

2.2.12 農林水産業における気候変動適応・緩和

(1) 研究開発領域の定義

農林水産業における気候変動対応、主として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、農林地や関連する施設の利用・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、ブルーカーボン生態系の利活用、漁船の電力化、品種改良、養殖技術、漁場整備、資源管理などあるが、ここでは主としてブルーカーボン生態系の利活用を通じた適応策に関する研究・技術開発を対象とする。

(2) キーワード

高温障害、水資源管理、気象予測、分布予測、機械学習、病虫害・獣害、豪雨、斜面災害、発生予測、広域複合災害、生態系を活用した適応策（EbA：Ecosystem-based adaptation）、自然を基盤とした解決策（NbS：Nature-based Solutions）、気候スマート農業、ブルーカーボン生態系、海藻・海草類、IPCC ガイドライン、CO₂吸収係数、有機炭素残存率、難分解性有機炭素、大規模海藻養殖施設、産業化

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

(農林業)

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第5次報告書で、気温上昇と干ばつ、および水資源不足と農業生産減少が、確信度の高いリスクとして挙げられた。また、農業に間接的な被害をもたらす高潮・海面上昇や、洪水などを引き起こす極端な気象現象の増加も、確信度が高いリスクとして列挙された。これらは気候変動に対する農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想されている。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、農業に関わる気候変動リスクに適応し、持続的な農業生産を確保することが必要となる。また農業生産に必要な不可欠な水資源や、農業生産を不安定化させる豪雨・洪水リスク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。

森林生態系は炭素蓄積や気候調整などの緩和機能をはじめ、様々な生態系サービスを提供する機能を有するため、気候変動の緩和と適応にとって重要な位置づけとなっている。また多様な生物の生息地も提供しているため、生物多様性の保全にとっても不可欠である。こうした森林が持つ様々な機能やサービスの活用に基づく適応策は「生態系を活用した適応策（EbA：Ecosystem-based adaptation）」と呼ばれ、人間社会の持続可能性を向上させる重要な役割が期待されている。

他方、わが国はその地理的特性から自然災害の発生しやすい国である。その中でも斜面災害（斜面崩壊、地すべり、土石流）はわ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。わが国は山地・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。過去20年間では年1,000件以上の斜面災害が発生している。農地や農村は豊かな水や土壌を求めて山麓の沖積地に立地し、森林の大部分は山地斜面に分布している。漁村や漁港も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る。このようにわが国の農林水産業は斜面災害に対して脆弱な立地条件の下で営まれており、それゆえ斜面災害の予測精度向上とそのシステム開発、人口減少に耐えるインフラの配備計画、感染症のような社会危機下での避難警戒など喫緊の課題は多い。

(水産業)

水産分野における気候変動適応に向けた研究開発としては、水産分野への気候変動影響評価に関する既存結果などを踏まえ、(1) ブルーカーボンを用いた吸収源拡大、ブルーカーボン生態系の利活用による持続可能な漁業・養殖業の推進、(2) 排出源対策としての漁船電力化、(3) 気候変動に適応可能な養殖品種・養殖技術・漁場整備手法・資源管理手法の開発(有害生物・食害種・外来種対策、高水温波浪対策)の3点が主に検討されている。

とくにブルーカーボンは、海洋生物によってCO₂が取り込まれ、海域に貯留される炭素のことを指す用語として2009年に国連環境計画が提唱した。現在、ブルーカーボンはパリ協定の目標の達成に向けた海洋分野における主要な5つのアクションの1つとして注目されている。この5つのアクションは、(1) 再生可能エネルギーの導入・拡大、(2) 海上輸送での脱炭素化推進、(3) ブルーカーボン生態系を中心とした沿岸海洋生態系の保全と再生、(4) 漁業・養殖の振興、食料源の転換、(5) 海底への人工的な炭素貯留、である。2050年までに1.5℃上昇シナリオを達成するために必要な温室効果ガス排出削減量の最大21%を、これらのアクションによって達成できると試算されている¹⁾。またこのうち「(3) ブルーカーボン」と「(4) 漁業・養殖」は、他の項目と比べると迅速に実施可能なアクションとみなされ、2030年までの主要な取り組みとしてその即効性が期待されている。

ブルーカーボンを有効な温室効果ガス吸収源として活用していくために、IPCCによる排出・吸収に係るガイドライン²⁾に掲載されている海草藻場(アマモ場など)、マングローブ林、塩生湿地の3つのブルーカーボン生態系(以後、BCEと記載)の炭素貯留技術の確立を目指す研究とその成果の社会実装が重要視されている。また、これらに海藻藻場(大型藻類など)を加えるための検討も活発に行われている。

[研究開発の動向]

(農林業)

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。

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が主な要因だが³⁾、気候変動も要因の一つと考えられている。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3度以上となった場合、米や小麦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⁾。

日本においても気候変動による農業生産への影響が顕在化している。農林水産省が毎年公表している「地

球温暖化調査レポート」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、各地で取り組まれる対策が報告されている。

こうした作物への影響に対し、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、人為的に昨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害虫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、続いて病虫獣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、発生時期や発生量の変化を的確に予測して、予測された時期に農薬などを使って適切に防除するという対策が主流となっている。

2.2

俯瞰区分と研究開発領域 環境区分

気温上昇や気候変動は、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。

(水稲生産やその生産基盤における適応策)

水稲に関しては、大気中CO₂濃度の増加が収量に及ぼす影響を評価するための研究が進められてきた。将来のCO₂の上昇が水稲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（FACE：Free-Air CO₂ Enrichment）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。

また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、米の品質への影響も重要な研究分野となっている。気候変動が米の品質に与える影響では、いずれも品質低下のリスクが高くなると予想されている。作物栽培に対して最も大きな影響を及ぼすのは夏季の高温である。7～9月の3ヶ月間の平均気温が1946年以降で最も高かった2010年には、一等米比率が全国的に低下し、北陸で43%、東海・近畿以西では40%を下回るなど、様々な被害が生じた。過去の一等米比率と気象条件の関係を経験式で表現し、九州を対象とした研究では、いずれの気候シナリオにおいても、将来の一等米比率は、1990年代に比べて、2046～2065年には28%、2081～2100年には41%も減少すると予測された^{6), 7)}。この他にも、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もある。

