

2.2.4 植物・農業

(1) 研究開発領域の定義

圃場環境の変化が作物に与える影響、作物と圃場環境との相互作用についての研究開発、及び農業の環境負荷低減に資する研究開発について概観する。

(2) キーワード

圃場生態学、化学生態学、作物生育シミュレーションモデル、気候変動・地球温暖化、持続可能型農業、微気象計測、開放系環境操作実験、群落微気象モデル、大気-植物-土壌相互作用、光合成、二酸化炭素吸収、環境応答、バイオスティミュラント、植物の誘導防衛・間接防衛、天敵、植物間コミュニケーション、みどりの香り (Green Leaf Volatiles: GLVs)、食害誘導性植物揮発性物質 (Herbivory-Induced Plant Volatiles: HIPVs)

(3) 研究開発領域の概要

[本分野の意義]

現代の農業は持続可能性について大きな懸念がある。特に、地球規模での大きな課題は、大気 CO₂ 濃度増加とそれにもなつて生じる気候変動 (地球温暖化) に対する対策と、環境負荷低減である。これらの課題解決のためには圃場環境の変化が作物に与える影響、作物と圃場環境との相互作用についての根本的なメカニズムを理解し、圃場環境システムと収量とをつなぐ精度の高いシミュレーションを可能にすることが不可欠である。

【圃場マルチスケールモデルの開発】

地球の人口増加に加え、近年の化石燃料依存からの脱却推進、消費者のナチュラル志向、ベジタリアン志向の高まりによって、野外で栽培される作物 (植物) の需要は劇的に高まっている。これまでの農業は地球環境への負荷はほとんど問題視せず、収量を最大化させる方向へ発展してきたため、環境負荷を低減させようとする、どうしても減収傾向になることが知られている¹⁾。これに加え、気候変動によって CO₂ 濃度の増加と気温の上昇、これまでにない異常気象によって、収量は低下傾向になることが示唆されている¹⁾。実際のところ、人類による温室効果ガスの実に 4.5% は農業によって排出されており、オゾン層を破壊する N₂O の 60% は農業の過剰な施肥由来である²⁾。また、人類が排出するメタンの 11% は稲作由来であることが報告されている²⁾。従って、今、気候変動下において、増え続ける農作物需要に応えられる収量を確保しつつ、環境負荷低減を行うというマルチタスクを解決しなければならない、難しい局面にある。このマルチタスクを解決するためには、高温耐性作物の作出、環境負荷を低減する施肥技術の開発、ノンケミカルな農業病害虫の管理技術など、個別の問題を解決する技術に加え、作物の成長や収量と圃場環境のバランスを最適化するため、作物と圃場環境の相互作用について理解する必要がある。野外で栽培される有用植物 (穀類や野菜類に加え、ゴムノキやパームヤシ、タバコなどの非可食農作物を含む) は、整備された圃場で密集して生育するため、互いに隣の植物と、光や土壌養分、水分などの生育資源を奪い合い、また密集による湿度や温度といった気象条件 (圃場の微気象) の変化を生み出す。同時に、圃場環境は光不足や肥料分不足などによって作物収量に影響を与えるだけでなく、密植による高湿度が作物病を誘発したり、高温による収量低下を招くなど、

様々な影響を及ぼす。つまり、作物群落（密集して生育する植物群を群落と呼ぶ）と圃場環境は、互いに影響を与えあう、相互作用の関係にあると言える。実験室などで小規模に栽培される作物はこうした密植の影響をほとんど受けないため、作物の成長と圃場環境の相互作用を理解するには、野外の実験的な圃場環境において多種多様な精密計測を行い、それらをモデル化する必要がある。これまで、日本を含む世界各地の開放系大気CO₂増加実験（Free-Air CO₂ Enrichment:FACE）圃場などを利用して、作物生育シミュレーションモデルの開発が進められてきた。この作物モデルでは投入する肥料の量や気温、光強度と作物収量をモデル化することが可能であるが、圃場環境、作物の成長の両方において精密計測技術が発達し、モデル化を行うコンピュータパワーの向上も相まって、近年では作物の成長と土壌窒素濃度、土壌からのメタン発生量、圃場の微気象、CO₂濃度など、真の意味でマルチスケールモデリングを行うことが現実のものとなりつつある。こうしたマルチスケールモデリングが可能になれば、圃場環境と収量のバランスを最適化する新しい作物品種や、栽培介入法の開発へとつながり、気候変動下でも収量の確保と環境負荷低減を両立させる革新的な農業へと変革していくことが可能になる。

【環境負荷低減を実現する作物 - 他生物間相互作用】

農業病害虫に対する農薬の過剰使用は主要な負荷要因の一つである。自然生態系とその一部である農生態系においては、様々な動植物が直接および間接的な相互作用関係が自立分散系統的に構築され、その総体は複雑な「生物間情報・相互作用ネットワーク」を形成している。かかるネットワークは、生態系における他種共存を実現させている。農薬の使用は、圃場内における害虫の駆除だけにとどまらず、生物間情報・相互作用ネットワークを通して、周辺の自然環境に対しても様々な負の影響を与える。生物間情報ネットワークを担っているのは様々な天然化学物質であるが、例えば、天敵を誘引する植物由来物質等を同定してその役割を解明し、バイオスティミュラントとして農業資材に利用することで、農業の環境負荷低減に貢献することができる。農薬の使用を減らし、地域環境に負荷を与えず、さらに安全安心な農業生産技術の確立のためには、農生態系を中心とした自然生態系の生物間情報・相互作用ネットワークの基本構造を解明する必要がある。なお、農薬の使用以外でも、様々な環境負荷を改善する場合にも、この生物間情報・相互作用と農作物の収量は、圃場での作物（植物）の様々な生理学的な反応に左右されるため、生物間情報・相互作用ネットワークについても、圃場のマルチスケールモデリングのパラメーターとして考慮する必要がある。

