

2022 年度 S-18 プロジェクト研究成果報告

テーマ番号	S-18-2-1
研究課題名	水稲、畑作物、野菜、果樹を対象とした気候変動影響予測と適応策の評価
研究代表者氏名	農研機構／農業情報研究センター 細野達夫

1. 研究成果の概要

本サブテーマでは、可能な限り多くの作目・品目を対象にし、新規開発あるいは高度化した影響予測モデルを用い、サブテーマ 2(2)および 2(3)と同じ NARO2017 を軸とするプロジェクト全体の共通気候シナリオのもとで、人口や土地利用などの社会経済シナリオは現状固定とした将来影響予測を行ってきた。また各品目について適応オプションを整理し、実現性の高い適応策の効果を定量化しようとしている。プロジェクト 3 年目となる R4 年度は、モデルの高度化、データ収集を行った。以下、作目別に詳細を記載する。

1) 水稲

(1) 研究方法

水稲では、オリジナルの水稲生育収量予測モデルに高温・高 CO₂ 複合影響を組み込んだ改良版影響予測モデル (Ishigooka *et al.*, 2021) を使用し、CMIP6 をベースにした最新の日本域気候シナリオデータ (NIES2020 データ: Ishizaki *et al.*, 2021) を入力値とした影響評価を実施した。改良版影響予測モデルでは、FACE 実験で明らかになった高 CO₂ 増収効果の温度依存性と高 CO₂ による白未熟粒率発生の助長が組み込まれており、従来のモデルと比較して、収量、品質ともに将来予測される高温・高 CO₂ 条件下において負の影響が強く現れる傾向が見られる。

今回入力値として使用した NIES2020 データ 3 種類の RCP による 5 種類の GCM の出力値であり、1981～2100 年の 1 km 空間解像度でのバイアス補正済み日別気象データで構成される気候シナリオである。5GCM の平均気温上昇量 (1981-2000 年を基準) は、2041-2060 年で +2.0°C (SSP126) および +2.7°C (SSP585)、2081-2100 年で +2.0°C (SSP126) および +5.4°C (SSP585) であり、従来の影響評価で用いていた NARO2017 データ (西森ら 2019, CMIP5 ベース) における対応する期間での上昇量 (それぞれ、+1.9、+2.6、+2.0、+5.2°C) と比較して若干高めである。一方、今回用いた CMIP6 における CO₂ 濃度は、2041-2060 年で 470ppm (SSP126)、574ppm (SSP585)、2081-2100 年で 456ppm (SSP126) および 1013ppm (SSP585) であり、CMIP5 における濃度 (それぞれ、442, 545, 426, 850 ppm) と比較して高く、特に SSP585 (RCP8.5) で顕著である。

(2) 結果の概要

新たなシナリオによる算定例として、MIROC6-SSP585 (NIES2020) による 2041-2060 年の平均相対収量 (基準移植日、白未熟粒率 40%以下) の分布と、比較のため対応する従来シナリオ (MIROC5-RCP8.5: NARO2017) による結果の分布を比較した。この期間の当該気候シナリオの予測気温上昇量は、それぞれ +2.37°C、+2.43°C (1981-2000 年を基準) と新シナリオの方がやや低いが、CO₂ 濃度は前述のとおり新シナリオの方が高く設定されている。両者による結果を比較すると、特に東日本の多くの地域で新シナリオを用いた方が収量を低く算定していることが認められた。また、収量および品質の観点から影響を軽減する適応策として最適移植日の選択を行うため、算定した白未熟粒率 (Percentage of chalky grains: PCG) のレベルに応じて収量を 6 クラス (PCG<10%, 10%<PCG<20%, 20%<PCG<30%, 30%<PCG<40%, 40%<PCG<55%, 55%<PCG) に分類し、PCG のレベル毎に最も収量が高くなる最適移植日を探した。その結果、収量および品質両方の観点による最適移植日の選択を行った場合でも、新シナリオによる予測は従前の予測と比較して影響軽減効果が小さい結果が見られた。シミュレーションに使用した改良版影響予測モデルには高温と高 CO₂ の複合作用による増収効果の抑制と品質低下の助長の効果が考慮されているため、CO₂ 濃度が高く設定されている新シナリオを使用することで、昇温の度合いによっては収量、品質とも、従来よりも大きく低下する予測結果となりやすいことが示唆された。

担当者：石郷岡康史、長谷川利拡、桑形恒男、西森基貴、滝本貴弘、麓多門、伊川浩樹

2) コムギ

<適応技術の開発>

(1) 研究方法

前作および施肥による収量の違いを明らかにするため、温暖地向け秋播型コムギ品種「さとのそら」を対象に、前作および施肥設計を要因とした1年目の圃場試験を行った。

最適な踏圧時期を明らかにするために、1葉期と2葉期に踏圧を行い幼穂発育に及ぼす効果を調査した。茎立ち期以降に日最低気温 -2°C 以下を経験する日数を、発育モデルを用いて2012年から202年について算出し、10年間の平均日数を凍霜害リスク日数とした。

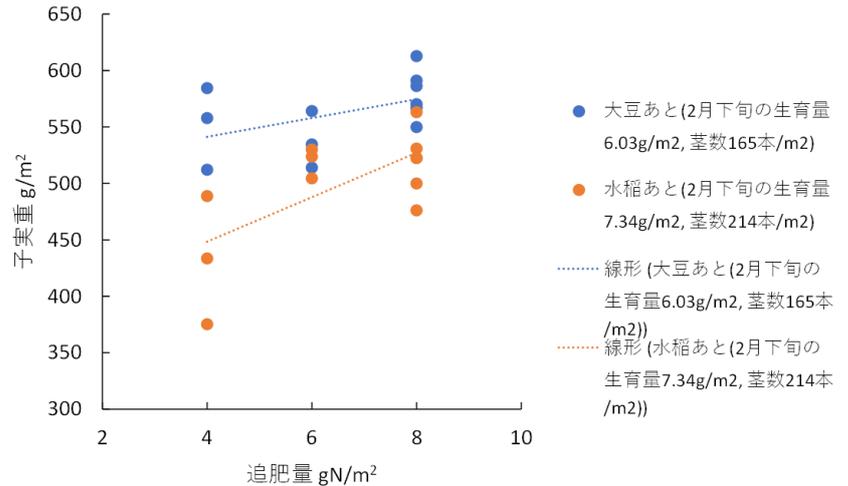


図 2-1 前作が異なる場合の追肥の増収効果

(2) 結果の概要

水稲跡と比較して大豆跡で収量が多くなった。水稲跡では追肥の増量による増収効果が大きく、大豆跡コムギと比較して追肥の重要性が高いと考えられた(図 2-1)。

これまでの踏圧試験結果を総合して、1-2 葉期の麦踏みの茎立ち期遅延効果が高いことを明らかにした(図 2-2)。幼穂分化前の麦踏みは、茎立ち期を 3-9 日遅延させて凍霜害による減収リスクを緩和するため、早播栽培における安定生産技術となることが示された。東海地域(三重県津市)の春播型品種において、麦踏みを行う場合の播種早限は 3 日程度早まることから、播種期間の拡大による規模拡大に有効と推察された(図省略)。

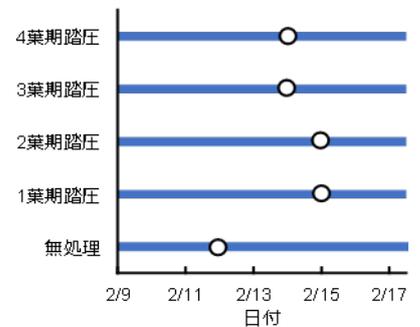


図 2-2 麦踏み時期と茎立ち期(○)の暦日

担当者：松山宏美、山脇賢治、水本晃那

<モデル開発>

(1) 研究方法

津市において施肥量および施肥パターンを変えた栽培試験を実施し、前年度までのデータとつくば市で実施した施肥試験のデータを合わせてモデルの適合度を検証した。面的な影響評価の実施に向けて、茨城県を対象に将来気候シナリオを用いて発育および凍霜害リスクのシミュレーションを行った。

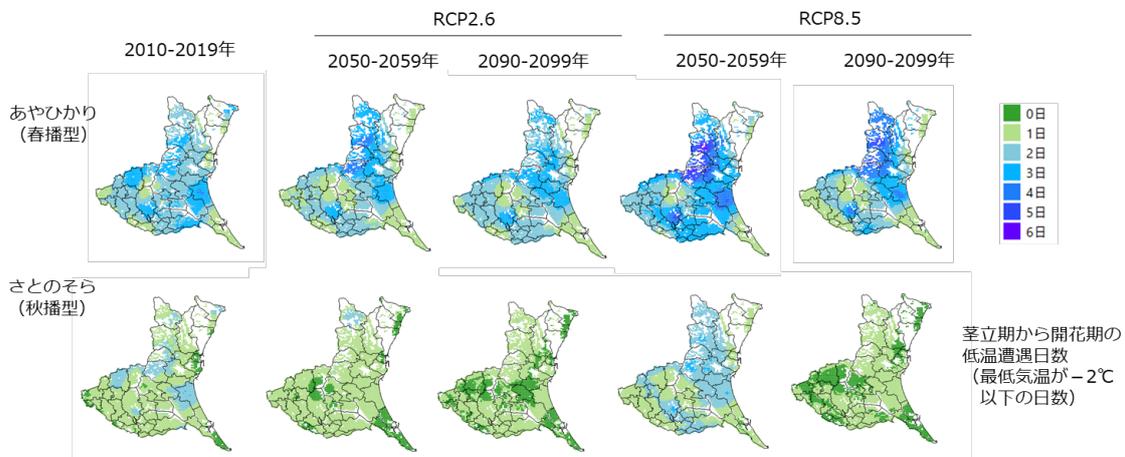


図 2-3 将来気候シナリオによる茨城県における凍霜害リスクの推定結果
1km×1km メッシュデータ使用、白抜きのメッシュは耕地面積 0%

(2) 結果の概要

モデルは年次、品種、圃場および施肥パターンの異なる試験区の収量差をおおよそ推定できていたが、誤差の大きい場合もあり、生育期間中の窒素の流出量の推定値が大きいほど収量を過小評価する傾向が認められた。また土壌有機物のパラメータを実測値に合わせて調整した場合に、推定精度が向上した。凍霜害リスクは品種の播性により異なり、春播型品種は発育の大幅な前進により特に RCP8.5 シナリオでリスクが上昇する一方で、秋播型品種は 2090 年代においてリスクが低下することが示された(図 2-3)。広域を対象とした影響評価では、土壌条件および品種の特性を考慮し実施する予定である。

担当者：中園江

3) ダイズ

(1) 研究方法

ダイズでは、これまでに高温年や干ばつ年に発生が助長されると報告されている莢先熟(青立ち)の発生量を予測するモデル構築を目指した。まず、農研機構内のダイズの育成地(育種拠点)において、過去数十年にわたって実施されてきた生産力検定試験成績の中から、播種日や開花日に加えて、青立ちの障害程度(0-5)を収集した。次に、収集したデータセットを使い、青立ち程度の予測モデルの構築と検証を実施した。具体的には、各試験成績に対応する緯度・経度・年次・播種日・土壌物理性パラメータ等の情報を使い、「農研機構メッシュ農業気象データ」から気象要素を取得して、播種日以降の気象要素を抽出するとともに、土壌水分推定モデル(熊谷ら、2018)により、播種日以降の土壌体積含水率を推定した。開花日を起点にして、開花・登熟期間全体を幾つかの期間に区切り、気温、大気飽差、全天日射量および土壌体積含水率の平均値を計算した。それらを説明変数として、青立ち程度を目的変数とする機械学習モデルを構築し、その精度を検証した。さらに、複数の育成地において、その機械学習モデルとダイズ開花日予測モデル(中野ら、2015)にメッシュ温暖化シナリオデータ(西森ら、2019)を入力して、ダイズの青立ちの障害程度の将来予測を実施した。

