

# 寒冷環境における環境評価の高度化と作物光合成ダイナミクスに関する研究

村上貴一

(農研機構北海道農業研究センター)

## 1. はじめに

このたびは、伝統ある日本農業気象学会奨励賞を賜り、大変光栄に存じます。ご推薦くださった高木健太郎氏、下田星児氏をはじめ、審査委員会の皆様に厚く御礼申し上げます。受賞対象となった研究は、北海道農業研究センター(北農研)での任期付研究員として1年目に取り組んだ、冬の北海道の農業気象に関する方向性の大きく異なる2つのものです。本稿では、これらの研究の概要と論文には記載されなかったいくつかの事柄、そして自分にとっての意味などについて雑駁に紹介いたします。

## 2. 地理情報等を入力とした機械学習による低温補正

地表が一面の雪に覆われる厳寒の冬季北海道では、農業の気配は一見感じられない。しかし、冬の気象は農業に確実に影響を及ぼす。たとえば冬季の低温は、掘り残された地中のパレイショを凍死させることで翌年の雑草化を抑制する(Hirota *et al.*, 2006)、極端な場合には雪下越冬性の多年草本類や樹木の生存率を低下させる(酒井, 1982 など)、などの多面的な作用を持つ。このような知見を一般化して情報システムとして広く適用する場合、低温の空間分布を正確に推定する技術が求められるが、日最低気温が観測される早朝には夜間の放射冷却により冷えた空気塊が地形と風に応じて移動することから、その空間分布の予測は難しい。

農研機構が開発・運営するメッシュ農業気象データシステム(メッシュシステム)では、空間分解能およそ1 km で国内任意地点における各種気象データが配信されている(大野ら, 2016)。このシステムはアメダス地点で観測された気象データの空間内挿値を計算に利用している。上述のように低温は局所性を持って分布することから空間補間に基づくメッシュシステムの日最低気温の推定精度には検証の余地がある。そこで、道内各地で実測された日最低気温データを用い、メッシュシステムでの推定精度を検証すること、メッシュシステム推定値を補正する手法を検討すること、の2点を目的とした解析を実施した(Murakami *et al.*, 2020)。

日最低気温の実測値として、日本気象協会および株式会社アグリウェザーが運営する気象観測システムおよび生産者圃場で自然通風された温度計により観測された10–3月の値を利用した。実測値との比較検証の結果、メッシュシステムによる日最

低気温の推定値は概ね正確であった。ただし、一部の観測地点では、RMSEが1 °C以上となるような明らかな系統誤差があり、この誤差は日平均風速が小さい場合に大きくなったことから、冷気の滞留の関与が示唆された。メッシュシステムによる推定値を補正するため、該地点におけるメッシュシステムの各種気象要素推定値、上空の気象情報、観測地点周辺の地理情報(標高・土地利用)を入力として学習し、実測値とメッシュシステム推定値の偏差を計算する機械学習モデルを構築した。地理情報を入力する範囲、すなわち視野を、数段階設けたモデルと比較したところ、視野を30 km未満としたモデルの方がより正確に補正値を算出することが分かった。冬季北海道の低温分布はローカルに生起することが確認され、予測の困難さが強調された。今回の解析では標高データを利用しているが、圃場単位のようなさらに細かいスケールを対象とする場合には雪面の凹凸やその時間変化を考慮する必要があり、衛星データが必須になるだろう。なお、冷気の蓄積を地形から予測することで日最低気温を推定したKimura *et al.*, (2023)は、複雑地形を対象とする場合の地形に関する最適な視野は80 mであると提案しており、より視野を狭めた解析の必要性を示唆する。

この研究では、全てのデータを自分で取る必要はない、という感覚を持てるようになったことが自分にとって非常に大きい。これまでの研究ではデータといえば、植物のサンプリングデータやガス交換データ、チャンバ内の気温、相対湿度、光、CO<sub>2</sub>濃度など、csvに収まるせいぜいMBオーダーのものであり、基本的にはすべてを自分で取るスタイルだった。自然と管理が行き届く植物個体とその周辺10 cm程度までに意識の範囲が制限されていたように思う。プログラミングに親しんでいたことが幸いし、ファイル形式も配信方法も多様な大規模データを簡単に扱える、ということに認識したため以降の選択肢が広がった。ただし同時に、手に入るデータをナイーブに使うと痛い目を見ることになる、ということも意識するようになった。当然かもしれないが、まずは可能な限り測器と周辺の様子を見ること、そして生データを可視化することだろう。このあたりは北農研羊ヶ丘拠点の気象観測露場のクオリティチェックを丁寧に行っていた所属グループの文化が活かされ、どつぼにはまらずに済んだ。

