

「衛星データ・アンサンブル気象季節予報・作物モデルを融合した全球作物生育監視・収量予報システムの構築」の成果の概要について

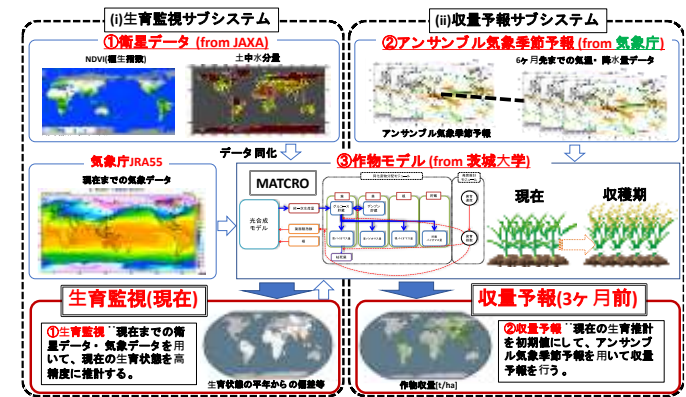
実施体制	主管実施機関 研究代表者名	茨城大学 准教授 増富祐司	実施期間	令和1年度～ 令和3年度 (3年間)	実施規模	予算総額(契約額) 58.5 百万円		
	共同参画機関	農研機構				1年目	2年目	3年目
						19.1百万円	19.5百万円	19.9百万円

背景・全体目標

[背景] 気候の年々変動や異常気象の増大による農作物不作が主要因となって、世界の栄養不足人口は2014年以降増大してきている。このような気候に関連したリスクに対して食糧安全保障を確保するには、事前にそのリスクを把握し、適切な計画や政策を立て、迅速に対応行動を取ることが重要である。

[全体目標] 本課題では、食糧安全保障に関わる気候リスクを軽減・回避するための科学的な情報を提供する「**全球作物生育監視・収量予報システム**」を構築することを目的とする。

全球作物生育監視・収量予報システムの開発



課題概要

全体概要・主な成果

- ・ 「**全球作物生育監視・収量予報システム**」(Crop MoniCast)を開発し、限定公開をしている。
- ・ サブシステム「**収量予報サブシステム**」を開発した。
- ・ 高精度に水稻収量を推計する**作物モデルMATCRO-Riceを開発**。
- ・ 1993年の日本の大冷害を**8月初め(収穫の1,2ヶ月前)から予報に成功**。
- ・ サブシステム「**生育監視サブシステム**」を開発した。
- ・ **GCOM-CのLAIデータ**を用いて作物モデルのLAIを修正し(/同化し)、収量推計を行うシステムを構築した。

