

## 評価結果及び指摘に対する回答

4人の評価者による評価結果及び指摘事項等に対する回答を以下に示します。

### 1) テーマ全体について

目的が非常に明確で、有用なプロジェクトとなっている。全ての課題で日本だけでなく国際的にも有益で確実な成果が得られている。学術的成果の質は非常に高く、特に比較的少数の研究者で構成されていることを考慮すると高く評価できる。本プログラムが圃場、地域、国土、全球といった様々なスケールを対象としていることは素晴らしい。国内で本プログラムの緩和策、適応策の多くが広く普及していることも称賛に値する。また、IPCCやGRAを通じて、GHG排出量削減への国際的な取組に貢献していることも称賛される。

課題の中には、国内外の関係者と良い関係を築いているものもある。実践的な解決策や技術を開発しようとする意欲も本課題の長所である。

今後の方向性について、以下を推奨する。

- 1) GHG削減や炭素貯留の国際的な取組については、これらに関する政策や計画、運用に関わる組織や団体に協力関係を広げることにより、より大きな成果が得られるだろう。また、研究協力者だけでなく成果の利用者が研究の初期段階から関わることにより、より良い成果が得られるだろう。
- 2) 研修の実施や組織的な実務者養成は本課題の本来の目的ではない。しかしながら、GHG排出量削減を推進するためには教育は要である。実務者養成を組織的に行うことは本プログラムで得られた成果を社会実装するための効率的な方法である。将来の研究課題として対象国における能力強化と管理を考慮すべきである。
- 3) 本プログラムでは、管理技術の経済的影響が評価されていない。将来的には経済学者と連携し、経済的影響評価を実施すべきである。また、複合基準解析を行うことも有用であろう。ある課題は環境に、別の課題は生産に焦点を当てており、環境への正の効果と生産性/収益性とのトレードオフを解析している課題は見受けられない。
- 4) 病害虫の影響は他のプログラムで研究されているとのことであるが、病害虫による減収の公表データを用いて、作物収量に及ぼす気候変動の影響を評価できるのではないかと（本年8月にサイエンス誌に掲載された論文によると地球の表面平均温度が1℃上昇する毎に害虫による減収は10-25%増加する。）また、本プログラム成果の社会実装に際しては、天候インデックスに基づく減収評価を実施すべきである。
- 5) 課題間の関係が不明瞭な場合がある。いくつかの課題は部分的に重複しており、おそらく合併できるのではないかと。また、モデルでの予測結果を他の人に使ってもらうには、仮定がしっかりしていることが非常に重要なので、将来的に課題間の連携がより強化されることを期待する。さらに、緩和策、評価及び適応という3つのセクションの対象範囲と連携/統合の範囲をもっと明確にすべきである。加えて、現在の農業環境変動研究センターを中心としたフレームワークを出発点として、農研機構全体の気候変動適応策及び緩和策の研究を統合し、共通フレームで実施することも考えるべきである。
- 6) 農家での実証試験を行うべきであろう。本プログラムの中には、直接農家の圃場、つまり実際の条件で実施できる研究がある。また、農家や事業者とのワークショップを企画し、研究成果について情報共有し議論することもできるだろう。また、対象作物に求められる生産性に応じて緩和策、適応策を統合した管理体系の開発を薦める。研究成果の

社会実装を進めるためには当初からコスト、便益及びそれらのトレードオフを考慮する必要がある。

- 7) 作物管理技術から景観レベルに至まで、集落や景観レベルで統合された系においてそれぞれの技術の GHG 削減上及び適応上の価値を評価することを薦める（例えば、気候変動対応型「里山」等）。
- 8) 研究をさらに発展させるために、将来的には食料安全保障、回復力、生態系サービス、災害リスクマネジメント及び持続性等の観点から緩和と適応を同時に評価する総合的アプローチを実施して欲しい。農業生態系から気候システムへのフィードバックに関する研究は、例えば「季節内から季節予測プロジェクト（S2S）」や GCM といった数値気象予測の予測可能性の向上に大きく貢献するだろう。また、S2S に基づく評価の定型操作のための ICT 共有プラットフォームの支援とともに、気候の変動性（顕著現象）に対応した長期予報（S2S）のさらなる活用も考慮して欲しい。

### （回答）

貴重なコメントに感謝したい。

気候変動に関する農研機構の取組は、全体を 1 名のプログラムディレクターが統括し、3 つのテーマ（緩和、影響評価、適応）にそれぞれ一人のリーダーのもと、研究が進められている。また、9 つのセンター・部門に所属している研究者が参加しており、地域や作物に対応した研究を行う体制となっている。また農業経営、LCA の専門家との連携も一層強めていきたい。また、開発技術の国内外への普及については非常に重要と認識しており、外部資金の獲得も行いながら積極的に進めていく予定である。以下に、各段落に対応した取り組みを述べる。

