

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

地球温暖化「日本への影響」 -最新の科学的知見-

温暖化影響総合予測 プロジェクトチーム

茨城大学，(独)国立環境研究所，東北大学，
(独)農業・食品産業技術総合研究機構農村工学研究所，
東京大学，国土技術政策総合研究所，筑波大学，
国立感染症研究所，(独)農業環境技術研究所，
(独)国際農林水産業研究センター，
(独)森林総合研究所，九州大学，名城大学，
(株)三菱総合研究所

はじめに

この報告書は、環境省地球環境研究総合推進費の戦略的研究「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」(略称 温暖化影響総合予測プロジェクト)の前期3年間(平成17～19年度)の研究成果をとりまとめたものです。このプロジェクトは、平成17(2005)年にスタートし、前期3年、後期2年の合計5年間の研究プロジェクトとして進行しています。

温暖化の影響は、広く世界に出現しつつあり、そのことは昨年発表されたIPCC第4次報告書でも示されました。それに対する中長期的対策の検討は世界の焦点の課題になっており、まさに本年7月に開かれる北海道洞爺湖サミットでも議論されますが、こうした対策立案にとって、将来の影響予測やそれに基づく温暖化の危険な水準の見極めが不可欠です。本研究は、分野別影響研究とそれらの統合モデルによる総合化を組み合わせ、現在進行中の気候政策の議論に不可欠な情報、すなわち我が国への気候変動の影響予測と温暖化の危険な水準に関する科学的知見を生み出すことを目的にしています。

平成19年度までの前期研究期間においては、今世紀中頃(2050年頃)までに重点をおきつつ今世紀末までを対象として、水資源、森林、農業、沿岸域、健康といった主要な分野における我が国への温暖化影響予測及び経済評価を行いました。さらに、影響・リスクを総合的に解析・評価するための統合評価モデルを開発し、我が国において生じる影響の大きさと地域分布、出現速度について定量的に検討した結果、分野ごとの影響量と増加速度は異なるものの、我が国にも比較的低い気温上昇で厳しい影響が現れること、影響は地域毎に異なり、分野毎に特に脆弱な地域があることを明らかにしました。これらの成果は、我が国のみならず、世界的にも最先端の温暖化の危険な水準に関する総合的な知見を提供するものです。私たちは、この成果が緩和策、適応策両面の検討や多くの方々の温暖化理解のために広く活用されることを期待しています。また、今後2年間、我が国の影響予測の一層の高度化とアジア・太平洋地域に対する影響予測を行い、一層有用な知見を得るべく努力する所存です。

平成20年5月29日

温暖化影響総合予測プロジェクトチームを代表して
S-4 研究代表 三村信男(茨城大学 地球変動適応科学研究機関)

目次

はじめに	2
目次	3
主な研究成果	4
報告書の目的	6
報告書の概要	6
世界の温暖化影響研究	9

I. 分野別温暖化影響

1. 水資源への影響	11
1.1 概要	11
1.2 影響評価の対象と方法	11
(1) 洪水氾濫	11
(2) 斜面災害	12
(3) 土砂堆砂	12
(4) 積雪水資源	12
(5) 水需給	13
1.3 水資源影響の将来予測	14
(1) 洪水氾濫の将来予測	14
(2) 斜面災害の将来予測	17
(3) 土砂災害の将来予測	17
(4) 積雪水資源の将来予測	17
(5) 水需給の将来予測	20
2. 森林への影響	21
2.1 概要	21
2.2 影響評価の対象と方法	21
(1) ブナ林	21
(2) マツ枯れ	22
(3) チシマザサ	22
(4) 山地湿原	22
(5) ハイマツ	22
(6) シラベ	23
2.3 森林影響の将来予測	23
(1) ブナ林	23
(2) マツ枯れ	29
(3) チシマザサ	30
(4) 山地湿原	31
(5) ハイマツ	32
(6) シラベ	33
3. 農業への影響	35
3.1 概要	35
3.2 影響評価の対象と方法	35
(1) 我が国のコメ生産	35

(2) 世界食料モデルによる温暖化の影響予測	37
3.3 農業影響の将来予測	39
(1) 我が国のコメ収量	39
(2) 世界食料モデルによる気候変化の影響予測	44
4. 沿岸域への影響	48
4.1 概要	48
4.2 影響評価の対象と方法	50
(1) 高潮浸水	50
(2) 河川堤防	50
(3) 砂浜の経済価値	50
(4) 干潟の経済価値	50
(5) 液状化危険度の変化	51
(6) 斜面災害リスク	51
4.3 沿岸域影響の将来予測	52
(1) 高潮浸水被害の将来予測	52
(2) 河川堤防脆弱性の将来予測	55
(3) 砂浜の経済価値	57
(4) 干潟の経済価値	59
(5) 液状化危険度の変化	60
(6) 斜面災害リスク	62
5. 健康への影響	64
5.1 概要	64
5.2 影響評価の対象と方法	64
(1) 熱ストレス死亡リスク	64
(2) 熱中症	64
(3) 大気汚染リスク	65
(4) デング熱・マラリア・日本脳炎	65
5.3 健康影響の将来予測	66
(1) 熱ストレスによる死亡リスク	66
(2) 熱中症の将来予測	67
(3) 大気汚染リスク	68
(4) デング熱・マラリアの将来予測	71
6. 分野別影響の統合評価	79

II. 適応策と今後の課題

1. 水資源への影響	82
2. 森林への影響	82
3. 農業への影響	83
4. 沿岸域への影響	84
5. 健康への影響	86
参考資料	88
参考文献	91
連絡先・研究参画者	94

主な研究成果

1. 影響量と増加速度は地域ごとに異なり、分野毎に特に脆弱な地域がある。

水資源、森林、農業、沿岸域、健康の5分野への温暖化影響の地域分布を示す多数のリスクマップを提示した。これらの分野において、洪水や土砂災害の増加、森林の北方への移動と衰退、米作への影響、高潮災害の拡大や沿岸部での液状化リスクの増大、熱中症患者の増加、感染症の潜在的リスクの増大といった多岐にわたる影響が現れる。さらに、これらには地域差がある一方、我が国全体として見ると厳しい影響となるものがある。

2. 分野ごとの影響の程度と増加速度は異なるが、我が国にも比較的低い気温上昇で大きな影響が現れる。

気温上昇とその時の影響の程度との関係を示す「温暖化影響関数」を構築し、それを用いて、温暖化が進行する2100年までの気候シナリオに沿って、我が国に対する影響がどのように拡大するかを総合的に検討し、我が国にも比較的低い気温上昇で厳しい影響が現れることを提示した。

3. 近年、温暖化の影響が様々な分野で現れていることを考えると、早急に適正な適応策の計画が必要である。

これらの悪影響を抑制するために必要となる適応策の考え方や各分野における対策の方向を整理した。

水資源	・ 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 ・ 温暖化による豪雨の増加に伴う洪水期待被害額は年間約1兆円と見込まれる ・ 豪雨による斜面発生危険地域は都市周辺に迫る ・ 温暖化によってダムの堆砂が加速する。 ・ 温暖化により浄水費用が増加する ・ 積雪水資源量の減少は多い地域で20億トン以上と見込まれる ・ 代掻き期の農業用水が不足する可能性がある ・ 100年後に九州南部で渇水が増加する
森林	・ 温暖化によりブナ林の分布適域が大きく減少する ・ 白神山地のブナ林も温暖化に対して脆弱である ・ 分布北限のブナは温暖化に対応した移動は困難である ・ 温暖化によりマツ枯れ被害が拡大する ・ 温暖化に対し低標高域のチシマザサ（ネマガリダケ）は脆弱である ・ 暖冬・少雪傾向に伴い山地湿原が縮小している ・ 東北地方のハイマツは温暖化に対して脆弱である ・ シコクシラベは温暖化により絶滅が危惧される

農業	・ 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 ・ 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 ・ 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 ・ 2030 年代まで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
沿岸域	・ 温暖化による海面の上昇と高潮の増大で、高潮による浸水面積と浸水人口が増加する。それらの面積と人口は温暖化の進行に伴い徐々に増加する ・ 西日本では、温暖化により高潮で浸水する面積や人口は、瀬戸内海などの閉鎖性海域や入り江などで大きい ・ 温暖化が進んだとき、三大湾奥部では、古くに開発された埋立地とその周辺で高潮による浸水の危険性が高い ・ 温暖化による海面上昇によって河川汽水域が拡大し、堤防の強度が低下する ・ 砂浜の経済価値は 1m²あたり約 12,000 円。30cm の海面上昇によって失われる砂浜の価値は 1 兆 3 千億円に達する ・ 干潟の経済価値は 1m²あたり約 10,000 円。海面上昇によって全国の干潟に影響が及ぶとするとその経済的損害は最大約 5 兆円に達する ・ 海面上昇と異常降雨が地下水位を上昇させ、地震時の液状化による地盤災害を受ける地域の面積を大きくする ・ 温暖化に伴う斜面災害リスクが大きくなる。また、斜面復旧計画にリスク指標による検討が重要である
健康	・ 気温上昇に伴い、熱ストレスによる死亡のリスクが高まる ・ 日最高気温上昇に伴い、熱中症患者発生数は急激に増加する。65 歳以上の年齢層では 35℃を超えると患者発生数の急激な上昇が見られる ・ 温暖化による気象変化で、光化学オキシダント濃度の上昇とこれに伴う死亡の増加が見込まれる。ただし、増大する光化学オキシダントの越境汚染より影響は小さい ・ デング熱媒介蚊のネッタイシマカの分布可能域が、2100 年には九州南部・東西海岸線、高知県、紀伊半島の南部、静岡県、神奈川県、千葉県南部と広範囲に拡大する ・ ヒトスジシマカの分布域は現在、岩手・秋田に達しており、2100 年には東北地方全域および北海道の一部に広がる ・ 温暖化によるマラリア再流行の可能性は低い

本報告書の目的

地球温暖化の影響は、世界各地で現れてきている。北極海の海水が予想以上の速さで縮小し、ヒマラヤや南米の氷河も大きく後退している。ハリケーンカトリナをはじめ、台風や豪雨、干ばつの被害が世界各地で起きている。我が国でも、農業や漁業、高山の植生の変化等、温暖化に起因する影響が多く報告されるようになってきている。では、2030年や2050年といった将来、我が国にはどのような影響が現れるのか、そうした将来の環境像に関する情報が強く求められている。

さらに、温暖化対策の目標は、温暖化・気候変動を、人類社会と地球環境の持続性にとって危険となる水準以下に抑え込むことである。そのことは、温暖化対策の土台となる国連気候変動枠組条約でも、「地球の気候系に対し危険な人為的干渉を及ぼすことにならない水準において、大気中の温室効果ガスの濃度を安定させること」を究極の目標とすると定められている。2007年に発表されたIPCC第4次評価報告書は、気候変動の影響と脆弱性の評価に基づいて、1990年頃と比べ2～3℃の気温上昇によって世界規模で経済的に負の影響が生じることを指摘した。しかし、各国や地域、影響を受ける分野ごとの特徴を踏まえた温暖化の危険な水準に関する明確な知見はまだ得られていない。そのため、京都議定書第1約束期間以降を見通した中長期的な政策立案が焦眉の課題になっている現在、温暖化の危険な水準及び安定化濃度に関する科学的検討が緊急かつ重要な課題になっている。

本報告書は、平成17年度から開始された温暖化影響総合予測プロジェクト（環境省地球環境研究総合推進費プロジェクト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」）の成果である。

この研究プロジェクトの目的は、以上に述べた背景から、以下の2点である。

- 1) 2050年頃までに重点をおきつつ今世紀末までを対象として、我が国及びアジア地域の水資源、森林、農業、沿岸域・防災、健康といった主要な分野における温暖化影響についてできるだけ定量的な知見を得ること。
- 2) 我が国への影響を総合的に把握し、温暖化の程度との関係を示すこと。

本報告書では、分野毎に定量的評価手法を用いて得られた研究成果の中から、我が国に関する部分を整理し、影響の程度とその分布を示すリスクマップ（全国及び地域評価）を提示した。さらに、温暖化・気候変動の進展と影響量の間接関係を示す温暖化影響関数を開発し、これを用いて、一定の気候シナリオに沿って温暖化が進行した場合、どのように全国的な影響が拡大するかを総合的に検討した。

こうした総合的影響評価は、世界的にもほとんど例のない成果であり、行政担当者や企業、市民の方々が、より具体的に温暖化による環境変化を考え、想像する上で役立つものと考えている。

報告書の概要

報告書の構成

本報告書は二部構成となっている。

Iでは、水資源、森林、農業、沿岸域・防災、健康の5分野を対象とし、物理的影響及び経済影響に関する成果を紹介する。分野ごとに、簡潔な影響情報、リスクマップ、その他の情報を列挙している。なお、本研究以外でも重要な事象についてはコラムの形で紹介している。さらに、第一部の最後では、総合的影響評価の結果をまとめた。

IIは、それぞれ悪影響に対する適応策と今後の課題のまとめである。

影響評価手法

地球温暖化の進行による影響の予測を行うためには、以下のような手順が必要となる。

① 将来の世界の社会経済発展（人口、経済、技術等）について複数ケースを想定し、各想定の下での温室効果ガス（GHG）排出量を推定する（社会経済・排出シナリオ作成）。

② 排出シナリオを前提条件として、気候モデルによる将来気候の予測実験（シミュレーション）を行い、将来の気温や降水量が世界の各地域でどのように変化するか予測する（気候シナリオ作成）。

③ 上記の社会経済・排出シナリオおよび気候シナリオを前提条件とし、分野別・事象別の影響評価モデルを用いて、将来にどのような影響が起こるか予測する（影響予測の実施）。

本報告書で用いた排出シナリオ、気候モデル、影響評価モデル、統合評価モデルは以下の通りである。

(1) 社会経済・排出シナリオ

本報告書では、社会経済・排出シナリオとして IPCC の SRES (Special Report on Emissions Scenarios) シナリオを用いた。SRES シナリオは、気候・影響予測研究における統一的前提としての利用を想定して、IPCC が 2000 年に公表した社会経済・排出シナリオである。SRES シナリオでは、まず将来発展像に関する 4 つの異なる叙述的筋書きを描き、さらに各筋書きに対応した社会経済要素（人口・経済・技術等）ならびに GHG 排出量の定量的シナリオを示した。なお、どの SRES シナリオも温暖化抑制のための政策（緩和策）を含んでいない。4 つの筋書き（A1、A2、B1、B2）と、各々について示されたシナリオは以下の通りである。

A1 : A1 の筋書きとシナリオ群は、高度経済成長が続く、世界人口が 21 世紀半ばにピークに達した後には減少し、新しく効率の高い技術が急速に導入される未来社会を描いている。このシナリオ群の基礎にある主要な命題は、一人あたり所得の地域間格差の大幅な縮小を伴う、地域間格差の収束、能力強化及び文化的社会的交流の進展である。A1 シナリオ群は、エネルギーシステムにおける技術的变化について選択肢の異なる

三つのグループに分かれる。この三つの A1 グループは技術的な重点の置き方によって以下のものに区別される。すなわち、化石エネルギー源重視（A1FI）、非化石エネルギー源重視（A1T）、全てのエネルギー源のバランス重視（A1B）である（ここで言うバランス重視とは、ひとつの特定のエネルギー源に過度に依存しないことと定義され、すべてのエネルギー供給・利用技術の進歩がほぼ同じであると仮定している）。

A2 : A2 の筋書きとシナリオ群は、非常に不均一な世界を描いている。基礎にある命題は、独立独行と地域の独自性の保持である。地域間の出生パターンが非常に緩やかに収斂するため、世界の人口増加が続く。経済開発は主として地域主導で、一人あたりの経済成長や技術変化は、他の筋書きに比べてよりばらつきがあり、遅い。
B1 : B1 の筋書きとシナリオ群は、21 世紀半ばにピークに達した後、減少に転じるという、A1 の筋書きと同様の世界人口を前提として、地域間格差が縮小した世界を描いているが、物質に重点を置く度合いは減少し、クリーンで省資源の技術が導入される、サービス及び情報経済に向かった経済構造の急速な変化を伴う。衡平性の向上を含む、経済、社会及び環境の持続可能性のための地球規模の問題解決に重点が置かれるが、追加的な気候イニシアティブは含まれない。

B2 : B2 の筋書きとシナリオ群は、経済、社会及び環境の持続可能性のための、地域の問題解決に重点が置かれる世界を描いている。それは、世界の人口が A2 よりも緩やかな速度で増加を続け、中間的なレベルでの経済発展と、B1 と A1 の筋書きほど急速ではないが、より多様な技術変化を伴う世界である。このシナリオも環境保護や社会的衡平性を志向するものであるが、地方や地域レベルに焦点があてられる。

(2) 気候シナリオ

温暖化影響評価の入力データとなる将来の気候変化には、気候モデル（全球気候モデル（Global Climate Model: GCM）や地域気候モデ

ル (Regional Climate Model:RCM)) によって計算された気候シナリオが用いられる。気候モデルとは、大気や海洋、陸上の植生など地球の気候を左右する要素を組み立てて、コンピュータ上に気候システム再現するシミュレーションプログラムのことである。これによって、温室効果ガスが増加すると地球の気候はどうかなどを計算することができる。気候モデルにおいては、大気と海洋は水平・鉛直の格子(マス目)に分割して表現されている。以下では、本報告書の影響評価作業で用いた気候シナリオについて整理する。

(a) MIROC3.2(hires)

国立大学法人東京大学気候システム研究センター (CCSR), 独立行政法人国立環境研究所 (NIES), 独立行政法人海洋研究開発機構地球環境フロンティア研究センター (FRCGC) の合同研究チームが、世界最大規模のスーパーコンピュータである地球シミュレータを用いた気候予測実験により開発した全球気候シナリオ。予測実験に使用されたモデルは、CCSR, NIES, FRCGC が開発した水平分解能 1.125° (約 100km) の高解像度大気海洋結合気候モデル MIROC3.2(hires)である。排出シナリオとしては SRES-A1B シナリオを想定している。図 1 に日本域および全球における 1990 年～2100 年の気温上昇および降水量変化を示す。

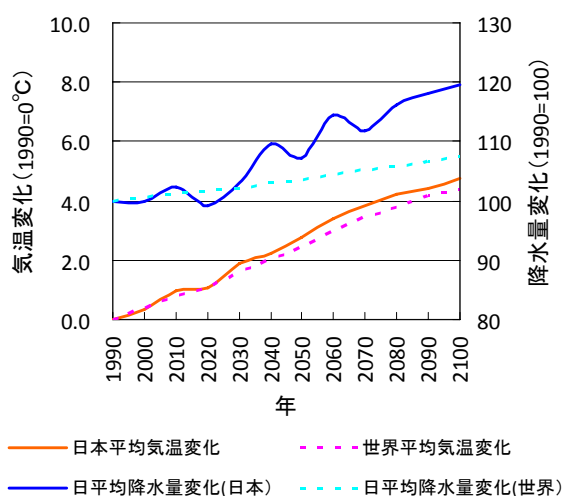


図 1 日本域および全球における 1990 年～2100 年の気温上昇および降水量変化 (MIROC)

(b) RCM20 (大気海洋結合大循環モデル)

気象庁・気象研究所が日本域を対象として開発した地域気候シナリオ。予測実験に使用されたモデルは、気象庁・気象研究所が開発した水平分解能 20km の地域気候モデル RCM20 である (全球大気海洋結合モデル (CGCM2, 水平分解能約 280km) の出力を境界条件として、日本域をダウンスケーリングした)。排出シナリオとしては SRES-A2 シナリオを想定している。

(3) 影響評価モデル

本報告書 I.1～I.5 の分野別影響評価では、分野別・指標別に、様々なモデル (物理学的モデル, プロセスタイプモデル, 統計モデル, 経済モデルなど) を用いて、温暖化が生じた場合の将来影響を推計した。各推計に用いた手法・モデルについては、分野別の各章ごとに「影響評価の対象と手法」という節を設け、そこで説明している。

(4) 統合評価モデルと温暖化影響関数

本プロジェクトでは、気候安定化目標を達成するために必要な排出削減量ならびにその安定化目標下で生ずる影響・リスクを統合的に解析・評価するため、統合評価モデル AIM/Impact[Policy]の開発に取り組んでいる。AIM/Impact[Policy]の開発では、まず、前項(3)で述べた分野別の詳細な影響評価モデル (以下詳細モデルと呼ぶ) の一部を用いて、気温・降水量等の主要因子を感度解析的に変化させた多数回シミュレーションを行い、その出力を地域別に平均集計することで「影響関数」を開発した。さらにその影響関数を統合評価モデルに実装し、複数分野における影響を統合的に評価した。なお、ここでいう影響関数は、詳細モデルをエミュレートする簡易影響評価モデルと考えることができる。

世界の温暖化影響研究

2007 年のノーベル平和賞は、気候変動に関する政府間パネル（Intergovernmental Panel on Climate Change : IPCC）とアル・ゴア（Al Gore）アメリカ合衆国元副大統領が受賞した。受賞の理由は、人為的に起こる気候変動についての科学的知見を蓄積・普及するとともに、気候変動へ対処する基盤を築いたことである。IPCC は世界気象機関（World Meteorological Organization : WMO）および国連環境計画（United Nations Environment Programme : UNEP）により 1988 年 11 月に設立された国連の組織である。IPCC の使命は温暖化研究の企画・実施ではなく、各国政府から推薦された科学者による地球温暖化に関する科学的・技術的・社会経済的な評価を行い、そこで得られた最新の知見を、政策決定者を始め広く一般に利用してもらうことである。IPCC の組織は、最高決議機関である総会と 3 つの作業部会、および温室効果ガス（GHG）目録に関するタスクフォースから構成されている。

2007 年 11 月 12～17 日の第 27 回 IPCC 総会において、第 4 次評価報告書（AR4）の統合報告書が採択された。これによって、2007 年に既に公表された 3 つの作業部会報告書と合わせて AR4 が完成した。AR4 の作成には 4 年を超える歳月が費やされ、130 以上の国の 450 名を超える代表執筆者と 800 名を超える執筆協力者による執筆と、2,500 名を超える専門家の査読を経て作成された。

温暖化の自然科学的側面の評価を行う第一作業部会（WG1）は、大気や海洋の全球温度上昇、雪氷の広範囲にわたる融解、世界平均海面水位上昇の観測などから、気候システムの温暖化には疑う余地がないことを報告した。また、1906 年から 2005 年までの 100 年間の気温上昇は 0.74°C 、1956～2005 年の最近 50 年間の温度上昇傾向は $0.13^{\circ}\text{C}/10$ 年であり、1906～2005 年の過去 100 年の傾向のほぼ 2 倍に相当し、20 世紀半ば以降に観測された世界平均気温上昇は人為起源の GHG の増加による可能性がかなり高いとし、第 3 次評価報告書（以

後、TAR）の「可能性が高い」よりさらに踏み込んだ表現を用いて報告している。

同じく、生態系、社会・経済等の各分野における影響および適応策についての評価を行う第二作業部会（WG2）では、すべての大陸およびほとんどの海洋で観測された事象が、多くの自然システムが、地域的な気候変化、特に気温上昇によって、今まさに影響を受けていることを示していると報告している。これは、主に 1970 年代以降に観測されたデータセットに基づくものであり、2001 年の第 3 次評価報告書以後、このようなデータを報告する研究の数は大きく増加し、データセットの質も向上した。具体的には、①1990 年以降に研究が終了し、②少なくとも 20 年間以上観測が行われ、③個別研究の場合にはいずれかの方向に顕著な変化傾向を示す、といった 3 つの基準を満たす 75 件の研究から得られた約 29,000 件以上の観測データに基づいている。生物環境では 28671 の観測データの 90%が、物理環境では 765 の観測データの 94%が、温暖化による影響を今まさに受けていると報告している。既に顕在化している主な温暖化影響を以下に記す。

雪、氷、および凍結した大地：①氷河湖の拡大と数の増加、②永久凍土地域における地盤の不安定化、山岳地域での岩雪崩、③北極及び南極のいくつかの生態系（海水生物群系、食物連鎖上位の捕食者を含む）における変化

水文システム：①氷河や雪融け水の流れ込む河川の多くで、流量増加と春の流量ピークの時期が早まる、②多くの地域における湖沼や河川の水温上昇による水質への影響

陸上生態系：①春季現象（例えば、開花、開葉、鳥の渡り、産卵）の早期化、②植物種及び動物種の生息範囲の極方向及び高標高方向への移動、③1980 年代初頭以来の衛星観測によれば、多くの地域において、最近の温暖化に起因する熱による栽培期の長期化に関連し、春の植物の「緑化」が早まる傾向

海洋および淡水の生物システム：①高緯度海洋における藻類、プランクトン及び魚群の生息範囲

の移動と生息数の変化、②高緯度及び高地の湖沼における藻類及び動物性プランクトン生息数の増加、③河川における魚類の生息範囲の変化と回遊時期の早期化

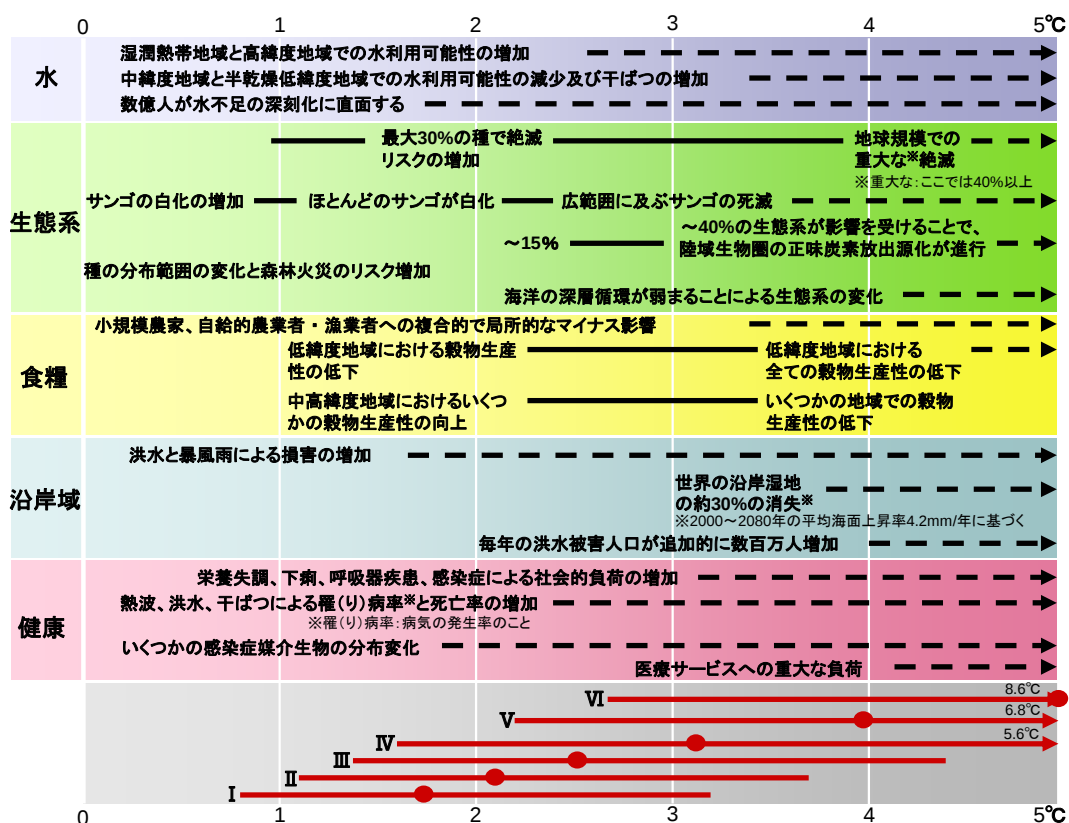
人間社会への影響については、気候以外の因子が複雑に絡み合っているため気温上昇と関わりを明示的かつ定量的に示すことは難しい場合が多いものの、①農業・林業：北半球の高緯度地域における耕作時期の早期化、火災や害虫による森林かく乱の変質、②健康：ヨーロッパでの熱波による死亡、媒介生物による感染症リスク、北半球高・中緯度地域における、アレルギー源となる花粉、③人間活動への直接影響：北極圏における氷雪上での狩猟や移動、低標高山岳地帯における山岳スポーツなど、に影響が現れていると報告されている。

2001年のTAR以降、これまでほとんど調査されていなかった地域において行われた研究のおかげで、全球平均気温の変化の異なる上昇幅と速度に応じた気候及び海水位変化により、影響の起こるタイミングと強度がどのように影響されるか

について、より系統的な理解することが可能となってきた。AR4 WG2 で報告された世界的な分野別将来影響を（表 1）に記す。黒い線は影響間の関連を表し、破線の矢印は気温上昇に伴って影響が継続することを示す。また、記述の左端は影響が出始めるおおよその位置を示す。ただし気候変化に対する適応の効果はこれらの推定には含まれていない。

表 1 によって気温上昇に伴いどのような影響がどの時点でどの程度現れるか概観することが可能となった。さらに、表 1 下部に示すように、安定化レベルの情報と組み合わせて考えることにより、目標達成のために、GHG をいつまでにどの程度削減すべきかを議論する際の、有用な科学的知見となりうる。例えば、カテゴリⅡの気候安定化を達成した場合（気温上昇 2.4～2.8℃上昇）、ほとんどのサンゴが白化し、種の絶滅リスクの増加が顕在化することがわかる。このような情報は、政策決定者が気候変化のリスクに対して適切な対応を行う際、非常に有効な科学的知見となる。

表 1 世界平均気温の上昇による主要な影響



I. 分野別温暖化影響

1. 水資源への影響

1.1 概要

温暖化による水資源への影響は、大きく豪雨と渇水に分けることができる。幾つかの全球気候モデル（GCM）によると、温暖化により豪雨の強度と、無降雨日数の増加が顕著になると報告されている。豪雨とは災害の原因となるような降水強度の特に大きい降雨を指す。豪雨は様々な災害をもたらす、無降雨は水利用を制限させ、ともに経済損失をもたらす。本報告書では、豪雨の増加影響に関連して、洪水被害と斜面災害の増加、貯水池の土砂堆積問題の、渇水頻度の増加に関連しては水需給の変化についての将来影響を評価した。また、気温上昇に伴う積雪水資源の減少について評価した。

本節では将来予測の方法について述べる。ここで利用される豪雨のデータは、日最大降雨の現在の統計値に基づいている。空間分解能、時間分解能に限界がある現在の GCM の結果では、将来の統計値を推定するのは困難である。そのため利用した豪雨のデータは、地域によっては過大または過小になりうることに留意する必要がある。統計値に従って導かれているため、利用したデータ期間が限られていること、観測されている地点が限られていること、分布データを作成する際の空間分解能が粗いことから、局所的な現象を表現できないこと、必ずしも時間統計値が完全でないこと、現在気候の統計値であるため将来の統計値が変化する可能性があること等から、降雨データは不確実性をもつ。詳細については、1.3(1)を参照のこと。

1.2 影響評価の対象と方法

(1) 洪水氾濫

日本は過去、洪水に対して様々な対策（治水）を行ってきた。その結果、現在では、洪水氾濫が頻発することはなくなりつつある。しかし、気候変動に伴って豪雨が激しくなると、過去に予測された水位を上回ることになり、洪水氾濫の危険性が増加する。

洪水氾濫の経済被害を調べるために2つの手法を組み合わせた。まず、洪水氾濫モデルによって氾濫域を求めて浸水深と浸水期間を推定した。次に土地利用に応じて資産価値を与えて、洪水による被害額を計算した。この方法は、国土交通省の治水経済マニュアルに沿っている。この2つの方法によって洪水氾濫の被害を計算した。

洪水氾濫モデルによって、50年に一回の確率で起こる豪雨と100年に一回の確率で起こる豪雨による氾濫域を計算し、この2つの豪雨による洪水氾濫被害額の差を求めた。これは、日本の治水整備が50年に一回の豪雨から守ることができると仮定している。その上で100年に1回の豪雨が温暖化によって50年に一回生じるようになった場合に拡大する被害を考えている。100年に一回の豪雨を対象としたのは1級河川では、およそ100年に一回の洪水規模に対する整備水準を目標にしているからである。なお、ここで用いた雨の空間分布は、日本全域に一斉に豪雨が生じるようにしている。これは、実際に降雨域が上流から下流に移動した場合に該当する場合であり、潜在的な最大被害と考えられる。

(2) 斜面災害

豪雨は土砂崩壊や地すべりなどの斜面崩壊をもたらす。日本は急峻な地形と広大な山岳域を持つため、現在も斜面災害に悩まされている。斜面災害は人命や財産に対する被害に留まらず、交通遮断による経済損失も生じる。日本全国に対策を施すことは不可能であり、重点地域の特定が必要とされてきた。そこで、本報告書では、数値地図情報を用いて斜面災害発生確率を求め、リスク地図を作成した。

斜面災害発生確率は、2つの変数、起伏量（数値地図メッシュ内の最高点と最低点の標高差）、地下水の動水勾配（地下水流速）から推定される。災害発生確率は2つの変数を持つロジスティック関数によって構築される。この関数の定数は、過去の災害実績に合致するように求められた。また、この関数は地質毎に推定されている。変数である地下水の動水勾配は、降雨を入力として、水の流れから求めている。つまり、30年に一度の豪雨を入力することによって30年に一度の斜面災害の確率を求めることができる。ここでいう斜面災害確率80%の地域とは、30年間にその降雨があった場合、100地点中、80地点が崩壊することを意味している。

本手法では短時間降雨による災害時のデータしか考慮していない。長期間の豪雨に比べて、崩壊しない地点が多くなるため、発生確率は減少する。一方、植生や道路などの土地利用は考慮していないため、蒸発や浸透の減少による地下水の動水勾配の減少が加味されておらず、大きな動水勾配が仮定されている。

(3) 土砂堆砂

豪雨により斜面崩壊が進行した場合、それに伴い土砂生産量が増える。過剰な土砂生産は、河床上昇を生じさせる。河床上昇によって洪水氾濫の危険性は増す。また、ダムや堰などでは、土砂の堆積量が増え、貯水容量が減少する。土砂に伴う濁質成分の流出による水質の悪化も懸念される。土砂生産量の増加は、良質な水資源

の確保を困難にさせる。

先に述べた土砂災害発生確率を用いて、全国52地点のダム湖の堆砂データと斜面リスクの平均値を比較した。その結果、両者は、指数関数によって表現でき、高い相関係数を示した。この関係を使えば全国の土砂生産分布を推定することができる。また、斜面災害リスクは、降雨の確率を変数としているので、気候変動に伴う降雨の変化による土砂生産を推測することができる。

推定された土砂堆砂と斜面災害の関係は、約50地点のダム湖データの平均値であり、砂防事業の影響や短期の土砂流出は考慮しておらず、長期の傾向として推算している。

(4) 積雪水資源

温暖化による水資源への影響が最も顕著なのは、積雪である。冬季の山岳域に水を貯めるため、雪は白いダムとも呼ばれる。融雪は春季の貴重な水資源であり、広大な水田を潤す。一方、少雪年には農業用水のみならず、他の水利用にも支障がでる。しばしば瀬枯れが生じ、生態系にも影響を与える。

積雪水資源の推定には、積雪融雪モデルを用いた。このモデルでは、全国の降雨、気温、標高のデータを用いて降雪分布データを作成し、気温のデータを用いて融雪分布を推定する。この2つを組み合わせることによって積雪深を計算する。このモデルの定数は、人工衛星画像から得られる積雪分布と計算による積雪分布が合致するように求めた。この手法によって、過去20年間で平均的な多雪と少雪年であった2000年と1993年を代表年としてシミュレーションした。また、融雪が始まる直前の2月15日積雪水資源量の差を比較することにより積雪水資源の脆弱性を考察した。

温暖化後の積雪状況は、降雪が降雨に変化するとともに降水量の変化もあり、現在の少雪の状況と合致するとはいえず、GCMで求められる将来の気温と降雪の組み合わせを詳細に考察する必要がある。

(5) 水需給

渇水期間の長期化が渇水のリスクを増加させる。しかし、将来、水田面積や人口が減少した場合、利水量も減少に転じるため、渇水リスクの将来予測は複雑である。これらの変化に対応した将来の水利用のあり方、水資源政策を検討するため、全国における現在の水需給バランスと社会条件との関係を水共同域（流域）レベルで整理し、それを踏まえて気候シナリオ（A2）に基づいた RCM20 を用いて将来の水需給バランスを推定した。水共同域（流域）毎の将来の水需要量と水供給量から、渇水指標（ダムの利用量が不足する日数×ダムの不足容量が最大になる量）を算出し、現況の渇水指標と比較することにより、将来の水需給バランスの評価を行った。将来の水需要量推定について、人口、上水道普及人口、水田面積、産業出荷額は 100 年後まで

予測している資料が存在しないため、既存の資料から簡易な推定により算定した。上水道普及人口については、将来推計人口（最終予測年次 2030 年）のトレンドから推定、水田面積については耕作放棄発生率（最終予測年次 2015 年）のトレンドから推定、産業出荷額は労働生産性の推定値（最終予測年次 2050 年）と将来推計人口から推定した。これらのデータと現在の水利用量の関係から水需要量を推定した。供給量については、GCM によって求められる降雨量と蒸発散量、融雪量から求めた可能水利用量である。このように、将来の社会変化と気候変化を考慮して、渇水指標の変化比を表した。

本計算は社会変化の予測を過去のデータから推計しており、政策や環境によって大きく変化する。特に減反や食料自給政策などの農業政策は大きく影響する。

1.3 水資源影響の将来予測

(1) 洪水氾濫の将来予測

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

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 I-I-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。

作成された豪雨データは以下のプロセスで作成されている。(1) 日本国内の降雨観測地点の過去50年の24時間降雨量について、年最大値を各年で求める。(2) この最大値の頻度解析を行う。これは各24時間年最大降雨の確率密度関数を求めることである。確率密度関数とは、24時間年最大降雨に対する発生確率を表すものである。ここでは一般化極値分布(GEV分布)関数を用いた。(3) ここで得られた関数を24時間年最大降雨と積算確率の関数に並べ替える。積算確率は非超過確率のことであり、24時間年最大降雨と非超過確率の関数を分布関数という。非超過確率とはその降雨を超えない確率を示している。(4) 1.0 (100%) から非超過確率を引くと超過確率を求めることができる。分布関数を超過確率との関係に作り直す。これは24時間年最大降雨がある値を超える確率を示している。(5) ここで得られた24時間年最大降雨の超過確率の逆数をとったものが再現期間(単位は年)(リターンピリオド)となる。例えば24時間年最大降雨100mmの再現期間が30年の場合、「100mmを超える降雨は確率的に30年に1回生じる」ということができる。

図 I-I-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。値の大きい地域は、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ことを示しており、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。

なお、ここで示したGCMの将来気候は平均値を見たものであり、確率密度関数の変化は考慮されていない。図をみるとわかるように分散値は大変大きく、不確実性が大きいことに注意する必要がある。

風間聡(東北大学)

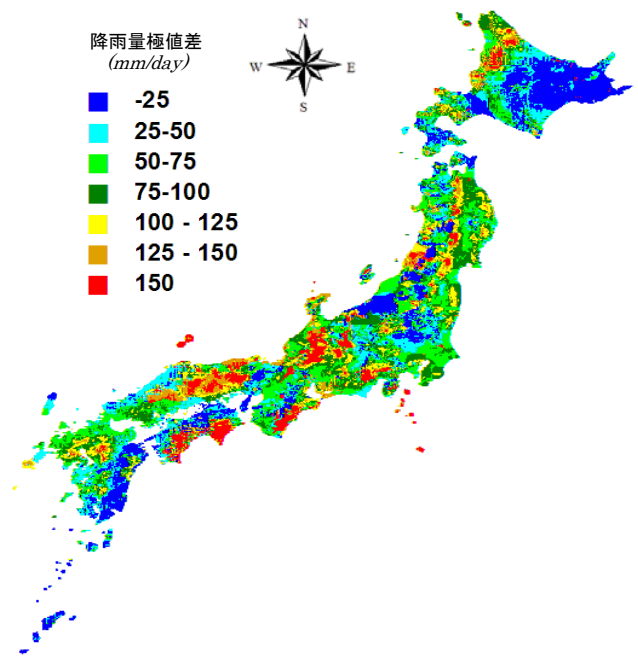


図 I-I-1 30年に1回の豪雨と50年に1回の豪雨の日降雨量の差(mm/日)。この結果は現在の統計値

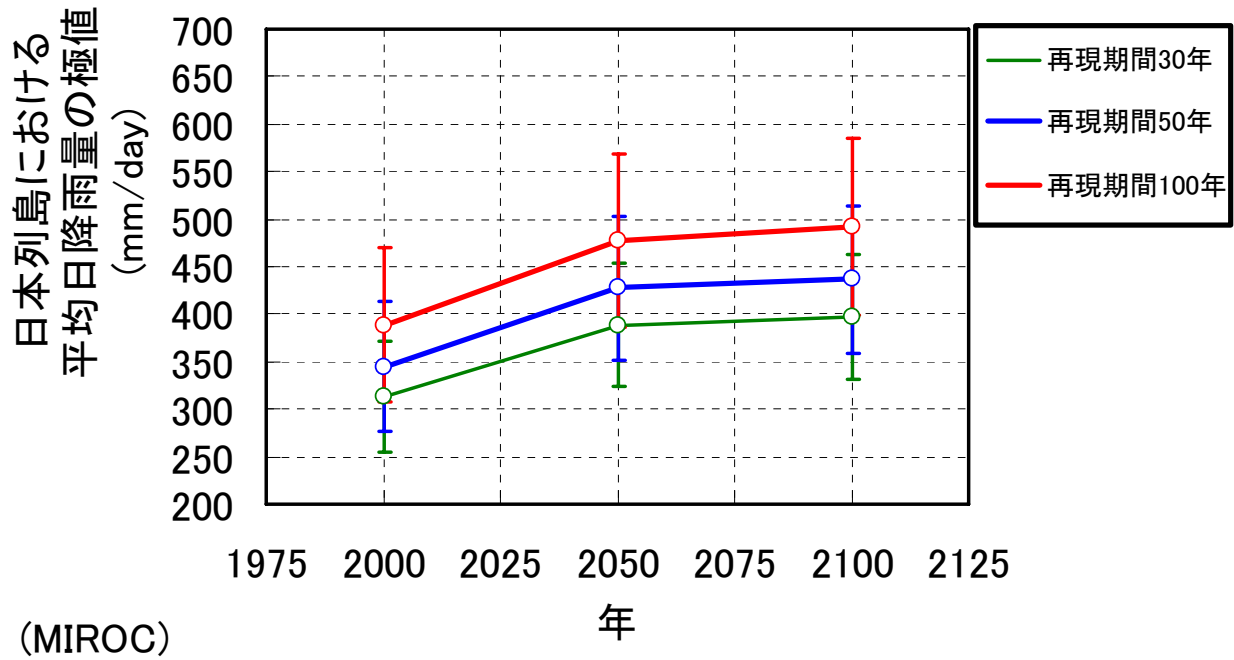


図 I-I-2 MIROC による近未来(2030-2050 年)と 2100 年頃(2080-2100 年)の降雨の状態。20 年間の日本全域の値の平均値と分散値(縦線)を示す