【研究開発の動向】

【圃場マルチスケールモデルの開発】

圃場で栽培される作物の収量予測に用いられる手法は大別して二つある。一つは、回帰分析などを駆使した統計モデルで、実際の収量（実収量）を標準的条件で得られる平均収量とその変動要因との和で表すという考え方である。統計モデルは、過去の収量変動と気象条件との関係の解析に有用で、頻繁に利用されてきた³⁾。しかし、統計モデルでは、あくまでも過去のデータに基づく予想であるため、気候変動といった過去のデータ範囲を超えるような中長期的な予測は実施できない。もう一つは、収量を生育に伴う作物体の重量増加、収穫器官への分配といった生育プロセスの結果として表す、プロセスモデルと呼ばれるものである。これは、実収量を、潜在収量（養水分の過不足、病害虫、倒伏などの生育阻害がない条件で、気候のみからみた達成可能収量）が、種々の生育阻害によって制限された結果とみるもので、気候変動による影響を考慮した将来のシミュレーション収量予測などで利用されている。一般に、プロセスモデルは統計的モデルに比べて複雑で、多くのパラメーターを要するが、収量成立の道筋を捉えやすいといった利点がある。

こうしたモデルは1960年代から開発され始め、現在は様々な作物に適用されている。1980年代からは作物生産に影響する土壌の養水分の動態を含むシミュレーションモデルも開発されるようになった。さらに、1990年代には、土壌からの温室効果ガスを含む微量ガスの放出を予測する生物地球化学モデルも開発されるようになった。これは、気候変動に関する政府間パネルの第一次報告書（IPCC 1990）が温暖化への警鐘を鳴らし始めた時期に相当する。その後、生物地球化学モデルは、圃場レベルの予測からより広域的な温室効果ガスの放出の推定にも用いられるようになった⁴⁾。こうしたシミュレーションモデルの開発は、主に欧米が先行的に実施してきたが、イネや水田土壌のモデル化においては、日本の研究が大きく貢献してきた。たとえば京都大学の堀江は、気象からみた潜在的な収量の予測のために、シンプルでかつ主要な要素を取り入れた動的モデルを1987年に開発⁵⁾し、気候変動の影響評価を実施した⁶⁾。また水田土壌における物質循環やメタン放出量を評価するために、欧米で開発された生物地球化学モデルを水田に適用するための改良を施したモデルが開発され^{7), 8)}、日本やアジア地域における水田からのメタン発生量の将来予測に使用されている^{9), 10)}。さらに近年は農研機構の長谷川などが中心に開発したモデルを用いて、気候予測シナリオに基づく日本全国におけるコメ収量と品質低下リスクの将来予測が実施されている¹¹⁾。

これまでに開発されたモデルは、現在農業モデルの相互比較と改良のための国際プロジェクト¹²⁾（Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project: AgMIP）の枠組みにおいて、不確実性要因の解析と予測精度の改良が進められている。例えば、世界で用いられている13のイネのプロセスモデルを比較検討したところ、13モデルの平均予測収量は、低緯度では温度上昇に伴って減収する傾向にあるのに対し、寒冷地では、3°C上昇程度までは減収は認められず、それ以上で減収する傾向にあった。これは、気候変動に関する政府間パネルが第5次報告書¹³⁾で取りまとめた傾向と類似しているが、13モデルの予測値に極めて大きな幅があったことから、気温変動に対する収量応答の予測は、現時点では極めて正確性に欠くと言え、気候変動下で必要な収量を確保するためにはその要因説明が急務であることがわかった。

モデルの評価および改良のためには、人工的に環境条件を変更して作物や土壌プロファイル、圃場の微気象の反応を調べる環境操作実験が不可欠である。モデル開発と環境操作実験は、まさに将来の気候変動影響を予測する上での車の両輪であるが、後者の不足が研究推進上最大のボトルネックになっている。

環境操作実験は、主に閉鎖環境で温度やCO₂濃度を制御するものであったが、1990年以降は屋外の開放系の群落条件で将来の高CO₂環境を実現するFACE実験などが世界各地で実施されるようになった。日本ではイネを対象としたFACE実験が1998年に岩手県雫石町で開始され、2010年からは茨城県つくばみらい市に場所を移し2017年まで実施された¹⁴⁾。大気CO₂濃度を高めた場合、一般に光合成は促進され、乾物生産ならびに収量が増加する。実際、岩手県や茨城県で合計11年間実施したFACE実験においても、両地点で共通して用いた品種「あきたこまち」の収量は、高CO₂によっておおむね増加したが、その程度は年次によって大幅に変動し、冷害年には増収が認められない一方で、他の年では増収の程度は高温になるとともに低下した¹⁵⁾。さらに、茨城県で実施したFACE実験から、高CO₂環境下では、高温で頻発する白未熟粒の発生が助長されることが示された¹⁶⁾。以上の結果は、CO₂濃度と高温が複合的に作物の収量・品質に影響することを示す実例である。国際的な作物モデルの精度比較を通して、FACE実験の結果をモデル改良に役立てる試みも開始されており、環境要因や栽培管理、品種などの相互作用を検証できる実験データのさらなる充実が強く望まれる。

高CO₂環境が高温障害を助長するメカニズムとしては、高CO₂によって気孔が閉じがちになり、葉面からの蒸散が抑制されて放出される気化熱が減少し、葉面温度が上昇することが挙げられる。すなわち高CO₂濃度になると、外気温が変化しなくとも葉面温度が上昇するため、植物は高温障害を受けやすくなる。一方、

