

日本農業工学会賞2025 受賞講演会

講演要旨集

主催：日本農業工学会

JAICABE: The Japan Association of International
Commission of Agricultural and Biosystems Engineering

日時：2025年5月10日（土） 14:00－16:50

場所：東京大学弥生キャンパス 中島ホール（フードサイエンス棟）

目 次

齋藤 高弘 氏(宇都宮大学農学部・教授) 閉鎖生態系での廃棄物処理技術と食品の製造工程での 機能性や品質変化に関する研究	1
菅野 洋光 氏(東京都立大学都市環境学部・客員研究員) 北日本に冷夏をもたらすヤマセの気団気候学的研究	5
鹿内 健志 氏(琉球大学農学部・教授) 沖縄地域における農作業システム開発と農作業解析	9
池口 厚男 氏(宇都宮大学農学部・教授) 畜舎の空気衛生環境制御とスマート畜産技術の開発	13
南石 晃明 氏(九州大学・名誉教授) 農業情報マネジメント理論とイノベーションに関する研究	17
田中 史彦 氏(九州大学大学院農学研究院・教授) 青果物品質保持についての農産食料工学的研究	21
藤原 正幸 氏(京都大学大学院農学研究科・教授) 浅水域の水流・物質輸送・生物移動に関する研究	25

閉鎖生態系での廃棄物処理技術と

食品の製造工程での機能性や品質変化に関する研究

齋藤 高弘

宇都宮大学 農学部

要旨

地方に身を置き、地域の食を題材として、中小零細企業の多い地場食品産業を支え育成する目的で、食品の一次機能(栄養素を供給する機能)、二次機能(テクスチャなど嗜好性に関わる機能)、三次機能(抗酸化活性など生体調節機能)に関して研究を進めてきた。しかし、その背景を振り返ると、学生時代のハワイ州立大学での複合栽培との出会い、また航空宇宙技術研究所でのCELSS(閉鎖生態系生命維持システム)との出会い、そして嗜好飲料や食品を題材とする工程管理に役立てる目的での経験と勘を補完する情報検出技術の開発との出会いという経緯があったからこそ、今にたどりつけた気がする。ここでは、時系列に沿っての研究展開を人との出会いを絡めて紹介させていただきたい。

キーワード

複合栽培、CELSS、物質循環、光検出、食品産業

緒言

大学での教育・研究生生活を振り返ると、その場その場での個人的な興味や私がもっと大事とする人との出会い、更にちょっとした予感や打算などを経て今にたどり着いてきている気がする。最初は、自らの興味や探求心に基づくものが、どこから妥当性や必然性という、すべきであるとする身勝手な自己肯定感のようなものになり、大学という組織がおかれている移り変わりに対応するような変遷だったのかもしれない。そのような雑駁な歴史のため、ここでは時間の流れに沿って、取り組んできた研究内容やその時々、の雑感(思い)などを交えて紹介させて頂きたい。幾分研究レポートというより、物語みたいな読み物口調であることをご勘弁頂きたい。多分読者の皆様にとっても見て頂きやすのではという、これまた勝手な自己満足感に基づくものである。

ハワイ州立大学、そして CELSS との出会い

大学が府中にあり、農業工学は農業土木 20 名、農業機械 10 名という全てに密である環境がスタート地点であった。属した農業機械は 2 つの研究室が用意され、「農用作業機」と「農用原動機」。より生物系に近い(近そうな?)作業機を選んだ。もともと数物系の興味が低く、すり抜けながらカリキュラムをこなしてきたため、卒論や修論では「電氣的刺激による発芽制御」、「機械適応性の高い苗の育苗方法」など、植物系に絡まる内容を担当させていただいた。この研究室の修士課程進学者は必ず 1 年間研究留学するのが恒例であり、文科省の国際交流制度の機会を得て(藍房和教授の力!）、ハワイ州立大学に研究留学した。教授

からは、「ノースカロライナとハワイがあるけど、齋藤君はどっちが良い?」との問いに、「もちろんハワイです」と即答した。これが生まれて初めての海外であった。偶然にも調べてみるとその当時 1\$ = 146 円で、今と余り変わらず何かビックリ!。修士課程しか存在しないハワイ州立大学農業工学科は世界からの学生が集まり、メインランド(アメリカ本土)へ ph.D.を取りに行くための中継基地のような存在であった。ここで、語学や成績のスコアを上げ、奨学金取得の人脈を形成し、羽ばたいていく、そんな存在であることに気づいた。大学は 1 つの街のような大きさがあった。多様な人種、多様な言語、多様な宗教観、そして学生の多様な年齢層。私は最も若く、いつも「Hiro は Young man !」と皆にかわいがってもらい、毎月のホームパーティでも週末のビーチバレーでも楽しい時間を過ごした。その際、分りにくい訛った英語を話すインド人や、倹約的な生活をする中国人の留学生からは、「帰国したら、博士課程に進学しないの? 若くして取得すれば、その先安泰じゃない!。Hiro は若くて羨ましいよ」との意見をよく聞いた。これが、帰国後、高校の教員(とはいえ、学部生時代採用試験合格せず)でもなろうと思っていた私の 1 つめのターニングポイントであった。

帰国後、何かグローバルな自分になったような気がし、博士課程に進学することとした。上級生には生涯の友となる、インドネシアボゴール農科大学 Tineke Mandang 先生が居た。その当時、大学には旧帝大のみに与えられていた博士号の付与という特権から、連合大学院という後期博士課程のみの組織が始まり、その立役者が私の副指導教

員にも成って頂いた大物の船田周先生であった。

博士課程のテーマは「養殖・養液複合栽培システム」という内容であった。これは、魚等の養殖と植物栽培を両立する、今どきの言葉としてはアクアポニックスなのかもしれない。この考えの発端は、ハワイ大学での出会いにあった。日本の農業工学とは異なり、ハワイ大学での農業工学には、Aquaculture Engineering という水産工学という分野が存在していた。観光が主産業であるハワイは海に囲まれ、多くの観光客は美味しいシーフードを楽しみにしている。しかし、周りは暖かい海で漁業は盛んでない一方、内陸（島内）の養殖は当時盛んであったが、排水がきれいなビーチの汚染に結び付くとして、この複合栽培の考えが、魚、貝、藻、植物、動物と多角的に高次元で結び付ける取り組みがなされており、私も興味深く研究に打ち込んだ。

養殖において、用水の循環利用には排泄物などに由来する $\text{NH}_4\text{-N} \rightarrow \text{NO}_2\text{-N} \rightarrow \text{NO}_3\text{-N}$ の速やかな硝化がポイントとなる。この過程が進まないと特に亜硝酸は有害性が高く問題となる。通常この過程は消化細菌に委ねることになり、硝化の第1反応ではpHの低下が起こり、アルカリの継続的投与が必要になる。この複合栽培系での物質のインプットは、養殖体に与える餌である。通常の魚類の餌の成分、養殖排水と植物栽培養液の成分を比較するといくつかの解決すべき問題がある。思った以上に、魚類側の排水はK含量が少ないこと、また両者には大きな濃度差が存在する。もちろん、硝化過程を繰り返し、排水の濃度を上昇させることもできるが、時間を要するとともに養殖体の生育にとっても、含有成分が増加することは望ましいことではない。そこで、当時ご縁を頂いた栗田工業のお陰で、養殖と養液栽培の中間に、逆浸透膜を介在するシステムを構築した(図1)。これにより、硝化の済んだ用水を分離し、濃度の低

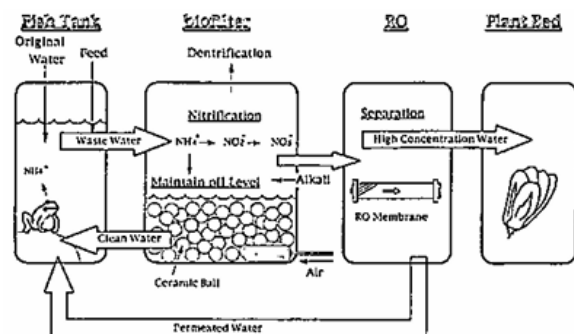


図1 逆浸透膜を用いた養殖・養液複合栽培システム
い透過水を養殖側へ、濃縮水を植物側に速やかに供給することが可能になる。また、逆浸透膜の選択により、ある程度成分組成を変化させることも可能になった(齋藤ら, 1994, 1995)。なお、Kの不足には、アルカリとしてKOHを用いることで改善がなされた(齋藤ら, 1991)。このような研究に携われたことにより、複合栽培、物質循環、物質収支という考え方に強い興味を持つことが出来た。

修了後、本興味、また距離の近さから調布に存在する航空宇宙技術研究所(NAL 現 JAXA)宇宙研究グルー

プに特別研究員としての生活がスタートした。これが2つめのターニングポイントであった。当時研究所は、飛行機の性能向上、無人機技術、宇宙探査技術、航空機の環境への影響を守備範囲とする、国内唯一の航空機、ロケット、衛星に関する研究機関であった。当然、主たる研究者の背景は、航空工学、工学、物理等であり、農学系の人材は皆無に近かった。宇宙研究グループの中には、将来の夢を語れるCELSS(閉鎖生態系生命維持システム)が存在していた。将来の月面基地、火星探査を念頭に、限られた空間の中で、食糧生産、水再生、ガス再生、廃棄物再生という物質循環を成り立たせる、まさに、「ミニ地球」を作るような分野であった。このような観点に加え、大坪孔治室長のご厚意も頂き、私のような背景の者も身を置くことが可能になった。もちろん、このような新しい分野に出会えること、さらに宇宙という夢、そしてこのような魅力的な研究分野に携われる経験は、きっと将来自分の売りになるのではとの打算もあった。時同じく、アメリカのアリゾナでBiosphere2の実験が開始された。これは、地球(Biosphere1)の代わりに宇宙生活での生物学的生物群の組み合わせによる生態系の維持の可能性を実証するため、8人の人間を2年間にわたり閉じ込めた壮大な実験であった。

これに対して日本版のBiosphereは、青森県六ヶ所村に閉鎖生態系実験施設(CEEf:図2)が建設され、物理化学的に水再生、ガス再生、廃棄物再生を迅速にコントロー

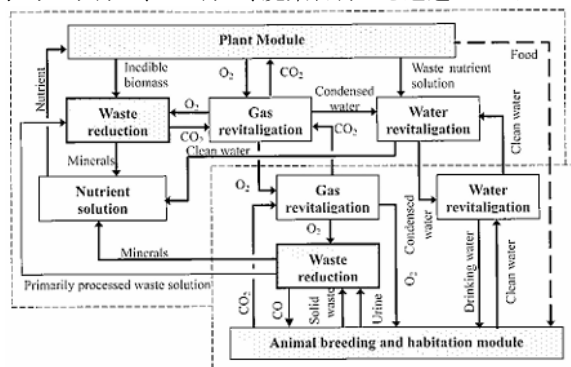


図2 閉鎖生態系実験施設における植物モジュールの物質循環システム(Tako etc, 2004)

する特徴をもち、食糧源となる植物体の生産も人工照明を用いたシステムを採用していた。この中で廃棄物再生は、高温高压で処理する湿式酸化法が採用された。この方法は固体触媒を用い、空気を酸化剤とする液相酸化反応により、有機物、などを二酸化炭素、水、窒素、などに無害化処理する方法である。この中で、人工尿を用いた水再生循環システムにおける課題(齋藤ら 1994)、糞を用いた湿式酸化処理での分解特性(齋藤ら, 1995)、湿式酸化処理で重要となる物質収支を解明するための窒素収支の測定技術の開発(齋藤ら, 2005)、さらに湿式酸化処理の根幹を成す触媒や流出防止剤の劣化や成分流出という閉鎖系での廃棄物処理関連に取り組んだ(齋藤ら, 2004)。

一方、これら物理化学的処理を補完する意味で、有機的かつ嫌氣的な分解発酵処理法での消化液の成分特性

の把握と、実際の物質循環への導入手法の検討へと進めた(森谷ら, 2008,2011)。

航空機実験・SPB そして食品分野へ

この当時、CELSS学会(後の生態工学会)は既存の学科や学問分野と連動する学会とは大きな違いがあった。通常は同じ背景をもち、同じ基礎学問を共有して研究展開をする同色に近い構成員の学会が一般的であるが、この学会は、宇宙科学、宇宙生物、化学工学、生物学、水産学、機械工学、人間科学、医学、農学等幅広い背景を有していた。どちらかというと、農業機械という背景に拘っていた自分にとり、多くの人との出会いがあった。特に、宇宙フォーラムの助成を受け、宇宙植物学の高橋秀幸先生を代表とする、日本版宇宙実験用植物栽培装置(SPB)の開発に関わることが出来た。この時、北宅善昭先生、後藤英司先生、谷 晃先生という魅力的な先生方と親交を深められた。特に、名古屋の小牧空港からの、過Gと 20 秒の無重力環境を作れる航空機実験(パラボリックフライト、瞬間雲?)の機会を得て、SPBの要素技術を試す貴重な機会を得られた。当時は、5 大学の先生方と学生が、共に合宿生活のような時間を共有し、人と人を深く結びつける貴重な思い出となった(もちろん、優秀な先生方との出会いは、特にストレスであったかもしれないが、それ以上に何となくもついていたのか、いかにという気持ちに駆り立てられていた)。

NAL を離れて地方大学に居ると地に足のつかない? 夢を語れるような宇宙研究分野で何をテーマに進めていくのか、大変悩ましい。学生からも、CELSS の人気は高く、魅力的に映るのだが、さてはや限られた予算で何を具体化するか。。。

一方で、大学の存在意義を語る上で、地域から必要とされる、地域に役に立つという観点(存在意義)が常に求められるようになった。大学では各人、何か一つは地域社会と結びつくことが推奨された。特に農学部は。その中で、栃木県産業技術センターの岡本竹己氏との出会いが大きかった。大学の先輩であり、たまたま大学の県支部同窓会に参加した際に名刺を交換し、交流が始まった。センターは県内企業等の新技術・新製品開発を支援し、企業の研究開発力の向上に寄与し、活力ある地域産業の発展を目指す目標がある。そこでの技術開発の多くは、常にその背景と必然性がエビデンスに基づき明確であり、今まで知りえなかった地域の抱えている問題点を具体的に共有することができた。特に、食品技術部では日本酒造りを重要な研究対象としていた。日本酒造りは地域密着型の中小零細企業が多く、そこでの造りは経験と勘に基づく、原料、微生物、水のもつ力をどのようにして最大限引き出すかという独特の世界観があった。日本酒は、麹菌によるでんぷんの糖化と酵母によるアルコール発酵が同時に進行する特徴的な並行発酵でビールやワインと異なる。日本酒造りでは、一麹(いちこうじ)、二酛(にもと)、三造り(さんつくり)と言われ、これらの制御管理が難しく、酒質へ大きな影響を及ぼ

す。この難しい工程管理において、その微生物活性などの変化を経験と勘だけではなく、定量的に評価する技術開発ができないか検討を始めた。これらの情報検出手法としては、「光検出」の技術を農研機構食品総合研究所萩原昌司氏の力添えを頂いた。ここで用いた光検出は、微弱発光、化学発光、蛍光分光である。微弱発光は 10^{-6} Lx 以下の光であり、光電子増倍管を用いたフォトンカウンティング計測が用いられる。本手法は物質が励起状態から基底状態に移行する際に光を放つ現象を応用しており、食品の酸化劣化や抗酸化能、微生物活性を簡便に捉えうる可能性が有る。これらの手法を用いて、清酒の製造工程中の精米歩合、製麹、酒母、醪期間、活性炭処理や火入れなどがどのように清酒の抗酸化性(劣化のしにくさ)に影響を及ぼすのかを明らかにし(山口ら, 2009)、機能性の高い日本酒造りの提言を行った。また、日本酒造りが微生物の力に大きく依存することから、酒質の良し悪しを左右する麹菌の増殖速度と蛍光強度には相関があること(図3)やビールにおいても酵母活性のモニタリングを行い、定量的に評価する技術開発をした(片岡ら, 2011、東尾ら 2016)。これらは、

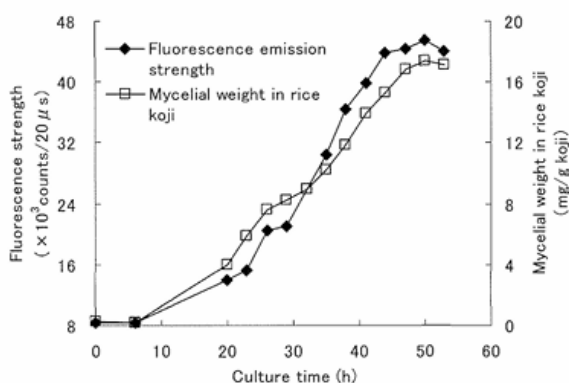


図3 光検出による麹菌の増殖速度のモニタリング

非破壊、非侵襲、かつ迅速に麹菌の繁殖過程の見える化に結び付いた。これらの手法の可能性に手ごたえを感じる中で、この技術を現場へ普及出来ないかと考えた。その際、課題になるのが簡便でコンパクトな光検出装置や様々な発光系に対応可能な装置開発であった。ここで、大変お世話になったのが浜松ホトニクス(株)の杉江正美氏であった。光電子増倍管と言えば、浜松ホトニクスというように光学技術の世界のトップランナーである。展示会などでの出会いを基に、装置の開発に共同して取り組んだ。光検出手法は様々あるため、光電子増倍管を有する基本部分を基に、サンプルホルダー、試薬分注ユニット、励起光源ユニットを積み木のように積み上げ、交換可能な構成とした。サイズは持ち運び自由な手のひらに乗る大きさ(縦横高さ、10×10×15 cm)とし、これ 1 台で、生物発光、化学発光、蛍光寿命、遅延蛍光などが、いつでもどこでも計測可能となった。改めて、企業の物づくりの素晴らしさに圧倒されるとともに、共同で育ててきた技術が形となり、製品化(図4)され

る感動に満たされた瞬間であった。



図4 製品化された微弱発光計数装置(浜松フォトニクスHPより)