以上のような顕在化している日本の水稲生産に及ぼす影響に対し、様々な適応技術の開発が進められている。作付け前から出来る技術としては、高温耐性品種の開発、移植日の適切な設定、深耕などが挙げられる。

作付け後の適応策では施肥管理と水管理の効果が認められている。白未熟粒のタイプ別にみると、背白米や基部未熟粒は主に高温や窒素不足により発生する傾向がある。これらの発生率を低下させるためには、穂肥の増量が有効とされている。ただし穂肥の増量は食味の低下につながるため、極端な増量には注意する必要がある。また、掛け流し灌漑は、高温で暑くなった稲体を水で冷やす直接的な対策技術であり、乳白粒、腹白粒および胴割粒の発生が低減することが知られている。しかし、低温の用水が大量に必要となることが、導入上の課題である。水田の湛水を地表面付近で管理する飽水管理には、夜間の地温低下効果があることが確認されており、導入が容易な高温対策とされている。

作期の分散や移動、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。IPCCの第5次評価報告書では、気候変動により洪水や渇水など極端な現象の影響が及ぶことが示唆されている。日本のように農業用水を利用するためのシステムが高度かつ広域にわたって整備されている場合には、渇水時の流況への人為的な影響が無視できない。そのため、気候変動の渇水への影響を評価するには、気候変動による自然条件の変化（降水量、気温、蒸発散量、積雪融雪量、河川の流れなど）に加え、農業用水の水利施設群（取水堰からの取水、用水路による水の配分、排水路を通した還元）が河川流況に与える影響を考慮する必要がある。農業水利の水循環と自然界の水循環（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⁸⁾。また開発されたモデルを用いて現在や将来の気候シナリオに基づく水資源の予測計算を行い、気候

変動が灌漑主体流域における農業水利用に及ぼす影響を定量的に評価する研究なども行われている⁹⁾。水田地域の流域スケールの水循環の把握は、水利用の側面だけではなく、洪水緩和や被害予測の観点からも広く研究が行われている。特に主要な河川への流出源となる水田地帯での浸水は、内水氾濫によるものが多く発生しており、そのモデル化と水田地帯の排水施設整備計画への応用、下流域の洪水緩和を狙った田んぼダム（水田からの豪雨流出を人為的に抑制する技術）の現地実装、冠水による減収予測などの研究が進められている。

（斜面災害への対応）

災害大国である日本は、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で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減殺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開発を目的としている。

土石流や斜面崩壊の発生雨量、発生場所についてはこれまで理論的な検討がなされている。近年は、現在の地盤情報と過去の災害履歴から将来の発生位置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、衛星写真やレーザーデータを用いたGIS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。これらを用いることで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り高精度の予測（効率 50%、解像度 数cm）が可能となっている¹⁰⁾。

わが国独特の研究として斜面森林災害がある。1990年代までは森林管理による樹木根系の斜面崩壊防止について多くの研究がなされ、現在はほぼ完了している。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（たとえば九州の日田・朝倉地方で発生した災害）。単なる浮遊流木ではなく、斜面崩壊から土石流、流木流と連鎖的に発達する災害で、九州から北海道まで広い範囲で発生し、気候変動下で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・砂防構造物の設計・配置の研究では数値計算や模型実験から新規な知見は得られず、既存技術の現地適用が主たる動きである。また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るため文理融合型研究の成果が待たれるが、研究方法の模索がしばらく続くと見られている。

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。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。特にカリフォルニア地域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いる。オセアニアでも同様だが、加えて長期にわたる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）では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、まとまった研究は見られていない。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）も問題となっている。

（農林業におけるEbA）

生物多様性および生態系サービスを活用した農林業技術の開発への期待が世界的に高まっている¹¹⁾。こうした農林業における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（Eco-DRR）」などととも、より広い概念である「自然を基盤とした解決

2.2

俯瞰区分と研究開発領域 環境区分

策 (Nature-based Solutions)」の一部として位置づけられている^{12), 13)}。研究開発は発展途上だが、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（微生物やミミズなど）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し多様な品種を作り出すことで、霜、干ばつや病気などのストレスの影響を軽減させることもEbAの一つと認識されている。

他方、国内ではEbAの視点を取り入れた農林業技術の研究は少なく、発展途上段階にある。ただ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は進められている。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。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温室効果ガス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。

（水産業におけるEbA：ブルーカーボン）

国連環境計画（UNEP）が中心となって作成した「ブルーカーボン・レポート」が2009年に公開されて以降の10年間では、天然（自然海岸）のブルーカーボン生態系における有機炭素貯留プロセスの解明に関する研究、および現場での有機炭素貯留量・貯留速度の評価に関する研究が、国内外で実施されてきた¹⁶⁾。特に、海草藻場・マングローブ林・塩生湿地の3つのBCEでは、各生態系での有機炭素貯留の主要プロセスである堆積作用を中心に、海底土壌（堆積物）への有機炭素貯留をベースとした地球規模での試算が多く

なされた。

2013年にIPCCから排出・吸収源インベントリへの評価手法の追補版として湿地ガイドラインが公開されてからは、その手法（単位面積当たりのCO₂吸収量＝CO₂吸収係数〔ブルーカーボン生態系の一次生産速度の把握〕×残存率〔生産された有機炭素のうち長期貯留される割合〕）に則り、各パラメータについて各国地域での比較整理が行われている。これらの研究で試算された値から、地球規模の炭素循環では、人類起源のCO₂年間排出量約94億tのうち、陸域生態系が隔離するCO₂量が23億t、海洋生態系が隔離するCO₂量が24億tあることが明らかとなった。またBCEを中心とする浅海域は、陸域生態系が隔離したCO₂量のうちの9億t、海洋生態系が隔離したCO₂量のうちの11億tの計20億tを隔離していることが分かってきた¹⁷⁾。

