農業気象学分野で応用可能な広域気象データセットの現状と課題

伊藤昭彦^{*, **, †}

(^{*} 国立環境研究所 地球環境研究センター 〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2
^{**} 海洋研究開発機構 北極環境変動総合研究センター 〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町 3173-25)

Current status of broad-scale meteorological data available for agrometeorological studies

Akihiko Ito^{*, **, †}

(^{*} Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies,
16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506, Japan.
^{**} Institute of Arctic Climate System Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology,
3173-25 Showa-machi, Kanazawa-ku, Yokohama, Kanagawa 236-0001, Japan.)

Abstract

Meteorological data are one of the fundamental information not only for studies on agricultural meteorology but also for other research fields and various social and economic activities. In this review, I summarized the current status of broad-scale (i.e. landscape or larger) data of land-surface meteorology applicable to agrometeorological works. The data sets presented here include statistically aggregated or up-scaled data, objective analysis and reanalysis data with meteorological models, teleconnection indices, satellite remote sensing data, and synthetic data for model input. Based on the development of weather monitoring systems and informatics, variety, quality, and coverage of these data sets have greatly improved in last decades. The data development facilitates our researches and operations in agricultural fields with respect to yield estimation, meteorological risk avoidance, optimization of management, and so on. However, we should still pay enough attention to deficiencies (e.g., bias and error, and short coverage) contained in these data, including the characteristics and difference among data sets, and data use policy.

Key words: Satellite observation, Meteorological model, Reanalysis data, Agricultural model, Mesh data

キーワード: 衛星観測, 気象モデル, 再解析データ, 農業モデル, メッシュデータ

1. はじめに

農業気象に関するほとんどの研究分野では、高精度な気象データが不可欠である。実験施設や地点スケールの研究であれば、測器により気象環境を現場で測定できるが、市町村や都道府県、さらに国以上の空間スケールでは広域の気象データを入手または作成して研究を行うのが一般的であろう。例えば収量予測、気象災害の事例分析、温室効果ガス収支を含む環境負荷の評価、気候変動に対する適応策の検討など、広域を対象に実施される研究テーマは多岐にわたる上に社会からの要請が強いものが多く、目的に応じた適切な気象データを用いなければならない。気象条件を予測できるモデルを用いる場合でも、推定の精度を高めるには観測データの利用（校正や検証）が欠かせない。また農業に関していえば、栽培だけでなく消費予測や物流の最適化などにも気象データは不可欠であり、IoTやICTなどの新技術を用いた農業の知識産業化（小池ら, 2015; 溝口・伊藤, 2015）を実現する要素の1つである。多くの産業や社会基盤整備でも気象データが利活用されていることは指摘するまでもないだろう。

もとより気象分野では、多数の観測点を世界各地に配置

して定期観測を行うとともにそのデータを逐次収集し、天気予報に利用してきた歴史がある。そこでは最新のスーパーコンピュータを用いた大気海洋モデル計算に観測情報を同化し、非常に精密な領域から全球スケールの気象データが作成されてきた。しかし、そのデータを以てしても農業気象およびその他の分野での必要性を全て満たせるわけではない。全球・領域気象モデルで採用される空間分解能は概して数十キロメートル以上と粗く、田畑のピンポイントにおける気象条件を知るには不十分である。気象モデルに固有なパラメタリゼーション（半経験的な推定）や近似計算に伴う不確実性がデータに含まれるという別の問題も生じる。また、光合成有効放射（PAR）のように、農業気象分野では利用価値が高くとともに、気象学では必ずしも重視されていない変数もある。

一方、近年の観測機器、ネットワーク、データ解析など技術的な進歩は急速であり、気象データの精度は顕著に向上するとともに種類も増えている。20年ほど前であれば気象データの選択肢は限られていたが、今では気温や降水のような基本的な気象要素であれば、何種類ものデータセットを入手することが可能である。例えば気象庁は、インターネット上の「農業気象ポータルサイト (<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/nougyou/nougyou.html>)」を通じて農業に有用な観測情報をまとめて提供している。また、日本国内であれば1 km メッシュで農業気象データを

2017年9月6日 受付, 2018年1月4日 受理

[†] Corresponding Author: itoh@nies.go.jp

DOI: 10.2480/cib.J-18-043

インターネット経由で提供するシステムも開発されている(3.2節参照)。情報の拡充自体は歓迎すべきことであるが、気象データの選択によって、解析やモデル計算の結果が変わりうるという新たな問題が生じがちである。また、多数のデータが存在することによって、それぞれのデータの特長の把握や、新たにリリースされるデータの情報収集に、より多くの努力を費やす必要が生じている。

本総説では、特に広域スケール(景観から全球まで数 km^2 より広い範囲)を対象として、農業気象分野で利用可能な気象データセットの現状と課題を概説する。気候変動の影響評価や適応研究では気候モデルや地球システムモデルによる将来予測データが使用されるが、本稿では触れず、過去から現在の観測に基づく気象データを取りあげる。また、実際にデータを利用する際は、各種のバイアス補正やダウンスケーリングを施すことが多いが、専門性が高いためその詳細は他稿に譲ることとし(例えば飯泉ら, 2010; 稲津・佐藤, 2010; 高藪・金光, 2010), ここでは代表的な気象データとその応用例の紹介、今後に向けた議論を行う。2節ではデータセットで扱う気象要素について説明し、3～5節では利用可能なデータセットの特徴などを簡潔に示す。最後に6節で気象データに関する課題を考察する。

2. 農業気象分野で用いられる気象要素

本節では、農業気象分野の研究と実務でどのような気象要素(変数)が用いられるかを示す。使用目的によって必要な要素は異なるが、農作物を含む陸域のモデル入力値として共通性が高いものに、地表での気温、降水量、湿度、下向短波放射、下向長波放射、気圧、東西方向の風速、南北方向の風速の8要素があげられることが多い(図1中に太字で示した)。ここで、データ頻度などの時間代表性や高度などの空間代表性に関する特性は、データセット毎に共通とは限らない点に注意が必要である。月別・日別・時別など、そして地上2 m や10 m などでの値が一般的である。気温に関しては平均値だけでなく、極値として最高気温や最低気温が要求される場合もある。降水量については、多くは雨量計で観測される降雨による水量を扱うが、降雪や結露などを別に扱う場合もある。湿度に関しては、相対湿度、絶対湿度、比湿、露点温度などがあり相互に変換することができる(近藤(1995)など参照)。日射は、下向の短波放射量を扱う場合が多いが、日照時間、直達・散

乱成分、光合成有効放射、また純放射を求めるための長波放射や、反射率を計算するため上向の放射量が必要な場合もある。気圧は通常は地表での値が与えられるが、気象モデルのプロダクトでは海面高度での値が提供されることもあり、その場合は高度補正が必要となる。風速は、平均値だけでなく強風の特徴を表す瞬間最大風速などを使用する場合もあり、また高度による変化も明らかなので対数則に基づく補正を行う必要がある場合もある。

上記以外にも、地表面温度、植生(キャノピー)温度、地温、土壌水分量(含水比など)、外気中の微量ガス(オゾン、二酸化炭素など)や微粒子(黄砂やPM 2.5など)の濃度、降雪、霰や雹の発生、雲量、風向、紫外線強度などを扱う場合もある。また、積算温度や年降水量、降水頻度のように時系列データを集計して得られるもの、放射乾燥度や干ばつ指数(例えばPDSI)などのように所定手順の計算処理を経て得られる二次的な気象指標と呼ぶべきものもある。

これら多くの変数が同時に観測されている場所は実際には少なく、比較的多くの変数がそろっている場合でも変数によって時間間隔、空間代表性、精度(誤差)は多少とも異なる点には注意が必要である。

3. 統計的アプローチ

本節では、観測された地表での気象データから数理統計的な処理を経て作成された気象データセットを紹介する。これらは、後述する気象モデルを用いた再解析データなどと比較して、物理的な整合性(例えばエネルギー収支が閉じているか)は譲る反面、実測データにより近く、気象モデルや同化アルゴリズムに起因するバイアスを受けにくい。また、計算負荷が比較的軽いいため、高い空間分解能でデータを作成することが可能である。

3.1 気象庁メッシュ平年値データ

日本国内の詳細な気象データとして、気象庁による観測データに基づいて作成された1 km メッシュデータが利用可能である。各地の気象台、測候所・航空測候所、およびアメダス観測網は、気象衛星や気象レーダーと並んで日本の気象事業の根幹となるデータを提供している。農業気象分野では、調査実験地から最寄りにある測候所やアメダス観測点の気象データを解析に利用した例は多数ある(例えば内川ら, 2003; 脇山ら, 2003; 古畑・原, 2013; 山根・国

図1. 気象データセットで扱われる気象要素(変数)の概要。

分, 2016)。詳細なモデル評価のために、早くから密な観測網を持つ気象庁などの観測所(北村, 1990)やアメダスデータ(清野, 1993)のメッシュ化が行われてきた。現在の気象庁メッシュ 2010 年版では、1981 ~ 2010 年の平均値から推定された、気温(日最低, 日最高, 日平均), 降水, 最深積雪, 日照時間, 全天日射量 (MJ m^{-2}) の月別または年間の平年値が提供されている(気象業務支援センター, 国交省 HP などから入手できる)。気象業務支援センターから提供されているデータは、スプレッドシート等で読み込み可能な CSV 形式で収録されている。データ作成に使用されているのは、気象庁による 156 ヶ所の気象台・測候所等のデータ、およびアメダス約 1100 地点のデータであり、標高・勾配・都市因子との重回帰モデル(日射量については別の簡便な統計モデル)を用いて内挿が行われている。

国内で稠密に実施された、高いレベルで測定手法が統一された観測データを用いており、気候条件における地域分布などの情報源として活用されている。ただし、カバーされている領域が国内に限られる点、平年値のみであり年々の変化は得られない点、湿度や風速など含まれていない変数がある点には注意が必要である。短時間の気象変動を得るには、その変動の性質に応じた手法により修正されたデータセットを作成する必要がある(例えばヤマセ吹走時の気温に関する菅野(1997)など)。また、概ね 10 年に一度のペースで更新されているため、特に過渡期にはバージョン情報を確認しておくべきである。本データは平年値のため、単体で利用されるだけでなく、時系列データを補正し信頼性を高める基礎データとして利用される場合が多い。
参考 URL (アクセス日 2018/01/16, 以下同じ)

気象庁, メッシュ平年値図。

<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/atlas.html>

国土交通省, 国土数値情報平年値メッシュデータ。

<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-G02.html>

気象業務支援センター, メッシュ平年値 2010 年。

<http://www.jmbasc.or.jp/jp/offline/cd0490.html>

3.2 メッシュ農業気象データ

農研機構は、アメダスの過去値や気象庁数値モデルの予報値(MSM-GPV および GSM-GPV)を組み合わせて、空間分解能 1 km で農業気象的に実用性の高い情報を提供する「農研機構メッシュ農業気象データ(The Agro-Meteorological Grid Square Data, NIAES)」を開発した(大野ら, 2016)。本データは無償ではあるが利用申請ベースで提供されており、提供元である農研機構の定める利用条件に適った使用を行う必要がある(農業分野以外での利用はできない、とのことなので筆者も実データは未見である)。提供されている気象要素は、日平均気温、日最高気温、日最低気温、降水量、日照時間、全天日射量、下向長波放射量、日平均相対湿度、日平均風速、積雪深、積雪相当水量、日降雪相当水量、予報気温の確からしさ、であり全て日値である(2017 年版マニュアル(農業環境変動研究センター, 2017)より)。気温、降水、日射に関する要素は 1980 年から、その他のものは 2008 年から前日までの過去データが提供されている。また気温と降水は 26 日先

