

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18128

研究課題名(和文) 衛星観測データを活用した力学的な広域作物収量予測システムの開発

研究課題名(英文) Process based Crop Yield Prediction Using Satellite Observations

研究代表者

小槻 峻司 (Kotsuki, Shunji)

国立研究開発法人理化学研究所・計算科学研究機構・研究員

研究者番号：90729229

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、衛星観測を利用した作物生育モニタリング、及び、力学的な広域作物収量予測を目的とし、以下の研究開発を行った。(1) 陸面アンサンブルデータ同化システムを開発し、良好な動作を確認した。(2) リアルタイム陸面計算システムを開発し、2年間に渡って安定的に動作することを確認した。(3) アンサンブルデータ同化を用いたパラメータ推定手法についての基礎研究を進めた。(4) データ同化の理論研究を進め、誤差が非ガウスな観測データの同化手法や、アンサンブルデータ同化に必須な共分散膨張法を改善した。

研究成果の概要(英文)：This study aims to develop a process-based crop yield prediction system using satellite observations. Through a series of system developments, we have obtained following achievements: (1) A hydrological land data assimilation system was newly developed. (2) A real-time hydrological simulation system was developed. The system stably ran over two years. (3) Ensemble-based model parameter estimation method was explored. (4) New data assimilation methods were explored mathematically on a covariance inflation method of the ensemble-based data assimilation, and a treatment of observations with the non-Gaussian error statistics.

研究分野：データ同化

キーワード：データ同化 パラメータ推定 リアルタイム予測 作物収量推定 天気予報 衛星観測 陸面過程モデル

1. 研究開始当初の背景

グローバル化により経済が国境を越えて密接に関わる現代では、自国のみならず、他国の作物不作のモニタリングが必要となる。作物生育のモニタリング手法は、モデル計算と衛星データ解析に大別される (Heim BAMS, 2002)。モデル計算では、降雨量や気温といった気象条件を入力として、統計解析や物理的な水収支解析により早魃指標を計算する。これらの研究は、古く 1960 年代からアメリカを中心に行われてきたが、あくまでも早魃状況をモニタリングするものであり、収量そのものを予測するものではない。一方の衛星データ解析は、1979 年以降に可視光線～赤外線を受動型センサ (e.g. AVHRR, MODIS, NAOMI) による衛星観測データを用いて行われてきた。特に、複数の波長の反射データから計算される植生指標を用いた作物生育モニタリングが国内外で盛んに行われている。衛星データ解析は高解像度データの利用により詳細な解析を利用できるものの、その膨大なデータ処理により広域的な収量予測に不向きである。モデル計算は比較的計算コストが低い一方で、あくまで気象条件からの外挿であり、作物生育の実態を直接反映しているものではない。そのため、モデル計算・衛星データ解析を相補的に利用した作物生育モニタリング手法が求められている。

2. 研究の目的

本研究では、アンサンブルデータ同化によってモデル計算と衛星観測を双利用した作物生育モニタリング、及び、力学的な広域作物収量予測が可能なシステムを開発する。モデル計算に、作物成長を捉える衛星観測植生指数を同化することで、作物生育モニタリングを高精度化する。更に、気象庁の提供する中長期アンサンブル予報データを利用し、モデルを用いて広域作物収量を力学的に予測する。本研究で遂行するシステム開発は、日本・世界の食糧安全保障の面からも重要な研究であり、海外展開や国際協力の観点で応用価値が高い。以上を踏まえ、衛星観測を利用した作物生育モニタリング、及び、力学的な広域作物収量予測が実施可能なシステム開発を本研究の目的とする。

3. 研究の方法

(1) 陸面データ同化システムの開発

アンサンブルカルマンフィルタ (EnKF) を作物生育モデルに実装した陸面データ同化システムを開発する。データ同化は、作物生育モデルのパラメータ推定とモニタリング (=将来予測計算の初期値生成) を視野に入れている。EnKF アルゴリズムは、既に開発済みのコードを利用し、統合陸面過程モデルと整合的に実装する。また、データ同化システ

ムの開発を通して、作物収量計算に衛星観測データを有効に利用する方法について検討を進める。

(2) リアルタイム収量計算

気象庁から提供される長期再解析 (JRA55) 等の気象強制力データを利用し、作物収量モニタリング・将来予測計算が実行可能なシステムを開発する。システムを実際にリアルタイムに運用し、システムの安定実行への課題を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 陸面データ同化システムの開発