これ以降、研究室の同僚の田村匡嗣准教授の力を借りて、大麦麵の開発(山崎ら, 2017)、そば粉による機能性の増強した食品(Batgerel etc, 2023)、さらにビール醸造用の香り豊かなホップの見える化(田村ら, 2020)と乾燥の影響(Tanaka etc.2024))など嗜好品、農産物、加工品の素材を対象に、食品の一次機能(栄養素を供給する機能)、二次機能(テクスチャなど嗜好性に関わる機能)、三次機能(抗酸化活性など生体調節機能)を明らかにする研究へと、企業や生産者の皆様と一緒に展開している。

謝辞

栄えある日本農業環境工学会賞の授与にあたり、ご推薦を頂きました生態工学会名誉会長大政謙次先生、会長船田 良先生、副会長の諸先生方に厚くお礼を申し上げます。本文にも記載いたしましたが、これらの成果は東京農工大学、航空宇宙技術研究所(現 JAXA)、宇都宮大学、での数々の素晴らしい先生方や企業・研究機関の皆様との出会い、そして素晴らしい同僚、一緒に時間を共有してくれた学生の皆様方のお陰であり、心から感謝を申し上げます。本当に、有難うございました。

引用文献

- Tanaka M., Saito T., Xie X., Ota E., Tamura M. Hot air-drying characteristics on the appearance, polyphenols, and aroma compounds of hops, *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 17(3), 91-98 2024
- Batgerel S., Saito T., Tamura M. Optimization of the physical properties and antioxidant activity of Mongolian buuz wrappers with buckwheat flour substituted for wheat flour, *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 16(4), 113-122, 2023
- 地ビール醸造家を対象としたホップ香気の評価指標に関する研究, 田村匡嗣, 駒田華奈, 井上大悟, 齋藤高弘, 農業施設, 51(1), 1-11, 2020
- グルテンを添加した大麦麵の物性および機能性の評価, 山崎優

司, 齋藤高弘, 阿久津智美, 星 佳宏, 岡本 竹己, 田村 匡嗣 *日本食品科学工学会誌* 64(12), 567-576, 2017

蛍光分光法を用いたビール酵母活性のモニタリング, 東尾 恭詳, 田村 匡嗣, 松井 正実, 齋藤 高弘, 松本健一, 岡本竹己, *Eco-Engineering* 28(4), 85-90, 2016

蛍光分光法を用いた清酒製造工程における麹菌活性評価技術の開発, 片岡皆人, 齋藤高弘, 岡本竹己, 佐々木隆浩, 星佳宏, 杉江正美, 萩原昌司, 志賀徹, *日本醸造学会誌* 106(9), 620-626, 2011

AHP による閉鎖系システムにおける廃棄物処理法の評価, 森谷和彦, 野口良造, 齋藤高弘 *Eco-Engineering* 23(1), 25-30, 2011

化学発光法を用いた清酒の熟度・抗酸化能の評価, 山口貴之, 齋藤高弘, 岡本竹己, 佐々木隆浩, 杉江正美, 萩原昌司, 志賀徹, *日本醸造学会誌* 104(4), 303-311, 2009

ヤギ糞の嫌気性発酵処理における発酵特性と消化液の利用, 森谷和彦, 齋藤高弘, 東城清秀, 新井竜司, 志賀 徹, 渡辺兼五, *Eco-Engineering* 20(4), 151-157, 2008

CEEF の湿式酸化処理過程における窒素収支測定技術の検討, 齋藤高弘, 新井竜司, 多胡靖宏, 志賀 徹, *Eco-Engineering* 17(2), 139-144, 2005

Closed Habitation Experiments and Material Circulation Technology, Yasuhiro Tako, ISBN 4-9980604-7-3, 80, 2004

CEEF での廃棄物処理に用いられる触媒ならびに流出防止材の劣化について, 齋藤高弘, 志賀 徹, 安藤達男, 福村一成, 新井竜司, 多胡靖宏, *Eco-Engineering*, 16(4), 271-276, 2004

CELSS における廃棄物再生処理システムに関する研究—湿式酸化処理でのウサギ糞の分解特性について—, 齋藤高弘, 谷 晃, 多胡靖宏, *生物環境調節*, 33(4), 293-295, 1995

水リサイクル型動植物栽培システムについて (第 2 報) 動植物栽培システムの総合的運用計画, 齋藤高弘, 志賀 徹, 東城清秀, 渡辺兼五, 藍 房和, 安藤達男, 鈴木克徳, *CELSS Journal*, 8(1), 1-5, 1995

CELSS における水再生循環システムの開発

齋藤高弘, 大坪孔治, 種村利春, 小口美津夫, 多胡靖宏, 芦田章, 新田慶治, 浜野亘男, 三谷健司, *生物環境調節*, 32(1), 17-24, 1994

水リサイクル型動植物栽培システムについて (第 1 報) 植物栽培に適する養殖用水の水処理, 齋藤 高弘, 志賀 徹, 大坪 孔治, 渡辺 兼五, 東城 清秀, 藍 房和, *CELSS Journal*, 6(2), 17-22, 1994

水生動物と植物の複合栽培システムに関する研究 養殖体に適する水処理法と養殖用水の肥料成分特性, 齋藤高弘, 藍 房和, 渡辺兼五, 東城清秀, 内田哲生, *農業施設*, 22(2), 117-124, 1991

北日本に冷夏をもたらすヤマセの気団気候学的研究

菅野 洋光

東京都立大学都市環境学部 客員研究員

要旨

北日本に冷夏・冷害をもたらすヤマセについて、主に気団気候学の視点から研究を進めてきた。ヤマセはそのグレードによって局地的な低温や大規模な冷夏・冷害を引き起こすことを明らかにしたが、それらはエルニーニョ・ラニーニャ現象や気候のステージによって影響され、ヤマセは決して局地的な現象ではなく、地球規模で引き起こされる現象であることがわかった。ヤマセによる農業被害を軽減するべく、東北地方メッシュ気象データの開発、それを実用的に運用するウェブシステムを構築した。現在は、農研機構から全国に展開するメッシュ農業気象システムにより詳細な農業気象情報が提供されている。地球温暖化による将来の気温上昇下でも、ヤマセは現代気候とそれほど変わらない頻度で吹走することが予想されている。今後の気候変動の監視とともに、ヤマセに関する研究は将来にわたって必要であると考えられる。

キーワード

ヤマセ、冷害、メッシュ気象データ、ENSO、気団変質

緒言

地理学は、気候学・地形学・人文地理学・地誌学等、広範な学問分野にまたがっており、人間の歴史や生活に影響する環境を主な研究ターゲットにしている。著者はこれまで気候学を専攻し、気団気候学を中心とした気象解析により、グローバルな気候変動の解明など広範な研究成果をあげてきた。特に北日本に冷夏・冷害をもたらす「ヤマセ」は、北極海～オホーツク海で形成された寒帯気団の南下に伴う気団変質でもたらされる現象であり、気団気候学的なアプローチが重要かつ必要である。

1960年代は、北日本の夏季の気温は安定しており、極端な暑夏も冷夏も発生しなかった。ところが、1976年の冷夏を端緒として、それ以後、1980年や1993年、2003年の大冷害を中心として冷夏が頻発するようになった。これについては、日本のはるか南で生じているエルニーニョ・ラニーニャ現象が、ロスビー波の伝播を通じて北日本に影響していたことが一義的な原因と考えられる。特に1993年の大冷害は、日本のコメ不足から、外国からコメを輸入する事態にまでなり、大きな社会問題となった。

著者は、東京都立大学在学中から、北日本(東北地方)の歴史的な冷害・飢饉に関心があり、気団気候学のアプローチからヤマセおよびそれがもたらす冷夏・冷害について研究してきた。ヤマセはそもそも風位方言の一つであり、一見局地的な現象であるが、それをもたらす寒帯気団の強弱には、偏西風の波動、ロスビー波の伝播、赤道太平洋での海面水温(SST)の変動が関わっており、大規模な気候変動との関係が明白である。そこで、気団解析を中心としたグローバル気候変動および北日本の冷夏に関する研究(例えば、菅野,1991, 2008b; Kanno and Matsumoto,

1993)をライフワークの一つとして遂行してきた。ここでは、それらの一端を紹介していきたい。

ヤマセをもたらす寒帯気団の解析

従来、梅雨前線は寒帯気団と熱帯気団の境界に形成される寒帯前線として認識されてきた。菅野(1988)は、地上気象電報および高層気象観測データを用いた前線解析から、海洋性寒帯気団(Pm 気団)の高さは2000m程度で、梅雨前線の北方で気団変質をおこしており、梅雨前線までは達していないこと、梅雨前線は上空の亜熱帯ジェット

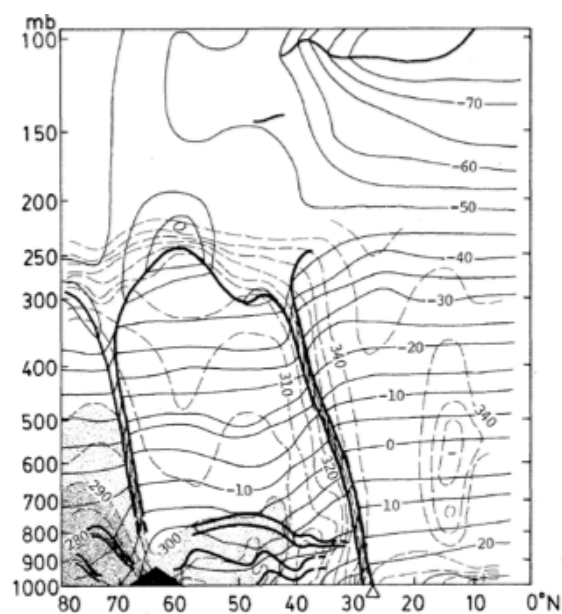


図1 140°Eに沿った鉛直断面(1985年6月1日)

ト気流に伴って形成される亜熱帯前線であることを明らかにした(図1)。ヤマセは、この Pm 気団が海洋からの加熱により気団変質を起こして北日本の太平洋沿岸に達した時に低温・寡照をもたらす現象である(菅野,1993a; 1993b)。

著者は、東北地方に展開する空間的に詳細なアメダス気象データおよび高層気象観測データを用いた多変量解析により、ヤマセを7つに分類し、それぞれの類型ごとの低温分布、夏季の出現パターンと冷夏の特徴について取りまとめた(Kanno,1997)。また、アメダスおよび現地気象観測データを用いて、農業に直接的に影響を及ぼすメソスケールでのヤマセの実態を明らかにした(菅野ほか,2000)。

ヤマセ予測に特化したメッシュ気象情報システムの開発

ヤマセによる農作物への影響を評価・予測するためには、詳細な気象要素の分布を把握する必要がある。そこで、東北地方のアメダス日データを目的変数、標高や地形因子、海岸からの距離等を従属変数として、日々重回帰分析を行い、ヤマセの吹走に合わせた1km四方メッシュ気温データの自動作成システムを開発した(菅野,1997)。その後、2003 年の大冷害を受けて、それまで運用されていた東北地方水稻冷害早期警戒システムを高度化したが(菅野,2008a)、それは、先だって開発した1km メッシュ気温データに1km メッシュ気象予測データを加え、1週間先まで

の低温予測のほか、病害(イネいもち病、イネ紋枯病)発生予測情報等を併せて提供するものになった(図2)。この新たなシステムでは、地図情報を Google マップとし、ユーザーが自分の圃場の位置を入力し、水稻の作付け品種や移植日を入力することで、その地点の気象経過に応じた生育状況を把握できた。また、同様に自分の圃場スケールで病害の発生予測情報も活用できた(大久保ほか,2015; 紺野ほか,2015)。本システムでは、気象データの利活用を課題としていた気象庁および岩手県立大学ソフトウェア情報学部との共同研究を通じて、産学官の連携を図ることができた。また、ユーザー数も東北地方で 500 名以上をカウントし、季節を通じて有意義な農業気象情報を提供してきた。現在は、東北地方向けには提供情報量を縮小した農業気象情報を東北農業研究センターHP から提供している(<https://www.tarc-agrimet.affrc.go.jp>)ほか、農研機構では全国を対象としたメッシュ農業気象データシステムを新たに構築しており、暖候期の低温のほか、近年顕著になっている高温についても有意なデータ提供をしている(https://amu.rd.naro.go.jp/wiki_open/doku.php?id=start)。

地球温暖化と将来のヤマセ

北日本の夏季の天候に大きな影響を持つオホーツク海高気圧は、偏西風の蛇行による寒気の南下とともに、赤道太平洋西部域の対流活動のエネルギー伝播によるロスビー波(PJ パターン)の相互作用によって強化される(菅野,2008b)。そのため、特に 1980 年代～2000 年代前半にかけて、ENSO(エルニーニョ・南方振動)と北日本の夏季の天候とは密接に関係していた(Kanno,2004)。例えば、1993 年および 2003 年の大冷害の翌年は一転して暑夏となったが、これはエル・ニーニョおよびその後の南シナ海における海面温度の東西コントラストで説明できる。

また、1998 年を境として、それ以降、北日本の夏季天候に特徴的な変化が現れ、4 月と 8 月の気温に強い負の相関関係がみられるようになった(Kanno,2013)。これは、4 月と 8 月に日本付近に吹走するジェット気流の位置および強度が密接にリンクしており、4 月に北日本に寒気をもたらす年にはジェット気流は本州南岸付近で強く(4 月低温)、8 月にはジェット気流の北上で熱帯気団の北上をもたらした(8 月高温)、逆に 4 月が高温の場合は本州南岸のジェット気流は弱く、8 月にはジェット気流は北上せず、北日本に低温をもたらすことがわかった。この関係は 1998 年頃から顕在化しており、England et al.(2014)の指摘する負の IPO (Interdecadal Pacific Oscillation)の開始と一致しており、同時期は温暖化の停滞(hiatus)の開始と一致している。すなわち、ラニーニャモードが強まり、太平洋熱帯海洋が大気の大熱を吸収していたため、地球の気温上昇が鈍化したと考えられている。200hPa 高度場と海面温度(SST)に特異値分解(SVD)を施したところ、それらの相関は 1998 年頃を境として不連続的に上昇していた。これらから、1998 年以降

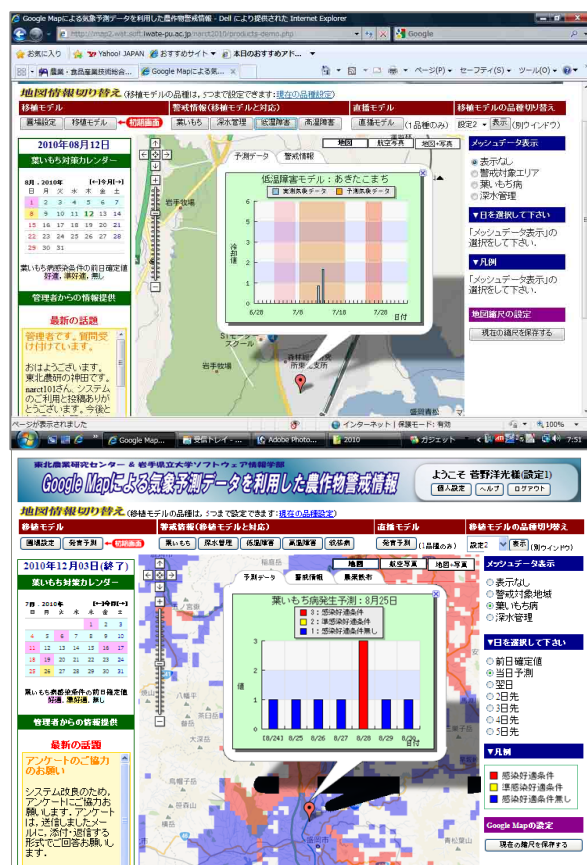


図2 Google マップウェブ早期警戒システム

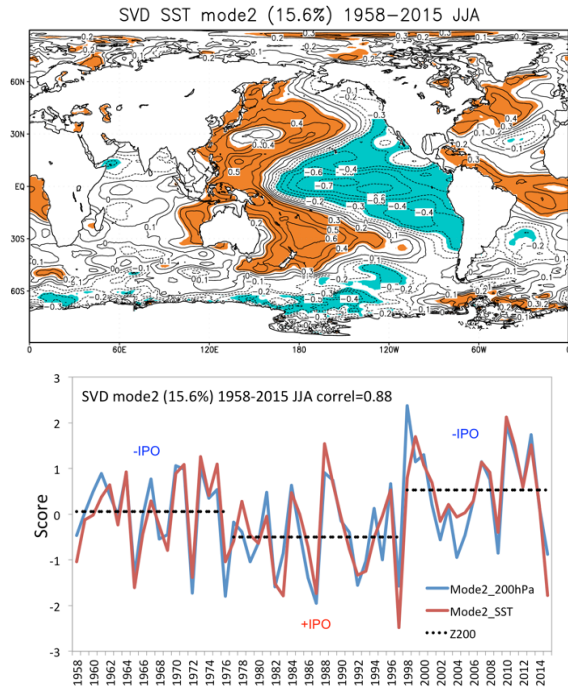


図3 200hPa 高度と SST に SVD 解析を行った結果 (1979~2015 年 6 月~8 月). 上)モード 2 の SST の異質相関マップ、下)SVD 解析のモード 2 の時間変化

は、ENSO による SST パターンと中緯度の高度場とが連動して北半球の大規模場に影響を及ぼしていることがわかった(図3)。

また、気候モデル(MIROC5, MRI-CGCM3)を用いて、将来のヤマセの出現予測を行った(Kanno et al., 2013)。ヤマセの吹走頻度は、PDWS インデックス(Kanno,2004)を用いて算出した。その結果、2100 年まで、北日本の夏季の気温は上昇を続ける一方で、ヤマセも現在気候とあまり変わらない頻度で出現していることが予測され、それに対応した気温低下が認められた(図4)。すなわち、地球温暖化で北日本の気温が上昇し、それに合わせて農業も適応させていった場合、ヤマセによりもたらされる低温は、気温絶対値は現在よりも高くとも、将来気候下で栽培されているイ

