日本農業工学会賞2020

受賞講演会

講演要旨集

主催：日本農業工学会

JAICABE：Japan Association of International

Commission of Agricultural and Biosystems Engineering

日時：2020年10月31日（土）

Webinar で開催

目　次

正会員

日本農業工学会賞2020受賞者

【講演】

船田　良　氏（東京農工大学・教授）
木質バイオマスの形成制御機構に関する研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　6

田中　道男　氏（香川大学・名誉教授）
洋ランのクローン苗生産に関する先駆的技術の開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　10

小沢　聖　氏（明治大学・特任教授）
作物反応を活用した環境制御技術の開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　14

荒木　肇　氏（北海道大学・教授、, 現新潟食農業大学・教授）
カバークロップによる農耕地環境改善と作物生産性向上に関する研究　・・・・・・　18

古野　伸典　氏（山形県農林水産部）
積雪寒冷地域における施設園芸の環境制御と強靱化に関する研究・・・・・・・・・　22

平藤　雅之　氏（東京大学・ 特任教授）
農業における IoT, ビッグデータ、AI の研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　26

飯田　訓久　氏（京都大学・教授）
コンバインの自動化・ロボット化・情報化に関する研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　30

久保　成隆　氏（東京大学・名誉教授）
開水路用排水路系における流れの解析と制御に関する研究・・・・・・・・・・・・・・・　34

日本農業工学会賞受賞者（2014 年度～2020 年度）・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　38

日本農業工学会フェロー（1999 年度～2020 年度）・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　41

2020 年度日本農業工学会フェロー受賞者・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　44

会則　・・・　45

日本農業工学会正会員

正会員 10 学協会　総会員数：14,853 名（農業電化協会 127 団体）；14,980 名・団体
（平成 29 年 4 月現在：9 学会、1 協会）（会員数は 27 年度日本農学会登録数）

農業農村工学会（昭和 59 年～現在）（会長：平松　和昭、会員数：9,280 名）
（平成 19 年 6 月 29 日に農業土木学会より名称変更）
Japanese Society of Irrigation, Drainage and Rural Engineering (JSIDRE)（略記：農工）

農業食料工学会（昭和 59 年～現在）（会長：近藤　直、会員数：1,131 名）
（平成 25 年 10 月農業機械学会より名称変更）
Japanese Society of Agricultural Machinery and Food Engineers (JSAM)（略記：機械）

日本農業気象学会（昭和 59 年～現在）（会長：平野　高司、会員数：730 名）
Society of Agricultural Meteorology of Japan(SAMJ)（略記：気象）

日本農作業学会（昭和 59 年～現在）（会長：小松﨑　将一、会員数：479 名）
Japanese Society of Farm Work Research(JSFWR)（略記：作業）

農業施設学会（昭和 59 年～現在）（会長：川越　義則、会員数：467 名）
Society of Agricultural Structures, Japan (SASJ)（略記:施設）

農業電化協会（昭和 59 年～現在）（会長：田澤信二、会員数：98 団体）
Japanese Association of Agricultural Electrification (JAAE)（略記：電化）

農村計画学会（平成 2 年～現在）（会長：一ノ瀬　友博、会員数：1,042 名）
The Association of Rural Planning (ARP)（略記：計画）

生態工学会（平成 6 年～現在）（会長：北宅善昭、会員数 371 名）
（平成 13 年 9 月に CELSS 学会より名称変更）
The Society of Eco-Engineering (SEE)（略記：生態）

農業情報学会（平成 9 年～現在）（会長：南石晃明、会員数：390 名）
（平成 14 年 8 月農業情報利用研究会より名称変更）
Japanese Society of Agricultural Informatics (JSAI)（略記：情報）

日本生物環境工学会（平成 19 年～現在）（会長：仁科　弘重、会員数：963 名）
（平成 19 年 1 月 1 日より日本生物環境調節学会と日本植物工場学会の合併）
Japanese Society of Agricultural, Biological and Environmental Engineers and Scientists
(JSABEES)（略記：生工）

日本農業工学会賞２０２０受賞者

船田　良（ふなだ　りょう）

学歴・職歴

1983 年東京農工大学農学部林産学科卒業
1988 年東京農工大学大学院連合農学研究科資源・環境学専攻博士課程修了（農学博士取得）。
日本学術振興会特別研究員、北海道大学農学部助手、助教授、パリ高等師範学校（École Normale Supérieure）フランス政府給費博士研究員、東京農工大学農学部助教授
2007 年東京農工大学大学院共生科学技術研究院（現在、大学院農学研究院）教授、
2011 年東京農工大学大学院連合農学研究科研究科長
2020 年東京農工大学大学院農学研究院長、大学院農学府長、農学部長。
2011 年生態工学会副会長
2014 年一般社団法人日本森林学会理事、2019 年一般社団法人日本木材学会会長。（現在に至る）

受賞歴

2001 年国際木材科学アカデミーフェロー
2004 年日本木材学会賞
2007 年生態工学会賞学術賞
2016 年日本農業工学会フェロー

田中　道男（たなか　みちお）

学歴・職歴

1978年　大阪府立大学大学院農学研究科博士後期課程単位取得退学
1978年　京都教育大学教育学部助手
1979年　香川大学農学部助手
1986年　香川大学助教授
1992年　香川大学教授
2013年　香川大学名誉教授，現在に至る

受賞歴

1990 年　園芸学会奨励賞
1996 年　日本植物工場学会学術奨励賞
2010 年　日本生物環境工学会学術賞
2012 年　日本生物環境工学会 50 周年記念功績賞
2014 年　日本生物環境工学会功績賞、日本生物環境工学会国際学術賞
2018 年　読売農学賞
2018 年　日本農学賞
2019 年　日本生物環境工学会特別国際学術賞

小沢　聖（おざわ　きよし）

学歴・職歴

1977 年　千葉大学園芸学部卒業
1977 年　東京都農業試験場
1977 年　東京都小笠原亜熱帯農業センター
1988 年　東京都農業試験場江戸川分場
1990 年　東北農業試験場
2000 年　国際農林水産業研究センター沖縄支所（現熱帯島嶼拠点）
2012 年　明治大学黒川農場

受賞歴

2003年　日本農業気象学会賞 普及賞
2017年　日本農業工学会フェロー

荒木　肇（あらき　はじめ）

学歴・職歴

1985 年　北海道大学大学院農学研究科修了（農学博士）
1985 年　北海道大学農学部助手
1991 年　新潟大学農学部助教授
2003 年　北海道大学北方生物圏フィールド科学センター教授
2020 年　新潟食料農業大学教授