低湿度、強風といった、晴天日の植物の蒸散が極めて大きくなるような条件のオーストラリアでは、気温が40℃を超える厳しい高温が頻発しても、稲の高温障害の発生は報告されていない。こうした気象条件の下では、蒸散冷却による群落表面温度の低下量が大きくなり、オーストラリアの生育環境では日中の葉温は気温よりも7℃近く低くなっていた¹⁷⁾。一方、多湿で風が弱く、大気からの蒸散要求が少ない気象条件となる中国長江中流域では、日中の気温が32～3℃であっても、穂の温度は気温よりも3℃ほど高くなり、高温に伴う稔実低下が観察された¹⁸⁾。

このように群落（葉面や穂）の温度環境は、気温の変化ばかりでなく、それ以外の気象条件（湿度や風速など）や大気CO₂濃度に依存して複雑に変化する。そのため、地球温暖化の進展によって生じる作物の高温被害を的確に予測し、それを回避するための技術を開発するためには、群落微気象環境の高精度な計測と共に、群落微気象環境を気象条件や大気CO₂濃度から、大気環境に対する植物の生理応答（気孔開度の変化など）を考慮して評価する物理モデル（群落微気象モデル¹⁹⁾）が必要となる。温暖化の進展によって発生リスクの増大が予想されるイネの高温被害の一つに、出穂期における受精障害（高温不稔）がある。出穂・開花期における日最高気温がおおむね35℃以上になると、受精障害によって受精率が低下し始め、40℃を超えると受精率はほぼゼロになることが人工気象装置を用いた実験によって確かめられているが²⁰⁾、群落微気象モデルによる穂温推定値を使用することで、より高精度で生産現場における高温不稔被害を把握できることが確認されている^{21), 22)}。

気象条件や大気CO₂濃度による蒸散量の変化は、作物の水利用にも影響を与える。一般には低湿度条件になるほど、圃場からの大気への水蒸気の放出量（蒸発散量）は増加し、作物の生産に必要な水の量（水消費量）は多くなる。すなわち低湿度条件による葉面温度の低下量の増大（高温被害の軽減）は、圃場における水消費量の抑制とトレードオフの関係にある。また高CO₂環境は光合成速度の上昇をもたらす一方で、気孔開度を低下させるため蒸散量が抑制され、作物の水利用効率（＝光合成量／蒸発散量）の大幅な上昇をもたらす。気候変動下における持続的な農業生産のためには、水資源の保護や作物生産のための水消費量の抑制が重要なことは言うまでもないが、今後予想される気象環境の変化や大気CO₂濃度の上昇による作物の蒸散量や水消費の変化を定量的に評価するためには、上述した群落微気象モデルが有用なツールとなる。作期の違いがイネの生育期間の全水消費量（積算蒸発散量）に与える影響や²³⁾、大気CO₂濃度が登熟期間の水利用効率に与える影響の品種特性による違いについて²⁴⁾、農研機構の研究グループが群落微気象モデルを用いた定量的な評価を実施している。

【環境負荷低減を実現する作物 - 他生物間相互作用】

植物－植食性節足動物（植食者）－捕食性天敵（肉食者）の三者からなる。食う－食われる関係は、三栄養段階相互作用系（以下三者系）と呼ばれ、陸域生態系における基本構造である。この三者系において植物は単に食われているだけではなく、様々な種類の防衛方式を備えている。害虫などの食害を受けたり、病原菌の侵入を受けた場合に、そのストレスに反応し、防衛を強化したり、新たに防衛を誘導的に開始する。これは植物の誘導的防衛と呼ばれている。植物には恒常的防衛もあり、それらは更に直接防衛と間接防衛の2つに分けられる。直接防衛とは、植物が毒物質、忌避物質、接触阻害物質、トゲ、腺毛などで植食者から身を守る場合を指し、間接防衛とは、植食者の天敵の効率を高めて防衛する戦略で、天敵誘引物質の生産、代替餌の供給、天敵の住処の供給などが知られている。三者系の視点で、1990年代より新たに研究が大きく進展したのが誘導的間接防衛の研究である。植物が植食者の食害ストレスを受けたと、様々な揮発性物質の生産を開始する。この揮発性物質は植食者誘導性植物揮発性物質（Herbivory-Induced Plant

Volatiles: HIPVs) と呼ばれている。注目すべきHIPVsの生態的な機能の一つとしては、食害している植食者の捕食性天敵（肉食者）を誘引する機能である。この戦略は1990年代に新たな植物の防衛戦略として報告され、現在でも様々な研究機関で基礎から応用まで研究が進められている。特徴的な点としては、HIPVsの植食者（害虫）の種特異性である。例えば、ある作物株が害虫Aの食害を受けると、害虫Aの特異的天敵Xを誘引し、Aを株上で殺させる。またもし同じ作物株が害虫Bの食害を受けると、害虫Bの特異的天敵Yを誘引し、Bを株上で殺させる。これは動物の抗原抗体反応に類似した植物－植食者－捕食性天敵の三者系における特異性である。もちろん特異性のない、あるいは低い三者系も報告されている。HIPVsが関与する三者系は地上部生態系で研究が進められてきているが、地下部生態系でも、植物－根を食害する昆虫－昆虫寄生性線虫の三者系で、食害を受けた根から出る揮発性物質が寄生性線虫を誘引するという一連の例が最近になって海外の研究グループより報告されている²⁵⁾。