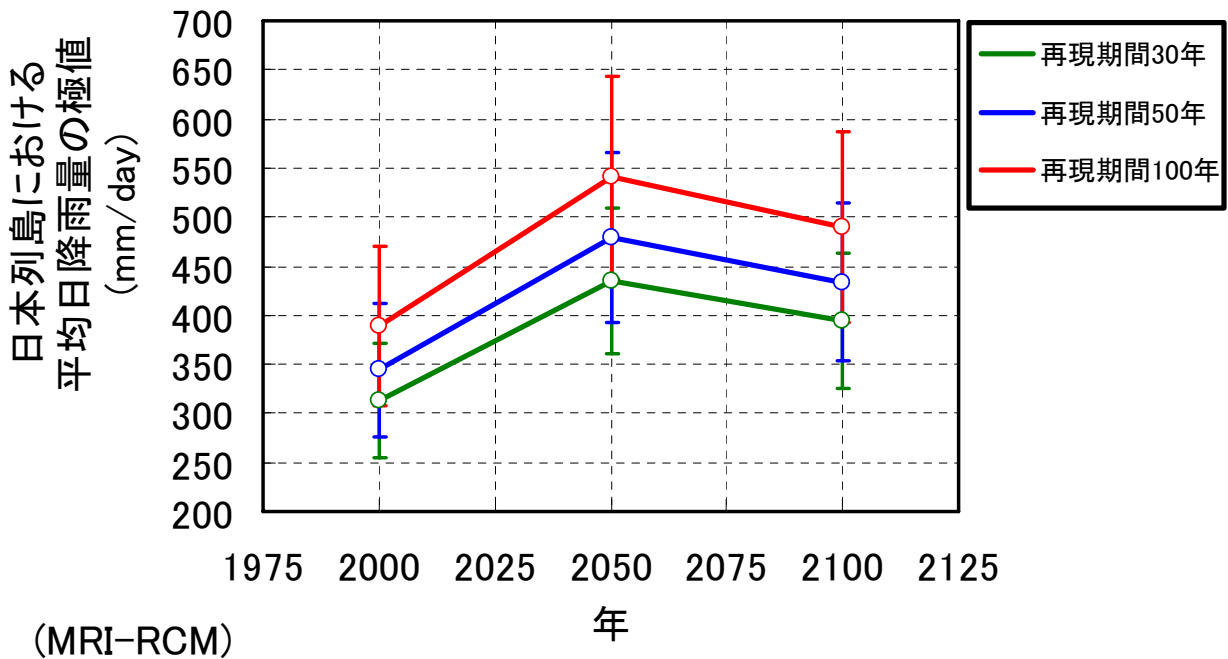


図 I-I-3 RCMver2.0 による近未来(2030-2050 年)と 2100 年頃(2080-2100 年)の降雨の状態。20 年間の日本全域の値の平均値と分散値(縦線)を示す

温暖化による豪雨の増加に伴う洪水期待被害額は年間約1兆円と見込まれる

温暖化による洪水氾濫の経済影響を評価するために、洪水氾濫計算と治水経済マニュアルを用いて洪水被害額の算定を行った。気候変動によって、現在100年に一回の豪雨が50年に一回程度まで増加した場合の被害増加額を推定した。MIROCモデルによると、この変化は2030年頃までの状態と考えられる。その1km²当たりの被害額の分布図が図I-I-4である。

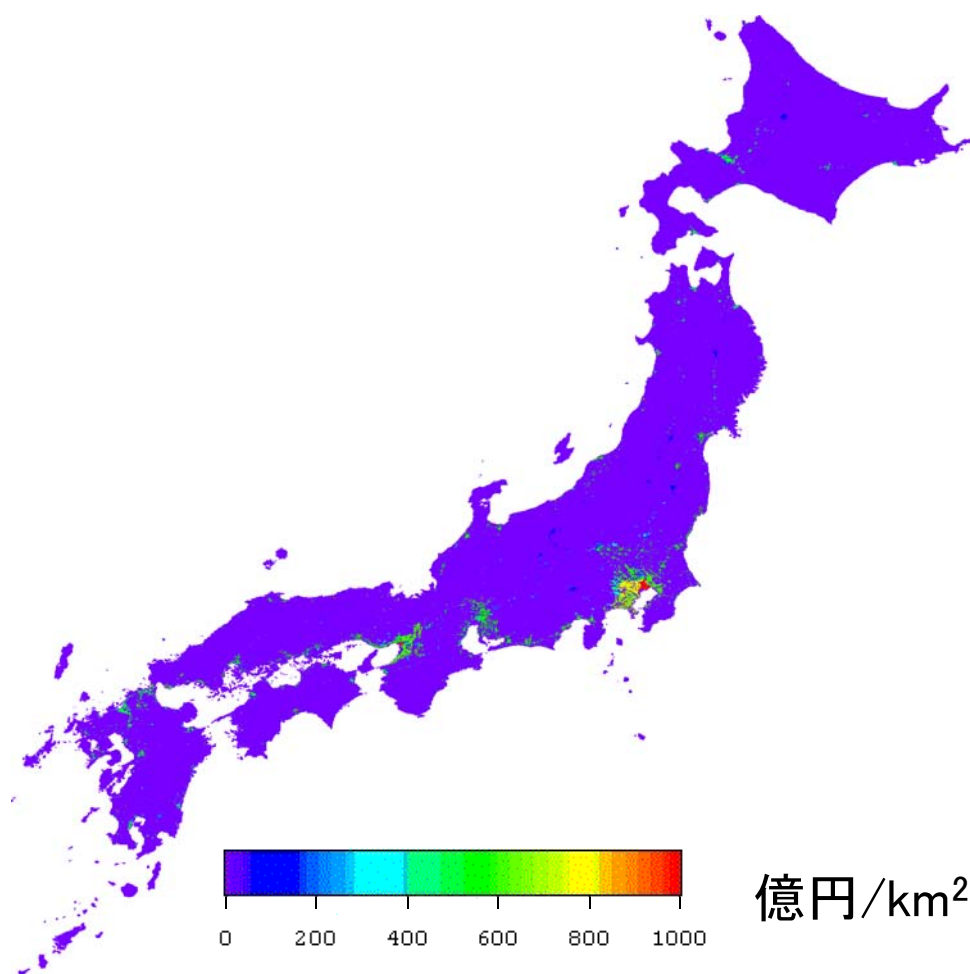
低地平地の広がる経済性の高い3大都市圏を中心に大きな対策費用が必要となる。多くの地域は、200億円/km²以下であるが、大阪、名古屋周辺では400億円/km²を越える地域が広がる。東京周辺は1000億円/km²の被害額が見られる。

日本全域では年間約1兆円の被害額（期待被害額）とされており、予算を潤沢に用意できない状況では、従来の治水整備、例えば大ダムやスーパー堤防等とは異なる方策、例えば早期警戒システムや洪水受容型住宅の建設が必要である。

被害額の大きい地域は、氾濫を封じ込めるような従来型の施設（堤防、ダム、地下放水路）による治水を優先し、被害額の小さい地域では、土地利用の管理や危機管理対応型の適応策を優先すべきと考えられる。例えば、早期警戒システムの構築や、洪水許容型住宅地の奨励、新規開発地域の制御等が含まれる（気候変動に適応した治水対策検討小委員会、2007）。

風間聡（東北大学）

参考文献：佐藤ら（2008）



図I-I-4 50年に1回の豪雨から100年に1回の豪雨に変化した際の被害増加額分布。2つの豪雨の被害額の差を求めた

(2) 斜面災害の将来予測

豪雨による斜面発生危険地域は都市周辺に迫る

気候変動に伴う降雨パターンの変化によって、重点地域がどのように変化するかを理解するため、気候シナリオ MIROC による豪雨を入力値とした斜面災害の発生確率を示した。2050 年（近未来）20 年間に豪雨の平均強度だけがシフトするとした。気候変動は分散などの統計値も変化するがここでは考慮していない（1.3(1)参照）。30 年に 1 回発生するとされる豪雨による斜面災害の発生確率を示した。危険とされる地域が平地近傍まで拡大する。特に中国地方や東北地方の都市圏郊外は 100%近い高い確率を示す。一方山岳域では、斜面災害によって土石流が生じる場合、その地点だけではなく下流へ伝播するため、流域全体を見た防災システムが必要である。

風間聡（東北大学）

参考文献：川越ら（2008）

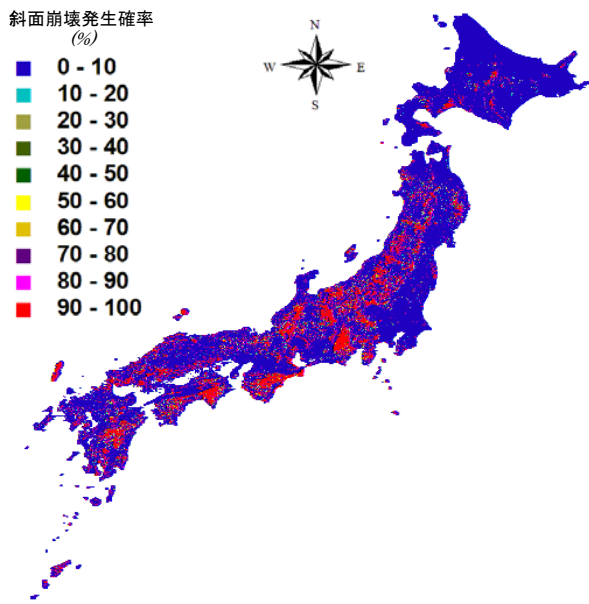


図 I-I-5 2050 年気候時の 30 年に 1 回生じるとされる豪雨による斜面崩壊発生確率。豪雨の発生確率は不確実性が高く、この結果はやや過大な結果といえる

(3) 土砂災害の将来予測

温暖化によってダムの堆砂が加速する

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湖流域の斜面災害リスク（1.3(2)で説明）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とが明らかにされた。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示している。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 I-I-6 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、ダム湖の堆砂は、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り、下流への影響が大きいので、慎重に計画する必要がある。

風間聡（東北大学）、参考文献：秋本ら（2008）

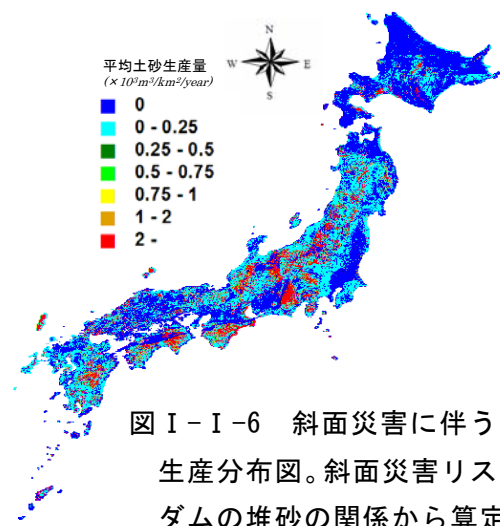


図 I-I-6 斜面災害に伴う土砂生産分布図。斜面災害リスクとダムの堆砂の関係から算定

温暖化により浄水費用が増加

多くの GCM の結果によると、気候変動によって無降雨期間の延長が指摘されている。この影響は、浄水過程に及ぶ。無降雨期間が長くなれば濁質成分の流出量が増加することが知られている。これは、大気降水物の長期間の堆積が一度に流出するためである。降水物を土地利用によって代表させ、無降雨期間を変数とした指数関数モデルを作成し、データの揃っている代表的な河川についてパラメータを同定した。ここでは現在データの統計解析によって、毎年生じるとされる無降雨期間と 100 年に一回生じるとされる無降雨期間 (100 年渇水期間) を求めた。方法は 1.3(1) で求めた豪雨の場合と同様である。図には平年値に対する 100 年渇水期間の場合の濁質成分の流出の割合を求めた。つまり値が大きいくほど気候変動によって濁質成分の増加が大きい地域といえる。濁質成分は、信濃川水系が 5% 以上の増加を示し、最も増加率が大きかった。無降雨期間は石狩川流域がもっとも長くなるが、土地利用の影響のため、信濃川流域が最も多い結果を示した。濁質成分の増加は浄水場における水処理費用を押し上げる要因となる。

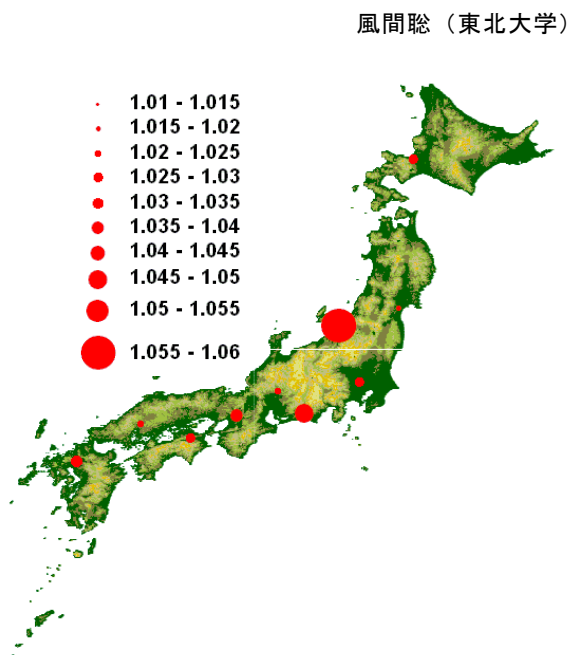


図 I-I-7 平年と比較した無降雨日後の濁質成分増加率

(4) 積雪水資源の将来予測

積雪水資源量の減少は多い地域で 20 億トン以上と見込まれる

温暖化による積雪水資源への影響を評価するために、数値計算を用いて雪の減少量を算定した。代表的な多雪と小雪年の積雪量を比較すると、新潟や秋田は、水換算高さ 1000mm 以上の差がある (コラム「スキー産業」参照)。温暖化は雪の減少だけでなく、蒸発散も助長するため、水資源の減少に拍車がかかる。こうした地域は米どころでもある。代掻き期の貴重な農業用水として融雪水が利用されており、温暖化による水不足が危惧される。広大な水田域を支えるため、雪と同じ機能をもつ貯留施設が必要になる。

簡単な適応策はないが、水利権の見直しや田植え時期の変更などの適応が考えられる。また、雪崩対策と一緒にを行うことができる雪ダムも貯留効果をあげる手法である。

風間聡 (東北大学)

参考文献: Kazama et al. 2007, 那須ら (2007)

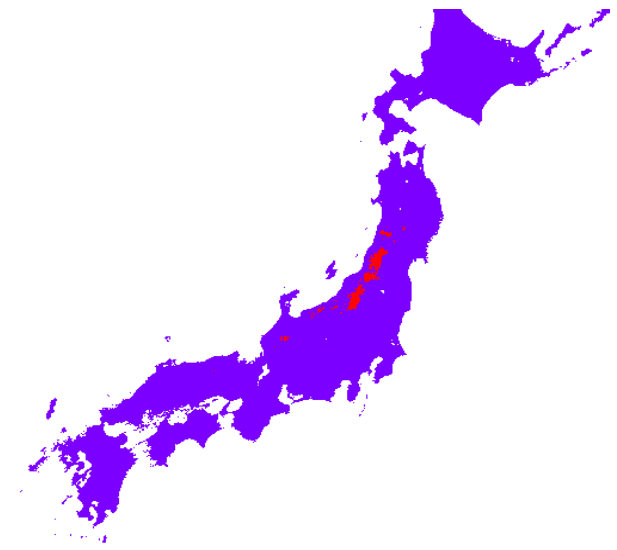


図 I-I-8 少雪年に減少する雪水量 1000mm 以上の地域 (赤色の地域)。平均的な多雪年であった 2000 年と少雪年であった 1993 年の差を求めた

代掻き期の農業用水が不足する可能性がある

東北地方の米の収穫量は、全国の4分の1以上を占め、全国で最大の米生産地域である。この広大な水田域を支えているのが、融雪量である。過去の小雪年と多雪年の積雪水資源が、春季の灌漑水量に占める割合を米作の代表的な流域について調べた。検証対象は最上川、北上川、信濃川の3つの流域である。それぞれの河川の流域には水田地帯が広がり、冬の間に貯留された積雪は農業用水として非常に重要な役割を持つ。

全ての流域において、多雪年の作付面積当たりの積雪水量は小雪年の場合の倍以上の値を示した。北上川は太平洋側にあり積雪水量総計の値が低いため、多雪年においても作付面積当たりの積雪水量は小さな値となっている。

水稻の一般灌水普通栽培において、1灌漑期間中に水田に必要とされる用水量は 1 m^2 あたり 1.5 m^3 である。これと作付面積当たりの積雪水量との比較を行う。表に示される数字は代掻き期の灌漑用水に占める流域積雪水資源量の割合である。1未満は不足していることを示す。信濃

川では小雪・多雪年ともに積雪によって十分な農業用水を得られることが分かる。最上川では多雪の年には灌漑用水の3倍ほどの積雪水資源量があるが、小雪年には灌漑用水以下になり、積雪のみから農業用水を確保することは困難であることが分かる。北上川では小雪・多雪年ともに農業用水に用いるほど十分な量の水を積雪からは得られない。多雪年には30%ほどが灌漑に使われているが、小雪の年には10%以下になる。信濃川では減少量は大きいですが、まだ十分な積雪水資源量があるといえる。北上川のような太平洋側の流域では、将来、温暖化により融雪の量・時期が変化することで、代掻きの時期に十分な農業用水が得られない可能性がある。これらの問題に対しては、前述のようにハード、ソフトの対策のほかに新たな水利権の設定も必要となろう。

風間聡（東北大学）

表 I-I-1 代掻き期の灌漑用水に占める積雪水量

		積雪水量(m^3)	作付面積(km^2)	作付面積当たりの積雪水量(m^3/m^2)	1灌漑期間中に水田に必要な用水量との比
最上川	少雪	8.83×10^8	717 (山形県)	1.23	0.82
	多雪	32.0×10^8		4.46	2.97
北上川	少雪	0.96×10^8	795 (宮城県)	0.12	0.08
	多雪	4.05×10^8		0.51	0.33
信濃川	少雪	32.1×10^8	1210 (新潟県)	2.65	1.76
	多雪	78.5×10^8		6.49	4.32

(5) 水需給の将来予測

100 年後に九州南部で渇水が増加する

全国水共同域（流域）を対象に、将来の社会変動による水需要の簡易な推定と、気候シナリオ RCM20 を用いた水供給量計算により、将来の水需給バランス・渇水リスクの評価を行った。

将来の需要推定値を用いて 100 年後の水需給バランスを計算したところ、地域差が明確に示された。具体的には、北海道、東北の東岸で水需給バランスが現状よりも逼迫することが推定され、九州南部と沖縄の水資源は特に逼迫することが示された。これは降雨の減少が大きいことと、気温の上昇に伴う蒸発量の増加が大きいためである。この計算は将来の様々な社会状況を現在の変動から推定しており不確実性は大きい、九州南部が他の地域より水資源の確保が相対的に困難な状況は間違いないと思われる。

多田智和（国土技術政策総合研究所）

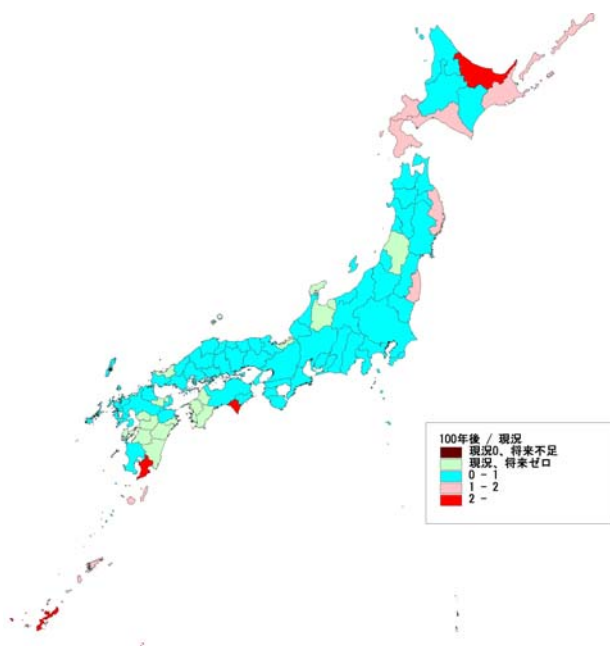


図 I-I-9 渇水指標の変化比。水需要推定に基づいた 100 年後の渇水指標と現在の渇水指標の比を表している。

コラム スキー産業

スキー、スノーボードは、冬のレジャーの代表であり、台湾や中国南部の雪のない地域からの観光客が近年増加しており、重要な産業です。しかし、温暖化によって稼動期間が短くなればスキー産業の衰退に拍車がかかると考えられています。各国を回るスキー、スノーボードの選手は、雪の減少を実感しており、スキー業界も温暖化に対して取り組み始めています。

2007 年 03 月 19 日の朝日新聞（asahi.com）に以下の紹介がありました。

『地球温暖化が進むと雪が減ってスキーができなくなる――。世界各地で雪不足による大会中止が相次いだことを受け、全日本スキー連盟の上村愛子（女子モーグル）、皆川賢太郎（男子回転）の両選手らが 19 日、若林環境相を訪問し、広く温暖化防止を呼びかけていくことを誓った。同連盟では今年から、「ストップ温暖化」のロゴ入りのパネルやゼッケンを大会で使うなど、PR活動を始めた。東京・霞が関の環境省を訪れた皆川選手は「ここ 10 年、練習する標高が年々上がるなど温暖化の影響を実感している」。上村選手は「いつか雪って何だろうと思う子どもたちが出てきたらどうしようと思う」と訴えた。環境相は「温暖化防止には国民運動が必要。今後も大いにアピールしてほしい」と話した。』

スキー場は山間部の重要な産業であり、農閑期の重要な収入です。スキー産業の衰退は、限界集落の増加に拍車がかかり、地域の社会、文化に大きな影響を与えます。今後の国土計画は、温暖化を含めた問題を考える必要があります。

風間聡（東北大学）

2. 森林への影響

2.1 概要

日本の植生帯は気候に対応しており、亜熱帯林、暖温帯照葉樹林、中間温帯林、冷温帯落葉広葉樹林、亜高山帯針葉樹林、北方林、高山植生などに区分されている。温暖化の日本の植生帯への影響予測として、年平均気温が 1、2、3℃ 上昇した場合の日本全土の植生帯の潜在分布の変化について報告されている (Tsunekawa et al. 1996)。しかし、温暖化の影響による植物の分布変化は、種ごとに温度や降水量に対する反応が異なるので、種ごとに予測することが必要である。また、気候シナリオがいろいろ作られており、シナリオごとの分布予測も同時に必要である。

2.2 影響評価の対象と方法

(1) ブナ林

ブナ林は、日本を代表する天然林で、水源涵養機能や野生生物の生息地として特に近年重要性が認められている。ブナは北海道南部の黒松内から鹿児島県高隈山まで分布し、その面積は日本の天然林総面積の 17% にあたる 23,000 km² である。北海道南部、東北、本州日本海側に分布が広く、本州太平洋側、四国、九州では山岳上部に限られている。白神山地は、世界的に稀有の大面積のブナ林が保存されている点から、1993 年に世界自然遺産に登録された。

気候変化は森林生態系に大きな影響を与える。気候変化が植物の分布へ与える影響を予測する研究が近年進められている。現在の気候下における種の分布に適する地域（分布適域）を環境条件から予測するモデルを開発することにより、将来の気候条件における分布適域を予測することができる。このような研究方法により、気候変化による分布適域の面積の変化、気候変

化後も引き続き生育に適する地域、気候変化により分布適域から外れる地域などが評価できる。その結果は、気候変化の時代における植物群落や野生植物の保全管理計画策定に利用されることが期待される。

気候変化が日本のブナ林の分布に及ぼす影響を評価するために、3 次メッシュ（約 1km×1km）の空間解像度で、4 つの気候変数と 5 つの土地変数を説明変数とし、ブナ林の分布の有無を目的変数として、統計モデルの一つである分類樹解析 (Classification tree analysis) を行い、ブナ林の分布を予測する分類樹モデル (ENVI モデル) を全国スケールで作成した (Matsui et al. 2004)。気候変数は、暖かさの指数（5℃ 以上の月平均気温の年間の積算値）、最寒月の日最低気温の平均、夏期降水量（5～9 月）、冬期降水量（12～3 月）を、土地変数には地質、土壌、大地形、斜面方位、斜面傾斜度を使用した。現在の気候変数は、モデルの作成には旧メッシュ気候値（気温が 1953-1982 年の平年値、降水量が 1953-1976 年の平年値、気象庁 1996）を、予測には新メッシュ気候値（1971-2000 年の平年値、気象庁 2002）に基づいて計算した。メッシュ気候値は、平年値（過去 30 年間のデータを平均して求めた値）の一種で、気象台やアメダス観測所がない場所の気象要素の月平均値あるいは月合計値を、地形等の影響を考慮して 3 次メッシュセルごとに推定したものである。ブナ林や他の天然林の分布データは、第 3 回自然環境保全基礎調査に基づく 3 次メッシュ植生データベース (MVDB) から抽出した。

ENVI モデルに現在の気候（気象庁 2002）と 2 つの気候シナリオ RCM20 と MIROC（2031-2050 年と 2081-2100 年）を組み込み、現在と将来のブナの分布確率を予測した。年平均気温は現在の気候に比べると、RCM20（2031-2050 年と

2081-2100 年)が 2.1、2.7℃、MIROC (2031-2050 年と 2081-2100 年)が 2.3、4.3℃上昇している。温度上昇の点から、RCM20 は低位、MIROC は高位の温暖化シナリオであり、この両シナリオを用いることは、気候シナリオによる影響予測の変化の幅を示す意義がある。

(2) マツ枯れ

温暖化が生物被害を通して森林に顕著な影響を与える例としては、マツノザイセンチュウ病が挙げられる。マツノザイセンチュウによるマツ枯れは冷涼な気候条件では発生しないことが知られており、温暖化がマツ枯れ危険域を拡大することが懸念される。

温暖化によるマツ枯れへの影響を評価するために、メッシュ気候値(気象庁 2002)の月別気温データを元に、マツ枯れのリスクの指標として用いられる、15℃を閾値とする積算温度(MB 指数)を気温上昇量 1℃毎に求めて、現在の土地利用形態を考慮したうえで、温暖化時のマツ枯れ危険域の分布を計算した。この結果を 3 次メッシュ危険域マップとして示すとともに、温暖化時のマツ枯れ危険域の面積(メッシュセル数)の変化を求めた。

(3) チシマザサ

タケ科ササ属のチシマザサは、ネマガリダケとも呼ばれ、樺太、千島列島から島根県まで分布し、日本海側多雪地の冷温帯から亜高山帯の林床における優占種である。チシマザサの分布は、積雪深との対応関係が強い理由として、常緑性で地上に冬芽をつけるチシマザサの生存にとって冬期の寒さと乾燥の被害から地上部を保護するために積雪が不可欠であることが知られている。この種は、林床の優占種として、樹木の更新を阻害するが、高密度の植被や根茎が山地の土壌保全に役立っている。

チシマザサは、多雪環境にのみ分布するうえ、移動速度が遅いことから、温暖化によって積雪量が減少した場合、大きな影響を受けることが予想される。チシマザサの生存に適した地域(分

布適域)を予測し、温暖化によるチシマザサの分布への影響を評価するために、分類樹モデルによる分布予測を行った。文献等に記載されているルルベ(植生調査区)データを統合した植物社会学ルルベデータベース(PRDB; Tanaka et al. 2005)から抽出したチシマザサの分布データと、現在の気候(気象庁 1996)から算出した 4 つの気候変数(暖かさの指数、最寒月の日最低気温、夏期降水量、冬期降水量)を用いて、チシマザサの分布を気候変数から予測できるようにモデルを作成した。このモデルに 2 つの気候シナリオ RCM20 と MIROC (2031-2050 年)を組み込んで、現在と将来のチシマザサの分布適域を予測した。

(4) 山地湿原

湿原とは、湿性な場所に成立する植生で、温度や水分、栄養状態の違いに対応して異なる植物種群からなる湿原が成立する。日本の日本海側は世界的にも稀有な多雪な環境にあり、多雪な山地には平坦面から緩斜面に積雪や降水によってのみ涵養される湿原が発達している。このような湿原は、多雪によって生じる特有の湿潤・低温な環境に適応した植物種群が生育しているが、近年の温暖化と積雪の減少の影響を直接受け、衰退しているのではないかと考えられる。そこで、代表的な多雪山地である群馬県と新潟県の境にある平ヶ岳の山頂平坦部の湿原における過去の変化を、1971 年から 2000 年までの航空写真に基づき検討した。この期間で 5 年おきに撮影された航空写真を電子化し、写真の歪みを修整(オルソ化)し、±50cm の精度で位置を比較できるようにした。この湿原の画像から、湿原と周辺のササ草原・森林の境界を地図化し、湿原の面積の経年変化を比較検討した。一方、調査地周辺の気象観測所 3 地点の過去 80 年の気象データを収集し、積雪量を中心とした気候の変化を解析した。

(5) ハイマツ

ハイマツは、マツ科マツ属の匍匐性の低木で、

ユーラシア大陸北東部に広く分布し、日本では北は北海道から南は赤石山脈まで西は白山まで分布する。日本国内では、山地の森林限界より上の高山帯に優占し、低木林を形成する。ハイマツは、その分布が山地上部に限られており、温暖化によって分布適域が縮小したり消滅したりすることが予想され、脆弱と考えられる。温暖化のハイマツ分布への影響を評価するために、PRDB から抽出したハイマツの分布データと、現在の気候（気象庁 1996）から算出した 4 つの気候変数（暖かさの指数、最寒月の日最低気温、夏期降水量、冬期降水量）を用いて、ハイマツの分布を気候変数から予測するモデル（分類樹モデル）を作成した。このモデルに現在の気候（気象庁 2002）と 2 つの気候シナリオ RCM20 と MIROC（2031-2050 年と 2051-2100 年）を組み込んで、現在と将来のハイマツの分布適域を予測した。その際、富士山など気候的には適していても実際にはハイマツの分布しない山地があるため、ハイマツの実際の分布域を林弥栄（1954）の調査データに基づき地図化し、ハイマツの実際の分布域における温暖化後の分布適域を予測した。

(6) シラベ

シラベ（シラビソ）は、本州福島県から四国までの亜高山帯で優占するモミ属の常緑針葉樹である。四国では、石鎚山や剣山などの山頂付近にのみ分布し、シラベの 1 品種であるシコクシラベとして区別される。温暖化のシラベの分布への影響を評価するために、PRDB から抽出したシコクシラベを含むシラベの分布データと、現在の気候（気象庁 1996）から算出した 4 つの気候変数（暖かさの指数、最寒月の日最低気温、夏期降水量、冬期降水量）を用いて、シラベの分布を気候変数から予測するモデル（分類樹モデル）を作成した。このモデルに現在の気候（気象庁 1996）と 2 つの気候シナリオ RCM20 と MIROC（2031-2050 年と 2081-2100 年）を組み込んで、現在と将来のシラベの分布適域を予測した。

2.3 森林影響の将来予測

(1) ブナ林

温暖化によりブナ林の分布適域が大きく減少する

現在の気候には 3 次メッシュ気候値（1971-2000 年の平年値、気象庁 2002）を、将来の気候には RCM20 と MIROC を、土地変数には国土数値情報を用いて、気候変化が日本のブナ林に及ぼす影響を予測した。前述のように、温度上昇の点から、RCM20 は低位、MIROC は高位の温暖化シナリオであり、この両シナリオを用いることは、気候シナリオによる影響予測の変化の幅を示す意義がある。

現在ブナ林が分布する地域における分布適域（分布確率が 0.5 以上）は現在に比べて、2031-2050 年には RCM20 と MIROC で 65%と 44%に、2081-2100 年には 31%と 7%に、それぞれ減少すると予測された（表 I-II-1、図 I-II-1）。いずれの場合でも、分布適域がほとんどなくなる西日本や本州太平洋側におけるブナ林は脆弱であると考えられる。

温暖化に伴い低標高域はブナ林の成立に適さなくなり、ブナは低標高域に分布する他の樹種に置き換えられる可能性がある。本州日本海側の低標高域ではコナラ、ミズナラ、クリが、九州・四国・本州太平洋側ではこれらの樹種に加えてカシ類、モミが、ブナに置き換わる可能性がある。ブナの寿命は 200~400 年であり、温暖化によりブナが枯死することはないだろうが、ブナの老齢木の枯死に伴い、徐々に樹種の交替が進むと考えられる。ブナ枯死後に、高木種の交替がスムーズに進行するか、今後監視していくことが重要である。

松井哲哉・田中信行（森林総合研究所）

表 I-II-1 気候シナリオごとの分布適域（確率0.5以上）の変化。値は3次メッシュセル数を示す。

気候データ	分布適域*	ブナ林かつ分布適域**
現在の気候(1971-2000)	22,314	11,869
RCM20(2031-2050)	20,102	7,720
RCM20(2081-2100)	7,353	3,644
MIROC(2031-2050)	10,215	5,170
MIROC(2081-2100)	5,197	798

*全国における分布適域のセル数、**実際のブナ林の分布域における分布適域のセル数

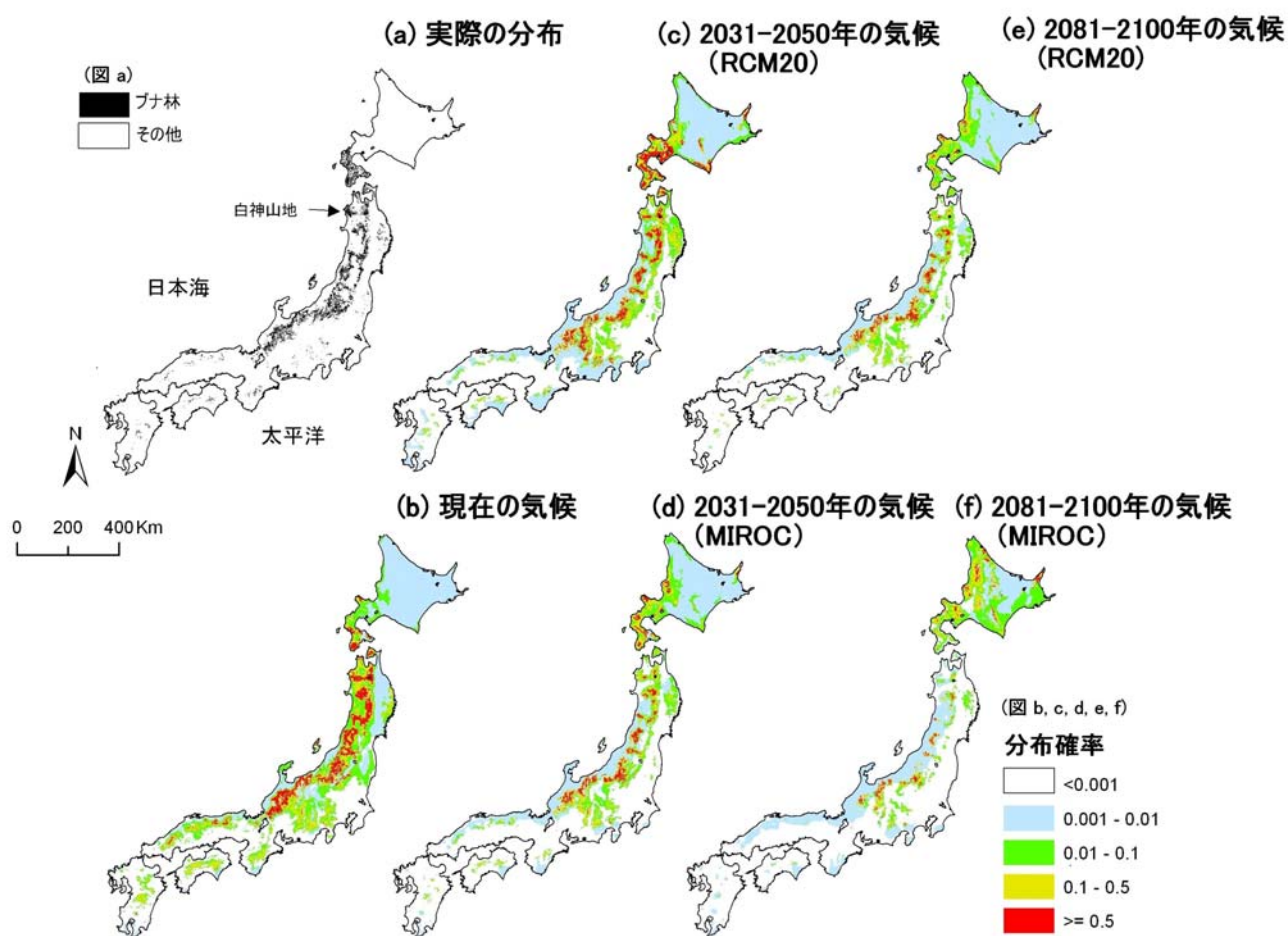


図 I-II-1 (a) 実際のブナ林の分布、(b)～(f)は各気候条件におけるブナ林分布確率の予測

白神山地のブナ林も温暖化に対して脆弱である

白神山地は、自然度の高いブナ林がまとまって広域に分布することにより世界自然遺産として登録されている。温暖化の白神山地のブナ林への影響を予測するために、全国を対象にして開発されたブナ林の分布予測モデル（ENVI モデル）における白神山地の部分について検討した。白神山地のブナ林の分布は、4 つの気候変数のうち冬期降水量と暖かさの指数が主に影響することがモデルから明らかとなった（松井ら 2007）。2 つの気候シナリオ（RCM20 と MIROC）の冬期降水量は変化が少ないので、ブナ林の未

来の分布へ影響を与える主要因は暖かさの指数である。分布確率 0.5 以上の分布適域は、現在の気候下では世界遺産地域の 77.0 % を占めるが、2031-2050 年には RCM20 で 44.3 %、MIROC で 2.9 % に、2081-2100 年には RCM20 で 3.4 %、MIROC で 0.0 % に減少する。施業管理計画図によると自然遺産地域の約 8 割が林齢 150 から 200 年生であるので、2100 年には多くのブナが壮齢期から老齢期を迎える。温度上昇に伴いブナ林下限域から、ブナの死亡後にミズナラやコナラなどの落葉広葉樹が成長し、ブナの密度が低下する可能性がある。

松井哲哉・田中信行（森林総合研究所）

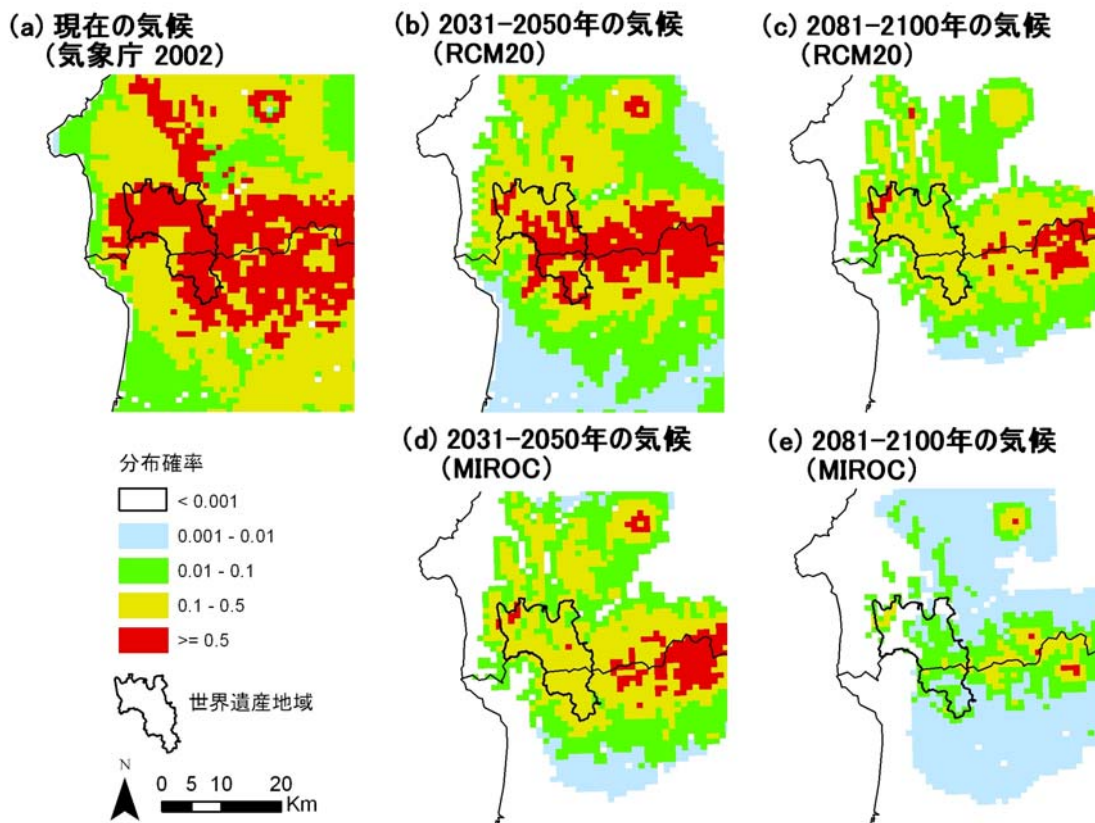


図 I-II-2 温暖化に伴う白神山地のブナ林分布確率の変化予測

分布北限のブナは温暖化に対応した移動は困難である

現在のブナ林の北限は北海道の渡島半島黒松内低地付近にある。温暖化の北限への影響を評価するために、ブナ林の分布予測モデルと3次メッシュの気候変数を用いて、北海道におけるブナ林の分布適域の変化と気候的閾値の分布変化を検討した。2つの気候シナリオ（RCM20 と MIROC）では、分布適域は黒松内低地を越えて北東に広がる。したがって、温暖化に伴いブナが北限を超えて北東域に侵入する機会が増えると予想される。花粉分析に基づき、最終氷期以降のブナの北進速度は本州で最大 233m/年、北海道で 11~20m/年と推定されている。RCM20 と MIROC シナリオの北海道における最寒月最低気