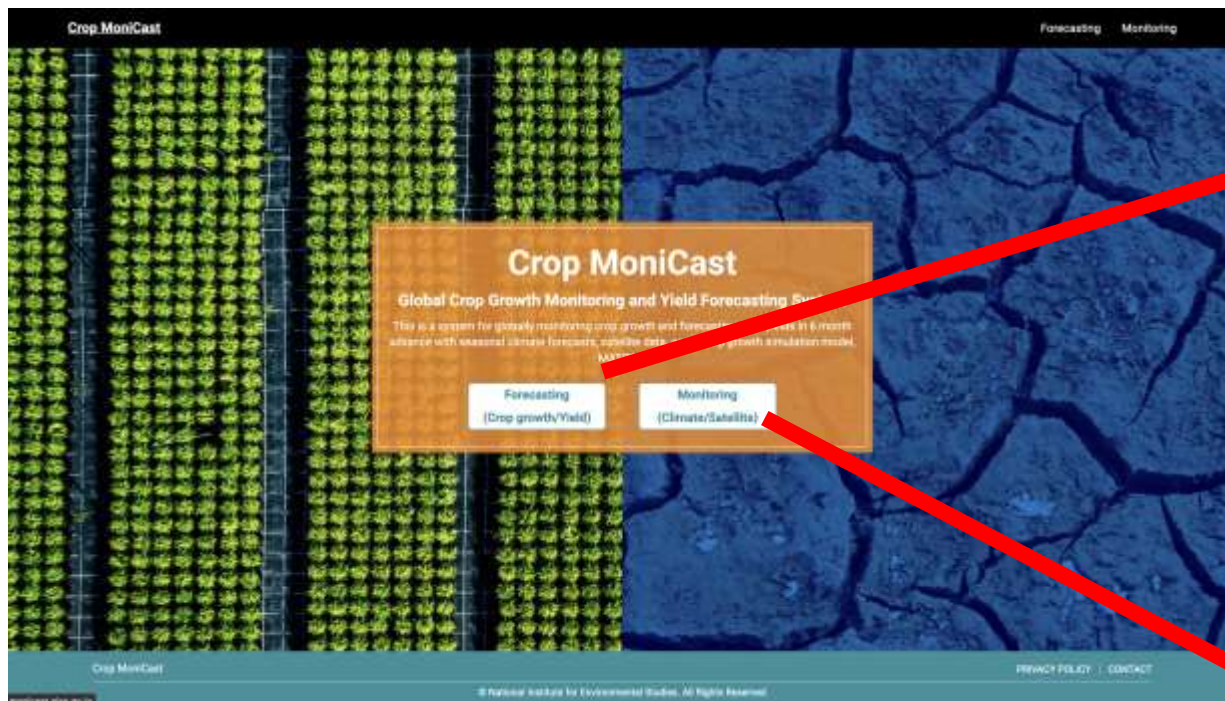


収量予報システムの表示画面

③ 「Webシステムの開発」

実施内容・成果

「**全球作物生育監視・収量予報システム**」(Crop MoniCast)を開発し、**限定公開***をしている。



収量予報サブシステム



生育監視サブシステム

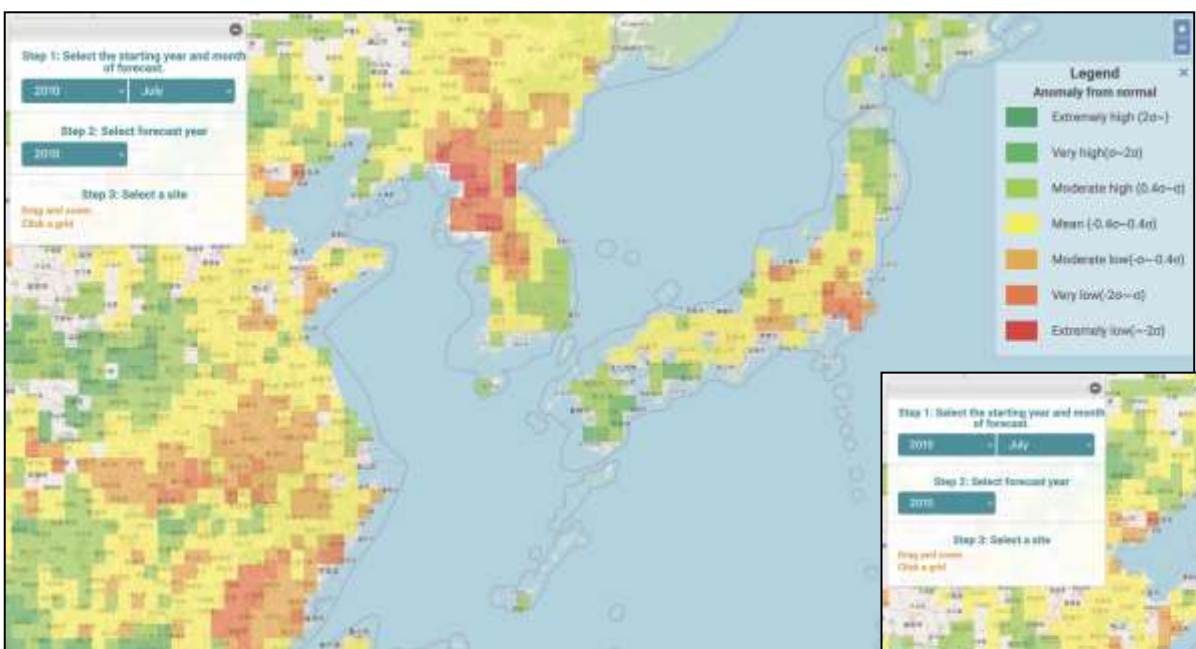
- 全球作物生育監視・収量予報システム「Crop MoniCast」のフロントページ
- Forecasting (Crop growth/Yield)とMonitoring(Climate/Satellite)の入口があり、クリックすると各システムに行く。

* : 申請・許可によりシステムにアクセスできる。

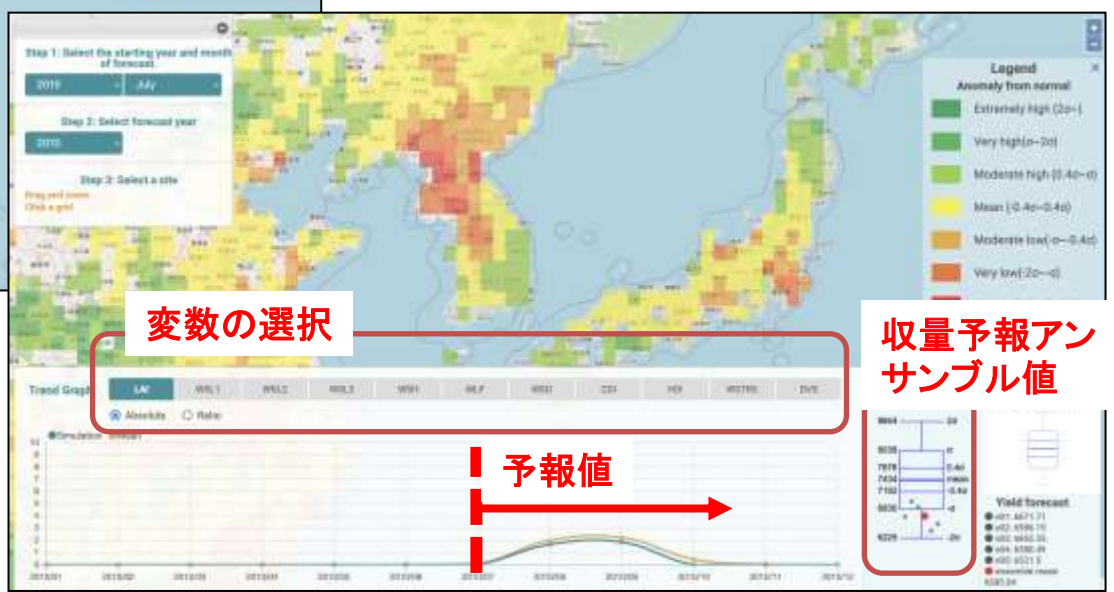
① 「収量予報サブシステムの開発」

実施内容・成果

「全球作物生育監視・収量予報システム」のサブシステム「収量予報サブシステム」を開発した。



Step3: グリッドをクリックすると、そのグリッドに関する詳細情報(収量アンサンブル値、LAI等の時系列)が得られる



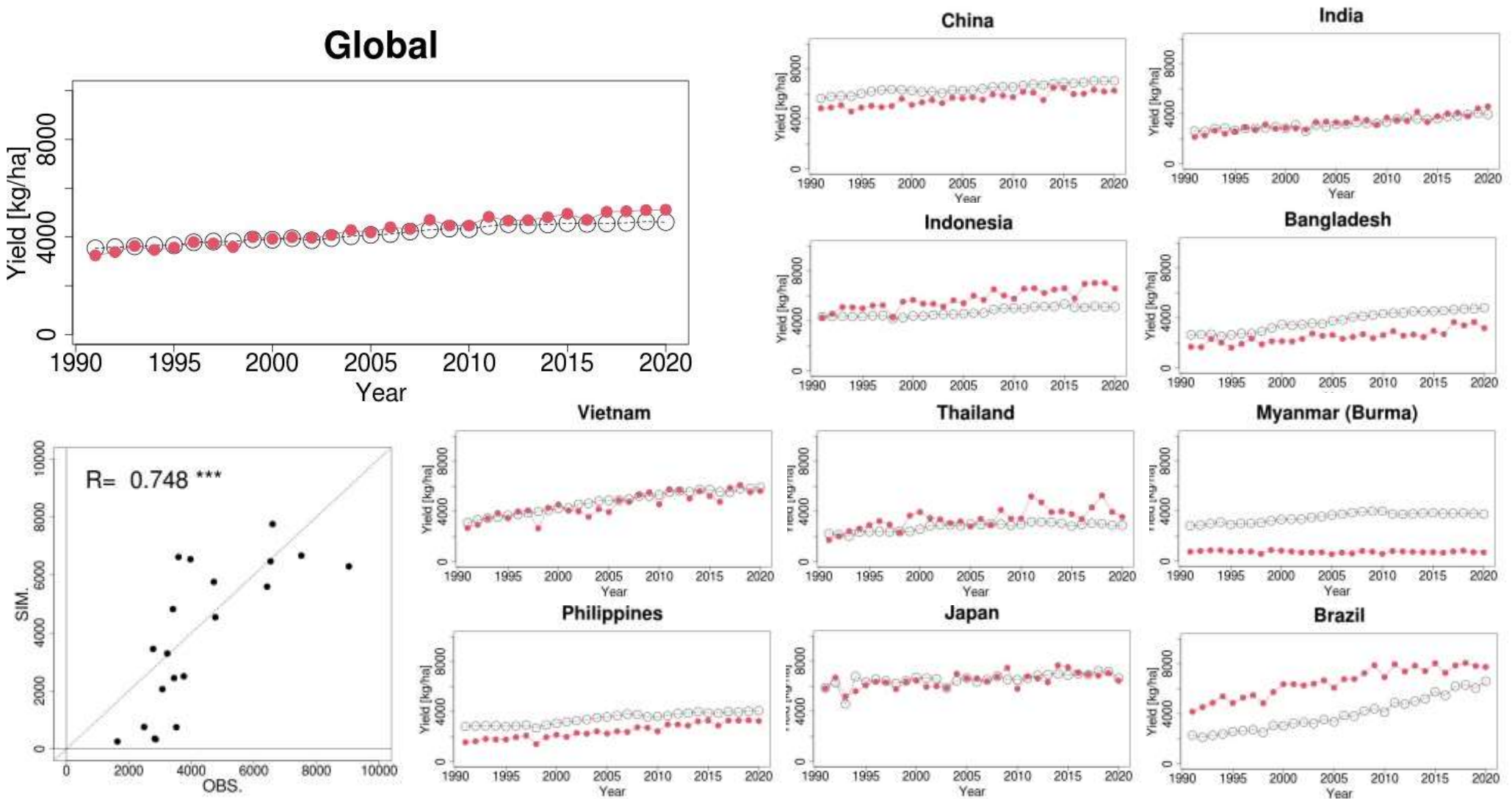
Step1: 予報開始年・月を選択
Step2: 予報年を選択(開始年及び前後1年から選択)
色の違いによって予報値が平年偏差のどのあたりに位置するかを表している。

