

地球温暖化「日本への影響」
－長期的な気候安定化レベルと影響リスク評価－

国立環境研究所地球環境研究センター 主任研究員

肱岡 靖明

土木学会
水工学委員会・海岸工学委員会

2009 年 8 月

地球温暖化「日本への影響」

－長期的な気候安定化レベルと影響リスク評価－

Global Warming Impacts on Japan

－ Long-Term Climate Stabilization Levels and Impact Risk Assessment －

肱 岡 靖 明

Yasuaki Hijioka

はじめに

本稿は、2009年5月29日に温暖化影響総合予測プロジェクトによって公表された「地球温暖化「日本への影響」－長期的な気候安定化レベルと影響リスク評価－」を抜粋、および一部改変したものである。温暖化影響総合予測プロジェクトとは、平成17年度から開始された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」を指す。この研究プロジェクトは、我が国及びアジア地域を対象として、温暖化による影響の全体像を定量的に把握し、それに基づいて温暖化影響の危険な水準を検討し、さらに安定化排出経路に沿って出現する影響を推定することを目標としている。これまで、今世紀中頃（2050年頃）から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、健康といった主要分野における影響予測及び経済評価の手法を開発し、さらに、影響・リスクを総合的に解析するための統合評価モデルの開発を進めてきた。

昨年の5月29日には、昨年5月には、第1回中間報告書として「地球温暖化「日本への影響」－最新の科学的知見－」を取りまとめ、我が国において生じる影響の地域分布、出現速度について定量的な検討結果など前期3年間の研究成果を報告した。「地球温暖化「日本への影響」－長期的な気候安定化レベルと影響リスク評価－」は、第1回報告書（「地球温暖化「日本への影響」－最新の科学的知見－」）以降に新たに得られた研究成果を取りまとめたものであり、以下の三点に特徴がある。

- ① 統合評価モデルを用いて温室効果ガスの安定化レベル別の影響を評価した点
- ② 日本全国に加えて地域別の影響を評価した点、
- ③ 物理的な影響評価に加えて被害コストを評価した点

これらは、気候安定化レベルに応じて我が国への影響および被害コストがどのように違ってくるのかについて総合的な見取り図を提供している

1. 統合評価の概要

1.1 統合評価モデルの概要

(1) 統合評価モデル“AIM/Impact[Policy]”

温暖化影響総合予測プロジェクトでは、1990年を基準として2100年までのGHG排出経路、GHG濃度、気温上昇と分野別影響を統合的に評価することを目的として、統合評価モデル“AIM/Impact[Policy]”の開発と拡張を行ってきた。このモデルを使うことで、ある気候安定化目標の達成によって、許容し難い水準の深刻な温暖化影響を回避できるかどうかを検討することができる。AIM/Impact[Policy]は大きく分けて、GHG排出予測モデル群と影響評価・適応モデル（図1.1）に分けられる。GHG排出予測パートに組み込まれているエネルギー・経済モデルを用いて、様々な制約条件下（全球平均GHG温室効果ガス濃度など）における地球全体のGHG排出の道筋を最適化計算により推定する。さらに、エネルギー・経済モデルに実装されている簡易気候

モデルにより、前述の様々な制約条件下における全球平均気温変化が算出され、影響評価・適応モデルの入力データとなる。次に、影響評価・適応モデルでは、(2)で説明する正規化気候変化データベースならびに分野別影響関数を用いて、地域別（世界モデルとして利用する場合は国別、日本モデルとして利用する場合は県別）の気候変化（気温や降水量など）と分野別影響量が、時系列的に計算される（図 1.1）。

(2) 影響評価・適応モデル

前述のように、AIM/Impact[Policy]の影響評価・適応モデルは、全球平均気温変化を入力条件として、地域別（国別もしくは県別）の気候変化と分野別温暖化影響を時系列的に予測する。影響評価・適応モデルでは、地域別の正規化気候変化データベースと分野別影響関数を事前に用意し、それらを用いて影響評価を行う工夫が施されている。正規化気候変化データベースとは、地域毎の気候変数（気温・降水量・日射など）の将来変化量を世界平均の気候変化量との比で表したものである。それは、GCM（Global Climate Model: 全球気候モデル）による気候予測を用いて、国別・県別に空間平均した気候変数の変化量を求め、同じ期間の全球平均気温変化で除して求める。これとエネルギー・経済モデルに実装された簡易気候モデルから渡される全球平均気温シナリオと組み合わせれば、後述のパターンスケールリング手法を用いて、国別・県別の将来気候シナリオを生み出すことができる。

影響関数とは、気温・降水量等の気候要素の変化に合わせてどのように影響が変化するかを示すものであり、実際には、（気候要素、影響）の対のデータを集めたデータベースである。その作成過程では、気候要素をある一定の刻み幅で変化させて多数回のシミュレーションを行い、影響要素モデルで推計される出力を地域別に平均して集計する。温暖化影響総合予測プロジェクトでは、分野別の影響研究班が分担して世界国別／日本県別の分野別影響関数を開発しており、そこで構築された影響関数が影響評価・適応モデルに実装されている。

(3) 影響評価の手順

図 1.1に“AIM/Impact[Policy]”を用いた影響評価の手順を示す。AIM/Impact[Policy]のエネルギー・経済モデルから全球平均気温変化シナリオが渡されると、まずはパターンスケールリングによって国別・県別の気候シナリオが作成される。パターンスケールリングとは、気候要素の空間分布をGCM実験の結果によって代表させる手法である。複数の排出シナリオの下での温暖化は簡易的な気温上昇推計モデルを用いて計算されるが、気候要素の空間分布までは計算されない。そのため、気候要素の空間分布を全球平均の気温変化量に応じてあらかじめ決めておけば、簡単に求めることができる。

AIM/Impact[Policy]のパターンスケールリングでは、GCM実験結果により得られた気温変化・降水量変化パターンとして、正規化気候変化データベースが用いられる。その後、国別・県別の気候シナリオをそれぞれの国・地域について用意された分野別影響関数に入力することで、国・地域別の分野別影響が計算される。

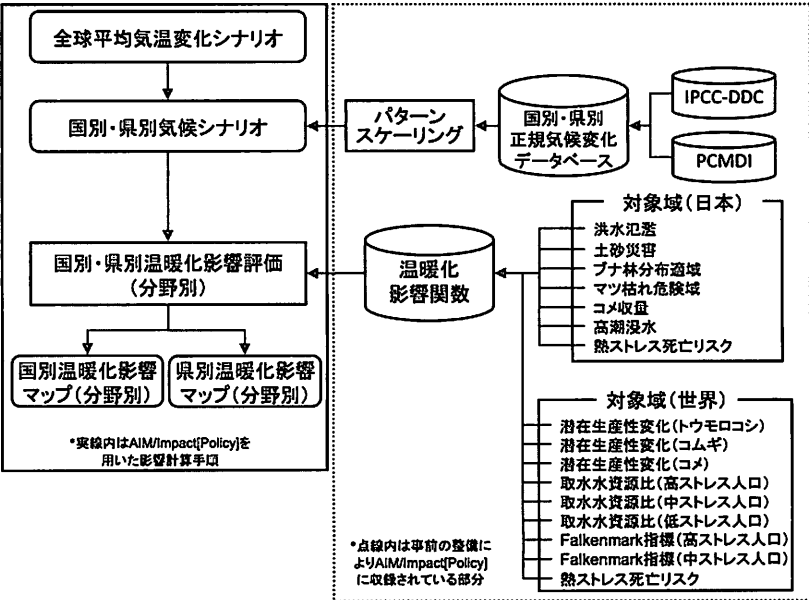


図 1.1 世界多地域多部門影響評価・適応モデル（データベース型モデル）概念図

1.2 安定化シナリオの概要

統合評価モデル“AIM/Impact[Policy]”を用いて、次の条件に基づき、BaU (Business as Usual : なりゆき) シナリオと2つのGHG濃度安定化シナリオを設定した。BaUの排出シナリオはSRES B2の想定に基づいたものである。①平衡気候感度は3℃、②炭素フィードバック効果は考慮しない、③全球平均気温変化から地域別の気候シナリオ作成(パターンスケーリング)に使用したGCMはMIROC3.2-hires、④GHG濃度にはGHGおよびエアロゾルの冷却効果も含む。

安定化シナリオを達成する排出経路は様々ありえるが、図1.2はその一例を提示している。温暖化による影響は1981-2000年(基準年)からの増加分と設定している。以下に、シナリオの概要を示す。

①450sシナリオ：GHG濃度450ppm(二酸化炭素等価濃度、本分析による2100年時は約2.1℃上昇)安定化シナリオ。GHG濃度のオーバーシュート有り。平衡気温上昇が約2.1℃(産業革命前比)。

②550sシナリオ：GHG濃度550ppm(二酸化炭素等価濃度)安定化シナリオ。GHG濃度のオーバーシュート有り。平衡気温上昇が約2.9℃(産業革命前比、本分析による2100年時は約2.7℃上昇)

③BaUシナリオ：なりゆきシナリオ。気温上昇が2100年で約3.8℃(産業革命前比)。

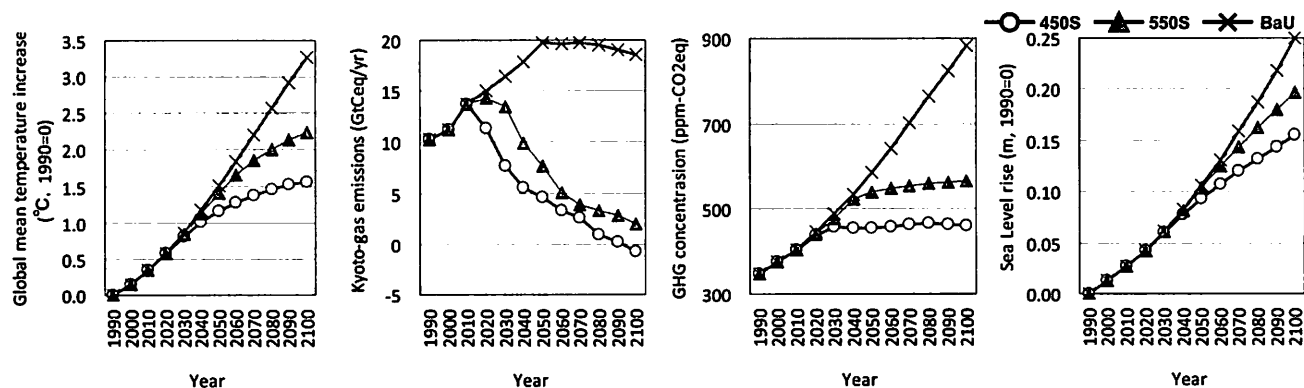


図1.2 シナリオ別の世界全体のGHG(京都議定書で設定された温室効果ガス6種)排出量・GHG濃度・世界平均気温変化・海面上昇量。1990年比の気温上昇量は産業革命前比-0.5℃で換算

1.3 対象地域・年代・結果の表示

対象地域は、日本全体を以下のように区分した4地域とする。

北海道・東北：北海道，青森，岩手，宮城，秋田，山形，福島

関東・甲信越・北陸：茨城，栃木，群馬，埼玉，千葉，東京，神奈川，新潟，富山，石川，福井，山梨，長野

東海・中部・近畿：岐阜，静岡，愛知，三重，滋賀，京都，大阪，兵庫，奈良，和歌山

中国・四国・九州：鳥取，島根，岡山，広島，山口，徳島，香川，愛媛，高知，福岡，佐賀，長崎，熊本，大分，宮崎，鹿児島，沖縄

ただし、洪水氾濫面積・被害額，コメ収量，ブナ林の適域・被害コスト，マツ枯れ危険域，高潮浸水人口・面積・被害額では沖縄県が検討範囲に含まれていない。また，対象年代は以下のように設定した。