温の北進距離は、地域により異なるが、100 年間で 10~50km になる。ブナの移動速度を過去最大値の 233m/年としても、100 年で 23.3km の移動距離にとどまる。このシナリオのような温暖化が進行すれば、ブナの移動が気温の上昇に追いつけないことが十分予想される。

ブナがスムーズに移動するためには天然林が連続している必要があるが、現在の土地利用は人工林、農耕地、都市などが天然林を分断しているため、ブナの移動は容易ではない。とくに、温暖化後も高温・乾燥により分布不適域である石狩低地が分布適域を広く分断するので、ブナの移動が阻害されると予想される。

松井哲哉・田中信行（森林総合研究所）

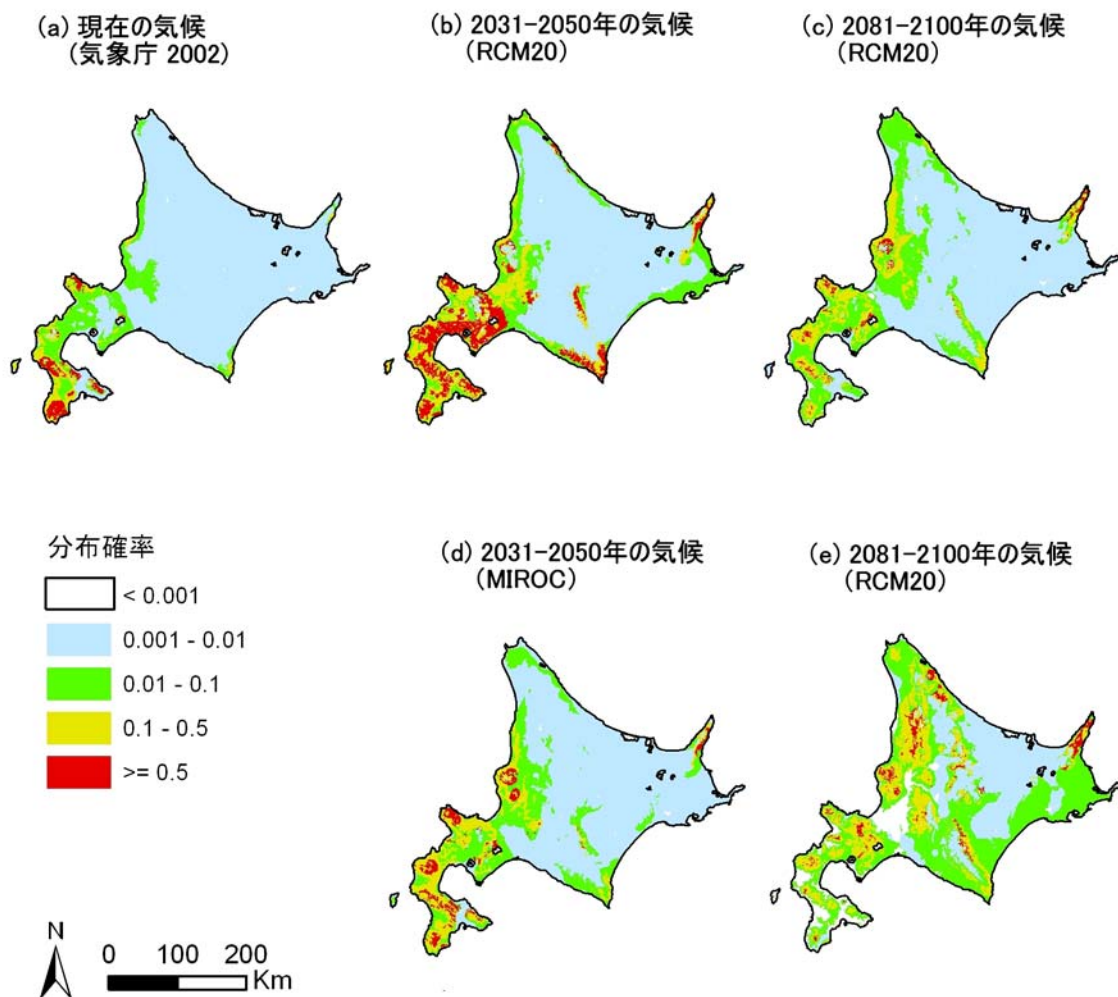


図 I - II - 3 温暖化に伴う北海道のブナ林分布確率の変化

ブナ林分布適域を多様な気候変化に対応して予測する

ブナ林の分布を予測するモデル（ENVI モデル）に、降水量を現状より-50%から+50%まで、気温を-2℃から+7℃まで段階的に変化させた110通りの異なる気候条件下におけるブナ林の分布確率を予測した（図 I-II-4、図 I-II-5）。この気候変化条件は、多様な気候変化シナリオの気温と降水量の変化範囲をほぼ網羅しており、どのような気候変化シナリオでも複雑な計算を省略してブナ林の分布確率の予測が可能となった。

現在がブナ林である地域の変化予測をみると、気温が現状より 2℃上昇する場合、同時に降水量が 40%増加すると分布適域は現状の 6 割に減少するだけだが、降水量が逆に 40%減少すると分布適域は現状の 2 割以下に減少してしまう。気温上昇が 4℃上昇すると、降水量が 40%増加しても分布適域が 1 割に減少してしまう。このように、温度上昇だけでなく、降水量の減少がブナ林分布確率を大きく低下させる。

松井哲哉・田中信行（森林総合研究所）

高橋潔（国立環境研究所）

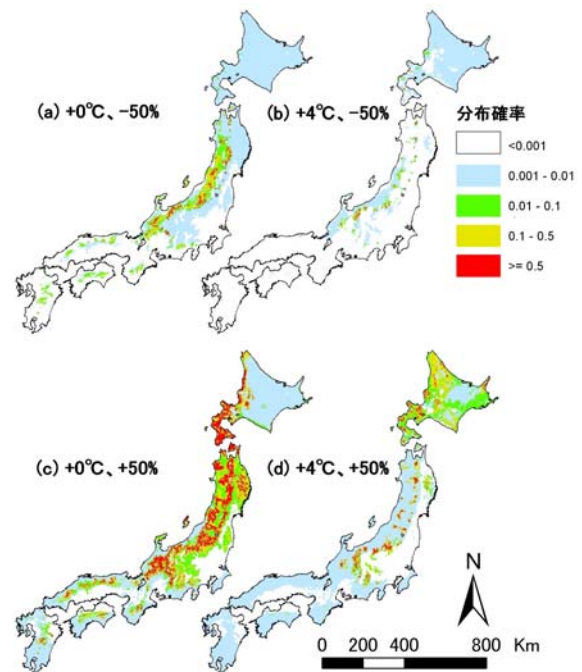


図 I-II-4 気温と降水量を現状から全国均一に変化させた場合のブナ林分布確率の変化予測。(a) 気温変化+0℃かつ降水量変化-50%, (b) +4℃かつ-50%, (c) +0℃かつ+50%, (d) +4℃かつ+50%の場合

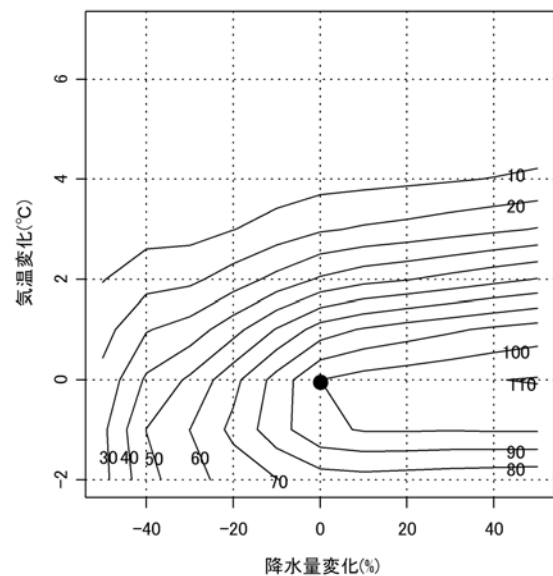


図 I-II-5 気温を 1℃きざみで-2℃から+7℃まで、降水量を 10%刻みで-50%から+50%まで現状から変化させた場合における、現存ブナ林メッシュセルにおけるブナ林分布適域セル（確率 0.5 以上）の割合（%）。現状は●の位置



ブナ林の経済価値は全国で6兆2千億円

2007年12月、名城大学都市情報学部の学生84人を対象に『森林生態系の保全に関する意識調査』を実施し、ブナ林の経済価値の評価を試みた。評価手法は仮想市場評価法CVM（Contingent Valuation Method）であり、また評価内容は日本全国のブナ林（約23,000km²）がもつ生物多様性維持機能の価値である。評価の結果、ブナ林の破壊を回避するための一人あたりの支払意思額は1,954円/年/人となった。この数値を年4%の社会的割引率で現在価値化すると、一人あたりのブナ林の経済価値は48,861円/人となる。この原単位に日本の総人口12,774万人を掛けると、全国に23,000km²あるブナ林の経済価値は2,497億円/年（現在価値6兆2,415億円）となる。

以上の結果は大学生84人のみのデータに基づいているので、そこに十分な信頼を置くことはできない。しかし、過去の経験から、今回のような大学生100人規模の『事前調査』と全国成人男女1,000人規模の『本調査』との間で、評価結果がケタ違いであったことはない。したがって、ここの示したブナ林の経済価値は、おおよそ妥当な推定であると考えられる。

大野栄治（名城大学）

(2) マツ枯れ

温暖化によりマツ枯れ被害が拡大する

温暖化によるマツ枯れへの影響を評価するために、MB 指数を用いて被害域の変化を予測した。マツ枯れ（マツ材線虫病）被害は、もともと北米にいたマツノザイセンチュウが木材貿易等に伴って世界各地にもたらされることにより拡大した。マツノザイセンチュウやその媒介者であるマツノマダラカミキリの活動は低温によって制限されるため、国内のマツ林については 15℃ を閾値とする積算気温（MB 指数）を用いてマツ枯れリスクの高い地域を推定できる。MB 指数はマツノザイセンチュウ及びマツノマダラカミキリの生育特性から推定された、マツ材線虫病の発生を予測するための指数で、MB 指数が 22 以上の地域はアカマツ林のマツ枯れ危険域、19 以下の地域は被害拡大の自然抑制域、19～22 は両者の移行域に区分される。現在のマツ枯れ被害は、日本海側平野部では秋田県八峰町（青森県境）まで、北上低地帯では岩手県紫波町まで、三陸沿岸部では大船渡市まで確認されている。

温暖化は、マツ枯れ被害リスクの拡大をもた

らす。図 I-IV-6 は現在の気温を元に毎月の平均気温が 1℃ ずつ上昇した場合の、マツ枯れ危険域、自然抑制域及び移行域を土地利用形態を考慮して計算したものである。1～2℃ の気温上昇によって、現在被害が及んでいない青森県の平野部にまで危険域が拡大すると予想される。また、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ことが懸念される。津軽平野のように、気温条件ではマツ枯れのリスクが予想されるが、被害がまだみられない地域もあり、被害域の北上が懸念されている。

2005 年夏の秋田県北限部での材線虫病発生を受け、青森県では日本海沿岸部の南北 6km に渡って集中的な監視を行い、さらにその南北両端部各 2km に渡ってマツ生立木を伐採して感染可能な木をなくしてしまう「防除帯」の設置が断行された。このような防除策を通して得られた経験は温暖化時の適応策を考える上で参考になる。

大丸裕武・中村克典（森林総合研究所）

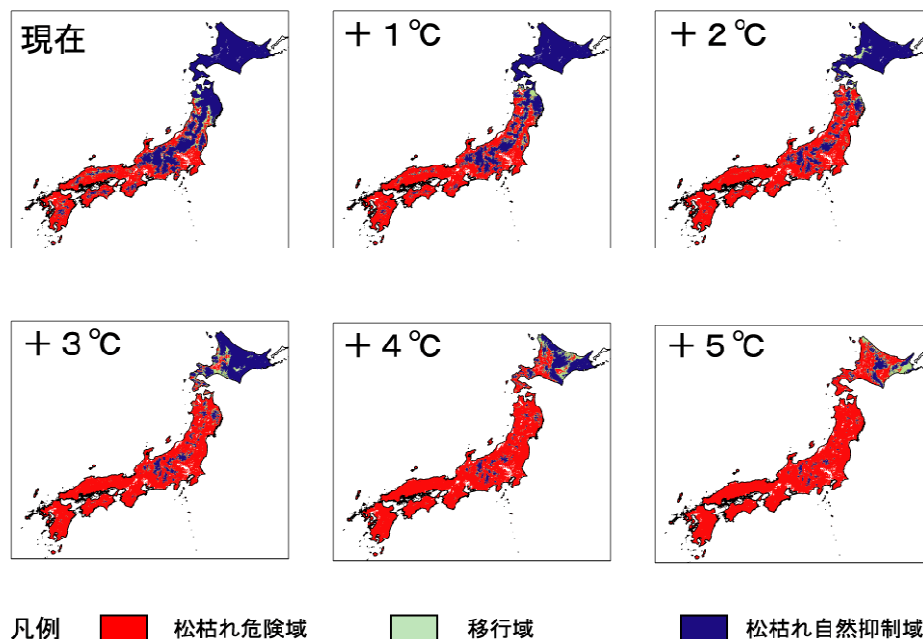


図 I-II-6 現在と温暖化時（+1～+5℃）におけるマツ枯れ危険域の予測

(3) チシマザサ

温暖化に対し低標高域のチシマザサ（ネマガリダケ）は脆弱である

植物社会学ルルベデータベース（PRDB）から抽出したチシマザサの分布データと、現在（気象庁 2002）および 2 つの気候変化シナリオ（RCM20、MIROC）を用い、本州東部の現在と温暖化後（2031-2050 年）における、チシマザサの分布適域を予測した。

チシマザサの分布適域は、寒冷かつ冬期降水量が多い地域にあり、現在の気候下では、東北

地方から新潟県にかけての日本海側を中心に分布していた。温暖化後は、RCM20、MIROC ともに、低標高域を中心に縮小すると予測された。現在の分布適域は、RCM20 では 54%に、MIROC では 45%に減少する。分布適域からはずれる地域では、温暖化に伴ってチシマザサの衰退が予想される。特に脆弱な地域は、分布適域がほとんど消滅する佐渡島である（津山ら、2008）。

津山幾太郎・田中信行（森林総合研究所）

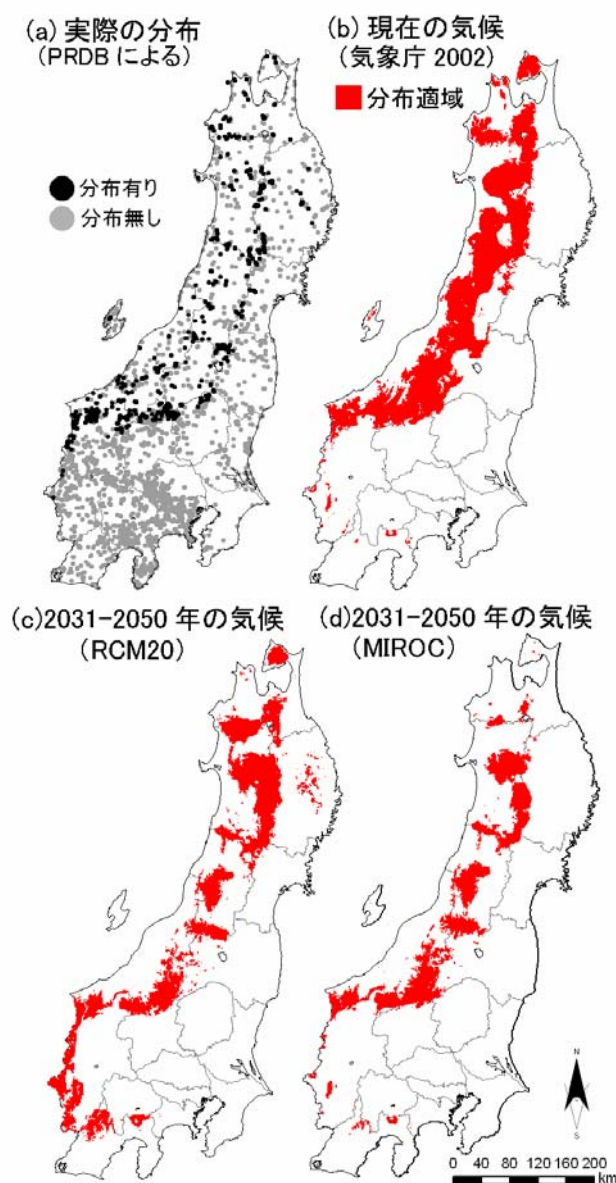


図 I-II-7 本州東部におけるチシマザサの (a) 実際の分布と、(b) 現在の気候と (c, d) 温暖化後における分布適域の予測

(4) 山地湿原

暖冬・少雪傾向に伴い山地湿原が縮小している

群馬県と新潟県の境にある平ヶ岳（山頂標高2140m）の頂上部には大小の湿原が分布している。この湿原は、排水の悪い地形部に大量の積雪があることによって成立している。この湿原は、ミズゴケ、ショウジョウスゲ、ヌマガヤなど湿原植物やイワイチョウ、コケモモなど雪田植物が生育している。湿原の周辺にはチシマザサ草原、ハイマツ低木林、オオシラビソ林などが分布している。

平ヶ岳湿原の経年変化を航空写真から精密に検討した結果、1971年から2000年までの30年間でその面積が約10%縮小したことが明らかとなった（安田ら、2007）。現地調査をしたところ、湿原の辺縁部はチシマザサ群落に変化していた。また、チシマザサ以外にもハイマツなど針葉樹が湿原へ侵入していた。

この地域では近年の暖冬傾向に伴って、積雪量の減少が認められている（安田・沖津 2006）。積雪量が減少すると、光合成が可能な期間が増加するとともに、湿原の基盤となっている泥炭が乾燥化して、湿原性ではない植物種が生育可能となる。このようなことから、チシマザサやハイマツの侵入による湿原の縮小は、暖冬・少雪化の影響と考えられる。将来的に気温上昇・少雪化が進んだ場合、湿原の更なる縮小が懸念される。

安田正次・大丸裕武（森林総合研究所）



図 I-II-8 湿原へ侵入しているチシマザサとハイマツ

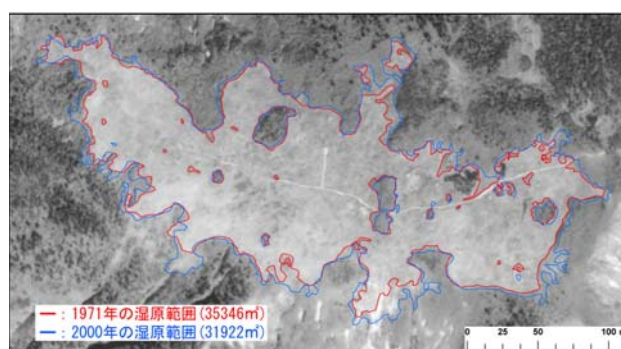


図 I-II-9 航空写真にもとづく1971年と2000年の湿原範囲の比較

(5) ハイマツ

東北地方のハイマツは温暖化に対して脆弱である

高山帯の代表種であるハイマツへの温暖化の影響を評価するために、ハイマツの分布を気候条件から予測するモデルを作成し、分布に適する地域（分布適域）を予測した。ハイマツの現在の分布は山地上部に限られ、山地間では分断されているので、温暖化後に分布が他の山地に移動することはないと仮定して、実際のハイマツの分布域内に限定した分布適合条件の変化を予測した。

ハイマツの実際の分布域における現在の気候下での分布適域の面積は 7,867km²であった。気

候変化後の 2031-2050 年には、RCM20 で 3,855km² (49%)、MIROC で 4,392km² (56%) に適域が減少する。2081-2100 年には、RCM20 で 2,456km² (31%)、MIROC で 1,061km² (14%) に適域が減少する。いずれの場合も、分布する山地の全てにおいて、適域の面積が縮小または消失することが予測された。特に東北地方では、2031-2050 年と 2081-2100 年において、RCM20 で 14%と 9%に、MIROCでは 6%と 0%にそれぞれ縮小すると予測され、特に脆弱な地域といえる。東北地方から適域が消失することにより、適域は中部山岳地域と北海道に大きく二分される。

堀川真弘・田中信行（森林総合研究所）

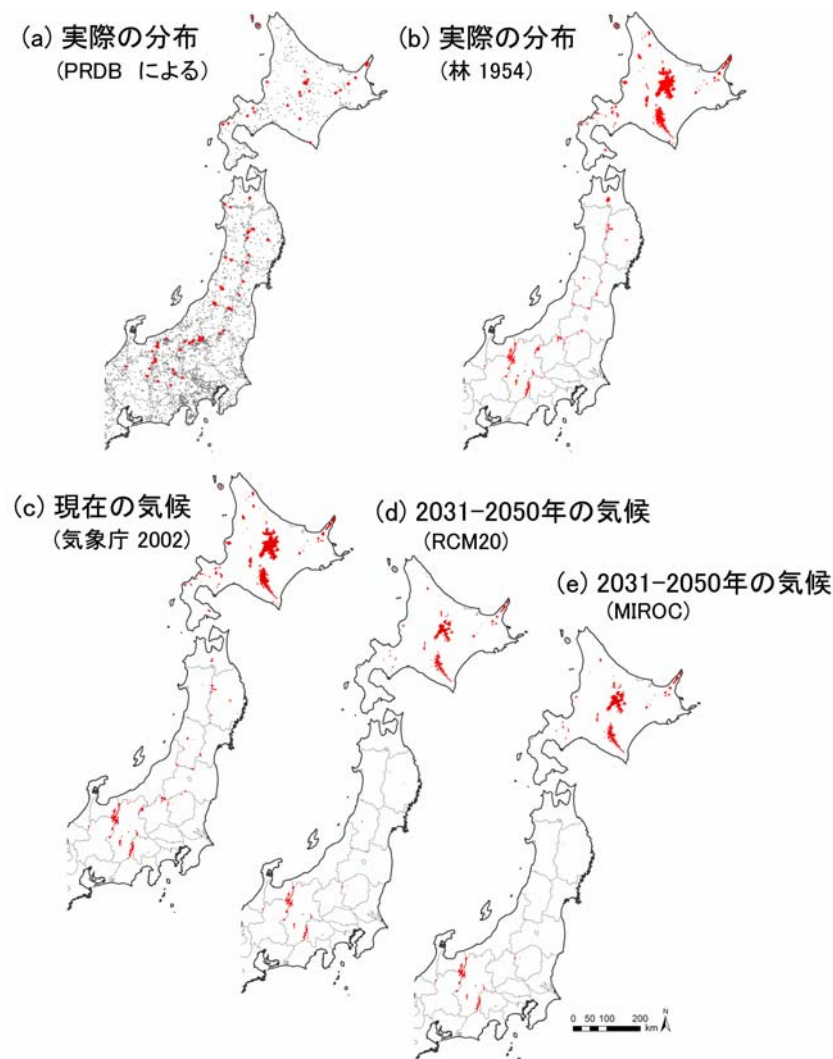


図 I-II-10 ハイマツの (a, b) 実際の分布、および (c) 現在の気候と (d, e) 温暖化後における分布適域の予測

(6) シラベ

シコクシラベは温暖化により絶滅が危惧される

シラベ（シラビソ）は、本州福島県から四国までの亜高山帯林の優占種である。四国には、高山の山頂付近にのみ分布し、シラベの1品種であるシコクシラベと呼ばれている。温暖化のシラベへの影響を評価するために、シラベの分布を気候条件から予測するモデルを作成し、気候変化シナリオ RCM20 と MIROC を組み込むことにより、温暖化後の分布に適する地域（分布適域）を予測した。

福島県以南本州と四国におけるシラベの現在の気候下での分布適域の面積は 3,859km² であった。気候変化後の 2031-2050 年には、RCM20 で 991km² (26%)、MIROC で 1,864km² (48%) に適域が減少する。2081-2100 年では、RCM20 で 879km² (23%)、MIROC で 509km² (13%) に適域が減少する。いずれの場合も、分布する全ての山地において適域の面積が縮小したり消失することが予想された。特に四国では、いずれのシナリオでも適域が消滅すると予測されることから、シコクシラベの絶滅が危惧される。

田中知行・中園悦子（森林総合研究所）

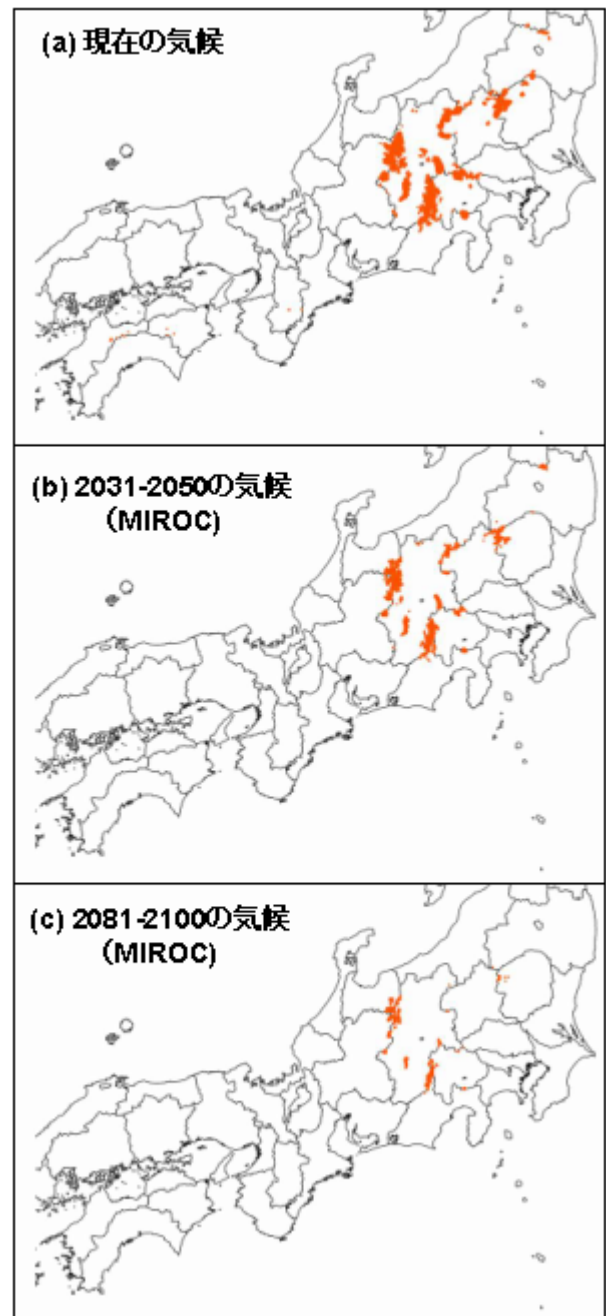


図 I-II-11 シラベの分布適域の変化（朱色）
現在の気候、気候変化シナリオ MIROC の
2031-2050 年と 2081-2100 年における予測

コラム

温暖化がニホンジカに与える影響

近年、各地でニホンジカの生息地が拡大していることが報告されている。その主要な原因として個体数の増加と、山地域の積雪深の減少の複合作用が指摘されている。ニホンジカは積雪深が 50cm を超えると活動や採食に支障が生じ、このような積雪状態が長く続くと死亡個体数が増加する。近年報告されているニホンジカの被害や目撃例が、これまで積雪によって分布が制限されていたと考えられる地域にまで及んでいることから、その原因の一つとして、個体数の増加とともに、1980 年代以降の積雪深の減少の影響が指摘されている。今後、温暖化の影響をより詳細に評価するためには、山地域の積雪深とニホンジカの分布の両方を正確にモニタリングしていくことが必要である。

大丸裕武（森林総合研究所）

参考文献：Li et al. 1996

3. 農業への影響

3.1 概要

世界の主要穀物（コメ、コムギ、トウモロコシ、ダイズ）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。第一に、気候変化および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、第二に、アジア諸国の経済発展、人口増加による食料要求量の増大と自給率の低下、第三には、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、である。最近、これにバイオマス燃料との競合が加わる。

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。

3.2 影響評価の対象と方法

(1) 我が国のコメ生産

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 I-III-1）。このモデルは過去の気象環境の状況から県別平均^{しゅつすいび}出穂日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影響を推定する。コメ収量を広域で評価するモデルの作成手順は以下のとおりである（横沢ら、2006）。

- 1) 土地利用分布データ（国土数値情報）を用いて各県における水田メッシュを抽出する。
- 2) 気象メッシュデータを利用して、1)で抽出した各県の水田メッシュにおいて平均した気象状況（日別の最高・最低気温および日射量）を計算する（県平均水田気象データ）。
- 3) 1979～2003年の25年間を対象として、2)で作成した県平均水田気象データを入力し、県別農林統計による平均の移植日、出穂日、収穫日および収量のデータと比較しながら非線形最適化法を利用してモデルのパラメータを決定する。ただし、パラメータの決定は対象期間内の奇数年について行い、偶数年も含めてモデルの検証を行う。これを全県について行う。

本モデルは日本の代表的な水稻生育・収量予測モデルである SIMRIW と同様の構造を持つ。しかし、これまでの水稻生育・収量予測モデルは圃場スケールの現象を対象とし、かつ品種、栽培管理などの詳細な情報が必要であり、日本全国を広域的に評価するには適していない。それに対して本モデルは県の平均ではあるが、過去の生育状況、収量変化の実際を統計的に反映し、かつ作物の環境応答の機構を取り込んで将来の気候変化による影響を定量的に推定できる点に特徴がある。また、過去の収量の年々変動を定量的に再現し、かつモデルのパラメータの不確実性も考慮するために、ベイズ推定法を援用した。これにより、確率的に収量の年々変動を再現することが可能となった点も従来にない本モデルの特徴である（図 I-III-2；Iizumi et al.

2008)。

本モデルは県平均の生育、収量の変動を対象としているため、特定の品種に対する影響を表しているわけではなく、対象とする県でこれまで用いられてきた品種の平均特性を反映している。また、本モデルは降水量を入力としていない。なぜなら、わが国は農地の基盤整備がすすんでおり、降水量不足に起因する被害報告が過去 25 年間に於いてほとんど無いため、モデル構築に利用できないからである。将来の気候シナリオにおいても、わが国のコメ生産に対して降水量が総量で不足するという推計はないが、水資源影響の項でも指摘されているように、例えば、降雪の減少が代かき、田植え時期の水不足を引き起こす可能性はある。また、害虫についても温暖化に伴う発生回数、発生量が増加するという推定結果もある。このように、水資源量

の変化ならびに病虫害、雑草などとの相互作用を含み、水田生態系への影響を総合的に評価することは今後の課題である。

加えて、本影響評価では収量のみに着目するが、次節でも述べるように、食料供給の影響評価は作付面積と収量の積で与えられる生産量を基に行う必要がある。気候変化によって現在の作付可能地域が移動する可能性は高まるが、作付面積は自然環境だけでなく国内および国外の経済状況、人口、政策などとの関係で決まる。自然環境要因だけでなく社会科学的要因をも取り込み、国内の詳細なスケールで生産量を推定する研究はまだ無く、今後の課題である。本評価では、現在の栽培地域、技術水準、品種、管理を仮定して、気候変化によるコメ収量への影響を解析する。社会経済要因を考慮した食料需給への影響については国単位で行った。

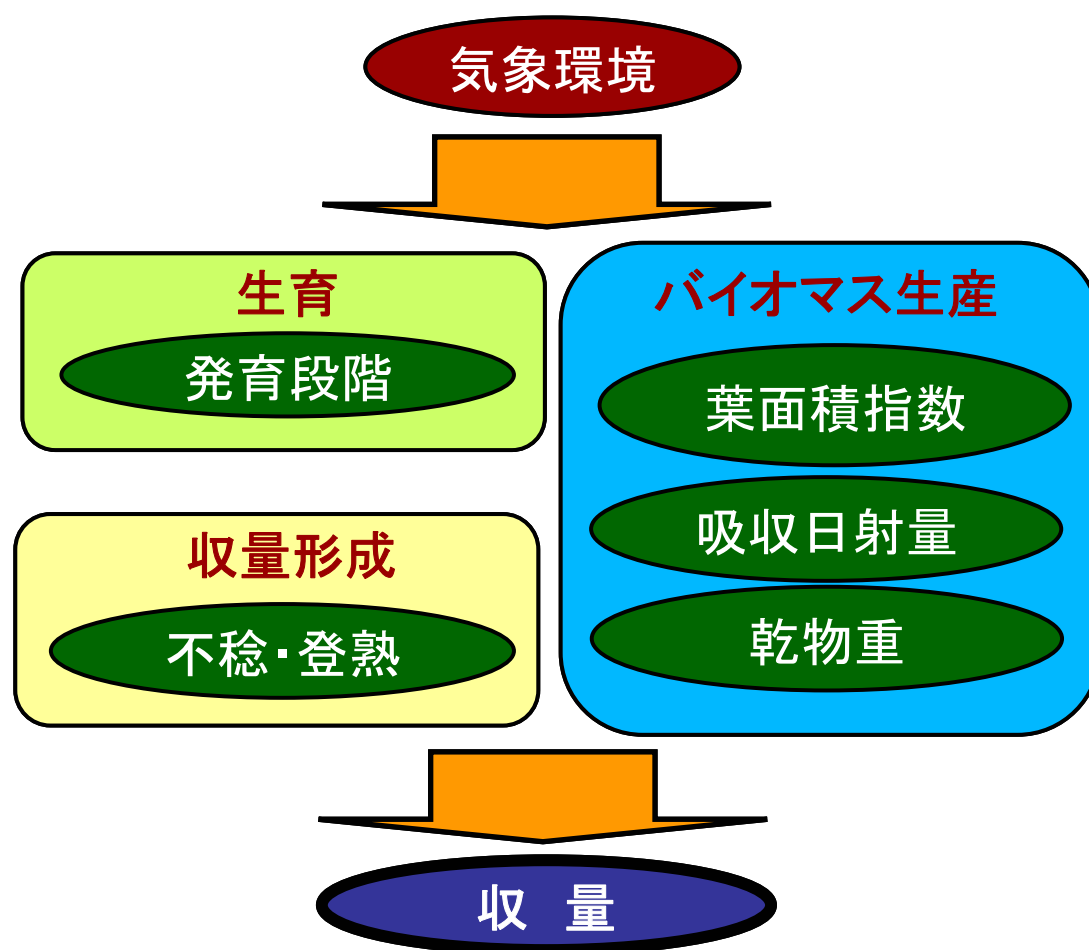


図 I-III-1 県別コメ収量推定モデルの構造

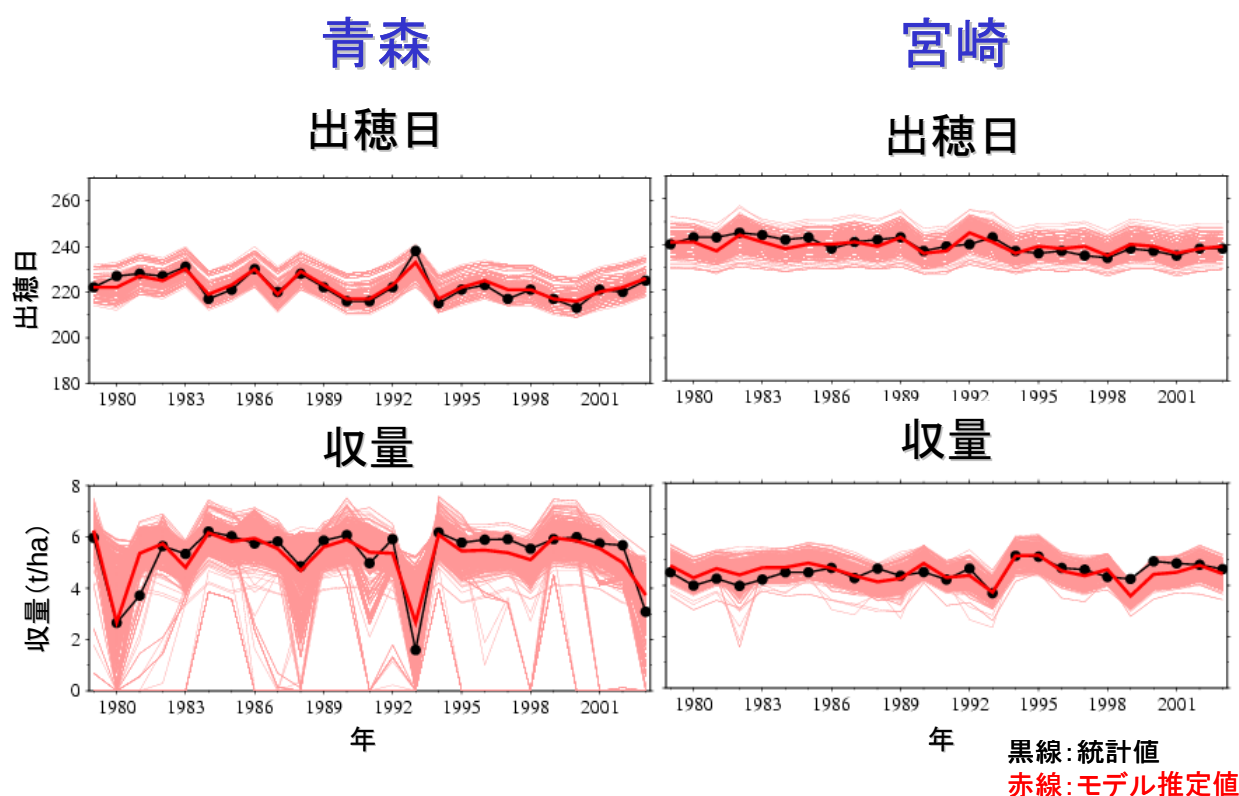


図 I-III-2 県別コメ収量推定モデル推定値と統計値との比較例

(2) 世界食料モデルによる温暖化の影響予測

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。世界食料モデルに気象変数の予測値を入力して、気温上昇が世界の農産物の生産量や供

給量にどのような影響を与えるかを推計した。

本評価で基本とした世界食料モデル（IFPSIM）は、収量、作付面積、輸出、輸入、在庫、価格連結の各関数から構成され、14の品目と32の国・地域を対象としている（Oga and Yanagishima, 1996）。対象とする作物は、小麦、トウモロコシ、他粗粒穀物、コメ、大豆であり、他粗粒穀物は、大麦、ライ麦、オート麦、キビ、ソルガムを含む。Furuya and Koyama（2005）は、気温と降水量を変数に含む収量関数を作成し、それをIFPSIMの収量関数と置き換えた。計測式は次のようなものである。

$$\ln YH_t = a + b_1 T + b_2 \ln TMP_t + b_3 \ln PRC_t \quad (1)$$

ここで、 YH は収量（単位面積当たり生産量）、 T はタイムトレンド、 TMP と PRC は開花期の気温と降水量である。また、「見せかけの相関」が検出された場合は、次のような階差型の関数を計測した。

$$d\ln YH_t = a + b_2 d\ln TMP_t + b_3 d\ln PRC_t \quad (2)$$

ここで、 $d\ln YH_t = \ln YH_t - \ln YH_{t-1}$ 、 $d\ln TMP_t =$

$\ln TMP_t - \ln TMP_{t-1}$ 、 $d\ln PRC_t = \ln PRC_t - \ln PRC_{t-1}$ である。気温と降水量のパラメータ b_2 と b_3 のうち、有意水準 10%以上の値を用い、他は 0 とした。

ただし、アメリカと欧州連合（EU）の小麦、トウモロコシ、他粗粒穀物、コメ、および全ての国・地域の大豆は、次に示す価格に反応する収量関数を用いた。

$$\ln YH_t = a + 0.1\ln(PI_{t-1}/PI_{t-2}) + b_1T + b_2\ln TMP + b_3\ln PRC \quad (3)$$