ネなど農作物にとっては障害になる可能性があると考えられる(Kanda et al., 2014)。

菅野(1993a)による判定基準を用いてヤマセの最近の発現状況をみると、2020 年までは、1シーズン(6 月~8 月)に 20 日~30 日程度ヤマセが吹走していたが、2021 年以降急減し、2023 年は 7 日、2024 年は 8 日と非常に少なくなっている(図5)。両年は北日本の夏季気温偏差で+3℃以上と高温で、地球温暖化の顕在化とともに、北日本近海の SST が高温になっており、ヤマセが吹走しにくい状況になりつつあることが示唆される。

まとめ

北日本に冷夏・冷害をもたらすヤマセについて、主に気団気候学の視点から研究を進めてきた。かつては、梅雨前線は北の海洋性寒帯気団(Pm)と南の海洋性熱帯気団(Tm)との間に形成される寒帯前線であると認識されていたが、詳細な気団解析の結果、梅雨期の Pm 気団は高さが低く、前線の北方で気団変質していること、梅雨前線は上空の亜熱帯前線に伴って形成される亜熱帯前線であることが明らかとなった。ここで、変質した Pm 気団が北東風とともに侵入して北日本に低温・寡照をもたらすのがヤマセである。

ヤマセはそのグレードによって局地的な低温や大規模な冷夏・冷害を引き起こすが、それらはエルニーニョ・ラニーニャ現象や気候のステージによって影響される。これはすなわち、ヤマセをもたらすオホーツク海高気圧が太平洋西部熱帯域の対流活動のエネルギーをロスビー波経路で受けているため、ヤマセは決して局地的な現象ではなく、地球規模で引き起こされる現象であることがわかる。そのため、中長期的な時間スケールで認識される気候変動・気候ステージとの関連は明確であり、グローバルな視点での解析・把握が必要である。

筆者は、ヤマセと農業被害との関係を明らかにするべく、東北地方メッシュ気象データの開発、それを実用的に運

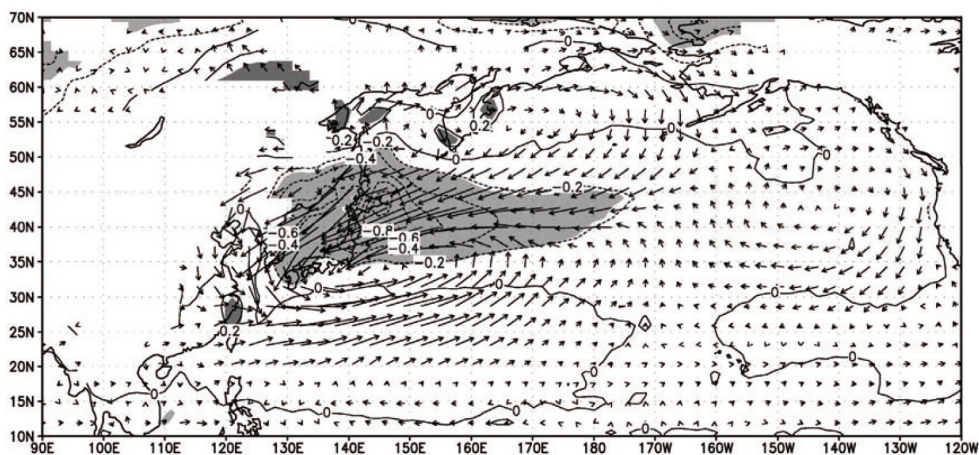


図4 MIROC5 を用いた PDWS(ヤマセインデックス)と 1000hPa 気温および風の回帰(2006-2100 年 6 月~8 月)

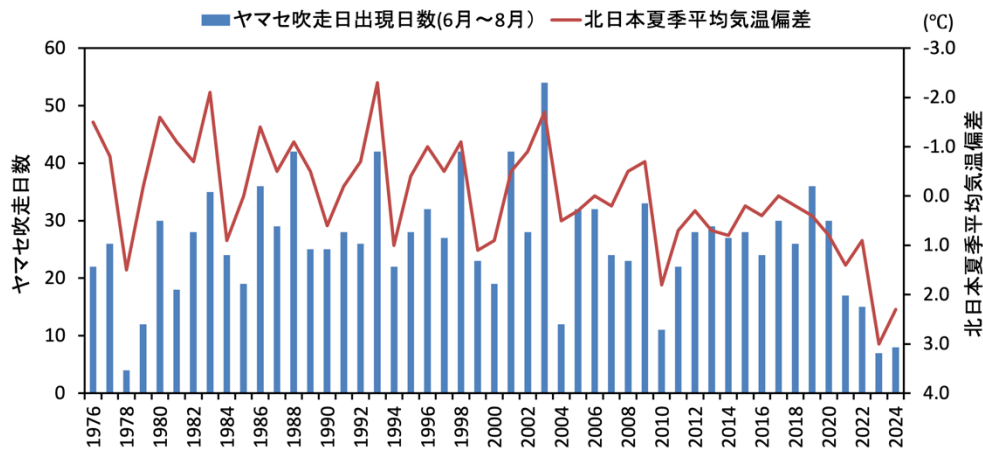


図5 ヤマセ吹走日数と北日本夏季(JJA)平均気温偏差との関係(1976-2024 年)

用するウェブシステムを構築した。1km メッシュで圃場の含まれる高解像度の情報が得られ、気象予測データも計算に入れてイネの成長予測や病害発生リスク情報を提供した。現在は、農研機構から全国に展開するメッシュ農業気象システムから詳細な農業気象情報が提供されている。

将来の気温上昇下でも、ヤマセは現代気候とそれほど変わらず吹走することが予想されている。その際のヤマセの気温絶対値は高くなっているものの、気温上昇に合わせて農業技術が進展している場合、相対的な低温による被害が発生する可能性がある。気候変動の監視とともに、ヤマセに関する研究は将来にわたって必要であると考え。

謝辞

今回の受賞に際し、格別のご配慮を賜りました日本農業気象学会会長の富士原 和宏先生、副会長の荊木 康臣先生、広田 知良先生をはじめ、関係の先生方に厚く感謝の意を表します。私の研究の発端は、もうお亡くなりになりました、東京都立大学名誉教授の前島 郁雄先生のご指導によるものです。ここで改めまして厚く御礼申し上げます。

引用文献

- England, H. M., and Coauthors 2014: Recent intensification of wind-driven circulation in the Pacific and the ongoing warming hiatus. *Nature Climate Change*, **4**, 222-227.
- Kanda, E., H. Kanno, S. Okubo, T. Shimada, R. Yoshida, T. Kobayashi, and T. Iwasaki 2014: Estimation of cool summer damage in the Tohoku district based on the MRI AGCM. *Journal of Agricultural Meteorology*, **70**, 187-198.
- 菅野洋光 1988: 東アジアにおける梅雨期の寒帯気団. 地理学評論, **61A**, 615-631
- 菅野洋光 1991: 北極域からユーラシア大陸東部中高緯度における気団の季節変化. 地理学評論, **64A**, 225-243.
- 菅野洋光 1993a: 青森県八戸におけるヤマセと海風の気温・湿度の差異とその季節変化. 天気, **40**, 751-757.

菅野洋光 1993b: 東北地方における 1993 年冷夏と冷害の実態—大気およびヤマセの構造—. 農業気象, **49**, 189-192.

Kanno, H. and J. Matsumoto 1993: Seasonal phase lock of temporal and spatial variations of the lower cold air in the winter northern hemisphere. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **71**, 111-122.

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.

Kanno, H. 1997: Classification of the Yamase (cold northeasterly wind around northeastern Japan) based upon its air-mass vertical structures. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **75**, 1053-1071.

菅野洋光, 徐 健青, 小沢 聖 2000: ヤマセと海風の地域的な気象特性と中山間地(岩手県久慈市～山形村)への侵入. 農業気象, **56**, 11-23.

Kanno, H. 2004: Five-year cycle of north-south pressure difference as an index of summer weather in Northern Japan from 1982 onwards. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **82**, 711-724.

菅野洋光 2008a:「気象予測データを利用した農作物被害軽減情報サービス」の開設. 農業および園芸, **83**, 241-249.

菅野洋光 2008b: 北日本の冷夏とグローバル気候システム変動. 地学雑誌, **117**, 1077-1093.

Kanno, H., M. Watanabe, and E. Kanda 2013: MIROC5 predictions of Yamase (cold northeasterly winds causing cool summers in northern Japan). *Journal of Agricultural Meteorology*, **69**, 117-125.

Kanno, H. 2013: Strongly negative correlation between monthly mean temperatures in April and August since 1998 in Northern Japan. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **91**, 355-373.

紺野祥平, 大久保さゆり, 菅野洋光, 福井 真, 吉田龍平, 岩崎俊樹, 小林 隆 2015: アンサンブルハインドキャスト実験結果を用いたイネ葉いもち感染確率予報の精度検証. 天気, **62**, 759-764.

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察モデル(BLASTAM)の検証. 天気, **62**, 5-15.

沖縄地域における農作業システム開発と農作業解析

鹿内 健志

琉球大学 農学部

要旨

沖縄のサトウキビ栽培において、農業の生産性向上を目指し、情報技術を駆使した農作業システムの開発を行った。ドライブレコーダ、GNSS、Web カメラを組み合わせた農作業記録システムを開発し、作業位置情報を GIS で解析して作業効率を分析した。沖縄の小規模ほ場が主体の地域における農作業の効率性について考察した。さらに、農業生産法人の農作業効率を向上させるために、農作業プロセスを数理モデルで記述し、複数のほ場に作業機械と労働力を効率的に割り当てるスケジューリング手法を構築した。これにより生産法人が管理する複数のほ場における複雑な制約条件を満たし実行可能な最適スケジュールを作成することが可能となった。

キーワード

サトウキビ, 機械収穫, 作業効率, 農作業計画, 小規模圃場

緒言

サトウキビは南西諸島地域の農業における基幹作物であり、国産の甘味資源としても重要である。しかし、高齢化や担い手不足などによって、作付面積、生産量ともに減少傾向にあることから、当地域では機械収穫体系の導入が進められ、農地の集積や農作業の受委託における効率的で安定した生産法人等による機械化経営が求められている(鹿内 2023)。

特に機械収穫体系の導入を進めているが、分散して面積も異なるほ場に対して、効率的な作業が困難となっている。効率的な機械作業を進めるためほ場毎の作業実態に基づいた作業計画が求められる。そのためには作業機の作業面積、作業内容と作業時間などの作業履歴を記録し、データを分析しながら効率的な作業計画を考えるべきである(Guan et al., 2006)。そこで筆者らは、情報技術を駆使した農作業情報記録システムの開発を行った。ドライブレコーダ、GNSS、Web カメラを組み合わせたシステムを開発し、作業位置情報を GIS で解析して作業効率等を分析した。さらに、生産法人の農作業の効率向上を図るために、ペトリネットと呼ばれる数理モデルで農作業プロセスを記述した。生産法人で課題となる作業のスケジューリングと農業機械などのリソース割り当てをモデル化し効率的な作業計画の策定を行った。生産法人では複数の圃場を扱い、作業ではトラクタなどの農業機械と従業員などの労力が複数種類の資源として扱われ、これらを農作業の順序関係の中で割り当てるスケジューリング問題として扱い、複雑な制約を満足する実行可能な最適スケジュールを求めることが可能となった。

運送業界で活用されている車載情報システム(デジタルタコグラフ)を沖縄県北部地域のサトウキビ収穫作業を行う小型収穫機に搭載して農作業記録装置として利用した。車載情報システムは時刻、緯度・経度、エンジン回転数に加え、収穫機の操作レバーに近接スイッチを取り付け、サトウキビを裁断するベースカッターの回転の ON-OFF 状態の記録、また、3 台のカメラを設置し、キャビンからの映像及び積み込み部の収納袋の映像を記録した。携帯電話の回線を利用した通信機能により作業位置を遠隔から確認することもできる。収穫機の稼働実態を記録し、エンジン回転数を用いることで収穫機の作業内容を正確に分析することができた。また、GNSS の走行軌跡より収穫機の刈り取り面積を 8%以下の誤差で計測可能で、さらに、画像を用いることで刈り取り量の把握が可能となった。その結果、有効作業速度と畝 1m 当たりの刈り取り質量との関係に相関があり、刈り取り量が多いと、刈り取った茎の切断やトラッシュの処理のため刈り取り速度を上げることができないことがわかった(図 1)(鹿内ら 2015)。

一方、小規模経営が多い沖縄県南部地域で収穫機械化を進めるには、小型の収穫機が必要で、沖縄県で稼働している最も小型の収穫機は 36kw であるが、キャビンがなく、設置スペースにも余裕がないため簡易な記録システムを構築する必要がある。そこで、市販の旅行移動記録用の GNSS と Web カメラ及び Raspberry Pi を用いて時刻、緯度、経度、高度および収穫機の前方向および後方の画像を撮影する記録装置を開発した。1 秒ごとの収穫機の軌跡を解析することで有効作業量、有効作業効率などを明らかにすることができた。また、カメラの映像から、サトウキビの倒伏により、茎の切断が困難で、サトウキビを収穫機内に取り込め

GNSS と車載カメラを用いた農作業解析

ず、刈り取り作業が停止し、作業能率が低下していることが確認でき、有効作業効率への影響程度を明らかにした(図2)(鹿内ら2019;鹿内ら2020)。

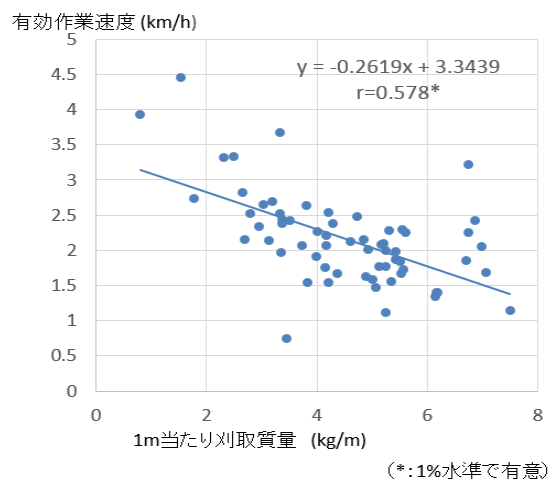


図1 有効作業速度と畝1m当たりの収量との関係



有効作業効率 : 0.46



有効作業効率 : 0.39

図2 サトウキビの倒伏と作業効率

収穫機と搬出機の連携作業と作業能率分析

沖縄県南北大東島のような大きなほ場でサトウキビ収穫作業を行う場合、収穫作業と収穫物を搬出する作業との連携作業が必須となる。大・中型収穫機は伴走・搬出機が収穫機と伴走し収穫作業を行い、伴走・搬出機が満載になった際に作業は中断する。一方、小型収穫機では機体後部

に搭載した収納袋(網袋)に収穫茎を積み込み収納袋が満杯になれば、ほ場内に収納袋を置いて新しい収納袋を受け取る収穫作業方式で、収納袋を回収しほ場外へ運び出すクレーン付搬出機と共に作業を行う。搬出機が新しい収納袋を供給するが、収納袋の供給が遅れると収穫機の作業が中断する。すなわち、収穫作業解析に際しては、単に収穫機の作業性能だけでは正確な予測ができず、正確な予測のためには収穫機と搬出機のほ場内の動きを連携して考慮する必要がある(図3)。



図3 収穫機と搬出機の連携による収穫作業

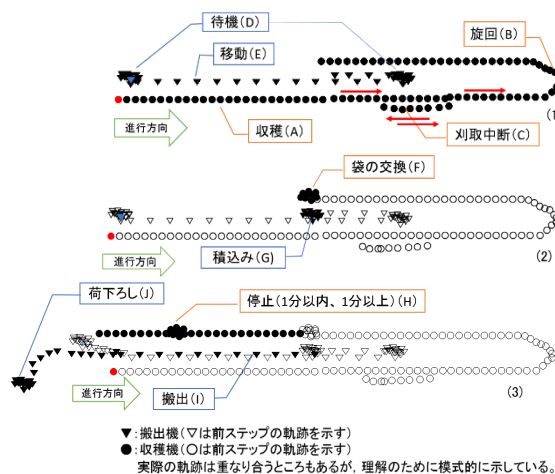


図4 小型収穫機とクレーン付搬出機の軌跡(往復刈)

サトウキビ機械収穫作業において収穫機と搬出機の両方に市販の安価な GNSS を取り付け、両者の軌跡を分析することで、数パーセントの誤差で、収穫機と搬出機の作業実態を分析することができた。収穫機と搬出機の相互の挙動を解析することで、作業の非効率な部分を明らかにし、効率の改善の可能性を示すことができた(図4)。これにより、小型収穫機については搬出機との連携作業を最適化

することで、現在より能率向上できる可能性があることがわかった。また、降雨量と機械稼働の関係から小型収穫機は中型収穫機より稼働率が6%程度高い可能性があることがわかった(鹿内ら2017)。

無人航空機 (UAV) の画像による 3 次元モデルでの草高計測

サトウキビの産糖予想のため、生育茎数、茎長、茎径などが調査されている。草高は茎長を直接示していないが、両者の関連は高く、草高を把握することで栽培管理での活用も考えられる。小型の UAV を使って撮影した画像から対象とする植物の 3 次元モデルを作成し、群落の植物高さを求めることで、きめ細かいほ場観測や栽培管理が可能となる。また、南西諸島のサトウキビ栽培では台風によりサトウキビは茎の倒伏・折損、葉の切断・裂傷等の被害を受ける。台風の被害調査は調査ほ場を任意に選定し、折損茎数や葉片裂傷被害率を調査し算定されるが、3 次元点群データを用いて、ほ場全体の草高の分布を明らかにすることで台風被害を数量化できる。図 5 はサトウキビの生育ステージによって、高さの分布が変化している様子を示す。7~8 月ではまっすぐ成長し 2.5m 以上の分布割合が 5 割まで増えていた。2020 年 8 月 31 日の台風 (T2009) の襲来後の 9 月 4 日は、倒伏により地面がむき出しになったため 0m の点群分布が約 4 割に増えていた。高さの分布も低い位置での分布に変化している。機械による収穫作業では、倒伏により作業能率が大きく低下すること(鹿内ら 2019)や欠株が増えること(玉城ら 2009)が報告されている。ほ場における倒伏状況の程度、またその分布が把握できれば、生産法人のように複数ほ場を管理して作業を行う場合、各ほ場で、収穫作業が困難になる部分を事前に把握し、作業手順の計画や作業時間の正確な予想ができ、適切な作業計画の立案に有益と考えられる(上地ら 2023)。