受賞歴

2011 年　日本農作業学会学術賞
2012 年　大学等附属農場協議会教育
賞 2017 年　日本農業工学会フェロー

古野　伸典（ふるの　しんすけ）

学歴・職歴

1995 年　千葉大学園芸学部卒業、山形県職員採用
1998 年　山形県立園芸試験場に配属
2006 年　千葉大学大学院自然科学研究科にて博士（農学）取得
2007 年　山形県庄内総合支庁産地研究室
2018 年　山形県農林水産部園芸農業推進課に配属　現在に至る

受賞歴

2005 年　農業施設学会奨励賞
2014 年　農業施設学会学術賞

平藤　雅之（ひらふじ　まさゆき）

学歴・職歴

1983 年 東京大学農学系研究科・修士課程修了。博士（農学）。
農研機構・北海道農業総合研究センター（研究領域長）、筑波大学大学院（教授、併任）
2017 年 4 月から現職。
JST CREST「フィールドセンシング時系列データを主体とした農業ビッグデータの構築と新知見の発見」の研究代表者
ドリームサイエンスホールディングス株式会社・CEO
株式会社 Quantomics・サイエンティスト

受賞歴

飯田　訓（いいだ　みちひさ）

学歴・職歴

1989 年　京都大学農学部農業工学科卒業
1991 年　京都大学大学院農学研究科農業工学専攻修士課程修了
1997 年　京都大学博士（農学）学位取得
1991 年　京都大学農学部農業工学科助手
1996 年　京都大学大学院農学研究科地域環境科学専攻助手
1998 年　京都大学大学院農学研究科地域環境科学専攻助教授
2007 年　京都大学大学院農学研究科地域環境科学専攻准教授
2012 年　京都大学大学院農学研究科地域環境科学専攻教授、現在に至る

受賞歴

2009 年　農業機械学会・学術賞
2019 年　日本農業工学会フェロー

久保　成隆（くぼ　なりたか）

学歴・職歴

1976 年 東京大学農学部農業工学科卒業
1979 年 東京大学大学院博士課程中退
1979 年東京大学農学部助手
1996-1998 年　アジア工科大学院 Associate Professor
1998 年 東京農工大学農学部助教授
2004 年 東京農工大学大学院共生科学技術研究部教授、
2011 年 東京大学大学院農学生命科学研究科教授
2018 年 東京大学定年退職

受賞歴

1995 年 農業土木学会学術賞
2010 年 PAWEES Sawada Prize

木質バイオマスの形成制御機構に関する研究

船田　良

東京農工大学大学院農学研究院

要旨

資源・エネルギーの持続的な供給と環境問題との調和は，重要な課題である。化石資源の大量消費や熱帯林の減少などにより，大気中の CO_2 濃度が上昇しており，地球温暖化の急激な進行や異常気象の増大などが危惧されている。樹木が生産する木材など木質バイオマスは，再生可能な資源・エネルギーであり，CO_2 を固定する場としても重要である。循環型社会を構築し，持続可能な開発目標（SDGs）を達成するには，木質バイオマスの高度有効利用が重要である。木質バイオマスの生産量や特性は，樹木の生育環境や遺伝的な違いで大きく変動する。そこで，木質バイオマスの特性や形成機構，樹木の環境適応性などに関して，生態工学的手法を駆使して明らかにした。

キーワード

木質バイオマス，木材，形成層，細胞壁，地球環境変動

緒言

循環型社会を構築し，持続可能な開発目標（SDGs）を達成するには，再生可能な資源・エネルギーである木材など木質バイオマスの有効利用が重要である。また，木質バイオマスの高度有効利用は，バイオエコノミーの推進にも貢献する。石油や石炭など化石資源の大量消費や熱帯林の急激な消失などにより，大気中の二酸化炭素（CO_2）濃度が上昇している。CO_2 は温室効果ガスであるため，大気中濃度の上昇による地球温暖化の急激な進行が危惧されている。今後，地球温暖化や急激な気候変動を防ぐためには，化石資源の利用を可能な限り抑制し，カーボンニュートラルな木質バイオマスをさらに高度有効利用していくことが不可欠である。

木質バイオマスは，樹木の形成層細胞の分裂により生産されるため，その形成過程は環境要因や遺伝的要因などにより変動する。また，木質バイオマスの主要な構成要素である仮道管や道管要素などの形成層由来の二次木部が分化する過程で獲得する物理的あるいは化学的性質が，木質バイオマスの材質特性を制御する。したがって，木質バイオマスを木材，紙･パルプ，セルロースナノファイバーや CLT などの新規材料，バイオエネルギーなどに高度有効利用する上で，形成層細胞の分裂や分化機構の解明は重要である。さらに，木質バイオマスの形成機構を十分に理解することにより，その生産量や特性の人為的な制御による高付加価値化の実現が期待される。

そこで，木質バイオマスの量や質の変動要因を解明するために，樹木生理学や木材生物学などを背景に，イメージング技術を駆使して，形成層活動の制御機構，樹木の環境適応性，細胞壁構造の構築機構などに関して生態工学的な研究を行ってきた。成果の概要を以下に述べる。

研究成果

1．樹木の形成層活動の季節的変化に関する研究

樹木の形成層活動は，気温や降水量などの気象要因，土壌条件，大気汚染などの環境ストレス，など環境要因の変化に大きく影響を受ける。将来，地球環境が大きく変動した場合，形成層活動も変化し，樹木の肥大成長量や森林の CO_2 固定量も大きく変動することが予想される。樹冠は樹木の成長に不可欠な光合成同化産物や植物ホルモンなどを生成する場所であるため，その活性の違いは樹幹の肥大成長に強い影響を及ぼす（図 1 A, B）。

温帯や冷温帯に生育する樹木の形成層活動は，活動期と休眠期を繰り返す周期性を示す（図 1C）。形成層活動の周期性と気温との関連性を明らかにするために，常緑針葉樹であるトドマツ，スギや落葉広葉樹であるポプラ，コナラなどの樹幹を，形成層が休眠中である冬期に局部的に加温処理すると，数日後に加温した樹幹のみ形成層細胞が分裂を開始した。したがって，樹幹温度の上昇が形成層活動再開の直接的な引き金になっているといえる。

また，晩冬から初春にかけての気温が高いと，形成層活動の分裂再開が早く起こる。晩冬から初春の気温の変化と形成層再活動との関連性の解析結果から，分裂開始にはある閾値以上の最高気温が一定期間以上累積することが必要であるといえる。閾値には樹種特性があり，交

雑ポプラでは 15 度以上の最高気温が，スギでは 10〜11 度以上の最高気温が一定期間以上続くと形成層活動が再開した。閾値の違いが，同一環境下での形成層活動の再開時期の樹種による違いを生じさせており，各樹種の生存戦略に関係していると考えられる。

