

# 植物-環境系における輸送現象の定量的可視化に関する研究

北野 雅治

(高知大学 IoP 共創センター)

## Studies on Quantitative Visualization of Plant-Environment Transport Phenomena

Masaharu KITANO

(IoP Collaborative Creation Center, Kochi University)

### 1. はじめに

作物生産は、生理生態が介在する植物-環境系におけるエネルギーと物質の輸送に決定づけられます。40年以上の長きにわたって、個葉、個体及び群落スケールでの多様な輸送現象(葉面対流, 熱収支, 光合成, 転流, 蒸散, 養水分吸収等)の定量的な可視化に取り組んできました。本報では、一連の研究の経緯と成果の一部および今後の展開について報告させていただきます。

### 2. 研究略歴と研究経緯

#### 2.1 農業気象トラウマ(1977~2000):

九州大学農学部3年生の時に、Montheith の生物環境物理学に共感して、伝統ある農業気象学研究室の門を叩きました。気象災害研究を中心にしていた当時の研究室の在り様に何となく馴染めずに、修士課程を中退して、当時の農技研や九州農試への就職を希望しましたが叶わず、「農業気象学とは縁が無い」と思い定めて、北海道開発庁土木試験所に2年間、沼田農業開発事業所に1年間お世話になりました。その後、恩師の坂上務先生、元田雄四郎先生、林静夫先生、早川誠而先生らのお導きで、新設間もない九州大学生物環境調節研究センターの助手に転任になり、江口弘美先生らの薫陶を受ける機会に恵まれました。休日返上で徹夜研究生活でしたが、濱古賀道雄氏ら技術職員の強力なサポートと最先端の環境制御機器を駆使して、植物-環境系の輸送現象の研究を、荒木卓哉君(現、愛媛大学作物学教授)らと自由に推進させていただきました。新興の学術分野「生物環境調節学」を牽引する新設の研究機関に所属している立場で、既存の伝統ある農業気象学会で活動することは、北野個人の道義が許さず、「農業気象学」に対するトラウマ状態が続きました

#### 2.2 遅れてきた青年(2001~2006):

46歳の時に、縁あって高知大学農学部暖地農学科教授に採用され、新しい研究室を自由に立ち上げる機会にも恵まれて、晴れて農業気象学会での活動も開始できました。破天荒な新任教授の下に集まってくれた、九州大学からの学振ポストドク特別研究員・安武大輔君(現、九州大学気象環境学准教授)および純粹素直な高知大学の学生諸君、和島孝弘君(現旭川市立

大学教授), 日高功太君(現、九州沖縄農業研究センター主任研究員), 佐合悠貴君(現、山口大学准教授)らと一丸となって、日本一の施設園芸の現場の近くで本研究を展開でき、青山仰ぐが如き、青年時代のようなフレッシュな6年間でした。

#### 2.3 青年は荒野をめざす(2007~):

52歳の時に思いがけず母校九州大学の農業気象学研究室(現気象環境学研究室)の教授に採用され、小林哲夫先生、脇水健次先生らと共に、伝統ある大所帯の研究室を主宰しました。北野の教育研究活動に共感してくれた安武大輔准教授らの気鋭の同志および、野見山綾介君(現、九州沖縄農研研究員), 三好悠太君(現、高崎量子研研究員), 野村浩一君(現、高知大学准教授), 木村建介君(現、農環研研究員), 横山 岳君(現、九州大学気象環境学助教), 小野信太郎君(現、九州沖縄農研研究員), 中井 鴻美君(現、九州大学学振特別研究員)らの多くの優秀な学生諸君と共に、定年退職までの13年間にわたって、100年の歴史を有する研究室の伝統をリセットする気概で、独自の教育研究活動を展開させていただきました。新キャンパスへの学部移転も相まって、新たな荒野を開拓するが如き教育研究活動でした。

九州大学定年退職後の2020年からは、思いがけず高知大学特任教授(IoP共創センター長)として、日本一の施設園芸県高知の施設園芸の現場で、植物-環境系の輸送現象の情報の可視化と共有化を目指す内閣府プロジェクトに取り組んで、今日に至っています。

