

2.7.2 農林水産業における気候変動影響評価・適応

（1）研究開発領域の定義

農林水産業に対する気候変動の影響評価および適応のための研究開発や技術開発を扱う領域である。農林業分野における対応は、圃場・林地スケールの生産関連技術から流域スケールの水資源確保や豪雨・斜面災害対策まで幅広い。具体的には気象に基づく生育予測・栽培管理や病虫害対応、乾燥・土壌浸食など農業生産基盤の利用・整備に関する研究・技術開発が含まれる。水産業分野における対応は、海水温上昇の海洋生態系への影響、漁船の電力化、品種改良、養殖技術、漁場整備、資源管理、ブルーカーボン生態系の利活用を通じた適応策などが含まれる。なお炭素吸収・固定に関する研究開発動向は「2.4.1 ネガティブエミッション技術」で扱う。

（2）キーワード

水稻生産、高温障害、資源管理、水資源管理、圃場、流域、適応技術、気象予測、豪雨、斜面災害、広域複合災害、経済被害、発生予測、避難警戒、レーザープロファイリング、自然を活用した解決策（Nature-based Solutions：NbS）、養殖産業成長化、複合漁業、スマート水産業、バイオマス産業化、魚種交代

（3）研究開発領域の概要

〔本領域の意義〕

農林水産業は、地盤（または海洋）の物理的条件に大きく制約されると同時に、生物資源を扱うことから、日々の気象現象や地域の気候環境にも強く影響される。近年の気候変動は、生物資源量の変動だけでなく、自然災害の増加も引き起こしている。これにより、第一次産業に携わる住民の生活を脅かし、資源輸送や市場経済にも多大の損失を与えて、広く市民社会に深刻な影響を及ぼしている。直近では大規模自然災害による農林水産関係の被害額は過去10年（2013年～2022年）のうち大半が年間2,000億円超だった¹⁾。また世界全体では自然災害による経済被害は2021年には28兆5千億円と推算されている²⁾。

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第6次評価報告書では、確信度の高いリスクとして食料及び水の安全保障の低下が挙げられた。また、干ばつ、洪水および熱波の強度と頻度の増大、海面水位上昇の継続によって食料安全保障に対するリスクが高まることも確信度が高いとされた。これらは気候変動に対する農林水産業の脆弱性の高さを表している。その一方、世界の人口は、今世紀中頃にはおよそ98億人、今世紀末には112億人に達すると予測されている。加えて新興国の経済発展もあり、世界の食料需要は今世紀半ばには現在の約2倍に達すると見込まれている。増大する世界的な食料需要に対応するためには、農林水産業に関わる気候変動リスクに適応し、持続的に食料生産を確保することが必要となる。農業生産に必要な水資源も気候変動により変化することが予測されており、流域一貫での水資源管理や防災システムの構築により、食料およびエネルギーの安定供給を確保することが大きな課題となっている。また、温暖化による気温の上昇は、変温動物である昆虫などの発育や発生に大きな影響を及ぼすため、温暖化に伴って病虫害の発生やそれに伴う被害が大きく変化すると考えられている。

日本においても気候変動による農業や水産業への実際の影響あるいは将来的な影響予測が多数報告されており、政府は2021年10月に「農林水産省気候変動適応計画」の改定を行っている。同改訂では、気候変動に適応する生産安定技術・品種の開発・普及等の推進、農村地域の防災・減災機能の維持・向上、山地災害の防止、資源評価の高精度化と高水温耐性の藻類開発、総合的な食料安全保障の確立を主なポイントとして掲げている。

〔研究開発の動向〕

（農林業）

農業は気候変動に対して最も脆弱な産業の一つであり、気候変動は世界の穀物生産に直接的な影響を及ぼす。近年の世界的な主要穀物の収量の伸びの鈍化は、既に収量が高い先進国の収量を引き続き引き上げていくことが技術的に困難になっていることによる³⁾。これに加え、気候変動も要因の一つに考えられている。全球規模の解析によると、気候変動（特に気温の上昇）が生産量を約2～6%低下させたと推計されている⁴⁾。今後、産業革命前と比べた今世紀末の世界平均気温の上昇が約3度を超えた場合、コメやコムギの世界平均収量の伸びが鈍化すると予測されている。また、気温上昇が1.8度未満でも、トウモロコシや大豆は収量の伸びが減少すると見込まれている⁵⁾。二酸化炭素濃度の上昇による施肥効果がなかった場合は28-43%の食料生産が失われるであろうとの推計もある⁶⁾。加えて人口増加に伴う食料生産への要望に応えるためには世界の水利用の約7割を占める灌漑用水も重要な位置づけにある⁷⁾。

日本においては、農林水産省が毎年公表している「地球温暖化影響調査レポート」では、日本全国での水稻、果樹、野菜、畜産などにおける温暖化による品質・収量低下の現状とともに、各地での適応策の取組状況が報告されている。また世論調査では気候変動に関する問題意識として「農作物の品質や収量の低下、漁獲量の減少」（令和2年：83.8%、令和5年：85.7%）が挙げられており、農業への影響に社会の高い関心が寄せられている⁸⁾。

農業での気候変動適応研究は、高温や水不足が作物の生育や収量に及ぼす直接的な影響、もしくは作物生産に必要な水資源の減少や洪水・高潮などによる農地の浸水による減収などの間接的な影響に関する研究に大別される。前者に関する研究は、観測などにより作物栽培に対する気象要素の長期的変化の影響を素過程の解明を通して明らかにする基礎的な研究と、作物生育モデルの開発を通して気候変動の影響評価や減収・品質低下に対する警報を発するなどの応用的研究からなる。

農作物への影響に対する適応策としては、播種日（コメの場合は移植日）の変更や気温が高い地域の品種への切り替えが検討されている。またこうした比較的簡単に導入できる適応策に加え、高温や乾燥に強い品種の開発、灌漑・排水設備の導入、高温や干ばつなどの極端気象の早期警戒システムの開発なども同時に検討されている。

一方、果樹は、気候に対する適応性の幅が狭く、果樹生産は地域によって栽培樹種が分かれている。水稻や野菜のような一年生の作物は、播種時期を調整することで気候への適応性の幅を広げることができるが、樹木である果樹は、人為的に作期を調整することは難しく、気候変動への適応性が低い。気温上昇が果樹や茶に影響を及ぼすメカニズムは、（1）極端な高温に短期間さらされることによる高温障害、（2）長期間の気温上昇による果樹の発育速度への影響、（3）気温上昇により生産環境が変化することによる病虫害の変化などの間接的な影響の大きく3つに分けられる。これらの影響に対する適応技術として、被害を防ぐ対策だけでなく、温暖化の利点を活用する方策も進められている。現在は、栽培する樹種を生かしたまま栽培方法の改善をする適応技術が最も広く適用されているが、今後は、同じ樹種の高温耐性品種への更新、他の樹種への更新により、これまでその土地で栽培されてこなかった樹種への変更が進むことが見通されている。

林業に関連した研究では、2000年代以降は森林分布予測モデルの開発が活発に行われ、続いて病虫害に関する影響予測研究が盛んになった。元々、森林の広域分布と環境条件との対応関係を統計モデルによって説明する手法が1990年代から欧米を中心に発展した。この頃、日本ではバイオーム（生物群系）の全国的な分布を気温と降水量で説明するロジットモデルを構築し、平均気温が1～3℃上昇した場合の潜在生育域を予測した研究が行われていた。森林生態系に関する既存の情報を集約したデータベースの構築が開始したのもこの時期である。

2000年代に入ると気候変動問題が社会的に注目され、それ以降、温暖化影響研究は進展し、現在は機械学習を使った高精度の森林分布予測モデルが次々と開発されている。例えば日本では白神山地の世界遺産で有名なブナ林を対象とした分布予測モデルが構築された。現在と温暖化後の将来の潜在生育域を比較するこ

とを通じ、西日本のブナ林が脆弱であることなどが判明した。同様に、天然林の主要な構成種に関する分布予測モデルの構築が進み、各森林帯を代表する樹種（例：ハイマツ、シラビソ、アカガシ）や林床に広がるササ類などについての研究結果が公表された。欧米諸国は伝統的に植物や植生の分布データベースが充実しており、研究者人口も多いため、2000年代以降に温暖化影響研究が一気に進み、数千種類もの植物種の温暖化影響を予測できる段階に達していた。これと比べると日本を含む東アジア地域は研究者数で欧米との差は歴然としていた。

2010年代になると、森林の樹木だけではなく、ニホンジカ（シカ）やマツ材線虫病（マツ枯れ）といった森林生態系に被害をもたらす病虫獣害に関する影響予測研究も始まった。統計モデルに拠らないプロセスモデルによる林業への影響評価に関する研究も開始された。

農林業における病虫害に関しては、温暖化による気温の上昇が変温動物である昆虫などの発育や発生に大きな影響を及ぼすため、温暖化に伴って病害虫の発生やそれに伴う被害が大きく変化すると考えられている。具体的な対応策としては病害虫の発生を考慮して作物の栽培時期を変えるなどの手段はあるものの、基本的には、発生時期や発生量、経済的な被害の発生を的確に予測して、予測された時期に農薬あるいは環境への影響の少ない防除手段を使って適切に防除するという対策が主流である。

気温の上昇や気候変動は、病害虫の地理的分布の拡大や越冬限界地の北進、発生量の増加や発生の早期化、発生世代数の増加などに影響すると考えられている。このため、これまでの研究の多くは、主要な病害虫で温暖化によるこれらの変化の実態解明や、その将来予測を行うものである。最近では、これらの温暖化による病害虫の直接の影響のみならず、病害虫と寄主植物とのフェノロジー（季節性）の同調性、寄主植物の抵抗性、植物-害虫-天敵3者系の関係、病害虫の薬剤抵抗性などに温暖化が間接的に影響すること、比較的軽微な温度上昇が害虫の生存や繁殖に影響すること、作物の病害虫抵抗性を変化させることなどが明らかにされつつあり、これらを含めた影響評価と対応が求められている。

（水稻生産やその生産基盤における適応策）

水稻生産に対する気候変動の影響として、大気中CO₂濃度の増加に対する増収および出穂・登熟期の高温による品質低下に関する研究が進められている。将来のCO₂の上昇が水稻生産に及ぼす影響を明らかにするため、開放系大気CO₂増加実験（Free-Air CO₂ Enrichment：FACE）と呼ばれる環境操作実験が続けられ、気温とCO₂濃度の複合的な影響が明らかにされてきた。

CO₂濃度と同様に明確な上昇トレンドが観測されている気温については、収量への影響に加え、コメの品質への影響も重要な研究分野となっている。気温の上昇によって作物の発育が高まることで発育期間が短縮し、積算日射量が減少し、結果的に収量減少や品質低下をもたらす可能性がある。

以上のような顕在化している日本の水稻生産への気候変動影響に対し、様々な適応技術の開発が進められている。農業への影響に対する適応策は、段階的、革新的および両者の中間に位置する適応策に分類できる⁹⁾。段階的な適応策は既存システムや技術の運用を前提とするもので、移植日の適切な設定、直播、深耕等の新技術の導入が挙げられる。作付け後には、施肥管理、登熟期の掛け流し灌漑、収穫期の適切な設定などがある。革新的な適応策には既存のシステムを完全に更新する作付け作物の更新などが挙げられる。中間的な適応策には高温や乾燥に強い品種の開発、灌漑・排水設備の導入、高温や干ばつなどの極端気象の早期警戒システムの開発などがある。