これまでに京都大学・理化学研究所を中心に開発されてきた統合陸面過程モデル (Kotsuki and Tanaka, 2013) に、EnKF の 1 手法である局所変換 EnKF (LETKF; Hunt et al. 2007) を実装し、陸面データ同化システム SiBUC-LETKF を開発した。まずシステムの動作確認として、中国のフラックスサイト (Yucheng; YCS) 地点において衛星により観測される地表面温度の同化実験を行い、システムが良好に動作することを確認した (図-1)。この例では、特に冬季に大きな計算精度向上を確認されている。

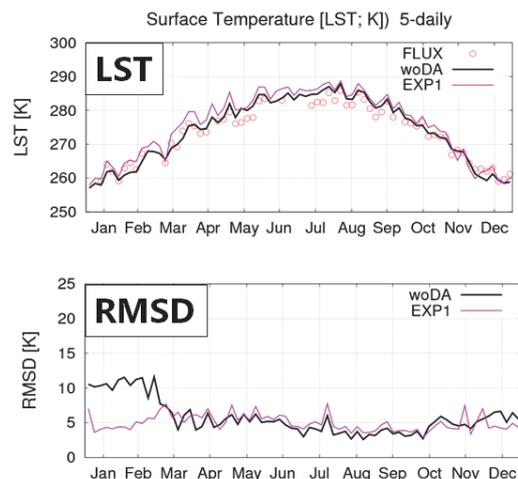


図-1 上：YCS 地点における地表面温度 (K) のデータ同化有り (黒線) 無し (紫線) 実験の比較。赤ドットは観測を示す。下：フラックス観測に対する平方平均二乗誤差 (K) のデータ同化有り無し実験の比較。

SiBUC-LETKF システムの開発を通して、陸面データ同化のスプレッド膨張法についての課題も明らかとなった。EnKF は、アンサンブル予報によって背景誤差共分散の構造を flow-dependent に推定するデータ同化手法である。大気を始めとするカオス力学系では、モデルの時間積分により予報誤差が成長する。しかし、同化サイクルを重ねるうちに予報誤差が過小評価されていくため、共分散膨張によりそれを克服する必要がある。陸面水循環の多くは、そのみで誤差が成長する系

ではないため、大気モデルに用いられる共分散膨張に加えて、更に工夫が必要となる。ここでは既往の研究に倣い、気象強制力に摂動を加えて(Perturbed Forcing)予報誤差を膨張させた。具体的には、気象強制力に乱数を足しこむことで陸面のスプレッドを膨張させている。しかし、この手法は乱数を使うことで、不要な誤差要因を加えている可能性もある。より良い方法としては、大気モデルをアンサンブルに実行し、そのアンサンブル気象強制力を陸面データ同化に用いる方法がある。また、気象強制力による予報誤差膨張は、本研究で同化の対象と想定していた、作物モデルにより計算される Leaf Area Index (LAI)に十分な予報誤差を与えられない可能性も示唆された。以上の課題と本研究の最終目標を鑑み、研究(2)、(3)を実施した。

(2) 植生指標データ同化の理論研究

Arakida et al. (2017)で論文発表済みの為、詳細は論文を参照。衛星観測植生指標を陸面モデルに同化するための理論研究を行った。ここでは、動的植生モデル SEIB-DGVM(Sato et al. 2007)と粒子フィルタを使用し、理想条件下でのデータ同化実験を実施した。植生指標を同化するための予報誤差の膨張方法について考察を進め、成果をまとめて論文を発表した。

(3) 全球作物農事歴プロダクトの作成

Kotsuki and Tanaka (2015)で論文発表済みの為、詳細は論文を参照。上述の課題を踏まえ、衛星観測植生指標を、収量計算を行う上で重要になるに農事歴データとして利用する方針とした。新しく、衛星観測データを用いた作物農事歴の推定手法を開発した。一般的な手法として開発しており、世界各国での播種・収穫日を、衛星により観測される植生指標 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)から推定した(図-2)。以上の成果をまとめ論文を発表した。この全球農事歴データについては、open dataとしてweb上で公開している。