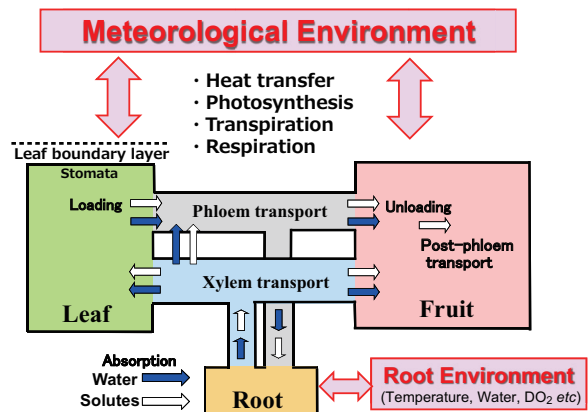


図1. 植物-環境系の輸送現象

### 3. 研究実績

#### 3.1 葉面の輸送現象の可視化<sup>1-4)</sup>

葉と周辺空気間の輸送現象を律速する葉面境界層を対象にして、気流の可視化法、水蒸気濃度分布の測定法、アブシジン酸処理による気孔閉鎖を活用した生葉の葉面境界層コンダクタンスの評価法、多数の模擬葉による葉面境界層コンダクタンスの時空間分布の評価法等を確立し、主要な成果として以下を得た。①作物生産場の弱風条件下の葉面で生じる複合対流の可視化に世界初で成功し、レイノルズ数とグラスホフ数で評価される浮力の効果のメカニズムを解明した。②温室内の弱風条件下の葉面では複合対流が支配的で、葉面境界層コンダクタンスが、各種環境調節の稼働によって多様な時空間分布を示すことを定量的に可視化した。③茶園の防霜ファンの熱的効果の時空間変動を、葉面境界層コンダクタンスとチャ葉の熱収支の多点連続評価によって定量的に可視化し、防霜ファンの首振り運動とその熱的効果の時空間変動との動的関係を明らかにした。特に、葉面の複合対流については、園芸施設内等の弱風下の作物生産場において支配的であるにも関わらず研究例が少ないために、葉面境界層に関する Review 等によく引用されている。

#### 3.2 蒸散および養水分動態の可視化<sup>5-14)</sup>

作物-環境系の養水分の動態の可視化のための多様な生体計測法として、動的な個葉熱収支解析による蒸散と気孔運動のオンライン計測法、葉の表裏面のガス交換特性の分別評価法、茎内蒸散流量のオンライン計測法として、動特性と分解能に優れた熱フラックス制御法、高圧水流量計と圧力チャンバによる作物器官の水力学的特性の評価法、作物個体群の根群におけるイオン吸収速度の評価法、アブシジン酸処理による気孔閉鎖を活用した畑作圃場の作物群落の蒸散速度の評価法、土壌塩類化大型カラムシステム等を開発し、主要な成果として以下を得た。①環境変動に対する気孔運動、蒸散および葉の水収支の動特性と階層性を明示した。②環境変動時における作物個体の水収支と気孔運動および葉の伸長との動的関係、体内貯留水の緩衝作用等を定量的に可視化した。③日中の気孔閉鎖(昼寝現象)の発生時の作物個体の水収支、葉の伸長、水力学的特性の変動を定量的に可視化した。④根群のイオン吸収速度に対する根域温度、イオン濃度、光強度、蒸散速度の影響を可視化した。⑤根群のイオン吸収速度が、蒸散速度と各イオン種固有の膜輸送タンパク質の能力に依存するという蒸散統合型イオン吸収モデルを新規に提案し、根群のイオン吸収の環境依存性を統一的に説明した。⑥乾燥地畑作圃場(黄河上流域)の土壌塩類化が、蒸散で駆動される根群域へのイオンのマスフローと作物種固有のイオンの選択吸収機能によってもたらされていることを定量的に明らかにした。これらの成果群は、環境変動下の作物-環境系の養水分動態に関する多くの新知見を提示し、この分野の国際的名著 "WATER RELATIONS OF PLANTS AND SOILS"(P.J. Kramer and J.S. Boyer)にも数ヶ所にわたって引用されている。