最高気温と閾値との差を加算した値を基に，形成層活動の再開時期を気象データから予想する上で有効な形成層再活動指標（Cambial Reactivation Index; CRI）を提案した。CRI は，形成層活動の再開時期の将来予測を行う上でも有効な指標である。地球温暖化が進行し晩冬や初春の気温が上昇した場合，形成層の再開時期が早くなる可能性が高い。形成層活動の再開時期が早くなることにより肥大成長期間は長くなり，より多くの木質バイオマスが形成されることが予想される。一方，形成層活動が再開し耐寒性が低下した後の急激な気温低下により，形成層が低温傷害を受ける可能性も充分考えられる。したがって，気温の上昇による樹木の形成層活動の変化にはプラスとマイナスの両面があることを想定すべきである。

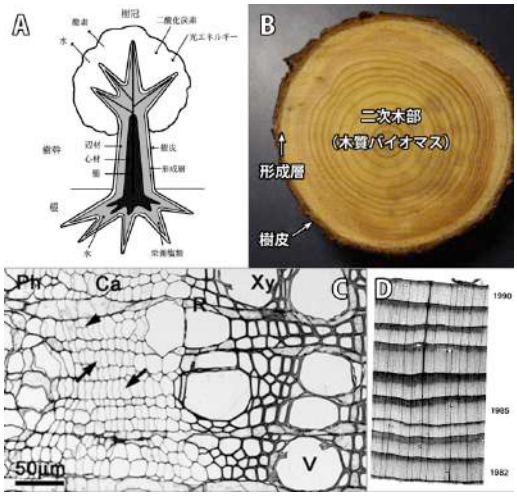


図１　(A) 樹木の構造, (B) 樹幹の構造, (C) 形成層細胞分裂（矢印; 分裂, Ph; 師部, Ca; 形成層, Xy; 木部, R; 放射組織, V; 道管要素）, (D) 肥大成長量（年輪幅）の変動

一方，インドネシアなど気温や日長時間が変動しない熱帯に生育する樹木においては，雨季では形成層細胞の分裂活動が活発に行われ，乾季では形成層細胞の分裂活動は停止した。降水量のパターンの違いが，形成層活動の変化を制御しているといえる。これらの研究成果は，樹木の生育環境の違いにより，形成層活動を制御する外的要因が異なることを示している。

さらに，樹木の肥大成長量や年輪構造には，気温や降水量など気象要因だけでなく，酸性雨，オゾン，エアロゾルなど大気汚染が強く影響を及ぼすことを，年輪年代学的解析と環境制御室を用いた樹木生理学的な解析により明確にした（図 1D）。また，FACE など高 CO_2 環境制御下での樹木の成長量や光合成特性を解析し，将来の環境変動に伴う樹木の適応性や炭素固定能を推定した。

2.　樹木の形成層活動の内的制御機構に関する研究

樹木の形成層活動は，植物ホルモンなどの成長調節物質により内的に制御される。形成層活動の生理学的な制御要因を明らかにするために，植物ホルモンの微量分析法を確立し，形成層領域に含まれるオーキシン，アブシシン酸，サイトカイニン類を同定・定量した。

植物ホルモンのなかでも，オーキシンが形成層活動の制御に重要な役割を担っている。主要なオーキシンであるインドール酢酸（以下 IAA と略する）は，シュートなどで主に生成され，形成層細胞を通って極性移動する。したがって，樹木の生育条件が悪化すると，形成層領域に含まれる IAA レベルは減少し，形成層活動は阻害される。形成層領域に含まれる内生 IAA レベルは，明らかな季節的変化を示した（図２A）。内生 IAA レベルは，春から初夏にかけて増加しピークを迎え，秋にかけて急激に減少し春とほぼ同じレベルとなる。内生 IAA レベルが急激に増加する時期と形成層細胞の分裂が活発になる時期はよく一致することから，IAA が形成層細胞の分裂速度を制御する主要因であると考えられる。樹冠で生成される総 IAA 量が増加するに伴い分裂能力をもつ形成層細胞数は増加し，肥大成長が活発になると考えられる。

一方，形成層活動の停止が起こる初秋においても，形成層領域に含まれる内生 IAA レベルは比較的高かった。したがって，内生 IAA レベル以外の要因が形成層活動の休眠誘導を制御していると考えられる。形成層活動の季節的変化は，内生 IAA 量の変化と IAA に対する形成層細胞の反応性の変化が制御しているといえる。また，内生 IAA レベルの変化と分裂の開始時期とは関連性が低く，先に述べたように，樹幹の温度上昇が形成層活動開始の直接的な引き金であるといえる。

3.　樹木の木部細胞の分化機構に関する研究

樹木の形成層細胞は，分裂能力を失うと二次木部または二次師部細胞に分化する。形成層細胞は，自らとは異なる形態や機能をもつ細胞に分化する能力をもち，細胞分裂を行って同様の分化能を維持することができる細胞であり，幹細胞（stem cell）の性質をもつといえる。二

次木部の細胞は，水分やミネラルの通道，重い樹幹の力学的支持，養分の貯蔵や供給，などの機能を担っている。これらの機能を発揮するために，二次木部は形態を特殊化し，水分通道や力学的な支持を行う仮道管，道管要素，木部繊維などは厚い二次壁を構築する（図２B とC）。

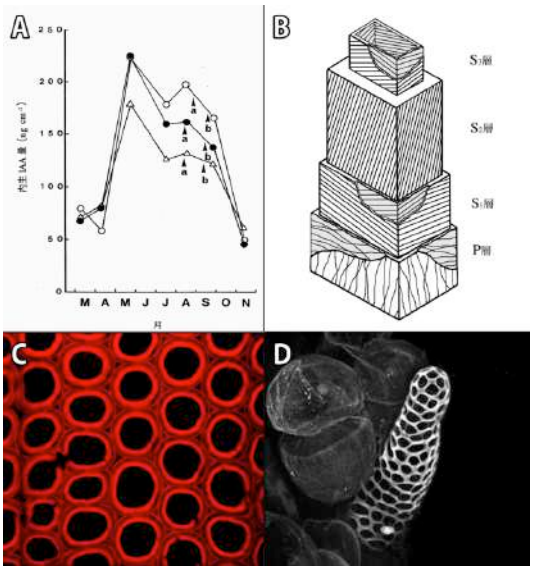


図２ (A) アカマツ樹幹形成層領域に含まれる内生 IAA 量の季節的変動（a; 早材から晩材への移行時期, b; 木部細胞の形成停止時期）, (B) 仮道管細胞壁における CMF の配向モデル, (C) トドマツ圧縮あて材仮道管の構造, (D) スギ培養細胞から直接誘導された木部様細胞

二次壁の主要成分はセルロースであり，45～50%存在する。セルロースやリグニンなど細胞壁主成分は，地球上に最も豊富に存在する天然高分子である。二次木部細胞は，平行性の良いセルロースミクロフィブリル（CMF）を薄い一次壁の内側に順次堆積し，厚い二次壁を形成する。二次壁の厚さは細胞の種類や樹種により異なり，木材の容積密度（比重）や強度と密接な関係がある。