2020s：2011～2030年，2030s：2021～2040年，2040s：2031～2050年，2050s：2041～2060年，

2060s：2051～2070年，2070s：2061～2080年，2080s：2071～2090年，2090s：2081～2100年

本稿で示す影響評価の結果図(図2.5.3，2.5.4，2.7.3，2.7.4を除く)は，2100年まで毎年の値を算定し，20年間の平均値を表示している。

1.4 留意点

今回の影響評価結果の主たる不確実性として，以下の点が挙げられ，結果を見る時に留意が必要である。

1) 影響予測は，その入力情報となる気候シナリオの作成手法(ダウンスケーリング手法・バイアス補正手

法)の選択に依存する。研究実施時点において気候シナリオ作成手法は研究途上分野であり、今回の評価結果はその不確実性幅の中の一例と考えるべきである。

- 2) 全球平均気温上昇量と、各種気候因子の空間分布変化ならびに海面上昇量の関係は GCM により異なるが、今回は一つの GCM (MIROC3.2-hires) の結果に基づいている。この報告書の結果は、GCM の予測不確実性幅の中の一例を示すものと考えられるべきである。
- 3) ある安定化レベルを達成する排出経路は複数あり得る。また、経路の選択により影響の出現現時期が異なる。本研究では、エネルギー・経済モデルを用いて、経済合理的な排出経路を算定した。今回の評価結果は複数あり得る選択肢の中の一例と考えるべきである。

2. 分野別温暖化影響

2.1 洪水氾濫による影響

2.1.1 推計方法

降雨がもたらす洪水の氾濫域を推定するために、氾濫流の流下現象を最も詳細に再現する 2 次元不等流モデルを用いて洪水氾濫の計算を行った。このモデルでは、洪水が流れる流路を簡易的に数値地図上に表現し、土地利用毎の抵抗を表す粗度係数を、水深を変数とした関数によって与えている。これは河川や都市部などの建物の側面に摩擦が生じることを考慮している。また、堤防やポンプ場といった河川構造物は考慮せず、後で述べるように洪水防護対策は別の形で考慮した。計算では、日本全体を氾濫原と想定し、全域に氾濫モデルを適用したが、氾濫した水は標高の低い部分へと流れ、自ずと河川に戻って流下する構造となっている。氾濫計算には、標高、土地利用の数値地理情報を用いる。これらは、すべて 1km×1km の解像度のグリッドセルデータである。標高データは、国土地理院が発行する国土数値情報の KS-META-G04-56M データに格納された 1km² の平均標高値を用いた。土地利用データは、国土数値情報の KS-META-L03-09M データに格納された 1km² の土地利用情報(15 区分)から、各グリッドセル内において、最も占める割合が多い土地利用をそのセルにおける土地利用と設定した。

洪水氾濫による経済的被害の指標を、浸水被害コストポテンシャルと呼ぶ。この被害コストは、①治水経済調査マニュアル(国土交通省)の「直接被害の対象資産」を参考にして土地利用ごとの被害額の計算手順を設定し、②氾濫計算から得られる氾濫水深と浸水期間の分布を取り出し、③グリッドセル毎の土地利用分類を考慮し①の算定方法によって算定した。被害コストを推計した土地利用は、田、畑地、建物用地、ゴルフ場、幹線交通用地であり、森林、荒地、その他の用地、河川地及び湖沼、海浜、海水域では、浸水に伴う被害はないものと仮定した。

2.1.2 将来影響

(1) 洪水氾濫面積

洪水氾濫面積の影響関数は、現状で 50 年に一回降るような雨(以後、再現期間 50 年降雨)を 100% (基準)として、100%、150%、200%降雨時の洪水氾濫を日本全国において 1km² 分解能でシミュレーションし、その面積を県別に求めた。気候変数には、年間で最大の日降水量(以後、年別日最大降水量)を採用した。氾濫計算の中では防護施設は考慮していないので、日本の平均的な防護レベルは再現期間 50 年降雨に対応しており、それより小さい降雨では被害が発生しないと仮定した。したがって、温暖化による将来影響も、年別日最大降水量が再現期間 50 年降雨を越える場合に発生することになる。ただし、三大都市圏の防護レベルはそれよりも高く、現状で 150 年に一回降るような雨に対応していると仮定した。温暖化による被害面積は、将来の氾濫面積から、再現期間 50 年降雨(三大都市圏では再現期間 150 年降雨)の氾濫面積を差し引いた面積と定義した。また、防護レベルは将来に渡って現状と変わらず一定とし適応策は考慮していない。

(全国的な傾向)洪水氾濫は降雨強度と頻度の変化に大きく影響される。気候モデルによる降雨の傾向は

気温上昇に伴う単調増加ではないため、洪水氾濫面積も年代によって大きく変化する。また、将来の降雨の空間的分布も考慮しているため、地形的に平地の占める割合が大きい地域は浸水面積が拡大しやすい。降雨強度の増大と強い雨の頻度が増加することにより洪水氾濫面積の増加が見込まれる。低いGHG濃度で安定化させるほど、洪水氾濫面積が抑えられるが、最も厳しい安定化レベル（450s）の場合でも、被害が大幅に増加すると見込まれる。450s、550s、BaUシナリオにおける全国の洪水氾濫面積は、今世紀中頃（～2050s）まではシナリオ間で大きな差が現れないが、その後シナリオによって差が現れ、それぞれ最大で約1000km²、約1100km²、約1200km²に達すると見込まれる（図2.1.1）。（地域別の傾向）各地域に甚大な被害が見込まれ、特に、関東・甲信越・北陸における氾濫面積の増加が見込まれる（図2.1.1）。

(2) 浸水被害コストポテンシャル

洪水氾濫面積と同様に、気候変数として年別日最大降水量を用いて、県別の地点毎の浸水被害コストポテンシャルの影響関数を求めた。この時、被害による資産価値の低下（例えば穀物生産量の減少）は考慮しておらず適応策も考慮していない。洪水氾濫は降雨の強度と頻度の変化に大きく影響される。（1）でも述べたように、気温上昇と異なり、降雨シナリオは大きな変動を示すため、浸水被害コストも年代によって大きく変化する。

（全国的な傾向）降雨強度の増大と強い雨の頻度が増加することにより浸水被害コストの増加が見込まれる。安定化濃度別の傾向では、低いGHG濃度で安定化させるほど、浸水被害コストポテンシャルが低くなるが、最も厳しい安定化レベル（450s）の場合でもそのポテンシャルは温暖化の進展に伴って増加すると見込まれる。450s、550s、BaUシナリオにおける浸水被害コストポテンシャルは、今世紀中頃（～2050s）まではシナリオ間で大きな差が現れず、2050年前後には約5兆円/年弱に達すると見込まれる。その後、今世紀末頃（～2090s）までにはシナリオによって浸水被害コストポテンシャルに大きな差が現れ、それぞれ最大で約6.4兆円/年、約7.6兆円/年、約8.7兆円/年に達すると見込まれる（図2.1.2）。（地域別の傾向）氾濫源に資産が集中している関東・甲信越・北陸と東海・中部・近畿の被害が大きく、今世紀末頃（～2090s）までにはシナリオによって最大の浸水被害コストポテンシャルにおおきな差が現れ、450s、550s、BaUシナリオそれぞれにおいて、約3.5兆円/年・約2.5兆円/年、約4.1兆円/年・約2.9兆円/年、約4.6兆円/年・約3.7兆円/年に達すると見込まれる。最も厳しい安定化レベル（450s）の場合でも被害が大幅に増加する可能性があり、緩和策と共に適応策の検討も重要である（図2.1.2）。ただし、気候予測の性格上、2070年代に特に大きな氾濫が生じるというよりも、21世紀後半にはこのようなリスクが生じると考えるべきである。また、この被害コストは今回の計算に用いた降雨シナリオに基づく算定値であり、降雨シナリオが変われば被害コストも変わることには注意が必要である。

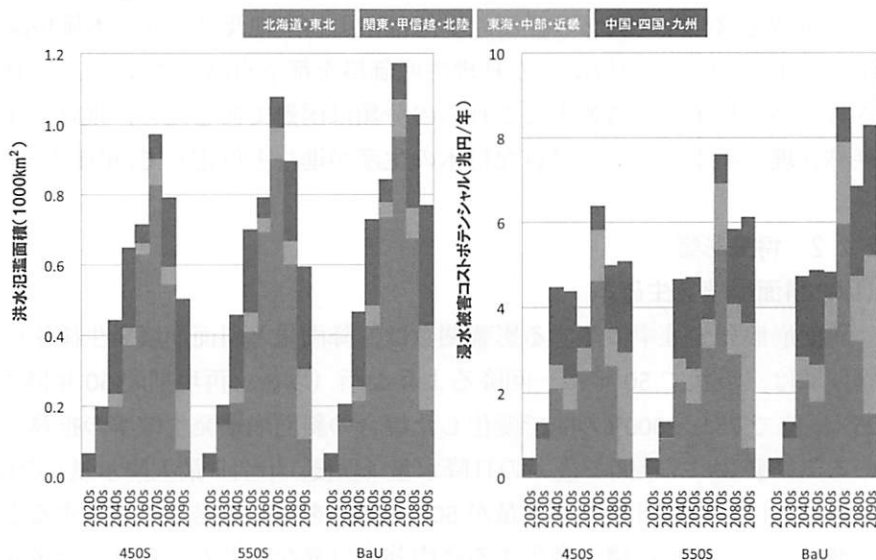


図 2.1.1（左図） 1981-2000 年を基準とした場合の
洪水氾濫面積の増加

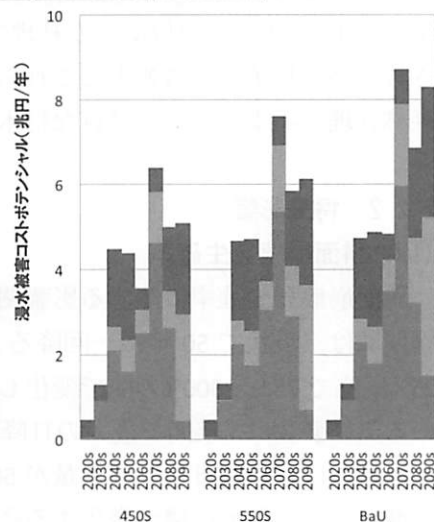


図 2.1.2（右図） 1981-2000 年を基準とした場合の
浸水被害コストポテンシャルの増加分

2. 土砂災害による影響

2.1 推計方法

土砂災害リスクは、斜面崩壊の原因となる地形、地質、そして降雨量を含む水文的条件を用いた、多重ロジスティック回帰分析により構成される斜面崩壊発生確率モデルから推計された。降雨量を含む水文的条件の利用により、気候変動の進展に応じた動的な斜面崩壊の発生確率を導くことができ、時空間的な発生確率分布の推定も可能である。斜面崩壊発生確率モデルに利用される説明変数は、地形条件の「起伏量」、水文的条件の「動水勾配」であり（後述）、これらを説明変数とした地質毎の斜面崩壊発生確率モデルを構築した。地形条件である起伏量は、国土数値情報に格納された最高標高と最低標高の差から求めた。起伏量は地形の複雑さを示す値として解釈されており、一般に、起伏量の大きな地域は地形変動が活発であり、斜面崩壊が多く認められる。水文条件である動水勾配は、単位距離あたりの地下水水頭の変化率であり、降雨量が多くなるほど急勾配を呈する。急な動水勾配は、土塊の抵抗力である有効応力を減少させ、斜面の不安定化を促す。動水勾配は、国土数値情報の表層土壌データと斜面傾斜度データを用いて、同じ鉛直断面を持つ擬似二次元化した斜面に日降雨量を入力し、飽和不飽和浸透解析を行うことで計算される。発生確率に用いる動水勾配は、降雨発生後の最大傾斜を示す浸潤線から得た。対象とした地質は、斜面崩壊を引き起こしやすい未固結の土壌、および土砂化しやすい地質である。崩積土、続成期間の短い半固結状態である新第三系堆積岩、古第三系堆積岩、造山鉱物にカオリナイトを含み粘土化しやすい花崗岩の4種類の地質データを国土数値情報から取得し、発生確率モデルを構築した。