海外では、BCEのうち同じ生態系を対象とする研究者がIPCCの動きに合わせた比較研究を実施し、世界各地の値を整理する事例が多い¹⁸⁾。BCEを対象とする研究者数はさほど多くないため、各国が競って研究開発を進めるというよりは、グループを作っての国際共同研究が進められている。その中心となっているのが欧米の研究者を中心とした「Blue carbon initiative」である。対象地域としては、自国のインベントリにBCEを含めている米国や豪州、広大なBCEを有するラテンアメリカ、東南アジア諸国が中心である。

海藻藻場（大型藻類など）については、従来のBCEに加えてIPCC準拠の吸収源としてガイドラインに正式掲載しようとする動きが活発である。特に海藻類が広域に分布する北欧域において、わが国での海藻類の評価と同様に、海藻類のCO₂吸収源としての有効性を示す研究成果が報告されている^{19)、20)}。その北欧グループがBlue carbon Initiativeでも中心になり、COP（気候変動枠組条約締約国会議）の補助機関会合であるSBSTA（科学上及び技術上の助言に関する補助機関）で、海藻藻場の追加に関する議論を行っている。更にUN Oceans関連のハイレベルパネルの報告書作成公開（2019年9月）にも関わっており、海藻養殖のCO₂吸収源としての試算値を示している¹⁾。なおこの報告書では、水産資源のタンパク源としての利用促進を緩和策に位置付けており、それを受けて海藻藻場の水産資源生産の場としての役割にも期待が持たれ始めた。CO₂吸収源としてだけでなく、様々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藻場のコベネフィットを統合的に評価・活用する方向へ研究が進みつつある²¹⁾。

こうした盛り上がり一方で、海藻藻場の減少が世界的に問題視されている。わが国で普遍的にみられるようになった気候変動に起因する藻場の広範囲消失（磯焼け現象）は、今や世界各地の温帯域・亜熱帯域の境界域でも報告されるようになった。特に地中海では熱帯性魚類の出現による磯焼けの進行により、重要な海藻藻場の消失が深刻化している。そのため、世界各地で藻場の監視モニタリング、維持回復、新しい造成（養殖含む）に向けた動きが出始めている。特にIPCCガイドラインに基づくインベントリの算定では活動量（人の活動による吸収源面積の増減）に関する情報が必要であるため、藻場の監視モニタリング技術の確立が喫緊の課題になっている。

国内の研究動向としては、2009年度から2013年度にかけて実施された水産庁の研究事業「藻場・干拓の炭素吸収源評価と吸収機能向上技術の開発」において、IPCCガイドラインに記載のある海草藻場に加え、大型海藻藻場によるCO₂隔離量（吸収係数）に関する評価が実施された。隔離量のみの評価だが、海藻類によるCO₂隔離量は陸域の森林をはるかに上回ったため、特に大型褐藻類のCO₂吸収源としての可能性が注目され始めるきっかけとなった。大型褐藻（ガラモ類）の残存率が予想より高かったという海外での報告とも相まって、以降は大型海藻類による隔離・貯留の評価とそのプロセス解明に研究がシフトした。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

(農林業)

• 水稻に対する温暖化影響の予測

冷涼な岩手県雫石市および温暖な茨城県つくばみらい市で行われたFACE実験では、高い大気CO₂濃度に対するコメ増収効果は、年によって0～21%と異なるが、平均で11%との結果が得られた。外観品質への影響も見られた。また水稻の多収品種は一般の穀物に比べてシンク容量（籾数×籾重）が大きく、大気CO₂濃度の上昇による収量の増加割合が大きいことが明らかとなった²²⁾。こうしたことを受けて、将来の多収化に向けてシンク容量を拡大することが重要な方向性として期待されている。

高温による影響については全国10km四方の解像度での推計が行われている。将来の気候条件では現在より全国平均のコメ収量は増加すると同時に、登熟期に高温に遭遇するコメの割合も増加し、品質の高いコメの割合及び量が減少する可能性が指摘されている。地域別にみた場合、品質の高いコメの収量は2031～2050年で関東・北陸以西の平野部で減少、21世紀末には東北のほぼ全域や中部以西の中山間地などでも減少に転じる可能性が示された²³⁾。

• 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、土地起伏など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およびその配信システム「農研機構メッシュ農業気象データシステム」が農研機構によって開発された。また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最小化でき、気候変動への適応策となる。短期間の洪水の予測は広く行われており、近年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も広く整備されてきた。また気象庁の季節予報では、数値予測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²⁴⁾。

• 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⁸⁾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²⁵⁾。

• 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（Hydrologica 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、わ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。

• 気候変動と人口減少を考慮したニホンジカ（シカ）の生息域予測

著しく増加している国内のシカが、食害や踏圧によって森林生態系および生物多様性に甚大な被害を及ぼしていることが近年問題となっている。今後の人口減少と温暖化による少雪化はシカの生存にとって更に有利に働くと考えられている。これらを背景に、シカの分布予測モデルの構築と、過去から現在、将来にわたるシカの潜在生育域の推定が行われている。

• マツ枯れ被害リスク域に関する気候変動影響評価

マツ材線虫病によるマツ枯れ被害は北海道を除く46都府県の低地のマツ林を中心に広がっているが、今後の温暖化によって高標高地や寒冷地のマツ林も被害を受ける可能性があるとしており、現在および将来の気候条件下におけるマツ枯れの危険度マップが作成された。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。そのため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域の予測モデルも構築されている。

• 人工林への気候変動影響評価

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。例えばスギでは、年降水量が少ない地域で、将来、スギ人工林の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。また近年のプロセスモデルによるスギの一次生産量予測シミュレーションでは気候変動による純一次生産（NPP）の上昇は見込めないという予測もなされている。

• 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。このモデルでは、トドマツ人工林の経営収支は、十勝や釧路中部で高く、日本海側や宗谷、根室などで低いと予測された。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対し、単純な見かけの相関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⁾。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²⁹⁾。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や実態解明の必要性も指摘されている³⁰⁾。

• 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。

(水産業)