ここで、 a は調整された切片、 PI は補助金を含む価格、 b_1 、 b_2 、 b_3 はそれぞれタイムトレンド、気温、降水量のパラメータである。その他の単収関数は、(1) 式に同じである。

図 I-III-3 に、世界食料モデルの作物部門におけるリーダー国に関するフローチャートを示した。図から分かるように、収量、面積、生産量、輸入量、輸出量、在庫量、需要量は内生変数、すなわちモデルの内部で決まる変数であり、人口、国内総生産、気温、降水量は外生変数、

すなわちモデルの外部から与えられる変数である。

収量関数に含まれる気温と降水量に関するパラメータは、Furuya and Koyama（2005）が決定したものを使用する。それ以外の需要の価格弾力性等のパラメータは IFPSIM と同じである。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。

気候温暖化影響のシミュレーションの仮定は、次の通りである。

- 1) 栽培暦に変更はない。
- 2) 栽培地域は移動しない。
- 3) 収量は気象変化の影響を直接受ける。
- 4) 気温と降水量は HadCM3（SRES-A2）の気候温暖化シナリオに従って変化する。

すべてのパラメータは変化しない。

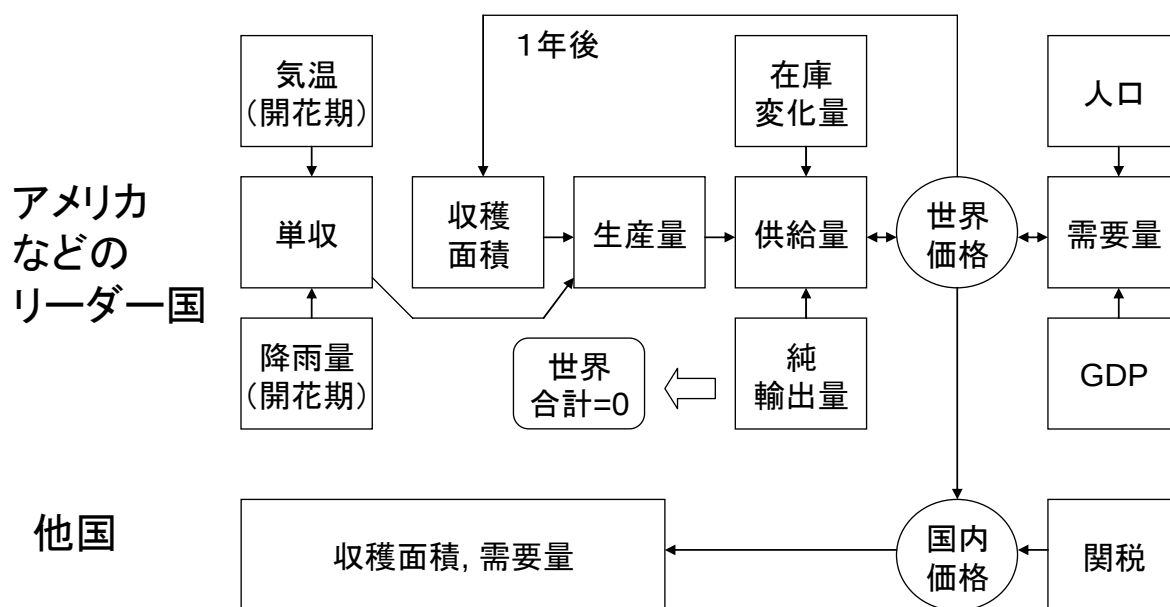


図 I-III-3 世界食料モデルの作物部門の構造

3.3 農業影響の将来予測

(1) わが国のコメ収量

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

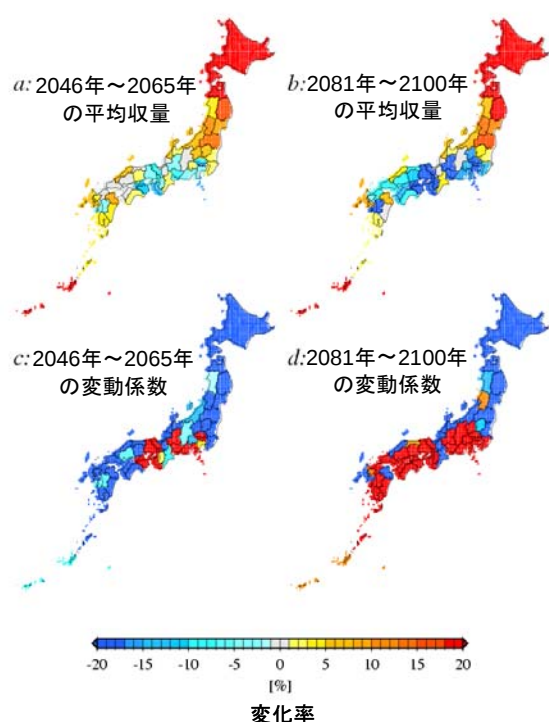
コメ収量は、移植（田植え）から出穂までの栄養生長過程と出穂から収穫までの稔実・登熟過程における気温と日射量によって決まる。気温上昇は生育を速めてバイオマス蓄積、出穂後は子実形成に影響を与える。水稻の生育過程と気象環境との関係に基づいて、過去のデータを再現する県別コメ収量推定モデルを作成し、気候シナリオ（MIR0C, A1B）を入力してコメ収量の変化を推定した。

その結果、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I-III-4a）。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I-III-4b）。本推定結果では、北日本では増収、西日本では

現状維持かやや減収する傾向については既存の研究結果と同じであるが、平均収量の地域分布が従来とは異なる。今回使用したシナリオでは、太平洋高気圧の影響により、高温による減収が中部日本を中心に現れる。

3.2でも述べたが、ここでの評価は気温、日射量、ならびに大気中の二酸化炭素濃度の3つの気象環境変化に対する影響のみを考慮したものである。他の要因との相互作用を取り込んだ総合的評価は今後の課題であるが、コラム「水田生態系の脆弱性」で示した融雪水資源および害虫の影響を簡易に取り入れた評価例はその参考になると思われる。本研究とコラムで紹介された研究では、気候変化シナリオ、コメ収量推定モデルの構造は異なるため、定量的比較はできないが、収量変化の地域による傾向（北日本の増収と西日本の減収など）は同様である。図I-III-5から、本影響評価でコメ収量が増収すると推定された地域、とくに東北、北陸の日本海側（図I-III-5の地図で赤、黄色の地域）においては、融雪期の水資源量の変化の影響を受けて減収になる可能性が示唆される。

横沢正幸・飯泉仁之直（農業環境技術研究所）



図I-III-4 気候シナリオ（MIR0C、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（標準偏差と平均との比）の変化率を表す。変化率は対象期間の値（2046～2065年あるいは2081～2100年）と現在の値（1979～2003年）との差と現在の値との比で定義した

コラム

水田生態系の脆弱性

気候変化が日本の農業生態系におよぼす影響を評価するためには、気象要因だけでなく、農業用水資源の不足や病害虫の発生などの他の生育阻害要因も考慮に入れた総合評価が求められている。ここではそのような研究例を紹介する(西森ら, 2008)。平均気温が約 2℃ 上昇した場合(おおむね 2060 年代を想定)におけるコメ収量、降積雪量および害虫の世代交代速度の変化を全国 10km メッシュの単位で推定し、それらの影響を重ね合わせることにより、温暖化によって水田生態系が受ける負の影響の強さを評価することにより、脆弱な地域を検出することを試みた。

まず、登熟期の気温を変数とする回帰推定式を用いて、最大のコメ収量が期待される適温を推定した。北陸、南関東および九州北部では、現在の気候条件における適温より高温の条件で栽培されているため、温暖化による高温ストレスの影響を受けやすい(西森ら, 2002)。次いで、温暖化時の気温変化から降積雪量の変化量を推定すると、東北～北陸の日本海側では、降雪量が約 15% 減少し、また融雪時期も現在より早まる(井上ら, 2001)。よって、これらの地域では水稻の代かき・田植え期に河川水量が減少し、農業用水が不足する可能性が高くなると考えられる。さらに、有効積算温度則を用いてヒメトビウンカの発育速度を推定した結果、温暖化時には発育速度が速まって世代数が増え、イネ縞葉枯病の多発危険地域が、東北～北陸および関東南部に広がると予測された(Yamamura et al., 2006)。

以上の結果を総合すると、温暖化時には、北陸地方が気象、水資源、害虫の 3 つの生育阻害要因の変化が同時に水稻生産に負の影響をおよぼす、すなわち最も脆弱であると推定された(図中の白色の地域)。次に脆弱な地域は、東北日本海側地域(水資源と害虫の変化に脆弱：図中黄

色)および南関東地域(気象と害虫の変化に脆弱：図中水色)と推定された。

なおここでは、要因相互の関係、品種や土壌の違い、および作付体系の変更などの適応策などは考慮しておらず、今後の課題である。

西森基貴(農業環境技術研究所)

参考文献：西森ら(2008), 西森ら(2002), 井上ら(2001), Yamamura et al. (2006)

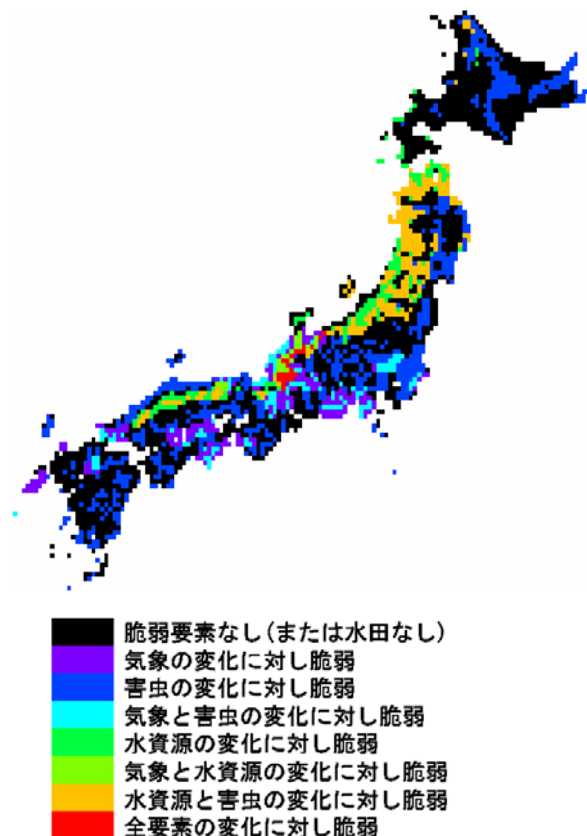


図 I-III-5 10km メッシュで見た日本のコメ生産における気象(高温ストレス)、害虫(ウンカ世代交代)および水資源(降雪量減少)の 3 要素から見た脆弱性の分布

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

1993 年には、日本がコメの大凶作のために 250 万トン規模（世界貿易量の約 2 割）の緊急大量輸入を行い、世界のコメ市場を大きく混乱させた。韓国は 1980 年代初頭に 200 万トン規模の緊急輸入を行った。また、1988 年まで約 100 万トンも輸出した中国が、1989 年には不作と需要拡大で逆に 120 万トンも輸入、その後 1993 年の日本の不作時に 100 万トンをわが国に供給したのが、1995 年には一転して 200 万トン近くを輸入するなど、過去にも不安定な生産状態が出現した。ここで使用した県別コメ収量推定モデルは、過去の収量の年々変動を再現できる。このモデルが将来の環境下でも妥当であると仮定し、MIROC が出力する年々変動を含む気候変化シナリオを入力することで、将来の収量の年々変動について推計を行った。

図 I-III-4c 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の変化を示している。変動係数はその期間の値の標準偏差を平均値で除したものと

て定義される。したがって、標準偏差が増加あるいは平均値が減少すると変動係数は大きくなる。その結果、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た。この結果は、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し、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 I-III-6 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（コラム「水稲冷害の可能性」を参照）。ただし、気候モデルおよび影響評価モデルの年変動予測の信頼性はまだ低いため、複数の気候シナリオ、モデルの利用、評価の仕方などを工夫する必要がある。

横沢正幸・飯泉仁之直（農業環境技術研究所）

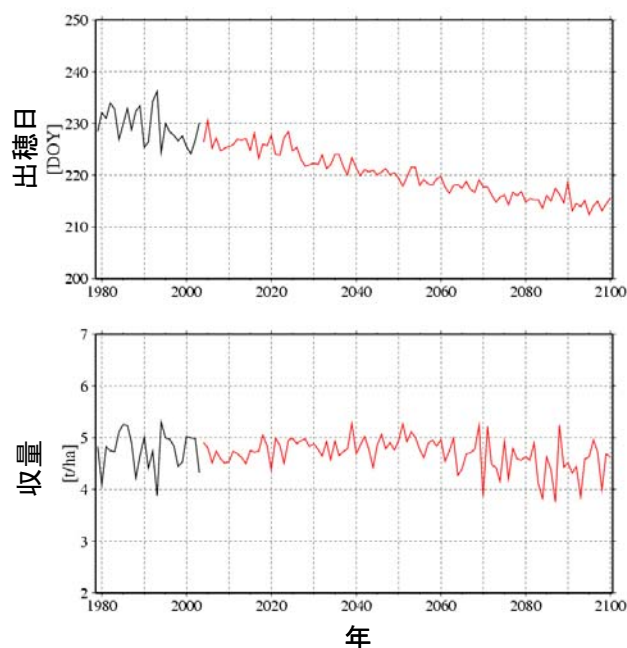


図 I-III-6 全国平均収量の時系列推定値（MIROC, A1B シナリオ）

コラム

水稻冷害の可能性

IPCC(2007)によると、最近 100 年で 0.74°C 気温が上昇した。特にこの 30 年間の昇温傾向が顕著で、今後 100 年間でさらに $1.1\sim 6.4^{\circ}\text{C}$ 上昇することが予測されている。地球温暖化は平均気温の上昇として捉えられているが、日平均気温が漸次上昇するわけではなく、一定の地域に高温をもたらす気象システムの発現頻度が卓越するようになるものと考えるのが一般的である。

農業、なかでも水稻栽培は年々の気象が重要であり、季節予報などの確度に限界があるなかで、毎年リスクを抱えて営まれている。図 I-III-7 は 1883 年から 2004 年の日本の水稻収量と年平均気温の変化を示している(林, 2005)。収量は赤い実線で回帰直線はオレンジ色の実線、年平均気温は青の破線で回帰直線は水色の一点鎖線で示してある。両者とも上昇傾向を示すため気温上昇が収量増加の要因であるかのように見える。しかし、それは見かけ上の相関関係に過ぎない。すなわち、1970 年代から 1980 年代の気温と 1940 年代後半から 1950 年代の気温には大きな違いがないが、それらの期間の収量を比較すると、前者の期間の収量が後者より $100\text{kg}/10\text{a}$ ほど大きい。収量の変化には、近年の栽培技術や品種改良が大きく寄与している。収量変動に潜在する温暖化のシグナルを抽出す

るためには、そうした人為的な効果を差し引いて考えなければならない。

さて、地球温暖化が進行すると冷害はなくなるだろうか。図には同時に冷害発生年に該当する年(横軸上)に丸印を付けて示した。冷害年は、収量と気温が相対的に低下した年に一致している。122 年間を通してみると、最近でも冷害が頻発していること、平均気温が低い過去ほど冷害年が多いとはいえないこと、が明らかである。むしろ、温暖化の影響軽減策として対暑性のある品種の栽培が拡大すると、ひとたび冷夏になると甚大な被害を受ける危険性が予想される。年々の平均気温の振幅は温暖化による気温上昇の幅を超えるため、冷害は今後も発生すると考えられる。

なお、これまでの大規模な冷害は東北地方で発現し、その要因はヤマセであることが知られている。林ほか(1999)によると、東北地方でヤマセが起こる気圧配置のもとでは同時に韓半島の日本海側でも類似の寒冷な北東気流が襲来し、両地域で同時に水稻冷害が発生することが示されている。こうした気象システムの発現が温暖化の過程でどのように変化するかが、北東アジアの水稻栽培に重要な問題である。

林 陽生(筑波大学)

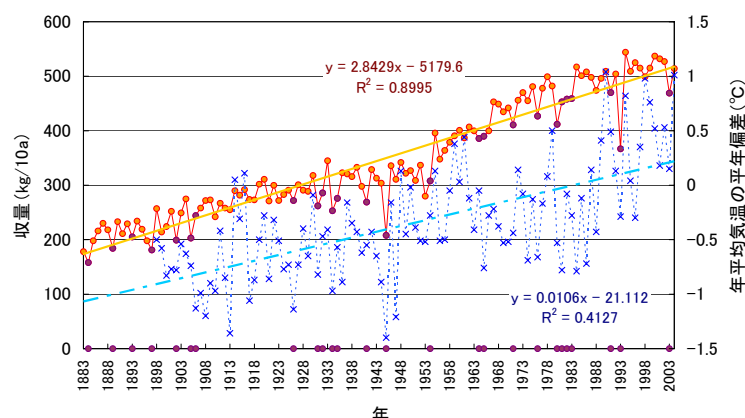


図 I-III-7 水稻収量および年平均気温の変動

赤実線とオレンジの回帰直線は収量(左縦軸)について、青破線と水色の一点鎖線は平均気温(右縦軸)を示す。

コラム

水稲収量に対する高温と寡照の複合影響

最近 20 年間における地域別の水稲作況指数を図 I-III-8 に示す。九州地域では、1991 年の台風被害、1993 年の冷害などとともに、1999 年および 2004 年以降、作況指数の低下が起こっている。この現象は登熟期間の高温による負の影響と考えられ、地球温暖化が水稲栽培に及ぼす影響の具体的な事例として重要であり、対策が必要である（農林水産省、2006）。これを受けて、従来品種に代わり高温耐性にすぐれかつ良食味の品種「にこまる」の開発が進み、2007 年から福岡県や佐賀県で栽培されはじめている。

水稲の登熟度に関する研究によると、登熟度は温度条件のみならず光条件にも依存することが知られている。そこで、舩屋（2008）は、1999 年と 2004 年の九州地域の作柄表示地帯を対象として、出穂後 20 日間の平均気温（最高気温、最低気温）と日照時間の出現傾向を調べた。その結果を図 I-III-9 に示す。赤色が 1999 年、黄色が 2004 年を、また、最高気温を基準にした場合を○、最低気温の場合を△で示してある。対象とした 2 年以外の年については、灰色で示してある。日最高気温の場合について見ると、両年とも、分散した集団の左上に分布している。日最低気温についても同様の傾向が現れている。このことは、1999 年と 2004 年の作況指数の低下は、相対的な高温条件と少日照時間が複合した気象条件に応じて発生したことが考えられる。

高温と寡照が複合した効果により作況指数の

低下の規模が増大するメカニズムについては、さらに解明が必要である。こうした現象をモデル化し将来予測に活用することが望まれる。

林 陽生（筑波大学）

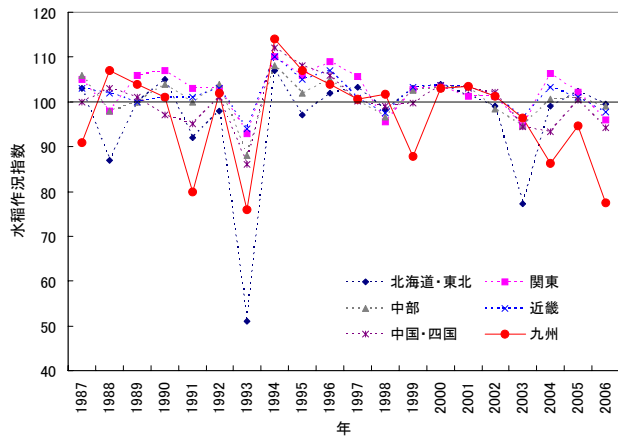


図 I-III-8 地域別水稲作況指数の年次推移

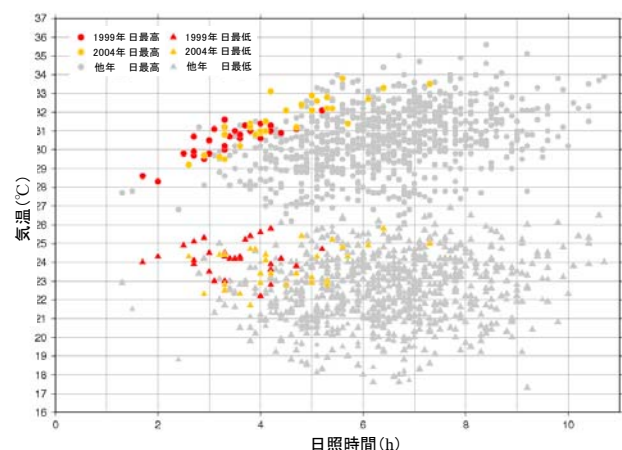


図 I-III-9 1999, 2004 年の出穂期後 20 日間の日最高・日最低気温と日照時間の関係

(2) 世界食料モデルによる気候変化の影響予測

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。2030 年代まで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

気候変化が世界の食料需給へ及ぼす影響、ひいてはわが国への食料供給を評価するために、世界食料モデルを用いて、気温、降水量の変化に伴う主要穀物の生産量変化を算定した。ここで使用した気候変化シナリオは、GHG 排出シナリオ SRES-A2 に従って、英国ハドレーセンターの GCM (HadCM3) で推計されたものである。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。

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 I-III-10 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、トウモロコシと大豆の生産量の年間増加率は、それぞれ 0.55%、1.81%に低下する。大麦、ライ麦などの他粗粒穀物生産、およびコメ生産については、ベースラインの場合、ほとんど増加しないが、気候変化した場合には、それぞれ年間 0.10%、0.26%の減少へと転ずる。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。

アメリカにおける気候変化による畜産物生産への影響について、図 I-III-11 は、2005 年から 2030 年までの各畜産物の年間平均生産量の増加率を示している。気温が上昇すると、家畜体

内に熱が蓄積され、増体量や泌乳量が減少し、肉質や乳質も低下するが、ここでは、トウモロコシ等の飼料生産の変動による影響のみを考慮する。ベースライン気候の場合、牛肉、鳥肉、鶏卵、生乳の生産は、それぞれ年間 0.79%、1.61%、1.78%、1.04%の割合で増加するが、気候が変化した場合、牛肉の年間生産量増加率は、0.76%に低下する。豚肉生産は、ベースラインでは年間 0.12%の減少となるが、気候変化があった場合、年間 0.18%の減少となると算定された。気候変化の畜産物生産に与える影響を飼料生産の変化のみを通して見た場合、牛肉と豚肉生産に与える影響が大きいと推定される。

わが国への食料供給量がどのように変化するか検討しよう。ここで、供給量は、生産量に輸入量と期首（去年の）在庫量を加え、輸出量と期末（今年の）在庫量を引いたもので、国民の総需要量に等しい。なお、飼料としての需要量も含んでいる。図 I-III-12 は我が国の穀作物の供給量の年間増加率を示している。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 I-III-13 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。また、温暖化によってある地域の生産量が減少すれば、当該農産物の価格は上昇し、生産者は生産を増やすための手段を講じるだろう。この場合、意志決定から生産物を得るまで、耕地の整備などに時間を要するかもしれないが、長期的には世界全体の生産は回復すると考えられる。

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。

本評価のような社会経済状況を反映させた将来の長期推計は極めて難しい。他の産業セクターとの相互作用を考慮する必要があるとともに、特に農業の場合、政策などの外生的要因によって推計が大きく変わるためである。また、ここで示した推計結果は生産量の平均的な趨勢、すなわちトレンドの変化予測であるが、年々の気象変動、あるいは投機などによっても価格、生産量は大きく変動する。さらに最近は、穀物はバイオマス燃料としての需要もあり、予測をさらに困難にしている。

古家 淳（国際農林水産業研究センター）

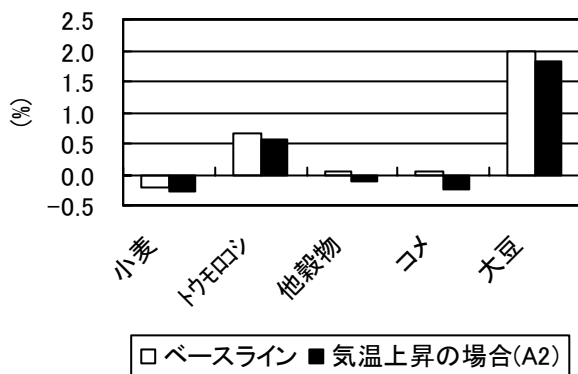


図 I-III-10 アメリカの穀作物の年間生産量増加率

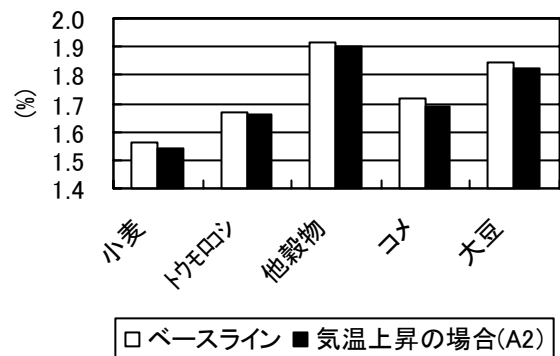


図 I-III-12 世界の穀作物の年間生産量増加率

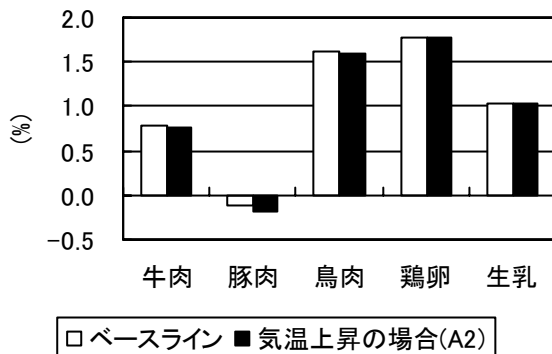


図 I-III-11 アメリカの畜産物の年間生産量増加率

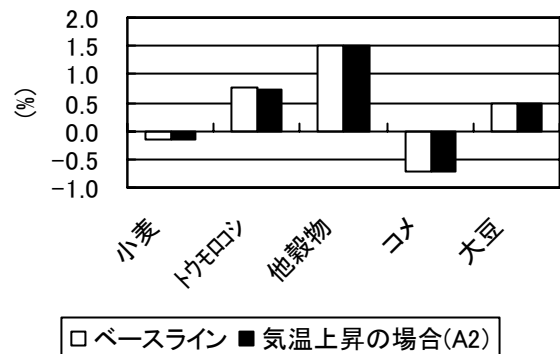


図 I-III-13 日本の穀作物の年間供給量増加率

コラム

変調するメコンデルタのコメ生産

モンスーン・アジアの稠密な人口はこれまで「コメ」に支えられてきたと言っても過言ではないし、今後もこの扶養関係は変わらないだろう。これらの地域におけるコメ栽培の多くは厳しい自然環境条件に大きく左右されながら営まれており、気候変動に対しても生産基盤が高度に発達した日本等の稲作とくらべるとさらに敏感であると予想される。モンスーン・アジアの自然環境は地域ごとに多様であるため、コメ生産の変動を引き起こす鍵となる要因もまた地域ごとに様々である。

ここでは例として、世界でも有数のコメの大生産地帯であるベトナム・メコンデルタの塩水遡上問題について紹介したい。塩水遡上とは、海面潮位が河川の水位より高くなった時に、海水が河川水路をさかのぼり内陸部にまで浸入する現象である。特にデルタは低平な土地であるため塩水が遡上する範囲は広く、また、その程度は潮位や河川流量の変化に伴って日・季節・年で大きく変動する。将来においては海面上昇や河川流量の減少によってその規模がさらに拡大することも懸念されている。当然、塩分はイネの生育にとって好ましいものではない。現状においては塩水遡上の季節周期性に適応した作付暦、つまり塩分濃度が低くなる時期に集中

的に栽培することによって、イネの生育への影響はおおよそ回避され高い収量が維持されている。ところがこの適応策にも塩水遡上規模の拡大に対しては盤石とはいえない面がある。

塩水遡上規模の拡大によって栽培に適した塩分濃度が低くなる期間は短縮する。そのためこれまでの塩水遡上の季節周期性に合わせた栽培様式では、例えばこれまで年間2回収穫できていた農地が1回しか収穫できなくなるなど、塩水遡上がある限界を超えると作付可能回数の減少が避けられない事態が起きると予想される。これはメコンデルタのコメ栽培可能面積が失われ、生産能力が確実に低下することを意味している。また中には、わずかな塩水遡上の拡大でさえ突如として栽培不可能となる、極めて破局的な性質をもった農地も少なくないことが、我々の最近の研究によって明らかになってきた(図 I-III-14 の赤色の地域)。

このような塩水遡上問題地域に限らず、モンスーン地域の稲作では雨季や季節洪水等の自然の周期性に合わせた栽培様式は多くみられる。したがってメコンデルタでみられたような、わずかな環境変動によって現在の栽培リズムが変調し、それがコメ生産に大きく影響する危険性はどの地域でも存在しうる問題であると考えられるのである。

小寺昭彦・横沢正幸(農業環境技術研究所)

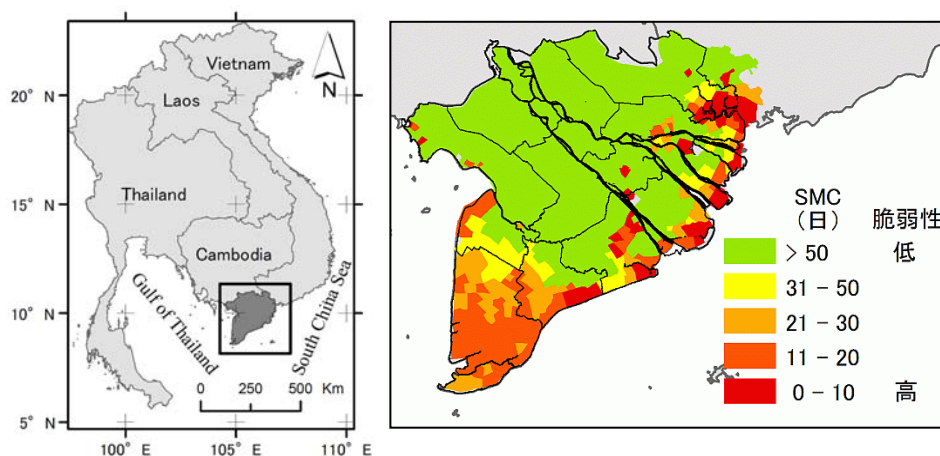


図 I-III-14 ベトナム・メコンデルタ 1998 年における塩水遡上の季節変化と降雨パターンからみた稲作の脆弱性空間分布

SMC(Safe margin for cropping) = [栽培可能日数] - [栽培必要日数]

SMC は現行の作付回数が維持できる栽培可能日数減少の限界を表し、SMC が短いほど塩水遡上の拡大や降水量の減少に対するコメ生産の脆弱性が高いことを意味する

コラム

中国における日本型コメの栽培

中国における主要穀物の生産量の変動予測は、食料安全保障に欠かせない要素である。なかでも食味のよいジャポニカ・タイプのコメは、近年の中国国内の需要の増大とも関連して、東北平原で急速に栽培面積が増大している。従来中国で栽培されてきた品種は、収量性の点で優れたインディカ・タイプやハイブリッド・タイプが主で、華中や華南地方を中心に栽培されている。

矯・許（2004）によると、農村生産体制の改革が始まった 1980 年代以降における中国全体の水稲栽培面積は減少傾向にあり、1979 年～2003 年の 25 年間で約 16.5%減少した。地域別にみると、特に華南地方で減少（-23.4%）した。一方、東北平原一帯では著しい増大（+92.5%）となった（図 I-III-15）。東北平原のなかでも、黒龍江省における栽培面積拡大が著しく、25 年間でほぼ 7.5 倍である。2000 年における省別の播種面積を比較すると、黒龍江省は第 9 位（160.6 万 hm²）で、第 1 位の湖南省（389.6 万 hm²）の約 41%に達している。

2007 年夏に行った現地調査では、水稲栽培の北限といわれる黒龍江省の北緯 50 度に位置する黒河（図 I-III-16）で、農地の約 30%が水田であり栽培面積が増え続けている。このように、従来は華中を中心としたコメ生産地帯が北方へ移動する傾向が継続すると考えられるため、温暖化と中国東北平原のコメ生産との関係解明は重要な研究課題である（Jiang et al. 2007）。

林 陽生（筑波大学）

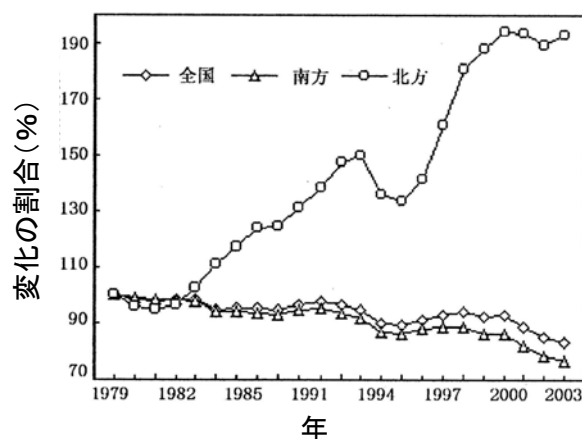


図 I-III-15 1979 年を基準とした中国における水稲栽培面積の変化

全国：中国全体、南方：華南地方を中心とした地域、北方：東北平原を中心とした地域（矯・許，2004）



図 I-III-16 中国黒龍江省黒河（北緯 50 度）の水稲栽培（撮影：林）

4. 沿岸域への影響

4.1 概要

温暖化によって人間が居住する地域として最も影響を受けるのは沿岸地域と河川の沿岸域と考えられる。特に、温暖化によって台風の数が増えたり、大きくなったりすると、最も影響を受けるのは海岸沿岸域である。その影響も要因が重なり合うと、起きる災害が大きくなる。このように要因が重なり合って生じる災害をここでは、複合災害と呼んでこのことを重視している。図 I-IV-1 はこのような複合災害を模式的に示したものである。これによると、ここでいう複合災害は、水にかかわる災害（水災害）と土や地盤にかかわる災害（地盤災害）に大別されることがわかる。

このような複合災害は図 I-IV-2 に示すように、温暖化の要因が重なり合って起きるものと、温暖化にかかわる要因と温暖化に関係しない現象が重なり合って生じる災害に分けられることも分かる。したがって、ここでいう複合災害の事例としては、以下のようなものが考えられる。

- ①海面上昇を受ける沿岸域に大きな台風が襲ってきたために、高潮氾濫が拡大するというように、温暖化による複数の現象が重なり合って生じる大きな災害
- ②温暖化によってもたらされる海面上昇や集中豪雨と、温暖化とは無関係の地震などの変動が重なったときに起きる災害

とくに、我が国の大都市は沿岸域の低平地に立地していることなどもあって、とくに、

自然の脅威には脆弱である。したがって、これらについて予測して、対応策や適応策を考慮しておくことが重要である。これまでの研究によって以下のようなことが明らかになっている。

①温暖化が進んだとき、三大湾（東京湾、伊勢湾、大阪湾）奥部では、古くに開発された埋立地とその周辺で高潮による浸水の危険性が高い

②気候変動による海面上昇と降雨特性の変化によって、液状化の危険性が高いエリアが沿岸域で拡大する

③海面上昇によって消失する砂浜や干潟の経済的価値は相当大きい

④海面上昇に伴い河川に塩水が遡上することによって河川堤防が劣化や損傷する可能性がある。そのメカニズムを明らかにし、日本全国レベルでの河川堤防の温暖化に起因する降雨に対する脆弱性を概略的に表示した

⑤温暖化に伴う豪雨沿岸域に隣接する斜面では災害が起きる危険性が大きくなる。したがって、斜面復旧計画ではリスクを示す指標による検討が重要である



図 I-IV-1 温暖化によって引き起こされる複合災害の概念図

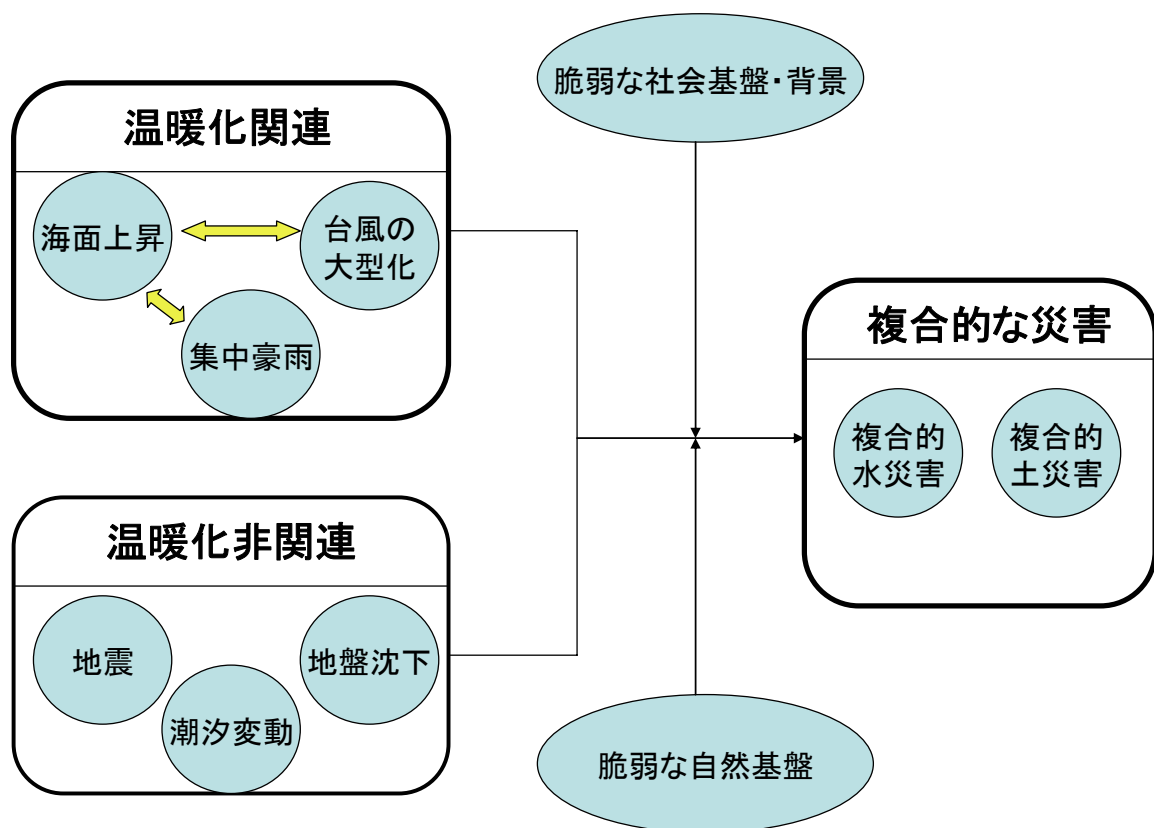


図 I-IV-2 温暖化によって引き起こされる複合災害のまとめ

4.2 影響評価の対象と方法

(1) 高潮浸水

日本は、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、陸上雪水の融解や海水の膨張等で海面が上昇し、海水温の上昇等により台風が大型化すると考えられている。こうした変化により、沿岸域では高潮による浸水の危険度が高まる。そのため、それを評価するための指標として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た。

浸水面積と浸水人口の予測は、地表面の高低と防護施設の情報を持つ空間データ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った。三大湾では、高波による越波も海水流入の計算に組み込んでいる。計算の対象地域は、人口や資産の集積が大きい低平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）とした。

(2) 河川堤防

温暖化に伴う海面上昇が生じると、海水が河川を遡上することが予想され、河川下流域に位置していた汽水域が上流側に拡大する可能性がある。このような事象が生じた場合には、重要な防災施設である河川堤防に影響を及ぼすことが考えられる。地球温暖化による社会基盤施設の脆弱性定量評価が求められている現状から、上記のような河川堤防に着目した調査が必要であるとともに、その脆弱性を改善するための適切な適応策の選定も求められている。

温暖化による河川堤防への影響評価では、全国の河川堤防を構成する土を収集し、それらの土のコンシステンシー（水を含むことによる変形のしやすさ）と圧縮性（変形のしやすさ）を

調べる実験に基づき、海面上昇に伴って河川に塩水が遡上することによって河川堤防が劣化や損傷するメカニズムを明らかにした。

また、河川堤防の降雨に対する脆弱性を評価すること目的として、土の保水性（土のもつ水の保持しやすさ）を調べる試験を行った。各地域の河川堤防を構成すると想定される土質材料の保水性能データベースを作成するとともに、その結果に基づき、河川堤防の降雨に対する脆弱性を、概略的ながら日本全国レベルでの表示を行った。

(3) 砂浜の経済価値

羽生(2000)によると、日本の海岸線総延長は35,236kmであり、そのうちの約20%（7,060km）が砂浜海岸である。そこは古くから海上交通の拠点であったり、水産業や農業の場であったりして、人々の暮らしを支えてきた。また、現代では海水浴、キャンプ、バードウォッチング、散歩などのようなレクリエーションの場として、砂浜には精神的・文化的価値も認められている。すなわち、砂浜には市場価値のみならず、非市場価値も広く認識されている。

しかし、近年の地球温暖化に伴う海面上昇により、このような価値をもつ砂浜が消失の危機に直面している。三村ら(1993, 1994)は、日本の砂浜（総面積191km²）について、30cm, 65cm, 100cmの海面上昇によって、それぞれ108km²（56.6%）、156km²（81.7%）、173km²（90.3%）の砂浜が消失すると予測した。

そこで、都道府県別の砂浜の価値、また海面上昇によって消失する砂浜の価値を評価した。評価対象は砂浜のもつ非市場価値のうちで海水浴の場としての利用価値に焦点を当て、また評価手法は顕示選好データに基づく旅行費用法TCM（Travel Cost Method）を採用した（参考資料②）。

