えるような非常に強い熱帯低気圧の出現数は増加すると予測されている。

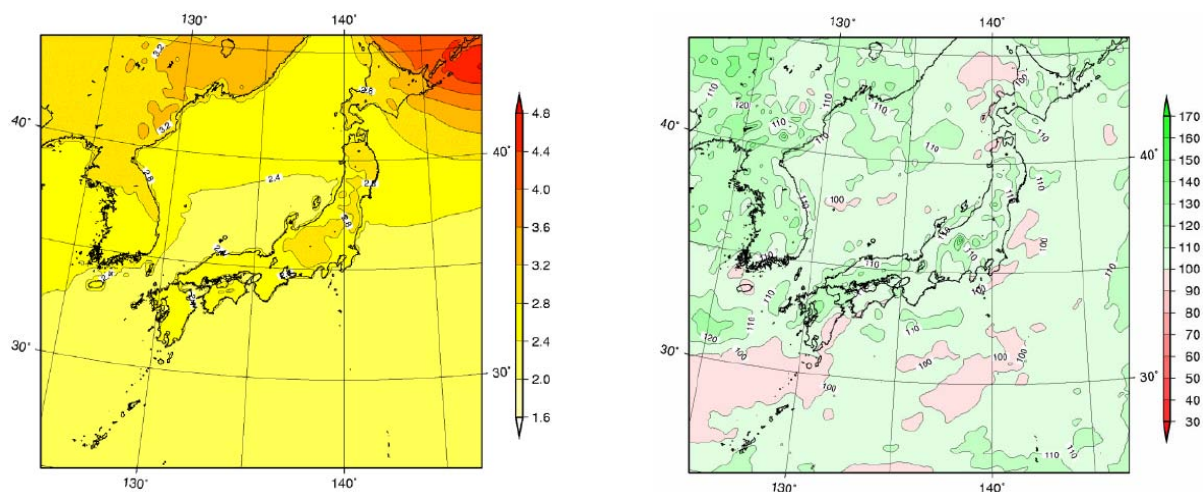


図 2.2.3 RCM20 を用いた気象現象の将来予測（2081～2100 年と 1981～2000 年の差）
（気象庁，2006b）

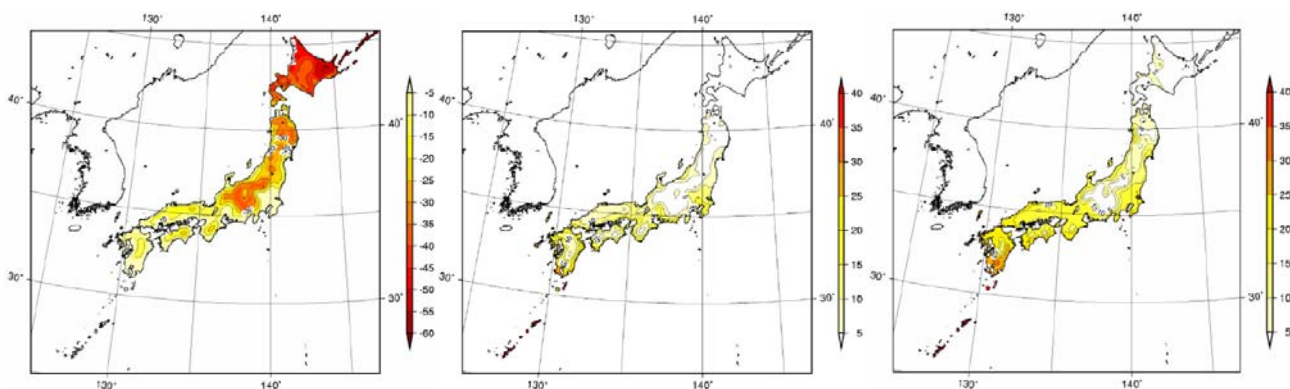


図 2.2.4 RCM20 を用いた各気象現象の年間出現日数の変化（2081～2100 年と 1981～2000 年の差）【日】
（気象庁，2006b）

参考文献

環境省，2008：気候変動への賢い適応－地球温暖化影響・適応研究委員会報告書－，340p..

IPCC，2007: Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976p..

気象庁，2006a：気候変動監視レポート 2006 世界と日本の気候変動および温室効果ガスとオゾン層等の状況について，88p. (<http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/monitor/>).

気象庁，2006b：異常気象レポート 2005 近年における世界の異常気象と気候変動～その実態と見通し～（Ⅶ），383p.

3 我が国に対する影響

3-1 水資源

(1) 降水量の変化

GCM(大気循環モデル)によると、将来気候において降雨量の増加と無降雨期間の拡大が示されている。これは年降水量、1 降雨イベントともにいえる。年降水量は、少雨の年が増えているとともに、多雨の年との年降水量の差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過去のデータから示されている（国土交通省、2007）。1 イベントの降雨についても、極めて短い時間スケールの豪雨と無降雨の渇水期間が拡大する傾向にある。こうした降水パターンの変化は水資源管理システムの運営を困難にする。

(2) 積雪量の変化

温暖化の影響が最も顕著に現れるのが積雪量である。冬季降水量の減少については明らかにされていないが、気温の上昇は、降雪を降雨に変化させると同時に冬季融雪量も増加させる。北陸から東北地方にかけては、春季（代掻き期）の水田の灌漑用水は融雪水に依存しているため、積雪水資源量の減少は、農業生産性のみならず河川環境にも大きな影響を与える。過去の記録によると平均年最深積雪について、10 年あたりの長期変化傾向は北日本の日本海側、東日本の日本海側、西日本の日本海側においてそれぞれ、 -4.7% 、 -12.9% 、 -18.3% となっており、東日本の日本海側、西日本の日本海側で有意な減少傾向が認められる（国土交通省、2007）。また、積雪減少量に対する農業用水の比率を見ると、日本海側より積雪量が少ない東北地方の太平洋側流域の方が深刻であることが示されている（那須他、2007）。こうした積雪量の変化において、植生が重要な働きをすることが示されており、常緑樹が落葉樹に比べて積雪期間が長くなることや、間伐が積雪期間に影響することが考えられている。

(3) 河川

河川水は様々な利権者に利用されており、最も重要な水資源であるといえる。しかし、日本の一人当たり水資源賦存量は欧米諸国と比べて少ないと同時に、急峻な地形のため多くの河川水が海に達してしまう。そのため、ダムや貯水池、ため池が、貯留効果を担ってきた。これらの多くの貯水池容量は、1980 年以前のデータによる河川計画流量によって計算されており、気候変動に対応できないことが危惧される。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示されており、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、最近は有意に低下している（山本聡、2007；国土交通省、2003）。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ている。ただし、河川流量は都市化に伴う地下浸透量の減少が気候変動より大きく影響することが知られており、土地利用や水利用の制限の効果が高いと考えられる。

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、夏場には気温と水温に強い正の相関（傾き 1.4）が見られた。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。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。降水パターンの変化に伴う汚濁負荷量の変化も報告されている。豪雨の発生は土砂流出を助長させるため、濁質成分の流出を多くさせる。一方、渇水期間の拡大も地表面の大気降水物の堆積量が増加するため、直後の降雨時に大量の汚濁物質が流出する。このため浄水場の水質管理は新たな対応を必要とされ、コストの増加をもたらす。

都市内の河川の存在は、ヒートアイランドに有効とされる。潜熱の移動や風による熱交換によって地表面温度を下げる効果がある。また、散水による気温減少の効果も認められており、都市の炎熱化を防ぐ水資源の効果も期待されている。

（4）湖沼

ダムや貯水池と同様に貯留効果が大きい湖沼も重要な水資源である。しかし、滞留時間が長いため、水質悪化の影響を受けやすく回復しにくい特徴をもつ。気温上昇に伴う流域蒸発散量の増加と無降雨期間の拡大は、湖沼の水量を減少させる。琵琶湖では、近年 2000 年 9 月に琵琶湖基準水位（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）。神奈川県においても 1996 年に、1967 年以来 29 年ぶりの渇水に見舞われ、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。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）。

気候変動に伴う湖沼の水質悪化は、河川水と同様の理由によるところが多いが、滞留性からより深刻な場合が多い。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。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、水温上昇による微生物活性の増加に伴い、貧酸素化の増加、水温上昇に伴う飽和溶存酸素濃度の低下、低温期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。また、水温の上昇に伴い、富栄養化が顕在化する場合が考えられる。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。

る（草場ら、2007）。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（滋賀県琵琶湖研究所、1996）。気温低下時の大循環が湖沼環境に大きな影響を与えているとされ、躍層の存在が大循環を阻害し、低層の貧酸素化をもたらす。湖底が嫌気状態になると硫化水素を生じるため、生態環境に影響を与えると同時に水資源に適さない湖沼環境に変化する場合がある。

(5) 地下水

地下水に関しては、渇水時の代替水源として利用が増加し、過剰採取によって地盤沈下等の影響が想定される。地下水は安定した水温と水質のため最も利用しやすい水資源であるが、気候変動に伴い水温上昇と水質悪化が懸念されている。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や島嶼にとっては、塩水化は深刻な温暖化影響となる。海面上昇と高潮による地下水への塩水侵入によって塩水化は加速する。また、沿岸域の開発は地下浸透量を減少させる傾向にあり、沿岸域の地下水資源は脆弱であるといえる。ガイベン・ヘルツベルグの理論式によると地下水水位の減少の 40 倍で塩水界面が上昇するとされ、淡水レンズからの揚水は急激な地下水資源の減少をもたらす。

(6) 水資源への影響とその対策

以上のような影響に対して、表 3.1.1 に示すような対策が提案されている。

表 3.1.1 水資源への影響と対策

対象	影響	対策
河川	渇水 (積雪量減少)	法制度の見直し（水利権の見直し、土地利用の制限） 新たな貯留施設の建設 浸透施設（透水舗装、浸透ます等） 雪ダム
湖沼	渇水 水質悪化	水利用制限 負荷量の減少、循環（曝気）施設の導入
ダム、調整池	管理の複雑化 堆砂 水質悪化	複数ダムによる総合管理 プレダム、森林保護、斜面保護 負荷量の減少、循環（曝気）施設の導入
浄水場	水質悪化	負荷量の減少
地下水	塩水侵入 枯渇	地下ダム、浸透施設 浸透施設、揚水制限

参考文献

本報告の多くの部分を環境省「気候変動への賢い適応-地球温暖化影響・適応研究委員会報告書-第三章」によっている。

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。

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.

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.

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）。

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.

香川県 香川の環境ホームページ (<http://www.pref.kagawa.jp/kankyo/data/0712/071225.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

神奈川県ホームページ

(<http://www.pref.kanagawa.jp/osirase/01/0104/suigenkaihatu/page20.html>)

福島武彦他，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.

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.

草場智哉他，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.

谷口真人，2005：気候変動と地下水，地下水学会誌，47(1)，pp.5-17.

3-2 防災（河川洪水、土砂災害、高潮）

(1) 河川洪水

1) 降水量の変化

環境省地球環境研究総合推進費戦略的研究開発プロジェクト S-4(2008)によれば、温暖化による豪雨増加は地域によって差があり、山岳域はより増加する傾向があると分析している。以下は引用である。

温暖化による豪雨の増加量を評価するために、GCMと確率降雨の概念を用いて気候変動による豪雨の増加量を算定した。図3.2.1はGCMによる日本全域の将来の雨の降り方(日雨量)の変化を示したものである。

図3.2.1に示す解析結果は、現在の降雨の統計値から求めたもので、50年に1回降るとされる豪雨と30年に1回降る豪雨の差を示している。求めた値は日降雨量である。これは気候シナリオMIROCによるとおおよそ現在と2030年頃の気候差に相当し、気候変動によって豪雨が増加することを表している。大きい値の地域は、他の地域より豪雨の増加が大きい地域である。この図によると、豪雨の増加量は、地域によって大きな差があり、太平洋沿岸や山岳地域の豪雨が大きくなる。つまり、これらの地域が、気候変動により、他の地域よりも災害が増加する可能性を示しており、気候変動に対する備えが他の地域より必要であると言える。

つぎに、国土交通省河川局 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にあり方についての答申（社会資本整備審議会河川分科会、2008）では、以下の分析を行っている。

・年最大日降水量を 100 年後と現在とで比較した場合、RCM20 の予測結果の変化率（A2 シナリオ）は、概ね 1.0～1.5 倍となり、GCM20 の予測結果の変化率（A1B シナリオ）は、概ね 1.0～1.2 倍で、北海道、東北など地域によっては 1.3 倍になり、最大で 1.5 倍となる可能性がある。また、RCM20 の予測結果から、50 年後と 100 年後の 100 年確率最大日降水量を比較した結果（A2 シナリオ）では、50 年後の変化率は概ね 1.1～1.2 倍、100 年後の変化率は概ね 1.2～1.4 倍となる結果が得られた。

・これらの結果から、100 年後の降水量の変化を予測すると、現在の概ね 1.1～1.3 倍、最大で 1.5 倍程度となる可能性がある。

・全国を 11 の地域に区分して 100 年後の年最大日降水量を算出すると、北海道、東北で倍率が高くなる傾向となる可能性がある。

2) 洪水の増大

国土交通省河川局 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にあり方についての答申（社会資本整備審議会河川分科会、2008）では、以下の分析を行っている（環境省地球温暖化影響・適応研究委員会報告書、2008）。