• 大型海藻類のバイオマス利用および新しい吸収源創生

農林水産研究推進事業委託プロジェクト研究(2020年度～)において、海藻類が成長に伴って排出する難分解性溶存有機炭素(溶存態有機炭素、懸濁態有機炭素)の存在が明らかになり、ブルーカーボン生態系における有機炭素貯留(残存率)の新しいプロセスとして注目され始めている³¹⁾。仮にこの新しい残存率プロセスが吸収源評価に加わると、食料生産として消費されてしまう海藻養殖もCO₂吸収源として機能する可能性が生じる。そのため、バイオマス利用への展開と相まって、大規模海藻養殖プラントや人工藻場など新しい吸収源の創生、化石燃料由来製品に代替する新素材開発や機能成分の探索などに関する技術開発が当面の喫緊課題とされている。なおこれらを発展させるには産業化に対応できるだけの原材料確保が必要となるが、熱帯雨林より早い速度で減少している自然海岸のBCEから原材料を採取することは回避すべきである。原材料の安定供給の観点から、海草・海藻養殖を大規模実施できる海上養殖プラントの構築およびその産業化のための研究開発も求められている。

• 大規模海藻養殖施設の構築

我が国の海藻養殖は静穏な内海性浅海域で実施され、その目的は食料生産であったため、食用海藻種の

みを対象として技術開発が行われていた。今後、CO₂吸収源対策として実施すべき海藻養殖は、食用対象種だけでなく、CO₂吸収源としての効果の高い海藻類を活用していくとともに、面積の限られた内海性浅海域ではなく、沿岸域や沖合域での海藻養殖を可能とする技術開発が必要となると考えられている。既に欧米では数年前から国主導で研究開発が開始しており、再生可能エネルギー施設（海上風力発電施設）との併用などが試験されている。

・ブルーカーボンの活用に向けた国内検討の活発化

国土交通省は令和元年6月に「地球温暖化防止に貢献するブルーカーボンの役割に関する検討会」を立上げ、ブルーカーボンの活用に向けた具体的な検討を開始した。また「ジャパンプルーエコノミー技術研究組合」が2020年に設立された（国土交通省認可）。ブルーカーボンを主軸とした技術研究組合であり、ブルーカーボン生態系の環境価値の定量的評価（科学的）、新たな資金メカニズム導入（経済的）、環境価値の創造と増殖（技術的）、社会的コンセンサス形成（社会的）とその連環構築を目標にした研究活動を推進するとしている。更に、2025年に海藻藻場（大型藻類など）をIPCC準拠の吸収源として採用することを目指したUN Oceansほかの動きに合わせ、国内でも正式に日本国のインベントリに加えるべく、海藻藻場（大型藻類など）のCO₂吸収源評価手法の確立とその手法による国内初の全国評価が実施されようとしている³²⁾。

〔注目すべき国内外のプロジェクト〕

・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」

我が国の気候変動適応を支援するため、影響予測・適応評価に関する最新の科学的情報の創出を目標として5年間（2020～2024年度）の予定で実施中。同プロジェクトにより（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、といったアウトカムの実現を目指している。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。

・文部科学省「統合的気候モデル高度化研究プログラム」（2017～2021年度）

気候変動メカニズムの解明、気候変動予測モデルの高度化や気候変動がもたらすハザードの研究などに取り組むとともに、高度化した気候変動予測データセットの整備に取り組むプログラム。このうち領域テーマD「統合的ハザード予測」（京都大学防災研究所）では、高精度化された気候変動予測情報を受け取るハザードモデルについて、モデルの高度化、高解像度化、日本全域へのハザードモデルの最適化などの研究開発を行うとしている。また開発されたハザードモデルをもとに、台風や豪雨などの極端現象などに関するハザードについての頻度や最大クラスの強度評価も含めた将来変化予測、あるいは自然災害や水資源を対象に、時系列を考慮して現在から徐々に進行していくハザードの将来変化の時系列についての研究を実施している。

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

世界の作物モデル（農作物の収量予測モデル）を統一基準で比較して予測精度の向上に結びつける国際プロジェクト。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中。

- **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。

- **令和2年度農林水産研究推進事業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」（2020～2024年度）**

我が国の温室効果ガスインベントリ報告書にブルーカーボン生態系（特に藻場・干潟）を登録するための評価手法を確立させると同時に、藻場を維持・回復・形成拡大するための技術開発を実施している。

- **JST SATREPS「コーラルトライアングルにおけるブルーカーボン生態系とその多面的サービスの包括的評価と保全戦略」（2017～2021年度）**

フィリピン・インドネシア海域でのブルーカーボンの調査と活用に向けた研究・指導を実施している。

- **Blue Carbon Initiative**

BCEについての国際的な共同イニシアチブ。Blue carbon scientific working groupとBlue carbon policy working groupの2つのグループからなり、両者が連携して活動を行っている。活動事例にはインドネシア、ラテンアメリカ地域、米国、豪州でのBCEを対象としたCO₂吸収源機能の評価、BCEの保全活動、ブルーカーボン活用に向けた政策研究の実施、UNFCCC-SBSTAでのブルーカーボンワークショップの開催などがある。

- **Oceans 2050「Seaweed Carbon Farming」（2020年～）**

海洋の保全に取り組む国際的なプラットフォームであるOceans 2050が開始した世界各地の海藻養殖海域のブルーカーボン貯留量の計測と推定を行う研究プロジェクト。日本からは先述の農林水産研究推進事業委託プロジェクト研究が連携する形で参加予定である。

- **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の開発を進める、米国エネルギー省傘下のARPA-Eによるプロジェクト。バイオ燃料による化石燃料削減を最終目的とする。

• EU FP7「Wier & Wind Project」(2019～2022年)

2012年～2015年にバイオマス向けの大規模海藻養殖技術の開発を目指したプロジェクト「AT-SEA: Advanced Textiles for Open Sea Biomass Cultivation」が実施された。これに続き現在は沖合風力発電施設を利用した海藻養殖技術の構築が進められている。同プロジェクトでは2ha程度の海藻養殖面積を目指している。