植物の誘導的間接防衛は、植物ホルモンの一種であるジャスモン酸（JA）シグナル伝達系が関与している。植食者、特にチョウ目幼虫の食害では、幼虫の唾液中に存在する成分（エリシター）を植物が受容し、JAシグナル伝達系が誘導的に活性化する。機械的傷でもJAシグナル伝達系は活性化するが、エリシターの誘導は単なる機械傷によるものとは異なるが、その生理学的な機構は明らかにされていない。また、食害でサリチル酸（SA）シグナル伝達系が活性化する場合が、吸汁性の植食者の三者系で報告されている。

もう一つ新たな植物の防衛戦略が2000年以降に科学的に実証された。これも生物間情報・相互作用ネットワークに影響を与える。食害を受けた植物が放出するHIPVsは、食害を与えている植食者を殺す捕食性天敵を誘引するが、そのHIPVsを隣接する同種あるいは異種の未被害植物が受容すると、あたかも食害を受けたかのような誘導的防衛反応を示す。この現象は「植物間コミュニケーション」（あるいは、「植物－植物間相互作用」、「立ち聞き」）と呼ばれている。HIPVsを「立ち聞き」した植物は、JA酸（傷害応答関連の植物ホルモン）が関与する誘導防衛を開始する²⁶⁾。多くの研究例では、直ちに防衛を開始するのではなく、食害を受けた際に速やかに誘導防衛を開始するという、車のアイドリングに似た誘導防衛応答である。この応答は、直接防衛、間接防衛の両方を含むが、植物の種によってその応答形態は異なる。植物がHIPVsを立ち聞きすることで開始される誘導防衛には、JAシグナル伝達系が関与していることが明らかになっている。HIPVsが関与する地下部三者系を農生態系に応用し、害虫防除に役立てようという試みに関しては、スイス、ニュシャテル大学のTurlingsらのグループで基礎研究が進められている。彼らはイネ科作物（トウモロコシ）－根を食害するハムシ科幼虫－幼虫に寄生して殺す線虫の三者系において、線虫を誘引する成分Caryophylleneを特定している²⁷⁾。また、植物間コミュニケーションの研究では、地上部のHIPVsが情報として機能しているという研究例が多いが、地下部で菌根菌ネットワークを通して、植物がコミュニケーションしている例も報告されている²⁸⁾。地上部だけでなく、地下部生態系にもスポットを当てる必要がある。

地域生態系で成立している自立分散的な「情報・相互作用ネットワーク」の基盤となる植物の防衛戦略の解明は、地域環境に負荷を与えず、さらに安全安心な農業生産技術の確立のために不可欠な基礎研究領域である。応用的には、より天敵を誘引する作物や、立ち聞き感度の高い植物の育種が今後重要となるが、その基盤にもなる。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

- ・2020年、気候変動や農業の環境負荷を低減し、持続可能で健康的な食糧供給に関する高い知見を提供することを主たる目的として、国際的に権威あるNatureの姉妹紙Nature Foodの刊行が開始された。

- ・ビル&メリンダ・ゲイツ基金など9団体の支援を受ける光合成効率向上を目的とした国際共同研究グループ (Realizing Increased Photosynthetic Efficiency: RIPE) が、2019年以來、立て続けに劇的な光合成効率の向上を可能にする技術を発表している。光合成効率の向上は、農作物によるCO₂吸収量を増加させ、単位面積当たりの収量を増加させる可能性があることから、農業の環境負荷低減と収量確保を両立させる夢の技術として、欧米でし烈な開発競争が繰り広げられている分野である。2019年には、光合成においてCO₂を植物体内に取り込む際の効率低下を引き起こす「光呼吸」という現象を、合成生物学的な手法を用いて抑制することに成功した。光呼吸を抑制した植物体は圃場試験において20%以上バイオマスが増大した²⁹⁾。2020年には光合成において光エネルギーを化学エネルギーに変換する電子伝達系を強化し、同時にCO₂固定のプロセスにおいて必要なSBPaseと呼ばれる酵素の量を増量することに成功した。この光合成能力を向上させた植物体は、温室試験ではバイオマスが50%増大し、圃場試験では27%のバイオマス増大を達成した³⁰⁾。温室でのバイオマス増大量と圃場での増大量がかなり異なるが、こうした問題を解決するためにも、植物群落と圃場環境の相互作用を扱う作物モデルは重要である。
- ・2020年の報告によると、東北大学の牧野率いる国際共同研究グループは、光合成において直接CO₂吸収に関わるRuBisCOと呼ばれる酵素を増量した遺伝子組換えイネを作出し、圃場試験を行った。その結果、遺伝子組換えイネは、同じ窒素施肥量に対して最大で28%の増収効果があることを確認した。光合成の機能改善により、窒素利用効率が向上し、収量の増加に結び付いた実例は世界初であり、農業の環境負荷低減につながると期待される³¹⁾。英国シェフィールド大学のBeerlingらは、各種モデリングを駆使することで、農地にケイ素を含む岩石の粉碎物を撒くことで、土壌が改良し、大規模な大気中CO₂の土壌への固定が可能であることを試算した。シミュレーションによると、大気CO₂の土壌への固定は米国や中国といったCO₂の排出大国において、特にその効果が顕著に認められた³²⁾。
- ・2019年、AgMIPはプロジェクトの一環として、14種類の作物モデルによる15種類の作物の成長と収量をモデル化した大規模データセット (Global Gridded Crop Model Intercomparison: GGCM) を公開した。この大規模データは地球の全球を細かくグリッドで区切り、それぞれの地域における作物の成長と収量について、土壌窒素濃度や気象データ、大気CO₂濃度などのパラメーターを用い、データセットで提供された各種作物モデルを用いてシミュレーションを行うことができるものである。全世界の研究者がこのデータセットを活用し、作物モデルの結果を多角的に比較検討することにより、より正確な収量予測が可能になることが期待されている²⁾。
- ・農耕地における作物・土壌の適切な管理は、将来の食料確保と地球温暖化抑制において極めて重要である。気候変動および農耕地管理が、作物生産や耕地の物質循環に及ぼす影響について、包括的かつ定量的に評価する手法は、管理技術の効果を測り、削減目標への貢献度を明確にするためにも必要不可欠である。2019年8月に刊行されたIPCC特別報告書『気候変動と土地』においても、農業における適応と緩和の両立が取り上げられている。
- ・日本で実施された実用化に向けた研究例として、「ミズナーコナガ幼虫-コナガ天敵寄生蜂 (コナガサムライコマユバチ)」の三者系がある。ミズナハウス内に発生するコナガ幼虫を防除するため、周辺環境に生息するコナガサムライコマユバチを合成のHIPVsで呼び寄せる試みであり、一定の効果が得られている³³⁾。総合防除の視点からは、イギリスロザムステッド耕地作物研究所のグループがPush-Pull strategiesという手法を提唱している。彼らは、アフリカでその有効性の実証試験を行い、良好な結果を得ている。
- ・日本では、ダイズ畑に周辺雑草 (セイタカアワダチソウ) の切断した匂いを漂わすことで、人為的な植物