作期の時期の分散や変更、用水の掛け流し灌漑を行うには、その時期に必要な農業用水を河川などから取水する必要がある。農業水利用の水循環と河川の流出過程（降雨、流出、蒸発や積雪・融雪）を一体的に解析する水文モデルが開発され、流域での渇水規模の評価や用水計画の策定に用いられている¹⁰⁾。日本全域の河川流域での将来の水資源予測¹¹⁾等も行われており、今後は気候変動と営農上の適応策の組み合わせが水資源リスクに及ぼす影響を考慮した適応策評価手法が求められる。

農林水産分野のGHGs排出量としてはメタンが最も多く、最大の排出源は水田である。水田土壌由来のメ

タンは日本の人為起源メタン発生量の約30%を占めており、発生量削減の技術開発が求められている。例えば稲わらなどの新鮮有機物を水田に施用することはメタン発生量を増加させることが知られている。全国の水田において、3～14日間の中干し延長を行った処理区では、慣行中干し区に比べて一作あたりのメタン発生が12～55%削減された。今後、水田が広く分布するアジア域への普及が課題となる。

（農林業におけるEbA）

生物多様性および生態系サービスを強化することで気候変動への適応力を強化する農林業技術の開発への期待が世界的に高まっている¹²⁾。こうした農林業における生態系を活かした気候変動適応（Ecosystem-based Adaptation：EbA）は、「気候スマート農業（climate-smart agriculture）」、「グリーンインフラ」、「生態系を活用した防災・減災（Ecosystem based Disaster Risk Reduction：Eco-DRR）」などとともにより広い概念である「自然を活用した解決策（NbS）」の一部として位置づけられている¹³⁾。研究開発は発展途上だが、国際連合食糧農業機関（FAO）においても気候変動の適応計画の一つとして重要視されている¹⁴⁾。具体策としてこれまで注目を集めてきたのはアグロフォレストリー、保全農業、非作付け地の確保、遺伝的多様性の保全や有機農業などであり、これらは「持続可能な集約化（sustainable intensification）」などとも呼ばれる。また農林業は気候変動への緩和・適応に加えて、生物多様性保全、生態系サービスの強化、生計や健康の改善、コミュニティの強化や食料安全保障など、様々なコベネフィットをもたらすと考えられており研究事例の蓄積が進んでいる¹⁵⁾。

樹木を植栽し、その樹間で家畜・農作物を飼育・栽培するアグロフォレストリーは、EbAの具体策の一つとして注目され、その意義や効果を報告する事例が増えている。例えば、樹木があることで、乾季には強い日差しや土壌の乾燥、強風から農地を守り、雨季には強い雨から農地を守る。土壌浸食や害虫の抑制、土壌水分や肥沃さの保持といった生態系サービスが向上することにより、通常の農林業と比較して生物多様性が高まる。収量はしばしば低下するが、低コスト・高販売単価を進めながら、作物の多様化や樹木の木材利用などからの収入を得ることで収益の維持・安定化を図ることができるとの報告もある。その他にも土壌炭素貯留量が多いことからCO₂吸収源として気候変動の緩和に貢献する可能性もあるなど、多面的な意義が見出されている。

保全農業は、原則として①不耕起など土壌のかく乱の最小化、②植物残渣など土壌被覆の維持、③輪作、の三つの要件を満たす農業のこととされている。保全農業は土壌の生物多様性を増加させ、土壌有機物を増やし、保水能力の向上などを介して水の流出や少雨の影響を低減するため、EbAの一方策になり得ると考えられている。収量は不耕起単体では減少傾向にあるが、残渣保持と輪作を組みあわせることで減少をある程度抑えることができるとの報告もある。ただ、収益増は主にコスト削減（大規模機械化の設備投資など）によってもたらされることから小規模農家では実現が難しく、南アジアの稲作・麦作地帯など高投入・高収量条件では比較的成功しやすいが、サブ・サハラ地域など低投入・低収量条件では残渣の確保の難しさなどの課題があるとされる。

農地や河川の周辺における森林、草地、生垣、湿地などの非作付け地の確保は、浸透能の増加、水質浄化、流出量や最大流量の緩和などの効果があると期待されている。また遺伝的多様性を保全することで、多様な品種を作り出し、霜、干ばつや病気などのストレスの影響を軽減することもEbAの一つと認識されている¹⁶⁾。

国内では気候変動が与える影響の将来予測や、緩和策・適応策の開発、農地における生物多様性保全や生態系サービスの活用のための研究が進められている。特に里山の耕作放棄水田などを活用したグリーン・インフラは注目を集めており、気候変動への適応を含む様々なベネフィットが期待できると考えられている。しかしながら、EbAの視点を取り入れた農林業技術研究は少なく、発展途上段階にある。今後に向けては、例えば水田の中干し延長はメタンなどのGHGsの発生量を削減できるものの、水田を利用する生物の生息地が失われるという課題があるように、EbAや気候変動対策と生物多様性保全の間のトレードオフの解消など、より統合的な視点の研究開発が必要と考えられている。

(斜面災害への対応)

日本は山地・丘陵地が国土の約7割を占め、土石流の発生限界勾配15度以上の溪流・斜面は国土の約4割に上る。そうした中で農地や農村は豊かな水や土壌を求めて山麓の沖積錘や扇状地に立地し、森林の大部分は山地斜面に分布している。漁村や漁港は深い港を求めて海岸の崖直下に点在することが多い。これらをつなぐ道路・鉄道などのインフラや加工工場も多くは急傾斜地に接近して建設されている。このように日本の農林水産業は斜面災害に対して極めて脆弱な立地条件のもとで営まれており、斜面災害（斜面崩壊、地すべり、土石流）は我が国の農林水産業に大きな損害を与え得る災害の一つである。それゆえ日本では斜面災害の予測と軽減、国土利用を含めたインフラの整備、避難警戒体制の確立等の研究が以前から行われており現在は米国と並び世界最先端レベルにある。

斜面災害の研究は、(1) 災害発生の場所とタイミング（時間）の正確な予測方法、(2) 土砂や水のエネルギー軽減と一時的貯留のための工学的な方法、(3) 災害からの最適な避難方法やより安全な生活圏の設計方法などの解明を目的としている。

土石流や斜面崩壊の発生雨量、発生場所についてこれまで理論的に詳細な検討がなされている。近年は、現在の地形・地盤情報と過去の災害履歴から将来の発生場所や規模を予測する研究や、降雨量及び降雨パターンから斜面災害発生タイミングを予測する研究が多い。手法としては、現地での調査観測、衛星画像やレーザープロファイラを用いた地形・地盤解析、およびこれらに基づく数値シミュレーションが用いられる。例えば発生場所についてはレーザープロファイリングによる高精度の予測（効率50%、解像度数cm）が技術的に可能となっている¹⁷⁾。

また、森林地域が国土の70%を占めるわが国に特有の現象として、樹木を巻き込んだ斜面災害があげられる。特に近年は森林斜面が樹木とともに崩壊した際の流木の災害が注目されている（例えば日田・朝倉地方で発生した災害）。単なる浮遊流木ではなく、崩壊した土砂が流木を巻き込んで連鎖的に発達する災害で、北海道から九州まで広い範囲で発生し、気候変動下での我が国の特徴的な災害として今後の研究展開が期待されている。

治山・砂防構造物の配置・設計の研究においては、現場での土砂や水の移動計測とこれまで開発された工種・工法の現地適用試験が課題である。避難や生活圏の設計には、社会科学的知見や建築・土木技術も必要となり、降雨量対応型の避難経路探索、避難場所の安全性、建物の強度解析、ハザードマップの開発、避難警報の発令タイミング、災害危険地帯の指定方法などが研究対象となる。住民の避難警戒や産業・生活圏のレジリエンスは急務であり、広域におよぶ複合災害として分野横断的な研究が待望されている。

海外では、より広域かつ長期間での斜面災害が注目されている¹⁸⁾。米国では、気候変動によって山火事や大規模なサイクロンが頻発することから、これらによる斜面からの流出土砂量や洪水発生に焦点が当てられている。米航空宇宙局（NASA）ではアジアの広域斜面災害予測を行っている。また、特にカリフォルニア地域やオーストラリア東海岸地域では山火事後の斜面崩壊など、乾燥化による斜面災害が多発しており、長期間の斜面からの土砂流出や海洋まで流出する細粒土砂による海洋資源への影響なども研究課題となっている。欧州は比較的わが国の土地条件に近いが、自然現象の研究よりも対策技術の研究に軸足が置かれている。一方、中国は様々な環境条件を有し、内陸部（四川省、甘粛省など）で近年豪雨災害が頻発している。しかしながら現在はまだ災害復旧に追われており、まとまった研究が見られない。また最近では長期化する豪雨による洪水災害（三峡ダム決壊など）と乾燥による農業用水の不足も懸念されている。

(水産業)

深刻化する水産業への気候変動の影響に鑑み、新しい水産基本計画ではすべての要素に気候変動適応・緩和策の推進が関連することとなった。2022年度から開始された計画であることから、関連する技術開発はこれから進められて行くこととなる。以下では気候変動適応・緩和に関わる部分の先行事例を列記する。

「水産資源管理の着実な実施」では、海洋環境変化への適応を加味することが明記されている。そのアブ

ローチとして、環境変動リスクの把握、資源変動に適応できる漁業経営体の育成、複合的な漁業など新たな操業形態への転換推進、我が国の海域・資源・漁業を守るための国際交渉の展開などがあげられている。資源評価に関わるデータ収集では、漁船・漁具に搭載する環境計測機器を開発し、操業場所の環境要因を直接的に自動計測して漁獲量と連動させる取り組みも試行されている¹⁹⁾。また、資源評価では資源量の変動要因に海水温の変化を組み込むだけでなく、魚種変化・分布変化を見込んだ漁獲努力量の変化（漁獲区域・漁獲漁具の変動）を想定した資源評価モデルの開発など、いくつか試行が始まっている。加えて、気候変動に対応した漁船・漁具および操業形態に関わる技術開発も進められている。気候変動による魚種変動、少量多種（1種当たりの漁獲量は少ない一方、漁獲される種は多様化）により、従来の特定種漁獲を主軸とした漁船漁業が困難になりつつあるため、日々変動する漁場を的確に把握し、効率よく漁獲するための漁場予測技術の開発、多様な魚種を漁獲するための適切な漁具交換技術の開発、複数の漁業を組み合わせた複合漁業手法の開発等が必要となる。更にこれらの技術開発により、省エネルギー型の漁船開発と連動し、漁場探索の効率化、漁労の効率化によってGHGs排出削減にもつながることが期待される。

次に環境変動のリスク増大を踏まえた水産業の成長産業化においては、気候変動に適応した漁船漁業の構造改革、陸上養殖や大規模沖合養殖などの新たな養殖産業の構築、漁船漁業と養殖業を組み合わせた経営方策開発などが進められている。また、海藻養殖によるCO₂吸収源拡大や再生可能バイオマスとしての活用に向けた増産など、適応策と緩和策を融合させた取り組みも開始されている（後述）。特に、漁業以外の業種を取り込んだ海業化によって漁村を活性化させるとともに、沿岸漁業に対する経営安定対策によって持続的漁業を可能にし、沿岸環境管理の担い手となる漁業者数を維持・拡大することで、沿岸漁場管理と環境対策の持続性を確保する体制を構築することが望まれている。

2.7 (水産業におけるNbS：ブルーカーボンの活用)