- 1) 政策や計画の立案・運用に関わる組織・団体との連携は、開発した技術成果を内外に広く普及する上で重要と考えている。一例ではあるが、課題 3 で報告した国際連携プロジェクト「アジア地域の水田における GHG 削減等に関する総合的栽培管理技術の開発」（MIRSA-3）では、開発技術の実用化に向けて、毎年持ち回りで開催するプロジェクト会合の場を利用して、開催国の普及組織、生産者団体、行政部局等を対象とした意見交換の場を持つ予定。
- 2) 研究成果の普及、特に緩和技術の普及にとって、人材育成は重要であると認識しているが、継続的に行うための予算と人員の確保が課題である。今年度は、GRA 理事会や FAO 主催のワークショップ（タイ）、APEC 資金による人材育成会合（チリ）において、水田における節水栽培（AWD）による GHG 削減の研修を行った。今後も、国際機関・組織と連携して、あるいは JICA 等を通じた研修受入により、対象国の人材育成に協力したい。
- 3) 気候変動対策技術の経済性評価や環境影響評価は重要な課題と認識している。それぞれのプロジェクトで回答するように、適応技術の研究には多くの場合、経済性（収益性）の評価が含まれている。一方、緩和技術の研究では、現状では作物収量への影響評価に止まっている場合もあるが、それで十分とは考えていない。適応技術や緩和技術の導入にとまなう環境影響評価も本プログラムとして常に意識している点である。たとえば水田の中干しや冬季湛水などの水管理は、それぞれメタン排出削減対策や生物多様性保全対策として有効であるが、その普及にあたってはそれぞれコメ中のカドミウム濃度低減やメタン排出削減とのトレードオフに留意している。今後も、幅広い分野の研究者を擁する農研機構の強みを活かして他のプログラム、農業経営や LCA の専門家との連携を強めつつ、経済性評価や環境影響評価を含めた気候変動対策の研究に取り組んでいきたい。

- 4) 気候変動に伴う病害虫被害の拡大は、わが国の農業分野での気候変動適応計画に最重要課題の一つとしてリストアップされており、農研機構もその重要性を認識している。課題7で紹介した栽培管理支援システムでは病害発生予測モデルによる管理支援プログラムがすでに搭載されている。他にもカメムシ類の分布域拡大予測やイネの虫媒ウイルス病発生予測にメッシュ農業気象データが利用されるなど、病害虫分野との連携は強化されつつある。また、課題5の研究成果を活用して、東南アジア（タイ、インドネシア）を対象に天候インデックス保険について民間損保会社との共同研究を行った実績がある。
- 5) 緩和（課題1～3）、影響評価（課題4及び5）、適応技術（課題6及び7）についてはそれぞれ一人の課題リーダーの下、共同で取り組んでいる。また、3つのセクションは一人のプログラムリーダーにより進行管理が行われており、情報交換は密接に行われている。今後はさらにセクション間の連携を深め、影響評価と適応策で利用可能な作物モデルの開発や栽培管理技術のGHG排出評価などを実現していく予定。
- 6) 開発技術の社会実装は重要な課題であり、緩和技術、適応技術については地域センターを中心に農家に受け入れられる技術開発に取り組んできた。来年度からは国内各地でスマート農業技術を農家で実証するプロジェクトが開始され、本プログラムで適応技術として開発した栽培管理支援システムを生産体系に組み込んだ実証が行われる計画。また、上述した国際連携プロジェクトMIRSA-3では、東南アジアにおける持続的な水稲生産と緩和策の両立を目指して、現地の生産者団体や普及組織への技術普及に向けた取り組みも実施する予定。適応技術や緩和技術の開発にあたって、導入コストや便益、それらのトレードオフを考慮することは当然であるが、同時に気候変動対応においては、イノベーションを引き起こす革新的な技術開発への挑戦も必要と考えている。
- 7) 緩和技術、適応技術の地域的な適用は、それぞれの地域が気候変動のもとで持続的な農業生産を行っていくために必要な取組であり、今後の重要な研究課題と認識している。今年成立した気候変動適応法のもとで、地方自治体レベルの適応計画策定が進められるので、本プログラムの研究成果を活用して自治体による適応計画策定を支援する予定。
- 8) 適応と緩和の統合的かつ多面的な評価は、農研機構の気候変動対応プログラムが全体として取り組む必要があり、農研機構の様々な分野の研究者や外部有識者の意見を伺いながら進めていく。農業生態系から気候システムへのフィードバックを考慮した気象予測については、水田生態系モデルを大気循環モデルと結合させて、耕地気象や群落微気象を予測する研究を進めており、将来予測への利用も考えている。季節内から季節予測については、グローバルスケールでは、課題5が実用化に向けて研究を進めており、国内では、気象庁が提供する3ヶ月予報の2ヶ月目の情報の利用について、今年度から研究に着手したところ。

## 2) 課題別

### 第1部 農地における温暖化の緩和

#### 課題1 農地土壌からの温室効果ガス排出・吸収量の全国評価

研究課題の目的は明確で（温室効果ガス（GHG）緩和ポテンシャルの全国評価）、著名な国際誌で論文が公表されている。また、様々な農地管理の条件下でGHG排出量を計算するための非常に有効なモデルが開発されている。将来シナリオの解析では土壌有機物、メタン（CH<sub>4</sub>）及び亜酸化窒素間（N<sub>2</sub>O）のトレードオフを提示しており、注目に値する。今後は以下の様な点に留意し研究を進められたい。