2.2

俯瞰区分と研究開発領域 バイオエコノミー

間コミュニケーションを作り出し、作物の害虫に対する抵抗性、収量を向上させることに成功した研究が報告されている。またこの暴露でダイズ種子内のイソフラボンやサポニンの含有量が増えることも報告されている³⁴⁾。

- ・植物の誘導的間接防衛における植物の応答を自動計測することで、密閉型大型ハウス栽培における病害虫の予防と発生予察を行う技術開発³⁵⁾がある。そのためにはHIPVsの高感度センサーの作成と普及が重要である。また、農家的な知見としては、レタスは内部に害虫がいる場合は、やや温度が高くなるので、手で触って温かいレタスは出荷しない。このようにHIPVs以外でも植物（作物）の誘導的防衛反応はさまざまな形で現れるため、作物に応じた予防と発生予察技術が求められる。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

- ・農林水産省委託プロジェクト「農林業に係る気候変動の影響評価（A-8）」(2013～2017年度)

イネFACE実験などによる作物の高温・高CO₂影響メカニズムの解明と、作物モデルを用いた気候シナリオに基づく作物収量・品質の将来予測と適応技術の定量評価が実施された。また「温暖化の進行に適応する生産安定技術の開発（A-11）」(2015～2019年度)では、地力の変化と気温ならびに大気CO₂濃度の上昇が、イネの生育・収量におよぼす相互影響に関する研究が実施されている。

- ・文部科学省SI-CAT（気候変動適応社会実装プログラム）(2015～2019年度)

作物モデルを用いた最新の気候シナリオに基づくコメの収量・品質予測と適応策の評価に加え、それら結果を活用した地方自治体における気候変動適応計画の策定支援が実施された。現在、環境省S18「気候変動影響予測・適応評価の総合的研究」のテーマ2「農林水産業分野を対象とした気候変動影響予測と適応策の評価」において、最新の気候シナリオと高度化した作物モデルを用いた作物の気候変動影響予測と適応策の評価が、引き続き実施されている。

- ・JST・CREST「植物頑健性」(2015～2022年度)

この領域で取り組まれた研究開発の中には、フェノミクスに着目したものがあり、野外における作物の動態に関する理解が進んだ。ハイブリッドモデリングによる環境変動適応型品種設計法の開発や、光合成を中心とした作物の生理生態学的な応答の解析、トランスクリプトーム等オミクスを駆使した解析、作物と昆虫などの他生物との相互作用の評価、土壌微生物と作物との相互作用、などに着目した解析が挙げられる。

- ・JST・さきがけ「植物分子の機能と制御」(2020～2025年度)

一部課題では、植物他生物間コミュニケーションについて化学生態学的な理解を目指している。

- ・米国 Phytobiomeプロジェクト

このプロジェクトではアメリカ植物病理学会が主導し、植物（作物）を基軸にして、相互作用する関連生物の総体を取り扱う研究が推進されており、地上部と地下部の両方について解析が進められている。

- ・Horizon 2020 Agriculture and forestry 領域

スイス・ベルン大学で行われるPRENEMAと題するプロジェクトでは、自然生態系と圃場生態系における地下部の三者系を扱い、植物が被食者にされられた際に放出する物質の化学プロファイリング等を推進して

いる。

(5) 科学技術的課題

【圃場のマルチスケールモデル】

土壌、作物、そして群落の微気象モデルを融合して、環境と耕地管理との相互作用を定量的に評価する手法を開発し、圃場の物質循環をコントロールすることは、温暖化への適応、および環境負荷低減農業の実現のために不可欠である。しかし複合的な気象条件を取り扱い、土壌や作物の生態生理学的な特性を反映した包括的なモデルを構築して運用し、モデルの問題点を洗い出して、改良を進めていくには、十分なデータがない¹⁹⁾。気候変動の研究に取り入れるには、組織的あるいは協調的な仕組みが必要である。ようやく FACE などの環境操作実験を利用して、作物モデル精度比較と改良を行う試みが始まったが、これまでの環境操作実験では、CO₂濃度、温度、水といった単独の環境要因を扱うことが多かった。先にも述べたように現実の気候変動下では様々な環境要因が複合的に変化するので、それらを複合的に取り扱うことができる新規の環境操作実験プラットフォームを構築し、そこから精度の高いデータを取得して、モデル研究で問題となった新たな課題（仮説）に取り組む必要がある。