(2) 結果の概要

複数地点および複数年次における品種「エンレイ」、「里のほほえみ」および「リュウホウ」のデータを合計 187 点収集できた。青立ち程度予測の機械学習モデルは、モデル構築段階(n=125)および検証段階(n=62)において、良好な精度を示した。機械学習モデルによる変数重要度は、ある特定時期の平均気温が最も高く、この時期の高温イベントによって青立ち発生が助長されると推察された。青立ち程度の機械学習モデルを使い、秋田県の育成地にて、2020 年から 2100 年の 6 月 5 日に品種「リュウホウ」を播種すると仮定したシミュレーションでは、開花日は変動しながら年々前進し、青立ちの障害程度は年々上昇した。今回開発した機械学習モデルは入力要素が多いため、今後はより少ない入力要素(例えば、特定期間の平均気温)でのシンプルなモデルの構築を進めていく予定である。開発するモデルと最新のシナリオデータに基づき、青立ちなどの障害程度の将来予測やそれらを軽減する適応策(播種日移動や品種選定)を示す予定である。

担当者：熊谷悦史、山崎諒、川崎洋平、松尾直樹、野見山綾介、白岩立彦

4) 野菜

<施設果菜>

(1) 研究方法

共通気候シナリオに基づくデータセットを用い将来気候下での生育や収量への温暖化の影響を定量的に評価するための施設園芸作物の乾物生産モデルを整備した。このモデルを活用し、施設園芸作物への影響評価を実施する準備を行うため、これまでに準備した将来気候シナリオの拡充を図り、日本の異なる地点のデータを取得を行った。

(2) 結果の概要

施設で栽培する果菜類の例として、これまでにトマトを対象とし影響評価の試行を行った。具体的には MIROC RCP2.6/8.5 を参照し 2050 年付近 3 カ年分のデータセットを準備した。本データを用い大規模施設(施設面積 1.0ha)での周年栽培(8 月定植、翌年 6 月終了)を仮定し、屋外気象から機械学習(XGboost)により屋内気象を推定し温室内のトマトの収量に及ぼす影響を予測した。結果、夏期を除く期間では収穫量への影響はないと考えられた。将来気候シナリオを用いた評価スキームを構築することが出来たため、今後は温暖化の影響評価の年度を拡大し 2100 年までの影響を予測するためのデータセットを整備した。上記に

より共通気候シナリオ第2版を入力し影響評価に活用するためのフレームワークを整備し、今後複数地点での評価を実施する予定である。

担当者：菅野圭一

<ハウレンソウ>

(1) 研究方法

2020～2023年の6～9月に農研機構西日本農研普通寺拠点の雨よけハウスを用いて、遮光率が異なる複数の遮光資材を展張した試験区を設けた。試験区で複数回ハウレンソウを栽培し、発芽直後における苗の生存率、ならびに生育パラメータとして播種後25日目における株の葉長、新鮮重、乾物重を調査した。本年度および過去2年間で得られた生存率と生育データから、高温下の生育（障害）モデルとして成長曲線への適合を検討した。さらに、ハウス内地温および普通寺拠点の気温、ならびにMIROC5、MRI-CGCM3とRCP2.6、RCP8.5を組み合わせた4種類の気候変化シナリオから、1986-2005年、2041-2060年、2081-2100年におけるハウス内の6～9月の月別平均地温を推定し、夏作ハウレンソウに対する温暖化の影響を評価した。

(2) 結果の概要

生育および苗生存率についてゴンペルツ曲線を用いた生育障害モデルを作成した。生育では、葉長を指標とした場合最も適合度が高かった。作成したモデル（ハウス内地温と、苗生存率または葉長との関係式）と気候変化シナリオを用いて温暖化の影響評価を行うため、ハウス外気温とハウス内地温の回帰式を作成した。夏作ハウレンソウに対する温暖化の影響評価について、MRI-CGCM3に比べMIROC5の方が苗の生存率が減少し、葉長の伸長を抑制した。特に、2081-2100年8月の平均地温で評価した場合、MIROC5-RCP8.5において温暖化の影響が最も高くなった。

担当者：米田有希、村上健二、遠藤みのり

<トマト葉先枯>

(1) 研究方法

葉先枯れ発症程度の異なる大玉トマト3品種について、葉先枯れ発症の原因となるカリウム濃度を変更した栽培液で栽培することにより、発症しやすさと栽培液中のカリウム濃度の関係について検証したほか、トマトの主要なカリウム転流先であると考えられる果実について、収穫量と葉先枯れ症との関係、そして温暖化による影響評価への利用可能性を検証した。

(2) 結果の概要

栽培液中のカリウム濃度を変化させた検証実験では、いずれの品種、栽培液においても同時期に葉先枯れの発症が見られ、気象の影響により発症しているものと考えられた。また発症程度が低い品種については栽培液の管理により発症をほぼ抑制できることが示唆され、有効な対策技術となることが想定された。果実収量の発症予測への利用検討については、果実収量から逆算した果実肥大量について葉先枯れ発症との相関がみられた($R=0.70$)ほか、1日あたりの果実肥大量については4年間の環境データを用いた機械学習(XGboost)により決定係数 $R^2=0.72$ で予測可能であった。これらの知見を次年度実施予定の温暖化による影響評価に活用する予定である。

担当者：上野広樹、前田健、棚橋寿彦、馬橋美野里

<野菜細菌病>

(1) 研究方法

ハクサイ主産地である茨城県における軟腐病の発生状況について、過去40年間分の発生面積および発生程度を集計した。アメダスデータを利用して軟腐病多発年における気象要因間の相関解析を行う。一方で野菜類軟腐病菌菌株の再同定を行うと共に病原細菌種の再同定および識別手法を開発して多発生時に備えた適応策を検討する。

(2) 結果の概要

気象要因の月別平均データからは、ハクサイ主産地における軟腐病多発年における象要因として、夏季の雨量および気温が軟腐病発生面積を助長する傾向が見られたが有意な相関までは認められなかった。今後、メッシュ気象データと軟腐病発生記録を併せたモデル解析を進める予定である。また、日本産軟腐病菌約300株の再同定を行った結果、1種類と考えられていた病原細菌種が10種以上混在していることを確認す

るとともに、各種の簡易識別法を確立した。

担当者：染谷信孝、菅野圭一

5) 果樹

<リンゴ>

(1) 研究方法

高温がリンゴ品質に与える影響を明らかにするため、過去数年間実施してきた人工気象室での温度処理結果データを整理、解析した。供試されたデータは、リンゴ「ふじ」のポット栽培樹に対し、自然光ファイトトロンにおいて17.3~25.6℃の一定温度で温度処理を施し、収穫期に品質調査したものである。

(2) 結果の概要

気温が高いほど酸含量と、果皮の地色と表面色、デンプンの消失程度、蜜入りの評価値がいずれも有意に低くなることがわかった。これらの品質指標と気温の関係は、線形に近似することができた。なお、糖度や果実の硬さについては、気温の影響を明確に受けることはなかった。以上の結果を用いて、日平均気温から算出した品質指標の変化量を日々蓄積することで、気温の経過から果実の品質指標の変化を推定するモデルを開発した。このモデルに、気温の現在値として、メッシュ農業気象データ、将来値として国環研(NIES2020)を適用し、品質変化のシミュレーションを実施した。

担当者：杉浦俊彦、杉浦裕義、紺野祥平

<ブドウ>

(1) 研究方法

ブドウ適地の南限を決める要因である着色不良発生に対する適応策として、植物ホルモン剤(ABA)の効果进行调查した。鉢植えの「巨峰」を1樹当たり新梢2本で管理し、2房着果させ、開花期とその2週間後にジベレリンを処理し、無核化した。処理区21~33℃の4℃毎に設定した自然光ファイトトロンにおいて、着色始期にABA(1000ppm)を果房のみ散布処理し、収穫日に果皮色の調査をおこなった。

(2) 結果の概要

植物ホルモン剤(ABA)処理により果皮色は30℃以上の極端な高温区でも明らかに改善し、ABA処理は有望な適応策と判断された。処理区と無処理区の差は平均してカラーチャート値で2.7であった。次年度はこの値を用いて、適応ありの場合の適地マップを作成する予定である。

担当者：杉浦裕義、杉浦俊彦、紺野祥平

<亜熱帯果樹>

(1) 研究方法

ミカン栽培が困難となった場合の適応策として有望な、亜熱帯果樹レイシの栽培可能性に関する実験で、レイシの樹体温度と寒害発生の関係を調べているが、寒害発生時には樹体温度と気温との間に乖離が認められる可能性がある。そこで2022年度は、レイシの冬季における樹体温度を調べるため、2023年1月、鹿児島県薩摩川内市において、気温と葉温との関係を調査した。T型熱電対を用いて、気温と2年生のポット植えレイシ「佐多系」の葉温を5分間隔で測定した。試験は2回実施し、各回3樹を供試した。

(2) 結果の概要

最低気温が-3.1℃になった2023年1月5日の早朝4~7

時のレイシの平均葉温は-4.2℃で、その差は1.1℃であった。最低気温が-2.6℃になった1月31日の早朝

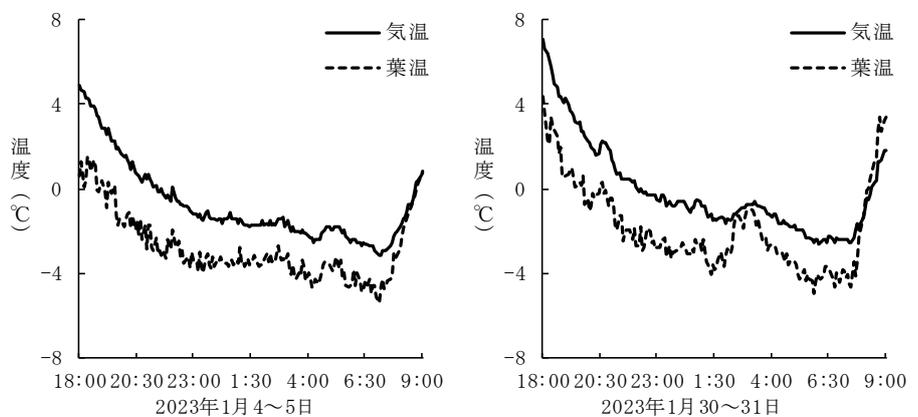


図 5-1 冬季早朝におけるレイシの葉温と気温の関係

4～7時の平均葉温は-3.8℃で、その差は1.2℃であった。したがって、極端な低温発生時には、葉温は日最低気温より1℃程度低下する可能性があり、レイシの栽培適地は、最寒日の日最低気温が、レイシの寒害発生温度より少なくとも1℃以上高い地域であることが示された。

担当者：吉松孝宏、篠原和孝、吉松孝宏、前野欽哉

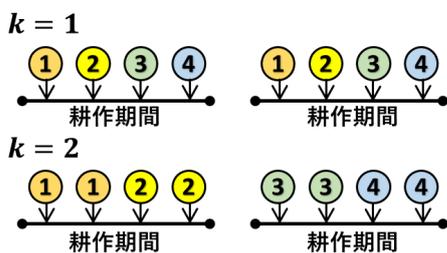
6) 水稲害虫

(1) 研究方法

将来に気温が上昇すれば、害虫の冬期生存率が上昇し、しかも夏季の発育速度も加速されることから、日本などの温帯域では一般に害虫による作物被害は増えると予想されている。このため、地球温暖化への適応策としては、農薬の散布回数を増やさざるをえない可能性が高い。一方で、農水省の策定した「みどりの食料システム戦略（みどり戦略）」では、2050年までに化学農薬使用量をリスク換算で50%低減するとしており、農薬以外の天敵等の利用を推進するとしている。ただし、天敵等の利用はハウスなどの閉鎖系では有効だが水稲のような開放系ではあまり有効ではない。ここで農薬を多用すると、薬剤に抵抗性のある害虫が進化するため、さらに農薬量を増やすという悪循環が生じる。その対策として、みどり戦略では2050年代には「病虫害が薬剤抵抗性を獲得しにくい農薬の開発」を行うとしているが、もはや農薬に使用可能な化学物質のネタは尽きつつある。しかし、このような厳しい状況下においても「病虫害が薬剤抵抗性を獲得しにくい農薬の『施用法』の開発」は可能である。本研究ではこの部分に焦点を当て、将来の地球温暖化のもとでの実用的な適応策としての薬剤散布法を理論的に構築する。