(4) リアルタイム陸面計算システム

陸面モデル計算をリアルタイムに実行するシステムを開発した。陸面過程モデル計算の入力データとなる気象強制力データを、提供機関のサーバーから自動的に入手してモデル計算を実施し、その結果をHP上で随時結果を更新した。1時間に一度、計算機サーバーに設定されたcronにより、最新の気象強制力データの有無を確認・取得し、最新のデータが揃って場合に陸面計算を実行し、web上に表示される最新結果が更新される様に設計されている。なおこのシステムでは、収量計算に重要となる降水量データや短波

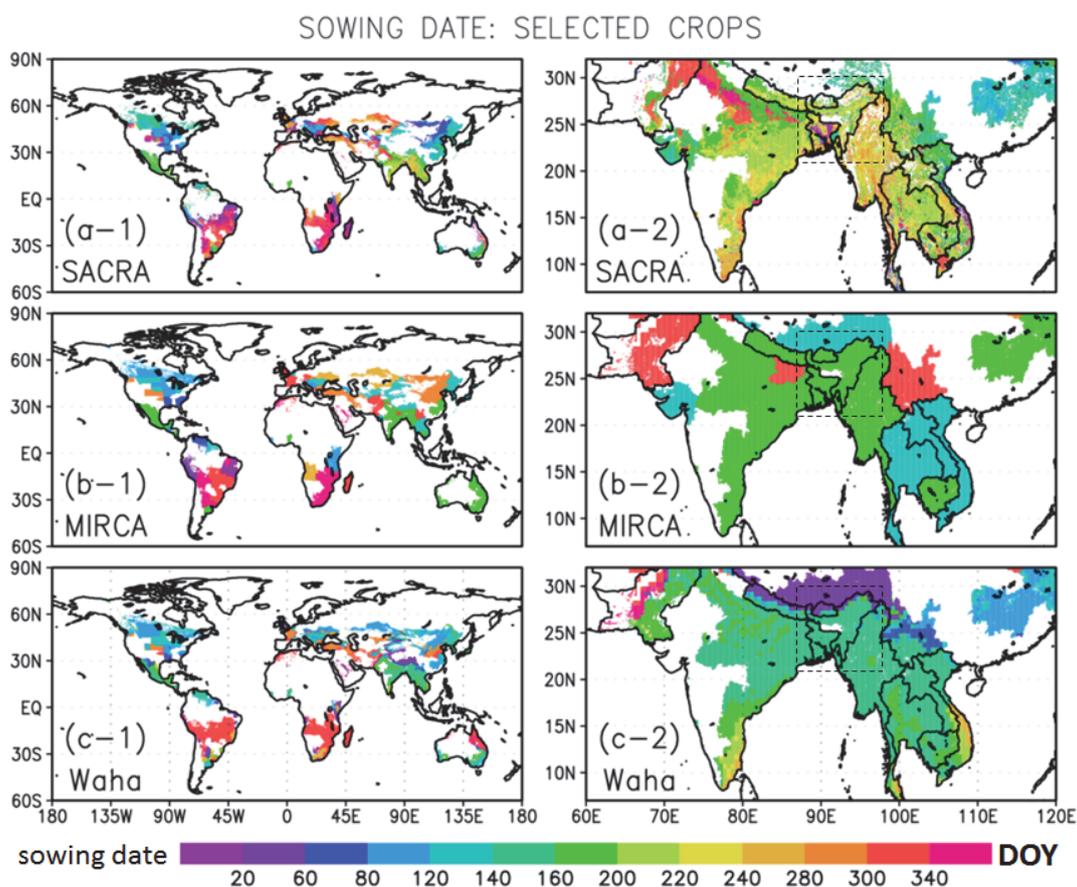


図-2 全球主要作物の播種日(day of year)の比較。(a) 本研究の手法、(b) 統計データベース、(c) 作物モデル計算。Kotsuki and Tanaka (2015)より引用。

放射データに、衛星観測値ベースで推定されたプロダクトを利用し、衛星データを最大限活用している。モニタリングシステムは、2015年8月の開始から2年にわたってリアルタイムに実行し、良好に動作することを確認した(図-3)。また、統合陸面過程モデルに結合されている収量推定モデルにより、作物生育や収量計算が実施されており、システムが期待通りに動作することを確認した。ただし、一部気象強制力データの欠落・欠損などでシステムが止まることもあり、非常時のアラートやシステムの安定化に向けての課題も明らかとなった。また、このシステムの計算結果を地上観測 Flux データとの比較・検証し、論文を発表した (Kotsuki et al. 2015)。