木材中の炭素量（kg）は，木材の材積（m^3）× 容積密度（kg / m^3）× 木材中の炭素の含有率（細胞壁成分中の炭素の割合）を用いて推定できる。ただし，容積密度は樹種により大きく異なり，針葉樹のスギでは 314 kg / m^3, アカマツでは 451 kg / m^3, 広葉樹のドロノキでは 291 kg / m^3, ブナでは 573 kg / m^3 など各樹種の代表値が公表されている（独立行政法人国立環境研究所報告）。一方，木材中の炭素の含有率は樹種による違いがほとんど認められず，約 50 %である。したがって，樹齢が同じで毎年の肥大成長量（年輪幅）が同様な場合，アカマツにはスギに比べて約 40 %多く大気中 CO_2 が固定される。容積密度は，木部細胞の細胞形態や細胞壁の厚さにより決まることから，細胞壁の構造が木材の CO_2 固定量を決定する。

また，仮道管など二次木部の二次壁に堆積する CMF の配向は，木材の物性と密接な関係がある。そこで，CMF を高分解能走査電子顕微鏡などで詳細に解析し，細胞壁構造のモデル図を提唱した。CMF の配向は，回転するように連続的に変化するため，二次壁は多層構造を示す。さらに，微小管やアクチン繊維などの細胞骨格を，共焦点レーザ走査顕微鏡法などイメージング技術を駆使して三次元的に可視化し，表層微小管が分化中木部細胞において連続的に配向変化することを明確にした。原形質膜直下に存在する表層微小管がセルロース合成酵素の動く方向を制御し，CMF の配向を制御すると考えられる。

一方，二次木部細胞の細胞壁構造や成分量は，生育環境の変化に適応し，容易に変化する。例えば，樹木は重力方向の変化を感知し，傾斜した樹幹にあて材という組織を形成して応力を発生させ，姿勢制御を行う。針葉樹は傾斜した樹幹下側に圧縮あて材（図２C）を形成し，広葉樹は傾斜した樹幹上側に引張あて材を形成する。あて材の形成は，固着性の樹木にとり重要な環境応答である。引張あて材の形成機構を解析したところ，ジベレリンが重力刺激に対する伝達物質として重要であることを明らかにした。また，重力方向の変化に対して表層微小管が応答し，細胞壁構造を変化させることを明らかにした。

樹木の細胞壁形成機構をリアルタイムで解析するために，培養細胞からの木部様細胞の *in vitro* での直接誘導系を確立した（図 2D）。培養条件を検討し，二次壁が複雑なパターンで堆積する管状要素様の細胞を誘導した。さらに，GFP の導入により微小管を動的に可視化したところ，微小管と CMF の局在は一致しており，微小管の動的な変化が細胞壁高次構造の形成を制御しているといえる。表層微小管の配向制御により二次壁における多層構造の形成を制御し，木材の物性を制御できるといえる。

4. まとめ

木質バイオマスの形成制御機構や機能に関して一連の研究を行い，地球環境が大きく変動した場合の木質バイオマスの量的・質的特性を予測するための重要な情報を得られたといえる。また得られた知見は，炭素固定能力やストレス耐性が高く材質にも優れた樹木の作出，育種，植林など地球規模の森林管理にも貢献するといえる。

本研究を遂行するにあたって、ご協力を戴いた東京農工大学および北海道大学の教員・学生に感謝申し上げる。

引用文献（主な総説・著書）

Abe, H., Funada, R. (2005) The orientation of cellulose microfibrils in the cell walls of tracheids in conifers: a model based on observations by field emission-scanning electron microscopy, **IAWA Journal**, 26, 161-174.

Begum, S., Nakaba, S., Yamagishi, Y., Oribe, Y., Funada, R. (2013) Regulation of cambial activity in relation to environmental conditions: understanding the role of temperature in wood formation of trees, **Physiologia Plantarum**, 147, 46-54.

Begum, S., Kudo, K., Rahman, Md H., Nakaba, S., Yamagishi, Y., Nabeshima, E., Nugroho, D.W., Oribe, Y., Kitin, P., Jin, H.O., Funada, R. (2018) Climate change and the regulation of wood formation in trees by temperature, **Trees**, 32, 3-15.

船田　良 (1994) 植物ホルモンによる早材・晩材形成の制御, 木質分子生物学（樋口隆昌編著）, 文永堂出版, 東京, p.187-197.

船田　良 (1997) 樹木の木部細胞壁形成における表層微小管の役割–共焦点レーザ顕微鏡の応用–, **電子顕微鏡**, 32, 95-99.

Funada, R. (2000) Control of wood structure. In: Nick, P. (ed.) Plant Microtubules: Potential for Biotechnology, Springer-Verlag, Heidelberg, Germany, p.51-81.

Funada, R., Miura, H., Shibagaki, M., Furusawa, O., Miura, T., Fukatsu, E., Kitin, P. (2001) Involvement of localized cortical microtubules in the formation of a modified structure of wood, **Journal of Plant Research**, 114, 491-497.

Funada, R. (2002) Immunolocalisation and visualisation of the cytoskeleton in gymnosperms using confocal laser scanning microscopy. In: Chaffey, N. (ed.) Wood Formation in Trees: Cell and Molecular Biology Techniques, Taylor and Francis Publisher, London, UK, p.143-157.

船田　良 (2003) 木材の構造と形成, 木質の形成–バイオマス科学への招待–（福島和彦, 船田　良, 山本浩之, 高部圭司, 梅澤俊明, 杉山淳司編著）, 海青社, 大津, p.11-88 .

船田　良 (2003) 樹木細胞壁の構造と形成-光合成同化産物のシンクとしての機能-, **Journal of Applied Glycoscience**, 50, 513-514.

船田　良 (2004) 樹木の肥大成長, 樹木生理生態学（小池孝良編著）, 朝倉書店, 東京, p.125-137 .

船田　良 (2005) 木材の形成機構, **木材工業**, 60, 59-64.

船田　良 (2007) 木材の形成, 森林・林業実務必携（東京農工大学編）, 朝倉書店, 東京, p.348-353.

船田　良 (2008) 樹木形成層活動の制御, **木材学会誌**, 54, 1-10.

船田　良 (2008) 木質バイオマスの形成機構, **Eco-Engineering（生態工学会誌）**, 20, 37-43.

Funada, R. (2008) Microtubules and the control of wood formation. In: Nick, P. (ed.) Plant Microtubules: Development and Flexibility, Springer-Verlag, Heidelberg, Germany, p.83-119.

船田　良, 半　智史 (2009) 樹木の二次木部細胞におけるセルロースミクロフィブリルの配向制御, **Cellulose Communications（セルロース学会誌）**, 16, 95-101.