まで、湿度と風速は 9 日先までの予報値も提供されている。注意事項として、1 km メッシュデータの作成時に用いている測地系は JGD2000 であり、旧測地系を用いているデータとの混用はできないとされる。メッシュ農業気象データは専用のサーバから配信されており、データアクセスフォーム、専用表計算シート(Web クエリ機能を使用)、および Python 言語のスクリプトを介して入手することができる(詳細は下記ページより入手できるマニュアル参照)。提供されるデータのフォーマットは、アクセスフォームを使う場合には、汎用性の高いテキスト形式、NetCDF3/4 形式などから選択できる。他の方法では、表計算ソフトとの親和性が高い CSV 形式および MS-EXCEL 形式が採用されている。Python スクリプトの使用にあたっては、データの入手と処理の利便性を高めるためのツール群が提供されている。本データは、異常気象による作物へのストレス発生日リスク評価(中野ら, 2017)や北海道におけるワイン生産動向と気候変動の関係に関する解析(広田ら, 2017)など、すでに多くの利用例がある。

参考 URL (利用申請やマニュアルなど)

農研機構, 技術情報: 数値予報も取り込んだ全国 1 km メッシュ農業気象データ。

<http://adpmit.dc.affrc.go.jp/technical/cont67.html>

3.3 CRU データセット

英国イーストアングリア大学の Climate Research Unit (CRU) は、気候変動分野で世界的に有名な部門であり、独自の気象データセットを多数配信している。例えば全陸域 0.5 度メッシュの気温、降水量、雲量、湿度データ(時間分解能は月別)は、1901 ~ 2016 年の長期をカバーし、農業分野を含む多くの陸域研究で使用されている。直接モデルへの入力値とするほか、地上観測ベースの参照データとして気象モデル推定の補正などにも利用されている。1990 年頃にも Leemans and Cramer (1991) による全陸域 0.5 度メッシュの気温・降水量データが作成され利用されていたが、1931-1960 年の長期平均値であり、気候変動が陸域に与える影響などの地球環境研究に適用するには不十分であった。2018 年 1 月現在、全陸域 0.5 度メッシュの最新バージョンは TS 3.25 であり(Harris *et al.*, 2014, DOI:10/gcmdf7), 改良されたアルゴリズムを用いた TS 4.01 も同時に提供されている。例えば TS 3 シリーズまでは、任意地点について近隣の観測データ 3 点を距離加重して内挿する方法(Triangulated Linear Interpolation)が用いられていたが、TS 4.0 からはよりフレキシブルな角距離加重法(Angular Distance Weighting)が採用されている(Mitchell and Jones, 2005)。現在の TS 4.0 データセットでは、1 点の推定を行うために有効距離内(Correlation Decay Distance: 地域や変数で異なる)にある 1 ~ 8 地点の観測データを用い、距離の 4 乗に反比例する加重方法を採用している。ベースとして使用する観測データは世界気象機関(WMO)が提供するものであり、英国気象庁ハドレーセンター、米国大気海洋局(NOAA)、米国気象データセンター(NCDC)とも協力してデータを得ている。全陸域 0.5 度メッシュはほぼ年に 1 回、前バージョンより 1 年延長するとともに過去分にアップデートを施す形で

リースされている。また、時系列データだけでなく 30 年間（1961-1990 年）の長期平均値データセットも提供されている（CRL CL 2.1）。主なデータ形式は NetCDF であり、TS3.25 と TS4.01 の温度と降水量については Google Earth による表示のための KML ファイルも提供されている。

参考 URL

University of East Anglia, High-resolution gridded datasets.

<https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/>

3.4 WorldClim

米国カリフォルニア大学デービス校の Robert J. Hijmans らによって開発された気象データセットであり、その最大の特徴は高い空間分解能にある。全球陸域をカバーしながら、最高で緯度経度 30 秒つまり約 1 km 相当を達成している。現在のバージョンは WorldClim 2 であり（Fick and Hijmans, 2017）、空間分解能は緯度経度 10 分、5 分、2.5 分、30 秒の 4 種類が提供されている。含まれる気象要素には最高・最低・平均気温、降水量、日射量、風速、水蒸気圧があり、いずれも 1970-2000 年の月平均値である。月平均データから計算される各種の生気象学的な指標（Bioclimatic variables）を提供しているのもこのデータセットの特長であり、年平均気温と年較差、年降水量と季節的な変動係数などが含まれる。

使用した気象データには、WMO が提供する長期平均値（CLINO, 1961-1990）、世界農業機関（FAO）による気象データ FAOCLIM 2.0、全球の気象観測ネットワークデータセット（GHCN v2, v3）、さらに前出の CRU TS3.22 で使用した観測データなどが含まれる。観測データ点数は、降水量で最多の 60419 地点、日射量で最小の 9118 地点である（そのうち重複や品質のチェックで除外されるデータも相当数ある）。地点の観測データに対し、スプライン処理を施すことで高分解能データが生成される。WorldClim 2 では、オーストラリア国立大学のグループが開発したソフトウェア ANUSPLINE 4.4 を使用しており、使用データのグルーピングや外れ値（outlier）の補正などで計算時間を節約しつつ精度を高めるための工夫を行っている。高分解能になるほど、観測地点の位置情報に含まれる誤差も問題となるため、必要場合は Google Earth で衛星画像を見ながら緯度経度の確認を行ったという。また高分解能な地形・標高データも必要となるため、緯度経度 30 秒相当の SRTM（スペースシャトルによるレーダー観測）および GTOPO30（8 種類の標高情報を組合せて作成）を使用している。なお、前バージョン（WorldClim 1.4; Hijmans *et al.*, 2005）では、近年の長期平均値だけでなく、気候モデルの出力をダウンスケールして古気候（最終氷期、気候最適期）や IPCC 第 5 次評価報告書で使用された将来予測に関する高分解能データも含まれていた。年毎の時系列データでは無いため、一定の精度向上を果たした（論文が出版された）タイミングで不定期にアップデートが行われているようである。主なファイル形式は GeoTIFF 形式である。応用例としては、全球を高分解能でカバーするという特性を活かし、ケニアでの農業改良に関する面的な解析（齊藤ら, 2015）、ラオスでの複合農業システムに関する調査への利用（福田・チャンソム, 2008）、全球スケールの農

地マッピング（Salmon *et al.*, 2015）や収量ギャップ分析（Mueller *et al.*, 2012）などがある。

参考 URL

WorldClim - Global Climate Data. <http://www.worldclim.org/>

3.5 地上降水データ：GPCP, CMAP, APHRODITE など

地表面における降水量は、農業気象学だけでなく水文学や生態学など多くの分野で基礎的データとして重要である。そのため、降水に特化した広域データセットが多数開発されてきた（表 1）。本節では歴史的に重要な役割を果たしたデータセットと、近年の降水データの紹介に絞って紹介する（TRMM など衛星観測から作成された降水データは 5.2 節へ）。降水データに関する総説としては Sun *et al.* (2018) などがある。

地上降水データは、基本的に降水ゲージで観測された地点データを集計・補間して作成される（近年ではレーダー観測も使用される：林ら 2017）。降水量は時間的・空間的な分布と変動性が複雑であり、観測の空間代表性など技術的な困難さも残されているため、データの補正や解析の方法によってデータセット間の違いが生じる（例えば中井・横山, 2009）。1990 年頃まではデータ処理上の制約もあり、広域データとしては前述の Leemans and Cramer (1991) や Legates and Willmott (1990) による長期平均値のみであった。つまり、干ばつや洪水などの明らかなものすら経年変動は平滑化されており、気候値として季節変化や空間分布の解析に用いられた（経年変動の解析は後述の客観解析データで可能であった）。1990 年代後期には、技術的進歩や地球環境変動への注目度が高まり、極端現象を含む時系列データが作成された。代表的なデータとして、Global Precipitation Climatology Project (GPCP; Huffman *et al.*, 1997)、1989 年に設立された Global Precipitation Climatology Centre (GPCC; Schneider *et al.*, 2017)、CPC (Climate Prediction Center) Merged Analysis of Precipitation (CMAP; Xie and Arkin, 1997)、Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation (MSWEP; Beck *et al.*, 2017) などがある。これらは地上観測だけでなく気象衛星による観測データも利用しており、そのため必要な情報が得られるようになった 1979 年以降について主に時系列データを提供している。いずれも 2017 年時点までアップデートが継続されている。

日本で開発された代表的なデータとして Asian Precipitation- Highly Resolved Observation Data Integration Towards Evaluation (APHRODITE; Yatagai *et al.*, 2012) がある。アジア地域を対象として、できるだけ多数かつ高品質な観測データを利用し、長期（現時点で 1951 年以降）の降水量データを提供している。また、多くの降水データセットが月別値を与えているのに対し、APHRODITE は日値を提供しているため極端な降水現象を含む時間変動を考慮するのに適している。使用したデータは WMO の Global Telecommunication System により各国から報告されるデータに加え、個別の研究グループから個別に承諾を得て使用するデータ、さらに独自の観測データを用いている。空間分解能は、モンスーンアジア域版（MA）では緯度経度 0.5 度または 0.25 度であるが、日本域版（JP; Kamiguchi *et al.*,

2010) では 0.05 度である。2017 年 7 月より、日本域版は 2015 年までのデータが提供されている。データセット本体はデータ統合解析システム DIAS から入手可能であることも、他のデータと比べて際だった特色と言える (ファイル形式は NetCDF が採用されている)。開発プロジェクト第 1 期では 2007 年までのデータが作成され、現在進行中の第 2 期では精度向上とともに提供期間の延長が図られると期待される。

参考 URL

APHRODITE's Water Resource.

<http://st.hirosaki-u.ac.jp/~aphrodite2/>

Deutscher Wetterdienst, Global Precipitation Climatology Centre (GPCC).

<https://www.dwd.de/EN/ourservices/gpcc/gpcc.html>

GLOH2O, MSWEP. <http://www.gloh2o.org/>

3.6 FAOCLIM

FAO は機関内での諸活動および農業に関する外部の様々な活動を促進するため、世界の農業気象データベースを提供している。CD-ROM で提供されている FAOCLIM 2.0 には、世界 28,100 地点で観測された気象データが含まれている (ただし提供されているデータが作成されたのは 2001 年頃なのでやや古い感否めない)。インターネット経由でデータを配信する FAOCLIM-NET も提供されている (ただし 2018 年 1 月現在、ネットワークサービスには接続できない状態である)。FAO からは、世界の気候データに基づいて判定された農業生態ゾーン (Agroecological zone) マップ、降水量マップ (FAO-RainFall Estimate)、純一次生産力マップ、内挿により地点での気象条件を近似的に推定するツール (LocClim) など提供されている。

参考 URL

Food and Agriculture Organization, FAOCLIM2: world-wide agroclimatic data.

http://www.fao.org/nr/climpag/pub/en1102_en.asp

3.7 MERRAclim

スペイン・Rey Juan Carlos 大学の Greta C. Vega らによって作成された全陸域の気象データセットである (Vega *et al.*, 2017, DOI: 10.5061/dryad.s2v81.2)。前出の WorldClim では南極がカバーされていなかったのに対し、本データセットでは再解析気象データ (MERRA: 4.3. 節参照) を用いることで南極を含む全陸域がカバーされている。提供されている気象要素は、年平均気温、気温日較差の年平均値、気温の変動幅と年較差、再暖月の最高気温、最寒月の最低気温、年平均比湿、最も湿潤な月の比湿、最も乾燥する月の比湿など 19 種類である。降水量や日射量が含まれない点には注意を要する。提供データの空間分解能は 10 分、5 分、2.5 分であり、もとの MERRA 再解析データ (緯度 0.5 度×経度 2/3 度) よりも高いが、これはスプライン法により内挿処理を行ったためである。また、このデータは 1980 年代、1990 年代、2000 年代の 10 年毎に提供されているが、これは当初のデータ開発目的が生物の種分布予測モデルに入力しての長期推定であり、高い時間分解能を必要としなかったためである。

参考 URL

DRYAD, MERRAclim.