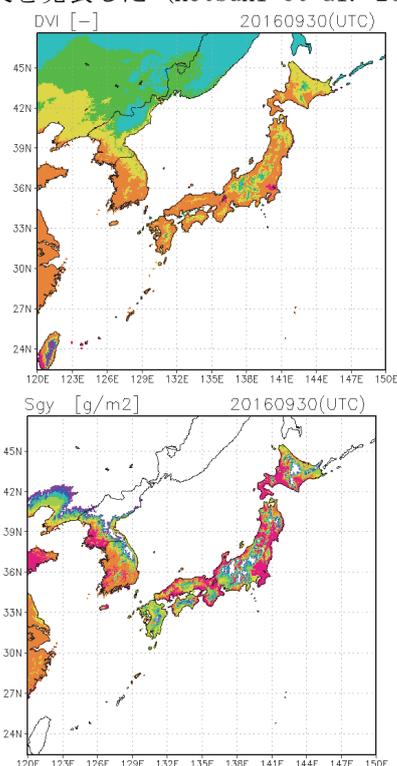


図-3 リアルタイム陸面計算システムにより実行された作物モデル計算の例。(上) 水稻生育指数、(下) 乾燥収量 (g/m^2) であり、2016年9月30日時点でのモニタリング結果を示している。

(5) 大気データ同化システムの開発

本研究では、気象庁により現業的に行われているアンサンブル予測データを利用した広域収量予測を当初の計画していた。しかし、このアンサンブル予測データは、気象業務支援センターを介してのデータ購入することが非常に高価であり、予算上も困難であることが判明した。そこで、理化学研究所・計算科学研究センターで開発が進められている全球大気アンサンブルデータ同化システム NICAM-LETKF (Terasaki et al. 2015) の活用を狙い、高度化・リアルタイム運用化を進めた。

① NICAM-LETKF システムの安定化手法開発

本研究でデータ同化に用いる EnKF には、必須な技術として共分散膨張があり、そのパラメータを適切に設定することが重要である。本研究では、新しい適応型共分散緩和手法の定式化・テスト実験を行った。この適応型共分散緩和手法により、システムの安定化と精度向上の双方を達成した。以上の成果をまとめ、論文を発表した (Kotsuki et al. 2017b)。

② NICAM-LETKF システムの高度化

本研究開始時点の NICAM-LETKF は、通常観測のみが同化されるシステムであったため、更なる精度向上を狙って全球降水マップの同化手法開発に取り組んだ。通常、降水データの同化は非常に困難であるが、新しい経験的ガウス分布変換手法を開発した。JAXA により開発されている全球降水マップ (GSMaP) の同化による降水予測精度向上を達成し、成果をまとめて論文を発表した (Kotsuki et al. 2017c)。

③ モデルパラメータ推定手法の開発

データ同化によりモデルパラメータを推定するための基礎研究を行った。ここでは、作物生育モデルのパラメータの推定に先立ち、より簡単な問題として全球大気モデル NICAM (Satoh et al. 2014) の大規模凝結スキームのパラメータ推定に取り組んだ。このパラメータを、GSMaP を用いてデータ同化の中で見積もった。パラメータ推定無しと有りの実験の降水分布を比較すると、パラメータ推定により海上に広がっていた弱い降水分布が改善されている良好な結果を得た。

④ 降水ナウキャストシステムの開発

数値天気予報とは別のシステムとして、直近の降水予測精度向上も狙った降水ナウキャスト手法を開発した。ナウキャストは一般に、短時間の予測精度が数値予報モデルより高い。GSMaP をベースにしたリアルタイムナウキャスト手法を開発し、論文を発表した (Otsuka et al. 2016)。このリアル全球降水ナウキャストは、気象庁の予報業務許可も取得し、現業的に稼働させている。