#### 3.3 光合成、転流および成長の可視化<sup>15-23)</sup>

葉の光合成および光合成産物の転流と果実肥大の動態の可視化のための多様な生体計測法として、生化学的光合成モデル等の理論的モデル群と AI を連動させた新規の Hybrid AI モデルによる作物群落の光合成速度と蒸散速度のリアルタイム評価法、AI 画像認識と群落内光透過理論による葉面積指数の評価法、フルーツチャンバによる果実の肥大速度、呼吸速度、光合成速度、蒸散速度、水収支のオンライン計測法、果柄のヒートリング処理を活用した師管液フラックスと道管液フラックスの分別評価法、キレート剤 EDTA を活用した果実への師管経由の糖フラックスの評価法、<sup>13</sup>Cトレーサー法および放射性同位元素 <sup>14</sup>C を用いた RI イメージング法による光合成産物の転流動態の可視化等を駆使し、主要な成果として以下を得た。①6 連棟イチゴ温室内の環境調節(炭酸ガス施用等)に伴う光合成速度と収量の時間的・空間的なムラを定量的に長期間可視化し、局所適時環境調節の時空間的最適化の重要性を示した。②新規に提案した Hybrid AI モデルが、営農現場で容易に取得可能な環境情報と作物画像情報のみを用いて、作物群落の光合成速度、蒸散速度をリアルタイムで可視化でき、少量の学習量で高い汎化性能を発揮することを立証した。③シンク器官(果実)の肥大、水収支および師管経由と道管経由の物質集積などの動態に対する光、気温、昼夜温、水ストレス、塩ストレス、呼吸等の作用を定量的に可視化した。④果実の肥大および同化産物の転流の動態が、ソース葉の光合成だけでなく、個体内の水分動態、師部での浸透圧調節機能および果実内の呼吸に依存する糖の能動的輸送プロセスを通して律速されていること等を定量的に可視化した。これらの研究によって、作物生産を決定づけるが、可視化が困難であった群落光合成および光合成産物の転流動態の可視化を実現する多様な方法を確立し、特に、Hybrid AI モデルによる群落光合成・蒸散速度の可視化に関する論文は、*Agricultural and Forest Meteorology* に掲載され、*most downloaded paper* にも選ばれた。

#### 3.4 Internet of Plants (IoP)による可視化と共有化<sup>24-28)</sup>

作物生産を決定づける光合成、蒸散、栄養成長、生殖成長等の作物生理生態の時系列情報を営農現場で可視化するとともに、作物生理生態情報に基づく合理的な営農支援情報を農業者に提供し、さらにそれらの情報を産地で共有する仕組みとして、Internet of Plants (IoP)を、2017 年に発案した。IoP は、Society5.0 における農業の革新技術として注目されて、土地生産性日本一を誇る高知県施設園芸において、地域情報インフラとして社会実装され、Hybrid AI モデルによる群落光合成速度、群落蒸散速度等の営農現場でのリアルタイムの可視化が実現し、2022 年 9 月から高知県施設園芸で本格運用が開始されて、急速に普及が広がっている。

## 4. 今後の展開

営農現場の農家にとって今までブラックボックスであった植物-環境系の輸送現象の情報(図2)の定量的可視化を、IoP を介して多様な地域・作目を対象に展開します。その過程で、下記の課題に取り組みます。

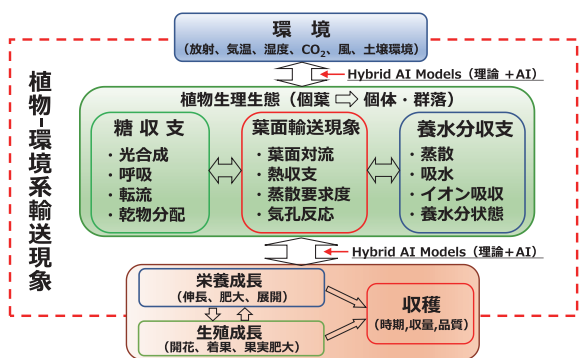


図2. 農家の営農現場での植物-環境系の輸送現象の定量的可視化

- ・有効な過去情報および履歴情報の抽出と活用による Hybrid AI モデル群の拡張と強化。
- ・一年一作露地作物栽培(畑作物, ヴィンヤード等)への IoP の導入と有効活用
- ・IoP とオンサイトグリーンエネルギーを活用した脱炭素化施設栽培システムの構築。
- ・「何の情報を、どう見せて、どう使って、どう営農改善につなげるか」についての農家との協働。
- ・多種多様な農家の営農現場群(オンサイト)で得られる、生理生態等に関するバラツキの大きい大量の情報群から、説明性の高い有意な情報を抽出して、合理的な営農支援への活用を目指す新たな農学「Society5.0 型オンサイト農学(図3)」の提唱。
- ・「野花咲く 荒れ野のはての 旅枕 (雅治)」