海洋国家の首脳陣により2018年に立ち上げられた「持続可能な海洋経済の構築に向けたハイレベル・パネル（HLP）」が2019年に報告書「気候変動の解決策としての海洋」を公開している。同報告書が掲げたアクションの中には水産分野関連のものとしてブルーカーボン生態系の活用、水産業の振興と脱炭素化、海上輸送の脱炭素化の3つが含まれている。これらのうちブルーカーボンに関しては、直接的なブルーカーボン生態系による吸収源拡大だけでなく、他の2つのアクションと組み合わせた活用が進められている。例えば風力発電施設海域の海面養殖への活用については以前から議論されている²⁰⁾。日本に先んじて洋上風力を導入している欧州では、海藻養殖によるブルーカーボンの吸収源構築・再生可能バイオマス生産等を試みる事例が見られる²¹⁾。また、水産業の振興においても、陸上生産の食料よりもCO₂排出が少ない水産資源への関心の高まりから、海藻養殖が世界各国で急速に拡大している。水産資源の利用促進を緩和策と位置付けている点に加えて、CO₂吸収源としての可能性も含め、さまざまな生態系サービスを包括したブルーエコノミーとして海藻養殖のコベネフィットを総合的に活用する方向へ進みつつある。我が国では2020年に策定された革新的環境イノベーション戦略において、農林水産業・吸収源としてブルーカーボン（海洋生態系による炭素貯留）の追求が掲げられている。この中では取り組むべき技術開発に、（1）バイオ技術の活用等により、効率良くCO₂を吸収する海藻類等の探索と高度な増養殖技術の開発、（2）海藻類等を新素材・資材として活用するための技術開発、が掲げられており、2021年策定の農林水産省「みどりの食料システム戦略」でも2030年を目処に確立させる技術開発の項目に挙げられている。このような技術開発を通じて水産業ベースでの気候変動対策が海業化の一翼を担い、さらなる気候変動対策の推進と持続的な漁業に貢献することが期待されている。

(文献・特許動向)

「研究開発の俯瞰報告書 論文・特許データからみる研究開発動向（2024）」の「E7.2 農林水産業における気候変動影響評価・適応」によると本領域と関連する論文・特許動向概観は以下のとおり。

- ・論文数や高被引用論文数の推移では欧州、米国が首位を維持していたが中国が急速に数を伸ばしていた。
- ・主要国間の共著関係を見るとより多くの国と共著関係にあるのは米国と英国だった。中国、ドイツ、オーストラリアがそれに続いていた。日本の共著相手国として件数が多いのは米国 (21.7%)、中国 (14.8%)、英国 (13.4%) だった。
- ・論文数上位機関にはフランス国立科学研究センターやドイツ研究センターヘルムホルツ協会、オーストラリア連邦科学産業研究機構など公的研究機関が見られた他、国際農業研究協議グループ (CGIAR)、米国海洋大気庁 (NOAA)、米国農務省 (USDA) など農林水産関連の機関も見られた。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

・気候変動シナリオと穀物収量予測

気候変動は既に世界の穀物生産に悪影響を及ぼしており、将来の食料生産にさらなる悪影響が生じると懸念されている。国立環境研究所や農研機構が参加する国際研究チームによると、世界の穀物収量に対する気候変動の影響は、トウモロコシ、ダイズ、コメの収量の大幅な悪化をもたらす可能性がある²²⁾。気候変動が進行するシナリオ (SSP585) の場合、今世紀末 (2069-2099年) のトウモロコシの世界の平均収量は24%低下、ダイズについては2%低下、コメについては2%増加との結果になった。一方、将来のコムギ収量は大きな増加を示し、18%増加との予測結果となった。

・水稻に対する温暖化影響の予測

水稻の収量や白未熟粒など外観品質への影響予測は水稻生育収量予測モデルによって行われてきたが、CO₂濃度の上昇による増収効果が栽培地の気温が高いほど小さくなること、高CO₂では外観品質が低下することなどのFACE (Free-Air CO₂ Enrichment) 実験から得られた知見を踏まえ、これまで別々に考慮されていた高温と高CO₂の影響を複合的に扱う最新の予測モデルが構築され、これを使った影響予測が行われた²³⁾。これによると、従来モデルでは今世紀中ごろまでは増収傾向で、その後減収に転じ、今世紀末には20世紀末と同程度に戻ると予測されたのに対し、最新のモデルでは従来モデルほどの増収傾向は見られず、更に今世紀末には20世紀末の約80%まで減収するとの予測結果が示された。また外観品質低下の主要指標である「白未熟粒率」においても、気温のみを考慮した従来モデルでは今世紀半ばでは約15%、今世紀末では約30%と予測されたのに対し、気温とCO₂濃度を考慮した最新のモデルでは今世紀半ばでは約20%、今世紀末では約40%と予測された。

・農業気象データの蓄積とその活用

変動する気候下で農業生産の安定性を図るには、気象情報の活用が一つの鍵になる。気象庁のアメダスは約21km間隔で全国に配置されているが、土地起伏等を考慮するとそのデータをアメダスから離れた現場に適用するにはやや粗いとされ、約1km四方単位で日本全国に気象データを提供するメッシュ農業気象データとその配信システム「農研機構メッシュ農業気象データシステム」が開発された²⁴⁾。このシステムを拡張した栽培管理支援システムでは、気象情報に加え、栽培技術、作物生育モデルを統合し、冷害・高温障害などの気象災害の警戒情報、病害警戒情報および様々な栽培管理支援コンテンツも配信されている。

・季節予報の活用

気候変動の長期的トレンドの変化に比べて気象現象の年変動は大きい。効果的に季節予報を活用すれば気象災害の影響を軽減でき、気候変動への適応策となるため研究が進められている。短期間の洪水の予測は非常に広く行われており、近年では気象レーダーによる豪雨域の可視化や数値予測モデルの精度向上も目覚ましい。これらの予測と流出解析モデルを組み合わせることにより、数時間から数日先の洪水を予測し、警報

を発出するシステムなども広く整備されてきた。一方、季節予報に関しては気象庁で数値予報モデルによる力学的予測が採用され、現業運用も開始された。その開発における最も大きな技術的な進歩は、大気海洋結合モデルの導入であると言われており、これによって気象モデルの季節予測の精度が大きく向上した²⁵⁾。現在は季節予報を用いた高解像度の作物収量予報・早期警戒システムの構築も検討されている。

• 水資源の将来予測

農業用水の利用を考慮した分布型水循環モデル¹⁰⁾を日本全域の河川流域に適用し、11種類の気候シナリオを用いた将来の水資源予測が行われた。これによると水稻の生産に影響が大きい代かき期には東北、北陸地方で全ての気候シナリオにおいて水資源量が減少する傾向がみられた。気温上昇が積雪融雪に大きな影響を及ぼさない北海道では変化が小さかった。中四国、九州などの西日本では気候シナリオによって増加・減少が混在し、予測の不確実性が大きかった¹¹⁾。

• 水田域を対象とした汎用水文モデルの活用

流域スケールでの水文現象（水・溶質・濁質の動態）の解析においては、国際的に広く用いられている水文モデルが複数あり²⁶⁾、国内でもそれらをプラットフォームとした研究が多く行われている。水と水質成分の流域での挙動を表すモデルで国際的に広く用いられているものとして、SWAT（Soil and Water Assessment Tool）やHSPF（Hydrological Simulation Program-Fortran）が挙げられる。水資源開発、農業開発が主要な国でSWATの適用が急増しており、流域水文解析モデルのデファクトスタンダードになりつつある。現在は水田等のアジア特有の土地利用を考慮したサブモデルや、不確実性解析等のツール開発の必要性が指摘されている。また、豪雨等による深刻化が懸念される土壌侵食については、WEPP（Water Erosion Prediction Project）が広く用いられており、我が国でも適用例が多くみられる。気候変動による農地表土の流亡やその水域汚染は深刻な影響をもたらすため、科学的な予測に基づく対策立案の重要性が高まっている。

• 農業由来のGHGs（CO₂以外）排出削減

水田土壌由来のメタンは我が国の人為起源メタン発生量の約30%を占める。全国9地点の農業試験研究機関圃場において、中干し期間の延長による水田からのメタン発生量削減効果を評価した結果、稲わら等の新鮮有機物を施用した水田では、中干し期間を慣行からさらに一週間程度延長すれば、コメ収量への影響を抑えつつメタン発生量を約30%削減できることが示された。日本として、メタン削減型水管理技術の開発・普及を主導し、特にアジア圏でのメタン排出削減への貢献が期待できる。また、一酸化二窒素（N₂O）は主に窒素施肥由来であり、減肥や硝化抑制剤の利用に加え、N₂O排出を抑制する微生物の活用技術等の開発が進んでいる。

• 気候変動と人口減少を考慮した野生鳥獣類の分布予測モデル

ニホンジカ（シカ）やイノシシによる食害、剥皮被害、踏圧による被害は、農林地のみならず森林生態系や生物多様性に甚大な影響を及ぼしている。気候変動による気温の上昇や積雪量の減少と人口減少はこれら野生鳥獣類の生息適地を拡大させる可能性がある。これらを対象とした中長期的な分布予測モデルの構築や農林業被害予測の推定が行われている。

• 自然林と人工林における気候変動影響評価

人工林では、台風による風倒害リスクの増加、水ストレスによる生長阻害、一次生産量の増加、素材生産量への影響、病虫獣害など、多岐にわたる気候変動影響が想定されている。自然林では、天然更新を通じた構成種の優占度や組成の変化に現れると考えられている。

例えばスギ人工林について、将来、年降水量が少ない地域で脆弱性が増加する可能性が指摘されている。しかしスギの衰退と土壌の乾燥化との関連はいまだ明らかではないため、引き続き検討が必要とされている。シミュレーションモデル（陸域炭素循環モデル）をスギ林に調整した一次生産量の高解像予測（1kmメッシュ）では、GHGs低排出および高排出シナリオのいずれにおいても一次生産量の増加が予測された。

今後の温暖化によって、マツ材線虫病によるマツ枯れ被害が高標高地や寒冷地のマツ林にも拡大する可能性があると考えられている。またマツ枯れの被害は日本のみならず韓国、中国、ポルトガル、スペインなどにも拡大している。現在および将来の気候条件下におけるマツ枯れ危険度マップの作成やマツ材線虫病に罹患しやすい21種のマツ属森林を対象としたマツ枯れ危険度の予測モデルの構築がなされている。

気候変動が木材生産に及ぼす影響が懸念されており、森林の生産性を評価することの重要性が増している。ビッグデータを用いた森林生産量の定量的かつ空間的な評価結果をもとに、生産性に配慮した森林管理を行うことで、その影響を軽減できる可能性が示唆されている。

・人工林の造林適地と経営収支の予測

トドマツ人工林の造林に適した環境条件と、その地理的な分布を明らかにすることを目的とした、機械学習に基づく統計モデルが開発されている²⁷⁾。北海道のトドマツ人工林は多くが主伐期を迎えており、伐採後の再造林における最適な管理手法を特定することが重要な課題となっていたことが背景にある。モデルによる予測の結果、温暖かつ夏期降水量が多く、火山灰地や花崗岩地といった特定の地質以外の場所がトドマツの造林適地であることが判明した。また、モデルから予測された造林地としての好適度（地位）を対象に収穫予測を行い、素材単価、育林費、素材生産費などと併せてトドマツ人工林の経営収支を予測するモデルも開発された。これらのモデルによる人工林の経営収支を予測する手法は、今後、気候変動に対する影響評価研究への応用が期待されている。