(6) その他

本研究課題は、システム開発を通じた応用研究の面が強いが、基礎研究についても重要な進展があった。

まず、本研究課題の土台となる陸面モデル自身の改良に取り組んだ。アフリカ乾燥域を対象として行われている陸面モデルの相互比較プロジェクトに参加し、モデルの比較を通して、乾燥域において重要になる物理プロセスの理解と検討を進めた (Grippa et al. 2017; Gerirana et al. 2017)。

データ同化手法の理論的研究も実施した。適切な同化システムの設計には、観測データがどの程度天気予報の改善に寄与している

のかを定量化することが重要である。観測データが予報をどの程度改善したかを測る手法に Forecast Sensitivity to Observation (FSO; Langland and Baker 2004)がある。従来、FSOは随伴モデルを要したが、Kalnay et al. (2012)により EnKF に拡張された (Ensemble FSO; EFSO)。FSOを通して同化された観測を診断すると、個々の観測が予報を改善 (改悪) した程度を定量化できる。このEFSO手法の理論的解釈を進め、成果をまとめて論文を発表した (Kotsuki et al. 2017c)。

(7) 総括

本研究の目的として掲げた、衛星観測を利用した作物生育モニタリングや力学的な広域作物収量予測可能なシステムが開発されたことには大きな意義がある。リアルタイムシステムの開発自体は工学的な目的の強いものであるが、研究開発の中で新たな課題が発見され、それらを解決していくことで当初の計画以上の発展的な成果を挙げたといえる。陸面データ同化システムの安定運用については、予報誤差の適切な膨張法については未解決問題であり、最先端の課題として今後も更なる研究が必要である。

<引用文献>

- Heim R. (2002) A Review of Twentieth-Century Drought Indices Used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1149-1165. doi: 10.1175/1520-0477-83.8.1149
- Hunt, B. R., E. J. Kostelich, and I. Szunyogh (2007), Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local ensemble transform Kalman filter, *Physica D*, 230, 112-126, doi:10.1016/j.physd.2006.11.008.
- Kalnay, E., Y. Ota, T. Miyoshi, and J. Liu, 2012: A simpler formulation of forecast sensitivity to observations: Application to ensemble Kalman filters. *Tellus*, 64A, 18462, doi:10.3402/tellusa.v64i0.18462.
- Kotsuki S. and Tanaka K. (2013): Estimation of Climate Change Impact on Japanese Rice Yield and Water Resources. *Proceedings of 2013 IAHR World Congress*, A10344.
- Sato H, Itoh A, Kohyama T (2007): SEIB-DGVM: A New Dynamic Global Vegetation Model using a Spatially Explicit Individual-Based Approach *Ecological Modelling* 200(3-4), 279-307.
- Langland, R. H., and N. L., Baker, 2004: Estimation of observation impact using the NRL atmospheric variational data assimilation adjoint system. *Tellus A*, 56(3), 189-201. doi: 10.1111/j.1600-0870.2004.00056.x
- Satoh, M., and Coauthors (2014), The Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: Description and development, *Progress Earth Planet. Sci.*, 1, 1-32, doi:10.1186/s40645-014-0018-1.
- Terasaki, K., M. Sawada, and T. Miyoshi (2015), Local Ensemble Transform Kalman Filter Experiments with the Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model NICAM, *SOLA*, 11, 23-26, doi:10.2151/sola.2015-006.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計10件) 全て査読あり

1. Honda T., Kotsuki S., Lien G.-Y., Okamoto K. and Miyoshi T. (2018): Every-10-minute Refresh of Precipitation and Flood Risk Predictions by Assimilating Himawari-8 All-Sky Satellite Radiances. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122, 1-12. doi:10.1002/2017JD027096
2. Kotsuki S., Greybush S., and Miyoshi T. (2017a): Can we optimize the assimilation order in the serial ensemble Kalman filter? A study with the Lorenz-96 model. *Monthly Weather Review*, 145, 4977-4995. doi: 10.1175/MWR-D-17-0094.1
3. Arakida H., Miyoshi T., Ise T., Shima S.-I., and Kotsuki S. (2017): Non-Gaussian data assimilation of satellite-based Leaf Area Index observations with an individual-based dynamic global vegetation model. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 24, 553-567. doi:10.5194/npg-24-553-2017
4. Grippa, M., Kergoat L., Boone A., Peugeot C., Demarty J., Cappelaere B., Gal L., Hiernaux P., Mougou E., Ducharne A., Dutra E., Anderson M., Hain C., and ALMIP2 Working Group (2017): Modelling surface runoff and water fluxes over contrasted soils in pastoral Sahel: evaluation of the ALMIP2 land surface models over the Gourma region in Mali. *Journal of Hydrometeorology*, 18, 1847-1866. doi:10.1175/JHM-D-16-0170.1
5. Getirana, A., Boone A., Peugeot C., and ALMIP2 Working Group (2017): Streamflows over a West African basin from the ALMIP-2 model ensemble. *Journal of Hydrometeorology*, 18, 1831-1845. doi:10.1175/JHM-D-16-0233.1
6. Kotsuki S., Ota Y., and Miyoshi T. (2017b): Adaptive covariance relaxation