(4) 干潟の経済価値

環境庁（現環境省）による第4回自然環境保全基礎調査において、日本の海辺には約145ヶ

所の干潟が確認され、その総面積は約 514km² であることが把握された。干潟には独自の環境によって育まれた豊富な生物資源が存在し、生物多様性の維持に重要な役割を果たしている。また、ゴカイやアサリなどによってその海域の浄化が行われており、水産業や海運業などの産業や人々の生活を支えている。さらに、干潟での潮干狩りやバードウォッチングなどを通して「憩いの場」や「癒しの場」としての精神的・文化的価値が認められている。

そこで、都道府県別の干潟の経済価値を評価した。評価対象は、日本全国の干潟がもつ生物多様性維持機能の価値に限定し、また評価手法は表明選好データに基づく仮想市場評価法 CVM (Contingent Valuation Method) を採用した(参考資料③)。

(5) 液状化危険度の変化

地球温暖化による海面上昇を受ける沿岸陸域地盤では、地震による地盤の液状化危険度の増加、堤防や護岸、防波堤など沿岸構造物の安定性の低下、さらには、地下水位以浅に存在していた土壤汚染物質の水浸による拡散などの地下水位上昇に起因した問題、加えて、比較的高い塩分濃度の地下水が内陸部へ拡大するといった地下水の塩水化の問題が指摘されている。したがって、海面上昇や気候変動に伴う沿岸域地盤の地下水位変動を予測し、地下水位変動を考慮した地域の防災能力の診断技術の確立が必要である。地下水位変動に起因する地盤災害について、地震時における液状化危険度に着目し、気候変動に対する影響評価を行った。対象地域は、東京湾沿岸域である。

影響評価方法は、対象地域における地盤情報データベースを活用した地盤構造モデリングを行い、海面上昇や気候変動に伴う沿岸域地盤での地下水位上昇量を有限要素法を用いた 2 次元不圧地下水流動解析手法 (Murakami et al. 2005) により予測するものである。この方法によって、海面上昇・気候変動前後における液状化危険度の変化を算出することによって、海面

上昇に伴う沿岸域地盤の地震時脆弱性評価を行った。なお、想定した降雨は、気象庁提供による気候統一シナリオ (RCM20) を用いた。

(6) 斜面災害リスク

温暖化に起因する異常気象としては、台風の大規模化や豪雨の増加などが考えられる。台風・豪雨は人間や社会資産に甚大な被害をもたらす(直接経済損失)。また、豪雨は斜面崩壊の主な誘因となり、斜面災害による経済損失をもたらす(間接経済損失)。温暖化の影響を検討するために、これらの経済損失を予測し、適応策を提案することが非常に重要である。

温暖化に起因する台風の大規模化による経済損失の増加リスクを評価するために、過去のデータを用いて、台風の大きさ(強さ)と経済損失率(損失額/資産額)の相関を分析し、台風の大きさによる経済損失の推定モデルを確立した。また、台風の大きさの統計特性を用いて、モンテカルロ・シミュレーションによる台風のリスクカーブの作成手法を確立した。温暖化に起因する台風大型化を想定し、将来の台風のリスクカーブを推定し、今のリスクカーブと比べて経済損失のリスク増加を評価した。

温暖化に起因する豪雨による斜面災害リスクを評価する手法を開発した。提案した斜面災害リスクの評価手法は、評価の対象範囲によって、局部範囲の手法と広域的な手法がある。局部範囲の手法では、対象斜面において豪雨と地震との複合影響を考慮した斜面災害リスクを求めるものである。一方、土砂災害リスク評価を全国に展開できるようにするために、地理情報システム (GIS) を用いて広域における土砂災害のリスクを以下の手順で評価する(広域的な手法): ①国土数値情報 4 次メッシュにおける降雨による斜面崩壊確率の推定手法を用いて、斜面崩壊の確率を示すハザードマップを作成する。②4 次メッシュにおける資産分布の推定手法を用いて、資産に基づく斜面崩壊による経済損失を評価する。③斜面崩壊確率と崩壊による経済損失額との積を斜面災害リスクとして計算する。

④現在の気候条件での斜面災害リスクマップ及び2050年、2100年後の温暖化による想定した気候条件での斜面災害リスクマップを作成し、温暖化前後のリスクマップの比較により、温暖化による斜面災害への影響を推定する。本手法に基づき福岡県における2050年温暖化による斜面災害リスクおよびリスクの増加が推定された。

4.3 沿岸域影響の将来予測

(1) 高潮浸水被害の将来予測

温暖化による海面の上昇と高潮の増大で、高潮による浸水面積と浸水人口が増加する。それらの面積と人口は温暖化の進行に伴い徐々に増加する

温暖化による海面の上昇と台風の大規模化による高潮偏差の増大で、高潮による被害が増大する。

そうした影響を予想するため、地表面の高低と堤防等の防護施設の情報を持つ空間データをコンピュータ上に構築し、海面上昇と高潮を（三大湾では高波も）与え、陸域に流入した海水で浸水する面積とそこに居住する人口を求める計算を行った（鈴木、2007a; 鈴木、2007b）。計算では、海面上昇量を0cmから100cmまで10cm単位で変化させ、2000年の高潮偏差の規模を基準として1倍から1.6倍まで0.1刻みで変化（高潮増大率）させた。そして、それらの計算結果をもとに、気候シナリオMIROCの海面上昇が起こり、2000年から2100年の間に高潮偏差が一定割合で増加し1.3倍になると仮定し、2030年と2100年の浸水面積と浸水人口を予測した。

その結果によれば、2000年には、三大湾奥部と西日本（中国地方、四国地方、九州地方）で高潮によって浸水する危険がある面積が20,000ha、その範囲に居住する人口が29万人であるが、2030年には浸水面積が29,000ha、浸水人口が52万人となり、さらに2100年には浸水

面積が58,000ha、浸水人口が137万人となる。温暖化による海面の上昇と台風の大規模化による高潮偏差の増大で、2000年から2100年にかけて、高潮に脆弱な地域の面積が38,000ha増加し、人口が108万人増加する。

高潮による浸水面積や浸水人口は、ある海面上昇、ある台風の大規模化の水準で急激に大きくなることはなく、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というのではなく、どのような水準であっても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になる。

鈴木武（国土技術政策総合研究所）

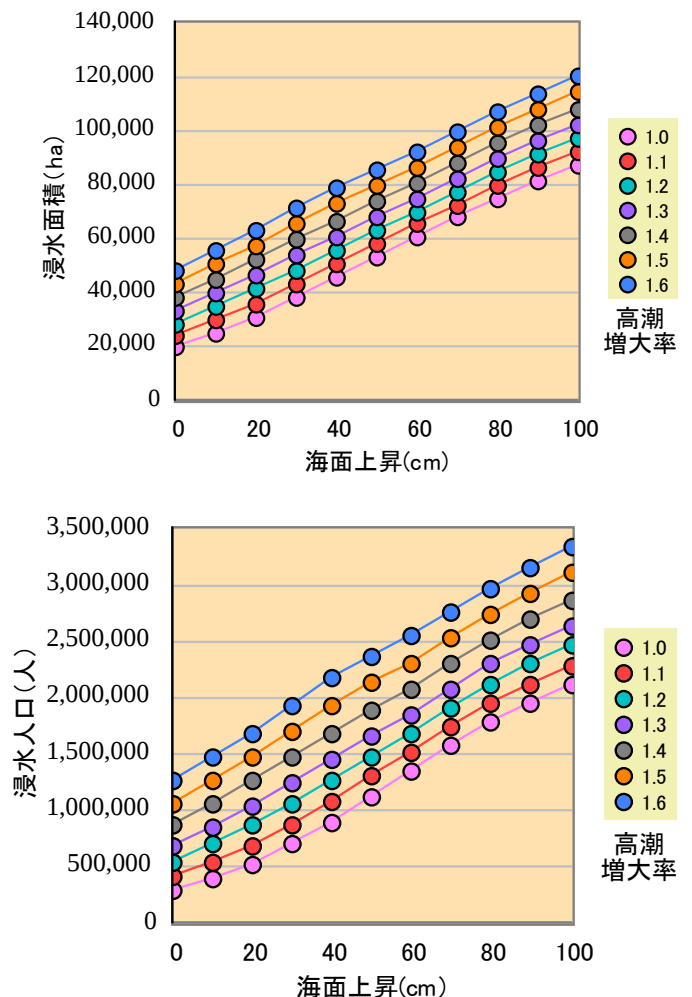


図 I-IV-3 高潮で浸水する面積・人口の海面上昇と高潮増大による変化

西日本では、温暖化により高潮で浸水する面積や人口は、瀬戸内海などの閉鎖性海域や入り江などで大きい

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）では、温暖化が進行した場合に、高潮によって浸水する危険があると予想される地域は、瀬戸内沿岸、有明海沿岸、八代海沿岸、北西九州の内湾・入り江などに多い。

2000 年では高潮による浸水の危険がある面積が 15,000ha、その範囲に居住する人口が 26 万人であるが、2030 年には浸水面積が 22,000ha、浸水人口が 40 万人になり、2100 年には浸水面積が 44,000ha、浸水人口が 90 万人になる。温暖化による海面の上昇と台風の大型化による高潮偏差の増大で、2000 年から 2100 年にかけて、高潮に脆弱な地域の面積は 29,000ha 増加し、人口は 64 万人増加する。

高潮による浸水の危険があると推定される場所は、閉鎖性海域や入り江に多く、波浪や津波の危険が大きくないため海岸の防護水準が低く、低地が広がっている場合が多い。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しているのが特徴である。

鈴木武（国土技術政策総合研究所）

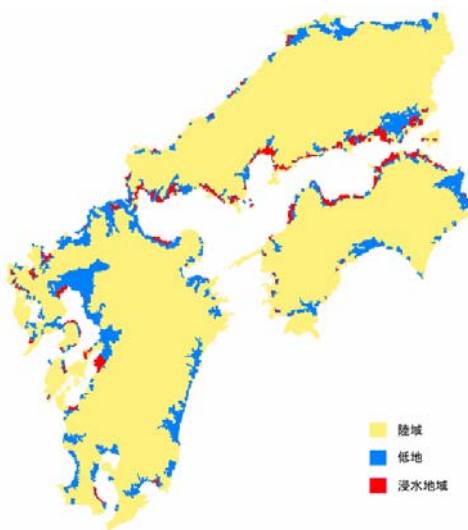


図 I-IV-4 2100 年気候時における西日本の高潮浸水

温暖化が進んだとき、三大湾奥部では、古くに開発された埋立地とその周辺で高潮による浸水の危険性が高い

東京湾、伊勢湾、大阪湾は奥部にゼロメートル地帯を含む大きな低平地が広がる。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。

浸水予測の結果、2000 年における高潮浸水の危険が予想される地域の面積は 4,900ha（東京湾が 740ha、伊勢湾が 3,400ha、大阪湾が 710ha。）、そこに居住する人口は 3.1 万人（東京湾が 0.4 万人、伊勢湾が 2.0 万人、大阪湾が 0.7 万人。）である。2030 年には、浸水面積が 7,200ha（東京湾が 970ha、伊勢湾が 5,000ha、大阪湾が 1,200ha。）、浸水人口が 12.5 万人（東京湾が 0.5 万人、伊勢湾が 9.1 万人、大阪湾が 2.9 万人。）となり、2100 年には、浸水面積が 14,000ha（東京湾が 1,700ha、伊勢湾が 9,600ha、大阪湾が 2,600ha。）、浸水人口が 47 万人（東京湾が 4 万人、伊勢湾が 32 万人、大阪湾が 11 万人。）となる。温暖化による海面の上昇と台風の大型化による高潮偏差の増大で、2000 年から 2100 年にかけて、高潮に脆弱な地域の面積は 9,100ha 増加し、人口は 44 万人増加する。

高潮に脆弱な地域は、東京南部沿岸、名古屋港内、大阪中南部沿岸に多く、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。

鈴木武（国土技術政策総合研究所）

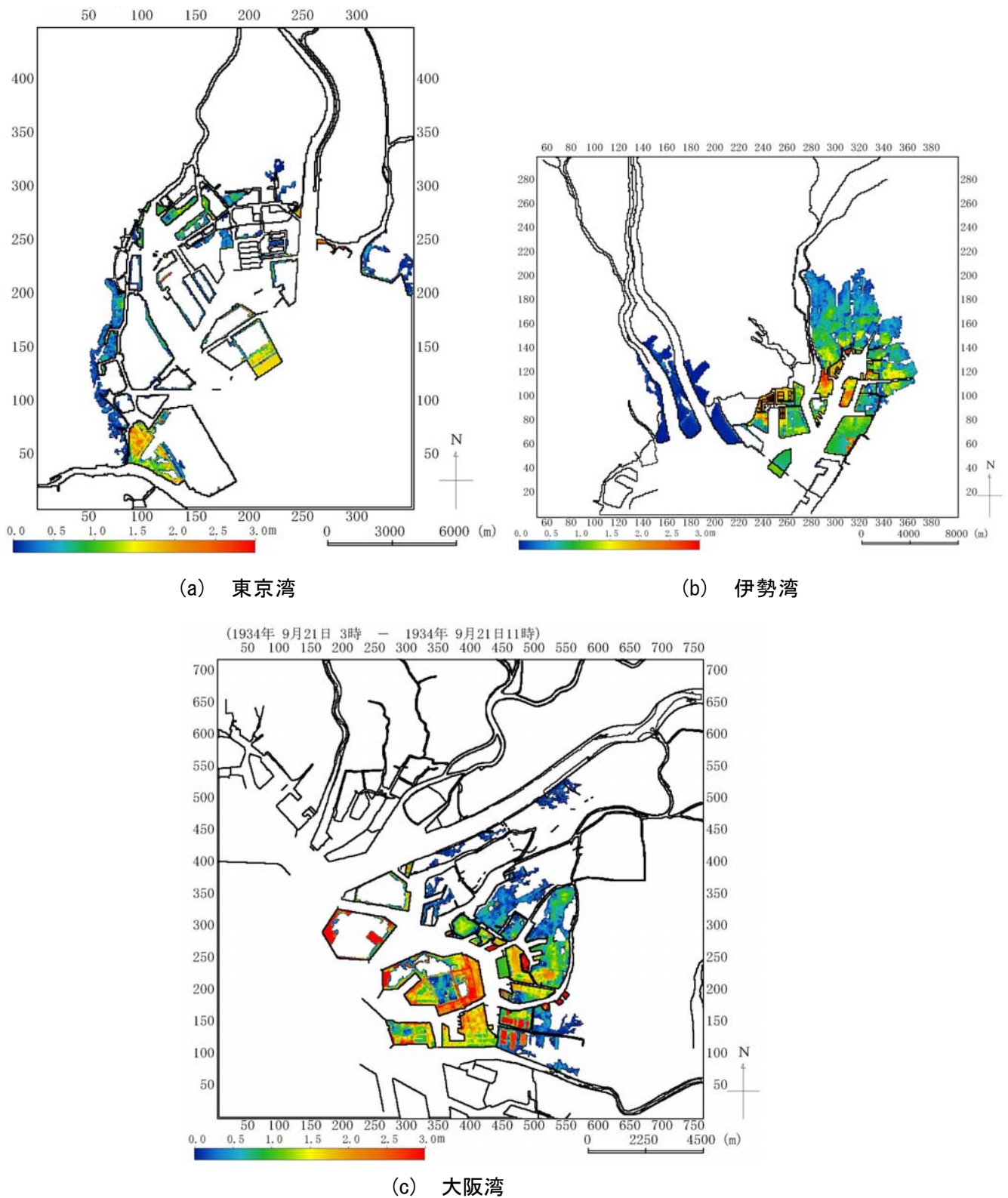


図 I-IV-5 2100 年気候時における三大湾奥部における高潮浸水深

(2) 河川堤防脆弱性の将来予測

温暖化による海面上昇によって河川汽水域が拡大し、堤防の強度が低下する

温暖化に起因する海面上昇や豪雨の増加に伴い、河川堤防の脆弱化が懸念される。海面上昇により、図 I-IV-6 に示すように、河川部において汽水域が拡大することが予想される。

また、豪雨の頻発と河川水位の増加により、河川堤防内への浸水も増加することが予想される。このような視点から、河川堤防への海水成分の侵入や浸水量の増加を想定した実験により、河川堤防の脆弱性を評価した(Komine 2007a:2007b)。

図 I-IV-7 に示す通り、日本各地より、河川堤防への利用が想定される土質材料9種類を採取し各種実験に供した。

海面上昇に伴う河川汽水域の拡大による堤防堤体材料への影響は、以下の通りと予想される。なお、将来を具体的な時間として示す評価レベルにはないことを付記する。

- 1) 北海道：堤防堤体材料では強度低下、圧縮量の増加・透水性の上昇が考えられる。予想される破堤パターンは、浸透・越水破壊である
- 2) 関東・信越地方：堤体材料の透水性の低下が予想される。予想される破堤パターンは、残留水圧による堤体損傷である
- 3) 中国地方：堤防堤体材料では強度低下、圧縮量の増加・透水性の上昇が考えられる。予想される破堤パターンは浸透・越水破壊である
- 4) 九州地方：堤体材料により透水性上昇と低下、圧縮量の増減が異なる。予想される破堤パターンは、浸透・越水破壊または残留水圧による堤体損傷が主なものである

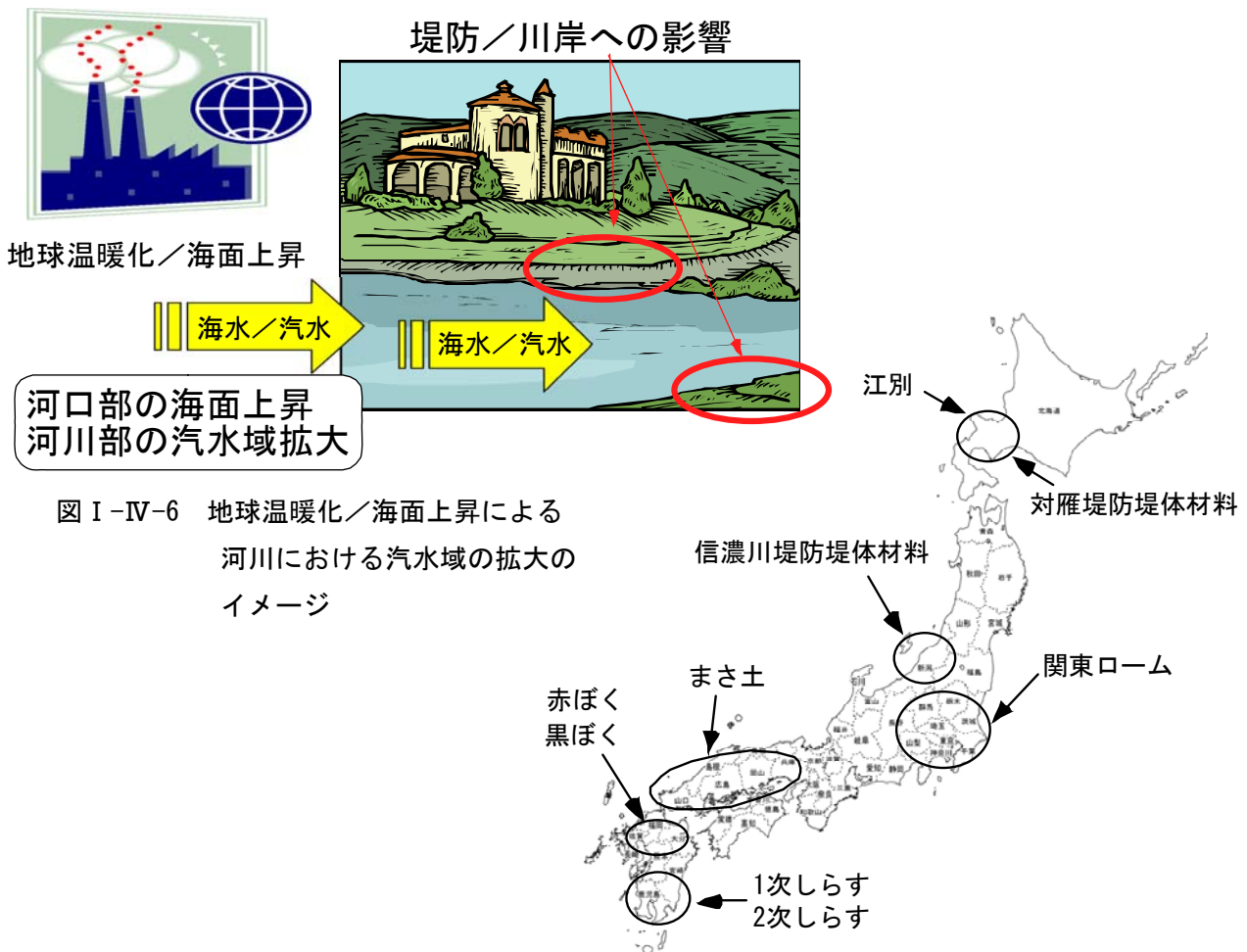


図 I-IV-6 地球温暖化／海面上昇による河川における汽水域の拡大のイメージ

図 I-IV-7 河川汽水域の拡大による堤防堤体材料への影響マップ

図 I-IV-8 は、上記の脆弱性評価をマップとして表示したものである。

次に、河川堤防堤体材料の降雨に対する脆弱性評価と対策は、以下の通りと予想される (Uchida et al. 2007) なお、こちらについても将来を具体的な時間として示す評価レベルにはないことを付記する。

- 1) 北海道：降雨により堤体内に浸水した水が排水される際に、堤防堤体材料の強度が急激に低下する。このことから急な法面崩壊などが生じる可能性がある。対策として、排水対策が考えられる
- 2) 関東・信越地方：降雨により堤体内に浸水した水が排水される際に、河川堤防堤体材料の体積収縮量が大きい。このことから余裕高が減少する可能性がある。対策として、余盛り

が考えられる

- 3) 中国地方：堤防堤体材料の保水性が低い。このことから、降雨に対する脆弱性は高く、法面の急な崩壊や体積収縮が生じる。対策として、遮水対策が考えられる
- 4) 九州地方：堤防堤体材料の保水性が低い。このことから、降雨に対する脆弱性は高く、法面の急な崩壊や体積収縮が生じる。対策として遮水対策が考えられる。特に鹿児島地区では、保水性の低下、強度の急激な低下、著しい体積収縮が生じる可能性があり、総合的な対策が必要と考えられる

図 I-IV-9 は、上記の脆弱性評価とそれぞれの対応策をマップとして表示したものである。

小峯秀雄（茨城大学）

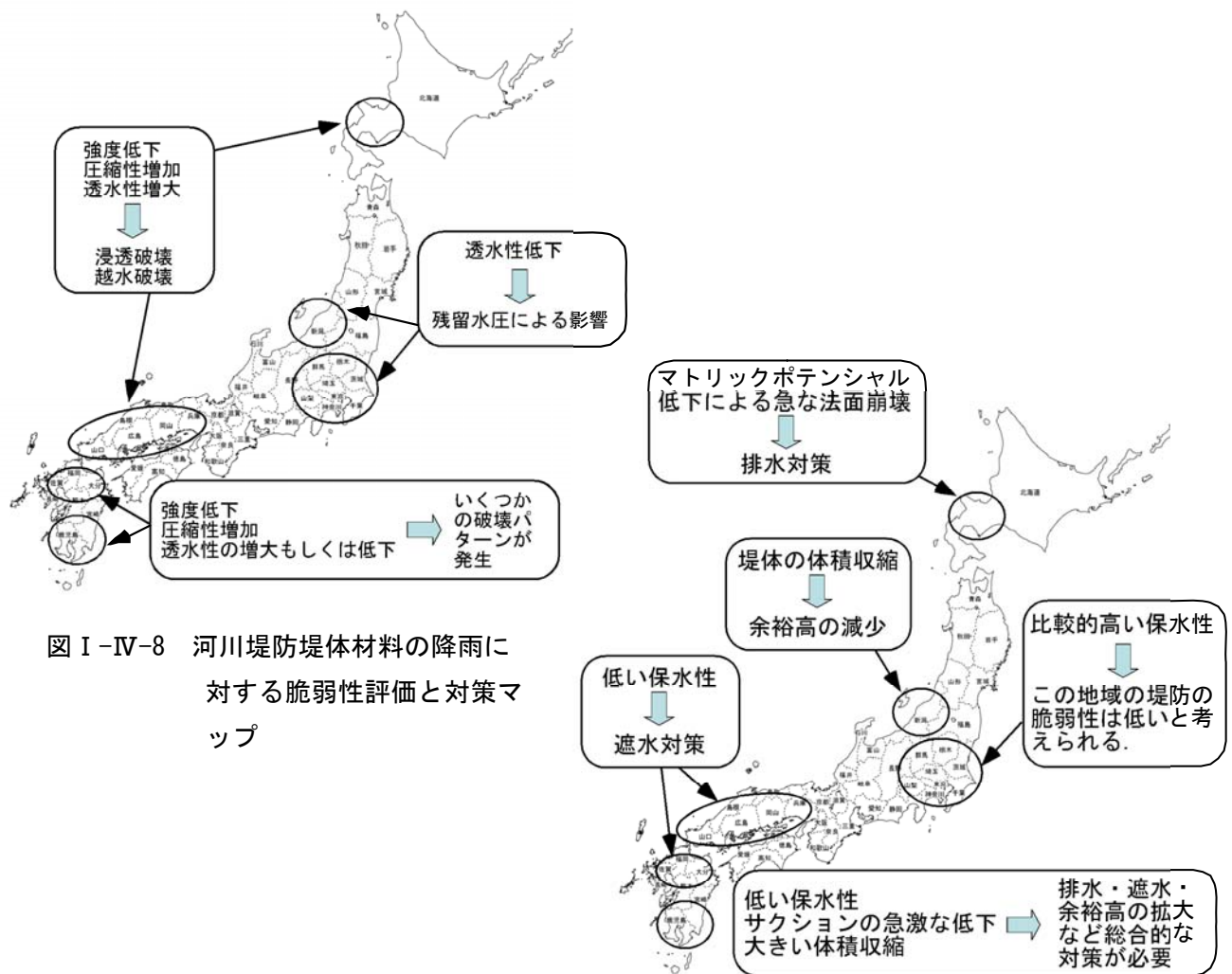


図 I-IV-9 河川堤防堤体材料の降雨に対する脆弱性評価と対策マップ

(3) 砂浜の経済価値

砂浜の経済価値は 1m^2 あたり約 12,000 円。
30cm の海面上昇によって失われる砂浜の価値は 1 兆 3 千億円に達する。

図 I-IV-10(a) に示す都道府県別の砂浜の面積より、北海道：43.9 km^2 、静岡県：14.0 km^2 、青森県：12.5 km^2 の順に大きいことがわかる。なお、海のない 8 県（栃木、群馬、埼玉、山梨、長野、岐阜、滋賀、奈良）における砂浜面積はゼロである。また、図 I-IV-10(b) に示す都道府県別の砂浜の年間利用客数（海水浴）より、神奈川県：505 万人/年、新潟県：399 万人/年、沖縄県：361 万人/年の順に多いことがわかる。

旅行費用法 TCM を用いた推定によって、砂浜利用 1 回あたりのレクリエーション価値は、2,179 円/回であることがわかった。この原単位を都道府県別の砂浜の年間利用客数（海水浴）に掛けることによって、砂浜の年間レクリエーション価値が求められる。この数値を合計すると、全国の砂浜の年間レクリエーション価値は 922 億円/年となる。また、この数値を年間 4% の社会的割引率で現在価値に換算すると、全国の砂浜のレクリエーション価値は 23,046 億円となる¹。

ここで、都道府県別の砂浜のレクリエーション価値は、図 I-IV-10(c) に示すとおりである。図 I-IV-10(c) より、神奈川県：110.0 億円/年（現在価値 2,751 億円）、新潟県：87.0 億円/年（同 2,174 億円）、沖縄県：78.7 億円/年（同 1,967 億円）の順に多く、砂浜の年間利用客数に正比例している。

また、日本に現存する砂浜の面積は 191 km^2 であることから、砂浜の資産価値（単位面積あたりのレクリエーション価値）は 12,058 円/ m^2 と

なる。この数値が砂浜の貨幣評価原単位となる。そして、砂浜の面積（図 I-IV-10(a)）と砂浜のレクリエーション価値（図 I-IV-10(c)）より、都道府県別の砂浜の資産価値は、図 I-IV-10(d) に示すとおりとなる。図 I-IV-10(d) より、大阪府：114,951 円/ m^2 、神奈川県：82,354 円/ m^2 、兵庫県：64,823 円/ m^2 の順に大きいことがわかる。ここで、図 I-IV-10(d) の比較における順位の変動は、砂浜面積の狭さが大きく影響している。

一方、日本では 30cm, 65cm, 100cm の海面上昇によって、それぞれ 56.6%, 81.7%, 90.3% の砂浜が侵食されるという予測結果が得られている。したがって、30cm, 65cm, 100cm の海面上昇によって消失する砂浜のレクリエーション価値は、それぞれ 522 億円/年（現在価値 1 兆 3,044 億円）、753 億円/年（同 1 兆 8,829 億円）、832 億円/年（同 2 兆 811 億円）となる。

また、都道府県別の消失状況は、図 I-IV-10(e) に示すとおりである。ここで、図 I-IV-10(e) の凡例について、「海面上昇 0～30cm」「海面上昇 30～65cm」「海面上昇 65～100cm」は、それぞれ海面上昇「0～30cm の間」「30～65cm の間」「65～100cm の間」に消失する砂浜の価値を意味する。したがって、第 1 色の棒の長さは海面上昇 30cm によって消失する砂浜の価値、第 1 色と第 2 色の合計の棒の長さは海面上昇 65cm によって消失する砂浜の価値、そして 3 色合計の棒の長さは海面上昇 100cm によって消失する砂浜の価値を示す。

図 I-IV-10(e) より、海面上昇 30cm のときには、沖縄県：76.3 億円/年（現在価値 1,908 億円）、新潟県：62.7 億円/年（同 1,568 億円）、神奈川県：47.1 億円/年（同 1,177 億円）の順に多いことがわかる。しかし、海面上昇 65cm のときには順位が変わり、神奈川県：83.5 億円/年（現在価値 2,088 億円）、新潟県：82.3 億円/年（同 2,057 億円）、沖縄県：78.3 億円/年（同 1,957 億円）の順となる。海面上昇 100cm のときも同様に、神奈川県：96.5 億円/年（現在価

¹社会的割引率について、現在日本の公共事業評価において年間 4% の社会的割引率が用いられているので、これに倣った。また、年間価値から現在価値への換算方法について、年間価値が未来永遠に続くものと仮定すると、現在価値は年間価値を年間 4% の社会的割引率で割ることによって求められる。

I. 分野別温暖化影響 沿岸域への影響

値 2,412 億円)、新潟県:86.1 億円/年(同 2,153 億円)、沖縄県:78.5 億円/年(同 1,963 億円)の順となる。ここで、順位の変動は、各海域の形状が異なることによるものである。なお、価値の消失率に着目すると、海面上昇 30cm のときは、沖縄県:97.0%、岡山県:88.4%、東京都:

80.7%の順に大きい。また、海面上昇 65cm で 98%以上の消失率となるのは 8 都府県(秋田、山形、東京、京都、和歌山、島根、岡山、沖縄)であり、海面上昇 100cm ではさらに 8 府県(新潟、石川、福井、大阪、兵庫、広島、山口、高知)が加わる。

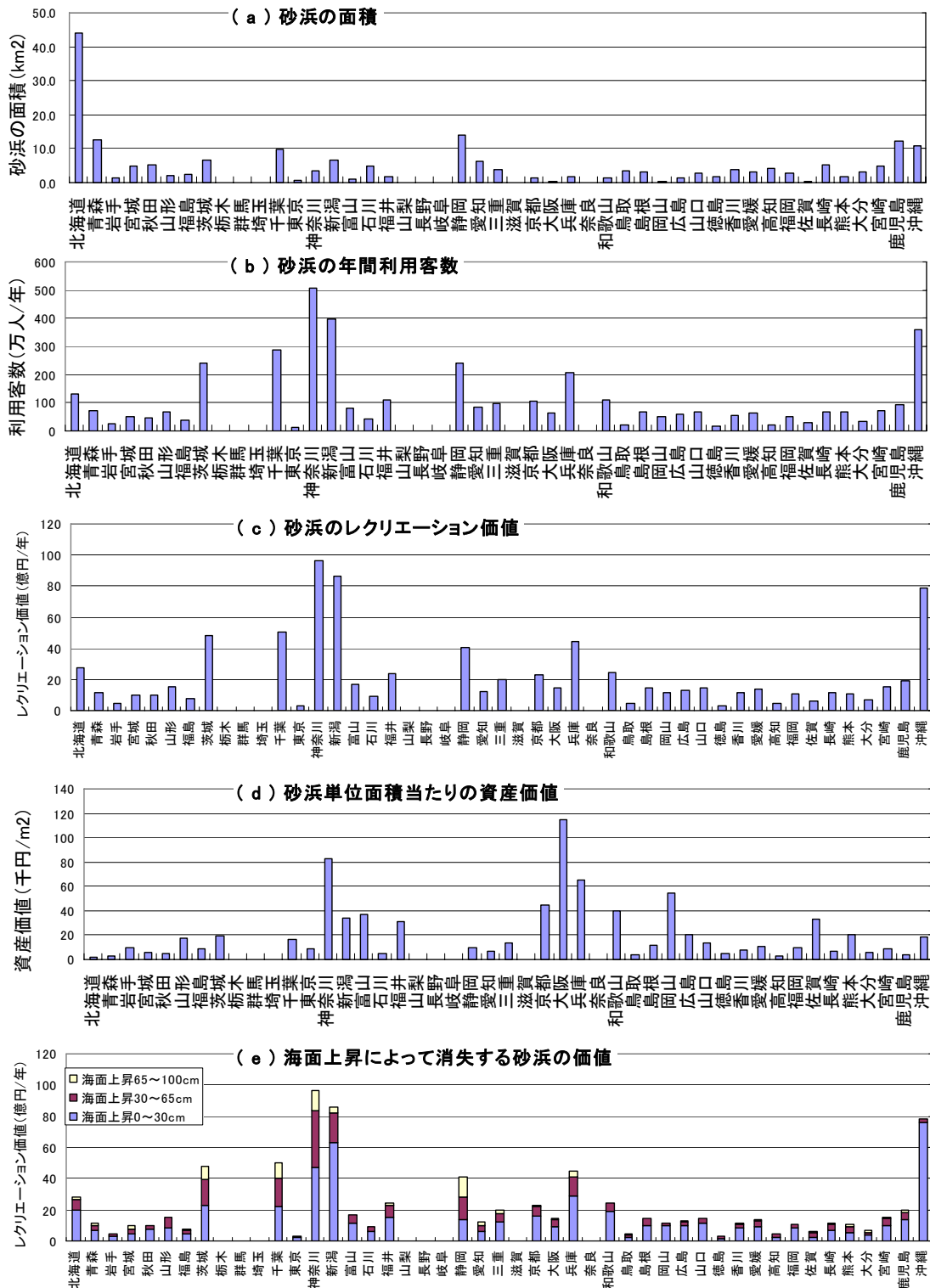


図 I-IV-10 砂浜の面積(a), 年間利用客数(b), レクリエーション価値(c), 単位面積あたりの資産価値(d), 海面上昇によって消失する砂浜の価値

(4) 干潟の経済価値

干潟の経済価値は 1m^2 あたり約 10,000 円。海面上昇によって全国の干潟に影響が及ぶとするとその経済的損害は最大約 5 兆円に達する

仮想市場評価法 CVM を用いた推定によって、干潟の破壊を回避するための一人あたりの支払意思額は、1,554 円/年/人となることがわかった。この数値を年 4% の社会的割引率で現在価値化すると、一人あたりの干潟の経済価値（生物多様性維持機能の価値）は 38,858 円/人となる。また、この数値に日本の総人口 12,774 万人を掛けると、全国の干潟の経済価値は 4 兆 9,637 億円となる。一方、日本の海辺で現在確認されている干潟の総面積は 514km^2 であることから、干潟の資産価値（単位面積あたりの経済価値）は 9,657 円/ m^2 となる。

ここで、鷺田・栗山・竹内(1988)による藤前干潟の経済価値の評価結果と比較検討してみる。鷺田らは、本研究と同様に CVM を用いて、約 2.5km^2 の干潟の保全に対して一人あたりの支払意思額 6,555～10,260 円/人を算出し、総額約 2,960 億円の価値を見出した。これより、藤前干潟の資産価値は $118,400\text{円}/\text{m}^2$ となり、本研究の評価結果はその 12 分の 1 であることがわかる。両者の違いは、評価対象地域の特定性（全国の干潟：不特定、藤前干潟：特定）、保全の緊急性（全国の干潟：長期の温暖化問題、藤前干潟：緊急のゴミ処理問題）などによるものと考えられる。

大野栄治（名城大学）

表 I-IV-1 干潟の破壊を回避するための支払意思額に関する質問

将来、地球温暖化（海面上昇など）によって干潟が破壊され、その機能がすべて失われてしまうと予想されています。そこで、地球温暖化による干潟の破壊を回避するため、全国民から負担金を徴収して対策に充てるという政策が提案されたと仮定してください。なお、負担金の徴収は地球温暖化による干潟の被害を経済評価するために想定したものであり、実際に負担金を徴収しようとするものではありません。そして、

- この政策が**実施される**と、日本中の干潟（約 514km^2 ）が**保全される**（そこに生息する生態系は維持される）
- この政策が**実施されない**と、日本中の干潟（約 514km^2 ）が**破壊される**（そこに生息する生態系は失われる）と想定してください。

次の（１）～（９）には、上記の政策を実施するために必要な負担金の額が示されています。あなたは、（１）～（９）のそれぞれについて、政策の実施に賛成ですか、それとも反対ですか。あてはまるものを（それぞれ）1つ選び、番号を○で囲んでください。なお、この負担金は日本にお住まいの期間中に負担していただくものであり、その金額分だけあなたの購入できる別の商品やサービスが減ることを十分念頭においてお答えください。

- （１）政策の負担金が１人あたり毎年 **100 円** の場合
 - 1. 政策の実施に賛成 2. 政策の実施に反対
 - （２）政策の負担金が１人あたり毎年 **300 円** の場合
 - 1. 政策の実施に賛成 2. 政策の実施に反対
 - （３）政策の負担金が１人あたり毎年 **500 円** の場合
 - 1. 政策の実施に賛成 2. 政策の実施に反対
- （以下、省略）

(5) 液状化危険度の変化

海面上昇と異常降雨が地下水位を上昇させ、地震時の液状化による地盤災害を受ける地域の面積を大きくする

海面上昇に伴う沿岸域地盤の地下水位上昇量は、海岸線のみならず、河川沿岸域においても影響を受ける。このため、海面上昇に伴う液状化危険度の変化は、海岸沿岸地域に近いほど、また、内陸では河川沿岸に近いほど液状化の危険性が増大する。一方、気候変動による降雨の変化においては、降水量が増大する地域においては、内陸部において地下水位を上昇させることとなる。このため、集中豪雨が増大する地域においては、内陸部における地下水位上昇による液状化危険度が増大する。地震による地盤の液状化現象は、建物倒壊の危険性の増大、下水管などの地中構造物の浮き上がりや地盤の側方流動を伴った建物基礎や橋梁の落下、地盤沈下などの被害の要因であり、気候変動がこの液状化危険度に及ぼす影響の程度を知ることは、地域の地震地盤災害を把握する上で極めて重要である。

ここでは、気候変動による降水量の増加が予測されているエリアのうち、東京湾沿岸域の鶴見川、多摩川で挟まれた川崎市と横浜市の地域を検討の対象とした。影響評価方法は、対象地域における地盤情報データベースを活用した地盤構造モデリングを行い、海面上昇や気候変動に伴う沿岸域地盤での地下水位上昇量を有限要素法を用いた 2 次元不圧地下水流動解析手法 (Murakami et al. 2005, Yasuhara et al. 2007) である。これによって、海面上昇・気候変動前後における液状化危険度の変化を算出することによって、海面上昇に伴う沿岸域地盤の地震時脆弱性評価を行った。液状化危険度の評価には地下水位を含めた地盤の状態によって算出される P_L 値 (表 I-IV-2 参照) を用いた。なお、想定した降雨は、気象庁提供による気候統一シナリオ (RCM20) を用い、海面上昇量は 2100 年で 88cm とした。

図 I-IV-11 (a) は現状における液状化ハザードマップである。これに対し図 I-IV-11 (b) は海面上昇を考慮した液状化ハザードマップである。海面上昇に伴う海岸線付近の液状化危険度が増加していることが分るとともに、河川沿岸域でも液状化危険度が増加することが分かる。このことから、海面上昇による沿岸域地盤が影響を受けるエリアは、海岸線付近だけでなく、潮汐変動を受けるような河川下流域沿岸部においても影響を受けることが分かる。

図 I-IV-11 (c) は、降雨を考慮した場合の液状化ハザードマップである。これによれば、海面上昇のみの場合より、河川沿岸域においてより内陸に向かって液状化危険度が増大していることが分かる。すなわち、気候変動による海面上昇では海岸・河川沿岸域において、降雨特性の変化によって内陸部において、それぞれ影響が異なることが分かる。

降雨特性の変化によって、液状化の危険性が高いエリアが増大することが分かる。表 I-IV-2 はそれぞれの液状化危険度エリアの変化率をまとめたものである。

実際は、気候変動による海面上昇及び降雨特性の変化が同時に起こることから、両者の影響を考慮した図 I-IV-11 (d) がもっとも将来の様子を示したものであると考えられる。図 I-IV-11 (e) は液状化危険度区分の変化領域を示している。これから、対象地域においては、気候変動による海面上昇と降雨特性の変化によって、液状化の危険性が高いエリアが増大することが分かる。