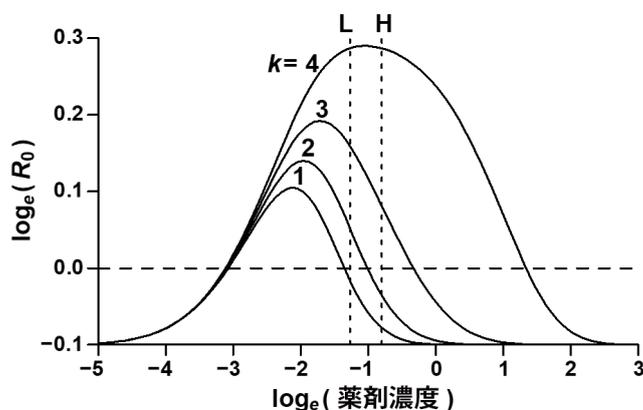
(2) 結果の概要

人間の病原菌に対しては抗生物質が用いられるが、そこでは中途半端に抗生物質を用いるのではなくしっかりと抗生物質を用いれば抵抗性が発達しにくいことが経験的に知られていた。その原理を数理モデルにより明確にし、農業現場において害虫の薬剤抵抗性の進化を阻止できる管理条件を計算する計算式を構築した。図6-1には、水稲などの開放系において、時間的な薬剤散布パターンの典型的な二つの例を示す。ここで害虫は耕作期間と耕作期間の間に移動拡散を行うと仮定する。丸は薬剤を示しており、異なる数字は異なる系統の薬剤であることを意味する。kは1耕作期間内で同系統の薬剤が使用される回数を示す。新型コロナウイルスの報道で知られるようになったように、病虫害が蔓延するか否かを決定するのは広義の「実効再生産数」である。図6-2には、薬剤抵抗性遺伝子比率の実効再生産数の対数値 $\log_e(R_0)$ が、薬剤濃度の対数値に依存してどのように変化するかについての計算例を示す。 $\log_e(R_0)$ が0以下であれば薬剤抵抗性の進化を阻止することができる。図6-2の例では、薬剤濃度がHの場合にはk=1, 2のいずれの散布パターンを用いても薬剤抵抗性は進化しない。しかし、薬剤濃度がLの場合にはk=2の散布パターンを採用すると薬剤抵抗性が進化してしまうことが分かる。これらの計算を行うためには、野外における「薬剤の散布濃度と害虫死亡率の関係」や「害虫の移入率」などのパラメータを適切に推定する必要がある。



(上) 図6-1. 農薬の時間的な散布パターンの例

(右) 図6-2. 耕作期間内の同系統の農薬の散布回数kが抵抗性進化の実効再生産数に与える影響。 $\log_e(R_0)$ が0以下であれば抵抗性の進化が阻止される。



担当者：山村光司、山中武彦

2. 成果一覧（予定を含む）

○学術論文（国内誌 2 件、国際誌 4 件）

<査読あり>

- 1) Abramoff, R. Z., Ciais, P., Zhu, P., Hasegawa, T., Wakatsuki, H., & Makowski, D. (2023). Adaptation Strategies Strongly Reduce the Future Impacts of Climate Change on Simulated Crop Yields. *Earth's Future*, 11(4). <https://doi.org/10.1029/2022EF003190>.
- 2) Hasegawa, T., Wakatsuki, H., and Nelson, G. C. (2022). Evidence for and projection of multi-breadbasket failure caused by climate change. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 58, 101217. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2022.101217>.
- 3) Wakatsuki, H., Ju, H., Nelson, G. C., Farrell, A. D., Deryng, D., Meza, F., and Hasegawa, T. (2023). Research trends and gaps in climate change impacts and adaptation potentials in major crops. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 60, 101249. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2022.101249>.
- 4) Zhang, G., Ujiie, K., Yoshimoto, M., Sakai, H., Tokida, T., Usui, Y., ... Hasegawa, T. (2022). Daytime warming during early grain filling offsets the CO₂ fertilization effect in rice. *Environmental Research Letters*, 17(11), 114051. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aca038>.
- 5) 染谷信孝, 諸星知広, 吉田重信 (2022) . *Bacillus thuringiensis*—微生物殺虫剤からポリバレント資材へ、土と微生物, 76(1), 16-25.

<査読なし>

- 1) 上野広樹. 技術の窓. (2022) トマト葉先枯れ症発症を軽減する栽培管理技術. (<https://www.jfc.go.jp/n/finance/keiei/pdf/2565.pdf>)

○学会・シンポジウム等における発表（国内 22 件、国外 1 件）

<口頭発表>

- 1) 長谷川利拡. IPCC 報告書連携シンポジウム「気候変動の影響はどうか？どう対応するか？～IPCC 第6次評価報告書と日本の研究報告～」(オンライン)(2022) IPCC 第2作業部会第6次報告書、概要I: 気候変動の影響とリスク.
- 2) 西森基貴. IPCC 報告書連携シンポジウム「気候変動の影響はどうか？どう対応するか？～IPCC 第6次評価報告書と日本の研究報告～」(オンライン)(2022) 農林水産業への影響と適応策.
- 3) Nishimori, M., JPGU2022: U-02 「地球規模環境変化の予測と検出」(幕張市)(2022) Agricultural impact assessment and adaptation research in Japan using climate change scenarios at multiple scales.
- 4) Hasegawa, T., Bezner Kerr, R. NARO-FFTC International Symposium "Climate Change and Food System - synergies of adaptation and mitigation, and advanced utilization of climate information for sustainable and climate-resilient agriculture" (つくば市)(2022) Observed impacts and projected risks from the new climate report.
- 5) Bezner Kerr, R., Hasegawa, T., NARO-FFTC International Symposium "Climate Change and Food System - synergies of adaptation and mitigation, and advanced utilization of climate information for sustainable and climate-resilient agriculture" (つくば市)(2022) Adaptation solutions for climate resilient development in food systems.
- 6) Wakatsuki H., NARO-FFTC International Symposium "Climate Change and Food System - synergies of adaptation and mitigation, and advanced utilization of climate information for sustainable and climate-resilient agriculture" (つくば市)(2022) Research trends and gaps in climate change impacts and adaptation potentials in major crops.
- 7) Nishimori M., NARO-FFTC International Symposium "Climate Change and Food System - synergies of adaptation and mitigation, and advanced utilization of climate information for sustainable and climate-resilient agriculture" (つくば市)(2022) An integrated study of climate impacts and adaptation on rice production and quality in Japan using regional climate change scenarios.
- 8) 杉浦俊彦. NARO-FFTC International Symposium "Climate Change and Food System - synergies of adaptation and mitigation, and advanced utilization of climate information for sustainable and climate-resilient agriculture" (つくば市)(2022) Impact of climate change on Japan's fruit industry and adaptation measures
- 9) 西森基貴・若月ひとみ・坂田雅正・齋田直哉・滝本貴弘・長谷川利拡. 日本気象学会 2022 年秋季大会、異なる気象データを用いた気候影響評価結果の相違—高知県における高温耐性品種導入効果.
- 10) Nishimori M., Tonouchi M., Satoda H., Kadarsha, Sabana Hadi A., Gunawan D. 19th Annual Meeting of the Asia

Oceania Geosciences Society (AOGS2022) (on-line) A Comparative Study of Various Downscaling and Bias Correction Methods for Future Changes of Precipitation Over the Indonesian Region.

- 11) 長谷川利拡. 令和4年度気候変動適応の研究会シンポジウム・分科会「農業分野における気候変動適応策関連の研究の動向」(2023)
- 12) 石郷岡康史, 西森基貴, 桑形恒男, 滝本貴弘, 若月ひとみ, 長谷川利拡. 日本農業気象学会 2023 年全国大会 (山口市) CMIP6 気候シナリオによるわが国の水稲生産および品質への影響と適応.
- 13) 滝本貴弘, 若月ひとみ, 石郷岡康史, 長谷川利拡, 西森基貴. 日本農業気象学会 2023 年全国大会 (山口市) 気候変動の適応・緩和や持続可能な食料・水に資する農業気象学研究.
- 14) 西森基貴, 石郷岡康史, 滝本貴弘, 若月ひとみ, 長谷川利拡, 日本農業気象学会 2023 年全国大会 (山口市) 気候変動適応策と社会経済シナリオを考慮した日本におけるコメ生産の将来像.
- 15) Wakatsuki, H., Takimoto, T., Ishigooka, Y., Yoshimoto, M., Nishimori, M., Hasegawa, T. International Symposium on Agricultural Meteorology 2023 (山口市) Assessing the impact of the 2022 hot summer on rice grain appearance quality and effectiveness of introducing heat tolerant cultivars.
- 16) 長谷川利拡. 日本作物学会 96 周年特別公開シンポジウム「気候変動下の食料システム—作物科学への期待と挑戦—」(2023)
- 17) 中園江. 2022 年度茨城県地域気候変動適応センターシンポジウム(2023) 小麦の気候変動影響と適応策.
- 18) 紺野祥平. 日本熱帯農業学会第 132 回講演会 (川崎市) (2022) 国内の亜熱帯地域における気候特性.
- 19) 木崎賢哉, 吉松孝宏, 内野浩二, 杉浦俊彦, 日本熱帯農業学会第 132 回講演会 (川崎市) (2022) アボカド・‘ペーコン’における冬季の気温と葉温との関係
- 20) 染谷信孝, 諸星知広, 菅野圭一, 2022 年度茨城県病害虫研究会 (2022) 茨城県におけるハクサイ軟腐病の発生動向について.
- 21) 前田健, 松尾尚典, 沖光芳, 岩本文司, 園芸学会 令和 5 年度春季大会 (2023) 施設栽培トマトにおける ICT を活用した排液フィードバック制御の検討.

<ポスター発表>

- 1) 山中武彦, 岸茂樹, 越智直, 2022 年米昆虫学会・カナダ昆虫学会・BC 州昆虫学会合同大会 (カナダ・バンクーバー) (2022) 50 years of rice pest records in Japan revealed dynamical changes of pest composition.
- 2) Yoneda Y., Murakami K., NARO-FFTC International Symposium "Climate Change and Food System - synergies of adaptation and mitigation, and advanced utilization of climate information for sustainable and climate-resilient agriculture" (つくば市) (2022), Growth predictions for summerspinach associated with global warming

○「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 長谷川利拡. 農業土木事業協会セミナー (オンライン) (2022) 農業分野への気候変動の影響について
- 2) 長谷川利拡. IPCC WG2 支援事務局の地球・人間環境フォーラム「IPCC AR6 WG2 報告書 執筆者に聞く」(オンライン) (2022) 気候変動と農業・食料
- 3) 長谷川利拡. 朝日地球会議 2022「気候危機と戦争で揺れる世界」(2022) 動画配信 (<https://www.asahi.com/eco/awf/movie/101801.html>)
- 4) 長谷川利拡. アメリカ合衆国 Dickinson College 主催国際気候変動シンポジウム (オンライン) (2022)
- 5) 長谷川利拡. 気候変動リスク産官学連携ネットワークセミナー「農業分野における気候変動影響」(オンライン) (2022) 農業分野における気候変動適応.
- 6) 長谷川利拡. 関東農政局第 3 回統計部勉強会 (オンライン) (2022) 気候変動が水稲の収量・品質に及ぼす影響
- 7) 長谷川利拡. 環境省・農水省・経産省・文科省・気象庁共催 IPCC シンポジウム『第 6 次評価報告書から考える私たちと気候変動』(オンライン) (2022)
- 8) 長谷川利拡. 気候変動研究プロジェクト間のシナリオに関する協力イニシアティブ主催「IPCC 執筆者とマスメディア関係者の対話」(東京大学) (2022)
- 9) 西森基貴. 京都気候変動適応センター・地球研セミナー (京都市) (2022) 関西圏および日本の農業における気候変動の影響.