農生態系の周辺環境で涵養されている土着の天敵を有効利用し、農薬の使用を低減させる手法の開発。土着天敵を誘引する成分の特定と、合成、徐放性を確保した天敵誘引剤の開発。その実現には、周辺環境（里山）の保安全管理技術の見直しも含まれる。

JAの類縁化合物（PDJなど）を処理した植物を用いた土着性天敵の誘因技術の開発。品種改良、遺伝子組換えで天敵を効率よく誘引する作物あるいはコンパニオン植物の作出、あるいは探索が必要である。土着性天敵の有効利用のみでは、完全に圃場生態系の害虫を制御できないため、他の耕種的防除技術とのマッチングによる相補的・相乗的な防除効率の向上を図る研究も必要である。植物間コミュニケーションを利用した作物の抵抗性向上技術の開発。HIPVsやその他植物由来の揮発性物質に対して、誘導的防衛反応の応答性が高い作物の選抜、作出が可能であると考えられる。植物間コミュニケーションでは、植物に嗅覚受容機構が存在することは間違いないが、その機構は全く未解明である。この新しいコンセプトの研究は、植物の新たな能力の解明につながる。

(6) その他の課題

- ・基礎から実用までを目指した研究体制

近年の分子生物学や植物生理学の進展は著しく、それらの分野の基礎的な研究成果を、野外の植物の環境応答機構の解明や、気候変動に適応した作物の品種改良や栽培技術の開発などに役立てることが期待されている。これらの分野の研究は主として実験室で実施されてきたが、オミクス解析技術の進歩により、トランスクリプトームやメタボロームなどのデータが野外で手軽に取得できるようになった。実際の生産現場における作物の生産性や物質循環を研究対象とする、農学の各分野（作物学や生態学、土壌肥料学、農業気象学など）との研究連携の促進が望まれる。

2018年に気候変動適応法が公布され、気候変動適応計画の策定が義務付けられた。自治体レベルでの地域気候変動適応計画の策定や、地域気候変動適応センターの設置も進んでいる。将来気候シナリオに基づく農業を含む各分野に対する総合的な影響評価と、適応計画の策定支援に関しては、環境省が中心にプロジェクトを企画し、それに各セクターの省庁や大学の専門家が参加して推進している。これらプロジェクトでは気象学や環境分野の専門家がリーダーシップを取るが、影響評価の対象となる各分野の専門家の役割が重要で

ある。日本において最も重要な作物の一つであるイネの気候変動影響評価は、気候シナリオの作成、現象解明のための圃場実験（FACEなどの環境操作実験）、影響評価モデル（イネ生育モデルや群落微気象モデル）の開発、気候シナリオに基づく影響評価（将来予測と適応策の評価）と適応計画の策定支援までを、国立研究開発法人（農研機構）における研究グループが実施している。低環境負荷で持続的な農業生産を実現するためには、このようなグループを核として、フィールドを対象に得られた「圃場の物質循環」に関する基礎的な研究成果を、国内外の気候変動対策に積極的に反映させていくための仕組みが必要である。

・ 実用化と法規制の問題

HIPVsを用い、周辺に生息している土着天敵を有効活用する研究は、農薬の使用低減を目指したもののだが、現在の農薬の定義からは、このようなHIPVsも農薬として扱われる。この点は問題で、この解釈のため、農薬登録のための実証試験が不可欠となる。実証試験は化学農薬を対象に設計されているため、HIPVsを用いた害虫管理のようなマイルドな防除方法では実証試験をパスできない。同様な問題は、JAやSA、その類縁化合物を用いた植物の直接・間接誘導防衛の利活用においても発生する。また、植物間コミュニケーションを利用した作物の抵抗性付与に関しても同様に農薬登録が必要となる。農薬登録法上の農薬の定義を改めない限り、実用化は困難と思われる。

・ 実験プラットフォーム

「圃場の物質循環」に関する研究を戦略的に推進するためには、上述した研究分野における幅広い人材が共同で利用できる実験プラットフォームの設置が望まれる。研究内容の性格上、少なくとも10年間は維持する必要がある。実験プラットフォームの運営のための予算や設備を確保し、大学や国立研究開発法人の研究者が組織をまたいで利用できような仕組みが必要となる。

・ 人材育成

「圃場の物質循環」やそれを担う植物の生理生態を、フィールドスケールのマクロな視点から理解するためには、生理生態学者やアグロノミストの役割が重要であるが、近年はいずれの人材とも大幅に不足している。大学の生物学や農学系の学部や学科においても、分子生物学や植物生理学を志願する学生は多いが、生態学や作物学、農業気象学などのフィールド調査・計測に関わる研究分野に対する志願者が多くない現状がある。今後の人材育成を推進するために、これら分野の重要性と魅力を国内外に積極的にPRすると共に、分子生物学や植物生理学などの分野との連携に加え、社会的な関心が高い地球温暖化や気候変動対策に関わる分野との交流を強めていく必要がある。

・ 国際連携に関する課題

大規模な環境操作実験や大気—作物—土壌結合モデルの国際的な連携を行うにあたり、サンプルやデータのやりとり時間に時間および労力を要する。多国間、多機関との契約を締結するか、コンソーシアムのような包括的な枠組みが必要で、これらをサポートする体制が必要である。また、外国との機関で予算の配分を行う場合の事務的な手続きも混乱が予想される。効率的な研究運営のためには、これらの要素についての研究サ