経済損失額は、「経済損失額」＝「経済価値(経済原単位)」×「土地利用の規模(面積)」×「斜面崩壊発生確率」により推計された。国土数値情報の土地利用データを用いてグリッドセルあたりの「市街地」、「田」、「畑地」、「森林」の面積と各土地利用の経済原単位を用いることで、土砂災害被害コストポテンシャルを得た。市街地の経済原単位は、急傾斜地崩壊対策事業の費用便益分析マニュアル(案)（国土交通省）に準拠した居住地域と事務所在地の経済単価を合算することで求めた。国土数値情報を基に市街地調整地域を居住地域、その他の市街地を事務所在地に設定した。田、畑地、森林の原単位は急傾斜地崩壊対策事業の費用便益分析マニュアル(案)にも記載されているが、平成10年を基準としており、近年の価格変動により経済価値が異なる可能性もあるため、近年の生産所得を基に現在価値に相当する原単位を求めた。田と畑地の経済原単位は、農林水産省統計データを基に平成12年から平成17年までの平均単位あたりの生産所得額を都道府県別に設定した。畑地は複数の作物が混在するため、いも類、野菜、果樹等の収穫量を調べて、都道府県毎の畑作所得の特徴を求めた。森林の経済原単位は、山林素地及び山元立木価格調（日本不動産研究所）を基に平成12年から17年までの単位あたり林地生産価格を都道府県別に設定した。林地生産価格は用材林と薪炭林で分類されるが、数値地理情報上でこれらの分類は困難であるため、地球温暖化に伴う森林保護の動向を考慮し、森林管理の高まりにより良質な材木の生産が進むと仮定して、単価の高い用材林を森林の経済原単位とした。

2.2.2 将来影響

(1) 斜面崩壊発生確率

斜面崩壊発生確率に関する影響関数は、降雨量と斜面崩壊発生確率の対応関係を示すものである。この影響関数は、現状で50年に一回降るような雨（以後、再現期間50年降雨）を100%（基準）とし、この雨が25%単位で75%～300%の間で変化した場合の斜面崩壊発生確率の推算に基づいて開発された。影響関数に用いる気候変数は、年間で最大の日降水量（以後、年別日最大降水量）を採用した。温暖化による将来影響（斜面崩壊）は、年別日最大降水量が50mm/dayを越える場合に発生すると全国一律に仮定している。実際には地域によって斜面崩壊が発生する降雨強度は異なると考えられ、今後詳細な調査が必要である。また、適応策は考慮していない。斜面崩壊発生確率は、洪水氾濫と同様に降雨強度と頻度の変化に大きく影響される。降雨シナリオは気温上昇に伴う単調増加傾向を示さないため、土砂災害被害も年代によって変化する。

（全国的な傾向）降雨強度の増大と強い雨の頻度が増加することにより斜面崩壊発生確率の増加が見込まれる。低いGHG濃度で安定化させるほど、斜面崩壊発生確率が低下する。最も厳しい安定化レベル（450s）の

場合では、斜面崩壊発生確率の増加が頭打ちになる傾向がある。450s, 550s, BaU シナリオにおける全国の斜面崩壊発生確率は、今世紀中頃(～2050s)まではシナリオ間で大きな差が現れないが、今世紀末頃(～2090s)までにはシナリオによって斜面崩壊発生確率に差が現れ、それぞれ最大で約4%、約5%、約6%増加すると見込まれる(図2.2.1)。(地域別の傾向)北海道・東北地方は、シナリオに依らずおおそ今世紀末に向かって発生確率が増加し続けるが、関東・甲信越・北陸地方では、年代によって発生確率が大きく変動する傾向が見られる(図2.2.2)。このような地域別の違いは、将来の50mm/day以上の雨の降り方の違いによる。したがって、この限界降雨強度の設定によって傾向が違うことには注意が必要である。

(2) 斜面崩壊被害コストポテンシャル

斜面崩壊被害コストポテンシャルに対する気候変数は、斜面崩壊発生確率と同じであり、影響関数も同様の考え方にに基づき推定されている。また、本検討において、一度被災した地域の資産価値の低下や将来の資産価値の変動、斜面崩壊に対する対策(適応策)は考慮していない。

(全国的な傾向) 降雨強度の増大と強い雨の頻度が増加することにより斜面崩壊被害コストの増加が見込まれる。低いGHG濃度で安定化させるほど、斜面崩壊被害コストポテンシャルが低くなる。最も低いレベルで安定化させる450sシナリオにおける斜面崩壊被害コストポテンシャルは頭打ちになると見込まれる。450s, 550s, BaUシナリオにおける斜面崩壊被害コストポテンシャルは、今世紀中頃(～2050s)まではシナリオ間で大きな差が現れず、最大で約0.69兆円/年程度と見込まれるが、今世紀末頃(～2090s)までにはシナリオによって斜面崩壊被害コストポテンシャルに大きな差が現れ、450sシナリオでは今世紀中頃までと余り変わらないが、550sシナリオでは最大約0.77兆円/年、BaUシナリオでは最大約0.94兆円/年に達すると見込まれる(図2.2.3)。(地域別の傾向) 東海・中部・近畿地方の被害が将来に渡り大きいと見込まれる。北海道・東北、関東・甲信越・北陸地方は、温暖化の進行に伴い被害の増加が顕著であり、今世紀末頃(～2090s)までの斜面崩壊被害コストポテンシャルは、450s, 550s, BaUシナリオにおける最大の斜面崩壊被害コストポテンシャルは、それぞれ、約0.14兆円/年・約0.09兆円/年、約0.17兆円/年・約0.10兆円/年、約0.22兆円/年・約0.13兆円/年に増加すると見込まれる(図2.2.3)。なお、この被害コストは、洪水被害と同様に、今回の計算に用いた降雨シナリオに基づく算定値であり、降雨シナリオが変われば被害コストも変わることには注意が必要である。

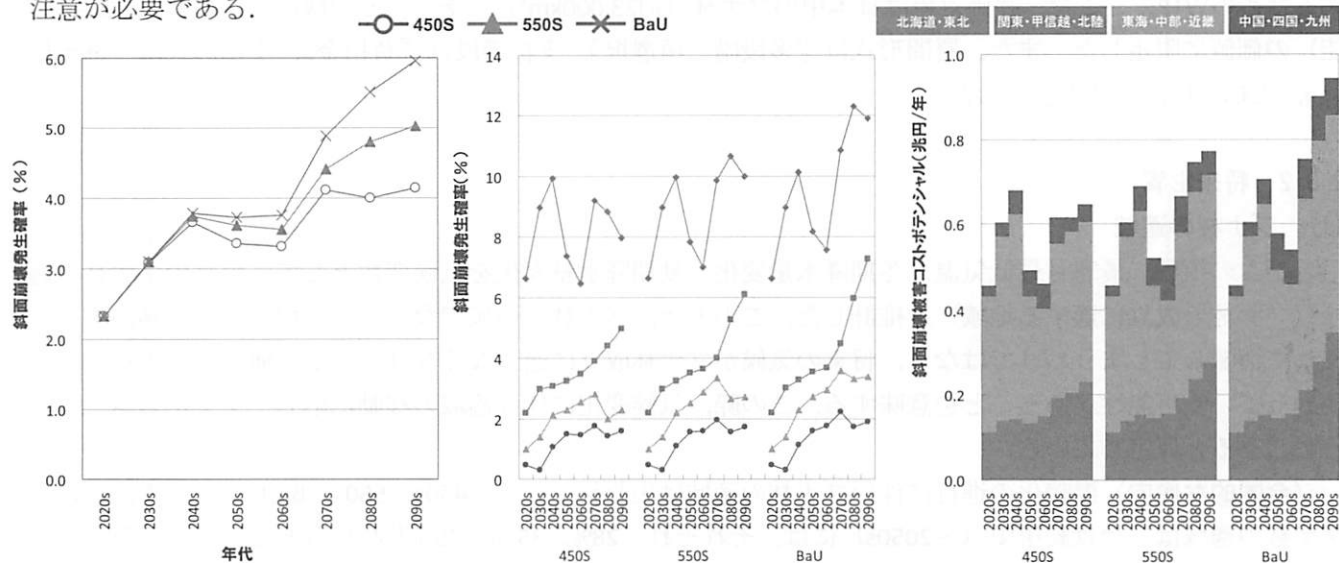


図2.2.1 (左図) 1981-2000年を基準とした場合の斜面崩壊発生確率の増加分(全国平均)

図2.2.2 (中央図) 1981-2000年を基準とした場合の斜面崩壊発生確率の増加分(地域別)

図2.2.3 (右図) 1981-2000年を基準とした場合の斜面崩壊による被害コストポテンシャル増加分

2.3 ブナ林の適域

2.3.1 推計方法

ブナ林の適域（ブナ林の成立に適する地域）の推定には、現実のブナ林分布域の再現能が高く、温暖化影響予測に多数の利用実績がある ENVI モデルを採用した。ENVI モデルは、国内の各 3 次メッシュセル（国土を緯線方向に 30″，経線方向に 45″ の大きさ（約 1km²）の網の目に区切ったもの）について、4 つの気候変数（暖かさの指数，最寒月最低気温，夏期降水量，冬期降水量）と 5 つの土地変数（表層地質，地形，土壌，斜面方位，斜面傾斜度）を説明変数とし，ブナ林が分布する確率を推定するものである。ブナ林分布を規定する要因の影響力は，分離貢献度で測った場合，冬期降水量，暖かさの指数，最寒月最低気温，夏期降水量の順に高いこと，土地変数の貢献度が比較的低いことが分かっている。以下に 4 つの気候説明変数について述べる。暖かさの指数（WI[℃・月]）は，月平均気温[℃]から 5℃差し引いた数値を，月平均気温が 5℃を超える月についてのみ積算して計算され，生育期の熱量の指標として用いられている。最寒月最低気温（TMC[℃]）は，最寒月の日最低気温の月平均値であり，冬期低温の極値指標として用いられている。夏期降水量（PRS[mm]）は 5～9 月の降水量であり生育期の水分供給の指標として，冬期降水量（PRW[mm]）は 12～3 月の降水量であり冬期の乾燥や積雪の指標として用いられている。ブナ林の分布適域の推計値は，あるメッシュセルの分布確率が p である時，「そのメッシュ点にブナ林が存在する」という命題が p の確率で正しいことを意味する。ここで示すブナ林の適域とは，分布確率 0.5 以上を有する地域を示す。