##### 1) 不確実性の解析

本研究課題の主要部分は数理モデルに基づいているので、モデルでの予測における不確実性を解析することは有効であろう。不確実性の要因としては、パラメータ値、モデル式、説明変数の値、特に地域スケール、全国スケールで集められた農家の生産管理に関する説明変数の値が考えられ、これらの不確実性によりシミュレーションモデルの信頼性が損なわれるだろう。また、感度分析も試みてはどうか。感度分析により個々の説明変数の重要性がわかり、最も影響の大きい要因を同定できるだろう（例 Lamboni et al. 2009. Field Crop Research 113, 312-320）。将来的には、アンサンブルモデルにより、GHG 排出シミュレーションの頑健性を評価し、モデルを選択することも考慮して欲しい。

## 2) モデルの改良

N<sub>2</sub>O 排出量を推定する経験的モデルは土壌や作物を考慮できるよう改良すべきであろう。将来的には農地からの N<sub>2</sub>O 排出量の予測には DNDC モデルを使ってはどうか。

## 3) 緩和策の多角的評価

提案された緩和策による環境面での利益とそれらが作物収量や経済的な収益性に及ぼす影響との間に生じるトレードオフを分析すべきである。もし提案された緩和策により収量や収益性が減れば、農家が実際に使うことは考えにくい。収量や収益性を含む複数の基準により緩和策を評価すべきである。

## 4) 農研機構内での連携

全球気候モデル（GCM）の選択では、他の課題（例：気候変動の影響評価、適応策）と整合性を取るべきであろう。

N<sub>2</sub>O 排出量のモデル化については、より改良された窒素施肥方法に対応すべきである。窒素施肥の影響を研究しているグループは N<sub>2</sub>O 排出量も調べているが、施肥日、施肥回数及び肥料タイプも排出量に影響する。これらを最適化することにより GHG 排出量の低減が見込める。農研機構内の他の研究プログラムと連携することを薦める。

## 5) 国際連携

経験的モデルと Roth C モデルを組み合わせる N<sub>2</sub>O 排出量を推定する方法は、アジアの他の国や研究機関と共有できる。また、緩和策シナリオの結果はアジアの主要稲作国の「各国が自主的に決定する約束草案（NDC）」の農業分野での実践の重要なガイダンスとなるだろう。

評定：A

## (回答)

- 1) GHG 排出量評価予測における不確実性とその要因の理解についての重要な指摘であると認識している。我々はこれまでに、モデルそのものの改良とともに、全国の農地土壌の理化学性調査データや 1km メッシュ気象データなどを取り込み、不確実性の整理やアウトプット精度の向上に努めてきた。モデルそのものの不確実性はある程度評価できているが、全国計算における入力データ、特に、ご指摘いただいた農業活動量の不確実性評価及び感度分析は今後の重要な課題と考えている。なお、気候モデルや作物モデルと比べて、温室効果ガス排出モデルの種類はずっと少ないのが現状である。ご指摘のアンサンブルモデルシミュレーションについては、将来の課題としたい。
- 2) 経験的モデルを土壌や作物別にするためには現在のデータでは不十分で、より多くの排出量の実測データが必要。このためデータの集積を進める。N<sub>2</sub>O の推定については、統計モデルとは別に、メカニスティックなモデルの開発にも取り組んでいるところ。
- 3) 農業活動における GHG 削減の取組の重要性を農家に理解してもらい農業現場に普及させるうえできわめて重要なご意見であり、課題 2、3 も含めた温暖化緩和技術、及び

適応策も含む研究全体の課題と認識して取組んでいる。例えば、課題2で開発した中干し延長による GHG 削減技術は収量への影響がなく、かつ政府の環境保全型農業直接支払いというインセンティブが施されており、その水管理技術による GHG 削減程度を本課題で評価できるようにモデル改良を行っている。

- 4) GCM については、課題5と密接に連携しながら進めており、今後もそのように取組んでいく予定。また窒素については、課題6、7で紹介したように、温暖化条件下の水稲栽培では窒素肥料散布は収量と品質のトレードオフを考慮しながら施肥のタイミングや肥料タイプを選択する高度な栽培技術となりつつあり、これに対応した GHG 排出評価に向けて、メカニスティックなモデル開発などで他のプログラムを含めた連携を強めていく。
- 5) 我々の研究成果や開発技術はアジアの国々の農業分野の GHG 削減に大きく貢献できると考えている。課題3で述べているように、農水省委託プロジェクトや APEC 基金を通じたワークショップやキャパシティビルディング活動により情報提供や技術移転を進めている。