・害虫に対する温暖化の影響評価

数理生態学的な検討から、気温上昇と害虫発生量との関係など2つの要因の間の因果関係を調べる統計的な方法について、単純な見かけの相関だけではなく因果関係の解析が温暖化影響の正しい評価には不可欠であることが指摘されている^{28) -30)}。また害虫は温度に対する適応と殺虫剤抵抗性との間に進化的なトレードオフが存在するため、気温上昇の結果、殺虫剤抵抗性の程度が変化する可能性が指摘されている。単に害虫の発生時期や発生量の変化だけでなく、殺虫剤抵抗性の遺伝子頻度などの変化も注視していくことが重要とされている^{31) -33)}。さらに気温上昇は病害虫の発生のみならず病害虫が加害する寄主植物の生育や季節消長、害虫に寄生する天敵などの発生にも影響するため、植物-害虫-天敵の3者系を考慮に入れたモデリングのアプローチや実態解明の必要性が指摘されている^{34) -36)}。

温暖化による高温が害虫の繁殖に及ぼす影響のみがこれまで注目されていたが、比較的軽い温暖化による亜致死的な影響によっても害虫の生殖や繁殖に悪影響が起り、さらに害虫の種の永続性や進化にも影響を及ぼす可能性が指摘されている^{37) ,38)}。気温上昇は、害虫に対する作物の品種抵抗性の働きを弱めることがある一方で、作物上で共存する2種の害虫に対してプラス或いはマイナスの影響を及ぼすことで結果的には生態系の持続性や回復力を増加させ、被害軽減につながる可能性があることが解析された。気候変動が病害虫に及ぼす影響は直接的なものだけでなく、病害虫の種間相互作用や作物を通じた間接的関係など様々に関わっていることが指摘されている^{39) ,40)}。

・農林水産分野におけるCO₂削減

農林水産業におけるCO₂削減の取り組みとして、農業用ヒートポンプの活用や高効率蓄熱・移送技術・放熱制御技術の活用、再生可能エネルギー利用推進のための農業用エネルギーマネジメントシステム（Energy Management System：EMS）の開発などが行われている⁴¹⁾。また再エネや蓄電技術を活用した地産地消

エネルギーシステムの構築なども各地で取り組みがある。CO₂削減に加え、農林水産業における高齢化・人手不足対策として、農業機械・漁船の電動化、漁船の自動航行化、農業用電気自動車（Electric Vehicle：EV）の開発なども進められている。漁船の電動化においては自動車や大型船舶と同様にハイブリッド・リチウム電池や水素燃料電池等の開発が進められている。漁場予測や漁獲魚種の予測等による漁船漁業の効率化や海面養殖業の作業効率化によるCO₂削減なども実施されている。

・漁船搭載型観測機器の開発と活用

気候変動の影響を評価・予測し、適切な適応・緩和策の提案・実施を行うためには、環境モニタリングに基づくビッグデータ構築とビッグデータを用いた予測モデルの開発が必須となる。各省庁で独立して実施されている海洋観測データは目的依存型の海洋観測であるため、目的に合わせた単位・手法で取得されることに加え、時空間的な偏り等もあり、ビッグデータとして統合して扱うことが困難である。そこで、漁船・漁具に観測機器を搭載して、操業と同時に環境データ収集を行う手法の開発や、広範囲・高頻度の環境データ収集とモデル予測を行うための研究開発などが進行している^{42), 43)}。

・バイオマス活用型の海藻養殖システムの展開

海外では気候変動適応・緩和に向けた方策の一つとしてバイオマス活用型の大規模海藻養殖システムの構築が先行的に検討されている。日本は2022年に策定された新たな水産基本計画において食用魚介類の自給率の目標値が令和14年度で94%（令和元年度55%）であるのに対し、海藻類は72%（令和元年度65%）とされている。国際社会での海藻類の需要の高まりと相反して、養殖産業成長化による海藻類の食用利用の増加はあまり期待されていない感があるが、日本が技術的アドバンテージを持つ海藻類の養殖技術を食用海藻以外に活用する方向性での技術開発に期待が持たれている。

・海藻バイオマスを用いた製品・サプライチェーンの構築

大規模海藻養殖システムの開発が進めば大量の海藻バイオマスが生産されるため、食用海藻市場への悪影響を避けつつ、その有効活用を進めることが重要となる。そのため生産された海藻バイオマスの化学・工業的活用に向けた技術開発が必要とされている。海外で先行して進められている海藻バイオマスを用いた生分解性プラスチック生成、バイオ燃料、機能性製品の開発は国内においてもわずかながら進められており、以前から実用化しているアルギン酸等の機能性成分由来製品に加え、セルロース系から生分解プラスチックであるポリヒドロキシアルカノエート（Polyhydroxyalkanoate：PHA）、セルロースナノファイバー（Cellulose Nano Fiber：CNF）、製紙等への活用事例がある。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

■国内

・気候変動適応情報プラットフォーム（A-PLAT）

気候変動適応法の施行（平成30年12月）を受けて国立環境研究所気候変動適応センターが立ち上げたプラットフォームであり、気候変動影響や適応策に関する科学的知見や適応に向けた様々な取組みなどの情報を発信している。国内の主な研究プロジェクトもまとめられている。

・環境研究総合推進費戦略的研究開発S-18「気候変動影響予測・適応評価の総合的研究」（2020～2024年度）

日本の気候変動適応を支援するための最新の科学的情報の創出を目標にしている。具体的には（1）2025年に予定されている適応計画見直しへの貢献、（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、（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

対して強靱な社会の在り方に関する提言作成などを目指している。日本における農業生産や水資源・水利用への気候変動の影響予測に加え、適応策の検討に重点を置いた研究が実施されている。水産分野では漁船・漁業における対象魚種の分布域・資源量の将来予測に対応した適応策の提案、養殖業における高水温耐性種の開発などの適応策の提案が実施されている。

• 文部科学省「気候変動予測先端研究プログラム」(2022～2026年度)

気候変動対策（気候変動適応策・脱炭素社会の実現に向けた緩和策）に活用される科学的根拠の創出・提供を目指し、気候変動予測シミュレーション技術の高度化等による将来予測の不確実性の低減や、気候変動メカニズムの解明に関する研究開発、気候予測データの高精度化等からその利活用までを想定した研究開発を一体的に推進している。「気候変動予測と気候予測シミュレーション技術の高度化」、「カーボンバジェット評価に向けた気候予測シミュレーション技術の研究開発」、「日本域における気候変動予測の高度化」、「ハザード統合予測モデルの開発」の4課題から構成される。

• NEDO「食料・農林水産業のCO₂等削減・吸収技術の開発（2022～2030年度）」

「グリーンイノベーション基金事業」の一環として、農林水産業のCO₂等削減・吸収技術の開発を中心としたプロジェクトである。農業分野では高機能バイオ炭等の供給・利用技術の確立、林業分野では高層建築物等の木造化に資する等方性大断面部材の開発、水産分野ではブルーカーボン推進のための海藻バンク整備技術や海藻供給システムを開発する。

• 農林水産省・農林水産技術会議委託プロジェクト研究「ブルーカーボンの評価手法及び効率的藻場形成・拡大技術の開発」(2020～2025年度)

我が国のGHGsインベントリ報告書にブルーカーボン生態系を登録する動きの一助とするため、海草・海藻藻場・海藻養殖を対象としたCO₂吸収量算定評価手法の確立と、藻場を維持・回復・拡大させるための技術開発を実施している。なお前者に関連して、2023年4月提出のインベントリ報告書では日本として初めてマングローブ林による吸収量2,300トンが計上された。藻場（海草・海藻）については2024年4月の提出時に盛り込む方針が示されている。後者の取り組みでは、気候変動適応策と緩和策の融合を可能にする技術開発とともに、バイオマス活用によるCO₂排出量削減に向けた技術開発も実施している。

• 北海道大学広域複合災害研究センター

これまでの専門分野ごと縦割りで行われた災害研究を、地域の自然条件と人間の社会経済活動の両面から見直す研究へと再編成した学内共同施設である。異分野融合を柱とし、基礎的研究と自治体・民間等の需要にも答えられる社会実装研究および人材育成を行っている。

■ 国外

• AgMIP (Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project) (2010年～)

農作物の収量予測モデルを統一基準で相互比較し、予測精度の向上に結びつける国際プロジェクトである。イネを対象とした研究チームは2011年に発足し、現在、9カ国（日本、中国、インド、フィリピン、アメリカ、イタリア、フランス、オーストラリア、オランダ）の計18機関が参加して研究を実施している。

• 国連開発計画（UNDP）の気候変動適応プロジェクト

UNDPの気候変動適応プロジェクトでは気候スマート農業（雨水採取技術や作物の多様化など）の導入を通じた4,800万人の小規模農家支援と85万haの農地再生に取り組む。

• CASCADE プログラム

国際 NGO の Conservation International は様々な研究機関などと連携して気候変動のリスク評価や EbA の実現に取り組んでいる。その一つに中米の小規模コーヒー農家を対象とした本プログラムがある。気候変動がもたらす送粉サービスへの影響や、生垣やシェードツリーを活用した適応策の有効性の評価が行われており、多数の学術的成果も報告されている。農家のトレーニングプログラムや政策資料も公開している。

• Greenhouse gas Mitigation in Irrigated Rice Systems in Asia (MIRSA)

水田水管理技術の開発によって灌漑水田土壌由来のメタンと一酸化二窒素の排出低減を目指すプロジェクトである。日本の農林水産省の支援により、タイ、ベトナム、インドネシア、フィリピンでフィールド実証実験が実施されている。

• EbA を推進する国際コミュニティ

EbA に関する情報発信や国際連携のためのコミュニティが複数立ち上がっている。「Friends of EbA (FEBA)」は、EbA に関する協力や知識共有に関心のある組織の非公式なネットワークとして知られている。「weADAPT」や「ABE (Adaptation Based on Ecosystems)」は気候変動適応問題に関する共同プラットフォームとして EbA に関する研究事例の集約にも取り組んでいる。また「Ecosystem-based Adaptation through South-South Cooperation (EbA South)」は、アフリカ、アジア太平洋地域における EbA の検証や普及に取り組んでいる。「Natural Water Retention Measures (NWRM)」は欧州における水資源に関する諸問題の解決に取り組んでおり、EbA 農林業の事例も含む。

• Ocean2050 (2020 年～)

海洋の保全に取り組む Cousteau 財団を主軸に科学コミュニティが組み合わさったプラットフォーム。海洋におけるさまざまな環境問題に取り組むとともに、ブルーカーボンによる GHGs 吸収源構築とブルーエコノミーの進展を目指し、海藻養殖による CO₂ 吸収源の促進を目指した研究と実装を進めている。

• DOE ARPA-E 「MARINER: Macroalgae Research Inspiring Novel Energy Resources」(2017 年～)

バイオ燃料などに利用可能な大規模海藻養殖技術を開発するプロジェクトである。米国国内は少なくとも 5 億乾重トンの大型藻類が生産可能な地理・環境条件を持つと推定され、液体燃料として約 2.7 千 BTU (British thermal unit) のエネルギー（米国の年間輸送エネルギー需要の約 10% に相当）を生み出す可能性を示唆している。2022 年 4 月には「Marine Renewable Energy Applications for Restorative Ocean Farming: Kelp FY21 Seedling Final Report」が公開された。

• EU Interreg Europe 「Wier & Wind」(2019～2022 年)

大規模海藻養殖技術の開発プロジェクト「AT-SEA: Advanced Textiles for Open Sea Biomass Cultivation」(2012～2015 年) の後継プロジェクトであり、欧州地域における持続可能な海藻養殖の促進を目的とする。大規模かつ自動化した海藻養殖生産システムを北海の洋上風力発電施設海域に構築し、商用海藻の生産技術開発が進められている。長さ 50m ほどの養殖網を用いたシステムが構築されており、2022 年には自動収穫機の実証化試験が実施された。