100 年後の降雨量の変化が、河川において想定される洪水の大きさに対して、どのような影響を及ぼすかについて検討した。具体的には、全国の一級河川のう

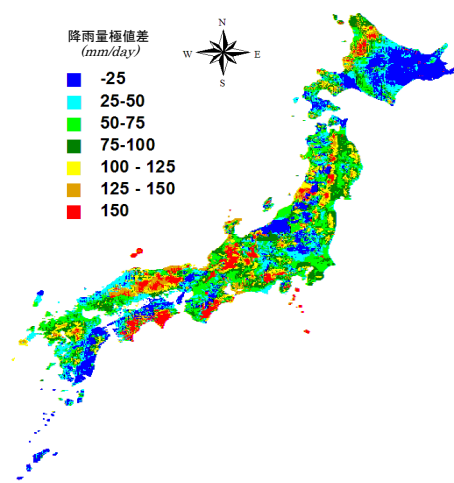


図 3.2.1 30 年に 1 回の豪雨と 50 年に 1 回の豪雨の日降雨量の差(mm/日)

（環境省地球環境研究総合推進費戦略的研究開発プロジェクト S-4, 2008）

ち、各地域から 1 河川ずつ選び、100 年後の降水量の変化率に相当する倍率（1.1 倍、1.2 倍、1.3 倍、1.5 倍）を計画降雨量に乘じて、100 年後および現在の計画の治水安全度（降雨量の年超過確率）と基本高水のピーク流量の変化を試算した。原計画の計画降雨量を上記の倍率で引き伸ばし、年超過確率を求めた。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ・現計画の治水安全度を 100 年後においても確保するとすれば、非常に大きな治水安全度に相当し、これまでの考え方にに基づく治水対策のみでは対応することは極めて困難である。

- ・100 年後の基本高水のピーク流量を試算した結果、計画降雨量の倍率が高くなるほど基本高水のピーク流量の倍率はそれ以上の倍率で大きくなる傾向が見られた。このことから、降水量の変化が大きくなればなるほど、より大規模な治水対策が必要となり、対応はより一層困難となる。

- ・100 年後の現計画の治水安全度は、1/200 の場合 1/90-1/145、1/150 の場合 1/22-1/100、1/100 の場合 1/25-1/90 と大きく低下する可能性がある。浸水、氾濫の危険度が増大する可能性がある。

(2) 土砂災害

環境省 地球環境研究総合推進費戦略的研究開発プロジェクト S-4(2008)によれば、温暖化によって、豪雨による斜面崩壊による土石流の発生、河道への土砂堆積、ダム貯水池への堆砂が加速し土砂災害が増加する可能性があると分析している（社会資本整備審議会河川分科会、2008）。以下は引用である。

温暖化による土砂生産への影響を評価するために、斜面災害リスクを用いて土砂生産分布を算定した。ダム湖の堆砂量とダム

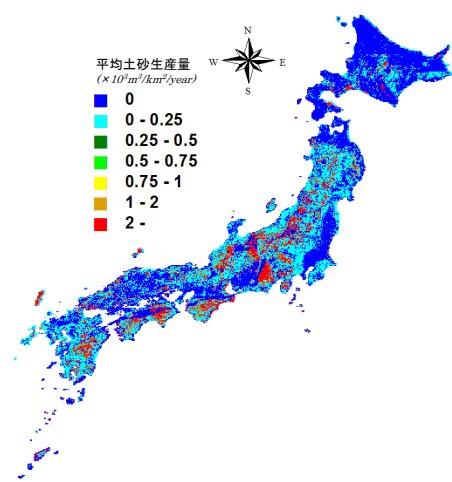


図 3.2.2 斜面災害に伴う土砂生産分布図
(環境省地球環境研究総合推進費戦略的研究開発プロジェクト S-4, 2008)

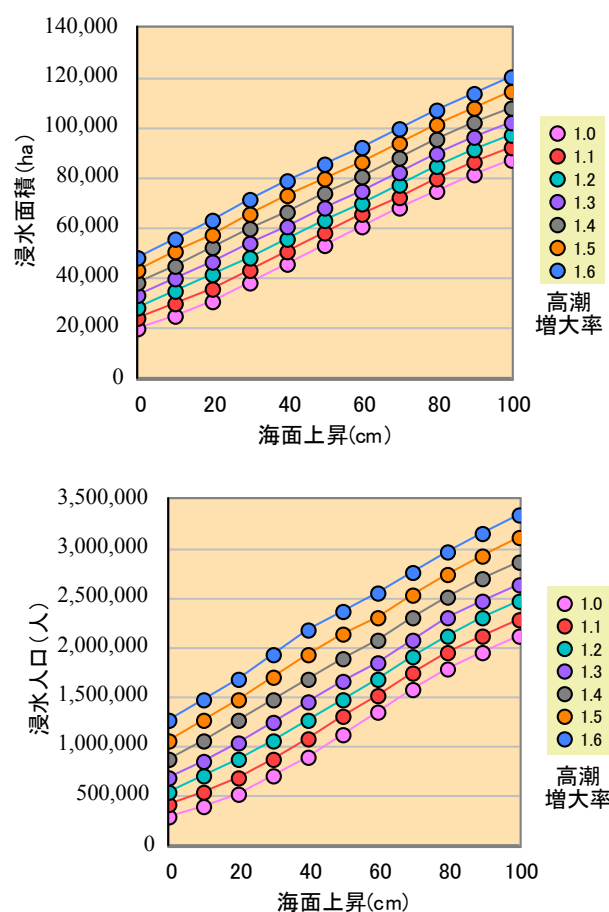


図 3.2.3 高潮で浸水する面積・人口の海面上昇と高潮増大による変化
(環境省 地球環境研究総合推進費 戦略的研究開発プロジェクト S-4, 2008)

湖流域の斜面災害リスクの関係を求めた。その結果、堆砂量はリスクに対して指数関数的に増加する。これは、豪雨量の増加の割合に対して、堆砂量は加速度的に増加することを意味している。この関係を用いて、斜面災害リスク分布図を土砂生産量分布に変換したものが図 3.2.2 である。関東から九州へ、西南日本を縦断する大断層である中央構造線に沿って大きな土砂生産量の地域が広がる。もともと土砂生産の多い地域はより大きな土砂生産量になる。特に北アルプスから南アルプスにかけては、土砂生産の増加が危惧される。また、山岳地の土砂生産はダム湖の堆砂を促す。この影響により、洪水調整能力を減少させるだけでなく、栄養塩の流出に伴う水質悪化も加速させることが推測される。

これらの対策として、砂防事業やプレダム（ダム湖流入河口付近に築く堆積用ダム）のようなハードによる堆砂対策や堆砂を取り除く浚渫や排砂操作が考えられる。サンドバイパス（堆砂を下流へ移動させること）や排砂操作は、河床や海岸線の安定に重要であるが、下流への影響が大きいため、慎重に計画する必要がある。

(3) 高 潮

日本では、海に面する市町村に人口の 46%、工業出荷額の 47%、商業販売額の 77%が集中し、沿岸域は社会・経済活動にとって重要な地域になっている。温暖化が進行した場合、海水の膨張や陸上雪氷の融解等で海面が上昇し、海水温の上昇等により日本に來襲する台風が大型化すると考えられている。そうした変化が進めば、沿岸域では高潮による浸水の危険度が高まることになる。

環境省 地球環境研究総合推進費 戦略的研究開発プロジェクト S-4(2008)では、温暖化による高潮危険度を評価するため、高潮による浸水が生じる地域の面積とそこに居住する人口を予測している。

高潮浸水の危険度の予測は、地表面の高低と防護施設の情報を持つデータ空間をコンピュータ上に構築し、その海側境界に海面上昇と高潮の増大を想定した海面変動を与え、それに対応する海水の流入と陸域での湛水を計算することによって行なっている。計算の対象地域は、人口や資産の集積が大きく、低地が大きく広がる三大湾（東京湾、伊勢湾、大阪湾）の奥部と台風の来襲頻度が高い西日本（中国地方、四国地方、九州地方）である。海面上昇は 0cm から 100cm まで、高潮偏差は 2000 年頃の高潮偏差を基準にして 1 倍から 1.6 倍までを計算している。

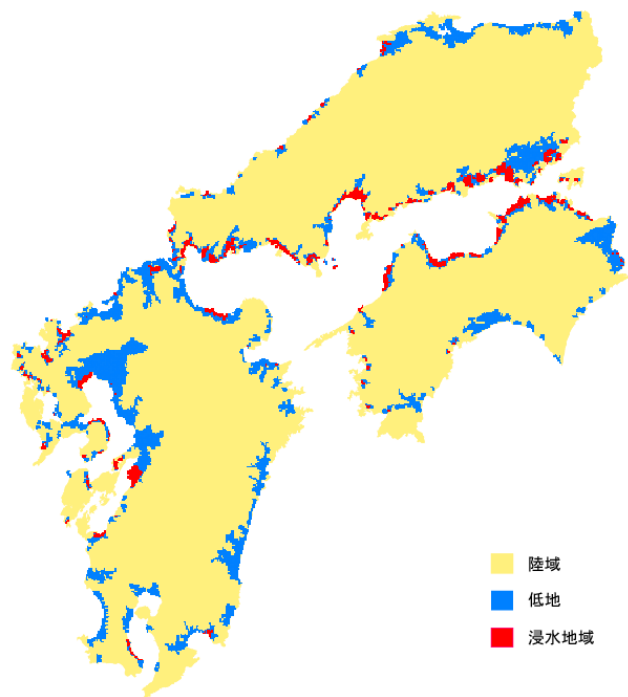


図 3.2.3 2100 年の西日本の高潮浸水
(環境省地球環境研究総合推進費戦略的研究開発プロジェクト S-4, 2008)

計算結果によれば、高潮による浸水面積と浸水人口は、全体として直線的に増加する。そのため、高潮に対する対策はある水準までは様子を見、その水準に近づいたときに対策を講じるのではなく、状況に合わせて適切な対策を連続的にとっていくことが重要だとしている。

また、同プロジェクトでは、気候シナリオ MIROC をもとにした 2100 年気候時における高潮に脆弱な地域の平面分布を提示している。

それらによれば、西日本では、温暖化が進行した場合に高潮浸水の危険が認められる地域は、瀬戸内沿岸、有明海沿岸、八代海沿岸、北西九州に多い。高潮浸水に脆弱な場所の特徴は、閉鎖性海域や入り江に多く分布していることである。そうした場所は、古くに開発されたため護岸や堤防等の防護水準が低かったり、港湾や漁港として海陸を往来するため防護水準が低かったりすることが特徴である。

東京湾、伊勢湾、大阪湾は奥部にはゼロメートル地帯を含む大きな低地が広がっている。そこは、大都市圏の市街地や臨海工業地帯が広がり、浸水を受けると大きな被害が発生する。それら地域の中で高潮に脆弱だと考えられる場所は、東京南部沿岸、名古屋港内、大阪中南部沿岸で、比較的古くに開発された埋立地とその周辺である場合が多い。

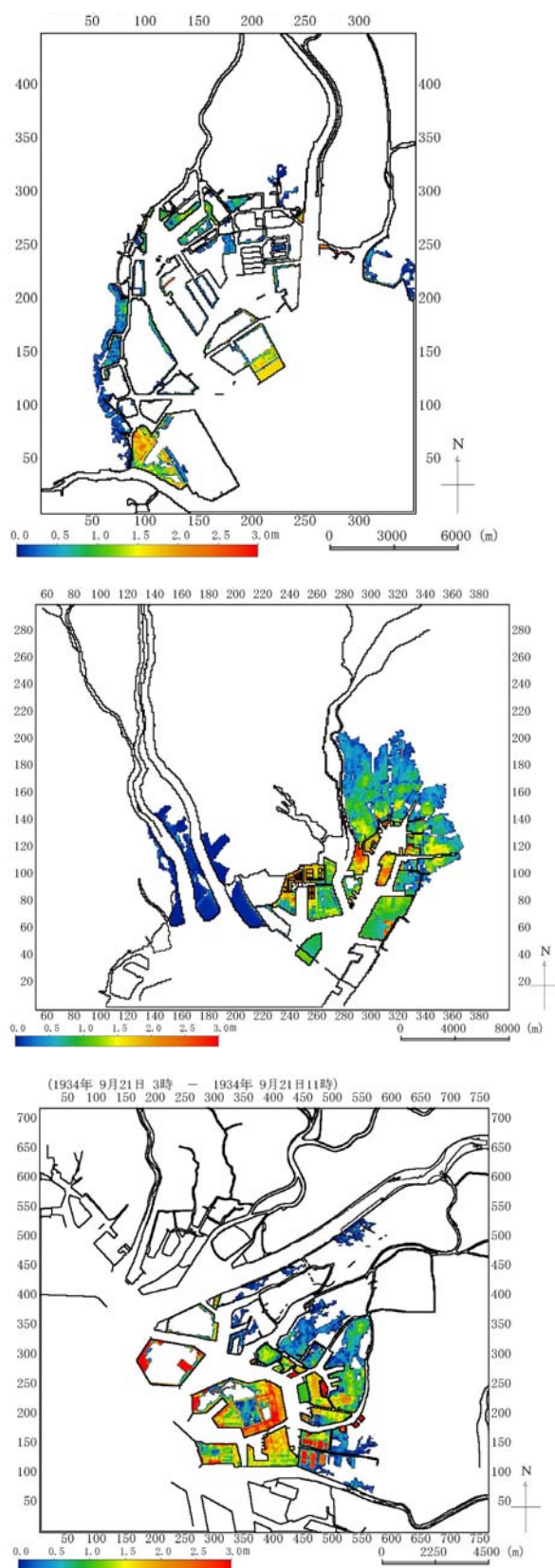


図 3.2.4 2100 年の三大湾奥部の高潮浸水深
(上段：東京湾，中段：伊勢湾，下段：大阪湾)
(環境省地球環境研究総合推進費戦略的研究開発プロジェクト S-4, 2008)

参考文献

温暖化影響総合予測プロジェクトチーム，2008：地球温暖化「日本への影響」－最新の科学的知見－，環境省地球環境研究総合推進費戦略的研究開発プロジェクト S-4「温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究」，

<http://www.env.go.jp/earth/suishinhi/>， 95p.