オレンジ: 平年値、青: 予報値

① 「収量予報サブシステムの開発」

実施内容・成果

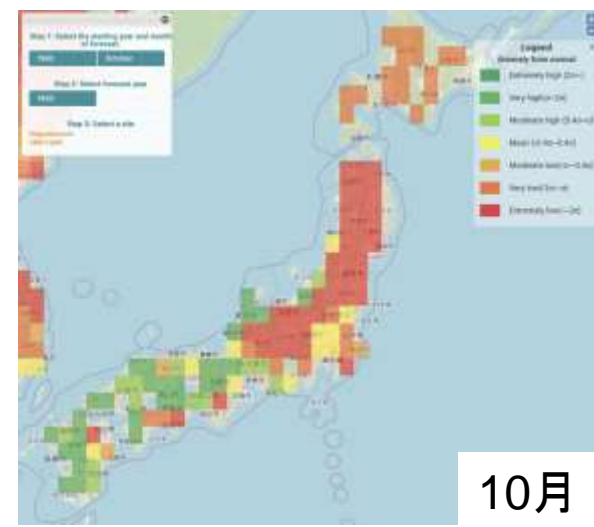
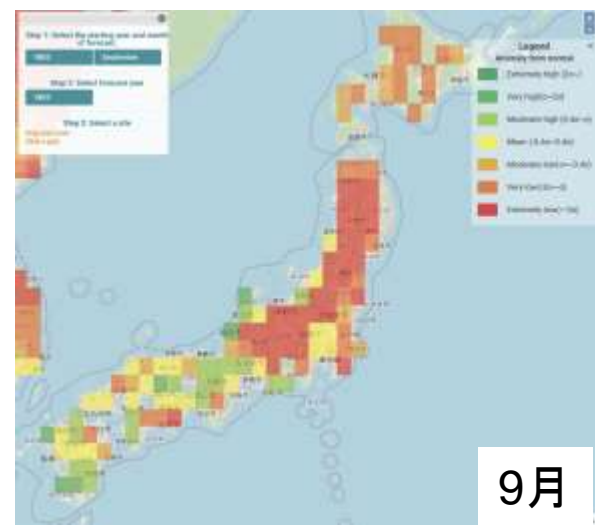
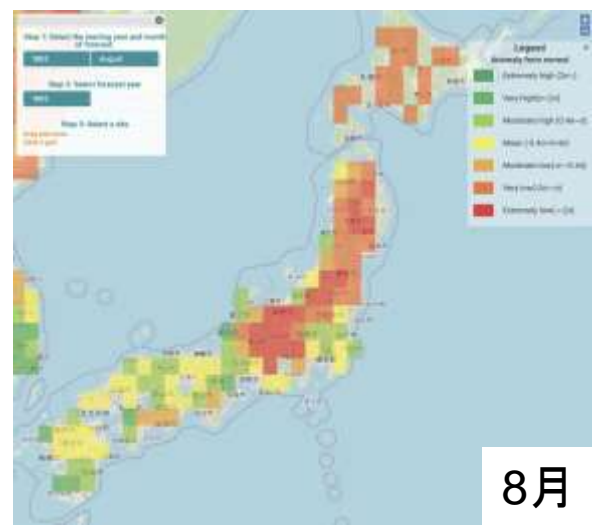
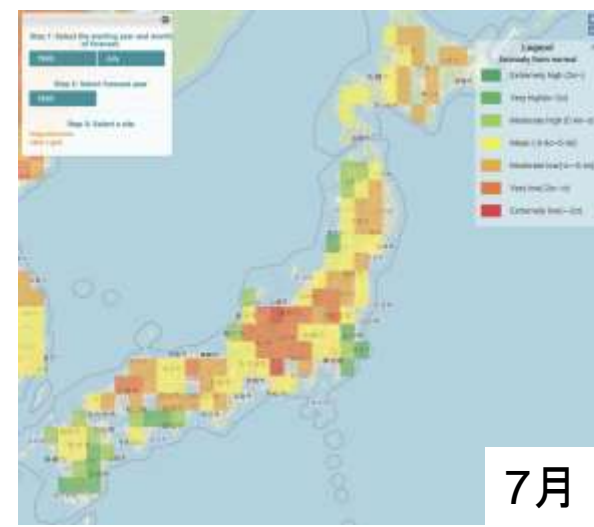
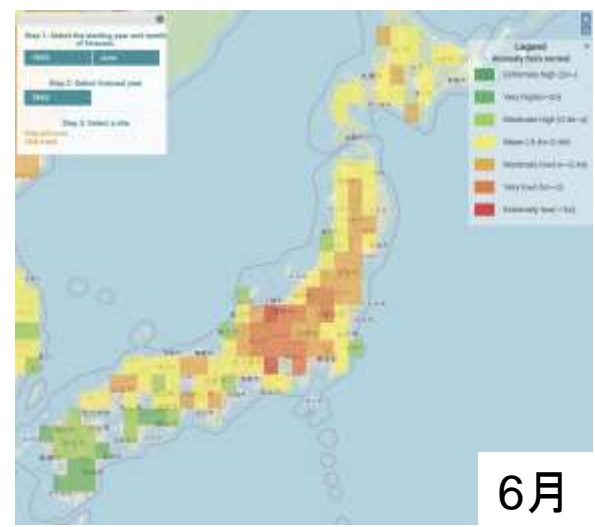
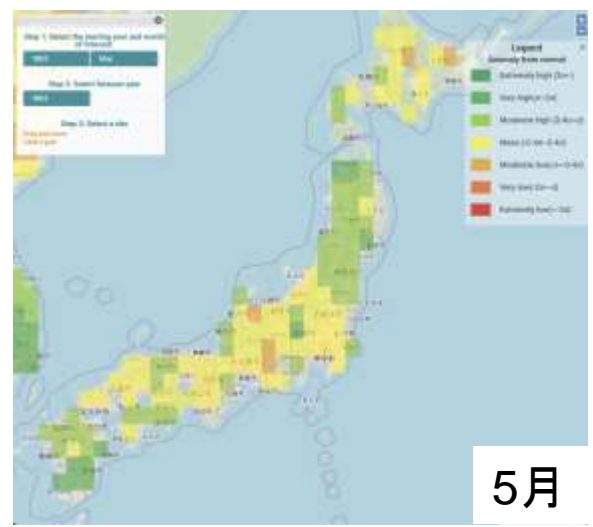
- 高精度に水稲収量を推計する作物モデルMATCRO-Riceを開発。
 - グローバルにパラメータを調整し、水稲生産上位10カ国について平均誤差率30%以下を達成



