

環境研究総合推進費戦略的研究課題S-18報告書

日本の気候変動影響と適応策 —レジリエントで持続可能な社会に向けて—



2025年3月

環境研究総合推進費S-18プロジェクトチーム

はじめに

世界各地で異常な高温、熱波、洪水、干ばつが毎年発生し、気候変動の影響が大きく顕在化しています。この事態に対して、2023年7月にグテーレス国連事務総長は「地球沸騰化の時代が来た」と警鐘を鳴らしました。国際的な温暖化対策にもかかわらず、遠からず世界の平均気温が1.5℃上昇を超え、さらに激しい気象極端化が発生すると見込まれています。そのため、適応策の実行は待ったなしの状況になっています。

日本では、2018年に「気候変動適応法」が成立し、5年毎に全国的な影響評価を行って政府の適応計画を見直すことになっています。そのため、2025年に公表される次の全国影響評価に向けて、新たな研究が必要とされました。こうした背景のもと、2020年4月にS-18研究プロジェクト「気候変動影響予測・適応評価の総合的研究」がスタートしました。この研究プロジェクトは、環境省と環境再生保全機構が運営する環境研究総合推進費による5年間の研究プロジェクトです。本報告書では、この研究プロジェクトの成果をまとめて報告します。

S-18研究プロジェクトでは分野毎に評価を行っていますが、以下のような特徴があります。

- 日本全国を対象に2100年までの気候変動の影響と適応策の効果を評価した。
- 地方自治体の適応策実施に役立つように、国土数値情報3次メッシュ（1km×1km）の空間解像度で評価を行い、市町村など自治体ごとに結果を取りまとめた。
- これまで影響予測の少なかった多種類の農作物や国民生活・都市生活などに対象を広げた。また、一部の分野において適応策と緩和策の効果を評価した。
- 人口減少や高齢化、建物用地の変化など将来の社会的変化と合わせた影響評価を行った。
- こうした成果を生み出すため、共通の気候シナリオ、社会経済シナリオを用いた研究フレームワークを構築した。また、従来から用いられてきたプロセスモデルとともに統計的モデルや機械学習などデータドリブンな予測モデルを開発した。
- これらを通じて、気候変動適応策の推進、さらに気候にレジリエントで持続可能な社会づくりに寄与する多様な知見を得た。

本報告書は、学術論文やシンポジウムなどを通じて発表したこれまでの成果を中心にまとめたものです。今後さらに、国立環境研究所気候変動適応センターの気候変動適応情報プラットフォーム「A-PLAT」を通じてより詳しくお伝えする予定です。これらを通して、本プロジェクトの成果が今後の気候変動対策の推進に役立つことを期待しています。

なお、本報告書の「2. 自然生態系」は、国立環境研究所気候変動適応センター（CCCCA）の皆様が執筆して頂きました。CCCCAが進めている「気候変動適応研究プログラム」の中の自然生態系分野の成果報告です。本報告書に対する貴重な成果報告の寄稿、またこれまでのS-18プロジェクトに対する緊密な連携・協力に対して心から感謝致します。

2025年3月

S-18 プロジェクトリーダー
三村信男（茨城大学）

編集委員会

	所属	S-18 での役割
三村信男	茨城大学地球・地域環境共創機構	プロジェクトリーダー テーマ 1、サブテーマ 1 (1) リーダー
長谷川利拡	農業・食品産業技術総合研究機構	テーマ 2、サブテーマ 2 (1) リーダー
横木裕宗	茨城大学大学院理工学研究科	テーマ 3、サブテーマ 3 (1) リーダー
栗栖 聖	東京大学大学院工学系研究科	テーマ 2、サブテーマ 2 (1) リーダー
日引 聡	東北大学大学院経済学研究科	テーマ 2、サブテーマ 2 (1) リーダー
真砂佳史	国立環境研究所気候変動適応センター	サブテーマ 1 (2) リーダー
坂本幸子	茨城大学地球・地域環境共創機構	S-18 事務局

謝辞

本報告書をまとめるにあたって、筑波大学 武若聡教授、茨城大学地球・地域環境共創機構 今村航平、横田容子両研究員には原稿の整理及び校正などで大変お世話になった。また、S-18 プロジェクトの参加者及び参加機関の事務局の皆様にも多大なご協力をいただいた。これらの方々のご尽力に対して、心から感謝致します。

本研究は、環境省・（独）環境再生保全機構の環境研究総合推進費（JPMEERF20S11800）により実施した。5 年間にわたるご支援に対して感謝致します。

本報告書の入手方法

本報告書の pdf 版は以下の S-18 ホームページからダウンロードできます。

<https://s-18ccap.jp/>

目 次

はじめに	1
目次	3

【S-18 プロジェクト成果概要】

A. S-18 プロジェクトの概要	7
A.1 S-18 プロジェクトの目標	7
A.2 影響・適応評価の対象分野	7
A.3 影響・適応評価の共通フレームワーク	7
B. 研究成果サマリー	10
B.1 気候変動影響に関する研究成果	10
B.1.1 観測された気候変動影響に関する成果	10
B.1.2 将来の気候変動影響の予測に関する成果	11
B.2 適応策に関する研究成果	15
B.2.1 適応策の効果に関する成果	15
B.2.2 緩和策や他の社会的課題との関係に関する成果	17
B.2.3 適応策の検討・実施に資する成果	19
B.3 気候変動適応策の推進に向けた提言	21

【本編】

第 1 部 分野毎の影響予測と適応評価	25
1. 農林水産業	25
1.1 観測された影響	25
1.1.1 農業	25
1.1.2 水産業	28
1.2 将来予測と適応の効果	30
1.2.1 農業	30
1.2.2 畜産業	35
1.2.3 林業	36
1.2.4 水産業	38
1.3 災害リスク、生物多様性を考慮した気候変動適応	41
1.4 気候変動対策の推進に向けた課題・提言	42
1.4.1 気候変動対策の推進に向けた提言	41
1.4.2 今後の課題	43
Box 1.1 令和 5 年の異常高温による一等米比率の低下と高温耐性品種の導入効果の推定	44

2. 自然生態系.....	50
2.1 研究の目的と概要.....	50
2.2 樹種分布の変化の検出.....	50
2.3 森林樹木群落の脆弱性評価.....	52
2.4 大雪山国立公園における高山植生の将来予測と保全計画.....	52
2.5 地域気候変動適応計画における沿岸生態系（サンゴ、大型海藻、海草）に関する記述と 適応策の位置づけ.....	53
2.6 結論.....	54
3. 水資源.....	58
3.1 はじめに.....	58
3.2 日本の水資源・水需給バランスに対する影響評価.....	58
3.3 適応策・適応効果.....	59
3.3.1 全国評価.....	59
3.3.2 信濃川流域における水需給バランス.....	60
3.4 トレードオフを考慮した気候変動適応の提示：多目的最適化の応用.....	62
3.5 適応の課題と提言.....	63
Box 3.1 空間公共財ゲームに基づく水稻栽培における水利用集中時期を分散化する制度設計	65
4. 自然災害・沿岸域.....	67
4.1 沿岸域における影響評価と適応効果.....	67
4.1.1 研究の目的と方法.....	67
4.1.2 海面上昇.....	67
4.1.3 高潮.....	69
4.1.4 海岸侵食.....	70
4.1.5 港湾施設.....	71
4.2 河川流域における影響評価と適応効果.....	73
4.2.1 外水氾濫.....	73
4.2.2 内水氾濫.....	74
4.2.3 適応と緩和の相乗効果.....	74
4.3 適応策の課題と提言.....	74
Box 4.1 高潮浸水評価に関連する取り組み.....	76
Box 4.2 日本国沿岸の海岸保全施設高さの推定.....	77
5. 国民生活・都市生活.....	78
5.1 気候変動の QoL への影響.....	78
5.1.1 QoL への影響総論.....	78
5.1.2 QoL に基づく地域評価.....	78

5.2	QoLを構成する主要な側面での影響評価	79
5.2.1	街区における暑熱への影響	79
5.2.2	交通システムへの影響	81
5.2.3	健康への影響	83
5.3	緩和と適応の効果	84
5.3.1	都市計画における適応施策の整理	84
5.3.2	ストック管理・建材による緩和と適応	86
5.3.3	健康に対する適応策とその効果	88
5.4	おわりに	89
6.	影響・適応策の社会・経済的効果	92
6.1	気候変動の経済影響と適応能力	92
6.1.1	気候変動の農業への影響と適応能力	92
6.1.2	気候変動の健康影響と適応能力	95
6.1.3	気候変動の製造業への影響と適応能力	96
6.2	気候変動に対する適応行動のインセンティブの分析	100
第2部	適応策の評価	103
7.	適応策の分類と現状評価	103
7.1	研究の目的	103
7.2	適応策の分類	103
7.3	適応策オプションの分類と分野別の特徴	104
7.4	適応の限界と変革的適応策	106
Box 7.1	水環境・水資源に関連する適応策	108
Box 7.2	気候変動影響の地域性の評価方法	110
8.	地方自治体における適応策の取り組みの特徴	112
8.1	地域気候変動適応計画の策定状況及び特徴	112
8.2	地域気候変動適応センター（LCCAC）の類型化と課題の解析	114
9.	適応策の効果と適応策と緩和策の関係	117
9.1	適応策の効果	117
9.1.1	適応策の評価	117
9.1.2	適応策と緩和策の関係	120
9.2	適応策の計画・実施上の課題	121
Box 9.1	緩和策と適応策の気候安全保障と人間の安全保障からの政策枠組の構築	123
第3部	S-18 研究フレームと共通シナリオ	127
10.	研究フレームと評価方法	127

10.1	S-18 プロジェクトの背景と目標	127
10.2	影響・適応評価の対象分野	127
10.3	影響・適応評価の共通的分枠ワーク	128
11.	共通シナリオ	131
11.1	気候シナリオ	131
11.2	社会経済シナリオ	132
11.2.1	研究目的	132
11.2.2	手法	133
11.2.3	研究成果	133
 資料編		
•	執筆テーマ・サブテーマ一覧	139
•	S-18 プロジェクト参加者（研究組織）	140

【S-18 プロジェクト成果概要】

A. S-18 プロジェクトの概要

A.1 S-18プロジェクトの目標

本プロジェクトの全体目標は、「我が国の気候変動適応を支援する影響予測・適応評価に関する最新の科学的情報を創出する」ことである。それを通じて、① 2025 年に予定されている気候変動影響評価報告書への貢献、② 地方自治体における適応の取組への寄与、③ IPCC 第7次評価報告書やパリ協定における国際的取組への貢献、④ 気候変動に対してレジリエントな社会のあり方に関する提言、といった目標の実現を目指した。本プロジェクトの目標と研究の構成を図 ES1.1 に示す。

A.2 影響・適応評価の対象分野

気候変動適応計画では、「農業・林業・水産業」、「水環境・水資源」、「自然生態系」「自然災害・沿岸域」、「健康」、「産業・経済活動」、「国民生活・都市生活」の7分野を対象にしている。これにない、本研究プロジェクトでは自然生態系を除く6分野を影響予測・適応評価の対象にした。なお、自然生態系については、国立環境研究所気候変動適応センターで別途研究しており、その成果を本書にも記載している。

A.3 影響・適応評価の共通的分枠ワーク

(1) 対象とする地域と期間

- 1) 対象地域：日本全国。影響評価などの空間解像度は、国土数値情報3次メッシュ（ほぼ1km × 1km）とし、市町村あるいは都道府県といった地方自治体ごとの評価と併用した。
- 2) 対象期間：将来予測の期間は、2020 年から 2100 年までとした。共通の評価時期は、近未来：2030 年（2020 ～ 2040 年）、中期的未来：2050 年（2040 ～ 2060 年）、長期的未来：2090 年（2080 ～ 2100 年）である。

(2) 評価の条件

- ① 気候変動による影響のみの評価：温暖化レベルとして3つの温室効果ガス排出シナリオ（RCP8.5、4.5、2.6）を設定し、社会経済条件は現状に固定して評価した。
- ② 気候変動と社会変化（人口、世帯数、土地利用）を考慮した評価：温室効果ガス排出シナリオ（RCP）と社会経済シナリオ（日本版 SSP）を組み合わせ、RCP8.5-SSP5（高排出成長社会）、RCP4.5-SSP2（中間的社会）、RCP2.6-SSP1（持続可能社会）の3つの将来シナリオを設定した。
- ③ 補足的人口シナリオ：人口減少・高齢化の大きいケースとして日本版 SSP3 人口シナリオを用意し、大きな人口減少の影響を考慮できるようにした。

以上のために、表 ES1.1 に示す共通の気候シナリオ及び社会経済シナリオを設定した。

(3) 温室効果ガス排出シナリオと気候シナリオ

IPCC は、温室効果ガス排出シナリオに基づいての気候予測を行っている。IPCC 第 5 次報告書 (AR5) では代表的濃度経路シナリオ「RCP」が用いられ、第 6 次報告書 (AR6) では「SSPX-Y」の形式の温室効果ガス排出シナリオが用いられた。例えば、SSP5-8.5 などである。

本研究で用いた気候シナリオ「NIES2020」は、AR6 の排出シナリオ SSPX-Y に基づいている (本編 11.1 参照)。一方、AR5 の RCP 排出シナリオを用いた影響予測もあるため、気候シナリオの表記が両方現れることに注意して頂きたい。

ただし、この 2 つの排出シナリオはほぼ同等であるため、本報告書では下のように類似したグループとして扱っている。

- ・「非常に高い排出シナリオ」グループ SSP5-8.5、RCP8.5
- ・「中間的な排出シナリオ」グループ SSP2-4.5、RCP4.5
- ・「低い排出シナリオ」グループ SSP1-2.6、RCP2.6

また、影響予測の結果を相互に比較する場合、これらの排出シナリオグループを RCP 表記で示すことが多いが、その中には SSPX-Y に基づく結果も含まれている。

以上をまとめると、本プロジェクトで設定した評価ケースとシナリオは表 ES1.1 のようになる。

表 ES1.1 評価の目的と排出シナリオ、社会経済シナリオの対応

目的	評価ケースの表記	温室効果ガス 排出シナリオ	社会経済シナリオ
①気候変動による影響 のみの評価	SSP5-8.5/ RCP8.5	SSP5-8.5/ RCP8.5	社会・経済条件は現状 固定
	SSP2-4.5/ RCP4.5	SSP2-4.5/ RCP4.5	
	SSP1-2.6/ RCP2.6	SSP1-2.6/ RCP2.6	
②気候変動と社会変化 の両方を考慮した評価	RCP8.5-SSP5	SSP5-8.5/ RCP8.5	SSP5 (日本版)
	RCP4.5-SSP2	SSP2-4.5/ RCP4.5	SSP2 (日本版)
	RCP2.6-SSP1	SSP1-2.6/ RCP2.6	SSP1 (日本版)
③補足的人口シナリオ の提供			SSP3 (日本版) 人口シ ナリオを準備

(3) 分野毎のアウトプット目標

- ① 日本全体に対する気候変動影響：温室効果ガス排出シナリオ（温暖化レベル）ごとの影響
やリスクの評価、影響の地域特性、影響の経済評価等
- ② 分野毎の適応策の評価
- ③ 緩和策と適応策の相互作用：シナジーとトレードオフ、適応策の緩和に対する効果
- ④ 複合的影響に関する知見：複数の影響が重なった場合の影響
- ⑤ 人口減少など社会変化と気候変動影響の相乗効果
- ⑥ 今後の適応策推進に向けた知見・提言

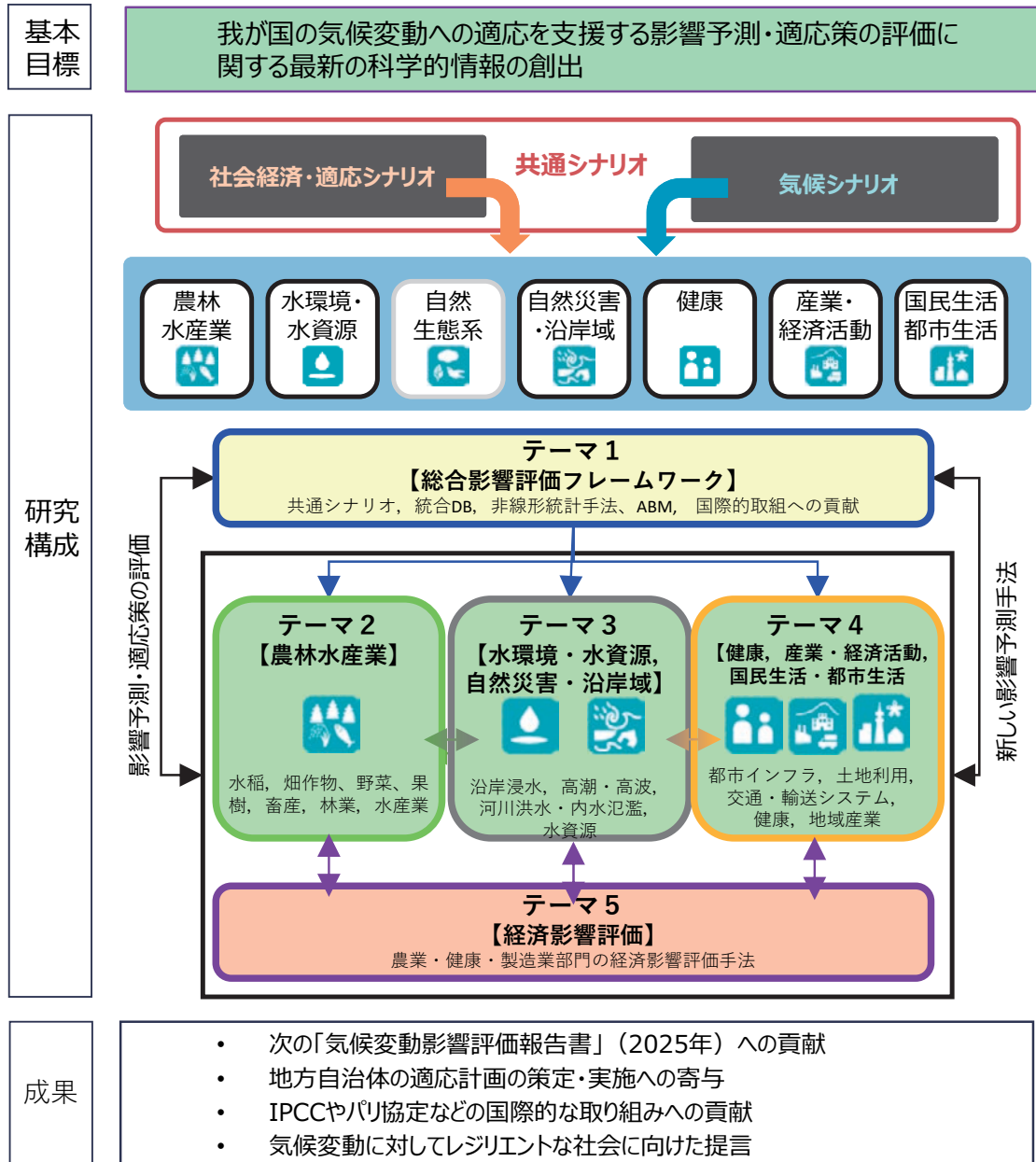


図 ES1.1 S-18 プロジェクトの目標と研究の構成

B. 研究成果サマリー

B.1 気候変動影響に関する研究成果

B.1.1 観測された気候変動影響に関する成果

【総括 Statement】

地球の平均気温は、2023 年には産業革命以前に比べて $1.45 \pm 0.12^{\circ}\text{C}$ 上昇した (WMO, 2024)。日本でも 100 年あたり 1.35°C という速さで平均気温が上昇し、2023 年は観測史上最も平均気温が高い年になった (気象庁, 2024)。地球温暖化によって気象極端化が進み、水稻や果樹の品質低下、サンマやスルメイカなどの漁獲量減少、ブリ、サワラ等の北上などの水産資源分布の変化、熱中症による死者や搬送者の増加、洪水被害の増大など、多くの分野で著しい影響が現われつつある。これらは国民生活に直接影響を与えており、現在進行形の影響被害に対する対策 (適応策) が急務になっている。2018 年の気候変動適応法施行によって、国や地方自治体を中心に適応策の策定・実施が進んだが、それを超えて影響が拡大しており適応策の強化が必要とされている。

参考文献 WMO (2024) : State of the Global Climate 2023, WMO-No.1347, 53p.

気象庁 (2024) : 日本の年平均気温偏差の経年変化 (1898~2023 年),

気象庁 HP, https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/an_jpn.html

【農業・林業・水産業】

- 近年の気候変動により、水稻、果樹、野菜、畜産物など多くの品目で高温障害が確認されるとともに、その影響を報告する県が増加するなど影響が拡大している (1.1.1)。
- 水稻では、登熟期の高温による白未熟粒の発生が増加し、外観品質の低下や一等米比率の減少が顕著である。白未熟粒率は登熟期前半の気温が 26°C を超えると増加する傾向がある。2000 年以降、全国的に登熟期の気温上昇が見られ、特に関東、北陸、近畿では 10 年間で 0.3°C 以上の上昇が確認されている。さらに、2011~2023 年の全国データによれば、登熟期前半の気温が 1°C 上昇すると、一等米比率が平均 15 ポイント低下することが明らかになった (1.1.1)。
- 大豆では、登熟期後半の高温が青立ちの発生に関与することが室内実験および全国 4 カ所の育種試験データから明らかになった (1.1.1)。
- 果樹 (ブドウ、リンゴ、ウンシュウミカン) では、夏季高温により果皮の着色不良や日焼けが、野菜でも各種の高温障害が報告されている。花きでは、発育の促進や遅延などで、適期出荷に問題が生じる県が増加している (1.1.1)。
- 畜産 (乳牛、肉牛、養豚、採卵鶏、肉用鶏) では、夏季高温が乳量や成長量の低下、繁殖率低下に及ぼす高温が問題となっており、へい死を報告する県も増加している (1.1.1)。
- 水産業では、海水温の上昇により水産生物の分布が北上しており、特に東北地方では黒潮の影響で南方の魚が急増している。これらの漁業資源の有効活用と消費拡大が重要な適応策とされている。代表的な例として、日本海のサワラや北海道のブリがある。調査船による研究では、深海魚の分布も北上し、さらに深い海域に移動していることが確認された。日本海南西部の底引き網漁業では、ハタハタが北東方向に移動する一方、カレイ類は分布変化が見ら

れず、アカムツは資源量の増加により南西方向に分布が拡大した。マイワシをはじめとする小型浮魚類では、海洋環境の変化による資源量の変動が大きく、関連産業への影響が大きい。特にスルメイカは、国内資源の減少によって国内における加工業の縮小が進んでいる（1.1.2）。

【自然生態系】

- 過去の気候変動に伴って、森林樹木種の多くがその分布域を北上させている可能性がある。また、種による特徴の違いや地理的分布、攪乱や競争の影響などにより、森林タイプや場所によって分布移動の程度や方向性は異なる（2.2）。

【国民生活・都市生活】

- 気候変動への深刻度認知は、農業に依拠した小規模自治体で高く（図 5.1.2）、これらの自治体では適応計画の策定が他自治体に比べて進んでいる。またこれらの自治体は現状の Quality of Life (QoL) の面からも脆弱性が高いことが懸念され（図 5.1.3）、気候変動による追加的影響のダメージが大きい。
- 2020 年時点において全国の建設物ストックの約 42% は洪水浸水区域内に存在しており、過去 20 年間で浸水レベルを問わず増加している（図 5.3.3）。
- 全国のバス営業所の約 42% が、洪水や土砂災害の災害リスクにさらされている（5.2.2）。

【社会・経済的效果】

- 過去の各市町村データを用いて、水害が各市町村の出荷額、事業所数、雇用などに与える影響を推計した。その結果、水害がなかった場合の経路と比較して、製造出荷額、事業所数、雇用へのマイナス影響は大きくなり、短期的な影響だけでなく、長期的な影響が大きいことがわかった（6.1.3）。
- 水害は小中規模事業所数を 20% 程度減少させ、大規模な事業所を 10% 程度減少させており、小中規模事業所は水害の適応能力が低いことが分かった。被災経験がある地域では、そうでない地域と比べて出荷額への影響が小さく（20 ～ 50% 程度）、被災経験は適応能力を強めることがわかった（6.1.3）。

B.1.2 将来の気候変動影響の予測に関する成果

【総括 Statement】

今後、気候変動対策が十分進まなかった場合、日本でも気候変動の影響がさらに大きく現われる。それらの影響は、温暖化のレベル、影響を受ける対象、地域によって、影響の程度や発現時期が異なる。本研究では、分野・対象ごとにこれらの特徴を把握した。

- 温暖化レベルによる影響の差：多くの分野で、温暖化レベルによって影響の程度が大きく異なる。今世紀末に世界の平均気温が 4℃ を超える RCP8.5 シナリオでは、2℃ 上昇の RCP2.6 シナリオに比べて、農業、畜産業、水産業、沿岸域、河川氾濫、交通インフラ、熱中症などの分野において、より厳しい影響が予測される。その結果、たとえば環境への適応幅の狭い果樹などでは、樹種の変更といった変革的な適応策が必要なものが現われる可能性がある。一方、これまで低温が問題で栽培や生産が制限されていた品目では、気候変動に伴って生産

が可能になったり、収量が増加したりすると予測される地域もある。こうした品目や地域による影響の違いを考慮した適応策の検討が必要である。

- 重大な影響、脆弱な地域：気候変動の影響は、地域ごとに現れ方が異なるのが大きな特徴である。適応策では、地域ごとの特徴を踏まえた計画立案と実施が必要である。
- 突発的ハザードとゆっくり進行するハザード：気候変動がもたらすハザードには、豪雨・高潮のような突発的事象と海面上昇のようなゆっくり進行する事象がある。本研究では、前者に対してはイベント毎に被害を算定し、後者に対しては防護がない場合の潜在的被害を算定する手法をとった。こうしたハザードと算定方法の違いを踏まえて予測結果を見る必要がある。
- 気候変動の経済影響：海面上昇による浸水が引き起こす経済影響には、浸水地域で生じる直接影響と、サプライチェーンを通じて被災地外の地域経済に影響が波及する間接影響がある。47 都道府県マクロモデルによって直接影響と間接影響を総合的に評価する手法を開発し、各都道府県への影響を算定した。

【農業・林業・水産業】

- 水稻では、高温・高 CO₂ 濃度の複合的影響を反映した生育収量予測モデルと、高 CO₂ 濃度を考慮した白未熟粒率予測モデルを組み合わせることで、収量と品質の双方を統合的に解析した。収量予測では、RCP8.5 シナリオにおいて今世紀末に約 20% の減収が見込まれ、白未熟粒率の予測では、今世紀末に約 40% に達すると示された。また、増収する地域の縮小と白未熟の発生地域の北上が推定された。さらに、温暖化レベルと米粒の外観品質を考慮した解析の結果、現在の品種を栽培し続けた場合、産業革命前からの気温上昇が 1℃ を超えるだけで白未熟率の低い高品質米の生産量が日本全体で減少することが示され、収量と品質の両面で気候変動の深刻な影響が明らかとなった (1.2.1 (1))。
- 大豆では、気候変動による青立ち程度の増加を予測する手法を開発した。本モデルと秋田県大仙市、茨城県つくばみらい市、香川県善通寺市、熊本県合志市の 4 地点の気候シナリオを基に解析した結果、開花後 51-60 日目の平均気温が 1℃ 上昇すると、青立ちスコアが 0.12 ~ 0.21 ポイント増加することが分かった (1.2.1 (2))。
- 果樹では、ウンシュウミカンとアボカドの適地条件が気温上昇に伴い大きく変化すると予測された。非常に高い排出シナリオ (SSP5-8.5) の場合、今世紀末までにウンシュウミカンの適地は北上または内陸に広がり、一部の産地では適温を超えて生産が困難になることが予測された。一方、低い排出シナリオ (SSP1-2.6) では、適地の変化は比較的小さく、現在の産地での栽培継続が可能とされた。アボカドの適地は気温上昇に伴い拡大し、今世紀半ばには現在のウンシュウミカン適地の多くがアボカド栽培に適すると予測された (1.2.1 (3))。
- 67 の作目の市町村別収量と気象要因の関係からなる統計モデルを用いて、今世紀半ばの収量を予測したところ (SSP5-8.5)、気候変動により、葉菜類、豆類、根菜類では多くの地域で収量が増加する一方、穀物類、果菜類、果樹類では地域による違いが顕著であった。西日本では収量が減少する作物が多く、東日本では増加が予測される作物が多いことが分かった。(1.2.1 (4))。
- 畜産では、いずれの畜種でも生産性の低下が予測されたが、その程度には違いがあった。すなわち、泌乳牛では、温湿度指数 (THI) を用いた予測 (SSP2-4.5) で、本州全域で乳量の

大幅な低下が2030年代以降に進行し、気温上昇とともに拡大が続くと推定された。一方、採卵鶏では気温上昇の影響は比較的小さく、関東以南や九州沿岸で最大10%程度の生産性低下が一部の鶏種で予測された程度であった。また、肥育豚の日増体量は2030年代から減少が顕在化し、関東以南や九州沿岸で10%以上の生産性低下が予測され、影響がさらに拡大する見込みである(1.2.2)。

- 林業では、スギ人工林の高齢化と広葉樹二次林の増加により、2050年には炭素吸収量が2010年に比べて平均14～21%減少すると予測された(SSP1-2.6およびSSP5-8.5)。また、スギの遺伝的特性によって将来の気候条件に適応しづらくなる「遺伝的オフセット」が、2050年以降に九州・四国の内陸部や東北地方を含む広範囲で高まると予測され、2090年には低地全域で影響が顕著になるとされた(1.2.3)。
- 水産業では、養殖ワカメへの影響予測を三陸海域と鳴門海域で実施した。その結果、三陸海域では、RCP2.6では生産量増大の可能性があるプラスの影響が予測された。一方、RCP8.5では収穫量は現在と同程度だが、養殖終了日の早期化が予測された。鳴門海域では、水温上昇と栄養素減少により、従来品種では全長の減少が予測された。藻場生態系とアワビ漁業では、海藻の分布が寒海性から暖海性へ移行する過程で磯焼けが進行し、藻場生態系やアワビ資源量が減少することが予測された。また、底魚資源では、暖水性種の漁場は北方に拡大し、冷水性種の漁場は縮小、深海性種は深場へ移動する傾向が強いと予測された(1.2.4)。

【自然生態系】

- 大雪山地域での高空間解像度の解析により、気候変動に脆弱な高山植生において寒冷地に特化した植生が大きく減少し、より低標高域に分布する植生に置き換わっていくことが予測された(2.4)。

【水資源】

- RCP2.6では渇水基準値を下回る水資源量の累積値に明確な増減傾向がみられなかったが、RCP4.5とRCP8.5では多くの流域で累積値の増加傾向が予測された。地域的な傾向としては、東南北部、関東、近畿、中国の太平洋岸において灌漑期間における水需給バランスが悪化する傾向にあることが確認された(3.2)。

【自然災害・沿岸域】

- 海面上昇による潜在的浸水面積(海岸構造物を無視した標高と海面水位の比較による浸水面積)の予測を行った(RCP2.6、RCP8.5)。浸水面積は、2050年に約2,111-2,127km²、2100年に約2,261-2,598km²と推計された。日本版SSPシナリオに基づく影響人口は、2050年には約445-470万人、2100年には約376-492万人と推計された。さらに、浸水被害額は2050年に約151-181兆円、2100年に243-455兆円と推計された(いずれの金額も将来の物価上昇率を考慮；4.1.2)。
- 三大湾における気候変動シナリオごとの海面上昇と人口推移による影響人口の年変化を推定した結果、多くのシナリオにおいて2050年頃に影響人口がピークを迎え、その後減少傾向となることが示された(4.1.3)。このことは、沿岸域の適応策では、目標時期を2050年頃に設定すべきことを示唆している。

- 2100 年における砂浜面積の将来変化を予測した結果、RCP8.5 では 8 割以上の面積を失う海岸が多くなることが示された。806 の砂浜海岸すべてを対象とした砂浜面積の将来変化の全国平均は、39 の海岸もしくは 66% の砂浜の面積の消失が予測され、海面上昇の砂浜海岸への影響が大きいことがわかった (4.1.4)。

【健康】

- RCP4.5 や RCP8.5 の通りに気候変動が推移した場合には、既に流行確率が高いとされている 7 月や 8 月に加えて、気温上昇により 6 月や 9 月でも Dengue 熱の流行リスクが上昇する。また、気温の影響だけでなく、輸入感染者数（流行国からの渡航者数）の増加も大きく Dengue 熱流行確率の上昇に寄与する (5.2.3)。
- RCP2.6 程度の気温上昇であっても熱中症による救急搬送患者数が今後増加する (5.2.3)。

【国民生活・都市生活】

- 将来の気温上昇は都市の街区内の気温に直接的に影響を及ぼす一方で、市街地形態の変化が人間の快適性や熱関連リスクへの影響を緩和する可能性がある (図 5.2.1)。
- バス営業所に関しては、河川沿いの営業所では水害リスクが顕著であり、山間部の営業所では土砂災害による機能低下が長期間に及ぶ可能性が高い (5.2.2)。
- 鉄道ネットワークにおける水害リスクは、SSP5-8.5 シナリオにおいて 21 世紀末における基準気候と比較して最大で約 1.37 倍に増加する。特に、主要都市間を結ぶ幹線路線や新幹線では、リスクの増加が顕著であり、これらの路線が寸断された場合、広範囲な輸送網に重大な影響を及ぼす (5.2.2)。
- 道路網の水害リスクには橋梁の影響が特に大きく、橋梁を多く含む区間のリスクが高い。また、土砂災害では山間部を通る区間でリスクが顕著であり、特に都市間輸送を担う主要路線でリスクが高い (5.2.2)。
- 気候変動による豪雨の頻発化と激甚化は、斜面崩壊に伴う道路途絶を通じて孤立地域の発生可能性を増大させ、特定地域に深刻な課題をもたらす (5.2.2)。

【社会・経済的効果】

- 水稻、大豆、玉ねぎ等を対象に、統計モデルを用いて 2℃ の気温上昇の影響を検討した。水稻では、高温障害のマイナス影響は、東北や北海道地域では小さいものの、関東以西では大きくなる。低温のマイナス影響の減少によるプラス影響を考慮すると、関東地方、愛知県、九州の一部を除く多くの地域で気温上昇による収量への影響は、プラスに働く地域が多くなる。また、大豆、玉ねぎ等についても、それぞれの収量に関する影響の地域分布を得た。(6.1.1 (1))
- 気温上昇はヒートショックなどに起因する冬の死亡者数を減らす一方、熱中症によって、夏の死亡者数を増やす。分析の結果、冬と夏の気温が低い地域では、冬の死亡率の低下が、夏の死亡率の上昇を上回るため、気温上昇は年間の死亡率を減少させるが、冬と夏の気温が高い地域では、気温の上昇は年間の死亡率を増加させることがわかった。(6.1.2)
- 市町村別の過去の水害とその被害額のデータを用いて分析した結果、降水量が 1.5 倍になると、関東から九州までの広範囲で水害区域面積、水害被害総額が増加し、最大で 5 ～ 8% 程

度増加することがわかった（6.1.1）。

- 被災地で生じた経済影響（直接影響）はサプライチェーンを通じて、被災地外の地域経済に影響（間接影響）を与える。海面上昇による土地消失が大きいと想定される地域においては、直接的なマイナスの影響が顕著であった（佐賀県、愛知県、東京都）。マイナスの間接影響が多く地域に波及する一方、プラスの間接影響が海面上昇の影響が小さい東北地域などで観察された（6.1.3）。
- 直接影響と間接影響を合計した全効果では、西日本でマイナスの経済影響が大きくなる傾向にあり、北海道や東北地方などではプラスの経済影響であった。間接影響はサプライチェーンを通じて全国に広がり正負の効果を及ぼした（6.1.3）。

B.2 適応策に関する研究成果

B.2.1 適応策の効果に関する成果

【総括 Statement】

本研究で開発した最新の影響予測モデルを活用することにより、各分野における適応策の効果を定量的に評価することができた。適応策の効果は地域や温暖化レベルによって異なり、RCP2.6 シナリオでは十分な効果が期待できるが、RCP8.5 シナリオでは効果が不十分になるという予測が多く見られた。また、農業と水資源管理のように密接な関連がある分野間では、相互作用を考慮して適応策を検討することが重要であることが示された。

- 農業分野では、高温耐性品種の導入や播種時期の変更など耕作方法の変更の有効性が示された。また、SSP5-8.5 シナリオ下では熱帯性果樹の適地面積が拡大するため、作物転換による適応策が持続可能な果樹栽培を支える重要な戦略であると考えられた。
- 信濃川流域でのケーススタディでは、高品質米の収量最大化を図るために水稻の移植日を変化させると、栽培期間が変化して水資源の需給バランスが悪化する可能性がある。こうしたトレードオフを考慮した営農計画が重要である。
- 自然災害・沿岸域分野では、海面上昇に対する適応策として、移住策に比べて施設による防護策の費用が小さいことが分かった。外水氾濫に対する適応策については、ピロティ建築の効果が大きく、治水安全度向上や田んぼダムやため池による被害軽減率は相対的に小さかった。いずれの場合も、地域に応じて最適な施策を選択する必要がある。
- 高齢者の熱中症に対して、独居・飲水不可・エアコン不所持の3つ要因について現状の70%解消を実現すると、罹病率が40%程度減少することを示した。
- 農業従事者の高齢化やソーシャルキャピタル（農家同士の助け合い）は、気候変動に対する適応策を実施する能力（適応能力）に影響を及ぼすことを示した。

【農業・林業・水産業】

- 水稻では、気象条件と品種の高温耐性ランクに基づいて白未熟粒の発生割合を推定するモデルを開発し、高温耐性を持つ品種の導入効果を数値的に評価した。2023年の気象条件で高温耐性ランクを“中”から“やや強”に1ランク上げると、全国の推定白未熟粒率は8ポイント低下した（図 Box1.1.2 の右上と右中の差）。これにより、全国の一等米比率は12～13ポイント程度高まると推定された（Box1.1）。

- 大豆では、青立ちの増加を抑制するため、播種時期の遅延や品種の転換が有効であることが示された。秋田県大仙市の事例では、普及品種「リュウホウ」から比較的青立ちの少ない高い「里のほほえみ」に転換することで、1℃あたりの青立ちスコアの増加率を約30%低減できると試算された（1.2.1（2））。
- 果樹では、新たな適応策として作物変更の効果を評価した。高温によりウンシュウミカンの生産が困難になる地域では、アボカドへの転作が適応策として有望であると評価された。特に、SSP5-8.5 シナリオ下では、21 世紀末までにアボカドの適地面積が現在の2.4～7.7 倍に拡大すると推定された。このような作物の転換による適応策は、気候変動の影響を和らげ、持続可能な果樹栽培を支える重要な戦略であると考えられる（1.2.1（3））。

【水資源】

- 適応策として水稻の収量が最大となるように移植時期を選択することにより、太平洋側の流域では水需給バランスが悪化することが予測された。一方、北陸・東北地方の流域ではやや改善する傾向にあることが示された（3.3.1）。

【自然災害・沿岸域】

- 海面上昇による潜在的浸水被害を、構造物により防護するための費用は、2100 年に約 53.4 - 84.5 兆円（いずれの金額も将来の物価上昇率を考慮）と推計された（4.1.2）。
- 東京湾周辺地域を対象にして、海面上昇による潜在的浸水被害を、標高の高い地域への移転によって軽減するシミュレーションを行った結果、影響人口の大半は利用可能な土地が多い千葉県、埼玉県、茨城県、神奈川県に移転することがわかった。全国の移転費用の推計金額は、2030 年では約 90 - 94 兆円、2050 年では約 101 - 117 兆円、2070 年では約 109 - 150 兆円（いずれの金額も将来の物価上昇率を考慮）であった（4.1.2）。
- 防波堤に対する適応費用として、海面上昇量（潮位上昇量）毎に波高の増加が現在より +1m まで増加する場合の、嵩上げとケーソンの滑動を抑えるための腹付け等のための費用を算定した結果、適応費用は 100 万円～200 万円 /m となった（4.1.5、図 4.1.6）。
- 外水氾濫・内水氾濫において、適応策の有無、種類による被害変化率を算定した（4.2.1, 表 4.2.1, 4.2.2）。外水氾濫に対する適応効果（表 4.2.1）では、ピロティ建築の効果が大きかった。とりわけ資産価値の高い地域に設置すると効果が大きかった。一方、治水安全度向上はすでに既存の治水レベルが高く増加分が小さいために軽減率が小さかった。田んぼダムやため池の効果は小さかったが、手取川流域のように田んぼダムが 15% 以上の軽減効果を示す地域もあった。
- 内水氾濫に対する適応効果では、おおよそ外水と同様の傾向を持つが、田んぼダムの効果は極めて小さい。また、都市に多い内水氾濫に対してピロティ建築はさらに有効である。

【健康】

- 独居・飲水不可・エアコン不所持の3つ全てについて現状よりも70%の解消を実現すると、高齢者の熱中症の罹病率は相対的に40%程度減少する（5.3.3）。

【社会・経済的効果】

- ・ 高齢化やソーシャルキャピタル（農家同士の助け合い）は、気候変動に対する適応策を実施する能力（適応能力）に影響を及ぼす。地域の助け合いは、高温障害の影響を小さくすることに役立つ。また、農家の年齢が60歳を超えると、高齢になるほど水稻の高温障害のマイナス影響が大きくなることがわかった。これは高齢化により認知能力や体力が相対的に低くなるため、望ましい適応技術があっても活用できないことによると考えられる。(6.1.1)
- ・ 太陽光発電の設置の多い地域では、気温上昇による、高齢者（65歳以上）の熱中症による死亡者数が低かった。高気温になっても我慢してエアコンを使わず、熱中症でなくなるケースが生じている。パナソニックが2022年に実施した夏のエアコン利用に関する調査によると60歳以上の回答者の60%以上が、エアコンを控える理由として「電気代がかかる」を挙げ、高齢者は若い世代に比べて、より電気代を気にする傾向があることを明らかにしている。また、2011年から2013年にかけて日本で実施された節電キャンペーンにより、高齢者および低所得者の多い都道府県では夏場の死亡リスクが有意に高まったことが報告されている。本研究の分析結果は、これらの調査結果とも符合しており、太陽光発電の設置は、高齢者に電気料金を心配せずに使える環境を作ることができるためと考えられる(6.1.2)。

B.2.2 緩和策や他の社会的課題との関係に関する成果

【総括 Statement】

気候変動対策では、適応策と緩和策が相乗的な効果を発揮することが重要である。また、気候変動の影響は人口減少・高齢化といった社会の変化と併進するため、適応策はこうした社会的変化に対する各種政策と密接な関係がある。本研究では、分野ごとに他の取り組みとのシナジーやトレードオフについても検討した。

- ・ 緩和策との関係：非常に高い排出シナリオ（SSP5-8.5/RCP8.5）では、多くの分野で適応策のみで影響を抑制することが難しく、気温上昇を1.5℃あるいは2℃以下に抑える緩和策が必要である。高排出シナリオと低排出シナリオによる顕著な影響の差が特定された事項は、水稻の白未熟粒率の増加による品質低下、ウンシュウミカンの不適地拡大、泌乳牛や肥育後期豚の生産性低下、藻場生態系の機能喪失、海面上昇による潜在的浸水被害、外水・内水氾濫による被害、熱中症などほとんどの分野にわたる。
- ・ 適応の限界：環境に対する適応幅の小さい分野では、現在の対策技術だけでは対応が困難になり、適応の限界に達するものが現れる可能性がある。たとえば、現在のウンシュウミカンの適地は、高排出シナリオ（SSP5-8.5）において今世紀末に生産が難しくなる地域が大幅に拡大すると予測された。こうした品目では、適地が大幅に拡大する亜熱帯果樹（アボカド等）への転換といった変革的な適応策が求められる。
- ・ 適応策と緩和策のシナジー（相乗効果）：適応策の中には気候変動の緩和に効果があるものもある。例えば洪水被害への適応策であるため池や河道の植生伐採は、水力発電やバイオ発電によるクリーンエネルギーとして緩和にも貢献できる。また、建築物の長寿命化も都市インフラ分野における緩和効果の例である。
- ・ 社会的課題との関係：人口減少や高齢化、インフラの老朽化は、気候変動影響に対する脆弱性の要素だけではなく、適応策を実施する際の障壁となりうる。例えば林業では、限界自治

体の増加と財政問題やインフラの老朽化が進行する中、人工林へのアクセスが困難になる可能性がある。これらの人工林は高標高・低気温地域に位置しているため、気候変動対策に加え、少子高齢化への対応策として、人工林の適正配置を進めることが重要であることが示唆された。

- 他の基本計画等への組み込み：気候変動への対応と日本が直面する社会的課題の解決を両立させるには、統合的アプローチが重要であり、適応策を自治体の総合計画や環境基本計画の中に組み込み、温暖化対策計画と密接に連携させることが重要である。

【農業・林業・水産業】

- 水稻では、気象条件と品種の高温耐性ランクに基づいて白未熟粒の発生割合を推定するモデルを開発し、高温耐性を持つ品種の導入効果を数値的に評価した。その結果、耐性を2ランク向上させることで、産業革命前からの気温上昇が2℃に達する場合でも高品質米の生産量を維持できる可能性が示されたが、2℃以上の気温上昇では、高品質米の収量維持は困難であることから、気候変動緩和策を同時に進めることが極めて重要である（1.2.1（1））。
- ウンシュウミカンの適地維持には、特に非常に高い排出シナリオ（SSP5-8.5）において、今世紀末に適地が高温となり、生産が難しくなる地域が大幅に拡大することが示された。これに対して、低い排出シナリオ（SSP1-2.6）では適地の変化は少なく、気候変動緩和のための温室効果ガス排出削減が重要であることが強調された。したがって、ウンシュウミカンの適地維持には、大幅な気候変動緩和策が強く求められる（1.2.1（3））。
- 畜産は、特に暑熱の影響が顕著である泌乳牛については、わずかな気温上昇でも生産性の低下が大きい。すなわち、強い緩和策がなければ、生産性の損失を食い止めることが難しいことが示唆される（1.2.2）
- 林業では、少子高齢化が進む中で、限界自治体の増加とそれに伴う財政問題やインフラの老朽化が進行する中、人工林へのアクセスが困難になる可能性がある。本プロジェクトでは、2050年における限界自治体内のスギ・ヒノキ人工林の分布を推定した結果、全国の40%、九州では27%が該当し、これらの人工林は高標高・低気温地域に位置していることがわかった。したがって、気候変動対策に加え、少子高齢化への適応策として、人工林の適正配置を進めることが重要であることが示唆された（1.2.3）。

【水資源】

- 信濃川流域では、高温障害への適応策として移植日の変化を継続した場合、コメの総収量と高品質米の収量、水需給バランスの間にトレードオフが存在する。3者を含む評価モデルによって、高品質米の収量を重視すると水需給バランスが悪化することが示された（3.3.2）。

【自然災害・沿岸域】

- 緩和策実施（SSP5-8.5とSSP1-2.6の比較）により、2100年の海面上昇による潜在的浸水被害額は約455兆円から212兆円減少し、防護による適用費用は84.5兆円から31.1兆円減少することが予測された（いずれの金額も将来の物価上昇率を考慮；4.1.2）。効率的な適応のためにも緩和策実施が重要であると示唆された。
- 外水・内水氾濫被害に対する緩和策の効果は土地利用規制と同程度である。しかし緩和策は

洪水対策だけでなく、様々な影響を軽減できるため、費用対効果が最も良い対策と考えられる（4.2.1）。

- ため池の活用や河道の植生伐採は洪水被害への適応策であるが、それぞれが水力発電とバイオ発電によるクリーンエネルギーとして緩和策にも貢献できる。対象地域によっては効果の大きい場合がある（4.2.3）。

【国民生活・都市生活】

- 建築物の寿命延長によって建て替え頻度が低下することで、2100 年における新規資材投入量、CO₂ 排出量はいずれも 5 割程度削減される（図 5.3.4）
- 長寿命化シナリオにおける CO₂ 排出量は初期には現状維持シナリオより約 5% 多くなるものの、2058 年を境に逆転することから滞留年数の延長による長期的な緩和効果がある（図 5.3.4（b））

【適応策】

- 人口減少や高齢化、インフラの老朽化は、気候変動影響に対する脆弱性を増大させる。気候変動への対応と日本が直面する人口減少・高齢化をはじめとする社会的課題の解決を両立させるには、統合的アプローチが重要であり、適応策を自治体の総合計画や環境基本計画の中に組み込み、温暖化対策計画と密接に連携させることが重要である。（9.2）

B.2.3 適応策の検討・実施に資する成果

【総括 Statement】

2018 年 12 月に気候変動適応法が施行されて以降、政府の気候変動適応計画や地方自治体による地域気候変動適応計画の策定によって、政府、地方自治体、事業者など各レベルで適応の取り組みが進んできた。

- 2024 年 11 月時点で、すべての都道府県および政令市を含む 369 の地方公共団体で適応計画が策定され、「地域気候変動適応センター」（LCCAC）は 65 か所設立されている。一方、人的資源や資金を含むリソースの不足や専門知識の不足といった共通の課題がある。
- 政府、自治体、事業者の適応策では、気候変動影響の違いや適応の限界との関係、対策の実績・経験、各分野の将来展望などによって、分野ごとに施策カテゴリーの分布が異なっている。
- 適応策の検討・実施における基本的な視点は、地域ごとの気候条件や産業の特性、地域の課題に応じた適応策を計画することである。農林水産業は地域の自然環境や生態系と密接な関係を持っている。また、沿岸域・自然災害や都市生活・都市インフラの分野においても、全国一律の計画ではなく、地域の自然的・社会的条件に応じた計画の重要性が指摘されている。そのためには、広い関連分野における対策の実績や蓄積を踏まえて、各分野と協力し、地域の将来像を共有して適応策を推進することが重要になる。
- 現状では変革的適応策オプションは少ないが、今後、影響が一層激化する分野では変革的適応策が必要になるであろう。

【農業・林業・水産業】

- 林業分野では、多面的な指標を用いた気候変動適応策の評価手法が提案された。具体的には、

炭素蓄積、土砂災害リスク、生物多様性保全などの複数の生態系サービスを統合的に評価する手法を開発し、適応技術の効果をトレードオフも考慮しながら多面的に評価することが可能となった。その結果、南日本ではスギの伐採と再植林を強化することで炭素吸収量を確保しつつ、広葉樹種の生息域も提供できる一方、北日本では伐採率や再植林率を低く抑える管理が有効であることが示され、地域ごとの気候条件や森林構造に応じた適切な管理方法の選択が重要であることがわかった（1.3）。

- 水産業では、水温上昇に伴う藻場構成種の変化による生態系機能の損失がアワビ資源量の低下につながることを予測された。一方、アワビの種苗放流は、アラメなどの藻場生態系の維持を通じて生態系サービスの向上をもたらす可能性も示唆された（1.2.4）。

【自然生態系】

- 海洋生態系に対する気候変動影響の認知と共に適応策の検討が進められている自治体が増えているが、認識の程度は自治体により大きく異なり、気候変動に対し脆弱な地域の周知や適応策実施の積極的な推進が必要と考えられる（2.5）。

【水資源】

- 気候変動に対する適応策を策定する場合、ある側面だけに着目して適応策を実施するのではなく、地域における影響を総合的に考慮し、さらに施策の競合を避けるような対策が必要となる。信濃川流域で示された事例は、水稻の品質のみを重視して適応策（水稻移植日の晩期化）を進めた場合、水需給バランスに悪影響が出ること、また一方で、水需給バランスのみを考慮して農業の水利用時期を設定した場合、農業者の収益が損なわれる可能性があることを示唆している（3.4）。

【自然災害・沿岸域】

- 日本全国を対象に、海面上昇による浸水被害の適応として、防護のみを行う場合と移転のみを行う場合のそれぞれの適応効果と総費用を推計した結果、全国総額では移転費用は防護費用よりも高額であることが示された。ただし、人口密度が高い地域では防護、人口密度が低い地域では移転を行うと費用が小さくなると考えられる。両者を組み合わせた場合の適応費用は今後の研究課題である（4.1.2）。

【健康】

- 蚊が媒介する感染症リスクを低減するには、蚊を直接駆除することよりも、蚊に刺されない努力にコストをかける方が効率が良い（5.3.3）。

【国民生活・都市生活、健康】

- 都市計画分野における適応施策は、「計画・方針」、「規制」、「誘導」、「事業」、「実態把握」に区分することができる（図 5.3.1）。

【適応策】

- 2018 年 12 月に施行された気候変動適応法では、地方公共団体による地域気候変動適応計画

の策定に努めることとしており、2024年11月時点で、すべての都道府県および政令市を含む369の地方公共団体で適応計画が策定されている。(8章)

- 地域における適応推進の拠点である「地域気候変動適応センター」(LCCAC)は、2024年11月現在全国で65か所設立されており、推進体制の整備が進んでいる。設置されたLCCACの体制や経験等にはばらつきがあり、課題も異なる。アンケート調査の結果、人的資源や資金を含みソースの不足が共通していた他、“専門知識の不足”や“身近に専門家がない”という回答も多かった。今後、より専門性の高い人材育成が必要である。(8.2)
- 政府、地域・自治体、事業者が計画・提案している適応策オプションには、分野ごとに特徴的な傾向がある。土地利用、施設整備、技術、制度、経済、社会などの施策カテゴリーの分布は分野毎に異なるが、この違いは、気候変動影響の違いや適応の限界との関係、対策の実績・経験の程度、各分野の将来目標などが重なった結果である。(7.3)

B.3 気候変動適応策の推進に向けた提言

(1) 気候変動適応策の推進について

1) 地球温暖化と気候変動の進行によって、多くの分野で著しい影響が現われつつある。これらは国民生活に直接影響を与えており、現在進行形の影響被害に対する適応策が急務になっている。2018年の気候変動適応法施行によって国や地方自治体を中心に適応策の策定・実施が進んだが、それを超えて影響が拡大しており適応策の強化が必要である。

2) 本プロジェクトでは、幅広い分野を対象にして定量的評価を含めた影響予測を行った。こうした予測結果を気候変動適応計画や関連する施策の中に活かすことが期待される。

また、各分野に特有なリスクや留意点も明らかになった。例えば、健康分野では、デング熱の流行対策において輸入感染者数(流行国からの渡航者数)の増加を考慮する必要性や、子供の熱中症予防に向けた屋外・体育館での運動の自粛が保健体育の授業の大幅な中止につながる危惧などの指摘がある。さらに、交通システムでは、バス営業所や幹線路線や新幹線、橋梁の多い道路、山間部道路などの脆弱性を指摘した。

3) 適応策には、土地利用や施設による対策、技術的対策、制度や社会的、経済的対策など多様なオプションがあり、ハード・ソフトを含めた対策を総合的に検討すべきである。また、もっとも効果的な適応を図るために、複数の適応策オプションをいかに組み合わせるかを検討することが必要である。さらに、都市計画や長寿命の施設計画などを含めた、長期的視点での適応計画も重要である。例えば、気候変動適応に向けたまちづくりを推進するために地区単位の計画的な建物更新を考慮するアプローチや、ハザードエリアへの人口流入の制限や建築物のエリア外への移転誘導など、長期的な視点での対策が必要である。短期、中期、長期の視点に立った見通しのよい適応計画によって、レジリエントで持続可能な地域社会の構築に向けた展望を示すことが期待される。

4) 適応策の推進のための方策では、行政的・制度的な推進体制と社会的認知の向上といった社会全体での取り組みが重要である。これらに関連して本研究で明らかにした事項には以下のよう

なものが含まれる。

- 小規模な地方公共団体や人口の少ない市区町村では、地域気候変動適応計画の策定が予算や人材不足により進んでいない。また、地域気候変動適応センターも専門知識不足やリソース不足といった課題に直面している。これらの障壁を克服するためには、国や都道府県等による策定支援の強化や専門性の高い人材の育成、さらに財政面での支援が必要である。
- 農業における若年齢化や後継者問題の解決や、地域において農家同士が協力できる体制（ソーシャルキャピタル）を構築することは、適応策の実施のために重要な役割を果たすと考えられる。
- 水害に対する企業の対策では、適応能力の小さい小規模事業所を対象にした適応策導入支援策が重要となる。また、水害経験を有する地域ほど被害が小さくなる傾向にあるため、被害経験に基づく事業継続や災害対策などを含む認証制度の設立が望まれる。
- 気候変動の影響は、サプライチェーンを通じて直接影響を受けた地域以外の地域にも伝播する。このため、気候変動の地域影響を評価する際に、サプライチェーンの影響も考慮する必要がある。

5) 現状では、これまでの分野ごとの施策を強化する漸進的適応策オプションが多く、抜本的な転換を図る変革的適応策オプションは少ない。今後、影響が一層激化する分野では変革的適応策が必要になるであろう。新作物の開拓や持続的な地域産業の強化を含む変革的適応策は、人口減少・高齢化に直面する日本の地域活性化にとっても重要な視点である。

(2) 適応策による地域活性化の推進

1) 気候変動の影響の特徴は、地域ごとに異なる点である。また、影響を受ける地域は、それぞれ固有の地理的、環境的、社会経済的条件を持っているため、地域の適応策は、こうした地域特性を十分踏まえたものでなければならない。また、適応計画は、それぞれの地域の総合計画や環境基本計画と密接に関連しており、地域の将来像実現をめざすこれらの取り組みの中に位置づける必要がある。

農林水産業分野においては、これに関連して以下のような点が提示されている。

- 農林水産業においては、広域的で科学的な視点を持ちながら、地域特性に合った適応策を推進することが重要である。また、生産性だけでなく、気候変動緩和、災害リスク軽減、生物多様性保全などを考慮した持続可能な基盤を構築することで、気候変動の影響に対応しつつ、地域社会の活性化と気候変動抑制を両立させる必要がある。
- 農業に依拠する小規模の脆弱自治体は QoL の面からも脆弱性が高く気候変動の影響を強く受けやすいことから、適応への取り組みが特に重要となる。
- 農業生産・水資源の両面を考慮して持続的な社会を構築するために、ハード・ソフトの様々な適応策を組み合わせた農業シナリオの構築が求められる。

2) 広域的で科学的な適応策の推進も重要である。そのために、市町村を越えた広域的な影響の把握、適応策効果の評価を長期的に実施することが望まれる。具体的には、産地の移動、新たな作物や漁法の導入、水産資源の変化への対応など、地方自治体間の連携が必要になる。

3) 適応策の大きな目標は社会のレジリエンスの構築である。IPCC 第6次報告書が示した「気候にレジリエントな開発 (CRD)」は、気候変動対策の緩和策と適応策を持続可能な社会の構築に向けた取り組みの一環として行うというものである。適応策と地域活性化を統合した取り組みをCRDとして位置づけ、気候にレジリエントで持続可能な地域社会に向けたビジョンを検討することが望ましい。