<http://datadryad.org/resource/doi:10.5061/dryad.s2v81>

4. 客観解析・再解析データ

天気予報で使用する数値モデルの初期条件を与えるため、世界複数の気象研究機関で典型的には 6 時間毎に各種の観測データを同化した全球の (客観解析) 気象データが作成されている (表 2)。気象分野では、変分法やアンサンブル・カルマンフィルタがデータ同化の手法に使用される (データ同化については加藤 (2013) など参照)。全球モデルの空間分解能は緯度経度 2 度程度ของことが多く、必ずしも陸域を見るのに十分なほど高くないが、時間分解能は日内変動も得られるほど細かい。客観解析データは現業で用いるため、使用する観測情報だけでなく計算機・モデ

表 1. 代表的な広域スケール降水量データ.

	データ提供期間*	範囲, 分解能	観測データ
APHRODITE (APHRO_MA v1)	1951/1/1-2007/12/31	モンスーンアジア, 15-30 分	降水ゲージ
CMAP	1979/1-2017/12	全球, 2.5 度	降水ゲージ, SSM/I など 5 種類 の衛星データ
GPCP v2.3	1979/1-2017/11	全球, 2.5 度	降水ゲージ, SSM/I, TOVS, AIRS など衛星データ
GPCC v7	1901/01-2013/12	全球, 0.5-2.5 度	降水ゲージ, 衛星データ (モニタリングプロダクト)
GSMaP (準リアルタイム版)**	2008/10 ~ (4 時間遅れ)	60°N-60°S, 0.1 度	複数衛星データ (TRMM, GPM など)
MSWEP v2.1	1979-2016	全球, 0.1 度	降水ゲージ, 衛星データ, 再解析データ
TRMM Monthly Climatology	1998-2010 平均	40°N-40°S, 0.25 度	衛星搭載降水レーダー

* 2018 年 1 月 16 日現在.

** 0 時間遅れのリアルタイム版, 再解析版 (2000 年 3 月 ~ 2014 年 2 月) などもある.

ルも随時アップデートされていく。それとは別に、保存された過去の観測データを最新の気象データに同化し、一貫した気象プロダクト（再解析）を研究用に作成する活動がある。このような再解析データには、大気上層までの三次元構造が得られるという気象学的な利点だけでなく、かなり長期にわたり連続した、非常に多数の気象要素データが得られるという特長がある。また、気象モデルは質量やエネルギーの保存則（連続の式）が基礎方程式に含まれているため（観測データを同化した時点では必ずしも厳密に成り立たない場合があるが）、物理的に整合性の高いデータが得られるという利点もある。そのため気象学研究では、再解析データの分析は、観測や数値モデルと並んで有効な手法・分野として確立されている。また、気象学以外の分野での使用頻度も高まっている。再解析データの短所となりうる空間分解能の低さや提供期間の不足については、適切なダウンスケーリング手法や補助的なデータを援用することである程度まで克服されている。

4.1 気象モデルによる再解析データ（2000 年代まで）

気象の再解析データが開発されるようになったのは 1990 年頃からであり、そこにはいくつかの契機があったと思われる。①長期の気象観測データが蓄積されてきた。測候所だけでなく、1979 年以降は TOVS など気象衛星によるデータが利用可能になり使用するデータ量が大きく増加した（そのため長期再解析データでは 1979 年を境に品質が異なる）。②計算機の演算能力が大きく向上し、ベクトル化や複数プロセッサによるパイプライン処理が可能なスーパーコンピュータを気象研究に利用することが可能となった。③データ同化に用いられるアルゴリズムに関する研究開発が進んだ。初期の最適内挿法やナジング法から始まり、4 次元変分法やアンサンブル・カルマンフィルタなど更に高度な手法が利用されるようになった。④温暖化をはじめとする地球環境問題への関心の高まりを受け、信頼度が高い長期気象データに対する需要が高まった。

1990 年代に開発が始められた代表的な気象の再解析データとして、米国の NCEP/NCAR (Kalnay *et al.*, 1996), NCEP DOE/AMIP-II (Kanamitsu *et al.*, 2002), ヨーロッパ

の ERA15 (Gibson *et al.*, 1997) があげられる。日本の気象庁は当時より、客観解析および予報データ (GPV) を作成していたが、再解析データについては 2007 年から提供が始められた JRA25 (Onogi *et al.*, 2007) を待たねばならなかった。日本独自の再解析データである JRA25 は、気象庁と電力中央研究所によって開発が行われ、1979 年からの 25 年間 (2004 年末まで) を対象としていた。そのため 2005 年以降は JCDAS として準リアルタイムでデータをリリースし、それは後述する JRA55 にフェーズが移行した 2014 年まで続いた。NCEP/NCAR 再解析は提供期間が 1948 年からと長く、2018 年 1 月現在でもデータが更新され続けている。これらの再解析データに関するデータ同化手法（多くは 3 次元変分法を使用）や空間分解能に関する比較を表 2 に示した。気象学的な説明は大野木 (2007) など参照されたい。

これら（レガシーな）再解析データは、気象学の研究に用いられただけでなく、全球をカバーする利点を活かしてグローバルな陸域モデル研究でも多く利用された（生態系分野では Ito and Oikawa, 2000 など）。農業気象分野では、例えば峠ら (2013) は JRA25 などの気象データを陸面モデル SiBUC に入力し、アララ海周辺の灌漑農地の拡大が熱水収支に与える影響を評価している。大塚・永吉 (2015) は、沖縄におけるミカンコバエの飛来経路・リスクを分析する際、NCEP/NCAR 再解析データをモデル入力値に用いている。また、大久保ら (2015) はイネ葉いもちの発生予測を行うシステム (BLASTAM) を開発し、JRA25 に見られる気象の総観場の特徴などを用いて被害発生原因に関する解析を行っている。再解析気象データは、適切なダウンスケール手法（例えば飯泉ら (2010) など参照）を援用することで地域スケールの研究に利用され、また統計的なメッシュデータによるバイアス補正を加えることで長期研究にも利用されている。

4.2 JRA55

気象庁により開発作成されている長期再解析データであり、先だって開発されていた JRA25 の後継プロダクトにあたる。世界の気象予報現業機関では数十年スケール

表 2. 気象再解析データの比較.

データ名	データ提供期間	空間分解能	データ同化手法
NCEP/NCAR	1948–現在	T62	3 次元変分法
NCEP/DOE AMIP-II	1979–現在	T62	3 次元変分法
NCEP/CFSR	1979–2011/3	T352	3 次元変分法
NCEP/CFSR2	2011–現在	T574	3 次元変分法
ERA15	1979–1993	T106	3 次元最適内挿法
ERA40	1957–2002	T159	3 次元変分法
ERA-interim	1979–現在	T255	4 次元変分法
JRA25	1979–2004	T106	3 次元変分法
JCDAS	2004–2013	T106	3 次元変分法
JRA55	1958–現在	TL319/2.5 度	4 次元変分法
NASA-DAO	なし (MERRA へ)	2 度 × 2.5 度	最適内挿法
MERRA 1,2	1979–現在	1/2 度 × 2/3 度	3 次元変分法

の気候変動解析に対応できる長期データの開発がトレンドとなっており、欧州の ECMWF ではすでに 1901 年以降の 20 世紀中をカバーする再解析が行われている（後述）。JRA55 は 1958 年以降の 55 年間以上を対象期間としており、改良された数値解析システムを用いることで精度も大幅に向上している（Kobayashi *et al.*, 2015; Harada *et al.*, 2016）。ちなみに 1957 年 7 月 1 日から 1958 年 12 月 31 日は国際地球観測年であり、この時期以降はラジオゾンデによる定期的な高層観測データが利用可能となっている。技術的な詳細は上記文献を参照されたいが、データ同化システムに 4 次元変分法を採用し、空間分解能も TL319（約 55 km）となるなど、JRA25 と比較して精緻化されていることは明らかである。モデルは上記の準規則ガウス緯度-経度格子系を採用しているが、緯度経度 1.25 度格子のデータも配布されている。

農業気象など地表付近のデータを利用する場合は、陸面解析値 (anl_land) や地表面解析値 (anl_surf) に含まれる気圧（地表面）、気温・比湿（地表から 2 m）、東西・南北風の風速（地表から 10 m）、2 次元物理量平均値 (fcst_phy2m) に含まれる地表面での総降水量、下向短波放射フラックスなどが利用可能である。気象モデルの多くには、地表面のエネルギー・水収支を扱うスキームが組み込まれており、そこから出力される変数も利用することができる。例えば陸面予報値 (fcst_land) に含まれる積雪深、キャノピー温度、土壌温度、土壌水分量（上・中・下層）、陸面物理量平均値 (fcst_phyland) に含まれる流出量、蒸散・遮断蒸発フラックスなどである。このように変数によって解析値か予報値かが分かれる点には注意が必要だが、いずれも 3 時間毎のデータを利用可能である。また、領域スケールの事例解析を目的として、メソ数値予報モデルにより日本域を 5 km メッシュ相当にダウンスケーリングしたデータ (DSJRA-55, Kayaba *et al.*, 2016) も提供されている。

JRA55 は気象データで多く採用されている GRIB1 形式で提供されており、気象庁によるデータ提供サイトの他、地球環境情報プラットフォーム構築推進プログラムによるデータ統合・解析システム DIAS、筑波大学・計算科学研究センター、米国大気研究センターから配布されている。

参考 URL

JRA-55: 気象庁 55 年長期再解析。

http://jra.kishou.go.jp/JRA-55/index_ja.html

4.3 MERRA

NASA（米国航空宇宙局）ゴダード宇宙飛行センターの全球モデリング・同化オフィス（GMAO）によって開発されている気象再解析データである（Rienecker *et al.*, 2011）。この再解析データ開発の主要目的には、NASA で実施されている各種地球観測衛星のデータを最大限活用することが含まれており、衛星観測データが充実する 1979 年以降の期間をカバーしている。特に、降水や大気中の水蒸気量など水文気象に関係する変数の精度を大幅に向上させることが目標に掲げられている。気象モデルとして GEOS-5 を用い、3 次元変分法を適用しているが、前出のレガシーな再解析データで使用されていた方法と比較して、観測値と予

測値のズレの評価計算やノイズに関する制約の付け方などで精度向上のための細部の工夫が加えられている。なお、MERRA バージョン 1 は 2016 年 2 月で終了し、それ以降は MERRA バージョン 2（Gelaro *et al.*, 2017）に引き継がれている。使用する衛星データは大幅に増加し、その中にはヨーロッパの ESA が打ち上げた MetOp 衛星によるものも含まれる。また、気候モデルで雲や降水を扱う物理スキームや雪氷・海氷の反射率などにも改良が加えられている（空間分解能は大きく変わっていない）。MERRA バージョン 1 および 2 データにおける気象場の精度評価に関しては Bosilovich *et al.* (2011, 2017) などを参照されたい。

MERRA データは NASA のゴダード地球科学データ情報サービスセンター（GES DISC）から入手できる。空間分解能は 1/2 度 × 2/3 度で鉛直方向は 72 層が設定されている。また、基本的に同じシステムを用いながら、陸面で独自の改良（同化に用いるデータの更新や蒸発散関係のパラメータ再調整など）を加えつつオフラインで同化を行った MERRA-Land も同時に開発されており（Reichle *et al.*, 2011）、水文気象関係の変数では大気と結合したバージョンよりもバイアスの少ないデータを提供している。