## 課題2 農地からの温室効果ガス排出削減技術

本研究課題では、水田からの CH<sub>4</sub> ガス発生量及び農地土壌からの N<sub>2</sub>O 排出量を削減しながら土壌有機物を蓄積する様々な技術が開発されている。中干延長による CH<sub>4</sub> 削減技術は広く普及している。また、ダイズ畑に硝酸細菌 (*Bradyrhizobium diazoefficiens*) を接種し N<sub>2</sub>O 排出量を削減する研究は新規で、世界をリードしている。IPCC の国別 GHG インベントリーガイドラインへの貢献は優れている。また、著名な科学雑誌に非常に多くの論文が公表されている。今後の研究に向けて以下を推奨する。

### 1) 課題1との連携強化

課題1と2は独立しているが、部分的には同じ問題に対応している。課題2は課題1で開発されたモデルを有効に使えるだろう。例えば、課題2トピック3で実施された実験の N<sub>2</sub>O 排出量を課題1のモデルで評価してはどうか。逆に、課題2で得られたデータは課題1のモデルの評価に使えるだろう。

### 2) 緩和策の作物収量及び収益性に対する影響評価

提案された緩和策は、作物収量や収益性にマイナスの影響を与えるかもしれない。そうであれば、農家が実際にそれらの技術を使うとは考えられない。従って、収量や収益性も含めて多角的に緩和策を評価すべきであろう。なお、これらは病虫害、減収、作物品質等の影響を受けることに留意して欲しい。

### 3) 更なる解析

バイオ炭についての興味深いメタアナリシスが実施されている。他のトピックについても同様の解析を行ってはどうか。可能であれば、様々な緩和策の既存データの統合を目指してより体系的に解析して欲しい。

加えて、課題全体に対して LCA 特にフットプリント解析とリンクした LCA をもっと行ってはどうか。

### 4) IPCC ガイドラインの改良に向けて

農業研究において世界をリードする研究機関として、モンスーンアジアの稲作主体の農業生産体系を考慮し、IPCC ガイドラインの優れた点と欠点を評価し、改正する努力を期待する。

評価：A

## (回答)

- 1) 課題間の連携の重要性はご指摘の通りであり、課題1と2は既に連携している。例えば、水田におけるCH<sub>4</sub>発生量や畑地からのN<sub>2</sub>O発生量に関する圃場データを課題2から1へ提供し、DNDCモデル等の改良に利用などの例がある。今後さらなる連携を進めていく予定。
- 2) 収量維持の重要性はご指摘の通りであり、本課題でも収量及び品質を維持し、かつ生産性向上につながるGHG緩和技術の開発を目指している。例えば、水田の中干延長によるCH<sub>4</sub>削減技術は従来の水管理と収量は同等であり、すでに普及が進んでいる。今後ともこのような技術開発とその評価を進めていく予定。
- 3) バイオ炭だけでなく、他にも硝化抑制剤や被覆肥料のN<sub>2</sub>O削減効果メタアナリシス(Akiyama et al., 2009)を行っており、さらに進めていきたいと考えている。LCAに関してはこれまでもバイオ炭の農地施用やカバークロップ不耕起栽培について取り組んできており、また現在は家畜排泄物の草地還元に関して取り組んでいるところ。またフットプリント解析については、研究者間の連携を進めていきたいと考えている。
- 4) IPCCガイドラインの改良に関しては世界の専門家及び政府によるレビューが行われているところ。農研機構からは2名が代表執筆者になっており、すでに4回の執筆者会合に参加し、世界中からのレビュー意見に対応しつつ、2019年5月の公表に向けた改訂作業に貢献しているところ。ご指摘いただいた期待に添えるように努力したい。

## 課題3 温暖化緩和技術のモンスーンアジアへの展開と国際連携

本課題では複数の緩和策を開発しモンスーンアジアに導入している。国際的な枠組み(IPCC)やネットワーク(GRA)、構想(4per1000、ALTENA)への貢献は高く評価できる。GHG削減のためのモニタリング、報告及び検証手法を記載したハンドブックは多くの国々で非常に有効であり、また、研究の方向性も適確である。今後の研究においては以下の点を考慮されたい。

### 1) 収益性への影響評価

本課題では、緩和策の環境や収量への影響は評価、比較されているが、収益性への影響に関してはほとんど検討されていない。環境への正の影響と収量、収益とのトレードオフを解析することを薦める。

### 2) 農家の選択肢拡大

GHG排出量削減に、自然排水とかん水を繰り返す節水栽培(AWD)は効果的だと考えられる。しかし、水を制限なく使える状況では農家がAWDの導入に興味を示すかは不明である。その場合の技術導入方法を考えているか。中干はこれに替わるものであり、GHG削減技術の導入のきっかけとなろう。そのため、これらの地域での中干の実験を薦める。

### 3) ガイドライン及びハンドブックの影響評価

本課題で作成されたガイドラインやハンドブックは非常に興味深い但实际上に使われているのだろうか。これらの資料の影響を調査して欲しい。

### 4) 課題1で開発されたシナリオ解析の活用

本課題では課題1の緩和シナリオが活用できる。実験では乾季にトウモロコシやソルガム等を作付けしてCH<sub>4</sub>やN<sub>2</sub>Oの排出量等を測定しているが、タマネギやニンニク、コショウ、タバコや他の野菜のように窒素消費量の多い作目の場合はどうだろうか。雨季に連続灌漑で稲作を行った後、AWDや中干を行った場合はどうなるのだろうか。稲作体系におけ