(3) 緩和策の重要性

1) 本プロジェクトで実施した影響予測では、温室効果ガスの排出が低いシナリオ (SSP1-2.6/RCP2.6) に比べて、非常に高い排出シナリオ (SSP5-8.5/RCP8.5) の方が、相当大きな影響をもたらすというが得られた。RCP2.6シナリオでは十分な適応策の効果が期待できるが、RCP8.5シナリオでは効果が不十分になるという予測が多く見られた。そのため、全ての分野で、緩和策による気候変動の抑制が極めて重要という認識が示されている。例えば、自然災害・沿岸域分野では、異なる排出シナリオ (温暖化レベル) を用いて被害 (浸水・氾濫面積、被害額) を算定し緩和の程度による影響の違いを評価した結果、効果的な適応策の実施には緩和策による気候変動の抑制が極めて重要であることを示した。

また、温暖化が大きく進めば、適応策では影響を抑えきれない適応の限界に達する恐れがある。そのため、2050年カーボンニュートラルをめざす緩和策を確実に進めながら、同時に出現する影響に対しては適応策で対処するという気候変動対策の基本的枠組みの重要性が再確認された。この認識を土台にして、政策的、社会的取り組みを進める必要がある。

2) 適応策と緩和策の間には、シナジー (コ・ベネフィット) とトレードオフの関係があるものがある。例えば、河川の洪水対策ではため池の発電利用や河道から伐採された樹木のバイオ発電利用といったシナジーの検討も行われた。適応策と緩和策の間のシナジーとトレードオフに関する具体的な研究は今後重要になる課題である。

(4) 科学的成果の活用とモニタリング・調査・研究の推進

1) 気候変動はすでに深刻な影響を及ぼしているが、将来さらなる影響の激化が予想される。そのため、影響に関する観測・モニタリングを行いながら、その結果を機動的に政策に活用するといったサイクルが期待される。例えば、持続可能な農林水産業の実現に向けて科学的知見を活用するためには、環境変化をリアルタイムで把握するモニタリング体制をさらに整え、その結果を農林水産業の政策に反映させる必要がある。適応策の実施状況を科学的に評価し、効果を検証する仕組みを構築するとともに、災害リスクの軽減と生物多様性の保全を両立させる取り組みを進めるべきである。

2) 本研究で進めた影響予測手法の開発には、従来開発されてきたプロセスモデルの高度化や統計的手法など新手法の開発の両方が含まれる。本プロジェクトでは、これらの影響予測モデルを用いて緩和策と適応策の効果を評価できることを示した。様々な研究で開発されてきたこうした予測手法やモデル及びそれらによる予測結果を、政府や自治体、企業などが活用できる仕組みの構築が重要である。ユーザー自身がモデルを使えるようにすると同時に、国立環境研究所のA-PLATのような成果活用のプラットフォームを強化する必要がある。S-18の詳細な成果も今後

A-PLAT 上で公開する予定であるが、研究コミュニティと適応策の策定・実行の現場をいかにつなぐかは、今後一層重要になる課題である。

3) 本プロジェクトでは、気候変動と社会変化の相乗的影響を評価するため、日本版 SSP に沿った社会経済シナリオの開発を行った。その成果は、例えば、沿岸域における適応策の目標時期の特定や河川氾濫の被害の評価など重要な結果に結びついた。しかし、開発した社会経済シナリオは、まだ日本の長期的な社会経済変化に関する網羅的シナリオには到達していない。網羅的な社会経済シナリオは、日本の地域社会の将来像を考える上で基本的な重要性を持つものであり、今後も研究開発を行うべき課題である。

4) 地球温暖化と気候変動への対応は、今後も社会が取り組むべき重要な課題である。ダイナミックに変動する気象現象とその影響に対処するには、基礎となる観測・モニタリング、将来予測研究、緩和策と適応策に関する技術対策などを継続する必要がある。特に、影響・脆弱性・適応策の分野で、影響予測モデルを対策の評価に結びつけること、空間的な解像度をさらに高めて、地域計画、都市計画などに活かせるものにすることなどが課題である。また、急速に進展する AI の活用なども重要になる。今後も、こうした研究の継続が必要である。また、研究と技術開発の面で、国際的な連携・協力を図る必要も高い。

気候変動に関する科学的な知見が、レジリエントで持続可能な日本社会の構築に向けて活かされるように、今後も研究コミュニティと社会の連携を一層強めていく必要がある。

【 本 編 】

第 1 部 分野毎の影響予測と適応評価

1. 農林水産業

1.1 観測された影響

1.1.1 農業

近年の温暖化に伴う農業品目における高温障害の実態を明らかにするために、農林水産省が毎年公表している地球温暖化適応策関係レポート (<https://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/ondanka/report.html>) から 2012 ～ 2021 年の都道府県別の農業の影響を集計した。その結果、高温障害は、穀物類、豆類、野菜、畜産物などの影響が既に広範囲に及んでおり、多くの品目で過去 10 年間に増加していることが確認された (Hasegawa et al., 2025) (表 1.1.1)。

水稻では、夏季の高温により、米粒が白く濁る白未熟粒が増加する高温障害が頻発し、高温年には、外観品質や一等米比率の顕著な低下が報告されている (Box1.1)。水稻の白未熟粒の発生は、登熟期 (出穂期または穂揃いから約 20 日後) のデンプンの異常蓄積に起因し、被害を報告した県数は過去 10 年間で増加傾向にある (表 1.1.1)。白未熟粒率は、米粒が盛んに成長する期間 (稲穂が出てから約 20 日間) の温度に影響され、このときの日平均気温が約 26℃を超えると、白未熟粒率が増えることがわかっている。そこで、白未熟粒が発生する温度の指標として、稲穂が出てから 20 日間について、毎日の日平均気温が 26℃を超えた温度を積算した値を用いて、2000 年頃からの水稻の高温曝露の傾向を調査した (図 1.1.1)。なお、ここでは積算した値を 20 日で割ることで、1 日あたりの平均超過温度 (MET26) として表した。全国平均の MET26 指数はこの期間に著しく上昇したが、上昇率と全体の MET26 レベルには地域差があった (図 1.1.1a)。特に関東、北陸、近畿で指数が高い。MET26 は、全国の一等米と高い負の相関があり、2011 ～ 2023 年については、MET26 が 1℃上昇すると、1 等米比率は 15 ポイント低下することがわかった (図 1.1.1b、Box1.1 参照)。

表 1.1.1 日本の農作物および家畜の高温障害を報告した都道府県数 (Hasegawa et al., 2025)

農林水産省「地球温暖化適応策関係レポート」から 2012 年から 2021 年までの 10 年間を 5 年ごとに 2 分割してまとめたもの。数値は、障害を報告した都道府県の平均数を示し、各期間の報告都道府県数の最大値と最小値を括弧内に示す。

作目	障害の種類	気候的要因	影響	高温障害を報告した都道府県数			
				2012-2016		2017-2021	
				5 年平均	(最大— 最小)	5 年平均	(最大— 最小)
水稻	白未熟粒	登熟期の高温	外観品質・販売 価格の低下	24.0	(17-29)	30.8	(23-36)
麦類	晩霜害	暖冬による生育 段階の前進	品質・収量低下	3.0	(2-4)	3.8	(1-6)
豆類	青立ち	生殖成長期の高 温・乾燥	品質・収量低下	3.6	(1-8)	2.4	(1-5)
ブドウ	着色不良	夏季高温	品質・収量低下	12.8	(6-18)	21.4	(20-25)
リンゴ	着色不良	着色・収穫期の 高温	品質低下	7.0	(4-11)	7.8	(6-10)
	日焼け	果実肥大期の高 温	品質・収量低下	6.2	(6-7)	6.0	(5-7)
ウンシュウ ミカン	浮き皮	果実肥大期の高 温・土壌加湿	品質・貯蔵性低 下	8.8	(5-14)	10.8	(9-13)
	日焼け			4.4	(2-6)	7.6	(5-11)
ナシ	発芽不良	休眠・発芽期の 高温	収量・品質低下	5.2	(2-8)	6.8	(4-10)
トマト	結果不良	生育期間の高温	収量・品質低下	19.0	(13-27)	14.8	(12-17)
イチゴ	花芽分化遅延	花芽分化期の高 温	収穫期の遅れ、 品質・収量の低 下	10.4	(6-15)	9.8	(3-15)
ハウレンソ ウ	生育不良	夏季作型の高温	収量・品質の低 下	5.8	(4-7)	6.4	(4-8)
タマネギ	生育不良(葉 先枯含)	生育期間中の高 温	収量・品質の低 下	11.2	(8-14)	9.8	(8-12)
キク	発育前進ある いは遅延	生育期間中の高 温	適期出荷の機会 喪失・価格低下	11.8	(7-14)	18.8	(17-23)
泌乳牛	乳量低下	夏季高温	生産性低下	15.2	(13-18)	16.0	(14-19)
	へい死			10.2	(6-14)	14.4	(12-17)
	繁殖率低下			10.8	(9-16)	9.0	(7-11)
肉牛	成長量低下	夏季高温	生産性低下	10.2	(8-14)	7.8	(7-8)
	へい死			6.2	(4-8)	10.2	(9-12)
	繁殖率低下			4.8	(4-6)	4.4	(3-6)
養豚	成長量低下	夏季高温	生産低下	7.6	(5-10)	7.4	(5-9)
	へい死	夏季高温多湿		6.2	(5-10)	9.8	(9-12)
	繁殖率低下	夏季高温		9.2	(8-11)	7.4	(5-9)
採卵鶏	産卵率低下	夏季高温多湿	生産性低下	11.8	10-14	10.0	(9-11)
	へい死	夏季高温		10.8	(9-12)	14.4	(13-17)
肉用鶏	成長量低下	夏季高温多湿	生産性低下	9.0	(6-10)	3.6	(3-5)
	へい死	夏季高温		8.4	(5-11)	11.8	(10-14)

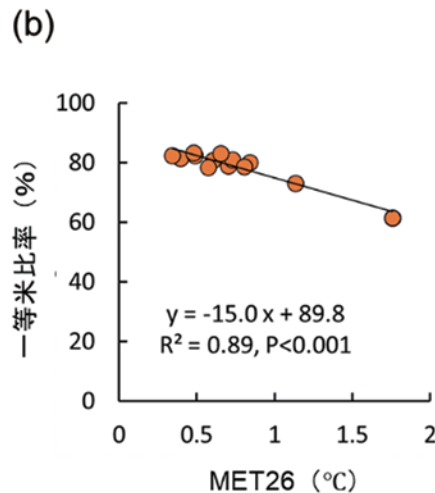
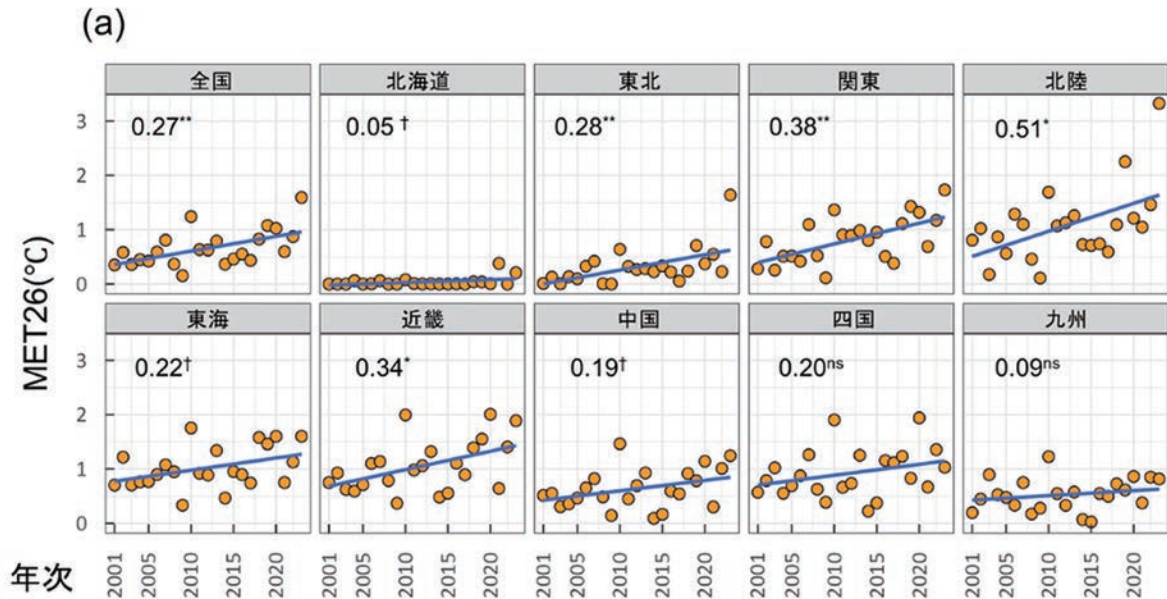


図 1.1.1 2001～2023 年の水稻高温登熟指標 MET26 の推移 (a) と全国の一等米比率との関係 (b) (Hasegawa et al., 2025)

(a) の図中の値は、回帰傾き (10 年あたり℃)。**、*、†は、それぞれ $P < 0.01$ 、 $P < 0.05$ 、 $P < 0.1$ で統計的に有意であることを示し、n.s. は有意でないことを示す。高知、徳島、鹿児島、宮崎は普通期。沖縄は出穂期のデータが揃わず集計に含めず。(b) は 2011 年から 2023 年までのデータから作成。

麦類や大豆などの畑作物は、高温だけでなく降雨量の増減が複合的に影響するため、温暖化の影響を特定するのが難しい場合が多い。麦類では暖冬で生育が早まり、穂の発育に重要な時期に霜害を受ける被害が報告されている。また、大豆では高温や乾燥による青立ち（収穫期に莢が熟しても茎葉が青く残り、収穫作業の効率低下や汚損粒による収量や品質の低下を引き起こす現象）の被害が挙げられる。本プロジェクトでは、室内の温度制御実験により、大豆の青立ちが登熟期後半の高温で増加することを確認した (Yamazaki and Kawasaki, 2023)。さらに、全国 4 地点 (秋田県大仙市、茨城県つくばみらい市、香川県善通寺市、熊本県合志市) で 2008 年から 2023 年の育種試験データを基に、機械学習モデルを用いて生育時期別の気温と土壤水分から青立ち程度 (0～5、数字が大きいほど青立ちが顕著) を解析した結果、登熟期後半にあたる開花後 51～60 日

目の平均気温が青立ち発生に大きく関与することが分かった（熊谷・山崎，2025）。

ブドウ、リンゴ、ウンシュウミカンなどの主要果樹は、ほぼすべての産地で夏の気温上昇の影響を受けている（表 1.1.1）。これらの果樹では、夏季の高温が原因で果皮の着色が悪くなったり、日焼けが多発したりする被害が報告されている。過去 10 年では、特にブドウの着色不良を報告する県が増加している（表 1.1.1）。また、温暖化がリンゴの品質特性に与える影響を定量化するために、環境制御室や屋外での長期栽培試験結果を解析したところ、酸度や果皮の色が低下すること、さらに蜜入りが減少することを確認し、これらの品質特性を予測するモデルを構築した（Sugiura et al., 2023）。また、温暖化に伴う開花時期の変化も品質に大きく影響するため、リンゴの内生休眠と外生休眠の温度反応を考慮し、広域に適用可能な開花期予測モデルを開発した（Sugiura et al., 2024b）。

野菜や花きにも高温障害が広く報告されており、特にキク栽培では開花時期が計画から外れることを報告する県が増えている（表 1.1.1）。これにより、適期出荷が難しくなり、価格変動の要因になっている。

近年の気候変動の影響は、主要な家畜種全体にも現れている（表 1.1.1）。乳牛は特に被害を受けやすく、乳量の減少、繁殖率の低下、熱ストレスによるへい死が報告されている。主要な畜種を平均すると、家畜のへい死を報告している都道府県数は、2012 年から 2016 年の期間から 2017 年から 2021 年にかけて 50% 近く増加しており、近年の影響の広がりや深刻化を表している（表 1.1.1）。

1.1.2 水産業

気候変動に伴う水温上昇によって水産生物の分布が北偏化している。特に近年の東北地方太平洋沿岸域では黒潮の大蛇行も重なり南方系の魚の漁獲量の急増が観察されている（木所ら，2024；寛・成松，2024）。そのため、これら急増した漁業資源の有効利用と消費拡大が水産分野における気候変動への適応策の 1 つとして重要となっている（寛・成松，2024）。既に、日本海におけるサワラや、北海道におけるブリなどでそれらの取り組みが進められており、日本における気候変動による漁業資源への適応の代表的な事例となっている（木所，2024）。

調査船調査で採集された漁獲対象以外の深海性魚類について、その分布変化を調査した結果、底層域の水温上昇に伴い、北方向への移動に伴う分布密度の変化を確認した（Takeuchi et al., 2021）。さらに、これまで日本周辺域ではデータとして示すことが困難であった深海性魚類の分布域が、より深い水深に移動していることも明らかになった（Takeuchi et al., 2021）。

漁業資源の分布域および漁場の変化は、気候変動による水温上昇の影響に加えて、海域特性や資源量変動とも関連している。本プロジェクトでは、日本海南西部の底曳き網漁業の主対象種について、時空間的な相関や魚種間の関係性を考慮した統計モデル（複数種 VAST モデル）を適用して、各魚種の局所密度、分布重心、分布面積指標等を推定した。その結果、ハタハタのように主分布が長期的に対象海域北東へ偏る傾向が明瞭にみられる魚種がある一方、日本海固有水に分布するカレイ類では大きな分布域の変化が認められなかった（図 1.1.2）。また、分布域の北偏化とは反対に、アカムツ（＝ノドグロ）では資源量増加によって分布域が拡大し、漁場の中心が南西方向に拡大する状況も明らかとなった（Kawauchi et al., 2023）。

これまでも水産資源は小型浮魚類を中心に大きな資源変動や分布海域の変化が起きており、日本の水産業はその変化に対応してきた。例えば、スルメイカは数十年周期の海洋環境の変化と共

に資源が大きく変化する特性があり、1970～1980年代と2010年代半ば以降に資源が大きく低下した。これらの資源の低下に対し、1970～1980年代は海外の新たなイカ類資源開発で対応したものの、2010年代以降においては水産物をめぐる国際情勢の変化によって同様の対応が困難となり、原料の輸入によって対応することで水産加工業の空洞化をもたらす要因にもなった（木所，2024）。

このように、本解析によって、近年の顕著な水温上昇に伴う東北地方を中心とする水産資源の分布域・漁場の変化を明らかにした他、水温上昇に伴う北偏化以外の複雑な応答事例も示すことが出来た。このことは、気候変動による漁業資源の応答特性は海域によって異なり、様々な要因を含めた予測が重要となることを示している。また、これらの変化への適応として、増えた魚の有効利用が想定されるものの、それらの効果的な推進には消費者の協力も不可欠であることを指摘した。さらに、気候変動に対応する水産業の適応策として、国内需要の促進に加え、水産物を取り巻く国際情勢の変化も含めた対策が必要であることが、過去の資源変化への適応事例からも示された。

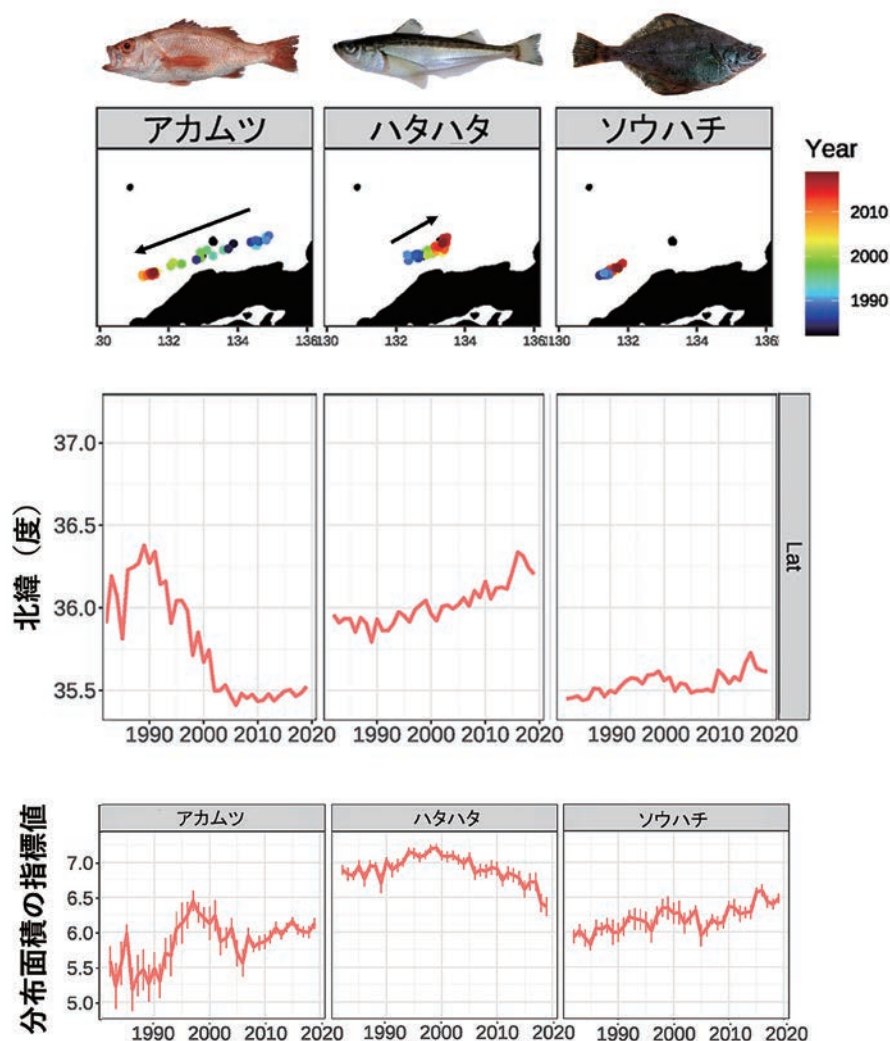


図 1.1.2 日本海南西部におけるアカムツ、ハタハタ、ソウハチの分布重心と分布面積指標の変化。Kawauchi et al., (2023) から作成。 上図：重心位置、中図：重心の緯度、下図：分布面積の指標値。代表的な変化パターンの 3 魚種を示した。

1.2 将来予測と適応の効果

1.2.1 農業

第1章では、作物の生育、収量、各種障害に及ぼす気候要因を、主に影響のプロセスを表したモデルで定量化する方法を用いて、気候シナリオに基づき、将来の収量、品質、高温障害の発生リスクや適応技術の定量的評価を行った¹。

(1) 水稻

水稻については、1990年代後半から全国規模で影響評価が進められ、気候シナリオの更新や作物影響評価モデルの改良に伴い、新たな結果が報告されてきた。このプロジェクトでは、過去に実施された屋外栽培実験「開放系大気CO₂増加（FACE）実験」で得られた高温と高CO₂濃度が水稻に与える複合的な影響の知見を取り入れ、水稻の生育収量予測モデルを改良した(Ishigooka et al., 2021)。このモデルを用いて日本全体の水稻収量を予測した結果、従来の予測と比べて収量が低く算定され、特にRCP8.5シナリオでは年代が進むにつれて差が拡大し、今世紀末には約20%の減収が予測された(図1.2.1)。さらに、白未熟粒率の予測では、高CO₂の影響を考慮した新たな推定モデルを用いた結果、従来よりも高い値が算定され、RCP8.5では今世紀半ばで約20%、今世紀末には約40%に達すると予測された(図1.2.1)。また、今世紀半ばの影響の分布については、新モデルでは、北日本や高緯度地域でみられる増収が予測される地域が縮小するとともに、白未熟の発生については東日本以西だけでなく、北日本にも広がるものと推定された(図1.2.2)。

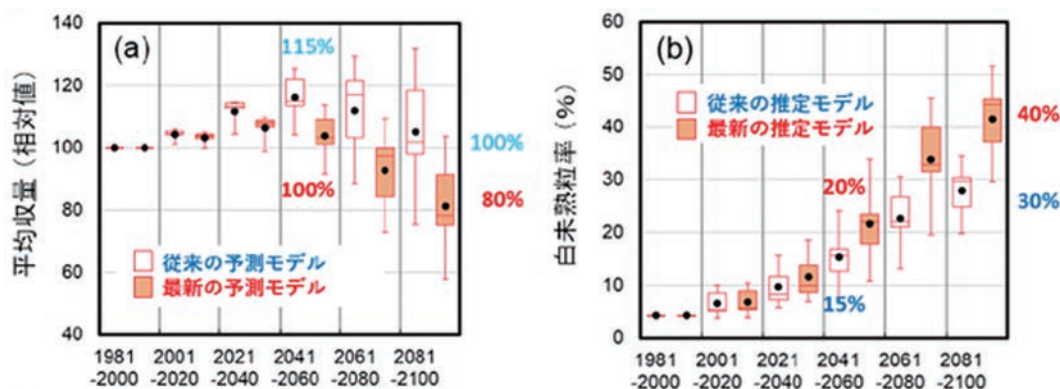
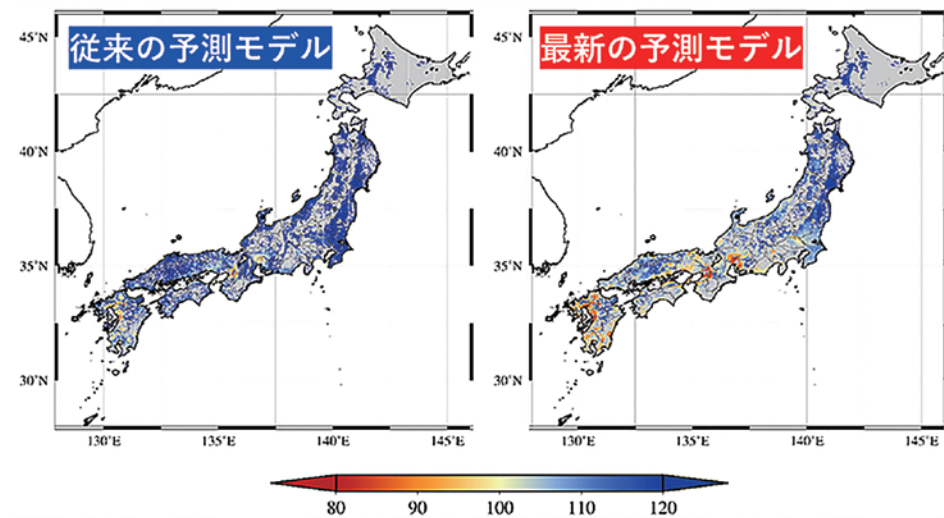


図1.2.1 従来および新たなモデルによる水稻の収量 (a) および白未熟粒率 (b) の20年毎の推移(全国平均)(RCP8.5)(Ishigooka et al., 2021)

2000年頃から育成が進んでいる高温耐性品種の導入は、高温でも白未熟粒の発生が少なく、温暖化への有効な適応技術と期待されている。水稻品種の高温耐性は、高温条件での白未熟粒の発生程度により5ランクに分類される。しかし、これまで、気象条件の変化に応じて高温耐性ラン

¹ なお、第6章では、経済評価を目的に、過去の市町村別の収量データと気象要因および社会 経済的要因から統計モデルを構築し、現在から気温が2℃上昇した際の影響を経済 的観点から分析している。これにより、目的に応じた異なる視点からの評価を提示した。

(a) 今世紀半ば（2041-2060年）のコメ相対収量（1981-2000年に対する%）



(b) 今世紀半ば（2041-2060年）の推定白未熟粒率（%）

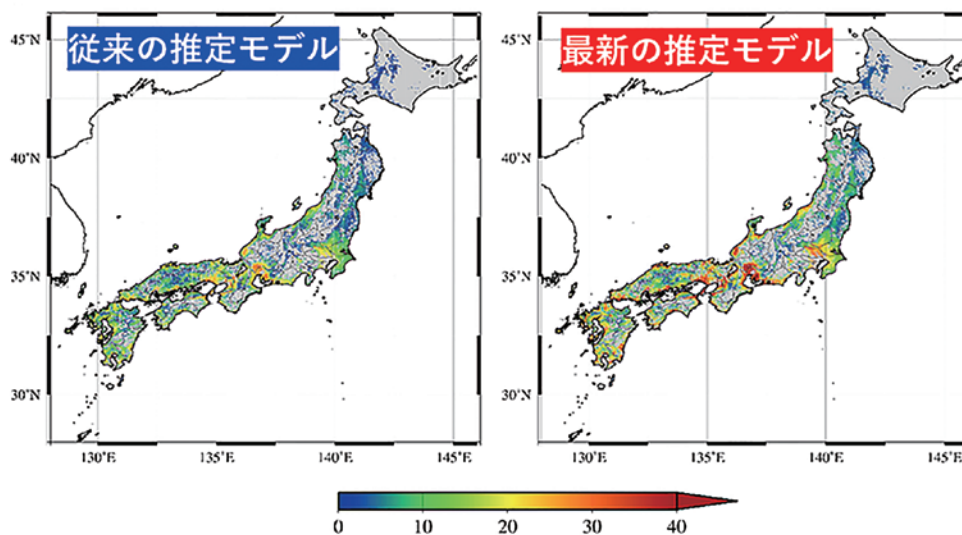


図 1.2.2 収量・品質予測における従来モデル新モデル間の今世紀半ば（2041-2060 年）の水稻の相対収量 (a) および白未熟粒率 (b) の分布の比較。ただし、高排出シナリオ（RCP8.5）の気候モデルは MIROC5 の結果を例示（Ishigooka et al., 2021）

クの違いが白未熟の発生にどの程度影響するかを数値化する方法はなかった。そこで、全国から収集した栽培試験結果を基に、白未熟粒の発生割合を、気象条件と品種の高温耐性ランクに基づいて推定するモデルを開発した（Wakatsuki et al., 2024）。得られたモデルから、穂が出てから 20 日間の気温が 28℃ 程度（MET26 が 2℃）の場合、高温耐性ランクが“弱”の品種では、白未熟粒率が 45%、“中”の品種では 24%、“強”の品種では 11%と推定された（図 1.2.3）。また、気温が 30℃ 程度（MET26 が 4℃）に上昇すると、“やや強”や“強”の品種でも白未熟粒率が増加するが、高温耐性品種の効果は顕著になる。たとえば、MET26 が 4℃ の場合、高温耐性ランクを“中”から“やや強”に 1 ランク上げるだけでも、白未熟粒率は 10 ポイント以上抑えることができると推定された（猛暑年の導入効果については Box1.1 参照）。

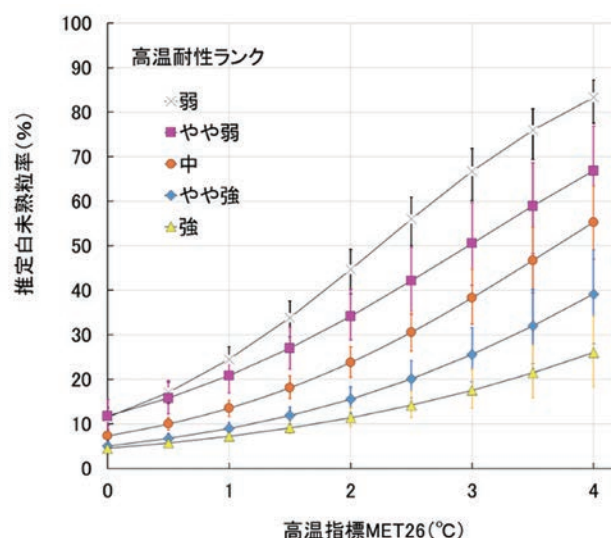


図 1.2.3 高温耐性ランクごとにモデルで推定した高温指標 MET26 と白未熟粒率の関係

縦線は 90% の信頼区間。MET26 は、稲穂が出てから 20 日間に日平均気温が 26℃ を超えた超過温度を積算し、その合計値を 20 で割った値。Wakatsuki et al. (2024) から作図。

気候変動が農林水産業に及ぼす影響と適応技術の効果が、温暖化レベルに応じてどのように変化するかを定量的かつ統一的に示すため、改良した収量・品質予測モデル (Ishigooka et al., 2021) および品種の影響を考慮した白未熟予測モデル (Wakatsuki et al., 2024) を組み合わせて、産業革命前からの温暖化レベルが外観品質の米粒 (白未熟率 30% 以下) の収量に及ぼす影響を解析した (石郷岡ら、2025)。その結果、現在の品種を引き続き栽培した場合、産業革命前からの温暖化レベルが 1℃ を超えるだけで、日本全体で白未熟率の低い高品質米の生産量が減少することがわかった (図 1.2.4)。一方、品種の高温耐性を 2 ランク向上させることで、温暖化が 2℃ 程度まで進行しても高品質米の生産量を維持できることが示された。しかし、それ以上の温暖化が進行すると高品質米の生産量が低下することが推定された。

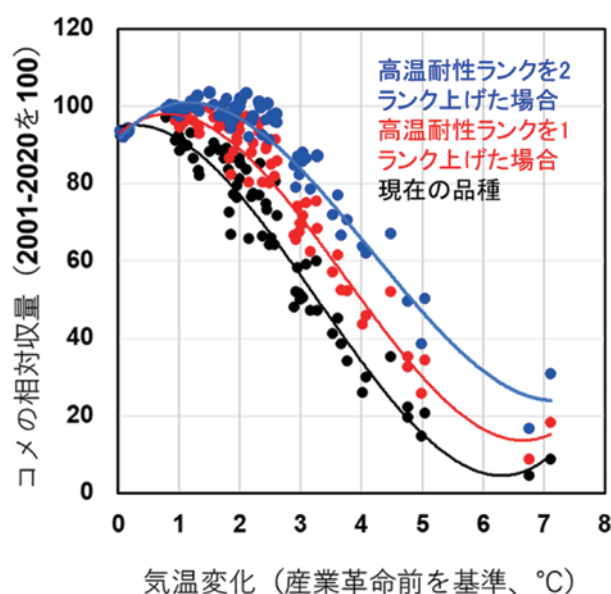


図 1.2.4 産業革命からの温度上昇と水稻の相対収量推定値 (白未熟率が 30% 以下の米収量に限定) の関係 (石郷岡ら、2025)。

水稻の害虫に関しては、福井県および香川県内の8地点で、ニカメイガ、フタオビコヤガ、キリウジガガンボ、イナズマヨコバイ、ツマグロヨコバイ、セジロウンカ、ヒメトビウンカ、トビイロウンカの8種を対象に、55～71年にわたる長期データを用いて捕獲数の傾向と変動要因を統計解析した（Yamanaka et al., 2024）。その結果、これらの害虫は、主に圃場整備や農薬による害虫管理の影響等で減少傾向にある一方、気温や降水量の影響は比較的小さいものと推定された。ただし、近年被害面積が拡大傾向にある斑点米カメムシ類については、本プロジェクトでは解析対象にできなかった。

(2) 小麦および大豆

小麦では、秋から冬にかけての温暖化により、発育段階が前倒しされるため、低温期に茎立ち期を迎えることが多くなり、凍霜害のリスクが増大する。この問題に対処するため、麦踏の効果を検討した。その結果、1～2葉期に麦踏を行うことで茎立ち期が遅れ、凍霜害リスクを低減する効果が確認された。これにより、播種時期を約3日早めて生育期間を長くすることが可能であることも示された（Mizumoto et al., 2023）。

大豆では、温暖化により増加が懸念される青立ち現象について統計的予測モデルを開発し、将来の温暖化シナリオでの青立ち程度（スコア）を予測した。秋田県大仙市、茨城県つくばみらい市、香川県善通寺市、熊本県合志市において気候シナリオ（NIES2020）データセットから3つの排出シナリオを使用し、慣行品種と播種日条件で青立ち程度を算出した。その結果、開花後51～60日目の平均気温が1℃上昇でスコアが0.12-0.21ポイント増加することが予測された。また、現状よりも晩播や品種転換により青立ち増加率の抑制効果が示された。図1.2.5の秋田県大仙市の事例では、普及品種「リュウホウ」から「里のほほえみ」に転換することで、1℃あたりの青立ちスコアの増加（回帰式の傾き）を0.17から0.12に0.05ポイント（約30%）低下できると試算された（熊谷・山崎，2025）。

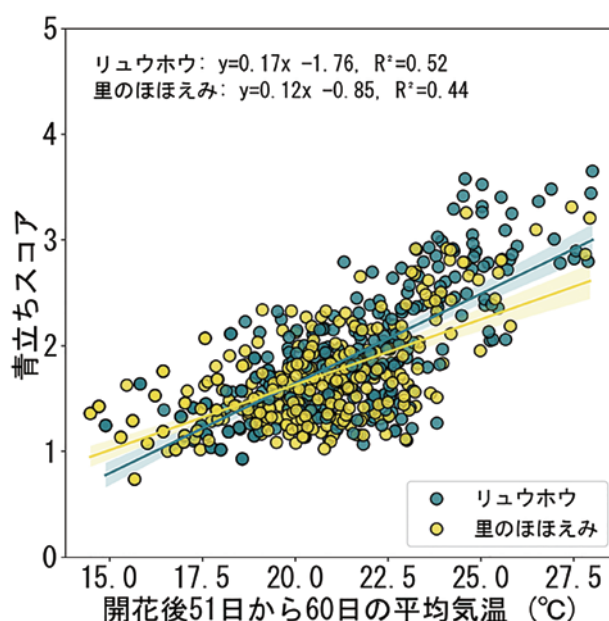


図1.2.5 3つの排出シナリオでの1995年から2100年における開花後51から60日の平均気温とモデルで予測された青立ち程度（スコア）との関係（秋田県大仙市にて、5/28に播種した場合の結果）（熊谷・山崎，2025）

(3) 果樹

果樹では、主力果樹のウンシュウミカンと輸入に依存している亜熱帯果樹のアボカドについて、適地条件を実験などにより明確にし（木崎ら，2024）、気候シナリオを用いて今世紀末までのウンシュウミカンとアボカドの適地移動を推定した（Sugiura et al., 2024a）。その結果、特に非常に高い排出シナリオ（SSP5-8.5）では、ウンシュウミカンの適地は北上あるいは内陸に広がるが、今世紀末には適地より高温となり適応策なしでは生産が難しくなる地域が大幅に拡大する（図 1.2.6a）。一方、低い排出シナリオ（SSP1-2.6）では、適地の变化は少ないことから、現在のウンシュウミカン産地にとって、温室効果ガス排出削減による温暖化緩和が非常に重要であることが示された（図 1.2.6a）。アボカドについては、適地が拡大し、SSP5-8.5 では今世紀半ばには現在のミカン適地の多くがアボカド栽培に適すると予測された（図 1.2.6b）。さらに、21 世紀末には、アボカド適地の面積は現在の 2.4 ～ 7.7 倍に拡大するのに対して、現在のウンシュウミカンの産地はその適温を越える。こうした地域では、ウンシュウミカンからアボカドへの転作が適応策の一つとして有効であることを示す。

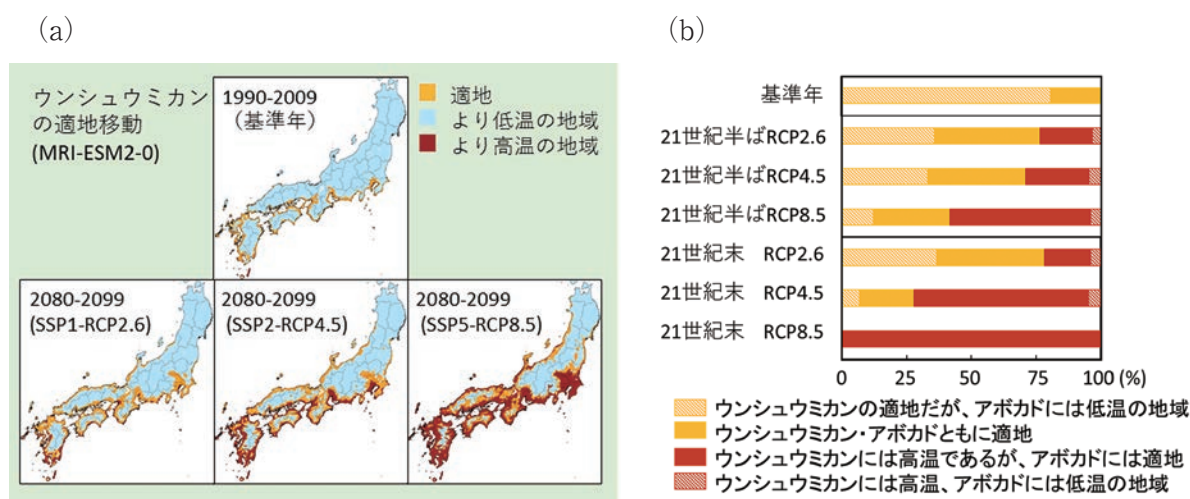


図 1.2.6 今世紀末までのウンシュウミカン適地の分布 (a) および基準年（1990-2009 年）のウンシュウミカン適地における今世紀半ばおよび後半のアボカドとウンシュウミカンの適地面積率の変化 (b)。RCP2.6、4.5、8.6 は GCM（MRI-ESM2-0）における SSP1-RCP2.6、SSP2-RCP4.5、SSP5-RCP8.5 シナリオ条件を示す（Sugiura et al., 2024）。

(4) 多品目を対象とした市町村別収量の統計モデルによる収量予測

日本の 67 種類の作物について、過去の市町村別単位面積あたりの収量データ（年間値）を目的変数、栽培期間中の平均気温と平均日射量を説明変数とする統計モデルを構築し、SSP5-8.5 の気候シナリオを用いて今世紀半ば（2041-2060 年）の収量を予測した。なお、予測収量は、5 種類の GCM の気候予測値の違いとモデルパラメータの推定幅から、それぞれの市町村について幅のある値分布を持った値として算出した。さらに予測値の分布幅と基準年（2016-2022 年）の平均収量を比較し、将来の収量が増減する確率を推定した。図 1.2.7 には、67 種を「穀物類」「果菜類」「果樹類」「葉菜類」「豆類」「根菜類」に分類し、それぞれについて増収が予測される種数の割合を示した。その結果、葉菜類と豆類、根菜類については半分以上の作物で基準年よりも収量が増加すると予測された地域が多かった。一方で、穀物類と果菜類、果樹類については西日本では半分以上の作物で収量の減少が予測された地域が多かったが、東日本では半分以上の作物で収

量の増加が予測された地域が多かった（Sakurai and Morishita 2024, Sakurai et al. 2024, Sakurai et al. in review）。ただし、これらは収量のみに着目しており、品質への影響を考慮しておらず、二酸化炭素の直接的な作物への影響（二酸化炭素施肥効果）なども考慮していない。また、あくまで広域での潜在的な作物収量に気候変動が及ぼす影響の傾向について予測であり、細かな農法の違いなどは考慮していないため、対象とする市町村と作物の全ての収量が必ずしも減少や増加することを予測するものではないことに注意が必要である。

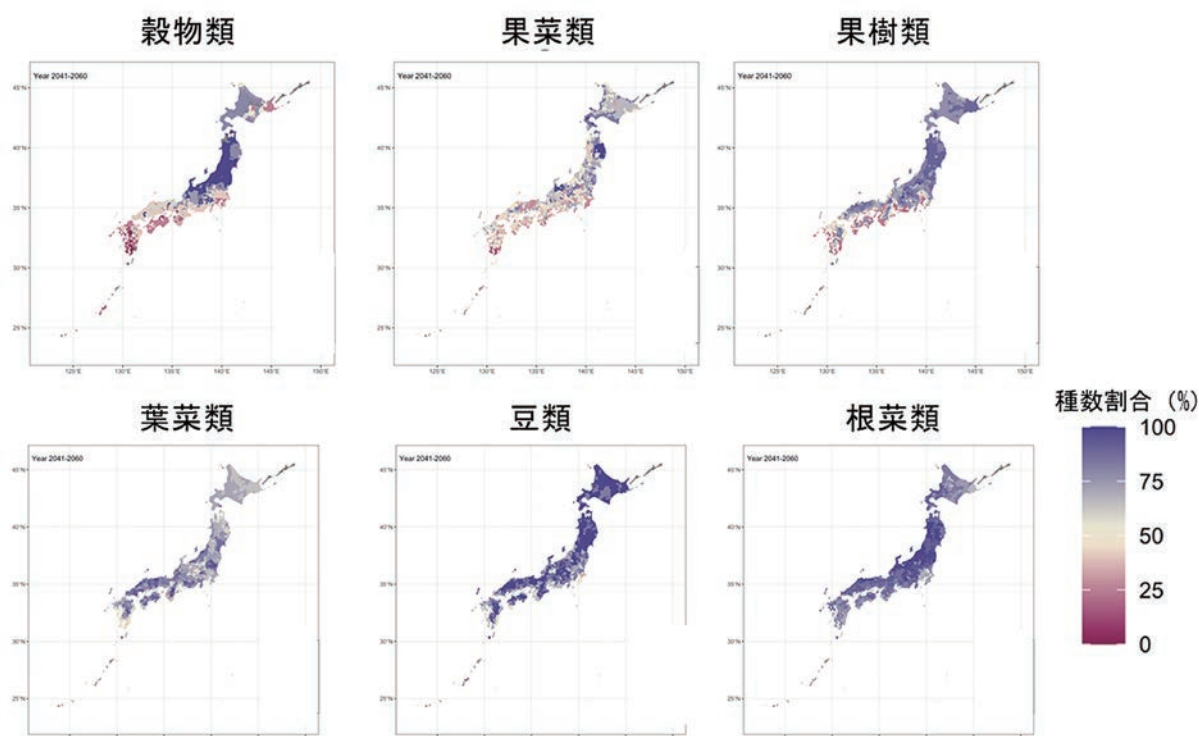


図 1.2.7 67 種類の作物の穀物類と果菜類、果樹類、葉菜類、豆類、根菜類について、今世紀半ばに現在 (2016-2022 年) 比べて収量が増加すると予測された作物種の割合(%)。5 つの GCM の出力値を使用した。シナリオには SSP5-8.5 を使用した。ここで種数の割合が高いことは、その分類に属する作物の内、予測収量が増加する作物種が多いことを示す。

1.2.2 畜産業

畜産では、温度および湿度が家畜の生産性に影響することは広く知られているが、定量的な反応モデルについては十分に検討されていなかった。そこで、主要な畜種を対象に、温度および湿度を制御した飼養実験を行い、気温および湿度が生産性の及ぼす影響をモデル化した。さらに、今世紀末までの気候シナリオとモデルを利用することで、気候変動が主要畜種の生産性に及ぼす影響を評価した。

(1) 泌乳牛

泌乳牛においては、飼養試験結果から温度と湿度をあわせた温湿度指数 (THI) を説明変数とする乳量減少予測モデルを作成した (Higuchi et al., 2024)。さらに、SSP2-4.5 シナリオから THI を算出し、今世紀末までの気候変動が乳量に及ぼす影響を推定した。まず、2030 年代の影響予測地図をみると、適温条件が 18℃ 以下であり元来暑熱の影響を強く受ける泌乳牛では本州のほ

ば全域で強い生産性低下が予測された（図 1.2.8a）。また、年代毎の影響予測を見ると、生産性が 10%以上低下すると予測される面積割合は、2030 年代までに急増し、その後も継続的に拡大することが示された（図 1.2.8b）。これは、現在の気温がすでに多くの地域で泌乳牛の適温を越えており、わずかな温度上昇でも生産性低下地域が拡大することを示している。

（2）採卵鶏

採卵鶏では、環境温度を説明変数とし、適温環境（22℃）に対する日産卵量減少率を予測するモデル式を作成した（大津ら，2024）。採卵鶏で生産性の低下が予測される地域は他の畜種に比べて大幅に少なかった（図 1.2.8c）。これは、卵鶏の適温が比較的高い（22℃程度）ため、使用した気候シナリオで予測される平均気温（約 20～24℃程度）が適温範囲内に収まる地域が多いことが主な要因である。また、鶏種により暑熱の影響が異なることも示された。鶏種 A では関東以南、四国および九州沿岸で 10%以下程度の生産性低下が予測された（図 1.2.8d）。一方、鶏種 B ではやはり関東以南、四国および九州沿岸での 10%程度の生産性低下が予測された。

（3）肥育後期豚

肥育後期豚では、環境温度、湿度を説明変数とし、適温環境（20℃、60%）に対する日増体量比を予測するモデル式を作成した（井上ら，2024）。その結果、2030 年代で生産性への影響が拡大し、以降の年代でも拡大が続けることが予測された（図 1.2.8e）。これは日増体量予測モデルにおいて 20～21℃程度の環境温度ではほとんど影響を受けないが、22～23℃程度より体重減少が顕在化し始め（1～2kg）、24℃では体重減少がさらに大きくなる（6kg）ことが示されており、このことを反映して、平均気温が 23℃程度となる 2030 年代以降で温暖化の影響が顕在化し、拡大すると考えられた。影響予測地図では関東以南、四国および九州の沿岸・平野部において生産性が 10%以上低下することが予測された。関東・東山の内陸や東北（一部沿岸・内陸部を除き）・北海道では暑熱の影響は小さいことが予測された（図 1.2.8f）。

1.2.3 林業

スギ人工林の面積・齢級の推移が炭素吸収量に及ぼす影響を全国レベルで明らかにするため、異なる 4 つの再生林シナリオを設定し、炭素吸収量のモデル予測を行った。気候シナリオは共通シナリオの SSP1-2.6 と SSP5-8.5 を利用した。その結果、4 つの再生林シナリオは程度の差はあるが、いずれも 2010 年に対し 2050 年の炭素吸収量の低下を示し、SSP1-2.6 と SSP5-8.5 の平均で -21%、-14% の低下幅であった。このとき炭素吸収量の低下の主たる要因はスギの高齢級化と広葉樹二次林の増加の 2 つであった（鳥山ら，2024）。

全国で少子高齢化が進み、将来的に住民の半数以上が 65 歳以上となる限界自治体が増えることで、財政問題や道路インフラの老朽化が進行し、アクセスが困難な人工林の分布が増加する可能性がある。しかし、アクセス性が低下する人工林が将来的にどのような環境条件に置かれるか試算した例はこれまでなかった。そこで、本プロジェクトでは、SSP1 シナリオに基づき、2050 年時点の限界自治体に含まれるスギ・ヒノキ人工林の分布域を推定した結果、全国の 40%が限界自治体に含まれることがわかった（鳥山・橋本，2023）。九州では 27%が該当し、これらの人工林は非限界自治体の人工林に比べて平均標高が高く、気温が低い地域に位置していることがわかった。今後、気候変動対策と同様に少子高齢化への適応策として、将来予測を基にした人工林

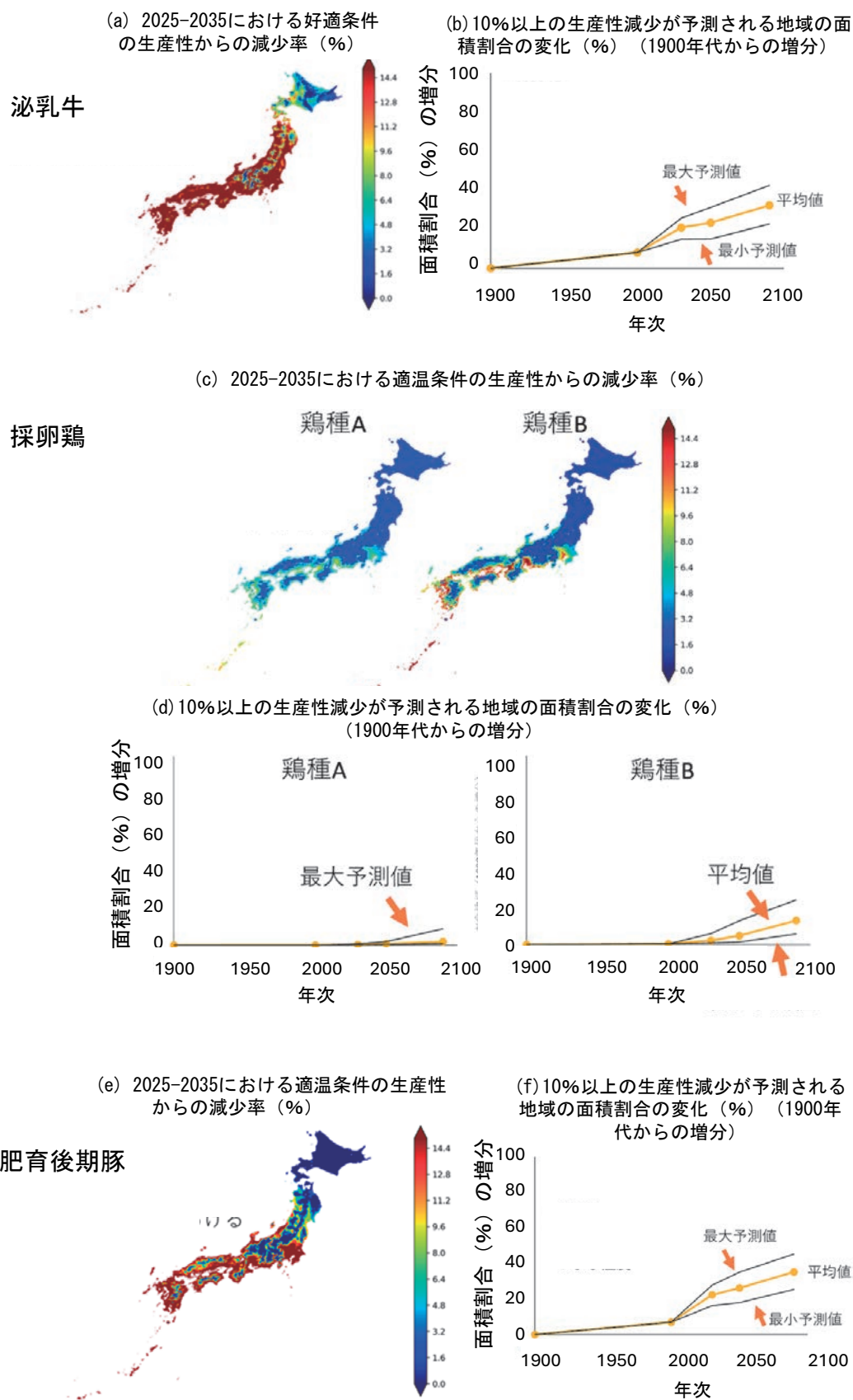


図 1.2.8 泌乳牛、採卵鶏、肥育後期豚の生産性に及ぼす気候変動の影響の将来予測

2025-2035 年に予測される生産性の減少率（対好適条件における生産性）の分布 (a, c, e) と 10%以上の生産性低下が予測される地域割合の 1900 年代からの増分およびその予測範囲（2030 年代以降がシナリオによる予測値、b、d、f）。いずれも SSP2-4.5 の 5 気候モデル平均値を用いて算定。

の適正配置などの取り組みが重要になる。

気候変動でスギの地域系統の適応度が低下する地域を予測するため、遺伝的な多様性と環境データを用いたモデリングを実施し、将来の気候条件下での「遺伝的オフセット」を分析した（内山ら，2023）。なお、遺伝的オフセットは、現在のスギの遺伝的特性と将来の気候条件との適合性のずれを意味し、オフセットが大きいほど、現行の遺伝的特性が将来の環境に適応できない可能性が高いことを示す。この研究では、2つの気候モデル、MIROC6とMRI-ESM2、の出力を用いて将来予測を行った。MIROC6を用いた場合、2050年時点（シナリオ SSP1-2.6）で九州や四国の内陸部、東北地方の一部で遺伝的オフセットの増加が予測された。また、2050年から2090年の間（シナリオ SSP5-8.5）には、スギの分布域全域にわたる低地で遺伝的オフセットが高まるとされた。一方、MRI-ESM2による予測では、2050年に中国地方や関東の低地、2090年には西日本や関東の低地、日本海側の海岸沿いで遺伝的オフセットの増加が推定された。これらの結果は、気候変動がスギの地域適応に与える影響を明らかにしており、将来の森林管理や遺伝資源の保全計画を立てる上で重要な知見となる。

1.2.4 水産業

本プロジェクトでは、ワカメ養殖業、藻場生態系とアワビ漁業および底びき網漁業の主要漁獲対象種である底魚類の将来予測と適応策に関して検討した。

(1) ワカメ養殖

ワカメ養殖はノリ養殖に次ぐ収穫量を有する重要な海藻養殖業であり、三陸地方（岩手県・宮城県）で全体の約7割の生産を占めているほか、瀬戸内海の鳴門海域でも生産されている。本プロジェクトでは、気候変動がワカメ養殖に及ぼす影響と、地域による影響の違い、および有効な適応策検討するため、三陸地方と瀬戸内海における影響予測と適応策の評価を行った。

三陸海域では、岩手県大槌町船越湾においてワカメの生育環境と成長過程をモニタリングし、得られたデータに基づいてワカメの成長モデルを構築し、将来予測を行った。将来予測の結果、RCP2.6シナリオでは養殖スケジュールに大きな変化はなく、生産量増大の可能性がある、ワカメ養殖業にとってプラスの効果が期待された（図1.2.9）（Takehi et al., 2024）。RCP8.5シナリオでは、収穫量は現在と同程度が見込まれるものの、養殖終了日が早期化すると予測され、収穫作業や販売等のスケジュールの大幅な前倒しが必要となると考えられた。

鳴門海域では、水温上昇に伴う養殖開始時期の遅れや栄養素となる溶存無機窒素濃度の低下により、RCP2.6シナリオを除いて2090年代には1990年代に比べて3月末時点の全長が大きく減少した（図1.2.10）（Onitsuka et al., 2024）。一方、高温耐性を備えた新品種を想定した計算では、RCP8.5でも全長の減少が抑えられると予測され、高温耐性品種は気候変動に対する適応策となり得ることが示された（図1.2.10）。なお、感度解析の結果、瀬戸内海でも冬季水温の低い海域では、水温上昇はワカメの成長にプラスの影響（生育最適温度に近づくことによる生育の促進）があり、海域によって水温上昇の影響の度合いが異なることが示唆された（Onitsuka et al., 2024）。

以上の結果から、ワカメ養殖業においても地域的に気候変動が与える影響要因は異なるとともに影響の出方（収穫時期の短縮、成長の低下）も異なることが示された。そのため、想定される有効な適応策（収穫スケジュールの変化と出荷・流通体制の構築、高温耐性品種の開発）と必要