環境省，2008：気候変動への賢い適応，地球温暖化影響・適応研究委員会報告書，

http://www.env.go.jp/earth/ondanka/rc_eff-adp/index.html， 400p.

国土交通省河川局，2008：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にあり方について（答申），社会資本整備審議会河川分科会，<http://www.mlit.go.jp/common/000017547.pdf>， 15p.

3-3 自然生態系

(1) 顕在化している影響

温暖化の進行に伴い、日本の生態系にも様々な影響が現れていると報告されている（地球温暖化影響・適応研究委員会，2008）。自然生態系は、気温や二酸化炭素濃度の上昇、および、降水量・積雪変化などの気候変化、気候変化に伴う自然変化（河川流量、水温・水質変化、土壌変化）によって多大な影響を受ける。また、人間活動によっても大きな影響を受け、それぞれが複合的に影響しあっていることに注意しなくてはならない。

1) 陸上生態系

- ・ 大気の乾燥化による水ストレス増大により平坦地での過ぎの衰退減少
- ・ 冬の平均気温上昇と積雪期間短縮によってニホンジカの越冬地が拡大し、ニホンジカの被食による木本の衰え
- ・ 気温上昇に伴い病原マツノザイセンチュウの媒介者マツノマダラカミキリが高緯度・高標高へ拡大し、マツ枯れ被害が拡大
- ・ 温暖化による富士山永久凍土の下限の上昇
- ・ 湿原面積の縮小（群馬県と新潟県の境にある平ヶ岳頂上部湿原の面積が、1971～2004年までの33年間で約10%縮小）
- ・ 植物季節変化（開芽の早まりと落葉の遅れ）

2) 海洋生態系

- ・ 過去50年のデータ分析によると、オホーツク海を含む北太平洋の中層水の水温が上昇し、溶解酸素濃度が減少傾向
- ・ 気象庁の沿岸海氷観測によると毎年の流氷期間が減少
- ・ 海水温上昇に伴う海洋生物の分布や量的変動（日本周辺で、アオウミガメ、アカウミガメ、ミズクラゲ、カブトクラゲ、ヒョウモンダコ、ミドリイガイ、有毒渦べん毛藻類、カニ類など）
- ・ 干潟・藻場に生息する個体群分布の北上
- ・ 種間相互作用の変化を通じた生態系変化（例えば、南方系の魚類であるナルトビエイの増加により、サリやカキが大量に摂食されたり、草食性の魚類であるアイゴが温帯域のアマモ場で増加することで、アマモを過剰摂食することにより藻場を衰退させる）

(2) 予測される将来影響

1) 陸域生態系（地球温暖化影響・適応研究委員会，2008；温暖化影響総合予測プロジェクトチーム，2008）

ブナ林分布適域は、全国では、現在比で 65～44%（2031-2050 年）、31～7%（2081-2100 年）に減少し、西日本や本州太平洋側ではほとんど消滅すると予測されている。白神山地（世界遺産地域）の 77%を占めるブナ林の分布適域も、2031-2050 年には 44.3～2.9%、2081-2100 年には 3.4～0.0%に減少すると予測されている。さらに、北海道における温暖化の北上速度は 10～50km/100 年であるが、ブナの移動速度は 1～2km/100 年（本州の過去最大値は 23.3km/100 年）であるため、ブナの移動が気温上昇に追いつけない可能性が懸念されている。

マツ枯れ危険域は、1～2℃の気温上昇により、現在被害のない青森県平野部にまで危険域が拡大する。さらに気温上昇が 2℃を超えると、岩手県内陸部のアカマツ林業地帯やマツタケ生産地に壊滅的な被害が及ぶ可能性がある。

チシマザサ（ネマガリダケ）の分布適域は、現在比 54～45%（2031-2050 年）に減少し、佐渡島ではほぼ消滅すると予測されている。

ハイマツの分布適域は、全国では、現在比で 49～56%（2031-2050 年）、31～14%（2081-2100 年）に減少し、東北地方では、現在比で 14～6%（2031-2050 年）、9～0%（2081-2100 年）とほぼ消滅すると予測されている。

シラベ（シラビソ）の分布適域は、全国では、現在比で 48～26%（2031-2050 年）、23～13%（2081-2100 年）に減少し、四国では適域が消滅すると予測されている。

高山生態系は、分布可能域の下限上昇に伴い「追い落とし現象」やニホンジカによる食圧・跡圧によって消失する可能性が懸念されている。

2) 海洋生態系⁴⁾

海水温上昇を、短期（30 年後）では 1.0℃、中期（50 年後）では 1.5℃、長期（100 年）では 3.0℃と設定した場合、温帯性と亜熱帯性の海洋生物の分布境界となる年間最高水温 29℃が、現在の九州南方から、50 年後には中国・四国沿岸域に、100 年後には完投や北陸沿岸に達することが予測されている。このとき、浮魚類は遊泳力が強いので、分布域が変化するものの影響が軽微であり、底魚類は、水深 100m 以深の水温上昇がわずかであるため、影響が現れない。一方、沿岸に生息・養殖する種や海藻は短期から影響が出ることが懸念されている。

サンゴ礁やマングローブ生態系は、温暖化に伴う海面上昇、大型台風の頻発、高水温によって、様々な被害を受けると予測されている。

(3) 土木施設への影響と対策

温暖化による自然生態系への影響と関連した土木施設への影響は、現状ではあまり無いと考えられる。しかしながら、自然生態系への影響を軽減するために、1) 温暖化によって生態系の分布が変化する場合、できるだけ自然でスムーズな移動を可能にするような生態学的回廊の設置（例えば、森林生態系機能をバランスよく発揮させる森林の配置や、効果的な魚道など付帯設備の設置）、2) 生態系保全を考慮した土木施設の設置、3) 人間活動による生態系への影響を軽減するような土木施設の敷設（例えば、淡水生態系への影響を軽減するための、湖水保全のための、面源からの排水を効果的に集めて処理するためのインフラ整備）、などの観点から、土木技術を活か

すことができると考えられる。

参考文献

地球温暖化影響・適応研究委員会，2008：気候変動への賢い適応，

http://www.env.go.jp/earth/ondanka/rc_eff-adp/index.html.

温暖化影響総合予測プロジェクトチーム，2008：地球温暖化「日本への影響」－最新の科学的知見－，環境省地球環境研究総合推進費戦略的研究開発プロジェクト S-4「温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究」，

<http://www.env.go.jp/earth/suishinhi/>，95p.

桑原久実・明田定満・小林聡・竹下彰・山下洋・城戸勝利，2006：温暖化による我が国水産生物の分布域の変化予測、地球環境 Vol.11、N0.1、49-57

3-4 食料生産

(1) 概要

世界の主要穀物の生産は、品種改良、栽培技術などの進歩により過去においては人口の伸びよりも大きい生産量の増加率を示してきた。しかし、1980年代からその伸びが鈍る傾向が見え始めるとともに変動も増大する傾向が現れてきた。そして今後、食料供給をさらに不安定化させる要因として次のことが懸念されている。

- ・ 気候変化とそれに伴って頻発すると予測されている干ばつ、大雨、高温などの異常気象
- ・ 途上国の経済発展、人口増加による食料要求量の増大と自給率の低下
- ・ 貿易依存、国際分業化による世界の穀物の主要輸出国の北米、南米ならびにオーストラリア大陸への極端な偏在化
- ・ バイオマス燃料との競合

ここでは、気候変化がわが国の食料供給に引き起こす影響について、国内生産への直接影響と世界の食料需給関係の変化を介した間接影響とに分けて推計を行った結果を報告する。ただし前者については、わが国の主食であるコメ生産に対する影響を対象とする。

(2) 国内生産（コメ生産）への直接影響

1) 影響評価の方法

気候変動に伴うわが国のコメ収量（単位面積あたりの収穫量）の変動リスクを評価するために、温度、日射、および大気中の二酸化炭素濃度といった気象環境とイネの生育、コメ収量との関係について、日本全国を県単位で記述する機構的モデルを構築した（図 3.4.1）。このモデルは過去の気象環境の状況から県別平均出穂日^{しゅつすいび}ならびに平均コメ収量の年変動を定量的に再現するとともに、それに気候シナリオを入力することにより、将来の気候変化がイネの生育、コメの収量に及ぼす

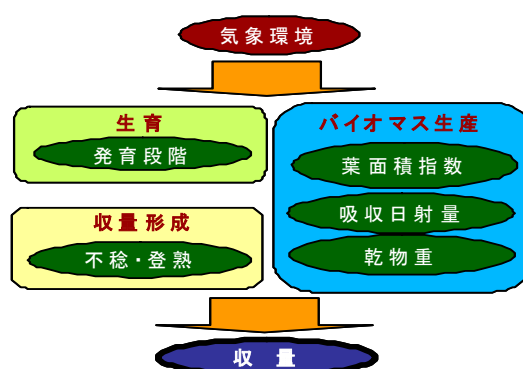


図 3.4.1 県別コメ収量推定モデルの構造

影響を推定するものである。気候シナリオとしては MIROC、 A1B を入力した。

2) 県別コメ収量推定モデルによる気候変化の影響予測

■コメ収量は、北日本では増収、西日本では現在とほぼ同じかやや減少する傾向が見られる

コメ収量は、移植（田植え）から出穂までの栄養生長過程と出穂から収穫までの^{ねんじつ}稔実・^{とうじゅく}登熟過程における気温と日射量によって決まる。気温上昇は生育を速めてバイオマス蓄積、出穂後は子実^{しじつ}形成に影響を与える。

県別コメ収量推定モデルでは移植日を現在のままと仮定すると、2046～2065 年の平均収量は、現在（1979～2003 年平均）に比べて、北海道および東北においてそれぞれ 26%、13%増収すると推計された（図 3.4.2a）。一方、近畿、四国では、両地域とも現在に比べて 5%減収すると推定された。この傾向は 2081～2100 年ではより強く現れ、減収地域は中国、九州へ広がると推定された（図 3.4.2b）。

■平均収量が減少する地域と同じ西日本を中心とする地域では、収量の年々変動も大きくなる傾向が見られる。

図 3.4.2c および d は、それぞれ 2046～2065 年および 2081～2100 年の期間における収量の変動係数（その期間の値の標準偏差を平均値で除したもの）の変化を示している。平均収量が減少する地域とほぼ同じ地域（近畿、四国、中国、九州）で、変動係数が大きくなると推計され、収量の年々変動、とりわけ不作年が頻発することを示唆する。これは食料供給の不安定化をもたらす、平均的变化よりも深刻な問題を引き起こすと考えられる。

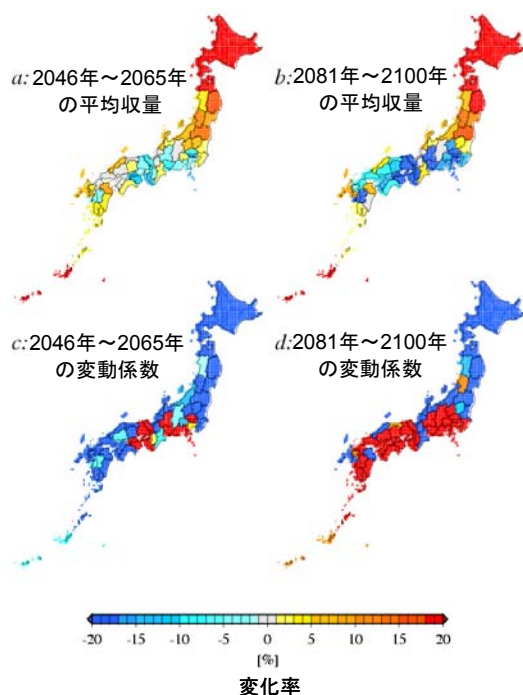


図 3.4.2

気候シナリオ（MIROC、A1B）によるコメ収量の変化推計結果. a, b : 平均収量、c, d : 20 年間の収量の変動係数

（環境省地球環境研究総合推進費戦略的研究開発プロジェクト S-4，2008）

■全国平均収量は 2060 年頃までは増加するが、その後減少すると推計される

図 3.4.3 は全国平均収量について、年々変動を表す時系列を示したものである。2040～2060 年にかけて収量の増加トレンドが見えるが、その後、平均収量は減少するとともに年々変動が大きくなると推計された。温暖化により北日本を中心として平均的には増収の可能性はあるが、年々変動の増大は、平均気温が高い環境下においても冷害が発生する危険性もあることを意味する。

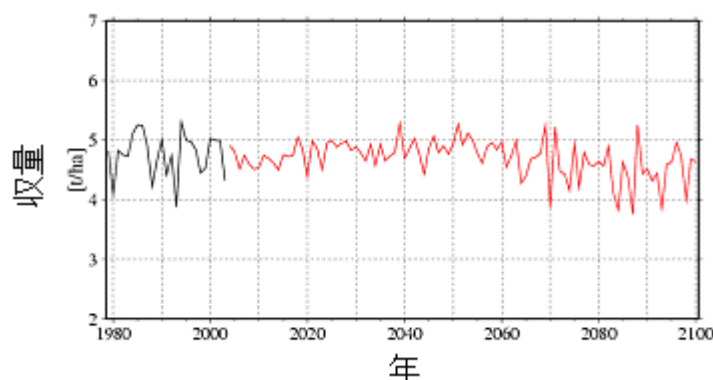


図 3.4.3

気候シナリオ (MIROC、A1B) による全国平均収量の時系列推定値
(環境省地球環境研究総合推進費
戦略的研究開発プロジェクト S-4, 2008)