• The Norwegian Seaweed Biorefinery Platform (2019～2024 年)

ノルウェー研究評議会による研究プロジェクトで、大型海藻類のバイオリファイナリープロセス開発、海藻由来製品の高付加価値化、持続可能性と経済的評価等を行っている。またプラットフォームとして、ステークホルダー間のネットワーク形成を担う役割も果たしている。

（5）科学技術的課題

• 気候変動による水リスクへの適応

人間が気候変動による水リスクにどのように適応するかについては、十分な検討が進んでいない。適応策の検討の難しさの一つは、ある分野の適応行動が流域内の他の関係者の利益と対立し、トレードオフ関係が様々な分野間で現れることにある。気候変動への適応について取りまとめるIPCC第2作業部会の第6次報告書では、複数の利害関係者が混在する現場レベルで、適応策の限界や実現可能性を評価する手法開発の重要性が強調された。適応策の策定では、ある分野の適応行動が他者の利益や適応行動と競合する、「適応の失敗」をできる限り事前に回避することが求められる。今後は、ある適応行動が、地域内の関係者にもたらす利害関係からも適応策の有効性や実現可能性を評価する手法が求められる。

• 季節予報の渇水予測と最適な意思決定

力学的な季節予報では大気・海洋のカオス的な振る舞いを確率論的に予測するため、同じ予測対象期間に対して複数の数値予報を行うアンサンブル予報が採用されている。現在は、そのように行われる季節予測を用いて、収穫の数ヶ月前に主要穀物の収量変動について予測情報を提供するための研究が進められている⁹⁾。また季節予報の渇水（水資源）予測への利用も今後の重要な課題となっている。確率的な渇水予測に基づき実際の貯水池の運用や水需要調整などの多岐にわたる渇水対策での最適な意思決定を行うことが適応策の検討として必要となっている。

• 栽培管理支援システムの開発

圃場の水管理は、水稻栽培における労働時間の約3割を占める。大規模営農では複数品種の栽培で水管理が複雑になるとともに、気候変動による年々の栽培暦の変化も問題となる。水田の給排水の遠隔操作が可能になる自動水管理システムが開発され、ハード的な機能だけでなく、各生育期間での水管理方法を設定するなどのソフト的な機能も備わっている。生育期間の情報は、現地圃場の気象データと作物生育モデルにより時々刻々と更新され、予測情報も取り入れるようになっている。また、水田水温のシミュレーションモデルと結合することにより、最適な給水時刻に給水を行うことが可能となる。こうした栽培管理支援システムは全国の圃場で実証試験が進められており、今後の発展が期待されている。

• 生態学的、地球物理学的、工学的な研究アプローチの必要性

極端な気象現象が森林生態系にどのような擾乱（じょうらん）を与えるかについては十分に分かっておらず、様々な周辺分野との共同による解明が必要とされる。大きな擾乱によって植生や地形が変わり、蒸発散や流出の経路に大きな変化が生じたときに、生態系を形成している動植物の生息域が変化し、蒸発散へのインパクトを通して水収支、水貯留への影響が生じる可能性があると考えられている。これらのプロセスの理解には、農学のみならず動植物や微生物の生態学的知見も必要になる。また表層の浸食や崩壊など基盤となる土壌に擾乱が生じる可能性を考えればより複雑な影響が生じるため、地球物理学的、砂防工学的な研究アプローチも必要となる。

• 総合評価の枠組みの必要性

SDGsに関する複数の指標（気候変動の緩和、適応、生物多様性、生態系サービス、食料安全保障等）は個別に研究されることが多く、それらのトレードオフやシナジーの実態把握や解決については、まだ知見の蓄積が十分ではない。例えば環境に配慮した農業は生物多様性およびそれに由来する生態系サービスを向上させるが、収量の低下につながりやすく、食料安全保障上の問題が残る。圃場スケールの解決策には限界があり、シナジーの創出には景観スケールの総合的な適応計画が必要になる。これにはあらゆる分野の科学者が関与し、協力していくことが求められている¹³⁾。

・病虫害に関する科学技術的課題

病害虫に関する研究としては、気温上昇やCO₂濃度の上昇が植物を介して間接的に病害虫に及ぼす影響の解明、気温上昇などが病害虫の殺虫剤抵抗性の変化に及ぼす影響の具体的な事例の収集および分析、植物-害虫-天敵3者系を考慮に入れた気候変動の影響評価、越境性害虫の気温上昇に伴う越冬地域の拡大や侵入量増加の将来予測、アジア地域や豪州における果樹ミバエ類の発生地域が近年拡大している要因の解明などが今後取り組むべき課題として認識されている。

・斜面災害に関する科学技術的課題

国内向けには、①台風や線状降水帯に伴う長時間局地豪雨による斜面災害、②地震と複数の豪雨の連鎖による複合型斜面災害、③森林斜面の崩壊に伴う流木災害、④高緯度地域での斜面土壌浸食が今後の課題である。それぞれ短期的、中長期的に取り組むべき課題を以下にまとめる。

	短期的	中長期的
①	流域面積100km ² 程度の狭い地域で地形的に危険な斜面の抽出方法の開発	局地豪雨予測と豪雨時の斜面内水ポテンシャル上昇による崩壊メカニズムの解明
②	震動と地下水上昇に伴う斜面の脆弱性（劣化）の進行メカニズムの解明	複数豪雨の連鎖による斜面災害危険箇所の探索システム開発
③	立木を伴う斜面崩壊による下流域への流木流出プロセスの解明	補捉された大量の流木処理と流木利用方法の確立
④	北海道などの高緯度地域での農業基盤消失プロセスの解明	土壌や砂の循環も考慮した農林業システムの確立

気候変動に伴って集中豪雨の頻度が著しく高くなり、複数の集中豪雨や地震の連鎖による多種の斜面災害が多数発生していることから、人口減少と生存基盤の脆弱性も研究対象に含めた文理融合型の研究体制が必要である。

また海外では干ばつと山火事による斜面浸食と崩壊の加速が課題となっており、国際共同研究等で中長期的に山火事後の斜面劣化プロセスの解明に取り組むことも必要である。

・漁船搭載型観測機器の開発と活用

一般的に漁業者自身が観測機器を操作することが困難であるため、観測機器の操作・観測・データ送信は自動化することが望ましい。観測機器の操作が操業の妨げにもなれば搭載そのものを見直すことになり、普及・実用化が難しくなる。そのためには、IoT機器とクラウド間での高速通信を可能にする通信網の整備が必要である。陸域では5G通信網が整備されつつあるが、通信範囲の制限から海上での利用は難しい。

・漁船電動化と航行自動化

電動化と自動化に関する技術開発上の課題は自動車等と同様であるが、加えて水産業においては漁船改修・艀装上の課題があげられる。船舶は1隻当たりの価格が高いため、各漁業者が新しい技術導入のために船舶を完全新装することは不可能に近い。既存船舶の船体を活用しつつ、新規技術を搭載するための技術も必要となる。これは電動化・自動化だけでなく、気候変動適応としての複合漁業において、多種多様な漁具を一隻の漁船に搭載可能にする改修にも共通する課題である。

・バイオマス活用型の高藻養殖システムの展開

現行の高藻養殖施設と手法は漁業の経営体単位で管理可能な規模であり、大量生産が可能な高藻種および地域が限られている。また、食用を目的としているため、食味等に関わる品質を向上させるための労力・技術が多く含まれており、バイオマス活用を目的とした養殖には必ずしも必要としないものも含まれる。脱炭素社会の構築に向けた再生可能バイオマスの増大に向け、ブルーカーボンを増加させるためには海外で進められている洋上風力発電施設のような大型の海上構造物を利用した養殖技術の開発、再生可能エネルギーを活用しつつさまざまな工程を自動化してCO₂排出を減らす技術開発、食用以外のさまざまな有用高藻種を対象とした種苗生産技術開発が必要である。

・高藻バイオマスを用いた製品・サプライチェーンの構築

高藻バイオマスは淡水を利用せず生産できる等の利点がある一方、塩分含有量・含水率が高いといったデメリットもある。この点がネックとなり、高藻バイオマス由来の機能性成分や製品製造においては、海外でいくつか事例があるものの、実用化のボトルネックとなるケースが多い。効率的かつCO₂排出の少ない脱塩・脱水技術かあるいは脱塩等を必要としない製品化技術が必要となる。また、企業間連携や研究機関－企業間連携を促進し、産業連関によるサプライチェーンの最適化などとともに、プラスチックや燃料等、高藻バイオマスを用いた各種製品化への技術開発を進めていく必要がある。

・沿岸域での栄養塩添加とその濃度計測

一般的に沖合域は沿岸域よりも栄養塩濃度が低く、高藻の成長には不適と考えられている。そのため、沖合域の養殖では人工的な栄養塩添加の技術開発が望ましいが、現時点では栄養塩を豊富に含む海洋深層水の汲み上げ等が実施されている。しかしながら深層水は同時にCO₂も多く含むため、気候変動対策としてそのまま使用することは好ましくない。海洋深層水からCO₂を除去、あるいは海洋深層水を使用しない栄養塩添加技術の開発が課題となる。また、海水中の栄養塩濃度の測定は現時点では採水後に分析機器による分析を行うしかなく、現場でのリアルタイム観測ができない。養殖工程の省エネ化、効率化を実現するためには、栄養塩口ガー・観測機器の開発が急務である。近年は海岸に近い沿岸域でも気候変動等により貧栄養化が進み、高藻養殖業や漁業生産に影響が出ている。これらの技術開発は沿岸域での気候変動対策にも活用が期待できる。

（6）その他の課題

気候変動適応法（平成30年6月13日公布）では、現在すでに生じている、または将来予測される被害の回避・軽減等を図る方策について、自治体ごとに計画を策定することが謳われている。気候変動による食料生産環境への影響に対して、様々な適応策が分野ごとに検討されているものの、それらを統合し、地域での総合的な適応策の検討は端緒についたところである。

水稻を例にとると、移植日の変更を行う場合には、河川からの取水を現在の期間から移植日・収穫期に応じて変更する必要がある。また、掛け流し灌漑等の高温障害への適応策をとる際にも、十分な水資源を確保する必要がある。一方で、降雪・積雪量の減少、融雪時期の変化、降水量の年変動の拡大、蒸発散量の増加はこれまでとは異なる河川流況を生じさせることから、これまで以上に水資源の適切な管理や効率的な水利施設の運用が求められる。農業生産・水資源の両者のバランスをとるには、圃場スケールでの作物的な適応策と流域スケールでの水資源の適応策を同時に考える枠組みを構築することが課題となる。さらに、洪水・渇水を引き起こす両極端な気象現象の増加が予測されるため、利水・治水のバランスをどのようにとるか、水源地となる森林管理までを含めた、流域レベルでの構想が求められる。農地・貯水池の持つ「治水効果」（洪水調節機能）は「農業生産」とトレードオフ関係にある。農地での洪水貯留で作物の減収リスクが高まり、貯水池の洪水調節容量を大きくすれば渇水リスクが高まる。令和2年に流域治水関連法が成立し、関係者が