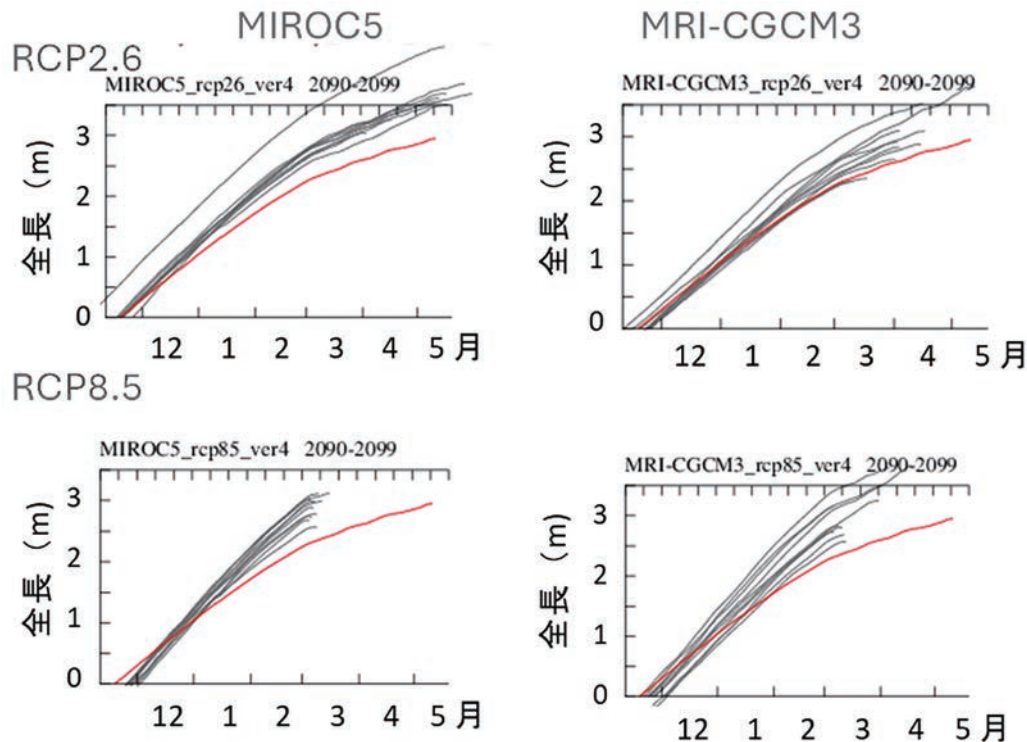


図 1.2.9 2 種類の気候シナリオ（RCP2.6、8.5）と 2 種類の気候モデル（MIROC5、MRI-CGCM3）を用いて推定した三陸海域における今世紀末（2090-2099 年）におけるワカメの成長予測（Kakehi et al., 2024）。赤線は成長モデルに基づく現在の環境下における成長予測結果

となる時期も異なっていることが示された。このような同じ養殖品目においても海域によって適応策が異なる状況は、今後の地方自治体が推進する地域適応計画の作成においても非常に有用な知見となることが期待される。

(2) 藻場生態系

沿岸域の藻場生態系では、気候変動による海水温上昇の直接的な影響に加え、植食性動物の増加などによる磯焼けが発生している。そこで、東北地方の三陸沿岸及び瀬戸内海における 2 つの海域において、気候シナリオ別に海藻分布の将来予測を行い、適応策に関する課題について検討した。瀬戸内に比べ東北地方沿岸域では温度変化が大きく、藻場生態系が大きく変わることが予測された。さらに海藻は分散速度が遅いことから、寒海性から暖海性の種への置換が起こるまでの間、植食性魚類による磯焼けが発生する可能性が示唆された。なお、東北地方では暖流の影響により海藻は南からのみではなく、津軽海峡を通じて日本海側からも拡大する可能性があった（須藤・島袋, 2024）。

海水温上昇によって沿岸域の藻場生態系では磯焼けが進行し、磯根資源と呼ばれる藻場生態系を基盤とした水産資源は危機的状況をむかえている。その典型であるアワビ類は藻場を生息場所としてだけでなく、藻場を構成する大型褐藻類そのものを主要餌料とするため、藻場の衰退は資源崩壊の大きなトリガーとなる。そこで、東北太平洋岸と瀬戸内海を対象に、気候変動に伴う藻場分布変化がアワビ類に及ぼす影響を予測した。RCP8.5 シナリオではアラメをはじめ多くの藻場構成種が大きく衰退するため、さらにエゾアワビ資源量が減少する推定値が得られた。その一方で、稚貝の種苗放流等により残存するアラメ藻場へのアワビ類の加入率を人為的に増加させ

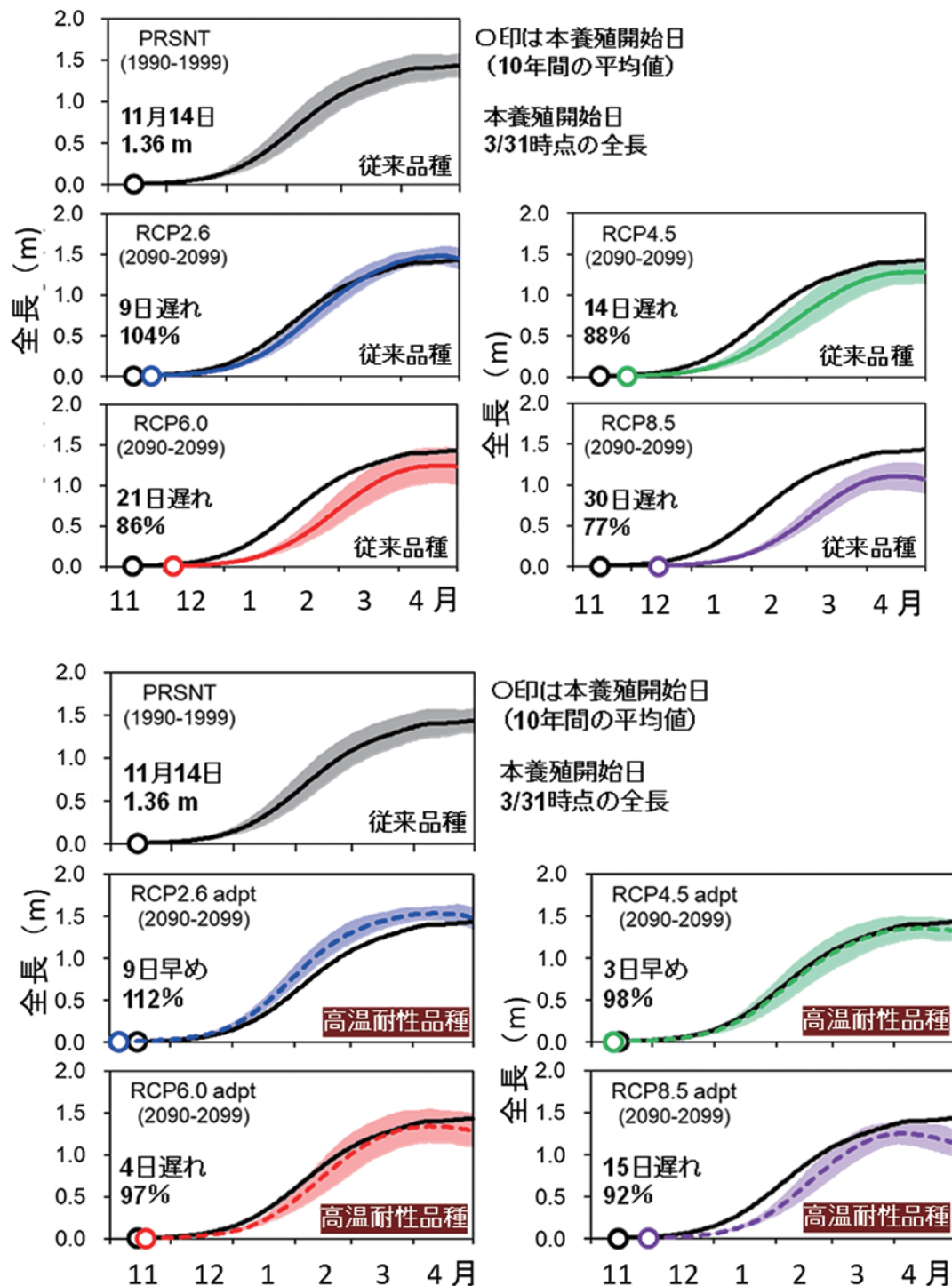


図 1.2.10 瀬戸内海（鳴門海域）の今世紀末（2090-2099 年）におけるワカメの成長予測 上半分は従来品種による予測、下半分は高温耐性品種を導入した場合の予測結果（Onitsuka et al., 2024）。

ば、資源量の減少率を緩和できる可能性も示唆された（堀ら，2024）。

(3) 底魚資源

親潮系水や黒潮系水など異なる水塊の影響を受ける東北太平洋沿岸域の水塊構造は水温（T）と塩分（S）からなる T-S ダイアグラムによって判別可能とされる。そこで本研究では、東北太平洋沿岸域の底層における水温・塩分をもとに底魚資源の分布密度モデルを作成すると共に、分

布密度モデルと水温と塩分の将来予測値を用いて分布の変化を予測した。作成した予測モデルではマダラ等の冷水性種では低温・低塩、ヒラメ等の暖水性種では高温・高塩、キチジ等の深海性種は低温・高塩で高い漁獲量（単位努力当たり）が観測される傾向がみられ、それぞれ親潮系水、黒潮系水および深層の環境に多く分布するという各魚種の分布特性を反映することができた。また、底層環境の温暖化が進むに従って暖水性種では漁場が北方に移動または拡大する一方で、冷水性種では漁場が縮小し、深海性種では漁場の南北移動は小さいものの、漁場がより深場へと移動すると予測された（鈴木ら，2024）。

以上から、本プロジェクトで検討した将来予測の結果では、RCP2.6 シナリオにおける影響は適応可能な場合が多く認められる一方、RCP8.5 シナリオでは影響が著しく、適応が困難となる場合が多かった。そのため、RCP8.5 シナリオにおける適応のコストと、RCP2.6 シナリオにおける緩和のコストを比較しながら今後の気候変動への対応を検討することが重要である（日本水産学会水産環境保全委員会，2024）。

1.3 災害リスク、生物多様性を考慮した気候変動適応

全国の森林を対象に、森林管理が炭素蓄積、災害リスク軽減、生物多様性保全などの生態系サービスに与える影響を評価するため、2010 年から 2050 年にかけてスギ林面積の 16% を広葉樹二次林に置き換え、残存スギ林の平均林齢を 44.4 年から 72.0 年に増加させる森林管理シナリオを構築した（Toriyama et al., 2024）。このシナリオを用い、炭素吸収量の指標である純生態系生産量と、表層崩壊防止機能、広葉樹種の生息域提供機能の 2 つの生態系サービス間のトレードオフ解析を実施した。森林管理行為（成長、伐採、再植林）に加え、気候条件（大気 CO₂ 濃度、気温、降水量）の変化が炭素循環、土壌安定性、生物多様性に及ぼす影響を、プロセスモデルを用いて評価した。その結果、南日本ではスギの伐採率と再植林率を高く維持することで炭素吸収量を確保しつつ広葉樹種の生息域提供にも寄与する有効な手法であることが判明した。一方、北日本では伐採率や再植林率を低く抑える管理も現実的な選択肢となる。これらの結果は、地域ごとの気候条件や森林構造の違いを考慮した管理の重要性を示しており、持続可能な森林利用と気候変動適応の両立を目指すための指針となる。

さらに、地域スケールで炭素蓄積、土砂災害リスク、生物多様性保全を定量的に評価するため、スギ樹高成長（炭素蓄積）、土砂災害リスク予測、既存の維管束植物の多様性分布情報を GIS 上で統合し、森林域の気候変動適応策評価モデルを構築した（Nakao et al., 2024）。ここでは、福岡県朝倉市周辺の約 300km² を対象とした試算結果を示す。このモデルは、気候シナリオ（気候モデル：MIROC5 及び MRI-CGCM3、SSP: SSP1-2.6）と適応策シナリオ（伐採周期、スギ人工林拡大、樹種変換など土地利用及び森林管理）を組み合わせで計算を行った。標準伐採周期（50 年）で気候シナリオの効果（図 1.3.1a と b の比較）を見ると、気候変動は今世紀中頃から後半にかけて山地災害リスクを増加させるだけでなく、炭素蓄積が減少すると推定された。気候変動シナリオ下で、適応策シナリオを比較すると、スギ人工林に着目した炭素蓄積を最優先するシナリオ（図 1.3.1c）では、気候シナリオ下で慣行管理を行ったシナリオ（図 1.3.1 b）と比較して、炭素蓄積は増加するが、土砂災害リスクが最大 30% 程度上昇すると予測された。一方、生物多様性を優先した広葉樹林への転換を行う適応策シナリオ（図 1.3.1e）では、気候シナリオのみ（図 1.3.1b）に比べて、炭素蓄積は 11% 減少するが、生物多様性を 23% 高め、土砂災害リスクを 10% 低減す

る可能性が予測された。全体としては、適応策の効果は最大でも 27%程度で、気候変動の影響に比べると限定的であることから、緩和策の重要性が再確認された。地域の中で将来的にどのような土地利用を行なっていくかは、科学的な合理性だけで決めることはできないが、今回構築したモデルは、地域ごとの合理的な意思決定を支援するツールとして機能し、持続可能な森林利用と気候変動適応の両立を目指すための基盤となる。

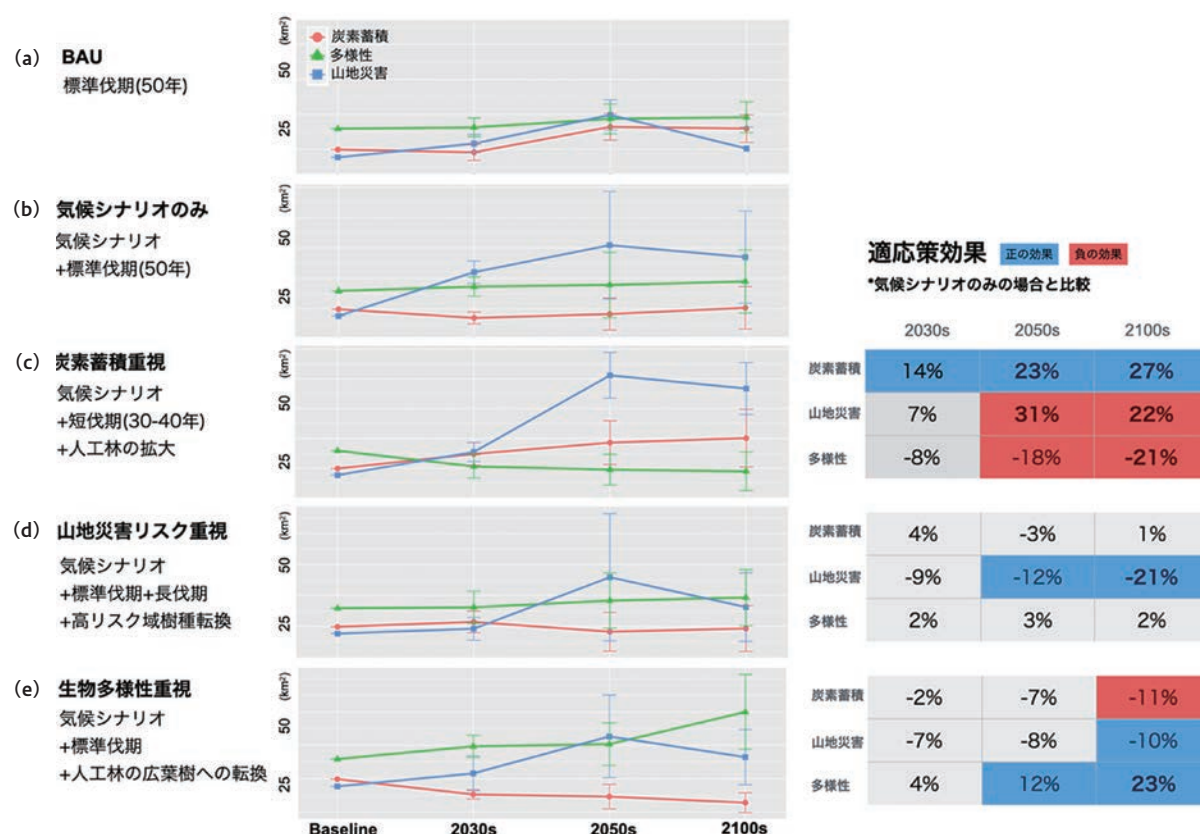


図 1.3.1 シナリオ解析の結果。左側（折れ線グラフ）：5つの適応策シナリオに基づく炭素蓄積（スギ人工林成長）、土砂災害、生物多様性に寄与する面積の変化。エラーバーは、気候モデル（MIROC5、MRI-CGCM3）、社会経済シナリオ（SSP1-2.6）下において適応策シナリオごとに行った1000回の試行回数に由来する誤差を示す。右側：気候シナリオのみの場合と比較した場合の3つの要素における適応策効果を示す。青色が正の効果、赤色が負の効果。

1.4 気候変動対策の推進に向けた課題・提言

1.4.1 気候変動対策の推進に向けた提言

農林水産業に関しては、多くの品目で温暖化の影響が顕在化しており、今後の温暖化の進行とともに深刻になることが懸念される。すでに、本プロジェクトでも取り扱ったような個別の適応策については、今後も改良を進めるとともに、普及に向けた支援が必要である。今回対象とした、高温耐性品種の育成や移植時期の調整、畜産では温湿度管理、林業では短伐期化や樹種転換、水産業では高温耐性品種の導入や藻場造成、漁期・漁場の変化などへの対応は、地方自治体レベルでも促進可能なオプションである。しかし、産地の移動や新しい作目の導入や魚種への転換等については、地方自治体の枠組みを超えた広域のかつ長期的な見方が極めて重要である。こうした広域、長期的な適応策をけん引する担い手を明確とするとともに、研究サイドはそれを支

持するための科学的根拠を提示し続けることが必要である。

一方、近年の温暖化の速度は急激であり、IPCC 第6次報告書でも適応の限界が指摘されている。温暖化抑制への取り組みは、農林水産業分野でも一層強化する必要がある。同時に、適応策の実施にあたっては、それ自体が温暖化を悪化させたり、生物多様性を損なう結果を招かないよう多面的な評価を行うことが求められる。本プロジェクトでは、林業分野において、樹木成長、炭素蓄積、災害リスク防止、生物多様性保全といった多面的指標に基づく管理オプションを定量化し、政策判断を支える科学的根拠を提示した。今後、こうした多面的評価を他分野にも広げ、共便益を高める適応技術の発展に貢献していきたい。

1.4.2 今後の課題

これらの取り組みを加速するには、科学者と地方行政が連携し、科学的根拠に基づく政策を展開することが求められる。そのためには、以下の課題を克服することが重要である。

- 1) 温暖化の影響モニタリングの強化：進行する環境変化をリアルタイムで追跡し、そのデータを温暖化影響および適応技術の評価に迅速に反映させることが望まれる。特に、地域ごとの気温上昇や降水パターンの変化を詳細にモニタリングする体制を強化し、予測の精度を向上させることが求められる。
- 2) 適応効果の科学的評価の充実：導入された適応策が実際にどの程度の効果を発揮しているかを定量的に評価するための手法を確立し、継続的にその効果を検証することが重要。農業や畜産業、水産業において、適応技術が長期的にどのような成果をもたらしているかを評価するためのデータ収集と解析を継続的に実施する仕組みが必要である。
- 3) 地域特性を考慮した適応策の実施と改善：地域ごとの気候変動影響の違いを的確に評価し、各地域に最適化された適応策を実施することが求められる。特に、農業や水産業などの地域ごとに異なる産業活動に対して、柔軟かつ効果的な適応策を導入し、その成果をフィードバックする仕組みが必要である。
- 4) 社会経済要因を考慮した持続可能な施策の推進：気候変動の影響は生態系だけでなく、社会経済にも大きな影響を与える。特に、農業、畜産業、林業、水産業において、地域の経済的脆弱性や人口動態を考慮した持続可能な施策を策定し、政策に反映させることが重要である。
- 5) 国際的な協力と知見の共有：気候変動の影響は国境を越えて広がるため、国際的な協力が不可欠。特に、アジア太平洋地域における気候変動の影響に関するデータや適応策の成功事例を共有し、共通の課題に取り組むための協力体制を強化することが重要である。

Box1.1 令和5年の異常高温による一等米比率の低下と高温耐性品種の導入効果の推定

近年、夏季の高温により、米粒が白く濁る白未熟粒が増加する高温障害が頻発している。特に猛暑となった2023年には白未熟粒が多発し、外観品質が低下したため、一等米比率は全国平均で60.9%となり、現行の農産物検査制度が始まった2004年以来、最低を記録した。これにより、農家の収入にも大きな影響が出た。2000年ごろから育成が進められている高温耐性品種は、高温でも白未熟粒の発生が少なく、温暖化の影響を軽減する有効な技術とされている。しかし、これらを導入した場合に実際どれだけ白未熟粒の発生が軽減され、一等米の割合が確保できるかを数値で評価する方法は存在しなかった。そこで、本プロジェクトで開発した白未熟粒率発生予測モデル（Wakatsuki et al., 2024）と全国1kmメッシュの気象データを用いて、2023年の高温の影響と高温耐性品種導入効果を、夏の気温が過去10年間の平均に近かった2016年と比較した（長谷川ら、2024）。

全国を平均した高温登熟指標（MET26、1.1.1参照）は、2023年が1.8℃で、2016年の0.5℃よりも1.3℃高かった（図Box1.1.1）。また、気温28℃に相当するMET26が2℃以上となったメッシュ数は、2016年が全体の3%程度であったのに対し、2023年には25%に達した。特に北陸、関東、東北、東海、近畿で2023年のMET26が著しく高くなった。

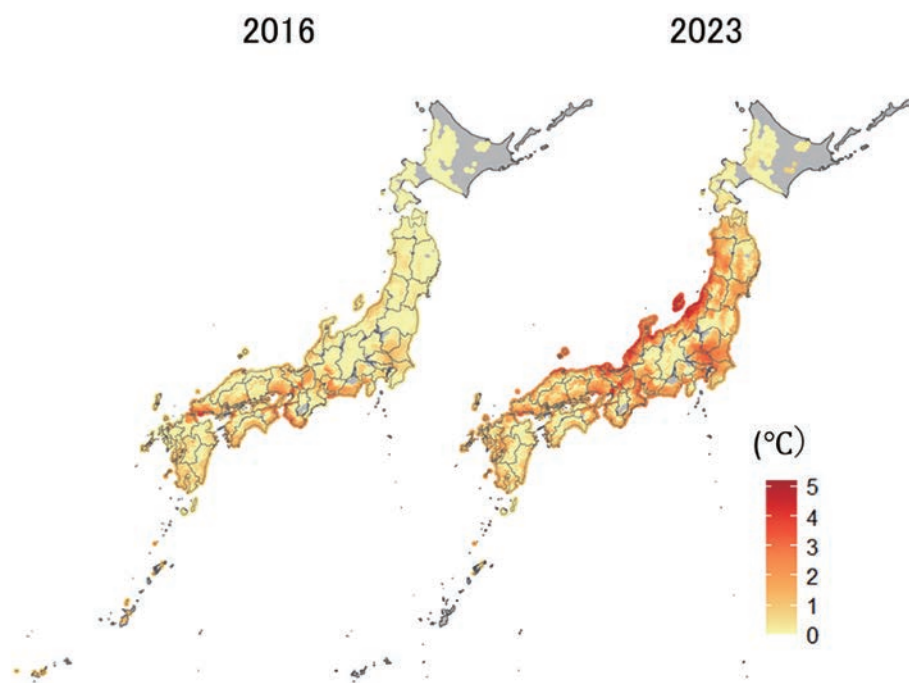


図 Box1.1.1 夏の気温が過去10年間の平均に近かった2016年と最高を記録した2023年の高温指標MET26の分布（長谷川ら、2024）

MET26は穂が出てから20日間を対象に日々の平均気温が26℃を超過した温度を積算し、20で割って1日当たりの超過温度とした値。作柄表示地帯別の出穂盛期から起算して全国1kmメッシュの気象値を用いて計算。1kmメッシュ内の水田面積率が10%以上のものを表示。

2016 年と 2023 年の気象データを基に、白未熟粒率推定モデルで、全国の水田が分布する 1km メッシュで白未熟粒率を推定した。その結果、高温耐性ランクを“中”と仮定した場合、推定白未熟粒率は 2016 年が 11%（図 Box1.1.2 上段左）であったが、2023 年には 24%（図 Box1.1.2 上段右）に増加した。一方、2023 年の気象条件で、高温耐性ランクが“やや強”の品種を用いた場合の全国平均の推定白未熟粒率は 16%（図 Box1.1.2 中段右）となり、“中”の品種の 24%（図 Box1.1.2 上段右）と比べて 8 ポイント低下すると推定された。同様に、“強”の品種を用いた場合は 11%（図 Box1.1.2 下段右）となり、“中”の品種と比べて 13 ポイント低下すると推定された。

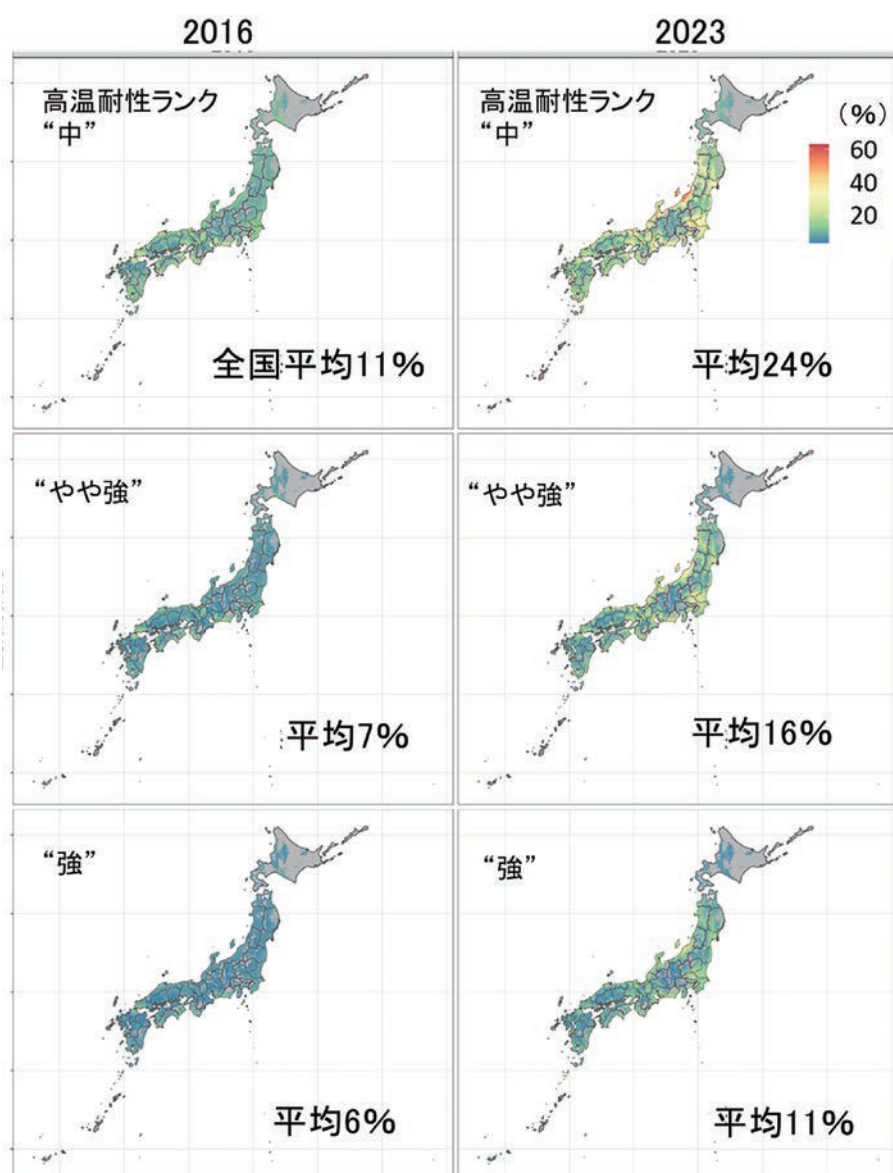


図 Box1.1.2 モデルから推定された高温耐性ランク“中”、“やや強”、“強”の場合の推定白未熟粒率の分布（2016 年と 2023 年）（長谷川ら，2024）

2011 年以降の推定白未熟粒率と全国の一等米比率には負の相関が見られた（図 Box1.1.3）。両者の関係式から、推定白未熟粒率が 1 ポイント増加すると、一等米比率が 1.6 ポイント低下することが分かった（回帰式の傾き）。また、2023 年の気象条件で高温耐性ランクを“中”から“やや強”に 1 ランク上げると、全国の推定白未熟粒率は 8 ポイント低下する（図 Box1.1.2 の右上と右中の差）。これにより、全国の一等米比率は 12 ～ 13 ポイント（ 8×1.6 ）程度高まると推定された。

温暖化が進行するにつれ、異常高温に見舞われる年次や地域が今後も拡大することが懸念される。現在の高温耐性品種の効果を正確に見積もり、地域ごとに今後どの程度の高温耐性レベルが必要かを定量化することで、中長期的な品種開発目標の設定が可能になる。

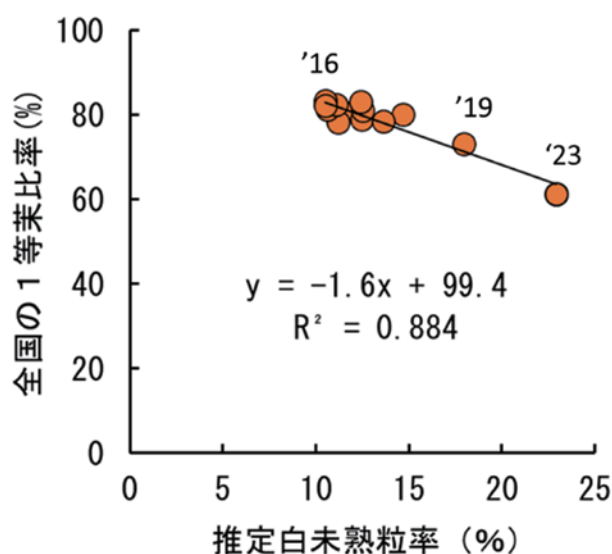


図 Box1.1.3 2011 ～ 2023 年における全国の推定白未熟粒率と一等米比率との関係 長谷川ら (2024)

全国の推定白未熟粒率の推定の集計方法は、図 Box1.1.2 の説明文章を参照。一等米比率は、農林水産省農産物検査米穀の検査結果（<https://www.maff.go.jp/j/seisan/syoryu/kensa/kome/>）で、2023 年については同年 12 月 31 日に発表された速報値。図中の数値は年次。

作柄表示地帯別の出穂盛期から起算したメッシュ気象値から、高温耐性ランクごとに白未熟粒率を推定。図内の数値は全国集計した平均白未熟粒率で、次の方法で算出。すなわち、まず 1km メッシュの気象データから、高温耐性ランクごとに白未熟粒率を算出し、各メッシュ内の水田面積率で重みづけしたものを県単位で合計。次に各県の推定白未熟粒率を、県で農産物検査法に基づき実査されたコメの検査数量および高温耐性品種導入率で重みづけして、全国集計値を算出。

参考文献

- 井上寛暁・大森英之・石田藍子・芦原 茜・村上 斉 (2024)：畜産を対象とした気候変動影響予測と適応策の評価，肥育後期豚，2023 年度 環境研究総合推進費 S-18 プロジェクト研究成果報告書，<https://s-18ccap.jp/ccap-jp/wp-content/uploads/2024/08/2023report-theme-2.pdf>
- 熊谷悦史・山崎 諒 2025. 温暖化でダイズの莢先熟（青立ち）は増えるのか？育種データを基にした原因分析と将来予測，日本農業気象学会 2025 年全国大会講演要旨集，熊本市.
- 須藤 健二・島袋寛盛 (2024)：日本周辺海域の藻場生態系の将来予測と適応策，令和 6 年度日本水産学会春季大会シンポジウム講演要旨.
- 大津 晴彦・原 文香・依馬朋香・松下浩一・芦沢咲知 (2024)：畜産を対象とした気候変動影響予測と適応策の評価 採卵鶏，2023 年度 環境研究総合推進費 S-18 プロジェクト研究成果報告書，<https://s-18ccap.jp/ccap-jp/wp-content/uploads/2024/08/2023report-theme-2.pdf>
- 長谷川利拡・若月ひとみ・吉本真由美・酒井英光・石郷岡康史 (2024)：2001 ～ 2023 年における全国の水稲の登熟温度環境と一等米比率の動向，および高温耐性品種導入効果の推定，日本作物学会講演会要旨集，258：49.
- 鳥山淳平・橋本昌司 (2023)：少子高齢化社会における九州地方の人工林の分布と生育環境－人口シナリオと限界自治体指標による推定－，九州森林研究，76：117-120.
- 鳥山淳平・中尾勝洋・斎藤 琢・西園朋広・内山憲太郎・荒木眞岳・村上 亘・平田泰雅 (2024)：スギ人工林域の炭素吸収量の将来予測－スギの面積縮小と高齢級化の影響－，森林学会大会学術講演集，pp. 150 (15).
- 内山憲太郎・中尾勝洋・津村義彦 (2023)：スギの適応遺伝変異の空間分布と気候変動への応答可能性評価，日本森林学会大会発表データベース，134：145.
- 日本水産学会水産環境保全委員会 (2024)：農林水産業の気候変動影響評価手法と水産分野における将来予測・適応策－水産分野における課題と展望，日本水産学会誌，90 (5)：486-489.
- 堀 正和・高見秀輝・須藤健二・島袋寛盛 (2024)：日本周辺海域におけるアワビ資源の将来予測と適応策，令和 6 年度日本水産学会春季大会シンポジウム講演要旨.
- 木所英昭 (2024)：気候変動による回遊性魚介類の資源動態や分布海域の変化と日本の水産業における対応，地球環境，29：61-69.
- 木所英昭・笥 茂穂・増田義男・森 友彦 (2024)：第 10 回東北太平洋岸の水産業と海洋研究集会 東北太平洋岸における気候変動の水産資源への影響と解析方法，水産海洋研究，88 (2)：107-122.
- 木崎賢哉・吉松 孝宏・内野 浩二・杉浦俊彦 2024. アボカド‘ベーコン’における冬季の気温および葉温と寒害発生の関係，熱帯農業研究，17：12-17.
- 鈴木勇人・八木佑太・川内陽平・瀬藤 聡・木所英昭・矢野寿和 (2024)：東北海域における底魚資源の分布の将来予測，令和 6 年度日本水産学会春季大会シンポジウム講演要旨.
- 笥 茂穂・成松庸二 2024. 三陸沿岸における魚種変化と水産利用面の変化，地球環境，29：71-82.
- Hasegawa, T., Ishigooka, Y., Nakazono, K., Sugiura, T. and Wakatsuki, H. (2025) : Coping with Climate Change: An Evaluation of Agricultural Impacts and Adaptation in Japan. In: N. Mimura and S. Takenaka (Eds.), Climate Change Impacts and Adaptation Strategies in Japan - Integrated Research toward Climate Resilient Society. Springer-Nature, https://doi.org/10.1007/978-4-431-58000-0_10

org/10.1007/978-981-96-2436-2_4.

- Higuchi, K., Hara, K., Yamashita, M., Tsubokura, M., Sawado, R., Monaka, I., Fujimori, M., Takizawa, S., Shinkai, T., Saito, Y., Tatebayashi, R., Nishiura, A., (2024) : Projection of Climate Change Impacts for Lactating Performance of Holstein Cows in Summer Season in Japan, 2024 International Symposium on Ruminant Physiology, pp. 59.
- Ishigooka, Y., Hasegawa, T., Kuwagata, T., Nishimori, M. and Wakatsuki, H. (2021) : Revision of estimates of climate change impacts on rice yield and quality in Japan by considering the combined effects of temperature and CO₂ concentration, Journal of Agricultural Meteorology, 77 (2) : 139-149.
- Takehi, S., Kidokoro, H., Setoh, T. and Onitsuka, G. (2024) : Assessment of climate change impacts on large brown seaweed (*Undaria pinnatifida*) growth in the Sanriku coastal area, Japan, Journal of Applied Phycology. <https://doi.org/10.1007/s10811-024-03382-z>.
- Takehi, S., Narimatsu, Y., Okamura, Y., Yagura, A. and Ito, S. (2021) : Bottom temperature warming and its impact on demersal fish off the Pacific coast of northeastern Japan, Marine Ecology Progress Series, 677: 177-196.
- Kawauchi, Y., Yagi, Y., Yano, T. and Fujiwara, K. (2023) : Multi-decadal distribution changes of commercially important demersal species in the central-western Sea of Japan based on a multi-species spatiotemporal model, Regional Studies in Marine Science, 61: 102899.
- Mizumoto, A., Tanio, M., Nakazono, K., Watanabe, K., Uchino, A., Azuma, T. (2023) : Early ground rolling is highly effective in delaying spikelet initiation in early-sown spring wheat, Plant Production Science, 26 (4) : 402-410.
- Nakao, K., Tsunetaka, H. and Murakami, W. (2024) : Adaptation strategies timeline for conservation and sustainable use of forest resources under uncertainty climate change., International Union of Forest Research Organizations World Congress 2024, pp. T5.35.
- Onitsuka, G., Yoshida, G., Shimabukuro, H., Takenaka, S., Tamura, T., Takehi, S., Setou, T., Guo, X., Higashi, H. (2024) : Modeling the growth of the cultivated seaweed *Undaria pinnatifida* under climate change scenarios in the Seto Inland Sea, Japan, Journal of Applied Phycology, 36 (5) : 3077-3090.
- Sugiura, T., Fukuda, N., Tsuchida, T., Sakurai, M. and Sugiura, H. (2023) : Modeling the relationship between apple quality indices and air temperature, Horticulture Journal, 92 (4) : 424-430.
- Sugiura, T., Sugiura, H., Konno, S., Date, T., Yoshimatsu, T., and Kisaki, K. (2024a) : Assessing the expansion of suitable locations for avocado cultivation due to climate change in Japan and its suitability as a substitute for satsuma mandarins, Journal of Agricultural Meteorology, 80:111-117.
- Sugiura, T., Sugiura, H., Konno, S. and Fukuda, N. (2024b) : Model for predicting apple bloom date based on bud response experiments in controlled environments, Scientia Horticulturae, 331: 113144.
- Toriyama, J., Hashimoto, S., Nakao, K., Nishizono, T., Uchiyama, K., Araki, G. M., Hirata, Y. (2024) : Assessing climate change impacts on Japanese cedar plantations: Mitigation and adaptation
-

measures in shrinking scenarios, International Union of Forest Research Organizations World Congress 2024, pp. T5.22.

Wakatsuki, H., Takimoto, T., Ishigooka, Y., Nishimori, M., Sakata, M., Saida, N., Akagi, K., Makowski, D., Hasegawa, T. (2024) : Effectiveness of heat tolerance rice cultivars in preserving grain appearance quality under high temperatures in Japan – A meta-analysis, *Field Crops Research*, 310: 109303.

Yamanaka, T., Kishi, S. and Ochi, S. (2024) : EDM analyses for long rice pest records in Japan, XXVII International Congress of Entomology, August, 25-30, 2024, Kyoto, Japan.

Yamazaki, R. and Kawasaki, Y. (2023) : Effect of high temperature during the late seed filling period on green stem disorder in soybean. *Field Crops Research*, 302: 109092.

2. 自然生態系

2.1 研究の目的と概要

気候変動は地球規模で進行しており、その影響は生物多様性や生態系機能に広範囲に及んでいる (Lenoir et al., 2020; Piao et al., 2019; Hogan et al., 2024)。これらの変化は単に生態系内に留まらず、生態系サービスの供給を通じて人間の生活や福祉にまで波及している (Pecl et al., 2017; Scheffers et al., 2016)。国内において、陸域生態系に関しては、寒冷適応種の南限での個体群の減少 (Amagai et al., 2018; Mizunaga et al., 2005)、生物季節の変化 (Doi and Takahashi, 2010)、温暖適応種である常緑広葉樹 (Suzuki et al., 2015) や南方系チョウ類 (モニタリングサイト 1000 里地調査: https://www.biodic.go.jp/monil000/findings/reports/pdf/third_term_satoyama.pdf) の分布拡大が報告されている。またフラックスタワーを用いた観測結果から、森林の炭素収支における生産性や呼吸の変化が報告されている (Murayama et al., 2024; Sha et al., 2021)。また沿岸生態系に対する環境変化の影響として、水温上昇によるサンゴの白化や死亡、高水温と摂餌圧の増加による海藻藻場や海草藻場の衰退がよく知られており、温帯域の生態系の熱帯化の事例も数多く報告されている (Kumagai et al., 2018; 阿部ら, 2023)。

こうした気候変動などの環境変動・環境ストレスによる影響に適切に対処し、生態系サービスを持続的に享受するためには、観測による気候変動影響の検出、影響のメカニズムの理解、将来予測に基づく適応策の検討や実施が必要であり、そのためにはデータに基づく科学的な評価や検証が重要である。これらを背景に、国立環境研究所では S-18 プロジェクトと関連して、自然生態系における気候変動の影響の検出、評価、及び将来予測に基づく適応策の開発を進めてきた。本章では、これらの取り組みの中から、樹種分布の検出、森林の脆弱性評価、地域スケールでの将来予測と保全計画を中心に成果を紹介する。

2.2 樹種分布の変化の検出

樹木は、長寿命で固着性という生物学的特性から、気候変動の影響を敏感に受ける存在である (Lenoir et al., 2020)。そのため陸域生態系を支える生産者でもある樹木種の分布変化は、気候変動による生態系の変化を評価する上で重要な指標となる。そこで環境省の自然環境保全基礎調査における全国の植生調査データを用い、302 種の樹木について稚樹と母樹の分布温度差を指標とした分析を行った (Koide et al., 2022)。この手法では、稚樹が現在の暖かい気候条件下で定着したものであり、母樹は過去の寒冷な気候条件下で定着したものであるため、過去の温暖化に即して同じ種内でもサイズ間で気温分布域に差が生じていると仮定している (図 2.2.1)。この方法により、モニタリングでは数十年かかる気候変動の影響を迅速に評価することが可能である。

解析の結果、稚樹の分布が母樹に比べて寒冷方向にシフトしていることが広範に確認された (図 2.2.1) (Koide et al., 2022)。これは温暖化が進む中で、種子の発芽や稚樹の生長場所が、より寒冷な場所に進行していることを示唆している。一方で、常緑広葉樹種においては、特に島嶼地域において稚樹が暖かい方向にシフトする逆のパターンも観察された。この現象は、島嶼地域における台風などの攪乱の増加や競合種への分散制限などにより、競争圧力の減少が寄与している可能性 (Lenoir et al., 2010) が考えられる。また、種子重量の軽い樹種においては、分布の先端部

分、すなわち寒冷限界と温暖限界の両方で稚樹と母樹の分布差が大きいことが示された。これは軽い種子における高い拡散能力によって寒冷限界では稚樹の新規定着による前進を促進し、温暖限界では軽い種子における低い耐陰性によって温暖種との競争による稚樹の死亡を促進して、稚樹の寒冷シフトを起こしていると考えられる (Ettinger & Hillerislambers, 2017)。こうした植物の側の特徴（機能形質）による違いや、地域ごとの地形や攪乱要因による影響も複雑に絡み合っ、過去の樹木種における分布移動が生じていた可能性が示唆された。これらの結果は、気候変動の影響を広域的かつ迅速に把握する上で有用な知見を提供しており、将来の気候変動シナリオを基にした適応策の立案において重要な基盤を形成するものである。

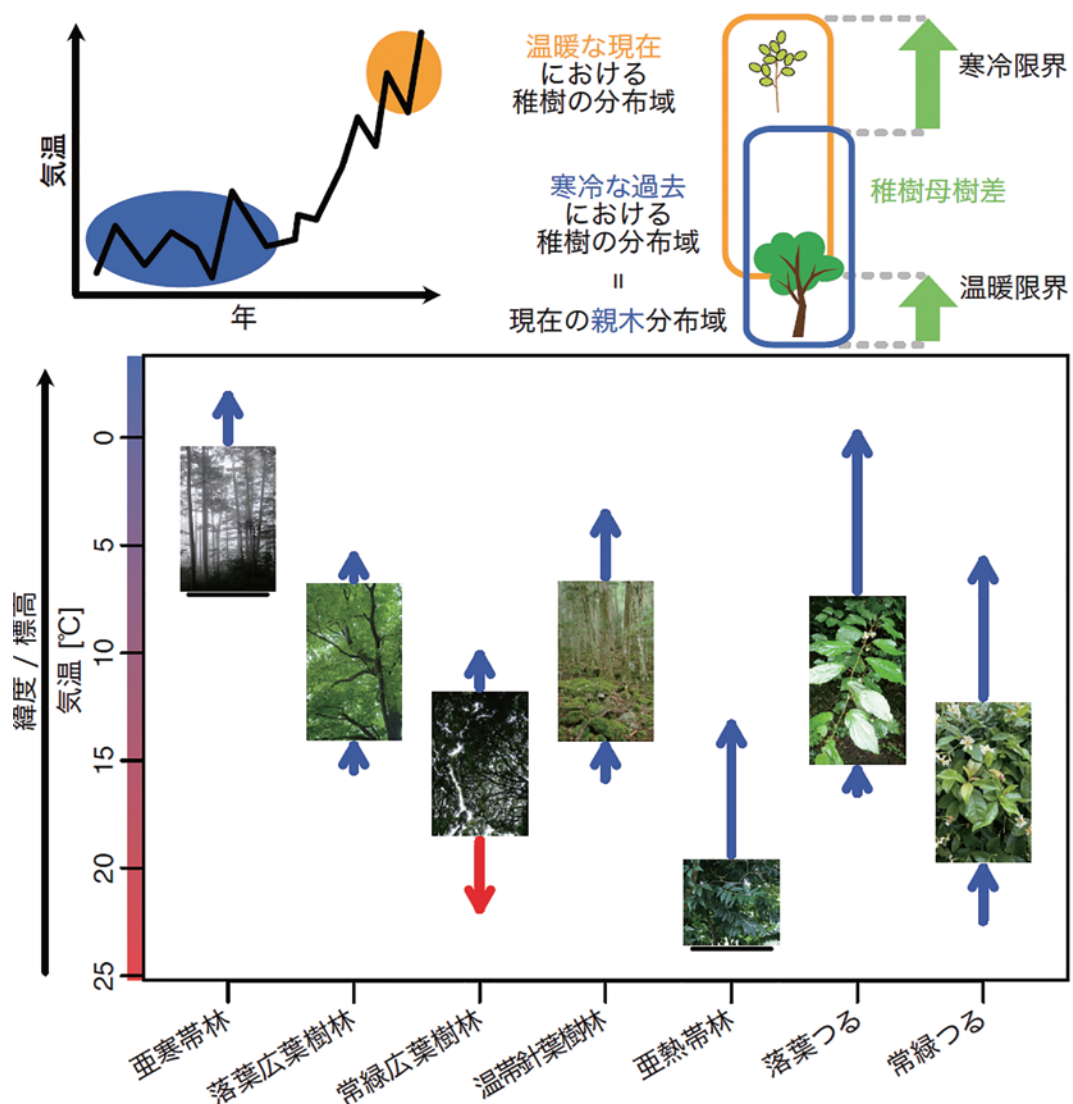


図 2.2.1 7つの森林タイプにおける稚樹と母樹の分布気温差 (出典: Koide et al., 2022 の Fig. 3 を一部改変)

写真の範囲は各森林タイプの分布する温度域を示しており、矢印・横棒は稚樹と母樹の分布気温差の有無と方向（上向き：稚樹が母樹より寒冷方向にずれる、下向き：稚樹が母樹より温暖方向にずれる）を示している。

2.3 森林樹木群落の脆弱性評価

生物多様性は、生態系の機能とサービスの根幹を支えている。特に、生態系サービスの量や種類は、異なる種が互いに補完し合う効果（補完性効果）によって向上し、また、生物多様性が高いと、多様な種が似たような機能を果たすため、重要な生態系機能を維持する冗長性効果が働く（Gamfeldt et al., 2008）。このような理由から、生物多様性の保全は気候変動の適応や生態系サービスの持続可能な利用にとって不可欠であり、気候変動によって引き起こされる生物多様性の脆弱性評価が必要である（Hong et al., 2022）。

しかし将来の分布予測に基づく脆弱性評価では、多くの不確実性が伴う。気候モデルや種分布モデル（SDMs）を用いた予測には、モデルによる違いを将来予測の不確実性として表現するために複数のシナリオを使用することが一般的となっている。しかし比較的高い不確実性を持つ自然環境分野においては、これらの予測結果がシナリオによって大きく異なることが多いため、研究者や関係者が最適な計画を選定する際に支障をきたすことがある。どのシナリオの結果を最もらしいものとして適応計画を立案するかによって、取りうる適応策は大きく異なってしまうためである。この課題を解決するため、Info-gap 理論が注目されている。この理論は、最初に目標とする自然または社会システムのパフォーマンスを設定し、その後、目標を維持するための受け入れ可能な不確実性の範囲を特定する方法を取る（Johnson & Geldner, 2019; Yokomizo et al., 2014）。このフレームワークを適用することで、システムの脆弱性（目標とするパフォーマンスを維持する上でどれくらいの温暖化を許容できるか）を定量的に評価することが可能となり、具体的な適応戦略を立案する際に有用と考えられる。

そこで日本のモニタリングサイト 1000 による毎木調査プロットのデータを活用して森林樹木群落の脆弱性評価を行った結果、森林タイプやプロットによって温暖化に対する種多様性の減少程度が異なることが確認された（Yoshikawa et al., 2023）。特に常緑広葉樹林は、将来的な温暖化による種数の減少が最も大きいことが予測された。また温帯針葉樹林は、温暖化に対して比較的高い脆弱性（さらなる温暖化により大きく種数が減少する可能性）を示した。プロットによる脆弱性の違いについては、そのプロットに含まれる暖地性・寒地生の種の多さや割合の違いによって引き起こされていると考えられ、場所による種組成の違いやその生態的特徴の把握が重要と考えられる。またこの論文では便宜的に 10、25、50% の種数の減少を許容できる種多様性の減少として設定したが、この目標とする種多様性の設定の仕方については科学的にも社会的合意形成の政治プロセス的にも今後更なる検討が必要と考えられる。このようなアプローチにより脆弱性を評価すれば、生態系の回復力を将来世代でも維持することができるため、今後の気候変動適応戦略を構築する上で重要な評価手法になると考えられる。

2.4 大雪山国立公園における高山植生の将来予測と保全計画

高山植生の保全計画には、地域ごとに 1km^2 以下などの細かい解像度において予測が必要である。しかし、 1km^2 解像度での種の在 / 不在データを用いた従来の方法では、種の分布を二項的に捉えるため、実際の生態的状态（例：健全な個体群、地域絶滅寸前、たまたま出現など）を十分に反映していない。また希少種の場合、そもそも分布データ自体が限られており、妥当な分布モデルの構築が困難な問題もある。この問題に対処するため、種の在 / 不在データに代わって、植生被覆面積を応答変数として使用し、大雪山における高山植生の分布確率とその将来変化を予

測した (Amagai et al., 2022)。その結果、大雪山地域の高山植生は、気候変動によって温暖化が進むと、特に RCP8.5 シナリオ下で、亜寒帯針葉樹林に置き換わる可能性が高いことが示された。ミヤマキンポウゲやミヤマクロスゲ、ツルコケモモなどを含む雪田植生や、コマクサ、コメバツガザクラ、エゾマメヤナギなどを含む高山荒原は特に脆弱であり、RCP2.6 シナリオでも大きく減少し、少数の生息地を残すのみとなることが予測された。

また実際の保全のための処置を実行に移す際には、いくつか考慮すべき条件が存在する。複数の保全目標（希少種や対象の植生など）を同時に効率的に達成できる場所の優先や、処置によっては反対に他方の保全目標に有害となる場合（例：希少種を保全するためにはその希少種を用いたエコツーリズムを制限する必要がある場合など）もある。さらに処置をする場所へのアクセスの良さや、コストの面も考慮すべきである。これらの保全実行時の問題を解決するため、ここでは保護区選択ツールである SecSel モデルを用いて大雪山の高山植物の保全優先場所の選定を行った (Takenaka et al., 2021)。SecSel モデルは事前に設定された保全目標（植生面積を想定）を満たすため、異なる保全目標間の競合を定量的に分析し、各地点での優先順位を最適化して最適な場所を選択するツールである。その結果、北部と南部の雪田群落・高山荒原植生を優先する必要が示され、次いで中部の個体群が優先されたが、アクセス性（登山道からの距離）を考慮すると、北部と南部のみに集中した方が良いことが示された。SecSel モデルはこうした現実的な提案を可能にし、担当官やステークホルダーと共同して地域計画の立案・実行・再考する際に有用なツールと言える。

2.5 地域気候変動適応計画における沿岸生態系（サンゴ、大型海藻、海草）に関する記述と適応策の位置づけ

日本近海は緯度帯が広いとともに、黒潮や親潮などの海流の影響を受けるため、生物多様性が高いことが知られている。同時に、緯度（海面水温）による沿岸生態系・水中景観の南北勾配が顕著である（図 2.5.1）。サンゴは日本周辺の亜熱帯から温帯に分布し、海藻や海草は国内のほぼ全域に分布している。日本における海洋環境や生態系は地域差が大きいいため、各地域で個別に気候変動等の影響を把握する必要がある。本節では、海に面した 39 都道府県の行政文書を解析することにより、日本のサンゴ礁（温帯サンゴ群集を含む）、海藻藻場、海草藻場の現状と気候変動適応に向けた課題を議論した。具体的には、各都道府県の地域気候変動適応計画等におけるサ

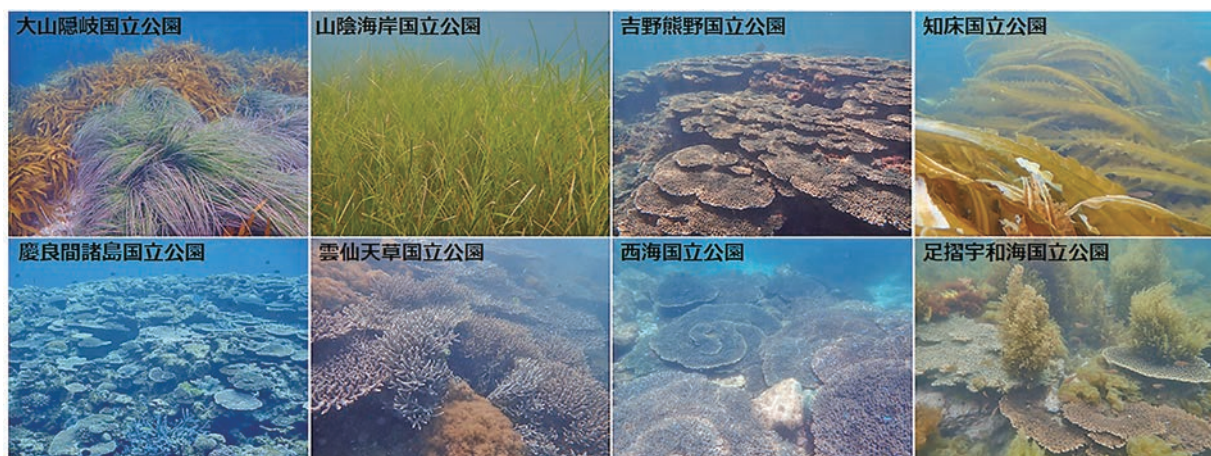


図 2.5.1 国内の沿岸域における造礁サンゴ、大型海藻、海草類の成育状況の一例

ンゴ、海藻、海草に関する記載状況を整理し、各地域における適応策の検討・推進に関する課題を検討した。

サンゴ、大型藻類、海草に関連するキーワードの出現頻度は、都道府県間、キーワード間で顕著な違いが見られた。例えば、サンゴの白化については高知県と沖縄県以外ではほとんど記述がなかった。一方、鹿児島県の南西諸島には沖縄と同様にサンゴ礁が形成されているが、鹿児島県ではサンゴに関する記述はなかった。また北海道ではコンブ林が広く形成され、重要な水産資源となっているが、適応計画では言及されていない。過去または将来の変化や影響については、生物多様性、漁業、二酸化炭素の吸収・隔離（ブルーカーボン）の観点からの記述が多かった。観光産業の観点からの記述は少なかったが、千葉ではサンゴ分布の北上による観光への影響の可能性が指摘されていた。気候変動はサンゴや大型藻類、海草類の分布に大きな変化をもたらすと予測され（阿部ら、2022）、従来の保全や利用方法の変更が必要となる。しかし、沿岸生態系の変化や価値に対する地元の利害関係者の認識は、地域や産業によって異なる可能性がある（Abe et al., 2022b）。したがって、気候変動による沿岸域の生態系の変化に対して、漁業だけでなく観光業の観点からも必要な対策を検討・推進する必要がある（Abe et al., 2021）。さらに、地域の生態系の実態を適応計画等に適切に反映させることが課題である（Abe et al., 2022a）。

気候変動適応策を推進する上での課題は地域によって異なる（Fujita et al., 2023）。また、科学的知見を行政文書に反映させ、地域のステークホルダーに還元するには多くの課題が残る。気候変動適応の推進には、環境・生態系のモニタリングや気候変動影響評価と並行して、社会的科学的アプローチを実施することが不可欠である。

2.6 結論

ここでは、国立環境研究所による気候変動適応研究プログラムの自然生態系分野で得られた成果を要約した。これらの研究結果は、過去から将来にかけての気候変動の中で、様々な条件やメカニズムの影響を受けて地域や生物種によって多岐にわたる変化が生じていることを示した。また現行のモデルに基づく将来予測には、現場におけるメカニズム理解の不十分さや予測された不確実性への対処方法の欠如から、ある程度の不完全さや意思決定時の使いにくさが残っていた。しかしそうした課題も、不安定な要素に対処するフレームワークを利用することで、より良い意思決定を可能にできることを示唆している。本報告が、国内外の自然生態系における気候変動適応の普及啓発と立案・実行まで広く貢献し、さらに他の地域や研究分野にも刺激を与え、気候変動適応の一般化に向けた次のステップへとつながることを期待する。

参考文献

- Abe H., Kitano Y.F., Fujita T., Yamano H. (2022a) : Distribution, use, management, regulation, and future concerns of reef-building corals based on administrative documents in Japan, *Marine Policy*, 141, pp. 105090. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.105090>
- 阿部博哉・熊谷直喜・山野博哉 (2023) : 国立公園における沿岸生態系の気候変動影響と適応策, *地球環境*, 28 (1), pp. 95-102.
- Abe H., Mitsui S., Yamano H. (2022b) : Conservation of the coral community and local stakeholders' perceptions of climate change impacts: Examples and gap analysis in three
-