(3) 世界の食料需給関係の変化を介した間接影響

1) 影響評価の方法

気候変化が及ぼす食料需給への影響を考えるには、作物収量の変化だけでなく作付面積への影響を考慮に入れ、生産量(=収量×面積)として評価する必要がある。生産者は市場の価格変化に応じて作付面積を変え、農家は生産している農産物の来年の価格が上昇すると期待すれば作付面積を増やす。市場価格は穀作物の在庫量変化や国際貿易などによって決定される。ここでは、気候変化とともに、そのような経済活動の変化に伴う国別の食料需給関係への影響を評価するために、これまで開発してきた世界食料モデルを用いた解析を行った。気候変化による影響のみを見るために、社会経済シナリオは固定して、気候変化が起きずに平年の気象状態で推移する場合(ベースライン)とシナリオに沿って気候変化する場合との算定結果を比較した。この際、シミュレーションの基準年は 1998 年であり、2030 年までを予測期間とした。

気候変化シナリオは、IPCC の温室効果ガス排出シナリオ (SRES) A2 に沿って、英国ハドレー気象研究所の GCM、HadCM3 で推計された結果を国別に集計したデータ(気温と降水量)を利用した。

2) 世界食料モデルによる気候変化の影響予測

■期間内(2030 年代まで)のアメリカの主要穀物生産量の増加率は気候変化により減少する。期間内の日本への食料供給に対する影響は少ないが、トウモロコシの供給量増加率は減少する。期間内の世界全体の穀物生産量に関しては大きな影響はない。

はじめに、主要穀物の世界市場の価格リーダー国であるアメリカの生産量の動向を見る。図 3.4.4 は、2005 年から 2030 年までの各穀作物の年間平均生産量増加率を示している。ベースラインでは、トウモロコシと大豆の生産量の年間増加率はそれぞれ 0.67%、1.97%であるが、気候変化が起きた場合では、それぞれ 0.55%、1.81%に低下する。小麦生産は、カナダやオーストラリアなど他国の生産量が増加するため、ベースラインの場合、年間 0.21%の減少となるが、気候変

化した場合には、年間減少率が 0.27%へとさらに低下すると推計された。

わが国への食料供給量の年間増加率を図 3.4.5 に示す。ベースラインでは、トウモロコシ、他粗粒穀物、大豆の供給量は、それぞれ年間 0.78%、1.50%、0.48%増加するが、小麦とコメの供給量は、それぞれ年間 0.16%、0.71%減少する。気候変化した場合には、トウモロコシの供給量は、パーセンテージが 0.048 だけ減少するが、その他の穀作物の供給量に変化は見られないと推定された。

世界全体での気候変化の影響について、図 3-5-6 に各穀作物の年間生産量増加率を示した。ベースラインでは、年間の生産量増加率は、小麦は 1.56%、トウモロコシは 1.67%、他粗粒穀物は 1.91%、コメは 1.72%、大豆は 1.85%、それぞれ増加するが、気候変化した場合では、パーセンテージの値が、それぞれ 0.021、0.010、0.012、0.032、0.025 だけ減少する。とりわけコメは相対的に温暖化の影響を受けやすく、増加率の減少が大きいと推計された。

以上をまとめると、温暖化の影響を大きく受ける地域はあるが、世界合計で見るとそれほど影響は大きくないと言える。それは、単純な合計による正負の影響の相殺のほかに、貿易によって地域間で農産物が移動し、世界全体への影響が緩和されるからである。

ただし、この結果は 2030 年代頃までの推計であり、使用した気候変化シナリオでは、全球平均気温の上昇幅は高々 1℃程度である。したがって、とりわけ主要生産地域が分布する中緯度地域では、温暖化の影響は顕著に表れない。IPCC の第 4 次評価報告書によれば、全球平均気温が現在より 3～4℃以上上昇すると中緯度から高緯度にかけての農業地帯での生産性が低下すると報告されている。

参考文献

本報告は、環境省地球環境研究総合推進費戦略的研究開発プロジェクト S-4，2008：温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究，3. 農業への影響 の抜粋によっている。

横沢正幸、飯泉仁之直、小寺昭彦、坂本利弘：県平均水稻収量の推定モデル、P1473、農業環境

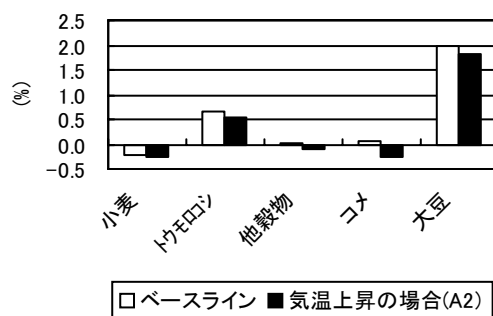


図 3.4.4 アメリカの穀作物の年間生産量増加率

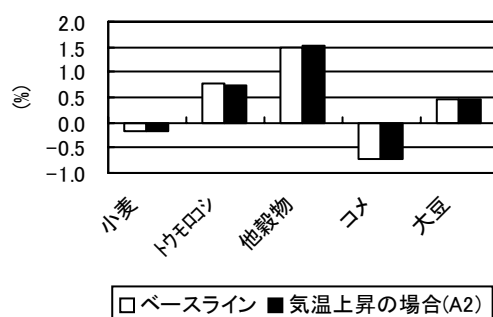


図 3.4.5 日本の穀作物の年間供給量増加率

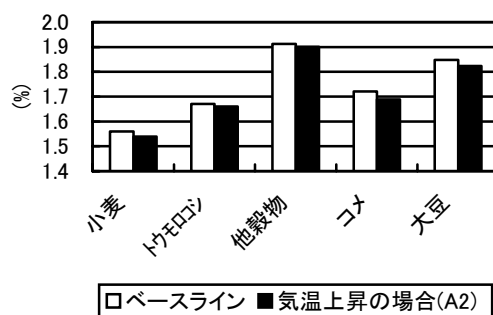


図 3.4.6 世界の穀作物の年間供給量増加率
(環境省地球環境研究総合推進費戦略的研究開発プロジェクト S-4，2008)

工学関連学会 2006 年合同大会、2006.

Furuya J, Koyama O : Impacts of climate change on world agricultural product markets: estimation of macro yield functions. *Japan Agricultural Research Quarterly (JARQ)* 39(2), pp.121-134、 2005.

3-5 われわれの生活と健康に関する影響

(1) 地球温暖化とわれわれの生活

地球温暖化は自然環境や社会環境にさまざまな影響を与え、最終的に我々の生活にさまざまな影響を及ぼす。環境省（2008a）は国民の立場にたって、図 3.5.1 に示すような①安全な暮らし、②健康な暮らし、③経済的に豊かな暮らし、④快適な暮らし、⑤文化や歴史を感じられる暮らし、の 5 分類に基づいて温暖化影響を整理している。

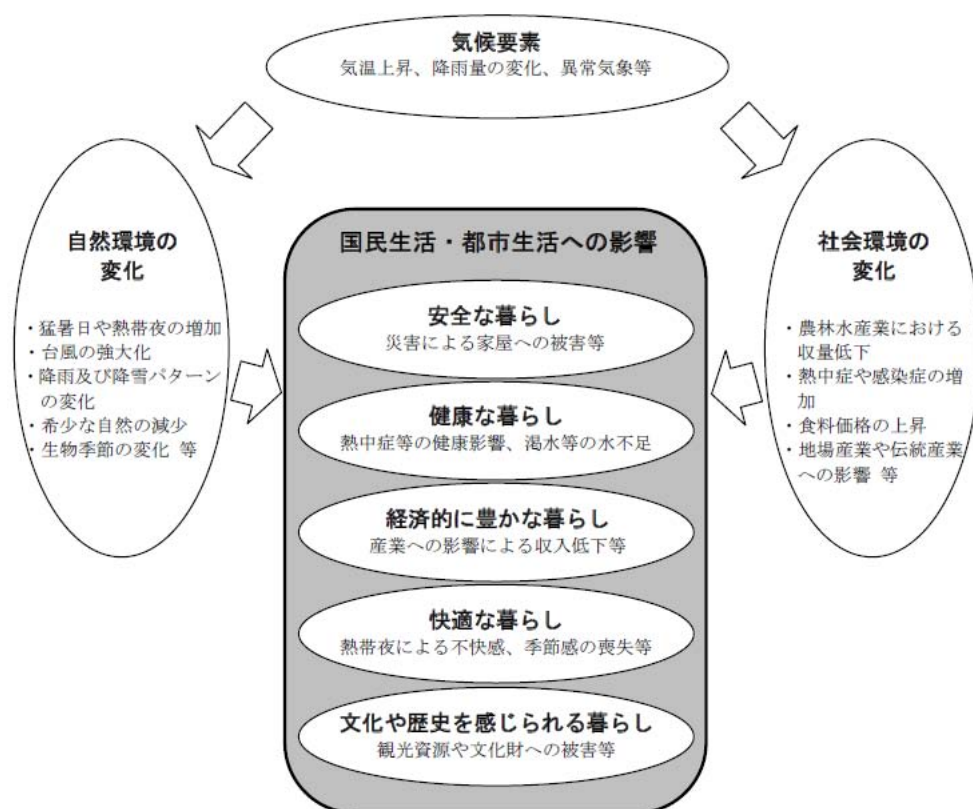


図 3.5.1 地球温暖化の要因及び国民生活・都市生活分野への影響に関するフロー
（環境省、2008a）

ここでは、この 5 分類に基づいて、現在把握されている影響および将来予想される影響の事例を紹介する。温暖化による影響であるかどうか現時点では明確には判断し難いが、その可能性が高いと考えられる現象や温暖化が進行すればさらに増加すると考えられる現象を対象としている。

(2) 安全な暮らしに関する影響

安全な暮らしに関する影響としては、異常気象（台風の強大化、豪雨、渇水等）に伴う家屋への浸水や土砂崩れ、都市施設への被害など、国民の生命や個人資産へ直接影響を与える家屋への

被害、人間生活の場（都市／山地）への影響が考えられる。現在把握されている影響や将来予想される影響の事例は、3.(1)や3.(2)に記載されている。

(3) 健康な暮らしに関する影響

健康な暮らしに関する影響としては、暑熱の影響、感染症への影響およびその他の影響（大気汚染、自然災害、衛生害虫）に分けられる。それぞれにおける温暖化影響のメカニズムを構成する要素を表3.5.1に示す。ここで挙げられた影響のうち自然災害については3.(1)や3.(2)に記載されている。

暑熱の影響としては、猛暑となった2007年には熊谷市と多治見市で日本最高気温（40.9度）を更新するとともに、多くの都市で過去最高の熱中症患者数を記録した。温暖化の進展とともに、熱波による死亡や熱中症のさらなる増加、あるいは熱帯夜の増加による睡眠障害などが懸念されている。気温上昇に伴い熱ストレスによる死亡確率については、2100年までに変化の小さい県でも約2倍、大きな県では5倍以上にもなると予測される（環境省、2008b）。死亡率が最低になる日最高気温は寒冷的な地域で低く温暖な地域で高いことも示されており（環境省、2008b）、北日本など暑さになれない地域で影響が大きくなることが予想される。また、高齢者が特に暑熱への影響を受けやすいことに注意が必要とされている（環境省、2008a）。

感染症への影響としては、デング熱、チクングニヤ熱などの媒介蚊であるヒトスジシマカの生息域（環境省、2008b）や水系感染症を引き起こすビブリオ・バルニフィカスの発生地域（古城、1999）の北上が報告されている。また、東南アジアからの日本脳炎媒介蚊の沖縄地方への侵入が確認されている（環境省、2008a）。これらの現象は直接該当する疾病の増加に結びついてはいないが、これらの疾病が発生しうる素地を有する地域が拡大していると言える。将来においては、温暖化に伴い水系感染症（コレラ、腸炎ビブリオ）や蚊媒介性感染症（デング熱、リフトバレー熱、チクングニヤ熱）などについて、これらが発生しうる地域が拡大するとともに、発生そのものの増加が懸念されている。一方で、温暖化影響としてよく指摘されるマラリアの影響については、我が国における流行の可能性が低いという報告がある（環境省、2008b）。

また、気温上昇による光化学オキシダント濃度上昇に伴う健康への悪影響の可能性も指摘されている（環境省、2008a）。

表 3.5.1 健康分野における温暖化影響のメカニズムの構成要素（環境省、2008a）

カテゴリー		気候要素	自然的要素	社会的要素	影響
暑熱の影響		● 夏季の最高気温 ● 湿度 ● 日射	● 地形	● ヒートアイランドの原因となる都市構造・排熱	● 熱中症 ● 死亡リスクの増加 ● 睡眠障害
感染症への影響		● 夏季や冬季の気温、年平均気温 ● 雨量 ● 湿度	● 媒介動物の分布拡大、数の増加 ● 海水温の上昇による海水中の細菌数増加	● 上下水道の整備 ● 雨水マス等排水路の整備 ● 農業（稲作等）や畜産業の構造変化 ● ワクチン接種状況 ● 啓発活動 ● 高齢化・免疫不全者の増加 ● 海外との人の移動、物流の増加 ● 食習慣（魚介類の生食等）	● 水系感染症の増加 ● 蚊媒介感染症の増加
その他	大気汚染への影響	● 高濃度の光化学オキシダントが発生する気象条件の増加（高温、日射）	● 地形	● 光化学オキシダントの大陸からの移流	● 局地的な高濃度発生による直接的な健康影響 ● 死亡リスクの増加
	自然災害による影響	● 大雨 ● 大型台風 ● 干ばつ		● 上下水道の整備	● 蚊媒介感染症の増加 ● 水系感染症の増加
	衛生害虫による影響	● 年平均気温 ● 冬季平均気温	● 衛生害虫の分布、数	● 海外旅行の増加 ● 貿易の増加	● 衛生害虫による咬症・刺咬等患者数の増加