(5) 科学技術的課題

(農林業)

気候変動が収量に及ぼす影響の予測は、社会シナリオとそれに基づく気候予測、および作物の収量予測モデルを組み合わせで行われるため、予測にはいくつもの不確実性が含まれる。これまでの影響予測の不確実性評価では、主に社会シナリオや気候予測による不確実性が取り上げられてきたが、作物の収量予測モデル自体は十分に検討されていなかった。そのため、異なる作物収量予測モデルによる予測結果を相互比較し、収量予測モデルの不確実性を評価するとともに、精度を向上させる国際的な取り組み(AgMIP)が始まった。今後に向けては、FACE実験などで得られた知見をこうしたモデルに取り入れ、精度を向上させることが課題となっている。

水稻の品質予測モデルは、これまで主に気象要因のみを指標として開発が進められてきた。しかし品質には栽培管理や品種といった気象以外の多くの要因が関係するため、気象条件に基づく経験式のみでその変動を予測するのは困難だった。近年、栽培管理などを取り入れたモデルも開発されており、今後、適応技術も考慮した予測に適用される見込みとされている。

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っている。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。

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、そのようにして行われる季節予報を用いて、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。また季節予報の渇水(水資源)予測への応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。

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ている。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環境が変化し、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してされている。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、基盤となる土壤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になる。

2.2

俯瞰区分と研究開発領域 環境区分

病害虫に関する研究としては、気温上昇と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などが今後取り組むべき課題として認識されている。

森林分野では、気候変動緩和策の代表例である植林やバイオ作物栽培と、適応策ともいえる生物多様性の保全との間にはトレードオフが存在するため、最適な土地利用管理や配分の設計が求められる。シカ被害、マツ枯れ、ナラ枯れなどの病虫獣害や、人口減少による森林の維持管理機能の低下などの諸問題も同時に考慮した総合的な最適解を示すことが期待されており、問題解決型の研究開発が必要とされている。

ドローン画像によって樹木の種類を判定して森林モニタリングに活用する動きがあり、効率的かつ省力的な森林モニタリング技術として期待されている。しかし現時点では高精度なドローン画像であっても全ての樹木の判定は困難であるなど、AIによる完全な自動判読の実現にはまだ課題が残されている状況である。季節を変えてドローンを同じ場所で複数回飛ばし、同時に現地調査や目視判読と重ねることを繰り返して教師データとし、AIに学習させるといった方策が必要と考えられている。

ナラ枯れ（ブナ科樹木萎凋枯死被害）は、1980年代から日本海側の地域を中心に報告されていた。近年では、関東地方の多数地点や九州北部からも被害が報告されている。かつては里山林で薪炭が定期的に伐採されていたが、薪炭林が以前のように利用されなくなり、里山のブナ科樹木が高齢化、大径化したことが原因の一つと言われている。病原菌を運ぶカシノナガキムイムシの越冬後の生存には冬季の積雪や低温が影響を与えるとされているため、温暖化が進むと被害地域がより北方や高標高地域においても発生する可能性があるかと懸念されている。特に、ブナ科樹木の中でもナラ属のミズナラは被害を受けやすいとされ、ミズナラの天然林が広がる北海道にナラ枯れ被害が拡大しないように注意を払い、検討を進めるべきと認識されている。

国内向けでは台風や線状降水帯に伴う局地豪雨の継続による斜面災害が今後の課題となっている。これに対して短期的には流域面積100km²程度の狭い地域で地形的に危険な斜面を抽出する方法の開発が必要となる。中長期的には局地豪雨予測と豪雨時の斜面内ポテンシャル上昇による崩壊メカニズムの解明が課題となる。また地震と複数の豪雨の連鎖による複合型斜面災害も課題となっている。短期的には震動と地下水上昇に伴う斜面の脆弱性（劣化）の進行メカニズム解明が必要とされ、中長期的には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が必要と考えられている。

（農林業におけるEbA）

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、食料安全保障など）は個別に研究されることが多く、目標間のトレードオフやシナジーの実態把握、あるいは解決については、知見がまだ十分に蓄積されていない。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では限界があり、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となる。これに取り組むためにはあらゆる分野の科学者がこの問題に関与し、気候変動の解決策を見つけるために協力していくことが必要になる^{12), 13)}。

（水産業）

CO₂吸収源を目的とする海藻養殖の実現のためには、食用外の種や産業利用が可能な種を対象とした大規模な養殖プラントの構築が必要になる。海草・海藻類を原料として産業利用していく上でも安定的な供給体

制の構築は不可欠となる。食料生産に関してはブルーミート（牛などのレッドミートと対比させて海由来の動物性たんぱく質をこのように呼ぶ）の食料利用がCO₂排出削減対策としても有力視されている。ただ現状では産業利用可能な種は選定されていない。また場所の問題に関し、内海性浅海域は航路や食料生産の場としてすでに多くの面積が占有されている。限られた浅海域を取り合うのではなく、広域な面積を確保できる沿岸沖合域での養殖展開が検討される必要があり、そのための技術開発が求められている。既に欧米では技術開発が始まりつつあるが、国内では未着手の状態である。

海藻・海草類が成育中に排出する溶存性有機炭素（DOC：Dissolved Organic Carbon）に難分解性有機炭素（RDOC：Refractory DOC）が含まれることが解明され³¹⁾、有機炭素貯留（残存率）の新しいプロセスとして期待されている。ただ現状はその存在が解明されたのみで、RDOCを構成する物質や成分については明らかにされていない。RDOCとして機能する成分の解明や残存率プロセスの強化に資する研究開発が必要とされている。また大規模養殖により増やした海藻を深海へと輸送するプロセスについても、技術開発や監視システムの開発など各種検討が必要と認識されている。

海草・海藻類のバイオマス利用に向けた新素材・機能成分の探索などは殆ど未着手に近い状況にある。加工過程の少ない（CO₂フットプリントのできるだけ小さい）ものが求められている。バイオエタノール生成に向けてグルコース含量の高い海藻類の探索・培養が実施されたこともあるが、実用化レベルには達していない。