- Japanese national parks, *Ocean and Coastal Management*, 218, pp. 106042. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2022.106042>
- 阿部博哉・三ツ井聡美・山野博哉 (2022) : 国立公園における造礁サンゴ・大型海藻・海草の管理と利用 : 気候変動への適応策検討に向けた課題の抽出, *保全生態学研究*, 27, pp. 1-19. <https://doi.org/10.18960/hozen.2120>
- Abe H., Suzuki H., Kitano Y.F., Kumagai N.H., Mitsui S., Yamano H. (2021) : Climate-induced species range shift and local adaptation strategies in a temperate marine protected area, Ashizuri-Uwakai National Park, Shikoku Island, western Japan, *Ocean and Coastal Management*, 210, pp. 105744. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105744>.
- Amagai Y., Kudo G., Sato K. (2018) : Changes in alpine plant communities under climate change: Dynamics of snow-meadow vegetation in northern Japan over the last 40 years, *Applied Vegetation Science*, 21 (4), pp. 561-571. <https://doi.org/10.1111/avsc.12387>
- Amagai Y., Oguma H., Ishihama F. (2022) : Predicted scarcity of suitable habitat for alpine plant communities in northern Japan under climate change. *Applied Vegetation Science*, 25 (4), pp. e12694. <https://doi.org/10.1111/avsc.12694>
- Doi H., Takahashi M. (2010) : Macro-scale investigation of climate change effect on plant phenological timings using the phenological dataset of Japan Metrological Agency, *Japanese Journal of Ecology*, 60, pp. 241-247. https://doi.org/10.18960/seitai.60.2_241
- Ettinger A., Hillerislambers J. (2017) : Competition and facilitation may lead to asymmetric range shift dynamics with climate change, *Global Change Biology*, 23 (9), pp. 3921-3933. <https://doi.org/10.1111/gcb.13649>
- Fujita T., Mameno K., Kubo T., Masago Y., Hijioka Y. (2023) : Unraveling the challenges of Japanese local climate change adaptation centers: A discussion and analysis, *Climate Risk Management* 39, pp. 100489. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2023.100489>
- Gamfeldt L., Hillebrand H., Jonsson P.R. (2008) : Multiple functions increase the importance of biodiversity for overall ecosystem functioning, *Ecology*, 89 (5), pp. 1223-1231. <https://doi.org/10.1890/06-2091.1>
- Hogan A., Domke G.M., Zhu K., Johnson D.J., Lichstein J.W. (2024) : Climate change determines the sign of productivity trends in US forests, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 121 (4), pp. e2311132121. <https://doi.org/10.1073/pnas.2311132121>
- Hong P.B., Schmid B., De Laender F., Eisenhauer N., Zhang X.W., Chen H.Z. Wang S.P. (2022) : Biodiversity promotes ecosystem functioning despite environmental change, *Ecology Letters*, 25 (2), pp. 555-569. <https://doi.org/10.1111/ele.13936>
- Ishizaki N.N., Nishimori M., Iizumi T., Shiogama H., Hanasaki N., Takahashi K. (2020) : Evaluation of Two Bias-Correction Methods for Gridded Climate Scenarios over Japan, *SOLA*, 16, pp. 80-85. <https://doi.org/10.2151/sola.2020-014>
- Johnson D.R., Geldner N.B. (2019) : Contemporary Decision Methods for Agricultural, Environmental, and Resource Management and Policy, *Annual Review of Resource Economics*, 11, pp. 19-41. <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100518-094020>
- Koide D., Yoshikawa T., Ishihama F., Kadoya T. (2022) : Complex range shifts among forest

- functional types under the contemporary warming, *Global Change Biology*, 28 (4), pp. 1477-1492. <https://doi.org/10.1111/gcb.16001>
- Kumagai N.H., García Molinos J., Yamano H., Takao S., Fujii M., Yamanaka Y. (2018) : Ocean currents and herbivory drive macroalgae-to-coral community shift under climate warming, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115, pp. 8990-8995. <https://doi.org/10.1073/pnas.1716826115>
- Lenoir J., Gégout J.C., Guisan A., Vittoz P., Wohlgemuth T., Zimmermann N.E., Dullinger S., Pauli H., Willner W., Svenning J.C. (2010) : Going against the flow: potential mechanisms for unexpected downslope range shifts in a warming climate, *Ecography*, 2005, pp. 295-303.
- Lenoir J., Bertrand R., Comte L., Bourgeaud L., Hattab T., Muriénne J., Grenouillet G. (2020) : Species better track climate warming in the oceans than on land, *Nature Ecology & Evolution*, 4 (8), pp. 1044-1059. <https://doi.org/10.1038/s41559-020-1198-2>
- Mizunaga H., Sako S., Nakao Y., Shimono Y. (2005) : Factors affecting the dynamics of the population of *Fagus crenata* in the Takakuma Mountains, the southern limit of its distribution area, *Journal of Forest Research*, 10, pp. 481-486. <https://doi.org/10.1007/s10310-005-0165-8>
- Murayama S., Kondo H., Ishidoya S., Maeda T., Saigusa N., Yamamoto S., Kamezaki K., Muraoka H. (2024) : Interannual Variation and Trend of Carbon Budget Observed for More Than Two Decades at Takayama in a Cool-Temperate Deciduous Forest in Central Japan, *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 129 (6), pp. e2023JG007769. <https://doi.org/10.1029/2023JG007769>
- Pecl G.T., Araújo M.B., Bell J.D., Blanchard J., Bonebrake T.C., Chen I.C., Clark T.D., Colwell R.K., Danielsen F., Evengård B., Falconi L., Ferrier S., Frusher S., Garcia R.A., Griffis R.B., Hobday A.J., Janion-Scheepers C., Jarzyna M.A., Jennings S., Lenoir J., Linnetved H.I., Martin V.Y., McCormack P.C., McDonald J., Mitchell N.J., Mustonen T., Pandolfi J.M., Pettorelli N., Popova E., Robinson S.A., Scheffers B.R., Shaw J.D., Sorte C.J., Strugnell J.M., Sunday J.M., Tuanmu M.N., Vergés A., Villanueva C., Wernberg T., Wapstra E., Williams S.E. (2017) : Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being, *Science*, 355 (6332), pp. eaai9214. <https://doi.org/10.1126/science.aai9214>
- Piao S.L., Liu Q., Chen A.P., Janssens I.A., Fu Y.S., Dai J.H., Liu L., Lian X., Shen M., Zhu X. (2019) : Plant phenology and global climate change: Current progresses and challenges. *Global Change Biology*, 25 (6), pp. 1922-1940. <https://doi.org/10.1111/gcb.14619>
- Scheffers B.R., De Meester L., Bridge T.C., Hoffmann A.A., Pandolfi J.M., Corlett R.T., Butchart S.H., Pearce-Kelly P., Kovacs K.M., Dudgeon D., Pacifici M., Rondinini C., Foden W.B., Martin T.G., Mora C., Bickford D., Watson J.E. (2016) : The broad footprint of climate change from genes to biomes to people, *Science*, 354 (6313), pp. aaf7671. <https://doi.org/10.1126/science.aaf7671>
- Sha L.Q., Teramoto M., Noh N.J., Hashimoto S., Yang M., Sanwangsri M., Liang N.S. (2021) : Soil carbon flux research in the Asian region: Review and future perspectives, *Journal of Agricultural Meteorology*, 77 (1), pp. 24-51. <https://doi.org/10.2480/agrmet.D-20-00013>
- Suzuki S.N., Ishihara M.I., Hidaka A. (2015) : Regional-scale directional changes in abundance of

- tree species along a temperature gradient in Japan, *Global Change Biology*, 21 (9), pp. 3436-3444. <https://doi.org/10.1111/gcb.12911>
- Takenaka A., Oguma H., Amagai Y., Ishihama F. (2021) : SecSel, a new software tool for conservation prioritization that is applicable to ordinal-scale data for multiple biodiversity features, *PLoS ONE*, 16 (7), pp. e0247737. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0247737>
- Yokomizo H., Coutts S.R., Possingham H.P. (2014) : Decision science for effective management of populations subject to stochasticity and imperfect knowledge. *Population Ecology*, 56 (1), pp. 41-53. <https://doi.org/10.1007/s10144-013-0421-2>
- Yoshikawa T., Koide D., Yokomizo H., Kim J.Y., Kadoya T. (2023) : Assessing ecosystem vulnerability under severe uncertainty of global climate change, *Scientific Reports*, 13 (1), pp. 5932. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-31597-6>

3. 水資源

3.1 はじめに

気候変動適応法により、地方自治体が地域の特性に応じた適応計画を策定することを求められている。地域に現れる気候変動の影響は、いくつかの分野に対する影響が関係する。そのため、影響予測に際しては、ある分野に現れる影響が他の分野におよぼす複合的な影響についても考慮する必要がある。本章では、気候変動による気温、降水、積雪・融雪過程の変化が日本の水資源に及ぼす影響を全国の河川流出モデルと将来の気候変動シナリオによって評価するとともに、気候変動等に伴って生じる農業の水利用時期の変化が水需給へおよぼす影響についても検討を行った。

水稻の生産は、その生育期間に大量の河川水を利用するため、地域の用水不足の発生リスクと強く関係する。高温による農作物に対する直接的な影響を緩和するために、水管理、肥料管理、移植日の変更、作物品種の切り替え、農業保険など、さまざまな適応策が提案されている。その中でも、水稻の移植日変更は比較的实施しやすく、また有効性も確認されているため、多くの地域で実施されている。気候変動による水資源量の変化に加え、高温障害を避けるために水稻の生育期間が変わると、地域の用水需給バランスに複雑な影響が生じて、計画の想定を超えるような水不足が発生する可能性がある。

このような複合的なリスクを評価するため、本章では、地域に生じるリスクと便益の関係を評価し、適応策の実施が便益向上とリスク低下に繋がる「調和型」と、便益向上がリスク増大に繋がる「競合型」に大別する枠組みを構築する。次いで、将来気候下で便益を最大化させたときに競合型の関係が生じうる地域を明らかにするとともに、多目的最適化に基づくパレート解の提示手法を示す。競合型のようにトレードオフ関係が存在する場合の合理的解であるパレート解の提示は、ハード的な対策のみにとどまらない地域適応計画策定の鍵になる。本プロジェクトでの水資源評価では、気候変動による直接的な影響に留まらず、間接的な影響についても考慮した影響評価を全国で行い、適応策の策定に向けた課題・提言をまとめた。

3.2 日本の水資源・水需給バランスに対する影響評価

水資源の評価モデルは、流域の河川を 1km の格子（グリッドセル）上に表現することにより、各グリッドセルにおける河川流量を計算する。さらに、貯水池や河川からの取水施設、大規模な灌漑水路等の水利施設をグリッドセル上に配置し、それぞれの施設の運用方法をモデル化することにより、人間活動による水利用を表現することができる。この評価モデルに、将来の気候変動シナリオとして第 6 期結合モデル相互比較プロジェクト（CMIP6）から 5 つの全球気候モデル（MIROC6, MRI-ESM2-0, ACCESS-CM2, IPSL-CM6A-LR, MPI-ESM1-2-HR）を抽出し、3 つの排出シナリオ（RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5）による 2015 ～ 2050 年の結果を比較した（高田ら、2024）。

日本における渇水は農業水利用が卓越する夏季に主に発生することから、灌漑期間を評価対象とした。各地域の灌漑期間は、作物統計（農林水産省が毎年発行）から、各河川流域における 2000 年の田植え最盛期と出穂最盛期の日付を調べ、田植え最盛期の 14 日前から出穂最盛期の 30 日後までとして設定した。次に、全球気候モデルの過去再現実験（ここでは 1980 ～ 2014 年）を

用いた水資源評価モデルの計算結果から、灌漑期間における河川流量の3% タイル値（下位3%に相当する値）を渇水基準値とした。さらに、将来実験における計算値が、この渇水基準値を下回った量の累積値（以下、累積不足量）を年別に算出した。累積不足量は、流域の水需要に対して供給量が下回るリスクを定量化した指標であり、開発すべき水資源量や節水等によって確保すべき水量の目安として利用できる。個別の流域での評価を行う場合、渇水基準値として河川管理上定められた値（正常流量等）を使うことにより、より現実的な評価につなげることができる。

その結果、RCP2.6 では累積不足量の増加、減少には明確な傾向がみられなかったが、RCP4.5 と RCP8.5 では多くの流域で累積不足量の増加傾向が観察された（図 3.2.1）。地域的な傾向としては、東北南部、関東、近畿、中国の太平洋岸において水需給が悪化する傾向にあることが確認できた。

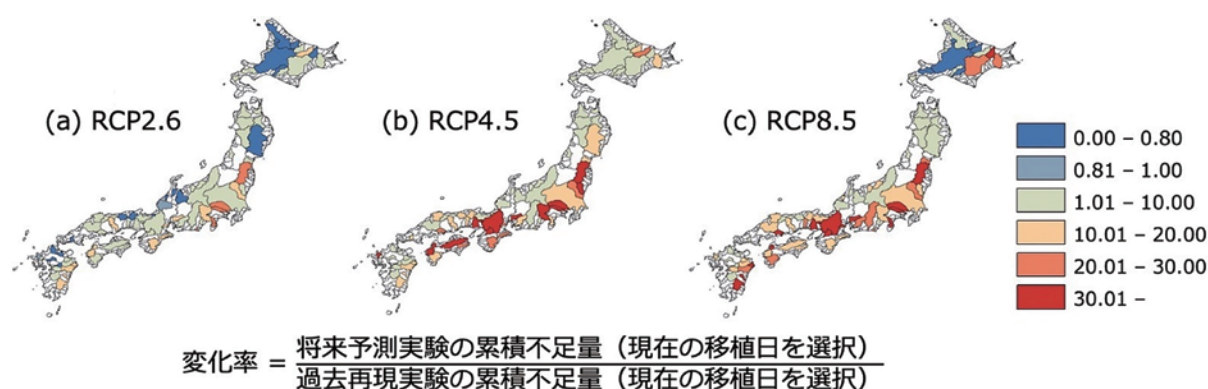


図 3.2.1 (a) RCP2.6、(b) RCP4.5、(c) RCP8.5 における累積不足量の変化率（過去再現実験 [1980-2014] に対する将来予測実験 [2015-2050] の変化）（高田ら，2024）

3.3 適応策・適応効果

3.3.1 全国評価

3.1 で示した水資源評価と共通する気候変動シナリオにより水稻の収量・品質評価モデルを実行し、将来における水稻の移植時期の変化の影響を考慮した評価を行った。ここでは、気候変動シナリオ（2015～2050年）の下で収量が最大となるよう移植時期を選択した場合の水資源の累積不足量の変化率を示す（図 3.3.1）。図中の暖色系は移植日の変化によって累積不足量が増加する流域を、寒色系は減少する流域を示す。これらの結果から、河川の水利用の大半を占める農業水利用の時期は、流域の水需給に大きな影響を及ぼすことが読み取れる。また、地域的な傾向をみると、太平洋岸の流域では収量を最大化させることにより水需給バランスが悪化する一方で、北陸・東北地方の流域ではやや改善する傾向にあることが示された。

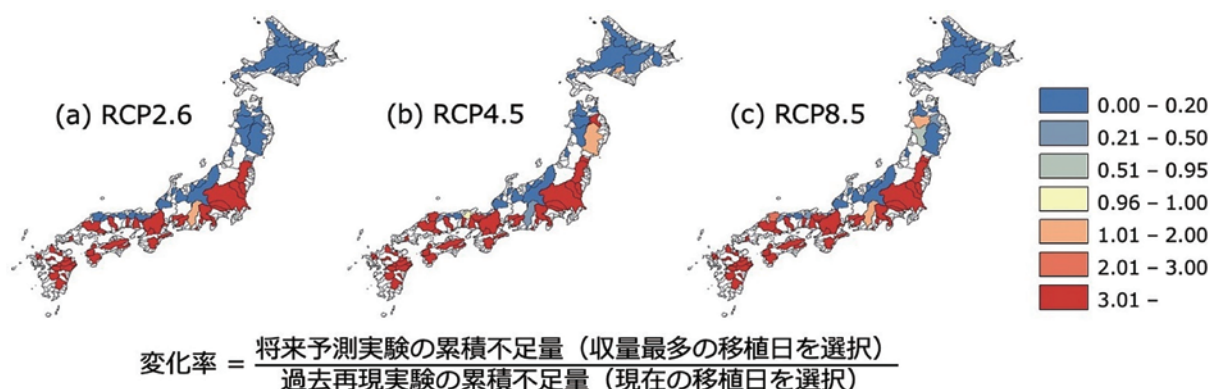


図 3.3.1 水稻の収量が最多となる移植日を選択した場合の (a) RCP2.6、(b) RCP4.5、(c) RCP8.5 における累積不足量の変化率（将来予測実験 [2015-2050] において、水稻移植日のみを変化させた際の累積不足量の変化を示す）（高田ら，2024）

3.3.2 信濃川流域における水需給バランス

将来における水稻の移植時期の変化は、必ずしも収量を最大化するように変化しない。典型的な農業水利用が卓越した流域である信濃川において、コメの生産利益を収量と高温障害によって損なわれる外観品質という 2 つの指標を用い、より詳細な検討を行った（Takada et al., 2024）。図 3.3.2 に信濃川流域が位置する新潟県中越地域における、水稻移植日の経年変化を示す。同地域における水稻移植日は統計開始の 1953 年から一貫して早期化し、1998 年には約一ヶ月早くなった。しかし、2000 年代になると徐々に晩期化する傾向にあり、現在までにおよそ 10 日遅くなった。これは 2000 年に水稻の高温障害への対策として移植日の晩期化が実施されたこと、経営規模拡大により移植期間が長期化していることによると考えられる。

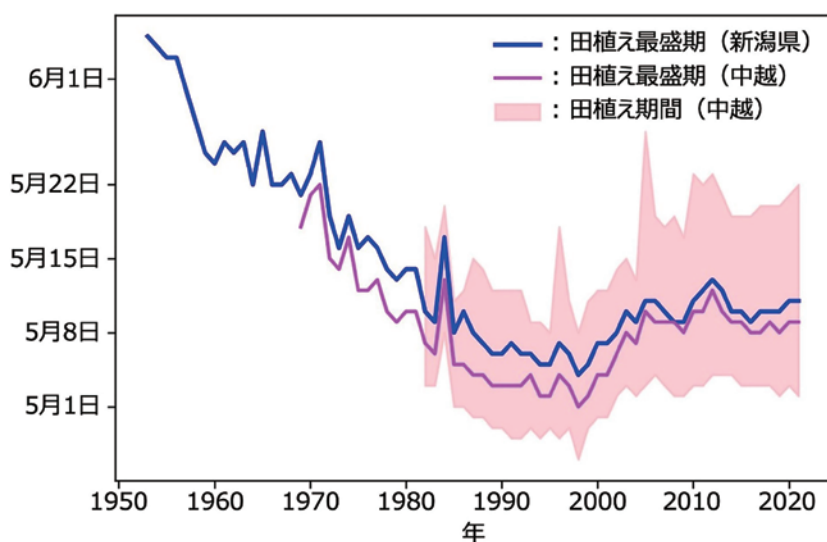


図 3.3.2 新潟県中越地域における水稻移植日の経年変化（青線：新潟県の平均、赤線：中越地域における平均、ピンク：移植日初期から周期までの期間）（Takada et al., 2024）

高温障害への適応策として、こうした移植日の変化が将来も継続した場合に、水需給バランスに及ぼす影響を評価した。水稻の外観品質については、暑熱ストレス指数（高温による白未熟粒の発生に伴う品質劣化の可能性）が最も低いクラスの収量（以下、クラス A 収量）で評価した。

移植日を現在のそれから前後5週まで一週間ごとに変更した11ケースを設定し、コメの生産利益（収量）と水資源の累積不足量を算定した。コメの生産利益を横軸に、水資源の累積不足量を縦軸にプロットすると、水稻の生育期間の変更が便益向上とリスク低下に繋がる「調和型」（右下がりのプロット）と、便益向上がリスク増大に繋がる「競合型」（右上がりのプロット）に大別される（図 3.3.3）。

信濃川下流域では近年の夏季の高温を背景に、水稻の外観品質の低下を回避するため、生育期間を10日程度遅らせている（図 3.3.2）。図 3.3.3 に示したコメの生産利益と水資源の累積不足量のプロットでは、コメの生産利益として総収量をとった場合には右下がり（同図（a））、クラス A 収量をとった場合には右上がり（同図（b））の関係性を示した。将来も外観品質が重視されると仮定し、外観品質が高いコメの収量を便益の指標とすると、リスクと便益の関係は競合型になる。すなわち、水稻の外観品質を重視して移植日を決定した場合には水需給バランスが悪化するため、河川管理の面からは望ましくないことを示唆する。農業用水の取水量や期間は、概ね10年に一回、河川管理者との協議により決定される。水需給バランスの悪化するような水稻生育期間への要望が高まることは、こうした用水計画に関する河川協議に対して影響をおよぼし、水稻生産者が希望する時期に十分な取水量を確保できなくなるリスクに繋がる可能性がある。

気候変動に対する適応策は存在するが、社会的・制度的・財政的などの人為的な制約により十分な適応が行えない状況を、IPCC では「ソフトな適応限界」と定義し、絶対的な適応限界（ハードな適応限界）と区別している。水稻生産と密接に関係する水資源との競合関係によって生じる適応の限界は、ソフトな適応限界のひとつと位置づけられる。こうした競合型の地域では、高温耐性品種の導入、ほ場や水利施設等のハード的な整備、水源対策等を組み合わせた気候変動適応計画の検討が進める必要があることを意味する。

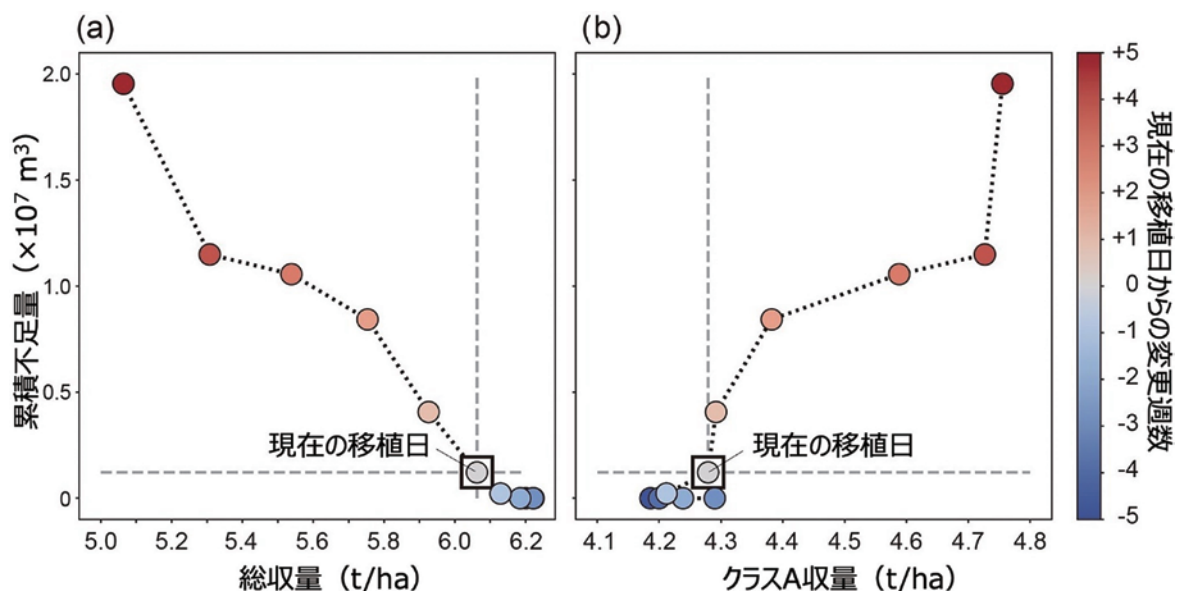


図 3.3.3 信濃川流域におけるコメの生産利益（(a) 総収量、(b) クラス A 収量）と水資源の累積不足量の関係（Takada et al., 2024）

3.4 トレードオフを考慮した気候変動適応の提示：多目的最適化の応用

本節では前節で示されたような適応策を選択するにあたり、複数の目的にトレードオフ関係が存在する場合の適応策について多目的最適化を利用した研究の成果を報告する。

多目的最適化は複数の目的関数（便益）を同時に最適化する解を探索する手法である。これらの目的が互いにトレードオフの関係にある場合には、全てを同時に最適化するユニークな解は存在せず、その代わりに、パレートフロントと呼ばれる解集合が求められる。たとえば、次の2つの目的がある自動車の設計を考える：1) 燃費を良くする、2) 性能を向上させる（例えば、加速性能を上げる）。通常、燃費を良くすると軽量化などが必要で、性能が低下する一方、性能を向上させるためにエンジンを大きくすると燃費が悪化する。このような目的が互いにトレードオフの関係にある場合に多目的最適化の手法が役立つ。パレートフロントは、多目的最適化で得られる次の2つの条件を満たすパレート解の集合である：1) 他の解によって支配されない、2) 少なくとも1つの目的において他の解を上回る。ここで、ある解 A が解 B によって支配されるとは、B がすべての目的において A 以上であること、すなわちパレートフロント上の解はそれ以上、他の解によって改善される余地がないものと定義される。パレートフロント上にない解は劣解と呼ばれる。

以上のように意思決定者はパレート解の中から、自身の優先順位に応じて最適な選択ができる。例えば、水資源が特に不足する地域ではより水使用量の少ない解を、生産性を重視する地域では生産量の多い解を選択できるなど、ステークホルダー間の合意形成を支援する客観的な材料を提供する。ひいては気候変動適応問題における「妥協の限界」（前節で示されたソフトな適応限界に相当）を提示し、最適な解を見つけるための出発点となり得る。

気候変動影響を推計するために本研究で利用したモデルは、前節の研究で利用された河川水資源量の影響評価モデルとほぼ同じ構造を持つが、水稻の生育・生長段階ごとに必要な水資源量をオンラインで推計するとともに最終収量を推計するサブモデルが組み込まれている（Okada et al. 2018; 岡田ら 2021）。さらに、クラス A 米比率の推計には Masutomi et al. (2019) のモデルを実装している。信濃川流域を対象としてこのモデルに気候変動シナリオを入力するとともに、田植日を現行からシフトさせて、3つのモデル出力（米生産量、クラス A 米比率および栽培期間の要求水量）に対して多目的最適化を適用・分析した。前節でも示されたように農家の視点では米生産量とクラス A 米比率を最大化することが望ましく、一方、他セクターとの水資源共有の観点から栽培期間の要求水量は少ない方が望ましいが、それらはトレードオフの関係にある。その状況下での最適解であるパレートフロントを分析した。

図 3.4.1 は気候変動環境下におけるモデル出力値（米生産量、クラス A 米比率および栽培期間の要求水量）を表す 3 次元空間上の点を農家の視点である米生産量とクラス A 米比率の 2 次元平面上に射影したものである。図より 2050 年代では RCP2.6-SSP1 と RCP8.5-SSP5 の違いは大きくなく、パレートフロントはクラス A 米比率が 0.9 付近にある。米生産量は田植日の早期化あるいは遅延化で異なり、要求水量は生産量と正の相関がある。すなわち田植日を早期化した場合に要求水量は多くなり生産量も増加するが、逆に田植日を遅延化した場合に要求水量は少なくなるが生産量は減少する。この場合、パレートフロントはある程度広く広がっている。一方、2090 年代では気候変動シナリオ間の差は大きく、とりわけ RCP8.5-SSP5 ではクラス A 米比率が大きく低下する。この状況でのパレートフロントは田植日の早期化による生産量、クラス A 米

比率の最大化で要求水量も最大となる場合で、選択肢は極めて限られることが示された。気候変化が大きいほど最適解の分布域は狭まると示唆される。

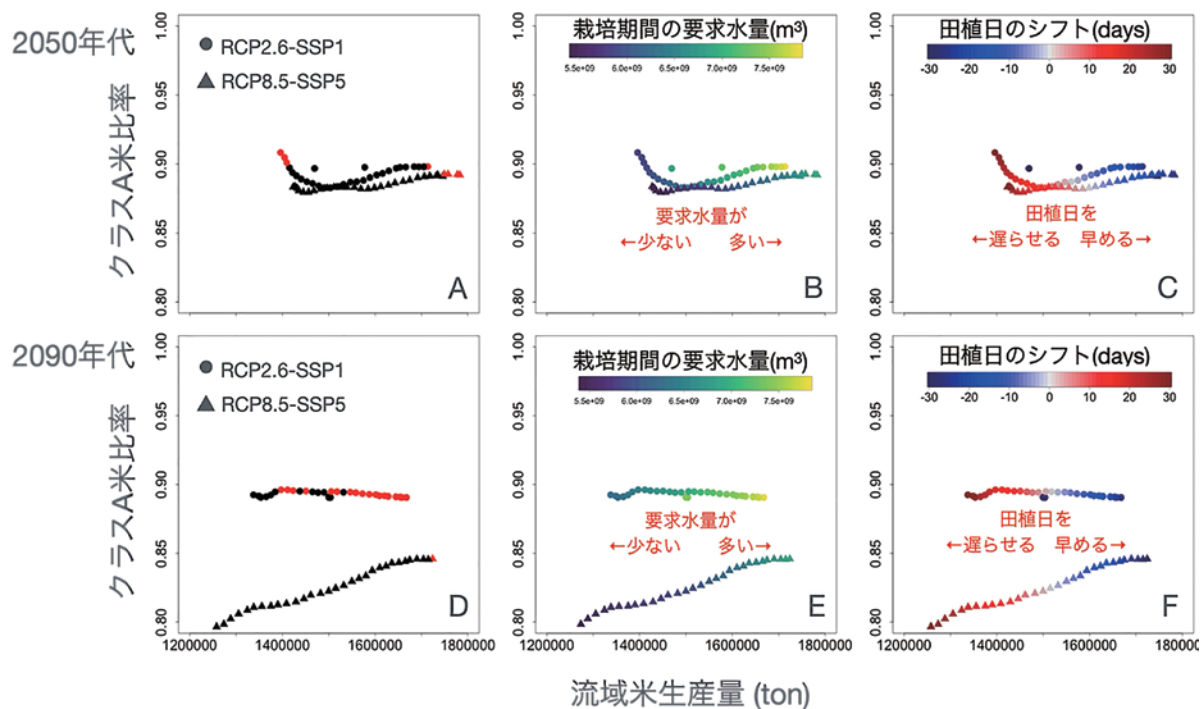


図 3.4.1 河川水資源評価モデルによる田植日をシフトさせる適応策をとった場合の気候変動影響の推計結果と多目的最適化

モデルの出力値（米生産量、クラス A 米比率および栽培期間の要求水量）を表す 3 次元の点を米生産量とクラス A 米比率の 2 次元平面に射影した。気候変動シナリオは MIROC6, RCP2.6-SSP1 および RCP8.5-SSP5 である。A と D：赤のプロットがパレートフロントを示し、その他の点は最適ではない劣解を示す。B と E：各プロットにおける栽培期間の要求水量をカラーで示す。C と F：各プロットにおける田植日シフト日数をカラーで示す。2050 年代の RCP2.6-SSP1 シナリオでは、田植日：遅延、要求水量：少、生産量：少の場合と田植日：早期、要求水量：多、生産量：多の場合にパレートフロントが分かれて分布する。RCP8.5-SSP5 シナリオでは田植日：早期化、要求水量：多、生産量：多の場合付近にパレートフロントが位置する。2090 年代の RCP2.6-SSP1 シナリオでは、田植日、要求水量、生産量の広い範囲にパレート解が位置する。RCP8.5-SSP5 シナリオでは、田植日：最早期、要求水量：最多、生産量：最多の限られた場合がパレート解になる。

3.5 適応への課題と提言

気候変動に対する適応策を策定する場合、ある側面だけに着目して適応策を実施するのではなく、地域における影響を総合的に考慮した対策が必要となる。信濃川流域で示された事例は、水稻の品質のみを重視して適応策（水稻移植日の晩期化）を進めた場合、水需給バランスに悪影響が出ること、また一方で、水需給バランスのみを考慮して農業の水利用時期を設定した場合、農業者の収益が損なわれる可能性があることを示唆している。

本プロジェクトによって提案した枠組みは、水稻生産と流域の水需給バランスという関係にお

いて直面する可能性のあるソフトな適応限界を予測することに成功した。またこの枠組みは、ソフトな適応限界の発生の予測に加え、農業生産・水資源の両面を考慮して持続的な社会を構築するためのツールとして利用でき、灌漑施設の改修やほ場整備等のハード的な整備による、水資源の効率的な配分がもたらす効果を評価できる。また、経営規模拡大による水稻品種や移植日の分散が、コメの収益のみならず水資源に及ぼす効果も評価できる。それらの評価結果に基づき、ハード・ソフトの様々な適応策を組み合わせた農業シナリオの構築が求められる。

また、気候変動による影響評価から適応策の定量的効果および多目的最適化に基づく合理的な解であるパレート解の提示、さらにはステークホルダーの適応行動の促進方策まで含む包括的な影響・適応策評価フレームワークを提示した。このフレームワークは、気候変動への適応策を実装する上で重要な知見を提供するものである。モデルによる定量的な影響評価と、ステークホルダーの行動変容を促すガバナンス設計を組み合わせたアプローチ（Box3.1 参照）は、他の地域や課題への応用可能性も高く、気候変動適応策の実践的な計画立案に貢献することが期待される。

参考文献

- 岡田将誌・中河嘉明・西原是良・横沢正幸（2021）：全球作物生産性予測モデル CROVER の信濃川流域への適用、2021 年度日本地理学会秋季学術大会要旨集、p.91.
- 高田亜沙里，吉田武郎，石郷岡康史，丸山篤志，工藤亮治（2024）：気候変動下における水稻の作付時期の変化が農業水利用に及ぼす影響の全国評価．土木学会論文集 80, 23-16118.
- Masutomi, Y., T. Takimoto, M. Shimamura, T. Manabe, M. Arakawa, N. Shibota, A. Ooto, S. Azuma, Y. Imai, M. Tamura (2019) : Rice grain quality degradation and economic loss due to global warming in Japan, *Environmental Research Communications*, 1, 121003.
- Nakagawa Y, M. Yokozawa (2023) : A social system to disperse the irrigation start date based on the spatial public goods game. *PLOS ONE*, 18 (5) : e0286127.
- Okada, M., T. Iizumi, T. Sakamoto, M. Kotoku, G. Sakurai, Y. Hijioka, M. Nishimori (2018) : Varying benefits of irrigation expansion for crop production under a changing climate and competitive water use among crops, *Earth's Future*, 6, pp.1207-1220.
- Takada, A., Yoshida, T., Ishigooka, Y., Maruyama, A. & Kudo, R. (2024) : Potential (Barriers to Adaptive Actions in Water-Rice Coupled Systems in Japan: A Framework for Predicting Soft Adaptation Limits. *Water Resour. Res.* 60.

Box3.1 空間公共財ゲームに基づく水稻栽培における水利用集中時期を分散化する制度設計

エージェントベースモデルを用いて空間公共財ゲーム理論を援用して流域水資源の効果的な利用を促進するためのガバナンス設計について検討した（Nakagawa and Yokozawa, 2023）。水稻栽培において最も水資源を使用する代かき時期の灌漑作業はこれまで農家間でほぼ同じ日程で実施されているが、積雪量減少に伴う代かき時期における資源量不足が懸念されている。そこで、どのようなガバナンス設計が効率よく灌漑時期の分散（取水時期のシフト）を促すかについて分析した。

モデルは個々の農家の経済変数（収穫利益や栽培コスト）、灌漑開始日の分散のための協力に関するコストや補助金、農家間の情報共有ネットワークを考慮した。最適な灌漑開始日が存在して、その日からずれた日に灌漑を開始するとコストがかかると仮定した。シミュレーションの結果、一つの農家が一つのグループに所属し、グループが重複しないスキームでは、協力する農家の数が増加せず、灌漑開始日の分散はほとんど増加しなかった。一方、一つの農家が複数のグループに所属し、グループが重複するスキームを採用すると、協力する農家の数が増加し、灌漑開始日の分散が最大化した。さらに、補助金の額を正確に決定するためには、協力者が誰であるかの情報が必要であるが、個人情報の提供として抵抗が予想される。そのため各グループ内の協力者数を衛星データなどから灌漑開始日の分散を測定して、その値の分布から各グループ内の協力者の数を推定する方法も提案した。これにより、スキームの運営コストが大幅に削減され、農家の虚偽の申告に影響されない補助金の提供や政策評価が可能となる。

組織	所属グループ数	取水時期の調整	補助金計算範囲
(1) OL なし	1	1 グループのみ	1 グループのみ
(2) 5 人組 OL(利己)	5	1 グループのみ	1 グループのみ
(3) 5 人組 OL(利他)	5	全所属グループ	1 グループのみ
(4) 5 人組 OL(全体)	5	全所属グループ	全所属グループ

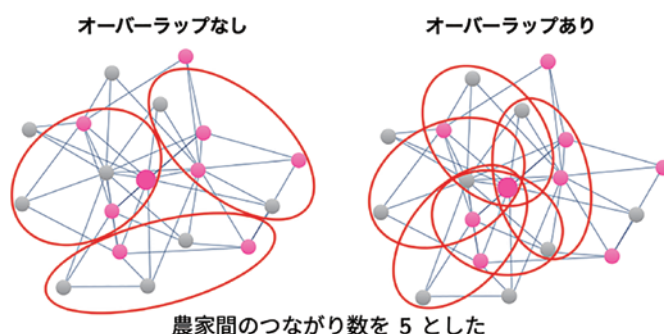


図 Box3.1.1：エージェントベースモデルによるシミュレーションの設定

農家のグループでオーバーラップ（OL）の有無、取水時期の調整をどの単位で行うか、補助金の計算をどの範囲で行うか、表のように4ケースについて計算した。

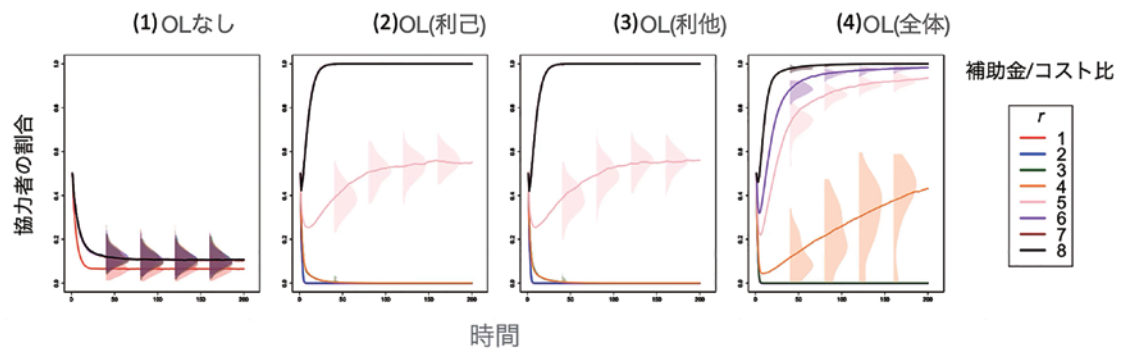


図 Box3.1.2 取水時期シフトの協力者割合の時間変化 (Nakagawa & Yokozawa, 2023)

図 Box3.1.1 の表の設定でシミュレーションした結果を示す。オーバーラップがない場合には取水時期シフトの協力者は皆無に収束する。補助金/コスト比が大きくなると協力者比率は速く大きくなる。

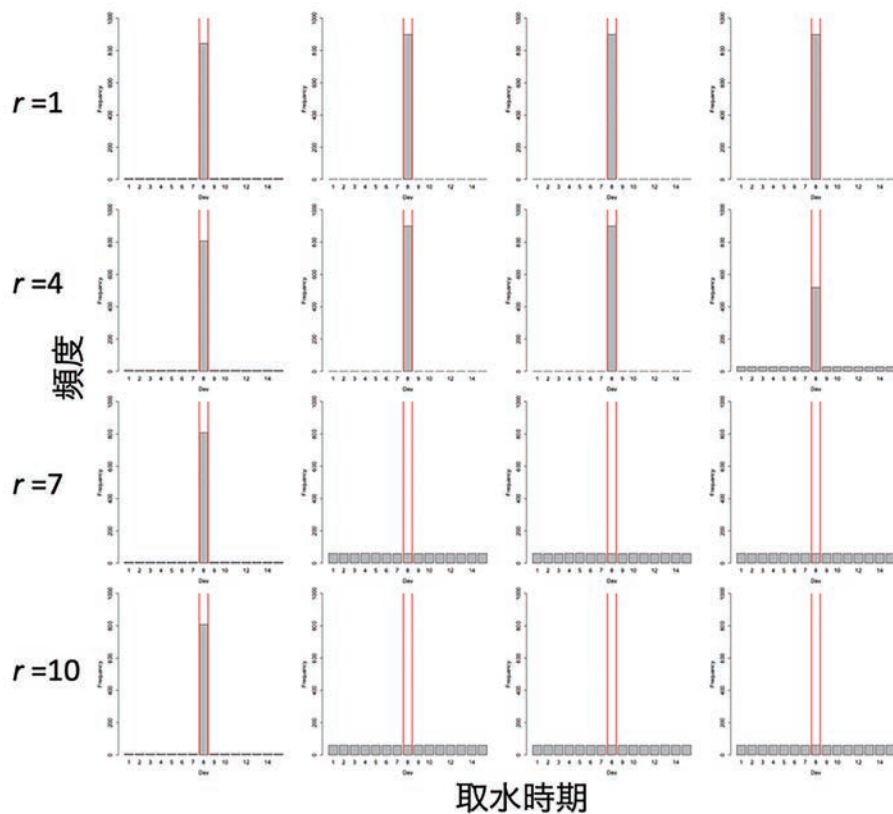


図 Box3.1.3：取水時期に対する農家エージェントの頻度分布 (Nakagawa & Yokozawa, 2023)

補助金/コスト比 (r) が大きくなると頻度分布が横に広がり、取水時期の分散化が進んでいる。

参考文献

Nakagawa Y, M. Yokozawa (2023) : A social system to disperse the irrigation start date based on the spatial public goods game. PLOS ONE, 18 (5) : e0286127.

4. 自然災害・沿岸域

4.1 沿岸域における影響評価と適応効果

4.1.1 研究の目的と方法

気候変動に伴う海面上昇は、沿岸域のハザードを増加させ、低平地の被害ポテンシャルを増幅させる。さらに、気候変動による台風強度の増加は、高潮や高波強度を増加させ、海面上昇と合わせた高潮位を増加させ、さらなる被害ポテンシャルを増幅させる。これら沿岸ハザード変化に合わせた被害の増加が予想される。本節では、これら海面上昇および高潮等の沿岸ハザード変化の影響と適応効果について評価する。

被害ポテンシャルについては、海面水位や高潮の将来変化に対する、標高をもとにした影響面積や影響人口を推定する。海岸侵食については、全国砂浜データベースをもとに、海面上昇を考慮した静的な面積変化を求め、その影響を予測する。港湾施設については、海面水位、高潮および波浪の将来変化に対する影響する施設の類型化と代表的な条件における適応費用を求めた。

4.1.2 海面上昇

海面上昇の影響予測と適応評価は長らく行われてきたが未だに途上にある。本節では、日本沿岸域の海面上昇による浸水影響、適応効果、適応費用を示す。はじめに、温室効果ガス排出経路の高位シナリオ（RCP8.5-SSP5;化石燃料依存社会）と低位シナリオ（RCP2.6-SSP1;持続可能社会）における浸水影響を比較する。次に、適応策として防護と移転の効果と費用を推計し、両者を比較することで海面上昇への適応のあり方を議論する。

浸水影響評価では、2020 年から 2100 年までの 10 年ごとに浸水計算を行い、潜在的浸水面積（以下、浸水面積）と浸水影響人口（以下、影響人口）を推計した。浸水計算では、国土数値情報 3 次メッシュを用いて、海面上昇と潮汐を考慮した海面水位と平均標高を比較して潜在的浸水域（以下、浸水域）を抽出した。浸水域の面積および浸水域内の人口（日本版 SSP 別 3 次メッシュ人口シナリオを参照）を集計して各時点の浸水面積と影響人口とした。なお、浸水計算では既設の堤防などの構造物による浸水防止を考慮しておらず、浸水域を過大評価している可能性がある。

浸水被害額は治水経済調査マニュアル（案）（国土交通省 2020）を用いて推計した。防護費用については、堤防の現状の高さを 2020 年時点の海面水位と同等と仮定し、各時点の海面水位の高さへの嵩上げ費用と更新費用を既設の堤防の費用のデータを基に推計した。移転費用については、東日本大震災の復興事業等で実績のある防災集団移転促進事業の枠組みを適用し、各時点の全影響人口を移転させる際の行政の費用として推計した。金額は、シナリオごとの GDP 予測から算出したデフレーターを乗じることで、将来の物価上昇を考慮した名目価値に換算した。

浸水域の分布を図 4.1.1 に示す。浸水域は東京湾、伊勢湾、大阪湾、有明海の周辺の 4 地域に主に分布した。全国の浸水面積は、2050 年に約 2,111-2,127km²、2100 年に約 2,261-2,598 km² と推計された。全国の影響人口は、2050 年には約 445-470 万人、2100 年には約 376-492 万人と推計された。全国の浸水被害額は、2050 年に約 151-181 兆円、2100 年に 243-455 兆円と推計された。浸水面積、影響人口、浸水被害額のいずれも RCP2.6-SSP1 が RCP8.5-SSP5 より小さかった。これは緩和策の重要性を示唆する。被害額を地域で比較すると、建物用地や影響人口が集積する地

域が顕著であった。

全国の防護費用の推計結果を図 4.1.2 に示す。Type 1（堤防の高さと 1 人当たり GDP から費用を推計する方法）の場合では、2100 年に約 39.7-54.4 兆円と推計された。Type 2（土木学会レジリエンス確保に関する技術検討委員会の報告書記載の堤防単価を用いる方法）の場合では、2100 年に約 53.4-84.5 兆円と推計された。シナリオ間で比較すると RCP2.6-SSP1 の方が低い金額を示した。これは RCP2.6-SSP1 の方が必要な堤防の長さや高さの両方ともに小さいからである。

移転先をシミュレーションした結果、東京湾周辺を例にとると、影響人口の大半は利用可能な土地が多い千葉県、埼玉県、茨城県、神奈川県に移転する。2030 年と 2070 年の移転先の分布を比較すると、2030 年時点では居住者がいて移転先に利用できなかった土地が人口減少で 2070 年時点では移転先に利用可能となっている。全国の移転費用を図 4.1.3 に示す。2030 年では約 90-94 兆円、2050 年では約 101-117 兆円、2070 年では約 109-150 兆円であった。移転費用は RCP2.6-SSP1 の方が RCP8.5-SSP5 よりも低かった。これは移転する世帯数の違いと金額を名目価値に換算する際のデフレーター値の違いに起因する。

本節では、日本沿岸域を対象に海面上昇と潮汐による浸水影響を評価し、RCP8.5-SSP1 と RCP2.6-SSP1 で比較した。浸水面積、影響人口、浸水被害額のいずれも RCP2.6-SSP1 は RCP8.5-SSP5 よりも小さく、緩和策の重要性が示唆された。さらに、日本全国を対象に防護のみを行う場合と移転のみを行う場合のそれぞれの適応効果と総費用を推計した。その結果、全国総額では移転費用は防護費用よりも高額であることが示された。ただし、人口密度や資産の分布によっては地域毎の大小関係は逆転しうる。それゆえ人口密度が高い地域では防護、人口密度が低い地域では移転を行うのが最も安価となると考えられる。両者を組み合わせた場合の適応費用は今後の研究課題である。

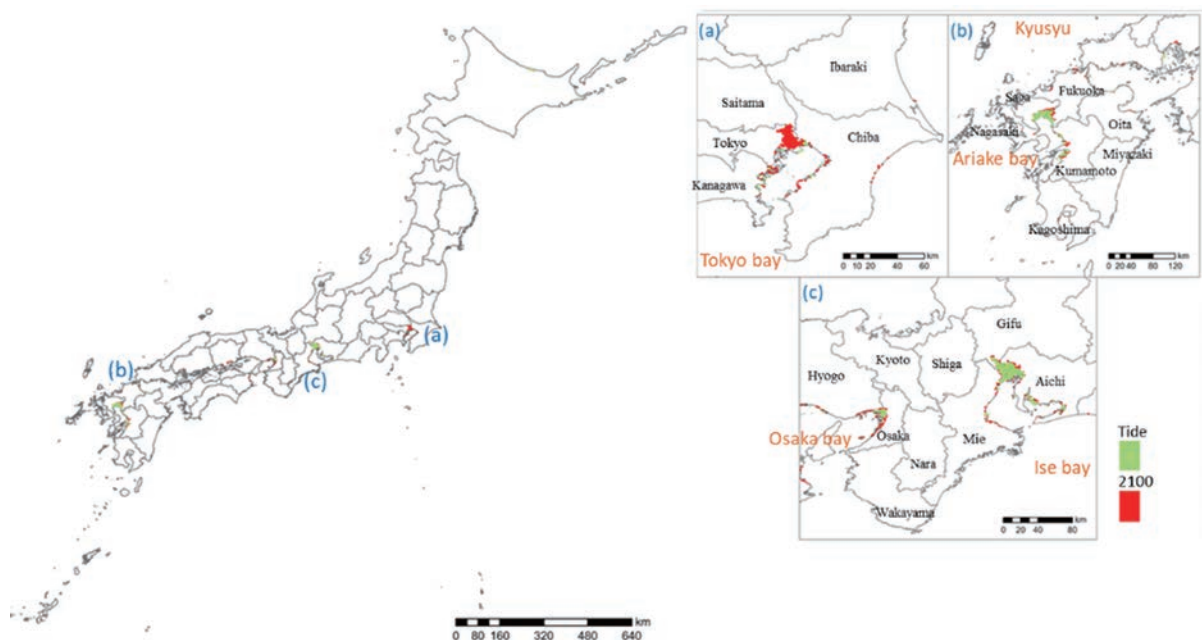


図 4.1.1 潜在的浸水域の分布 (RCP8.5; 出典 : Tamura et al. 2023)

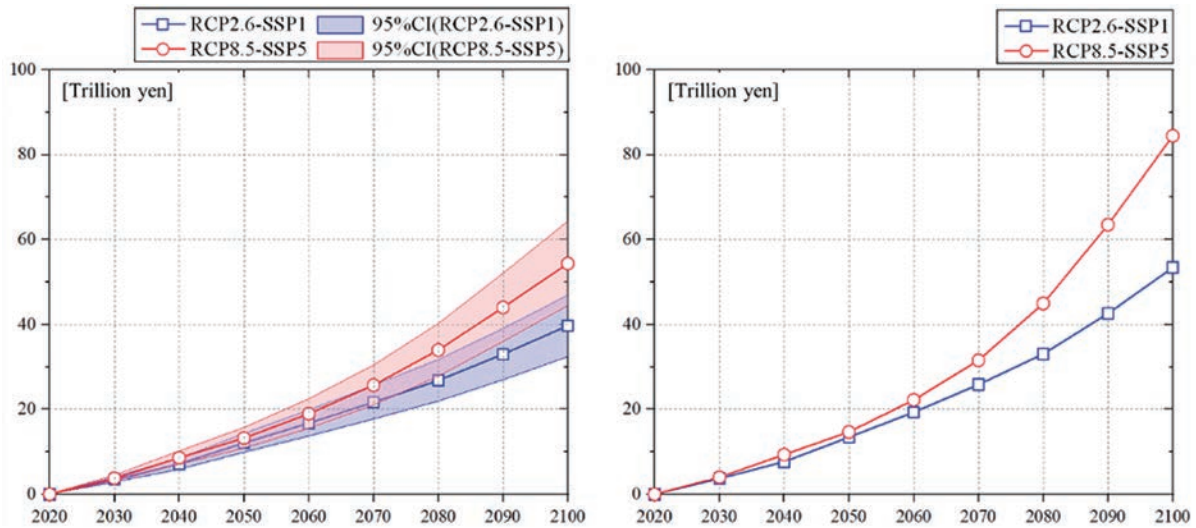


図 4.1.2 防護費用 (左 Type 1, 右: Type 2; 出典: Tamura et al. 2023)

Type 1: 堤防の高さと 1 人当たり GDP から費用を推計する場合

Type 2: 土木学会レジリエンス確保に関する技術検討委員会の報告書記載の堤防単価を用いる場合

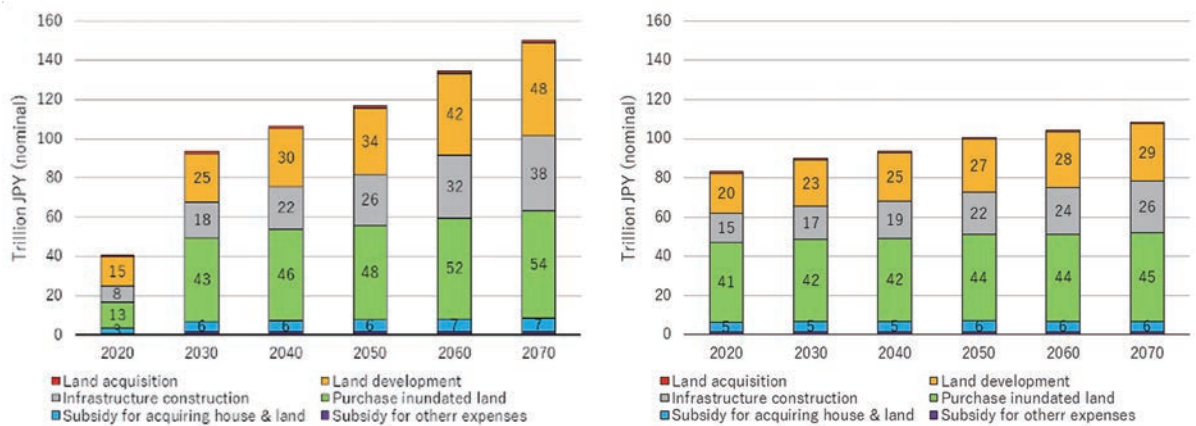


図 4.1.3 移転費用とその内訳 (左: RCP8.5-SSP5, 右: RCP2.6-SSP1; 今村他 (2023) より改変)

4.1.3 高潮

大阪湾、伊勢湾、東京湾を対象に、海面上昇に対する潜在的な高潮浸水危険地域を推定した。IPCC AR6 の海面上昇量予測値のデータセットの太平洋側 468 地点の平均値を海面上昇量として用いた。人口については、国立環境研究所日本版 SSP 開発チームにより、日本独自のデータを反映した日本版 SSP を用いた。影響面積・人口の算出の基準とする水位は、1) 標高 0 m (T.P. \pm 0m)、2) 平均水面 (MSL: Mean Sea Level)、3) 朔望平均満潮位 (HWL: High Water Level)、4) 既往最高潮位 (HHWL: Highest High Water Level) の 4 種類を用いた。基準水位に海面上昇量を加算した水位より低く、人口データが非ゼロとなる地点の合計面積を影響面積、それらのメッシュ内の人口の合計を影響人口とする。

図 4.1.4 に三大湾における気候変動シナリオごとの海面上昇と人口推移による影響人口の年変化を示す (山本ら, 2024)。MSL の 2020 年における RCP4.5-SSP2 の影響人口を比較すると、大阪湾が約 79 万人、伊勢湾が約 83 万人、東京湾が約 152 万人であり、東京湾は大阪湾の約 1.9 倍、伊勢湾の約 1.8 倍である。HWL においても、東京湾の影響人口は大阪湾の約 1.9 倍、伊勢湾の約

1.8 倍である。東京湾の影響人口が多い理由は、東京湾沿岸域の人口が大阪湾、伊勢湾より多いことに加え、低地の人口が多いためである。伊勢湾は影響面積は大きい、低地の居住人口が三大湾の中で最も少ないため、影響人口は大阪湾と同程度である。年変化傾向をみると、大阪湾では MSL の RCP8.5-SSP5 のみ 2020 年より 2100 年の影響人口が多い。MSL では増加するのに対し、HWL で減少する理由は、潮位変化によって拡大した影響面積内の人口減少の影響が大きいからだといえる。伊勢湾は、RCP8.5-SSP5 で 2020 年と 2100 年の影響人口がほとんど変化せず、他のシナリオでは減少する。すべてのシナリオで影響人口の増加がみられないのは伊勢湾のみである。東京湾は、RCP8.5-SSP5 で 2020 年から増加し続け、RCP2.6-SSP1 と RCP4.5-SSP2 では 2020 年と 2100 年の変化が小さく、RCP7.0-SSP3 では減少する。経年的な影響面積の増加量は大阪湾と同程度であるが、影響人口の傾向が大きく異なる。

以上のように、影響人口は湾毎に異なり、多くのシナリオでは 2050 年頃までにピークを迎えて、そのあと減少傾向になる。このため、海岸の適応策の対象も 2050 年まで頃をターゲットにすべきケースが多い。

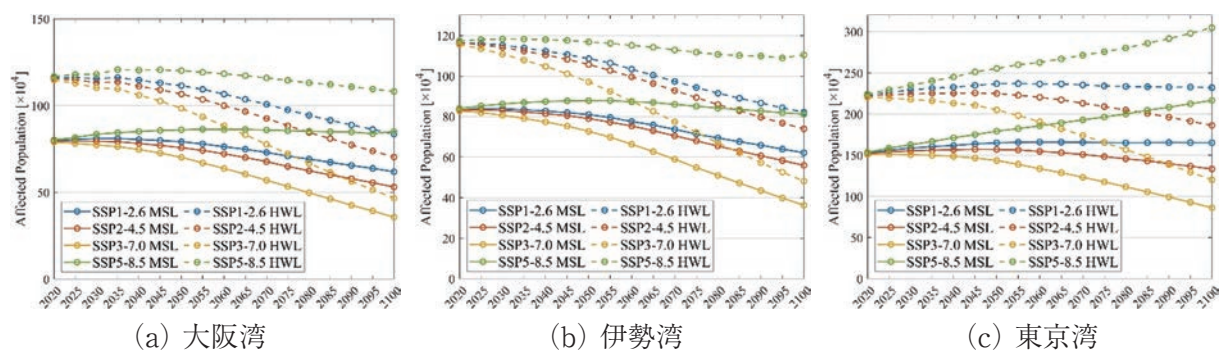
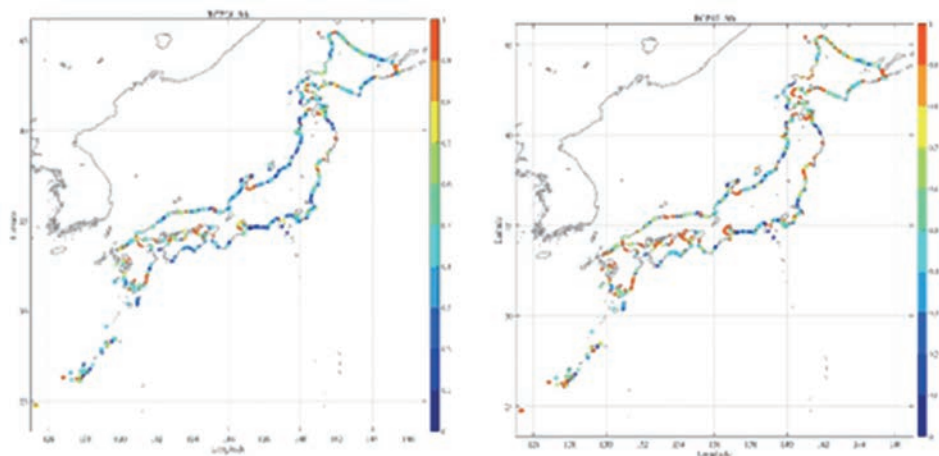