- 10) 西森基貴. 宮城県農業・園芸総合研究所等「気候変動への適応に向けた農業技術セミナー」(宮城県古川市). (2022) 地球温暖化や気候変動が県内農業に及ぼす影響と対策について.
- 11) 西森基貴. 香川県農業共済組合研修会(高松市). (2022) 地球温暖化に伴う農産物生産の変化と今後の見通しについて
- 12) 西森基貴. 令和4年度栃木県農業気象災害対策セミナー(宇都宮市). (2023) 気候変動が農業に及ぼす影響とその対策について.
- 13) 西森基貴. 安房地区千葉県指導農業士協会研修会(オンライン). (2023) 近年の気候変動と農業への影響、及びその対応(適応策)について.
- 14) 杉浦裕義. 令和4年度宮城県ぶどう栽培研修会(宮城県名取市). (2022) ぶどう栽培における生理障害の発生要因と対策について.
- 15) 杉浦裕義. 令和4年度岩手県果樹農業振興担当者会議(岩手県盛岡市). (2023) 地球温暖化が果樹産地に及ぼす影響とその対応について.
- 16) 杉浦俊彦. 日本ワインブドウ栽培協会ウェビナー(オンライン). (2022) 温暖化が日本のブドウ生産に及ぼす影響と対策.
- 17) 杉浦俊彦. 稲城市高尾ぶどう生産組合研修会(東京都稲城市). (2022) 温暖化に伴うブドウ着色不良の発生拡大を予測.
- 18) 杉浦俊彦. 食料/農業・環境を考える千葉県民フォーラム(千葉市). (2022) 気候変動とわたしたちの食・農業.
- 19) 杉浦俊彦. 気候変動×アート第2回ワークショップ(横浜市). (2023) 温暖化が及ぼす日本の農・食への顕著な影響.

○新聞・雑誌記事等

特に記載すべき事項はない。

○知的財産権

特に記載すべき事項はない。

○受賞等

2023年日本農業気象学会 学会賞(普及賞)、日本農業気象学会、2023年3月17日、西森基貴
 2023年日本農業気象学会 学会賞(学術賞)、日本農業気象学会、2023年3月17日、石郷岡康史
 第67回日本応用動物昆虫学会 学会賞、日本応用動物昆虫学会、2023年3月13日、山中武彦
 令和4年度(第15回)農環研若手研究者奨励賞、農研機構農業環境研究部門、2023年3月27日、若月ひとみ

テーマ番号	S-18-2-2
研究課題名	畜産を対象とした気候変動影響予測と適応策の評価
研究代表者氏名	農研機構／畜産研究部門 樋口浩二

1. 研究成果の概要

本サブテーマでは、将来の温暖化が家畜の生産性へ及ぼす影響を推定するためのモデルの構築を目的として、これまで気候変動の影響予測について十分な検討が行われていなかった家畜種である泌乳牛、採卵鶏および肥育後期豚を対象とした動物実験によるデータ収集、モデル化および温暖化影響予測、ならびに既存のデータと影響予測モデルのある育成牛、肉用鶏および肥育前期豚への温暖化影響予測の高度化をおこなってきた。今年度は実験データの収集を継続するとともに、1連の実験を終えた家畜種についてはモデルの構築および将来予測試算に着手した。

1) 泌乳牛

(1) 研究方法

ホルスタイン種泌乳牛4頭を供試し、環境調節室に収容、温度3水準（18、23、28℃）、相対湿度は70%一定の条件に2週間ずつ暴露し、その間の体重、飼料摂取量、乳量・乳成分、体温・呼吸数、エネルギー代謝等を測定した。飼料はトウモロコシサイレージを主体とした一般的な構成とし、これを自由採食させた。飼料の粗タンパク質含量は16%程度であった。

乳量減少モデルの構築にあたり、今年度のデータに、2020年度および2021年度の同様の試験（相対湿度条件のみ、2020年度が60%、2021年度は80%と異なる）のデータを加えた、計36点（温度3水準×4頭×3年）の乳量データより推定式を検討した。

(2) 結果の概要

体重、乾物摂取量および乳量は28℃で減少した。体温・呼吸数は温度が高くなるにつれてそれぞれ上昇・増加した。3年間の飼養試験結果から温度、体重、分娩後日数および産次を説明変数とするモデルを作成した（未公表）。

上記モデルを用い、泌乳牛の条件として体重：650kg、産次：2.8産、分娩後日数：90日、気候モデルはMIROC5、温暖化シナリオをRCP8.5の条件で、2020年、2030年、2050年および2090年各年の7、8および9月における適温（18℃）に対する生産性低下割合をNARO2017に基づいてマップ化した。

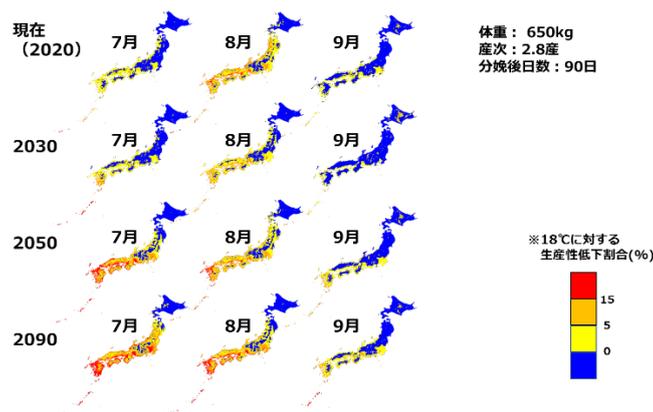


図1. 泌乳牛の生産性に及ぼす温暖化影響予測（試算）

担当者：樋口浩二、澤戸利衣、野中最子、宇喜多 遥

2) 採卵鶏

(1) 研究方法

市販のロードアイランドレッド種（ボリスブラウン、30週齢）72羽を供試した。環境温度が22、28および

び 33℃の部屋に 24 羽ずつ収容し、4 週間の産卵試験を実施した。各室、相対湿度が 60%に近づくように加湿器で調整した。卵重は毎日記録し、飼料摂取量および体重は毎週測定した。週に一度全ての卵について、卵殻強度、卵殻厚およびハウユニットを測定した。また山梨県畜産酪農技術センターにおいて赤玉系のボリスブラウン（23 週齢）と白玉鶏（ジュリアライト）それぞれ 60 羽を用いて暑熱期（6 月 2 日～9 月 8 日）の産卵性や卵重について開放鶏舎におけるフィールド調査を実施した。

(2) 結果の概要

環境調節実験では、環境温度が高くなるにつれて飼料摂取量、体重が減少し、産卵率および卵質（卵殻強度、卵殻厚、卵殻重量）が低下した。環境温度と日産卵量（g/day）との関係については次の式が得られた。

$$\text{日産卵量 (g)} = -0.3188 \times \text{温度}^2 + 14.76 \times \text{温度} - 112.52 \quad (R^2=1)$$

これは昨年度の白色レグホーン種（ジュリアライト）を用いた試験よりも大きく温度の影響を受けることが示唆される結果であったため、2023 年度はボリスブラウンとジュリアライトを用いた試験を同時に行い、系統差の比較も含めて検討し、更にデータの蓄積を行い回帰式を作成する予定である。またフィールド調査では、週平均温度が高くなるにつれてジュリアライトはわずかに日産卵量が減少したが、ボリスブラウンではより大きく日産卵量の減少が観察された（図 2）。また卵殻強度や産卵率に対しても同様にボリスブラウンのほうが大きく温度の影響を受けることが示唆された。

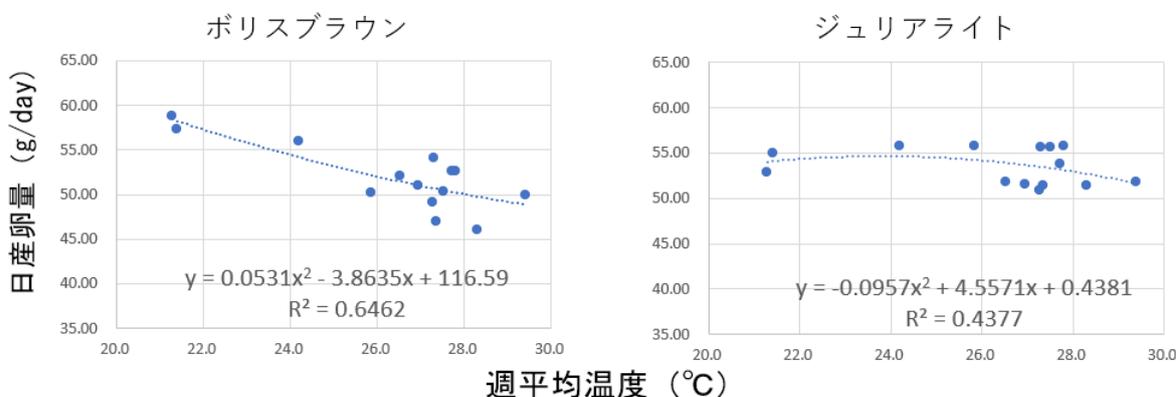


図 2. ボリスブラウンとジュリアライトにおける週平均気温と日産卵量の関係

担当者：大津晴彦、原文香、松下浩一、村上 斉

3) 肥育後期豚

(1) 研究方法

LWD 交雑種去勢雄豚（体重約 70kg）を環境調節室の単飼豚房に収容し、温度 2 水準（20, 28℃、各区 n=6）、相対湿度は 80%一定の条件で 4 週間飼養、その間の体重、飼料摂取量、体温、呼吸数等を測定した。給与飼料はトウモロコシと大豆粕主体の肥育後期豚用に設計した飼料とし、これを自由採食させた。飼料の粗タンパク質含量は 12.7～12.8%であった。

(2) 結果の概要

これまでに行った相対湿度 60%における環境温度と日増体量との関係を図 3（黒プロット）に示した。今年度の相対湿度 80%の実験結果より、環境温度 28℃では 20℃と比較して呼吸数および直腸温の上昇がみられた。飼料摂取量および日増体量は 20℃に比べて 28℃ではそれぞれ 24%および 21%（赤プロット）減少した。環境温度 20℃と 28℃では、相対湿度が 60%から 80%へ上昇しても飼養成績には影響はみられなかった（図 3）。

2023 年度は相対湿度 80%で環境温度 24 および 30℃におけるデータを採取し、相対湿度 80%における回帰式を完成させる予定である。

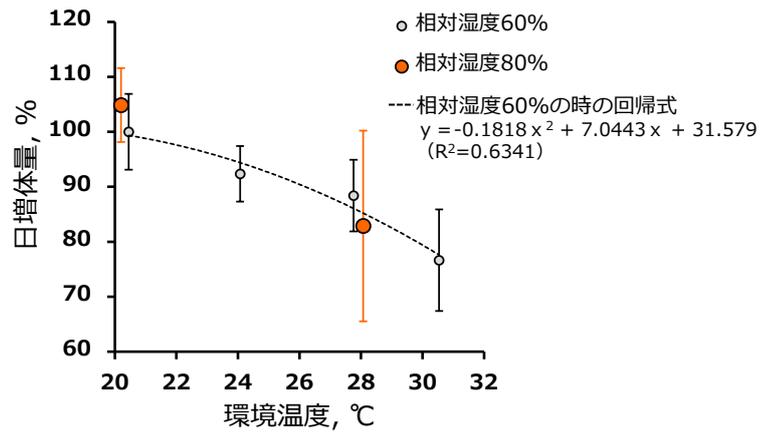


図3. 肥育後期豚における環境温度と日増体量*との関係

*各環境における日増体量は、環境温度 20°C、相対湿度 60%の時の値を 100 とした相対値で表示

担当者：井上寛暁、大森英之、石田藍子、芦原 茜、村上 斉

2. 成果一覧（予定を含む）

○学術論文（国内誌 0件、国際誌 1件）

<査読あり>

- 1) Nanto-Hara F, Yamazaki M, Murakami H, Ohtsu H. (2023). Chronic heat stress induces renal fbrosis and mitochondrial dysfunction in laying hens. Journal of Animal Science and Biotechnology DOI 10.1186/s40104-023-00878-5