安原一哉・村上 哲 (茨城大学)

表 I-IV-2 現状に対する液状化危険度レベル
の面積変化

P_L 値区分	海面上昇 後	降雨特性の 変化	海面上昇と 降雨特性の 変化
$0 < P_L < 5$ (Rank1)	1.03	0.98	0.93
$5 < P_L < 15$ (Rank2)	0.98	0.95	0.87
$15 < P_L < 25$ (Rank3)	1.09	1.11	1.06
$25 < P_L$ (Rank4)	1.14	1.27	1.42

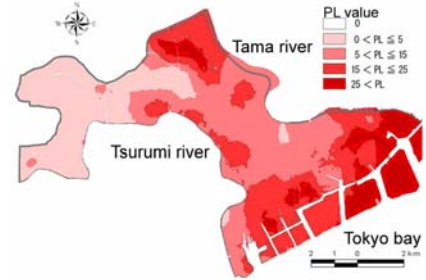
P_L 値と液状化による影響(道路橋示方書(1996)による)

$P_L=0$: 液状化による影響は無し

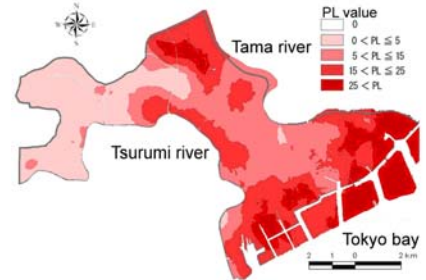
$0 < P_L \leq 5$: 液状化による影響は小さい

$5 < P_L \leq 15$: 液状化による影響が大きい

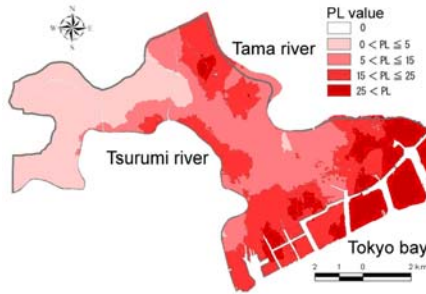
$15 < P_L$: 液状化による影響が非常に大きい



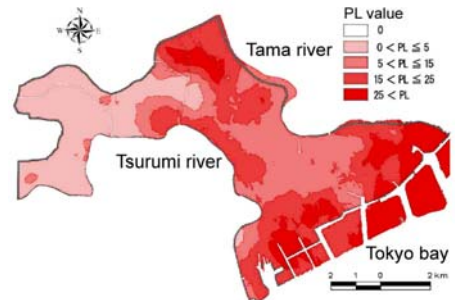
(a) 現状(1990)



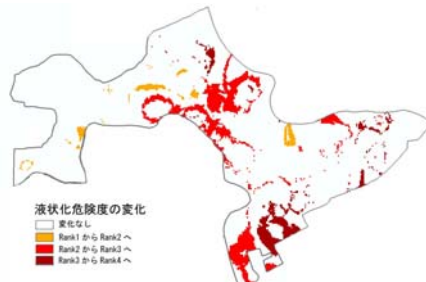
(b) 海面上昇量のみ考慮(2100)



(c) 降雨特性の変化のみ考慮(2081- 2100)



(d) 海面上昇と降雨特性の変化を考慮(2081- 2100)



(e) (a) から (d) への液状化危険度区分の変化領域

図 I-IV-11 液状化危険度の変化(村上)

(6) 斜面災害リスク

温暖化に伴う斜面災害リスクが大きくなる。
また、斜面復旧計画にリスク指標による検討が重要である

①福岡県を対象にした、温暖化に伴う斜面災害リスク（斜面の崩壊確率と崩壊による経済損失額との積）の様子は図 I-IV-12 のようになる。これに基づいて福岡県を対象に試算を行い、以下の結果が得られた。

- ・現在の降雨条件での斜面災害リスク：360 億円／年の損失
- ・2050 年温暖化に伴う降雨条件での斜面災害リスク：614.3 億円／年の損失

よって、温暖化による福岡県における斜面災害リスクの増加は 70.6%である。

②豪雨と地震との複合影響を考慮した斜面災害リスクの評価手法を開発し、2005 年福岡県西方沖地震による志賀島の崩壊斜面のリスク評価に適用した。この地震により、斜面の上部に変形量の大きい陥没地形が形成されたため、将来の地震や豪雨によって大規模な斜面崩壊が発生する可能性が懸念されている。潜在的な崩壊斜面の規模においては、図 I-IV-13 に示す三つのケースが考えられている。対策費用は、想定した崩壊規模によって数億円から数十億円まで大きく異なる。そこで、3 ケースにおいてリスク解析を行い、その結果を図 I-IV-14 に示す。これによると、

1) 地震時、降雨時及び降雨後地震が起きた時のいずれの場合も表層崩壊及び中間中規模崩壊のリスクが高くなるが、深層大規模崩壊のリスクはかなり小さい

2) 降雨と地震が複合して生じる場合はやはり中間中規模崩壊及び表層崩壊のリスクが極めて高くなるが、深層大規模崩壊のリスクはそれほど高くない

したがって、以下のことが明らかになった。

- 1) ケース C の深層大規模崩壊リスクは小さい
- 2) ケース A の表層崩壊リスクとケース B の中間中規模崩壊リスクは同程度である

3) 対策工コストを考慮すると、部分的な中層崩壊を考慮して、表層崩壊対策が最も効率的である。なお、本提案は、福岡市の復旧計画に取り入れられた。

陳 光斉・三谷泰浩（九州大学）

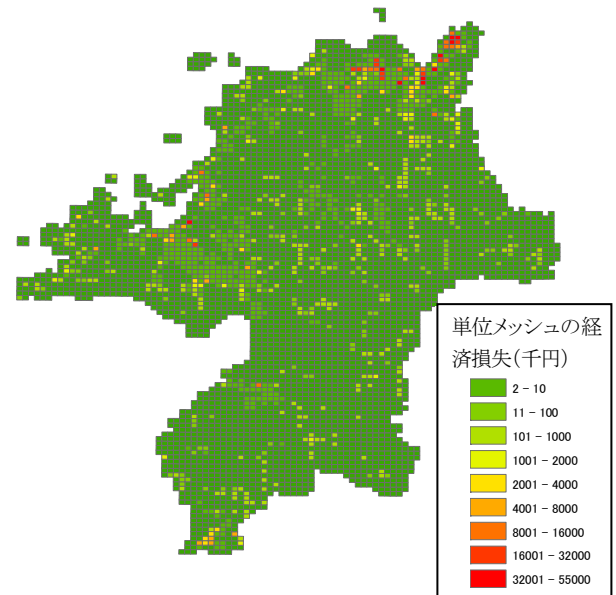


図 I-IV-12 温暖化による福岡県における斜面災害リスクマップ

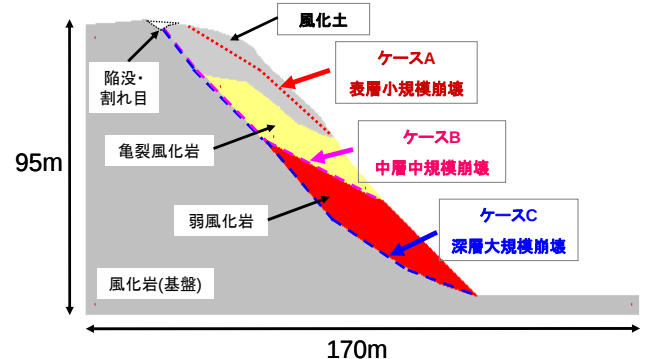


図 I-IV-13 想定した斜面崩壊の形態モデル

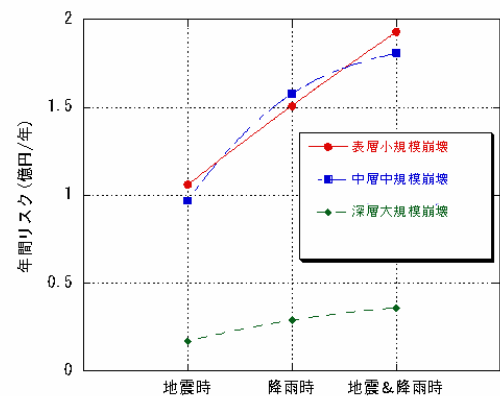


図 I-IV-14 各条件下の斜面災害リスク



気候変動が地盤災害を加速する

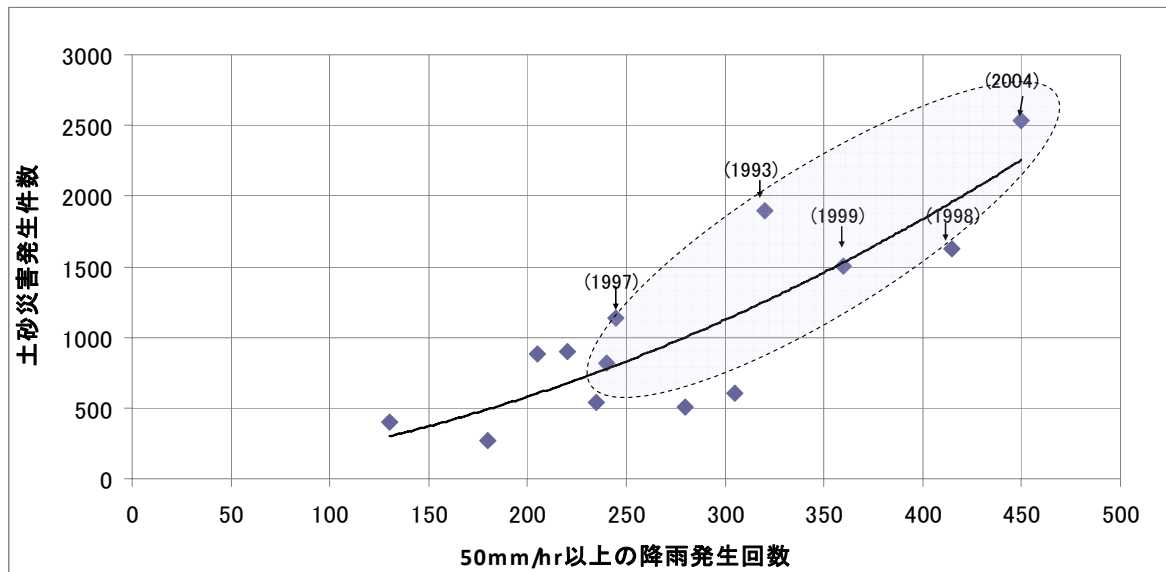
温暖化の影響の最悪のシナリオの一つとして、温暖化による現象と地震など他の現象が同時に起こった場合に、今までなかったような複合的な災害になる恐れがあり、さらに、その頻度が増えることが懸念されている。

例えば、約1カ月続いた長雨の後に大きな地震が起こった2004年の新潟中越地震は複合災害の典型的な例である。地震が起きる直前まで異常な降雨が続き、丘や山に雨水が蓄積され、崩れやすくなっていた。そこに大きな地震が起こり、斜面崩落が約四千カ所で発生した。図I-IV-15に示すように、最近の集中豪雨の増加に伴って、土砂災害の発生回数が増えていることがわかる。

地球はいま「大地動乱の時代」(石橋克彦神戸大学教授)に入っていると言われており、そこに温暖化による異常気象による事象が重なろうとしているとも考えられる。

一方で、地下水位は集中豪雨によって一時的に上がる短期的要因と、近年、上野駅や東京駅の地下駅舎が持ち上がる危険性がある事例のように、地下水位がゆっくりと時間をかけて上昇するという長期的要因がある。併せて、温暖化に伴う集中豪雨が増えると、地下水位を急激に増加させるので、液状化は沿岸部だけでなく、内陸部でも起こる危険性が高まる。このように温暖化は災害を加速する危険性がある。

安原一哉(茨城大学)



図I-IV-15 集中豪雨と土砂災害

5. 健康への影響

5.1 概要

地球温暖化による健康影響については、IPCC 第4次評価報告等によれば、直接的な影響、間接的な影響、そして、社会・経済システムの崩壊による影響、に分けて考えられている。具体的には、低栄養に起因する疾患の増加、熱波、洪水、暴風雨、火災や干ばつによる死亡、疾病の増加、下痢性疾患の増加、光化学オキシダント濃度の上昇による心臓・呼吸器系疾患の増加、そして、動物媒介性感染症の増加、が指摘されている。本研究では、直接的な影響として、①熱ストレスのよる死亡リスク、②熱ストレスの代表的疾患である熱中症発症リスクを、また、間接的な影響として、③温暖化に伴って悪化が予想される光化学オキシダント汚染による死亡リスクと、④媒介動物の生息域拡大による節足動物媒介性感染症のうち、代表的な疾患としてデング熱、日本脳炎、マラリアについて検討した。

途上国等においては、低栄養による健康異常、下痢性疾患、水系感染症、等のリスクが大きいと考えられるが、日本を始めとする先進国においては、現況の温暖化予測範囲においてはこれらのリスクは比較的小さいと考えられる。また、節足動物媒介性感染症においても、温度環境だけでなく、社会・衛生状況が大きく関係し、現在の社会・衛生状況が維持される限りにおいては、デング熱、マラリア等が現実に再流行する可能性は小さいと考えられる。しかしながら、生物学的観点からみて、媒介蚊の生息域拡大は確実であり、温暖化に伴う潜在リスクは大きいと考えられる。

5.2 影響評価の対象と方法

(1) 熱ストレス死亡リスク

わが国を含む先進国では、温暖化による健康影響として、感染症よりも熱ストレスによる直接的影響が大きな問題と考えられている。熱ストレス影響の評価は、高気温による超過死亡（率）の形で研究されることが多い。わが国以外に、ヨーロッパや米国でも気温と死亡の関連がV字型（ある気温（至適気温）で死亡率が最低になり、それより気温が高くて低くても死亡率は高くなる）になることがわかっており、またその関係が気候によって異なり、寒冷な気候では至適気温が低く、温暖な気候では至適気温が高いことも報告されている。高気温による超過死亡率とは、至適気温よりも気温が高い日と至適気温日の死亡率の差のことであり、高温が原因で生ずる全死亡を意味する。後述の熱中症は、その一典型例であるが、熱ストレス影響に占める割合は必ずしも多くない。

日最高気温と死亡の関連が示すV字型の、死亡率が最低になる気温、すなわち至適日最高気温を、過去のデータ（気温観測値と死亡統計）を用いて県別に推定し、至適日最高気温が将来にわたり変化しないと仮定して、高気温による超過死亡率の将来予測を行った。

(2) 熱中症

気温の上昇によって増加が予想される熱中症について、リスクが増大するレベル、すなわち閾値について検討を行うとともに、温度・影響関数を構築することが必要である。

熱中症の影響評価を行うために、政令市消防局・消防庁の協力で進めている救急車による搬送例を基礎情報として、熱中症患者発生状況と温度指標（日最高気温等）の関係、地域や属性による差異について検討し、病院を対象とした熱中症患者実態調査に基づき、救急搬送以外の熱中症患者数を推定し、温暖化リスクの予備的評価を行った。

(3) 大気汚染リスク

大気汚染物質のなかで温暖化の影響を直接受けるものとして、温度上昇で生成反応が促進される光化学オキシダント(Ox)がある。工場や自動車交通が集中して Ox 濃度が高くなっている都市部では、温暖化によってさらに Ox 濃度が上昇し、光化学スモッグの発生頻度が増え、健康被害が増加することが予測される。

Ox の大部分を占めるオゾンの健康影響としては、高濃度の光化学スモッグが発生した時に見られる目の症状(チカチカする、涙が出る等)、呼吸器の症状(喉が痛い、せきが出る、息苦しい等)や重い場合は吐き気や頭痛等が知られているが、最近の疫学研究で、オゾン濃度が高い日にはわずかではあるがその日あるいは翌日の死亡率が上昇することが明らかにされている。

そこで、汚染物質の排出状況は現況と同じと仮定し、温暖化による気象パターンの出現頻度の変化により Ox 発生状況が現状と比べどのくらい増加し、その健康影響はどのくらいになるかを、夏季(6月から8月)を対象として検討した。健康影響については、濃度との関係について既知の研究の蓄積がある死亡の増加を対象とし、将来の人口推計は2種の社会シナリオに基づく人口を基にした。

(4) デング熱・マラリア・日本脳炎

地球温暖化や異常気象現象がヒトの健康に対してどのように影響を及ぼすかについては種々のシナリオが述べられている。特に重要なものとして、蚊等の節足動物により媒介されるウイルス感染症の増加や流行が予測されている。しかし、このような予想、仮説の裏付けとなるデータは国内、国外においても十分に得られておらず、地球温暖化や異常気象現象の節足動物媒介性感染症に及ぼす影響を明らかにし、さらに、現象の経済評価も考慮し適応策の検討を行なうことが急務である。

本研究では、主要媒介蚊の生息域調査及び生息可能域分布に基づく、潜在リスクの検討を行

った。デング熱媒介蚊に関しては、東北地方を中心に都市部で墓地の花立て、古タイヤなどの人工的な発生源で幼虫を採集し、分布域の調査を行った。日本脳炎の媒介蚊は CDC 型のライトトラップやブラックライトのトラップで成虫を捕集し、地域による捕集数の違いを検討した。ハマダラカに関しては、石垣島で幼虫および成虫を捕集して解析を行った。

5.3 健康影響の将来予測

(1) 熱ストレスによる死亡リスク

気温上昇に伴い、熱ストレスによる死亡のリスクが高まる

日最高気温と日死亡率の関係を、滑らかな曲線を用いて県別に推定すると、どの県においても、ある日最高気温で死亡率が最低になり、その気温より気温が高くて低くても死亡率は高くなった（図 I-V-1 は北海道の例）。また、この死亡率が最低になる気温（以下、至適気温）は寒冷地ほど低いことが示された。

各県とも至適気温が将来にわたって変化しないと仮定したうえで、予測される将来気候の下での熱ストレスによる超過死亡を評価した。図 I-V-2 は、県別の熱ストレス超過死亡数推計モデルと気温分布データを用いて、一人の人間が1年間に熱ストレスにより死亡する確率を推

計し、地図化したものである。気温上昇に伴い、熱ストレスによる死亡確率が、変化の小さな県でも約2倍、大きな県では5倍以上にもなると予測された。なお、本研究では、低気温での超過死亡の変化を解析対象とせず、気温上昇による高気温での超過死亡の変化のみ検討した。

先進国における猛暑時の死亡増加の過去の事例としては、2003年の欧州熱波が記憶に新しい。欧州熱波の際には、エアコンの普及不足や熱波警報システムの不備など、異常高温への備えが足りなかったことが被害深刻化の原因として指摘された。今後、温暖化にともなう熱ストレスによる超過死亡の増加を考慮し、我が国においても熱波対策の追加を検討すべきであろう。

本田靖（筑波大学）・高橋潔（国立環境研究所）

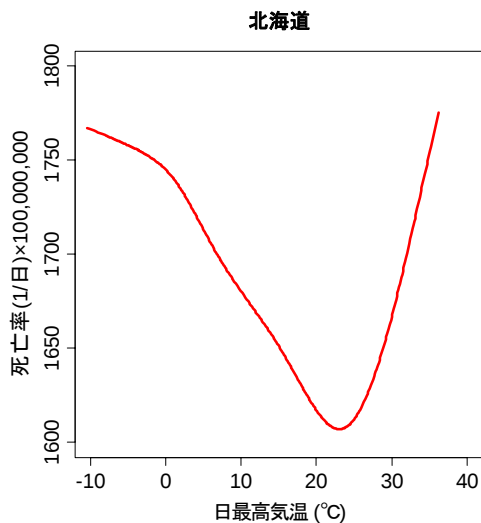


図 I-V-1 日最高気温と日死亡率の関係（北海道）

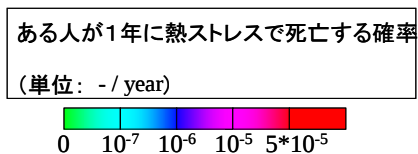
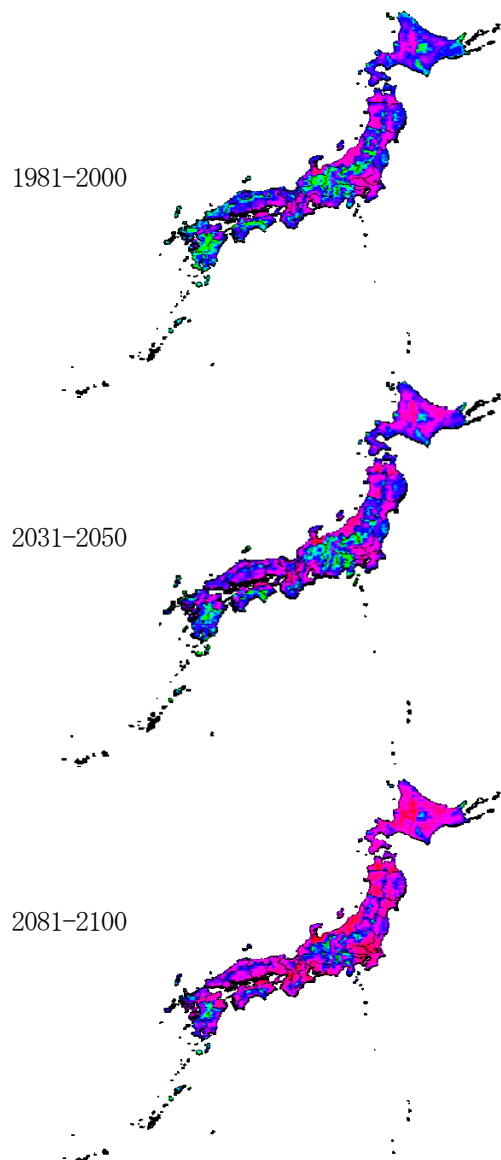


図 I-V-2 一人の人間が1年間に熱ストレスにより死亡する確率



(2) 熱中症の将来予測

日最高気温上昇に伴い、熱中症患者発生数は急激に増加する。65 歳以上の年齢層では 35℃ を超えると患者発生の急激な上昇が見られる

図 I-V-3 は関東地区（さいたま市、千葉市、東京都、横浜市、川崎市）の日最高気温出現日 1 日当たり・人口 100 万人当たりの患者数を示した。日最高気温が 27℃、28℃あたりから患者の発生に増加傾向が見られ、31℃、32℃を超えるあたりから急激に増加する様子が観察された。同じ日最高気温であっても地域により人口あたりの熱中症患者発生率にかなりの違いが見られた。この原因として、熱中症発症に最も強く影響する日最高気温以外の気象要素（湿度、日射、風速、等）、昼間人口、特に屋外作業人口、等の影響が考えられる。

日最高気温別の熱中症患者発生率を年令階級別にみると（図 I-V-3）、①全体をとおして、高齢者の発生率が高いこと、②特に 35℃を超えたあとも、急激な上昇が見られた。屋内（居室）での発症の多い高齢者では、他の年令層と異なり、35℃を超えるような高温環境下でも適切な適応策がとられていないことが原因ではないかと考えられる。このことは、温暖化による影響が高齢者で顕著に現れること、一方で、適切な対策での予防可能性を示すものと言えよう。

小野雅司（国立環境研究所）

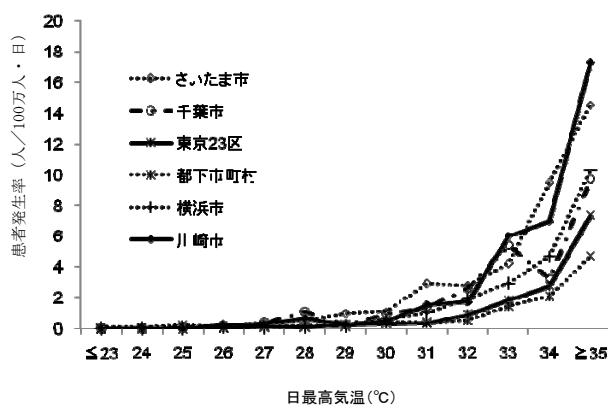


図 地域別・日最高気温別患者発生率(2007年・関東地区)

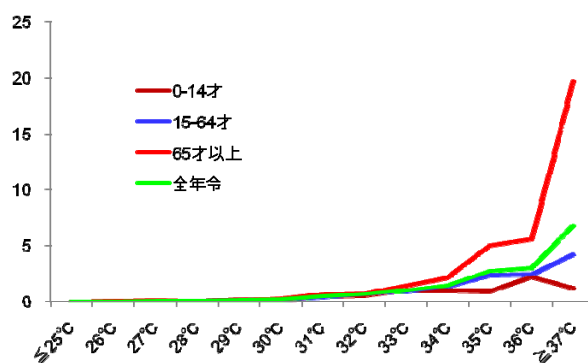


図 I-V-3 年令階級別・日最高気温別患者発生率（2007 年、東京 23 区）

(3) 大気汚染リスク

温暖化による気象変化で、 $0x$ 濃度の上昇とこれにともなう死亡の増加が見込まれる。ただし、増大する $0x$ の越境汚染より影響は小さい

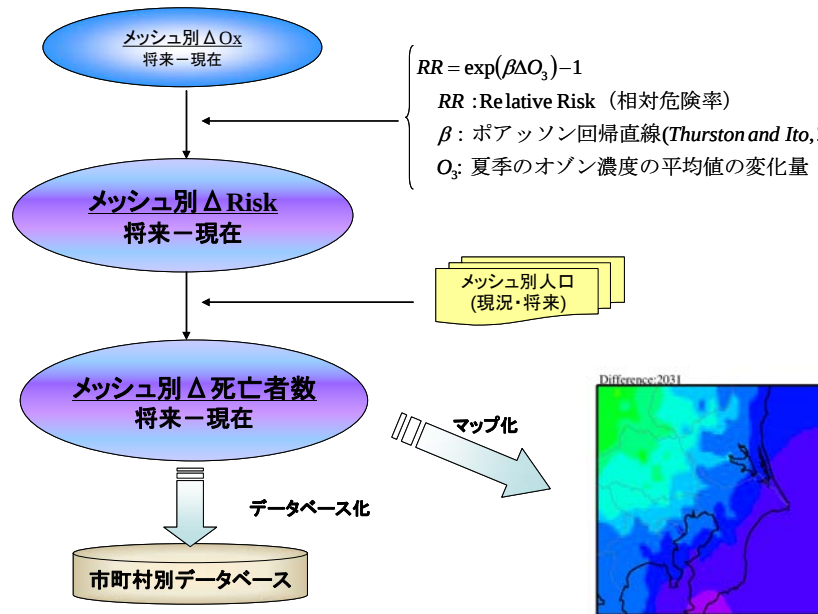
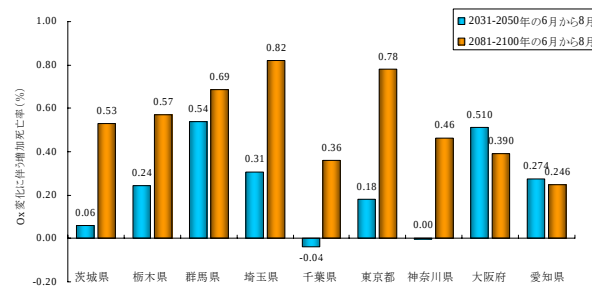
光化学オキシダント ($0x$) のリスクを検討するために、地域ごとに現状の気象パターンごとの $0x$ 濃度を求め、予想される将来の気象パターンにこの濃度を当てはめる方法を用いた。従って、越境汚染による今後の濃度上昇は考慮していない。推定に必要な気象データと過去の $0x$ 濃度の測定値が得られる関東圏、関西圏（大阪府）、東海圏（愛知県）で詳細な推計を行った。その結果、関東 7 都県ではほとんどの地域で将来の $0x$ 濃度上昇とそれに伴う死亡増加が見込まれ、大阪府、愛知県でも府県内で地域による違いはあるが全体としては $0x$ 濃度が上昇していた。これに対応する増加死亡数は、図 I-V-4 のように、メッシュごとの $0x$ 濃度上昇分を求め、死亡の相対危険率からメッシュごとのリスクの増分を求め、予想される総死亡者数を掛けて求めた。死亡リスクのデータは国内ではないため欧米の疫学研究結果を基に決定したが、生活や環境の違いがあるため、欧米のデータを基に推定した数値の解釈は慎重にしなければならない。しかし、粒子状物質に関する国内の死亡リスク研究では欧米とほぼ同じ傾向が確認されており、 $0x$ 濃度上昇による死亡についても、日本でも欧米と同様の増加傾向があるものと推定している。

$0x$ 濃度の上昇に伴う死亡の増加については、

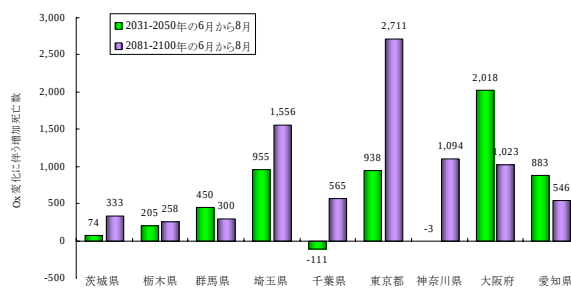
地区メッシュごとに 65 歳以上と 65 歳未満の将来人口を推定し、これに $0x$ の死亡リスクを乗じて計算した。ここでは、これまでに検討した都府県別の将来の増加死亡率と死亡数について、都市集中型の社会シナリオ (A) のケースにおける将来人口を用い、死亡への影響が大きい 65 歳以上の結果を図 I-V-5 と図 I-V-6 に示した。また、関東地方の $0x$ 濃度予測マップとリスクマップを図 I-V-7 と図 I-V-8 に示した。なお、日本においては急速に人口が減少していくと予想され、2100 年の総人口は 2000 年の 40% 以下の 5 千万人を下回ると推計されている。

ところで、現在アジア大陸から日本に移流してくる大気汚染物質は年々増加し、すでに 4～5 月の国内の $0x$ 濃度を 5～20ppb 上昇させていると考えられている (Tanimoto et al. 2006)。温暖化による気象変化がもたらす国内の $0x$ 上昇は、2081 年～2100 において多いところでも 10ppb 以下と推定された。大陸からの越境汚染は今後数十年増加し続け、越境汚染による $0x$ 濃度の上昇は温暖化の影響をはるかに上回るものと考えられる。今回の予測では今後の越境汚染による $0x$ 濃度上昇を考慮していないが、基礎とした実際の $0x$ 濃度が上昇すれば、温暖化による濃度上昇はさらに大きくなることとなる。

田村憲治（国立環境研究所）

図 I-V-4 将来の O_x 濃度上昇に伴う死亡リスク評価の方法図 I-V-5 温暖化による O_x 濃度上昇に伴う死亡率の増加

都市集中型の社会シナリオを用いた 65 歳以上の夏季 20 年間における増加死亡率。死亡数は事故死を除いたもの。

図 I-V-6 温暖化による O_x 濃度上昇に伴う死亡数の増加

都市集中型の社会シナリオを用いた 65 歳以上の夏季 20 年間の増加死亡総数。死亡数は事故死を除いたもの。

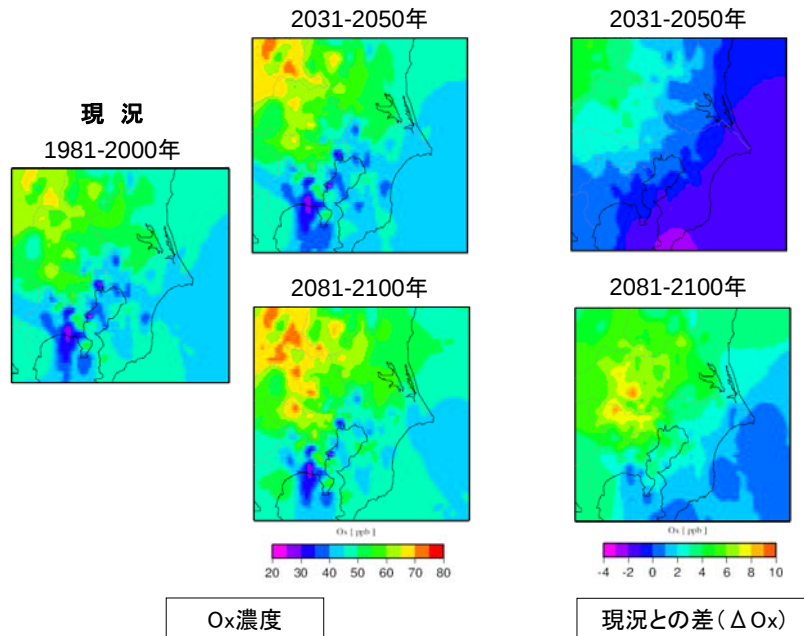


図 I-V-7 関東地方の Ox 濃度予測と現況との濃度差 (ΔOx)

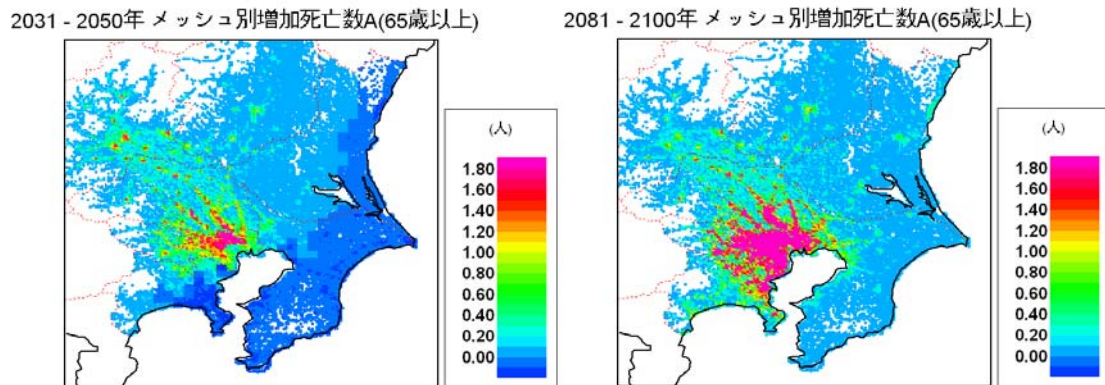


図 I-V-8 関東地方の影響予測

(ΔOx に対する夏季 20 年間の合計死亡増加数)

注： Ox の暴露による死亡数への影響は、 $\Delta M = I_0 (\exp(\beta \Delta Ox) - 1) \times (\text{人口})$ とした。ここで、 ΔM は日死亡数の変化、 I_0 は非事故日死亡率のベースライン値、 ΔOx (ppb) は 1 時間値最高値のベースラインからの増分である。 β は全年齢については 3 つのメタ解析事例 (Tanimoto et al. 2005, Ito et al. 2005, Bell et al. 2005, Levy et al. 2005.) の平均値 $\beta = 7.65 \times 10^{-4}$ (1/ppb) を、また、高齢者 (65 才以上) についてはこれらの文献をもとに推計した値 $\beta = 1.33 \times 10^{-3}$ (1/ppb) を用いた。 I_0 は市町村別死亡数 (高齢者は都府県別死亡数) を国勢調査メッシュ別人口比で案分してメッシュ別死亡数を推定した。将来のメッシュ別人口は、都市域に人口が集中するシナリオ A と地方都市にも人口が分散するシナリオ B の二つのシナリオに基づく年齢階級別推計値を用いた。以上の結果をメッシュ別 ΔOx 濃度と合わせて将来のメッシュ別の死亡増分の推計値 ΔM を求めた。

参考文献：Tanimoto et al. 2005, Ito et al. 2005, Bell et al. 2005, Levy et al. 2005

(4) デング熱・マラリアの将来予測

デング熱媒介蚊のネッタイシマカの分布可能域が、2100年には九州南部・東西海岸線、高知県、紀伊半島の南部、静岡県、神奈川県、千葉県南部と広範囲に拡大する

デング熱は2-3年毎に世界的な流行が起こると言われているが、最近は毎年のように流行が東南アジア、南太平洋諸国、中南米を中心に起こっている。

温暖化は媒介蚊幼虫の発育期間の短縮、媒介蚊体内で増殖するウイルス数の増加などに影響を与えると考えられる。一方、マラリアに関しては、30℃以上の高温は原虫の蚊体内での発育を阻害することが知られている。その意味で、アフリカ諸国のより海拔高度の高い地域へ媒介蚊が分布域を広げ、その結果高地でマラリアの流行が起こることが予想されている。

デング熱の重要な媒介蚊であるネッタイシマカは、1月の平均気温が10℃以上の地域に分布する可能性が指摘されている。そこで、温暖化によるネッタイシマカの分布可能域を検討するために、MIR0Cモデルで2100年における1月の平均気温を推定したところ、沖縄から種子島までが、現在デング熱が流行している台湾南部の都市とほぼ同様の平均気温（およそ17℃）になることが明らかとなった。また、ネッタイシマカが分布可能な地域が九州南部から東西の海岸線、高知県、紀伊半島の南部、静岡県、神奈川県、千葉県南部と広範囲に拡大することが示された。

小林睦生（国立感染症研究所）

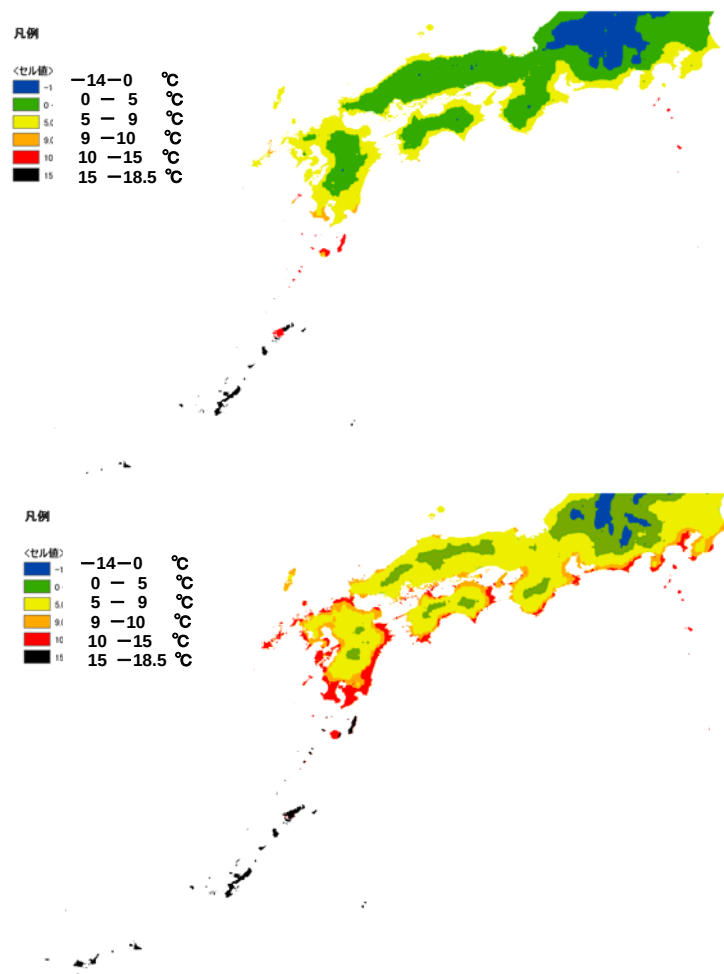


図 I-V-9 1月の平均気温の温度分布(上:2035年、下2100年) (ネッタイシマカの分布域拡大予測)

ヒトスジシマカの分布域は、現在、岩手・秋田に達している

ヒトスジシマカは、デング熱、チクングニヤ熱などの媒介蚊で東南アジアを起源とするヤブカである。1950 年は栃木県が分布北限であったが、徐々に分布域を拡大し、1990 年代には秋田県及び岩手県に分布拡大した。同蚊は朝方から夕方まで執拗にヒトから吸血をし、発生数の多い住宅地では5月から9月まで庭仕事ができないほど被害が大きいヤブカである。また、吸血嗜好性が広く、ヒト、イヌ、ネコ、ネズミなどのほ乳動物、カモ、スズメなどの野鳥から吸血することが知られており、米国ではウエストナイルウイルスの媒介蚊としても知られている。

このヤブカは古タイヤの溜まり水に発生して

いる幼虫や内側に付着した卵が運ばれることによって長距離を移動し、アメリカへの移動も日本から輸出された古タイヤが原因であった。現在、北米、中南米、ヨーロッパ、アフリカなどに分布域を広げており、新しい環境への適応能力が高い蚊である。デング熱、チクングニヤ熱、ウエストナイル熱の媒介蚊であり、刺されて痒いだけの不快昆虫ではないことを再認識すべきであり、平時から幼虫防除を行って、発生密度を極力抑えることが蚊媒介性感染症の予防対策につながると考えられる。