図 4.1.4 三大湾における気候変動シナリオごとの海面上昇による影響人口の年変化（山本ら，2024）

4.1.4 海岸侵食

自然海岸については、全国砂浜データベース（京都大学・国総研開発）を構築し、マクロ的な砂浜の将来変化予測を実施するとともに、力学的海浜変形モデルの開発を進め、ミクロ的な検討として汀線等の長期変化の過去再現計算を実施した（鈴木ら，2023；岡嶋ら，2024）。マクロ的な砂浜の将来変化予測では、国土数値情報 5 次メッシュ（解像度 10m）の標高データと Google Earth データを組み合わせた全国砂浜データベースを用い、長さ 1km 以上の全国 806 海岸を評価対象とした。海面上昇量は、高潮での評価で用いた IPCC AR6 の値を用いた。図 4.1.5 は、2100 年における砂浜面積の将来変化割合である。暖色系になるほど面積変化割合が大きい海岸であるが、地域差は見られない。これは砂浜海岸の勾配の差が地域ごとに決まっていなかったためである。RCP8.5-SSP5 の予測は、8 割以上の面積を失う海岸が多くなることを示している。806 海岸すべてを対象とした砂浜面積の将来変化の全国平均は、RCP8.5-SSP5 では 39 海岸もしくは 66% の砂浜の面積の消失が予測され、海面上昇の砂浜海岸への影響が大きいことがわかった。



(a) RCP2.6-SSP1

(b) RCP8.5-SSP5

図 4.1.5 砂浜面積の将来変化：全国平均・2100 年

4.1.5 港湾施設

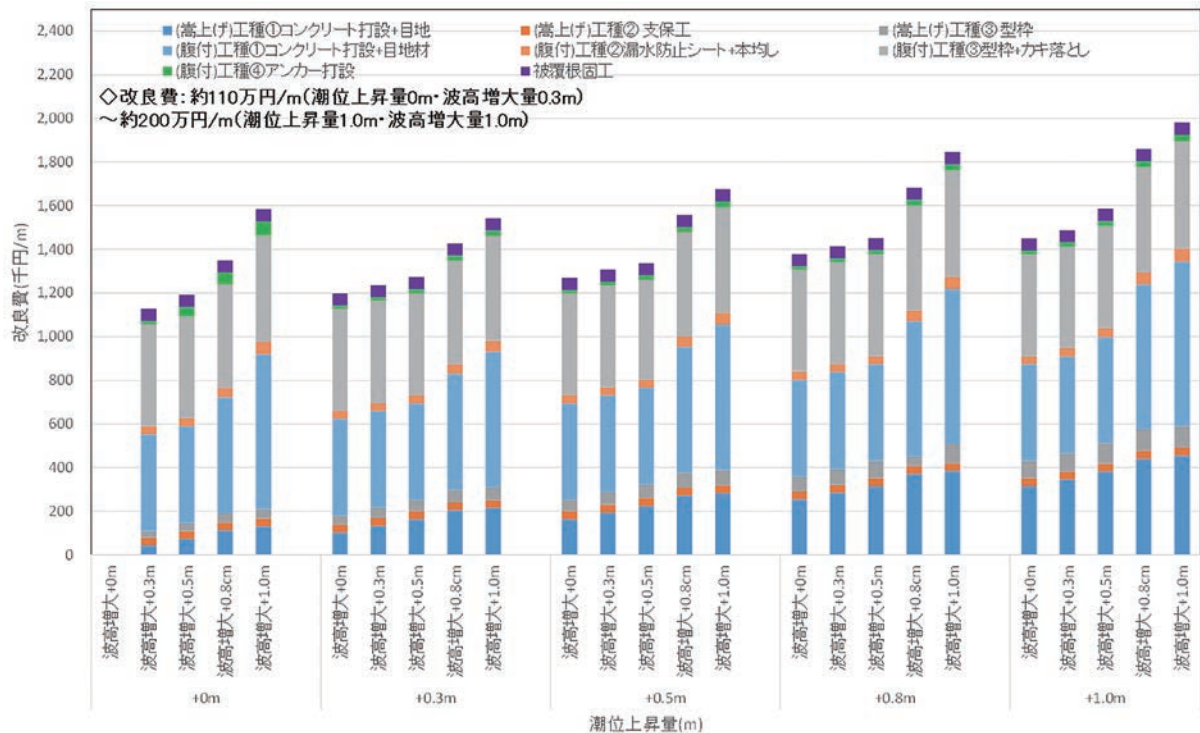
人工海岸について、全国の主要な港湾域の防波堤の位置・高さのデータベース化、適応オプションのための港湾域の類型化を実施した。表 4.1.1 は係留施設についての結果であり、湾施設への気候変動による影響と適応策をまとめた。例えば、海面上昇や波浪の波高増加により、岸壁の堤体に働く浮力や波圧の増加が想定される。これに対する適応策としては、材料の変化や工法の変化により、構造物の安定性を今と同程度に確保する事が可能である。これらの適応オプションの数は多くあり、どの場合にどの適応オプションを取るのかについての検討が必要となってくる。

ついで、防波堤に対する適応費用を算定した。図 4.1.6 は、その一例であり、国土交通省港湾局 H30 設計事例集の「第 14 章 ケーソン式混成堤」の断面を対象している。図は、海面上昇量（潮位上昇量）毎に波高の増加が現在より +1m まで増加する場合の改良費の変化である。改良については、嵩上げとケーソンの滑動を抑えるための腹付け等のための費用を考慮した。図に示すように、m 当たりの適応費用は 100 万円～200 万円となった。

この他、外力変化に対する費用の変化について代表的な港湾に対して検討した結果、波高 +0.8m の変化に対して、防波堤で 100-200 万円 /m、護岸で 10-50 万円 /m、重力式係船岸で 20-40 万円 /m、矢板式係船岸で 10 万円 /m の適応費用が必要であることがわかった。

表 4.1.1 港湾施設の適応策の類型化（係留施設）

施設	構造形式	外力	項目	施設への影響要因	施設への影響の可能性 (○:影響が大きい) (△:影響が軽微)	対策案
係留施設	岸壁・物揚場	重力式	【異常時】 施設安定性	・堤体に作用する浮力の増大 ・残留水圧の増大 ・地震時動水圧の増大	○	【土圧軽減】 ・背後地盤材料の置換え ・軽量砕石、軽量混合処理土 ・セメント固化 【控え工増設】 ・タイ材+控え杭の増設 ・グラウンドアンカー
		矢板式		・残留水圧の増大 ・地震時動水圧の増大	○	【土圧軽減】 ・重力式と同様 【控え工増設】 ・タイロッド、控え杭の増設 【上載荷重低減による土圧低減】 ・二段タイ構造に変更 ・棚式構造に改造
		栈橋式		・上部工への揚圧力の増大 ・渡版への揚圧力の増大	○	【上部工補強】 ・上部工の補強、打ち替え 【杭の補強】 ・増杭 ・水中梁工法 ・鋼板巻き立て 【渡版補強】 ・渡版の補強、打ち替え
		共通	【常時】 供用性 (港湾物流・ 旅客輸送)	・船体からの岸壁の相対的な高さが変化 ・排水孔が海面下となる可能性	○	【高さ関係の調整】 ・船舶の吃水調整、ガントリークレーン更新時の高さ調整 ・排水施設の再設置
			【異常時】 供用性 (港湾物流・ 旅客輸送)	・岸壁上への越波量の増加	○	【越波防止】 ・岸壁天端高全体の嵩上げ ※堤体の安定性が確保されない可能性がある ・岸壁前面への防潮壁(車止め兼用等)の設置



4.2 河川流域における影響評価と適応効果

4.2.1 外水氾濫

洪水氾濫計算は、水が重力や摩擦に応じて移動する様を数値モデル（2次元不定流モデル）によって表現する。摩擦は土地利用毎に与える。入力値としての降雨データは、S18で指定された5つの気候モデルの降雨データについて、現在の観測値との比較から将来のモデル値を修正するバイアス補正と、より細かな空間に直すダウンスケージングを実施した。洪水による年期待被害額を求める場合、頻度分析による再現期間（年発生確率の逆数）と降雨値の関係を求める。ここでは30, 50, 100, 200年の再現期間を求めた。S18の将来共通シナリオは、温暖化+社会経済シナリオ（RCP2.6-SSP1、RCP4.5-SSP2、RCP8.5-SSP5）である。空間解像度は250mで、浸水深と浸水期間が得られる。この両値について土地利用毎の治水経済マニュアルを用いて被害額を求め、年発生確率を乗じることから年期待被害額を求めた。適応策として、治水水準向上は各水系の計画規模と河川区間種別の治水安全度の目標を反映させるように河道掘削を行い、整備目標を100%達成した際の軽減額を評価した。土地利用規制は、再現期間200年の洪水時に3.0m以上浸水する建築用地において被害額を未計上にする際の軽減額を求めた。ただし、対象を人口密度が10,000人/km²以下の地域に限定した。ピロティ建築の評価手法は再現期間30年の洪水解析において0.45m以上浸水（床上浸水）するメッシュの浸水深を3.0m下げて被害額を計算した。田んぼダムモデルは流出量をオリフィス及び円筒堰の公式から求めた。水田のメッシュにおいて入力降水量から田んぼダムモデルの流出量を減ずることにより効果を計算した。ため池は貯留量がゼロの状態を仮定し、満水まで下流への流出量がないとしている。結果は表4.2.1の通りである（Yanagihara et al. 2024, Ikemoto et al. 2023）。ここで示す値は2000年の気候状態の適応無しの被害額に対する被害額の変化割合である。正の場合は被害額が増加することを意味している。資産価値の高い地域に設置するピロティ建築の効果が大きい。高層住宅の3階程度を空けるようなことが想定されるが、改築には大きな費用が生じる。都市洪水対策では一部導入されているが、行政の補助や低層の有効利用が望まれる。治水安全度向上は、過去長い期間に治水レベルが上げてきたため、追加の増加分が小さい。そのために軽減率が小さい結果となっている。田んぼダムやため池の効果は小さいが、手取川のように田んぼダムが15%以上の軽減効果を示す地域もある。田んぼやため池の位置によっては大きな効果を持

表 4.2.1 外水氾濫適応策評価。SSP 一定シナリオ 20 世紀末・適応策無しに対する被害額変化率（%）

		適応策無し	治水安全度向上	土地利用規制
20世紀末		0	-18	-18
近未来	RCP2.6	22	2	1
	RCP8.5	23	4	2
21世紀末	RCP2.6	16	-4	-5
	RCP8.5	38	18	16
		ピロティ建築	田んぼダム	ため池
20世紀末		-67	-8	-3
近未来	RCP2.6	-46	14	19
	RCP8.5	-45	16	21
21世紀末	RCP2.6	-51	8	13
	RCP8.5	-30	31	31

表 4.2.2 内水氾濫適応策評価 SSP 一定シナリオ 20 世紀末・適応策無しに対する被害額変化率（%）

		適応策無し	治水安全度向上	土地利用規制
20世紀末		0	-54	-31
近未来	RCP2.6	50	-2	5
	RCP8.5	53	1	8
21世紀末	RCP2.6	35	-16	-7
	RCP8.5	85	36	30
		ピロティ建築	田んぼダム	全ての適応策
20世紀末		-86	-10	-90
近未来	RCP2.6	-75	38	-91
	RCP8.5	-74	41	-90
21世紀末	RCP2.6	-78	23	-92
	RCP8.5	-66	71	-85

表 4.2.3 21世紀末 RCP8.5 適応無しに対する被害軽減効果。

適応策	被害軽減率
緩和策	22% ↓
治水安全度向上	14% ↓
排水能力向上	26% ↓
土地利用規制	24% ↓
ピロティ建築	68% ↓
田んぼダム	7% ↓

つ地域があり、自然を用いた解決策（NBS）や EcoDRR として期待されている。

4.2.2 内水氾濫

外水氾濫と同様の条件の氾濫計算を行った。内水氾濫には自然排水によって生じるものと、排水不良によって生じるものがあるが、前者の結果を表 4.2.2 に示す（Yanagihara et al. 2024）。この計算条件は、再現期間 5 年の降雨は全てポンプ場によって排水されるとし、再現期間 5 年を上回る降雨の場合、自然排水される過程で湛水したものを内水氾濫とした。おおよそ外水と同様の傾向を持つが、田んぼダムの効果は極めて小さい。また、都市に多い内水氾濫に対してピロティ建築はさらに有効である。全ての適応策は大きく被害額を軽減し、適応策の組み合わせが重要であることを示している。

4.2.3 適応と緩和の相乗効果

上記の適応策の評価において RCP8.5 と 2.6 の差から緩和策の効果を知ることができる。表 4.2.3 に比較した結果を示す。緩和策は土地利用規制と同程度の効果を持つ。緩和策は洪水対策だけでなく、様々な影響を軽減できるため、費用対効果が最も良い対策と考えられる。

ため池の活用や河道の植生伐採は洪水被害への適応策であるが、それぞれが水力発電とバイオ発電によるクリーンエネルギーとして緩和策にも貢献できる。ため池容量を全て洪水時に貯留かつ流入量を最も効果的に発電とした場合、洪水被害軽減率は 2.1%、水力発電量は 6.2×10^4 t-CO₂ となる（池本ら, 2024）。河道植生が 20 年で回復するとして、全国の河道植生面積の 1/20 を一斉に伐採した場合の洪水被害軽減率は 0.005%、バイオマス発電量は 9.0×10^4 t-CO₂ となる（柳原ら, 2024）。この両発電量は公共施設の太陽光発電よりは大きいが風力発電よりは小さい。洪水被害軽減率も他の適応策より大変小さい値であるが、ため池において香川県の洪水被害軽減率が 17%、兵庫県の発電量が 1.5×10^4 t-CO₂ と大きな効果を持ち、植生伐採も含めて対象とする地域によって効果の大きい場合がある。

4.3 適応策の課題と提言

本章では、異なる社会経済シナリオ（SSP）を用いて被害（浸水・氾濫面積、被害額）を評価することで緩和策の有無による影響の違いを評価している。例えば、外水氾濫による被害額の評価においては、緩和策による被害軽減効果は、考えられる最も有効な適応策には及ばないことが示されたが、これは緩和策の有効性を否定するものではなく、様々な影響を軽減する緩和策が極めて重要であることは揺るがない。

海面上昇による浸水や、外水・内水氾濫、海面上昇・高潮・高波浪に対する港湾施設における適応策について、複数の適応オプションを提示してそれらの適応効果を示した。それぞれの適応策について、効果の多寡を示すことができたが、実際にはそれらを組み合わせて適応することになる。今後、どのような地域でどのような組み合わせが最も効果的なのかを詳細に検討することが必要である。

ため池の活用（氾濫対策と水力発電）と河道の植生伐採（洪水対策とバイオマス発電）が適応策と緩和策の両方に資するものとして提示され、それぞれの効果が試算された。これらのような対策は、限られた地域においてより効果を発揮することが示唆された。

参考文献

- 池本敦哉, 風間聡, 吉田武郎, 新井涼允 (2024) : 日本全国のため池における流況指標に応じた水力エネルギーのポテンシャル, 土木学会東北支部技術研究発表会予稿集, II-7.
- 今村航平, 田村誠, 横木裕宗 (2023) : 日本沿岸域の海面上昇に対する住宅移転のシミュレーション, 土木学会論文集, 79 巻 10 号, 23-00054. <https://doi.org/10.2208/jscej.23-00054>.
- 岡嶋理功, 大家隆行, 熊谷健蔵, 加藤史訓, 森信人 (2024) : XBeach における Surface Roller Energy の散逸項の地形変化に与える影響検討と平面地形変化計算への適用性について, 土木学会論文集, 80 巻, 17 号, <https://doi.org/10.2208/jscej.24-17142>.
- 国土交通省 (2020) : 治水経済調査マニュアル (案) 令和 2 年 4 月改訂, 国土交通省 水管理・国土保全局.
- 国立環境研究所 (2021) : 環境研究総合推進費 2-1805 成果 (日本版 SSP3 次メッシュ人口シナリオ第 2 版), <https://adaptation-platform.nies.go.jp/socioeconomic/population.html>.
- 鈴木樹, 大家隆行, 辻尾大樹, 熊谷健蔵, 加藤史訓, 森信人 (2023) : XBeach を用いた海面上昇を考慮した海浜断面地形の長期予測, 土木学会論文集, 2023, 79 巻, 17 号, <https://doi.org/10.2208/jscej.23-17082>.
- 柳原駿太, 池本敦哉, 風間聡, 呉修一, 藤下龍澄 (2024) : 河道内植生の伐採順序による洪水適応策と緩和策の評価 土木学会論文集, 2024, 80 巻, 16 号, 23-16121, <https://doi.org/10.2208/jscej.23-16121>.
- 山本詩恩, 宮下卓也, 安田誠宏, 志村智也, 森信人 (2024) : 気候変動シナリオの違いによる三大湾ゼロメートル地帯の浸水危険度変化分析, 土木学会論文集, 80 巻, 17 号, 公開日 <https://doi.org/10.2208/jscej.24-17044>.
- Ikemoto A, Kazama S, Yoshida T, Yanagihara H (2023) : Evaluation of an adaptation strategy for flood damage mitigation under climate change through the use of irrigation reservoirs in Japan, *Water Resources Management*, Vol.37, pp.4159-4175, <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03544-7>.
- Tamura M, Imamura K, Kumano N, Yokoki H (2023) : Assessing the effectiveness of adaptation against sea level rise in Japanese coastal areas: Protection or relocation? *Environment, Development and Sustainability*, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03612-3>.
- Yanagihara H, Kazama S, Yamamoto T, Ikemoto A, Tada T, Touge Y (2024) : Nationwide evaluation of changes in fluvial and pluvial flood damage and the effectiveness of adaptation measures in Japan under population decline, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol.110, 104605, <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2024.104605>.

Box4.1 高潮浸水評価に関連する取り組み

ここでは高潮浸水評価に関連する3つの研究成果を紹介する。

- (1) 海岸堤防の位置と高さは高潮浸水解析における重要な入力データであるが、全国で均一かつ正確なものは整備されていないことから、高分解能衛星による可視カラー画像及び地形画像から海岸堤防の位置と高さを推定する深層学習ベースの手法を開発した(図 Box4.1.1; Xia and Tonooka, 2024)。
- (2) 地表面粗度は高潮浸水解析の入力情報の一つであり、土地利用と密接な関係を持つ。そこで想定した都市成長シナリオの下で将来の土地利用を予測し、それに基づく粗度マップを生成して高潮浸水リスクを評価する手法を提案した(図 Box4.1.2; Safabakhshpachehkenari and Tonooka, 2024)。
- (3) 高潮浸水対策では多様な要素を考慮した意思決定が重要である。そこで、専門家でない多くのユーザが仮想空間で意思決定の難しさを体験し、その結果を視覚的に確認できるシステムを開発した(図 Box4.1.3; 柴田・江副, 2024)。

これらの成果は高潮浸水評価の信頼性の向上と理解の深化に貢献することが期待される。

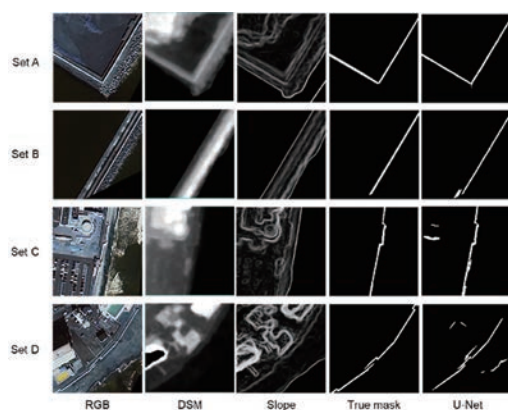


図 Box4.1.1 深層学習による海岸堤防の抽出 (Xia & Tonooka, 2024)

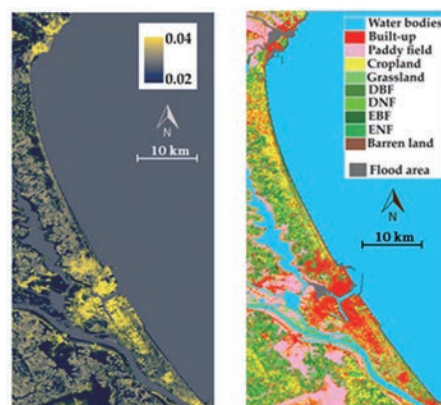


図 Box4.1.2 粗度と高潮浸水域の将来予測 (Safabakhshpachehkenari & Tonooka, 2024)



図 Box4.1.3 高潮浸水対策の疑似体験システム (柴田・江副, 2024)

参考文献

- 柴田傑, 江副樹 (2024): 気候変動対策の仮想体験学習教材システムのプロトタイプ, 2024年度 情報処理学会東北支部研究会 (秋田大学), Vol.2024-akita, No.17.
- Safabakhshpachehkenari, M., Tonooka, H. (2024): Modeling Land Use Transformations and Flood Hazard on Ibaraki's Coastal in 2030: A Scenario-Based Approach Amid Population Fluctuations. Remote Sens. 2024, 16, 898.
- Xia, H., Tonooka, H. (2024): Extraction of Coastal Levees Using U-Net Model with Visible and Topographic Images Observed by High-Resolution Satellite Sensors. Sensors 2024, 24, 1444.

Box4.2 日本国沿岸の海岸保全施設高さの推定

全国規模での浸水域評価において現状の防護レベルを考慮することは非常に重要なテーマである。日本の沿岸部に対してより現実的な浸水域評価を実現するため、日常的に沿岸部に作用する外力に対する海岸防護については現在の日本沿岸では整備が完了しているとの仮定のもと、潮汐、波浪、高潮による外力評価に加えて、過去に生じた津波高さの評価結果から、日本沿岸部の海岸保全施設高さを500mメッシュで推定を行った（図Box4.2.1；佐藤・横木，2023，2024）。推定された海岸保全施設高さは実際の海岸堤防高さは和歌山県御坊市沿岸および福井県高浜町沿岸での現地調査結果と比較を行い、良い一致が得られていることが確認できた。本研究成果をさらに多くの海岸で検証することで、実用可能な海岸保全施設高さとなるものと考えられる。

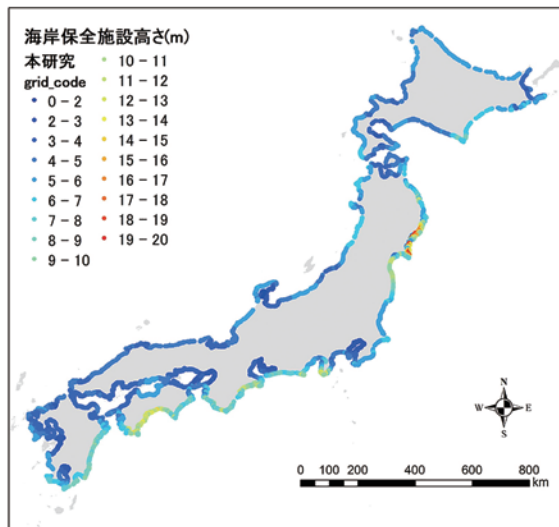


図 Box4.2.1 粗度と高潮浸水域の将来予測
(佐藤・横木，2024)

参考文献

- 佐藤大作，横木裕宗（2023）：日本国における現状の海岸保全施設高さの推定手法に関する研究，土木学会論文集，Vol.79，No.27，pp.1-6.
- 佐藤大作，横木裕宗（2024）：津波を考慮した日本国沿岸の海岸保全施設高さの推定，土木学会論文集，Vol.80，No.27，pp.1-7.

5. 国民生活・都市生活

5.1 気候変動のQoLへの影響

5.1.1 QoLへの影響総論

国民生活と都市生活において気候変動影響を受ける領域には、産業やインフラ・ライフライン、祭りや花見などの文化等の生活環境への影響と、健康等人への直接的影響の双方がある。図 5.1.1 に示すように、気候変動が人々の生活の質（Quality of Life: QoL）にもたらす影響は、極端現象の増加、暑熱環境の悪化、感染症の増加等といった変化を通して人々の生活環境および個人の健康や快適性に影響を与える。生活環境への影響は気候変動のリスクとして自治体に認知され、それが緩和策・適応策の推進に繋がっている。また、生活環境や個人の状態は個人の価値観を通して主観的な満足度および幸福感といった主観的 QoL へと繋がる。本章ではこれらの内、ストック、交通、市街地環境・街区、といった生活環境を支える主要なインフラと、個人の状態の中で重要な位置を占める健康に対する気候変動の影響およびその緩和策・適応策について得られた成果を示す。

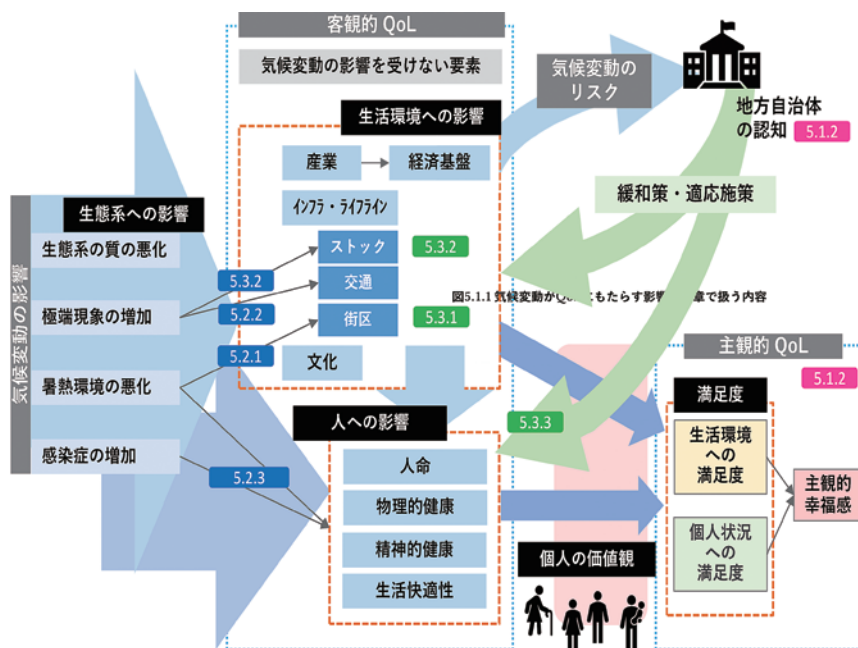


図 5.1.1 気候変動が QoL にもたらす影響と本章で扱う内容

5.1.2 QoLに基づく地域評価

地方自治体が現状の気候変動のリスクをどのように捉えているかは、各地域において今後どのように適応策を推進していくかを決定づける重要な側面と言える。そこで、日本全国の 1,788 の地方自治体を対象にアンケート調査を実施し、1,098 の有効回答を分析に用いた（今井と栗栖，2022）。気候変動の深刻度認知に基づき自治体を類型化した結果、図 5.1.2 に示すような 6 つ（C1～C6）に分かれた。これらの内、全分野で気候変動の深刻度認知が最も高かった C3 および次いで高かった C4 のグループでは、適応計画の策定状況も他の自治体に比べ高い傾向が見られた。

一方でこれらの自治体は農業への依存度が高く、人口密度の低い自治体群であり、そのことが気候変動の深刻度を特に高く認知している理由と考えられた。

また、QoLは客観的指標に基づく評価だけでなく、その主観的評価も重要な側面と考えられている。その中で、主観的幸福感がどのような因子によって決定づけられるかをモデル解析した（白井ら，2023）。モデル解析で抽出された生活環境に関わる5つの側面「生活利便性」「地域環境・文化」「活性度」「安全性」「地域気候」「教育サービス」の各得点を用いて調査対象自治体を分類したところG1～G9の9つに分かれた。これらの中で、特にG8、G9は人口密度の小さい小規模自治体であったが、その生活満足度には大きな差が出た。経済的状況や人とのつながり、地域環境・文化への満足度が高かったG8では生活への満足度が比較的高かったのに対し、G9はいずれにおいても満足度が低い結果となった。図5.1.3に上記C1～6とG1～9の関係性を示した。特にC3、C4では上述したように気候変動への深刻度認知が高い。これらのグループではG9自治体の割合が高かった。このことから、以下のように整理できる。

- C3, C4, G9の特徴
 - 人口密度の低い小規模自治体
 - 農業への依拠度が高い
 - 気候変動への深刻度認知が高い
 - 適応策実施度が高い
- G8のG9との違い：

G8も小規模自治体であるが農業への依拠度は低い。観光などへの依拠度が高く、地域環境と文化や人的コミュニティへの満足度の高さが生活満足度を比較的高くしている

これらのことから、各地域の気候変動の影響、産業などへの依拠度、基盤となる経済、人口等のあらゆる側面を考慮したリスク評価枠組みを検討し、他のテーマ、サブテーマで得られてきている成果を基に、日本全国の地方自治体を対象とした評価を実施している（井田ら，2024）。

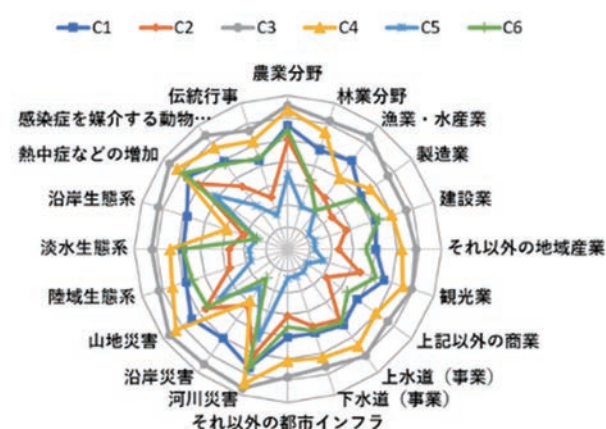


図 5.1.2 各分野への気候変動影響深刻度認知に基づく自治体の類型化（今井と栗栖，2022）

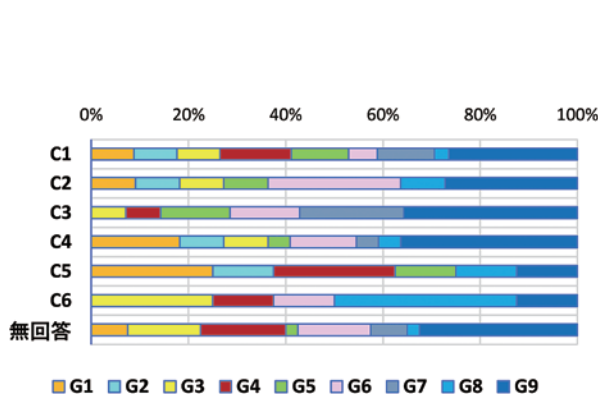





図 5.1.3 各分野への気候変動影響深刻度認知に基づく自治体の類型化

5.2 QoLを構成する主要な側面での影響評価

5.2.1 街区における暑熱への影響（Yamasaki et al., 2024; 山崎ら，2023）

街区レベルの温熱環境への気候変動影響評価を目的とし、都市中心部に位置する16haの複合

表 5.2.1 名古屋市・錦二丁目地区の将来的な市街地形態のシナリオ別イメージ

シナリオ名		SSP1（持続可能シナリオ）	SSP2（中庸シナリオ）	SSP5（化石燃料依存シナリオ）
名古屋市の都市構造		コンパクト・プラス・ネットワークの集約連携型都市構造が実現し、駅そば生活圏の各拠点を中心とした複合市街地が形成される	2020年代の都市構造から大きな変化はなく、緩やかな成長に伴って個々の建物の更新が進む	一極集中型の都市構造となり、都心にオフィス・商業施設が集積し、都心周辺や郊外に住宅地が広がる
錦二丁目地区	イメージ	職住近接型（住み、働く）の都心市街地	緩やかな成長下の都心市街地	オフィス・商業型（働く、訪れる）の都心市街地
	開発動向	2050年代に開発がピークに達し、以降は概ね築年数の古い建築物から解体され、跡地は空地として多目的に利用される	2020年代の開発圧力が21世紀末まで継続する	2090年代まで規制緩和による集中的な開発が続く
	2021年以降の新築建築物	住宅・商業・業務の用途を複合した中高層木造建築物（容積率：400～600%）	商業・業務用の中高層非木造建築物（容積率：600～800%）	商業・業務用の高層非木造建築物（容積率：800%）
	2090年代の市街地形態想定			

用途街区群（愛知県名古屋市中区錦二丁目地区）を対象に、将来像の3Dモデルを対象とした温熱環境シミュレーション（CFD解析）を実施した。地区スケールの温熱環境に対する気候変動の影響は大きい、将来的な市街地形態の変化はそれ以上の不確実性を孕んでいる。そこで、本研究では同地区のまちづくりに関わる専門家によるエキスパートジャッジメントに基づき、対象地の市街地形態（建物や空地の配置）の変化をモデルに反映させた（表5.2.1）。ここでは同地区におけるSSP1・SSP2・SSP5の2020年代から2090年代までの変容イメージを想定し、各シナリオ下において更新・保全される建物・空地を建物の築年数や開発方針などを反映しながら決定した。例えば、SSP1においては2050年代に開発がピークに達した以降は概ね築年数の古い建築物から解体され、跡地は空地として多目的に利用される将来を想定し、SSP5においては2090年代まで規制緩和による集中的な開発が続く将来を想定した。

解析の結果、将来の気温上昇は地区内の気温にも直接的に影響を及ぼす一方で、市街地形態の変化は人間の快適性や熱関連リスクへの影響を緩和する可能性があることが示された（図5.2.1）。

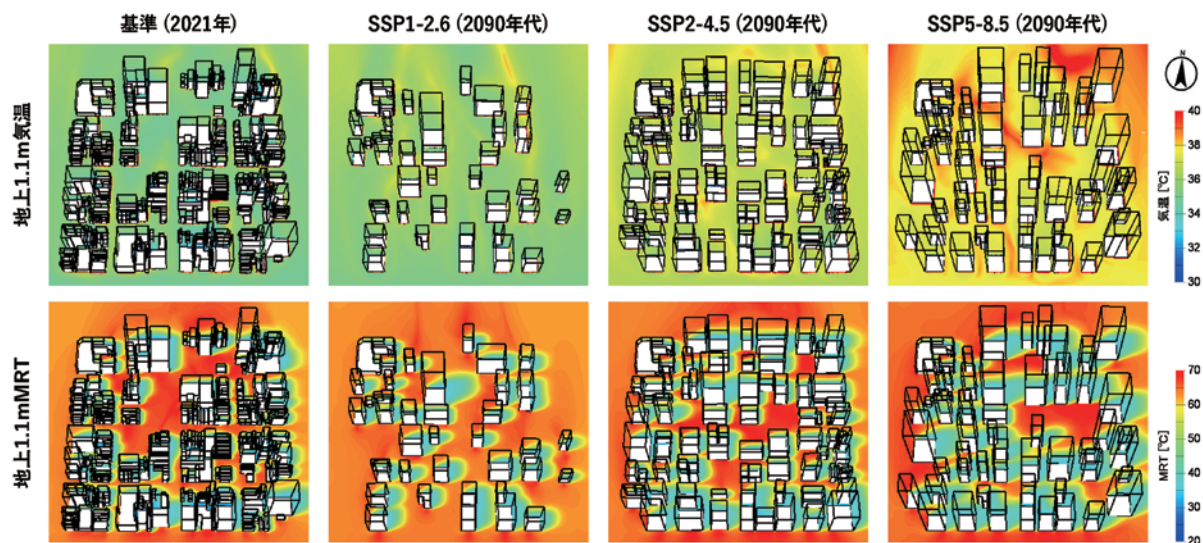


図 5.2.1 シナリオ別の温熱環境シミュレーションの結果（夏季代表日 14 時時点）

例えば、夏季代表日の地区内の道路空間において、2090年代までの気温上昇（SSP5-8.5）により地上1.1m気温は最大2.7℃上昇したが、想定した市街地形態の変化（SSP5-8.5）により地上1.1m平均放射温度（MRT）は最大7.5℃低下した。MRTとは、周囲から受ける放射量を温度表示したものであり、主に周囲の構造物の表面温度によって決定される。SSP5は高層建物が立ち並ぶ市街地形態を想定しており、夏季日中において地区内の日陰面積が大きいいため、道路空間のMRTが相対的に低い結果となった。一方、建築物が疎らなSSP1の市街地形態は温熱的には不利となる結果となり、空地の多い市街地においては地区の物的環境をデザインする必要があることが示された。

今後の気候変動適応に向けたまちづくりを推進するためには、広域的なヒートアイランド現象の緩和による気温上昇抑制に加え、地区単位の計画的な建物更新による日陰面積のコントロールなどのアプローチが重要である。また、気候変動研究においては、将来的な気象条件のみでなく市街地形態も同じシナリオ枠組みで検討し、双方の変化が及ぼす影響を定量的に把握する重要性が示された。

5.2.2 交通システムへの影響 (Xu et al., 2023; 田島ら, 2023; 高山ら, 2022; 松本ら, 2024)

気候変動の交通システムへの影響として、バス営業所、鉄道網、道路網を対象に、災害リスクの評価を行うと共に、孤立地域の発生可能性を分析した。

その結果、全国のバス営業所の約42%が、気候変動による災害リスクにさらされていることが明らかになった（図5.2.2）。本研究では、水害や土砂災害を中心にリスクを分析し、特に河川沿いの営業所では水害リスクが顕著であり、山間部の営業所では土砂災害による機能低下が長期間に及ぶ可能性が高いことが確認された。愛知、岐阜、三重の3県を対象としたケーススタディの結果、災害対策の優先度を明確化し、防災計画における重点的に対策を進めるべき営業所の特定が可能となった。

鉄道ネットワークにおける水害リスク評価では、「ハザード」「曝露」「脆弱性」の3つの因数の積をリスク値と定義した。本研究において「ハザード」は、“鉄道路線が長期不通となり得る規模の水害の発生確率”として定義し、一定の区間ごとに計画基準や浸水深を基に閾値を設け、

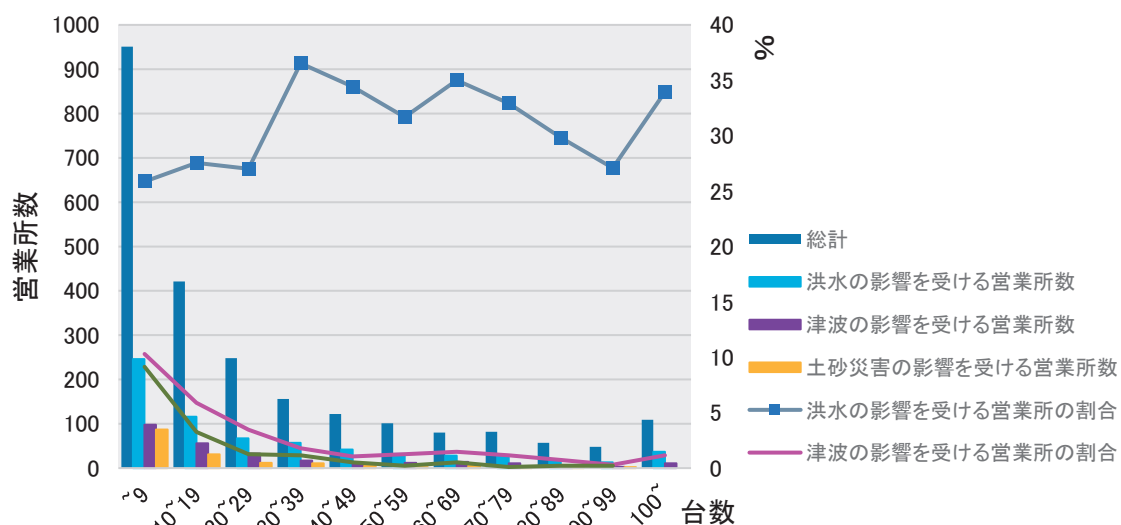


図 5.2.2 被災が想定される営業所数

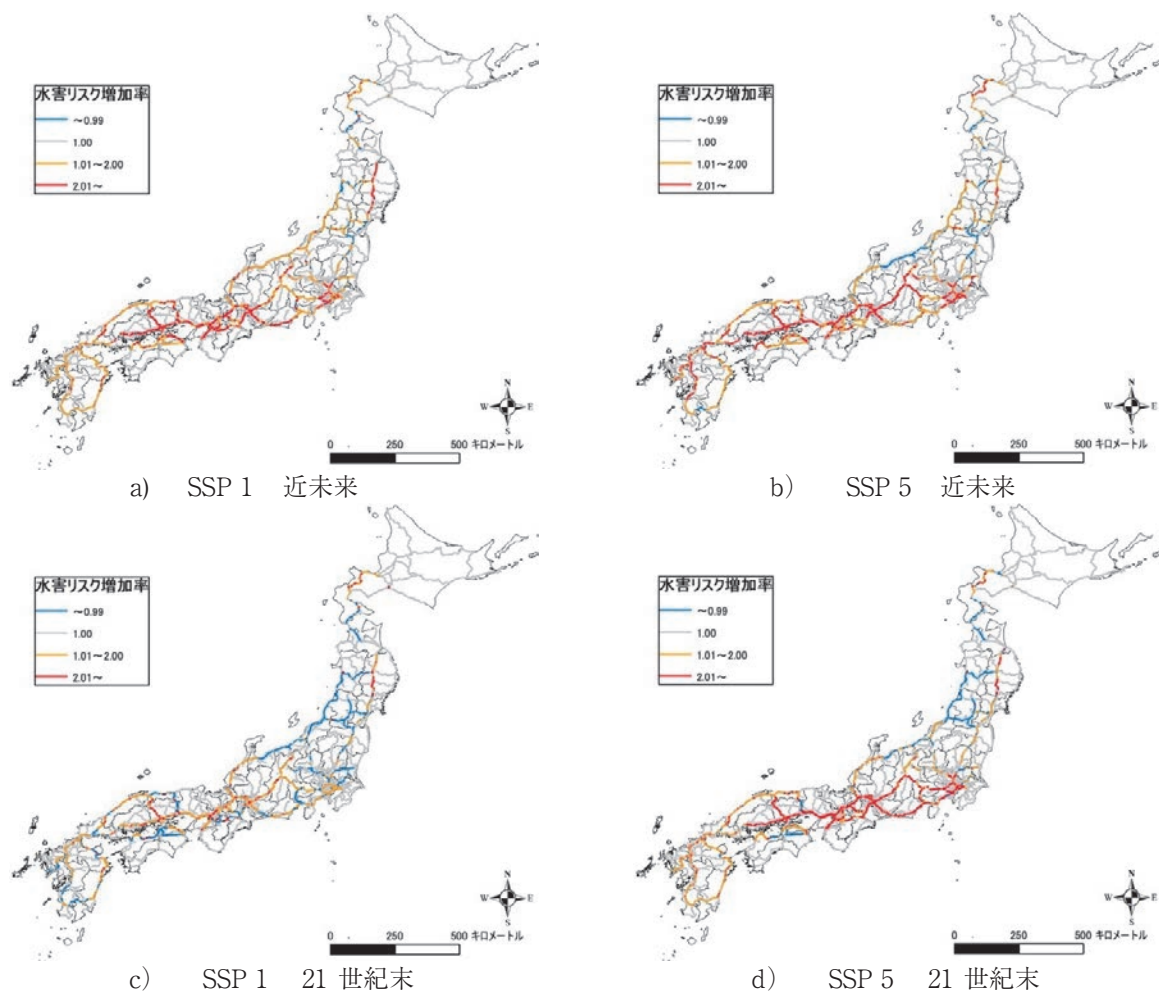


図 5.2.3 鉄道ネットワークにおける基準気候に対する水害リスク値の増加率（5 気候モデル平均）

その閾値に相当する水害が1年間に発生する確率（/年）とした。「曝露」は、不通となった鉄道路線を平常時に利用していた人数、すなわち路線の区間通過人員（人/日）を指す。「脆弱性」は、インフラ形状に依拠した修復困難性およびネットワーク形状による迂回時間の増加特性を考慮した要素として定義した。評価結果では、SSP5-8.5 シナリオにおいて 21 世紀末における水害リスクが基準気候と比較して最大で約 1.37 倍に増加することが明らかになった。特に、主要都市間を結ぶ幹線路線や新幹線では、リスクの増加が顕著であり、これらの路線が寸断された場合、広範囲な輸送網に重大な影響を及ぼす可能性が示唆された（図 5.2.3）。

道路網については、災害危険性に加え、橋梁・トンネルといった土木構造物の違いを考慮した災害リスク評価の手法を開発した。災害の発生確率と交通需要を掛け合わせることで区間別の災害リスクを定量化し、同手法を全国の高速度道路に適用した。その結果、水害では橋梁の影響が特に大きく、橋梁を多く含む区間のリスクが高く評価された。また、土砂災害では山間部を通る区間でリスクが顕著であり、特に都市間輸送を担う主要路線で高い危険性が示された。加えて、災害発生時の迂回路の有無や距離を考慮し、ネットワーク冗長性を反映した区間別災害リスク評価手法を開発した。本手法では、迂回路の距離が長いほど経路としての価値を低いとみなし、最短経路との差に応じて重み付けを行った。その上で、リンクが寸断された場合とされていない場合の経路数を比較し、その比率を基にリンクの重要度を算出し、リスク評価に反映させた。さらに、

本手法を愛知県内道路網に適用したところ、水害は名古屋市周辺の橋梁を含むリンク、土砂災害は県東部の山間部を通る主要道路に集中していることが明らかになった。また、新規道路整備がリスクをどの程度低減するかが算定可能となった。

また、気候変動による豪雨の頻発化と激甚化は、斜面崩壊に伴う道路途絶を通じて孤立地域の発生可能性を増大させ、特定地域に深刻な課題をもたらしている。岐阜県下呂市を対象とした分析では、水害や斜面崩壊が2031～2050年および2081～2100年に増加傾向を示し、特にSSP5-8.5シナリオでは孤立地域の発生可能性が最大30%増加すると予測された。このリスクは交通網の途絶によって救援活動や物流機能に大きな支障を来す可能性が高い。本課題に対応するには、地域住民への防災教育、道路網の強化、さらには代替ルートの整備が不可欠である。

本研究の成果は、気候変動がもたらす交通システム全体の脆弱性を具体的に明らかにし、その影響を軽減し持続可能な交通システムを実現するための実効的な適応策の策定に向けた重要な知見を提供するものといえる。

5.2.3 健康への影響

気候変動がもたらす健康リスクには熱ストレスが直接的な影響を与えるものと生物環境や物理環境系の変化などを介した間接的な影響を与えるものが挙げられる。本研究ではその中でも影響が既に観察されはじめており、その影響の程度が顕著であると考えられるデング熱と熱中症のそれぞれに関する予測モデルの開発と実装を行った。

デング熱の疫学動態の分析では、その伝播（ヒト→蚊→ヒトの経路を介した2次感染）において蚊の咬傷や個体群動態が気温に強く依存することが既知である。ここでは、その知見を逆手に取って、未来の平均気温を予測変数と活用し、デング熱の実効再生産数の変化を捕捉する数理モデルを定式化した（Wang & Nishiura, 2021）。気候変動のシナリオ別で国内空間において1km×1kmのメッシュレベルで実効再生産数の長期時系列の予測値が得られた。それを活用し、デング熱が国外から輸入されたときの各地の絶滅確率（輸入が起こったが大規模流行に至らずに消えてしまう確率）の計算を行い、実効再生産数と絶滅確率、および、流行時期（蚊の活動が伝播を起こして実効再生産数が1を超えるのに十分な時期）を得た（Hayashi et al., 2022）。地図上でこれら推定値の空間的分布を得ると、それはデング熱のリスクマップとして活用可能である。シナリオごとに長期時系列予測を行ったところ、RCP4.5やRCP8.5の通りに推移した場合には、既に流行確率が高いとされている7月や8月に加えて、今後、気温上昇により6月や9月でも流行リスクが上昇することが示された（図5.2.4A）。加えて、気温の影響だけでなく、輸入感染者数（流行国からの渡航者数）の増加が大きくデング熱流行確率の上昇に寄与することが示唆される研究結果を得た。例えば、気温上昇に限らず日本国内でデング熱の伝播に十分な気象条件にあるのは高温かつ多湿である沖縄県であり、それに次いでリスクが高いのは温暖な九州四国地方である。しかし、デング熱の伝播が起こるには伝播が持続的にみられるエンデミックな国から移入者が多数やってくる必要がある。東南アジアからの移入者を加味して分析したところ、現状の都道府県別では東京都におけるデング熱流行リスクが最も高く、次いで大阪府・京都府におけるリスクが高く推定されるなど、しばらくは都市部で旅行者の多い場所でのリスクが高いと考えられた（Wang & Nishiura, 2021）。

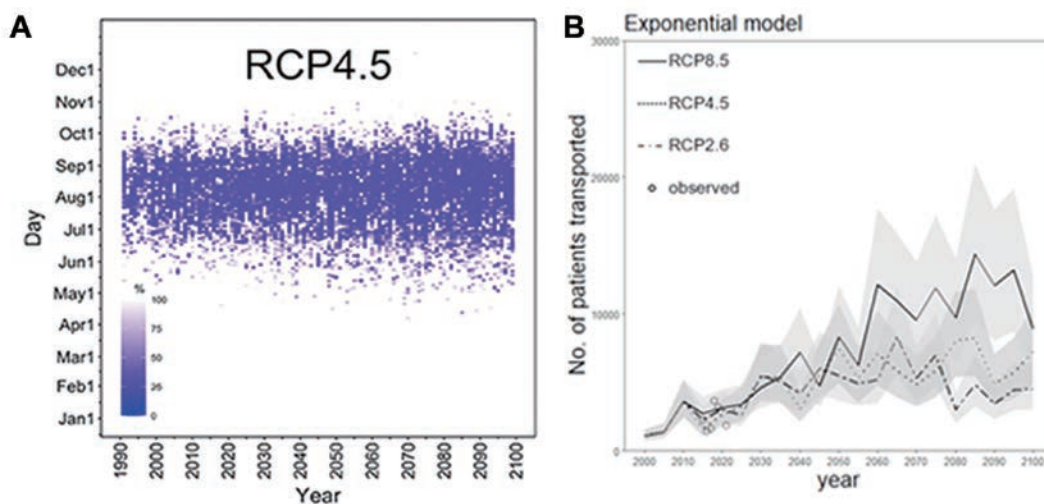


図 5.2.4 デング熱 (A) と熱中症 (B) のリスク評価。

A ではデング熱の実効再生産数が 1 を上回る時期の割合を青の密度でしている。B では 65 歳以上の熱中症搬送者数の予測値を気候変動シナリオ別に示す。

熱中症の患者発生頻度の予測では、暑さ指数 (WBGT) を用いて 1 日あたりの熱中症救急搬送患者数を推定する統計モデルについて用量反応関係モデルをヒントに実装した (Fujimoto & Nishiura, 2022)。ベースラインシナリオ作成のために、東京都において 2100 年までの毎日の WBGT データを気候変動シナリオ別に得た。その結果、一般的な熱中症発症の嚴重警戒とされる WBGT28 度以上を超える日 (ハイリスク日) の年間日数が増加することが示された。東京都の 2015 年から 2019 年までの熱中症搬送者数と WBGT の関連から予測式を作成し、MIROC6 と MRI-ESM-2.0 の 2 シナリオへ統計モデルの外挿を実施したところ、両シナリオでは例え RCP2.6 程度の気温上昇であっても熱中症による救急搬送患者数が今後増加することが示された (図 5.2.4B)。また、実態調査を通じて今後の適応政策を見据えた高齢者の熱中症発症リスク因子 (独居、自力飲水不可能、エアコン不所持) を特定する疫学研究を実施した (Fujimoto et al., 2023)。WBGT のみを加味したモデルでは患者数が著しく増加する日などを中心に時系列の搬送者数を完璧に捕捉することが難しい。そこで、改良モデルの 1 つのアイデアとして暑熱順化も加味したモデルの定量化も行った。その際、気候変動に伴う熱中症搬送者の推定とともに、社会調査を合併させてモデル化を行うことで子ども (未成年)、生産年齢人口、高齢者のそれぞれの年齢群で気象変数以外のリスク構造や熱中症発症メカニズムを解きほぐすべく検討を実施した。実態調査を通じて今後の適応政策を見据えた高齢者の熱中症発症リスク因子 (独居、自力飲水不可能、エアコン不所持) を特定した (Fujimoto et al., 2023)。

5.3 緩和と適応の効果

5.3.1 都市計画における適応施策の整理

今後の日本における都市計画的な適応策を検討するにあたり、その先進事例を把握するため、気候変動政策が先進的な英仏 8 自治体のアクションプランを対象に、都市計画に関連する分野の適応策を抽出してリストに整理した。また、作成したリストに基づく施策群の特徴分析や自治体間の比較分析から、同分野の適応策における傾向を考察した (保坂ら, 2022)。その要点は次の

通りである。

- ・計画には、民間の都市開発における気候変動適応の考慮、交通事業など他分野との連携による適応策の実施など、市民啓発活動のみでない物的環境への介入が広く記載されていた。
- ・施策は、都市の物的環境構成要素に着目して、「建物・開発地区」（＝壁面や屋上、敷地内の緑化、建物の熱ストレスの軽減、氾濫に適応した建設、建物・地区開発の総合的な環境性能の向上）、「オープンスペース」（＝都市における緑化や緑地の管理、オープンスペースの設計・管理の工夫による熱ストレスの軽減、土地被覆の透水性向上、自然的土地利用の管理・保全）、「グレイインフラ」（＝インフラ整備）、「その他」（＝気候変動の全般的な考慮や調査など）に類型化することができた。
- ・施策は、「計画・方針」、「規制」、「誘導」、「事業」、「実態把握」に区分することができた（図5.3.1）。
- ・施策パッケージとしては、適応策全体の方針をとりまとめることを計画の主眼におき詳細の事業は別途作成する分野別計画で定める「方向性提示型」パッケージと、具体的な実現手段が記載され都市計画関連分野における適応策展開の全体像が把握できる「実行手段提示型」パッケージの2つに分類できた。
- ・実行手段の多くは「事業」であったが、容積率緩和や開発行為における文書作成義務などの規制・誘導的手段も記載され、気候変動適応に向けた都市計画施策の幅広い展開が確認された。
- ・事業や実験的取り組みを行う地区や場所が明記されているものも存在した。

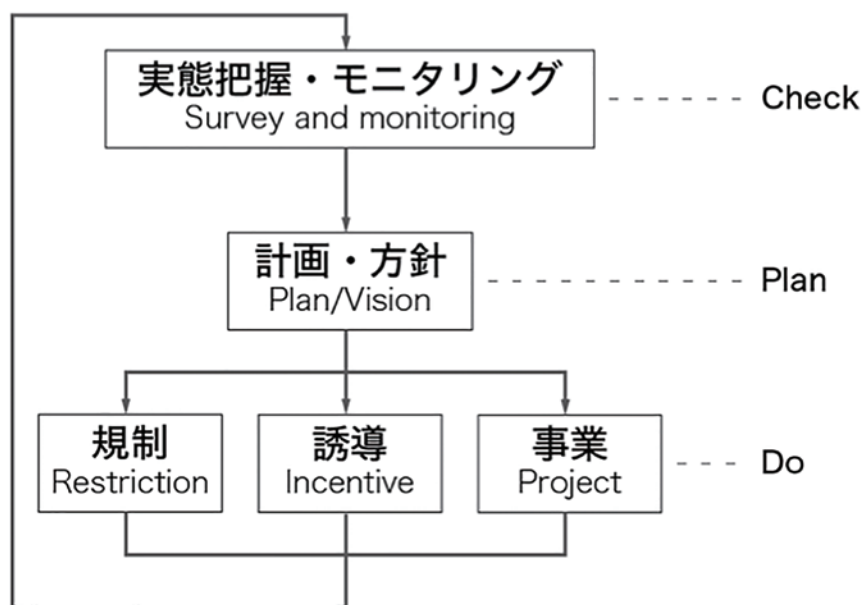


図 5.3.1 都市計画分野の適応策の施策区分

また、東京大学都市計画研究室では、まちづくり関係者が気候変動の街区群の温熱環境への影響を理解し、暑熱適応策を検討するための「気候変動×都市デザインワークショップ」の方法を開発・適用した。同ワークショップ内では、建物の適切な配置や庇・街路樹の設置による日陰創出、緑化をはじめとする土地・建物被覆の変更といった物的環境への介入（都市デザイン）を伴う適応策が提案された（山崎ら、2022）。ワークショップを実施した錦二丁目地区（5.2.1 節参照）では、



図 5.3.2 「気候変動×都市デザインワークショップ」の様子（一部抜粋）

進行中の街路再整備事業の構想の中に適応策の一部を盛り込むこととなり、研究成果が先導的な社会実装につながった（図 5.3.2）（N2/LAB, 2024）。

5.3.2 ストック管理・建材による緩和と適応

都市構造物の再建築・再配置、強靱化などの適応策は、災害廃棄物の発生や新規資材投入・温室効果ガス排出抑制などの側面から緩和策にも貢献する。一方、都市機能強化に伴う環境負荷や経済コストの増大にも繋がることから、気候変動適応策は緩和策と一体的に検討する必要がある。本研究では、気候変動が都市構造物にもたらす影響を定量化するとともに、温室効果ガス排出抑制に向けた構造物の長期利用及び建設材料の循環性を分析することで、都市構造物における適応策・緩和策を包括的に議論することを目的とした。

極端気象による治水安全性の低下や洪水被害の拡大が懸念される中、最近の研究では、世界的に洪水ハザードエリアの人口が増加していると指摘されており、ハザードエリア内の資産の増加も洪水被害の増大を招く一因となっている（図 5.3.3）。日本全国の建築物基盤データと洪水浸水想定区域データを重ね合わせた建築物の浸水ランクを示している。2020 年時点において全国の建設物ストックの約 42% はハザードエリア内に存在しており、過去 20 年間で浸水レベル問わず増加していることが判明した。建築物の構造強化やピロティ化、堤防の再配置や補強などの適応策の導入により被害は抑制されると予想されるが、ハザードエリアへの人口流入をコントロールする、建築物のエリア外への移転を誘導するなど、地域ごとのリスクや建築物の利用状況に応じた対策が必要である。

物質が投入されてから製品や構造物として社会に滞留する期間を滞留年数といい、滞留年数の長短は将来の物質循環やライフサイクルを通しての CO₂ 排出量に影響する。図 5.3.4 は建築物の滞留年数の延長による新規資材投入量及び CO₂ 排出量の抑制効果を示している。シナリオ I は建築物の寿命が将来にかけて変化しない現状維持シナリオ、シナリオ II は 2050 年までに約 2 倍に延長される長寿命化シナリオである。寿命を迎えた建築物については、(A) 適切に解体・再資