(4) 経済的に豊かな暮らし

経済的に豊かな暮らしに関する影響としては、温暖化の影響を受ける農林水産業や観光産業の収入低下、食料価格の上昇、地場産業・伝統産業、製造業、レジャー産業への影響等がある。これらのうち農林水産業や食料に関する影響については、3.(4)に記載されている。

製造業やレジャー産業の影響として、家電製品、衣料品、食料飲料製品等の売上げの変化（暖房器具、冬物衣料等の売上げの減少、エアコンや清涼飲料等の売上げの伸びなど）や、暖冬によるスキー場及び観光産業への影響が報告されている（気象庁、2007）。スキー場への影響については、温暖化の進展による降雪の減少や時期の遅れ及び短縮等による影響が懸念されており、気温が 3℃上昇すると、北海道と標高の高い中部地方以外では、ほとんどのスキー場で利用客が 30%以上減少すると予測されている（IPCC、2007）。なお、これらの影響の中で農林水産業や観光産業への影響は農村域において影響が大きい。

家計への影響として、温暖化による食料生産高の減少が物価上昇を招くとともに、気温上昇による影響を軽減したりするための出費が増えることが考えられる。具体的には、気温上昇に伴う

エアコン使用時間の増加による電気料金支払いの上昇などである（環境省、2008a）。

(5) 快適な暮らし

快適な暮らしに関する影響としては、夏の暑さの激化や衛生害虫の発生による不快感の増加、水道水質の悪化、季節感の喪失が挙げられる。これらのうち、水道水質の悪化については 3.(1)に、季節感の喪失については 3.(3)に詳しく記載されている。

夏の暑さの激化については、2004 年度までの観測値を基に 100 年あたりの気温上昇量を調査すると、日本の中小都市で平均 1.1 度上昇しており、さらに主要な大都市ではこれにヒートアイランド現象の影響が加わり、2.2～3.0 度上昇していることが報告されている。また、熱帯夜の年間日数も増加傾向を示しており、4 都市（東京、名古屋、京都、福岡）の 1970 年代の平均年間日数が 6.3～21.3 日であるのに対し、1994～2003 年の平均年間日数は 21.6～37.2 日に増加していることが報告されている（気象庁、2005）。温暖化が進展すると、猛暑日や熱帯夜がさらに増加し、日常生活の不快感やストレスが増加していくことが考えられる。これらは都市部で影響が顕著であり、高齢者が特に影響を受けやすいと考えられる（環境省、2008a）。

(6) 文化や歴史を感じられる暮らし

文化や歴史を感じられる暮らしに関する影響としては、脆弱な自然環境や自然遺産等への影響、砂浜の消失による海水浴や潮干狩り等への影響、文化財や伝統行事への影響、ウィンタースポーツへの影響等が挙げられる。

文化財や伝統行事への影響では、厳島神社回廊の冠水回数の増加（3.(2)を参照）や諏訪湖の「お神渡し」（3.(1)を参照）などが報告されている。また、桜開花時期の変化による伝統行事への影響なども懸念されている（環境省、2008a）。

また、高山植物の減少や湿原の縮小など、脆弱な自然環境・生態系が温暖化によって失われることによる自然景観やレクリエーション空間の喪失、四季の季節感の喪失、砂浜の消失による観光やスポーツ、レクリエーションの機会の減少なども懸念されている（環境省、2008a）。

(7) 国民生活や健康への影響予測の課題

地球温暖化のわれわれの生活への影響の把握については、幅が広い分野における事例や知見の集積と、波及的な影響も含めた総合的な影響の評価が求められている。また、これらの影響は平均的な気候変化に伴う影響ばかりでなく、異常気象などの突発的・特異的な影響がわれわれの生活に重大な影響を及ぼす可能性が大きくなっており、そのような事象に注目して影響予測の精度を向上していくことが求められている。また、これらの影響の出方や影響に対する脆弱性は地域や人ごとに異なるため、温暖化影響を実際の地域で検討していくうえでは地域性や脆弱性への配慮が必要である。

また、土木・建設業における対応という視点からは、異常気象などによる自然災害への影響、水資源とその利用への影響、暑熱に関する影響などが注目すべき影響と考えられる。

参考文献

IPCC , 2007 : IPCC 第 4 次評価報告書第 2 作業部会報告書, 938p.

環境省, 2008a : 地球温暖化影響・適応研究委員会, 気候変動への賢い適応,

http://www.env.go.jp/earth/ondanka/rc_eff-adp/index.html.

環境省, 2008b : 地球環境研究総合推進費温暖化影響総合予測プロジェクト, 地球温暖化「日本への影響」－最新の科学的知見－, 戦略的研究開発プロジェクト S-4「温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究」報告書,

<http://www.cger.nies.go.jp/climate/rrpj-impact-s4report/20080529report.pdf>.

気象庁, 2005 : 異常気象レポート 2005,

http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/climate_change/index.html.

気象庁, 2007 : 気象年鑑 2007 年版.

古城八寿子, 1999 : *Vibrio vulnificus* 感染症－診断と治療のフローチャートの試み, 日本皮膚科学会誌, 109, pp.875-884.

3-6 エネルギーと産業他

(1) エネルギー産業への影響

電力中央研究所では、IPCC 第 4 次評価報告書 WG1、WG2 の内容を踏まえて、以下の分析を行っている（坂井ら、2007 ; 2008）。

1) 電力需要への影響

日本の気候を考えた場合、平均的な気温上昇は冬季の暖房エネルギー需要を減少させる一方、夏季の冷房エネルギーを増加させると考えられる。暖房のエネルギー源は石油、石炭、ガス、電力など多様であるのに対し冷房エネルギーのほとんどは電力により賄われていることから、電力需要の増加が予想される。現在すでに冷房使用が通常である地域では平均気温の増加に対応した緩やかな電力需要の増加が想定される。一方、例えば北海道などの冷房使用が一般的でない地域において冷房設置が進む場合、電力需要は不連続に突発的に増加していく可能性がある。また、夏季の異常高温が頻発するような場合、需要のピークが最大供給可能量を上回る事態も想定される。

2) 水力発電への影響

水力発電に影響を及ぼす要因を整理すると、雨の降り方の変化、および積雪融雪時期の変化が挙げられる（西澤ら、2007）。雨の降り方の変化では、短時間降雨強度の増加による、洪水時のダム操作や定常的な流量確保など電源運用面への影響、貯水池への土砂流入量の増加とそれに伴う堆砂対策や浚渫費用の増加、および土砂災害の増加が考えられる。

さらに、季節的に渇水期間が長期化した場合には、基底流量が減少し、緊急放水等の影響で貯水池の利用効率の低下も予想される。積雪融雪時期の変化は、ダム運用計画の見直しにつながる可能性がある。

気温上昇に伴う水温上昇により、生物化学過程の変化による藻類の発生や、栄養塩の現象による水質悪化などから、安全な水を確保するための水処理費用の増加につながる可能性もある。

3) 火力・原子力発電への影響

我国に大規模な火力・原子力発電所も、そのほとんどが沿岸域に建設されており、将来的には温暖化影響による被害リスクが増加することが考えられる。発電所施設に係わる具体的な被害リスクとしては、海面上昇に伴う海岸侵食の進行と地下水位上昇による地盤の脆弱化、高潮被害の増加、熱帯低気圧強度の増加に伴う浸水被害の増加、海水温の上昇による発電効率の低下、ならびに港湾施設機能低下に付随する物流システムへの影響などが想定される。

4) 生物相の変化の影響

陸上および沿岸域の生物相の変化は、電力施設の設計・運用・保守、および環境影響評価手法など、事業計画の策定に影響を及ぼす可能性がある。例えば、水力発電施設においては、貯水池内の水質環境保全対策の見直し、沿岸域の火力・原子力発電所における取水口への付着生物の増加に対する対策強化などが想定され、火災や極端な気象現象など陸域生態を攪乱する現象の頻度や強度の増加は、水源涵養機能を提供する集水域の森林分布にも影響を及ぼし、結果的に流出特性を変化させ、炭素クレジットとしての森林隔離量に対して脅威に成り得る。

5) その他の影響

石油、石炭、ウランなどのエネルギー源を輸入に頼っていることから、輸出国の採掘現場の脆弱性や燃料輸送経路の脆弱性も、電気事業に影響を及ぼす可能性がある。このような温暖化進行に対する脆弱性への適応としては、エネルギー源の分散化や輸入国の分散化の観点が益々重要となる。

(2) 発電方法の高効率化の影響

電力中央研究所では、IPCC 第4次評価報告書 WG3 の内容を踏まえて、以下の分析を行っている（山本ら、2008）。

- ・ 我国は 1973 年と 1978 年の 2 度の石油危機を契機に、脱石油火力を目標として大容量石炭火力、高効率 LNG 複合発電を実用化してきた。その結果、火力発電の平均熱効率は現在世界の最高レベルにある。LNG は高温高効率ガスタービン複合発電が開発・導入されて以来、現在 LNG 生焚き発電との比率が 50% 近くになっている。
- ・ 石炭火力は、石炭中の炭素分が多いため、発熱量当りの CO₂ 発生量が天然ガスの倍近いいため、逆風が吹いているが、我国にとり安価で賦存量の多い石炭資源はエネルギーセキュリティー上重要である。また、中国をはじめ急成長するアジア諸国では石炭を一次エネルギーとして利用しているので、石炭火力の高効率化による CO₂ 排出量の緩和効果は非常に大きい。
- ・ 我国の化石燃料発電技術は環境排出物質のクリーンさを含めて、世界最高レベルの性能を達成している。これら技術を低コスト化、メンテナンス性を改善して、今後、電力需要の急速な伸びが懸念されるアジア諸国に技術移転すれば、その GHG 緩和効果は莫大だと予想される。
- ・ 既存火力のリプレース時期に高効率火力を導入するという火力の高効率化による、2030 年までの電力部門の CO₂ 削減ポテンシャルは、23Mt CO₂/年と予想される。

(3) 運輸部門の動向

電力中央研究所では以下の分析を行っている（山本ら、2008）。

- ・ 運輸部門からの、CO₂排出量は、我国の総排出量の 20%に達している。内燃機関自動車では、走行性能の向上により、低燃費化は進んでいるものの、車両の大型化により総排出量は減っていない。また、ガソリンや軽油など石油燃料に大半が依存し、エネルギーセキュリティ面でも課題となっている。
- ・ 自動車分野では省エネ、脱化石燃料、温暖化排出ガス低減に向けて、駆動系と燃料のハイブリッド化が加速している。駆動系においては内燃機関と電動機とのハイブリッド化が、燃料においてはガソリンや軽油の化石燃料とバイオ燃料（エタノール）や GTL・CTL との混合によるハイブリッド化が進められている。なかでも、化石燃料依存度の少ない電気エネルギーの利用は、エネルギーの多様化と併せて期待が大きく、自動車分野での電気エネルギー利用へのシフトは加速する方向になる。
- ・ 車両の電動化、特に系統からの電力供給も行えるプラグインハイブリッド自動車(PHEV)が注目されている。PHEV は電気自動車の充電距離が短いという欠点をハイブリッド走行により補い、普及の可能性がある。また、利用分野をフリート走行の配達車両や路線バスなどに限定することで、電気自動車の普及もある。排出ゼロでの走行が可能となり、CO₂排出低減が期待できる。ただし、これらの充電にあたっては、電源構成により発電原単位の十分な考慮が必要である。

参考文献

- 坂井伸一・筒井純一・門倉真二・西澤慶一，2007：IPCC 第 4 次評価報告書 WG1 の内容分析 ― 地球温暖化に関する科学的知見―、調査報告 V07402、45p.
- 坂井伸一・立田 穰・本多正樹・石井 孝・松村秀幸・中屋 耕・芳村 毅・横山隆壽，2008：IPCC 第 4 次評価報告書 WG2 の内容分析 ― 気候変化の影響、適応、脆弱性と電気事業への係わり―、調査報告 V07404、44p.
- 西澤慶一・北端秀行・筒井純一・吉田義勝・丸山康樹，2007：大気海洋結合モデルを用いた地域水収支変化のアンサンブル予測、電力中央研究所 研究報告 V07002、22p.
- 山本博巳・佐藤幹夫・森塚秀人・池谷知彦・上野 剛・渡部良朋・志田原 巧・朝岡善幸・根本孝七・坂井伸一，2007：IPCC 第 4 次評価報告書 WG3 の内容分析 ― 温暖化緩和ポテンシャルの詳細とわが国への含意―、調査報告 Y07401、44p.