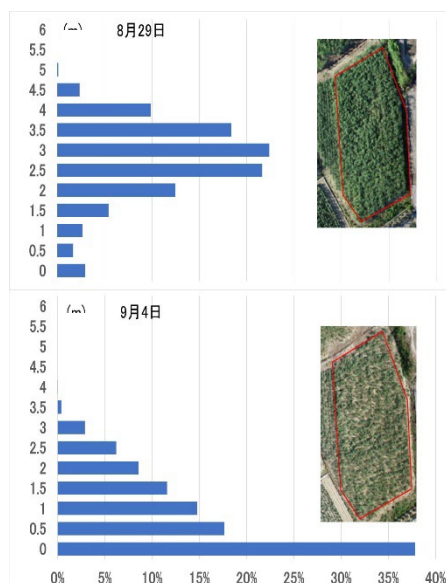


図 5 3次元点群データによるサトウキビの草高分布

ほ場分散がサトウキビ生産性に与える影響

沖縄県中部地域のサトウキビ生産法人を対象としほ場分散とサトウキビ生産性の関係を調査した。この生産法人はサトウキビの機械化栽培を約 16ha の借地ほ場で行っている。この地域はサトウキビ生産地域であるが、土地集積のため広域に渡り借地しており、これらのほ場は南北約 6km、東西約 3km の地区全域に点在している。これらのほ場を合わせると生産法人が作業を行うほ場は 100 筆程度になり、遠距離の費用対効果が小さいほ場についても、規模拡大を目指した生産法人が、無理をして借地し、作業効率の低下を招いていると指摘されている。ほ場分散とサトウキビ生産性の関係を調査するため、ほ場分散を評価する指標として、「周囲ほ場面積」の指標を提案した(図 6)。「周囲ほ場面積」は作業効率や移動効率を評価するための指標である。1日に複数のほ場の作業を行う際、特に適期作業の実施を考える場合には対象ほ場の周囲にはほ場が存在することは効率上、大変有利である。対象ほ場での作業終了後、周囲にはほ場が多数存在すればそれらが次の作業地の候補となる。そのため、対象となるほ場を中心に一定の範囲内にはほ場が集積され集団化されれば効率性の向上が期待でき、生産性向上につながると考えられる(鹿内ら 2007)。

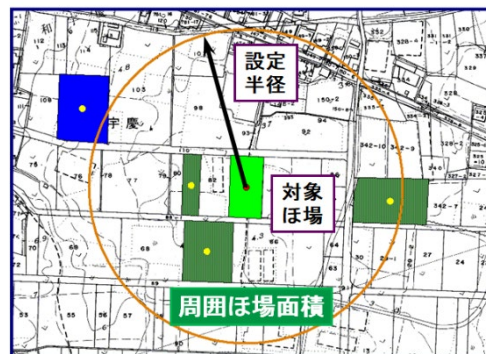


図 6 周囲ほ場面積

農作業スケジューリング最適化システムの構築

サトウキビ栽培の作業は各作業が作物の生育に応じて必要な順序で、必要な資源(農業機械、労働力)を配分して行われる。生産法人の経営では多数のほ場で作業機を移動しながら、作業適期に必要な作業を終了する必要がある。そのためには各ほ場の作業順序や、資源の計画的な配分を計画する必要がある。しかし、多数のほ場を移動しながら農作業を行う作業スケジューリング問題は複雑な問題であるため、短時間に最適な作業計画を立てることは極めて困難である。そこで、正確にかつ効率良く作業計画を立てるために、サトウキビ栽培の作業体系を正確にモデリングするペトリネットモデルを提案した。ペトリネットは複雑

な数式をあまり使わないで、農作業の体系と作業に利用される資源の関係を一つのモデルとしてグラフィカルに表現できるため、直感的に分かりやすく、農家にも理解しやすい。ペトリネットのモデル化に際し、耕うん、植付、施肥などの各農作業をトランジションに、ほ場状況や必要機械の条件などをプレースに、農業機械や労働力をトークンとして設定した(図7)。生産法人に限られた作業機を配置しながら複数のほ場で農作業を行っている事例をペトリネットモデル化し 80 のほ場で作業する場合の作業スケジューリングを行い、機械稼働率を最大化することで大幅な作業日数の短縮が可能であることがわかった(Guan et al., 2007)。

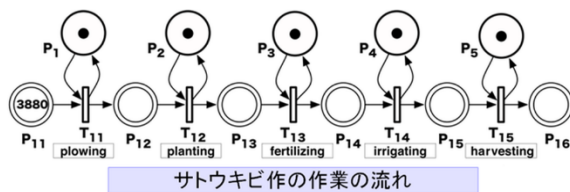


図7 ペトリネットのモデル化

今後の展望

持続的で安定な地域農業を確立するには、農家経営において効率的な計画を立て、計画を円滑に実施するよう管理することが重要である。農作業システムを用い、詳細なデータによる農作業解析を通じた営農支援は地域農業発展のために必要な研究である。今後は、南西諸島の小規模な栽培体系に相応しい農作業システムを地域企業等と協力して開発し、現場への導入を進めて行く必要がある。これらの技術は南西諸島のサトウキビ農業だけではなく、小規模経営であるアジア、アフリカなど他の地域に展開可能であり、日本の南西諸島の技術がグローバルに活用される可能性を秘めている。

謝辞

今回の受賞に際し、ご推薦を頂きました日本農作業学会 大谷隆二会長をはじめ関係の諸先生方に厚くお礼を申し上げます。本研究の遂行にあたり共同研究でご指導・ご協力頂いた上野正実先生、名嘉村盛和先生(琉球大学)、官 森林氏、大嶺政朗氏(故人)(農研機構)、赤地徹氏(故人)、新里良章氏、玉城麿氏(沖縄県)、沖縄県の農家、製糖工場の皆さん(結農業生産法人、三崎農業生産法人、グリーン糸満、大農ファーム、宮城さとうきび農業機械組合、ゆがふ農場、北大東製糖、ゆがふ製糖など)および機器・装置等企業(トランストロン、拓南伸線、国建など)の皆様に深く感謝申し上げます。

引用文献

Senlin Guan, Takeshi Shikanai, Takayuki Minami, Morikazu

Nakamura, Masami Ueno, Hideki Setouchi (2006) Development of a System for Recording Farming Data by Using a Cellular Phone Equipped with GPS, *Agricultural Information Research*, 15(3), 241-254.

Senlin Guan, Hirofumi Matsuda, Morikazu Nakamura, Takeshi Shikanai, Takeo Okazaki (2007) Scheduling for Farm Work Planning Based on Petri Net Model and simulated Annealing, *Agricultural Information Research*, 16(3), 88-195.

鹿内健志 (2023) 沖縄のサトウキビ栽培の機械化と地域企業, *農業食料工学会誌*, 85(6), 359-363, 2023

鹿内健志, 南 孝幸, 官 森林, 上野正実 (2007) サトウキビ生産法人に集積された圃場の分散が生産性に及ぼす影響—地理情報システムを用いた分析—, *農作業研究*, 42(1), 29-36.

鹿内健志, 官森林 (2015) 車載情報システムを用いたサトウキビ収穫機の作業記録と作業能率分析, *農業情報研究*, 24(4), 101-111.

鹿内健志, 大城梨実, 官森林, 赤地徹 (2017) 沖縄県北大東島のサトウキビの中・小型収穫機と搬出機の連携作業に着目した作業能率分析, *農業情報研究*, 26(4), 142-154.

鹿内健志, 世嘉良康太, 官森林 (2019) 沖縄本島南部地域における GPS と車載カメラを用いた小型サトウキビ収穫機の作業分析とその利用可能性, *農作業研究*, 54(2), 85-92.

鹿内健志, 官森林 (2020) GNSS, ドライブレコーダを活用した農作業データの収集, *農作業研究*, 55(3), 163-167.

玉城麿, 鹿内健志, 赤地徹, 安谷屋賛(2009) サトウキビ株出し栽培における欠株状況と補植機の開発, *農業機械学会誌*, 71(3), 104-114.

上地涼子, 鹿内健志, 官森林, 深見公一郎 (2023) 沖縄県南部地域における UAV の RGB 画像を利用した 3 次元モデルによるサトウキビの草高計測, *農業情報研究*, 32(3), 76-87.

畜舎の空気衛生環境制御とスマート畜産技術の開発

池口 厚男

国立大学法人 宇都宮大学

要旨

人に対して病原性がある微生物の約 6 割がズーノーシス (Zoonosis: 人獣共通感染症) に分類され, それら病原体の伝播の一つとしてエアロゾルが関与している. エアロゾルには病原体を含む微生物, ウイルスや悪臭成分が付着しており, 畜産における防疫, 悪臭問題の解決にはエアロゾルの発生, 拡散の抑制が必要であり, それらの動態の解明と抑制技術の開発を行ってきた. また, アニマルウェルフェアに対応した飼養管理に向けて, スマート畜産技術を用いた酪農牛舎システムを開発した. 本稿ではそれらの成果の一部を紹介する.

キーワード

エアロゾル, 畜産, 防疫, 悪臭, スマート畜産

緒言

人に対して病原性がある微生物の約 6 割がズーノーシス (Zoonosis: 人獣共通感染症) に分類されている (Taylor et al., 2001). ズーノーシスの間接伝播には様々な媒介物があるが, エアロゾルもその一つであり, 口蹄疫, 豚繁殖・呼吸障害症候群等を始めとした家畜伝染病の多くはエアロゾルで伝播することが多数報告されている. 近年, 高病原性鳥インフルエンザも鶏舎内で発生すると, 罹患鶏の糞がエアロゾル化して舎内や他の棟, 他の農場へと疾病を拡散することが報告されている (Montserrat et al., 2016). エアロゾルには病原体を含むウイルスや微生物が付着しているだけではなく, 低級脂肪酸等の悪臭成分も付着しており, 悪臭拡散の媒体にもなっている. このようにエアロゾルは防疫, 悪臭という畜産における重要な課題のキーとなる要因であり, その発生と抑制が求められている. 筆者はこの畜舎内空气の衛生環境因子であるエアロゾル・空气中微生物の気流による拡散の動態解明と対策技術に関する研究を 35 余年にわたって実施してきている.

一方, 畜産の課題を解決する一つのアプローチとしてスマート畜産技術が近年導入されてきており, アニマルウェルフェア (AW) に対応した飼養管理技術としても注目されている. 筆者は次世代閉鎖型 LPCV (Low Profile Cross Ventilation) 搾乳牛舎システム, AI による疾病の早期発見技術等を開発し, 普及を推進している. 本稿では上記についてその一部を紹介する.

エアロゾルと空气中微生物, 悪臭

換気とエアロゾル濃度分布

畜舎内のエアロゾル濃度は牛舎 (0.22 mg m^{-3}), 豚舎 (1.87 mg m^{-3}), 採卵鶏舎 (1.53 mg m^{-3}), ブロイラー (9.92 mg m^{-3}) 鶏舎の順に高くなる傾向がある. 気流によってエアロゾルは輸送されるので, その動態は換気方式と密接な関係がある. 拡散の指標として濃度分布の 2 次モーメントを正規化した平方根である拡散半径を提案し, 排気口の位置, 入気流の方向による影響を明らかにした (Ikeguchi, 2000).

エアロゾル濃度と空气中微生物濃度

エアロゾルには空气中微生物が付着しており, 両者の濃度には高い相関が認められている (図 1). これらの濃度変化は換気だけではなく, 畜舎内作業による家畜の行動によっても大きく変わる (図 2). これらのデータを多数収集し, 簡易で低コストな空气中微生物濃度センサーを開発した.

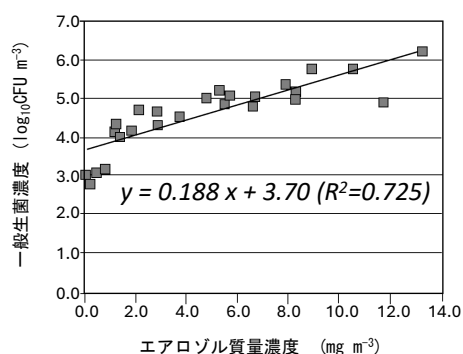


図 1 肥育豚舎内のエアロゾル濃度と空气中微生物濃度の関係

一般に空气中微生物やウイルスは採材してから持ち帰り, 後処理をしてから濃度が分かるため, リアルタイムで濃度を知ることはできない. 紫外線領域のレーザー光を用

いたセンサーは非常に高価であるため実装は不可能である。そこで、リアルタイムで計測可能なエアロゾル濃度から空气中微生物濃度を推察するセンサーを開発し、空气中微生物濃度により、舎内の空気衛生環境を制御するシステムを構築した(図 6)。空气中微生物は一般生菌を指標とした。大腸菌群や黄色ブドウ球菌をはじめとして多くの細菌群を含んでいるためである。

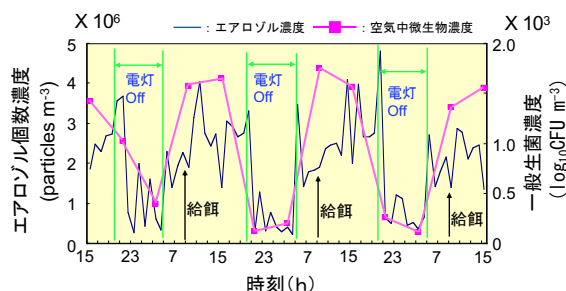


図2 採卵鶏舎内のエアロゾル濃度と空气中微生物濃度の時系列

空气中の指標ウイルスの探索

病原ウイルスを含め畜舎空气中的の家畜由来ウイルスについて調査した報告は少なく、畜舎空氣の衛生指標となるウイルスは明らかになっていなかった。そこで豚舎内を対象に空氣衛生指標となる豚由来ウイルスの探索を目的として、換氣方式や飼養形態の異なる7農場を対象に排出由来の異なる9種類のウイルスを調査した。ワクチンプログラムに影響されにくく、どの農場でも検出率が高く、環境抵抗性も強く、遺伝子型が少ない豚サペロウイルス(PSV)が指標として最適であることを明らかにした。この際に、1stPCRの増幅産物を鋳型としたNested-PCR(2ndPCR)を再度実施することにより検出感度を向上させる検出系を構築した。

エアロゾルの畜舎外への拡散

舎内で発生したエアロゾルは換氣によって舎外へ拡散する。閉鎖型畜舎であれば排氣口でバイオフィルターを用いトラップすることが可能であるが、開放型畜舎、特に大空間の牛舎では対策が困難である。どのように開放型畜舎から拡散するかを風洞模型実験により定量化した。日本の開放型牛舎は屋根と柱のみの構造が多く、モニター、セミモニター、片流れの3種類の屋根形状が舎外への拡散に与える影響を明らかにした。3種のうちモニターが最も舎内からの排出量が多く、畜舎の長手方向に対して30°の角度の風向が最も排出が多くなることを明らかにした(Ikeguchi and Okushima, 2001)。

また、開放型豚舎間において風下で発生した病原体等の汚染物質は風上にも拡散し、畜舎間の距離によって伝播する濃度が異なることを風洞模型実験で示した(Ikeguchi et al., 2005)。風上の建物で風が跳ね上がり、その後流が風下の畜舎内を通り抜け、風上の畜舎内に入るため、風下の畜舎内の汚染物質が風上の畜舎内に到達する。畜舎間の距離を畜舎の棟高さの3倍以上離す

と発生源濃度の10万分の1となる(図3, 4)。

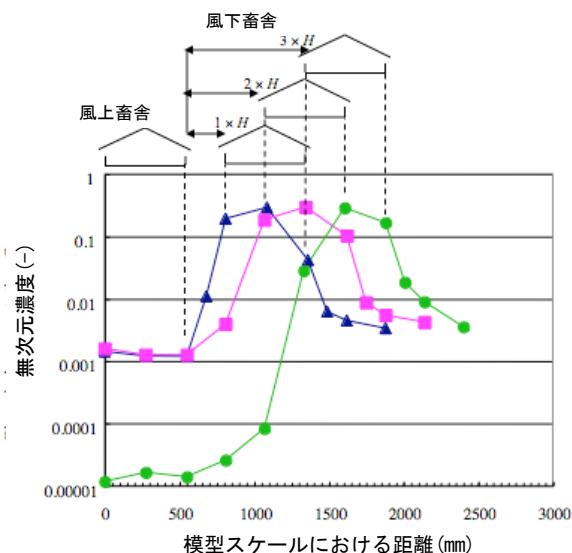


図3 開放型畜舎における風上側への拡散

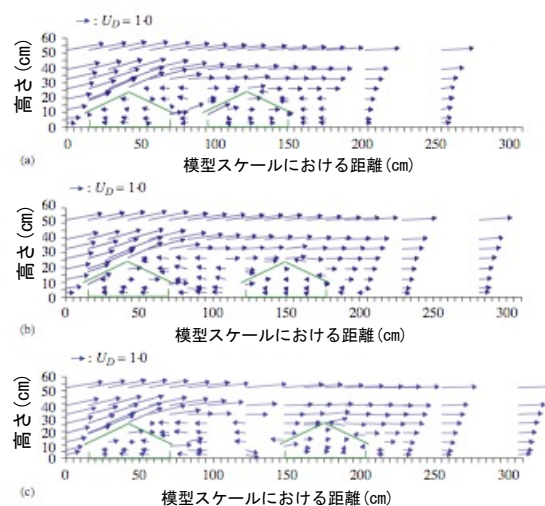
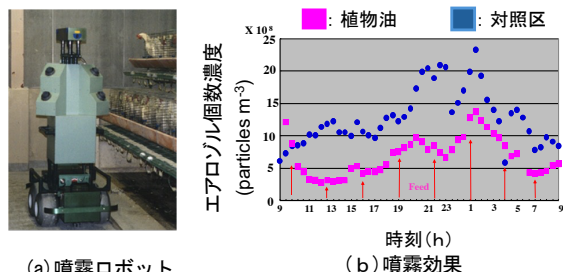