<査読なし>

特に記載すべき事項はない。

○学会・シンポジウム等における発表（国内 1件、国外 1件）

<口頭発表>

- 1) 大津晴彦、家禽における暑熱の影響・栄養によるその対策法の探索、令和4年度東北農業試験研究推進会議 畜産飼料作推進部会大家畜中小家畜分科会

<ポスター発表>

- 1) Higuchi K, Hara K, Sawado R, Nonaka I, Ohtani F, Terada F. (2022). Once daily milking improved nitrogen balance in lactating cow under hot environment. Animal - Science Proceedings 13(3), 462-463

○「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない。

○新聞・雑誌記事等

特に記載すべき事項はない。

○知的財産権

特に記載すべき事項はない。

○受賞等

特に記載すべき事項はない。

テーマ番号	S-18-2-3
研究課題名	林業を対象とした気候変動影響予測と適応策の評価
研究代表者氏名	森林研究・整備機構／森林総合研究所 平田泰雅

1. 研究成果の概要

本サブテーマでは、地域に応じた最適な地域系統選択指針の提示のための適地推定モデルを構築することを目的として、スギの現在の生育地の環境情報と遺伝的変異データとの対応を解析し、スギの地域適応に関わる遺伝子型の日本における分布を明らかにして、地域系統の将来気候下における脆弱性を推定するモデルを構築した。また、成長量予測と山地災害リスクを考慮して適応策を評価することを目的として、全国モデルによる成長量の試算結果と地域モデルによる試算を相互比較し、両モデルの高度化と精度検証を行い、整理した適応策オプションごとにモデルへの組み込み手法を検討することによって、成長量と山地災害リスクを考慮した適応策評価モデルを構築した。

1) 地域に応じた最適な地域系統選択指針の提示

(1) 研究方法

気候変動の適応策の定量的な評価を行うため、スギ人工林の成長量予測の全国モデルに伐期変更と系統転換のオプションを組み込み、両者が成長量に与える影響を推定するフレームを構築した。スギの成長量予測の全国モデルは炭素循環モデル Biome-BGC をベースとし、昨年度までにスギ人工林のパラメタリゼーションを完了している。気候シナリオは 1km メッシュの空間解像度で、共通シナリオ第二版の 5 つの気候モデルを利用し、現在気候を 1995-2014 年、将来気候を 2081-2100 年としてスギの成長量の将来変化を試算した。伐期は 40 年と 80 年の比較を行い、80 年伐期に対する 40 年伐期の増加分を適応策として評価した。スギの地域系統はオモテスギとウラスギの 2 系統とし、ベースシナリオとして両系統の現在の空間分布にもとづき、成長量の計算を行った。さらに、両者の転換により成長量の予測値が増加した場合、系統転換の適応策として評価した。オモテスギとウラスギの成長特性の違いとして、40 年生以降のスギ人工林ではオモテスギがウラスギと比較し、材積成長の低下の度合いが大きいという統計的知見を組み込んだ。

気候変動によるスギの地域系統の脆弱性を評価するため、遺伝的変異の分布と気候変数を用いたモデリングを行った。まず日本の分布域をカバーする 20 集団 254 個体の解析により得られた 31,676 の遺伝的変異（一塩基多型、SNP）の中から、潜在因子混合モデル(latent factor mixed model)を用いて、気候値との有意な相関を持つ SNP を抽出した。気候値は World Clim v2.0 の bio1-19（1970-2000 年の平均値）を用いた。いずれかの気候値と有意な相関が検出された 2034SNP を用い、局所適応している遺伝子のアレル頻度（遺伝的変異のタイプ）が環境勾配中でどのように分布し、将来気候下で局所適応がどこでどの程度阻害されるか、について Gradient Forest を用いてモデリングした。モデルには、空間情報としてサンプリング地点の位置情報より Principal coordinates of neighbor matrices(PCNM)を算出して組み込んだ。また、環境適応において重要度の高い気候値を推定した。気候モデルは MIROC6、社会経済シナリオは ssp1-2.6、ssp5-8.5 を用いた。2030、2050、2090 年時の地域系統の遺伝的な不適合の程度（genetic offset）を算出し、脆弱性の高まる地域を推定した。

(2) 結果の概要

スギの成長量の全国モデルの試算により、日本の異なる地域では適応策の効果が変わる可能性が示された。地方別にみると、スギ人工林の将来的な成長量の増加/減少を幅広く含む九州地方では適応策の効果がより高く、成長量の全面的な増加が予測される東北地方では、適応策の効果が限定的である可能性が示唆された（図 1）。この理由として、九州地方のスギ人工林では 40 年生以降のバイオマス炭素の増加がより鈍く、植え替えによるプラス効果が高くなったと考えられた。一方で、同地方における晩成型への系統転換の評価については、後述の遺伝的脆弱性を含めた実行可能性を考慮する必要があるため、次年度以降の検討課題と

した。また当初の計画には無かったが、S-18の共通社会シナリオ（人口シナリオ）を利用し、少子高齢化社会の人工林の空間分布を推定した結果、2050年には全国のスギ・ヒノキ林の4割が限界自治体（人口の半数以上が高齢者）の管理下にあると予測され、我が国の将来における人工林の管理の議論に新たな視点を与える重要な結果と考えられた。

遺伝的変異と空間・気候変数をモデリングすることにより、スギの環境適応には最寒四半期（冬期）の平均気温、最暖四半期（夏期）の降水量、年間降水量の寄与が大きいことが示された（図2）。全ての遺伝的変異と環境適応的な遺伝的変異のみによる遺伝構造を比較すると、九州や四国など太平洋側の端の地域と、日本海側全域において差が大きく、これらの地域で局所適応が強いことが予測された。気候モデルMIROC6によるgenetic offsetの予測では、低排出シナリオ（ssp1-2.6）では2050年に九州、四国の一部内陸域および東北地方の一部地域においてgenetic offsetが上昇した。一方、高排出シナリオ（ssp5-8.5）では、2050-2090間に分布域全域の低地で広くgenetic offsetが高まるタイミングがあると予測された（図3）。以上の結果より、スギにおいては気温と降水量の点で地域適応が生じており、気候変動によりそれらが増加することで、現在の適応パターンが崩れ、適応度が低下する地域や系統が生じることが予測された。

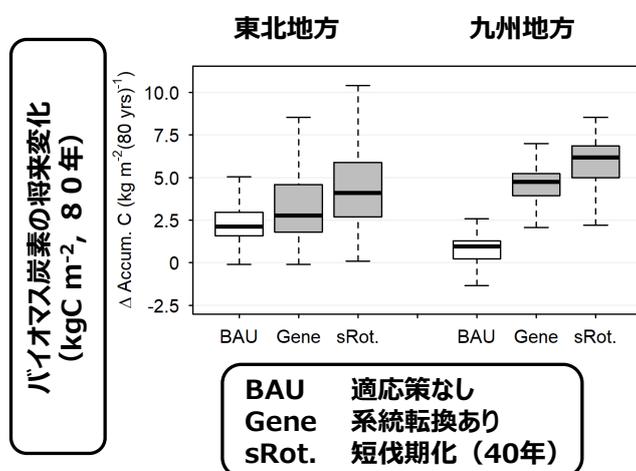


図1. 全国モデルへの適応策の組込

成長量予測の指標として、1995-2014年とSSP1-2.6の2081-2100年のバイオマス炭素の差分（正の値が将来的に増加）を示している。

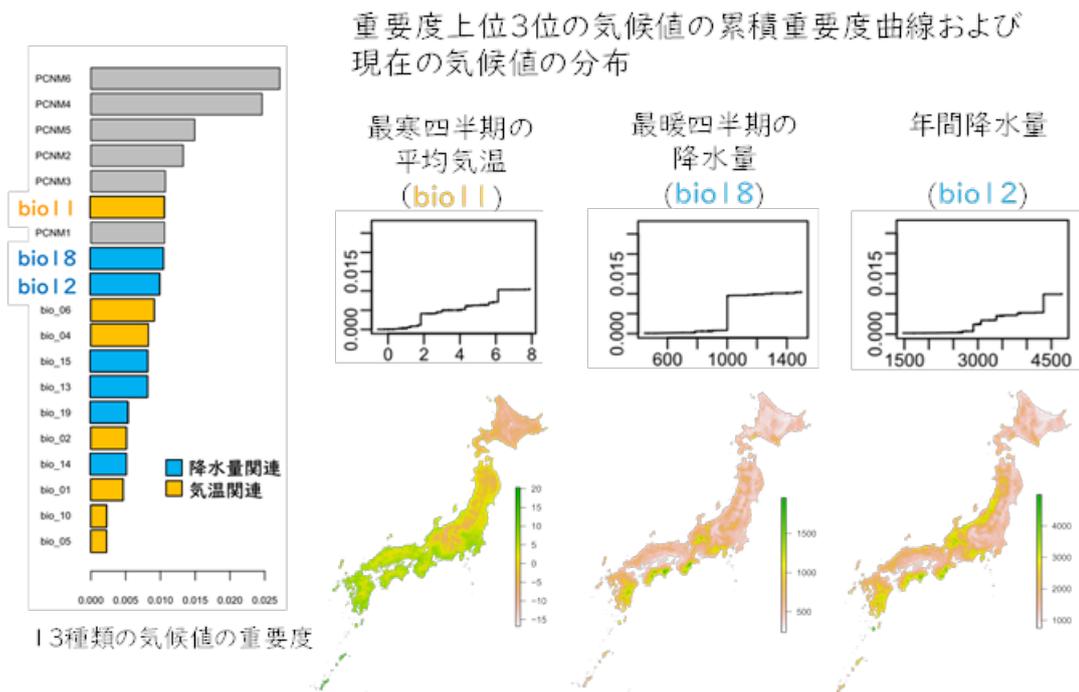


図2. スギのゲノム情報から取得した環境適応候補遺伝子と、現在の気候値との関係をモデル化 (Gradient Forest)
スギの環境適応には冬季の降水量および気温が重要であることが示された。

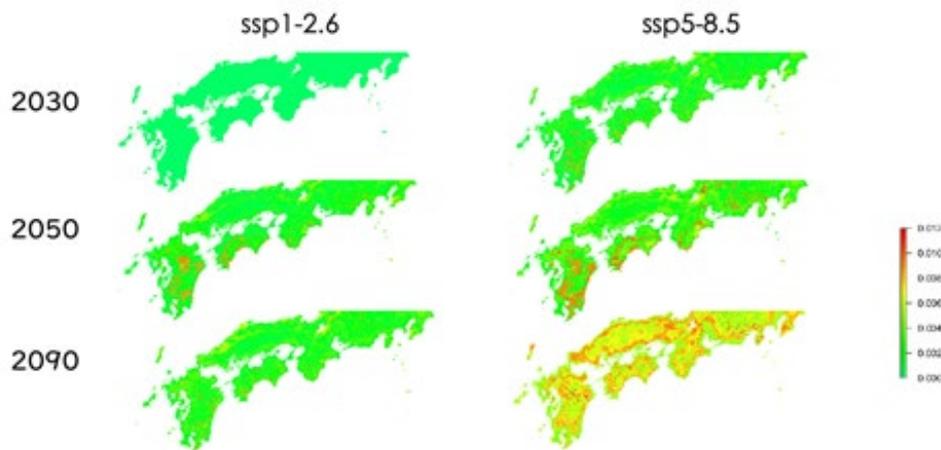


図3. 気候モデル MIROC6 による genetic offset (GO) の予測
気候モデル MIROC6 と低排出シナリオ (ssp1-2.6) 及び高排出シナリオ (ssp5-8.5) を用いた試算により、将来気候下での遺伝的脆弱性の程度を色分けして示した。