参考 URL

NASA-GMAO, MERRA,

<https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA/>

NASA-GMAO, MERRA2,

<https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/>

4.4 NCEP-CFS 解析データ

米国 NCEP による新しい予報システムである CFS（Saha *et al.*, 2006）を用いた現業目的の客観解析および再解析データ（CFSR）である。2004 年 8 月から稼働しているこのシステムでは、大気海洋の結合スキームを改良することで季節予報の精度向上が図られている。解析データはバージョン 1（1979 ～ 2010 年, DOI: 10.5065/D6513W89）とバージョン 2（2011 ～, DOI: 10.5065/D6N877VB）が作成されている。バージョン 1 は空間分解能 T382（緯度方向 576 行、経度方向 1152 列のガウス格子）であり、NCEP/NCAR 再解析と比較して大きく向上している。衛星データの同化においても、NCEP/NCAR 再解析では観測できる物理量に変換したりトリバルデータを用いる必要があったが、CFSR では放射輝度をそのまま使用することができる。また、従来の再解析データでは大気 CO₂ 濃度増加の影響を考慮することが難しかった（NCEP/NCAR 再解析では 330 ppmv で固定）が、CFSR では CO₂ 濃度変化とその地表の放射収支への影響が導入されている（Saha *et al.*, 2010）。ただし、様々な改良が施されたにも関わらず（筆者自身も CFSR データを使用して経験したことであるが）、熱帯陸域での降水バイアスが大きいなどの問題点があった。2011 年 3 月に運用が開始された CFS 解析のバージョン 2 では、さらに空間分解能が T574（緯度方向 880 行、経度方向 1760 列のガウス格子）に高められ、大気と陸面のモデルに改良を加えて、数日から数ヶ月の季節予報の精度が向上している（Saha *et al.*, 2014）。

NCEP-CFR データの注目すべき点として、全球 1 時間ステップデータが公開されている。多くの再解析は 6 時間

または3時間毎のデータなのに対し、このデータでは毎時の値を得ることができるため日内のより短時間の変動を得ることができる。これは日射量のように時間変動が激しい変数を扱う場合には利点となるが、空間分解能の高さと相まって、データ量を大幅に増加させるという短所ともなりうる。データはGRIB2形式で、米国NCEPおよびNCAR Research Data Archiveから配布されている。

参考 URL

NOAA-NCEP, CFSR1. <http://cfs.ncep.noaa.gov/cfsr/>

CFSR1. <https://rda.ucar.edu/datasets/ds093.1/>

NOAA-NCEP, CFSR2.

<https://rda.ucar.edu/datasets/ds094.1/>

4.5 ERA-interim, ERA-20C (NOAA-CIRES 20C)

ヨーロッパ中期予報センター (ECMWF) による再解析データである。ECMWFは天気予報の精度の高さで知られており、その要因として予報の初期値に使われる客観解析データの信頼度の高さが考えられる。1993年から開始され1979～1993年を対象とした再解析 (ERA15), 2000年から開始され1958～2003年を対象とした再解析 (ERA40; Uppala *et al.*, 2005) を経て、新しいデータ同化システムと観測データに基づく再解析が実施されている。ただし、20世紀初頭からの長期を対象として一貫した解析を行った ERA-20C (Poli *et al.*, 2016) と、1979年以降を対象としている ERA-interim (Dee *et al.*, 2011) は別個のデータセットとして提供されている (使用している解析システムのバージョンも異なる)。ERA-interim は4次元変分法を採用しており、ERA40での問題点であった水循環、成層圏循環、再解析の整合性などにおいて改善が図られている。1979年以降、数ヶ月遅れで現在まで、時間分解能は3時間のデータが公開されている。解析システムの空間分解能はT255 (約80 km)・鉛直60層であり、提供されるデータは、GRIB形式では緯度経度0.75度からT63まで、NetCDF形式の場合は緯度経度0.125度から3度までの間で選択することができる。

ERA-20Cは1901-2010年の期間について、空間分解能T159 (約125 km) で再解析データが作成されている。データ同化には4次元変分法が用いられているが、同化に用いる観測データは地上気圧と海上風のみである。1931年以前には衛星データはもちろん、高層気象の情報を得るゾンデ観測データも揃わないため、一貫性を優先して地上データのみが使用されている。なお、米国NOAAにおいても、同様な方向性のNOAA-CIRES 20C再解析データ (Whitaker *et al.*, 2004, DOI: 10.5065/D6N877TW) が作成されており、そのバージョン2cは長期の海洋気象データ等を用いて1851年まで遡ることに成功している。

参考 URL

ECMWF, ERA-interim.

<https://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis/era-interim>

NOAA, CIRES 20C. <https://rda.ucar.edu/datasets/ds131.2/>

4.6 CRU-NCEP

主に陸域モデルの入力データとして作成された、長期気象データである。カバーする期間が長く空間分解能も

高いが1ヶ月ステップであるCRUデータと、期間が短く分解能も低い6時間ステップであるNCEP/NCAR再解析を組み合わせることで両者の長所を活かしている。フランス・IPSLに所属するNicolas Viovyらによって作成されたNetCDF形式のファイルが配布されている。空間分解能を揃えるため、まずNCEP/NCAR再解析データはバイリニア法を用いて0.5度メッシュに内挿される。次いで各0.5度格子点について1ヶ月毎に月平均値を計算し、それに対する6時間毎の値の偏差を同じ年・月のCRU月間値に加える方法を採用している (降水量に関しては不自然な降水頻度を避けるため閾値を設けるなどの工夫を加えている)。CRUは毎年、NCEP/NCAR再解析は随時更新されるため、CRU-NCEPも現在のところほぼ1年に1回のペースでアップデートが行われている。2018年1月時点で最新v7.2は、1901年から2016年までをカバーしており、このバージョンから0.5度に加え1度や2度に変換したファイル (いずれもNetCDF形式) も提供されるようになった。注意点としては、提供される変数はCRUデータに含まれるか導出するものに限られ (気温、降水、風速、比湿、気圧、下向短波、下向長波)、再解析データのように大気上空や地下部の情報は得られない。CRU-NCEPデータは、MsTMIP (Huntzinger *et al.*, 2013) などのモデル相互比較プロジェクトでも共通の入力データ (ただし最新版でない場合が多い) として利用されることがある。

参考 URL

Atmospheric forcing data for ORCHIDEE (CRU-NCEPを含む), <http://forge.ipsl.jussieu.fr/orchidee/wiki/Documentation/Forcings>

5. 指標, 衛星観測, 気象モデル

5.1 テレコネクション

空間的に離れた地域間で同調する気象変動パターンが見られることは以前から知られており、気象学ではテレコネクション (teleconnection, 遠隔相関) と呼ばれる。気温や降水量そのものに加え、テレコネクションに関する指標を参照することで、広域スケールの農業気象的に有用な示唆が得られる場合がある。本節では、代表的なテレコネクションとその指標について紹介する。

エルニーニョ・南方振動 (ENSO) とその逆のラニーニャは最もよく知られた例であり、基本的に太平洋赤道部の大気-海洋相互作用が主因でありながら、その影響はアマゾンの森林から日本など中高緯度まで及び、干ばつや多雨、猛暑や冷夏をもたらす。それは自然生態系だけでなく人間社会にも強い影響を与える場合が多いことから (Iizumi *et al.*, 2014a), 気象被害のリスク管理といった農業経営の点でも ENSO 指標に注目する意味は大きい。ENSOの指標は、大気圧の変動パターンに基づく古典的な南方振動指数 (SOI: 負がエルニーニョ) だけでなく、風速、海面温度、海上気温、雲量を考慮した Multivariate ENSO Index (MEI: 正がエルニーニョ) などが提案されている。日本の気象庁も監視海域 (NINO.3) の海面水温偏差データなどを提供している。

ENSO以外にも気象学研究によって多数のテレコネクションが発見されている (ただしメカニズムが未解明のものや仮説段階のものもある)。太平洋の中北部域では、

太平洋十年規模振動 (PDO) と呼ばれる約 10 年周期のパターンが重要な役割を果たすことが分かっており、漁獲高にも強い影響を与えていると考えられる。また、日本で行われた研究により、インド洋にも ENSO とは異なるインド洋ダイポールモード (IODM) と呼ばれる数年規模の変動パターンが存在することが示されており、南アジアやアフリカ東部の気象変動に影響を与えているとされる。例えば太平洋とインド洋に面するオーストラリアでは、ワイン用ブドウの成熟に ENSO と IODM の両方が影響を与えているという研究例がある (Jarvis *et al.*, 2018)。北半球中高緯度域では、北極振動 (AO) が注目されており、偏西風の蛇行に強い影響を与えて様々な異常気象 (特に冬季) の原因になると考えられている (ただし周期が一定しておらず予測が困難な一因となっている)。他にも北大西洋振動 (NAO), 太平洋・日本 (PJ) パターンなど多くのパターンが提唱されている。なお、アジアの温暖湿潤な気候とその変動にはモンスーンが不可欠な役割を果たしており、そのメカニズムとなるモンスーン循環、そしてその指標が提唱されている。これらの気象パターンを解析するための指標は多数が提案されており、時系列の数値データを入手することも可能である。

参考 URL

NOAA-NCDC, SOI.
<https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/soi/>
 NCAR CGD's Climate Analysis Section.
<http://www.cgd.ucar.edu/cas/catalog/climind/soi.html>
 NOAA, MEI. <https://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/>
 気象庁, 監視指数 (NINO.3).
<http://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/db/elnino/index/dattab.html>
 NOAA-CPC, AO, NAO 指標などの時系列.
http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/teleconnections.shtml
 NOAA-WGSP, IODM 指標などの時系列.
https://www.esrl.noaa.gov/psd/gcos_wgsp/Timeseries/
 University of Hawaii, Monsoon Monitoring Page,
<http://apdrc.soest.hawaii.edu/projects/monsoon/seasonal-monidx.html>

5.2 衛星観測：降水 (TRMM, GSMaP), 土壌水分 (CCI)

人工衛星による観測は、全球を一樣に高分解能でカバーできるという明らかな長所があり、その応用範囲は広がり続けている。陸域を対象とした観測分野では可視光、マイクロ波、レーザー光などを用いて生産力・バイオマスなどを把握するための様々な手法が開発されており、農業分野にも早くから導入されている (谷ら, 1984; 秋山, 1994)。陸域リモートセンシング全般は他稿 (例えば久米, 2014, 井上, 2016) を参照していただくこととし、本節では気象要素に係るデータに絞って紹介する。

気象衛星 (日本のひまわりなど) と呼ばれる専門の衛星が打ち上げられるほど、気象の解析と予報には衛星観測が不可欠の存在となっている。ただし、いわゆる気象衛星の多くは静止衛星 (地球の自転速度に合わせて周囲を回転しながら定まった領域を観測する) であり、雲関係変量の測定に特化した可視・赤外域バンドでの観測が行われて