図4 気流分布

対策技術の開発

舎内での対策技術には、①水溶液の散布、②空気清浄装置(光触媒、サイクロン、電気集塵等)、③ふん尿搬出、④リキッドフィード(飼料を液状にすることで、飼料からのエアロゾルの発生を低減)等、多種あるが、確たるものがないのが現状である。その一番の大きな要因はコスト、労力である。舎内での対策はアニマルウェルフェアの観点からも家畜に適切な環境を提供する意味で

最も望まれる対策技術である。筆者は無窓プロイラー鶏舎で植物油をレシチンでエマルジョン化した液体を超音波噴霧する自律走行ロボットを開発し、エアロゾル濃度を約 40 ～ 50% 低減できることを示した (図 5) (Ikeguchi, 2002)。



(a) 噴霧ロボット

(b) 噴霧効果

図5 噴霧ロボットと採卵鶏舎内の低減効果

後述する次世代閉鎖型 LPCV 牛舎システムにおいて光触媒空気清浄装置によって冬季における乳房炎原因菌の黄色ブドウ球菌を 99.9 % 以上低減することができ、他の空气中細菌濃度も優位に低減した (Islam et al., 2022)。

また、前述した空气中微生物濃度センサーで制御する超音波噴霧装置によりオゾン水を細霧し、舎内空气中微生物濃度を低減するシステムを開発し、販売している。



図6 オゾン水超音波噴霧システム

スマート畜産技術の開発

多くのデータに基づいて営農を行うデータ駆動型農業がスマート農業である。スマート畜産が提唱される前から畜産分野では搾乳ロボットを始め、環境制御 (換気制御)、給餌、給水、ふん尿処理などの自動化が進められ

ており、農業の中では最も ICT 化、スマート化が進んでいる分野である。畜産の課題には①担い手の不足、高齢化、②夏季における熱ストレスによる生産性の低下、③防疫、疾病、④輸入飼料への依存、⑤悪臭、等が挙げられることは衆知であり、これらの課題解決の一つのアプローチとしてスマート畜産が位置づけられる。

次世代閉鎖型 LPCV 牛舎システム

酪農に対して上記の畜産の課題を網羅的に解決する一つのアプローチとして 2014 年の農林水産省「攻めの農林水産業の実現に向けた革新的技術緊急展開事業」から 2020 年のスマート農業実証事業を通して、次世代閉鎖型 LPCV 牛舎システムを開発した (図 7)。

①閉鎖型 LPCV 牛舎、②搾乳ロボット、③近赤外装置による乳質検知、④自動給餌機、⑤餌寄せロボット、⑥自動敷料散布機、⑦ふん尿搬出ロボット、⑧個別別行動解析システム、⑨光触媒空気清浄装置、⑩カメラ画像による牛の位置検出に基づく環境制御、これらを統合する⑪酪農クラウドから構成されている。特徴は、要素①の閉鎖型 LPCV システムによって防暑効果が特段に向上し、暑熱下での熱ストレスが軽減され、従来の開放型で送風・細霧の牛舎と比較し、1 日 1 頭あたり平均 6 kg 乳量が増加した。十分に AW に対応した飼養管理法である。画像センシングで牛の頭数を畜舎を空間的に分割したゾーン毎にカウントして、ゾーン毎に環境制御を独立に実施することが可能である。これは畜舎における世界初の環境制御システムである。閉鎖型であることによって、鳥獣の侵入もなく、白血病の媒介中であるサシバエやアブの侵入、牛体への着中の減少によって、本システムでは白血病の陽転率が有意に開放型よりも低くなり、防疫的にも効果があつた。畜舎内作業をほとんど自動化することで、慣行より飼養管理作業時間の 97 % を削減することが可能となった。課題は初期コストである。搾乳ロボットを導入する場合は 300 頭規模の牛舎であれば十分に利益がでる。

初期コストの課題があるため、農林水産省の畜産クラスター関連事業における本牛舎の引き合いは多い。現在ま

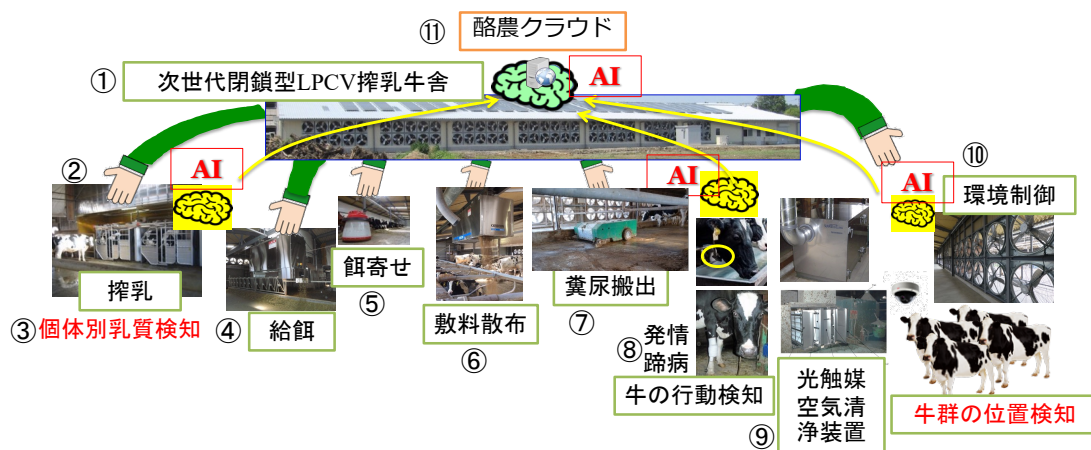


図7 次世代閉鎖型LPCV牛舎システム

でに日本全国で17件建設された。

AIによる疾病の早期発見

畜産分野において家畜の健康状態を非接触、非侵襲でセンシングする技術開発が世界的に進められている。画像、音声によって家畜の状態を把握する技術であるが、社会実装までには至っていない。養牛の場合は個体識別を電磁気的に行い、モーションセンサー等で発情、分娩、異常を検知するシステム、分娩に特化した画像による検知システムは市販されている。酪農の場合、蹄病が生産病のなかで課題となっており、農場の20%から50%の牛が罹患している。他の疾病への感染のカスケードの原因となっており、早期発見が生産性、AWに対して重要である。一般的にはロコモーションを画像で解析して、人間の目では判別できない歩様から検知する方法が取られているが、この方法では罹患してから検知となる。そこで筆者は様々な入力因子のデータセットを検討し、蹄病が発症する1週間前に約70%の正解率で、約60%の再現率のAIモデルによる早期発見システムを開発し、特許申請している。

悪臭の拡散抑制技術

畜産農場の悪臭は長年解決されない大きな課題である。苦情によって廃業に追いやられる農場も多く、また、新規に農場を建設する際にも近隣住民からの反対によって農場を開設できないことが散見されている。そこで、(財)畜産環境整備機構とともに日本型悪臭防止最適管理手法(BMP)を策定した。この中には前述した風洞模型実験の成果を取り入れ、畜舎と畜舎の軒高さ分だけ離れた位置に軒高さの遮蔽壁を設置することで悪臭拡散を抑制する技術が採用されている。

悪臭の抑制は、農場内の清掃が基本であり、できるだけ各箇所を好気的な条件にすることが重要である。一方、芳香消臭剤、オゾン水、次亜塩素酸水等を畜舎内やふん尿処理施設へ散布、消臭ネット、脱臭装置の設置が現場実施されているが、一つの方法だけでは防止することができない。また、このような環境対策は生産性に関係ないので、コストが掛けられないという課題がある。筆者は一つのアプローチとして、臭気の強度より近隣住民の不快感を軽減するシステムを開発し、特許を取得した。これは農場の外に消臭芳香剤を散布するものである。米国においても臭気の拡散予測はブルームモデルを用いているが、これでは悪臭拡散に対して地形の影響が考慮されない。筆者はCFD(Computational Fluid Dynamic)を用いて、農場毎に地形、風向、風速を加味し、農場の位置を中心として数キロメートルにわたる悪臭の拡散を予測した。開発したシステムは、①CFDによる悪臭拡散の予測、②①のデータを基に農場を中心として対策を取りたい対象の市街地等の座標、悪臭強度を入力として出力を風向風速としたAIモデルにより、芳香消臭剤の散布制御パラメータを決定、③ウェザーステーションからのデータ、②のパラメータ、作業時刻等から散布制御、と

いう構成になっている。できるだけ噴霧資材のコストを低減するため、芳香消臭剤と水の2系統を適宜散布する。福島県での実証試験では、住民からの苦情がなくなった。しかしながら、設備のコストがやはり課題であり、苦情低減のコスト評価が今後の課題である。

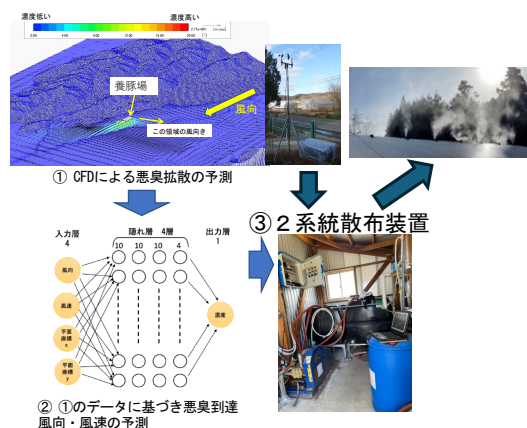


図8 不快感低減芳香消臭剤散布システム

謝辞

この度の日本農業工学会賞受賞に際しまして、格別のご高配を賜りました日本農業工学会渡邊紹裕会長、飯田訓久副会長、理事、監事の役員の皆様に謹んで御礼申し上げます。また、ご推薦くださいました農業施設学会理事会の皆様に厚く御礼申し上げます。

引用文献

- Burt, P. J. A. : Airborne foot-and-mouth virus, *Weather*, **57**, 192-193 (2002)
- Ikeguchi, A., DISTRIBUTION PROPERTIES OF DUST CONCENTRATION IN AN ENCLOSED MODEL LAYER HOUSE, Transaction of the ASAE, 43(2), 399 - 404, (2000).
- Ikeguchi, A. and L. Okushima, AIRFLOW PATTERNS RELATED TO POLLUTED AIR DISPERSION IN OPEN FREE-STALL DAIRY HOUSES WITH DIFFERENT ROOF SHAPES, Transactions of the ASAE, 44(6), 1797-1805, 2001.
- Ikeguchi, A.: Ultra Sonic Sprayer Controlling Dust in Experimental Poultry Houses, the CIGR Journal of Scientific Research and Development, IV, August, 2002.
- Ikeguchi, A., L. Okushima, G. Zhang and J.S..Strom, Contaminant Air Propagation between Naturally Ventilated Scale Model Pig Buildings under Steady-state Condition, Biosystems Engineering, 90 (2), 2 17-226, 2005.
- Islam MD.A., A. Ikeguchi and T. Naide, Effectiveness of an air cleaner device in reducing aerosol numbers and airborne bacteria from an enclosed type dairy barn, Environmental Science and Pollution Research, <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19514-2>, 2022.
- Montserrat, T., Aloson, C., Davise, P.R., Raynor, P.C, Patanayak, D., Torchetti, M. and McCluskey, B.: Investigation into Airborne Dissemination of H5N2 Highly Pathogenic Avian Influenza Virus During the 2015 Spring Outbreaks in the Midwestern United States, Avian Disease, **60(3)**, 637-643 (2016)
- Taylor, L.H., Latham, S.M., Woolhouse, M.E.: Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci, 356, 983-989, 2001.

農業情報マネジメント理論とイノベーションに関する研究

南石晃明

九州大学 名誉教授

要旨

「デジタル・ゲノム革命」の時代を迎え、「情報」に関する科学技術が、学術的のみならず社会的にも重要度を増している。農業分野においても、イノベーションの契機としてデジタル技術が注目されており、スマート農業が政策的にも推進される時代になっている。農業情報マネジメントの重要性が高まっており、その理論、方法論、手法、システムに関する研究のさらなる発展と深化が期待されている。本稿では、筆者らの一連の研究に基づいてその概要を紹介する。農業を特徴づける主要素である不確実性やリスクに対処するためには、情報マネジメントが不可欠である。本稿では、まず営農計画や農作業を対象とし、次に農業経営全体を対象に様々なデジタル技術を融合したスマート農業モデルを取り上げ、情報マネジメントの考え方と具体例を示す。最後に、デジタル技術が契機になり得る農業イノベーションについて述べる。

キーワード

不確実性, リスク, 営農計画, 農作業, スマート農業, デジタル技術

緒言

農業は、気象変動や市場変動など様々な不確実性やリスクに直面しており、安定的で効率的な生産や持続的な経営発展にはリスクマネジメントが重要になる。リスクマネジメントと共に、生産・経営の最適化には、作物や家畜の生産環境、生体情報、農作業情報、経営情報など農業生産・経営に関わる幅広い情報の収集・計測及び可視化・解析、生産・経営目標を達成する農作業や経営戦略の提案、生産・経営実績との比較評価を含む情報マネジメントが必須であり、その理論構築が重要な研究課題である。情報マネジメントの実践には、情報マネジメントを支援する情報システムの研究開発と共に、これを活用できる人材育成が不可欠になる。さらに、こうした情報マネジメントやデジタル技術が農業におけるイノベーションにどのように貢献するのか、どのような課題があるのかを解明することは学術的にも重要なテーマといえる。そこで、筆者らは不確実性下の地域農業・営農計画の統合理論と最適化手法、農作業における農業誤使用防止の方法論と手法、スマート農業モデルの提案実証と情報マネジメント、デジタル技術と農業イノベーションに関する研究を体系的に行ってきた。

不確実性下の地域農業計画と営農計画の統合理論と最適化手法

農業経営が経営目標を最大限達成できる計画は、最適営農計画問題として以前から研究され、線形計画法等による手法等が開発されてきた。農産物価格や作物収量の変動リスクを考慮した手法も開発され、リスクプログラミングと呼ばれてきた。一方で、地域農業を対象とする場合に

は、地域農業の生産出荷計画の内容が市場価格へ影響を及ぼすため、個別の農業経営とは異なる新たな計画手法が必要になる。そこで、筆者は、地域農業が直面する農産物の需要関数を統計的に推定し、需要関数による価格の予測誤差を市場の不確実性として、地域農業計画に組み込む、不確実性下の地域農業計画の新たな理論と手法（確率的 2 次計画法）を開発し(Nanaseki 1989)、応用事例においてその有用性を明らかにした(南石ら 1991)。また、従来の様々な営農計画や農業計画が確率的 2 次計画問題に包摂・統合されることを理論的に示すと共に、国内外の実証的分析(Nanaseki & Moroka 1991 など)を行い、その有効性を実証的に明らかにした(南石 1991)。

さらに、降雨等による農業作業の遅延や中止を含めた様々な営農リスクを考慮した最適営農計画を含めて、不確実性下の営農計画の理論と最適化手法を体系的に示した(南石 1995)。これらの最適化手法を、幅広い研究者や農業改良普及員等が営農現場で活用できるように、パーソナルコンピュータPC で作動する汎用的数理計画システム micro-NAPS や営農技術体系評価・計画システム FAPS と共に、農業技術体系データベース FAPS-DB や青果物市況データベース NAPASS 等を開発公開した(南石 2002, 南石ら 2007a)。FAPS は、農産物価格や作物収量の変動リスクや降雨による農作業遅延中止リスクを考慮した営農計画を作成できるシステムであり、経営資源制約(土地、労働、機械等)のもとで、設定した経営目標やリスク選好に対応した最適計農計画を作成できる(図 1)。具体的には、FAPS はデータ管理と数理計画モデルの生成を行い、micro-NAPS がその最適解を算出し、FAPS がその結果を図表と共に自動的に表示する仕組みとなっている。

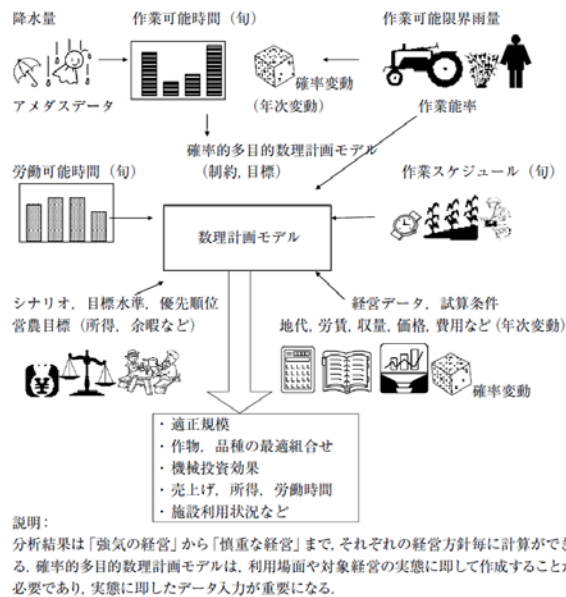


図1 営農技術体系評価・計画システムFAPS概念図

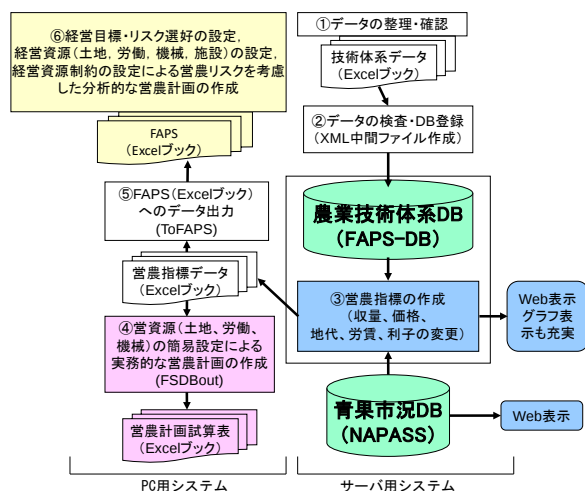


図2 営農指標および営農計画の処理フロー

FAPS-DB は、生産技術および経営に関わる営農全体のデータベースであり、作付けする作物・品種・栽培様式等を選択して作付面積を入力することで、経営収支と共に、必要となる労働時間、生産資材、農業機械台数等などの営農指標を容易に作成し、図表で表示する。これらのシステムは、密接にデータ連携しており、利用場面に応じて、営農指標や営農計画の作成を相互に関連づけて作成できる(図2)。FAPS-DB や NAPASS に蓄積した生産・経営・市場の体系的データを用いることで、新規作物や新規就農者の営農計画を営農現場で容易に作成することが可能になった。全国の農業試験場や農業改良普及センターと連携して、これらシステムの全国規模の公開実証試験を行い、その有効性を実証した。