CO₂吸収源の算定には活動量（人の活動による吸収源面積の増減）の把握が必須となるため、衛星などを用いた広域の藻場監視モニタリング体制を構築する必要がある。

海草・海藻藻場（海藻養殖含む）の減少を国内外で引き起こしている要因として、海水温上昇による海草・海藻類の生理活性の低下や、温暖化に伴い北上する植食性動物による食害がある。なかでも藻場消失のトリガーとなっているのが食害の多発であり、特に、南方から移入する植食性魚類に対しては、現時点で十分な対策手段がない。この植食性魚類の殆どは食用外であるため、漁獲されることがなく高密度状態が維持されている。そのためこれらの食害を防除し、藻場を確実に維持するための技術開発が早急の課題となっている。

ブルーカーボン生態系は内海・内湾浅海域に分布し、特にわが国ではその多くが漁場として漁業権管理されている。そのため漁業との統合化を可能にする政策や管理方策に関する研究（藻場管理・監視・漁業によるCO₂貯留プロセスの創出、CO₂緩和による漁業の創出など）も必要と認識されている。

（6）その他の課題

（農林業）

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・軽減など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へと落とし込むための検討は端緒についたところであり、今後の課題と認識されている。

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、掛け流し灌漑など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。

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が農林業の気候変動適応策としても課題となる。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も変化している。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、改修などの長期的な適応策を講じていく必要もある。

若手人材の不足が問題視されている。森林・林業の分野でも研究分野が細分化されて多岐にわたっており、その中で森林・林業への気候変動影響研究に取り組む研究者の数は限られている。大学で当該分野を専攻とする教官も少ないため、若い世代が育ちにくい状況にある。加えて近年は、博士課程に進学する日本人学生数が少なく、将来を担う若手研究者の不足が明白な状況がある。森林科学全体の国際競争力を維持する観点からは、こうした課題の解決に向けた方策が必要とされている。

（農林業におけるEbA）

EbAの実践には、ファンドの獲得、土地利用におけるコンフリクト、地域コミュニティの理解や知識のギャップ（例：EbAの便益評価）などにおいて困難があるとされている¹⁵⁾。その他の工学的手法（グレイインフラ）などとの組合せが必要な場合も多い。現状では気候変動対策に関連するファンドの中でもEbAに関するものはごく一部に留まるという。

（水産業）

日本には海草・海藻利用文化と藻場の保全管理の歴史があり、数百年以上も続く漁場整備や漁業権範囲内での地域的な取り組みなどがある。食料生産としての海藻養殖技術も世界有数のレベルにある。そのためブルーカーボンの活用は国際的にイニシアチブを獲得しうる分野だが、藻場の産業活用は漁業の範囲内での議論が殆どで、産業としては小規模であり、食料生産以外の産業化への取り組みは国際的にみて遅延気味な状況にある。小規模産業であるがために他分野の産業による海岸開発により藻場が消失してきた経緯もある。今後はBCEの維持・拡大に向けた社会的コンセンサスを得るための活動が必要と認識されている。その一環としてBCEを対象とする産業（ブルーエコノミー）の推進機運も盛り上がっている。一方、BCEの多くが沿岸の漁業権海域内にあり、漁業権との調整による成長産業化への仕組み構築が課題となっている。

海外では、バイオマス利用に向けた大規模養殖など、産官学連携による産業化推進と気候変動対策の両立に向けた取り組みが始まっている。一方で我が国の養殖産業は食料生産の範囲内にとどまっている。しかしノリ・コンブ類も海外産が多くなり、ワカメは国内消費の8割が中国・韓国などの養殖生産物に占められている。国内養殖産業の維持・発展のためには、今後は食料としての利用だけでなく、気候変動対策としての海藻養殖産業を拡大していくことが必要な方策の一つと考えられている。またその推進に向けて、国主導での国内養殖資本の強化や技術開発への投資の増加が課題と考えられている。

(7) 国際比較

・農林業分野

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。 ● 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基礎的な影響の検討が進んでいる。 ● 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。 ● 農林業における気候変動の影響評価や将来予測が進んでいる。また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・緩和策の研究プロジェクトなどが進んでいるが、EbA の観点からの研究はまだ限定的。 ● 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が進んでいるが、近年は発生予測の研究に注力されている。
	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、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。 ● 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 AI システムも公表されている。
米国	基礎研究	◎	↗	● 農務省の農業研究所 (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。

2.2

俯瞰区分と研究開発領域
環境区分

				●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。
	応用研究・開発	◎	↗	●USDA-ARSでは、農地灌漑量や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（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。
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。 ●Horizen2020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ており、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。 【各国】 ●フランス国立農業・食糧・環境研究所INRAE（National Research Institute for Agriculture, Food and Environment）が農地からの温暖化ガス放出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。 ●英国では生態・水文研究所CEH（Centre for Ecology and Hydrology）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。 ●ドイツ政府環境省（IKI-BMUB）がEbAプロジェクトに130万ユーロを資金提供。フランスではアグロフォレストリーなどの研究が進む。英国では生物多様性や生態系サービス関連の研究が盛ん。 ●病虫害に関する研究でも植物・害虫・天敵の3者の相互作用の解析やモデリング、害虫の分布予測、害虫の温度反応の推定など多様な研究を実施。

	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とるよう促している。「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。 【各国】 ●フランス国立農業・食糧・環境研究所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存在感を示し、国際的な研究イニシアティブHydrologic Ensemble Prediction Experiment (HEPEX) などを通して精力的に活動。 ●ドイツでは大学や連邦政府が連携しEbAのガイドブックなどを出版。フランスでは経済社会環境評議会が生物多様性や生態系サービスを考慮した気候変動適応への意見書を策定。 ●英国は「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組みを推進。
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。 ●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。政策提言も行う。 ●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。
韓国	基礎研究	△	→	●限定的だがモミ属や常緑広葉樹など韓国の天然林構成種に関する気候制限要因などに関する研究成果がある。 ●病害虫の分布拡大予測に関する研究がある。 ●Korean Environmental 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	△	→	●森林生態系に対する気候変動適応策の研究はあまり進んでいない。 ●国連の方針に沿って生物多様性・生態系の保全を含む気候変動への適応策の策定と主流化を進めているが、国際的な発信は多くない。
豪州	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。 ●病害虫の薬剤抵抗性の進化と気候変動の関連性についての研究が行われている。
	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。