① 「収量予報サブシステムの開発」

実施内容・成果

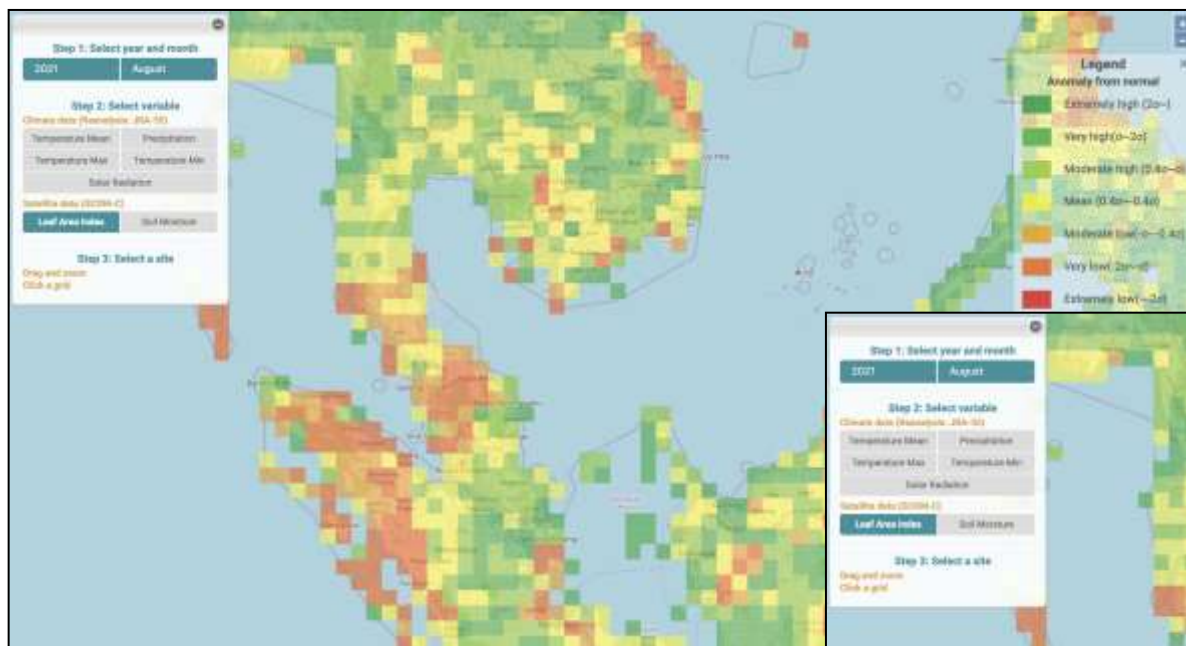
1993年の日本の大冷害を8月初め(収穫の1, 2ヶ月前)から予報に成功。



② 「生育監視サブシステムの開発」

実施内容・成果

「全球作物生育監視・収量予報システム」のサブシステム「生育監視サブシステム」を開発した。



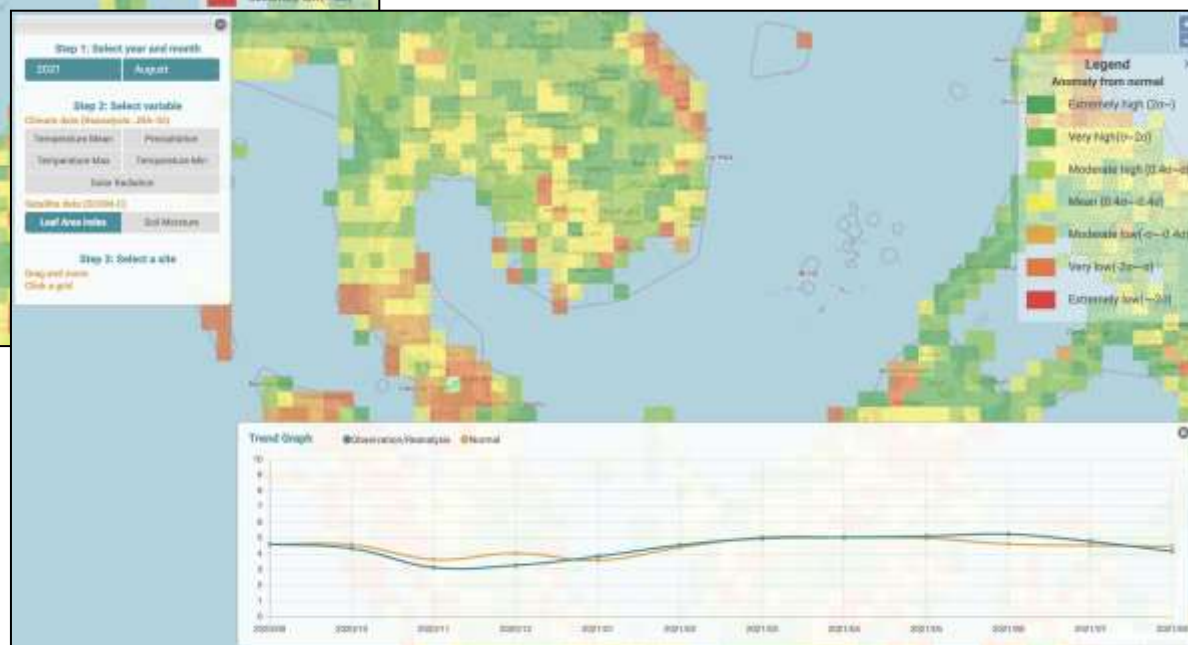
Step1: 監視年・月を選択

Step2: 変数を選択

LAI、土中水分量、気象変数(平均気温・最高気温・最低気温・降水量・日射量)の中から選択

色の違いによって平年偏差のどのあたりに位置するかを表している。

Step3: グリッドをクリックすると、そのグリッドに関する過去の時系列が平年値とともに得られる。



オレンジ: 平年値、**青:** 予報値

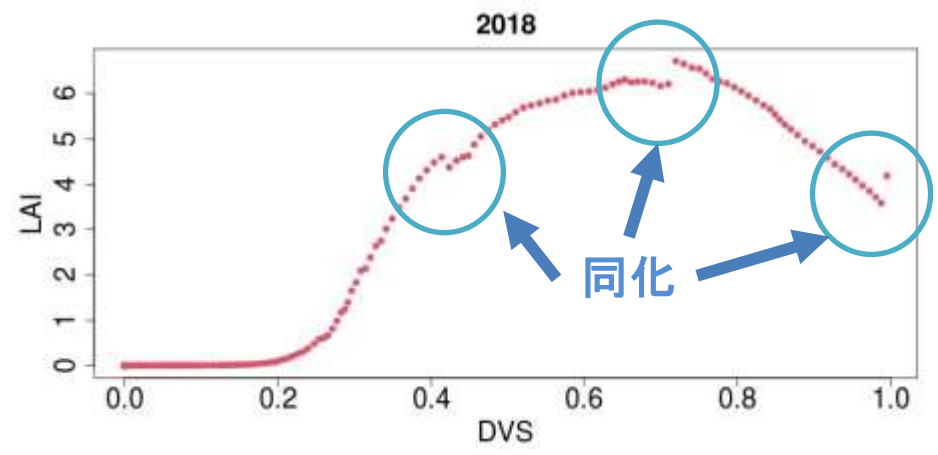
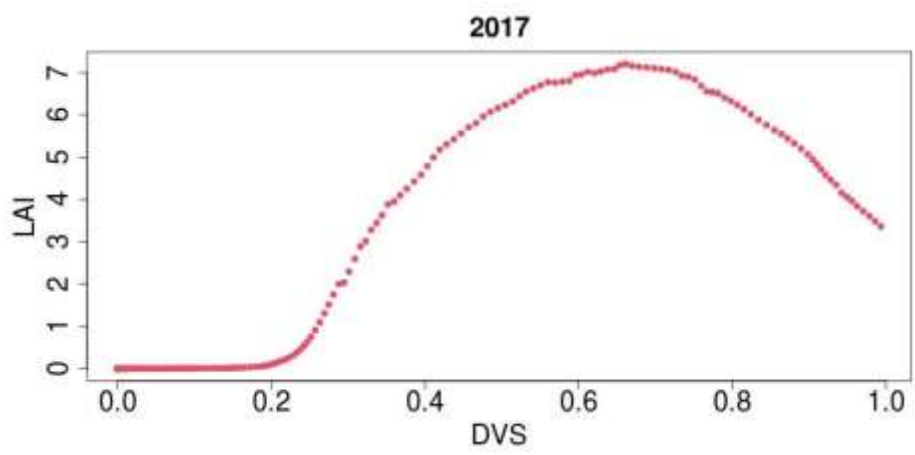
② 「生育監視サブシステムの開発」

実施内容・成果

GCOM-CのLAIデータを用いて作物モデルのLAIを修正し(/同化し)、収量推計を行うシステムを構築した。

$$LAI_{assim}(yr,mon,gr)/LAI_{sim}(yrs,mon,gr)=LAI_{obs}(yr,mon-1,gr)/LAI_{obs}(yrs,mon-1,gr)$$

$\frac{\text{修正されたLAI}}{\text{モデルの平年LAI}} = \frac{\text{前月の観測のLAI}}{\text{前月の観測の平年LAI}}$ \rightarrow 前月のLAIの観測値の偏差とモデルの偏差が等しくなる様に修正



GCOM-Cのデータがある2018年以降にデータ同化を実施

その他の成果

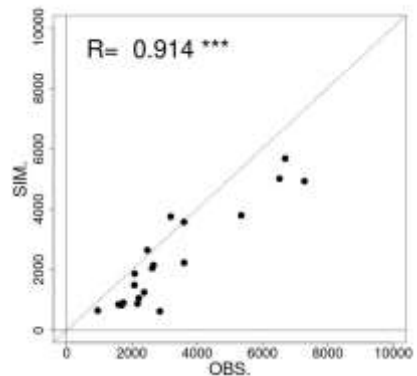
これまで得られた成果 (特許出願や論文発表数等)	特許出願	査読付き 投稿論文	その他 研究発表	実用化事業	プレスリリー ス・取材対応	展示会展
	国内 : 0 国際 : 0	国内 : 0 国際 : 1	国内 : 7 国際 : 3	国内 : 0 国際 : 0	国内 : 1 国際 : 0	国内 : 0 国際 : 0
	受賞・表彰リスト		特になし			

成果展開の状況・期待される効果

- 国立環境研究所気候変動適応センターが管理・運営するアジア太平洋気候変動適応情報プラットフォーム (AP-PLAT) から一般公開の予定
- 各国政府やFAO等の農業関係の機関で利用されることが期待される。
- WMOの**早期警戒システム普及**に係る行動計画への貢献も期待される。

今後の研究開発計画

- 小麦・大豆・とうもろこし**への展開 (環境省推進費 (令和3~7年))
- 高解像度**収量予報への発展 (科研費 (基盤A) への申請済)