小林睦生（国立感染症研究所）

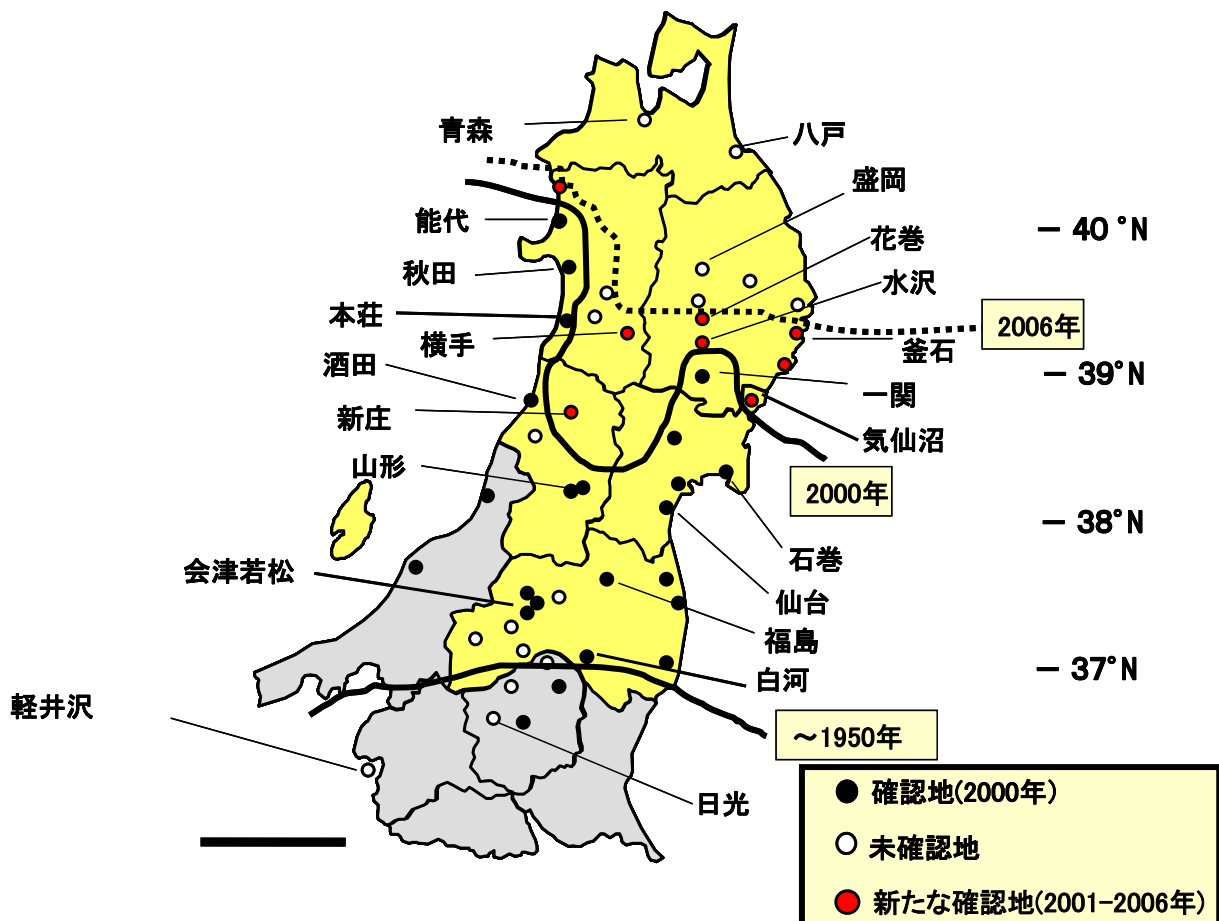


図 I-V-10 東北地方におけるヒトスジシマカの分布北限（2000～2006 年）

Kobayashi et al. 2008 : Journal of Disaster Research より転載

ヒトスジシマカの分布域が 2100 年には東北地方全域および北海道の一部に広がる

気候シナリオ MIROC を用いた年平均気温の将来予測によると、ヒトスジシマカが安定して分布する年平均気温 11℃以上の地域が、2035 年には青森県の津軽平野、青森市周辺、八戸市周辺に拡大する。また、2100 年には東北地方のほぼ全ての平地にヒトスジシマカの分布が広がり、北海道の函館を含む南部の海岸線、室蘭から苫小牧にかけての海岸線および小樽を含む札幌市周辺の平地に分布域を広げる可能性が示された。

北イタリアでの分布域拡大から考えて高緯度が休眠卵の産下のタイミングに影響を与えないことが示され、北緯 42-43 度の地域に分布域を拡大する可能性が示唆された。

成虫の発生密度がどの程度になるか予測が難しいが、2100 年には東北地方のヒトスジシマカの発生密度は現在の東京以西の地域と同等になることが予想され、デング熱やチクングニヤ熱のリスク地域が今後明らかに拡大すると考えられる。

小林睦生（国立感染症研究所）

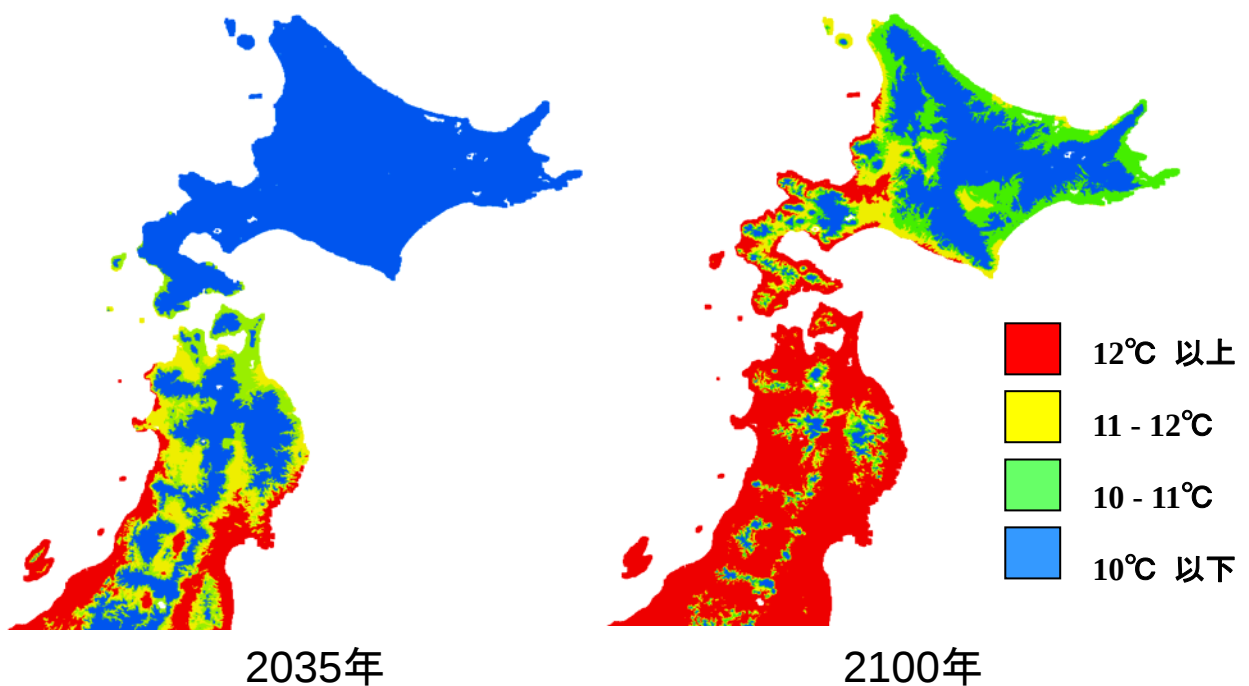


図 I-V-11 MIROC データによる予測年平均気温の分布

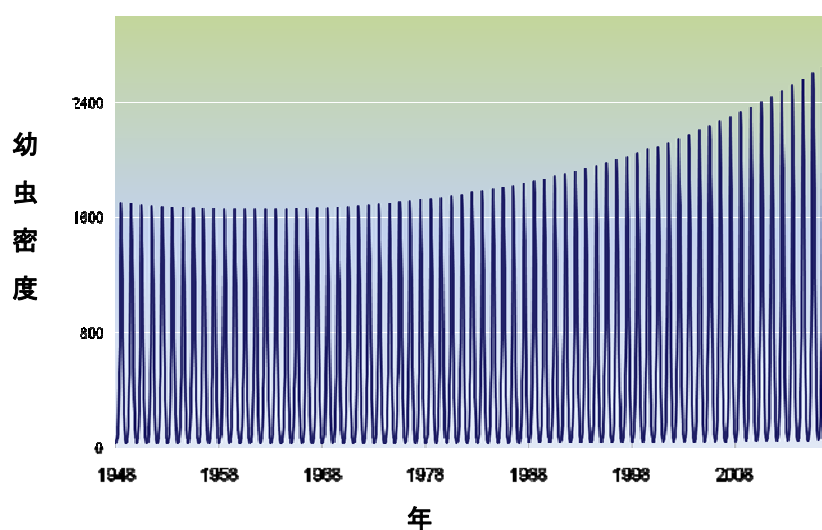
温暖化によるマラリア再流行の可能性は低い

かつて日本では、三日熱マラリアと熱帯熱マラリアの2種類のマラリアが問題であったが、1961年以降、国内ではいずれの流行例も報告されていない。マラリアの侵入と再流行は、媒介蚊が一定密度以上で生息する地域に、マラリア原虫保有者が侵入することによって起こる。そこで、温暖化の影響を直接受けやすいとされる熱帯熱マラリアの侵入と再流行を予測するため、国内の熱帯熱マラリア媒介蚊の現在の生息状況調査を行ない、過去の調査結果と比較した。コガタハマダラカの分布は過去とほとんど変わらず、沖縄県八重山諸島に局限されていた。コガタハマダラカの飛翔可能距離は短く、生息の為の温度条件を満たす地域が増加したとしても、島つたいに生息地が拡大していく可能性は殆どない。ただし、温暖化傾向が続けば、現生息地におけるコガタハマダラカの幼虫密度は増加していく可能性が高い(図I-V-12)。しかし、温暖化がさらに進み、最低温度がマラリア原虫とコガタハマダラカの最適発育である23-25℃を超える日が多くなると、幼虫密度は、かえって減少に転ずると予想される。

今後我が国で心配されるのは、輸入患者から

の蚊を介しての2次感染である。少数例からマラリアの感染拡大がみられた事例として、1951年に10人の感染者から発生した石垣島小川村での熱帯熱マラリア流行がある。この流行を数理モデル化し、1000回のシミュレーションを行った(図I-V-13)。10人以上の輸入例があった場合、仮に1950年代と同じような対応しなかったとすれば、現在の気候条件でも八重山諸島で小流行が起きる可能性を否定できない。ただし、近年、実際のマラリア輸入例は、1-2例が散発的に発生し、診断後は治療を受けるのが通例である。そこで、2人のマラリア感染者が同時に現在のコガタハマダラカ生息地に帰国し、1ヶ月後に治療を受け始めるという仮定のもとに流行パターンを数理モデル化し、1000回のシミュレーションを行ったところ、この条件では2次感染や再流行が起きる可能性はほとんどないという結果となった(図I-V-14)。従って、現在の日本の状況では、仮に少数の輸入患者があったとしてもマラリア再流行の可能性は非常に低いといえる。

大前比呂思(国立感染症研究所)



図I-V-12 温暖化、降水量変化に伴う八重山諸島におけるコガタハマダラカ: *An. minimus* 幼虫密度の変化予測

(原図 岡山大学大学院環境学研究科 石川洋文、植木優夫、笛田薫)

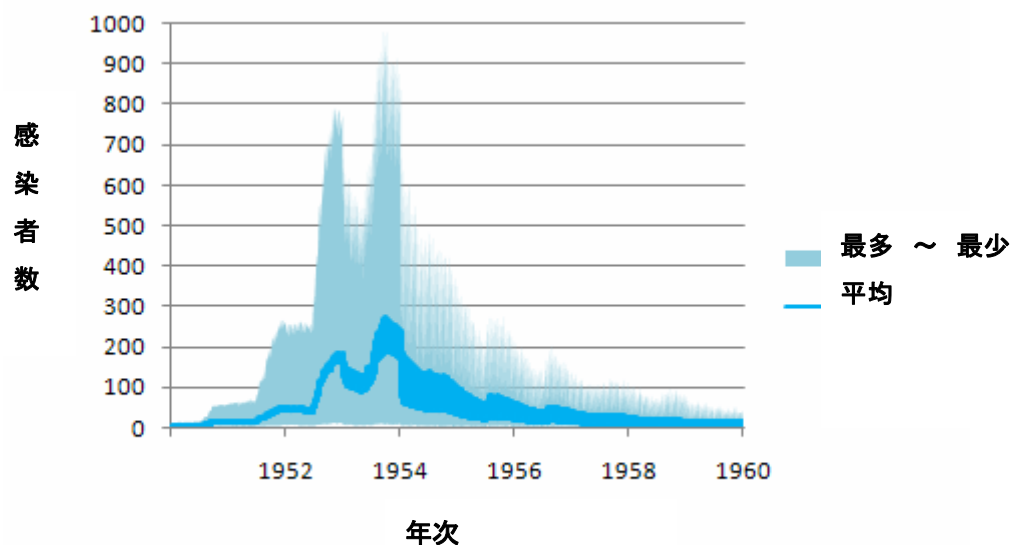


図 I-V-13 日本における熱帯熱マラリアの侵入・再流行モデルの一例（1950年代の石垣島、小原村において患者10人から始まった熱帯熱マラリア流行のシミュレーション（一試行回数1000回））
（原図 岡山大学大学院環境学研究科 石川洋文、中川祐希）

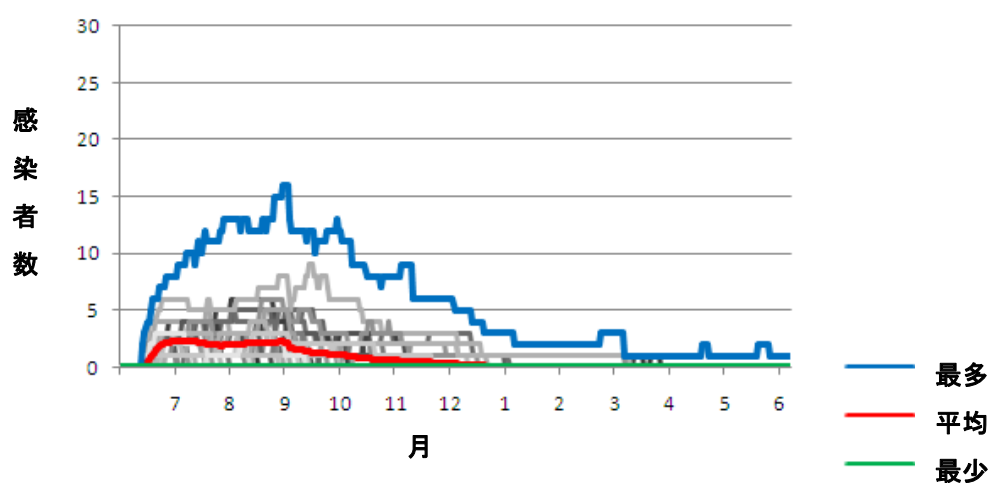


図 I-V-14 日本における熱帯熱マラリアの侵入・再流行モデルの一例（図 I-V-13 を基礎に、石垣島のコガタハマダラカ生息地に2名の感染者が侵入したケースを考える。診断までの期間は、次第に短縮されていくと想定する。）（一試行回数1000回）
（原図 岡山大学大学院環境学研究科 石川洋文、中川祐希）

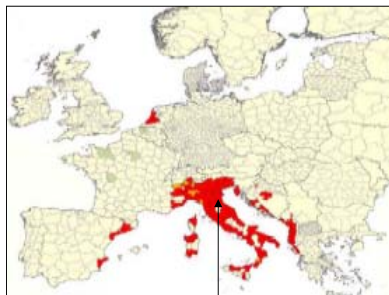
コラム

ヨーロッパにおけるヒトスジシマカの分布の現状とチクングニヤ熱の流行

チクングニヤ熱は蚊が媒介するウイルス感染症で、主にヒトスジシマカとネッタイシマカが媒介する。2005～2006 年にかけてインド洋諸島国、インド、スリランカなどで 170 万人規模の患者が発生した大きな流行があった。

2007 年に、インドで感染した 1 人の患者が原因となって、突然北イタリアの小さな村でチクングニヤ熱の流行が起こり、約 300 名の患者（1 名死亡）が発生した。イタリアでは 1990 年に初めてヒトスジシマカが確認され、その後約 16 年間でほぼ全土に分布域が拡大し、蚊の発生密度も高いことが報告されている。今後の温暖化の進み具合によっては、ヨーロッパ諸国全域にヒトスジシマカの分布が拡大することが予想され、感染症のリスク地域が拡大する可能性が考えられる。

小林睦生・二瓶直子（国立感染症研究所）



チクングニヤ熱の流行
が起こった村

図 I-V-15 ヨーロッパにおけるヒトスジシマカの分布の現状

ECDC Mission Report : Chikungunya in Italy
17-21. 09. 2007 より転載

コラム

大阪府におけるセアカゴケグモの分布域拡大(1995～2006 年)

セアカゴケグモは蛋白性の神経毒を持つゴケグモで、抗毒血清が開発される以前のオーストラリアでは、相当数の咬症患者が死亡していた。1995 年に大阪湾岸で初めて分布が確認されて以来、急速に分布域を拡大している。

1997 年に関西国際空港の作業員が咬まれて以来、2005 年までで 4 名の咬症例が発生している。その後 2006 年と 2007 年には各 6 名と急激に咬症例が増加した。これは、新規造成地で見られていたゴケグモが一般住宅へ侵入を開始したことを意味しており、高齢者に被害が集中する傾向が認められている。

実際、庭先においてあるサンダルや長靴をはいた時に咬まれた、戸袋に手を入れて咬まれたなど、ゴケグモの存在に気がつかない状況で咬まれる症例が多い。

現在、大阪府以外に兵庫県、京都府、和歌山県、三重県、愛知県などに分布が確認されている。ゴケグモの密度が高いオーストラリアのブリスベンは、大阪府より年平均気温が高く、冬期（7 月）の平均気温は約 15℃と奄美大島の平均気温（1 月）とほぼ一致する。今後温暖化が進んだ場合、よりセアカゴケグモの発生密度が高まることが予想される。

小林睦生（国立感染症研究所）

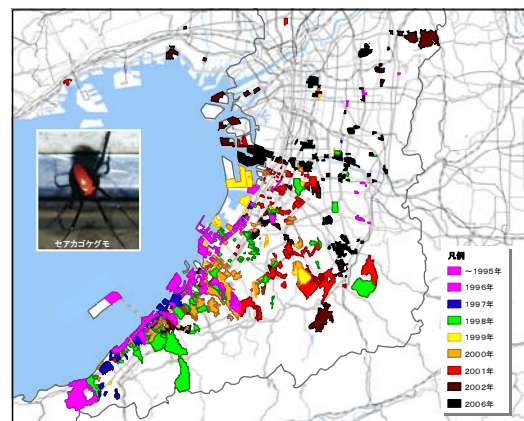


図 I-V-16 大阪府におけるセアカゴケグモの分布域拡大(1995-2006)

参考文献：小林睦生ら（2007）

コラム 台湾におけるデング熱流行状況

デング熱は世界で最も患者数の多い蚊媒介性ウイルス感染症である。1990 年以前までは台湾にデング熱の流行はなかった。近年、台湾においてはデング熱の流行が見られる（図 I-V-17）。患者のほとんどは台湾南部（図 I-V-18、赤で塗った地域）で見られるが、この地域はネッタイシマカの分布域とほぼ一致する。台湾においても年平均気温の上昇が見られ、今後ネッタイシマカの分布域の北上とともに、デング熱流行域の北上が予想される。

小林睦生（国立感染症研究所）

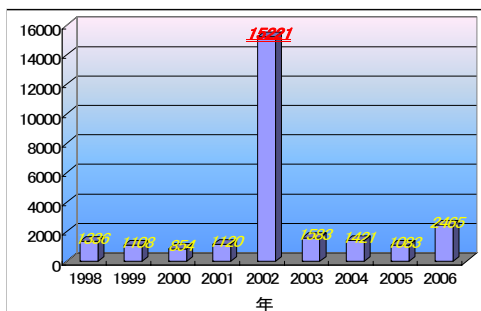


図 I-V-17 台湾におけるデング熱患者の発生状況



図 I-V-18 台湾におけるデング熱の流行地域

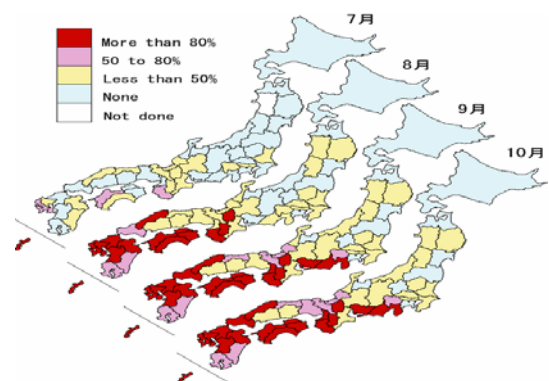
コラム 日本脳炎ウイルスの活動と温暖化

日本脳炎はコガタアカイエカによって媒介される脳炎である。日本脳炎ウイルスの活動はブタにおける日本脳炎抗体によって反映されることが知られている。上図は冷夏であった 1993 年、下図は暑夏であった 1994 年の日本脳炎抗体陽性ブタの率である。

1994 年には東北地方においても高い抗体陽性率となった。このことは、温暖化で夏季の気温が高くなることにより、日本脳炎ウイルスの活動が盛んになり、東北地方や北海道においても日本脳炎患者が発生する可能性を示している。

小林睦生（国立感染症研究所）

1993年(冷夏)



1994年(暑夏)

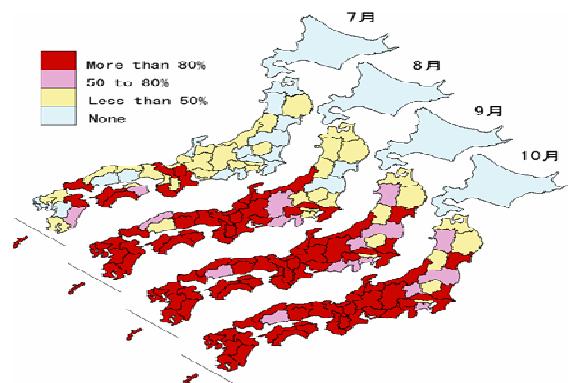


図 I-V-19 日本脳炎抗体陽性ブタの率



我が国における温暖化がマ ラリアに及ぼす影響に関す る考察

地球温暖化とマラリアの流行拡大については、世界的に色々な予測結果が公表されているが、未だ議論の多い分野である。気温上昇によりかなりの地域で流行が拡大するというモデルは、温暖化に伴いマラリア媒介蚊の生息できる標高限界が上昇していくという、アフリカ高地での経験により作成されたが、他の地域に当てはめる場合、大きな修正を迫られる。特にこのモデルを温帯の島嶼国である日本に当てはめる場合、地域毎に植生や土地利用、媒介蚊の特徴などを十分に考慮する必要がある。今回は主に、温度条件による影響を受けやすい熱帯熱マラリアについて、わが国における再流行の可能性を検討した。かつて我が国において熱帯熱マラリアの主要媒介蚊であったコガタハマダラカの生息状況を調査したところ、現在も八重山群島で生息しているが、特に生息地が拡大している傾向はみられなかった。今後、平均気温が3℃上昇すると、九州や四国の一部も温度条件からみたコガタハマダラカの生息可能地域に入るが、植生や土地利用状況からみると、短期間のうちに実際に生息できるようになる可能性は低い。また、コガタハマダラカの飛翔距離は限られているため、温度条件をクリアできたとしても、今後実際に島伝いにその生息範囲を拡大していく可能性も低い。また、1950年代にみられた石垣島でのマラリア小流行と平均気温の変動との間にも、特に関係はみられなかった。ただ最近、石垣島においても、温暖化の傾向は明らかであり、1990年代に行われた調査結果を基礎とすると、今後降水量や気温の変化が進むと、コガタハマダラカの幼虫密度が増加していく可能性が指摘される。しかしその場合でも、熱帯熱マラリアが日本に侵入・定着して再流行を起こすには、他の色々な条件が重なる必要があり、実際に再流行が起きる可能性は非常に低い。

大前比呂思（国立感染症研究所）

6. 分野別影響の統合評価

気候シナリオにMIROCを適用し、統合評価モデルを用いた温暖化影響評価を行い、1990年を基準年とした気温上昇をX軸に分野別影響変化と気候変化を整理した（図 I-VI-1~3）。

洪水氾濫の影響は（1.3 (1) 参照）、気候シナリオMIROCから推計された各期の50年に一回の降雨（以後、極値降雨）が降った時に生じる被害を推計している。この極値降雨は、将来に渡って変化している。洪水氾濫面積と被害額は2℃を越えるあたりまで、気温上昇に伴いなだらかに増加するが、2℃を越えたあたりで氾濫面積および被害額がより悪化する傾向を示し、その悪化傾向は被害額の方がより大きい。これは、洪

水氾濫域がより都市域（経済価値の高いエリア）に迫ることを表している。これは、氾濫面積と被害額の変化の比較からも明らかであり、2.5℃あたりでは、氾濫面積5%拡大するとき、被害額はおよそ2倍と、氾濫面積の変化率の約40倍となっている。

斜面災害の影響は（1.3 (2) 参照）、洪水氾濫影響と同様に、気候シナリオMIROCから推計された各期の50年に一回の降雨（極値降雨）が降った時に生じる被害を推計している。斜面災害の影響は、2℃を越えるあたりまではその影響が2%増加の幅に収まっているが、2℃を越えたあたりから影響が増加する傾向を示す。

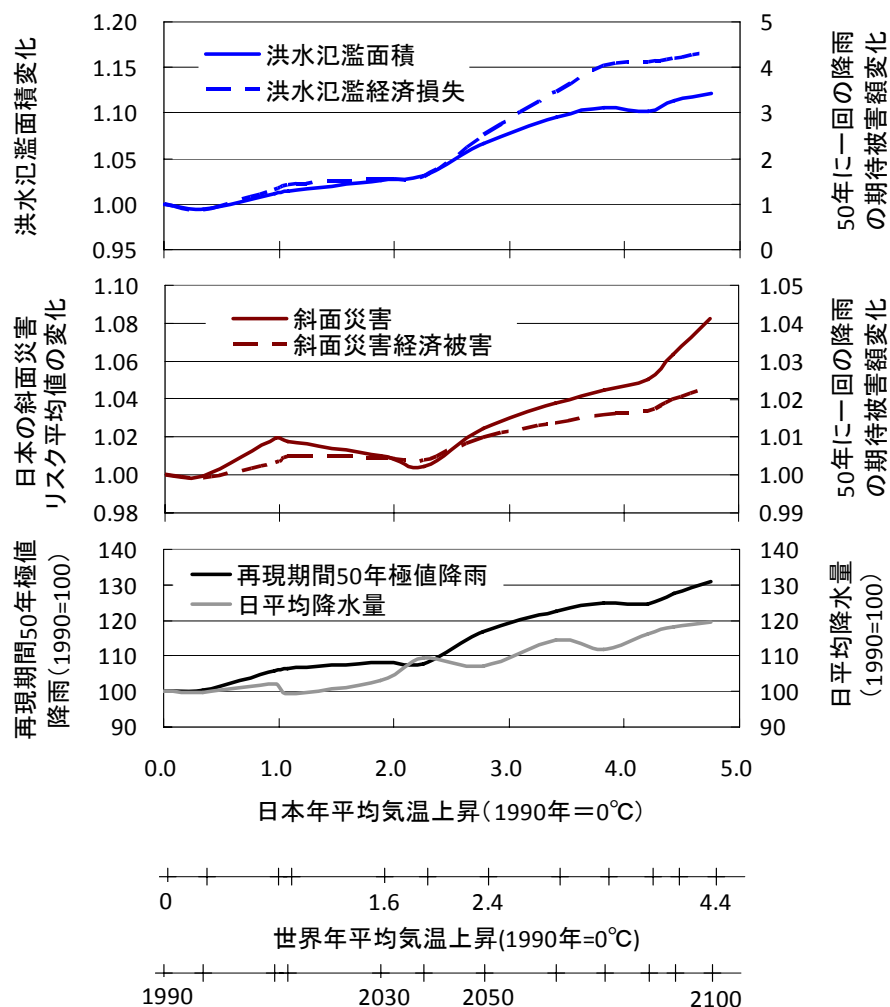


図 I-VI-1 気温上昇と洪水氾濫，斜面災害への影響

I. 分野別影響の総合評価

ブナ林の分布適域は（2.3 (1) 参照）、温暖化による影響が大きく、気温上昇が約1.5℃で約30%減少、約2.5℃で50%減少、約4℃で約80%近く減少する。マツ枯れ被害危険域面積（2.3 (2) 参照）もブナ林と同様に温暖化の影響が大きく、気温上昇が約1.2℃で約1.3倍、約2.0℃で約1.5倍、約4℃で約2倍近くまで増加する。いずれも、1℃程度の気温上昇でも大きな影響が現れることがわかる。

コメ収量は（3.3 (1) 参照）、他の指標と異なる傾向を示す。気温上昇がおおよそ2℃に達する

までは生産性の向上が見られ、その後減少傾向に転じる。約2.6℃あたりまでは、現状と比べて生産性の低下は見られないが、その後気温の上昇に伴い、現状以下に減少する。収量は年平均気温だけでは情報が不十分で、同じ平均気温でも夏季の状況で大きく結果が変わることがわかっている。なお、ここで示すコメ収量の値は、日射量、CO₂濃度の値は、統合評価モデルを用いた得られたものではなく、3.3 (1) で示されている結果を気温上昇1℃単位で平均化したものである。

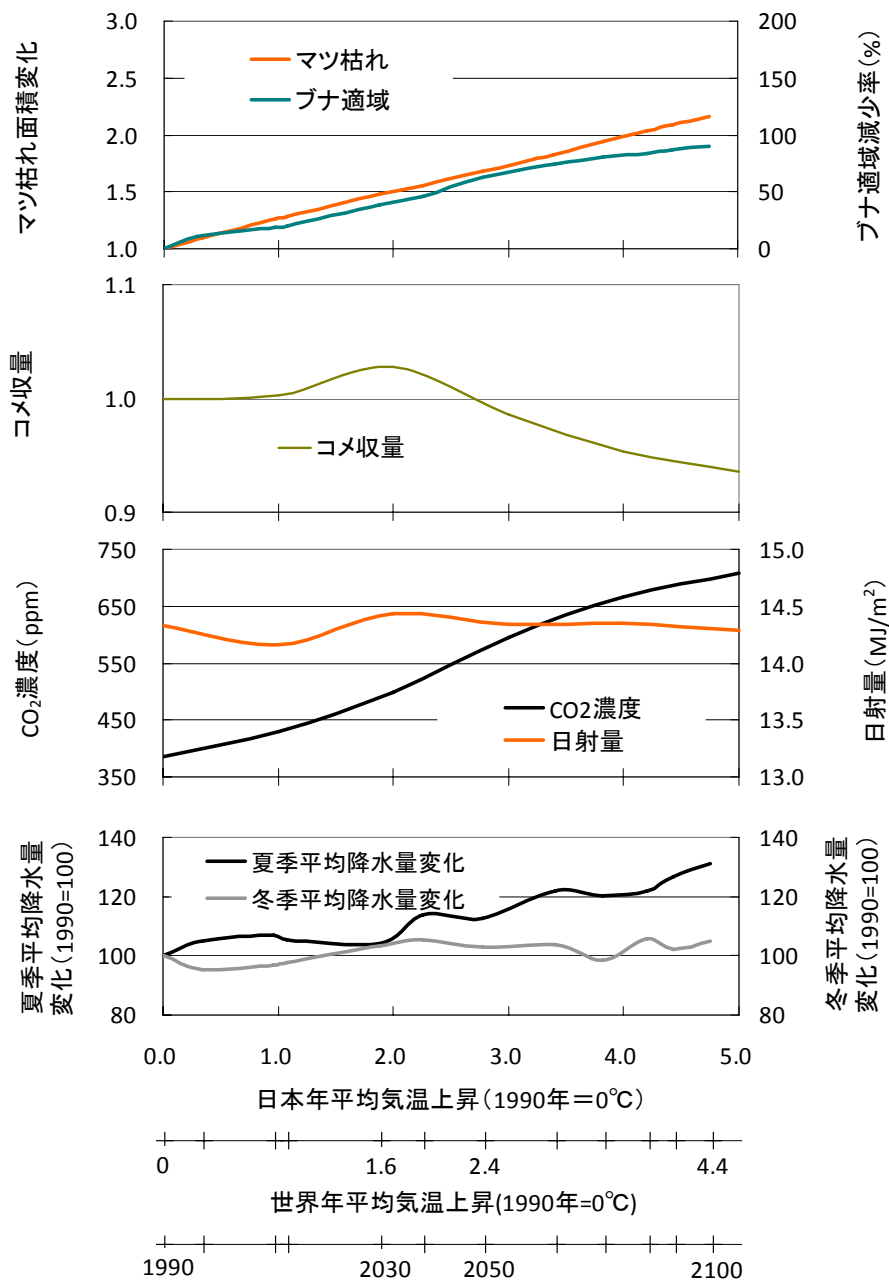


図 I -VI-2 気温上昇とブナ適域，松枯れ面積，コメ収量への影響

高潮浸水面積と人口は西日本および三大湾の合計値であり、基準年を 2000 年、台風強度は 2100 年に 1.3 に達するよう計算されている。高潮浸水の影響は (4.3 (1) 参照)、気温上昇と共にかなりの増加傾向を示す。約 2℃の気温上昇で高潮浸水面積は約 1.4 倍、浸水人口は約 1.7 倍となり、約 3℃の気温上昇で高潮浸水面積は約 1.7 倍、約 4℃の気温上昇で浸水人口は約 3.2 倍となる。

本研究で算定した熱ストレス死亡リスクは、暑熱による過ごし難さを、暑熱日における死亡率と最適な気温における死亡率との相違を用いて、定量的に示したものとみなせる。よって、熱ストレス死亡リスクは (1.3 (1) 参照)、気温上昇に伴い暑熱日が増加することで単調に上昇する。我々の社会は、現在の気候条件に合わせ、空調の設置・利用をはじめとした暑さ対策を取っており、現在気候下での熱ストレス死亡リスクはその対策の結果として依然残る暑熱による

過ごし難さを示している。本研究で算定した気温上昇時の熱ストレス死亡リスクは、現在気候にバランスした程度の暑さ対策を将来気候下でも継続すると仮定した場合の、暑熱による過ごし難さの増加を示しており、図が示すようにその増加が著しいということは、今後、気温上昇に応じて、現時点より多くの暑さ対策の実施が必要となることを示唆している。ただし、具体的にどの程度の追加対策が適当であるかは、対策実施の費用便益の分析が必要であり、今後の研究課題である。

なお、今回示す結果は気候シナリオMIROCのみを用いたものである。気温上昇に伴う降雨や日射量などの変化はGCMの結果によって異なるため、気温以外の気候変化を説明変数とする影響評価指標は、GCMの結果に大きく依存することに留意する必要がある。

脇岡靖明・高橋潔・原沢英夫（国立環境研究所）

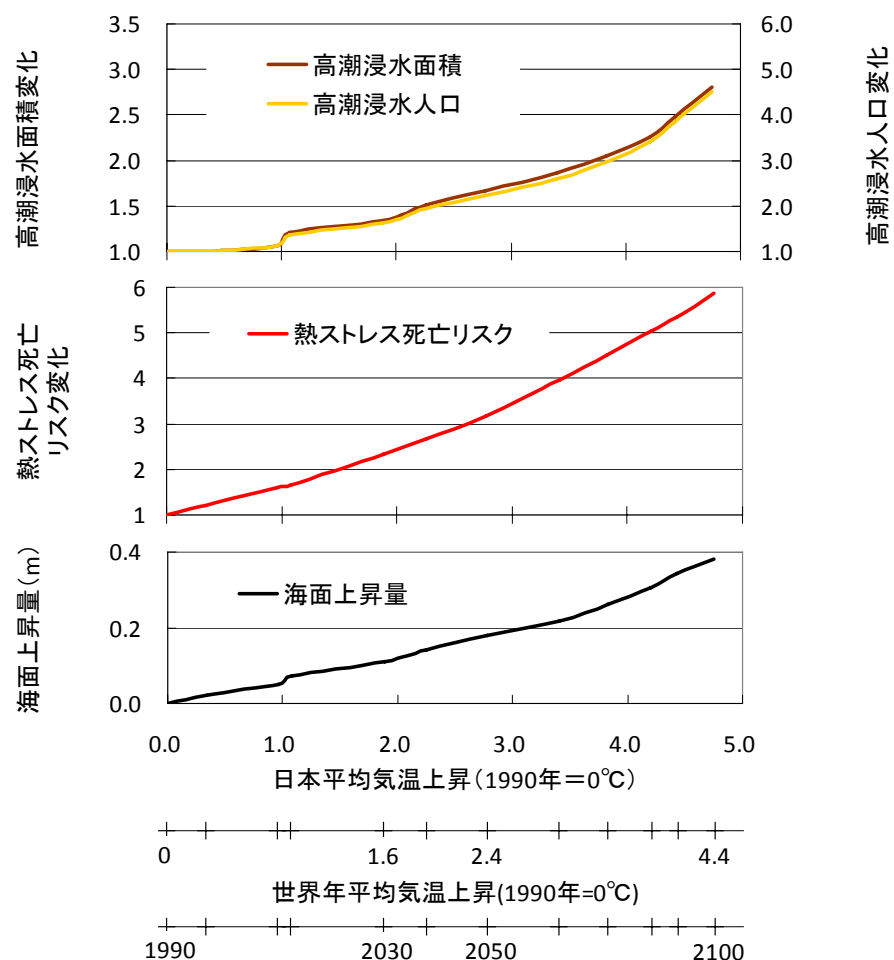


図 I-VI-3 気温上昇と高潮浸水、熱ストレス死亡リスクへの影響

II. 適応策と今後の課題

本研究では、我が国に対する気候変動の影響をこれまでになく詳細に明らかにした。温暖化に対する対策にはCO₂などの排出削減を行う緩和策と悪影響に備える適応策の2つがあるが、今後数十年間にわたって温暖化の進行が避けられない以上、適応策の導入が必要である。しかし、適応策だけで影響の全てを抑制できるわけではないため、緩和策と両方実施することが不可欠である。このように、温暖化の悪影響を一定範囲以内に抑えるためには、適応策と緩和策の最適な組み合わせが必要なことが世界の一致した見方になってきている。

適応策には、政策的・制度的対策、技術的対策、社会的対策など幅広い対応策が考えられる。我が国では、長く防災や環境管理、食料生産、国民の健康の確保を行っており、施策や技術ツールは多くの実績がある。気候変動への適応策では、将来の気候予測に合わせて、これらをいかに組み合わせて、効果的・効率的な気候変動への適応策を計画するかが課題である。その際、他のメリットもある対策や新たな環境負荷を生み出さない配慮が必要である。

本研究では、具体的な適応策の研究は今後の課題であるが、分野毎に行われてきた検討内容を以下に示す。

1. 水資源への影響

水資源の分野では、安全・安心な国民生活を確保するために、施設による防災や水の供給の確保、都市計画や土地利用の誘導による危険な地域の過度の利用の制限、早期警戒システムやハザードマップなどによる防災意識の向上といった適応策が考えられる。しかし、単一の対策で完全に有効なものではなく、これらを組み合わせた総合的な適応策が重要である。以下、影響事項毎に既に指摘した事項を再度列挙する。

洪水氾濫に対しては、予算を潤沢に用意でき

ない状況では、従来の治水整備、例えば大ダムやスーパー堤防等とは異なる方策、例えば早期警戒システムや洪水受容型住宅の建設が必要である。被害額の大きい地域は、氾濫を封じ込めるような従来型の施設（堤防、ダム、地下放水路）による治水を優先し、予想される被害額の小さい地域では、土地利用の管理や危機管理対応型の適応策を優先すべきと考えられる。例えば、早期警戒システムの構築や、洪水許容型住宅地の奨励、新規開発地域の制御等が含まれる。

斜面災害に対しては、土石流が生じる場合、その地点だけではなく下流へ伝播するため、流域全体を見た防災システムが必要である。また、土砂生産の増加に対しては、砂防事業やブレダム（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り、下流への影響が大きいため、慎重に計画する必要がある。

積雪水資源の減少に対しては、簡単な適応策はないが、水利権の見直しや田植え時期の変更などの適応が考えられる。また、雪崩対策と一緒に行うことができる雪ダムも貯留効果をあげる手法である。

2. 森林への影響

温暖化に対応して野生生物がスムーズに移動を行えるようにするために、緑の回廊（コリドー）の設定が重要である。その際、人工林や人工草地・耕地等が移動の障害となる場合は自然林に転換していくことがコリドーの機能を高めることに役立つと考えられる。

温暖化による環境変化に対応して、国立公園や生態系保護地域などの自然保護区の意義が変質し、保護区がそこに分布する種の一部にとっては不適な環境になってしまう。したがって、

保護区内の状況を把握するためにモニタリングを実施し、必要に応じて保護区を見直していくことが今後必要になる。

温暖化の時代に自然林や植物種を保全するためには、自然林の動態の中でどのような変化が起こっているかを把握するモニタリングが特に重要になる。もし、自然林に変化が検出された場合、それを受け入れるべきものであるか、適応策を講じるべきものであるか、関係者を集めた協議会などで検討する必要がある。こうして、自然林の変化に応じて、管理方法を時々再検討する順応的管理を行うことが重要である。

特定の植物種の衰退が温暖化の影響と考えられる場合、自然の変化に任せてその植物種が温暖な条件に適する別種に置き換わることを受け入れることは、自然林の管理における主要な選択肢の一つである。たとえば、温暖化により分布適域から外れて衰退が進行するブナ林では、ブナ林を維持するための植栽等の適応策を行うかどうかの判断が求められる。ブナが衰退しても、温暖な気候に適するコナラやモミ・カシ類がブナに置き換われれば、森林としての生態的サービスは維持されることになる。野生植物の播種や植栽は、遺伝的多様性の攪乱を引き起こす危険性があり、保育も含めて多額の費用がかかる。そうであれば、どうしてもブナ林に維持しなければならない理由がなければ、植栽等の人為を加えず、森林の変化を見守るためモニタリングしていく方が賢い選択だろう。モニタリングを通して、森林の再生が困難なことが明らかとなった場合にのみ森林の再生を促進させる天然更新補助作業（林床処理、播種、植栽など）を検討すればよいだろう。