農作業における農薬誤使用防止の方法論と手法

農作業における農薬の誤使用(違法使用)は、食品安全性、環境汚染、農業者被爆等の様々なリスクを生じさせ、最悪の事態では農業経営破綻にもつながるリスクにもなり得る。そこで、筆者らは、農薬取締法による農薬登録情報に基づいて、農薬誤使防止を支援するための方法論と手法を開発した(南石ら 2004)。

農薬登録情報は、当時、情報システムによる適正使用判定を想定しておらず、第1に、それを可能にするデータベース構築の方法論とデータ変換手法の開発を行った。第2に、営農現場で使用農薬を特定する方法論と農薬容器バーコードを携帯電話のカメラ機能により読み取り、農薬識別を行う手法の開発を行った。第3に、それまでの農薬使用履歴と営農現場で特定した農薬から、その農薬の使用が適正か否かを判定して、携帯電話に表示する手法とシステム(農薬ナビ)を開発した。農薬ナビに実装した防除指針や農薬使用計画の作成支援、農薬適正使用判定、現場警告・履歴記帳等の機能について(図3)、全国規模の公開実証試験を実施し、その有効性を実証した。

さらに、こうした農薬誤使用防止の方法論を社会実装するため、農業協同組合や農業試験場等と連携して、生産流通各段階で活用できる農薬リスク管理システムの開発(南石ら 2006, 図4)および現地実証を行いその有効性を明らかにすると共に、継続的な運営を行う体制を構築した。

また、農薬使用の潜在的環境リスク評価指標の提案を行い、農業生産における農薬使用リスクの評価と回避を可能にする研究を進めた。その成果に基づいて、FAPS-DB で作物・品種・栽培様式を選択することで、その栽培様式で使用する農薬の潜在的環境リスクの評価が容易にできるようになった。

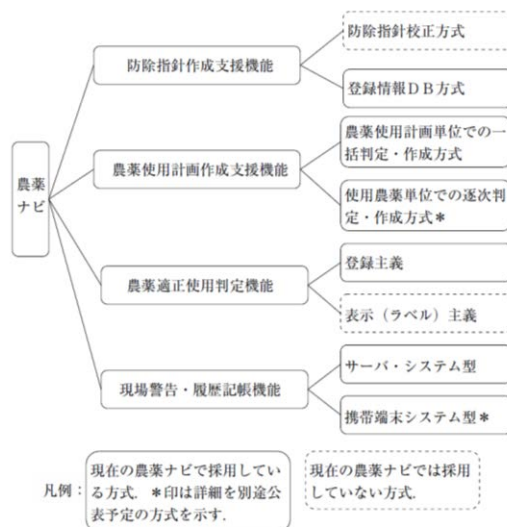


図3 農薬ナビ・システムの機能と採用している方式



図4 生産・流通の各段階で活用できる農業リスク管理システムのフレームワーク

スマート農業モデルの提案実証と情報マネジメント

2010年代には、デジタル技術の進歩・普及により、各種センサーやIT農機が実用化されると共に、営農の可視化や技能継承の支援システムが営農現場で活用できる技術基盤が整った。そこで、筆者らはこれらの技術を融合した次世代営農技術体系をスマート農業モデルとして提案すると共に、先進農業経営（関東Y、近畿F、北陸B、九州Aの4農場）、農機・IT企業、農業試験場等と連携して農匠ナビ1000コンソーシアムを組織し、水田1000圃場を対象とする大規模な現地実証を行った（図5）。

気象や水田水位・水温等の環境情報の収集にはセンサーネットワークを開発し、農作業情報や生体情報の収集には、ICタグ、カメラ映像、GPS位置情報等を営農現場で農作業中に収集できる手法を開発し



図5 水田経営を対象にしたスマート農業モデルのフレームワーク

た（南石ら 2007b, 2013）。収量情報の収集には、収量センサー付きITコンバインを活用し、1000圃場について、上述の多様な情報を収集・蓄積・解析でき、農場全体の営農可視化を可能にする営農可視化システム（FVSクラウド）を開発した。現地実証においては、システムが経営改善の契機となることを明らかにすると共に、収量の圃場間格差が想定以上に大きいことも明らかになった。また、圃場別収量に水田の水位・水温や土壌等が及ぼす効果（Li&Nansek 2021, 表1）を明らかにすると共に、農場

全体の生産量増加には低収量圃場の改善の有効であること等を示し、提案したスマート農業モデルの営農現場における有効性を実証した（南石 2019）。

また、農業人材確保・育成の課題となっている、農業機械操作や育苗作業など熟練が求められる農作業については、農作業映像を活用した技能継承支援システムを開発実証し、その有効性を明らかにした。

さらに、生産や経営に関わる多様なデータを組み合わせ、営農リスクを考慮した最適営農計画をFAPSを用いて作成し、適正規模や最適生産計画における経営者のリス

表1 技術効率性の上下10位圃場の水位と水温（2015年産コシヒカリ）

農場	平均値	ピア 回数	効率 効率	水位（毎日18:30の平均値、mm）				水温（毎日18:30の平均値、℃）			
				S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄
B	効率高い10圃場	24.9	1.000	36.72	22.18	16.43	5.58	23.26	26.23	26.16	23.00
	効率低い10圃場	0.0	0.974	51.68	29.90	12.75	9.55	24.42	26.36	27.39	24.24
	差（高ー低）	24.9	0.026	-14.96**	-7.71	3.68	-3.97	-1.16**	-0.13	-1.23**	-1.24***
Y	効率高い10圃場	18.4	1.000	45.62	19.90	35.82	11.21	24.63	27.54	26.67	22.93
	効率低い10圃場	0.0	0.946	43.45	18.65	39.50	8.19	24.31	26.46	27.94	22.82
	差（高ー低）	18.4	0.054	2.17	1.25	-3.68	3.02	0.32	1.08***	-1.27**	0.11

注：ピア（Peer）はほかの圃場の効率性を評価する参照・模範的な圃場。

***, **: 1%と5%の水準で有意。

S₁: 移植～最分（40日間）、S₂: 最分～出穂、S₃: 出穂後25日間、S₄: 出穂後26日目～成熟。

ク選考（強気、慎重等）の効果や農業用ロボットの導入効果等を明らかにした。分析対象の先進稲作経営は、現状でも最適営農計画に近い営農を実践しており、農業用ロボット導入による規模拡大効果はよりもリスク選好による効果が大いこと等が明らかになった（図6）。また、リスク選好に関わらず、農業用ロボット導入によって、必要労働時間が2～3割程度減少し、省力化に寄与することが明らかになった（図7）。

以上、筆者らの一連の研究成果を体系化することで、デジタル時代における次世代農業経営における情報マネジメント理論の基盤が形成される（南石 2011, 2023）。

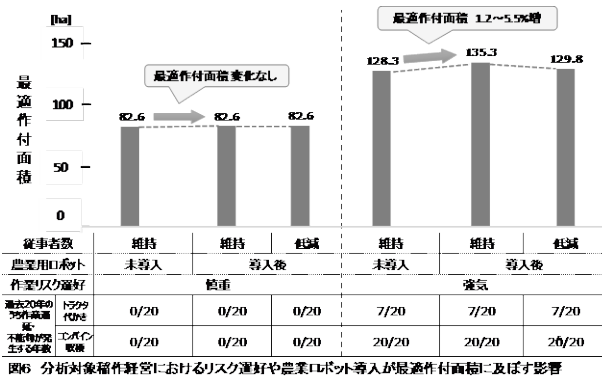


図6 分析対象稲作経営におけるリスク嗜好や農業ロボット導入が最適作付面積に及ぼす影響

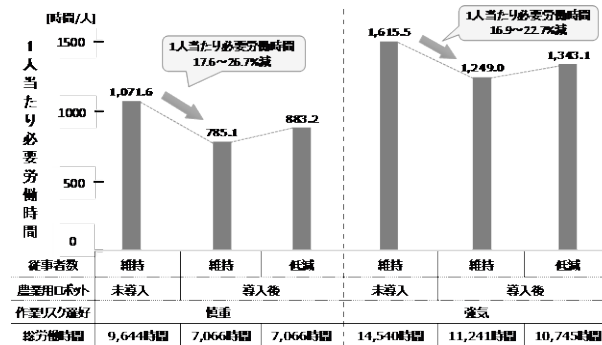


図7 分析対象稲作経営におけるリスク嗜好や農業ロボット導入が必要労働時間に及ぼす影響

デジタル技術と農業イノベーション

デジタル技術は、農業経営改善に有効であり、農業イノベーションの契機になり得るが、営農現場における普及には課題やリスクの懸念もある。そこで、筆者らは、全国の農業法人アンケート、現地実証、現地調査等により、デジタル技術が農業イノベーションや農業経営発展に及ぼす影響を、主な営農類型を対象に、その機会とリスクの両面から明らかにした(南石ら 2022, Nanseki 2023, 南石 2023)。

結語

「デジタル・ゲノム革命」の時代を迎え、「情報」に関する科学技術が、学術的にも社会的にも、その重要度を増している。農業政策においても、デジタル技術の重要性が認識され、2023年6月には「農業の生産性の向上のためのスマート農業技術の活用促進に関する法律(スマート農業技術活用促進法)」が成立・施行された。また、研究面では、現在大きな社会的関心を集めている生成AIをはじめとするデジタル科学技術が急速に進歩し、数年前には想定できなかったスピードで社会のあらゆる面でデジタル革命が進行しつつある。農業イノベーションの契機としても情報マネジメントの重要性が高まっている。本稿で紹介した一連の研究が、この分野のさらなる深化と体系化の基礎となり、農業の持続的発展に寄与すれば、これに勝る喜びはない。

謝辞

今回の受賞に際し、農業情報学会星会長並びに役員の方々に格別のご配慮を賜りました。筆者らの一連の研究の共同研究者、ご協力頂いた皆さまと共に、厚く感謝の意を表します。

引用文献

- Nanseki, Teruaki.(1989)A Stochastic Programming Model for Agricultural Planning under Uncertain Supply-Demand Relations, Journal of the Operation Research Society of Japan, 32(2)200-217.
- Nanseki, Teruaki., Morooka, Yoshinori(1991) Risk preference and optimal crop combinations in upland Java, Indonesia: An application of stochastic programming, Agricultural Economics 5(1) 39-58.
- 南石晃明, 上田泰士(1991)市場不確実性下における主産地の生産出荷計画:-確率的2次計画法による宮崎県産ピーマンの事例分析-, 農業経営研究, 29(1)11-21.
- 南石晃明(1991)不確実性と地域農業計画: 確率的計画法の理論,方法および応用, 大明堂(ISBN: 4470360503).
- 南石晃明(1995)確率的計画法: 不確実性に挑む知恵と技術 現代数学社(ISBN: 4768702279)
- 南石晃明(2002)営農技術体系評価・計画システム FAPS の開発, 農業情報研究, 11(2) 141-159.
- 南石晃明ら(2004)農薬適正使用判定サーバシステムの開発, 農業情報研究, 13(4)301-315.
- 南石晃明ら(2006) 農薬使用リスク管理システムの開発実証, 農業情報研究, 15(4)359-372.
- 南石晃明ら(2007) 農業技術体系データベースと統合化された営農計画支援システム FAPS-DB, 農業情報研究, 16(2)66-80.
- 南石晃明ら(2007) RFID を用いた農作業自動認識システム, 農業情報研究, 16(3),132-140.
- 南石晃明(2011)農業におけるリスクと情報のマネジメント、農林統計出版(ISBN: 4897322103).
- 南石晃明ら(2013)営農可視化システム FVS-PC Viewer の開発—農業技術・技能の伝承支援—, 農業情報学研究, 22(4)201-211.
- 南石晃明[編著](2019)稲作スマート農業の実践と次世代農業経営の展望, 養賢堂(ISBN: 9784842505725).
- Li, Dongpo, Nanseki, Teruaki[Ed](2021)Empirical analyses on rice yield determinants of smart farming in Japan, Springer (ISBN: 9789813362550).
- 南石晃明[編著](2022)デジタル・ゲノム革命時代の農業イノベーション, 農林統計出版(ISBN: 9784897324562).
- 南石晃明(2023)デジタル時代の農業経営学, 農林統計出版 (ISBN: 9784897324791).
- Nanseki, Teruaki[Ed](2023)Agricultural Innovation in Asia: Efficiency, Welfare, and Technology, Springer (ISBN: 9811990859).

青果物品質保持についての農産食料工学的研究

田中 史彦

九州大学大学院農学研究院

要旨

人類の生活基盤となる食料供給システムを強靱かつ持続可能なものにするためには、農産食料工学的アプローチを活用し、青果物の収穫後工程を最適化・高度化することが重要である。この取り組みにより、ムリ・ムダのない貯蔵および流通が実現し、食品ロスの削減と資源利用の効率化がさらに推進される。

本研究では、収穫後の青果物内部で起こる様々な現象を、最新の三次元イメージング技術とマルチフィジックスシミュレーション技術を統合し、さらにマルチスケールで場を連成させる新たなフレームワークを構築することで、仮想空間上で忠実に再現することに成功した。このフレームワークを活用することで、青果物が置かれる周りの環境からの摂動に対する応答を通じて生体としての健全性を評価し、青果物の品質保持の高度化に寄与する革新的な方法論を開発することに成功した。特筆すべき研究成果として、青果物の細胞組織スケールにおける熱・ガス拡散現象を個体レベルにスケールアップするフレームワーク、ならびに、これらの熱物性値の革新的な非破壊三次元分布計測法の概要について述べる。

キーワード

マルチフィジックス解析, マルチスケール解析, イメージング, 非破壊三次元計測, Digital Twin

緒言

近年、高度に進化するイメージング技術は生体内の時空間的な 4D 動態を連続的に解析可能にし、農業食料工学分野においてもその応用が期待されている。一方で、コンピュータシミュレーション技術の急進的な発展も、これまで不可能であったより複雑な場における諸現象を厳密に再現し、新たな多次元データを可視化するための強力なツールになりつつある。食品の品質計測・保持技術はこれらの融合によって飛躍的に進化することは間違いない。本研究の契機となったのは欧州委員会が進めてきた第 7 次研究・技術開発のための枠組み計画 (FP7) による Inside Food プロジェクトである。この事業では、様々な最先端技術の融合によって時間の経過とともに変化する食品の内部構造や、外部環境からの摂動に対する応答として起こる諸現象を厳密に解析することで可視化し、食品の最適保存や品質評価、さらには新食感の創造に活かす試みがなされてきた。今後、この動きは更に加速され、その対象がマイクロ・ナノスケールまで広がるとともに、異なるスケール間の情報を相互に利活用することによって新たな研究のフレームワークが構築されるものと期待されている。

本研究の根幹となる 3D イメージングでは、図1に示すように様々なスケールでのモデル化が行われる。青果物を貯蔵・流通させる施設や冷凍庫スケールのモデル化は CAD 設計ソフトの普及や、AI と LiDAR センサーを組み合わせた 3D カメラの開発により容易になってきた。梱包された青果物では、CAD 技術と 3D レーザースキャナー技術の融合、青果物内部構造を知るためには X 線 CT 技術、細胞スケールでは共焦点レーザー顕微鏡やマイクロフォーカス

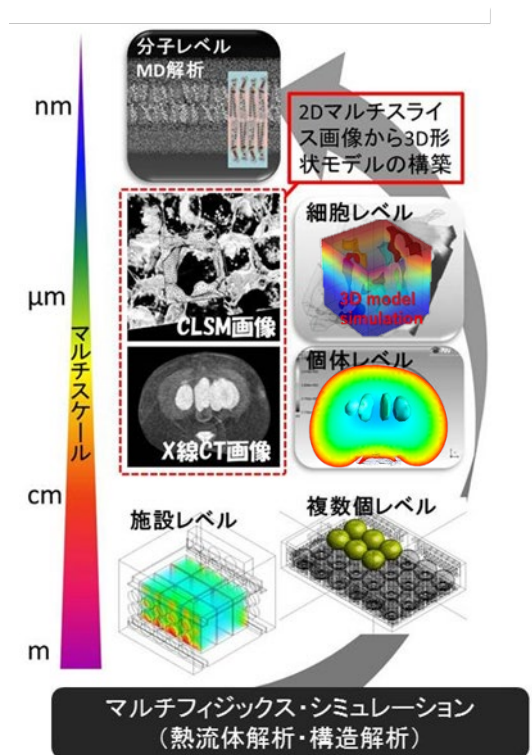


図1 マルチスケール・マルチフィジックスシミュレーションが対象とする研究領域

X 線 CT などの非破壊で内部局所構造を高分解能観察できる技術、さらにナノスケールの観察では AFM など微細構造をトレースする技術が開発され、様々なスケールで 3D イメージが取得できるようになっている。