- 特許**の出願



小麦モデルの精度評価



AP-PLAT

事後評価票

令和4年3月末現在

1. プログラム名 宇宙利用技術創出プログラム								
2. 課題名 衛星データ・アンサンブル気象季節予報・作物モデルを融合した全球作物生育監視・収量予報システムの構築								
3. 主管実施機関・研究代表者 国立大学法人茨城大学 准教授 増富祐司								
4. 共同参画機関 農業・食品産業技術総合研究機構								
5. 事業期間 令和元年度～令和3年度								
6. 総経費 58.5百万円								
7. 課題の実施結果								
(1) 課題の達成状況								
「所期の目標に対する達成度」								
◆ 所期の目標								
気候の年々変動や異常気象の増大による農作物不作が主要因となって、世界の栄養不足人口は2014年以降増大してきている。このような気候に関連したリスクに対して食糧安全保障を確保するには、事前にそのリスクを把握し、適切な計画や政策を立て、迅速に対応行動を取ることが重要である。本提案課題の目的は、このような食糧安全保障に関わる気候リスクを軽減・回避するための科学的な情報を提供する「全球作物生育監視・収量予報システム」を構築することである。このシステムは衛星から得られる準リアルタイムデータと作物生育をシミュレートする作物モデルを組み合わせ、全世界の現在の生育状態を正確に推計・監視する。さらに世界各国の研究機関が作成した多数の気象季節予報(アンサンブル気象季節予報)を用いて、収穫の3ヶ月前・2ヶ月前・1ヶ月前に作物収量を予報する。開発したシステムはインターネットを通じて公開し、農業・食糧関係の国際機関やNGO/NPO、日本を含む各国の政府機関等で利用されることを目標としている。								
◆ 達成度								
<table border="1"><thead><tr><th>実施項目</th><th>達成度</th></tr></thead><tbody><tr><td>① 収量予報サブシステムの構築</td><td>エクストラサクセス(TRL8)</td></tr><tr><td>② 生育監視サブシステムの構築</td><td>エクストラサクセス(TRL8)</td></tr><tr><td>③ Webシステムの開発・公開</td><td>フルサクセス(TRL7)</td></tr></tbody></table>	実施項目	達成度	① 収量予報サブシステムの構築	エクストラサクセス(TRL8)	② 生育監視サブシステムの構築	エクストラサクセス(TRL8)	③ Webシステムの開発・公開	フルサクセス(TRL7)
実施項目	達成度							
① 収量予報サブシステムの構築	エクストラサクセス(TRL8)							
② 生育監視サブシステムの構築	エクストラサクセス(TRL8)							
③ Webシステムの開発・公開	フルサクセス(TRL7)							