る地下水への窒素溶出については、IRRIが90年代に行った天水田コンソーシアムの結果が役立つだろう。

## 5) 国際連携

より大きな成果を得るために、研究機関だけでなく政策立案に関わる国の機関や民間団体にも協力関係を広げてはどうか。また、ベトナムの1M5R（優良管理体系）やフィリピンのPalayCheck（フィルライスがコメ生産性向上のために作成した技術指針）、インドネシアのRICM（総合的稲作管理）を評価したり、修正や調整を提案すれば、「モンスーンアジアにおいて現行収量を維持しながらCH<sub>4</sub>やN<sub>2</sub>O排出量を3割削減（二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）換算）する」という本課題の目的達成に大きく近づくことになる。地域特異的な総合的GHG削減技術や炭素貯留技術を調査するのも良いかもしれない。また、本課題で開発されたガイドライン等の資料を用いて国際的な研修を企画してはどうか。研修は関係者にガイドラインの原則を説明する良い機会となる。

評定：A

### （回答）

- 1) ご指摘のように、これまで指標としてきた収量／生産性を経済的収益性に拡張することには意味があると考え。更に、環境に対する便益については、“life cycle assessment (LCA)”の視点を導入することで、これまで指標としてきた2つの指標をいずれも強化でき、開発された技術の実社会における意義をより明瞭に説明できるようになると考える。一方で、それらを追加実施するためには、資源、特に人的資源（経済学者・LCA 専門家等）の追加投入が必要となるので、将来の実施に向けて、他のプログラムや他機関との連携を検討したい。
- 2) ①東南アジアの水資源の豊富な一部地域において、AWDの導入によりGHG排出削減と同時に有意な増収が実現した例があり、このような増収の見込める地域を対象とすれば増収が農家のincentiveとなり得ると考える。②GHG排出抑制能はMDでもAWDの8-9割程度はあると考えられるため、節水の必要性の低い農家に対してMDの採用も選択肢として用意することには意義があり、今後の研究課題と考えている。
- 3) 様々な場を活用して、本成果を政策立案者、研究者、農業者等に広報している段階であり、普及効果の調査は将来の課題である。なお、本年度は、農業分野のGHGに関するグローバル・リサーチ・アライアンス（GRA）理事会や、FAO等主催ワークショップ（バンコク）にて、これらguidelines・handbooksの普及に係る取り組みを行った。  
GRA理事会: <https://globalresearchalliance.org/e/2018-council-meeting-berlin/>  
Workshop: <https://faounfccagworkshop.wixsite.com/faoricelandscape>
- 4) 課題1とは深く連携しつつ活動を進めているところであり、例えば本年度開始した、東南アジアの水田を対象とした国際連携プロジェクトMIRSA-3においては、課題1で開発された数理モデルによるGHG排出削減効果の長期推定をその研究活動のひとつの柱としている。このように、ご指摘のような具体的なケースを対象に今後も課題1の成果を利用する。
- 5) 政策立案に係る国家機関や民間セクターとの連携の重要性は認識しており、3)にて具体例を挙げたような、各国政策立案者の出席する会議等で積極的な発信を行っているところ。各国の取組も承知しており、これまでそれら取組の共通項に焦点を当てた研究が主であったが、より各国・各地で実施されている具体的なアプローチにも踏み込んだ研究も進め、技術・知見の社会還元をより意識したい。なお、これら各国・各地の具体的なアプローチの総合評価を農研機構が単独で実施することは困難なので、今年度開始した国際連携プロジェクトMIRSA-3に参画している各国機関と実施可能性を検討したい。” Training sessions”

についても、3)で挙げたワークショップの他、チリにおいても同国の Institute of Agricultural Research などと協力して APEC 基金を用いた capability building 活動を本年 11 月に行ったところ。

## 第 2 部 作物生産における気候変動の影響評価

### 課題 4 イネの高温・高 CO<sub>2</sub> 応答機構：実験的評価とモデル化

本課題では、世界で初めて稲作における開放系大気二酸化炭素増加 (FACE) 設備が整備され、イネの収量及び品質に関する気温と CO<sub>2</sub> の影響が解析された。非常に興味深い結果が得られており主要誌で公表されている。さらに、海外とも強固な連携関係が構築されており国際活動も活発である。提示された研究計画は意欲的で困難であるが、非常に重要である。以下に推奨点等を示す。

#### 1) 更なる解析

CO<sub>2</sub> の収量影響については、年次別の収量に関する別の評価法での結果 (例えば、降水量の多い年と少ない年を分けたもの e.g. McGrath and Lobell 2011) と本課題の結果を比較してはどうか。

コメの窒素含量に及ぼす高 CO<sub>2</sub> の悪影響が窒素施肥方法により緩和できないか調べてみてはどうか。

加温実験も含め別の FACE 実験で得られたデータを本実験のデータと組み合わせて解析してはどうか (e.g. Zhao et al. 2016. Nature plants 3, 16202)。