協働して治水安全度を高める取組が進められる中、農業がどこまで治水に協力するか、農業生産へのリスクを誰が負担するかについて議論する機運が高まっている。

国連食糧農業機関（FAO）をはじめとする国連の諸機関は、水資源、エネルギー、食料の安全を確保するためには、三者の相互関係とそのメカニズムを明らかにし、将来予測を立てる必要性を指摘している。我が国では、森林の公益的な機能のうち、土砂災害の抑制、水源涵養機能は、持続的な農業生産に大きく関わり、気候変動下で森林をどのような状態で維持するかを検討が必要である。また、農地面積や農家戸数の減少や、作付けする作物や作付け時期の変化といった社会的な条件が変化している。持続的に農業生産を続けるためには、今後起きつつある変化を理解し、ダム放流量の調整や取水制限などの短期的措置に加え、水利施設の整備、改修等の長期的な適応策を講じていく必要もある。

研究成果の社会実装には、社会経済効果まで含めて自治体などに提案する必要がある。自治体や民間企業と協力しながら社会実装を進める必要がある。広範な知識と経験を要するため、実践型の文理融合型研究体制の構築が必要である。

現場での実用化や制度の普及には行政との連携を密にし、気候変動対策として具体的かつ計画的な推進を行う必要がある。例えば、水田の中干し期間の延長はメタン発生量の削減が可能であり、技術開発の普及段階にある。2020年から環境保全型農業直接支払交付金制度として採用され、14日以上の中干しを実施する取り組みに対し、10aあたり800円の補助金が交付されている。しかし、普及率は水田面積の1%にとどまっており、制度の普及が課題となっている。

政策的な課題もある。例えば水産業における大規模沖合養殖の実施等には海洋政策面での課題が多い。先行する欧州や米国では法制度の改正や漁業権の調整が検討段階に入っている。

また人材不足も問題となっており、大学教育とリカレント教育を兼ね備えた専門機関において、安定的・継続的な研究人材・技術者の育成が求められる。

(7) 国際比較
(農林業)

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	● FACE 実験に代表される作物への直接的な影響評価研究やモデル化研究が活発に行われている。作物生育モデルにより、高温障害の発生リスクおよび将来予測が研究されている⁴⁴⁾。 ● 農業水利用を考慮した流域スケールの水資源評価モデルの開発が進められ、アジアモンスーン諸国・日本の各河川流域での治水・利水への影響評価および適応策の検討が進んでいる。農業水利用・作付時期等の変化を反映した水資源予測に加え、季節予報を用いた貯水池運用の検討などの適応策が検討されている。 ● 樹木の気候応答のような樹木生理学的研究は多数の報告があるものの、成果を広域化・地図化した事例は限定的。 ● 分布予測モデルや生態ニッチモデルといった機械学習を取り入れた統計モデル研究がブナ林をはじめとした天然林を中心に行われてきた。これらにより天然林の主要樹木種の分布と環境条件との関係性を解明するモデル研究は基礎的な手法がほぼ確立し、成果が出始めている。 ● 病害虫研究でも着実な研究。 ● 生態系を活用した防災・減災（Eco-DRR）やグリーンインフラの研究事例が蓄積しつつある。農林業における適応・緩和に着目した研究プロジェクトなどはあるがEbAの観点からの研究はまだ限定的。

日本				● 太平洋プレート周辺に位置する環太平洋諸国の一つとして、その地盤条件と気候条件から斜面災害が多発するため、米国と並び斜面災害についての研究が進んでいる。斜面災害の発生機構に関する研究に加え、近年は発生予測や森林管理と斜面災害に関する研究も実施されている。
	応用研究・開発	○	↗	● リアルタイム気象情報を用いた栽培管理支援システムの構築、情報通信技術（Information and Communication Technology：ICT）などを活用した水利施設の制御などの実用化研究が全国的に実施されている。2020年からは豪雨の発生が予測される場合には、ダムの貯水量を一部放流し、洪水調節を行う取り組みが全国の農業用ダムで実施されている。 ● 農研機構では、中干し期間の延長による水田からのメタン発生量削減効果の評価を、全国9地点の農業試験研究機関圃場において実施した。稲わら等の新鮮有機物を施用した水田では、中干し期間を慣行からさらに一週間程度延長すれば、コメ収量への影響を抑えつつメタン発生量を約30%削減できることを示した。 ● 農業水利用への気候変動影響の予測に基づき、各流域の農業水利用・作付時期などの変化を反映した水資源予測や、季節予報を用いた貯水池運用の検討などの適応策が検討されている。 ● 機械学習を利用した生物多様性、気候変動緩和・適応、森林生態系サービスなどを出口とした研究が今後増えてくると見られている。 ● 近年、プロセスモデルであるBiome-BGCを用いたスギ人工林の純一次生産量のマップ化が試みられている。 ● 分布予測モデルをベースに、育林や林業経営収支予測などの応用的な出口を目指す研究の流れは今後も続くと思われる。 ● 気候変動適応法に基づき気候変動適応計画が策定されたことにより、EbA的な農林業の事例はまだ少ないものの、検討が進みつつある。保安林を活用した自然災害の緩和や、洪水などの水害対策としての田んぼダムなど、農林業におけるEco-DRRやグリーンインフラに対する注目も高まっている。気候変動適応情報プラットフォームでの情報公開も進んでいる。 ● 斜面災害に係る応用研究・技術開発では国と民間が協力して研究成果の社会実装を行っている。斜面災害の危険箇所（ハザードマップ）や発生タイミングを住民や産業従事者などが自ら確認できるような人工知能（Artificial Intelligence：AI）システムも公表されている。
米国	基礎研究	◎	↗	● 米国農務省農業研究所（USDA-ARS）において詳細なチャンバー試験や現地実証試験に基づいた物理過程ベースの作物収量予測モデルの開発が行われている。土壌水分、炭素呼吸過程、土地利用などの変化による影響を考慮した作物成長の物理過程に基づくモデル解析など先進的な研究も進められている。 ● USDA Forest Serviceの研究者らを中心として気候変動に伴う樹木の潜在生育域の変化予測に関する研究が'90年代後半から行われ、論文や報告書などが多数公表されている。 ● 気候変動に適応するための気候スマート農業などの農林業技術の研究開発が盛んに行われ、その成果がThe National Climate Assessment（NCA）やUSDAなどによって取りまとめられている。 ● 斜面災害に係る基礎研究では斜面崩壊について多数の研究成果がある。
	応用研究・開発	◎	↗	● USDA-ARSでは、広域の蒸発散量予測から農地灌漑量・地下水取水量の推定に用いられる熱波長の観測による蒸発散量推定法、衛星観測雨量の補正のためのマイクロ波による土壌水分観測、リモートセンシングによる広域の早期収量予測モデルの開発など幅広く研究を先導している。 ● 病虫害に関連する研究も盛ん。アメリカマツノキクイムシが大発生してマツ林生態系に甚大な被害を与えており、気候変動影響や炭素循環、森林火災などとの関連が研究されている。温暖化に伴う害虫被害による地球規模での減収を予測し、特に温帯地域での収量減が増すことを指摘。温暖化の影響評価の際に植物-昆虫あるいは多栄養段階、群集レベルでの相互作用を考慮する重要性を指摘。 ● 森林の温暖化リスクマネジメント、炭素循環や温暖化適応策に関しても研究が進んでいる。

				● 環境保護庁が生態系の保護を含む気候変動適応計画・戦略を策定し、様々なツールを公開。 ● 北米気候スマート農業アライアンス（North America Climate Smart Agriculture Alliance：NACSAA）が設立され、野生動物の保護や生態系サービスの活用を考慮した、持続可能な気候スマート農業の普及に取り組んでいる。 ● 斜面災害に係る応用研究・技術開発はアメリカ地質調査所（USGS）で行われている他、各州で Landslide-debris flow mapping が作成されている。
欧州	基礎研究	◎	↗	【EU】 ● 気候変動適応への対応の枠組みである「Copernicus Climate Change Service」では、気象災害に適応できる水管理を重点テーマの一つに挙げている。 ● 伝統的に植物および気候に関するデータベースや研究成果が充実している。2000年代から森林に関する気候変動シミュレーション研究の成果を数多く公表してきた。現在でも分布予測モデルの著名な研究者はEU諸国の大学や研究所に多い。 ● Horizon2020でEbAを含む気候変動適応に関する研究プログラムが設定され、多くの研究成果が得られつつある。EUのEbAプロジェクトを総合的に評価し、成功要因の解明や費用便益の分析などを行うなど先進的な取り組みを実施。農林業におけるEbAの包括的評価が実施され、レポートを公開。 【英国】 ● 生態・水文研究所（CEH）が温暖化への統合的な影響予測を行うための基盤技術として、農地をはじめとする各フィールドでの観測に基づいたプロセスベースモデルJULES（Joint UK Land Environment Simulator）を開発し、収量予測や水資源予測を行っている。 ● 生物多様性や生態系サービス関連の研究も盛ん。 【フランス】 ● 国立農業・食糧・環境研究所（INRAE）が農地からの温室効果ガスの影響や緩和策の検討を本格化させている。作物収量の予測を目的として、ヨーロッパ・アフリカを対象とした作物モデルの開発による農作物の収量への影響予測も行っている。アグロフォレストリーなどの研究も進展。
	応用研究・開発	◎	↗	【EU】 ● 気候変動緩和を目指す土地利用シナリオと生物多様性保全とのシナジーなど、応用的な研究が進められている。 ● 「気候変動適応戦略」が採択され、その戦略の有効性評価を行うとともに、加盟国が包括的な適応のための行動を取るよう促している。「欧州気候適応プラットフォーム（Climate-ADAPT）」を設立し、各地域・セクターの適応計画を支援するための様々な情報・ツールを公開している。 ● 国連食料農業機関（FAO）では、国ごとの統計データに基づいて構築された作物モデルによる地域ごとの作物収量の予測および温暖化時の影響が評価され、アフリカ・アジア等の諸国でのリアルタイムでの収量予測に用いられている。 【英国】 ● 「25 Year Environmental Plan」に基づき生物多様性の保全や持続可能な利用、気候変動対策や緩和の総合的な取り組みを推進。UKRIと環境・食糧・農林省（DEFRA）によるFarming Innovation Pathwaysも実施されている。 【フランス】 ● INRAEが季節予報の渇水予測への活用に向けた応用研究においても存在感を示し、国際的な研究イニシアチブ Hydrologic Ensemble Prediction Experiment（HEPEX）などを通して精力的に進めている。 【ドイツ】 ● ポツダム気候影響研究所（PIK）では、自然科学と社会科学の研究者が地球規模気候変動とその生態や社会経済への影響評価について、1）地球システム解析、2）気候変動の影響と脆弱性、3）持続可能な対応策の検討等の分野横断的な研究が行われている。