担当者：伊原徳子、内山憲太郎、森英樹、鳥山淳平、橋本昌司、西園朋広

2) 成長量予測と山地災害リスクを考慮した適応策評価モデルの開発

(1) 研究方法

昨年度までに構築したスギ人工林の樹高成長予測モデル及び降雨条件に基づいた土砂災害リスク予測モデルを統合することで、将来気候下においてスギの成長量は増加し、土砂災害の発生危険性は相対的に低い、林業適地を判定するための、スギ成長量予測と山地災害リスクを考慮した適応策評価モデルを構築した。具体的には、まず昨年度までに開発したスギ成長予測モデルと土砂災害リスク予測モデルを用いて、将来気候シナリオ下での地域内における2100年までのスギの樹高成長と災害リスク頻度をそれぞれ予測した。スギ樹高予測モデルは、航空機 LiDAR か

ら得られる樹高情報と樹齢や環境要因との関係を機械学習の手法である random Forest を用いて構築した統計モデルであり、予測精度が十分に高いことが現地データに基づき昨年度までに検証されている。土砂災害リスク予測モデルは、対象地域の3日間積算雨量の100年確率雨量を閾値として土砂災害が発生する危険性の高い将来降雨を判定する経験的なモデルである。このモデルについては、過去に日本で大規模な土砂災害を引き起こした計10事例の降雨を対象とした検証により、十分な判定精度が確認されている。

今年度は、モデル地域において、ある基準年に植栽したと仮定した場合のスギ成長量を、スギ人工林の樹高成長予測モデルを用いて予測した。次に、予測結果を4タイプに分けてマップ化した(図4左列)。将来気候シナリオには、GCMとして日本周辺域の再現性が高いとされるMIROC5を用い、濃度シナリオは最も顕著な将来の気温上昇を想定したRCP8.5を用いた。同様の将来気候シナリオと濃度シナリオの予測雨量データを用いて、2100年までの各日の3日間積算雨量を算出した。そして、この予測3日間積算雨量が、対象地域の現在気候下における100年確率雨量に到達した場合に、その降雨を土砂災害発生リスクの高い危険降雨として判定した。予測雨量データの各グリッド(約1km²)において、この危険降雨が発生する回数を集計してマップ化した(図4右列)。

スギ成長量・土砂災害リスクの予測結果は、温暖化の進行に伴う将来の変化を詳しく調べるために、どちらも2030年代(2021-2040)、2050年代(2041-2060)、2100年代(2081-2100)の3期間で算出した(図4)。これらの結果をGIS上で統合することで、対象地域内におけるスギ成長パターンと災害リスク頻度を加味して林業適地と不適地をグリッド毎に評価するためのマップを作成した(図5)。この統合マップに基づいて、対象地域内において、現在から将来に渡る林業適地と林業不適地を推定することで、今後の安全かつ生産性の高い林業を、気候変動に適応した上で継続するためのゾーニングの試案を示した。

(2) 結果の概要

モデル地域における将来気候シナリオに基づくスギ樹高成長と土砂災害リスク頻度を試算した(図4左列)。スギ樹高成長モデルを用いて地域内の樹高成長を規定する要因を定量評価したところ、スギの樹高成長量に影響を及ぼすパラメータとしては、林齢と気候条件(気温や降水量)に比べ、地形条件(TWI: 土壌湿潤度を指標する指数)が最も影響の大きい支配的なパラメータであることが分かった。構築したモデルを用いて、将来気候下におけるスギ樹高成長について予測したところ、これらのパラメータが同地域内において空間的に異なるため、成長パターンも空間的に異なっており、将来に渡ってスギの高い成長量が望める場所もあれば、相対的に成長量が低くなる場所も生じると予測され、スギ成長量は空間的な差異が大きいことが明らかになった。なお、このような気候変動を考慮した場合のスギ成長量の空間的な配置パターンは、現在気候条件が維持すると仮定したBAUシナリオの予測結果とは異なっており、将来気候下における成長量の変化を考慮した林業の適応策の必要性を示唆する。

土砂災害リスク頻度の解析では、使用した将来気候シナリオ(MIROC5 RCP8.5)の降雨データに基づく試算では、2030年代は土砂災害を引き起こす危険性のある危険降雨(3日間の積算雨量が対象地域の100年確率降雨量を超過する雨)が、対象地域全域で発生しないと予測された(図4右列)。しかし一方で、2050年代にはモデル地域の北東部で、危険降雨が発生することがわかった。また、危険降雨の発生回数は、空間的なばらつきが生じており、特に対象地の東側では最大2回程度危険降雨が発生する高リスクな地域が生じることが予測された。2100年代には、危険降雨が予測される領域が縮小するものの、依然としてモデル地域の西側で危険降雨の頻度が高く、土砂災害の発生リスクが相対的に高いことが予測された。危険降雨の空間分布は、スギの成長量が相対的に高い地域の分布とは異なるパターンを示しており、両者の統合によってスギ成長量が高く、災害リスクの低い地域の判定が可能になる。

GISを用いて、スギ樹高成長予測モデルと土砂災害リスクマップを統合した。スギ樹高成長モデルによる成長タイプ、土砂災害リスクの高低、傾斜斜面の緩急に基づき、対象地域を4領域に区分した(図5)。北部では、高成長かつ土砂災害リスクが低く、将来気候下においても林業生産に適する場所が予測された。これに対し、東部域には成長は普通程度だが土砂災害リスクが高く、将来的な土地利用形態を慎重に検討すべき場所が予測された。なお、今回の予測は1つのGCMのみを用いた予測であり、将来予測の不確実性を十分に検討できていない点は課題として残る。

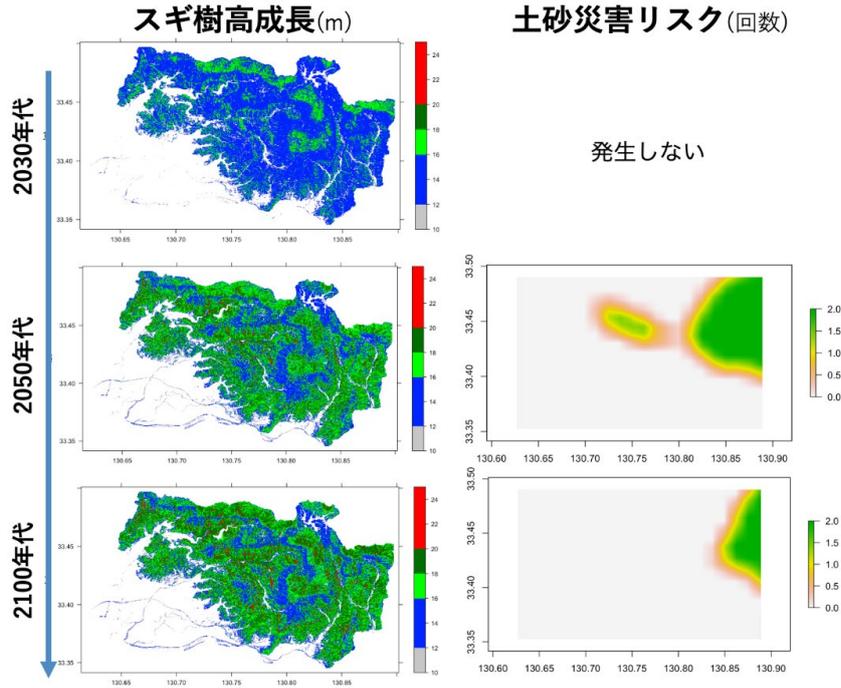


図4. 福岡県朝倉市周辺におけるスギ樹高成長(左列)と土砂災害リスク(右列)

スギ樹高成長は基準年に植栽したと仮定した場合の成長予測、土砂災害リスクは過去に発生した土砂災害と降雨との関係をもとに閾値を設定し、その閾値を超過する降雨がある回数を示している。

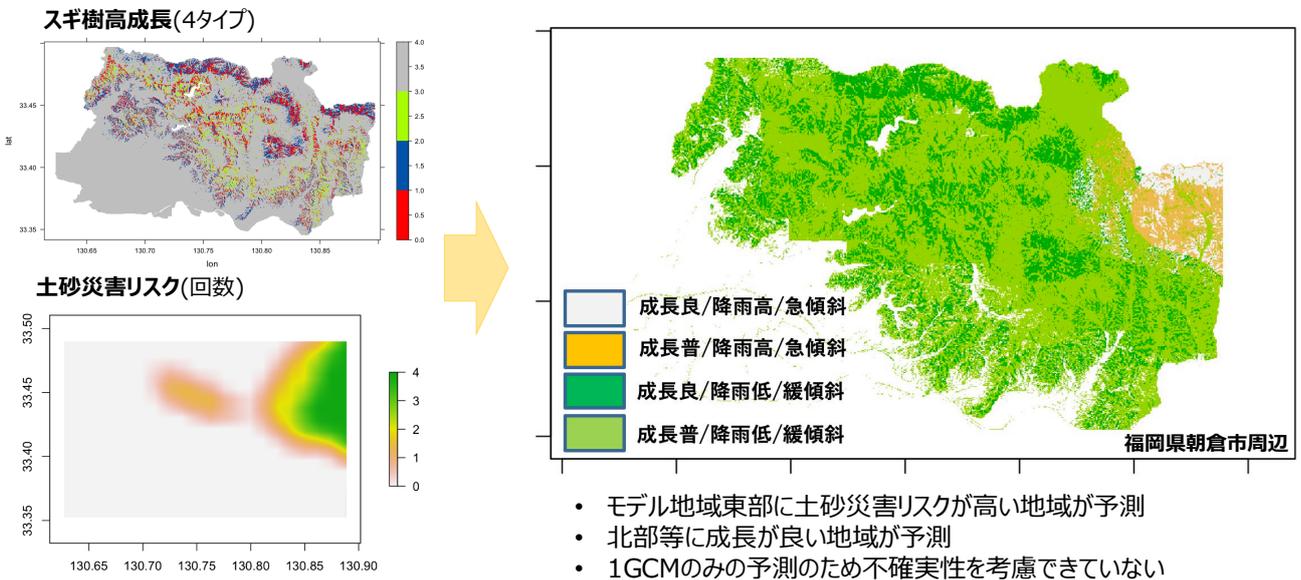


図5. モデル地域(福岡県朝倉市周辺)における、スギ樹高成長と土砂災害リスクマップとの統合
スギ樹高成長モデルによる成長の良悪、土砂災害リスクの高低、傾斜斜面の緩急に基づき、対象地域を4区分。

- モデル地域東部に土砂災害リスクが高い地域が予測
- 北部等に成長が良い地域が予測
- 1GCMのみの予測のため不確実性を考慮できていない

担当者： 村上亘、経隆悠、中尾勝洋

2. 成果一覧（予定を含む）

○学術論文（国内誌 4件、国際誌 1件）

<査読あり>

1) 鳥山淳平、橋本昌司：九州森林研究、76：117-120（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－

<査読なし>

1) 鳥山淳平、中尾勝洋、橋本昌司：森林総合研究所九州支所年報（令和4年版）、34：13-16（2022）日本の森林域の気候変動予測の概要－5つの気候モデルの気温と降水量の比較－

2) 鳥山淳平：九州の森と林業、142：1-3（2022）気候変動と向き合う九州の人工林

3) 中尾勝洋：山林、1665：19-24、（2023）森林ビッグデータを用いてスギ人工林の将来の生産性を高精度で予測する、1665：19-24

○学会・シンポジウム等における発表（国内 2件、国外 0件）

<口頭発表>

1) 【予定】内山憲太郎、中尾勝洋、津村義彦、日本森林学会大会（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

<ポスター発表>

1) 伊原徳子、内山憲太郎、金谷整一、陶山佳久、津村義彦、森林遺伝育種学会大会（2022）トランスクリプトーム解析によるスギ環境適応遺伝子の探索

○「国民との科学・技術対話」の実施

1) 中尾勝洋、東京大学 森林科学セミナー、2022、森林分野における気候変動適応策：日本の森林分野は気候変動にどのように適応すべきか？

2) 平田泰雅、電気硝子工業会技術セミナー、2022、気候変動時代における森林・林業の役割

○新聞・雑誌記事等

特に記載すべき事項はない。

○知的財産権

特に記載すべき事項はない。

○受賞等

特に記載すべき事項はない。

テーマ番号	S-18-2-4
研究課題名	水産業を対象とした気候変動影響予測と適応策の評価
研究代表者氏名	水産研究・教育機構／水産資源研究所 水産資源研究センター 木所英昭