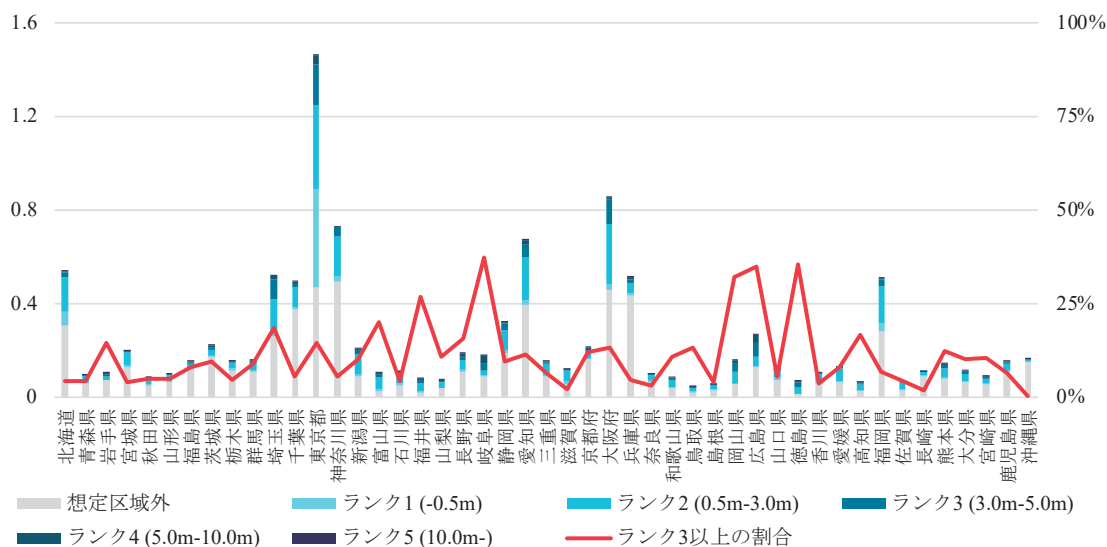


図 5.3.3 洪水ハザードエリアにおける建築物ストック、10 億トン（2020）（細川ら，2024）

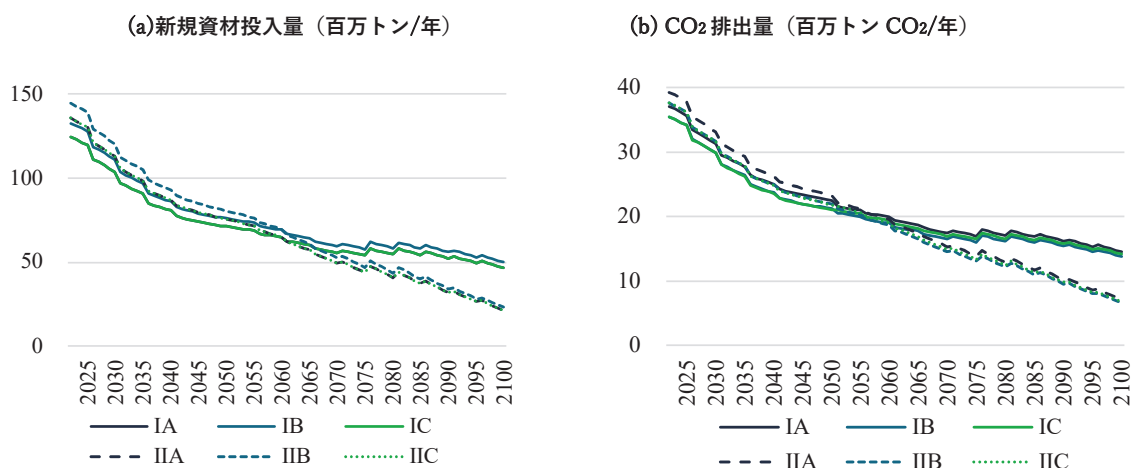


図 5.3.4 建築物におけるシナリオ別新規資材投入量および CO₂ 排出量（藤川ら，2024）

源化する、(B) 解体後のコンクリート塊を破碎して放置する、(C) 解体せず放置される建築物が増加するシナリオを想定している。建築物の寿命延長によって建て替え頻度が低下することで、2100 年における新規資材投入量、CO₂ 排出量はいずれも 5 割程度削減されることが判明した。また、推計初期には長寿命化シナリオにおける CO₂ 排出量が現状維持シナリオより約 5% 多くなるものの、2058 年を境に逆転することから滞留年数の延長による長期的な緩和効果が示された。

本研究を通して、ハザードエリアごとのリスクや都市構造物ストックの状況を考慮した対策が必要であること、構造物の長期利用は建て替え頻度の抑制を通して脱物質化、CO₂ 排出削減に有効であることが明らかになった。本研究で得られた結果をもとに、将来の人口減少や構造物の地理的分布などを考慮した中長期的な影響と対策について、物質フローの上流側から下流側まで一貫して適応・緩和の両側面から議論することが重要である。

5.3.3 健康に対する適応策とその効果

5.2.3 において熱中症もデング熱も今後わが国において顕著にリスクが上昇することは避けられないことを示した (Wang & Nishiura, 2021; Fujimoto & Nishiura, 2022)。社会レベルで細かな適応策は未だ定まっていないが、少なくとも、新型コロナウイルス感染症のパンデミックは適応社会を疑似的に実現することに繋がった。というのも、新型コロナウイルス感染症流行下では、緊急事態宣言の発令やまん延防止等重点措置の施行により、いつもに増して夏期の熱中症ハイリスク期にステイホームを強いられることがあり、さらにリモートワークはおろか、学校機関では休校が長期に渡って実施されることもあった。本研究における新型コロナウイルス感染症の気温と伝播の関係に関する研究では、各年齢群における熱中症の発生に対して新型コロナウイルス感染症の流行がもたらした疫学的影響について統計モデルを用いた因果推論を実施した。その結果、熱中症搬送者数が例年と比較して、各年齢層で平均して、児童生徒層 (7-17 歳) では 0.5 倍、成人層 (18-64 歳) では 0.7 倍、高齢者層 (65 歳以上) 0.8 倍減少したことが示された。このことは 2021 年の自粛期間中の生活態様として冷房のある自宅等の場で主に過ごすことで熱中症のリスクを大幅に減らすことに繋がったことを示唆しており、適応策に真剣に取り組むことで熱中症に伴う被害規模は劇的な軽減を果たすことが可能であることを示唆した。

具体的な社会的適応の影響の検討は、5.2.3 で述べた熱中症予測モデルを用いて実施した (Fujimoto et al., 2023)。WBGT とその予測値を利用した熱中症の搬送患者数の予測モデルの定式化を年齢群別に実施し、暑熱順化も加味したモデルの改良も行いつつ実装を行った。また、気候変動に伴う熱中症搬送者の推定とともに、社会調査を合併させてモデル化を行うことで子ども (未成年)、生産年齢人口、高齢者の適応政策の影響評価に取り組んだ。仮に、RCP1.9 を達成したとしても高齢者の熱中症患者の増加は避けられず、脱炭素化と適応政策の両方の実施が今後望まれることが示された。例えば、高齢者のケースでは、実態調査を通じて熱中症発症のリスク因子として、独居、自力飲水不可能、エアコン不所持が含まれることを特定した。特に独居は単一リスクとしてオッズ比が 2.5 (95% confidence interval: 1.2-5.4) と高く推定された (Fujimoto et al., 2023)。このことは適応政策に直結する。RCP4.5 あるいは RCP8.5 のシナリオではカーボンニュートラルと比較して熱中症の搬送者数が相対的に 30% 以上増加することが危惧される。その中で、現状よりも 30% だけ独居を解消すると熱中症の罹病率は相対的に 15% 低下するものと期待された (図 5.3.5)。独居・飲水不可・エアコン不所持の 3 つ全てについて現状よりも 70% の解消を実現すると、高齢者の熱中症の罹病率は相対的に 40% 程度減少するものと期待される。同様の実態調査を子どもを対象に実施したところ、グラウンドを中心とする屋外での運動と体育館での運動でのリスクが教室内でのそれよりも 10 倍以上高いことが示された。そのことから、一定度合いの WBGT を契機に屋外や体育館での運動を自粛することは熱中症予防のために極めて効果的であると考えられたが、他方で WBGT28℃ を閾値として屋外運動を中止するならば 2050 年までに保健体育の実技授業の 50% 以上を中止することが必要となるなど、単純なリスクを回避するだけの適応に関しては実現可能性に関する問題も包含する可能性が示唆された。

デング熱に対しても、熱中症と同様に 5.2.3 で構築した予測モデルを活用した適応社会の検討を実施した (Hayashi et al., 2022)。実効再生産数の構成成分を見ると、蚊の咬傷率は二乗の影響で再生産数に寄与し、蚊の総体的な数である m は 1 次のオーダーで再生産数へ影響する。これは、まずは蚊を直接駆除することよりも、蚊に刺されない努力にコストをかける方が効率が良いとい

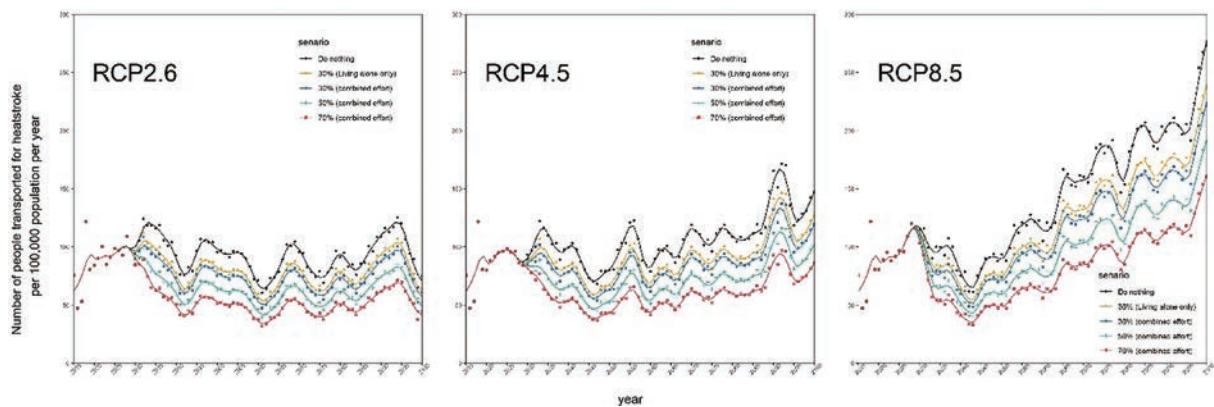


図 5.3.5 気候変動シナリオ別の高齢者の熱中症搬送者数の予測値と適応政策の遂行レベル別の予測値 (Fujimoto et al., 2023)。黒がベースライン（適応政策なし）、その他は適応政策別・その程度別の搬送者数予測。

う原理を数理的に捉えたものである。また、実効再生産数が平均して 1 を超える時期を理解することは、各自治体はいつ頃に蚊への暴露予防の積極的な呼びかけを住民に行うと良いのかを推し量る上で鍵となるものと考えられる。更に、都市の構造、特に土地の利用状況によるリスクの予測を実現し、将来の都市計画に資する適応を実現するための予測モデルの実装にも取り組みを進めてきた。

5.4 おわりに

本章では生活環境における QoL を構成する、インフラ、ストック、健康などの各分野における気候変動影響評価の知見およびそれに基づいて得られた適応策への示唆をまとめて示した。以下に得られた知見に基づく適応策への示唆を示す。

- 農業に依拠する小規模の脆弱自治体は、QoL の面からも脆弱性が高く気候変動の影響を強く受けやすいことから、適応への取り組みが特に重要となる
- 建築物の構造強化やピロティ化、堤防の再配置や補強などの適応策の導入により被害は抑制されると予想される
- ハザードエリアへの人口流入のコントロールや、建築物のエリア外への移転誘導など、地域ごとのリスクや建築物の利用状況に応じた対策も必要である
- 暑熱への適応策については、広域的なヒートアイランド現象の緩和による気温上昇抑制に加えて、地区単位の計画的な建物更新による日陰面積のコントロールなどのアプローチが重要である
- 交通システムで特にリスクの高いものとしては、河川沿いや山間部におけるバス営業所、主要都市間を結ぶ幹線路線や新幹線、橋梁の多い道路における水害リスク、山間部道路における土砂災害リスクが挙げられる。また、斜面崩壊に伴う道路途絶による孤立地域の発生リスクも重要である
- 今後、気温上昇により 6 月や 9 月でも Dengue 熱の流行リスクが上昇する。また、気温の影響だけでなく、輸入感染者数（流行国からの渡航者数）の増加が大きく Dengue 熱流行確率の上昇に寄与する
- 一定度合いの WBGT を契機に屋外や体育館での運動を自粛することは熱中症予防のために

極めて効果的であるが、他方で WBGT28℃を閾値として屋外運動を中止するならば 2050 年までに保健体育の実技授業の 50%以上が中止される。高齢者の熱中症については、独居・飲水不可・エアコン不所持の 3 つ全てについて現状よりも 70%の解消を実現すると、罹病率は相対的に 40%程度減少する。実現可能性や QoL を含めての検討が必要である

参考文献

- 井田新, 栗栖聖, 福士謙介, 2024, 全国自治体における地域特性を考慮した気候変動リスク評価枠組みの構築と評価. 環境科学会 2024 年会, (9/9-10, 東京)
- 今井 葉子, 栗栖 聖, 2022, 気候変動影響に対する全国自治体の評価と 影響深刻度認知の分析. 土木学会論文集 G (環境), 78 (4), II_99-107.
- 白井浩介, 栗栖 聖, 福士謙介, 2023, 将来的な気候変動影響の予測に向けた地域の生活環境の状態への満足度と主観的幸福感との関連性評価. 土木学会論文集 G (環境), 79 (26) 23-26005.
- 高山芳樹, 加藤博和, 朴秀日, 田島治希. ネットワークの構造を考慮した道路網の水害・土砂災害リスク評価手法. 土木計画学研究・講演集, 65 巻, CD-ROM (43-3), 2022 年 6 月
- 田島治希, 徐非凡, 加藤博和. 気候変動による鉄道ネットワークの水害リスク変化の評価に関する研究. 土木学会論文集, 79 (27), 23-27033.
- 藤川奈々, 山下奈穂, 蛭田有希, 白川博章, 谷川寛樹, 2024, 建築物の滞留年数の変化による将来の主要建設資材の投入量及び CO₂ 排出量への影響評価. 環境情報科学論文集 (掲載予定)
- 保坂朋輝, 山崎潤也, 吉田崇紘, 似内遼一, 真鍋陸太郎, 村山顕人, 2022, 英仏自治体における都市計画関連分野の気候変動適応策の枠組み -8 つの先進的な Climate Change Action Plans の施策内容分析から-, 都市計画論文集, 57 (1), 138-150.
- 細川莉来, 永田聡太, 白川博章, 谷川寛樹, 2024, 洪水ハザードエリアにおける建設資材ストック・フローの時空間分析. 土木学会論文集 G (環境) (掲載予定)
- 松本和司, 徐非凡, 加藤博和. 豪雨時の斜面崩壊に伴う孤立地域発生可能性の気候変動による変化の予測. 2 回地球環境シンポジウム, 土木学会 地球環境委員会, 2024 年 9 月
- 山崎潤也, 若月泰孝, 飯塚悟, 吉田崇紘, 似内遼一, 真鍋陸太郎, 村山顕人, 2023, 気候変動下の SSP・RCP 別将来像に基づく市街地の夏季温度分布の日変化解析 - 実測結果との比較を踏まえた解析モデルを用いて -, 都市計画論文集, 58 (3), 835-842.
- 山崎潤也, 似内遼一, 真鍋陸太郎, 村山顕人, 2022, 温熱環境シミュレーションを活用した気候変動適応まちづくりワークショップの方法 - 名古屋市中区錦二丁目地区における実践を通じて -, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1003-1004.
- Fujimoto M, Nishiura H, 2022, Baseline scenarios of heat-related ambulance transportations under climate change in Tokyo, Japan. PeerJ. 10, e13838. doi: 10.7717/peerj.13838.
- Fujimoto M, Hayashi K, Nishiura H, 2023, Possible adaptation measures for climate change in preventing heatstroke among older adults in Japan. Front Public Health. 11, 1184963. doi: 10.3389/fpubh.2023.1184963.
- Hayashi K, Fujimoto M, Nishiura H, 2022, Quantifying the future risk of dengue under climate change in Japan. Front Public Health. 10, 959312. doi: 10.3389/fpubh.2022.959312.
- N2/LAB, 2024, N2/LAB ワークショップ報告 HP, <https://n2-lab.jp/report>.
- Wang X, Nishiura H. 2021, The Epidemic Risk of Dengue Fever in Japan: Climate Change and

- Seasonality. *Can J Infect Dis Med Microbiol.* 2021, 6699788. doi: 10.1155/2021/6699788.
- Xu, F., H. Tajima, H. Kato, 2023, Assessing Natural Disaster Risks for Bus Operation Bases: Focus on Vulnerability and Importance. *Modern Environmental Science and Engineering*, 9 (7-9), 99-107.
- Yamasaki, J., Wakazuki, Y., Iizuka, S., Yoshida, T., Nitnai, R., Manabe, R., Murayama, A., 2024, Microclimate Simulation for Future Urban District under SSP/RCP: Reflecting changes in building stocks and temperature rises. *Urban Climate*, 57, 102068.

6. 影響・適応策の社会・経済的効果

6.1 気候変動の経済影響と適応能力

6.1.1 気候変動の農業への影響と適応能力

(1) 気温上昇の農業への影響

本研究では、米、野菜、果樹の作物別収量モデルを開発し、気温上昇による収量影響について全国評価（市町村単位）を行い、地域別の脆弱性を評価した。以下では、米と玉ねぎの結果を紹介する。

気温上昇は、高温障害によって収量を減少させる一方、低気温が上昇することで冷害リスクを減らすため、収量を増加させる効果を持つ。このため、市町村レベルの過去の収量データと気象（日平均気温、降水量、日照時間など）に関する日データを用いて、年間の気象変数が収量に与える影響を推計し、作物別（米、野菜、果樹など）収量モデルを開発し、気温上昇（2℃上昇のケースを想定）による収量への影響を地域別に評価した。

図 6.1.1 は、米の収量モデルを用いて、2℃の気温上昇が米収量に与える市町村別の影響のシミュレーション結果を地図化したものである（Ko et al., 2024）²。

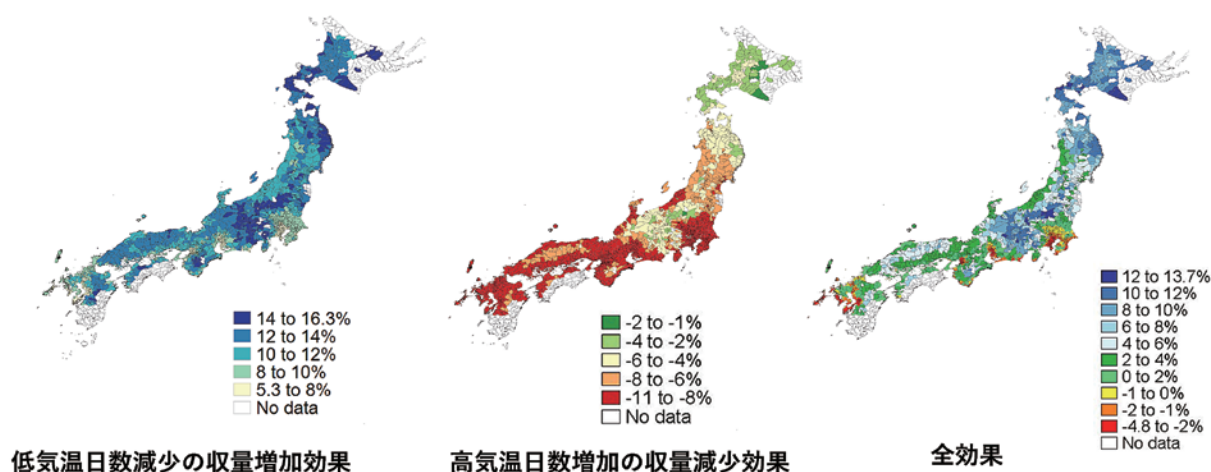


図 6.1.1 米収量の変化（低気温日数減少効果、高気温日数増加効果、全効果）

左の図は、2℃上昇によって、低気温による収量へのマイナス効果が減少することで、収量を増加させる効果を表しており、中央の図は、気温上昇によって高気温による高温障害のマイナス影響がさらに大きくなることで収量を減少させる効果を表しており、右の図は低温影響の減少によるプラスの効果と高温障害の増加によるマイナスの効果を合計した総合影響を表している。中

² 本研究では、経済評価を目的に、過去の市町村別の収量データと気象要因および社会・経済的要因から統計モデルを構築し、現在から気温が2℃上昇した際の影響を経済的観点から分析している。一方、第1章では、作物の生育、収量、各種障害に及ぼす気候要因を、影響のプロセスを表したモデルで定量化する方法を用いて、気候シナリオに基づき、将来の収量、品質、高温障害の発生リスクや適応技術の定量的評価を行っている。このように、類似の分析を行っているが、それぞれの分析手法が異なっており、目的に応じた異なる視点からの評価を提示している。

央の図からわかるように、高温障害のマイナス影響は、東北や北海道地域では小さいものの、関東以西では大きくなっている。一方、低温のマイナス影響の減少によるプラス影響を考慮すると、多くの地域で気温上昇による収量への影響は、プラスに働く地域が多くなっていることがわかる。

同様の分析を、他の作物についても行った。図6.1.2は、大豆と玉ねぎのシミュレーション結果(気温上昇による全効果のみ)を示している。大豆については、西日本を中心に、気温上昇による収量低下が顕著であった。米と比較すると、大豆の気温上昇の影響は、より広範囲で、大きなものとなることを示している。玉ねぎについては、九州南部や首都圏の一部の地域において、気温上昇による収量低下がみられたが、多くの地域では、収量が増加することを示している。

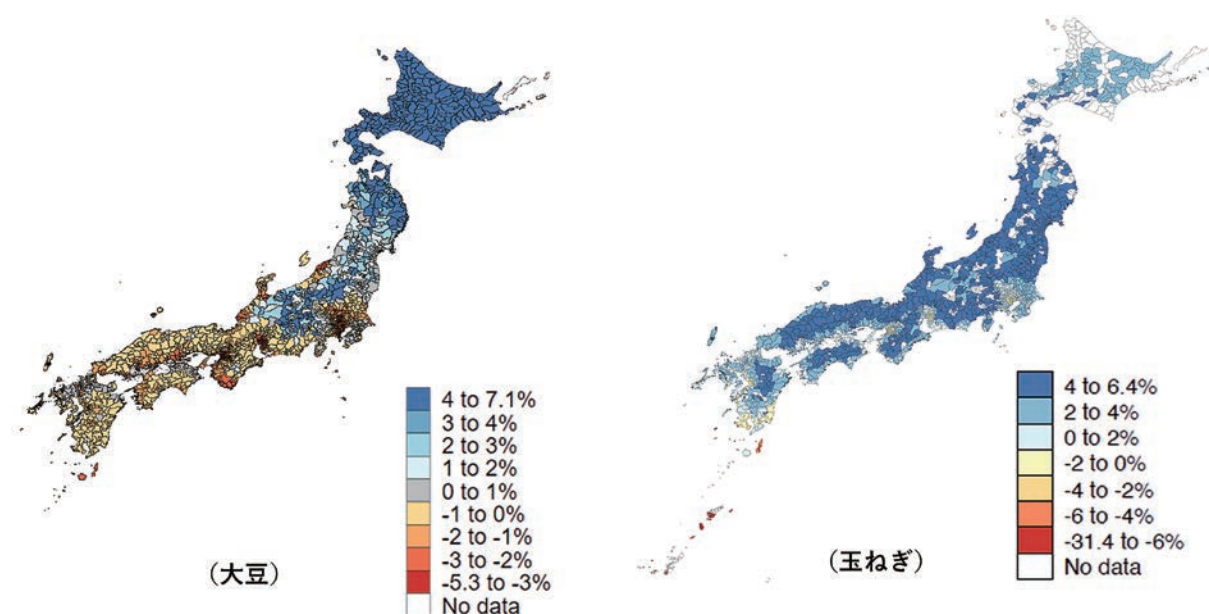


図 6.1.2 大豆（左）と玉ねぎ（右）の収量の変化

(2) 気温上昇に対する適応能力～農家の年齢とソーシャルキャピタル(地域の助け合い)の役割

高齢化やソーシャルキャピタル（地域の助け合い）は、気候変動に対する適応策を実施する能力（適応能力）に影響を及ぼす。たとえば、高齢農家の場合、認知能力や体力が相対的に低くなる。このため、望ましい適応技術があっても活用できず、高温障害の影響が大きくなる可能性がある。また、地域の助け合いは、適応策の実施を容易にするために、高温障害の影響を小さくする可能性がある。このため、米を対象に、高齢化や社会的共通資本が気温上昇による収量低下にどのような影響を与えるかについても分析を行った (Ko et al., 2024))。図 6.1.3 は、農家の平均年齢は 50 歳のケース、60 歳のケース、70 歳のケースについて、気温に対する収量への影響を推計したものをグラフ化したものである。図からわかるように、日平均気温が 24℃を超える場合、収量を低下させるが、その効果は、農家の平均年齢が 60 歳において最も小さく、70 歳になるとその影響は大きくなることがわかった。なお、50 歳の農家は、60 歳の農家と比較して高温障害によるマイナス影響が大きくなっている。これは、若い農家の場合、そうでない農家と比較して、栽培における経験が少ないために、気温に対する適応能力が低くなることを表している。

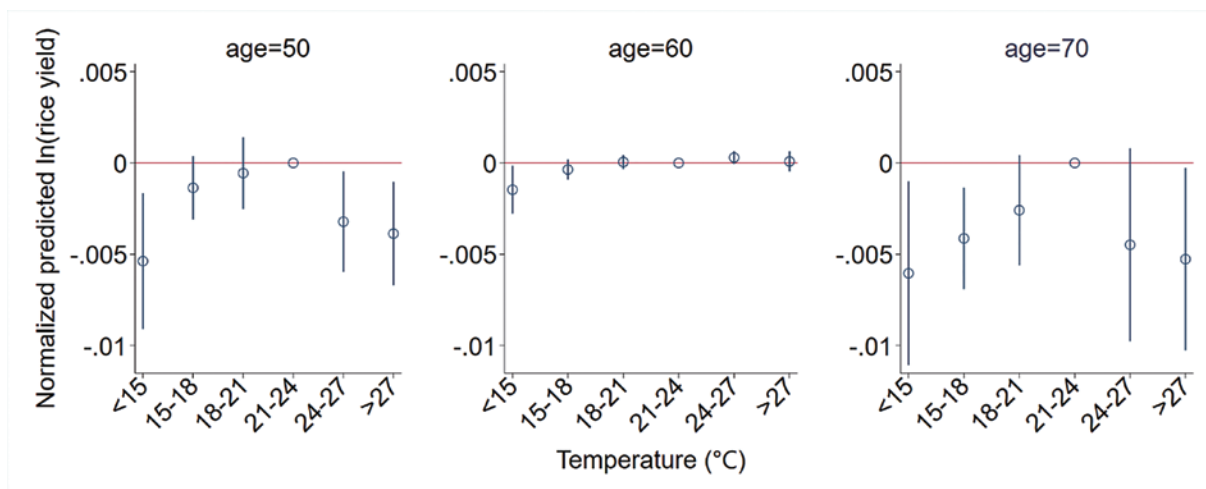


図 6.1.3 各気温グループの米収量への影響と年齢による違い

この推計結果を用いて、現在の年齢を前提に、仮想的に日平均気温が2℃上昇した場合に生じる高温障害の収量への影響と5歳高齢化した場合の高温障害の影響を比較したところ、日本全体では、高温障害の影響は、現在年齢のシナリオで、0.87%程度、高齢化が進むと、0.96%程度で、高齢化の進行は、高温障害によるマイナスの影響を0.1%程度増加させることがわかった。

また、コミュニティ活動への農家の参加率の高い（地域における助け合いが活発な）地域では、図 6.1.4 に示すように、高齢農家の高温障害のマイナス影響が小さくなることが分かった。

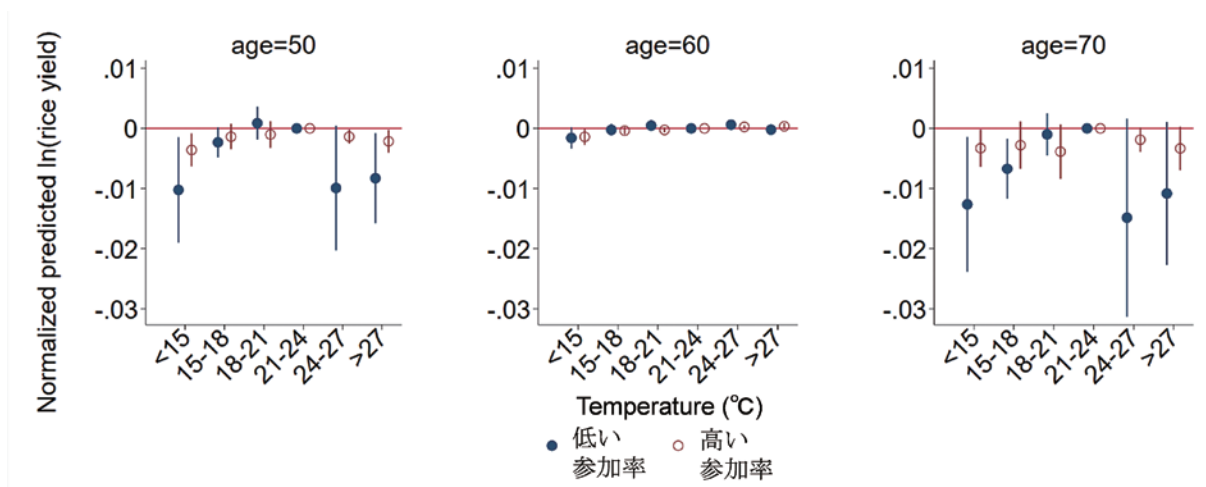


図 6.1.4 地域コミュニティ活動と気温による収量（年齢別）への影響

気候変動の影響を緩和するための適応策が存在していたとしても、実際に実施されなければ、影響を緩和することができない。6.2 節で、農家の高齢化、後継者の不在は、農家の適応策の実施を弱めることを明らかにしている。このことから、農業における若年齢化や後継者問題の解決、地域において、普段から農家同士が協力できる体制を構築することは、適応策の実施のために重要な役割を果たすと考えられる（内田，2022）。

(3) 水害の経済影響と耕地の役割

水害被害モデル（市町村単位）を開発し、水害による経済影響を分析した（Uchida et al., 2023）。その結果、降水量が1.5倍になると、関東から九州までの広範囲で水害区域面積、水害被害総額が増加することが明らかになり（図 6.1.5）、最大で5～8%程度増加することがわかった。

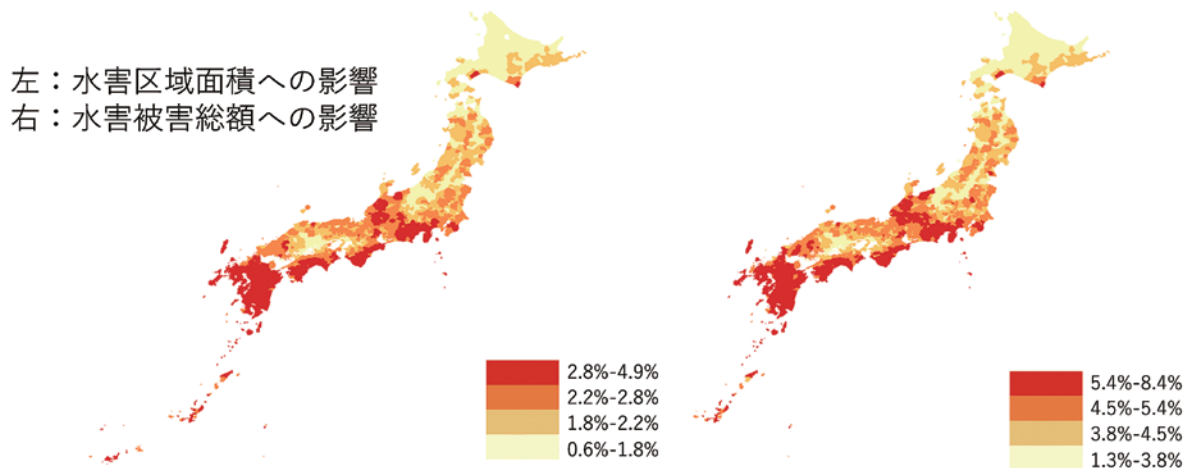


図 6.1.5 降水量（従来の 1.5 倍）による影響被害の変化

また、耕地による保水効果（田んぼダムなど）による減災効果についても推定した。その結果、水田面積比率が高い地域では、日最大降水量がある閾値を超えると水害被害を助長する可能性がある（堤防の決壊と類似した現象が生じうる）ことを明らかにした。一方、畑作地ではこうした現象は有意に観察されなかった。このことは、地域ごとに耕地の場所、耕地比率などに配慮した土地利用政策の実施が必要となることを示唆している。

6.1.2 気候変動の健康影響と適応能力

気温上昇は、ヒートショックなどに起因する冬の死亡者数を減らす一方、熱中症によって、夏の死亡者数を増やす。このため、冬の気温の影響と夏の気温の影響を考慮した健康被害モデルを開発し、気温が死亡率に与える影響について全国評価（市町村単位および都道府県単位）を行い、地域別の脆弱性を評価した。分析の結果、気温上昇は、夏における熱中症によって死亡率を増加させる一方、冬における、低温によるヒートショックや事故による死亡率を減少させる。このため、冬と夏の気温が低い地域では、気温上昇による冬の死亡率の低下が、夏の死亡率の上昇を上回るため、気温上昇は年間の死亡率を減少させ、冬と夏の気温が高い地域では、気温の上昇は年間の死亡率を増加させることが分かった。図 6.1.6 は、65 歳以上の高齢者の死亡率を分析対象とする推計結果を用いて、気温が 2℃ 上昇した場合の 65 歳以上の死亡率への影響を市町村別にシミュレーションした結果を表している。

一方で、ソーラーパネルの設置による自家発電により、高齢者（65 歳以上）の熱中症による死亡者数を減少させる可能性が高いことも分かった。高齢者は、認知能力の低下と体温の調整能力が低下することから高気温に対する感度が低く、さらに、電力料金の支払いを減らすために、高気温になっても我慢して熱中症でなくなるケースが生じていると考えられる。パナソニックが 2022 年に実施した夏のエアコン利用に関する調査（https://panasonic.jp/aircon/air_letter/

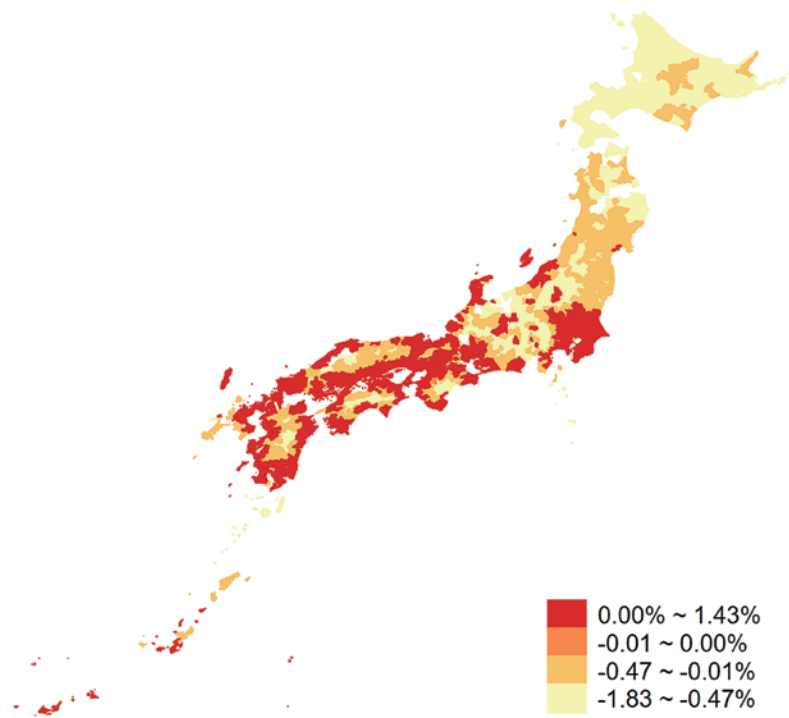


図 6.1.6 気温上昇による死亡率への影響

news/heatstroke_02.html) によると 60 歳以上の回答者の 60%以上が、エアコンを控える理由として「電気代がかかる」を挙げ、高齢者は若い世代に比べて、より電気代を気にする傾向があることを明らかにしている。加えて、2011 年から 2013 年にかけて実施された節電キャンペーンにより、高齢者および低所得者の多い都道府県では夏場の死亡リスクが有意に高まったことが報告されている (He and Tanaka 2023)。我々の分析結果は、自家発電がこうした死亡リスクを抑制する有力な手段の一つであることを示唆している。ただし、異常気温への適応手段としてエアコンの使用が増えることで、化石燃料を用いた発電量も増えてしまうと、温室効果ガスの排出量増加という新たなパラドックスを生んでしまうことに注意する必要がある (Biardeau et al., 2020)。それに対し、太陽光など再生可能エネルギーを用いた地産地消の「持続可能な適応策」は、緩和策と適応策の両立に向けたカギとなりうる (内田, 2021)。

6.1.3 気候変動の製造業への影響と適応能力

過去の各市町村の製品出荷額、事業所数、雇用のデータと地域別の水害のデータを用いて、水害が出荷額、事業所数、雇用などに与える影響を推計し、製造業被害モデルを開発するとともに、水害が製造業部門に与える経済影響（製造出荷額、雇用、事業所の立地変化）について全国評価（市町村単位）し、地域別の脆弱性を評価した (Yoshida et al., 2021)。図 7 は、水害が長期的に各市町村の製品出荷額、事業所当たりの出荷額、事業所数、雇用に与える影響を推計した結果を表している。図 6.1.7 の横軸は、0 を起点（水害発生時）として右方向に水害発生からの経過年数を表しており、縦軸は、分析対象の変数の変化率を表している。図からわかるように、水害がなかった場合と比較して、製造出荷額、事業所数、雇用へのマイナス影響は大きくなる（事業所数の減少は水害地域からの撤退を示唆）。

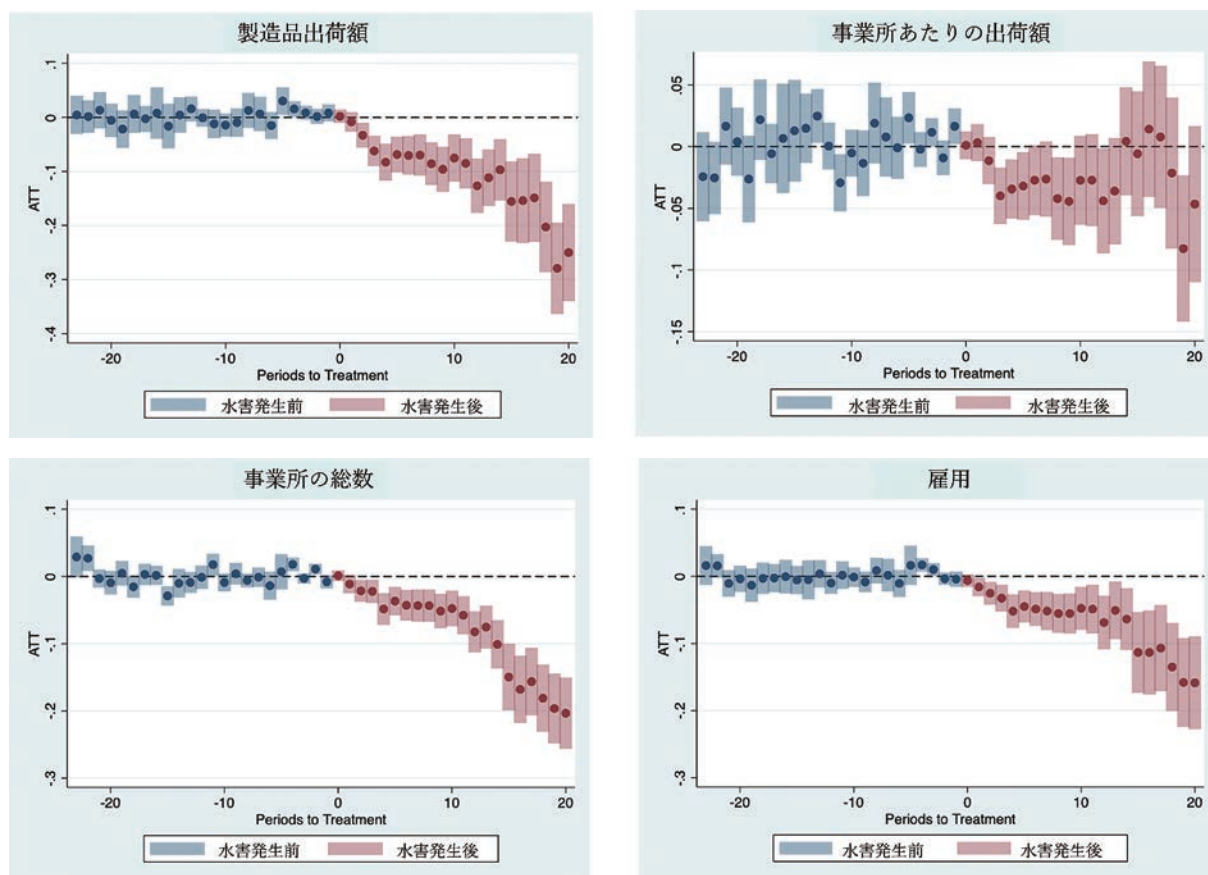


図 6.1.7 水害の経済影響（製品出荷額、事業所あたり出荷額、事業所数、雇用）

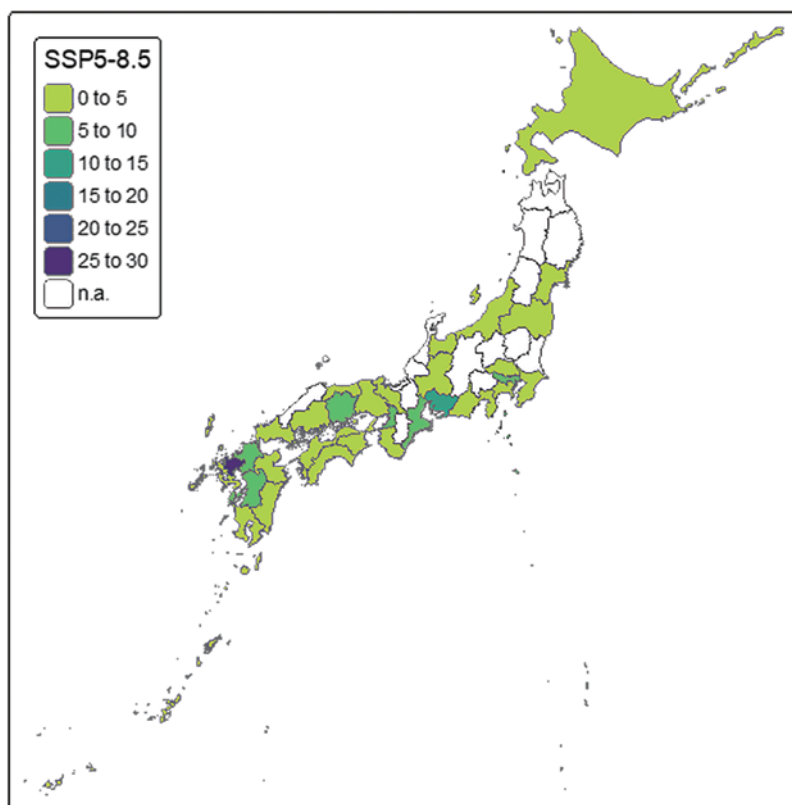
（1）製造業の適応能力

水害に対して、事前に準備（適応）を行うことでその影響を緩和することができる。しかし、どの程度準備できるかは、事業所の規模や過去の経験に依存するものと考えられる（内田，2022）。たとえば、規模の小さい事業所では、資金が十分でないために、より効果的な適応策が存在していたとしても、それを実行できないかもしれない。また、水害が頻繁に起こる地域では、そうでない地域と比べて、経験による、水害に対する対処の仕方を知っているため、より効果的な準備が可能となり、水害の影響を減らすことができるかもしれない。このため、事業所の規模の違いや、水害の経験の有無の違いが、水害による経済活動へどのような影響を及ぼすかを分析した（Yoshida et al., 2021）。その結果、水害は、小中規模の事業所数を 20% 程度減少させ、大規模な事業所（10% 程度減少）と比べて 2 倍の違いがあり、規模が小さい事業所は水害に脆弱であることがわかった。このため、小中規模の事業者の適応を推進するためには、適応策を実施する費用負担などについて、行政の支援が必要となる。また、被災経験がある地域では、そうでない地域と比べて出荷額への影響が小さく、災害経験が災害による影響を小さくする効果（適応効果）が大きい（20～50% 程度）ことがわかった。このことは、経験の差による知識の差が適応行動に大きな差を与えていることを示唆している。このため、災害に対する適応行動や事業継続に関する認証制度の整備によって、経験のない事業所でも、事前対策が進むような仕組みを作ることが必要となる。

(2) サプライチェーンを通じた経済影響

経済影響を総合評価するために 47 都道府県マクロモデルを開発し (Itakura, Iwamoto, 2024)、海面上昇 (図 6.1.8 の想定) による土地喪失によって生じる直接的な経済影響 (直接影響) 及びサプライチェーンを通じた間接的な経済影響 (間接影響) を総合的に評価し、各県への影響を明らかにした (Itakura et al., forthcoming)。企業が土地喪失地域外に立地していたとしても、取引先が海面上昇の被害を受けることによって、取引先が部品の供給先である場合、部品供給ができなくなることで、生産量を減らさなければならなくなる。また、取引相手が部品の調達先である場合には、部品調達ができなくなるために、生産が困難になる。このように、サプライチェーンを通じて、土地喪失地域外に立地していても、生産に悪影響が生じる。その一方、被災地での生産量が減少することで、被災地で分担していた生産が、被災地外に移動することによるプラスの効果をもたらす。このため、サプライチェーンの効果はマイナスの影響を受ける県とプラスの影響を受ける県に分かれる。

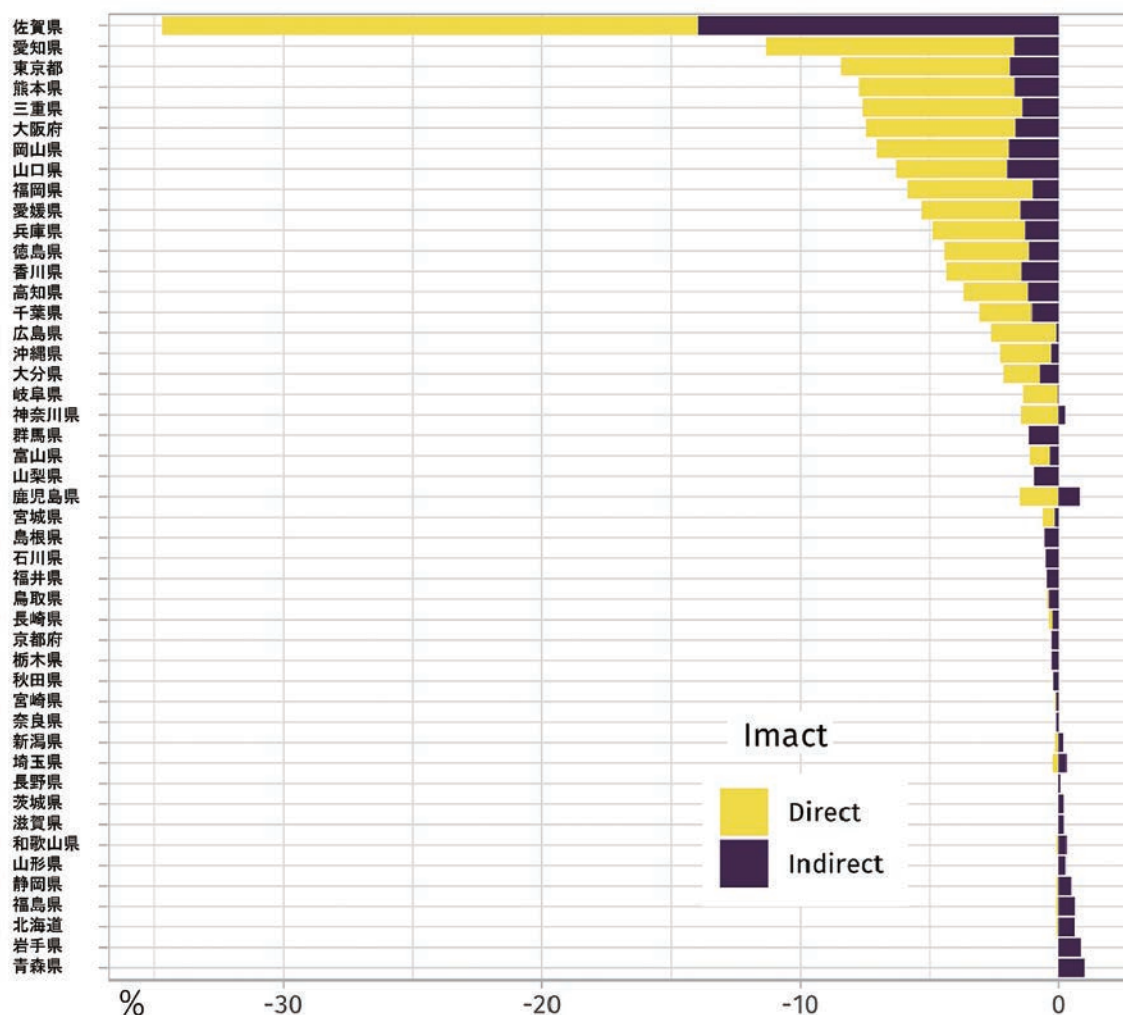
以下では、気候変動シナリオ SSP5-8.5 の下で、海面上昇によって農地と市街地が失われた場合を想定して、直接的な経済影響と間接的な経済影響のシミュレーション結果について説明する。児玉他 (2022) の推計結果を用いると、2100 年における、SSP5-8.5 下での都道府県別の土地の喪失の割合は、図 6.1.8 に示すとおりである (Itakura et al., forthcoming)。



出所：Itakura, et al. (2025)

図 6.1.8 SSP5 における海面上昇による農地と建物用地の浸水面積割合の想定，2100 年 (%)

図 6.1.9 は、SSP5-8.5 シナリオにおいて、2100 年における各都道府県の実質 GRP への影響及び直接効果と間接効果の分解を示している。最も大きな土地喪失による被害は佐賀県で、-35% の実質 GRP の減少（うち直接効果が 21%、間接効果が 14%）が見られる。これは、図 6.1.8 に示されているように、佐賀県が農地および市街地の土地喪失率が 26% と最も高かったことが原因であり、これが実質 GRP の大幅な減少につながった。また、佐賀県では、サプライチェーンを通じたマイナスの間接効果が大きいことも、全効果が大きくなる要因となっている。土地喪失率が 2 番目に高い愛知県と東京都でも、実質 GRP の減少が顕著である。愛知県の実質 GRP は 11%、東京は 8% 減少する。海面上昇により土地が失われると予測されている地域は主に西日本に位置しているため、実質 GRP へのマイナスの影響は、その地域でより大きくなる傾向にある。一方、海面上昇による土地の喪失が相対的に小さい都道府県では、サプライチェーンを通じてプラスの効果が生じる結果、都道府県別の GRP が増加する件も存在する（青森県、岩手県、北海道他）。



出典：Itakura, et al. (2025)

図 6.1.9 都道府県別の実質 GRP への影響（直接効果と間接効果），2100 年（%）

6.2 気候変動に対する適応行動のインセンティブの分析

本研究では、気候変動に対する農家の適応行動のインセンティブの分析を行い、どのような要因が農家の適応行動を促進するかについて明らかにした。

第一に、経営リスク分析を行い、農業経営が直面する気候変動の経営リスクの要因を明らかにし、経営リスクと適応行動の関係を分析した (Nohara et al., forthcoming)。その結果、米を主に栽培する農家にとって、後継者不足や高温障害の経験は経営リスクを高めていることがわかり、認定農業者に登録したり高温に強い他の作物への転換という適応策を導入したりする傾向にあることが分かった。また、野菜を主に栽培する農家にとって、豪雨や台風の経験は経営リスクを高めていることがわかり、水量や温度の調整、高温耐性品種の導入や高温に強い他の作物への転換といった適応策を導入する傾向があることが分かった。

さらに、気温や自然災害（多雨や水害など）に対する農家の適応行動モデルを開発し、16種類の適応策（①耐性品種の導入、②水不足に備えるためのため池活用、③水害に備えてのため池活用、④作付け時期の変更、⑤かけ流しによる水温調整、⑥肥料の調節、⑦高温に強い作物への転換、⑧低気温に強い作物への転換、⑨適温の異なる複数の作物栽培によるリスク低減、⑩気象条件の異なる場所での栽培、⑪保険の活用、⑫冷暖房機器を使った気温調整、⑬水害の少ない場所への移動、⑭水害被害を回避するための取り組み、⑮農薬・防除薬の工夫、⑯スマート農業の導入）を対象に農家の適応策の実施のインセンティブを分析した。その結果、以下のことがわかった。

- (1) 農家の年齢があがると、いずれの適応策も取り組みが弱くなる傾向がみられ、特に、⑫、⑮については、強い影響がみられた。
- (2) 高齢であっても、後継者が存在する農家では、④、⑪や⑮に関する取り組みが強くなる。
- (3) 高気温による高温障害の経験は、①、④、⑦、⑨、⑪の取り組みに対して積極的になる。
- (4) 多雨による作物被害の経験は、①、④、⑬、⑭の取り組みを強める一方、⑯の取り組みを弱める。
- (5) 集中豪雨、台風や水害の経験は、⑪、⑭の取り組みを促進する。

上記の (3)～(5) の結果は、災害経験のない農家の適応行動は不十分なものとなることを意味する。このため、災害の適応に関する認証取得などの制度の設立により、災害経験のない農家でも、災害対策の実施しやすくなる環境を作ることが重要となる。

参考文献

- 内田真輔 (2021) : 気候変動影響をどのように考えるか, 経済セミナー, 2021 年 12 月・2022 年 1 月号 (723 号), pp. 34-38
- 内田真輔 (2022) : 気候変動適応策の現状と課題: 適応格差の是正に向けた政策視点, 環境経済・政策研究, 第 15 巻 1 号, pp.21-28
- 児玉康希・横木裕宗・田村誠 (2022) : 人口・土地利用シナリオに基づく日本沿岸域の海面上昇の社会経済影響評価, 土木学会論文集 G (環境) 78 (5), I_349-I_357
- Biardeau, L.T., L.W. Davis, P. Gertler, C. Wolfram (2020) : Heat exposure and global air conditioning, Nature Sustainability, 3(1), pp.25-28.
- Itakura, K., A. Hibiki, J. Yoshida, M. Tamura, H. Yokoki (2025) : Chapter 23 Direct and Indirect Economic Impacts of Sea Level Rise in Japan. In: Climate Change Impacts and Adaptation

- Strategies in Japan - Integrated Research toward Climate Resilient Society – [Mimura, N., S. Takewaka (eds.)]. Springer (掲載予定)
- He, G., T. Tanaka (2023) : Energy Saving May Kill: Evidence from the Fukushima Nuclear Accident, *American Economic Journal: Applied Economics*, 15 (2), pp.377–414.
- Itakura, K., T. Iwamoto (2024) : Regional Computable General Equilibrium Model of Japan and the Global Economy, Tohoku University Research Center for Policy Design Discussion Paper, TUPD-2024-012, pp. 1-20
- Ko, Y.C., S. Uchida, A. Hibiki (2024) : Aging Farmers and the Role of Community in Adaptation to Extreme Temperature Effects on Crop Yields, RIETI Discussion Paper Series 24-E-069, pp.1-32
- Nohara, K., A. Hibiki, S. Uchida, J. Yoshida (2025) : Chapter 22 Determinants of Farmers' Strategies for Adapting to Climate Change in Japan. In: *Climate Change Impacts and Adaptation Strategies in Japan - Integrated Research toward Climate Resilient Society –* [Mimura, N., S. Takewaka (eds.)]. Springer (掲載予定)
- Uchida, S., A. Hibiki, S. Maki, K. Nohara, J. Yoshida (2023) : Rainfall Intensity and Flood Damages: Hidden Risk of Agricultural Land in Floodplains, 2023 International Conference on Agricultural and Environmental Economics, Department of Agricultural Economics, National Taiwan University, Taipei, September 3, 2023.
- Yoshida, J., S. Uchida, K. Nohara, A. Hibiki (2021) Natural Disasters and Firm Selection: Heterogeneous Effects of Flooding Events on Manufacturing Sectors in Japan, Tohoku University Research Center for Policy Design Discussion Paper, TUPD-2021-007, pp. 1-23

第2部 適応策の評価

7. 適応策の分類と現状評価

7.1 研究の目的

2018年の気候変動法の施行によって、政府や地方自治体を中心に、気候変動の適応策が進展している。一方、夏の猛暑や水害・土砂災害の激化などが現れ、現在と将来の適応策のあり方の検討が急務になっている。その中には、影響事象と地域の特性に合わせて、いかに有効な適応策を計画するかという課題も含まれる。その検討の前提として、政府や地方自治体、企業等で提案されている適応策オプションを収集し、分類方法や評価項目を体系化した適応策オプション・データベースを作成した。これを用いて、適応策オプションの内容を評価し、日本の気候変動適応策の特徴と課題の把握を行った。

7.2 適応策の分類

表7.2.1に政府、自治体、事業者が提案する適応策オプションをデータベース化した分類項目を示す。

【A】対象分類については環境省による「気候変動影響評価報告書（2020）」にある、農業・林業・水産業、水環境・水資源、自然生態系、自然災害・沿岸域、健康、産業・経済活動、国民生活・都市生活の7つの影響・適応分野を基本とした。さらに、法律・条例の制定や研究開発など分野横断的な施策があるため、この7分野に共通施策・基盤的施策を加えた8分野とした。

【B】では、適応策カテゴリー（機能・方法）、適応策の変革性を分類した。適応策カテゴリーは、①土地利用・空間計画、②施設・インフラ整備1（グレーインフラ）、③施設・インフラ整備2（グリーンインフラ）、④技術的対策、⑤制度的対策、⑥経済的対策、⑦社会的対策、⑧影響予測・情報提供・住民連携の8分類とした。また、変革性は、Fedeleら（2019）に従い、①Restructuring（構造改革）、②Path-shifting（経路転換）、③Innovation（イノベーション）、④Systemwide（システム横断）、⑤Multiscale（階層横断）、⑥Persistent（長期的視野）の6分類とした。

その上で、【C】として他の政策や緩和策、社会課題とのシナジー／トレードオフに関する評価

を行うという構成とした。

表 7.2.1 適応策オプションの分類・評価体系（出典：三村他，2024）

グループ	番号	項目
見出し項目		No.
		提案者／出典
		適応オプション名
【A】対象分野	A-1	大分類
	A-2	中分類
	A-3	小分類
	A-4	細分類
	A-5	目的・効果
【B】適応策オプションの特性 評価	B-1	適応策オプションの内容
	B-2	適応策カテゴリー ①土地利用・空間計画 ②施設・インフラ整備1（グレーインフラ） ③施設・インフラ整備2（グリーンインフラ） ④技術的対策 ⑤制度的対策 ⑥経済的対策 ⑦社会的対策 ⑧影響予測・情報提供・住民連携
	B-3	変革性 ① Restructuring（構造改革） ② Path-shifting（経路転換） ③ Innovative（イノベーション） ④ Systemwide（システム横断） ⑤ Multiscale（階層横断） ⑥ Persistent（長期的視野）
【C】適応策オプションのシナ ジー／トレードオフ評価	C-1	他の適応策とのシナジー／トレードオフ
	C-2	緩和策とのシナジー／トレードオフ
	C-3	他の社会的課題との関係
【D】出典		出典の情報