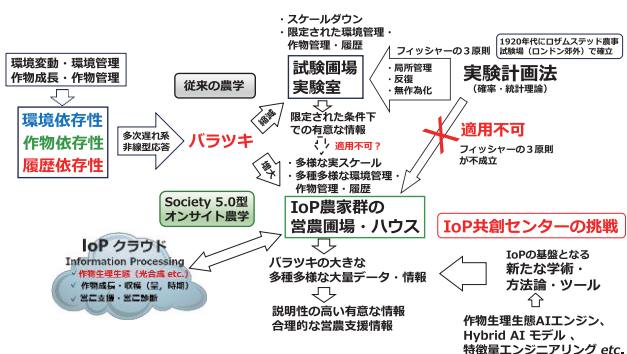


図3. Society5.0型オンサイト農学の展開

### 5. 謝辞

前例のない高齢会員への学術賞の授賞に際しましては、推薦して頂いた小林和彦会員(東大名誉教授)および選考して頂いた学会賞選考委員会と理事会メンバーの勇気と寛容なる見識に、深甚なる敬意と感謝の意を表します。

40年以上の長きにわたって本研究を遂行するに当たり、数えきれないほど多くの方々にご指導とご支援を賜りました。多くの恩師の先生方には、小生の性分と能力をよく見極めて、温かくこの道に導いて頂きました。職場の同僚の研究者、技術職員、事務職員の皆様には、知識、経験、技術が足りず業務の遂行能力が不十分な小生を、献身的に支援して頂きました。また、研究室に集った学生諸君には、反面教師の小生の教育研究活

動を広い心で受容し、本研究での協働を通じて、研究室を盛り上げ、目覚ましい成長を見せてくれました。ここに、衷心より感謝の意を表します。

さらに、高知 IoP プロジェクトの同志の皆様には、本研究に共感して頂き、社会実装に向けた産官学の共創の推進力を賜りましたことは、感激の極みであり、深甚なる敬意と感謝の意を表します。本研究は、多くの科学研究費補助金と内閣府地方大学・地域産業創生交付金「IoP (Internet of Plants)」が導く「Next 次世代型施設園芸農業」への進化」および「IoP (Internet of Plants)」が導く「Society5.0 型農業」への進化」の助成を受けました。記して謝意を表します。

最後に、40年以上の長きにわたる妻の理解と誠実な支援に、衷心より感謝の意を表します。

### 引用文献

- 1) Kitano M, Eguchi H, 1990: Buoyancy effect on forced convection in the leaf boundary layer. *Plant Cell and Environment* **13**, 965-970.
- 2) Kitano M, Tateishi J, Eguchi H, 1995: Evaluation of leaf boundary layer conductance of a whole plant by application of abscisic acid inhibiting transpiration. *Biotronics* **25**, 51-58.
- 3) Kimura K, Yasutake D, Nakazono K, Kitano M, 2017: Dynamic distribution of thermal effects of an oscillating frost protective fan in a tea field. *Biosystems Engineering* **164**, 98-109.
- 4) Kimura K, Yasutake D, Yamanami A, Kitano M, 2020: Spatial examination of leaf-boundary-layer conductance using artificial leaves for assessment of light airflow within a plant canopy under different controlled greenhouse conditions. *Agricultural and Forest Meteorology* **280**, 107773.
- 5) Kitano M, Eguchi H, 1989: Dynamic analysis of stomatal responses by an improved method of leaf heat balance. *Environmental and Experimental Botany* **29**, 175-185.
- 6) Kitano M, Eguchi H, 1989: Quantitative analysis of transpiration stream dynamics in an intact cucumber stem by a heat flux control method. *Plant Physiology* **89**, 643-647.
- 7) Kitano M, Eguchi H, 1989: Device for measuring water flow rate in plant stem. アメリカ合衆国特許, No. 4817427.
- 8) Kitano M, Eguchi H, 1991: Dynamics of plant water relations as affected by evaporative demand. In *Mathematical, Control Applications in Agriculture, Horticulture*. Oxford, 367-372.
- 9) Kitano M, Eguchi H, 1993: Dynamic analyses of water relations and leaf growth in cucumber plants under midday water deficit. *Biotronics* **22**, 73-85.
- 10) Yasutake D, Kitano M, Hidaka K, He W, Kobayashi T, 2005: A method for in situ evaluation of transportational water loss from crop field by applying abscisic acid to plants. *Journal of Agricultural Meteorology* **60**, 1117-1120.