1. 研究成果の概要

本課題では、プロジェクトにおける共通シナリオを用いて水産重要種の漁期・漁場の変化を予測し、各地域における漁業の影響評価を行う。特に、気候変動への影響に関する知見の少ない底魚類を対象として、各地の底びき網で漁獲される主要底魚類の分布・漁期・漁場の変化を把握し、環境要因を考慮した予測モデルを作成して精度向上を図って評価する。また、増養殖業においても藻場漁場への高精度の影響把握に不可欠な地理的特性による局地的要因の抽出と、栄養塩供給過程の変化が与えるワカメ養殖への影響を把握して影響を評価する。その結果を基に、各地の増養殖業における適応策オプションの有効性を評価し、地方自治体レベルでの経済的な視点も含めた適応策策定を支援する情報提供を行う。

プロジェクト3年目となるR4年度は、日本海における主要底魚資源の分布域の変化を論文として公表したほか、R4 スルメイカの回遊経路に関する試算を行った。また、R5年度の影響評価に向けて、底水温と主要底魚類の分布の有無に関してモデル化を行った。ワカメ類や藻場に関しては引き続き現地調査を継続して実施し、その結果をもとにモデルを高度化するとともに過去の海洋データから成長の再現を行いパラメータの調整を行った。

1) 日本海の底びき網漁業主要対象種における分布域の変化

(1) 研究方法

本研究では、沖合底びき網漁業（沖底）の漁獲情報をもとに日本海中西部における底びき網漁場（図1）における主要資源（タラ類、カレイ類等）の分布域の変化をまとめ、気候変動による影響を検討した。分布域の変化については、各漁区（10分升目）における月別のかげまわし漁獲データを基に、時空間補正手法（vector autoregressive spatiotemporal (VAST) モデル）を用いて1982年以降の日本海中西部の沖底漁場分布状況を解析した（図2）。そして、VASTモデルを用いて作成した各年の分布状況から、分布重心の南北方向、および東西方向への変化を計算した。基本的に日本海中西部の冷水性種は、水温上昇によって北東方向へ魚群分布が変化することが予想される。

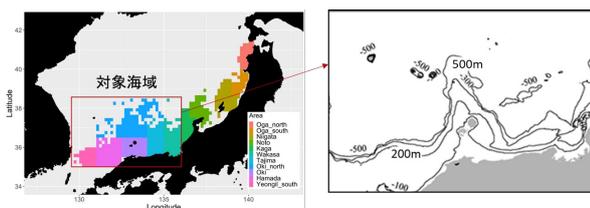


図1 本研究（日本海中西部）で解析の対象とした海域

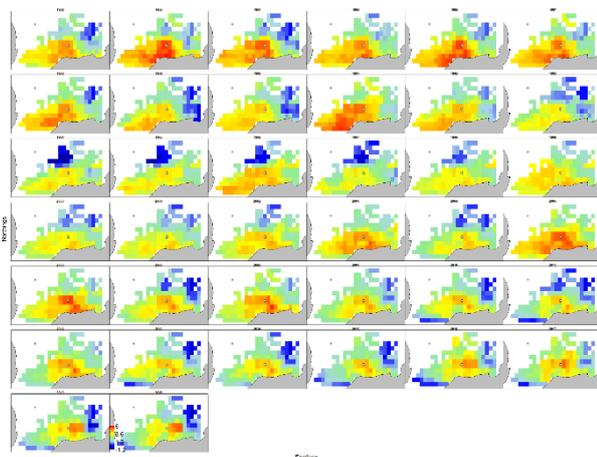


図2 VASTモデルを用いて推定した魚群の分布密度（ハタハタの例）
暖色系の色ほど分布密度が高い海域を示している。

(2) 結果の概要

分布重心や分布面積指標値の変化に関し、気候変動による水温上昇への一般的な応答の通り、北に移動した魚種（ハタハタ）や、解析期間において明瞭な変化は見られず安定している魚種（その中でもソウハチは分布域がやや北上、分布面積もやや拡大するような傾向も見られた）、そして想定されている水温上昇への応答に反して南西方向に移動した魚種（アカムツ）があった。

ハタハタは、分布重心が北東方向へ移動する一方、対象海域南西部における分布割合が相対的に減少したことから分布面積指標は2000年以降減少した。このような変化の要因として、本資源の供給源の一つである対象海域南西部以西（朝鮮半島東岸沖等）での水温・餌料環境の悪化等が考えられる。また、ソウハチの分布回遊範囲はほぼ安定しているものの、やや北上、拡大する傾向もみられ、今後の変化が注目される。一方、本資源は地域群間で異なる動態を示すため、水温上昇に対する生物応答の違いにも着目する必要がある。一方、アカムツは分布の重心が南西方向へ移動すると共に分布面積も拡大した。この要因として、日本海産アカムツの主分布域は今回の検討範囲よりも西側にあり、資源量の増加によって対象海域の西側で分布密度が上昇し、高密度域が拡大したことが要因であると推察された。

以上のように、日本海西部における魚群分布の変化は気候変動による水温上昇が要因と考えられるものの、資源量の増加による影響、さらには本研究では解析できていないが、漁業の変化による影響も想定される。今後、本課題において水温等の環境要因を変数として分布の変化を予測するモデルを作成、過去の魚群分布の変化の再現状況を確認しながら将来予測を行うことを計画しているものの、このような気候変動による分布水温の直接的な影響以外の要因については対応が困難な部分もあると考えられる。

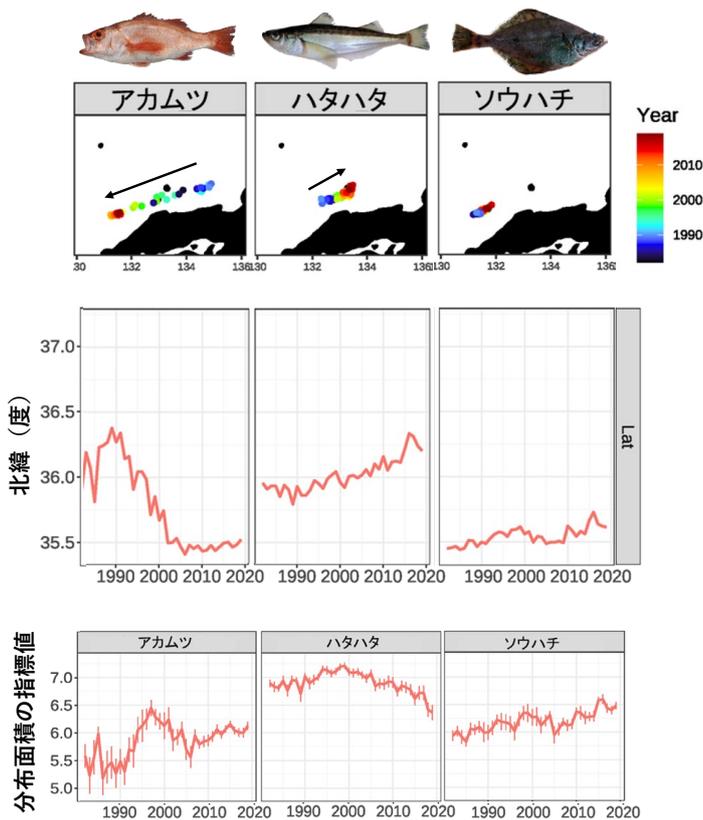


図3 アカムツ、ハタハタ、ソウハチの分布重心と分布面積指標の変化
 上図：重心位置、中図：重心の緯度、
 下図：分布面積の指標値
 代表的な変化パターンの3魚種を示した。

本成果にデータを追加し、さらなる解析を行った上で、詳細を Y. Kawauchi Y. Yagi, Toshikazu Yano, Kunihiro Fujiwara (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. として公表済みである。

担当者：川内陽平、八木佑太、矢野寿和

2) 水温データセットの整備と魚群の生息水温解析

(1) 研究方法

水産資源の漁場・分布回遊範囲は水温と深く関係しており、気候変動によって水温が上昇すると、魚群の分布位置は水温が低い北方の海域または深い水深に移動することになる。そのため、各魚種の水温と分布密度の関係を明らかにすることが、気候変動による水産資源への影響を把握する上で重要となる。そこで、本研究課題では、底びき網漁業の漁獲情報と水温データセットを統合すると共に各水温帯（1℃間隔）の平均分布密度を計算した。ここで、分布密度は1網あたりの漁獲量（CPUE）を指標値として用いた。なお、底びき網漁業の資料には東北地方太平洋側の漁獲資料（太平洋北区 沖合底引き愛漁業漁場別漁獲統計資料、水産研究・教育機構）を用いた。水温には1982年以降の気象庁のデータセットMOVE (Usui et al., 2006)を用い、漁獲情報の漁区区分（緯度経度10分）に集計すると共に、海底直上の水温を抽出した。

(2) 結果の概要

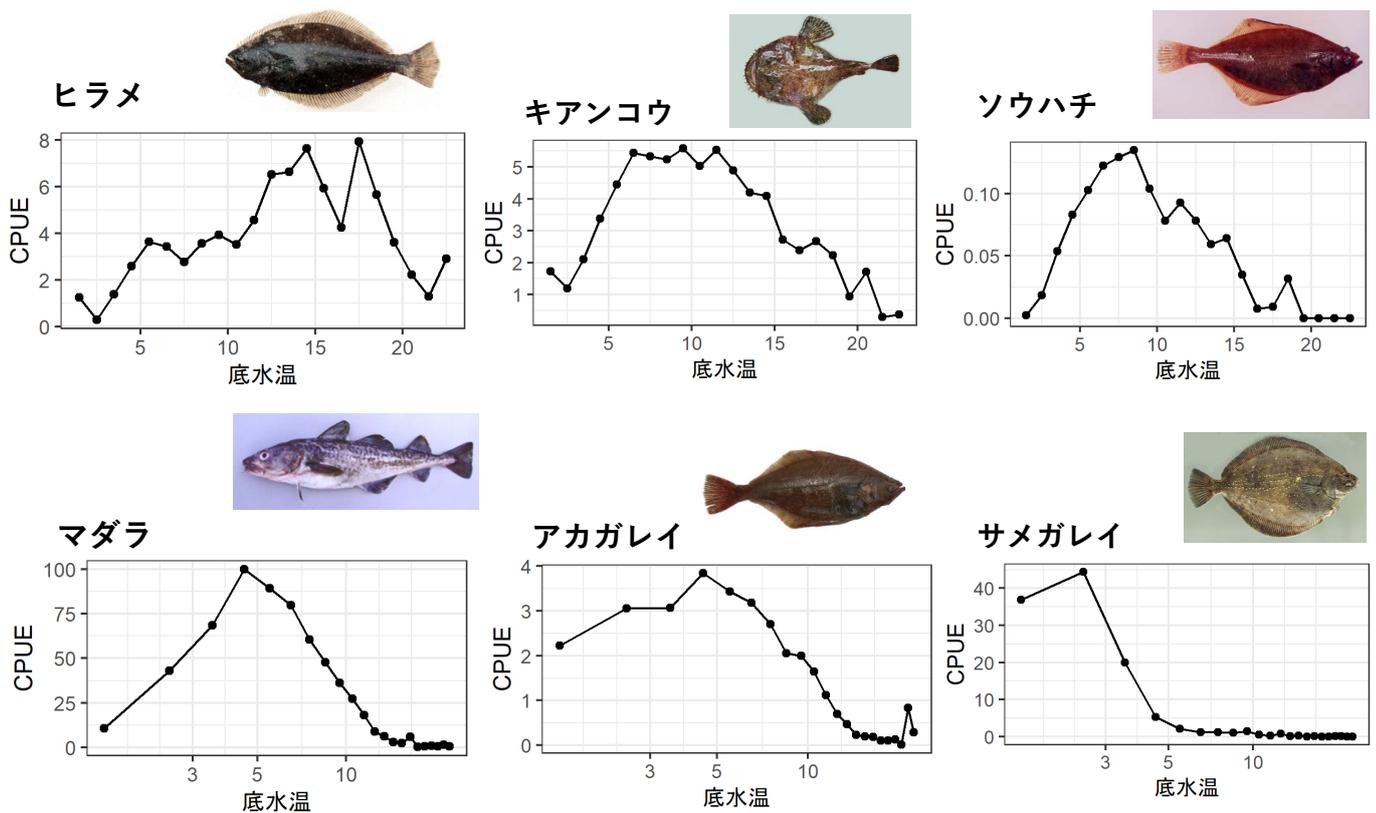


図4 東北地方太平洋側の底びき網漁業の主対象種における分布水温（底層水温）と分布密度（CPUE：1網あたりの漁獲量）の関係

上段の3種は比較的浅海性、下段の3種は比較的深海性種である。下段の水温は対数目盛で表示。

比較的浅海に分布するヒラメ、キアンコウ、ソウハチにおいては、それぞれ底層水温15℃、10℃、8℃付近で分布密度が高く、それよりも高い水温、およびそれよりも低い水温では分布密度が低下する傾向が見られた（図4）。一方、より深海域に分布するマダラでは底層水温4~5℃付近で分布密度が高い傾向が見られたものの、アカガレイ、さらに深海性のサメガレイにおいては、底層水温4~5℃付近で分布密度が高く、それ以上の水温では分布密度が低くなるものの、それよりも低い水温においても大きな分布密度の低下は認められなかった（図4）。