4 世界及びアジア・太平洋地域に対する影響

ここでは、環境省地球温暖化影響適応研究委員会（2008）に示された知見を中心に、アジア・太平洋地域の途上国における気候変動影響の概要を示す。

4-1 世界における異常気象の影響

近年、世界各地において、台風、豪雨、干ばつ、熱波等の異常気象による災害が頻発している。後述する途上国にとどまらず、影響への抵抗力が強いと考えられている先進国においても、さまざまな被害が発生している。2003年8月には、欧州の熱波により2万人以上が死亡した。2005年8月にはアメリカでハリケーンカトリーンにより、1800名以上の死者、120万人以上の避難民が発生した。オーストラリアでは、年・地域差はあるものの、6年以上も干ばつが続き、農作物に深刻な影響を与えている。近年の異常気象による災害の例を、図4.1.1に示す。

これらの異常気象の発生に、気候変動が関与しているかどうかを断定することはできないものの、温暖化・気候変動が進行することによって、異常気象の発生頻度や強度が増加する可能性が指摘されている。

4-2 途上国における気候変動影響

(1) 途上国及びアジア太平洋地域における気候変動影響の特徴

IPCC-AR4のWG2報告書では、「すべての大陸及びほとんどの海洋で観測によって得られた証拠は、多くの自然システムが、地域的な気候変動、とりわけ気温上昇の影響を受けつつあることを示している。」と示されている。従って、自然資源に対する依存度の高い農業等を主要産業とする途上国においては、特に気候変動の影響を受けやすい。また、途上国は人的、科学的、技術的、財政的、制度的に、気候変動への対処能力が不足しており、貧困と低開発とは、気候変動への抵抗力が不足する最大の要因となっている。

アジア太平洋地域諸国は、多様な自然要素と社会経済的な要素を有しており、また対象地域が広大なことから、関連する気候要素も種々にわたる。世界人口の60%が居住し、沿岸域にある多くのメガシティに人口や資産が集中していることから、被害を受ける人口や資産が多いことも特徴である。また、中国、インドのように10%前後の経済成長率を示す新興国もある一方、ブータン、ミャンマー、ラオスなど後発開発途上国に分類されている国もあり、気候変動に対する脆弱性は様々である。しかし、現状でも多くの国で食料や水などの問題が生じており、その上に気候変動の影響が加わることで、持続可能な開発が阻害されることが懸念される。

(2) アジア太平洋地域における気候変動影響のメカニズム

アジア太平洋地域における重要分野への気候変動影響のメカニズムについて、図4.2.1に示す。温暖化、気候変動性、極端気象現象などの気候変化が、海面上昇や、雪氷、水災害、沿岸域、生態系などに直接的な影響を及ぼし、さらに影響が様々な分野に波及することを示している。

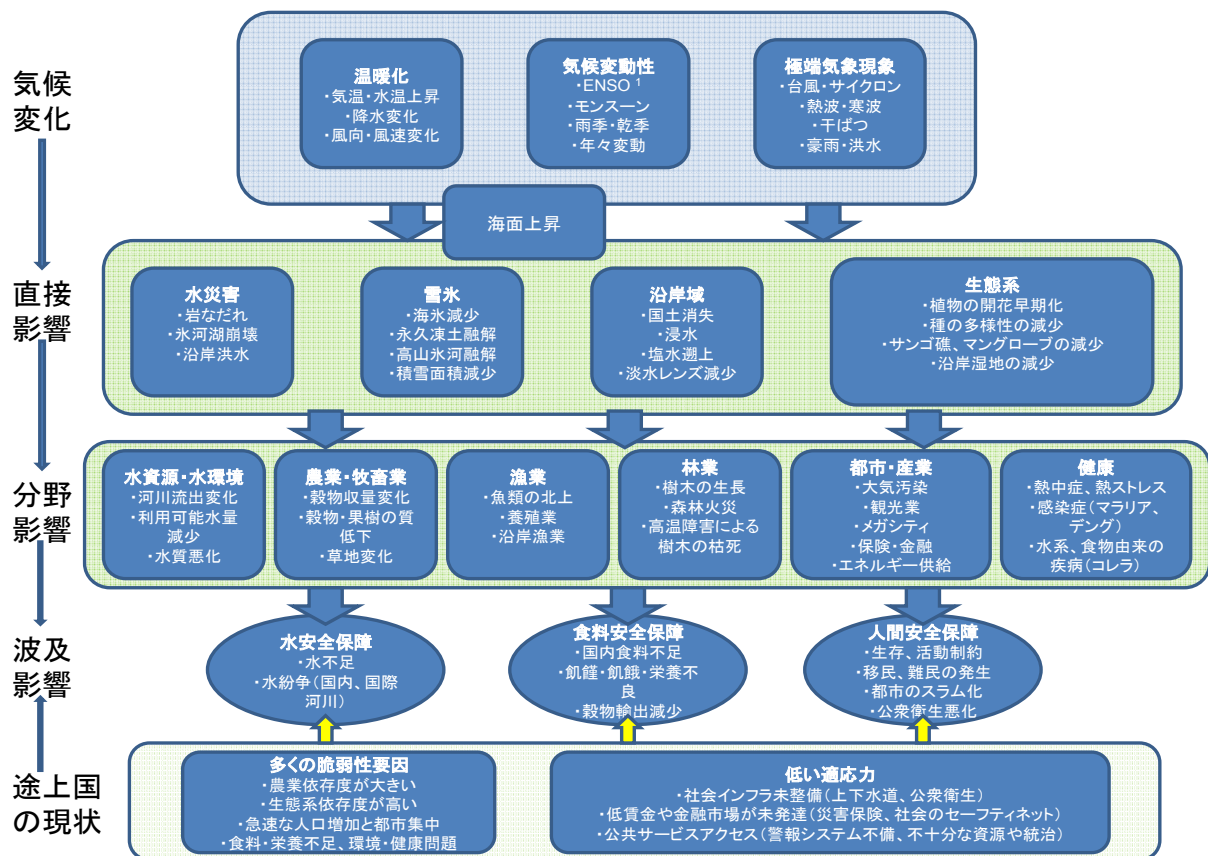


図 4.2.1 アジア太平洋地域における重要分野と温暖化影響のメカニズム（環境省，2008）

気候変動により、農林水産業、水資源、都市・産業、健康など種々の分野における影響が現状および将来に発生すると考えられる。また、直接的、物理的な影響に加えて、間接的、波及的な影響も考えられる。たとえば、水不足や気温の変化などによる穀物生産量の減少により、国内の食料需要に対して十分な供給がなされない場合、輸入による食料調達が不十分であれば、極端な食料不足が生じ、さらには飢饉などにつながる可能性もある。

また小島嶼国においては、食料供給のための農業・漁業、外貨獲得のための観光業など、産業が特化・限定されている場合が多い。海面上昇による影響とサイクロンなどの極端現象が重複すると、これらの産業に甚大な被害をもたらす。また、サンゴ礁を基礎とする島々では、淡水レンズに貯水された淡水資源が降水量変化や海面上昇などの影響により減少したり、高波浪や海面上昇によって海岸侵食が激化してくる可能性がある。

4-3 IPCC AR4 による主な知見

(1) 現状

IPCC-AR4 は、観測された気候変動影響について、「すべての大陸及びほとんどの海洋で観測された証拠は、多くの自然システムが、地域的な気候変化、とりわけ気温上昇によって、今まさに影響を受けていることを示している」と、前回報告書に比べてさらに踏み込んだ結論を示している。同報告書が「2001 年の第 3 次評価報告書以来、物理・生物環境において観測されたトレンド、

並びにそれらの地域的な気候変化との関係に関する研究の数は大きく増加した」と述べていることから分かるように、この結論は、影響の観測・検出に関する科学的知見の進展に裏付けられたものである。

一方で、報告書は「しかしながら、観測された変化に関わるデータ及び文献の地理的バランスが著しく欠如しており、特に途上国においてそれらの不足が目立つ。」とも述べている。欧米に比してアジア太平洋を含む途上国での観測事例は少なく、さらにその途上国の中でも大きな地理的偏りが見られる。これは、長期にわたる継続的観測が、これまで途上国において体系的に行われてこなかったことによるものであり、今後は、途上国における観測・モニタリング体制の拡充が望まれる。

以下に、AR4 で取り上げられた、アジア太平洋地域の主要分野における気候変動影響の現状を示す。

1) 雪氷圏・水資源

多くの都市及び居住地が、主として気温上昇に起因する永久凍土層の急速な融解及び凍土厚の減少により脅かされ、地すべりの頻度が増加し、永久凍土地域の湖で水位が上昇した。

より乾燥した地域では、通常、氷河の融解による水が淡水供給量全体に占める割合は 10%を超えている。中央アジア、西モンゴル、中国北西部のゼラフシャン氷河、アブラモフ氷河、チベット高原の氷河などは、近年その融解速度が増した。氷河の急速な融解の結果、氷河流出量及び泥流と岩なだれを招く氷河湖決壊の頻度が増大した。ただし、最近の北パキスタンでの研究では、過去 40 年間で西ヒマラヤでの冬季降水量増加により、インダス渓谷の氷河が拡大している可能性が示唆されている。

中国の一部地域では、水利用増加とともに気温上昇及び降水量減少によって水不足が生じ、結果的に湖及び河川が干上がるに至った。

2) 生態系

過去 20 年間に、アジアにおける森林火災の強度増大と拡大が観測された。その原因は主として気温上昇及び降水量減少が土地利用強度の増加と組み合わさったものである。最近の研究によると、シベリアの泥炭地における火災の急増は、人間活動の増加と気候条件の変化、特に気温上昇と関係がある。また、過去 60 年間に春季降水量が 17%減少、地表温度が 1.5℃上昇したため、モンゴルの森林及び草原火災の頻度及び範囲は 50 年間にわたって著しく増大した。

草地の成長期における降雨が次第に減少しているため、近年中央・西アジアでの乾燥が強まり、草原の成長が遅れ、地表の露出が増した。露出が進むとさらに土壤水分が蒸発することになり、地面はますます乾燥するため、草原の劣化が加速した。

アジアの湿地帯は、近年の温暖化した気候により次第に脅かされつつある。パキスタン、バングラデシュ、インド、中国のほとんどのデルタ地域において降水量の減少及び干ばつが生じ、その結果、湿地帯が干上がり、深刻な生態系劣化がもたらされた。

アジアにおける気候変動に関連した生物多様性喪失の証拠は依然として限られているが、近年アジアの多くの場所において、気候変動の結果、多くの動植物種がより高い緯度や高度へ移動していると報告されている。

3) 沿岸域

気候変動による海面上昇については、モニタリング期間は短いものの、1993年から海面上昇の測定に衛星（TOPEX/POSEIDON）も利用されはじめた。全球平均で海面が $3.1 \pm 0.7 \text{mm/年}$ 上昇していることが示され、上昇量に地域差があることも分かってきている。ツバル（Hall、2006）やモルディブなどアジア太平洋の標高が極めて低い島嶼国でも、海面上昇が進行してきていることは確実との認識が広がっており、海面上昇による影響は今後より明確になると考えられる。

海岸侵食、海水温、塩分濃度をはじめとした水質や生態系の変化も報告されている。気候変化によるマングローブへの大規模な影響が、インダスデルタとバングラデシュで確認されている。しかし、水質や生態系の変化には開発行為の影響も含まれていることから、気候変動との関係を示すには継続した観測が必要である。

気候変動により台風の強度の増加が予測されている中、ここ数10年、太平洋で発生する台風の頻度と強度に増加傾向が見られる。ベンガル湾やアラビア海では、発生数は減少傾向にあるが、強度は増している。これらの台風やサイクロンが引き起こす災害は、インド、中国、フィリピン、ベトナム、カンボジア、イランやチベット高原などの国・地域をはじめとして、各地で増加している。2007年11月にバングラデシュで被災者870万人以上の被害をもたらしたサイクロン・シドル^⑥は記憶に新しい。2008年5月2日には、サイクロン「ナルギス」が、人口密度の高いイラワジ川デルタ地帯に襲撃した。同16日時点での被災者数は、死者が77,738人、行方不明者が55,917人とされている（OCHA, 2008）。死者・行方不明者に加え、被災者は数十万～百万人以上に上ると言われている。存在する記録の中で、このデルタ地帯にサイクロンが上陸したのは初めてで、この100年間のミャンマーで最悪の自然災害となるとみられている。

なお、土木学会では2008年5月にミャンマー・サイクロン災害調査に対する災害緊急調査団を派遣した。調査団提供による現地の写真を図4.3.1に示す。



集落 （バゴー川右岸・河口から21km）
（証言）道路上15cm程度まで冠水。

撮影日時：2007年5月14日11:36



川のほとり （バゴー川左岸・河口から43km）
（証言）高潮の潮位は雨季の最大潮位と同程度だった。

撮影日時：2007年5月14日16:27

図4.3.1 ミャンマーにおけるサイクロンによる高潮被害の状況

写真：横浜国立大学 柴山和也・高木泰士研究室

4) 人間の健康

AR4 では、長期データに基づき、気温・降水等の変化と結びつけて説明された健康影響の顕在化についての報告はなかった。ただし、近年の熱波によりインドのいくつかの州において多数の死亡があったことが報告されており、また、シベリアの都市においても、極端に高い夏季気温に伴う熱中症等深刻な健康リスクが報告されている。南アジアでは、下痢を伴う風土性の疾病が、高温に関連して増加することが報告されている。

(2) 将来

1) 雪氷圏・水資源

永久凍土劣化によって著しい地表沈下及び建築物損傷がもたらされるであろう。ロシア及びモンゴルの水はけの良い丘陵地及び高地では、永久凍土融解によりさらに水はけが良くなり、地下水量が減少すると予測される。チベット高原では、今世紀末までに全般的に永久凍土地帯の規模が縮小し、高標高へ移動し、劣化に直面すると予測されている。地表気温が 3℃ 上昇し降水量が変化しないとすると、長さ 4km 未満のほとんどのチベット高原の氷河は消滅すると予測されており、長江の氷河地帯の面積は 60% 以上減少する可能性がある。