一方でマルチスケール解析をかなえるための主力なツールとして、CFD (Computational Fluid Dynamics) 法、DEM (Discrete Element Method) 法、そして MD (Molecular Dynamics) 法などが挙げられる。これらは、それぞれ流体の挙動、粒子間の動的相互作用、さらには分子レベルでの物質の振る舞いを詳細に解析することができる。さらに、近年のコンピュータ計算能力の急速な拡大によって、モデル解析では多様な物理現象を連成して解く機能が強化され、これにより複雑な物理的相互作用を統合的に捉えることが可能となってきた。これらの手法と技術を活用することで、異なるスケール間での現象が精密に理解でき、マルチスケール解析の精度と応用範囲が飛躍的に拡大している。

筆者らはこれまで、先進的イメージング技術、CAD 技術、シミュレーション技術の統合により、多くの研究成果をあげてきた。まず、大規模スケールの研究では、冷凍貯蔵施設 (Tanaka *et al.*, 2012; Tanaka and Tanaka, 2018b)、冷凍車・冷凍コンテナなどの輸送機器 (關屋ら, 2018) を対象とする数値シミュレーション解析を行い、青果物が置かれるコールドチェーン環境パラメータの可視化や最適化を行った。また、農産物・食品の腐敗防止と安全確保の観点から、CFD 解析と微生物殺菌モデルを組み合わせた電磁波照射殺菌予測についても研究を行い (Tanaka *et al.*, 2007, 2012, 2016; Trivittayasil *et al.*, 2011, 2013, 2014)、社会実装に務めてきた。さらに、個体レベルにおける青果物内部での熱・物質移動特性を解析した研究 (Kim *et al.*, 2020, 2021) や細胞組織レベルにおける熱・物質移動特性を解析した研究を行い (Tanaka *et al.*, 2018a; 阿部ら, 2023)、加えて、ナノレベルにおいても生物由来材料の弾塑性特性を予測するなど (Van *et al.*, 2025)、数理モデル解析による多岐にわたる物理現象の解明とその応用を進めてきた。これらの成果は、ナノ・マイクロレベルから冷凍施設などの大規模施設の設計に至るまで、幅広いスケールでの研究を支え、食料供給システムの持続可能性と効率向上に貢献している。

ここでは、特筆すべき成果として、青果物の細胞組織スケールと個体スケールを結ぶ連成解析フレームワークとその応用について詳述する。

スケール統合を目指した連成解析フレームワークの構築

高解像度 X 線 CT 装置で取得した青果物細胞組織の連続二次元画像から仮想空間上に立体微細構造を再構築、この領域における化学反応を伴う熱・物質移動を厳密に再現し、逆解析により有効拡散係数を決定する手法を確立した。さらに、微細空間の CT 値計測により非破壊的に有効拡散係数を推算する手法を確立し、ボトムアップ型のマルチスケール解析によって個体レベルでの現象解明へと展開することに成功した。この成果は、様々な外部環境に対応する不均質生体材料としての青果物内部時空間

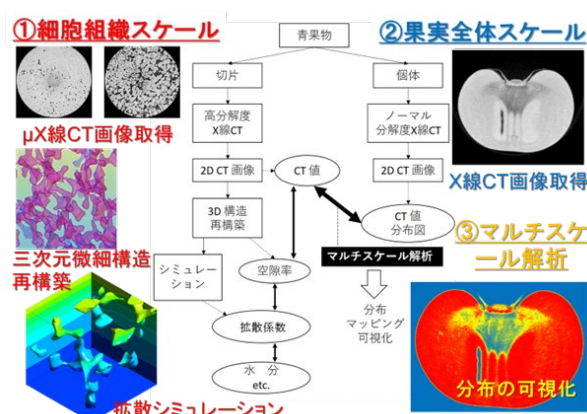


図2 マルチスケール解析のフレームワーク

応答を予測可能とし、より厳密で革新的な品質保持につながるものである。

筆者らによるこれまでの研究では、解像度の異なる X 線 CT 観察によって得られた青果物の両画像データを基に、微細構造モデルによる熱移動解析とマルチスケール画像解析を行うことによって果実全体の空隙率および熱伝導率、ガス拡散係数、水分分布を可視化する手法を提案してきた (Tanaka *et al.*, 2018a; 阿部ら, 2023)。

図2にマルチスケール解析による果実内物性値のリアルタイム可視化フレームワークを示す。本研究は、測定対象となる青果物を X 線 CT 装置によって細胞組織レベルと個体レベルで観察し、X 線の吸収度合いの指標となる CT 値を介して両者間の情報をつなぐものである。つまり、X 線 CT 装置では空気は CT 値は -1000、水は 0 となるのが原則であり、異なる X 線 CT 装置でも原則的には物質によって固有の CT 値が得られることとなる。実際は、X 線源の特性や劣化により CT 値のキャリブレーションが必要であり、これらの影響をキャンセルできるロバスト性の高いアプリケーションの開発が必要となるが、本研究では、基準物質を用いた簡易的なキャリブレーションによる CT 値の補償を行っている。

まず、観察結果を見ると、図2に示す通り、高解像度 X 線 CT 装置によって撮影したカキ果肉の細胞組織画像では、図中の黒い部分がガスを含む空隙、白い部分が水溶液を含む細胞となる。組織が疎な部分では空隙が多く観察されるが、赤道部付近では細胞が発達し、黒い空隙の部分が極端に少なくなる。一方、低解像度の X 線 CT ではカキ果実の内部構造は均一ではなく、ヘタ下部分に密度の低い領域が広がる粗密構造が観察される。これは、例えばカキ果実を冷却する際、あるいは雰囲気中のガス組成を変えた CA 貯蔵を行う際に、内部環境場の局所的な変化を考慮しなければならないことを意味する。異なる解像度を持つふたつの X 線 CT 装置ともに組織の粗密が明瞭に観察された。

以上の結果を基に、筆者らの行ったマルチスケール解析のフレームワークについて解説して行く。

まず、①細胞組織スケールの X 線 CT 計測では、カキ果実の小片を高解像度 X 線 CT 装置 (Skyscan 1172, Bruker) を用いて、X 線源管電圧 60kV、管電流 100 mA、スライス幅 3.24 μm で連続画像を取得し、一辺 0.3 mm 立方体内に含まれるスライス画像の平均 CT 値を算出、また、果肉細胞組織の立体構造をコンピュータ上に再構築し (図 2 左中段: 三次元微細構造モデルの構築)、平均 CT 値を求めた部分と同じ空間の空隙率を求め、平均 CT 値と空隙率 (空洞の存在比) の関係を求めた。これにより、ある空間の平均 CT 値が分かるとその空間の空隙率が間接的に推定できることとなる。さらに、ここで構築した 3D モデル内で熱やガスの拡散シミュレーション (図 2 左下段) を行えば、例えば、熱移動が空隙率にどのように依存するかが分かり、空隙率と熱伝導率の関係が明らかになる。空隙が細胞組織内の熱移動に与える影響を調べるため、空隙率が異なる立方体サンプルを準備し、非定常熱移動解析を行うことで均質材料を仮定した有効熱伝導率を算出、空隙率との関係を整理した。これにより、空隙率を経ることにより CT 値から有効熱伝導率が推算されることとなるわけである。また、文献等から有効熱伝導率と水分の関係が明らかな場合には、CT 値から間接的に水分の値が推算可能となる (Tanaka *et al.*, 2018a, c)。

次に、②果実全体スケールの研究では、実験動物用 X 線 CT 装置 (Latheta LCT-100, 日立) を用いて、X 線源管電圧 50 kV、管電流 1 mA、2D 画像取得スライス幅を 2 mm として CT 画像を取得し、果実断面の CT 値分布を可視化した。さらに、①と②で取得した両画像間の CT 値を介して、両者間をつなぐ③マルチスケール解析フレームワークを構築した。

非破壊三次元物性値分布計測法の開発

マルチスケール解析では、両スケールでの CT 値間のキャリブレーションを行うことで、互いの CT 値データが双方向的に連結することとなり、①で得た CT 値-空隙率-熱伝導率-水分の関係を基に、②で得た連続した X 線 CT 画像から空隙率と熱伝導率、水分分布等の 3D 可視化が可能となった。

図 3 にカキ果実の CT 値 (a) データに基づき空隙率 (b)、熱

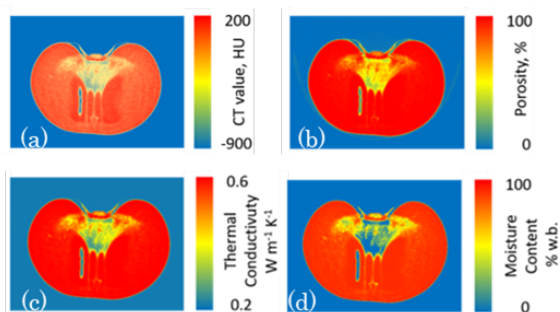


図 3 非破壊三次元物性値分布計測

伝導率 (c)、水分 (d) の分布を可視化した結果を示す。これらの分布が非破壊的に計測できる点で本手法の品質評価等への応用性は高く、革新的技術であると確信する。

筆者らはこの計測法を用いて、青果物の貯蔵期間における品質変化を測定し、密度や熱伝導率などの各種物性値の時空間分布や蒸散における水分の移動経路、1-MCP 処理や可食コーティング処理を施した際の構造変化の抑制効果を明らかにした (Tanaka *et al.*, 2018c; Karmoker *et al.*, 2019; Phuong *et al.*, 2023, 2024a,b)。

非均質材料でのマルチフィジックス解析

前述の非破壊物性値測定で得られた各物性値データは、対象物内の三次元的な位置に対応する座標に基づいて格納される。このため、様々な物性値を空間に割り振ることができ、複雑な非均質材料として計算領域の定義が可能となる。これによって、外部からの摂動に対する青果物の応答をより厳密に予測することが可能となる。

図 4 は MA 包装したカキ果実を大気の下で開封した際の二酸化炭素ガスの果実内からの放出過程を示した例であるが、ヘタ下は組織が粗であり、他は密であるためガス拡散係数の高い部分から次第に二酸化炭素が放出されていくことが分かる。ガス拡散係数は細胞内に比べ空隙で約 4 桁程度高くなる。このため空隙が主たる移動経路となり、ガスの流れは細胞と空隙が並列に並ぶ移動モデルに近くなる。同時に温度移動についても解析したが、ここでは省略する。この他、カキ果実をコーティングする際に内部酸素濃度が嫌気呼吸に切り替わらない程度のガス透過性を付与する条件についても明らかにしたが (阿部ら, 2023)、これは不均質性を考慮して初めて可能となった成果である。



図 4 MA 貯蔵されたカキ果実を大気中に放置した際のガス拡散係数分布を考慮した CO_2 ガス移動予測 (薄青色: 濃度比初期の 0.8 以下)

今後の展望

筆者らは青果物のさらなる高品質流通や食品ロスの削減に向けたフードチェーンシミュレータを作成中である。青果物が流通過程で遭遇する様々な環境条件において、品質がどのように変化・劣化していくのかを仮想空間上で予測するため、AIやDigital Twin技術に基づくモデリングに取り組んでいる。トラック輸送や船舶輸送など、異なる輸送形態や経路で配送される青果物が、消費者の元に届くまでにどのような状態になるのか、また、特定の輸送条件下で商品価値を損なうことなくどこまで運ぶことができるかなどを評価し、スマートフードチェーンの構築に寄与したい。

謝辞

本研究の根幹は学生時代に学んだ非平衡系現象のモデル解析にあり、故・村田敏先生にご指導を受けたことがその契機となった。マルチスケール解析に至るまでには長い道のりがあり、これら一連の研究を遂行するにあたっては農業食料工学会をはじめ、多くの方々から多大なるご指導、ご助言を賜った。ここに記して感謝の意を表す。

引用文献

- 阿部伶香, 田中良奈, 田中史彦, 青果物細胞組織内のガス移動解析と有効拡散係数の推算, アグリバイオ, 7(12), 62-64 (2023).
- Karmoker, P., Obatake, W., Tanaka, F., Tanaka, F., Visualization of porosity and thermal conductivity distributions of Japanese apricot and pear during storage using X-ray computed tomography, Engineering in Agriculture, Environment and Food (EAEF), 12(4), 505-510 (2019).
- Kim, S.H., Nishihara, C., Tanaka, F., Tanaka, F., Simulation of temperature profile and moisture loss of fresh cucumber fruit and visualization of commercial storage duration, Food Science and Technology Research, 26(4), 459-468 (2020).
- Kim, S.H., Tanaka, F., Tanaka, F., Drying kinetics and determination of effective moisture diffusivity and activation energy in cucumber pericarp tissues using thin-layer drying models, Food Science and Technology Research, 27(2), 181-192 (2021).
- Phuong, N.T.H., Koga, A., Nkede, F.N., Tanaka, F., Tanaka, F., Application of edible coatings composed of chitosan and tea seed oil for quality improvement of strawberries and visualization of internal structure changes using X-ray computed tomography, Progress in Organic Coatings, 183, 107730 (2023).
- Phuong, N.T.H., Tanaka, F., Wardana, A.A., Van, T.T., Yan, X.R., Nkede, F.N., Tanaka, F., Persimmon preservation using edible coating of chitosan enriched with ginger oil and visualization of internal structure changes using X-ray computed tomography, International Journal of Biological Macromolecules, 262, Part 1, 130014 (2024a).
- Phuong, N.T.H., Van, T.T., Nkede, F.N., Tanaka, F., Tanaka, F., Preservation of strawberries using chitosan incorporated with lemongrass essential oil: An X-ray computed tomography analysis of the internal structure and quality parameters, Journal of Food Engineering, 361, 111737(2024b).
- 關屋まどか, 田中良奈, 田中史彦, 内野敏剛, 藤田 明, 加藤信治, 谷口雅巳, 数値流体力学(CFD)を用いた二温度帯コンテナ設計指針の検討, 日本冷凍空調学会論文集, 35(3), 211-218 (2018).
- Tanaka, F., Chatani, M., Kawashima, H., Uchino, T., Hamanaka, D., Modeling of infrared thermal treatment of figs (*Ficus carica* L.). Journal of Food Process Engineering, 35(6), 821-828 (2012).
- Tanaka, F., Imamura, K., Tanaka, F., Uchino, T., Determination of thermal diffusivity of persimmon flesh tissue using three-dimensional structure model based on X-ray computed tomography, Journal of Food Engineering, 221, 151-157(2018a).
- Tanaka, F., Nashiro, K., Obatake, W., Tanaka, F., Uchino, T., Observation and analysis of internal structure of cucumber fruit during storage using X-ray computed tomography, Engineering in Agriculture, Environment and Food (EAEF), 11(2), 51-56 (2018c).
- Tanaka, F., Nashiro, K., Trivittayasil, V., Uchino, T., Simulation of UV-C dose distribution and inactivation of mold spore on strawberries in a conveyor system. Food Science Technology Research, 22(4), 461-466 (2016).
- Tanaka, F., Tanaka, F., (Ed. by Sun, D.-W.), Chapter 5 Improving the performance of partially loaded cold store by CFD in "Computational Fluid Dynamics in Food Processing, 2nd new edition", Taylor & Francis Ltd., ISBN: 9781138568310, pp.105-119 (2018b).
- Tanaka, F., Verboven, P., Scheerlinck, N., Morita, K., Iwasaki, K., Nicolaï, B. M.: Investigation of far infrared radiation heating as an alternative technique for surface decontamination of strawberry. Journal of Food Engineering, 79(2), 445-452 (2007).
- Trivittayasil, V., Tanaka, F., Hamanaka, D., Uchino, T., The inactivation model of mold spores by infrared heating under non-isothermal condition, Food Science and Technology Research, 19(6), 979-982(2013).
- Trivittayasil, V., Tanaka, F., Hamanaka, D., Uchino, T., Prediction of surface temperature of figs during infrared heating and its effect on the quality, Biosystems Engineering, 122, 16-22(2014).
- Trivittayasil, V., Tanaka, F., Uchino, T., Investigation of deactivation of mould conidia by infrared heating in a model-based approach. Journal of Food Engineering, 104(4), 565-570(2011).
- Van, T.T., Tanaka, F., Fanze, M., Wardak, M.H., Thanh, D. P., Wardana, A.A., Wigati, L.P., Yan, X.R., Tanaka, F., Application of green pomelo peel essential oil-based carboxymethylcellulose coatings reinforced with nano chitosan and nano cellulose fibers during the drying process on dried silkworms, Scientific Reports, 15, 8749 (2025).