## 3. 寒締め栽培条件下での葉の光合成動態

北関東以北での冬季特有の葉菜類栽培として普及している寒締め栽培という技術がある。寒締め栽培では、葉菜類を秋に播種して出荷可能なサイズまで生長させ、冬には外気を施設内に取り込み施設内気温を低下させる。低温暴露により個体の生長は停止し、糖度・ビタミン類といった有用成分の濃度が高まる。

<https://agrmet.jp/wp-content/uploads/2023-H-3.pdf>

2023年9月13日 受付

Copyright 2023, The Society of Agricultural Meteorology of Japan

葉が縮れて締まった外観となるため、寒さで締める、ということで「寒締め」と名付けられた。技術の開発経緯と普及については小沢 (2022) に詳しい。

寒締め中の糖度の上昇のメカニズムは十分に理解されているとは言えない。細胞の浸透圧を高めて耐凍性を向上するべく糖濃度が高められている、と説明される場合があるが、これは why であって how ではない。低温とはいえ呼吸による損耗があるため、何らかのインプットがない限り個体に蓄積された糖の総量は漸減する。低温により根の給水が抑制されることが高糖度化のトリガーとなっており、糖が濃縮されることが糖度上昇に寄与するものの、それだけでは糖度の上昇を十分にできないことが知られていた (岡田ら, 2005 など)。この糖度上昇は光合成産物に由来するものだろうという予想から、札幌の無加温温室で寒締め期間中のホウレンソウの光合成の日動態を測定した (Murakami *et al.*, 2021)。

測定を始める夜明けごろには温室内の葉は凍っており、融解後しばらくはいかにも軟弱な外観となる。しかし凍っていた葉も、晴天日の日中には個葉の葉面積あたりの純光合成速度で  $30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  に近い高い値を示した。この値は特殊な条件にない植物 (たとえば温室のトマト、圃場のコムギなど) の好適環境条件のもとでの値と同水準である。活発な光合成の結果として、密閉されがちな温室内の  $\text{CO}_2$  濃度は大気濃度の半分 ( $200 \mu\text{mol mol}^{-1}$ ) 以下まで低下し、日中の温室内の光合成は  $\text{CO}_2$  濃度に律速されていることが明らかとなった。種を明かせば、温室内環境の実際は「寒締め」の文字から想起されるものとは大きく異なる。温室内の日平均気温はおよそ  $0^\circ\text{C}$  ではあり、外気が  $-20^\circ\text{C}$  近くまで冷えた早朝にはダウンジャケットを着て温室に向かうが、日射により暖められた日中の温室内ではシャツ1枚でも汗をかくほどで、 $30^\circ\text{C}$  以上で開くよう閾値設定された側窓が開くこともあった。すなわち、日中の瞬時の環境だけで見れば温室内はさほど特殊な環境ではなく、施設内の環境調節の考え方と光合成の環境応答が素直に成立している。とはいえ、 $30^\circ\text{C}$  を優に超える日較差や葉が凍結融解を繰り返すダイナミックな条件のもとでも、寒締め葉菜類が「普通の環境にある植物」と同水準の光合成機能を維持していることは注目に値するだろう。

この研究は現象観察的なアプローチのものであり、糖度上昇の原因は光合成であるという仮説を支持する状況証拠を得ているが証明はしていない。直接この仮説を検証するシンプルな実験は、 $\text{CO}_2$  施用を行って光合成を促進した場合に糖度が上昇するのかを明らかにすることだろう。 $\text{CO}_2$  施用は施設園芸では広く普及している技術であり、寒締め栽培への実用技術としての導入も比較的容易だと推察される。ただし、寒締め栽培は大規模化や販売チャンネルの拡大には適さない側面があり、コストをかけて施設を高度化・大規模化していくよりは、側窓換気の適正化による温室内  $\text{CO}_2$  濃度の上昇のようなパッシブな環境調節に留めるのが現実的な戦略なのかもしれない。