methods for ensemble data assimilation: Experiments in the real atmosphere. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 143, 2001-2015. doi: 10.1002/qj.3060

7. **Kotsuki S.**, Miyoshi T., Terasaki K., Lien G.Y. and Kalnay E. (2017c): Assimilating the Global Satellite Mapping of Precipitation Data with the Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model NICAM. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 122, 1-20. doi:10.1002/2016JD025355
8. Otsuka S., **Kotsuki S.**, Miyoshi T. (2016): Nowcasting with data assimilation: a case of Global Satellite Mapping of Precipitation. Weather and Forecasting, 31, 1409-1416. doi:10.1175/WAF-D-16-0039.1
9. **Kotsuki S.** and K. Tanaka (2015): SACRA - a method for the estimation of global high-resolution crop calendars from a satellite-sensed NDVI. Hydrology and Earth System Sciences, 19, 4441-4461. doi: 10.5194/hess-19-4441-2015
10. **Kotsuki S.**, Takenaka H., Tanaka K., Higuchi A. and Miyoshi T. (2015): 1-km-resolution land surface analysis over Japan: Impact of satellite-derived solar radiation. Hydrological Research Letters 9(1), 14-19. doi: 10.3178/hr.l.9.14

[学会発表] (計41件) 招待講演のみ記述

1. **小槻峻司**, 黒澤賢太, 三好建正: EFSOの現状と惑星気象研究への発展の可能性. 第19回惑星圏研究会, 02/27-03/01, 2018. (Feb 27, 東北大学・青葉サイエンスホール)
2. **小槻峻司**, 黒澤賢太, 三好建正: 全球大気データ同化システム NICAM-LETKF を使った EFSO 観測インパクト推定. 第8回データ同化ワークショップ, 01/19, 2018. (Jan 19, 明治大学中野キャンパス)
3. **小槻峻司**, 三好建正: 全球大気アンサンブルデータ同化システム NICAM-LETKF による衛星降水観測データ同化. 地震研特定共同研究(B)「データ同化」勉強会, 2017. (Jul 14, 東大地震研究所)
4. **小槻峻司**, 三好建正: 予測モデルのためのデータ同化. PSTEP 研究集会「太陽地球圏環境予測のためのモデル研究の展望」, 01/26-27, 2017. (Jan 27, 名古屋大学, 名古屋)

2015年度 国際会議: 04件 国内会議: 04件
2016年度 国際会議: 05件 国内会議: 06件
2017年度 国際会議: 09件 国内会議: 13件

多数につき, 研究代表者が第一著者の発表飲

みカウントしている. 学会発表の詳細については, 科研費の本課題ページ, 及び, 下記を参照のこと.

<http://www.kotsuki-shunji.com/conference.html>

[その他]

全球作物農事歴データ

http://www.data-assimilation.riken.jp/pendata/sacra/sacra_des.html

理研天気予報:

<https://weather.riken.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小槻峻司 (KOTSUKI SHUNJI)

国立研究開発法人理化学研究所・計算科学研究機構・研究員

研究者番号: 90729229

(2) 研究協力者

三好建正 (MIYOSHI TAKEMASA)

国立研究開発法人理化学研究所・計算科学研究機構・チームリーダー

研究者番号: 90646209

田中賢治 (TANAKA KENJI)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号: 30283625

樋口篤志 (HIGUCHI ATSUSHI)

千葉大学・環境リモートセンシング研究センター・准教授

研究者番号: 90324384

本間香貴 (HOMMA KOKI)

東北大学・農学研究科・教授

研究者番号: 60397560