河川の流量の季節性及び水量にも、変化が生ずると予想される。中央アジア、南アジア、東アジア、東南アジアにおける淡水の利用可能性は、とくに大河川の集水域において減少する可能性が高い。このことは、人口増加と生活水準の向上とあいまって、2050 年代までに 10 億人以上の人々に悪影響を与えうる。メコン川流域では、最大月流量が増加する一方で、最小月流量が減少する。即ち、雨季の洪水リスクの増加と乾季の水不足の増加が同時に起こり得ることを示している。

ヒマラヤ山脈の氷河の融解により、洪水や不安定化した斜面からの岩なだれの増加、および今後 20～30 年間における水資源への影響が予測される。これに続いて、氷河が後退することに伴う河川流量の減少が生じる。

中国北西部およびモンゴル西部では、今世紀末までに、春季の積雪の融解量が大きくなるとともに、融雪時期が早期化する。結果的に春季の水資源量が増加し洪水のリスクも高まる一方、冬季の畜産用の水資源が大幅に減少すると見込まれている。

水質に関しては、海面上昇に伴い、沿岸域において地下水及び表層水の塩分濃度が増加する。特にインド、中国、バングラデシュがその影響を受けやすい。

2) 生態系

アジアの生物多様性の最大 50% が、気候変化によるリスクに曝されている。北アジアの北方林はさらに北に移動する。タイガがツンドラに入れ替わり大幅に増加し、さらにツンドラが北に移動することにより極砂漠が減少する。気候変化と生息域の断片化の相乗効果により、生物種の数大幅に減少すると見込まれる。二酸化炭素濃度倍増を仮定した二つの気候モデルによる予測によると、中国においては 105～1,522 の植物種と 5～77 の脊椎動物種が、インドシナ半島及びビルマでは 133～2,855 種の植物と 10～213 種の脊椎動物が、絶滅する可能性がある。

北アジア・東南アジアでは降水も増加する中で、予期される気温上昇によって森林火災の頻度・強度が増すかどうかは不確実である。1℃ の平均気温上昇によって、北アジアでは、森林火災が起

こりうる乾燥した期間が 30%増加するとの研究もある。もしそうなるならば、森林生態系の機能に様々な変化が生じることになる。気温上昇及び蒸散量の増加に伴い、アジアにおいては自然草地の面積及び成長量は一般的には減少すると予測されている。南アジアでは、草地・サバンナの自然資本が大きく減少すると予想される。モンゴルのステップでは、高地山岳地帯とゴビを除くと、気温上昇と降水量減少に伴い、牧草の生産性が約 10~30%低下すると見込まれている。

チベット高原の自然植生帯は大きく変化すると予測されている。温帯草地及び冷温帯針葉樹林は拡大するが、温帯砂漠及び氷縁砂漠は減少するかもしれない。気候変動により遊牧の移動域の境界が北東中国南部に移り、それにより草原面積が増加し、家畜生産の好条件をもたらす。しかしながら、遊牧の移動域は同時に潜在的な砂漠化地域であるため、新たな移動域で何ら保全対策がとられなければ、砂漠化が起こるであろう。気候変動及びその他の人為的要素との影響によって起こる、さらに頻繁で長期にわたる干ばつは、結果としてアジアにおける砂漠化傾向を増幅させるであろう。

3) 農業・食料

農業に関しては、今世紀末までにアジアにおける穀物の潜在生産量が大きく減少すると見込まれているが、その地域差は大きい。21 世紀半ばまでに、穀物生産量は、二酸化炭素の施肥効果を考慮したとしても、東アジアおよび東南アジアにおいて最大 20%増加しうる反面、中央アジアおよび南アジアにおいては最大 30%減少しうる。これらと人口増加と都市化を考慮すると、いくつかの途上国において、非常に高い飢餓のリスクが継続すると予測される。

より地域的な研究の結果としては、例えばバングラデシュでは、同時期までに、イネとコムギの生産量がそれぞれ 8%および 32%減少すると予測されている。インドでは、冬季の気温が 0.5℃上昇するだけで、コムギの収量が 0.45t/ha 減少すると予測されている。また、0.5~1.5℃の気温上昇で、コムギ及びトウモロコシの潜在収量が 2~5%減少するとの予測もある。中国では、2℃の平均気温上昇で、天水栽培のイネの収量が 5~12%減少すると見込まれている。

一方、農業適域は北にシフトする。例えば中国北部では、今世紀半ばまでに、三期作の境界が長江溪谷から黄河流域まで 500km 移動し、二期作地域は現状の一期作地域まで移動する。その一方で、一期作の地域は 23%減少すると見込まれている。

気温上昇・成長期間の伸長は、アジア温帯地域において害虫の数を増加させうると見積もる研究もある。また、大気中の CO₂ 濃度の増加と気温上昇により、光合成経路の異なる雑草間の競合関係が変化すると考えられている。

4) 沿岸域・島嶼国への影響

海面上昇は海岸侵食に直結する。発生数については未だはっきりしないが、温暖化によって熱帯低気圧の勢力が増す可能性が高い。したがって、海岸の低平地、特に人口が集中するデルタでは、海面上昇と高潮の強度の増加によって、現在よりも危険度が高くなる可能性が高い。気候変化と海面上昇により最も人々が影響を受けやすいのは、次の地域である。

- ・アジアのメガデルタ（バングラデシュと西ベンガルのガンジス-ブラマプトラ川デルタ等）
- ・自然現象及び人為的な活動による地盤沈下と熱帯低気圧の上陸点が重なる沿岸地帯
- ・ツバル、モルディブ等環礁に代表される標高の低い小島嶼

海面上昇によって 2050 年に 100 万人以上の人々が影響を受ける地域は、バングラデシュのガ

ンジス・ブラマプトラ川デルタ、ベトナムのメコン川デルタ、エジプトのナイルデルタである。紅河とメコン川の河口デルタでは、1m の海面上昇により、それぞれ 5、000 km²、15、000～20、000 km² の土地が洪水に見舞われ、400 万人、350～500 万人の被災者が発生することや、約 1、000 km² が塩分を帯びた干潟になり、耕地や養殖場の喪失、2、500 km² のマングローブ消失が予想されている。

海水温の上昇による、海洋生態系のさまざまな変化も懸念されている。アジアのサンゴ礁は今後 10 年以内に 24%、30 年以内に 30%が、気候変化と人為的活動などの複合ストレスを受けて失われると予想されている。

サンゴ礁からなる島々には、ツバルやモルディブなど標高が数 m 未満の国が少なくなく、海面上昇のみでも水没する面積が相対的に大きい。島嶼国における波浪の防御には、砂浜、サンゴ礁やマングローブなど自然のものを活用している場合が多いため、海面上昇や海水温上昇でこれらが失われると、防御機能が低下する。2100 年に海面が 88cm 上昇した場合、サモアでは 50%、15 の太平洋の島々で 12%のマングローブ地帯が消失すると予測されている。

島嶼国では、飲み水として、雨水の貯留以外に、海水との濃度差による淡水レンズ効果で溜まる地下水が重要である。降雨の減少と海面上昇が重なると淡水レンズが縮小し、水不足を引き起こす。例えばキリバスの Tarawa 環礁では、2050 年で降雨が平均 10%減少すると、淡水レンズの大きさが 20%減少すると予測されている。

これらの島嶼国は熱帯もしくは亜熱帯地域にあることが多く、気象や気候が伝染病の拡大に関係しているが、温暖化がさらにそれを加速させる可能性が高い。海水温の上昇は重要な食料、観光資源である海洋生態系へも大きく影響する。

参考文献

- 環境省，2008：気候変動への賢い適応－地球温暖化影響・適応研究委員会報告書－，340 pp.
- IPCC，2007: Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976p..
- 気象庁，2006：気候変動監視レポート 2006 世界と日本の気候変動および温室効果ガスとオゾン層等の状況について、88p. (<http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/monitor/>)
- 気象庁，2006：異常気象レポート 2005 近年における世界の異常気象と気候変動～その実態と見通し～（Ⅶ），383p.
- 環境省，2008：Stop the 地球温暖化 2008, 24 p.
- OCHA,2007: Cyclone SIDR Bangladesh, Situation Report No. 12, 3.
- OCHA, 2008: Cyclone Nargis Myanmar, OCHA Situation Report No. 20, 3.

5 土木から見た影響予測と対応の課題

以上の節で見てきたように、気候変動の影響は非常に広い範囲に及ぶ。土木分野の視点で見ても、影響はいくつかに分類できる。それには、1) 土木構造物の安全性や機能への影響、2) 土木事業の遂行（計画・設計・施工・維持管理）に対する影響、3) インフラ施設群としての機能不全、4) 安全・安心や環境保全など地域や国土の姿や国民生活に対する影響、等が含まれる。また、気候変動への対策としての緩和策と適応策には、土木分野に関わるものが広範に含まれる。そうした意味では、気候変動問題は、土木分野に新しい課題と使命を投げかけているといえる。

一方、気候変動の影響は広い範囲に及ぶため、複数の影響が重なって多重で複雑な影響が現れるのが現実であろう。そうした意味で、気候変動の影響は多くの場合、複合影響であることに特徴がある。また、現代社会が直面している多くの問題、すなわち、地震などの他の自然災害、少子高齢化、資源・エネルギー問題、水・食料問題などと気候変動の影響は重なって現れる。たとえば、集中豪雨の直後に地震が発生すると土砂崩れが拡大することや海面上昇の結果沿岸部の地下水位が高くなり、地盤支持力の低下した状況下で地震の被害が拡大すること、外国での農業生産への打撃が貿易を通じて我が国の食料問題に重なることなどである。そのため、気候変動の影響と他の問題の重なりによっても、複合影響が発生する。影響がこのような複合的であれば、その対策の考え方にも注意を要する。副次的な効果（コベネフィット）や多重の効果を持つものが期待される一方、個々の影響に対する対策がトレードオフになる場合も想定される。望ましいのは、多面的効果を持つ一石二鳥、一石三鳥の対策である。

以下では、こうした視点から、複合的な影響及び対策の検討を中心に示す。

5-1 複合リスク、影響の予測とそれへの対応

(1) 水環境に対する複合影響と対応

水環境管理の主要な目的は水環境を保全することにあるが、地球温暖化問題と水環境問題は図5.1.1に示したように互いに密接に関連している。例えば、水環境保全のための下廃水の処理は資源とエネルギーの消費を通じて温暖化の原因になっている一方で、処理を行わなければ放流先での温室効果ガスの放出を招くこととなる。一方、水環境は地球温暖化により多大な影響を受けると考えられ、海水面の上昇による地下帯水層への海水浸入や感潮河川への塩水遡上の進行、水温の上昇による河川や湖沼における環境容量の減少、などが指摘されている。温暖化による影響に加えて、水環境に対しては従来から認識されているように人間活動による影響が存在する。今後50年間の長期的な影響を考えると、全世界的に資源枯渇や食糧問題等の問題が水環境にもリスクとなりうるし、発展途上国ではこれに加えて人口増加や経済発展が水環境に対する大きなリスクとなる。日本では、少子高齢化とそれともなう労働力の減少が水環境管理上のリスクとなるであろう。ある程度の温暖化の進行はもはや避けられないことから、今後は温暖化に加えて上記のその他の要因による水環境への悪影響を前提とした、一層高度な水環境管理が必要になるであろう。このような多様な課題を同時に考慮し、総合化しなければ、地球温暖化下における高度な水管理は実現不可能である。

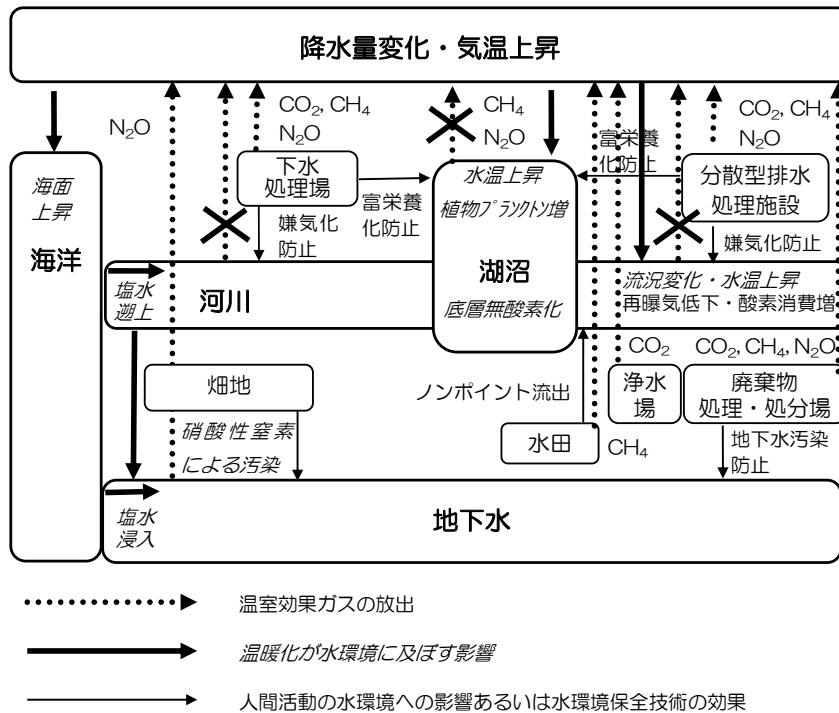


図 5.1.1 地球温暖化と水環境の相互関係¹⁾

水環境への複合影響に対する対応の例を図 5.1.2 に示す。地球温暖化にともなう水温上昇の結果、飽和溶存酸素濃度は低下するとともに植物プランクトンの増殖速度が増加するため、下廃水の処理においては現在以上の高度な水処理が求められる。発展途上国では将来の人口増加や経済発展により発生負荷の増大が見込まれることを勘案すると、革新的な高度処理技術の開発が必要となるであろう。その際には、温室効果ガスの排出抑制に加えて、省資源・省エネルギーの技術が温暖化防止の観点から求められる。少子高齢化・労働力不足が見込まれる日本においては、維持管理が容易なプロセスの開発も求められるであろう。さらには、汚泥や下水熱など大きなエネルギーポテンシャルを有している下廃水の特性を活かし、バイオマスや熱の収集、運搬、資源化も視野に入れ、資源・エネルギーの回収を行う必要がある。