いる。それは気象モデルのデータ同化には都合が良かったが、その放射輝度データを農業や生態学の研究で直接利用することは少なかった。衛星観測によってブレイクスルーと呼べるような気象データの高度化が図られた例として、降水量をあげることができる。特に降水レーダーを搭載した TRMM による観測データは、そのミッションが開始された 1997 年以降の水文気象研究に大きな影響を与えた (岡本・重, 2008 など参照)。TRMM データは主に低緯度域 (南北 40 度以内) を観測対象としており、データが HDF 形式で配布されているなど、専門外の研究者にはやや敷居が高かったが、5 分メッシュの高い空間分解能で、しかも 3 時間間隔のデータが得られる利点は大きかった。それまで地上観測点で降雨が観測されていたとはいえ、その空間密度は粗く、特に熱帯で多い積雲性の局在する降雨を把握することは困難であったが、TRMM データはその状況を一変させた。TRMM は 2015 年 6 月に使命を終えたが、その役割は 2014 年 2 月に主衛星が打ち上げられた GPM に引き継がれている。GPM は、中高緯度帯 (南北 60 度以内) をカバーすることで TRMM より広域の観測が可能となっただけでなく、二周波降水レーダーを搭載することで弱い雨や雪の検出精度も向上している。GPM を含む複数衛星による降雨観測に基づいて、衛星全球降水マップ (GSMaP: 緯度経度 0.1 度メッシュ, 時間分解能 1 時間) が作成され準リアルタイムで公開提供されている。また、地域によっては地上に設置された気象レーダー (ドップラーレーダー) により更に高い分解能での降水観測が行われており、衛星観測を補強している (例えば日本では気象庁により全国 20 ヶ所のレーダー観測などを用いて高解像度降水ナウキャストが提供されている)。

土壌水分量は、作物の水ストレス指標となり、他にも野外火災の予報など利用価値が高い変数である。しかし、時空間的な変動は大きく、空間代表性のある現地観測は簡単ではない。マイクロ波を使った人工衛星からの土壌水分観測は、Aqua 衛星に搭載された AMSR-E センサー、GCOM-W 衛星に搭載された AMSR-2, WindSat で実施されている。その土壌水分データは JAXA が運用するデータ配信サービス JASMES を通じて公開されており、アジア地域の水稲作況監視などを目的とするデータ提供システム (JASMIN) に利用されている (大吉ら, 2016; 2018 年 1 月現在, JASMES では土壌水分に代わり植生乾燥度 (水ストレス) が提供されている)。欧州宇宙機関 (ESA) では、1979 年に打ち上げられた Nimbus-7 から 2009 年に打ち上げられた SMOS までのマイクロ波観測データを用いて、37 年にわたる全球の土壌水分マップデータ CCI v03.3 を公開している (2018 年 1 月現在; Liu *et al.*, 2012)。このデータの空間分解能は 0.25 度であり、NetCDF 形式で配布されている。

参考 URL

JAXA, 衛星全球降水マップ (GSMaP).
http://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMaP/index_j.htm
 気象庁, 高解像度降水ナウキャスト.
<https://www.jma.go.jp/jp/highresorad/>
 JAXA, JASMES.
http://kuroshio.eorc.jaxa.jp/JASMES/index_j.html

ESA-CCI. <http://www.esa-soilmoisture-cci.org/>

5.3 干ばつ指標

干ばつは水ストレスによって農業被害を与えるだけでなく、都市域での生活水不足や火災発生などを通じて人間社会や生態系にも強く影響するリスク要因の1つである。単なる降水量の増減ではなく、温度・湿度・土壌水分など水利用に関係する要因、乾燥イベントの持続時間などを考慮し、発生するダメージとより密接に関係する干ばつの指標が提案されている。よく知られた Budyko の放射乾燥度は降水量だけでなく純放射を用いて乾燥の程度を指標化しているが、それは主に長期平均的な気候条件を表している。干ばつの指標は、より短期間に起こる変動、特に極端現象と呼ばれるイベントも適切に数値化できる必要がある。実際に、WMO は干ばつに関する 50 種類の指標を説明し、その中から実用的な指標を選択するためのハンドブックを公開している (WMO and GWP, 2016)。代表的な指標の 1 つに PDSI (パルマー干ばつ強度指標) がある。PDSI は気温と降水量に基づいて逐次的に計算されるが、前の時間ステップの値を使用して干ばつが継続する効果も考慮されている (Dai *et al.*, 2004 など参照)。また、降水量のみに基づく実用性の高い指標として SPI (標準化降水指標) が提案されている。これらの指標にはそれぞれ特徴があり、目的に応じた指標を選択することが肝要である。

NCAR CGD's Climate Analysis Section, PDSI 時系列データ. <http://www.cgd.ucar.edu/cas/catalog/climind/pdsi.html>

Climate Prediction Center, Drought Monitoring. http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/monitoring_and_data/drought.shtml

Integrated Drought management Programme, 干ばつ指標に関する説明. <http://www.droughtmanagement.info/indices/>

5.4 モデル相互比較用の入力データ

共通する入力データと計算手順 (プロトコル) を用いて複数のモデル (農業モデルも含まれる) で計算を行い、結果を比較して共通性や不確実性を検討するモデル相互比較プロジェクト (MIP) が盛んに行われるようになってきている。そこではモデル間の相対的な特徴を洗い出すだけで無く、モデル間で一致度の高い傾向を抽出することが目的となっており、そのための信頼性の高い入力データが必要とされる。実際に、データ自体の解析だけでなく主にモデル相互比較での使用を意図した気象データが作成されている。前出の CRU-NCEP データもその 1 つと言えるが、本節ではトレンド除去やダウンスケーリングを施したより高度な広域気象データについて紹介する。なお、飯泉 (2017) は変数別・データ別のより詳しい解説を行っているので参照されたい。

GSWP3 は、全球土壌水分プロジェクト第 3 期において、地表面の蒸発散や流出を計算する陸面モデルの入力データとして作成されたものである。東京大学生産技術研究所が開発を担っており、米国を中心に行われた 20 世紀再解析データ (20CRv2; Compo *et al.*, 2011) をベースとして気象モデルによる力学的ダウンスケーリング (空間的に 2 度メッシュから 0.5 度メッシュへ、時間的に 6 時間ステップ

から 3 時間ステップへ) を行っている。

PGMFDv2 は、プリンストン大学において作成された陸面モデル向けの気象データであり、NCEP/NCAR 再解析データなどをベースにしている (Sheffield *et al.*, 2006)。作成手順では、先ずベースのデータを 2 度メッシュの日値にバイリニア法で内挿してから、ベイズ統計を用いたダウンスケーリングが行われた。降水については、3 時間ステップの TRMM データも使用されている。

WATCH は、EU 主導で実施されている水文モデル相互比較プロジェクトで使用することを当初の目的として作成されたデータである (Weedon *et al.*, 2011)。ERA40 再解析データをベースにしておき、バイリニア法によって TL159 から 0.5 度メッシュへの内挿が行われている。1958 年以降のデータを並べ替えることで (擬似的に) 1901 ~ 1957 年分も作成され、バイアス補正は CRU TS2.1 データを用いて月ごとに行われている。WATCH データと基本的に同様な手法を用いつつ、ベースとなる再解析データとして ERA-interim を用いた WFDEI データも提供されている (Weedon *et al.*, 2014)。WFDEI ではバイアス補正に用いた CRU データも TS3.1/TS3.21 の新しいデータとなっている点にも留意した方がよい。全体的に WATCH よりも WFDEI の精度が高いと期待されるが、データ提供期間は WATCH の方が長いので、当面は目的次第で選択することになるだろう。

以上に紹介した 4 種類のデータは、影響評価モデル相互比較プロジェクトである ISI-MIP (Phase 2a) において、異なる気象データを用いた場合の結果を比較するベンチマーキングに使用されている。そこでは、気温と降水量にはデータ間の差は小さかったが、下向短波放射についてはデータ間で長期平均と変動幅に大きな差が見られた (Ito *et al.*, 2017)。結果的に、植生の光合成量とその経年変動の推定結果は、使用した気象データ間で異なりが生じていた。

その他にも、河川流出や蒸発散を推定する水文気象モデル向けに Hirabayashi *et al.* (2008) や Ngo-Duc *et al.* (2005) による全球 0.5 度または 1 度メッシュの気象データが作成されている。また、農業モデルで入力データとして使用することを想定した全球気象データも作成されている。Ruane *et al.* (2015) は、再解析データ CFSR と MERRA をベースに CRU や GPCC などの地上観測データ、TRMM などの衛星データを組合せ、1980-2010 年の全球日別気象データ (AgCFSR, AgMERRA: いずれも NetCDF4 形式) を作成している。さらに、Iizumi *et al.* (2014b, 2017) は、再解析データ JRA25 および JRA55 と気候モデルによる予測データを組合せ、作物モデルによる過去から将来までの影響評価を行うための全球気象データセット (GRASP, S14FD) を構築している。S14FD では、過去から現状について 1958 年から 2013 年までがカバーされており、主要な気象変数と 27 種類の指標について 4 バイトバイナリまたは NetCDF4 形式でデータが作成されている。これらのモデル用データセットは、期間や時空間分解能が異なるほか、各気象要素の補正法にも違いがある (飯泉, 2017)。そのため、前述の ISI-MIP ベンチマーキングで行われたように、複数の気象データセットを用いた計算結果の比較による不確実性の把握が必要となっている。

参考 URL

GSWP Phase 3. <http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/GSWP3/>
 WATCH, Data Availability.
http://www.eu-watch.org/data_availability
 AgCFSR & AgMERRA.
<https://data.giss.nasa.gov/impacts/agmipcf/>
 S14FD. <https://h08.nies.go.jp/s14/>

5.5 関連するデータ

高い精度の推定を行うには、気象データを高精度化するだけでは十分でなく、同時に使用される各種のデータやパラメータも高精度化する必要がある。それは多くの種類に及ぶが、農業気象分野の場合、土地被覆・土壌・地形・農作物の管理（作物種や農事暦など）などが含まれ、地域だけでなくグローバルなデータセットも構築されつつある（例えば RiceAtlas: Laborte *et al.*, 2017, DOI: 10.7910/DVN/JE6R2R）。ここでは、広域を比較的高い分解能でカバーするデータとして ECOCLIMAP を紹介する。このデータセットは、高分解能シミュレーションのため、衛星データを用いて関連パラメータをマップ化したものである。2003 年頃にリリースされたバージョン I では、NOAA/AVHRR による植生指数、土地被覆分類、気候帯、FAO による土壌マップを用いて、最高 1 km メッシュでの植被率、粗度長、アルベド、植生の長波射出率、最小気孔抵抗、葉面積指数を与えていた。2010 年頃にはバージョン II がリリースされ、まずヨーロッパやアフリカを対象に、MODIS および SPOT/VEGETATION の衛星データを加えることで高度化が図られている（Faroux *et al.*, 2013; Tchuente *et al.*, 2010）。

参考 URL

ECOCLIMAP.
<https://opensource.umr-cnrm.fr/projects/ecoclimap/wiki>

6. おわりに

6.1 気象データを用いる上での注意点

本稿では、現在利用可能な広域気象データの現状について紹介した。図 2 にデータセット間の関係を単純化して示した。ここで取り上げたものが全てではないにもかかわらず、多種類の気象データが存在することが理解していただけるだろう。冒頭に述べたように、広域気象データは農業だけでなく様々な分野で必要とされており、多くの努力がデータ開発に費やされた結果、近年は大幅に選択肢が増えている。それらの多くはインターネットから容易に入手可能であり、広域研究を促進する好材料といえる。しかし、本稿で何度か強調したように、提供されている気象データの特性を十分に知らないまま使用することは、好ましくなくいばかりか危険ですらある（例えば Grassini *et al.*, 2015）。特に注意すべき点をあげる。

○基礎データと信頼性：使用するのが日平均や月平均のメッシュ化された値であっても、そのソースをさかのぼると観測値に行き着く（図 2 参照）。それを 1 つ 1 つ確認することは現実的でないとしても、どういう種類の観測データを使用し、いかなる処理を経てデータが作成されたかを把握しておくことは意味がある（由来を知ること、情報を提供している観測への敬意も育まれるであろう）。別の見方をすれば、どの部分が実測でなく内挿などで推定された不確実性の大きい領域かを把握しておくことは有意義である。多くの気象データでは、数値データに加えて、使用した観測値やその分布、データ処理の情報を提供している。そして、観測密度の低い領域では詳細な解析に使用すべきでないとデータ開発者自らが注意を喚起している場合もある（例えば APHRODITE に関する谷田貝, 2016 など）。