・水産業分野 (ブルーカーボン)

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	○	→	●水産庁を中心に漁場整備や磯焼け対策などで研究開発の蓄積がある。 ●利用する海藻の種類や藻場の生物学的知見は多い。ブルーカーボン生態系の現状把握を全国レベルで実施・評価した例は日本のみ。 ●インベントリ報告書への登録に向けたブルーカーボン評価手法の確立に向けた研究が始まっている。
	応用研究・開発	△	↗	●NEDOや農林水産技術会議においてブルーカーボンの推進に向けた検討が始まっている。
米国	基礎研究	◎	↗	●海藻のバイオ燃料開発を含む、海藻バイオマス産業の構築に向けた研究プロジェクトが進行中。 ●USGS・NASAによる塩性湿地とマングローブ林のモニタリングシステム構築の動きがある。
	応用研究・開発	○	↗	●海藻養殖産業への参入を本格化。 ●全米の海岸を対象にブルーカーボンの総合評価を省庁連携で実施。
欧州	基礎研究	◎	↗	【北海～バルト海】 ●英国・オランダ・ベルギー・スウェーデン・フィンランド・フランス・ドイツ・デンマークなどの共同で、海藻類（ホンダワラ類）がCO₂吸収源として機能することを初めて明らかにした。これ以降、海藻ブルーカーボン研究の中心的研究チームとして北海～バルト海を中心に成果を上げている。 【地中海】 ●イタリア・フランス・スペインでは日本と同様に温暖化による藻場減少（磯焼け）が顕在化するようになり、その対策に向けた藻場と植食性魚類の基礎研究が増加傾向。
	応用研究・開発	○	↗	【北海～バルト海】 ●Blue Carbon Initiativeにおいて、英国・オランダ・ベルギー・スウェーデン・フィンランド・フランス・ドイツ・デンマークなどからなるKrause-Jensen博士らの研究チームが中心となり、海藻類をIPCC湿地ガイドラインへ加入させる動きを展開中。 ●バイオ燃料としての利用に向けたブルーエコノミー関連研究を開始。
中国	基礎研究	△	↗	●2018年に中国国家海洋局が協働への意思を示し、Blue Carbon Initiative会議を誘致。 ●中国国内のブルーカーボン生態系の評価、例えば中国の全沿岸の海底土壌中のブルーカーボン分布を調査。
	応用研究・開発	—	→	●特段の情報なし。
韓国	基礎研究	—	→	●特段の情報なし。しかし沿岸の海藻類の分布調査をBlue carbon研究と位置付けていたり、水産業の観点から海藻養殖は盛んであり磯焼け対策なども成功例が多いとの情報がある。
	応用研究・開発	—	→	●特段の情報なし。
その他の国・地域	基礎研究	○	→	【豪州】 ●ブルーカーボンをNDCの対象にすべく、各大学研究機関（特に西オーストラリア大、エディスコーワン大）がBlue Carbon Initiativeと協働で様々な基礎研究を実施。 【インドネシア】 ●欧米の研究者の多くが東南アジアに入り、研究を実施。

	応用研究・開発	○	↗	【豪州】 ●ブルーカーボンをNDCの対象とし算定を開始。 【インドネシア】 ●プラスチックに代わる海藻由来の包装紙など、バイオマス利用が民間主体で始まっている。
--	---------	---	---	---

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本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

◎：特に顕著な活動・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 ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・気候変動観測（環境・エネ分野 2.2.1）
- ・気候変動予測（環境・エネ分野 2.2.2）
- ・生態系・生物多様性の観測・評価・予測（環境・エネ分野 2.2.8）
- ・社会-生態システムの評価・予測（環境・エネ分野 2.2.9）
- ・植物・農業（ライフ・臨床医学分野 2.2.4）
- ・水産（ライフ・臨床医学分野 2.2.6）
- ・畜産（ライフ・臨床医学分野 2.2.7）
- ・林業（ライフ・臨床医学分野 2.2.8）

参考・引用文献

- 1) O. Hoegh-Guldberg et al., “The ocean as a solution to climate change : five opportunities for action”, High Level Panel for a Sustainable Ocean Economy, http://oceanpanel.org/sites/default/files/2019-10/HLP_Report_Ocean_Solution_Climate_Change_final.pdf (2021年1月18日アクセス)
- 2) T. Hiraishi et al. (eds.), “2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories : Wetlands”, IPCC, https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/Wetlands_Supplement_Entire_Report.pdf (2021年1月18日アクセス)
- 3) N. 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, doi: 10.1016/j.fcr.2010.07.012
- 4) D. B. Lobell, W. Schlenker and J. Costa-Roberts, “Climate trends and global crop production since 1980” *Science* 333, no. 6042 (2011) : 616-620, doi : 10.1126/science.1204531
- 5) T. Iizumi et al., “Responses of crop yield growth to global temperature and socio-economic changes”, *Scientific Reports* 7 (2017) : 7800, doi : 10.1038/s41598-017-08214-4
- 6) 横沢正幸, 飯泉仁之直, 岡田将誌, 「気候変化がわが国におけるコメ収量変動に及ぼす影響の広域評価」『地球環境』14巻 (2009) : 199-206, <http://www.airies.or.jp/attach.php/6a6f75726e616c5f3>

1342d326a706e/save/0/0/14_2-10.pdf (2021年1月18日アクセス)