7.3 適応策オプションの分類と分野別の特徴

全体では667件の適応策オプションを収録し、内訳は政府が34.0%、地域・自治体が52.9%、事業者が13.1%であった。地方自治体の割合は、健康、国民生活・都市生活、自然災害・沿岸域、自然生態系などで高く、事業者は、産業・経済活動、健康、自然災害・沿岸域などで比較的高い。

適応策のカテゴリー分布全体では、技術的対策、影響予測・情報提供、制度的対策、社会的対策の順で比率が高く、経済的対策が極めて少なかった。

分野毎のカテゴリー分布では以下の通り特徴が表れた（図 7.3.1）。農業・林業・水産業分野の適応オプションでは、技術的適応策が多い。高温耐性品種の開発、耕作方法の改善、給水施設などの施設整備、ドローンや IT の利用等、技術的対策によって現在の営農維持を目指す特徴がみえる。一方、ウンシュウミカンの産地では高温耐性品種への転換といった変革的適応オプションがすでに実施されている。

水資源・水環境では水質や地下水の収支に関する調査・研究、渇水対策設備の強化等があり、影響予測・情報提供・住民連携、制度的対策、設備・インフラ整備（グレーインフラ）で 8 割以上を占める。

自然生態系では、ニホンジカの拡大などの監視、保護地の管理のための影響予測・情報提供・住民連携、技術的対策、土地利用・空間計画のオプションが多数を占めた。

自然災害・沿岸域では、ほぼ全てのカテゴリーの適応策が取り組まれているが、制度的対策、影響予測・情報提供・住民連携、技術的対策、社会的対策の比率が高い。複数のカテゴリーを組み合わせた流域治水が実施されているのが特徴的である。

健康分野は熱中症と感染症を対象とした適応策が大部分である。熱中症は死亡者が年間 1,000 人を超える年が続いており、2023 年に気候変動適応法が改正され、対策が強化された。地方自治体では、熱中症ガイドライン発行、クールスポット設置などの社会的対策や技術的対策、独居高齢者対策、水分補給、クーラー使用に関する声かけなど個人の対策を促す社会的対策が実施されている。

産業・社会経済活動は多岐にわたる。エネルギー分野では、災害時のエネルギー供給やソーラーファーム農業等の技術的提案が多い。金融保険分野では防災・減災保険、グリーンボンドの発行など経済的対策が提案されている。また、観光業では外国人観光客の安全対策に関する制度的対策、社会的対策が多かった。

国民生活・都市生活では水道・交通などの都市インフラ・ライフラインに対する施設・インフラ整備（グレーインフラ）、水道の安定供給に関する制度的対策、それぞれにおける技術的対策があった。そのほかにも文化・歴史の維持について、影響予測・情報提供・住民連携（調査・研究）と社会的対策が提案されていた。

以上から、分野毎に特徴的な分類があることが把握された。この分野毎の違いは、気候変動影

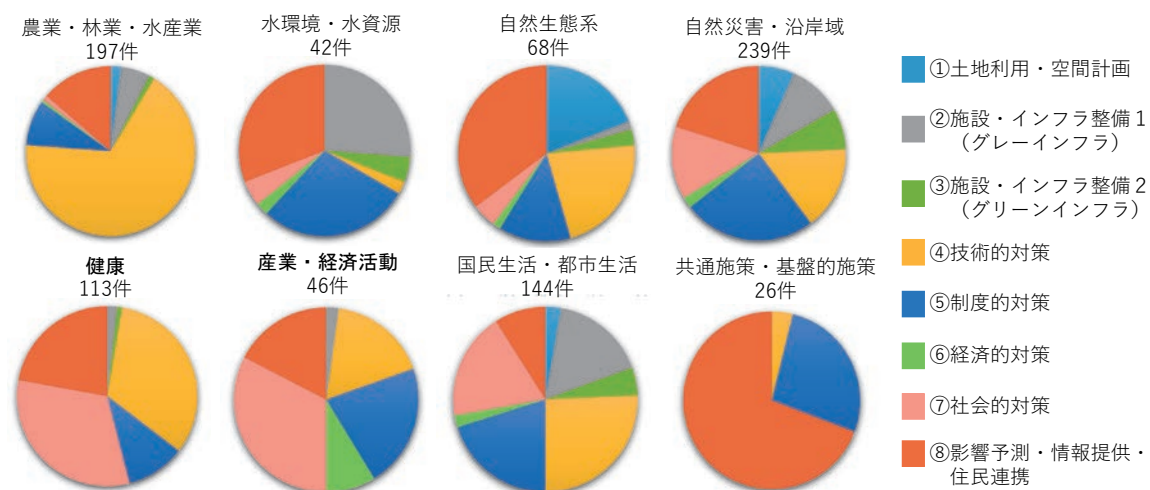


図 7.3.1 分野別の適応策カテゴリー分布（出典：三村他，2024）

響の違いや適応の限界との関係、過去の対策の実績・経験の程度、各分野の将来展望などが重なった結果である。これらの特性をさらに分析することによって、分野毎の有効な適応策を選択する指針が得られると期待される。

7.4 適応の限界と変革的適応策

多様な適応策を評価する視点として、国際的に transformational adaptation（変革的・システム転換的適応）と incremental adaptation（漸進的適応）という2つの区分が議論されてきた。

気候変動適応の初期の対応は、影響の増大に合わせて徐々に現在の対策を強化することになる（漸進的適応）。さらに影響が増大すれば「適応の限界」にぶつかり、これまでの延長線上とは異なる変革的な適応策が必要とされる。このように別次元の影響が見込まれる場合や社会のレジリエンスの抜本的強化に向けた施策が変革的適応策である。IPCCWGII（2022）はそれを「気候変動とその影響を見越して、社会生態システムの基本的な属性を変える適応」と定義している。

本研究では、表 7.2.1 に示す① restructuring（構造改革）、② path-shifting（経路転換）、③ innovation（イノベーション）、④ systemwide（システム横断）、⑤ multiscale（階層横断）、⑥ persistent（長期的視野）の6つの観点で評価した。これに基づいて1つ以上の要素を含むものを変革的適応策として抽出した。変革的な適応オプションは、667 件中 83 件（12.3%）であった（図 7.4.1）。分野別比率では、法律制定や計画の策定、研究開発などを含む共通施策・基盤的施策で変革的適応オプションの割合が突出して高く、次いで水環境・水資源、自然災害・沿岸域、産業・経済活動などで高い。具体的な適応策の例は表 7.4.1 のとおり。

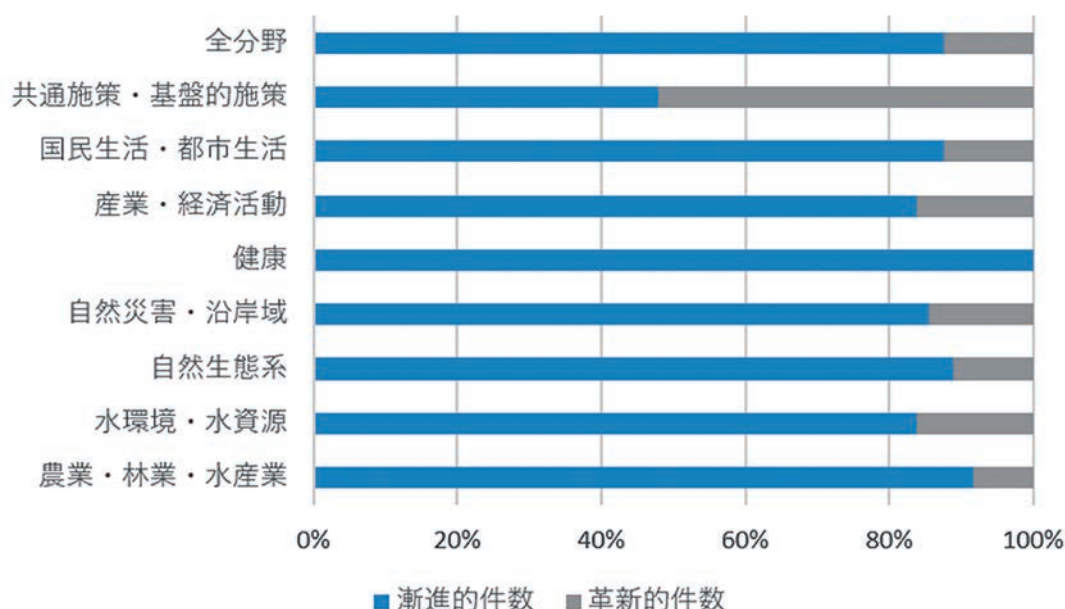


図 7.4.1 変革的適応オプションの現状（出典：三村他，2024）

表 7.4.1 変革的な適応策の例（出典：三村他，2024）

変革性の分類	具体的な適応策の事例
① 構造改革	流域治水（洪水外力の想定を既往最大から将来予測に転換、流域治水協議会による様々なステークホルダーの参加の促進）
② 経路転換	生態系を活用した防災、グリーンボンド（資金調達手段の変更）
③ イノベーション	d4PDF を用いた災害外力の想定、最新技術によるエネルギー供給（太陽光、水素）
④ システム横断	農業基盤・水資源・防災の複合的農村計画、災害への自助・共助・公助の支援、生活文化の継承（豊田市の新たな働き方や暮らし方の普及による中山間地の生活様式と地場産業の継承）
⑤ 階層横断	
⑥ 長期的視野	農業分野における生態系保全と長期的国土管理

現状では変革的適応策オプションは少ない。今後、気候変動の影響が一層激化すれば、影響の厳しい分野では変革的適応策が必要になるであろう。適応策の選択は、各分野や地域社会の将来展望に深く関係する。変革的適応策は、人口減少・高齢化に直面する中長期的な日本社会のレジリエンス構築をめざす上でも重要になる視点である。

参考文献

- 三村信男・槇田容子・真砂佳史・藤田昌史（2024）：気候変動適応策オプション・データベースの構築と適応策の現状分析，第 32 回地球環境シンポジウム（印刷中）
- Fedele G, Donatti CI, Harvey CA, Hannah L, Hole DG. (2019) : Transformative adaptation to climate change for sustainable social-ecological systems, Environmental Science and Policy. 101, pp.116-125.

Box7.1 水環境・水資源に関連する適応策

気候変動適応情報プラットフォーム（A-PLAT）に掲載されている各都道府県の地域気候変動適応計画等（2024年7月1日現在）を調査した。水環境・水資源分野の適応策の記述として、国民生活・都市生活分野等に分類されるものも含めて記載されている例が多いため、ここでは水環境・水資源分野に関連する適応策として広く捉えて解析した。

各都道府県の水環境・水資源分野に関連する適応策の記述は、合計276件抽出された。水資源、水環境、水環境・水資源保全の啓発、上下水道等の水インフラに関する適応策の記述に分類された（図Box7.1.1）。

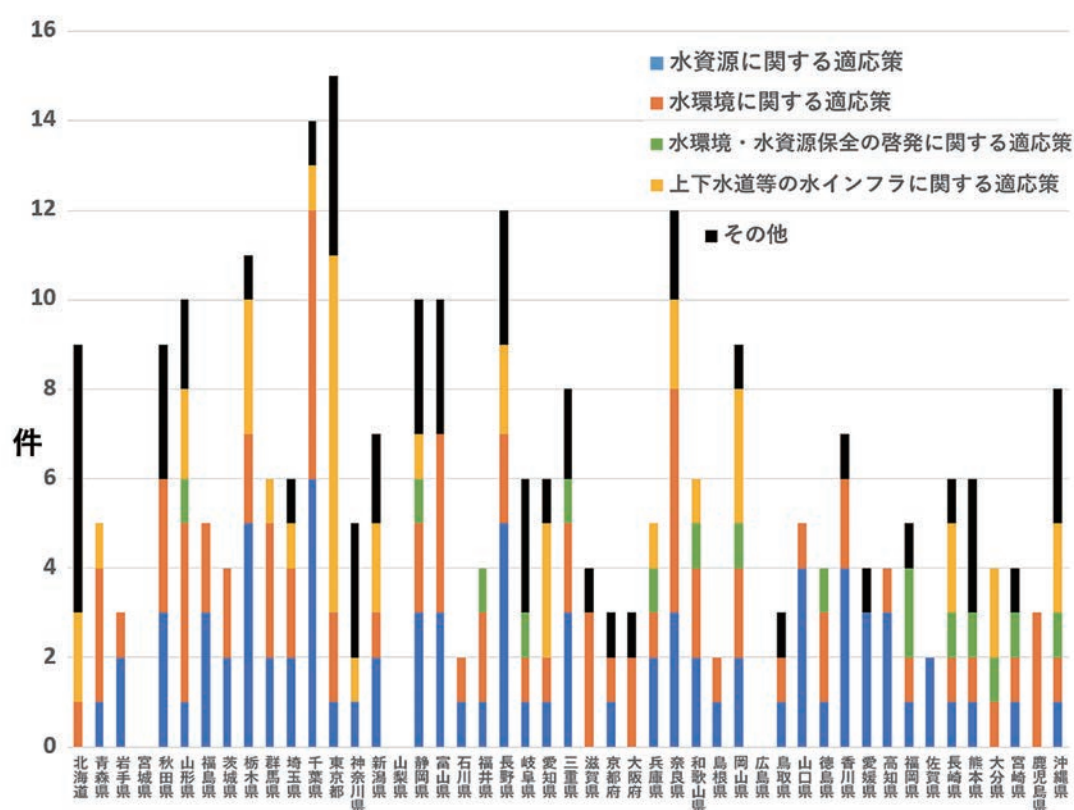


図 Box7.1.1 各都道府県の地域気候変動適応計画における水環境・水資源分野に関連する適応策の記述

各都道府県の地域気候変動適応計画等は、令和3年3月、令和5年3月に策定・改定されている場合が多いことがわかった。そこで、令和5年3月より前に掲載された219件の記述と令和5年3月より後に新たに追加された57件の記述をテキストマイニング（ワードクラウド法）により解析した。令和5年3月より前は、水質保全計画等の既存計画に関連するキーワードが多く見られたが、令和5年3月より後は、湧水等の水資源に関するものが頻出語として検出された（図Box7.1.2）。

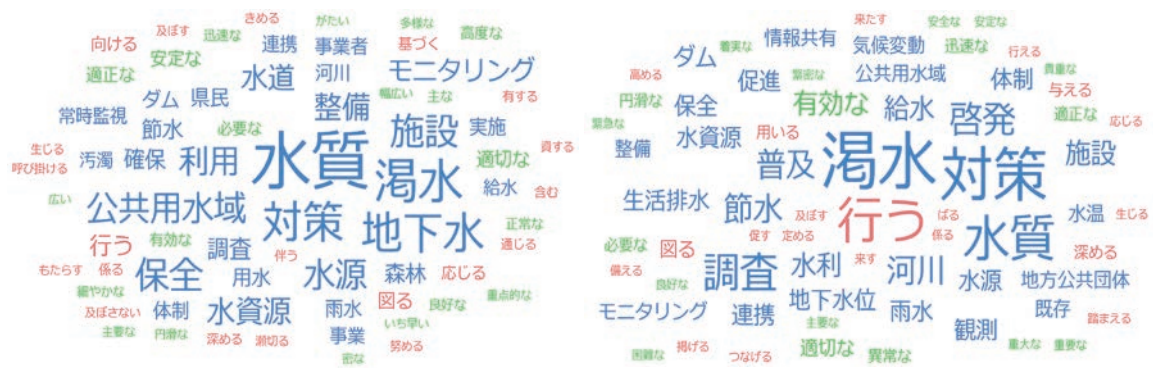


図 Box7.1.2 テキストマイニングの結果（左：令和 5 年 3 月以前、右：令和 5 年 3 月以後）

水環境・水資源分野の気候変動影響に対して、各都道府県がどのような適応策を講じようとしているのか気候変動影響評価報告書に記載されているインパクトチェーンを利用して整理した（図 Box7.1.3）。図中の数値は適応策に関する記述の数を示している。概観すると、降水量・降水パターンの変化に起因する影響に対する適応策に関する記述が多いことがわかった。

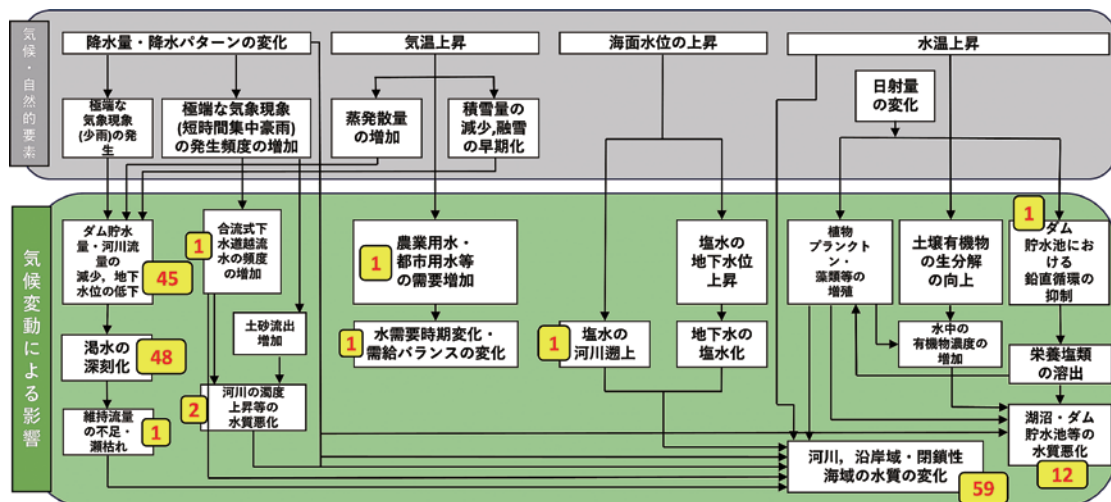


図 Box7.1.3 水環境・水資源分野のインパクトチェーンと適応

Box7.2 気候変動影響の地域性の評価方法

気候変動による影響は幅広くかつ多数の分野にわたる。また日本は南北に長く、気候や自然環境が多様であるため、地域によって求められる適応策は異なる。地域において幅広い影響に対する適応策を検討するには、様々な影響を横断的な視点で分析することが重要である。

図 Box7.2 は、気候変動影響の予測結果に基づき、影響の類似性により日本の地域をグループ化した例である。ここでは、気候変動影響の7分野のうち4分野にまたがる7つの指標（コメ収量、竹の生息可能域、松枯れ病のリスク、熱ストレス超過死亡者数、熱中症搬送者数、洪水による被害額、斜面災害リスク）の予測結果を用いている。7つの影響指標の変化率（基準期間と今世紀末の変化率）を変数としてK-means法による多変量クラスタリングと類似性探索を行うことで、日本の地域を気候変動の影響の程度や組み合わせが異なる6つの影響が類似した領域（homogeneous impact zone, HIZ）に分けることができた。

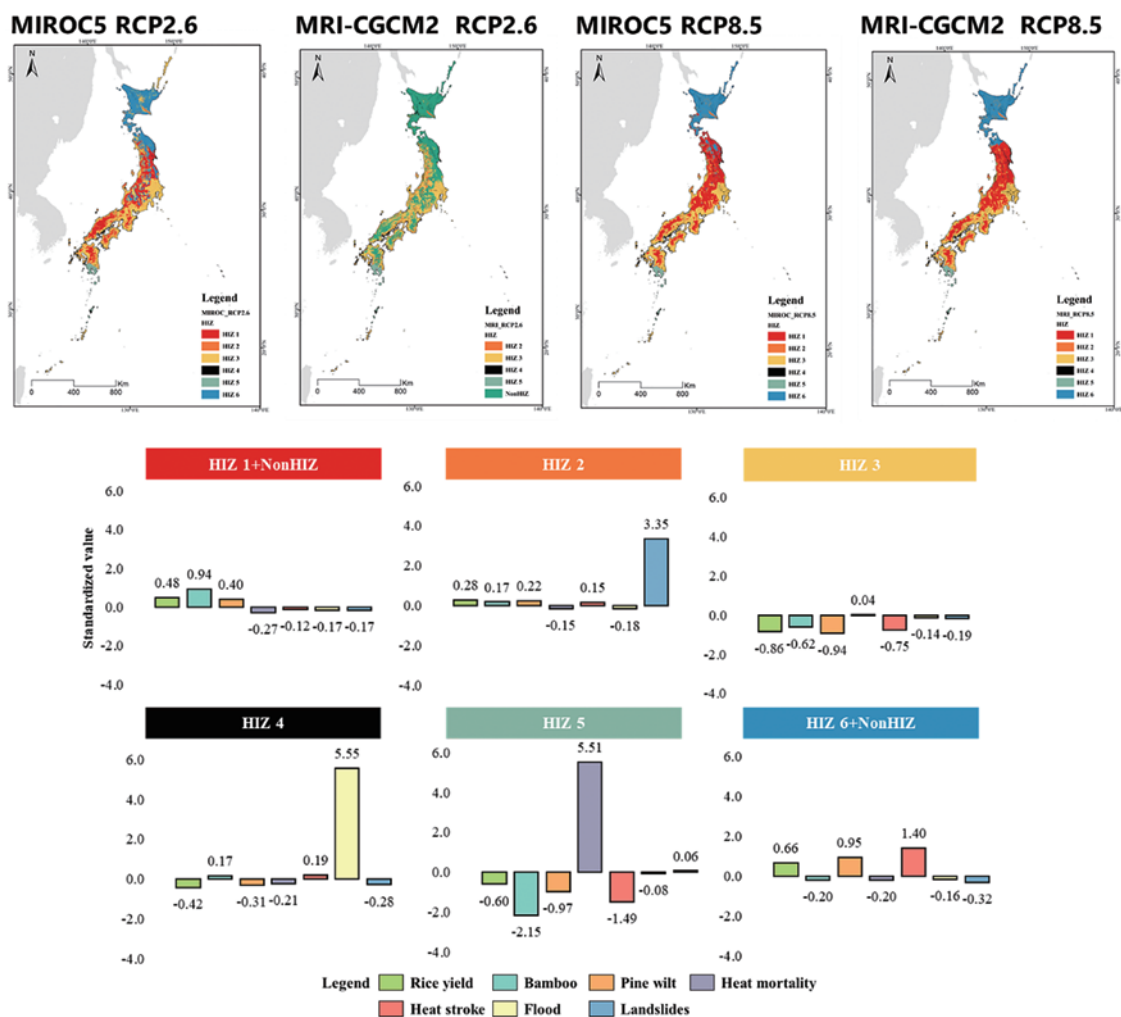


図 Box7.2 4つの気候シナリオの下でのHIZの空間分布

このように気候変動影響のパターンが似た地域では、必要とされる適応策やその優先度が比較的似ていると考えられる。

HIZ を特徴づけた影響指標を詳しく見ると、1つの影響指標の強い影響を受けた HIZ と、複数の影響指標の組み合わせによって特徴付けられた HIZ がみられた。単独で HIZ を特徴づけた指標（洪水による被害額（HIZ 4）と斜面災害リスク（HIZ 2））は気候の類似性に関係なく分布していた。これらの指標は地形など気候以外の条件により特定の地域で極端な値を示す特徴を持つため、独立した HIZ を形成したと考えられる。一方、複数の指標の組み合わせによって HIZ を特徴づけた影響指標は互いに比較的高い相関係数を示し、またそのような HIZ（HIZ 1, 3, 5, 6）は比較的似た気候条件の地域に分布していた。これらの HIZ では、同一の地域で複数の影響が発生するため、それらの影響に同時に対処する必要がある。同時に発生する複数の影響への適応策を統合し、シナジーを探索することで、気候変動影響への適応戦略を効率的に策定、実施できる可能性がある。

8. 地方自治体における適応策の取り組みの特徴

2018年12月に施行された気候変動適応法では、地方公共団体による地域気候変動適応計画を策定するよう努めることとしている。2024年11月時点で、すべての都道府県および政令市を含む369の地方公共団体で適応計画が策定されている。

8.1 地域気候変動適応計画の策定状況及び特徴

2022年8月1日時点で策定されていた162計画を対象に、表8.1.1に記した区分のとおりに計画の位置づけ・内容・構成・他分野の施策との関係等の特性を分析した。

表 8.1.1 分析区分（出典：真砂他 2024 から作成）

項目	区分
地方公共団体の5区分	都道府県 / 指定都市 / 中核市 / 施行時特例市 / その他市区村
気候変動影響の7分野	農業・林業・水産業 / 水資源・水環境 / 自然生態系 / 自然災害・沿岸域 / 健康 / 産業・経済活動 / 国民生活・都市生活
計画の位置づけ	環境基本計画の一部 / 地球温暖化対策計画（区域施策編）の一部 / 独立した適応計画

まず、地域適応計画の策定状況や位置づけ方について、地方公共団体の区分や人口との関連を分析した。結果は、人口の大きい地方公共団体の策定率、分野数が大きく、区域施策編の一部とした計画が多かった。一方、人口が小さい地方公共団体の策定率、分野数は小さく（図8.1.1）、環境基本計画の一部としている計画が半数以上であった。策定率については、都道府県や指定

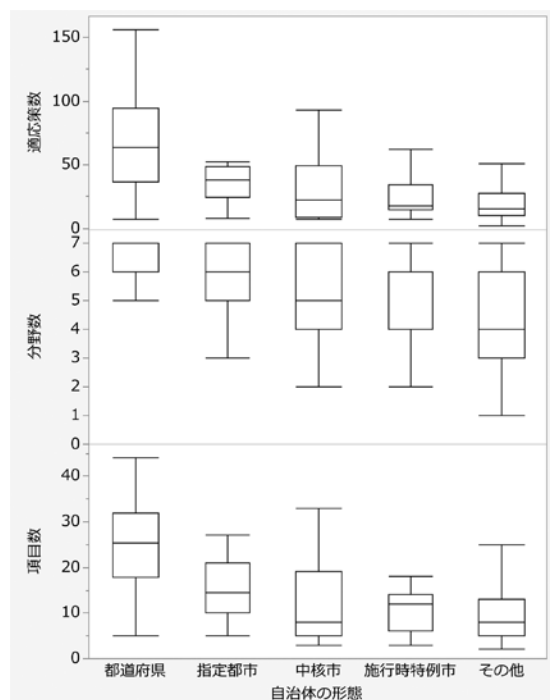


図 8.1.1 気候変動影響の各分野の適応策が計画の適応策全体に占める割合（真砂他，2024 をもとに作成）

都市では90%以上が策定済みであるのに対し、その他市区町村の策定率は3.9%であった（表8.1.2）。計画の位置づけについては、全162件中150件が区域施策編の一部として地域適応計画を同計画を策定していた。

表 8.1.2 地方公共団体の区分および人口ごとの地域適応計画策定状況（2022年8月1日時点）（出典：真砂他，2024）

人口規模	都道府県	指定都市	中核市	施行時特例市	その他市区町村
100万人以上	37	11	-	-	-
30万～100万人	9	7	19	1	10
10万～30万人	-	-	4	10	23
10万人未満	-	-	-	-	31
合計	46	18	23	11	64
（全数）	（47）	（20）	（62）	（23）	（1,636）
（策定率）	（97.9%）	（90.0%）	（37.1%）	（47.8%）	（3.9%）

次に、記載されている適応策の数や対応する気候変動影響の分野について、地方公共団体の区分や人口、および地域適応計画の位置づけ方との関連を調査した。結果は、都道府県では人口が多いほど「自然災害・沿岸域」の適応策が占める割合が有意に高かった（図8.1.2）。市区町村では人口が多いほど「農業・林業・水産業」の割合が有意に低く、「国民生活・都市生活」の割合が有意に高かった。

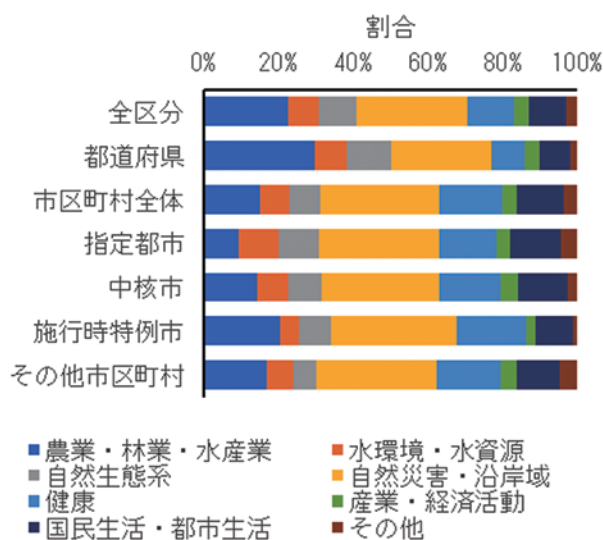


図 8.1.2 気候変動影響の各分野の適応策が計画の適応策全体に占める割合（出典：真砂他，2024）

また、適応策と他の施策との関係についての記載を確認すると、162件中11件にコベネフィットについて、内4件にはトレードオフについての記載があった。コベネフィットは11件中10件が緩和策との関係についての記載であり、そのほか都市緑化の多面的効果、節水・雨水利用の渇水対策、災害時の自立電源確保等に関する記載がみられた。一方トレードオフは、全てエアコン使用の熱中症対策と温室効果ガスの排出増加の関係についてであった。

これらの結果から、地方公共団体の区分や人口規模による策定状況や内容の差異があり、予算や人材等の不足により小規模な地方公共団体ほど地域適応計画の策定が困難であることが示唆された。また、市区町村は人口によって記載の適応策の分野が異なり、都市化の程度など特性によって重点分野が異なることがわかった。例えば、人口が多い地方公共団体では「国民生活・都市生活」、少ないと「農業・林業・水産業」分野の適応策を重点分野としている。地域適応計画策定に区域施策編のマニュアル等を活用していることから、計画の位置づけによる差異はなかった。しかし、区域施策編の策定義務のある都道府県、指定都市、中核市、施行時特例市では地域適応計画の策定率が高く、その他市区町村では低いことから、小規模な地方公共団体での策定はハードルが高く、さらなる支援が必要とされる。また、すでに地域適応計画を策定しており、今後改定する地方公共団体では、他分野の施策との関係や適応の限界・失敗等を含めるといった深化が望まれる。研究上の課題として、策定・改訂の幅広いニーズに対応した情報提供を実施するためには、研究とその成果を受け取る側に合わせた発信、普及のための工夫が必要となる。

8.2 地域気候変動適応センター（LCCAC）の類型化と課題の解析

日本では2018年に気候変動適応法が制定され、適応への取り組みが法的に位置づけられた。適応法の特徴の一つに、地域における適応推進の拠点として地域気候変動適応センター（LCCAC）の設置を各地方自治体に求めている点が挙げられる。LCCACに期待される役割としては、地域における気候変動の影響の把握や適応戦略に関する情報の収集及び普及啓発の実施などが挙げられている。全国に先駆けて2018年に埼玉県に日本初のLCCACが設立され、2024年11月現在全国で65のLCCACが設立されている。

地域で適応に取り組む上でLCCACが直面している課題に関してはこれまで知見がない。LCCACは自治体ごとに設置母体が異なり、地方環境研究所・自治体・大学・NGO等様々な組織に設置されてきた。このような状況を踏まえると体制やこれまでの経験等はLCCACで異なり、従って直面する課題にも違いがあることが予想される。そこで、LCCACが直面している課題を解明することを目的とし、2020年度末までに設置された25のLCCACを対象としてインタビュー調査とアンケート調査を実施した。これら25のLCCACのうち、23のLCCACが都道府県に、2つが市町村に設立されていた。設置母体別にみると、15のLCCACが地方環境研究所、4つが地方自治体、2つが地方環境研究所と地方自治体（合同設置）、1つが大学、1つが地方自治体と大学（合同設置）、残り2つがその他の組織に設置されていた。

LCCACの体制やこれまでの経験等を明らかにするため、質問票を利用したインタビュー調査を実施した。インタビュー調査で得られた情報を基にLCCACの類型化を行った。次にLCCACが直面する課題を特定するためのアンケート票を作成した。すべての質問は選択式で、リッカート尺度で構成されていた。LCCACsの活動実施上の課題を評価するために、13問のアンケート調査を実施した。13の質問のうち3つは予算や人員に関するもの、3つは専門知識に関するもの、4つは外部または内部のグループとの連携・協力に関するもの、最後の3つはその他に関するものであった。

インタビュー調査では各LCCACの専任スタッフの有無、予算、気候変動影響や適応に関する業務の実施経験などについて聞き取りを行った。得られた回答について階層型クラスター分析を用いて分析し、LCCACの類型化を行った（図8.2.1）。分析の結果、2020年末までに設置された

25 の LCCAC は 3 グループに分類できることが明らかになった。グループ 1 は、LCCAC の 48% (n=12) を占めていた。同グループは人員や配分された予算が限られており、また、これまでの類似の経験が浅い LCCAC が分類される傾向にあった。グループ 2 (n = 9) は、LCCAC の 36% を占めていた。同グループは、後述するグループ 3 と 1 の中間的な位置を占めていた。グループ 3 は、LCCAC の 16% (n=4) を占め、他の 2 つのグループよりも専任および兼任スタッフの人数が多い傾向にあり、また、類似の経験が最も豊富だった。

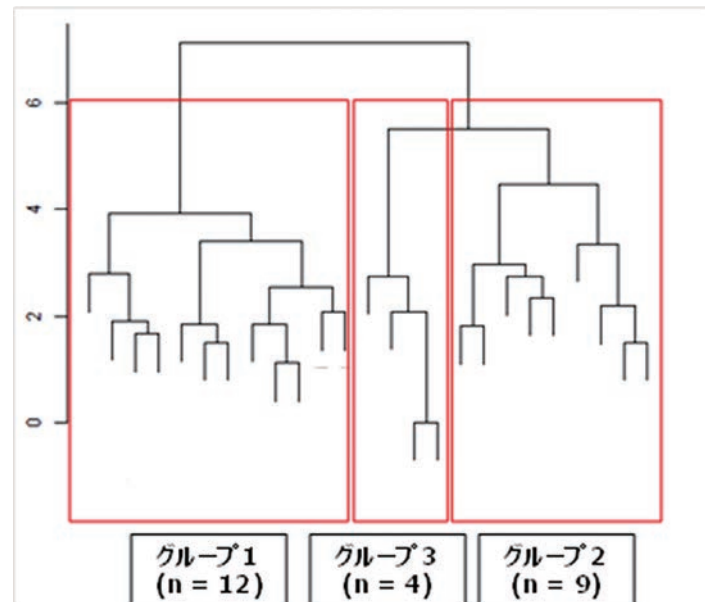


図 8.2.1 体制やこれまでの経験に基づく地域気候変動適応センター（LCCAC）の類型化

図 8.2.2 は、LCCAC で直面した課題を示しており、3 グループ間で比較している。分析の結果から、いくつかの課題は特定のグループに特異的に認識されている一方、3 グループすべてに共通している課題も存在することが明らかになった。例えば、グループ 1 と 2 に属する LCCAC の回答者は「専門知識の不足」(図 8.2.2-Q4)と「身近に専門家が少ない」(図 8.2.2-Q5)を課題として認識していた。また、グループ 1 に属する LCCAC の回答者は「取り組むべきタスクがわからない」(図 8.2.2-Q11)という課題を認識していた。グループ 3 ではこれらは課題として認識されていなかった。これらの課題はグループ間で統計的に有意差がみられた。他方、「人材不足」(図 8.2.2-Q1)、「予算不足」(図 8.2.2-Q3)などは多くの LCCAC が課題として認識しており、グループ間で有意差はみられなかった。

以上より各地に設置された LCCAC の体制やこれまでの経験等にはばらつきがあり、直面している課題も LCCAC ごとに異なることが示唆された。アンケート調査の結果、「専門知識の不足」や「身近に専門家がいなない」ことが課題であると回答したのはグループ 1 と 2 の回答者の方が多かった。グループ 1 と 2 の職員の多くは地方自治体の職員であり、専門知識を持たない職員がこのような課題に直面しても不思議ではない。今後、このような課題に対処するため、より専門性の高い人材育成が必須である。他方、3 グループで共通でみられた課題もあり、人的資源や資金を含みリソースの不足などが挙げられた。これらの調査結果は、LCCAC がリソース不足により効果的に活動できていない可能性を示唆している。今後、LCCAC 等に対する長期的な視点に立った財政的な支援等が望まれる。

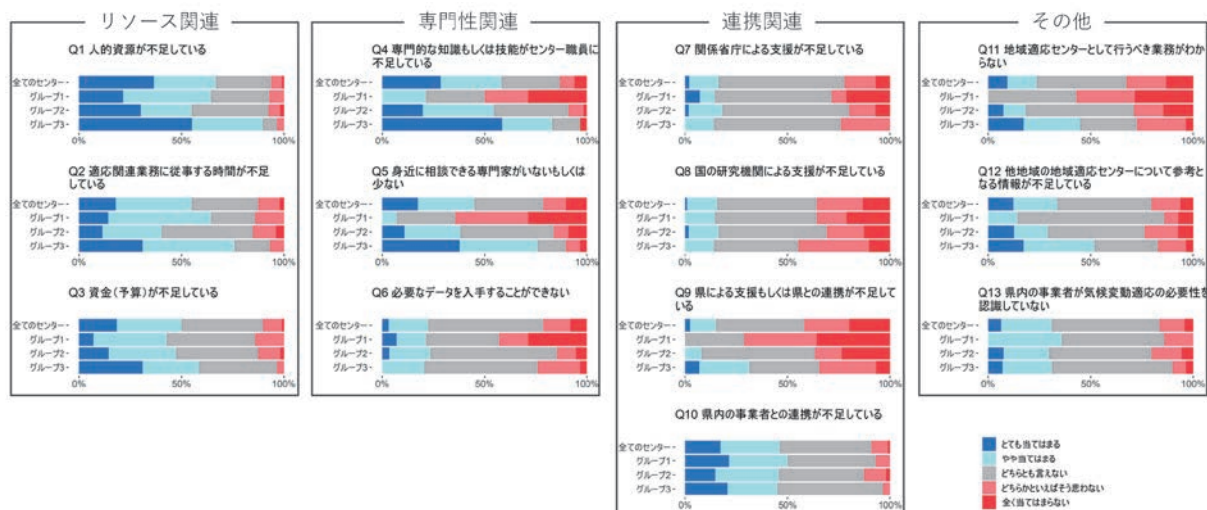


図 8.2.2 地域気候変動適応センター（LCCAC）が直面する課題についてのアンケート調査結果の比較

参考文献

真砂佳史・横田容子・藤田知弘（2024）：地域気候変動適応計画の策定状況や特性および適応策と他の施策との関連に関する記述の分析，土木学会論文集，80 巻 1 号，pp.23-00011.

Fujita T, Mameno K, Kubo T, Masago Y, Hijioka Y. (2023) : Unraveling the challenges of Japanese local climate change adaptation centers: A discussion and analysis, Climate Risk Management 39. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2023.100489>.

9. 適応策の効果と適応策と緩和策の関係

S-18 プロジェクトの目標の1つは、適応策の効果の評価を行うことである。また、気候変動の影響リスクの抑制にとって適応策と緩和策の関係はどのようなものかを分析するのも、目標であった。それらの成果は、分野ごとの章で示されているが、本章では改めて、以上の観点から成果を整理する。

9.1 適応策の効果

9.1.1 適応策の評価

(1) 農業分野における適応策の評価

適応策の評価の代表的な成果は、水稻生産に関する適応策の評価である。

水稻の影響予測 (1.2.1 (1))：改良した水稻の生育収量予測モデルを用いて日本全体の水稻収量を予測した結果、従来よりも大幅な収量減が算定された。さらに、白未熟粒率の予測では、新たな推定モデルを用いた結果、従来よりも高い値が算定され、RCP8.5 では今世紀半ばで約 20%、今世紀末には約 40%に達すると予測された。

この品質低下に対しては、高温耐性品種の導入が有効な適応技術と期待されている。そこで、白未熟粒の発生割合を、気象条件と品種の高温耐性ランクに基づいて推定した。穂が出てから 20 日間の気温が 28℃ 程度 (MET26 が 2℃) の場合、高温耐性ランクが“弱”の品種では、白未熟粒率が 45%、“中”の品種では 24%、“強”の品種では 11%と推定された (図 1.2.3)。また、気温が 30℃ 程度 (MET26 が 4℃) に上昇すると、“やや強”や“強”の品種でも白未熟粒率が増加するが、高温耐性品種の効果は顕著になる。たとえば、MET26 が 4℃ の場合、高温耐性ランクを“中”から“やや強”に 1 ランク上げるだけでも、白未熟粒率は 10 ポイント以上抑えることができるという推定結果を得ている。

さらに、現在の品種を引き続き栽培した場合、産業革命前からの温暖化レベルが 1℃ を超えただけで、日本全体で白未熟率の低い高品質米の生産量が減少することがわかった (図 1.2.4)。また、品種の高温耐性を 2 ランク向上させることで、温暖化が 2℃ 程度まで進行しても高品質米の生産量を維持できることが示された。しかし、それ以上の温暖化が進行すると高品質米の生産量が低下することが推定された。これらの結果は、白未熟粒発生に対して高温耐性品種の導入を図る際の見通しを与えるものといえる。

水稻生産と水資源 (3 章)：信濃川流域を対象にした、コメの総収量と高品質米 (クラス A) の収量、河川流量の不足という 3 者の関係性を評価した研究成果がある (3 章)。この研究では、適応策として水稻の移植日の変更をとり、その実施時期による 3 者の変化を検討した。その結果、信濃川流域では、移植日を遅らせる適応策を実施すると、高品質米の収量は増加する一方、河川流量の不足が増大し、コメの総収量も減るというトレードオフ関係にあることが分かった (図 3.3.3)。農業用水の取水量や期間は、概ね 10 年に一回、河川管理者との協議により決定されるため、こうした予測は、流域における水需給バランスと農家の生産利益のバランスを取るうえで重要な情報となる。気候変動の適応策は、他の施策との間にシナジーとトレードオフがあると指摘されてきた。本研究は、その内容を可視化した研究である。

その他の農作物：小麦及び大豆に関する研究がある（1.2.1（2））。麦類では暖冬で生育が早まり霜害を受ける被害が報告されている。また、大豆では高温や乾燥による青立ち（収穫期に莢が熟しても茎葉が青く残り、収穫作業の効率低下や汚損粒による収量や品質の低下を引き起こす現象）の被害が挙げられる。これに対して、小麦では、1～2葉期に麦踏を行うことで凍霜害リスクを低減する効果が確認された。また、大豆では、現状よりも晩播や品種転換により青立ち増加率の抑制効果が示された。

果樹（1.2.1（3））：ウンシュウミカンと輸入に依存している亜熱帯果樹のアボカドについて、適地条件を明確にし、気候シナリオを用いて今世紀末までのウンシュウミカンとアボカドの適地移動を推定した。その結果、特に非常に高い排出シナリオ（SSP5-8.5）では、ウンシュウミカンの適地は北上あるいは内陸に広がるが、今世紀末には現在の適地はより高温となり、適応策なしでは生産が難しくなる地域が大幅に拡大する（図 1.2.6a）。21 世紀末には、アボカド適地の面積は現在の 2.4～7.7 倍に拡大するのに対して、現在のウンシュウミカンの産地はその適温を越える。こうした地域では、ウンシュウミカンから亜熱帯果樹であるアボカド等への転作が適応策の一つとして有効である可能性が示唆された。

（2）自然災害・沿岸域における複数適応策の比較

海面上昇に対する適応策（4.1.2）：適応策として防護と移転の比較を行った。まず、海面上昇による全国の浸水被害額は、2050 年に約 151-181 兆円、2100 年に 243-455 兆円と推定された。この地域を堤防で防護する費用の推計結果（図 4.1.2）は、Type 1（堤防の高さと 1 人当たり GDP から費用を推計する方法）の場合では、2100 年に約 39.7-54.4 兆円と推計された。Type 2（土木学会レジリエンス確保に関する技術検討委員会の報告書記載の堤防単価を用いる方法）の場合では、2100 年に約 53.4-84.5 兆円と推計された。一方、全国の移転費用（図 4.1.3）は 2030 年では約 90-94 兆円、2050 年では約 101-117 兆円、2070 年では約 109-150 兆円であった。この浸水被害額は、既設の堤防などの構造物による浸水防止を考慮していないため、潜在的な被害額であり、これらの推定額は海面上昇で水面下になる地域の価値を表す指標と考えられる。

2つの対策を比べると、全国の総額では移転費用は防護費用よりも大きい。ただし、全国すべての地域で移転するのは非現実的である。3大都市圏をはじめ人口や資産の集積した地域では防護、人口密度が低い地域では選択的に移転を検討するといった方策が考えられるが、このように両者を組み合わせた長期的適応の費用分析は今後の研究課題である。

河川流域の外水氾濫・内水氾濫（4.2）：河川洪水による外水氾濫では、適応策として、河川の治水安全度向上、土地利用規制、建物のピロティ化、田んぼダム、ため池を選び、2000 年の気象条件、適応策なしの場合の被害額を基準に、各適応策による将来の被害額変化割合を算定した（表 4.2.1）。21 世紀末を見ると、適応策なしの場合被害額は +38% 上昇し、上記適応策毎の変化率はそれぞれ、+18%、+16%、-30%、+31%、+31% となっている。正の場合は適応策を実施しても 2000 年と比較して被害額が増加することを意味している。

この結果を見ると、ピロティ建築を資産価値の高い地域に設置する効果は大きいですが、高層住宅の改築には大きな費用が生じる。都市洪水対策では一部導入されているが、行政の補助や低層部分の有効利用が望まれる。治水安全度向上は、過去長い期間に治水レベルを高めてきたため、追加の増加分が小さく、軽減率が小さい結果となっている。田んぼダムやため池の効果は小さいが、手取川のように田んぼダムが 15% 以上の軽減効果を示す地域もある。田んぼやため池の位置に

よっては大きな効果を持つ地域があり、自然を用いた解決策（NBS）や EcoDRR として期待されている。ここで示したのは全国の評価値であるが、各流域や市町村ごとの検討結果は今後の氾濫対策の検討において有用な情報となろう。

また、内水氾濫についても同様な検討が行われているので 4.2.2 を参照して頂きたい。

（3）適応効果の時系列での把握

気候変動の影響は、気候外力と社会条件の双方が変化する中で出現する。そのため、適応策の有効性についても、時間の経過の中で把握することが重要になる。

高潮による影響人口の推定（4.1.3）：本研究では、大阪湾、伊勢湾、東京湾を対象に、海面上昇に対する潜在的な高潮浸水危険地域を推定した。図 4.1.4 に三大湾における気候変動シナリオごとの海面上昇と人口推移による影響人口の年変化が示されている。影響人口は湾毎に異なるが、多くのシナリオでは 2050 年頃までにピークを迎えて、そのあと減少傾向に転じると予測された。これは、気候変動と海面上昇の進行によって影響面積が増加する一方、人口減少のために影響人口の傾向が異なるためである。このことは、海岸における適応策の目標時期を 2050 年まで頃にすべきケースが多いことを示している。

熱中症対策（5.2.3、5.3.3）：5.2.3 で述べた熱中症予測モデルを用いて熱中症に対する社会的適応を検討した。気候変動に伴う熱中症搬送者の推定とともに、社会調査を合併させてモデル化を行うことで子ども（未成年）、大人（生産年齢）、高齢者の適応政策の影響評価に取り組んだ。仮に、RCP1.9 を達成したとしても高齢者の熱中症患者の増加は避けられず、脱炭素化と適応政策の両方の実施が今後望まれることが示された。

疫学調査により、高齢者の熱中症発症のリスク因子として、独居、自力飲水不可能、エアコン不所持が含まれることを特定した。特に独居は単一リスクとして関連性が高く、このことは適応政策に直結する。推定の結果、現状よりも 30% だけ独居を解消すると熱中症の罹病率は相対的に 15% 低下するものと期待された（図 5.3.5）。独居・飲水不可・エアコン不所持の 3 つ全てについて現状よりも 70% の解消を実現すると、高齢者の熱中症の罹病率は相対的に 40% 程度減少するものと期待される。図 5.3.5 には、適応策の経年的な効果の変化が示されている。

子どもを対象にした実態調査では、屋外と体育館での運動でのリスクが教室内でのそれよりも 10 倍以上高いことが示された。そのことから、屋外や体育館での運動を自粛することは熱中症予防のために極めて効果的であると考えられたが、他方で WBGT28℃ を閾値として屋外運動を中止するならば、2050 年ごろには保健体育の実技授業の 50% 以上を中止することが必要となる。リスクを回避するだけの単純な適応は実現可能性に関する問題も内包する可能性が示唆された。

（4）都市計画、地域計画での適応策

本プロジェクトでは、土地利用・空間計画・ストック管理の視点から都市や地域のあり方を検討する研究を行った。その成果は、長期的な視点で都市計画、地域計画を検討することの重要性を示している。

街区レベルの温熱環境への気候変動影響評価（5.2.1）：都市中心部に位置する 16ha の複合用途街区群（愛知県名古屋市中区錦二丁目地区）を対象に、将来像の 3D モデルを対象とした温熱環境シミュレーションを実施した。その結果、市街地形態の変化が人間の快適性や熱関連リスクへの影響を緩和する可能性があることが示された（図 5.2.1）。今後の気候変動適応に向けたまちづ

くりを推進するためには、広域的なヒートアイランド現象の緩和による気温上昇抑制に加え、地区単位の計画的な建物更新による日陰面積のコントロールなどのアプローチが重要である。

都市計画における適応施策の整理 (5.3.1)：都市計画的な適応策の先進事例を把握するため、英仏8自治体のアクションプランを対象に、都市計画に関連する分野の適応策を抽出してリストに整理した。その結果、計画には民間の都市開発における気候変動適応の考慮、交通事業など他分野との連携による適応策の実施など、物的環境への介入が広く記載されていた。それらの施策は、都市の物的環境構成要素に着目して、「建物・開発地区」（壁面や屋上、敷地内の緑化、建物の熱ストレスの軽減、氾濫に適応した建設、建物・地区開発の総合的な環境性能の向上）、「オープンスペース」（都市における緑化や緑地の管理、オープンスペースの設計・管理の工夫による熱ストレスの軽減、土地被覆の透水性向上、自然的土地利用の管理・保全）、「グレイインフラ」（インフラ整備）、「その他」（気候変動の全般的な考慮や調査など）に類型化できた。

この他に、9.1.2で紹介する都市の物質ストックの管理 (5.3.2) もこの分野での研究である。これらは、気候変動適応策を、悪影響への対処にとどまらず将来の都市・地域のあるべき姿を実現する都市計画・地域計画の一部として検討することの重要性を示している。

9.1.2 適応策と緩和策の関係

気候変動対策の直接の目的は、気候変動の影響やリスクの抑制である。それを達成する上で、適応策と緩和策がどのように関係するかを検討した。本研究では、気候シナリオのRCP8.5とRCP2.6における影響予測の差を取ることで緩和策の効果を把握した。これは、4℃の気温上昇を2℃に低下させた場合の影響の差を効果の指標としたことを意味する。

GHG 濃度経路 (RCP) による影響の違い：本研究における影響評価では、GHG 高排出経路のRCP8.5シナリオと持続可能性の高いRCP2.6シナリオを比べると、前者の方が悪影響がより大きくなる分野が多かった。例えば、水産業の将来予測 (1.2.4) では、RCP2.6シナリオにおける影響は適応可能な場合が多く認められる一方、RCP8.5シナリオでは影響が著しく、適応が困難となる場合が多かった。そのため、適応と緩和のコストを比較しながら今後の気候変動への対応を検討することが重要である（日本水産学会水産環境保全委員会, 2024）。同様に、適応策だけでなく緩和策の重要性を指摘する結果が多くの分野で示されている。

河川流域における氾濫の評価 (4.2)：本研究の結果は、適応策と緩和策の効果を明瞭に示している。河川流域の外水氾濫、内水氾濫の適応策の評価結果において、RCP8.5と2.6の差から緩和策の効果を知ることができる（表4.2.3）。21世紀末におけるRCP8.5、適応無しの被害額を基準にした場合、緩和策の効果は-22%と推定された。これに対して、適応策の効果は、治水安全度-14%、排水能力向上-26%、土地利用規制-24%、ピロティ建築-68%、田んぼダム-7%であった。緩和策は土地利用規制と同程度の効果を持つ。緩和策は洪水対策だけでなく、様々な影響を軽減できるため、費用対効果が最も良い対策と考えられる。

洪水対策の緩和効果に関する研究 (4.2.3)：ため池の活用や河道の植生伐採は洪水被害への適応策であるが、それぞれが水力発電とバイオ発電によるクリーンエネルギーとして緩和策にも貢献できる。ため池容量を全て洪水時に貯留かつ流入量を最も効果的に発電するとした場合、洪水被害軽減率は2.1%、水力発電量は 6.2×10^4 t-CO₂相当となる。全国の河道植生面積の1/20を一斉に伐採した場合の洪水被害軽減率は0.005%、バイオマス発電量は 9.0×10^4 t-CO₂相当となる。

この両発電量は公共施設の太陽光発電よりは大きいが風力発電よりは小さい。洪水被害軽減率も他の適応策より大変小さい値であるが、ため池において香川県の洪水被害軽減率が17%、兵庫県の発電量が 1.5×10^4 t-CO₂と大きな効果を持ち、植生伐採も含めて対象とする地域によって効果の大きい場合がある。

都市の物質ストックの管理 (5.3.2)：都市構造物の再建築・再配置、強靱化などの適応策は、災害廃棄物の発生抑制や新規資材投入・温室効果ガス排出抑制などの側面から緩和策にも貢献する。一方、都市機能強化に伴う環境負荷や経済コストの増大にも繋がることから、気候変動適応策は緩和策と一体的に検討する必要がある。物質が投入されてから製品や構造物として社会に存在する滞留年数の長短は将来の物質循環やライフサイクルを通してCO₂排出量に影響する。シナリオ分析の結果、建築物の寿命延長によって建て替え頻度が低下することで、2100年における新規資材投入量、CO₂排出量はいずれも5割程度削減されることが判明した(図5.3.4)。また、推計初期には長寿命化シナリオにおけるCO₂排出量が現状維持シナリオより約5%多くなるものの、2058年を境に逆転することから滞留年数の延長には長期的な緩和効果がある。

以上のように、適応策と緩和策の間にシナジー・コベネフィットがある。一方、適応策として実施することがエネルギーや資源の多消費に結びつければ、トレードオフの関係になる。今後こうした分析が重要になろう。

9.2 適応策の計画・実施上の課題

本研究における適応策の評価からは、適応策の推進に資する考え方や要素を指摘する成果も生まれている。ここでは、簡潔にそれらをまとめる。

- **林業—人口減少・高齢化への対応** (1.2.3)：本研究では、SSP1シナリオに基づき2050年時点のスギ・ヒノキ人工林の分布域を推定した結果、全国の40%が限界自治体に含まれることがわかった。九州では27%が該当し、これらの人工林は平均標高が高く、気温が低い地域に位置している。今後、気候変動対策とともに少子高齢化への適応策として、将来予測を基にした人工林の適正配置などの取り組みが重要になる。
- **水産業の適応策—ワカメ養殖** (1.2.4. (1))：ワカメ養殖業では、地域的に影響要因と影響の出方(収穫時期の短縮、成長の低下)が異なる。そのため、適応策(収穫スケジュールの変化と出荷・流通体制の構築、高温耐性品種の開発)とそれが必要となる時期も異なる。このような知見は、地方自治体の地域適応計画の作成において活用されることが期待される。
- **生態系—政策的アプローチ** (2.5)：気候変動はサンゴや大型藻類、海草類の分布に大きな変化をもたらすため、従来の保全や利用方法の変更が必要となる。そのため、漁業や観光業の観点からも対策を検討・推進し、地域の生態系の実態を適応計画等に適切に反映させることが課題である。気候変動適応の推進には、環境・生態系のモニタリングや気候変動影響評価と並行して、社会科学的アプローチを実施することが不可欠である。
- **適応策の統合的アプローチ**：本プロジェクトでは、適応策を総合的な目標の中に位置づけることや適応策相互及び適応策と緩和策の関係に関する研究を行った。例えば、森林の防災・炭素貯蔵能力・生物多様性に関する多面的目標 (1.2.3)、水産業と地域計画 (1.2.4)、都市の生活環境・QoLと都市環境 (5.1、5.2)、信濃川の水資源と高品質米の収量の関係 (3.4)、水

害に対する複数の適応オプションの比較（4.2）、海面上昇に対する防護と移住の比較（4.1.2）、熱中症の社会的対策（5.3.3）などである。気候変動への対応と日本が直面する人口減少・高齢化をはじめとする社会的課題の解決を両立させるには、こうした統合的アプローチが重要であり、適応策を自治体の総合計画や環境基本計画の中に組み込み、温暖化対策計画と密接に連携させることが重要である。

- **農家の年齢とソーシャルキャピタル**（6.1.1（2））：高齢化やソーシャルキャピタル（地域活動への参加）は、気候変動に対する適応策を実施する能力（適応能力）に影響を及ぼす。コミュニティ活動への農家の参加率の高い地域では、高齢農家の高温障害のマイナス影響が小さくなることが分かった。
- **関係者の協力**（Box3.1）：信濃川流域における農業の水資源管理に関する研究では、農家が所属するグループが互いに重なり合うことで情報共有が進み、共通の適応策（灌漑期間の分散）に有効であるとした。
- **製造業の適応能力**（6.1.3（1））：小中規模の事業所は水害に脆弱であり、適応策を実施する費用負担などについて、行政の支援が必要となる。また、災害経験の継承のため、適応行動や事業継続に関する認証制度など事前対策が進むような仕組みを作ることが必要である。
- **ソーラー発電と熱中症の関係**（6.1.2）：高齢者は高気温を我慢して熱中症で亡くなるケースが生じており、高齢者および低所得者の多い都道府県では夏場の死亡リスクが有意に高まったことが報告されている。今回の分析結果は、自家発電の導入がこうした死亡リスクを抑制する有力な手段の一つであることを示唆している。
- **適応策の現状分析**：7章と8章で、現在の適応策のカテゴリー分布や変革的適応策、地方自治体による適応計画の状況、地域気候変動適応センターの課題等に関する分析結果を示した。

参考文献

日本水産学会水産環境保全委員会（2024）：農林水産業の気候変動影響評価手法と水産分野における将来予測・適応第一水産分野における課題と展望，日本水産学会誌，90（5）：486-489。

Box9.1 緩和策と適応策の気候安全保障と人間の安全保障からの政策枠組の構築

気候変動を安全保障上の脅威とする議論は、当初は欧米中心の議論だったが、近年になり国内でもいくつかの研究成果が発表されるようになってきた（Hasui, 2011: Kameyama and Ono, 2020: 藤原 et al., 2021: 前田・蓮井, 2022: 阪口 et al. 2022: 関口 2023）。他方で、それらの議論が国内の気候変動政策にどのように貢献できるのか、または政策としてどのようにすれば評価できるのか、という点についてはあまり議論が進んでいない。そこで、各国の科学的研究成果の傾向と政策の動向を調査し、それらをふまえて、日本の外交方針のひとつである人間の安全保障（Human Security）の観点を取り入れた政策体系の構築により、評価の枠組のひとつを提供することを試みた。