以下にまず中間報告資料で示した「アプトブットに関する事後自己点検の方針」を示す。

実施項目	ミニマムサクセス (TRL1~4)	フルサクセス (TRL5~7)	エクストラサクセス (TRL8~9)
収量予報サブシステムの構築	収量予報サブシステムの 動作するプロトタイプ が完成している。	試験公開 用の収量予報サブシステムが完成している。	一般公開 用の収量予報サブシステムが完成している。
生育監視サブシステムの構築	生育監視サブシステムの 動作するプロトタイプ が完成している。	試験公開 用の生育監視サブシステムが完成している。	一般公開 用の生育監視サブシステムが完成している。
Webシステムの開発・公開	Webシステムの 動作するプロトタイプ が完成している。	システムがWebで 試験公開 されている。	システムがWebで 一般公開 されている。

これに対し、実施項目①の「収量予報サブシステムの構築」に関しては、既に一般公開用システムは完成しており、達成度をエクストラサクセス (TRL8) とした。また実施項目②の「生育監視サブシステムの構築」に関しても、一般公開用システムは完成しており、達成度をエクストラサクセス (TRL8) とした。実施項目③の「Web システムの開発・公開」については、申請・承認後、システムにアクセスできる試験公開の段階であり一般公開とは今のところ到っていない。よって達成度をフルサクセス (TRL7) とした。

「必要性」

・ [社会的・経済的意義]

国連の持続可能な開発目標 (SDGs) では、2030 年までに栄養不足人口をゼロにすることを目標の一つに掲げている。しかしながら国連食糧農業機関 FAO の最新レポート (FAO, 2022) によると、世界には未だ 8 億人以上の人が栄養不足の状態にあり、その数は 2014 年以降増加してきている。この増加の主要因の一つとして挙げられているのは、気候の年々変動と異常気象の増大である。このような気象に関連した災害は特定の場所や時期に発生する訳ではない。このため災害前にできる限り早くその場所や時期を特定し、事前事後の対策を検討・実施していくことが被害軽減の鍵となる。本課題で構築した「全球作物生育監視・収量予報システム」はまさにこのような食糧安全保障に関わる気候リスクを軽減・回避するための科学的な情報を提供するものであり、社会的・経済的意義は非常に高い。

・ [科学的・技術的意義] (独創性、革新性、先導性、発展性等)

本課題の最も独創的な点は、衛星データ・季節予報データ・作物モデルの三つの先端的技術シーズを融合することにより収量予報を行うシステムを構築した点である。高精度な収量予報を行うためには予報の初期状態として正確な作物の生育状態を知る必要があるが、衛星データを作物モデルに同化させることによりこれを実現している。また季節予報データを用いることにより、最大 6 ヶ月先までの収量予報が可能となっている。このような融合システムは世界的にも開発されておらず、これは本提案課題の大きな科学的・技術的意義である。

「有効性」

・ [知的基盤の整備への貢献や寄与の程度]

本課題で構築した「全球作物生育監視・収量予報システム」はインターネットでの一般公開を前提としており、インターネットにアクセスできる全世界の人が利用できるシステムである。またシステム内の文章はすべて英語で書かれており、どの国のユーザーもこのシステムを操作できる。さらにユーザーは Web 上のグラフィカルユーザーインターフェースを通じて、インタラクティブに作物の生育状況、予報収量を把握できるように設計されている。このように本システムは世界の多くの人々がアクセス・利用できる公共財として構築されたものであり、知的基盤整備における貢献・寄与は大きい。

・ [(見込まれる) 直接・間接の成果・効果やその他の波及効果の内容]

本課題で構築した「全球作物生育監視・収量予報システム」がインターネットでの一般公開されれば、農業・食糧関係の国際機関や NGO/NPO、日本を含む各国の政府機関等において、食糧安全保障に関わる気候リスクの軽減・回避に向けた計画や政策の立案、対応行動の実施を支援する科学的情報として広く利用されることが期待される。また国連は地球温暖化で激甚化する気象災害リスクの軽減に向けた「早期警戒システム」を 2027 年までに全世界に普及させるための新たな行動計画を発表しており、本システムはいち早くこの行動計画に貢献することが期待できる。

「効率性」

・ [計画・実施体制の妥当性]

本課題は 3 年間の計画で実施され、3 つのサブ課題「生育監視サブシステム開発」・「収量予報サブシステム開発」・「Web システムの開発・公開」に分かれて課題を実施した。それぞれの課題は中間評価の際に順調に目標を達成されていることが確認され、本事後自己点検においても、それぞれのサブ課題で、それぞれエクストラサクセス (TRL8)、エクストラサクセス (TRL8)、フルサクセス (TRL7) と評価している。したがって計画・実施体制は妥当なものであったと考えられる。

また課題費用の大部分は、大量の計算を実施するための大型計算機サーバーの購入費、研究をサポートするポスドク研究員の人件費、Web システム構築費であった。これらはすべて本課題を実施し、目標を達成する上での必要経費であり、その妥当性は問題ない。

(2) 成果

「アウトプット」

① 収量予報サブシステムの構築

全球作物生育監視・収量予報システムのサブシステムである「収量予報サブシステム」を構築した(図1)。このシステムは、ユーザーが収量予報開始年及び月を選択することで、マップ上で世界中の予報収量を閲覧することができるシステムである。マップの各グリッドには、収量の平年からの偏差に応じて色をつけて表示されており、一目で予報収量が低い地域や高い地域を同定することが可能となっている。より地域詳細の予報収量を見たい場合はマップのフォーカス機能及びドラッグ機能を使って、興味のある地域の予報収量を高解像度(50km)で閲覧することができる。

地域にフォーカスした場合、一つのグリッドをクリックすると、画面下部にそのグリッドの詳細情報パネルが表示される(図2)。詳細情報パネルでは、右側に予報収量の5つのアンサンブル値とその平均値が示されると同時に、過去の収量偏差に対して予報収量がどのあたりに位置するかが