○データの時空間分解能と代表性：広域気象データの空間分解能は、高いもので 1 km, 低いものでは 200 km 以上である。図 3 に示したのは、再解析データ、全球メッシュデータ、領域メッシュデータによる日本列島域の年平均気

図 2. 広域気象データの作成に関するデータの流れ

図 3. 日本列島域における気象データセット間の比較。1981～2010年の長期平均地表気温の例。(a) NCEP/NCAR 再解析, (b) CRU TS3.24, (c) 気象庁メッシュ年値 2010。格子は1度間隔。

温である。同じ気象要素についても、空間分解能が異なるデータセットの間で、領域を取り出した場合には大きな差が見られることが直感的に理解されるだろう。農作物を含む多くの生物現象には非線形な振る舞いがあり、例えばシンプルなモデルであっても、平均値を入力すれば平均的な出力が得られるとは限らない。特に地形や土地被覆の不均質性が高い場合、平均化された気象データをあてはめることは推定誤差の原因となりうる。グリッド（格子点）の値を抜き出した場合では、基となる広域データの分解能に対する注意がおろそかになりがちである。時間的にも、日平均や月平均の値には短時間の変動が含まれていないため、日射量など日変化する気象要因の影響や、極端な気象イベントを捉えることは難しいことに注意しなければならない。

○データ利用のルール：気象データの作成は観測のための多大な努力と高度な研究・技術開発の上に成り立つものであり、無償で配布されているデータであっても、無条件・無制限に使用して良いものではない。広域データは複数のソースから情報を取得して作成されるのが通例であり、それぞれのデータ利用条件など留意すべき事項は多々ある。戦時中のように気象データが機密情報として扱われたのは例外かもしれないが、社会全般でコンプライアンスやセ

キュリティへの意識が高まっている昨今、データ提供者が示している利用ポリシーを理解した上で使用すべきである。最近ではインターネットやスマートフォンアプリで、独自の分析による付加価値をつけた気象情報を有償で配信するサービスもあり、そのような場合は当然ながら配信元のポリシーに従うことになる。世界的に学術データのオープン化が進み、非営利目的では著作権・知的所有権の問題を生じさせずにデータ再利用を行うための基準（代表的にはクリエイティブ・コモンズ）が整備されつつある。そのような背景を踏まえつつ、研究不正を防止する上でも、自分が使用するデータの出自や属性を正しく把握しておくことの意義を強調しすぎることはない。

6.2 今後の課題

○長期データの作成：前節で述べたデータの限界とも共通するが、現在利用できる気象データの多くはせいぜい30年程度の期間しかカバーしておらず、産業革命以降の変化といった長期を見るには適していない。このような長期データは、過去から現在までの作物収量の変化や、農地からの温室効果ガス放出量の変化をシミュレートするといった目的で必要性が高まっている。20世紀初頭からの100年以上について気象データが試行的に作成された例もあるが、使用する観測データの質と量の変遷など残された技術的課題も多い。特に戦前には情報をデジタル形式で記録する手段そのものがなく、紙に直接記入せねばならなかった（天気図など現在でも手描きのデータは存在する）。その記録が大切に保管されていれば良いが、時間が経つほどに紙やインクは劣化して可読性が低下し、また記録紙そのものが処分・散逸・死蔵されることも多々あった。長期データは、樹木年輪や堆積物・氷床コアなど自然界に保存された記録（プロキシ）から得ることもできるが、往時の人物による観察・観測データも貴重な情報源である。そこで、現存する過去データをデジタル化して半永久的に保存する「データレスキュー」が課題となっている（Brunet and Jones, 2011; 財城, 2011）。これはカメラやスキャナで経時的劣化の心配がない画像ファイルに収め、数値を読み取るだけでなく、適切なメタデータ（データの帰属、種類や構成を専用の形式で記録したデータ）を付与して大量データの整理と解析を系統的行えるようにするところまでが含まれる。さらには、単位や有効数字などの整合性に関する品質チェック、必要があれば異常値の除去や補正までを行う場合もある。データレスキューは国際的な課題となっており、WMOでも専門のプロジェクト（DARE）が実施されているほどである。このような気象観測とは別に、衛星データのレスキューも課題に浮上している（Knapp *et al.*, 2007）。衛星観測データが長期間蓄積されていき、しかも近年のものほど高分解能でデータサイズが大型化していることから、過去の（大型磁気テープに保存されているような）衛星データが廃棄、あるいは読み出し不可になる場合がある。過去の衛星データといえども、長期の気象再解析を実施する場合に情報源として価値が見直される可能性があり、安易に廃棄して良いものではないだろう。失われれば復元不可能な一次データをどのように保存し、活用していくかを長期的な視点で考える必要がある。なお長期デー

タに関しては、観測ベースの過去データから気象モデルによる将来予測データへの接合や、ウェザージェネレータによる長期時系列の生成などの問題もあるが、本稿では紙幅の関係で扱わなかった。

○データリテラシーの向上：現在が情報化社会であり、それは産業だけでなく日常生活に及んでいることはあらためて述べるまでもない。データ収集と解析の手段が大幅に向上したことで、これまで利用できなかった大量のデータ（ビッグデータ）の活用が新たな課題となっている（松本, 2017）。農業分野でも、主に長年の経験に頼っていた作付けなどの管理をデータに裏付けされた科学的な手法に移行させ、効率化と高収益化を図るスマート農業を実現する方向性が提唱されて久しい。気象条件に出来が大きく左右される農業では、信頼度の高い気象データに基づいて予測を行うことで、リスク管理を行うことができる。また、各種のモニタリングデータを用いることで、環境負荷の少ないグリーン農業にも貢献することができる。そのためには、自治体・機関から個人までのあらゆるレベルで、データの利活用能力（リテラシー）を高めていく必要がある。気象データの利用側では、代表的なフォーマット形式とその取扱いに習熟し、広域・長期における大量のファイルを効率的に管理する方法を身につけることになるだろう（具体的な方法は目的や作業環境に依存するので本稿では割愛する）。データを作成し提供する側でも、以下のような点に留意していただくと（筆者を含め）利用者は助かるだろう。①データフォーマット：共通性の高いフォーマットの例として、プレーンテキスト形式、バイナリ形式、NetCDF形式があげられる。プレーンテキストやバイナリは、多くのプログラム言語やソフトウェアで容易に扱うことができる。NetCDF形式は、ワープロなどの汎用ソフトで扱うことは難しいが、比較的簡単にプログラム言語やGISソフトウェアで扱うことが可能である。NetCDF形式の利点として、ヘッダ情報をファイルに埋め込むことが可能なため、変数名、単位、欠値、座標などで迷うことが少ない。さらにNetCDF4形式はデータ圧縮に対応しているため、ディスクの節約にもなる。②メタデータ：数値ファイルだけでなく、その属性をまとめたメタデータはデータ管理を正確かつ効率的に行う上で重要性が増している。データセットに添付されたREADMEファイルやデータ配布サイトにフォーマット、変数の名称と定義、単位、座標系などの基礎情報や変更履歴が与えられているのは大きな助けとなる。この意味では、上記のNetCDF形式のようにヘッダに多くの情報を埋め込めるフォーマットは（その分ファイルサイズが増えるとしても）有利である。最近ではScientific DataやEarth System Science Dataなどのデータペーパー専門誌も刊行されており、そこで詳細な記述論文を出す方法もある。それでも、アップデートを柔軟に反映することは難しいので、やはりデータ本体に適切なメタデータが添付されていることが望ましい。関連事項として、各データにデジタルオブジェクト識別子（DOI）が付されていると、ネットを使った検索が非常に容易になり、データ利用者にとりデータ本体へのアクセスを向上する意味がある（本稿でも見当たったものにはDOIを付けた）。

デジタルの世界は日進月歩であり、本稿の内容もほとん

く古いものになってしまうだろうが、農業気象およびその周辺分野の方々がデータの海を乗り切る一助となれば幸いである。

謝 辞

本研究はJSPS科学研究費補助金（17H01867）および環境省・環境再生保全機構の環境研究総合推進費（2-1710）を用いて行われた。

略語一覧

AVHRR: Advanced Very High Resolution Radiometer
CFS(R): Climate Forecast System (Reanalysis)
CRU: Climate Research Unit
DARE: DATA REscue initiative
DOI: Digital Object Identifier
ECMWF: European Centre for Middle-range Weather Forecast
FAO: Food and Agriculture Organizations of the United Nations
GMAO: Global Modelling and Assimilation Office
GPM: Global Precipitation Measurement
GPV: Grid Point Value
GSMaP: Global Satellite Mapping of Precipitation
GSWP3: Global Soil Wetness Project 3rd phase
ICT: Internet Communication Technology
IODM: Indian Ocean Dipole Model
IoT: Internet of Things
JASMES: JAXa Satellite Monitoring of Environmental Studies
JASMIN: JAXa's Satellite based Monitoring Network system
JAXA: Japan Aerospace Exploration Agency
JRA: Japan ReAnalysis
MERRA: Modern-Era Retrospective analysis for Research and Application
MIP: Model Intercomparison Project
MODIS: MODerate resolution Imaging Spectroradiometer
NAO: North Atlantic Oscillation
NCAR: National Center for Atmospheric Research
NCDC: National Climate Data Center
NCEP: National Centers for Environmental Prediction
NOAA: National Oceanographic and Atmospheric Administrations
PDO: Pacific Decadal Oscillation
PDSI: Palmer Drought Severity Index
SPI: Standardized Precipitation Index
SRTM: Shuttle Radar Topography Mission
TOVS: TIROS Operational Vertical Sounder
TRMM: Tropical Rainfall Measuring Mission
WATCH: WATER and global CHnage
WFDEI: WATCH Forcing Data ERA Interim
WMO: World Meteorological Organization

引用文献

秋山侃, 1994: 衛星リモートセンシング技術の農業利用研究－広域的作物資源の分布と生育状態の定量的把握－. 生物環境調節 **32**, 145-154.
Beck HE, van Dijk AIJM, Levizzani V, Schellekens J, Miralles DG, Martens B, de Roo A, 2017: MSWEP: 3-hourly 0.25°