- 7) 農林水産省「平成22年度高温適応技術レポート」, https://www.maff.go.jp/j/pr/annual/pdf/h22_tekiou_gijyutu_report.pdf (2021年1月18日アクセス)
- 8) 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』277巻 (2012) : 9-19, <https://ci.nii.ac.jp/naid/130004555182> (2021年1月18日アクセス)
- 9) 工藤亮治 他, 「気候変動が灌漑主体流域における農業水利用に与える影響の定量的評価法」『農業農村工学会論文集』80巻1号 (2012) : 31-42, doi : 10.11408/jsidre.80.31
- 10) M. Kasai and T. Yamada, "Topographic effects on frequency-size distribution of landslides triggered by the Hokkaido Eastern Iwate Earthquake in 2018", *Earth, Planets and Space* 71 (2019) : 89, doi : 10.1186/s40623-019-1069-8
- 11) C. Kremen and A. M. Merenlender, "Landscapes that work for biodiversity and people", *Science* 362, no. 6412 (2018) : eaau6020, doi : 10.1126/science.aau6020
- 12) N. Seddon et al., "Understanding the value and limits of nature-based solutions to climate change and other global challenges", *Philosophical Transactions of the Royal Society Lond. B* 375, no. 1794 (2020) : 20190120, doi : 10.1098/rstb.2019.0120
- 13) N. Seddon et al., "Global recognition of the importance of nature-based solutions to the impacts of climate change", *Global Sustainability* 3 (2020) : 1-12, doi : 10.1017/sus.2020.8
- 14) A. Juergenliemk-Avagyan, N. L. Nyman and T. Wong, "National Adaptation Plans-An entry point for ecosystem-based adaptation", *FAO briefing note* (2020) : 1-12, <http://www.fao.org/3/ca9541en/ca9541en.pdf> (2021年1月18日アクセス)
- 15) H. Reid et al., Is ecosystem-based adaptation effective? Perceptions and lessons learned from 13 project sites, *IIED Research Report* (London : IIED, 2019) , <https://pubs.iied.org/17651IIED/> (2021年1月18日アクセス)
- 16) 堀 正和, 桑江朝比呂 編, 『ブルーカーボン-浅海におけるCO₂隔離・貯留とその活用』(東京 : 地人書館, 2017) , <http://www.chijinshokan.co.jp/Books/ISBN978-4-8052-0909-7.htm> (2021年1月18日アクセス)
- 17) T. Kuwae and M. Hori, "The future of Blue carbon : addressing global environmental issues", In Kuwae T, Hori M (eds) *Blue carbon in shallow coastal ecosystems : carbon dynamics, policy and implementation* (Singapore : Springer, 2019) : 347-373, doi : 10.1007/978-981-13-1295-3_13
- 18) J. Fourqurean et al., "Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock", *Nature Geosci.* 5, no. 7 (2012) : 505-509, doi : 10.1038/ngeo1477
- 19) D. Krause-Jensen and C. Duarte, "Substantial role of macroalgae in marine carbon sequestration", *Nature Geosci.* 9, no. 10 (2010) : 737-742, doi : 10.1038/ngeo2790
- 20) A. Ortega et al., "Important contribution of macroalgae to oceanic carbon sequestration", *Nature Geosci.* 12, no. 9 (2019) : 748-754, doi : 10.1038/s41561-019-0421-8
- 21) The European Commission's science and knowledge service (EU SCIENCE HUB) , "2020 Blue Economy Report : blue sectors contribute to the recovery and pave way for EU green

2.2

俯瞰区分と研究開発領域

- deal”, EU, <https://ec.europa.eu/jrc/en/news/2020-blue-economy-report-blue-sectors-contribute-recovery-and-pave-way-eu-green-deal> (2021年1月18日アクセス)。
- 22) H. Nakano et al., “Quantitative trait loci for large sink capacity enhance rice grain yield under free-air CO₂ enrichment conditions”, *Scientific Reports* 7, no. 1 (2017) : 1-10, doi : 10.1038/s41598-017-01690-8
- 23) Y. Ishigooka et al., “Large-scale evaluation of the effects of adaptation to climate change by shifting transplanting date on rice production and quality in Japan”, *Journal of Agricultural Meteorology* 73, no. 4 (2017) : 156-173, doi : 10.2480/agrmet.D-16-00024
- 24) Y. Takaya et al., “Japan Meteorological Agency/Meteorological Research Institute-Coupled Prediction System version 1 (JMA/MRI-CPS1) for operational sea-sonal forecasting”, *Clim. Dyn.* 48 (2017) : 313–333, doi : 10.1007/s00382-016-3076-9
- 25) R. Kudo, T. Yoshida and T. 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, doi : 10.3178/hrl.11.31
- 26) B. Fua et al., “A review of catchment-scale water quality and erosion models and a synthesis of future prospects”, *Environmental Modelling and Software* 114 (2019) : 75–97, doi : 10.1016/j.envsoft.2018.12.008
- 27) 津山幾太郎, 嶋瀬拓也, 石橋聡, 「トドマツ人工林伐採後の施行選択」『北の森だより』21巻 (2019) : 10-11, https://www.ffpri.affrc.go.jp/hkd/research/documents/kitanomori_vol21_hp.pdf (2021年1月18日アクセス)
- 28) 山村光司, 「地球温暖化が我が国の病虫害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, http://www.jppa.or.jp/shuppan/images-txt/2020/2020_0605.pdf (2021年1月18日アクセス)
- 29) J. L. Maino, P. A. Umina and A. A. Hoffman “Climate contributes to the evolution of pesticide resistance”, *Global Ecology and Biogeography* 27, no. 2 (2018) : 223-232, doi : 10.1111/geb.12692
- 30) F. Chidawanyika, P. Mudavanhu and C. 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, doi : 10.3389/fevo.2019.00080
- 31) K. Watanabe et al., “Macroalgal metabolism and lateral carbon flows can create significant carbon sinks”, *Biogeosciences* 17, no. 9 (2020) : 2425-2440, doi : 10.5194/bg-17-2425-2020
- 32) 農林水産技術会議 脱炭素・環境対応プロジェクト「農林水産分野における炭素吸収源対策技術の開発, 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 (R2～R6)」『農林水産省』, <https://www.affrc.maff.go.jp/docs/project/seika/2020/attach/pdf/seika2020-2.pdf> (2021年1月18日アクセス)