中国	基礎研究	○	↗	● 気候変動影響評価と森林生態系に関する研究成果は多数出ており、今後もその傾向が続くと予想されている。 ● 水田からのメタン発生に関する基礎研究が精力的に行われている。 ● アブラムシの発生に及ぼす温暖化の影響を長期データを用いて評価。その他にも害虫被害に対する温暖化の影響に係る研究を多数実施。 ● ゴム生産に間作を取り入れることによる生態系サービスの向上、収益増加、気候変動適応などの効果を検証する研究を、Natural Capital Project の一環としてスタンフォード大らとの共同で実施。
	応用研究・開発	◎	↗	● 気候変動に対する森林生態系への適応策など、応用的な研究も進んでおり、今後も増加すると見られている。 ● International Institute for Environment and Development (IIED) と共同で、EbAを利用した農業の干ばつ対策の研究を実施しており、政策提言も行っている。 ● 米国に本部を置く自然保護団体であるThe Nature Conservancyが中国におけるEbA優先エリアを地図化し、生物多様性保全や気候変動緩和に取り組む。 ● 世界最大規模の生態系サービスへの支払いプログラムが創設され、森林や草原を回復し、自然災害のリスクを軽減しながら農村の貧困を緩和する取組みに1億2,000万世帯が参加。 ● 極端化する気象災害による直接的な農業被害の研究が精力的に行われている。特に渇水による収量減少への対応に強い注意が払われている。 ● 2020年に複数災害早期警報技術研究センター（四川省成都市）が設立され、頻発する中国内陸部の地震・豪雨災害の研究推進を目指している。
韓国	基礎研究	△	→	● 水稻品種と水田のメタン発生量に関する基礎的な研究が継続的に行われている。 ● Korean Environment Instituteによって農業における気候変動適応策の研究開発が進められているが、国際的な発信は多くない。
	応用研究・開発	○	→	● 釜山にあるAPEC Climate Centerでは、季節予報を利用した作物の病虫害を予測する意思決定システム開発に関する研究が精力的に進められ、アジア域の農業地域に適用されている。
豪州、ニュージーランド	基礎研究	○	→	● 豪州科学研究機構（CSIRO）では、作物の生長過程や収量予測モデルを用いて、作物の生産量と自然生物の関係や地下水の上昇による塩害発生予測など、農業と周辺環境を連結した解析を進めている。 ● 斜面崩壊（Landslide）の基礎研究が進められており、特にニュージーランドはわが国と地形及び気候条件が類似することから、斜面災害の研究が盛んである。
	応用研究・開発	◎	→	● CSIROでは気候分野、水文水資源分野、作物分野の研究者が共同し、リモートセンシングを利用した土地利用の抽出および作物モデルの構築を行い、長期間の渇水に襲われたMurray川流域への気候変動の影響分析を進めている。 ● CSIROやニュージーランド地質・核科学研究所（GNS Science）にて斜面災害の応用研究や情報提供が行われている。

(水産業)

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	● 環境省・環境総合推進費518において、漁船漁業ではサケ・サンマやスルメイカ等、重要魚種への気候変動の影響評価と分布変化予測が実施されている。加えて養殖業・前浜漁業ではワカメ等の海藻養殖、海藻藻場とアワビ等磯根資源を事例とし、気候変動の影響評価と分布変化予測の解析が進められている。これらの解析結果をベースとした気候変動適応・緩和策の提案を目指している。 ● スマート水産業化を加速させるための水産庁事業がいくつか継続中である。漁船搭載型の観測機器の開発、観測機器による収集データから1週間先までの漁海況予測するシステム開発などが進められている。加えて、これらの観測機器を現場実装するための支援事業も進められている。 ● インベントリ報告書への登録へ向け、海草藻場・海藻藻場を対象とするブルーカーボン評価手法が検討され、2023年11月には算定ガイドブックが公開された。2024年1月にはインベントリ報告書に計上する方針が示された。ブルーカーボン生態系によるCO₂吸収量のアーカイブシステムの開発も進められている。 ● 気候変動に適応した養殖手法、養殖品種の開発が魚介類・海藻を対象に国の事業として進められている。二枚貝養殖での手法改善、育種による高温耐性海藻種の開発などが農林水産省で事業化されていることに加え、民間企業ベースでの開発も進んでいる。 ● 気候変動に適応した藻場維持・拡大技術の開発：気候変動適応策と緩和策の融合策として、藻場消失（磯焼け）を打開するための藻場創成技術（種苗生産技術+現場展開技術）、再生可能バイオマス増大に向けた海藻生産システムの技術の開発を統合的に進めるための研究が産官学共同で進められている。 ● 海外で先行している海藻バイオマスを対象としたバイオリファイナリー技術の開発が国内でも始まっている。日本のメリットとして多種多様な海藻種を生産できる点を生かし、気候帯ごとに異なる海藻種・異なるプロセスでシステム構築するための基礎研究が進められている。 ● 漁船電動化は2040年までに技術確立することが水産基本計画で目標に挙げられている。
	応用研究・開発	○	↗	● 水産資源評価の高度化とその評価結果をもとに、各魚種で不漁問題対策が検討されている。気候変動の影響を加味するための統計解析手法の開発、操業形態の変更や漁獲制限の効果の評価なども実施。 ● 重要資源対象種の分布変化を考慮した漁場整備が開始。地域別に気候変動による魚種の分布変化を加味しつつ、在来種の漁場整備を行うか、将来分布する魚種を対象とした漁場整備を行うか、水産庁が作成したガイドラインをもとに各都道府県で実施。 ● いくつかの県下では、県が独自で開発した高水温耐性の養殖品種を漁業者に普及し、養殖現場での実装が開始されている。また、2022年の三倍体魚等の水産生物の利用要領の見直しに伴い、例えばカキ養殖では高温下でも生残率が良く、品質が維持される三倍体種苗の展開が各地で検討開始。民間企業による三倍体種苗生産・販売も増加傾向にある。 ● 魚類の海面養殖を対象に、民間企業によるスマート事業化が進んでいる。給餌や養殖に悪影響を及ぼす環境変化（高水温、貧酸素、赤潮、波浪など）をモニタリング・予測し、その対策の自動化が進められている。これら技術を用いた沖合大規模養殖施設の技術開発も進められており、全国4か所で実用化が始まっている。 ● 再生可能エネルギーの推進可能性を探るため、その原料となる再生可能原料（バイオマス、有機廃棄物および廃プラスチック）の賦存量の調査が開始されている。このうち、海草・海藻類はブルー炭素として扱われており、バイオマス活用型海藻養殖の技術開発によって将来的な賦存量がどれくらい見込めるか、検討が実施。

				● カーボン・クレジット制度の適用と気候変動に適応した藻場維持・拡大技術の現場展開：Jブルークレジットを用いたカーボン・クレジット制度が開始されたことにより、気候変動対策を明確に目的とし、海藻養殖も含めた藻場維持・形成・拡大技術の現場展開が活発化し始めている。今後は、CO₂吸収量を最大化させるような藻場拡大技術や海藻養殖技術開発が進むことで、クレジット制度の活性化を介して水産業における適応策と緩和策の融合策の推進が期待できる。
米国	基礎研究	○	→	● 2010年代後半より開始された、国家プロジェクト予算に基づく海藻バイオマスを利用した燃料、素材開発に関わる研究が継続中。 ● マングローブ林、塩性湿地と海草藻場だけでなく、海藻養殖産業の振興とともに海藻によるCO₂吸収・排出抑制に関する研究が進行中。いくつかの成果は米国科学アカデミーで取りまとめられている。
	応用研究・開発	◎	↗	● 欧州とともに民間企業ベースでの海藻養殖と海藻産業が活発化。 ● 沖合洋上風力発電施設と漁業管理とのコンフリクトが課題化している。漁業管理の基礎となる米海洋大気庁（NOAA）の科学的調査では、洋上風力発電開発の影響評価にかかる費用のうち、NOAAと民間企業との洋上風力エネルギー開発が海洋環境と漁業コミュニティに与える影響に対処するための共同研究プロジェクトのための費用として、漁業団体が連邦政府へ約7,400万ドルの支出を要請した事例もある。また、風発施設そのものだけでなく、当該海域における海藻（コンブ類）養殖が漁業（当該海域の漁業資源）に及ぼす影響も懸念され始めている。 ● 気候変動に適応した食料生産として、沖合養殖への期待が高まっている。有権者の半数以上が沖合養殖を拡大する議員を支持していることが調査で判明したことをうけ、超党派の議員団が沖合魚類養殖場の開発に関心を有する企業に対する規制プロセスを合理化することを目的とした法案を議会上院・下院双方で提出している。 ● 気候変動への適応政策が加速化。NOAAはインフラ整備法での気候変動対策として2022年にNOAAが受け取る29.6億ドルのうち15億ドルは沿岸のレジリエンスを向上させるためのプロジェクトに、9.04億ドルはNOAAの気候データおよびサービスの改善に、残りは漁業支援に使用されている。
欧州	基礎研究	◎	↗	【英国・EU】 ● ブルーカーボン生態系、特に海草藻場・海藻藻場・海藻養殖におけるCO₂吸収源機能（植物残渣貯留）の解明が継続して進められている。これらの成果をもとに海藻類をIPCC湿地ガイドラインへ加える動きは新型コロナウイルスの影響で停滞していたが、2022年度より徐々に再開されている。 ● 英国をはじめ、各国で大学等公的研究機関がブルーカーボン生態系を対象としたCO₂吸収源の算定が開始。 ● 民間企業において、海藻類を対象とした再生可能バイオマス関連の製品化技術開発が加速している。従来から実施されていた機能性成分（増粘剤等）の抽出・利用加工だけでなく、飼料、プラスチック・燃料・電池等のGHGs削減に向けた技術開発を組み合わせたカスケード利用プロセスの構築に向けた技術研究が盛ん。 【フランス】 ● 上記のEU内での動きのほかに、フランスにおける重要水産業である二枚貝養殖の適応策に関わる研究が進行中である。温暖化に伴うカキ採苗の不良対策に向けた生物学的メカニズムの解明、観測システムの開発、温暖化に伴う食害魚増加に対応するための食害対策システムの開発などが進められている。 【地中海地域】 ● 温暖化による植食性魚類の増加によってブルーカーボン生態系（海草藻場）の減少がさらに深刻化していることをうけ、藻場減少の実態把握と対策研究が活発化。

欧州	応用研究・開発	◎	↗	【英国・EU・ノルウェー】 ● 気候変動により変動する水産資源の資源管理を強化するため、IUU（Illegal, Unreported and Unregulated）漁業への規制を強化することを決定。 ● EUのプロジェクト予算による援助のもと、民間企業主体で実施されている大規模海藻養殖施設等のシステム開発が現場試験段階に到達。 ● FAOが2022年4月の会合において海藻養殖・海藻産業のイノベーションを奨励する由を公表。それにより欧州を中心に研究と実装がさらに加速化する模様。特に、The Seaweed for Europe coalitionを主体に海藻養殖の急速拡大が進み、現在30万トンの生産量を今後10年で800万トンまで増加させる目標を立てている。また生産地は欧州、アメリカが主体であるがアフリカ等での展開も視野に入れている。海藻産業においても欧州の民間企業において製品化技術開発が勢力的に実施されている。化粧品、バイオパッケージング、バイオ燃料、織物、洗剤、および環境に配慮した建設資材などがあげられている。 ● オランダの民間企業では、アイルランド、モロッコ、インド、オランダに養殖場を展開、様々な海藻種を生産し、タンパク質、糖、繊維、ビタミン、ミネラル等の栄養補助食品を開発、動物飼料や植物肥料に活用している。医薬品、生分解性プラスチック、テキスタイル、紙、建設用コンクリート硬化化合物などの持続可能な材料、バイオエネルギーに変換することによって生み出される再生可能エネルギーの開発研究を進めている。 ● 英国スコットランド政府が商用海藻養殖に関する法令ガイドラインを作成し、養殖拡大・規制について法整備を開始。 【地中海地域】 ● 食害で壊滅状態にあるブルーカーボン生態系（海草藻場）の回復に向けた対策が実施中。
中国	基礎研究	◎	↗	● 海藻養殖を吸収源にするための基礎研究が急速に拡大。特に海藻養殖のCO₂貯留プロセスとして最も重要な難分解性溶存態有機炭素（Refractory Dissolved Organic Carbon：RDOC）による植物残渣貯留プロセスに関する論文が増加傾向にある。 ● 中国全土の海藻養殖施設によるCO₂吸収源ポテンシャルを算定。
	応用研究・開発	○	↗	● 昨今の海洋進出拡大に伴い、水産分野では沖合魚類養殖施設の構築が拡大中。
韓国	基礎研究	△	→	● 特段の情報なし
	応用研究・開発	△	→	● 海藻養殖拡大・輸出促進のためにASC（Aquaculture Stewardship Council：水産養殖管理協議会）・MSC認証（Marine Stewardship Council：海洋管理協議会）を取得。
その他の国・地域	基礎研究	◎	↗	【豪州】 ● 海草藻場・塩性湿地・マングローブ林に加えて、海藻類のCO₂吸収源、再生可能バイオマス活用に関する研究プロジェクトが開始。
	応用研究・開発	○	↗	【インドネシア】 ● 欧州で加速する海藻産業に参画、特に海藻のハイドロコロイド製品（増粘剤、ゲル化剤、乳化剤として機能する海藻ベースの製品）のヨーロッパ市場での開発に参加している。