- global gridded precipitation (1979–2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data. *Hydrology and Earth System Sciences* **21**, 589–615. DOI: 10.5194/hess-21-589-2017.
- Bosilovich MG, Robertson FR, Chen J, 2011: Global energy and water budgets in MERRA. *Journal of Climate* **24**, 5721–5739. DOI: 10.1175/2011JCLI4175.1.
- Bosilovich MG, Robertson FR, Takacs L, Molod A, Mocko D, 2017: Atmospheric water balance and variability in the MERRA-2 reanalysis. *Journal of Climate* **30**, 1177–1196. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0338.1.
- Brunet M, Jones P, 2011: Data rescue initiatives: bringing historical climate data into the 21st century. *Climate Research* **47**, 29–40. DOI: 10.3354/cr00960.
- Compo GP, Whitaker JS, Sardeshmukh PD, Matsui N, Allan RJ, Yin X, Gleason BEJ, Vose RS, Rutledge G, Bessemoulin P, Brönnimann S, Brunet M, Crouthamel RI, Grant AN, Groisman PY, Jones PD, Kruk MC, Kruger AC, Marshall GJ, Maugeri M, Mok HY, Nordli Ø, Ross TF, Trigo RM, Wang XL, Woodruff SD, Worley SJ, 2011: The Twentieth Century Reanalysis Project. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **137**, 1–28. DOI: 10.1002/qj.776.
- Dai A, Trenberth KE, Qian T, 2004: A global dataset of Palmer drought severity index for 1870–2002: relationship with soil moisture and effects of surface warming. *Journal of Hydrometeorology* **5**, 1117–1130.
- Dee DP, Uppala SM, Simmons AJ, Berrisford P, Poli P, Kobayashi S, Andrae U, Balmaseda MA, Balsamo G, Bauer B, Bechtold P, Beljaars ACM, van de Berg L, Bidlot J, Bormann N, Delsol C, Dragani R, Fuentes M, Geer AJ, Haimberger L, Healy SB, Hersbach H, Hólm EV, Isaksen L, Kållberg P, Köhler M, Matricardi M, McNally AP, Monge-Sanz BM, Morcrette J-J, Park B-K, Peubey C, de Rosnay P, Tavolato C, Thépaut J-N, Vitart F, 2011: The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **137**, 553–597. DOI: 10.1002/qj.828.
- Faroux S, Tchuente ATK, Roujean J-L, Masson V, Martin E, Le Moigne P, 2013: ECOCLIMAP-II/Europe: a twofold database of ecosystems and surface parameters at 1 km resolution based on satellite information for use in land surface, meteorological and climate models. *Geoscientific Model Development* **6**, 563–582. DOI: 10.5194/gmd-6-563-2013.
- Fick SE, Hijmans RJ, 2017: WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* **27**, 4302–4315. DOI: 10.1002/joc.5086.
- 福田信二・マニトン チャンソム, 2008: ラオス中山間地における複合農業システムのフィージビリティ調査. 農業農村工学会誌 **76**, 635–636.
- 古畑昌巳・原嘉隆, 2013: アレニウス式とアメダス気象データを利用した北陸地方における湛水直播栽培の播種早限の推定. 日本作物学会紀事 **82**, 402–406.
- Gelaro R, McCarty W, Suárez MJ, Todling R, Molod A, Takacs L, Randles CA, Darmenov A, Bosilovich MG, Reichle R, Wargan K, Coy L, Cullather R, Draper C, Akella S, Buchard V, Conaty A, da Silva AM, Gu W, Kim G-K, Koster R, Lucchesi R, Merkova D, Nielsen JE, Partyka G, Pawson S, Putman W, Rienecker M, Schubert SD, Sienkiewicz M, Zhao B, 2017: The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2). *Journal of Climate* **30**, 5419–5454. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0758.1.
- Gibson JK, Kållberg P, Uppala S, Hernandez A, Nomura A, Serrano E, 1997: ECMWF Reanalysis Project Report Series. 1. ERA description. ECMWF, pp. 72.
- Grassini P, van Bussel LGJ, Van Wart J, Wolf J, Claessens L, Yang H, Boogaard H, de Groot H, van Ittersum MK, Cassman KG, 2015: How good is good enough? Data requirements for reliable crop yield simulations and yield-gap analysis. *Field Crops Research* **177**, 49–63. DOI: 10.1016/j.fcr.2015.03.004.
- Harada Y, Kamahori H, Kobayashi C, Endo H, Kobayashi S, Ota Y, Onoda H, Onogi K, Miyaoka K, Takahashi K, 2016: The JRA-55 Reanalysis: Representation of atmospheric circulation and climate variability. *Journal of the Meteorological Society of Japan* **94**, 269–302. DOI: 10.2151/jmsj.2016-015.
- Harris I, Jones PD, Osborn TJ, Lister DH, 2014: Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset. *International Journal of Climatology* **34**, 623–642. DOI: 10.1002/joc.3711.
- 林義晃・手計太一・山崎惟義, 2017: 我が国の地上雨量観測所における観測体制と蓄積データの時空間特性に関する研究. 水文・水資源学会誌 **30**, 43–53.
- Hijmans RJ, Cameron SE, Parra JL, Jones PG, Jarvis A, 2005: Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* **25**, 1965–1978.
- Hirabayashi Y, Kanae S, Motoya K, Masuda K, Döll P, 2008: A 59-year (1948–2006) global near-surface meteorological data set for land surface models. Part I: Development of daily forcing and assessment of precipitation intensity. *Hydrological Research Letters* **2**, 36–40. DOI: 10.3178/HRL.2.9.
- 広田知良・山崎太地・安井美裕・古川準三・丹羽勝久・根本学・濱寄孝弘・下田星児・菅野洋光・西尾善太, 2017: 気候変動による北海道におけるワイン生産地の確立－1998年以降のピノ・ノワールへの正の影響－. 生物と気象 **17**, 34–45. DOI: 10.2480/cib.J-17-034.
- Huffman GJ, Adler RF, Arkin P, Chang A, Ferraro R, Gruber A, Janowiak J, McNab A, Rudolf B, Schneider U, 1997: The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) combined precipitation dataset. *Bulletin of the American Meteorological Society* **78**, 5–20.
- Huntzinger DN, Schwalm C, Michalak AM, Schaefer K, King AW, Wei Y, Jacobson A, Liu S, Cook RB, Post WM, Berthier G, Hayes D, Huang M, Ito A, Lei H, Lu C, Mao J, Peng CH, Peng S, Poulter B, Ricciuto D, Shi X, Tian H, Wang W, Zeng N, Zhao F, Zhu Q, 2013: The North American Carbon Program Multi-scale Synthesis and Terrestrial Model Intercomparison Project: Part 1: Overview and experimental design. *Geoscientific Model Development* **6**, 2121–2133. DOI: 10.5194/gmd-6-2121-2013.

- 飯泉仁之直, 2017: 全球気象外力データセット. 関東の農業気象 **43**, 3-8.
- Iizumi T, Luo J-J, Challinor AJ, Sakurai G, Yokozawa M, Sakuma H, Brown ME, Yamagata T, 2014a: Impacts of El Niño Southern Oscillation on the global yields of major crops. *Nature Communications* **5**. DOI: 10.1038/ncomms4712.
- 飯泉仁之直・西森基貴・石郷岡康史・横沢正幸, 2010: 統計的ダウンスケーリングによる気候変化シナリオ作成入門. 農業気象 **66**, 131-143.
- Iizumi T, Okada M, Yokozawa M, 2014b: A meteorological forcing data set for global crop modeling: Development, evaluation, and intercomparison. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere* **119**, 363-384. DOI: 10.1002/2013JD020130.
- Iizumi T, Takikawa H, Hirabayashi Y, Hanasaki N, Nishimori M, 2017: Contributions of different bias-correction methods and reference meteorological forcing data sets to uncertainty in projected temperature and precipitation extremes. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere* **122**, 7800-7819. DOI: 10.1002/2017JD026613.
- 稲津将・佐藤友徳, 2010: 1. 大は小を兼ねるのか: ダウンスケーリング. 天気 **57**, 196-199.
- 井上吉雄, 2016: 食料安全保障と農業生産の情報化に向けた先進リモートセンシング技術. 計測と制御 **55**, 747-749.
- Ito A, Oikawa T, 2000: A model analysis of the relationship between climate perturbations and carbon budget anomalies in global terrestrial ecosystems: 1970-1997. *Climate Research* **15**, 161-183.
- Ito A, Nishina K, Reyer CPO, François L, Henrot A-J, Munhoven G, Jacquemin I, Tian H, Yang J, Pan S, Morfopoulos C, Betts R, Hickler T, Steinkamp J, Ostberg S, Schaphoff S, Ciais P, Chang J, Rafique R, Zeng F, Zhao F, 2017: Photosynthetic productivity and its efficiencies in ISIMIP2a biome models: benchmarking for impact assessment studies. *Environmental Research Letters* **12**, 085001. DOI: 10.1088/1748-9326/aa7a19.
- Jarvis C, Darbyshire R, Eckard R, Goodwin I, Barlow E, 2018: Influence of El Niño-Southern Oscillation and the Indian Ocean Dipole on winegrape maturity in Australia. *Agricultural and Forest Meteorology* **248**, 502-510. DOI: 10.1016/j.agrformet.2017.10.021.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, Collins W, Deaven D, Gandin L, Iredell M, Saha S, White G, Woollen J, Zhu Y, Chelliah M, Ebisuzaki W, Higgins W, Janowiak J, Mo KC, Ropelewski C, Wang J, Leetmaa A, Reynolds R, Jenne R, Joseph D, 1996: The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society* **77**, 437-471.
- Kamiguchi K, Arakawa O, Kitoh A, Yatagai A, Hamada A, Yasutomi N, 2010: Development of APHRO_JP, the first Japanese high-resolution daily precipitation product for more than 100 years. *Hydrological Research Letters* **4**, 60-64. DOI: 10.3178/HRL.4.60.
- Kanamitsu M, Ebisuzaki W, Woollen J, Yang S-K, Hnilo JJ, Fiorino M, Potter GL, 2002: NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (R-2). *Bulletin of the American Meteorological Society* **83**, 1631-1643.
- 菅野洋光, 1997: ヤマセ吹走時におけるメッシュ日平均気温の推定. 農業気象 **53**, 11-19.
- 加藤知道, 2013: データ同化と陸域生物圏モデル. 生物と気象 **13**, 1-17.
- Kayaba N, Yamada T, Hayashi S, Onogi K, Kobayashi S, Yoshimoto K, Kamiguchi K, Yamashita K, 2016: Dynamical regional downscaling using the JRA-55 reanalysis (DSJRA-55). *SOLA* **12**, 1-5. DOI: 10.2151/sola.2016-001.
- 北村修, 1990: 気候値メッシュファイルの作成と応用. 地学雑誌 **99**, 56-63.
- Knapp KR, Bates JJ, Barkstrom B, 2007: Scientific data stewardship: Lessons learned from a satellite-data rescue effort. *Bulletin of the American Meteorological Society* **88**, 1359-1361. DOI: 10.1175/BAMS-88-9-1359.
- Kobayashi S, Ota Y, Harada H, Ebata A, Moriya M, Onoda H, Onogi K, Kamahori H, Kobayashi C, Endo H, Miyaoka K, Takahashi K, 2015: The JRA-55 reanalysis: General specification and basic characteristics. *Journal of the Meteorological Society of Japan* **93**, 5-48. DOI: 10.2151/jmsj.2015-001.
- 小池聡・島村博・森川博之, 2015: データに基づく農業の知識産業化—スマートサプライチェーンによる高付加価値ブランド実現に向けて—. 人工知能 **30**, 193-198.
- 近藤純正 (編著), 1995: 水環境の気象学. 朝倉書店, 東京, 348pp.
- 久米篤, 2014: 植生のリモートセンシング. 日本生態学会誌 **64**, 201-204.
- Laborte AG, Gutierrez MA, Balanza JG, Saito K, Zwart SJ, Bischetti M, Murty MVR, Villano L, Aunario JK, Reinke R, Koo J, Hijmans RJ, Nelson A, 2017: RiceAtlas, a spatial database of global rice calendars and production. *Scientific Data* **4**, 170074. DOI: 10.1038/sdata.2017.74.
- Leemans R, Cramer WP, 1991: The IIASA database for mean monthly values of temperature, precipitation and cloudiness of a global terrestrial grid. IIASA, Laxenburg.
- Legates DR, Willmott CJ, 1990: Mean seasonal and spatial variability in gauge-corrected, global precipitation. *International Journal of Climatology* **10**, 111-127.
- Liu YY, Dorigo WA, Parinussa RM, de Jeu RAM, Wagner W, McCabe MF, Evans JP, van Dijk AIJM, 2012: Trend-preserving blending of passive and active microwave soil moisture retrievals. *Remote Sensing of Environment* **123**, 280-297. DOI: 10.1016/j.rse.2012.03.014.
- 松本康志, 2017: 気象情報が高度に活用される社会を目指して. 情報管理 **60**, 79-88.
- Mitchell TD, Jones PD, 2005: An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *International Journal of Climatology* **25**, 693-712.
- 溝口勝・伊藤哲, 2015: 農業・農村を変えるフィールドモニタリング技術. 農業農村工学会誌 **83**, 93-96.
- Mueller ND, Gerber JS, Johnston M, Ray DK, Ramankutty N, Foley JA, 2012: Closing yield gaps through nutrient and