地球温暖化対策としてのブナ林保全に関する費用対効果を検討する際に必要となる貨幣評価原単位の算出を目的として，CVM（Contingent Valuation Method）により，ブナ林の適域衰退を回避するための支払意思額 WTP（Willingness To Pay）およびブナ林の環境経済価値を推計した。CVM とは，経済学における等価余剰 ES（Equivalent Surplus）あるいは補償余剰 CS（Compensating Surplus）の定義に基づいて，直接的に環境変化に対する支払意思額 WTP あるいは受取補償額 WTA（Willingness To Accept compensation）をたずねる方法である。2008 年 5 月中旬，全国の成人男女を対象にしてインターネット利用の CV 調査（Contingent Valuation Survey）を実施した。アンケート調査の表題は『地球温暖化問題に関する意識調査』であり，アンケート票の質問内容は以下のとおりである。

問1：地球温暖化の問題に対する関心度，問2：ブナ林の衰退に対する関心度，問3：ブナ林の衰退を回避するための WTP，ここで，評価対象は日本中のブナ林（約 23,000km²）であり，その機能（生物多様性維持機能）の価値に限定した。また，質問形式は『多段階二項選択』，支払手段は『負担金』，支払形式は『毎年払い』，支払単位は『個人』とした。

2.3.2 将来影響

(1) ブナ林の適域

暖かさの指数，最寒月最低気温，冬期降水量変化，夏期降水量変化を気候変数として，将来のブナ林の適域（ブナ林の成立に適する地域）を推計した。このとき，ブナ林の適域でなくなった場合，ブナ林がすぐに枯れて消滅してしまうわけではなく，将来の気候がブナ林成立に適さなくなり，やがて他の樹種の林に移り変わっていく可能性があることを意味する。この際，気候変化に伴う適域の移動に応じてブナがスムーズに移動しようと仮定している。

（全国的な傾向）温暖化の進行に伴いブナ林の適域は失われていく。450s，550s，BaU シナリオにおけるブナ林の適域は，今世紀中頃（～2050s）には，それぞれ，28%，35%，39%失われると見込まれ，シナリオ間でやや差が現れるが，今世紀末（～2090s）には安定化レベルによって大きな差が現れ，36%，50%，68% 失われると見込まれる（図 2.3.1）。最も厳しい安定化レベル（450s）の場合には，適域の衰退に歯止めがかかるものの，今世紀末に 36%の衰退は免れないと見込まれる。ブナ林の衰退が予測される地域を中心に，保全のためのモニタリングが重要になると考えられる。（地域別の傾向）特に，東海・中部・近畿，中国・四国・

九州のブナ林は温暖化の進行に伴い大幅に適域が失われると見込まれ、脆弱であると考えられる(図 2.3.1). この予測では、ブナの移動速度の遅さと土地利用形態を考慮していない. 実際には、ブナの移動速度はゆっくりしており、また、ブナの生育場所は自然植生域内に限られるので、100 年程度ではブナの新規の適域への移動はあまり起こらないと考えられる. したがって、適域から外れたブナ林が徐々に衰退することが主な影響として現れると考えられる.

(2) ブナ林の適域衰退被害コスト

「ブナの木」の寿命は 200~400 年であり、ブナ林では長い年月をかけて土壌の層が厚くなっている. そこに雨水や雪水をたくさん蓄えることができるので、ブナ林は「緑のダム」と呼ばれている. また、土砂の流出を防止する機能もある. さらに、大型鳥獣から小さな土壤動物までの動物、樹木から草やコケまでの植物、キノコなどの菌類など、多様な生物が生息し、食物連鎖や物質循環によって密接に関係しながら生態系を形作っている. 地球温暖化によってブナ林が衰退した後、別の高木林(カシ類やナラ類)にスムーズに置き換わらないと、低木林やササ原に変化して、上述の公益機能や生物多様性機能が著しく低下することが心配される. ブナ林は、水源涵養や生物多様性維持の機能を有するが、そのなかで今回は、ブナ林の生物多様性維持機能に焦点を当て、CVM によりその経済価値を計測した. まず、ブナ林の衰退(20%衰退、40%衰退、60%衰退、100%衰退)を回避するための支払意思額は、それぞれ 307、750、1,266、2,446 円/年/人と推定された. また、この支払意思額に対して、日本の総人口 12,774 万人を掛け、社会的割引率 4%で現在価値化すると、ブナ林単位面積あたりの環境経済価値は 213~340 円/m²となった. ちなみに、現在価値の総額は約 7.8 兆円となる.

(全国的な傾向) 温暖化の進行に伴いブナ林の適域衰退被害コストも増加する. GHG 濃度が安定化する 450s および 550s シナリオでは、被害コストの増加速度が低減すると見込まれる. 450s、550s、BaU シナリオにおける被害コストは、今世紀中頃(~2050s)までに、約 1034 億円/年、約 1273 億円/年、約 1381 億円/年とシナリオ間でやや差が現れ、今世紀末頃(~2090s)にはシナリオ間で大きな差が生じ、それぞれ、約 1325 億円/年、約 1811 億円/年、約 2324 億円/年に達すると見込まれる. 最も厳しい安定化レベル(450s)の場合には、被害コストの増加に歯止めがかかるものの、大きな損失は免れないと見込まれる.(図 2.3.2). (地域別の傾向) 現状のブナ林の分布適域が大きい北海道・東北地方では、今世紀末頃(~2090s)の被害コストは、約 832 億円/年(450s)、約 1146 億円/年(550s)、約 1479 億円/年(BaU)に達すると見込まれる(図 2.3.2).

2.4 マツ枯れ危険域

2.4.1 推計方法

メッシュ気候値を元に、温暖化による気温上昇を想定し、土地利用形態を考慮した上で、温暖化時のマツ枯れ危険度のゾーニングを行った. メッシュ気候値 2000 の気温データ(1971 年~2000 年の 30 年間の平均値)

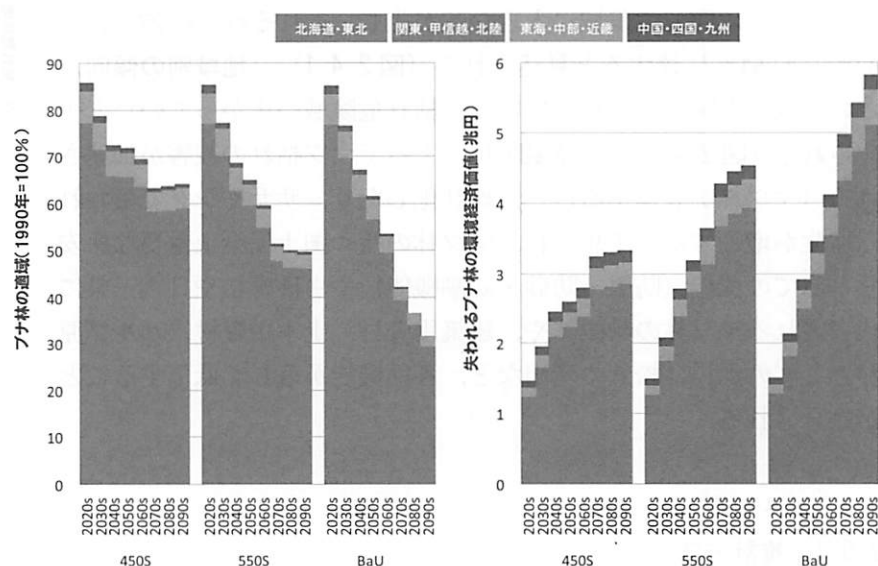


図 2.3.1 (左図) 1990 年を基準(100%)とした場合のブナ林の適域変化

図 2.3.2 (右図) 1990 年を基準とした場合のブナ林の適域衰退被害コスト

を元に、各メッシュセルについて月平均気温が1℃ずつ上昇した場合の気温環境を計算で求めた。さらに、3次メッシュ植生データ（環境省の第5回自然環境保全基礎調査植生調査による）を元に、現在、自然条件下あるいは人為的な管理のもとで森林状態が維持されている場所を、気温条件と構成樹種次第ではマツ林域となりうる場所と見なして区分した（以下、潜在マツ林域）。この潜在マツ林域について、温暖化時のマツ枯れの危険度を求め、その結果をマップ化し、県別の影響関数を開発した。マツ枯れ危険度は、竹谷ら（1975）によって提案されたMB指数という気候値を用いて評価した。MB指数は15℃をしきい値とする各月の平均気温の積算温度で、各月の平均気温のうち、15℃以上の月について、15℃を引いた値を合計して求められる。各地の被害実態との対応関係から、MB指数が22以上のエリアはマツ枯れの危険性が高い危険域（ゾーン3）に、19未満のエリアは気温によってマツ枯れの発現が抑制されている自然抑制域（ゾーン1）に、MB指数が19～22のエリアは両者の移行帯である自然抑制限界域（ゾーン2）に区分できることが知られている（中村，2006）。本研究でも、この区分にしたがって、3次メッシュ毎にMB指数をもとに区分したゾーン番号を与えた。県別データは、ESRI社の全国市町村界データを元に作成している。県別のポリゴンデータと3次メッシュデータを重ね合わせて、各県のポリゴン内に重心が含まれる3次メッシュデータを抽出して影響関数を作成した。この県別影響関数では、参考資料の土地利用による除外域を除く全3次メッシュポイントに対する、リスクゾーン3となるポイントの割合を計算した値が格納されている。

2.4.2 将来影響（マツ枯れ危険域）

将来の年平均気温変化を気候変数として、マツ枯れ危険域の変化を推計した。このとき、1990年を基準として、マツ枯れ危険域ではないマツ分布地域が将来危険域に変化する割合を推計している。

（全国的な傾向）温暖化の進行に伴いマツ枯れ危険域が拡大する。安定化レベルに関わらず、将来にわたりマツ枯れ危険域は拡大すると見込まれる。しかし、GHG安定化濃度が最も低い450sシナリオでは、今世紀末頃にその拡大傾向が止まる可能性が見込まれる。450s、550s、BaUシナリオにおける全国のマツ枯れ危険域は、今世紀中頃（～2050s）には、約22%、約26%、約28%とシナリオ間でやや差が現れるが、今世紀末頃（～2090s）にはシナリオ間で危険域に大きな差が生じ、それぞれ、約27%、約37%、約51%に達すると見込まれる（図2.4.1）。（地域別の傾向）どの地域も温暖化の進行に伴いマツ枯れ危険域が広がっていくと予想される（図2.4.1）。地球温暖化によってマツ枯れの被害が加速される（マツ林が衰退する）と、疎林化したり、ササやシダで覆われる植生が増加すると予想され、マツ林の持つ国土保全上重要な保安林としての機能（防風・防砂・防潮機能）や白砂青松や日本三景に代表されるマツ林の景観美や、建築用資材、土木用資材、パルプ原料としての利用、松茸の産出など、各種機能が著しく低下することが懸念される。

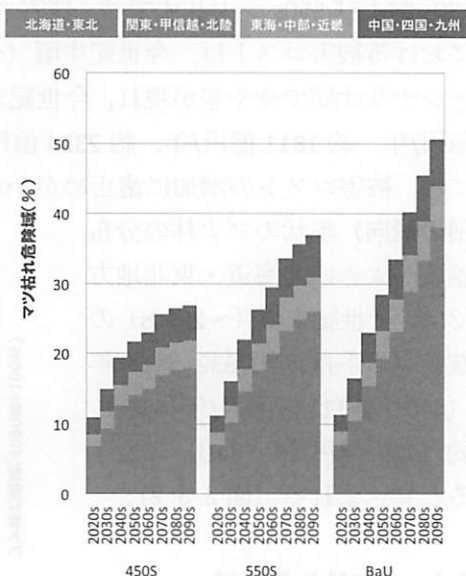


図2.4.1 1990年を基準とし、マツ枯れ危険域でない地域が危険域に変わっていく割合

2.5 コメ収量

2.5.1 推計方法

コメ収量予測に用いられたモデルは、Horie et al. (1995)のモデルと同じ構造を持ち、3つのサブモデルから構成される。①播種から出穂、開花、受粉を経て収穫までの生育段階（ステージ）を予測するモデル、②葉面積の展開ならびに光合成による同化産物生産過程を記述するバイオマス生産モデル、③登熟や稔実の子実形成過程のモデル。一般の作物生育・収量予測モデルは圃場スケールの現象を対象とした研究に用いられ、