(註1)「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

(註2)「現状」 ※我が国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている ○：ある程度の顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない ×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3)「トレンド」

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

参考・引用文献

- 1) 農林水産省「大規模自然災害からの復旧・復興」『令和4年度 食料・農業・農村白書』第2節 (2023)
- 2) Swiss Re Group, “Global insured catastrophe losses rise to USD 112 billion in 2021, the fourth highest on record, Swiss Re Institute estimates,” Swiss Re, <https://www.swissre.com/media/press-release/nr-20211214-sigma-full-year-2021-preliminary-natcat-loss-estimates.html>, (2023年2月4日アクセス) .
- 3) Nadine Brisson, et al., “Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France,” *Field Crops Research* 119, no. 1 (2010): 201-212., <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.07.012>.
- 4) David B. Lobell, Wolfram Schlenker and Justin Costa-Roberts, “Climate Trends and Global Crop Production Since 1980,” *Science* 333, no. 6042 (2011): 616- 620., <https://doi.org/10.1126/science.1204531>.
- 5) Toshichika Iizumi, et al., “Responses of crop yield growth to global temperature and socioeconomic changes,” *Scientific Reports* 7 (2017): 7800., <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08214-4>.
- 6) Joshua Elliott, et al., “Constraints and potentials of future irrigation water availability on agricultural production under climate change,” *PNAS* 111, no. 9 (2013): 3239-3244., <https://doi.org/10.1073/pnas.1222474110>.
- 7) Patrick Gerland, et al., “World population stabilization unlikely this century,” *Science* 346, no. 6206 (2014): 234-237., <https://doi.org/10.1126/science.1257469>.
- 8) 内閣府「気候変動に関する世論調査 (令和5年7月調査)」 <https://survey.gov-online.go.jp/r05/r05-kikohendo/>, (2024年2月15日アクセス) .
- 9) Toshichika Iizumi, et al., “Global crop yield forecasting using seasonal climate information from a multi- model ensemble,” *Climate Services* 11 (2018): 13- 23., <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2018.06.003>.
- 10) 吉田武郎, 他「広域水田灌漑地区の用水配分・管理モデルの実装による流域水循環のモデル化」『農業農村工学会論文集』80 巻 1 号 (2012): 9-19., <https://doi.org/10.11408/jsidre.80.9>.
- 11) Ryoji Kudo, Takeo Yoshida and Takao Masumoto, “Nationwide assessment of the impact of climate change on agricultural water resources in Japan using multiple emission scenarios in CMIP5,” *Hydrological Research Letters* 11, no. 1 (2017) : 31-36., <https://doi.org/10.3178/hrl.11.31>.
- 12) Claire Kremen and Adina M. Merenlender, “Landscapes that work for biodiversity and people,” *Science* 362, no. 6412 (2018) : eaau6020., <https://doi.org/10.1126/science.aau6020>.
- 13) Nathalie Seddon, et al., “Global recognition of the importance of nature-based solutions to the impacts of climate change,” *Global Sustainability* 3 (2020) : e15., <https://doi.org/10.1017/sus.2020.8>.
- 14) Food and Agriculture Organization (FAO) and United Nations Development Programme (UNDP), “Briefing note: National Adaptation Plans-An entry point for ecosystem-based adaptation,” FAO, <http://www.fao.org/3/ca9541en/ca9541en.pdf>, (2023年2月4日アクセス) .
- 15) Hannah Reid, et al., “Is ecosystem -based adaptation effective? Perceptions and lessons learned from 13 project sites,” *International Institute for Environment and Development* ((2019), <https://www.iied.org/17651IIED> (2024年2月15日アクセス) .

- 16) Hannah Reid, Alejandro Argumedo, and Krystyna Swiderska, “Ecosystem-based approaches to adaptation: strengthening the evidence and informing policy. Research results from the Potato Park and the Indigenous Peoples Biocultural Climate Change Assessment, Peru,” International Institute for Environment and Development (2018), <https://www.iied.org/17619iied>, (2024年2月15日アクセス) .
- 17) 柳井一希, 笠井美青「WOE法及びロジスティック回帰法による和歌山県那智川流域における表層崩壊危険度分布」『日本地すべり学会誌』57巻3号(2020): 90-98., <https://doi.org/10.3313/jls.57.90>.
- 18) Amy E. East and J. B. Sankey, “How is Modern Climate Change Affecting Landscape Processes?” *Eos* 101 (2020)., <https://doi.org/10.1029/2020EO152788>.
- 19) 国立研究開発法人水産研究・教育機構「2019年度 資源・漁獲情報ネットワーク構築委託事業 報告書 (令和2年3月)」農林水産省, https://www.maff.go.jp/j/budget/yosan_kansi/sikkou/tokutei_keihi/R1itaku/R1ippan/attach/pdf/index-348.pdf, (2023年2月4日アクセス) .
- 20) Bela H. Buck and Richard Langan, eds., *Aquaculture Perspective of Multi -Use Sites in the Open Ocean: The Untapped Potential for Marine Resources in the Anthropocene* (Switzerland: Springer Cham, 2017)., <https://doi.org/10.1007/978-3-319-51159-7>.
- 21) North Sea Farmers, “Wier& Wind,” <https://www.northseafarmers.org/projects/offshore-test-site/wier-en-wind>, (2024年10月31日アクセス) .
- 22) Jonas Jägermeyr, et al., “Climate impacts on global agriculture emerge earlier in new generation of climate and crop models,” *Nature Food* 2, no. 11 (2021) : 873-885., <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00400-y>.
- 23) Yasushi Ishigooka, et al., “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, Issue 2 (2021): 139-149., doi:10.2480/agrmet.D-20-00038.
- 24) メッシュ農業気象データシステム開発チーム「農研機構メッシュ農業気象データシステム」農研機構メッシュ農業気象データ, <https://amu.rd.naro.go.jp/>, (2023年2月4日アクセス) .
- 25) Yuhei Takaya, et al., “Japan Meteorological Agency/Meteorological Research Institute-Coupled Prediction System version 1 (JMA/MRI-CPS1) for operational seasonal forecasting,” *Climate. Dynamics* 48 (2017) : 313-333., <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3076-9>.
- 26) Baihua Fu, et al., “A review of catchment-scale water quality and erosion models and a synthesis of future prospects,” *Environmental Modelling & Software* 114 (2019) : 75-97., <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.12.008>.
- 27) 津山幾太郎, 嶋瀬拓也, 石橋聡「北の森だより21号: トドマツ人工林伐採後の施行選択」国立研究開発法人森林研究・整備機構 森林総合研究所 北海道支所, https://www.ffpri.affrc.go.jp/hkd/research/documents/kitanomori_vol21_hp.pdf, (2023年2月4日アクセス) .
- 28) 山村光司「状態空間モデルによる昆虫個体数変動の解析における諸問題」『日本生態学会誌』66巻2号(2016): 339-350., https://doi.org/10.18960/seitai.66.2_339.
- 29) Kohji Yamamura, “Estimation of the Predictive Ability of Ecological Models,” *Communications in Statistics -Simulation and Computation* 45, no. 6 (2016) : 2122-2144., <https://doi.org/10.1080/03610918.2014.889161>.
- 30) 山村光司「地球温暖化が我が国の病害虫発生にもたらす影響: 因果関係を調べる方法について」『植物防疫』74巻6号(2020): 338-342.
- 31) James L. Maino, Paul A. Umina and Ary A. Hoffmann, “Climate contributes to the evolution

- of pesticide resistance,” *Global Ecology and Biogeography* 27, no. 2 (2018) : 223-232., <https://doi.org/10.1111/geb.12692>.
- 32) Jian Pu, Zinan Wang and Henry Chung, “Climate change and the genetics of insecticide resistance,” *Pest Management Science* 76, no. 3 (2020) : 846-852., <https://doi.org/10.1002/ps.5700>.
- 33) Maor Matzrafi, “Climate change exacerbates pest damage through reduced pesticide efficacy,” *Pest Management Science* 75, no. 1 (2019) : 9-13., <https://doi.org/10.1002/ps.5121>.
- 34) Victorine Castex, et al., “Pest management under climate change: The importance of understanding tritrophic relations,” *Science of The Total Environment* 616-617 (2018) : 397-407., <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.027>.
- 35) Robin J. A. Taylor, et al., “Climate Change and Pest Management: Unanticipated Consequences of Trophic Dislocation,” *Agronomy* 8, no. 1 (2018) : 7., <https://doi.org/10.3390/agronomy8010007>.
- 36) Frank Chidawanyika, Pride Mudavanhu and Casper Nyamukondiwa, “Global Climate Change as a Driver of Bottom-Up and Top-Down Factors in Agricultural Landscapes and the Fate of Host-Parasitoid Interactions,” *Frontiers in Ecology and Evolution* 7 (2019) : 80., <https://doi.org/10.3389/fevo.2019.00080>.
- 37) D. Porcelli, et al., “Local adaptation of reproductive performance during thermal stress,” *Journal of Evolutionary Biology* 30, no. 2 (2017) : 422-429., <https://doi.org/10.1111/jeb.13018>.
- 38) Benjamin S. Walsh, et al., “The Impact of Climate Change on Fertility,” *Trends in Ecology and Evolution* 34, no. 3 (2019) : 249-259., <https://doi.org/10.1016/j.tree.2018.12.002>.
- 39) Finbarr G. Horgan, et al., “Positive and negative interspecific interactions between coexisting rice planthoppers neutralise the effects of elevated temperatures,” *Functional Ecology* 35, no. 1 (2021) : 181-192., <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13683>.
- 40) Finbarr G. Horgan, et al., “Elevated temperatures diminish the effects of a highly resistant rice variety on the brown planthopper,” *Scientific Reports* 11 (2021) : 262., <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80704-4>.
- 41) 三澤俊哉「農林水産部門の脱炭素化に向けた課題と取り組み」『電気学会誌』142 巻 5 号 (2022) : 276-279., <https://doi.org/10.1541/ieejjournal.142.276>.
- 42) 九州大学応用力学研究所「R3年度水産庁事業スマート水産業推進事業のうちICTを利用した漁業技術開発事業」<https://dreams-d.riam.kyushu-u.ac.jp/>, (2023年2月4日アクセス) .
- 43) Naoki Hirose, et al., “Numerical simulation of the abrupt occurrence of strong current in the southeastern Japan Sea,” *Continental Shelf Science* 143 (2017) : 194-205., <https://doi.org/10.1016/j.csr.2016.07.005>.
- 44) Yuji Masutomi, et al., “Critical air temperature and sensitivity of the incidence of chalky rice kernels for the rice cultivar “Sai-no-kagayaki”,” *Agricultural and Forest Meteorology* 203 (2015) : 11-16., <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.11.016>.