- water management. *Nature* **490**, 254–257. DOI: 10.1038/nature11420.
- 中井専人・横山宏太郎, 2009: 降水量計の捕捉損失補正の重要性－測器メタデータ整備の必要性－. *天気* **56**, 11–16.
- 中野聡史・大野宏之・島田信二, 2017: 発育予測モデルとメッシュ気象データを利用したダイズの乾燥ストレス発生リスクの広域評価. *生物と気象* **17**, 55–63. DOI: 10.2480/cib.J-17-035.
- Ngo-Duc T, Polcher J, Laval K, 2005: A 53-year forcing data set for land surface models. *Journal of Geophysical Research* **110**, D06116. DOI:10.1029/2004JD005434.
- 農業環境変動研究センター（大野宏之・佐々木華織）, 2017: メッシュ農業気象データ利用マニュアル（2017年版）.
- 岡本謙一・重尚一, 2008: 熱帯降雨観測衛星搭載レーダの研究開発とその観測成果. *電子情報通信学会論文誌 J91-B*, 723–733.
- 大野宏之・佐々木華織・大原源二・中園江, 2016: 実況値と数値予報, 平年値を組み合わせたメッシュ気温・降水量データの作成. *生物と気象* **16**, 71–79. DOI: 10.2480/cib.J-16-028.
- 大野木和敏, 2007: 長期再解析 JRA-25. *天気* **54**, 773–776.
- Onogi K, Tsutsui J, Koide H, Sakamoto M, Kobayashi S, Hatsushika H, Matsumoto T, Yamazaki N, Kamahori H, Takahashi K, Kadokura S, Wada K, Kato K, Oyama R, Ose T, Mannoji N, Taira R, 2007: The JRA-25 Reanalysis. *Journal of the Meteorological Society of Japan* **85**, 369–432.
- 大久保さゆり・菅野洋光・小林隆, 2015: 高解像度気象データを用いた東北地方におけるイネ葉いもち発生予測モデル（BLASTAM）の検証. *天気* **62**, 5–15.
- 大塚彰・永吉恵一, 2015: ミカンコバエ種群 *Bactrocera dorsalis* Complex Hendel (Diptera: Tephritidae) 飛来解析システム. *農業情報研究* **24**, 23–34.
- 大吉慶・小林和史・武藤太郎・奥村俊夫・祖父江真一・金子豊, 2016: アジア水稲作況作成のための農業気象提供システムの構築. *写真測量とリモートセンシング* **55**, 200–205.
- Polì P, Hersbach H, Dee DP, 2016: ERA-20C: An atmospheric reanalysis of the twentieth century. *Journal of Climate* **29**, 4083–4097. DOI: 10.1175/JCLI-D-15-0556.1.
- Reichle RH, Koster RD, De Lannoy GJM, Forman BA, Liu Q, Mahanama SPP, Touré A, 2011: Assessment and enhancement of MERRA land surface hydrology estimates. *Journal of Climate* **24**, 6322–6338. DOI: 10.1175/JCLI-D-10-05033.1.
- Rienecker MM, Suarez MJ, Gelaro R, Todling R, Bacmeister J, Liu E, Bosilovich MG, Schubert SD, Takacs L, Kim G-K, Bloom S, Chen J, Collins D, Conaty A, da Silva A, Gu W, Joiner J, Koster RD, Lucchesi R, Molod A, Owens T, Pawson S, Pegion P, Redder CR, Reichle R, Robertson FR, Ruddick AG, Sienkiewicz M, Woollen J, 2011: MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications. *Journal of Climate* **24**, 3624–3648. DOI: 10.1175/JCLI-D-11-00015.1.
- Ruane AC, Goldberg R, Chrysanthacopoulos J, 2015: Climate forcing datasets for agricultural modeling: Merged products for gap-filling and historical climate series estimation. *Agricultural and Forest Meteorology* **200**, 233–248. DOI: 10.1016/j.agrformet.2014.09.016.
- Saha S, Moorthi S, Pan H-L, Wu X, Wang J, Nadiga S, Tripp P, Kistler R, Woollen J, Behringer D, Liu H, Stokes D, Grumbine R, Gayno G, Wang J, Hou Y-T, Chuang H, Juang H-MH, Sela J, Iredell M, Treadon R, Kleist D, Van Delst P, Keyser D, Derber J, Ek M, Meng J, Wei H, Yang R, Lord S, van den Dool H, Kumar A, Wang W, Long C, Chelliah M, Xue Y, Huang B, Schemm J-K, Ebisuzaki W, Lin R, Xie P, Chen M, Zhou S, Higgins W, Zou C-Z, Liu Q, Chen Y, Han Y, Cucurull L, Reynolds RW, Rutledge G, Goldberg M, 2010: The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society* **91**, 1015–1057. DOI: 10.1175/2010BAMS3001.1.
- Saha S, Moorthi S, Wu X, Wang J, Nadiga S, Tripp P, Behringer D, Hou Y-T, Chuang H-Y, Mendez MP, van den Dool H, Zhang Q, Wang W, Chen M, Becker E, 2014: The NCEP Climate Forecast System Version 2. *Journal of Climate* **27**, 2186–2208. DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00823.1.
- Saha S, Nadiga S, Thiaw C, Wang J, Wang W, Zhang Q, van den Dool HM, Pan H-L, Moorthi S, Behringer D, Stokes D, Peña M, Lord S, White G, Ebisuzaki W, Peng P, Xie P, 2006: The NCEP Climate Forecast System. *Journal of Climate* **19**, 3483–3517.
- 齋藤元也・小川茂男・榎原大悟・浅沼修一, 2015: ケニアにおける畑地利用による米増産の可能性. *畑地農業* **676**, 9–22.
- Salmon JM, Friedl MA, Froking S, Wisser D, Douglas EM, 2015: Global rain-fed, irrigated, and paddy croplands: A new high resolution map derived from remote sensing, crop inventories and climate data. *International Journal for Applied Earth Observation and Geoinformation* **38**, 321–334. DOI: 10.1016/j.jag.2015.01.014.
- Schneider U, Finger P, Meyer-Christoffer A, Rustemeier E, Ziese M, Becker A, 2017: Evaluating the hydrological cycle over land using the newly-corrected precipitation climatology from the Global Precipitation Climatology Centre (GPCC). *Atmosphere* **8**. DOI: 10.3390/atmos8030052.
- 清野豁, 1993: アメダスデータのメッシュ化について. *農業気象* **48**, 379–383.
- Sheffield J, Goteti G, Wood EF, 2006: Development of a 50-year high-resolution global dataset of meteorological forcings for land surface modeling. *Journal of Climate* **19**, 3088–3111.
- Sun Q, Miao C, Duan Q, Ashouri H, Sorooshian S, Hsu K-L, 2018: A review of global precipitation data sets: Data sources, estimation, and intercomparisons. *Reviews of Geophysics* **56**. DOI: 10.1002/2017RG000574.
- 高藪出・金光正郎, 2010: 力学的ダウンスケーリングのレビュー. *天気* **57**, 435–447.
- 谷宏・堀口郁夫・元木敏博, 1984: 農業気象における人工衛星データの利用に関する研究－GMS（ひまわり）赤

- 外データによる地表面温度と AMeDAS 気温の関係 - 農業気象 **40**, 111-117.
- Tchuente ATK, Roujean J-L, Faroux S, 2010: ECOCLIMAP-II: An ecosystem classification and land surface parameters database of Western Africa at 1 km resolution for the African Monsoon Multidisciplinary Analysis (AMMA) project. *Remote Sensing of Environment* **114**, 961-976. DOI: 10.1016/j.rse.2009.12.008.
- 峠嘉哉・田中賢治・小尻利治・浜口俊雄, 2013: 集水域の灌漑地拡大の影響を考慮した水・熱収支解析によるアラル海の経年的縮小の再現. 環境科学会誌 **26**, 180-190.
- 内川修・福島裕助・松江勇次, 2003: 北部九州におけるダイズの収量と気象条件の関係. 日本作物学会紀事 **72**, 203-209.
- Uppala SM, Kållberg PW, Simmons AJ, Andrae U, da Costa Bechtold V, Fiorino M, Gibson JK, Haseler J, Hernandez A, Kelly GA, Li X, Onogi K, Saarinen S, Sokka N, Allan RP, Andersson E, Arpe K, Balmaseda MA, Beljaars ACM, van de Berg L, Bidlot J, Bormann N, Caires S, Chevallier F, Dethof A, Dragosavac M, Fisher M, Fuentes M, Hagemann S, Hólm E, Hoskins BJ, Isaksen I, Janssen PAEM, Jenne R, McNally AP, Mahfouf J-F, Moncette J-J, Rayner NA, Saunders RW, Simon P, Sterl A, Trenberth KE, Untch A, Vasiljevic D, Viterbo P, Woollen J, 2005: The ERA-40 re-analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **131**, 2961-3012.
- Vega GC, Pertierra LR, Olalla-Tárraga MÁ, 2017: MERRAclim, a high-resolution global dataset of remotely sensed bioclimatic variables for ecological modelling. *Scientific Data* **4**. DOI: 10.1038/sdata.2017.78.
- 脇山恭行・井上君夫・中園江, 2003: 水稻の登熟期における衛星データおよびアメダスデータを用いた収量予測法. 農業気象 **59**, 277-286.
- Weedon GP, Balsamo G, Bellouin N, Gomes S, Best MJ, Viterbo P, 2014: The WFDEI meteorological forcing data set: WATCH Forcing Data methodology applied to ERA-interim reanalysis data. *Water Resources Research* **50**, 7505-7514. DOI: 10.1002/2014WR015638
- Weedon GP, Gomes S, Viterbo P, Shuttleworth WJ, Blyth E, Österle H, Adam JC, Bellouin N, Boucher O, Best M, 2011: Creation of the WATCH forcing data and its use to assess global and regional reference crop evaporation over land during the twentieth century. *Journal of Hydrometeorology* **12**, 823-848. DOI: 10.1175/2011JHM1369.1
- Whitaker JS, Compo GP, Wei X, Hamill TM, 2004: Reanalysis without radiosondes using ensemble data assimilation. *Monthly Weather Review* **132**, 1190-1200.
- World Meteorological Organization (WMO) and Global Water Partnership (GWP), 2016: Handbook of Drought Indicators and Indices. WMO-No. 1173, Geneva.
- Xie P, Arkin PA, 1997: Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs. *Bulletin of the American Meteorological Society* **78**, 2539-2558.
- 山根正博・国分牧衛, 2016: 東北地方におけるダイズ収量の年次・地域間変動と気象要因との関係. 日本作物学会紀事 **85**, 198-203.
- 谷田貝亜紀代, 2016: 国際賞を受賞して. 水文・水資源学会誌 **29**, 15-21.
- Yatagai A, Kamiguchi K, Arakawa O, Hamada A, Yasutomi N, Kitoh A, 2012: APHRODITE: Constructing a long-term daily gridded precipitation dataset for Asia based on a dense network of rain gauges. *Bulletin of the American Meteorological Society* **93**, 1401-1415. DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00122.1.
- 財城真寿美, 2011: データレスキュー. 天気 **58**, 75-77.