ポートの充実が不可欠である。

(7) 国際比較

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	○	→	イネに関しては、遺伝学的材料や作物モデル、水田群落微気象モデルなどの研究蓄積があり、一定の優位性が認められるものの、他国との差は縮小している。生態学に関する大型プロジェクトがない。
	応用研究・開発	◎	→	コメの収量モデルの相互比較では世界をリードしている ³⁶⁾ 。イネの気候変動影響評価について、気候シナリオの作成、圃場実験、モデル開発、気候シナリオに基づく影響評価と適応計画の策定支援まで、単一の研究グループで実施している。
米国	基礎研究	◎	→	地球温暖化による作物収量予測のためのモデリングや生理解析、大規模FACE実験が行われている ³⁷⁾ 。光合成効率向上のための大規模研究も推進中である
	応用研究・開発	◎	→	構築されたモデルをもとに、遺伝子情報と衛星データから、広域の作物収量を精度よく推定する方法が開発されている。作物(植物)を基軸とした植物-他生物相互作用について相対的に解析を行うPhytobiome projectが行われている。
欧州	基礎研究	○	→	ゲノム編集や、インタークロッピングなどを視野にいれた光合成モデルや生産予測モデルの開発が盛んである ³⁸⁾ 。
	応用研究・開発	○	→	蓄積されたデータをもとに、Deep Learningを利用した光合成や植物の気孔の挙動の解明がおこなわれている。
中国	基礎研究	△	↗	中国科学院南京土壤研究所は、イネ-コムギFACE実験で顕著な成果を挙げている。日本との研究連携も実施している。また、化学生態学、分子生態学等への政府の支援が充実している。
	応用研究・開発	△	↗	中国科学院、南京農業大学などで圃場・地域・グローバルケースの作物モデル研究が展開されている。また、化学生態学、分子生態学等への政府の支援が充実している。
韓国	基礎研究	△	→	ソウル大学などが中心となり、衛星リモートセンシングと生物物理学的プロセスを組み合わせた、イネ収量推定モデルを開発している。化学生態学に関しては国際誌での発表が少ない。
	応用研究・開発	△	—	国際誌での発表が少ない。

(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

・農林水産分野における気候変動適応・緩和 (環境・エネ分野 2.2.12)

参考・引用文献

- 1) 科学技術振興機構 研究開発戦略センター ライフサイエンス・臨床医学ユニット 「(戦略プロポーザル) 次世代育種・生物生産基盤の創成 (第3部) 気候変動下での環境負荷低減農業を実現する基盤の創出 ～圃場における微生物、作物、気象を統合的に扱うモデルの開発に向けて～」(2020)
- 2) C. Muller et al., “The global gridded crop model intercomparison phase 1 simulation dataset”, *Scientific Data* 6, no. 1 (2019) : e50. doi: 10.1038/s41597-019-0023-8
- 3) 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
- 4) S. L. Gilhespy et al., “First 20 years of DNDC (DeNitrification DeComposition) : Model evolution”, *Ecol. Model* 292 (2014) : 51-62. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2014.09.004
- 5) T. Horie, “A model for evaluating climatic productivity and water balance of irrigated rice and its application to southeast Asia”, *Southeast Asian Studies* 25, no. 1 (1987) : 62-74. <http://hdl.handle.net/2433/56271>
- 6) T. Horie, “Predicting the effects of climatic variation and elevated CO₂ on rice yield in Japan”, *J. Agricultur Meteorol* 48, no. 5 (1993) : 567-574. doi: 10.2480/agrmet.48.567
- 7) T. Fumoto et al., “Revising a process-based biogeochemistry model (DNDC) to simulate methane emission from rice paddy fields under various residue management and fertilizer regimes”, *Glob. Chang. Biol.* 14, no. 2 (2007): 382-402. doi: 10.1111/j.1365-2486.2007.01475.
- 8) T. Fumoto et al., “Application of a process-based biogeochemistry model, DNDC-Rice, to a rice field under free-air CO₂ enrichment (FACE)”, *Journal of Agricultural Meteorology* 69, no. 3 (2013) : 173-190. doi: 10.2480/agrmet.69.3.11
- 9) K. Minamikawa et al., “Prediction of future methane emission from irrigated rice paddies in central Thailand under different water management practices”, *Sci. Total Environ.* 566-567 (2016) : 641-651. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.05.145
- 10) N. Katayanagi et al., “Development of a method for estimating total CH₄ emission from rice paddies in Japan using the DNDC-Rice model”, *Sci. Total Environ.* 547 (2016) : 429-440. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.12.149
- 11) 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”, *J. Agricultur. Meteorol.* 73, no. 4 (2017) : 156-173. doi: 10.2480/agrmet.D-16-00024
- 12) C. Rosenzweig et al., “The agricultural model intercomparison and improvement project (AgMIP) : Protocols and pilot studies”, *Agric. For Meteorol.* 170 (2013) : 166-182. doi: 10.1016/j.agrformet.2012.09.011
- 13) A. J. Challinor et al., “A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation”, *Nat. Clim. Change* 4, no. 4 (2014) : 287-291. doi:10.1038/nclimate2153