#### 2) FACE 実験における研究課題

FACE 条件下における土壌中の生物地球化学は注目に値する。

また、実験遂行中の農業生態系から大気系への潜在的なフィードバックに留意すべきである。

赤外線放射の葉面温度への副作用は予想されるより有意に大きく、葉からの蒸発散量を大きく増加させているかもしれない。

#### 3) 地域差の明確化

気温や CO<sub>2</sub> 濃度の上昇により正の影響を受ける地域と負の影響を受ける地域を明示して欲しい。

評価：A

#### (回答)

非常に建設的なお褒めの言葉を頂き感謝する。貴重なコメントを真摯に受け止め、今後の研究や国際連携に活かしたい。

- 1) ご示唆に感謝する。長期圃場試験での収量記録が環境操作実験で得られたデータと同様に貴重なことは、評価者と全く同意見である。それらは相互補完の関係にあり、環境に対する作物反応の結果予測をより頑健なものにする。複数のデータソースを活用し、おそらく作物モデルを使ってメタアナリシスを実施することにより我々の結果と比較しようと思う。なお、長期圃場試験データを用いたコメの収量に影響を及ぼす様々な要因の解析は既に始めている。

また、窒素が気候変動に対する作物の反応を変える最も重要な要因であることは、評価者の指摘のとおりであり、CO<sub>2</sub> 濃度の収量や品質への影響が窒素施肥の量や時期によってどのように変わるかについての実験を行っている。収量や品質に対して窒素施肥方法が良

い影響を与えることもあるが、窒素と品種の相互作用は無視できない。CO<sub>2</sub>濃度、窒素及び品種間の相互作用の解明が適応技術開発において重要であり、現在の主要な研究テーマの一つとなっている。

我々の FACE と T-FACE（通常の FACE に温度操作を加えたもの）の実験結果と他の FACE、開放系での気温上昇実験の結果を組み合わせるとするのはおもしろい提案で、メタアナリシスを実施するための連携をすぐに開始したいと思う。

- 2) 農業生態系からの気象系への潜在的なフィードバックを理解する上で、FACE あるいは気温操作実験下における土壌の生物地球化学が非常に重要なことは、ご指摘のとおりである。現在、安定同位体炭素を用いて土壌-植物-大気系の炭素フローを定量化している。気候変動下における微気象の重要性も認識しており、葉冠構造や植物生理が大きく異なる品種を用いて高 CO<sub>2</sub>濃度下での葉冠における熱及び水収支に関する研究を実施している。

評価者からの指摘のとおり赤外線加熱により葉面における飽差が非常に大きくなることは承知している。この実験から得られたデータと他の加熱方法を使った実験や長期の圃場試験のデータを組合せ気候変動に対する作物反応の予測を頑健なものにしたい。

- 3) コメントに感謝する。気温や高濃度 CO<sub>2</sub>に対する作物の応答は非線形であるため、地域や年次によって気候変動の影響は変わると予想される。作物の生育シミュレーションモデルがこの問に対する唯一の実践的な回答となろうが、シミュレーションモデルの不確実性は大きい。国際連携を通じ、地域差を明確化するためのアンサンブルモデルの構築を試みたい。

## 課題5 主要作物生産への気候変動影響の国内及びグローバル規模での評価

高解像度の気候シナリオを開発しており、ダウンロード可能である。得られたデータセットは国内で広く活用されており、H/H モデルにより、様々な気候変動シナリオを用いてコメの生育、収量及び品質のシミュレーションが実施されている。また、マルチタイプの数理モデルにより様々な気候や社会経済的仮定の下で世界の食料生産予測を行っており、科学的な水準は高い。今後の研究に関して以下を推奨する。

### 1) さらなるデータ解析

本課題で得られた作物生産予測と食料/飼料需要予測の比較を試みてはどうだろうか。そうすれば、食料/飼料の需給バランスが推定でき、不足リスクの解析が可能となる。

### 2) 技術的な改善

栽培面積への気候変動の影響を調べるために生態的ニッチモデリングを利用してはどうか。あるいは、このモデルを利用している研究グループとの連携も考えられる。

現在プロジェクトが実施されている季節内から季節スケールの予測は、気候変動に由来する顕著現象の早期警告の有望なツールあるいは情報源である。

### 3) 気候変動影響評価対象の拡大

コメの収量に対する気候の影響解析は非常に興味深いのが、広域評価については、収量のみで品質については実施されていないようだ。品質についても広域評価を行ってはどうか。

気候変動は病害虫の発生や被害規模にも大きな影響を与えるので、病害虫分野の研究者との連携を期待する。

将来的には、研究対象の作物種を拡大してはどうか。特に果樹や野菜のように高付加価値の農産物の予測は興味深いと思われる。

### 4) 実効性の改善

地方自治体の適応策作成にあたり、高解像度のデータ（リスクマップ、知識、地目図、社会資本、地勢図等）を統合できるか。これが可能であれば、適応策はより現実的で実効性のあるものとなろう。