個別の水環境要素においても、環境容量低下にともなう水環境悪化を防止するとともに温室効果ガスの水環境からの放出を抑制するため、水環境と温室効果ガスの放出の両面から調査研究を進展させなければならない。温暖化による富栄養化の進展に対する適応策としては、上述した点源由来の栄養塩の高度処理のみならず、栄養塩類、濁質成分等のノンポイント汚染物質の閉鎖性水域への流入特性の詳細を明らかにする必要がある、今後の土木分野による研究の進展が期待される。河川における溶存酸素の枯渇や海水面の上昇による地下帯水層への海水浸入に対する適応策も重要である。

水環境要素の一例として水田を中心と考えた場合には、水資源、生物多様性（生態系）、文化などへの影響を考えることができる。水資源の観点からは、田に水を引く時期に、十分な水の供給量の確保が必要となる。そのためには、森林の整備など、集水域の水源涵養能力の確保などの対策が必要となる。一方で、温暖化による豪雨に対して、水害を防止するための治水対策が必要と

なる。さらに、稲の管理には、水田内への水の引き込み量を調整したり、途中から乾田としたりするため、必要な時に水を入れて、不要時に排水できるなど、水が管理可能な状態にあることが必要である。水田からはとりわけ田植えや代掻き時期の栄養塩類の流出が報告されており、温暖化下での富栄養化防止のためにはこれらの流出抑制対策が重要な課題となる。生物多様性（生態系）の観点からは、猛禽類の一種であるサシバは、関東地方では4月に、東南アジア方面から渡ってきて繁殖し、9月に再び東南アジア方面に戻る。渡ってきた当初は、カエル類を捕食し、その後昆虫やトカゲを食べる。温暖化が進行した場合、渡りの時期と餌の発生時期に狂いが生じる可能性がある。

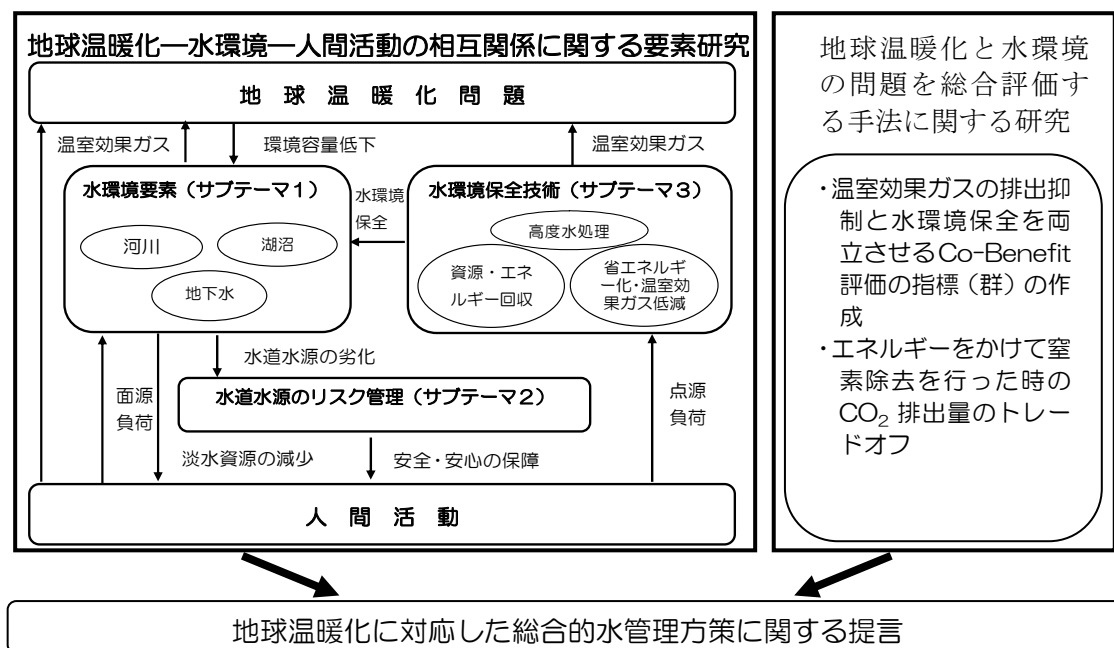


図 5.1.2 水環境への複合リスクに対する取組の例¹⁾

文化の観点からは、稲の収穫は、地域の文化である祭りなどと密接に関連していることが多い、適応策を検討する場合には、文化との関わりについても検討が必要となる。

温暖化の進展にともなう水環境の劣化は、淡水資源の減少と水道水源の劣化をもたらす。水温の上昇にともなう水道水源のリスク上昇も考慮し、水道を適切に管理していく必要がある。水道の適切なリスク管理は人間生活の「安全・安心の保障」をもたらし、温暖化下における持続的な発展に寄与するであろう。

最後に、地球温暖化と水環境の問題を総合評価する手法についても土木分野として研究を進める必要があろう。具体的な要素技術の開発に加えて、温室効果ガスの排出抑制と水環境保全を両立させる Co-Benefit 評価の指標（群）の作成が求められる。

(2) 沿岸域における複合災害

日本をはじめとするアジア・太平洋諸国の沿岸域には、人口、都市機能が集積しており、重要な地域である。これらは通常低平地からなるので、海面上昇や台風に伴う高潮により浸水するリ

スクが高まる。また、一方で海面上昇により地下水位が上昇することも考えられる。このことにより、地震の際の地盤の液状化の可能性が高まることが予測される。また、温暖化による気候変動によって豪雨が増えることになれば、山岳地帯で地震時の土砂崩壊（土砂崩れ）の危険が高まることになる。これらの懸念は温暖化そのものによる影響ではないので新たな災害とは呼べないにしろ、温暖化によってその災害危険度が高まることから複合災害と呼べるものである。今後十分な検討と予防対策が必要となるであろう。

5-2 複合的な方法による対応

温暖化の影響に対して、特に適応策を策定・実施する際に、いくつかの複数のオプションを検討して、それらのメリット・デメリットを提示することはもちろん、複数のオプションの組み合わせで対応することが望ましい場合がある。

- ・ 個々の対策オプションのメリットを組み合わせるより大きな効果を発揮させる場合
- ・ 個々の対策オプションのデメリットを相殺して対策効果を得る場合
- ・ 長期的に望ましい対策オプションと短期的に効果的なオプションを組み合わせる場合

海岸侵食対策などは、土砂生産・運搬・堆積のフローに関する自然の持つ機能を最大限に利用することが望ましいとされているが、現状の海岸ではそのような効果が期待できないことが多い。その場合でも、当面の侵食対策と将来のあるべき姿の両方を見据えた対策を取ることが必要である。このような、特に適応策の対策効果についての研究が求められることになる。

5-3 対応策がトレードオフの関係にある場合の課題

(1) 都市の生活環境について

温暖化の進行に伴う熱ストレスによる死亡数の増加や熱中症の増加に対して、寒冷ストレスの減少が考えられる。

産業技術総合研究所による「ヒートアイランド現象によりもたらされる環境影響の定量化」の研究報告では、ライフサイクル環境影響評価手法を用いて算定した結果、ヒートアイランドによりもたらされた 23 区内の 2002 年の環境影響は、睡眠障害 114 億円、熱ストレス 8.7 億円、熱中症 1.8 億円に対して、寒冷ストレス 80 億円、冷房エネルギー消費 0.28 億円、暖房エネルギー消費 0.47 億円と推計されている。東北地方などでは、温暖化による影響がプラスに働く可能性もあるなど、地域による影響の違いを考慮することも必要となる。

(2) 渇水に伴う地下水利用の増加、これに伴う地盤沈下の発生

温暖化による影響として、渇水に伴う地下水利用の増加と、これに伴う地盤沈下の発生が予測されている。これに対する対応策として、雨水利用が考えられている。雨水の利用を促進することは、地下水への涵養量を減少させることになり、トレードオフの関係にあると言える。地下水涵養と雨水利用を適切に行うためには、地下水の水源涵養域の設定など、水資源の管理が必要となる。

5-4 段階的な取組の必要性

温暖化による影響に対応するためには、緊急避難的に実施する適応策と、その後の恒久的な適応策に分けて段階的に実施することも必要である。

例えば、緊急避難的にコンクリート擁壁で防護し、その後より環境への負荷の少ない恒久的な手法を採用するなど。

5-5 対策の優先順位のつけ方

予測される影響に対して、実際に対応策を検討し実施する場合、優先順位をつけることが必要となる。この検討にあたっては、「影響の生じる時間（時期）」と「影響の大きさ」を評価の軸とした検討が必要となる。特に、影響の大きさについては、治水や健康、食料生産、生物多様性、生活、文化など複数の分野間の大きさを比較検討できる手法が必要となる。

また、対策の実施のための予算等の配分について、利害関係者間の合意形成も課題である。

5-6 予測される影響に対する適応策の実施が困難な場合の対応

温暖化によって、湖沼の水温の上昇や富栄養化の進展によるアオコの発生など、プランクトン相の変化が捕食する生物の構成を変えることによって、湖沼内の生態系の構造が変化することが予測されている。この他に、湖沼や海洋の鉛直循環の消失(停滞)による湖底の二枚貝や底生の魚類の減少などの影響が考えられている。これらの影響は、水質（健康）、生物多様性、水産などの分野に大きな影響を及ぼすが、根本的な適応策の実施が困難又は不可能な分野となっていると考えられる。このような分野に対する技術開発が必要である。

生物多様性の分野については、生物の生息範囲に変化(移動)が生じることが予測されている。これらに対する適応策としては、気候の変化に対応して生物が移動できるようなルート（コリドー）の整備や生息の拠点となる環境の整備等を行うことが考えられるが、これらに適切に対応するためには、生物相の変化の正確な予測が必要である。

5-7 許容されるリスクやハザードの決定（合意形成）

温暖化による影響に対して、どの程度の水準の対応策をとるのかを決定するためには、利害関係者間で許容されるリスクやハザードの大きさや頻度を決定することが必要である（ライフスタイルの選択も含め）。例えば、洪水をある程度許容する社会として、高床式の住宅を建設するなど。温室効果ガスの排出を抑制するための社会を実現するためにも、「原子力や高度な技術開発に依存する」～「再生可能エネルギーを中心に自然と共生する」までいくつかの選択肢がある。

5-8 気候変動対策に対する土木分野の責務

気候変動への対策としての緩和策と適応策には、土木分野が関わるものが広範に含まれる。そうした意味では、気候変動問題は土木分野に新しい課題と使命を投げかけている。

- 1) 温暖化対策の目標は、国連気候変動枠組み条約にあるとおり、気候変動の進行を危険な水準以下に抑えることに据えるべきである。そのためには、現在現れつつある気候変動の影響を避けるための適応策と CO₂ 排出削減の緩和策の 2 つの柱がある。この 2 つの対策の適切な組

み合せ（ベストミックス）が必要であり、その具体化のために、緩和・適応策ベストミックスのあり方に関する研究が必要である。

- 2) 温暖化の影響はあらゆる分野に及び、対策には社会全体の行動が必要であることを考えると、温暖化対策を社会経済政策の主要な政策分野の中に組み込むことが必要である（適応策の主流化）。そのため、各分野においてどのような取り組みが必要かを明確にする必要がある。
- 3) 土木分野の対象（インフラ施設とその運用システム、国土・地域づくり）は寿命が長く、一旦建設したら長く存続することに特徴がある。そのため、土木分野は、緩和策の目的である「低炭素社会」「低炭素地域」づくりと適応策の目的である「長期的に安全・安心な国土」作りの両方に密接に関係している。これらの実現に貢献するため、土木学会のあらゆる分野を結集して長期的にこの課題に取り組む体制を整える必要がある。
- 4) 緩和策と適応策に対してともに有効な一石二鳥の対策を生み出すべきである。また、個別の対策においても、両者の相乗効果や生態系の維持・保全や地域社会の問題克服に対して複合的な効果（コベネフィット）を持つものが望ましい。人口減少・高齢化社会を迎え、公共投資の伸びが期待できない制約の中で、社会基盤施設の設計・建設・運用のあり方についてさらに研究を進めるべきである。
- 5) 中国やインド、ブラジルなど新興国を含む途上国からの CO₂ 排出は、先進国のそれを上回り、今後大きく増加すると予想される。そのため、途上国における排出対策が極めて重要であり、ポスト京都議定書の新しい国際枠組みでは、途上国の参加が不可欠である。一方、影響の観点から見ても、より厳しい影響が現れるのもインフラ施設の整備が遅れている途上国である。大きな災害被害や食料危機、環境難民の発生は国際的な不安定をもたらす要因にもなる。そのため、途上国では、経済開発政策の中に気候変動への適応策を組み込んで、気候変動への備えをはかるべきである。こうした取り組みに対して、土木分野は積極的に貢献すべきであり、そのための行動計画を策定すべきである。

参考文献

藤原 拓・渡辺義公・船水尚行・村尾直人，2008：環境工学委員会における地球温暖化問題への取組、第 16 回地球環境シンポジウム講演集、pp.1-3.