浅水域の水流・物質輸送・生物移動に関する研究

藤原 正幸

京都大学大学院農学研究科

要旨

浅水域は、太陽光の下で大気と土と水が接する多様性に富んだ環境であり、人類の持続的な生存に重要な役割を担っている領域と位置付けられる。浅水域の環境に支配的な影響を及ぼす水流に関して、浅水流方程式の高精度な離散化と適切な計算格子生成法を組み合わせ、精緻な数値モデルを提案し、ダム崩壊流れ、斜め跳水、貯水池や魚道における流れに適用した。そして、計算で求められた魚道の流れ場にモデル化した魚を放流し、移動を追跡することで、水流からではなく魚の移動から魚道の最適な形状の検討を可能とした。また、水は様々な物質を溶かして運ぶ媒体であることから、水環境・生態系の観点から水流の影響下にある重要な物質(溶存酸素、リン、浮遊物質)の輸送について、現地観測と数理・数値モデルにより、貯水池流域、河川、ため池、水利構造物のスケールでいくつかの有用な知見を得た。

キーワード

浅水流方程式, 数値流体力学, 魚道, 魚の挙動, 溶存酸素, リン, 浮遊物質

緒言

浅水域は太陽光が届き、一次生産が行われることで豊かな生態系が形成されることから、人類の生存を持続的に支える環境として非常に重要な領域と位置付けられる。そして、水は様々な物質を溶かして運ぶ溶媒であることから、水流は環境的に重要な物質の輸送に支配的な影響を与えることになる。著者らは浅水域の創造と保全に資する研究を通して、豊かな食料生産環境と農村環境を実現するという方面から、農業工学分野に貢献してきた。

本稿では、浅水域を研究対象として、その環境に支配的な影響を与える「水流」、その水流によって生じる「物質輸送」、そして水流の影響下での「生物移動」について、著者らが取り組んできた研究を概説する。

水流

流体の運動は Navier-Stokes 方程式で記述される。その方程式は非線形であるため、限られた条件下で解析解が得られるのみであり、一般には数値計算によって解析される。そのような分野を数値流体力学という。数値流体力学で注意を払うべき重要事項の一つは、Navier-Stokes 方程式の非線形項(移流項)の離散化であり、今まで多くの研究がなされてきた。

農業農村工学分野で主として対象とする水流は、河川や水路や水田における流れである。これらの流れは、水平スケールに比べて鉛直スケールが小さいことから、三次元 Navier-Stokes 方程式を鉛直方向に積分した浅水流方程式が質量保存式(連続式)とともに解くべき方程式となる。

また、自然水域は一般に複雑な地形を有しており、その地形境界が内部の流れに大きな影響を与えている。このことから、対象領域を適切な計算格子に分割する格子生成手法も数値流体力学において重要な研究対象となってきた。

当時(21 世紀の幕開け)は、「食料・農業・農村基本法」が制定され、それに応じて「土地改良法」が改定され、農業農村整備事業における環境への配慮が求められることとなった時代である。このような背景から、農業水利施設における環境配慮の一つである魚道が研究対象として注目を集めることとなった。そこで、著者らは浅水流方程式を魚道の流れに適用してみることにした。魚道の流れは、大きく変形する自由水面を持ち、常流と射流が混在した流れであり、数値流体力学では最も手強い流れの一つである。そのような流れに対して、移流項には Roe の近似 Riemann スキームを、計算格子には曲線座標を用いた境界適合格子(Fujihara and Borthwick 2000)と四分木格子(Fujihara 2000, Rogers et al. 2001)を採用した 2 種類のモデル(Borthwick et al. 2001)を構築した。図1がパーティカルスロット式魚道への適用例(Fujihara et al. 2003)で、渦度が大きい領域では計算格子を自動で細かく分割して高解像度で計算する解適合格子を採用している(藤原・福島 2002)。図2は近年施工例が多い粗石付き斜路式魚道への適用例である(Chhatkuli and Fujihara 2007)。このモデルにより、従来は経験で決められていた粗石の配置パターンを水理状況と関連させて詳細に検討することが可能となった。

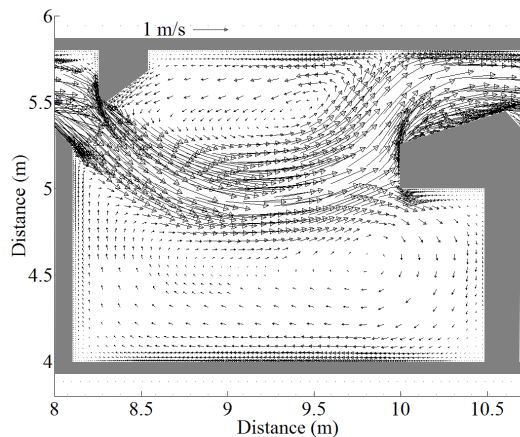


図1 解適合格子を用いたバーティカルスロット式魚道の流速ベクトル図

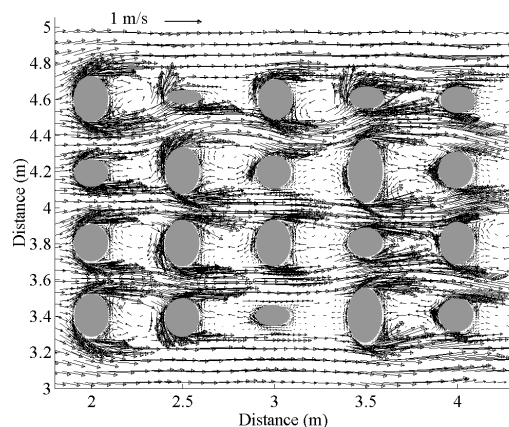


図2 粗石付き斜路式魚道の流速ベクトル図

物質輸送

< 溶存酸素 >

浅水域での水環境を対象とする場合、水生動物の生存にとって溶存酸素は重要な水質要素となる。また、溶存酸素は底質からのリン等の溶出に影響を与え、水域の富栄養化に大きく関与している。そのためダム湖等における水質改善手法として、水中に空気を送り込む曝気方式が採用されているところも多い。また、堰や落差工等の河川横断構造物は本来の機能である利水あるいは河床環境保全の他に、水を流下させることで、構造上、曝気機能を備えることになる。単純落差工の曝気機能については既往研究があり、局所的な水理量と酸素溶入能のモデル化が提案されている。しかしながら、それ以外の型式の堰等についてはあまり研究されていなかった。

そこで斜路部をもつ堰の曝気能について研究を行なった(藤原ら 2003)。この研究により、粗度の小さい斜路部では、同じ落差を自由落下した場合に比べ、ほとんど曝気効果が期待できないことを示した。しかしながら、自然石を埋め込むことにより人工的に粗度を大きくした場合は、落



図3 粗石付き斜路

差工と同程度の曝気効果を発揮することが明らかとなった。また、曝気効果は流量に依存し、流量が大きい場合は斜路部の水深が大きくなり、その結果、空気と接する比表面積が小さくなることから、曝気効果は小さくなることが示された。

水利構造物においても環境への配慮が求められ、河川生態系保全の観点から落差工や堰の鉛直部を斜路に改修するケースが増えている。そして、ほとんどの場合、斜路上の流速を弱めるために、阻流石(粗石)が配置される。これは図2に示した魚道として機能する。そのような粗石付き斜路(図3)が備える曝気機能について、現地観測により検討した(藤原ら 2003)。対象とした粗石付き斜路では、単純落差工と比較した場合、曝気効果の大きいことがわかった。また、粗石のない斜路を等流で流れると仮定して計算した曝気能力の推定値と実測値との比較により、粗石による曝気効果を見積もった。さらに、曝気効率は粗石によって生じる跳水発生が大きく関わっており、粗石の間隔は跳水が発生する程度離れた方がいいことがわかった。

< リン >

ため池: 貧栄養な水域を除くと、リンが制限栄養塩となっている水域が多く、その生態系に支配的な影響を与えている。そのようなリン制限下にある 2 つのため池を対象として、ため池の特徴と富栄養化の関係について論じた(藤原ら 2007)。愛媛県松山市にある O 池は、同地区にある同規模の S 池より、リンの流入負荷量が少ないにもかかわらず、富栄養化している。調査の結果、池の物理的環境(滞留時間、平均水深)とリンの沈降・溶出速度の違いがこれらの池の栄養度の差異を引き起こしていることがわかった。

O 池の水質変動特性は以下のようにまとめられる。O 池は 4 月初旬～9 月中旬にかけて成層状態にある。水温成層が形成され始めると、上層の DO 濃度は過飽和、下層は貧酸素化し、底泥からリンの溶出が起こる。底樋による灌漑取水が開始されると水温成層が弱くなるため、降雨や気温低下、風などの気象条件によって容易に鉛直混合する。混合に伴い、上層の DO 飽和度は下がり、下層の DO 飽和度は上昇する。また、この混合により底泥から溶出したリ

ンが上層に運ばれ、表層水の全リン(T-P)濃度が上昇する。そして、表層水の T-P 濃度が高くなる時期には、クロロフィル a 濃度も高くなる。

一方、S 池は、成層により下層が嫌気状態となるのは 9 月以降である。したがって 9 月から底層でリンが溶出し始めるが、強い成層に抑えられて上層にもたらされない。成層が完全に消滅するのは 11 月を過ぎてからである。

貯水池流域: 富栄養化は上水道源としている水域では、水道水にカビ臭がつき、浄化処理コストが増える等の問題を生じさせる。千苅貯水池は神戸市に水道水を供給しているが、リン濃度が環境基準値(=0.01 mg/L)を上回っていることから、貯水池内に曝気施設を導入した対策がなされている。そこで 2016 年から 2018 年にかけて貯水池流域(森林:88%, 水田:10%)からのリン流出の実態を調査した(Fujihara et al. 2021)。灌漑期間である 5 月から 9 月中旬までは 1 週間に 1 回、降雨による増水時には、灌漑期間と非灌漑期間に関わらず時間単位の集中的な観測を行った。水田からの流出量は排水路に、森林からの流出量は対象流域末端の河川に水位計を設置して、10 分間隔で測定し、水位-流量曲線から求めた。水田及び森林域とも頻度は少ないが高強度な降水時にリン負荷量のかなりの部分が流出することが分かった。具体的には 1 年のうちの 10 日程度で、年間のおよそ半分のリンが流出する結果となった。つまり、台風や豪雨の時に集中して流出するということである。また、水田に関しては、非灌漑期と灌漑期の流出負荷量は同じ程度であった。

<浮遊物質>

農業水路: 環境への配慮から、農業水路においても親水機能や水生生物の生息場のための施設が備えられるようになってきた。図4に示す農業水路の一部を拡幅することでそのような配慮を目的とした施設を対象として、水流と浮遊物質(SS)の輸送を現地観測と数値モデルによって検討した(Fujihara et al. 2010)。水路部での水深は 30 cm 程度、拡幅部では 40 cm 程度であった。水路部での流速はおよそ 70 cm/s、拡幅部では時計回りの渦が形成され、平均流速は 10 cm/s 以下の穏やかな流れであった。この流れ場は浅水流方程式によるシミュレーションにより正確に再現することができた。計算された流れ場に、粒子としてモデル化した SS を投入し、水平方向は受動的に流される一方、鉛直方向には Stokes の法則によって沈降するものとして、その輸送経路を計算した。図5は水路を一樣に流れてきた SS が沈降した位置を示している。細かいもののほど拡幅部の奥に輸送されることが示されていることから、浮遊性の高いもののほど拡幅部にトラップされることが考えられる。また、拡幅部の流れの遅い領域は水生植物の生育が可能となり、メダカなどの遊泳力の小さい魚類の生息場としても機能することが期待される。

河川: 「最後の清流」とも称される四万十川(高知県)は、4 月から 5 月の代かき・田植え時期になると、支流の広見



図4 環境に配慮した農業水路

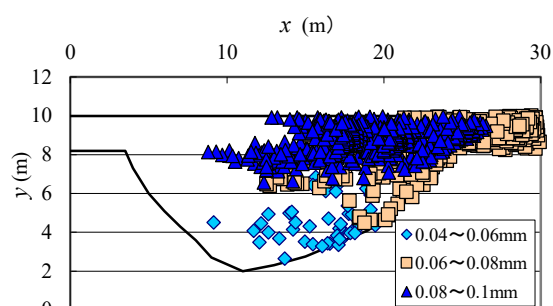


図5 浮遊物質の分布

川(愛媛県)からの濁水流入が見られるようになる。そこで、33 カ月(2008 年 4 月~2010 年 12 月)にわたる観測(水位:1 時間間隔, SS:灌漑期 12 時間間隔, 非灌漑期 24 時間間隔)により広見川から四万十川に流入する SS 負荷量を推定した。また、河川流量と SS 負荷量の関係を求め、SS 負荷量への代かき・田植えの影響を、代かき・田植え期の流量と SS 負荷量の関係式と代かき・田植え期以外の流量と SS 負荷量の関係式を利用して推定する方法を提案した(藤原ら 2012)。その結果、広見川は年間 $9.8 \times 10^6 \text{ kg}$ の SS を四万十川に運び、そのうち代かき・田植えに起因する量は $8.0 \sim 12 \times 10^4 \text{ kg}$ と推定された。

生物移動

前述した水流において、魚道の水流解析に言及したが、魚道の目的は対象魚を遡上させることであり、水流を明らかにしただけでは、その目的を十分に達したことにならない。対象魚が遡上しやすい魚道であるかどうかを検討する必要がある。そのために、パーティカルスロット式魚道を対象として、計算された流れ場にモデル化した魚を放流して、遡上状況を再現するモデルを構築した(Fujihara and Akimoto 2010)。魚の運動は、魚の推進力と水の抵抗力を考慮した Newton の運動方程式に従うとともに、魚の挙動の不確実性を加味して推進力の方向にランダム性を導入

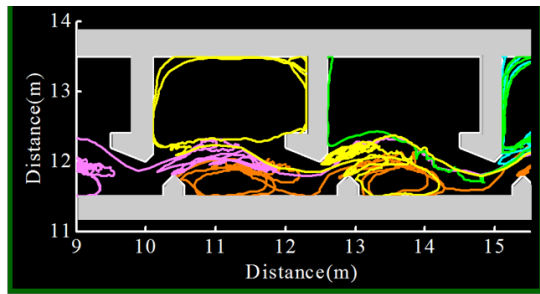


図6 魚道を遡上する魚の軌跡

してモデル化した。魚の推進力には体長に関連づけた巡航速度と突進速度の2種類の速度を採用した。巡航速度は1時間程度は疲れ知らずに持続できるが、突進速度は危険を避けたり、急流を上ったりする時に発揮され、数秒間しか継続できない特性を持つ。魚の周辺流速が巡航速度の8割を超えると、魚は流されまいと突進速度で泳ぎ始めるとモデル化した。図6は計算結果の一例で、流速の速いところではスムーズに遡上できず何回かチャレンジしながら遡上していることがわかる。

滋賀県では「魚のゆりかご水田プロジェクト」として、琵琶湖の魚を水田に遡上させ、そこで産卵・孵化させる事業が行われている。上記のモデルは、まだまだ改善の余地はあるが、魚道内だけではなく、図7に示した水田水利システム(河川—用水路—水田—水田魚道—排水路—河川)にも適用可能で、流れを再現してその流れに魚を泳がせることで、水田魚道の適切な設置位置の検討が可能となる。

謝辞

今回の受賞に際し、推薦賜りました農業農村工学会に御礼申し上げます。また、愛媛大学、京都大学、オックスフォード大学、神戸市水道局水質試験所の多くの共同研究者の皆様、さらに研究にご協力いただいた愛媛県、鬼北町、高知県の職員の皆様に心より感謝申し上げます。

引用文献

- Borthwick A.G.L., M. Fujihara, and B.D. Rogers (2001): Godunov Solution of Shallow Water Equations on Curvilinear and Quadtree Grids. In: Godunov Methods -Theory and Applications-, Toro, E.F.(Edt), Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, pp.141-148.
- Chhatkuli S. and M. Fujihara (2007): Numerical Experiments of the Effects of Obstructions Shape Variation on the Flow in Nature-like fishways, Journal of Rainwater Catchment Systems, 13(1), pp.11-16.
- Fujihara, M. (2000): Numerical Shallow Water Simulation Using Godunov-Type Scheme on Quadtree Grids. Journal of Rainwater Catchment Systems, 6(1), pp.13-20.
- Fujihara M. and M. Akimoto (2010): A Numerical Model of Fish

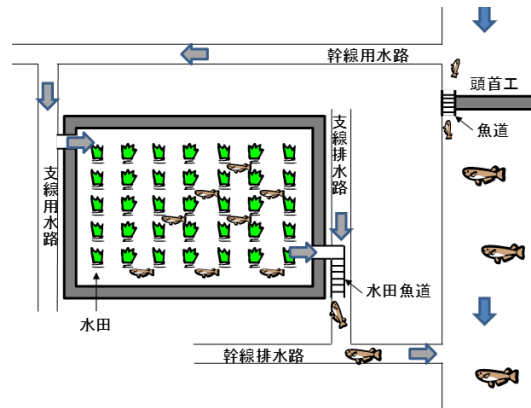


図7 水田水利システムを利用する魚

- Movement in a Vertical Slot Fishway, Fisheries Engineering, 47(1), pp.13-18.
- Fujihara, M. and A.G.L. Borthwick (2000): Godunov-type Solution of Curvilinear Shallow Water Equations. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 126(11), pp.827-836.
- 藤原正幸・福島忠雄(2002): 解適合 Q-tree 格子を用いた有限体積分法によるゴドゥノフ型スキームのパーティカルスロット式魚道への適用, 水産工学, 日本水産工学会, 39(2), pp.117-123.
- 藤原正幸・福島忠雄・松本靖代・岡本友和(2003): 斜路部をもつ堰の曝気能—単純落差工との比較を通して—, 農業土木学会論文集, 農業土木学会, No.228, pp.851-857.
- 藤原正幸・福島忠雄・岡本友和(2003): 粗石付き斜路の曝気能, 農業土木学会論文集, 農業土木学会, No.228, pp.843-849.
- Fujihara M., T. Fukushima and K. Tachibana (2003): Numerical Investigations of Flow in Vertical Single- and Double-slot Fishways, 農業土木学会論文集, 農業土木学会, No.223, pp.79-88.
- 藤原正幸・垣原登志子・富岡和博・福島忠雄(2007): なぜ大池は富栄養化するのか—大池とシダノシタ池の比較から—, 農業土木学会論文集, 農業土木学会, No.249, pp.99-106.
- 藤原正幸・ラボン エドワード・泉智揮・濱上邦彦・小林範之・垣原登志子 (2012): 四万十川支流広見川の SS 負荷量とそれに及ぼす水田農業の影響, 土木学会論文集 B1(水工学), 68(4), I_631-I_636.
- Fujihara M., Y. Sakurai and T. Okamoto (2010): Hydraulic Structure and Material Transport in an Irrigation Channel with a Side-Cavity for Aquatic Habitat, 農業農村工学会論文集, No.265, pp.17-22.
- Fujihara M., J. Takeuchi, K. Unami, T. Hama, M. Oishi, K. Iima, B.K. Kimengich, H. Ueshiro, T. Shimizu, and T. Oda (2021): Phosphorus Runoff Loads from Paddy Fields and Forested Watersheds in the Sengari Reservoir Basin, Journal of Rainwater Catchment Systems, 26(2), pp.7-14.
- Rogers, B., M. Fujihara, and A.G.L. Borthwick (2001): Adaptive Q-tree Godunov-type Scheme for Shallow Water Equations. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 35(3), pp.247-280.