#### 4. おわりに

これらの研究を含め、北農研にポストを得てから発表した原著論文はいずれも相互引用がなく、「寒地の農業気象」というゆ

るい括りで繋がるのみの独立した研究になっています。それぞれが何か一定のゴールに辿り着いたわけではなく、まとまりのない研究になっている点が強く反省されるところです。自分のこれまでを振り返ると、学位を取る、ポストを得る、という風に短期的な目的を見据えて研究をしてきました。時限を定められた条件では、既にあるデータとモデルを使うアプローチは強力で、とくに最近はモデル研究に意識が偏りがちになっていることを自覚しています。しかし、最近の AutoML 系フレームワークや大規模言語モデルの進展速度を見てみると、このスタイルは長続きしないことが予想できます。整然化されたデータセットさえ与えれば、それなりのモデルが自動的に返ってくる SF のような未来がそう遠くないような気がしますし、テーブルデータを対象とするものを中心に一部は既にも実現されています。とにかくよく当たるモデルが欲しいというだけであれば、データセットを解析コンペティションに公開して、データサイエンスに特化した者に委ねる方が合理的かもしれません。そうなってくると農業系の研究者にとって重要度が高まるのは、1) 既存の知見の内挿ではなく新事象の発見に資する研究を計画すること、2) 自動化がスケールしない現場で身体を動かして質の高い一次データを取り、モデルが解釈できる形式にデータを整えること、3) 得られたモデルと結果からメカニスティックなコンセプトを抽出し、理解できる解釈を与えること、などでしょうか。最大でも残り 30 年ほどの研究者としての寿命のなか、これからも大きな変化がありそうではありますが、腰を据えてオリジナリティのある骨太なデータを取ることを優先したいと思います。

#### 謝辞

北海道での研究を推進するにあたりご指導をくださった北農研寒地気候変動グループ (現 環境病害虫グループ) の皆様と共著者の皆様に厚く御礼申し上げます。ほとんど別分野の出自の自分が研究できているのは皆様からの厚いサポートがあったことだと感じています。とくに広田知良氏 (現 九州大学教授) には、様々な現場やコミュニティを経験する機会をいただきました。北海道も農業も不慣れな自分がこの環境・文化に順応して研究を進めるうえで、貴重な資産となっています。また、研究実施を広範かつ柔軟に支援くださった北農研の成田優司、三國孝博、山崎 真、牛島 慶、小峯成子、佐藤睦美の各氏に深く感謝申し上げます。皆様のお蔭でどうにか実験を続けられています。個別の論文内の謝辞にある通り、上に挙げた方々以外にも多くの方にご助力いただきました。心より御礼を申し上げます。

学生時代から現所属に着くまでも多くの先生方、先輩諸氏に支えられてきました。富士原和宏先生 (東京大学教授) と松田怜先生 (同准教授) には、生物環境工学研究室に卒論生として配属されて以来、数えきれないほどのご指導・鞭撻を戴きました。環境研での日々が自分の大きな部分を占めていることを折に触れて感じます。荊木康臣先生 (山口大学教授) には学位取得後に特別研究員として研究室に受け入れていただきました。任期中の留学や任期半ばでの農研機構への就職などの身勝手な手をむしる暖かく応援していただき、研究内容については厳しく的確なコメントを多数頂戴しました。上記 3 名の先生がた

には格別の謝意を表します。

### 引用文献

- Hirota T, Iwata Y, Hayashi M, Suzuki S, Hamasaki T, Sameshima R, Takayabu I, 2006: Decreasing Soil-Frost Depth and Its Relation to Climate Change in Tokachi, Hokkaido, Japan. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II* **84**, 821–833.
- Kimura K, Maruyama A, Sasaki K, Kudo K, Tanaka E, Fushimi E, Nakagawa H, 2023: Fine-scale mapping of daily minimum temperature in a cropland with complex terrains through the combination of a cold flow accumulation model with inversion strength. *Agricultural and Forest Meteorology* **329**, 109247
- Murakami K, Hirota T, Shimoda S, Yazaki T, 2020: Bias correction for spatially interpolated daily mean air temperature during winter in eastern Hokkaido using multimodal machine learning. *Journal of Agricultural Meteorology* **76**, 164–170.
- Murakami K, Hamasaki T, Nemoto M, Inoue S, Hirota T, 2021: Photosynthetic and respiratory activities of spinach in an unheated greenhouse during winter in Sapporo, Japan. *Journal of Agricultural Meteorology* **77**, 109–117.
- 岡田益己・井上めぐる・濱寄孝弘・青木和彦・荒川市郎, 2005: 寒締め野菜の環境調節シナリオ. *農業技術* **60**, 23–27.
- 大野宏之・佐々木香織・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.
- 小沢 聖, 2022: 寒締め栽培技術の開発経緯と定着のうちわ話. *生物と気象* **22**, 1–18.
- 酒井 昭, 1982: 寒害. 植物の耐凍性と寒冷適応. 学会出版センター, 東京, pp.217–276.