モデルのパラメータは品種単位、地域単位で決定されている。そのため、モデルの駆動には品種、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。そこで、イネの生育状況やコメ収量の年次変動、地域間の差などの環境条件の違いを反映させ、かつ広域スケールでのモデル適用を行うために、モデルのパラメータの決定を都道府県単位で行った。手順は以下のとおりである。

- 1) 国土数値情報（1km×1kmグリッド）を用いて対象県における水田分布を抽出する。
- 2) アメダスメッシュ気象データを利用して、1)で抽出した水田グリッドにおける平均の気象要素（日別の最高・最低気温および日射量）を計算する。大気二酸化炭素濃度は時間変化するが全国一律とする。
- 3) 対象期間を1979～2003年の25年間として、2)で作成した県平均気象要素をモデルに入力して、全国の都道府県別農林統計に基づく平均移植日、出穂日、収穫日および収量の時系列データと比較しながら、ベイズ推定を用いたモデルパラメータの推定を行った。ただし、パラメータの推定は対象期間内の奇数年のデータを用いて行い、偶数年も含めてモデルの検証を行った。モデルに含まれるパラメータは全部で32個あるが、上の方法で決定したパラメータは13個である。残りの既存研究から引用したパラメータ値は、品種特性や管理条件に依存しないイネ固有の特性に関連するものである。

この方法で作成されたベイズ推論に基づく広域コメ収量予測機構モデル（Process-based Regional-scale Rice Yield Simulator with Bayesian Inference: PRYSBI; Iizumi et al., 2009）は、県の平均ではあるが、過去の品種特性、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いる。さらに、ベイズ推定で得られたモデルに含まれるパラメータの事後分布に基づいて、パラメータ値の組を変化させて計算したパラメータ・アンサンブルの平均を取ることで、収量の年々変動を定量的に再現することが可能である。PRYSBIによるコメ収量の推定値と統計値との比較結果によると、北海道・東北、関東・甲信越・北陸、東海・中部・近畿、中国・四国・九州の4つのブロックに分けた収量の年々変動は、パラメータ・アンサンブルメンバーの平均を用いることによって、適切に再現されることがわかっている。全国平均で出穂日は3日以内、収量は0.2t/ha以下の精度で推定できることが可能である。

2.5.2 将来影響

(1) コメ収量

暖候期（5～10月）の積算日射量変化、夏季（7,8月）の平均気温変化、夏季を除く暖候期（5,6,9,10月）の平均気温変化およびCO₂濃度を気候変数として将来のコメ収量を推計した。ここでは適応策は考慮していない。気候変化による影響は次のように解釈される。日射量の変化がないとすれば、バイオマス（水稻体重）は気温上昇による生育期間短縮に伴う減少とCO₂施肥効果に伴う増加とのトレードオフで決まる。それに、現在冷涼な地域では冷害軽減による正の効果、現在温暖な地域では高温不稔による負の効果が登熟期間に加わって最終収量が決まる。

（全国的な傾向）今世紀中頃（～2050s）までは、生育期間短縮の影響＜CO₂施肥効果の状況

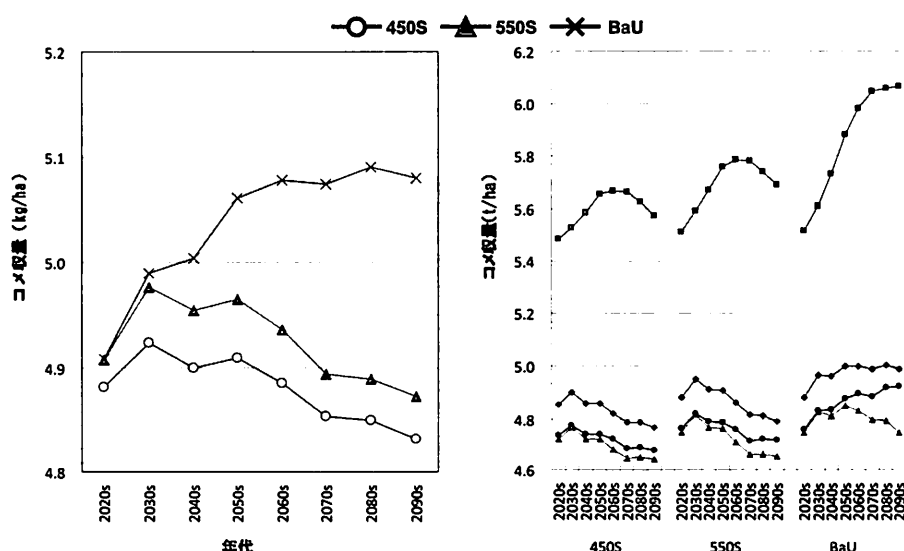


図 2.5.1（左図）コメ収量（全国平均）

図 2.5.2（右図）コメ収量（地域別）

で、さらに冷害の軽減に伴い収量は増加する。その後、450s および 550s シナリオについては、生育期間短縮の影響＞CO₂施肥効果の状況と高温による減収が加わり、今世紀末（～2090s）に向かつて減収に転じる。一方、BaU シナリオでは減収には転じないが、増加速度は徐々に低下すると予想される。（地域別の傾向）いずれの地方でも、気温上昇による負の効果が CO₂施肥効果を上回るまでは収量は増加するが、その後は減少する。特に北海道・東北では、気温上昇の正の効果が働いて減少に転ずる年は他と比べて遅い。BaU シナリオでは、CO₂施肥効果により中国・四国・九州や関東・甲信越・北陸では上昇するが、東海・中部・近畿では太平洋高気圧の影響を受けて、その他の地方よりも気温が高くなることやイネの開花期が高温期と一致するため、2050 年以降低下に転ずると予想される。450s および 550s シナリオでは、2030s 年代を過ぎると減少傾向に転ずると予想される。温暖化により収量の増加が見込めるが、さらなる気温上昇で減収に転じると予想されるとともに、気温と不稔率との関係によって収量の年々変動が大きくなることが予測される（(2)参照）。さらに品質や食味への影響も懸念されている。

(2) コメ収量の変動

統合評価モデルは、収量の年々変動の再現性が低いため、PRYSBI を利用して変動性の地域別影響を解析した。図 2.5.3 は気候変化シナリオ（現在気候も含めて）43 ケースについて地域平均コメ収量変化を計算した結果を暖候期（5 月～10 月）平均気温の上昇度に対して示している。これは、温室効果ガスの排出シナリオも含めて、複数の気候変化シナリオを利用しているが、シナリオにより気候変化の経過にばらつきがあり、年次による影響の比較は困難であるためである。したがって、横軸は暖候期の平均気温だけが示されているが、実際には日別の気温、日射の変動の影響が含まれている。

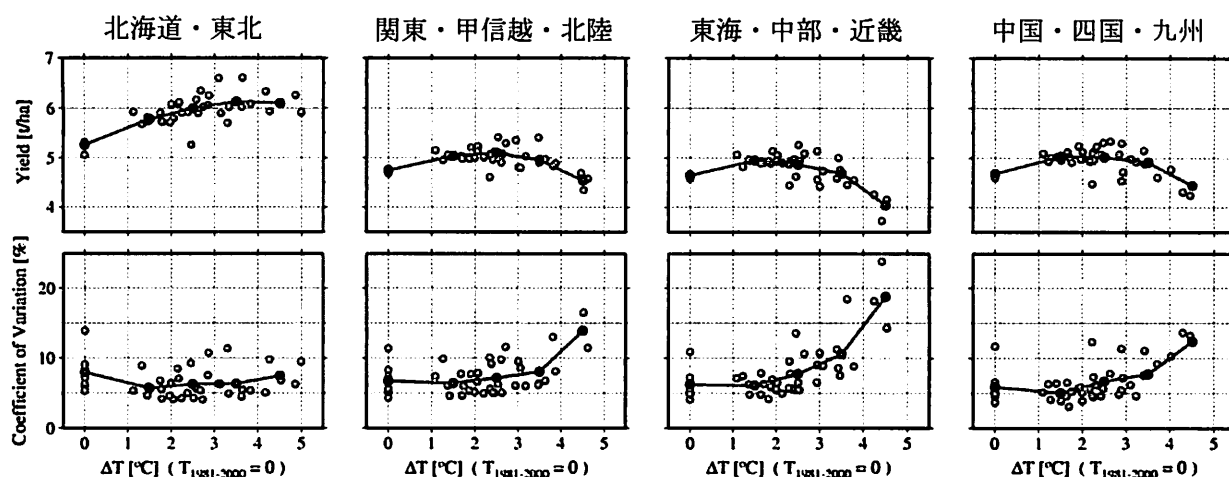


図 2.5.3 1981 年～2000 年の平均値に対する暖候期（5～10 月）平均気温の上昇度に対する
地域平均収量（上図）と変動係数の変化（下図）

この解析では、IPCC AR4 で報告された複数の将来の気候予測データに基づいている。使用した気候変化シナリオデータは、温室効果ガス排出シナリオが SRES A1B および A2 の 2 種類に対して、それぞれ 9 種類（A1B）、8 種類（A2）の全球気候モデルによる出力結果である。現在（1981 年～2000 年の平均気温）からの気温上昇度を指標として、その影響を表現した。将来収量推計には、2046 年～2065 年、2081 年～2100 年の 2 期間における日別のデータを利用した。線形内挿後のデータの空間解像度は、MIROC-hires が緯度・経度方向で約 1km、その他の気候モデルは約 10km である。

（全国的な傾向）図 2.5.3 より、日本付近の暖候期平均気温が（1981-2000 に対して）3℃以上上昇するとどの地域においても収量の変動が増加することが示されている。この原因は、後述の高温不稔過程モデルの応答によるものである（図 2.5.4）。（地域別の傾向）特に東海・中部・近畿地方において、気候変化に伴って太平洋高気圧が強まり、その端がこの地域にかかることにより、夏季の高温傾向が強まることが気候モデルの総観場として見られる。これは近年にも見られる特徴であり、将来、これが当該地域での収量低下およ

び変動の増幅のさらなる原因となる可能性がある。

図 2.5.4 のように、高温不稔過程は開花期における日スケールでの高温イベント（＞35℃）の発生によって急激に不稔率が増大する。したがって、温暖化によって平均気温が上昇すると、気象が現在と同程度の変動であっても不稔率の変動は増幅され、ひいては収量の変動は増大すると予想される。ただし、この関係は品種、栽培管理などによる不確実性が大きく、さらなる研究が必要である。

2.6 海面上昇による砂浜喪失

2.6.1 推計方法（モデルの概要）

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（市場経済における価値）のみならず、非市場価値（環境経済における価値）も広く認識されている。