他の高解像度のデータや実際の測定値を統合して、政策やプログラムの策定や運用に使えるようなモデル改良を考慮すべきである。例えば課題 6 の適応策を支援しているか。

また、課題 1 や 4 の手法やデータを活用することは有効であろう。

評定：A

### (回答)

- 1) 当日発表では、食料需要について先行研究の簡単な仮定を参照したが、現在、他機関と共同で SSP シナリオ (Shared Socioeconomic Pathways) に準拠した食料需要や人間の健康面からみた飢餓・栄養不足のリスクに関する研究も行っている。
- 2) 当研究課題のグローバル研究ではこれまでも、様々なモデル手法の導入に取り組んできた。ニッチモデリングは気候的な作物の栽培適地の評価に有用と考えるが、栽培面積の将来変化は気候要因に加えて社会経済的要因による土地利用変化の影響も受けるので、本課題への適用が有効かどうか専門家に相談したい。

早期警戒については、ダウンスケールした季節内予報/季節予報値を用いた収量予測研究を海外機関と進めており、ここ数年で実用的なシステムとして公開予定である。また 4) にも記すように、熱帯島嶼国における気候変動対応としても活用を予定している。

- 3) コメ品質の広域評価については、現在、まさに解析とモデリングを進めているところであり、既存の水稲品種については、評価・予測のためのモデリングの目途がついている。今後は、現在既に導入されている、または育成中の品種にも対応していく。さらに、病害虫の研究者と共同で、統合的なモデル評価を行う研究フェンドを申請しているところである。なお果樹については、課題 6 が主体となって研究を進めており、本課題は主に気候予測の立場から協力している。同様に、コムギ、ダイズ、野菜、飼料作物などの様々な作物を対象とする気候変動影響評価も、他の課題と連携して取り組んできた。
- 4) より現実的な自治体適応策のために、地形/土地利用、インフラ等のリスク評価のための高解像度モデルの統合化が必要である、との指摘であろう。当研究課題ではこれまでも日本の特定地域において、耕作放棄による気候環境変化とそれが水稲・園芸作物に与える影響の評価、極端降水の増加による水資源・水環境の変化について分野横断・学際的な研究グループを組織し、また政策担当者との議論を重ねてきた。今後は、より実践的かつ政策的な目的のため、課題 4・6・7 との連携を密にしていく。

さらに、海外でも、農業生産を天水に依存せざるを得ない太平洋島嶼国において、土地利用を考慮した地下水資源や肥料確保のための資源循環型農業システムに ICT 技術を用いた天候早期警戒システムを統合化する準備調査を計画している。これらについても課題 6 のほか、課題 1 及び他の地域農業研究センターとの連携で進めていく。

## 第 3 部 農業における気候変動への適応

### 課題 6 日本の作物生産における温暖化適応策の開発と実践

日本農業の重要事項について気候変動に対処するための実践的な解決策を提示できている。多くの学術論文、技術論文を公表しておりまた特許も取得している。今後の研究に向けて以下を推奨する。

#### 1) 環境影響評価

提案された適応策、特にコメや果樹での施肥法による緩和策の環境影響を評価すべきである。評価の際には、 $\text{N}_2\text{O}$  排出量を始め複数の指標を用いること。

## 2) 栽培適地地図の信頼性評価

栽培適地地図は非常に興味深いが、不確実性を解析すべきである。生態的ニッチモデリングには複数の方法があるので、複数のモデルの結果を比較し、本研究課題の結果の頑健性を評価できるであろう。

## 3) 実効性の改善

適応策の導入地域を拡大するためには、更なる改善と費用対効果の分析が有用であろう。追肥による適応策について、タンパクやアミロース含量、ゲルコンシステンシー、糊化温度といった他の品質特性を損なうことなく実行するための最適で実践的な追加窒素の量は明らかか。移植日の変更や、早生あるいは晩生品種の活用についてはどうか。

果樹の気候変動適応については、栽培や移植計画を立てる際に栽培適地予測が実践的に活用できるよう、それぞれの樹種の栽培、土壌、病害虫管理の専門家により検証された実測値を統合すると良いだろう。

評定：A

## (回答)

- 1) 課題 1、2 でも述べたように、適応策と緩和策のコベネフィットについては常に念頭に置いておかなければならないと認識している。

水稻栽培において、田面水のない状況で窒素施肥を行ったり、田面水などに窒素濃度の高い状況で田面水が消失したりすると、気になるレベルの  $\text{N}_2\text{O}$  flux のピークが見られることが知られており、海外においては窒素施肥レベルが日本よりもかなり高い条件ではこのような現象が顕著。しかし、日本の通常の施肥レベルで、田面水の十分存在する環境で施肥を行えば、 $\text{N}_2\text{O}$  の放出量に大きな影響はない。もちろん、栽培管理技術と  $\text{N}_2\text{O}$  の排出増とのトレードオフについて議論する必要が生じると考える。

果樹における温暖化適応策として、N 施用の減少や土壌有機物の蓄積による対策技術があり、これらは単に温暖化の被害を軽減するだけでなく、GHG 削減にも有効である。現在は温暖化の被害を軽減する効果についての検証を進めているが、次のステップとしてこうした適応策の環境影響を評価する予定である。