今後、分布密度に影響する水温以外の要因を取り除く解析を進めると共に、共通の気候シナリオに基づく底層水温予測を基に、分布域の変化予測を進める予定である。

担当者：矢野寿和、鈴木勇人、八木佑太、川内陽平、木所英昭、瀬藤聡、井桁庸介、奥西武

3) ワカメ養殖における影響評価と適応策

(1) 研究方法

本研究では、三陸沿岸海域と瀬戸内海を対象として、気候変動による海洋環境変化がワカメ生産量に及ぼす影響を明らかにすることを目的としている。本年は三陸沿岸海域でワカメ生長モデル構築のため現場調査を継続するとともに、瀬戸内海ではワカメ生長モデルの構築・試行計算を行った。ここでは瀬戸内海のワカメ生長モデルについて報告する。

モデルは水温と栄養塩（溶存態窒素）濃度の変化に応じて、ワカメの全長が変化するプロセスモデルを採用した。瀬戸内海におけるワカメの主要産地である徳島県産ワカメの生長と水温および栄養塩濃度の関係についての培養試験や現場調査、既往知見をもとに定式化し、瀬戸内海西部の2地点（山口県周防大島町、愛媛県明浜町）での現場養殖実験結果を再現するようパラメーターを設定した（図5）。続いて、気候変動適応情報プラットフォーム（A-PLAT）で「瀬戸内海の水環境に関する気候変動影響予測情報」として公表されている瀬戸内海における現在気候と気候シナリオごと（RCP2.6、RCP6.0、RCP8.5）の水質計算結果（水平解像度 1km、現在気候と RCP8.5 の結果は東ら（2020）で公表済み）より、1990年代と2090年代の秋季から春季にかけての水温と栄養塩濃度を用いてワカメ生長への影響を試算した。

(2) 結果の概要

瀬戸内海西部2地点の養殖実験によるワカメ全長の時間変化を比較すると、相対的に水温と栄養塩濃度が高い愛媛県明浜町で山口県周防大島町よりも生長が速く、収穫時の全長も大きかったが、2地点間の生長の違いはモデルで概ね再現された。

続いて行った現在気候と気候シナリオごとのワカメ生長の試行計算では、現在気候（1990年代）に比べて2090年代はいずれの気候シナリオでも養殖開始日は遅くなり、最も水温上昇が大きいRCP8.5シナリオでは約1ヶ月遅れる結果となった。ワカメの生長はRCP2.6シナリオでは現在気候とほぼ変わらなかったのに対して、RCP6.0およびRCP8.5シナリオでは減少した。RCP6.0およびRCP8.5シナリオでは水温上昇による本養殖開始の遅れと栄養塩濃度の低下がワカメの生産量を低下させる可能性が示された。

今後、モデル改良を行うとともに、高温耐性株の養殖を想定した適応策の効果についても検討を行う予定である。

$$\frac{dL^2}{dt} = (\mu - \gamma)L^2 \quad \begin{matrix} \text{全長の2乗} & \text{生長} & \text{減耗} \\ \mu = f(T) f(N) \\ \gamma = f(L^2) f(D) \end{matrix}$$

水温 栄養塩
全長の2乗 挟み込み間隔

$$f(T) = \left(\frac{T}{T_{opt}}\right)^{\alpha T + \beta} \exp\left\{1 - \left(\frac{T}{T_{opt}}\right)^{\alpha T + \beta}\right\}$$

※生長式は生長段階で変化しないと仮定



図5 瀬戸内海におけるワカメ生長モデルの概要。生長は水温と栄養塩濃度の関数とし、減耗は全長と養殖ロープへの挟み込み間隔の関数としている。生長式は生長段階で変化しないと仮定し、水温に関しては適水温で生長が最大となり、栄養塩濃度は高いほど生長率が高くなる設定となっている。

担当者：鬼塚 剛、笥 茂穂、吉田吾郎

4) 藻場漁場とアワビ類への影響評価と適応策（試行結果）

(1) 研究方法

本研究では、三陸沿岸及び瀬戸内海を対象として、気候変動による海洋環境の変化が藻場とアワビ類への影響の評価と適応策を検討することを目的としている（図6）。本年度は、三陸沿岸と瀬戸内における海藻の機能群別の分布及び水温との関係性の調査し、シナリオごとの将来予測を行った。また、餌料環境の変化によるアワビへの生理・生態の関係性の評価や簡易な齢査定手法の開発などを行い、個体群モデルのパラメーターの基礎となる知見の蓄積を継続した。ここでは海表面水温の将来予測モデルによるアワビの生息環境の質の変化を予測し、個体群動態モデルからアワビの環境収容力への影響予測を試行した。

藻場機能群の将来予測モデルについては、主として SI-CAT の日本近海域 2km 将来予測(FORP-JPN02 Version4)を用い、公開されていない一部の年代については、北太平洋海域 10km 将来予測データ (FORP-JP10) を逆距離加重法により内挿し併用した (Nishikawa et al. 2021)。将来予測モデルの不確実性を考慮するため、MRI-CGCM3 と MIROC5 の2つのアンサンブルモデルを適用した。また、モデルのバイアスは、衛星による現在気候の観測値に対し、モデルの Historical data と将来の温度上昇値の差分を用いることで補正を行った (Yara et al. 2011)。気候シナリオについては日本近海域 2km 将来予測で公開されている RCP2.6、RCP8.5 の2つシナリオを用いた。アワビの個体群動態モデルについては、藻場機能群の変化からアワビの生理・生態パラメーターを用いて生息環境の質を評価し、環境収容量を推定した。

(2) 結果の概要

現在気候に対して今世紀末（2090年代）には、RCP2.6では三陸沿岸のコンブ適域がやや減少し、RCP8.5の場合、コンブの適域が減少した。しかし、南方のアラメの適域の北上することが予測され、機能群の置換によるアワビの餌料環境の変化が予測された。このためエゾアワビの環境収容量は、アラメ場に置換した場合はやや低下する程度であった。一方、対策をせず磯焼けが拡大した場合は、収容量が大きく低下する予測となった。また、南方性のアワビの分布的適域も三陸まで北上するが、福島県から宮城県にかけては砂浜海岸が発達するため、岩礁性藻場の連続性が乏しく、北上が困難な可能性がある。これらのことから、適応策として、磯焼けとにならないように植食性動物への対策や藻場の保全と造成が重要と考えられた。さらに RCP8.5 の場合、代替種の検討も考えられる。

瀬戸内海においては、RCP2.6の場合、クロメ場の適域が減少し、温帯性ホンダワラ藻場（四季藻場）への置換が多く海域で予測された。RCP8.5の場合、クロメ場及び温帯性ホンダワラ藻場が大きく減少し、亜熱帯性ホンダワラ（春藻場）の適域が拡大することで、クロアワビの主要な餌資源が通年で確保できず、その環境収容量が低下することが予測された。このため適応策として、亜熱帯性ホンダワラとワカメの保全と造成により、アワビの餌料環境を維持することが必要と考えられた。

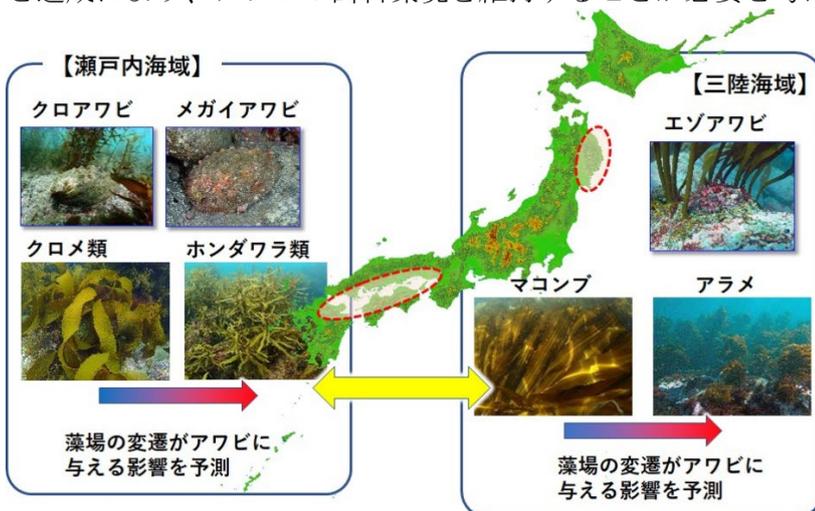


図6 評価の対象としたアワビと各海域における海水温上昇による藻場の変遷

担当者：島袋寛盛、須藤健二、高見秀輝、堀正和

2. 成果一覧（予定を含む）

○学術論文（国内誌 2 件、国際誌 1 件）

<査読あり>

1) Y. Kawauchi, Y. Yagi, Toshikazu Yano, Kunihiro Fujiwara (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.

<査読なし>

1) 八木 佑太、川内 陽平、矢野寿和、吉川 茜、佐久間 啓、藤原 邦浩（2022）日本海中西部海域における主要底魚類の分布変化. 東北底魚、131-133.

2) 高見 秀輝（2022）第4章 岩礁藻場生態系の変化とエゾアワビ資源への影響. e-水産学シリーズ 東日本大震災から10年 海洋生態系・漁業・漁村、89-110.

○学会・シンポジウム等における発表（国内 件、国外 件）

<口頭発表>

1) 鬼塚 剛、吉田吾郎、島袋寛盛、竹中彰一、田村稔治、瀬戸内海水産環境研究集会（2022）瀬戸内海における養殖ワカメ生長モデリング

2) 瀬藤 聡、木所英昭、気候変動適応に関する研究機関連絡会議（2023）水産業を対象とした気候変動影響予測と適応策の評価

3) 瀬藤 聡、木所英昭、水産海洋学会駿河湾・伊豆海嶺地域研究集会（2023）駿河湾の過去40年の水温変化と2100年までの水温上昇

○「国民との科学・技術対話」の実施

※発表者氏名、発表した場所、発表した年、発表題目を記載してください。

1) 木所英昭、仙台市、2022年、「東北適応・第8回気候変動適応東北広域協議会」 気候変動が水産業に及ぼす影響と適応策

2) 高見秀輝、仙台市、2022年、「東北適応・第8回気候変動適応東北広域協議会」 気候変動によるエゾアワビ資源の動態

3) 木所英昭、八戸市、2022年、「種差海岸の景観保護・保全ボランティア活動」 気候変動と水産資源 — 持続的利用と食品ロス防止を目指して — 旬のさかなの変化と適応

4) 木所英昭、盛岡市、2023年、「令和4年度東北・北海道ブロック漁業士研修会」 気候変動による漁業資源への影響と水産業の適応について

○新聞・雑誌記事等

特に記載すべき事項はない。

○知的財産権

特に記載すべき事項はない。

○受賞等

特に記載すべき事項はない。