本研究では、地球温暖化対策としての砂浜喪失防止に関する費用対効果を検討する際に必要となる貨幣評価原単位の提供を目的として、海面上昇によって喪失する砂浜の価値を計測する。ここでは、砂浜のもつ非市場価値のうち、海水浴の場としての利用価値（レクリエーション価値）に焦点を当てる。計測手法としては、旅行費用法 TCM (Travel Cost Method) を採用する。

TCM の適用に際し、砂浜利用目的交通の需要関数を式(1)で特定化する。

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

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。

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(1)で与えられた砂浜利用目的交通需要の消費者余剰 CS で評価される。

$$CS = \sum_{ij} \int_{p_{ij}}^{\infty} x_{ij} dp_{ij} = -\frac{1}{\beta} \cdot \sum_{ij} x_{ij} \quad (2)$$

式(2)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(2)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。

$$cs = \frac{CS}{\sum_{ij} x_{ij}} = -\frac{1}{\beta} \quad (3)$$

式(3)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

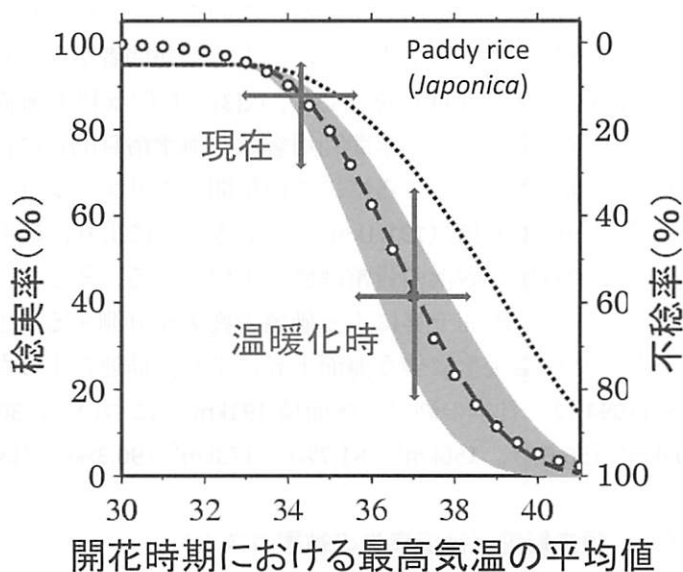


図 2.5.4 開花時期の気温と不稔率の関係

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。

式(1)のパラメータ推定を通じて、式(3)より砂浜利用価値(レクリエーション価値)の原単位が求められる。この原単位を全国の砂浜年間利用客数(海水浴目的)に掛けることにより、全国の砂浜年間レクリエーション価値が推計される。さらに、この年間レクリエーション価値を社会的割引率(年 4%)で現在価値に換算し、全国の砂浜面積(191.1km²)で割ることにより、砂浜単位面積あたりのレクリエーション価値が求められる。この数値が砂浜の貨幣評価原単位となる。そして、この原単位を海面上昇による砂浜喪失面積に掛けることにより、海面上昇による価値の喪失を計測することができる。

近年の地球温暖化に伴う海面上昇により、前述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(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ている。

2.6.2 将来影響(砂浜喪失の被害コスト)

三村ら(1994)の研究成果に基づき、海面上昇量と侵食面積の関係を求め、将来の海面上昇量を与えて、侵食される砂浜の面積を県別に推定している。このとき、1990 年を基準とし、基準年における砂浜喪失面積をゼロと仮定した。地域間の海面上昇量の違いは考慮せず日本全体で一律に変化すると仮定し、適応策は考慮していない。

大気が平衡気温になっても、海洋の水温上昇とそれに伴う海面上昇はさらに長い時間継続する。また、長期的にはグリーンランドの氷床融解による海面上昇も懸念されている。そのため、海面上昇による砂浜侵食は、21 世紀以降も長期間続くことになり、砂浜の持つ防災機能や生態系が大きく損なわれる可能性があることには注意が必要である。本研究では、まず TCM により砂浜のレクリエーション価値を計測した。その結果、砂浜利用一回あたりでは 2,179 円/回、また日本全国では 922 億円/年(現在価値:2 兆 3,046 億円)と推計された。そして、全国の砂浜価値を全国の砂浜面積(191.1km²)で割ることにより、砂浜の貨幣評価原単位は全国平均で 12,058 円/m² となる。また、シナリオ別の 2090s における海面上昇量は、0.15m(450s)、0.19m(550s)、0.24m(BaU)と見積もられている。仮に IPCC 第四次評価報告書に従えば、今世紀末の海面上昇量は 2 倍以上になる場合もある。

GHG 安定化濃度が最も低い 450s シナリオにおいても、海面上昇による砂浜の喪失面積は今世紀末頃(2090s)まで増加し続け、約 29% の砂浜が喪失されると見込まれる。一方、550s および BaU シナリオでは、同時期までに、約 37%、約 47%喪失すると見込まれる。今世紀末頃(～2090s)の砂浜喪失被害コストは、約 273 億円/年(450s)、約 338 億円/年(550s)、約 430 億円/年(BaU)に達すると見込まれる。BaU と比較すると 450s シナリオには大幅な被害低減効果が期待できるが、海面上昇による被害が長期間に渡ると予想され、450s シナリオにおいても被害の増加は長期間続くと考えられるため、長期的な視点からの適応策が重要となる。

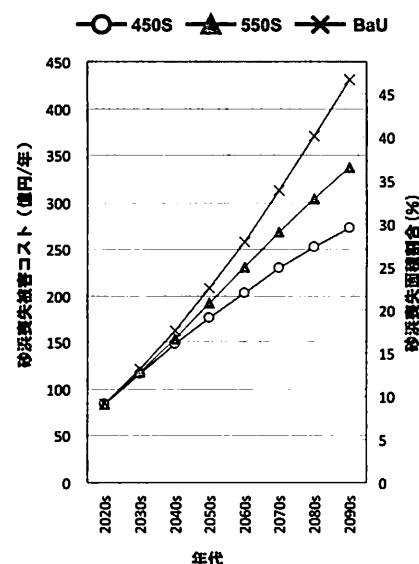


図 2.6.1 砂浜喪失割合と砂浜喪失による被害コスト(全国平均)。

2.7 高潮浸水被害

2.7.1 推計方法(モデルの概要)

a) 西日本： 台風の来襲頻度が高い西日本地域(中国地方、四国地方、九州地方)における高潮浸水を

予測するため、連続する低地を1つの計算領域として主要な低地に計算領域を設定した。計算領域ごとに現状を表現する地形と堤防等のデータを与え、レベル湛水法によって高潮浸水の状況を表現した。堤防等からの海水流入は本間の越流公式を用い、様々な高潮偏差の場合の浸水を計算し、生起確率で重みを付けて期待値を求めた。これらにより西日本地域における浸水状況を表現するモデルを構築し、そのモデルに海面上昇量と高潮増大率を与えて高潮による浸水を予測した。計算を行う海面上昇量は三大湾と同様とし、高潮増大率は現状の高潮偏差が一定倍率で変化すると想定し、現状を1として0.7から1.6まで0.1ずつ変化させた。そのため、西日本は毎年発生する被害を推定したことになり、三大湾とは意味が異なる。

b) 三大湾（東京湾・伊勢湾・大阪湾）：三大湾の奥部において高潮による浸水を予測するため、地形と堤防等のデータを格子情報として持つ空間を作成し、その空間で線形長波理論により海水の流動を表現した。海水の状態は、モデルの海側境界で海面変動を与え、それに対応する海水の流動と水面の変動を計算することによって表現した。堤防等からの海水流入を本間の越流公式で計算し、海水の遡上は岩崎・真野の方法で計算する。これらにより三大湾奥部の低地における浸水状況を表現するモデルを構築し、海面上昇量と台風の強度を与えて高潮による浸水を予測した。影響関数開発にあたり、計算を行う海面上昇量は、三大湾奥部のH.W.L.を基本とし、IPCC第4次報告書の予測範囲を含む0.0m～1.0mまで変化させた。台風の強度は、三大湾各々の海岸施設計画のための高潮を設定する条件となった台風（計画台風）の中心気圧低下量を1とし、中心気圧低下量を0.7から1.6まで0.3ずつ変化させた。三大湾の計画台風は、台風規模が伊勢湾台風（上陸時の中心気圧は935hPa、中心気圧深度は75hPa）であり、台風コースは、東京湾がキティ台風コース、伊勢湾が伊勢湾台風コース、大阪湾が室戸台風コースとした。

したがって、三大湾に対しては今世紀末に向かって、最大級の台風が来襲した時に（1回につき）どの程度の被害が生じるかを推定したことになる。

c) 西日本・三大湾の浸水被害コスト：陸上の資産の格子データを作成し、それを浸水シミュレーションの結果と重ね合わせて浸水被害を推計した。まず、平成12年国勢調査地域メッシュ統計の一般世帯数、農漁家世帯数、平成13年度事業所・企業統計調査の産業大分類別の事業所従業員数を求める。それらに都道府県別家屋1m²あたり評価額、1世帯あたり家庭用品評価額、産業大分類別事業所従業員1人あたり償却資産評価額および在庫資産評価額、農漁家1戸あたり償却資産評価額および在庫資産評価額を乗じて、家屋資産額、家庭用品資産額、事業所資産額、農漁家資産額を求めた。西日本モデルではこの他に農地面積と単位面積あたり生産額から農業生産額を求めた。

浸水計算によって得られた最大浸水深をもとに資産分類ごとの被害率を設定し、資産額および生産額に乘じて一般資産被害額を求めた。そして、一般資産被害額に公共土木施設比率、公益事業等比率を乗じ、公共土木施設被害額、公益事業等被害額を求め、それらに一般資産被害額を加え高潮浸水による被害額とした。海面上昇と高潮に関する条件が与えられた場合の浸水被害額を求め影響関数を開発した。

開発した影響関数の出力が持つ意味は、西日本の場合は意味が異なる。毎年のように発生する高潮の偏差がそれぞれ一定割合で大きくなりかつ海面が上昇したときに引き起こされる高潮被害をそれぞれ計算し、それらの平均値を求めたものが西日本の影響関数の出力値である。これに対し三大湾の場合、現時点で防御する対象と考えられている台風を代表的な台風と考え、その台風の強さが変化しかつ海面が上昇した場合に引き起こされる高潮被害の大きさを表すものである。

7.2 将来影響（高潮浸水人口・面積・被害額）

高潮防護施設をモデル化して組み込んだ高潮浸水モデルを用い、台風強度と海面上昇量を変化させて高潮浸水計算を多数行った結果から得られた、浸水人口、浸水面積、浸水被害コストの影響関数と、統合評価モデルで推計された安定化レベル別の海面上昇シナリオを組み合わせ、西日本と三大湾の浸水人口・面積・被害額を推計した。シナリオ別の2090sにおける海面上昇量は、0.15m(450s)、0.19m(550s)、0.24m(BaU)と見

積もられている。台風の強度は1990年を1として、2100年に1.3に達するよう線形に変化させている。

(西日本) 西日本における今世紀末(2090s)の被害は、シナリオ別に、450s(約32万人/年、155km²/年、5.4兆円/年)、550s(約37万人/年、176km²/年、6.2兆円/年)、BaU(約44万人/年、207km²/年、7.4兆円/年)に達すると見込まれる。中国地方は高潮に脆弱な地域が瀬戸内海沿岸の全域にわたって広く分布している。日本海沿岸では、高潮が相対的に大きくないことと、高波を防ぐために高い堤防等を設置している場合が多いことから、高潮による被害の危険性が低くなっている。高潮に脆弱な地域は、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場合が多い。四国地方は瀬戸内海沿岸と豊後水道沿岸で高潮による浸水の危険性が高い、太平洋沿岸では、高潮が相対的に大きくないことと、高波や津波を防ぐために高い堤防等を設置している場合が多いことから高潮による被害の危険性が低くなっている。高潮に脆弱な地域は、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場合が多い。九州地方は九州北西部、北九州、周防灘、別府湾、宮崎県南部、薩摩半島に高潮に脆弱な地域がある。こうした地域分布は主に堤防や護岸の整備水準が低い区間が断片的に存在することによって生じている。九州は台風の来襲の頻度が高い地域であるため、早めの手当と長期的な取組を組み合わせた対策の検討が求められる。