船田　良 (2011) 伸長成長と肥大成長, あて材の構造, 木質の構造（日本木材学会編）, 文永堂出版, 東京, p.109-123, p.207-215.

船田　良 (2011) 木材の構造と形成, 改訂版・木質の形成 –バイオマス科学への招待–（福島和彦, 船田　良, 山本浩之, 高部圭司, 梅澤俊明, 杉山淳司編著）, 海青社, 大津, p.15-144.

船田　良 (2013) 重力刺激応答, 植物細胞壁（西谷和彦, 梅澤俊明編著）, 講談社, 東京 p.199-203.

Funada, R., Kajita, S. (2014) Improvement of woody biomass. In: Tojo, S., Hirasawa, T. (eds.) Sustainable Biomass Systems, Academic Press, Oxford, UK, p.88-106.

船田　良 (2015) 木質バイオマスの形成と地球環境, 生態工学ハンドブック Vol.7 陸域環境と生態工学（生態工学会編）, アドスリー, 東京 p.6-11.

Funada, R., Yamagishi, Y., Begum, S., Kudo, K., Nabeshima, E., Nugroho,W.D., Oribe, Y., Nakaba, S. (2016) Xylogenesis in trees: from cambial cell division to cell death. In: Kim, Y.S., Funada, R., Singh, A. (eds.) Secondary Xylem Biology, Academic Press, Oxford, UK, p.25-43.

船田　良 (2016) あて材形成と植物ホルモン, あて材の科学–樹木の重力応答と生存戦略–（吉澤伸夫監修, 日本木材学会組織と材質研究会編）, 海青社, 大津 p.267-308.

船田　良 (2020) 樹皮の組織構造, 生活工芸双書　漆–植物特性と最新植栽技術–（田端雅進, 橋田　光監修, 船田　良, 渡辺敦史他著）, 農山漁村文化協会, 東京 p.14-20.

Kitin, P., Funada, R. (2016) Earlywood vessels in ring-porous deciduous hardwoods become functional for water transport after bud burst and before the maturation of the current-year leaves, **IAWA Journal**, 37, 315-331.

Koike, T., Watanabe, M., Watanabe, Y., Agathokleous, E., Mao, Q.Z., Eguchi, N., Takagi, K., Satoh, F., Kitaoka, S., Funada, R. (2015) Ecophysiology of deciduous trees native to Northeast Asia grown under FACE (Free Air CO_2 Enrichment), **Journal of Agricultural Meteorology**, 71, 174-184.

Nakaba, S., Kitin, P., Yamagishi, Y., Begum, S., Kudo, K., Nugroho, W.D., Funada, R. (2015) Three-dimensional imaging of cambium and secondary xylem cells by confocal laser scanning microscopy. In: Yeung, E.C.T., Stasolla, C., Summer, M.J., Huang, B.Q. (eds.) Plant Microtechniques: Methods and Protocols, Springer, Heidelberg, Germany, p.431-465.

大政謙次, 船田　良 (1996) 植物の生体画像計測、**バイオサイエンスとインダストリー**, 54, 33-35.

Yazaki, K., Maruyama, Y., Mori, S., Koike, T., Funada. R. (2005) Effects of elevated carbon dioxide concentration on wood structure and formation in trees. In: Omasa, K., Nouchi, I., De Kok, L.J. (eds.) Plant Responses to Air Pollution and Global Change, Springer-Verlag, Tokyo, Japan p.89-97.

矢崎健一, 船田　良 (2005) 高 CO_2 環境下での樹幹形成, **森林科学**, 45, 11-17.

洋ランのクローン苗生産に関する先駆的技術の開発

田中　道男

香川大学名誉教授

要旨

経済価値の高い重要な洋ランであるがクローン苗増殖が困難であったコチョウランにおいて，「葉」を用いる新培養法を提案し，簡便で効率的な葉片培養によるクローン苗生産法の開発に世界に先駆けて成功した．この技術は国内外で実用化され，クローン苗の時代を到来させる契機を与えた．高品質クローン苗の低コスト生産を可能にする新技術では，独創的なフィルム培養容器を世界で最初に開発した．また人工種子，エンブリオジェニックカルスおよび外部磁場の利用による培養法を開発した．さらにLEDや冷陰極蛍光ランプなどを用いた省電力新光源を開発し，世界初の低コスト化に成功した。以上の先駆的技術は，高品質と低コストが課題のクローン苗生産ビジネス現場に大きく寄与した．

キーワード

洋ラン，クローン苗，マイクロプロパゲーション，フィルム培養容器，省電力新光源

緒言

選抜優良個体と同じ遺伝子をもつクローン苗を急速・大量に増殖する培養技術はマイクロプロパゲーションとよばれている．マイクロプロパゲーションが最初に確立された植物は洋ランのシンビジウムであった．その端緒となった茎頂培養法が，フランス国立農業研究所（INRA）植物生理研究センターのMorelによって1960年に発見されて以来，カトレアや他のランのクローン増殖に関する実用的研究が行われ，他の洋ランも茎頂培養で増殖できることが証明された．この茎頂培養由来クローンはメリクロンとよばれ，60年代半ばにはフランスで最初に市販されていた．その後，メリクロン苗生産が各国で実用化され，ラン産業は今日のようにめざましい発展を遂げることになった．今日では，マイクロプロパゲーションは国内外の種苗会社等において実用化されており，観賞植物を中心に，野菜，果樹，作物，プランテーション植物，さらに植林樹に至るまで幅広く適用されている．ここでは，筆者らが1972年から実施してきた洋ランのマイクロプロパゲーションのさまざまな新技術の開発に関する研究のうち，主要なものについて概説する．

１．コチョウランのクローン苗増殖

筆者が洋ランのマイクロプロパゲーションに関する研究に取り掛かった1972年時点では，コチョウラン（図1）の茎頂培養は困難とされクローン苗増殖法が確立されていなかった．

コチョウランのクローン苗増殖に関する主要な研究業績は，ほとんどの洋ランでは茎頂培養でラン特有の体細胞胚（PLB）を誘導するのに対し，前例のない「葉」をコチョウランの培養材料として用い，その葉片上にPLBを形成させることに世界で初めて成功した点にある（図2）．葉片の材料源である苗条を得るために開発した花茎培養法，葉片培養でPLB形成に必要な培地組成，PLB増殖法，PLBからクローン苗に生育させる培地・培養条件，培養容器から取り出したクローン苗の順化，順化から3年後の開花検定による変異の有無の調査など，約15年の長期にわたる数多くの試験や調査を経て，葉片培養によるクローン苗増殖のプロトコルが世界に先駆けて開発できた（Tanaka・Sakanishi, 1977; Tanaka・Sakanishi, 1978; Tanaka・Sakanishi, 1980; Tanaka et al., 1983; Tanaka et al., 1988; Tanaka et al., 1990; Tanaka, 1991; 田中，1997）．