- 2) 将来の栽培適地マップの不確実性については、現在、多くの気候シナリオを用いて確率マップの開発に取り組んでいる。結論の頑健性については、開発技術の現場実証を進める中で評価し、技術の高度化を行いたいと考えている。なお、栽培適地判定モデル自体のもつ不確実性についても検討しているが、ニッチモデリングの導入可能性については専門家と相談したい。
- 3) 本課題で紹介した温暖化適応技術は、費用対効果の分析を含めて、日本各地域で現場実証研究を行っており、すでいくつかの技術は課題 7 で開発している早期警戒・栽培管理支援システムのコンテンツとして搭載され、利用拡大を進めているところである。

水稻における高温障害回避のための幼穂形成期の窒素施肥（穂肥）は、食味を低下させる玄米タンパクが大幅に上昇することはないことを既に明らかにしている。現在、玄米タンパクモデルを作成しているところであり、今後、穂肥とタンパクとの関係を一層明確にしていく予定である。アミロースは、品種や熟期の影響を受けることが分かっている。糊化の均一性については、穂肥施用に伴う品質の向上により高まると考えられる。晩生品種の利用は、夏季の高温環境下での登熟を避ける対策技術として各地域ブロックで普及が進

んでいる。また、日本では稲作経営の規模拡大が進みつつあり、作業計画上から早晚性の異なる多数の品種の利用はすでに行われている。

果樹において現在開発している適地マップは将来の気候変化によるリスクを評価しており、まずは現時点での改植や樹種変更の意思決定への利用を想定している。もちろんご指摘のように、各地域への適用に際しては、土壌条件、栽培技術、病害虫の種類や発生状況などを十分考慮することにより有効性は高まると考えている。

## 課題7 高解像度気象データの活用による気候変動リスク軽減のための栽培管理支援システムの開発

高解像度のグリッド気象データシステムを開発しており、オンデマンドでデータセットを配布している。また、作物生育シミュレーションモデルを開発しており、これらを基に気象及び気候に由来するリスクを軽減するための作物管理における意思決定支援システムを開発している。意思決定支援システムの技術的な説明は非常にクリアであったが、想定されるユーザーについての説明はあまりなく、このシステムが実際にはどのように使われるかははっきりしない。論文の科学的水準は非常に高くシステムも有望だと思えるが、ビジネスモデルが不明瞭である。研究計画については、是非達成して欲しい。今後の研究について、以下を推奨する。

### 1) ビジネスモデルの明確化

利用者は誰か。システム利用者の想定人数は。どのような意思決定がなされるのか。利用者は何を得られるのか。農家や機械メーカーは料金を払ってこのシステムにアクセスするのか。課金制度は成り立つか。料金はいくりに設定するのか。

### 2) 主要な環境問題への対応

本システムにおいてGHG排出を始めとする主要な環境問題に対応することは有用であろう。GHGについては、課題1で開発されたモデルを組み込んではどうか。

### 3) 課題間連携

課題6とより緊密な連携を図ってはどうか。また、適応策を研究する3つの課題（課題5、6及び7）は連携することによりシナジー効果が得られるだろう。

評定：A

## (回答)

1) 最終的なユーザは生産者だが、そこに情報を届け意思決定を促す流れとしては、1) 大規模生産者や普及指導者によるシステムの直接利用とともに、2) ICT企業等が提供する営農管理システムを通して農家に提供、3) JA、都道府県が農家のための独自システムを構築する際に開発ノウハウを提供、など複数ルートを想定しており、ビジネスモデルはそれぞれに異なると考えている。最終的なユーザーとしての生産者は、10ha以上の規模を持つ生産者（約2万戸）が、当面の普及対象と考えている。利用に当たっての課金体系などは、今後の検討課題であり、民間事業者が参加しているデータ利用のコンソーシアムなどを通じて、農研機構と企業の間で協議を進めているところ。

生産者からの要望をシステムに反映するために、様々な研究会、アウトリーチ活動、実証研究を通じてシステム開発に反映してきた経緯があり、今後も進める予定。

2) 農研機構を中心に、農業データ連携基盤という多数の農業関連情報を共有可能なクラウドサービスの構築と運営が進められており、それを通じて、栽培管理支援情報と課題1で

開発された GHG 排出量評価を、ユーザーの要求に応じて組み合わせる基盤が形成されつつある。

- 3) 課題 6 と 7 は、当初から一体的に進めており、多くの研究担当者が課題 6 と 7 の両課題に関係しており、ご指摘の様に両課題のシナジーの重要性を認識した課題構成となっている。そのため、開発した温暖化適応技術（課題 6）のうち、情報システムへの搭載によって、ユーザーの利便性が高まる技術は、すぐにシステムのコンテンツ開発（課題 7）に着手できる体制となっている。将来の温暖化影響予測・評価（課題 5）と現在の適応技術開発（課題 7）の双方に必要な作物生育モデル開発などについても共同で研究を行っている。