(三大湾) 三大湾では、今世紀末(2090s)の被害は、シナリオ別に、450s(約30万人/回、63km²/回、1.8兆円/回)、550s(約32万人/回、67km²/回、2.0兆円/回)、BaU(約35万人/回、72km²/回、2.3兆円/回)に達すると見込まれる。東京湾奥部には東部の荒川や江戸川の周辺にゼロメートル地帯が広がるが、それらの低地を守る護岸や水門等の防護水準が比較的高いため、それらの地域に脆弱な地域はそれほど多く見られない。むしろ東京南部沿岸に高潮に脆弱な地域が多くみられる。伊勢湾奥部では、木曾三川周辺から名古屋港周辺にかけてゼロメートル地帯が幅広く分布するが、高潮に対して脆弱な地域は木曾三川河口沿いと名古屋港奥部周辺に限れる。その中でも浸水深が大きいと予想されるのは、比較的古くに開発された名古屋港の埋立地とその周辺の地域である。大阪湾奥部では、大阪の北部から中部にかけて臨海部の埋立地の背後にゼロメートル地帯が広がるが、堤防や水門の整備が進んでいるため、高潮に脆弱な地域はそれほど多くない。高潮に脆弱な地域が多くみられるのは、大阪港の中部から南部に広がる埋立地とその周辺である。

温暖化に伴う海面上昇は長期間に及ぶため、その被害も長期的に増加する。気候安定化の効果が現れるにも長い時間を要するため、大きな被害を出さず、対策の実施主体の負担を大きくしないためには、温暖化の進行度合に合わせて適切な対策を徐々に講じていくことが合理的である。

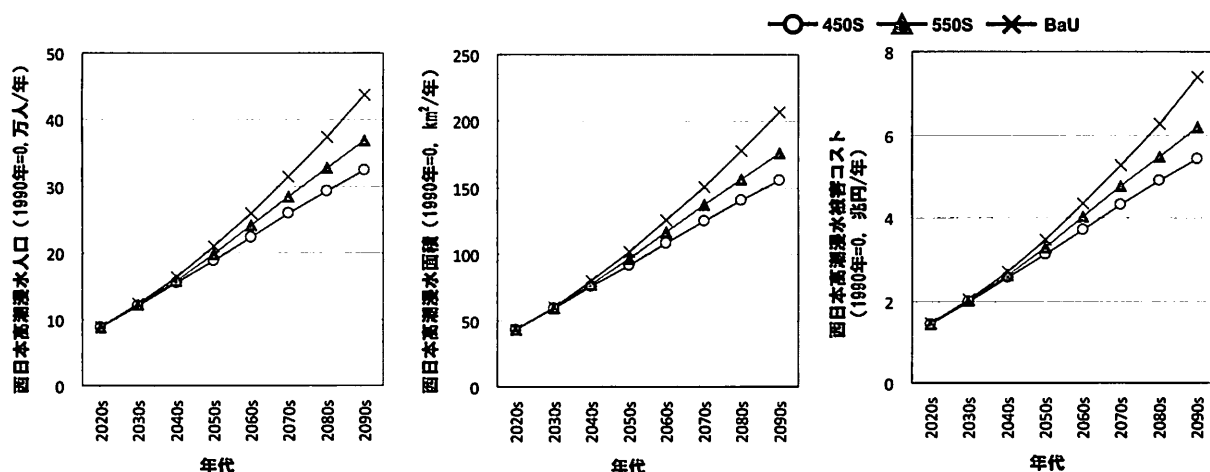


図 2.7.1 1990 年を基準(ゼロ)とした場合の温暖化による高潮浸水人口・浸水面積・浸水被害コスト(西日本)の増加分。

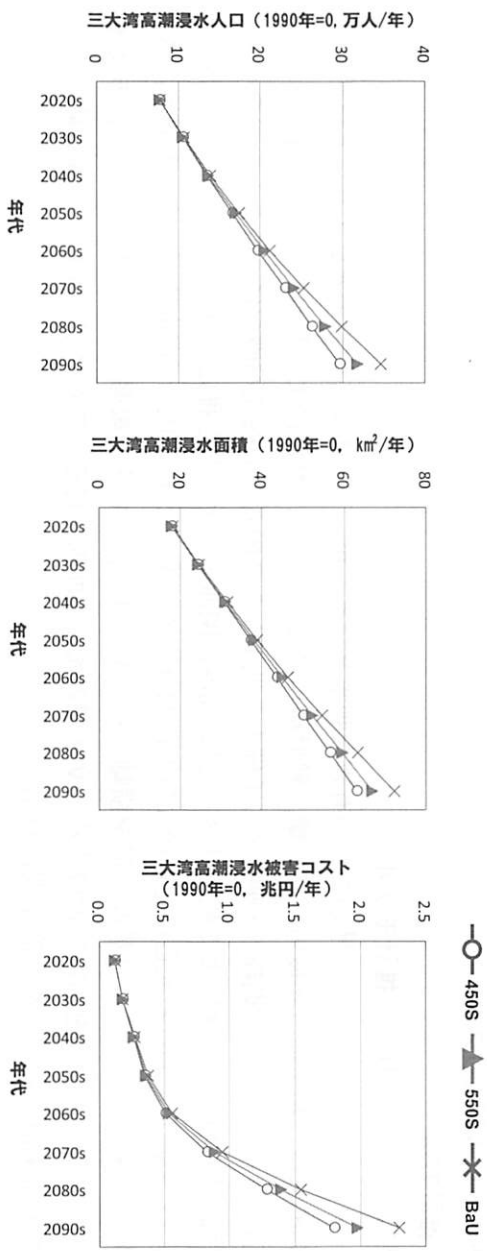


図 2.7.2 1990 年を基準(ゼロ)とした場合の温暖化による高潮浸水人口・浸水面積・浸水被害コスト (三大湾) の増加分。

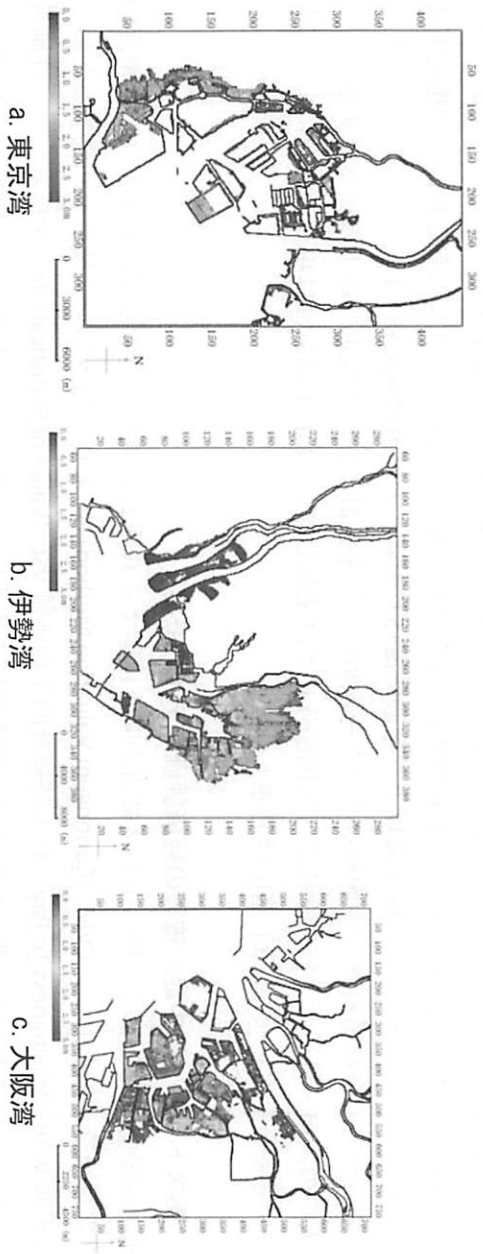


図 2.7.3 三大湾における海面上昇 60cm, 台風強度 1.3 の場合の高潮による浸水深

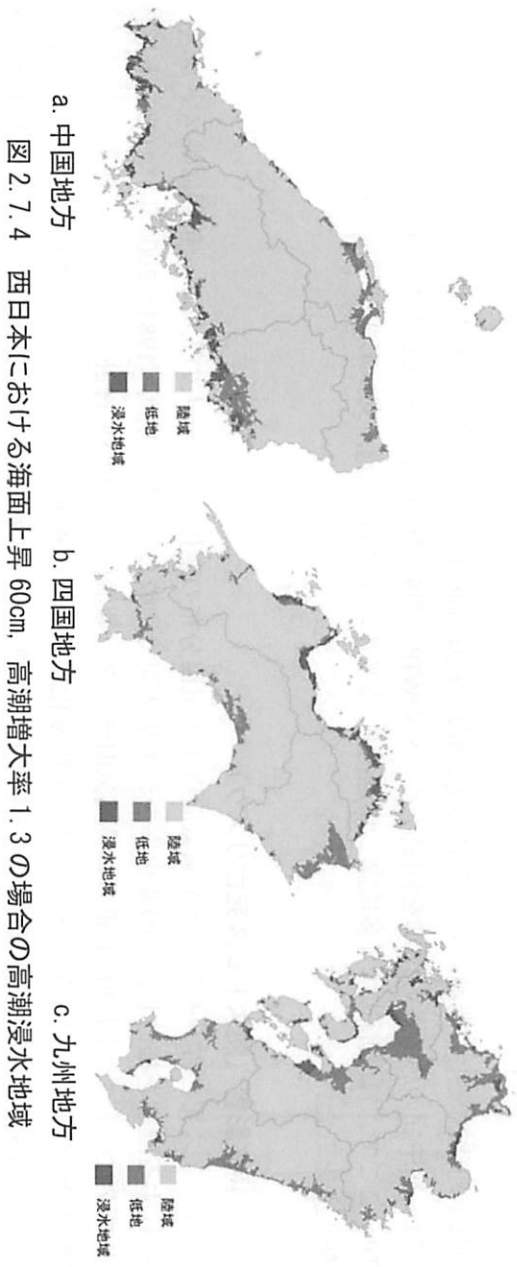


図 2.7.4 西日本における海面上昇 60cm, 高潮増大率 1.3 の場合の高潮浸水地域

2.8 熱ストレス死亡リスク

2.8.1 推計方法

(1) 熱ストレス死亡リスク推計モデル

熱ストレスによる死亡とは、暑いことが有害な刺激となって起こる生体反応の結果死亡することを意味する。具体的には、熱中症（熱疲労、熱痙攣、熱射病）による死亡や、発汗による脱水により、循環系・呼吸系の疾病を持っている人や循環系・呼吸系の予備力の低下した高齢者の心機能が破綻に至ることなどを示す。本研究における熱ストレスによる死亡リスクとは、高温に関連して生じたと推定される死亡のリスクをさす。具体的には、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差を用いて定量的に示したものである。気温と死亡の関連について、日最高気温を横軸、対応する日の総死亡率を縦軸としてプロットし、自由度 6 の平滑化スプライン関数を用いて近似すると V 字型の死亡率曲線を得る。この V 字の死亡率曲線が最低になる気温を至適気温と呼び、都道府県別に算出した。