図１　コチョウラン（*Phalaenopsis*）の花

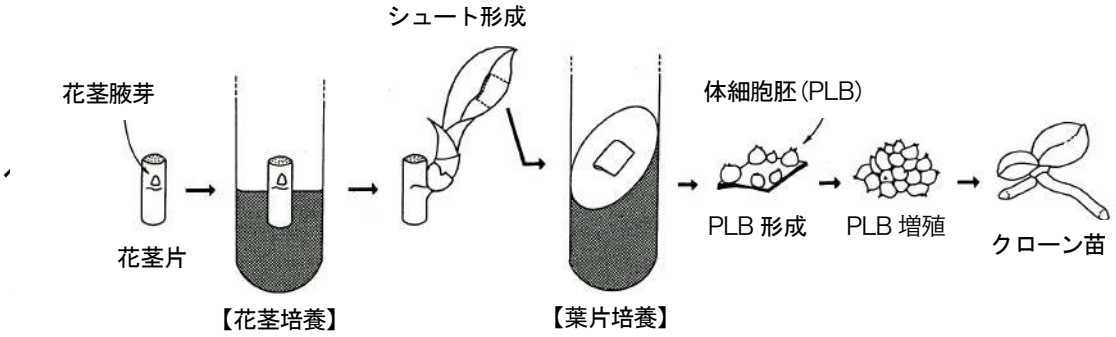


図２　葉片培養によるコチョウランのクローン苗増殖のプロトコル

コチョウランは世界的に人気の高い重要な高級洋ランである．このため葉片培養によるクローン苗生産法は，貴重な母株の茎頂を損なわない簡便で効率的な繁殖法として国内外で実用化され，クローン苗の時代を到来させる契機を与えた．また本増殖法は，大規模化が進む世界のコチョウラン生産において，優良個体クローン苗の導入による高収益性を保証するとともに，クローン苗を用いた環境制御による鉢物や切花の周年プログラム生産の実現に大きく貢献してきた．

２．高品質クローン苗の低コスト生産を可能にする新技術

クローン苗生産ビジネスは世界中で活発に展開されているが，高い生産コスト，高品質なクローン苗を得る困難性，さらに順化時のクローン苗の枯死など多くの問題がある．このため「高品質のクローン苗をいかに低コストで生産するか」が洋ランのマイクロプロパゲーションの課題である．筆者らはこの課題を解決するための技術開発に取り組み，さまざまな先駆的技術を確立した．

(1) 高品質クローン苗の新生産法

クローン苗生産用のガラス製や樹脂製のボトル類などの培養容器は，比較的高価，低耐衝撃性，密閉での生長抑制，培地乾燥や微生物汚染の発生，など問題点が多い．そこで，ガス透過性，光透過性，耐熱性に優れたフッ素樹脂フィルムを用い，独創的な密閉箱型培養容器カルチャーパック（CP）を 1986 年に世界で最初に開発した．特に，CP 内の支持体をロックウールマルチブロック（RW）とし、液体培地を注入した培養システムでは，従来法に比べクローン苗の生育が飛躍的に促進された．また，培養室内の CO_2 濃度を高めて，無糖培地上でクローン苗の光合成能の向上と光独立栄養成長の促進が図れることから，高品質のクローン苗生産に大きく寄与した（図 3）．これらの成果は海外でのフィルム培養容器実用化のきっかけを与えた（Tanaka et al., 1988; Tanaka, 1991; Hew et al., 1995; Nagae et al., 1996; Tanaka et al., 1999; Dam・Tanaka, 2004; Tanaka et al., 2005; Teixeira da Silva et al, 2006）．

また，増殖率，輸送性および生産コストなどの観点から

図３ CO_2 施用フィルム培養システム内の無糖液体培地を注入したロックウール上で生育中のシンビジウムのクローン苗

らクローン苗の究極モデルと言える人工種子による新しい苗生産法の開発にも取り組み，コチョウランの増殖 PLB を個々に分離してアルギン酸カルシウムゲルでカプセル化したいわゆる人工種子（図 4）を，CO_2 施用フィルム培養システム（CP・RW）に植え付けるという，洋ランの新しい高品質クローン苗生産技術の開発に世界で初めて成功した（Tanaka et al., 1995）．

図４ コチョウランの体細胞胚（PLB）をカプセル化した人工種子

さらに，エンブリオジェニックカルス（EC）誘導によるクローン苗生産法の開発にも着手した．すなわち，これまで不明であったコチョウラン PLB からの EC の誘導条件を調べ，高濃度のショ糖とココナッツウオーターを添加したジェランガム培地で効率良く誘導できることを初めて証明した．この誘導した EC を供試し，従来の PLB 分割による増殖法に比べ，短期間で効率的に PLB を増殖でき，しかも得られたクローン苗の遺伝的安定性にも優れた増殖法を世界に先駆けて確立した（Ishii et al., 1997; Le Van Tuong Huan et al., 2004）．

一方，外部磁場をクローン苗生産に利用する先駆的研究にも取り組み，外部磁場条件下でのコチョウランとシンビジウムの PLB 増殖と生育促進に初めて成功し，苗の高品質化を実証した（Tanaka et al., 2010; Pham Thanh Van et al., 2011; Pham Thanh Van et al., 2012）．

(2) クローン苗生産用省電力新光源の開発と応用

クローン苗生産は，25℃前後に空調された培養室内の，蛍光ランプを光源とした多段の培養棚上で行われるため，高いランニングコスト，特に照明と空調に要する高い電力費が問題となる．そこで，LED（発光ダイオード），CCFL（冷陰極蛍光ランプ）および SILHOS（サイドライトホローシステム）を用いた新光源の開発に約 20 年間取り組み，低コスト化に成功した．これらは世界初のクローン苗生産用の省電力新光源であるだけでなく，従来の蛍光灯に比べてクローン苗の生長を顕著に促進し，高品質苗生産の実用化も実現した．

まず，1994 年に開発した LED 培養装置を用いて，超高輝度赤色 LED と青色 LED を均等配置した面状光源・CO_2 施用条件下で，無糖液体培地を注入したフィルム培養システムを用いシンビジウムのクローン苗条の培養を行った．これは，赤色・青色 LED 混合光源下でクローン苗を光独立栄養成長させた世界で最初の試みであった．その結果，赤色・青色混合 LED 下では，蛍光ランプに比べ，生育が良好で葉色が濃い強健なクローン苗が得られ，LED がクローン苗生産用の光源として有用であることを実証した（図 5）．また，一般にクローン苗の生育には赤色 80%＋青色 20%の LED 混合比が最適であることを明らかにした（Tanaka et al., 1998; Duong Tan Nhut et al., 2003）．