- 14) 白井靖浩 他「FACE 実験による水田生態系の気候変動応答研究」『化学と生物』51 巻9号 (2013) : 628-633. doi: 10.1271/kagakutoseibutsu.51.628
- 15) T. Hasegawa et al., “Rice free-air carbon dioxide enrichment studies to improve assessment of climate change effects on rice agriculture”, *Improving Modelling Tools to Assess Climate Change Effects on Crop Response* 7 (2016) : 45. doi: 10.2134/advagriscystmodel7.2014.0015
- 16) Y. Usui et al., “Rice grain yield and quality responses to free-air CO₂ enrichment combined with soil and water warming”, *Glob. Chang. Biol.* 22, no. 3 (2016) : 1256-1270. doi: 10.1111/gcb.13128
- 17) Tsutomu Matsui et al., “Lower-than-expected floret sterility of rice under extremely hot conditions in a flood-irrigated field in New South Wales”, *Plant Prod. Science* 17, no. 3 (2014): 245-252. doi: 10.1626/pps.17.245
- 18) X. Tian et al., “Heat-induced floret sterility of hybrid rice (*Oryza Sativa* L.) cultivars under humid and low wind conditions in the field of Jiangnan Basin, China”, *Plant Prod. Sci.* 13, no. 3 (2010) : 243-251. doi: 10.1626/pps.13.243
- 19) 桑形恒男 他「水田群落微気象モデルの概要と農学分野への応用」『低温科学』77 巻 (2019) : 125-136. https://jglobal.jst.go.jp/detail?JGLOBAL_ID=201902215065861278
- 20) H. Y. Kim et al., “Effect of elevated CO₂ concentration and high temperature on growth and yield of rice: II. The effect on yield and its components of Akihikari rice”, *Jap. J. Crop Sci.* 65, no. 4 (1996) : 644-651. doi: 10.1626/jcs.65.644
- 21) T. Hasegawa et al., “Spikelet sterility of rice observed in the record hot summer of 2007 and the factors associated with its variation”, *J. Agric. Meteorol.* 67, no. 4 (2011) : 225-232. doi: 10.2480/agrmet.67.4.3
- 22) M. Yoshimoto et al., “Integrated micrometeorology model for panicle and canopy temperature (IM2PACT) for rice heat stress studies under climate change”, *J. Agric. Meteorol.* 67, no. 4 (2011) : 233-247. doi: 10.2480/agrmet.67.4.8
- 23) A. Maruyama and T. Kuwagata, “Coupling land surface and crop growth models to estimate the effects of changes in the growing season on energy balance and water use of rice paddies”, *Agric. For Meteorol.* 150, no. 7-8 (2010) : 919-930. doi: 10.1016/j.agrformet.2010.02.011
- 24) H. Ikawa et al., “Increasing canopy photosynthesis in rice can be achieved without a large increase in water use a model based on free-air CO₂ enrichment”, *Glob. Chang. Biol.* 24, no. 3 (2018) : 1321-1341. doi: 10.1111/gcb.13981
- 25) B. M. Delory et al., “Root-emitted volatile organic compounds: can they mediate belowground plant-plant interactions?”, *Plant and Soil* 402 (2016) : 1-26. doi: 10.1007/s11104-016-2823-3
- 26) G. Arimura, K. Matsui and J. Takabayashi, “Chemical and molecular ecology of herbivore-induced plant volatiles: proximate factors and their ultimate functions”, *Plant Cell Physiol.* 50, no. 5 (2009) : 911-923. doi: 10.1093/pcp/pcp030
- 27) S. Rasmann et al., “Recruitment of entomopathogenic nematodes by insect-damaged maize

- roots”, *Nature* 434 (2005) : 732-737. doi: 10.1038.nature03451
- 28) Z. Babikova et al., “Underground signals carried through common mycelial networks warn neighbouring plants of aphid attack”, *Ecol. Letters* 16, no. 7 (2013) : 835-843. doi: 10.1111/ele.12115
- 29) P. F. South et al., “Synthetic glycolate metabolism pathways stimulate crop growth and productivity in the field”, *Science* 363, no. 6422 (2019) : eaat9077. doi: 10.1126/science.aat9077
- 30) P. E. López-Calcagno et al., “Stimulating photosynthetic processes increases productivity and water-use efficiency in the field”, *Nat. Plants* 6, no. 8 (2020) : 1054-1063. doi: 10.1038/s41477-020-0740-1
- 31) D. -K. Yoon et al., “Transgenic rice overproducing Rubisco exhibits increased yields with improved nitrogen use efficiency in an experimental paddy field”, *Nat. Food* 1, no. 2 (2020) : 134-139. doi: 10.1038/s43016-020-0033-x
- 32) D. J. Beerling et al., “Potential for large-scale CO₂ removal via enhanced rock weathering with croplands”, *Nature* 583, no. 7815 (2020) : 242-248. doi: 10.1038/s41586-020-2448-9
- 33) M. Uefune et al., “Targeting diamondback moth in greenhouses by attracting specific native parasitoids with herbivory-induced plant volatiles”, *R. Soc. Open Sci.* 7 (2020) : 201592. doi: 10.1098/rsos.201592
- 34) K. Shiojiri et al., “Exposure to artificially damaged goldenrod volatiles increases saponins in seeds of field-grown soybean plants”, *Phytochem. Letters* 36 (2020) : 7-10. doi: 10.1016/j.phytol.2020.01.014
- 35) T. C. J. Turlings and M. Erb, “Tritrophic Interactions Mediated by Herbivore-Induced Plant Volatiles: Mechanisms, Ecological Relevance, and Application Potential”, *Ann. Rev. Entomol.* 63 (2018) : 433-452. doi: 10.1146/annurev-ento-020117-043507
- 36) T. Li et al., “Uncertainties in predicting rice yield by current crop models under a wide range of climatic conditions”, *Glob. Chang. Biol.* 21, no. 3 (2015) : 1328-1341. doi: 10.1111/gcb.12758
- 37) J. Sun et al., “FACE-ing the global change: Opportunities for improvement in photosynthetic radiation use efficiency and crop yield”, *Plant. Sci.* 177, no. 6 (2009) : 511-522. doi: 10.1016/j.plantsci.2009.08.003
- 38) X. Yin and P. C. Struik, “Can increased leaf photosynthesis be converted into higher crop mass production? A simulation study for rice using the crop model GECROS”, *J. Exp. Bot.* 68, no. 9 (2017) : 2345-2360. doi: 10.1093/jxb/erx085

2.2

俯瞰区分と研究開発領域
バイオエコノミー