Box Plot を用いて示される。また詳細情報パネルの左側にはモデルの出力変数の時系列が予報開始月の前後6ヶ月示される。これにより時系列中央より右側は予報情報を示し、左側は過去情報(生育監視)となる。時系列は各変数の値(青)のみならず平年値(オレンジ)も示され、過去及び将来において平年に比べて値が高いか低いかを即座に把握することができる。ここで選択できるモデルの出力変数は、LAI、土中水分量、地上部バイオマス、葉バイオマス、貯蔵器官バイオマス、冷害指標、高温害指標、水ストレス指標、発育指数である。

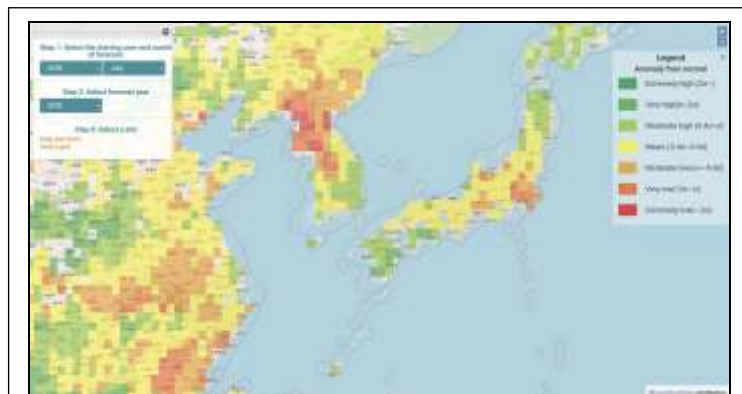


図1 収量予報サブシステム

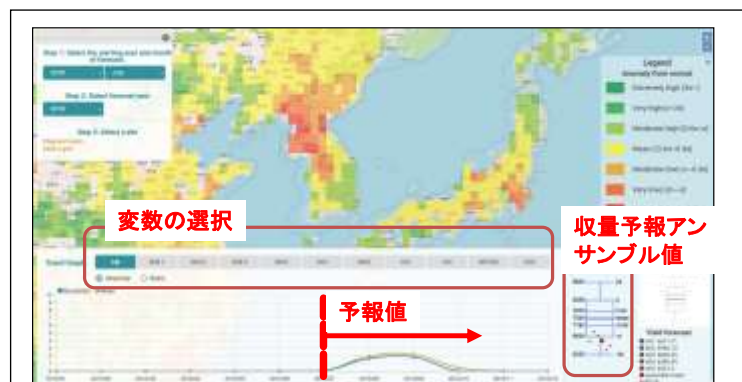


図2 収量予報サブシステム下部の詳細情報パネル

② 生育監視サブシステムの構築

全球作物生育監視・収量予報システムのサブシステムである「生育監視サブシステム」を構築した(図3)。このシステムは、ユーザーが監視年及び月を選択し、さらに閲覧したい変数を選択することで、マップ上で世界中のLAIや土中水分量、気象値を閲覧することができるシステムである。このシステムで閲覧することができる変数は、LAI、土中水分量、平均気温、最高気温、最低気温、降水量、日射量である。このうち、LAIと土中水分量については、GCOM-Cのデータを利用しており、その他の変数はJRA-55のデータを利用している。「生育監視サブシステム」では「収量予報サブシステム」と同様に、マップの各グリッドは平年からの偏差に応じて色がつけられて表示されており、選択した変数が平年に比べて低い地域や高い地域を容易に同定することが可能となっている。またマップ表示におけるフォーカス・ドラッグ機能についても「収量予報サブシステム」と同様である。

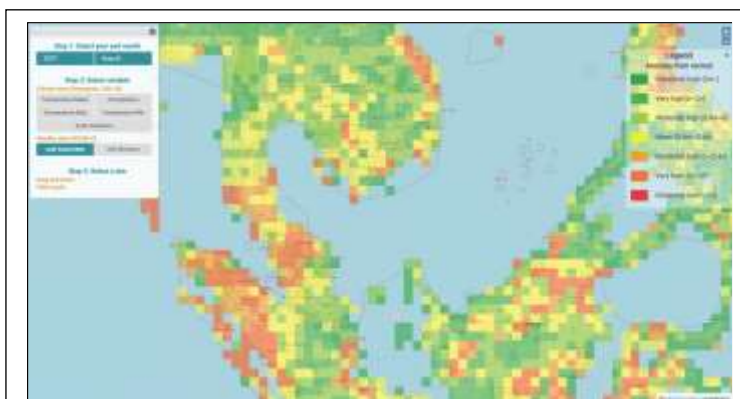
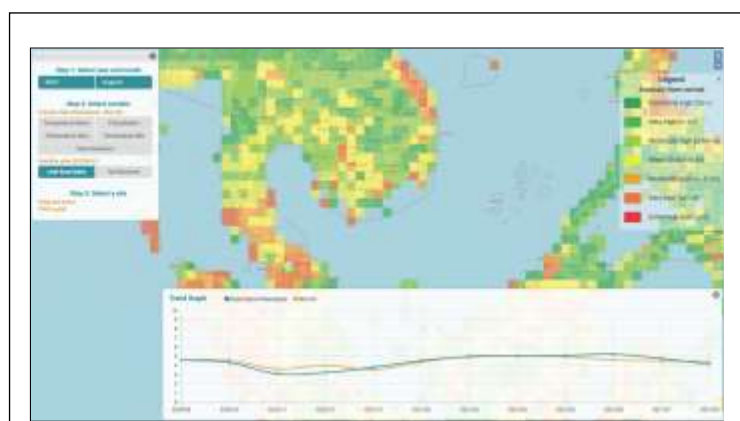


図3 生育監視サブシステム



オレンジ: 平年値、青: 予報値

図4 生育監視サブシステム下部の詳細情報パネル表示

「生育監視サブシステム」でも地域にフォーカスした場合、一つのグリッドをクリックすると、選択している変数に関する時系列が詳細情報パネルに表示される。ここで時系列表示されるのは、選択している年・月から過去1年である。この時系列にも平年値(オレンジ)が示されており、選択した変数の値(青)が平年値に比べてどの程度なのかが直感的に把握できるようになっている。

③ Webシステムの開発・公開

「収量予報サブシステム」及び「生育監視サブシステム」からなる「全球生育監視・収量予報システム」(Crop MoniCast)を開発した(図5)。各サブシステムの概要については上述の通りであるが、システム全体としては中央部分に二つの入口(左: Forecasting(Crop Growth/Yield)と右: Monitoring(Satellite/Climate))があり、



図?? 全球生育監視・収量予報システムのフロントページ

これをクリックすることで、それぞれのサブシステムを表示することができる。

またページ左上部の「Crop MoniCast」の文字をクリックするとどちらのサブシステムにいても、このフロントページに戻ることができる。さらにページ右上部の「Forecasting」あるいは「Monitoring」の文字をクリックすることでお互いのサブシステムを行き来することができる。