次に，長寿命，熱線を照射しないなどの特徴を有し，液晶テレビなどのバックライトとして使用される CCFL に注目し，蛍光塗料成分の調合によって赤色 80%＋青色 20%の混合比になるように設計した CCFL（管径 2.6 mm）を新たに開発した．この CCFL を用いて開発した CCFL 導光板型光源ユニットおよび直管型 CCFL 光源ユニット下では，蛍光ランプに比べ，高品質のクローン苗が得られることを示した．また，CCFL 直管を装着したインキュベータでは，蛍光ランプより棚あたりの電力量を約 40%削減できることが確認でき，省電力新光源としての CCFL の有用性が実証された（Tanaka et al., 2009; Norikane・Tanaka, 2010; Norikane et al., 2010; Wang et al., 2010）．

図 5　クローン苗の生育に最適な赤色・青色 LED 混合比を調査するために開発した LED PACK３

さらに，種苗工場用光源として蛍光ランプを用いた新照明方式の SILHOS を開発した．SILHOS は，端部に透明板で仕切られた発光部から出た光を反射板や中空および拡散面を経由して，均一に下方の培養棚面に照射する構造となっている（図 6）．SILHOS 光源下では，従来法に比べてクローン苗の生育が促進され，しかも SILHOS 設置の培養室における電力費（照明＋空調費）は，従来法と比べ単位棚面積当りで約 60%以上低減できた（田中ら，2008；田中，2014）．

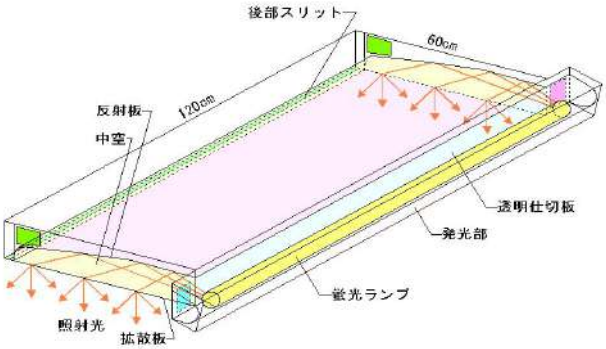


図 6　省電力新照明方式 SILHOS の構造図

高品質クローン苗の低コスト生産を可能にするこれらの新技術は，洋ランだけでなく，他の植物種のクローン苗生産にも適用できるもので，種苗生産ビジネスにおける革新技術として産業的にも評価されてきた．

引用文献

Dam Thi Thanh Giang and Tanaka, M. (2004) Photoautotrophic micropropagation of *Epidendrum* (Orchidaceae) using disposable, gas

permeable film vessel. Propagation of Ornamental Plants. 4: 41-47.

Duong Tan Nhut, Takamura, T., Watanabe, H., Okamoto, K. and Tanaka, M. (2003) Responses of strawberry plantlets cultured *in vitro* under superbright red and blue light-emitting diodes (LEDs). Plant Cell, Tissue and Organ Culture. 73: 43-52.

Hew, C. S., Hin, S. E., Yong, J. W. H., Gouk, S. S. and Tanaka, M. (1995) *In vitro* CO_2 enrichment of CAM orchid plantlets. Journal of Horticultural Science. 70: 721-736.

Ishii, Y., Takamura, T., Goi, M. and Tanaka, M. (1997) Callus induction and somatic embryogenesis of *Phalaenopsis*. Plant Cell Reports. 17: 446-450.

Le Van Tuong Huan, Takamura, T. and Tanaka, M. (2004) Callus formation and plant regeneration from callus through somatic embryo structures in *Cymbidium* orchid. Plant Science. 166: 1443-1449.

Nagae, S., Takamura, T., Tanabe, T., Murakami, A., Murakami, K. and Tanaka, M. (1996) *In vitro* shoot development of *Eucalyptus citriodor*a on rockwool in the film culture vessel under CO_2 enrichment. Journal of Forest Research. 1: 227-230.

Norikane, A. and Tanaka, M. (2010) The growth response of *Phalaenopsis* plantlets cultured under Cold Cathode Fluorescent Lamps (CCFL) and high CO_2 enrichment. Propagation of Ornamental Plants. 10: 67-74.

Norikane, A., Takamura, T., Morokuma, M. and Tanaka, M. (2010) *In vitro* growth and single-leaf photosynthetic response of *Cymbidium* plantlets to super-elevated CO_2 under cold cathode fluorescent lamps. Plant Cell Reports. 29: 273-283.

Pham Thanh Van, Jaime A. Teixeira da Silva, Le Huy Ham and Tanaka, M. (2011) Effects of permanent magnetic fields on the proliferation of *Phalaenopsis* protocorm-like bodies using liquid medium. Scientia Horticulturae.128: 479-484.

Pham Thanh Van, Jaime A. Teixeira da Silva, Le Huy Ham and Tanaka, M. (2012) Effects of permanent magnetic fields on *in vitro* growth of *Cymbidium* and *Spathiphyllum* shoots. In Vitro Cellular and Developmental Biology – Plant. 48: 225-232.

Tanaka, M. (1991) Micropropagation of *Phalaenopsis*. Biotechnology in Agriculture and Forestry, Vol.20 High-Tech and Micropropagation IV. Bajaj, Y. P. S. (ed.). pp. 497, Springer-Verlag, 246-268.

Tanaka, M. (1991) Disposable Film Culture Vessels. Biotechnology in Agriculture and Forestry. Vol.17 High-Tech and Micropropagation I. Bajaj, Y. P. S. (ed.). pp. 555, Springer-Verlag, 212-228.

田中道男（1997）クローン苗生産.（今西英雄・田中道男ら著, 園芸種苗生産学. pp.197, 朝倉書店）102-126.

田中道男（2014）組織培養（マイクロプロパゲーション）.（今西英雄, 腰岡政二, 柴田道夫, 土井元章編, 花の園芸事典, pp.444, 朝倉書店）92-99.

Tanaka, M., Sakanishi, Y. (1977) Clonal propagation of *Phalaenopsis* by leaf segment culture. American Orchid Society Bulletin. 46: 733-737.

Tanaka, M., Sakanishi, Y. (1978) Factors affecting the growth of *in vitro* cultured lateral buds from *Phalaenopsis* flower-stalks. Scientia Horticulturae. 8: 169-178.

Tanaka, M. and Sakanishi, Y. (1980) Clonal propagation of *Phalaenopsis* through tissue culture. Proceedings of the 9th World Orchid Conference. (Kashemsanta M.R.S. (ed.). Amarin Press, 215-221.

Tanaka, M., Goi, M. and Higashiura, T. (1988) A novel disposable culture vessel made of fluorocarbon polymer films for micropropagation. Acta Horticulturae. 226: 663-670.