人間の安全保障は、小渕内閣時代に政府開発援助（ODA）の方針のひとつとして取り入れられた。1998年に小渕内閣は人間の安全保障基金を設置し、2023年度までに累計約511億円を拠出している（外務省ウェブサイト）。2000年の国連ミレニアムサミットでは、日本の呼びかけで、当時の緒方貞子前国連難民高等弁務官とアマルティア・センケンブリッジ大学トリニティーカレッジ学長を共同議長とした委員会「人間の安全保障委員会」を設置し、2003年5月にコフィ・アナン国連事務総長に報告書を提出した（人間の安全保障委員会, 2003）。

気候安全保障は、当初は政治主導で英独を中心に2006年の国連総会などで概念が表明された。それ以後、欧米各国の政策文書やシンクタンク報告書（Busby, 2007: CNA, 2007）などに取り上げられ、気候変動を安全保障上の脅威として認識する言説が拡大し始めた。日本政府も環境省が2007年に報告書を出している（環境省, 2007）。だがその後、国内での議論はあまり進展せず、海外での研究や国際機関などでの議論が先行した。だがバイデン政権成立直後の2021年4月に「気候サミット（Leaders' Summit on Climate）」が開催され、日本から岸信夫防衛大臣（当時）が参加し、「連鎖するリスク」として気候変動を安全保障上の課題と位置づけた。また、2022年に日本政府は「国家安全保障戦略」で「気候変動は、人類の存在そのものに関わる安全保障上の問題」と位置づけた。

気候変動を安全保障上の脅威として位置づけることは、いわゆる安全保障化（securitization）であり、「その 이슈が存立の脅威として示され、緊急措置を必要とし、通常の政治手続きの枠外の行動を正当化すること」と訳される（ブザン et al., 2024）。だが、日本の安全保障政策自体は、通常は法律の枠内で機能するものであり、侵略の発生など、緊急事態にのみ一部が緩和されるだけである。気候変動政策は、対応の緊急性や被害の重大性においては安全保障上の脅威として成立しうるし、そのような認識も徐々に定着し始めていると評価できる。しかし、気候変動を安全保障政策の一部として組み込むことに、まだ日本政府は成功していない。受け皿となる安全保障政策の原理や法制度がないためである。

そこで、日本政府が長年活用してきた人間の安全保障概念に、2022年に発案者の国連開発計画（UNDP）から特別報告書が出版（UNDP, 2022）され、新世代の概念が登場したこ

とから、それを活用して気候安全保障論と組み合わせ、政策体系を形成することを試みた。その結果が表 Box9.1.1 である。

表 Box9.1.1 人間の安全保障と気候変動対応策とを組み合わせた気候安全保障の整理

		人間の安全保障(2022)		
		Protection (保護)	Empowerment (エンパワーメント)	Solidarity (連帯)
(気候安全保障政策)	緩和策 (共通の気候安全保障政策)	再生可能エネルギー政策	グリーンテクノロジーの推進	パリ協定の履行
		CO2排出規制	環境教育プログラム	国際的な環境保護運動
		環境規制法の強化	技術普及支援	グローバル気候市民会議
				SDGsの推進
	適応策 (国民の気候安全保障政策)	防災インフラの整備	農業の気候適応技術	気候難民支援プログラムや制度の構築
		災害予測システムの導入	地域レジリエンス強化	地域間の協力ネットワーク構築
		早期警戒システム	コミュニティ主導の適応プログラム	国際的な適応資金の調整
		土地利用の変更		

新世代の人間の安全保障概念では、緒方・センの報告書で重視された” Protection”、”Empowerment” のふたつに加えて、” Solidarity” (連帯) が加わった。人間の安全保障論では行為主体性 (Agency) を高めることが重視される。特別報告書は Agency を「自分の福利につながるかどうかにかかわらず、価値観をもって関与し、それに従って自分の選択や集団的な意思決定に参加することができる能力」(UNDP, 2022) と定義する。この考え方で、新世代の人間の安全保障概念は、人間がより行為主体性を高めて相互信頼 (Trust) に基づく主体的活動を拡大し意思決定に参加する方向に進化した。この認識は、図 Box 9.1.1 のように整理されている。

これをもとに、6つの領域を整理すると表 Box9.1.1 のように整理できた。共通の気候安全保障政策 (Common Climate Security Policies) は、1982年に国連のパルメ委員会が高まる冷戦の対立を緩和するために国連事務総長に提出した「共通の安全保障 (Common Security)」からヒントを得た概念である。また、国民の気候安全保障政策 (National Climate Security) は、国内向けの安全保障政策である国家安全保障 (National Security) からヒントを得た概念である。それぞれの元概念の特徴を援用して、政策を整理し評価する枠組として体系化できるのではないかと考えられる。

6つの分野に対する詳細な政策分類は未完成で、今後のさらなる精緻化が必要である。またこのような枠組が受け皿となり、日本社会の行為主体性の向上が図れるか、緩和策と適応策の政策評価基準として文献調査や国内外の政策決定者等へのインタビューなどを通じて明らかにする必要もあるだろう。

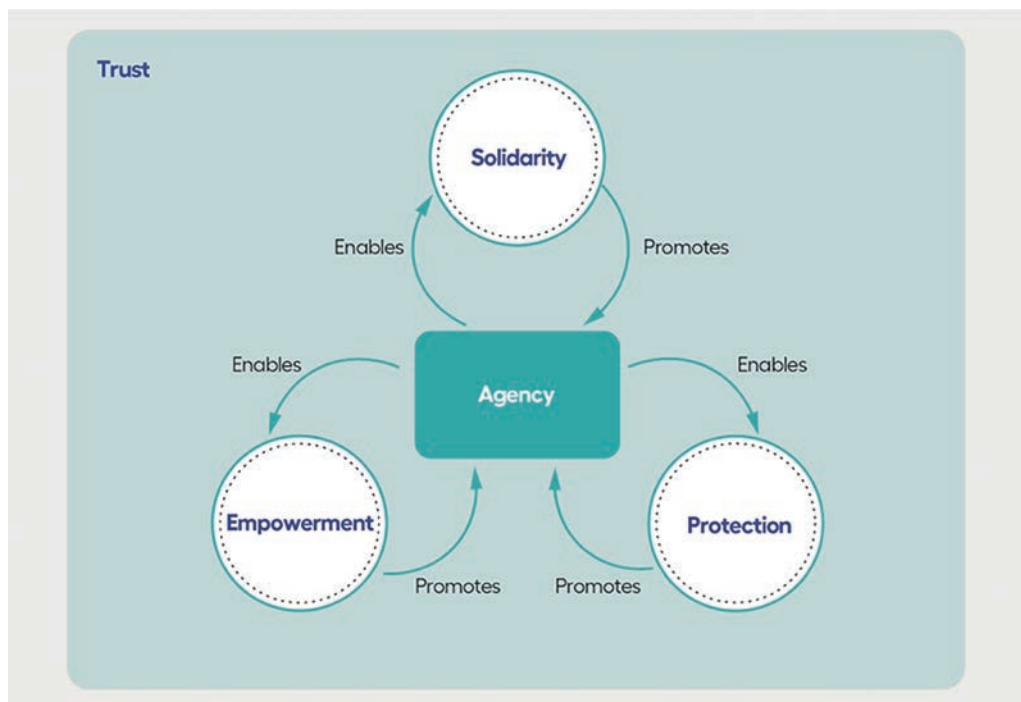


図 Box9.1.1 新世代の人間の安全保障概念における信頼を背景にした保護、エンパワースメント、連帯（出典：UNDP, 2022）

参考文献

- Busby, Joshua W., (2007) : Climate change and National Security: an agenda for action, New York: Council on Foreign Relations
- ブザン, バリー他著, 今井宏平他訳 (2024) : 「安全保障化」とは何か—脅威をめぐる政治力学 (ミネルヴァ書房)
- CNA Corporation (2007) : National Security and the Threats of Climate Change, CNA Corporation
- 藤原帰一他編著 (2022) : 気候変動は社会を不安定化させるか—水資源をめぐる国際政治の力学, 日本評論社
- 環境省中央環境審議会地球環境部会気候変動に関する国際戦略専門委員会 (2007) : 気候安全保障 (Climate Security) に関する報告, 環境省
- 公益社団法人笹川平和財団海洋政策研究所編, 阪口秀監修 (2021) : 気候安全保障—地球温暖化と自由で開かれたインド太平洋, 東海教育研究所
- 前田幸男・蓮井誠一郎 (2024) : 環境と批判的安全保障—気候の危機からジオ・パワーへ, 南山淳・前田幸男編, 批判的安全保障論, 法律文化社
- 人間の安全保障委員会 (2003) : 安全保障の今日的課題—人間の安全保障委員会報告書, 朝日新聞出版社
- 関山健 (2023) : 気候安全保障の論理—気候変動の地政学リスク, 日本経済新聞出版
- UNDP (2022) : New threats to human security in the Anthropocene – Demanding greater solidarity, UNDP

第3部 S-18 研究フレームと共通シナリオ

10. 研究フレームと評価方法

10.1 S-18プロジェクトの背景と目標

気候変動の影響は世界各地で顕在化しており、我が国でも悪影響への対処が重要な社会的課題となっている。それを背景に、2018年には「気候変動適応法」が成立し、2020年からおおむね5年ごとに、最新の科学的知見を踏まえた気候変動の影響評価と政府の適応計画見直しを行うことになった。その後も、2019年台風19号などの甚大な被害や毎年繰り返す夏の猛暑など、気象災害の強度・頻度が変化してきており、適応策の迅速な計画・実施が緊急の課題になっている。こうした課題にこたえるべく2020年度に戦略的研究開発S-18課題が設定され、本研究プロジェクトが始まった。

S-18プロジェクトの全体目標は、「我が国の気候変動適応を支援する影響予測・適応評価に関する最新の科学的情報を創出する」ことである。それを通じて、①2025年に予定されている気候変動影響評価報告書への貢献、②脆弱な地域の把握や適応計画の立案・実施など自治体の取組への寄与、③IPCC第7次評価報告書やパリ協定における国際的取組への貢献、④気候変動に対してresilientな社会の在り方に関する提言、といった目標の実現を目指した。

10.2 影響・適応評価の対象分野

日本の気候変動適応計画では、「農業・林業・水産業」、「水環境・水資源」、「自然生態系」「自然災害・沿岸域」、「健康」、「産業・経済活動」、「国民生活・都市生活」の7分野を対象にしている。これにならい、本研究プロジェクトでも自然生態系をのぞく6分野を影響予測・適応評価の対象にした。

自然生態系については、同じ時期に国立環境研究所気候変動適応センターにおいて研究プロジェクトが行われているため、その研究成果と合わせることで全ての分野を対象にできるようにした。

10.3 影響・適応評価の共通フレームワーク

(1) 対象とする地域と期間

本プロジェクトの対象地域と対象期間は以下のとおりである。

1) 対象地域：日本全国。併せて、国内の一部地域を対象にしたケーススタディも行う。

影響評価などの空間解像度は、地方自治体や企業の適応策策定に活用できる詳細さが求められる。そのため、国土数値情報3次メッシュ（ほぼ1km×1km）を基本とし、市町村あるいは都道府県といった地方自治体ごとの評価と併用することにした。

2) 対象期間：影響評価のベース（現状）は、2000年をはさむ20年間程度の期間とした。また、人口等の社会条件のベースは2015年のデータを用いた。将来予測の期間は、2020年から2100年までとし、時間ステップは1年、または5年である。共通のタイムスライスは以下の期間を設定した。

- 近未来：2030年（2020年～2040年の平均）
- 中期的未来：2050年（2040年～2060年の平均）
- 長期的未来：2090年（2080年～2100年の平均）

(2) 評価の条件

日本全国の気候変動影響・適応策を統一的な条件の下で評価するため、S-18プロジェクト全体で共通の評価の条件を定めた。評価目的に対応する条件は以下のとおりである。

①温暖化レベルによる影響の違いの評価

温暖化レベルとしてRCP8.5、4.5、2.6の3ケースを選び、社会経済条件は現状固定した。これによって、異なる温暖化レベルの影響だけを把握する。

②気候変動と社会変化（人口、世帯数、土地利用）の相乗的影響を考慮した評価

温暖化レベル（RCP）と社会経済シナリオ（日本版SSP）の組み合わせを設定し、両者の相乗的影響を評価した。その組み合わせは、RCP8.5-SSP5（高排出成長社会）、RCP4.5-SSP2（中間的社会）、RCP2.6-SSP1（持続可能社会）の3つの将来シナリオである。

ここで、日本版SSPとは、IPCCなどで用いられている世界版SSPを準用して日本の将来社会のあり方を想定した社会経済シナリオである（Chen, H. et al., 2020）。

③人口減少・高齢化との相乗的影響

高い人口減少・高齢化の影響を見るために、日本版SSP3の人口シナリオを使えるようにした。これは追加的ケースであり、基本ケースには含まれない。

以上の評価の条件とアウトプットの関係を模式的に示したものを図10.3.1に示す。

(3) S-18 共通シナリオ：気候シナリオと社会経済シナリオ

以上の研究フレームワークに沿って影響予測・適応評価を行うには、気温、降雨量、日射量、海面上昇、台風など気候外力を想定する必要がある。それを行うのが、気候シナリオである。本プロジェクトでは、国立環境研究所気候変動適応センターが作成した「日本域バイアス補正気候シナリオデータ（NIES2020）」を用いた。

一方、今後の社会変化を考慮するには社会経済シナリオが必要である。本プロジェクトでは、日本版SSPに沿って人口、世帯数、土地利用の変化を示す独自の社会経済シナリオを作成した。

これら2つのシナリオの詳細な内容は11章で紹介する。

S-18研究フレームワーク

影響予測・評価に用いる条件

- ① 温暖化レベル
高中低の3段階
RCP 8.5, 4.5, 2.6
- ② 気候シナリオ
GCM 1～5種類
- ③ 社会経済シナリオ
現状固定
日本版SSP1, 5
- ④ 適応条件
適応なし／あり

影響予測・適応評価の出力

- ① 影響の統一的全国評価
 - ・空間: 3次メッシュ (1km × 1km)
 - または 市町村/都道府県
 - ・期間: 2020～2100年の年変化
- ② 影響の地域特性／特に脆弱な地域
- ③ 適応策の効果の評価
- ④ 影響及び適応策の経済評価
- ⑤ 気候変動対応策に関する提言

成果のイメージ

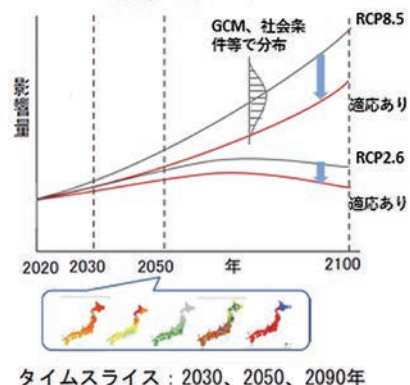


図 10.3.1 S-18 研究フレームワークと影響予測・適応評価に用いる条件

IPCC は、温室効果ガス排出シナリオに基づいて気候予測を行っている。IPCC 第 5 次報告書 (AR5) では代表的濃度経路シナリオ「RCP」が用いられ、第 6 次報告書では「SSPX-Y」の形式の温室効果ガス排出シナリオが用いられた。例えば、SSP5-8.5 などである。

本研究で用いた気候シナリオ「NIES2020」は、AR6 の排出シナリオ SSPX-Y に基づいている。一方、AR5 の RCP 排出シナリオを用いた影響予測もあるため、気候シナリオの表記が両方現れることに注意して頂きたい。

ただし、この 2 つの排出シナリオはほぼ同等であるため、本報告書では下のように類似したグループとして扱っている。

- ・ 「非常に高い排出シナリオ」グループ SSP5-8.5、RCP8.5
- ・ 「中間的な排出シナリオ」グループ SSP2-4.5、RCP4.5
- ・ 「低い排出シナリオ」グループ SSP1-2.6、RCP2.6

また、影響予測の結果を相互に比較する場合、これらの排出シナリオグループを RCP 表記で示すことが多いが、その中には SSPX-Y に基づく結果も含まれている。

以上をまとめると、本プロジェクトで設定した評価ケースとシナリオは表 10.3.1 のようになる。

表 10.3.1 評価の目的と排出シナリオ、社会経済シナリオの対応

目的	評価ケースの表記	温室効果ガス 排出シナリオ	社会経済シナリオ
①気候変動による影響 のみの評価	SSP5-8.5/ RCP8.5	SSP5-8.5/ RCP8.5	社会・経済条件は現状 固定
	SSP2-4.5/ RCP4.5	SSP2-4.5/ RCP4.5	
	SSP1-2.6/ RCP2.6	SSP1-2.6/ RCP2.6	
②気候変動と社会変化 の両方を考慮した評価	RCP8.5-SSP5	SSP5-8.5/ RCP8.5	SSP5 (日本版)
	RCP4.5-SSP2	SSP2-4.5/ RCP4.5	SSP2 (日本版)
	RCP2.6-SSP1	SSP1-2.6/ RCP2.6	SSP1 (日本版)
③補足的人口シナリオ の提供			SSP3 (日本版) 人口 シナリオを準備

(4) テーマ（分野）ごとのアウトプット

S-18 プロジェクトは分野毎の影響予測と適応評価を行う 5 つのテーマと 19 のサブテーマで構成されている。各テーマ・サブテーマは、プロセスモデルや統計的手法によるデータドリブン・モデル、経済評価モデルなどを用いて予測・評価を行い、共通の研究フレームワークに基づいて、以下のような共通的な成果を生み出している。

- ① 日本全体に対する気候変動影響：温室効果ガス排出シナリオ（温暖化レベル）ごとの影響やリスクの評価、影響の地域特性、影響の経済評価等
- ② 分野毎の適応策の評価
- ③ 緩和策と適応策の相互作用：シナジーとトレードオフ、適応策の緩和に対する効果
- ④ 複合的影響に関する知見：複数の影響が重なった場合の影響
- ⑤ 人口減少など社会変化と気候変動影響の相乗効果
- ⑥ 今後の適応策推進に向けた知見・提言

参考文献

Chen, H., Matsushashi, K., Takahashi, K., Fujimori, S., Honjo, K., and Gomi, K. (2020): Adapting global shared socioeconomic pathways for national scenarios in Japan. Sustainability Science, 15(3), 985-1000.

11. 共通シナリオ

11.1 気候シナリオ

S-18 共通気候シナリオとして、国立環境研究所で作成された NIES2020 (Ishizaki et al. 2022) を採用した。NIES2020 は、CMIP6 マルチモデルアンサンブルから 5 つの代表気候モデル (表 11.1.1) を選択した上で、その過去実験 (1900-2014 年) と将来予測実験 (2015-2100 年) の出力データを 1km 解像度に内挿し、バイアス補正を施した気候シナリオデータである。CMIP6 では、“ホットモデル” と呼ばれる将来の気温上昇量が非常に大きい気候モデルが複数存在するが、これらの“ホットモデル”の気温変化予測や全球平均降水量の増加予測は過大評価であることが明らかになっている (Hausfather et al. 2022, Shiogama et al. 2022)。そのため、NIES2020 では代表モデルを選択する際に“ホットモデル”をあらかじめ除外した。その上で、気温と降水量のほか、影響評価でよく利用される日射量、地上風速など 8 変数に関して、気候モデルの予測幅をよくカバーする 5 つの気候モデル (表 11.1.1) を選択している (Shiogama et al. 2021, Hayashi and Shiogama 2022)。NIES2020 のデータの時間解像度は日で、最低気温、最高気温、平均気温、降水量、全天日射量、風速、相対湿度、下向き長波放射量、地上気圧、雲量の予測データが含まれる。

NIES2020 では、温室効果ガス濃度増加の多いものから順に SSP5-8.5, SSP3-7.0, SSP2-4.5, SSP1-2.6, SSP1-1.9 の 5 つの濃度シナリオの気候シナリオデータが提供されているが、S-18 では SSP5-8.5, SSP2-4.5, SSP1-2.6 の 3 つを優先順位の高いシナリオとして設定した。

CMIP5 データにもとづいた過去の多くの影響評価研究では、濃度増加の最も大きい RCP8.5 を成り行きシナリオ (Business As Usual : BAU) と呼んで、影響の上限を調べるためのシナリオとして利用してきた。RCP8.5 と温室効果ガス濃度変化が近い SSP5-8.5 の気候シナリオを利用することで、以前の影響評価結果との比較が容易になる。ただし、2015 年にパリ協定が成立して以降の緩和努力によって、温室効果ガスの濃度増加が SSP5-8.5 で想定されるようなレベルに達する可能性は低くなってきたため、以前のように SSP5-8.5 を BAU または上限シナリオと呼ぶことは難しくなってきた (Hausfather and Peters 2020)。そのため、SSP5-8.5 を用いた影響評価を行う際には、ほかの濃度シナリオの結果と比較することで「パリ協定以降の緩和策によって避けられた影響」、「パリ協定以降の緩和策の効果」を見ていると解釈すべきである。一方、SSP1-2.6 は CMIP5 で下限シナリオとして使われてきた RCP2.6 に濃度変化が近く、パリ協定の 2℃ 目標を達成できる可能性の高いシナリオとして使え、以前の CMIP5 ベースの影響評価結果との比較も可能である。また、SSP2-4.5 は、中間的な濃度変化シナリオとして用いることとした。

SSP1-1.9 と SSP3-7.0 に関しては、NIES2020 では MIROC6, MRI-ESM2-0, IPSL-CM6A-LR の 3 モデルの気候シナリオデータが提供されている。日本では 2050 年までのカーボンニュートラルを目指すことが宣言されるなど、パリ協定以降、産業革命からの昇温量を 1.5℃ やそれ以下に抑えるためのさらに野心的な気候政策が提言されるようになった。このような社会的背景を考慮し、これらが達成できた場合の便益について評価するため、SSP1-1.9 にも対応した。

SSP5-8.5 のような高排出シナリオの実現可能性が下がってきた (Hausfather and Peters 2020) ため、Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project Phase 3b では SSP3-7.0 が共通シナリオの一つとして選択されている。NIES2020 でも一部 SSP3-7.0 に対応しているが、SSP3-7.0 はエアロゾル排出量が非常に多い特殊な設定のシナリオであることに注意する必要がある

(Shiogama et al. 2023)。図 11.1.1 に、NIES2020 の代表 5 モデル(SSP1-1.9 と SSP3-7.0 は 3 モデル)の日本の陸上での年平均気温と年平均降水量の変化を示す。温室効果ガスの排出量の多いシナリオほど昇温量大きい。一方、降水量に関してはエアロゾルによって減少する性質があるため、エアロゾル排出量の多い SSP3-7.0 では、温室効果ガスによる降水量増加効果が打ち消され、21 世紀半ばまでの変化が小さい (Hayashi et al. 2024)。

表 11.1.1 S-18 共通気候シナリオ (NIES2020) の設定

代表気候モデル	MIROC6, MRI-ESM2-0, ACCESS-CM2, IPSL-CM6A-LR, MPI-ESM1-2-HR
変数	日最低・最高・平均気温 (°C)、降水量 (mm/day)、全天日射量 (MJ/m ² /day)、風速 (m/s)、相対湿度 (%)、下向き長波放射量 (MJ/m ² /day)、地上気圧 (hPa)、雲量 (%)
ターゲット期間	2030 (2020-2040), 2050 (2040-2060), 2090 (2080-2100)

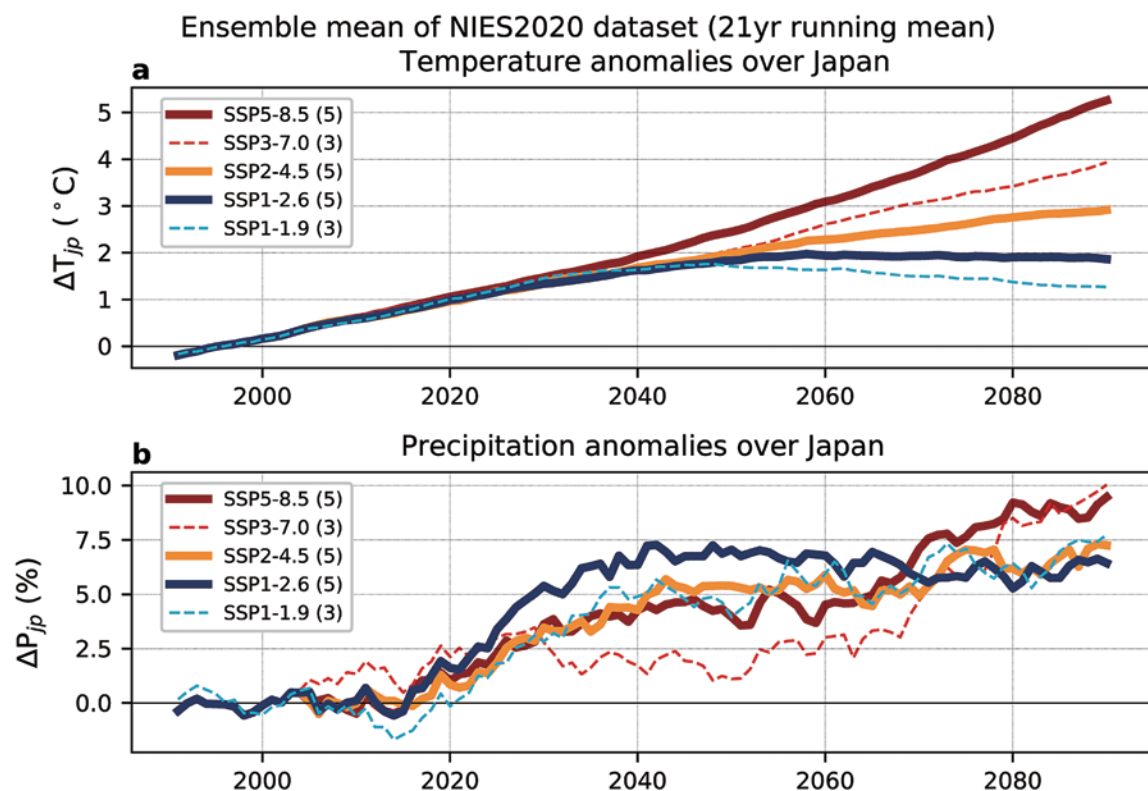


図 11.1.1 1 年移動平均した日本の陸上の (a) 年平均気温 (°C) と (b) 降水量の変化 (%)。1981–2010 年平均値からの偏差で、モデル平均値。カッコ内はモデル数。Hayashi et al. (2024) より。

11.2 社会経済シナリオ

11.2.1 研究目的

総合的な全国的影響予測と適応評価を実施するに当たり長期的な社会の将来見通しを示す社会経済シナリオの設定が必要である。S-18 で使用する社会経済シナリオは、日本版 SSPs を使用す

ることになったが、日本版 SSPs に付随するデータが不足している状況であった。特に、S-18 プロジェクトにおいて影響評価を行う分野を対象に要望調査を行い、80%のチームが土地利用を、50%のチームが人口を必要としていることがわかった。そこで本研究では、S-18 共通社会経済シナリオとして日本版 SSPs に付随するデータ(3次メッシュ別の人口・世帯数・建物用地の将来推計)を整備することを目的とする。

11.2.2 手法

(1) 人口・世帯数データの整備

人口については、2015年から2100年の5年ごとの日本版 SSPs に準拠した5歳年齢別・男女別の人口推計である国立環境研究所(2021)を人口データとして用いることとした。世帯数については、日本版 SSPs 将来人口に国立社会保障・人口問題研究所(2019)により求められた都道府県別の世帯主の男女・年齢5歳階級(20歳未満, 20-24歳・・・80-84歳, 85歳以上の15区分)・家族類型別に区分された将来の世帯主率を乗じることで男女別・年齢別・家族類型別の世帯数を求めた(吉川ら, 2024)。

(2) 土地利用データの整備

基準年である2015年の建物用地を工業用建物用地・商業業務等用建物用地・住宅用建物用地・その他建物用地の4つへ分類した。2020年以降の将来予測については、工業用建物用地及び商業業務等用建物用地の面積変化予測の代理変数を設定し、その面積を推計した。住宅用建物用地については、居住世帯あり住宅と居住世帯なし住宅を区分し、住宅用建物用地と元住宅用建物用地の面積を推計した(吉川ら, 2024)。

11.2.3 研究成果

(1) 人口・世帯数

日本版 SSP1 では、教育投資による育児環境整備によって出生率が加速するという想定の下で18%という高い出生率が維持されるが、2100年の総人口は7,300万人になる。死亡率と移動率は中位にとどまる。一方、日本版 SSP5 では、労働市場が徐々に開放され国際的な流動性が高まるため、外国人純移民が2035年までに25万人になり、2100年の総人口は7,900万人になると想定している。出生率と死亡率は中位である。総人口は、全てのシナリオで長期的に減少するが、日本版 SSP3 の減少が最も大きいと推定された(図 11.2.1)。全1683市町村のうち、2015年から2100年にかけて人口が増加するのは、日本版 SSP1 では約2.7%、日本版 SSP5 では約4.7%にとどまり、1600以上の自治体で人口が減少する。人口が増加する自治体でも、多くの場合、出生人口の増加ではなく65歳以上の人口が増加する。大都市圏への人口集中は、2100年まで進み、日本版 SSP5 (総人口比64.2%)の方が日本版 SSP1 (同49.8%)よりも集中度が大きいと推定された(Yoshikawa et al., 2022)。

総世帯数は、2015年の5,320万世帯から、2100年には1,881万～3,655万世帯になる(図 11.2.2)。将来人口に世帯主率を乗じる方法のため、人口減少の傾向と同様に世帯数も2030年以降急激に減少する。2015年時点で全世帯数に対する85歳以上が世帯主である世帯数の割合の市町村別平均値は8.1%であった。2100年の市町村別平均値は、日本版 SSP3 で28.7%、日本版

SSP5では20.5%であり、2015年と比べて2.5～3.5倍となる見込みとなった。これは日本社会の高齢化がさらに進み、大きな変化が訪れることを示唆している。

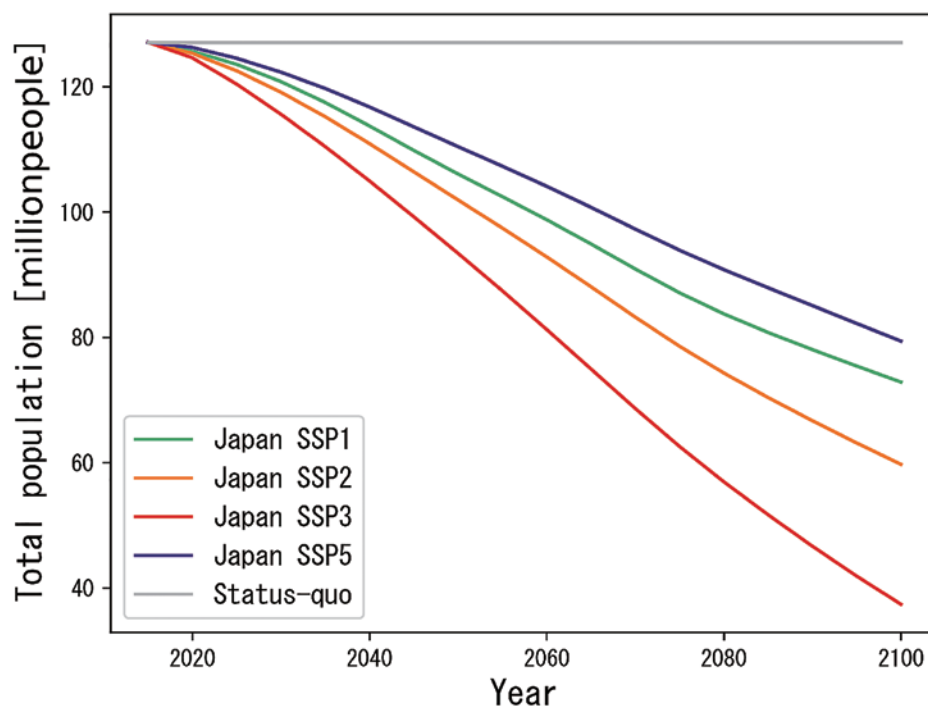


図 11.2.1 シナリオ別総人口推移（2015 年～ 2100 年）

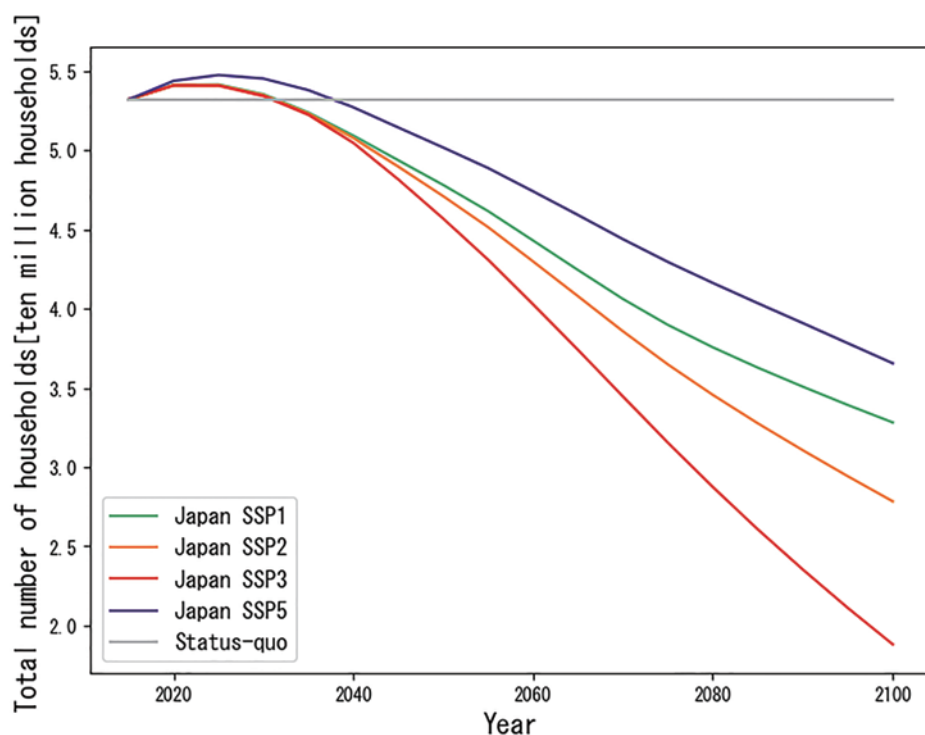


図 11.2.2 シナリオ別総世帯数推移（2015 年～ 2100 年）

(2) 土地利用

基準年を2015年とした2020年以降の用途別建物用地の将来推計を行った（図11.2.3）。シナリオ別の工業用建物用地面積の全国総計は、2015年の1,538km²から、2100年には1,564～1,572km²であった。過去の傾向分析に基づく、人口減少が始まって20年未満の都道府県では工業用建物用地が増加し続けることが分かった。シナリオ別の商業業務等用建物用地面積の全国総計は、2015年で2,887km²、2100年で3,090～3,115km²であった。シナリオ別においても工業用建物用地とほぼ同様の傾向であった。

住宅用建物用地面積の推計のための戸建て及び共同住宅空き戸数を推計した。空き戸数は現存する住宅戸数から世帯数を差し引いたものであるため、人口減少に伴い、空き戸数も増加する傾向にある。空き戸数は、2015年で戸建て393万戸、共同住宅634万戸、2100年で戸建て1,445～2,188万戸、共同住宅1,172～2,119万戸となることが分かった。こうした大きな空き戸数が生じれば何らかの政策的な介入があるに違いないが、今回の推定では政策的介入は設定していない。住宅用建物用地面積は、2015年で8,558km²、2100年で3,571～5,704km²であった。2015年と比較し、2100年には日本版SSP3では0.42倍、日本版SSP5では0.66倍となることが分かった。これは世帯数の減少率とほぼ同じ傾向である。元住宅用建物用地面積は、2020年で1,014km²、2100年で4,048～6,180km²であった。世帯数減少率が最も大きい日本版SSP3で元住宅用建物用地面積は最も大きくなる。2080年頃から住宅用建物用地面積よりも元住宅用建物用地面積の方が上回ると予測された（吉川ら，2024）。

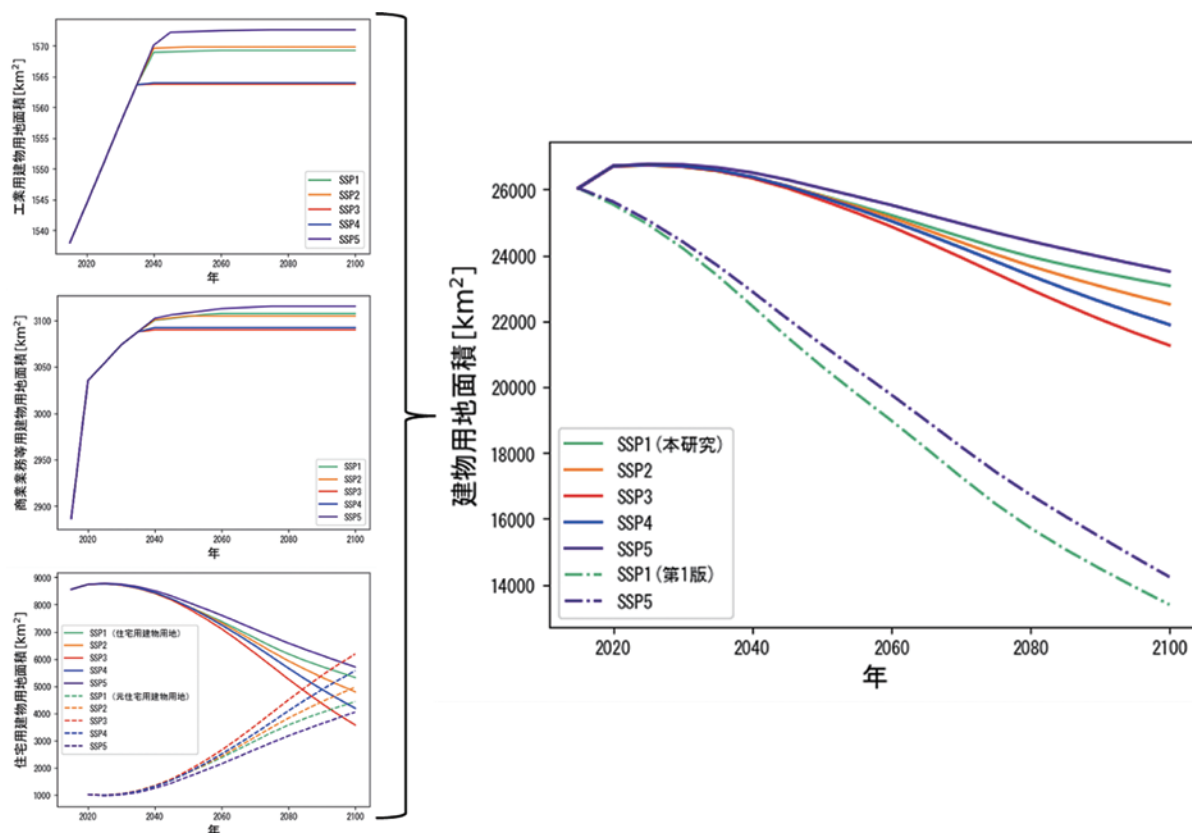


図 11.2.3 シナリオ別用途別建物用地面積（工業用・商業業務等用・住宅用）と全建物用地面積の推移

(3) 日本版 SSPs に付随したデータに関する今後の課題

気候変動による各分野への影響は、前述したように人口・世帯数・空き家を含む土地利用の大きな社会変化の中で生じる。将来社会の変化を想定したシナリオである社会経済シナリオの開発は、気候変動影響評価の予測にとって大変重要である。そこで、気候変動及び適応評価のための日本版 SSPs に準拠した S-18 共通社会経済シナリオの開発を行ってきた (Yoshikawa et al. 2022; 吉川ら 2024)。

工業用及び商業業務等用建物用地面積が、2040 年以降一定となっている。これは、各都道府県で人口減少開始 20 年後には一定となるという想定を置いた結果である。超長期的な将来の動向が不明なため、単純な想定としたが現実的なものとは言えないであろう。この点の解決には、人口減少下における工業用及び商業業務等用建物用地の減少や増加に関連する駆動因子や代理変数を見出すことが必要である。住宅用建物用地については、各分野で行われる気候変動影響評価・適応評価の際に起こる不確実性の幅を極力少なくするため、変動成分は世帯数のみとし、他の要素の関数化は一切行っていないシンプルな推計手法を採用している。そのため、人口減少地域における建物の新設・更新は考慮していない。また、空き家となった住宅用建物用地面積は次の時期には元住宅用建物用地としているため、その土地が駐車場になっているのか、空き家のまま建物が維持されているかなどについてはここでは推計の対象としていない。これらの課題が、今後検討が必要となる事項であると考ええる。

参考文献

- Hausfather, Z. and Peters, G. P. (2020): Emissions-the ‘business as usual’ story is misleading. *Nature*, 577, 618-620, <https://doi.org/10.1038/d41586-020-00177-3>.
- Hausfather, Z., K. Marvel, G. A. Schmidt, J. W. Nielsen-Gammon & M. Zelinka (2022) Climate simulations: recognize the ‘hot model’ problem. *Nature*, **605**, 26-29. <https://www.nature.com/articles/d41586-022-01192-2>
- Hayashi, M., Ishizaki, N. N., Shiogama, H., Wakazuki, Y. (2024) Scenario Dependence of Future Precipitation Changes across Japan in CMIP6. *SOLA*, 20, 207-216, <https://doi.org/10.2151/sola.2024-028>
- Hayashi, M., Shiogama, H. (2022) Assessment of CMIP6-based future climate projections selected for impact studies in Japan. *SOLA*, 18, 96-103. <https://doi.org/10.2151/sola.2022-016>
- Ishizaki, N. N., Shiogama, H., Hanasaki, N., Takahashi, K. (2022) Development of CMIP6-based climate scenarios for Japan using statistical method and their applicability to heat-related impact studies. *Earth and Space Science*, 9, e2022EA002451, <https://doi.org/10.1029/2022EA002451>
- Shiogama, H., Fujimori, S., Hasegawa, T., Hayashi, M., Hirabayashi, Y., Ogura, T., Iizumi, T., Takahashi, K. & T. Takemura (2023) The importance of recognizing the ‘distinctiveness’ of SSP3-7.0 for use in climate change impact assessments. *Nature Climate Change*, 13, 1276–1278. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01883-2>
- Shiogama H., N. N. Ishizaki, N. Hanasaki, K. Takahashi, S. Emori, R. Ito, T. Nakaegawa, I. Takayabu, Y. Hijioka, Y. N. Takayabu, R. Shibuya (2021) Selecting CMIP6-based future climate scenarios for impact and adaptation studies. *SOLA*, **17**, 57-62, <https://doi.org/10.2151/>

sola.2021-009

- Shiogama, H., Watanabe, M., Kim, H., Hirota, N. (2022) Emergent constraints on future precipitation changes. *Nature*, **602**, 612–616, <https://doi.org/10.1038/s41586-021-04310-8>
- Yoshikawa, S., Takahashi, K., Wu, W., Matsubashi, K., and Mimura, N.: Development of common socio-economic scenarios for climate change impact assessments in Japan, *Geosci. Model Dev. Discuss.*, gmd-2022-169, 2022.
- 国立環境研究所: 日本版 SSP 別人口シナリオ第 2 版 (2021), <https://adaptationplatform.nies.go.jp/socioeconomic/population.html>.
- 国立社会保障・人口問題研究所 (2019): 日本の世帯数の将来推計 (都道府県別推計), 人口問題研究資料第 343 号, ISSN1347-5428.
- 吉川沙耶花, 今村航平, 山崎潤也, 似内遼一, 真鍋陸太郎, 村山顕人, 高橋潔, 松橋啓介, 三村信男 (2024) 日本版 SSPs に付随したデータ開発のための用途別建物用地面積の将来推計, 土木学会論文集, Vol.80, No.27, 受理.

【 資 料 編 】

テーマ、サブテーマの執筆担当一覧

研究テーマ番号	執筆担当
編集委員会	S-18 プロジェクト成果概要、9 章
テーマ 1	7 章、8 章、10 章、11 章、1.2.1 (4) (1(3)1)、5.2.3 (1(3)2)、5.3.3 (1(3)2)、3.4 (1(4))、Box3.1 (1(4))、Box7.1 (1(1))、Box7.2 (1(1))、Box9.1 (1(1))
テーマ 2	1 章、Box1.1 (2(1))
テーマ 3	3 章、4 章、Box4.1 (3(1))、Box4.2 (3(1))
テーマ 4	5 章
テーマ 5	6 章
国立環境研究所	2 章

注) テーマ毎の章番号は主に執筆したことを示す。節、項、Box を個別のサブテーマが執筆した場合は () の中に担当サブテーマ番号を示す。

S-18 プロジェクト参加者（研究組織）

サブテーマ番号	氏 名	所 属	備考
S-18-1-1	三村 信男	茨城大学地球・地域環境共創機構	
	若月 泰孝	茨城大学大学院理工学研究科	
	武若 聡	筑波大学システム情報系	
	蓮井 誠一郎	茨城大学人文社会科学部	
	藤田 昌史	茨城大学大学院理工学研究科	2022.4 ～
	吉川 沙耶花	長崎大学大学院工学研究科	
	楨田 容子	茨城大学地球・地域環境共創機構	2023.4 ～
	大楽 浩司	筑波大学システム情報系	
S-18-1-2	真砂 佳史	国立環境研究所気候変動適応センター	
	肱岡 靖明	国立環境研究所気候変動適応センター	
	岡 和孝	国立環境研究所気候変動適応センター	
	高倉 潤也	国立環境研究所社会システム領域	
	釜江 萌美	国立環境研究所気候変動適応センター	
	小出 大	国立環境研究所気候変動適応センター	
	塩竈 秀夫	国立環境研究所地球システム領域	2023.2 ～
	石崎 紀子	国立環境研究所気候変動適応センター	2023.2 ～
	大山 剛弘	国立環境研究所気候変動適応センター	
	楨田 容子	国立環境研究所気候変動適応センター	2022.4 ～ 2023.3
S-18-1-3 (1)	石塚 直樹	農研機構農業環境研究部門研究推進室	
	櫻井 玄	農研機構農業環境研究部門	
	片柳 薫子	農研機構農業環境研究部門	
	岸 茂樹	農研機構農業情報研究センター	
	若井 淳	農研機構農業環境研究部門	2023.4 ～
	木村 延明	農研機構農村工学研究部門	2020.4 ～ 2024.8
	三中 信宏	農研機構農業環境研究部門	2020.4 ～ 2023.3
	岡部 憲和	農研機構農業環境研究部門	2020.4 ～ 2023.3
S-18-1-3 (2)	西浦 博	京都大学大学院医学研究科	
	林 克磨	京都大学大学院医学研究科	
	鈴木 綾子	京都大学大学院医学研究科	2020.4 ～ 2022.3
	藤本 万理恵	京都大学大学院医学研究科博士課程	2022.4 ～ 2024.3
S-18-1-4	横沢 正幸	早稲田大学人間科学学術院	
	太田 俊二	早稲田大学人間科学学術院	
	岡田 将誌	国立環境研究所気候変動適応センター	
	中河 嘉明	早稲田大学人間総合研究センター	
S-18-2-1	長谷川 利拡	農研機構農業環境研究部門	
	石郷岡 康史	農研機構農業環境研究部門	
	桑形 恒男	農研機構農業環境研究部門	
	西森 基貴	農研機構農業環境研究部門	
	滝本 貴弘	農研機構農業環境研究部門	
	麓 多門	農研機構農業環境研究部門	
	若月 ひとみ	農研機構農業環境研究部門	

サブテーマ番号	氏 名	所 属	備考
S-18-2-1	伊川 浩樹	農研機構北海道農業研究センター	
	山村 光司	農研機構農業環境研究部門	
	山中 武彦	農研機構農業情報研究センター	
	中園 江	農研機構中日本農業研究センター	
	松山 宏美	農研機構中日本農業研究センター	
	熊谷 悦史	農研機構農業環境研究部門	
	山崎 諒	農研機構作物研究部門	
	松尾 直樹	農研機構九州沖縄農業研究センター	
	野見山 綾介	農研機構九州沖縄農業研究センター	
	白岩 立彦	NPO 無施肥無農薬栽培調査研究会	
	染谷 信孝	農研機構植物防疫研究部門	
	菅野 圭一	農研機構野菜花き研究部門	
	米田 有希	農研機構西日本農業研究センター	
	遠藤 みのり	農研機構西日本農業研究センター	2020.4 ~ 2024.9
	馬橋 美野里	農研機構農業環境研究部門	2022.4 ~
	上野 広樹	農研機構野菜花き研究部門	
	前田 健	岐阜県農業技術センター	
	棚橋 寿彦	岐阜県農業技術センター	
	杉浦 俊彦	農研機構果樹茶業研究部門	
	紺野 祥平	農研機構果樹茶業研究部門	
	伊達 智輝	農研機構果樹茶業研究部門	2024.4 ~
	杉浦 裕義	農研機構果樹茶業研究部門	
	吉松 孝宏	鹿児島県農業開発総合センター	2021.4 ~
	篠原 和孝	鹿児島県農業開発総合センター	2022.4 ~
	前野 欽哉	鹿児島県農業開発総合センター	2022.4 ~
	白戸 康人	農研機構農業環境変動研究センター	2020.4 ~ 2021.5 (TL)
	細野 達夫	農研機構農業情報研究センター	2021.5 ~ 2023.7 (TL)
	水本 晃那	農研機構中日本農業研究センター	2020.4 ~ 2024.3
	村上 健二	農研機構西日本農業研究センター	2020.4 ~ 2024.3
	中野 聡	農研機構農業環境変動研究センター	2020.4 ~ 2022.3
	前川 富也	農研機構中日本農業研究センター	2020.4 ~ 2022.3
	川崎 洋平	農研機構西日本農業研究センター	2020.4 ~ 2023.3
	川嶋 浩樹	農研機構本部企画戦略本部ほか	2020.4 ~ 2023.3
	岡崎 圭毅	農研機構農業環境研究部門	2020.4 ~ 2023.3
	内野 浩二	鹿児島県農業開発総合センター	2020.4 ~ 2022.3
	楠 聡太	鹿児島県農業開発総合センター	2020.4 ~ 2022.3
	腰替 大地	鹿児島県農業開発総合センター	2020.4 ~ 2022.3
	今井 周平	岐阜県農業技術センター	2020.4 ~ 2022.3
	阪本 大輔	農研機構果樹茶業研究部門	2020.4 ~ 2021.3
	木崎 賢哉	鹿児島県農業開発総合センター	2020.4 ~ 2021.3
S-18-2-2	樋口 浩二	農研機構畜産研究部門	
	野中 最子	農研機構畜産研究部門	
	澤戸 利衣	農研機構畜産研究部門	

サブテーマ番号	氏 名	所 属	備考
S-18-2-2	宇喜多 遥	農研機構畜産研究部門	2023.2 ～
	大津 晴彦	農研機構畜産研究部門	
	原 文香	農研機構畜産研究部門	
	依馬 朋香	農研機構畜産研究部門	2024.4 ～
	井上 寛暁	農研機構畜産研究部門	
	大森 英之	農研機構畜産研究部門	
	石田 藍子	農研機構畜産研究部門	
	村上 斉	農研機構畜産研究部門	
	松下 浩一	山梨県畜産酪農技術センター	
	芦沢 咲知	山梨県畜産酪農技術センター	2023.4 ～
	山崎 信	農研機構畜産研究部門	2020.4 ～ 2021.3
	兼松 伸枝	農研機構畜産研究部門	2020.4 ～ 2021.3
	芦原 茜	農研機構畜産研究部門	2020.4 ～ 2024.3
S-18-2-3	平田 泰雅	森林研究・整備機構森林総合研究所	
	西園 朋広	森林研究・整備機構森林総合研究所	
	橋本 昌司	森林研究・整備機構森林総合研究所	
	中尾 勝洋	森林研究・整備機構森林総合研究所	
	鳥山 淳平	森林研究・整備機構森林総合研究所	
	村上 亘	森林研究・整備機構森林総合研究所	
	経隆 悠	森林研究・整備機構森林総合研究所	
	伊原 徳子	森林研究・整備機構森林総合研究所	
	内山 憲太郎	森林研究・整備機構森林総合研究所	
	森 英樹	森林研究・整備機構森林総合研究所	
	荒木 眞岳	森林研究・整備機構森林総合研究所	2020.4 ～ 2022.3
S-18-2-4	木所 英昭	水産研究・教育機構水産資源研究所	
	瀬藤 聡	水産研究・教育機構水産資源研究所	
	吉田 吾郎	水産研究・教育機構水産技術研究所	
	奥西 武	水産研究・教育機構水産資源研究所	
	井桁 庸介	水産研究・教育機構水産資源研究所	
	高見 秀輝	水産研究・教育機構水産資源研究所	
	笥 茂穂	水産研究・教育機構水産資源研究所	
	堀 正和	水産研究・教育機構水産資源研究所	
	島袋 寛盛	水産研究・教育機構水産技術研究所	
	八木 佑太	水産研究・教育機構水産資源研究所	
	川内 陽平	水産研究・教育機構水産資源研究所	
	矢野 寿和	水産研究・教育機構水産大学校	
	鈴木 勇人	水産研究・教育機構水産資源研究所	
	鬼塚 剛	水産研究・教育機構水産技術研究所	2021.4 ～
	須藤 健二	水産研究・教育機構水産技術研究所	2022.4 ～
S-18-3-1	横木 裕宗	茨城大学大学院理工学研究科	
	田村 誠	茨城大学地球・地域環境共創機構	
	外岡 秀行	茨城大学大学院理工学研究科	
	柴田 傑	茨城大学大学院理工学研究科	

サブテーマ番号	氏 名	所 属	備考
S-18-3-1	増永 英治	茨城大学大学院理工学研究科	
	今村 航平	茨城大学地球・地域環境共創機構	
	佐藤 大作	摂南大学理工学部	
	熊野 直子	愛媛大学大学院農学研究科	
S-18-3-2	森 信人	京都大学防災研究所	
	志村 智也	京都大学防災研究所	
	宮下 卓也	京都大学防災研究所	
	二宮 順一	金沢大学理工学域	
	加藤 史訓	国土技術政策総合研究所	
	本多 和彦	国土技術政策総合研究所	
	安田 誠宏	関西大学環境都市工学部	
	今井 優樹	京都大学防災研究所	2022.4 ～
	Tungcheng Ho	京都大学防災研究所	2022.4 ～ 2024.3
S-18-3-3	風間 聡	東北大学大学院工学研究科	
	平賀 優介	東北大学大学院工学研究科	2023.4 ～
	柳原 駿太	東北大学大学院工学研究科博士課程	
	山本 道	東北大学大学院工学研究科博士課程	
	池本 敦哉	東北大学大学院工学研究科博士課程	2023.4 ～
	桑原 祐史	茨城大学大学院理工学研究科	
	Li Han	茨城大学大学院理工学研究科	2022.4 ～
	川越 清樹	福島大学共生システム理工学類	
	呉 修一	富山県立大学工学部	
	峠 嘉哉	東北大学大学院工学研究科	2020.4 ～ 2022.9
S-18-3-4	吉田 武郎	農研機構農村工学研究部門	
	皆川 裕樹	農研機構農村工学研究部門	
	土原 健雄	農研機構農村工学研究部門	2020.4 ～ 2023.3
	吉本 周平	農研機構農村工学研究部門	
	角 哲也	京都大学防災研究所	
	堀 智晴	京都大学防災研究所	
	佐藤 嘉展	愛媛大学農学研究科	
	工藤 亮治	岡山大学環境生命科学研究科	
	高田 亜沙里	農研機構農村工学研究部門	2022.4 ～
	丸山 篤志	農研機構農村工学研究部門	2022.4 ～
	福元 雄也	農研機構農村工学研究部門	2023.4 ～
	小林 草平	京都大学防災研究所	2024.4 ～
S-18-4-1	栗栖 聖	東京大学大学院工学系研究科	
	福士 謙介	東京大学未来ビジョン研究センター	
	中谷 隼	東京大学大学院工学系研究科	
	白井 浩介	東京大学大学院工学系研究科博士課程	
	湯 寿妃	東京大学大学院工学系研究科	2022.6 ～ 2025.1
	今井 葉子	東京大学大学院工学系研究科	2020.4 ～ 2024.3
S-18-4-2	谷川 寛樹	名古屋大学大学院環境学研究科	
	丸山 一平	東京大学大学院工学系研究科	

サブテーマ番号	氏 名	所 属	備考
S-18-4-2	醍醐 市朗	東京大学先端科学技術研究センター	
	飯塚 悟	名古屋大学大学院環境学研究科	
	白川 博章	名古屋大学大学院環境学研究科	
	平山 修久	名古屋大学減災連携研究センター	2022.4 ～
	山下 奈穂	東京大学大学院工学系研究科	2023.2 ～
S-18-4-3	村山 顕人	東京大学大学院工学系研究科	
	真鍋 陸太郎	東京大学大学総合教育研究センター	
	似内 遼一	東京大学大学院工学系研究科	2022.4 ～
	山崎 潤也	名古屋大学大学院環境学研究科	
S-18-4-4	加藤 博和	名古屋大学大学院環境学研究科	
	徐 非凡	名古屋大学大学院環境学研究科	2022.4 ～
	水谷 圭宏	名古屋大学大学院環境学研究科	2024.4 ～
	大野 浩一	名古屋大学大学院環境学研究科	
	大野 悠貴	名古屋大学大学院環境学研究科	2020.4 ～ 2022.3
	朴 秀日	名古屋大学大学院環境学研究科	2020.4 ～ 2022.3
S-18-5-1	日引 聡	東北大学大学院経済学研究科	
	鈴木 賢一	東北大学大学院経済学研究科	
	松田 安昌	東北大学大学院経済学研究科	
	若林 緑	東北大学大学院経済学研究科	
	湯田 道生	東北大学大学院経済学研究科	
	戸田 裕之	東北大学大学院経済学研究科	
S-18-5-2	野原 克仁	立教大学観光学部観光学科	
	内田 真輔	名古屋市立大学経済学研究科	
	吉田 惇	東北学院大学経済学部	
	板倉 健	名古屋市立大学経済学研究科	
	岡地 迪尚	東京大学総合文化研究科	
	生川 雅紀	岡山大学社会文化科学研究科	

※所属は参画期間当時のものとする

環境研究総合推進費戦略的研究課題 S-18 報告書
日本の気候変動影響と適応策－レジリエントで持続可能な社会に向けて－

2025 年 3 月

発 行 環境研究総合推進費 S-18 プロジェクトチーム

問合せ先 S-18 プロジェクト事務局

茨城大学地球・地域環境共創機構（GLEC）内

〒310-8512 茨城県水戸市文京 2-1-1

Email s-18_info@m.ibaraki.ac.jp

※著作権法で認められた場合を除き、本書の無断転載をお断りします。