「全球生育監視・収量予報システム」(Crop MoniCast)には申請・承認によりアクセスすることができる試験公開の段階にある。一般公開は国立環境研究所気候変動適応センターが管理・運営しているアジア太平洋気候変動適応情報プラットフォーム(A-PLAT)から行うことを予定している。現在一般公開に向け、国立環境研究所が要求するセキュリティーチェックなどの要項や申請方法などの把握、セキュリティーチェックのための予算の確保など進めている。

「アウトカム」 (令和4年10月末時点)

①・② 収量予報サブシステム・生育監視サブシステムの構築

衛星データ・季節予報データ・作物モデルを融合させて収量予報及び生育監視を行う手法を確立した。これら三つの先端的技術シーズを融合することにより生育監視及び収量予報の双方を行うシステムは世界初である。今後、様々なシステムでこの手法が利用されることが期待される。実際、本課題では水稲を対象にシステム構築を行ったが、確立した手法は他の作物にも適用可能である。既に水稲以外を対象とした作物モデルの開発に着手しており、完成後は速やかに本システムに取り込まれることが期待できる。

③ Web システムの開発・公開

農業・食糧に関連した国内外の機関等が容易に利用できるシステムを構築した。本システムは世界中の作物生育状況及び予報収量を簡易に閲覧することができるシステムである。また例えば平年値に比べて予報収量値及びモデル変数の値がどの程度なのかが直感的に把握できるように工夫されている。さらにこのシステムはユーザーインタラクティブなグラフィカルユーザーインターフェースを有しており、このような収量予報システムは世界中を見ても例がない。本システムは食糧安全保障に関わる気候リスクを軽減・回避するための科学的な情報を提供するシステムであり、一般公開に向けて現在準備中であるが、これが公開されれば大きな社会貢献が期待できる。

(3) 今後の展望

・アジア太平洋気候変動適応情報プラットフォーム (AP-PLAT) からの公開

国立環境研究所気候変動適応センターでは、気候変動適応に関する総合的な情報プラットフォーム AP-PLAT を管理・運営している。本プラットフォームは気候変動適応法の国際協力に関する条項に則り構築されたもので、本システムの公開場所としては最適であると考えている。国の機関であるためセキュリティー等の制約が厳格であるが、現在一般公開に向けて着実に準備を進めているところである。

・小麦・大豆・とうもろこしへの展開

本課題では水稲を対象にシステム構築を行ったが、上述のように確立した手法は他の作物にも適用可

能である。これには水稲以外の作物について収量を推計するモデル開発の必要があるが、幸いなことに環境省推進費に応募し採択され、その中で水稲以外の主要作物(小麦・大豆・とうもろこし)の作物モデルを開発中である(令和3~7年度)。これが開発されれば、基礎としているモデルは同じであるため即座にシステムに取り込みが可能であり、水稲を含む主要作物を対象した作物生育監視・収量予報システムが実現することになる。

・ 高解像度収量予報への発展

現在のシステムの大きな課題は空間解像度が粗い(50km)ことである。これは季節予報データの解像度が粗いことが原因である。実際には衛星データはこれより遥かに高解像度であるため、季節予報データの低解像度は高解像度収量予報の大きなボトルネックとなっている。これに対し、機械学習技術を用いて高精度かつ即座に気候データの高解像度化を行い、収量予報を行うことを現在提案している。この提案については、既に科研費(基盤A)への申請を行い、採択されれば高解像度収量予報への道が開け、本システムの大きな飛躍となることは間違いない。

・ 特許の出願

本システムは、衛星データ・季節予報データ・作物モデルの融合という新しい発想により構築されたシステムであり、特許の出願を考えている。これにより商業目的利用については利用料を徴収し、これをシステム維持・改良に活用することを考えている。こうすることによりシステムの管理・運営を持続的なものにすることができると考えている。

8. 評価点

S

評価を以下の5段階評価とする。

- S) 優れた成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に著しく貢献した。
- A) 相応の成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に貢献した。
- B) 相応の成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に貢献しているが、一部の成果は得られておらず、その合理的な理由が説明されていない。
- C) 一部の成果を挙げているが、宇宙航空利用の明確な促進につながっていない。
- D) 成果はほとんど得られていない。

9. 評価理由

衛星データ、地上データ、定量的な収穫データなどを用いて、長期にわたる収穫量の定量推定モデルを構築し、世界全体のさまざまな農作物の収穫量予想を立て、それによる農業行政への反映などを目指す大きなテーマの事業である。雨量、乾燥、気温、天候などの自然における植物の育成パラメータを、いかに個別の植物の育成予想に最適化してその予想につなげるかは難しい作業であるが、本事業ではこれらの最適化を行い、水稲を対象とした生育監視・収量予測に科学的な情報を提供する「全球作物生育監視・収量予報システム」は極めて高いレベルで完成しており、インターフェースの完成度も高く、大変優れた成果であると評価できる。

また、限られた植物適応とはいえ、世界的な育成データとの相関も高く、確度の高い予想となっていることは重要である。現在のインフラで入手可能な衛星データ(GCOM-C)とアンサンブル気象デー

タを効率的に利用する茨城大学の作物モデルが、世界最高性能の予測精度を得るキー技術になっていると考えられ、これまでに培われた学術成果が宇宙利用に大きな進展を生む非常によい事例であり、また、世界的な課題に対して極めて高い貢献をする模範的な取組であると評価できる。

一方で社会的な還元に対する取組に関しては、ユーザー開拓やユーザー評価、それを受けたシステムチューニングなどは構想段階で、これから対応となっていた。また、今後の利用推進や商業利用も含めた社会的効果創出への具体的取組に関しても、打診や構想はしているが具体化はこれからとなっていた。

これからの世界人口の増加に向けて、食料確保は大きな課題であり、その予測を早期に行うことは人類全体のために不可欠である。世界中で有効利用を進めるため精度の更なる向上を期待する。

今後の研究計画として小麦も視野に入れており、将来的にも期待が持てることから、宇宙航空利用の促進への一層の貢献が見込まれる。

以上より、本課題は、優れた成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に著しく貢献していると認められる。

今後は、以下の点が期待される。

- ▶ 国ごとの育成データなどに差がみられるが、これらはそれぞれの国の農業政策やデータ取得法の差などであると予想されることから、今後、これらの差の原因を解明し、すべての国において、良い精度での予測が、より多くの植物で達成できることを期待する。
- ▶ モデルの精度を高める工夫の余地があり、地域固有の病気・害虫の影響や農業技術レベル（環境制御、農薬、遺伝子操作等）を組み込むことを期待する。
- ▶ 本システムによる予測データを具体的なユーザー開拓やソリューション提供等の、利用推進や商業利用も含めた他界的効果創出につなげる方策も併せて検討が望まれる。
- ▶ 限定公開とされているが、システム開発会社と協業してシステム販売・サポート体制まで構築するのも一案と思われる。開発に協力した企業への何らかの還元を考慮して今後の事業推進のバックボーンが強固になるような配慮をしつつ、可能であれば、特許取得、ライセンスアウトまで達成されることを期待する。