ニホンジカが増え過ぎると、造林地の植栽木の食害や自然林の野生植物の食害などの悪影響を及ぼすようになる。ニホンジカの個体数の増加や分布域の変化には温暖化だけでなく他の要因も影響していると考えられるが、被害を軽減するためには個体数の適正な管理が必要なことは明らかである。この場合も、ニホンジカの個体

数や分布域、その影響をモニタリングすることにより、森林生態系の順応的管理が可能となる。

3. 農業への影響

(1) 適応策の基本的考え方

気候変化の影響に対して、現在、農業分野で適応策として考えられている方策は主に、1) 移植日の移動、2) 施肥・水管理、3) 品種改良である。適応策の優先度は、省力性(簡便性)、コスト、効果が重要である。

(2) 具体的適応策の例

① 予防的な適応策として、作付する品種の選択や移植時期、堆肥投入による地力の向上、対症療法的な適応策としては、穂肥の量・時期や水管理の方法を高温の発生に応じて決めることが挙げられる。これらは、早期に精度の高い気象予測(予報)情報と組み合わせることにより高い効果が期待される。

② 農家で慣行的に行われる出穂の1ヶ月前頃の落水(中干し)およびそれに続く約1ヵ月半の間断灌漑(3日間水を張り、2日間水を落とすサイクルを繰り返す)は、常時湛水に比べて、土壌中のメタン産生菌の活動低下を介してメタン発生を大幅に抑制する。このような水管理は根の活性維持などを介した高温対策の一つにもなり得るので、温暖化への適応と抑制を兼ね備えた技術になり得る。

(3) 今後の課題

① 平均的な変化による影響だけでなく、干ばつ、多雨、台風等、異常気象・自然災害による年々変動の影響に関する研究を推進する必要がある。

② 気候変化に伴い病虫害の発生が頻度、量ともに大きくなる恐れがあり、それらによる被害の研究を推進する必要がある。

③ 水稻については、登熟期の高温が玄米の生長や外観品質に影響を及ぼし、開花期の高温が受精に影響を及ぼすことが明らかとなってきた。これらの高温影響と日射、湿度などの気象条件、

二酸化炭素濃度、窒素肥料や土壌水分などとの交互作用についてはまだ十分に明らかとはなっていない。高温と他の環境条件とを組み合わせた影響に関する研究を進める必要がある。

④ 作物の高温耐性に関する生理的メカニズムの解明と、それに注目した育種素材や選抜方法の開発のために、DNA マーカーの利用、高温耐性遺伝子の特定などによる品種開発を行う必要がある。

⑤ 作期移動による効果のメカニズムを明らかにし、地力、施肥、水等の適切な土壌条件を明確化し、省力・低コストも兼ね備えた栽培技術について提示する必要がある。

4. 沿岸域への影響

(1) 適応策の総合的メニュー

沿岸域における複合災害に対する適応策の総合的メニューの整理を行った。はじめに、沿岸域における気候変動の外力と災害の関係を図Ⅱ-Ⅳ-1に示す。地球温暖化に起因する気候変動によって海面上昇、台風、降雨変化などの外力が沿岸域における災害に影響を及ぼす。地震は気候変動とは独立した自然現象であるが、気候変動による降雨変化と重なることで斜面崩壊などへの複合災害を引き起こす可能性がある。

次に、これらの沿岸域の災害への適応策を表Ⅱ-Ⅳ-1にまとめた。適応策は撤退、順応、防護に大別され、堤防の嵩上げ、水門などの技術的な対策から、移住、災害保険など社会的な対策に至るまで多岐にわたる。総合的な適応策の実施には技術的な対策だけでなく、社会・経済的な対応が求められる。

(2) 適応能力の検討

気候変動への脆弱性を軽減するには、海面上昇などの外力に対する抵抗力(適応能力)を高めることが一つの方法である。本研究では潜在的な適応能力を把握するために都道府県別の人間開発指数(Human Development Index: HDI)を計測した。HDI は、寿命指数、教育指数水準、所

得指数から算出され、適応能力の代理変数としてしばしば用いられる。

$$\text{HDI} = (1/3) (\text{Life expectancy index} + \text{Education index} + \text{GDP index}) \quad (1)$$

日本の都道府県別の違いは比較的軽微であるが、東京、愛知、滋賀などが上位となる一方、青森、沖縄、長崎が下位となっている。これは一人当たり所得と寿命が左右したと考えられる。HDI は適応能力を構成する代表的な指標の一つであり、ここでは予備的検討としてその代理指標とみなした。具体的な適応策の影響評価に向けては、今後、技術水準や情報インフラ・能力などを採り入れた分析や地域を限定した分析や行う必要があるだろう。

(3) 今後の課題

これまで得られた温暖化が沿岸域の災害に及ぼす影響については、本来、日本全国にわたってどのような影響を及ぼすか、を示すことが望まれている。しかし、影響事象によってはこのことが可能なものとそうでないものがある。また、得られた手法や知見を我が国に比べると、より脆弱なアジア・太平洋地域に展開することも期待されている。このことを踏まえて、以下に今後の課題をまとめた。

1) 温暖化に伴う高潮の影響については、①全国モデルで残る地域の計算を進め、全国の浸水予測を行う必要がある。②また、全国モデルと三大湾モデルを改良し、浸水による被害額を計算し、全国ベースの高潮による影響関数(被害額)を作成することが重要である。③さらに、高潮に対する適応策を考慮するため、堤防強化費用の推定を進めなければならない。

2) これまでに開発してきた将来河川流量の推定方法と浸水・氾濫域推定方法を適用して、全国の代表的な河川下流域における浸水・氾濫域の推定を行うとともに、推定された浸水・氾濫域の土地利用特性を解析し、浸水・氾濫リスクの評価を行うことが望まれる。

3) 堤防堤体材料の脆弱性データベースを、より広範囲の実験条件を設定することにより整備

すると共に、上記データベースを活用した実堤防の脆弱性の指標化、GIS等を活用した河川堤防脆弱性マップの精緻化を行うことが望まれる。

4) 地盤情報が少ないあるいは無いエリアでは、液状化危険度の判定が困難であるため、このようなエリアにおける地盤モデルの作成方法を検討するとともに、より広い地域（大阪平野、濃尾平野、新潟平野、東京湾沿岸）における地震時液状化の影響評価を実施する必要がある。

5) 温暖化による斜面災害リスクの増加を評価するために、温暖化に伴う異常気象の斜面崩壊を誘発する豪雨の発生形態への影響を明らかにするとともに、斜面崩壊による斜面周辺の資産の被害率を同定する必要がある。

6) 具体的な適応策の評価に向けては技術水準や情報インフラ・能力などを採り入れた分析や地域を限定した分析や行う必要がある。また、

温暖化に起因する個別の複合的災害に対する適応策を提案するとともに、それぞれの経済評価を行うことが重要である。

7) アジア・太平洋地域は脆弱な地域が多いので、定量的な脆弱性評価をする必要がある。特にアジアでは温暖化・海面上昇よりも速い速度で人口増加が予測されており、そこに災害が起こった場合の脆弱性評価と、経済成長を考慮した適応策が必要になる。太平洋の島嶼国には標高の低い狭い地域に暮らしている人々が多く、海面上昇に対して最も脆弱である。標高や高潮などのデータも少ないので、データの整備と限られたデータの中での高精度な脆弱性の評価が必要である。限られた資源の中で可能な適応策を見つけることも必要になる。また両地域とともに、自国の伝統技術を活かした適応策の導入が非常に大切である。

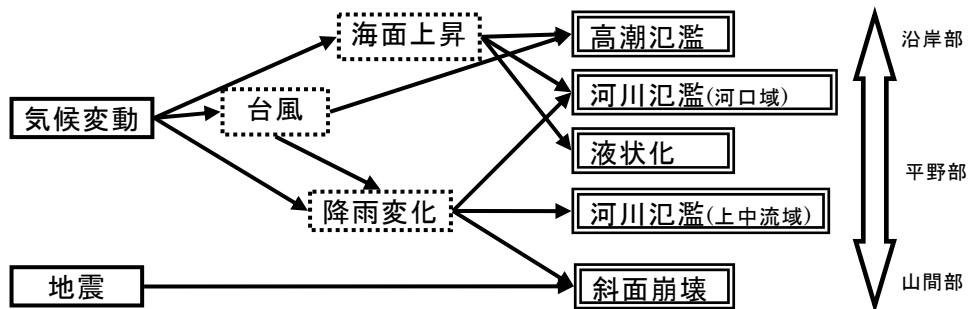


図 II-IV-1 気候変動の外力と災害の関係

表 II-IV-1 沿岸域における適応策

	適応策		
	撤退	順応	防護
高潮氾濫	海岸近隣地域での開発の回避 都市計画・土地利用計画による開発抑制 危険の高い海岸からの移住 移住のための公的補助金	ハザードマップ 土地利用形態の変更 マングローブなどの沿岸生態系の防護 危険地域での厳しい規制 災害保険	堤防の嵩上げ 海岸植生 大型水門 早期警戒システム・避難体制
河川氾濫	都市計画・土地利用計画による開発抑制 危険の高い地域からの移住 移住のための公的補助金	ハザードマップ 土地利用形態の変更 危険地域での厳しい規制 災害保険	堤防の嵩上げ 遮水工 早期警戒システム・避難体制
液状化	都市計画・土地利用計画による開発抑制 危険の高い地域からの移住 移住のための公的補助金	ハザードマップ 土地利用形態の変更 危険地域での厳しい規制 災害保険	地下水位監視 地下水位低下/盛土 地盤改良・地盤補強
斜面崩壊	土地利用計画による開発抑制 危険の高い地域からの移住 移住のための公的補助金	ハザードマップ リスクマップ 危険地域での厳しい規制 災害保険	抑止杭 早期警戒システム・避難体制

5. 健康への影響

(1) 熱ストレスによる死亡リスク・熱中症

高温環境への暴露が直接リスクとなるため、日常生活で高温環境を回避することが最大の対策となる。また、日常生活での一人一人の注意が熱ストレスによる死亡あるいは熱中症予防に重要となる。暑さを避ける（戸外、屋内）、服装に工夫をする、こまめに水分補給をする、体調等の維持を心がける、暑い日の運動を控える、といった簡単な対策が有効となる。（環境省「熱中症保健指導マニュアル」より）

一方、社会としてみると、地域住民への適切な予防情報の提供が重要となる。熱ストレスによる障害、熱中症の発生しやすさ（例えば、暑さ指数：環境省）あるいは予防策を HP 等など通じて発信し、さらには様々な広報手段を通して通知していくことにより、地域住民の適切な行動変容を促すことが可能と考える。

熱波の際に死亡を防ぐために、特に高齢者や呼吸循環系の病気を持つ人々に対しては、緊急避難的にエアコンを適正に使用すべきである。エアコンの普及率の低い寒冷な地域においては、公民館などをシェルターとして整備することも検討すべきである。CO₂ 排出といった負の作用もあるが、熱波に対してはエネルギーを使ってでも熱ストレスを減らす必要がある。

今後の課題としては、エアコンを使用する場合にも、家屋構造やエアコン自体の改良による冷房効率の向上の他、たとえば扇風機や水風呂など、エアコン使用を控えめにできる技術を開発することも重要である。

(2) オキシダント

a) 温暖化による O₃ 濃度上昇を抑制する対策

O₃ 発生の元となる自動車、工場などからの NO_x、VOC などの発生を抑制する。特に電気自動車の普及が有効である。

アジア大陸、特に中国における発生源対策に協力し、越境汚染を低減させる対策も必要である。

b) O₃ が濃度上昇した状況での適応策

O₃ 濃度の監視、高濃度 O₃ 発生予報体制、精度の向上が必要である。また、高濃度 O₃ が予測される場合の通常への対応（屋外作業の自粛、自動車の運転自粛など）も求められる。

ただし、死亡増加のほとんどを占める、リスクが高い（特に疾患を持った）高齢者は、単に外出を避けるだけでなく室内空気の管理も重要である。O₃ 濃度が高い地区においては、濃度が上昇する日中時間帯は室内への外気の取り込みを減らしてエアコンに頼る方が良いことになる。O₃ 生成が進む日射量が多いという条件は、太陽光発電にも適していることから、この推進は有効であろう。

(3) 感染症

デング熱、日本脳炎、マラリアの3種の蚊媒介性感染症においては、適応策がそれぞれ異なっており、一概に論ずることはできない。

使用できるワクチンが未だ存在しないデング熱は、感染者の早期診断、感染者宅周辺でのウイルスを持っている可能性のある媒介蚊成虫の薬剤による防除、常日頃からの住宅周辺での幼虫防除、蚊に刺されづらい服装など個人的な防御法が有効となる。

日本脳炎は、有効なワクチンが存在することからワクチン接種が最も有効な適応策といえる。日本脳炎ウイルスは西日本を中心に現在もコガタアカイエカと豚との間で活発に活動しており、流行地での夜間の野外活動などを行う予定がある場合は、蚊に刺されない準備を行うことも重要である。

マラリアを媒介するハマダラカ類は、田園地帯の牛舎や豚舎周辺の水田や湿地に発生するので、我が国の都市部で生活する場合、接触の機会はずくない。従って、現在年間 70-100 名ほどの輸入マラリア患者が、田園地帯で夜間ハマダラカに刺される可能性も低い、吸血により感染した蚊が、続けて人を吸血する確率はさらに低くなる。その意味では、感染者の早期診断と治療という基本的対応を除き、マラリアは将来的に適応策を考慮する対象とはなりにくいと考えられる。

2005 年からインド洋諸島国、インド、スリラン

カ、東南アジア等でヒトスジシマカが重要な媒介蚊であるチクングニヤ熱が流行している。継続的な媒介蚊の発生状況調査を行い、環境整備および環境に配慮した薬剤の使用による幼虫防除を行うことが、蚊の発生密度を低下させることにつながると考えられる。

参考資料

① 経済評価の考え方と評価手法

温暖化によるさまざまな被害を、貨幣換算値（円/年）で表現することを経済評価という。経済評価では、さまざま被害を受ける経済主体が被る被害を避けるために支払ってもよいと考える支払い意思額（円/年）によって統一的整合的に金額換算を行う。支払い意思額によって金額換算された評価値を被害費用（円/年）という。この被害費用には、温暖化適応策の費用をその一部に含むが、温暖化緩和策の費用とは異なるものである。温暖化緩和策の便益は、ここでいう被害費用の減少額に等しい。ここで対象とする被害には、直接貨幣単位で計測されている被害（市場的影響）のみならず、直接貨幣単位で計測されていない被害（非市場的影響）の両者を含む。本報告で対象としている影響・被害には、市場的影響としては、温暖化による洪水被害とその適応費用、地盤災害と適応費用、海面上昇による高潮被害とその適応費用、米作生産性への影響であり、非市場的影響としては、熱中症などの健康・生命への影響、生態系への影響、海面上昇による砂浜・干潟の減少を対象としている。貨幣換算するに当たって適用する概念は、経済主体が被る被害・損失を避けるために支払ってもよいと考える最低支払い意思額（毎年同じ金額を支払うものとして年あたりの金額所得で表示する）である。ここでいう経済主体は、家計、企業、政府からなり、個々の主体は、自分の利得を最大にするように行動するものとみなす。そして、被害のありなしにおける利得の差分が最低支払い意思額を表す。したがって、被害によって生じる利得の差分を推定することが必要になる。環境経済学・公共経済学・費用便益分析の分野で利得の差分を推定する方法が長年にわたって開発されてきた。最近では、公共事業の評価に当たり、費用便益分析が義務付けられ、マニュアルが整備されている。以下に示す手法は、治水事業、海岸事業、ほ場整備、公園、道路などのマニュアルで採用されている手法であ

る。

第1の方法は、資産・所得の減少、適応のための費用の増加という被害を対象とする。両者ともにそのままその損失金額をさけるための支払い意思額に等しい。対象としている被害では、洪水、高潮、地盤災害が相当する。温暖化により災害頻度と被害規模が大きくなり、政府は、適切な（純便益が最大になる）適応策を行うものとする。その結果、一定規模以上の災害時の被害が増大し、政府に適応策のための費用が増大する。前者は災害時のみに発生するものであるから超過災害時の被害額の期待値の増大という利得の減少であり、後者は増税となるので究極的には人々の利得の損失になる。

第2の方法は、生産性の低下の結果、価格が上昇するという被害の評価方法である。米作の生産性の低下の被害である競争的市場では、平均費の有無に関わらずゼロである。温暖化により生産性が低下すると生産費用が高くなり、その結果、平均費用に等しい価格が形成されているものと見なし得る（したがって温暖化の結果、価格が高くなり需要が減少して生産量が減少するが、仮定により生産者の利得は変化しない。価格上昇後も需要する消費者にとっては価格上昇分×需要量が損失である。この損失は、図Ⅱ-1の斜線をほどこした面積の内で□の面積で示される。これに加えて、消費することをあきらめた消費者の損失を計上する必要がある。消費することをあきらめた消費者はこの米に対して変化後の価格以下で変化前の価格以上の間にある価値、変化前後の価格の中間値の価値を平均値とする価値を見いだしているものと考えることができる。そして、変化前は、変化前の価格を支払っていたので変化前の利得は、価値から変化前の価格の差×需要の減少分である。この利得がなくなったので、これが、消費をあきらめたことの損失である。この部分は図Ⅱ-1の斜線の面積の内で△の面積で示される。結局、生産性の低下は価格の上昇となり、生産量が減少する。この損害は、価格の上昇分×需要の変化前後の中間値として計算することができる

ことがわかる。図では、斜線を示した台形の面積で表される。

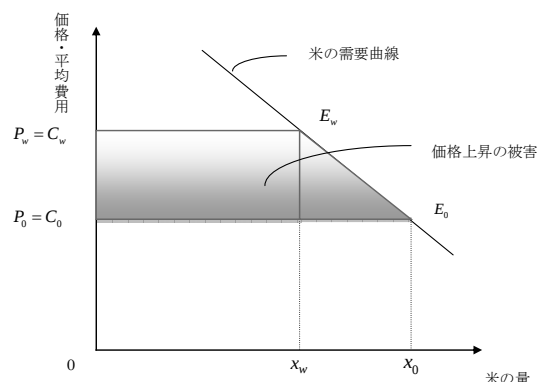
第3の方法は、旅行費用法（TCM, travel cost method）といわれている手法であり、砂浜のレクリエーション価値を計測するのに用いている。ある特定の砂浜に注目し、ある特定の地域からその砂浜に交通費と費やして訪れているという行動に注目する。図Ⅱ-2では、砂浜への訪問重要曲線を示している。訪問者が必要となる交通費以上の価値を砂浜に見いだしているので訪問していると考えることができる。訪問者の価値を大きい順番に並べたものが砂浜に対する需要曲線である。なぜならば、訪問費用に等しい需要の需要曲線の縦の高度はある費用がかかるにもかかわらず追加的に訪問する人の価値がちょうど費用に等しいということを示しているからである。そこで、X人の訪問者が交通費P円で訪問しているときには、X人の砂浜に対する支払い意思額はX人までの需要曲線の下で面積で表現される。実際には $P \times X$ ほどの支払いをしているので、訪問者の利得は、価格線と需要曲線で囲まれた面積で表現されている。これを、消費者余剰という。この消費者余剰を各地域について合計したものが、その特定の砂浜の価値である。海面上昇による砂浜の喪失被害は、喪失する面積比に比例するものと仮定して砂浜の価値に喪失面積比を乗じて計算する。

第4の方法は、CVM(contingent valuation method)といわれている手法である。これは、人々に直接アンケートを行い、その支払い意思額を訪ねる手法である。上記のように人々の行動から利得や支払い意思額を推測できない被害に対して適用される手法である。本報告では、病気や死亡の確率が増加するのをさけるための支払い意思額、干潟がなくなるのをさけるための支払い意思額、松枯れの増加をさけるための支払い意思額を計測している。

このように、被害の形態に応じて適切な評価方法を用いているのは、できるだけ、人々の行動に注目してその行動から導くことができるという意味で客観的な損害額を求めようとしているた

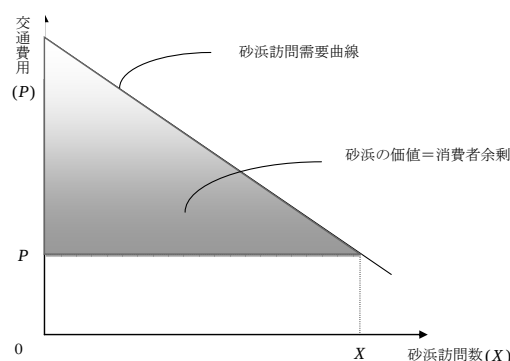
めである。行動に現れない時には、CVMを用いる以外にないのが現状である。以上の被害対象に対してそれぞれの適応する手法で温暖化の被害額を計算したものは、最後の表に示すとおりである。

森杉壽芳（（財）日本総合研究所・東北大学）



$P_w = C_w, x_w$: 温暖化したときの米の価格（＝平均生産費用）、米の消費量
 $P_0 = C_0, x_0$: 温暖化なしの米の価格（＝平均生産費用）、米の消費量

図Ⅱ-1 価格上昇の被害



図Ⅱ-2 砂浜の価値

② 砂浜経済価値に関するTCM調査

TCMの適用に際し、砂浜利用目的交通の需要関数を次式で定義する。

$$\ln(x_{ij}) = \alpha + \beta \cdot p_{ij} \quad (1)$$

ただし、 x_{ij} : 地域*i* - *j*間の砂浜利用目的交通量、
 y_{ij} : 地域*i* - *j*間のレジャー目的交通量、*i* - *j* : 出発地→到着地（都道府県）、 α, β : 未知のパラメータ。

このとき、潮干狩り目的交通需要関数は、次式

で与えられる。

$$x_{ij} = \exp(\alpha + \beta \cdot p_{ij}) \quad (2)$$

TCMでは、レクリエーション価値は当該レクリエーション活動の代理市場としての交通市場における消費者余剰で定義される。したがって、砂浜における海水浴のレクリエーション価値は、式(2)で与えられる砂浜利用目的交通需要の消費者余剰CSで評価される。

$$CS = \sum_{ij} \int_{p_{ij}}^{\infty} x_{ij} dp_{ij} \quad (3)$$

$$= -\frac{1}{\beta} \cdot \sum_{ij} x_{ij} \quad (4)$$

また、式(4)は交通市場全体の消費者余剰が総交通量の定数倍で表されることを示している。したがって、式(4)より砂浜利用一回あたりの消費者余剰csが次式で与えられる。

$$cs = \frac{CS}{\sum_{ij} x_{ij}} = -\frac{1}{\beta} \quad (5)$$

ここで、式(5)は砂浜から近い人も遠い人も、砂浜利用回数の多い人も少ない人も、砂浜利用一回あたりの消費者余剰が一定であることを示している。このことは、砂浜利用のレクリエーション価値を集計する際、当該砂浜への訪問者数をカウントするだけでよく、訪問者がどこから来たかを特定する必要がないことを意味する。

③ 干潟の経済価値に関するCVM調査

インターネット利用のCVM調査において、以下の質問を提示した。質問1：地球温暖化の問題

に対する関心度、質問2：地球温暖化による生態系の破壊に関する関心度、質問3：干潟の破壊を回避するための支払意思額。

ここで、CVM調査の中心部分は質問3であり、表I-IV-1に示すとおりである。評価対象は、日本全国の干潟（約514km²）がもつ生物多様性維持機能の価値に限定した。また、質問形式（多段階二項選択）、支払手段（負担金）、支払形式（毎年払い）、支払単位（個人）については、前述のCVM調査と同様である。

そして、表I-IV-1に示す質問の回答データより、提示金額に対する賛成割合を集計し、提示金額 t に対する賛成割合の累積分布関数 $F(t)$ を次式で特定化する。

$$F(t) = \frac{1}{1 + \exp(a + b \cdot \ln(t))} \quad (1)$$

ただし、 a, b ：未知のパラメータ。

このとき、一人あたりの支払意思額の中央値および平均値は次式で与えられる。

$$Median = \exp\left(-\frac{a}{b}\right) \quad (2)$$

$$Mean = -\int_0^{\infty} t \cdot dF(t) \quad (3)$$

ただし、 $Median$ ：中央値、 $Mean$ ：平均値。

ここでも一人あたりの価値として中央値を採用する。

④ 影響評価対象分野と対象指標

一般的に考えられる温暖化影響分野と指標、および本報告書で評価した指標の関係を表II-1に示す。

表Ⅱ-1 分野別温暖化影響指標と本報告書における評価対象指標

分野	影響指標	報告書での影響評価
水資源	洪水氾濫（面積・被害額）	1.2・1.3(1)
	土砂災害	1.2・1.3(2), (3)
	積雪水資源	1.2・1.3(4)
	渇水（都市用水、農業用水）	1.2・1.3(5)
	水質（河川、湖、ダム湖）、地下水	—
生態系	森林生態系	2.2・2.3(1), (2), (3), (6)
	高山生態系	2.2・2.3(5)
	自然草原、湿地	2.2・2.3(4)
	海洋生態系、沿岸生態系	—
農業（食料）	農業（コメ）	3.2・3.3(1), (2)
	農業（コメ以外穀類）	—
	果樹、茶、野菜、畜産業、水産業	—
沿岸域	高潮氾濫	4.2・4.3(1)
	河川氾濫（上中流域・河口域）	4.2・4.3(2)
	液状化	4.2・4.3(5)
	斜面崩壊	4.2・4.3(6)
	砂浜・干潟	4.2・4.3(3), (4)
健康	暑熱	5.2・5.3(1), (2)
	大気汚染	5.2・5.3(3)
	感染症	5.2・5.3(4)

参考文献

水資源

秋本嗣美，川越清樹，風間聡，沢本正樹，土砂崩壊によるダム貯水池の影響評価，水工学論文集，第52巻，pp.571-576，2008.

風間聡，沖大幹，温暖化による水資源への影響，地球環境，Vol.11，No.1，pp.59-65，2006.

川越清樹，風間聡，沢本正樹，数値地理情報と降雨極値データを利用した土砂災害発生確率モデルの構築，自然災害科学，2008.（印刷中）

気象庁・環境省・経済産業省監修（2002）：IPCC 地球温暖化第3次レポート，中央法規出版，pp.1-289.

佐藤歩，川越清樹，風間聡，沢本正樹，降雨極値データを利用した気候変動に伴う全国浸水被害額評価，水工学論文集，第52巻，pp.433-438，2008.

那須貴之他，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.361-366，2007.

西岡秀三・原沢英夫編「地球温暖化と日本」古今書院（1997年）

Bell ML, Dominici FD, Samet JM, A meta-analysis of time-series studies of ozone and mortality with comparison to the national morbidity, mortality, and air pollution study, Epidemiology, 16 (4), 436 - 444 (2005)

Discussion Paper No.230, Tohoku Economics Research Group, February 2008.

Ito K, De Leon SF, Lippmann M, Association between ozone and daily mortality analysis and meta-analysis, Epidemiology, 16 (4), 446 - 456 (2005)

Kazama S, Izumi H, Ranjan P, Sawamoto M, Nasu T, Estimation of snow distribution in a large area and its application for water resources, Hydrological Processes, 2007. (Early view online)

Levy JI, Chemerynski SM, Sarnat JA, Ozone exposure and mortality. An empiric Bayes metaregression analysis, Epidemiology, 16 (4), 458 - 468 (2005)

Tanimoto H, Sawa Y, Matsueda H, Uno I, Ohara T, Yamaji K, Kurokawa J, Yonemura S, Significant latitudinal gradient in the surface ozone spring maximum over East Asia, Geophysical Research Letters, 32, L21805, doi:10.1029/2005GL023514.

森林

気象庁：気象庁観測平年値(CD-ROM)，(財)気象業務支援センター，1996.

参考文献

- 気象庁：メッシュ気候値 2000 (CD-ROM)，(財) 気象業務支援センター，2002。
- 田中信行・松井哲哉・八木橋勉・埤田宏：天然林の分布を規定する気候要因と温暖化の影響予測：とくにブナ林について，地球環境 11:11-20，2006。
- 津山幾太郎・松井哲哉・小川みふゆ・小南裕志・田中信行：本州東部におけるチシマザサの潜在分布域の予測と気候変化の影響評価，GIS—理論と応用 16:11-25，2008。
- 松井哲哉・田中信行・八木橋勉：世界遺産白神山地ブナ林の気候温暖化に伴う分布適域の変化予測，日本森林学会誌 89(1)，7-13，2007。
- 安田正次・沖津進：上越国境山地における積雪の長期変動—平ヶ岳の植生変化に関連して—，地理学評論 79：503-515，2006。
- 安田正次・大丸裕武・沖津進：オルソ化航空写真の年代間比較による山地湿原の植生変化の検出，地理学評論 80：842-856，2007。
- Li Y, et al. (1996) Wintering range expansion and increase of sika deer in Nikko in relation to global warming. *Wildlife Conservation Japan*, 2, 23-35.
- Matsui T, Yagihashi T, Nakaya T, Taoda H, Yoshinaga S, Daimaru H, Tanaka N: Probability distributions, vulnerability and sensitivity in *Fagus crenata* forests following predicted climate changes in Japan, *Journal of Vegetation Science* 15: 605-614, 2004.
- Tsunekawa A, Ikeguchi H, Omasa K: Prediction of Japanese potential vegetation distribution in response to climatic change, In: K. Omasa, K. Kai, H. Taoda, Z. Uchijima and M. Yoshino, eds., *Climate change and Plants in East Asia*, Springer, pp. 57-65, 1996.
- Tanaka N, Matsui T, Shimada K, Yagihashi T, Taoda H: Constructing vegetation databases useful for assessing impact of climate changes in Japan, *Journal of Agricultural Meteorology* 60 (5): 433-438, 2005.

農業

- 井上聡・横山宏太郎・大野宏之・川島茂人(2001)：地球環境変化時における降積雪の変動予測(続報)ー国内主要河川における降積雪の変動予測ー，雪氷，63，489-499。
- 矯江・許頌濱(編)：黒龍江省稲米市場与生産中常見問題，黒龍江省科学技術出版社，1-16 (2004)
- 西森基貴・井上聡・山村光司・横沢正幸・林陽生(2008)：生育阻害要因を考慮した地球温暖化による日本の水稻栽培におけるぜい弱性の評価。農業および園芸、(印刷中)。
- 西森基貴・横沢正幸(2002)：気候変動・異常気象による日本の水稻単収変動の地域的变化。地球環境、6(2)，148-149。
- 農林水産省：水稻の高温障害の克服に向けて(高温障害対策レポート)，31p (2006)
- 林陽生：地球温暖化時代の農業影響研究の視点，農林水産技術研究ジャーナル，農林水産技術情報協会，28，51-56 (2005)
- 林陽生・鳥谷均・後藤慎吉・菅野洋光・鄭英祥・黄水鎮・金海東：予想される気候のゆらぎのもとでの日本・韓国地域の水稲生産量変動の予測，農業気象，55，117-125 (1999)
- 舩屋寛仁：九州地域における気温及び日照と水稻収量の関係，筑波大学第一学群自然学類(地球科学主専攻)平成19年度卒業論文，34p (2008)
- 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.
- Iizumi T, Yokozawa M, Nishimori M: Parameter Estimation and Uncertainty Analysis of a Large-scale Crop Model for Paddy Rice: Application of a Bayesian Approach. *Agric. For. Meteorol.* in press, 2008.
- Jiang J, Xu XB, Yayashi Y, Tao F: Overview of the impacts of climate warming on paddy rice production in Heilongjiang province, the north most of China. *Tsukuba Geoenvironmental Sciences, Univ. of Tsukuba*, 3, 23-31 (2007)
- Oga K, Yanagishima K: International food and agricultural policy simulation model (IFPSIM) (user's guide), *JIRCAS Working Report*, 1, 1996.
- Yamamura K, Yokozawa M, Nishimori M, Ueda Y, Yokosuka T (2006): How to analyze long-term insect population dynamics under climate change: 50-year data of three insect pests in paddy field. *Population Ecology*, 48, 31-48.

沿岸域

- 鈴木武：三大湾奥部における温暖化による高潮浸水領域の変化の予測，地球環境シンポジウム講演論文集，Vol. 15, pp. 167-170, 2007a.
- 鈴木武：四国を対象とした温暖化による高潮浸水領域の変化の見積，環境システム研究論文発表会講演集，Vol. 35, pp. 251-256, 2007b.
- 原沢英夫・一ノ瀬俊明・高橋潔・中口毅博(2003)：10 章「適応，脆弱性評価」，原沢英夫・西岡秀三（編）：地球温暖化と日本—自然・人への影響予測第 3 次報告，古今書院.
- 三村信男：地球温暖化対策における適応策の位置づけと課題、「地球環境」第 11 巻，第 1 号，国際環境研究協会, 2006.
- 安原一哉・村上 哲・小峯秀雄・鈴木希美・柴田はるか(2007)：気候変動に起因する複合的地盤災害への応策，第 7 回環境地盤工学シンポジウム論文集、福岡、237-242.
- Hay JE, Mimura N (2005): Supporting Climate Change Vulnerability and Adaptation Assessments in the Asia-Pacific Region – An Example of Sustainability Science, *Sustainability Science, Springer, Vol. 1, No.1, pp. 23 -35, 2006.*
- Komine H : Vulnerability of riverbank materials by sea-level rising due to Global Warming in Japan, Proceedings of the 2nd Malaysia-Japan Symposium on Geohazard and Geoenvironmental Engineering, 2007a.
- Komine H : Changes of fundamental properties of riverbank material by sea-level rising due to Global Warming, Vietnam-Japan Symposium on Mitigation & Adaptation of Climate-change-induced Natural Disasters, 2007b.
- Murakami S, Yasuhara K, Suzuki N, Wei NI, Komine H : Vulnerability Assessment to Liquefaction Hazard Induced by Rising Sea Levels due to Global Warming, Proceedings of International Conference on Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation & Rehabilitation, 2005.
- Uchida Y, Komine H, Yasuhara K, Murakami S : Soil water characteristic curve and one-dimensional deformation of riverbank soils in Japan, , Vietnam-Japan Symposium on Mitigation & Adaptation of Climate-change-induced Natural Disasters, 2007.
- Yasuhara K, Murakami S, Mimura N, Komine H, Juan R : Journal of Sustainable Science, Vol.2, No.1, pp.13-26, 2007, “Influence of global warming on coastal infrastructural instability”
- Yasuhara et al. Proc. Japan-Vietnam Symp. on Climate Change (Keynote Lecture), Climate-change-induced compound geo-hazards: lessons from case histories, pp. 242-252, Hue, Vietnam, 2007

健康

- 石垣市史；資料編近代 3 マラリア資料集成 （1989）
- 小林睦生・二瓶直子(2007) Clinical Neuroscience
- Bell ML, Dominici FD, Samet JM, A meta- analysis of time-series studies od ozone and mortality with comparison to the national morbidity, mortality, and air pollution study, *Epidemiology*, 16 (4) , 436 - 444 (2005)
- Ito K, De Leon SF, Lippmann M, Association between ozone and daily mortality analysis and meta-analysis, *Epidemiology*, 16 (4) , 446 - 456 (2005)
- Levy JI, Chemerynski SM, Sarnat JA, Ozone exposure and mortality. An empiric Bayes metaregression analysis, *Epidemiology*, 16 (4) , 458 - 468 (2005)
- Rogers DJ, Randolph SE. The global spread of malaria in a future, warmer world. *Science*, 289:1763-1766. (2000)
- Tanimoto H, Sawa Y, Matsueda H, Uno I, Ohara T, Yamaji K, Kurokawa J, Yonemura S, Significant latitudinal gradient in the surface ozone spring maximum over East Asia, *Geophysical Research Letters*, 32, L21805, doi:10.1029/2005GL023514.
- Pascual M, Ahumada JA, Chaves LF, Rodo X, Bouma M. Malaria resurgence in the East African highlands: temperature trends revised. *Proc Natl Acad Sci USA* 103, 5829-5834 (2006)

連絡先・研究参画者

プロジェクトリーダー

三村 信男	茨城大学地球変動適応科学研究機関	教授・機関長
	TEL: 029-228-8809, E-mail: mimura@mx.ibaraki.ac.jp	

水資源影響評価

風間 聡	東北大学大学院環境科学研究科	准教授
	TEL: 022-795-7458, E-mail: kazama@kaigan.civil.tohoku.ac.jp	
丹治 肇	(独) 農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究所	チーム長
多田 智和	国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部	主任研究官
沖 大幹	東京大学生産技術研究所	教授

森林生態系影響評価

田中 信行	(独) 森林総合研究所植物生態研究領域	主任研究員
	TEL: 029-829-8221, E-mail: ntanaka@affrc.go.jp	
大丸 裕武	(独) 森林総合研究所水土保全研究領域	室長
松井 哲哉	(独) 森林総合研究所北海道支所	主任研究員
中村 克典	(独) 森林総合研究所植物東北支所	主任研究員
堀川 真弘	(独) 森林総合研究所植物生態研究領域	非常勤研究員
安田 正次	(独) 森林総合研究所植物生態研究領域	非常勤研究員
中園 悦子	(独) 森林総合研究所植物生態研究領域	非常勤研究員
津山 幾太郎	(独) 森林総合研究所植物生態研究領域	非常勤研究員
小南 裕志	(独) 森林総合研究所関西支所	主任研究員
朝岡 良浩	(財) 電力中央研究所環境科学研究所物理環境領域	研究員
島田 和則	(独) 森林総合研究所気象環境研究領域	主任研究員
杉田 久志	(独) 森林総合研究所植物東北支所森林生態研究グループ	グループ長
市原 優	(独) 森林総合研究所植物東北支所	主任研究員
小泉 透	(独) 森林総合研究所野生動物研究領域	領域長

農業影響評価

横沢 正幸	(独) 農業環境技術研究所大気環境研究領域	主任研究員
	TEL: 029-838-8435, E-mail: myokoz@affrc.go.jp	
古家 淳	(独) 国際農林水産業研究センター国際開発領域	プロジェクトリーダー
西森 基貴	(独) 農業環境技術研究所大気環境研究領域	主任研究員
小寺 昭彦	(独) 農業環境技術研究所大気環境研究領域	特別研究員
小林 慎太郎	(独) 国際農林水産業研究センター国際開発領域	研究員
Nguyen Duy Khang	(独) 農業環境技術研究所大気環境研究領域	エコフロンティアフェロー
飯泉 仁之直	(独) 農業環境技術研究所大気環境研究領域	特別研究員
陶福祿	(独) 農業環境技術研究所大気環境研究領域	特別研究員
林 陽生	筑波大学大学院生命環境科学研究科	教授
岡田 将誌	筑波大学大学院生命環境科学研究科	大学院生

沿岸域影響評価

安原 一哉	茨城大学工学部都市システム工学科	教授
	TEL: 0294-38-5166, E-mail: yasuhara@mx.ibaraki.ac.jp	
鈴木 武	国土技術政策総合研究所沿岸海洋研究部	室長
横木 裕宗	茨城大学広域水圏環境科学教育研究センター	准教授
小峯 秀雄	茨城大学工学部都市システム工学科	准教授
陳 光斉	九州大学大学院工学研究院	准教授

田村 誠	茨城大学地球変動適応科学研究機関	特任研究員
細川 恭史	(財) 港湾空間高度化環境研究センター(兼 港湾・海域環境研究所)	理事 (所長)
桑原 祐史	茨城大学工学部都市システム工学科	講師
信岡 尚道	茨城大学工学部都市システム工学科	講師
村上 哲	茨城大学工学部都市システム学科	講師
三谷 泰浩	九州大学大学院工学研究院	准教授

健康評価

小野 雅司	(独) 国立環境研究所環境健康研究領域	室長
	TEL: 029-850-2421, E-mail: onomasaj@nies.go.jp	
本田 靖	筑波大学大学院人間総合科学研究科	教授
近藤 正英	筑波大学大学院人間総合科学研究科	講師
階堂 武郎	大阪府立大学看護学部	教授
田村 憲治	(独) 国立環境研究所環境健康研究領域	主任研究員
松本 幸雄	統計数理研究所 リスク解析戦略研究センター	客員教授
佐々木 寛介	(財) 日本気象協会首都圏支社調査部	技師
椿 貴博	(財) 日本気象協会首都圏支社気象情報部	技師
倉根 一郎	国立感染症研究所ウイルス第一部	部長
小林 睦生	国立感染症研究所昆虫医科学部	部長
大前 比呂思	国立感染症研究所寄生動物部	室長
高崎 智彦	国立感染症研究所ウイルス一部	室長
二瓶 直子	国立感染症研究所昆虫医科学部	客員研究員
駒形 修	国立感染症研究所昆虫医科学部	流動研究員
石川 洋文	岡山大学大学院環境学研究科	教授
笛田 薫	岡山大学大学院環境学研究科	講師

経済評価

森杉 壽芳	東北大学大学院経済学研究科	特任教授
	TEL: 022-795-6285, E-mail: morisugi@econ.tohoku.ac.jp	
大野 栄治	名城大学都市情報学部	教授
林山 泰久	東北大学大学院経済学研究科	教授
中嶋 一憲	東北大学大学院経済学研究科	助手

統合評価

肱岡 靖明	(独) 国立環境研究所社会環境システム研究領域	主任研究員
	TEL: 029-850-2961, E-mail: hijioka@nies.go.jp	
原沢 英夫	(独) 国立環境研究所社会環境システム研究領域(H19.3まで)	領域長
高橋 潔	(独) 国立環境研究所地球環境研究センター	主任研究員
花崎 直太	(独) 国立環境研究所社会環境システム研究領域	研究員
増富 祐司	(独) 国立環境研究所地球環境研究センター	ポスドクフェロー