- 11) Kitano M, Yasutake D, Kobayashi T, Hidaka K, Wajima T, Wang W, He W, 2006: Dynamics of water and ion transport driven by corn canopy in the Yellow River basin. *Biologia* **61**, S275-S279.
- 12) Kitano M, Yasutake D, Araki T, 2007: Measurement of transpiration streams in Plants. *Environmental Control in Biology* **45**, 223-239.
- 13) Kitano M, Urayama K, Sakata Y, Sonoda Y, Ebihara K, Sago Y, Yoshikoshi H, Araki T, Yasutake D, Cho H, Kobayashi T, 2009: Water and salt movement in soil driven by crop roots: a controlled column study. *Biologia* **63**, 474-477.
- 14) Sago Y, Yasutake D, Hidaka K, Eguchi T, Yoshida S, Kitano M, 2011: Kinetics of root ion absorption affected by environmental factors and transpiration. III. A kinetic model integrated with transpiration. *Environment Control in Biology* **49**, 41-46.
- 15) Kitano M, Araki T, Hamakoga M, Eguchi H, 1997: On-line measurements of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O gas fluxes, sap flux and expansive growth in an intact tomato fruit. *Biotronics* **26**, 85-94.
- 16) Kitano M, Araki T, Eguchi H, 1998: Temperature dependence of postphloem transport regulated by respiration in tomato fruits. *Biotronics* **27**, 33-39.
- 17) 北野雅治・荒木卓哉・江口弘美, 1998: トマトにおける果実生長および光合成産物の転流の動態に対する環境作用 I. 光照射および昼夜温の影響. *生物環境調節* **36**, 153-161
- 18) 北野雅治・荒木卓哉, 2001: トマトにおける果実生長および光合成産物の転流の動態に対する環境作用(第2報) - 師管液および道管液フラックスと果実水収支の解析 -. *生物環境調節* **39**, 43-51.
- 19) 北野雅治, 2004: 転流の計測. 「新農業環境工学」. 養賢堂, 東京, pp. 146-147.
- 20) 北野雅治・日高功太・園師一文・荒木卓哉, 2008: 養液栽培における根への環境ストレスの応用による野菜の高付加価値化. *植物環境工学* **20**, 210-218.
- 21) Kimura K, Yasutake D, Koikawa K, Kitano M, 2020: Spatiotemporal variability of leaf photosynthesis and its linkage with microclimates across an environment-controlled greenhouse. *Biosystems Engineering* **195**, 97-115.
- 22) Kaneko T, Nomura K, Yasutake D, Iwao T, Okayasu T, Ozaki Y, Mori M, Hirota T, Kitano M, 2022: A canopy photosynthesis model based on a highly generalizable artificial neural network incorporated with a mechanistic understanding of single-leaf photosynthesis. *Agricultural and Forest Meteorology* **323**, 109036.
- 23) Nomura K, Kaneko T, Iwao T, Kitayama M, Goto Y, Kitano M, 2023: Hybrid AI model for estimating the canopy photosynthesis of eggplants. *Photosynthesis Research* **155**, 77-92.
- 24) Kitano M, Nomura K, Yamazaki T, Iwao T, Saito M, Mori M, Yasutake D, Kaneko T, Ukeda H, Ishizuka S, Fujiwara T, Okabayashi T, 2022: Internet of Plants (IoP) empowers bottom-up innovations in greenhouse horticulture. *Environmental Control in Biology* **60(1)**, 3-12.
- 25) 北野雅治・野村浩一, 2022: 光合成に関する学習データ作成装置, 機械学習装置, 推定装置, 方法およびプログラム. 特開 2022-122358.
- 26) 北野雅治・野村浩一, 2022: 蒸散に関する学習データ作成装置, 機械学習装置, 推定装置, 方法およびプログラム. 特開 2022-158030.
- 27) 北野雅治・野村浩一・岩尾忠重・齋藤雅彦・山崎富弘・但田育直, 2022: 作物群落の鉛直プロファイルおよび空間分布推定装置, 推定方法, プログラム. 特願 2022-126729.
- 28) 北野雅治・野村浩一・岩尾忠重・齋藤雅彦・山崎富弘・但田育直, 2022: 作物群落の葉温分布推定装置, 推定方法, プログラム. 特願 2022-126931.