至適気温における死亡率は、気温のコントロールが最もうまくいった場合の、最適な気温と考えられるので、それ以上の気温によって、この最低死亡率よりも高い死亡率が引き起こされる超過部分を熱ストレスによる死亡と定義する。

熱ストレス死亡のうち、至適気温に近い気温ではそれほど死亡リスクは高くないのに対し、至適気温から離れた気温になるに従ってリスクが増大する。そのため、至適気温での死亡率を基準にした高気温の相対リスクを求めるにあたり、単純な線形回帰でなく、また少数の極端な高気温の日に左右されにくい推定方法として、大きく二つの区分（「至適気温以上、至適気温+5℃未満」と「至適気温+5℃以上」）に分け、それぞれの区分について全都道府県の平均相対リスクを求めた。将来推計における仮定は以下の通りである。

(a) 人口の規模・構造および疾病構造・死因別死亡率は変化しない。(b) 至適気温は現在の気候によって決定され、将来も変化しない。(c) 適応は考慮しない。

(2) 熱ストレス（熱中症）被害の経済評価モデルの概要

地球温暖化対策としての熱ストレス被害の防止に関する費用対効果を検討する際に必要となる貨幣評価原単位の算出を目的として、CVM（Contingent Valuation Method）により、熱ストレス被害を回避するための支払意思額 WTP（Willingness To Pay）および統計的生命価値 VSL（Value of Statistical Life）を推計した。評価対象には、熱ストレスの中で主要な要因である熱中症による死亡リスクだけを取り出した。2008 年 5 月中旬、全国の成人男女を対象にしてインターネット利用の CV 調査（Contingent Valuation Survey）を実施した。アンケート調査の表題は『地球温暖化問題に関する意識調査』であり、アンケート票の質問内容は以下のとおりである。

問1：地球温暖化の問題に対する関心度、問2：地球温暖化による熱中症の増加に対する関心度

問3：熱中症の患者数の増加を回避するための WTP、問4：熱中症による死亡者数の増加を回避するための WTP、ここで、質問形式は『多段階二項選択』、支払手段は『負担金』、支払形式は『毎年払い』、支払単位は『個人』とした。

2.8.2 将来影響（熱ストレス死亡リスク）

熱ストレス死亡推計モデルと至適気温以上の気温分布の変化から、一人の人間が一年間に熱ストレスにより死亡する確率を推計し、その変化率をシナリオ間で比較した。基準期間（1981～2000 年）の熱ストレス死亡リスクについては同 20 年間の日最高気温データ（観測値）を用いて推計した。一方、将来については基準期間 20 年間の日最高気温データに（気候変化の季節差を考慮せず）一律に年平均気温変化を足し合わせることで将来期間の日最高気温データを作成して熱ストレス死亡リスクを推計した。将来の人口データは 1990 年の値で一定とし、人口構成は考慮していない。また、低気温での超過死亡の変化は対象とせず、気温

上昇による高気温での超過死亡の変化のみを検討しており、適応は起こらないと仮定した。

（全国的な傾向）低い GHG 濃度で安定化させるほど熱ストレス死亡リスクは小さくなる。特に、最も厳しい安定化レベル（450s）の場合には、死亡リスクの増加速度が今世紀末に向かって徐々に低下すると見込まれる。450s、550s、BaU シナリオで比較すると、今世紀中頃（2050s）には、約 1.8 倍、約 2.1 倍、約 2.2 倍と比較的小さな差にとどまるが、今世紀末（2090s）には安定化レベルによって死亡リスクに大きな差が現れ、それぞれ約 2.1 倍、約 2.8 倍、約 3.7 倍に達すると見込まれる。（地域別の傾向）中国・四国・九州地方がいずれの安定化レベルにおいても最も高いリスク変化（BaU で約 7 倍）を生じると見込まれる。このリスク変化は、集団にもよるが、概ね 1 日 20 本程度の喫煙による肺癌死亡率増加に近い値である。ただし、この結果は、計算に用いた日最高気温データの解析によると、他地域に比べて同地域で日最高気温の昇温が大きいためではなく、同地域の基準期間の熱ストレス死亡リスク推計値が比較的小さい（至適気温が高く、基準期間の日最高気温がそれを超過する日数が少ない）ことに起因している。

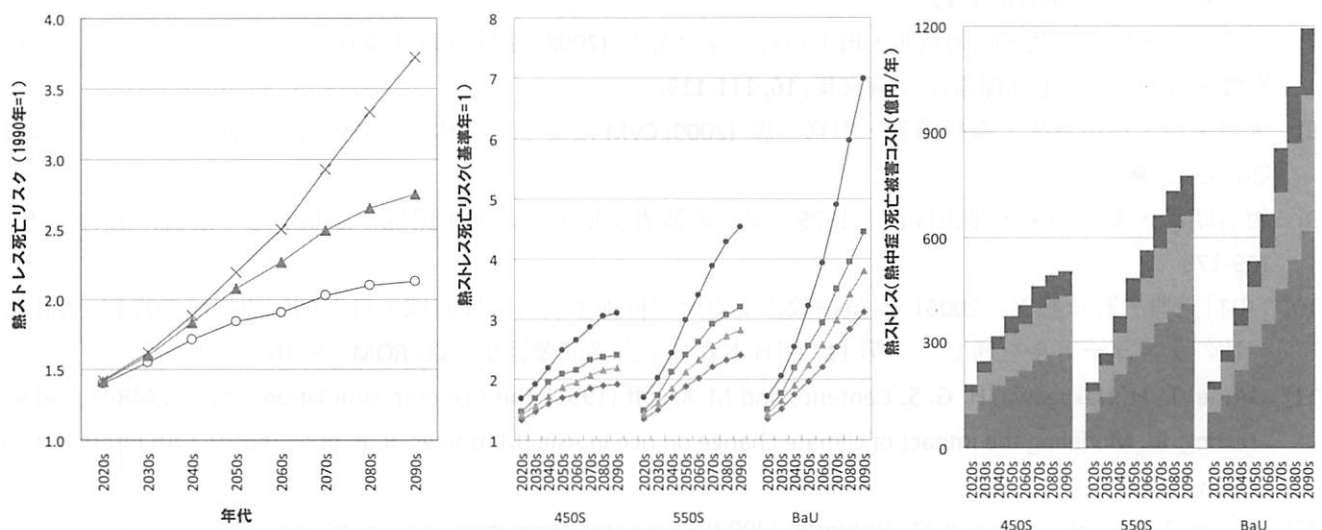


図 2.8.1（左図）1981-2000 年を基準とした場合の将来の熱ストレス死亡リスクの変化（全国平均）。

図 2.8.2（中央図）1981-2000 年を基準とした場合の将来の熱ストレス死亡リスクの変化（地域別）。

図 2.8.3（右図）1990 年を基準とした場合の将来の熱ストレス死亡被害額の変化（地域別）。

まとめ

温暖化影響総合予測プロジェクトによる研究成果により明らかとなった知見を以下に記す。

- 1) 我が国においても、今後、国民生活に関係する広範な分野で一層大きな温暖化の影響が予想される。世界的に温室効果ガス排出量が大幅に削減された場合、我が国に対する被害も相当程度減少すると見込まれる。しかし、温室効果ガス濃度を 450ppm に安定化した場合でもなんら対策を講じない場合には一定の被害が生じることは避けられない。
- 2) 今後 20 年は追加的な緩和策の有無にかかわらず温暖化が進行すると予想されているが、世界全体の気候安定化レベルの違いによる影響の差異は、今世紀中程を過ぎると大きくなると見込まれる。したがって、気候を安定化させるための積極的な緩和策と共に、ある程度の悪影響が生じることに備えて、長期的な視点で適応策を検討・実施することが早急に必要である。IPCC 第四次評価報告書によると「SRES 排出シナリオの範囲では、今後 20 年間に、10 年あたり約 0.2℃の割合で気温が上昇する」と予測されている。温暖化が進行すると、その悪影響は長期間に及び、気候安定化の効果が現れるにも長い時間を要する。そのため、将来の被害を可能な限り小さくし、後世に対策の負担を回さないようにするためには、長期的な視点での適応策の検討・実施が必要である。

参考文献

- 1) 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, 52, 433-438, 2008
- 2) 川越清樹, 風間聡, 沢本正樹: 融雪に起因する土砂災害リスクモデル, 水工学論文集, No.51, pp.367-372, 2007.
- 3) 川越清樹, 風間聡, 沢本正樹: 水工学論文集, 52, 463-468(2008), 日本列島を対象にした融雪に伴う土砂災害のリスク評価
- 4) 川越清樹, 風間聡, 沢本正樹(2008) 数値地理情報と降雨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, Vol.27, Issue1, 69-83.
- 5) 田中信行・松井哲哉・八木橋 勉・埴田 宏 (2006) 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.
- 6) 松井哲哉・田中信行・八木橋勉 (2007) 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.
- 7) 高橋 潔・松井哲哉・脇岡靖明・田中信行・原沢英夫 (2008) 温暖化政策支援モデルのための県別ブナ林影響関数の開発. 地球環境研究論文集, 16, 111-119.
- 8) 大野栄治・林山泰久・森杉壽芳・中畠一憲 (2009) CVM によるブナ林の経済価値の計測, 環境システム研究論文集, 掲載決定
- 9) 竹谷昭彦・奥田素男・細田隆治 (1975) マツの激害型枯損木の発生環境: 温量からの解析. 日林誌 57: 169-175
- 10) 中村克典・野口絵美 (2006) 温量指数によるマツ材線虫病自然抑制域・自然抑制限界域の推定: MB 指数のリニューアルを通して. 第 117 回日本森林学会講演要旨集 (CD-ROM) PF16.
- 11) Horie, T., H. Nakagawa, H. G. S. Centeno, and M. Kropff (1995) The rice crop simulation model SIMRIW and its testing, In: Modeling the impact of climate change on rice in Asia [Matthews, R. B. et al. (eds.)]. CAB International, Oxon, 51-66.
- 12) Iizumi, T., M. Yokozawa and M. Nishimori (2009) Parameter estimation and uncertainty analysis of a large scale crop model for paddy rice: Application of a Bayesian approach. Agricultural and Forest Meteorology, 149, 333-348.
- 13) 大野栄治・林山泰久・森杉壽芳・野原克仁 (2009) 地球温暖化による砂浜消失の経済評価: 旅行費用法によるアプローチ, 地球環境, 14,
- 14) 三村信男・井上馨子・幾世橋慎・泉宮尊司・信岡尚道(1994) 砂浜に対する海面上昇の影響評価(2)ー予測モデルの妥当性の検証と全国規模の評価ー, 海岸工学論文集, 41, 1161-1165.
- 15) 鈴木武 (2008) 高潮浸水シミュレーションによる三大湾奥部の浸水被害の感度解析. 海洋開発論文集, 24, 453-458.
- 16) 鈴木武 (2008) 九州地方における地球温暖化による高潮浸水リスクの変化. 地球環境研究論文集, 16, 105-110.
- 17) Takahashi, K., Honda, Y. and Emori, S.: Assessing Mortality Risk from Heat Stress due to Global Warming, Journal of Risk Research, 10, 339-354.
- 18) 大野栄治・林山泰久・森杉壽芳・野原克仁 (2009) 地球温暖化による熱中症被害の経済評価ーVSH と VSL の計測ー, 地球環境研究論文集, 17, 投稿中