Tanaka, M., Kumura, M. and Goi, M. (1983) Surface-sterilization for *in vitro* culture of *Phalaenopsis* flower-stalk cuttings using antimicrobials. Acta Horticulturae. 131: 321-328.

Tanaka, M., Kumura, M. and Goi, M. (1988) Optimal conditions for shoot production from *Phalaenopsis* flower-stalk cuttings cultured *in vitro*. Scientia Horticulturae. 35: 117-126.

Tanaka, M., Norikane, A. and Watanabe, T. (2009) Cold Cathode Fluorescent Lamps (CCFL): Revolutionary light source for plant micropropagation. Biotechnology & Biotechnological Equipment. 23: 1497-1503.

Tanaka, M., Dam Thanh Giang and Murakami, A. (2005) Application of a novel disposable film culture system to photoautotrophic micropropagation of *Eucalyptus* Uro-grandis (*E. urophylla* x *E. grandis*). In Vitro-Cellular and Developmental Biology-Plant. 41: 173-180.

Tanaka, M., Hayakawa, J., Nishimura, M. and Goi, M. (1990) Micropropagation of *Phalaenopsis* by leaf segment culture. Proceedings of the 3rd Asia Pacific Orchid Conference. Sooter, R. (ed.). The Orchid Club of South Australia Inc., 6-13.

Tanaka, M., Pham Thanh Van, Jaime A. Teixeira da Silva and Le Huy Ham (2010) Novel magnetic field system: Application to micropropagation of horticultural plants. Biotechnology & Biotechnological Equipment. 24: 2160-2163.

Tanaka, M., Yap, D. C. H., Ng, C. K. Y. and Hew, C. S. (1999) The physiology of *Cymbidium* plantlets cultured *in vitro* under conditions of high carbon dioxide and low photosynthetic photon flux density. Journal of Horticultural Science & Biotechnology. 73: 632-638.

Tanaka, M., Yoneyama, M., Minami, T. and Noguchi, K. (1995) Micropropagation of *Phalaenopsis* by using synthetic seeds in film culture vessel. Proceedings of the 14th World Orchid Conference. Pridgeon, A.M. (ed.). HMSO Publications Centre, 180-187.

Tanaka, M., Takamura, T., Watanabe, H., Endo, M., Yanagi, T. and Okamoto, K. (1998) *In vitro* growth of *Cymbidium* plantlets cultured under superbright red and blue light-emitting diodes (LEDs). Journal of Horticultural Science & Biotechnology. 73: 39-44.

田中道男・則包篤志・笹岡まどか・奥田延幸・磯崎政巳・谷口将一・下田辰雄・坂谷英志郎（2008）クローン苗生産における省電力新光源の開発, 植物環境工学, 20:125-135.

Teixeira da Silva, J. A., Giang, D. D. T. and Tanaka, M. (2006) Photoautotrophic micropropagation of *Spathiphyllum*. Photosymthetica. 44: 53-61.

Wang, H. Y., He, S. L., Tanaka, M., Thanh Van, P. and Jaime A. Teixeira da Silva (2010) Effects of 2,4-D on callus formation in tree peony (*Paeonia suffruticosa* Andr.) under different light conditions. Floriculture and Ornamental Biotechnology. 4: 99-102.

作物反応を活用した環境制御技術の開発

小沢　聖

明治大学黒川農場

215-0023 川崎市麻生区黒川 2060-1

要旨

作物の生体反応を活用することで，環境制御の効果を高めたり，経費を節減したりできる．とくに，これまで見落とされがちであった根と夜の環境に対する反応は,水ストレスの軽減,栄養塩の吸収に大きな役割を演ずる．本稿では著者がこれまでに，これら反応を活用して得られた高温，低温に対する対策技術の知見を紹介する．

キーワード

高温低温対策，溝底栽培，夜間養液供給，遮光，葉面噴霧

緒言

これまでの環境制御は，あまりに工学的で，環境への作物の生体反応を軽視している．そのため，巧妙さ，面白さに欠け，設備は巨大化，複雑化する．当然，経費は増加し，農家，行政，消費者の負担は増える．作物の生体反応を決める最大の要因は，日射により生じる環境の 1 日のサイクルである．例えば，遮光が要望されるような水ストレス環境下では，光合成は体内水分が十分な午前中に多い.そのため,午前遮光で収量は低下する一方，午後遮光は光合成への影響は少なく，体内水分の損失を減らし，増収することが多い．このように生体反応を活用することで，環境制御の効果を高めたり，経費を節減したりできる．本稿では，著者がこれまでに高温対策，低温対策として得た知見を紹介する．これらの作物視点を環境制御に取込むことの有用性と面白さを認識してもらえれば幸いである．なお，誌面の都合，具体的なデータと詳細は割愛するので，引用文献を参照されたい．

研究の背景

著者は 1977 年 10 月から父島にある東京都小笠原亜熱帯農業センターに 10.5 年，1990 年から盛岡にある東北農業試験場に 10 年，2000 年から石垣島にある国際農林水産業研究センター沖縄支所（2006 年から熱帯島嶼拠点）に 12 年勤務した．亜熱帯島嶼では，海に囲まれているため，夜温が同緯度の大陸に比べて高く，7 から 9 月には大陸の熱帯より高い．高夜温による作物体の呼吸量増加で，秋から冬に向けて露地で栽培する多くの果菜類で花芽の発育，花粉の稔性が不良となる．

この対策として，光合成向上のための水ストレス軽減に研究を向けた．しかし，潅水に頼る栽培法では期待する効果は得られなかった．一方で，定植時とその後の１週間に１から２回，株元に潅水することでトマト，メロンで満足な収量が得られた．これは伝統的農法で，下層土への根の伸長を促進し,体内水分を高めて安定させる．小笠原の土壌は重粘土で有効水分は少ないが，不飽和透水係数が高い特徴が関係するとみられ，浅根を増やす潅水，マルチが不適であった．とくに，根の伸長が 15 から 18 時にかけての体内水分の回復を早め，夜間の体内水分を多く保つ効果が大きかった．この結果がその後の著者の研究を闇の２つの半分「根」と「夜」に導いた．

根の伸長と栄養塩吸収

小笠原では，高温，強日射，有効土壌水分の少なさで作物が日中，日常的に水ストレスを受ける．施肥する耕土層には栄養塩は多いが土壌水分は少なく，土壌溶液濃度は高まる一方，下層土には土壌水分は多いが栄養塩は少ない．このような土壌環境での作物の定常的な吸水吸肥の仕組みに疑問を感じた．

高温期の根の伸長の特徴

作物の葉と根の生育バランスは高温期と低温期で大きく異なる．父島での地這いメロンでは，葉面積指数は高温期作で増加速度は速かったが，低温期作で栽培期間が長いため両作で収穫終了期に差はなかった．一方，根長は両作で同様の速度で果実に糖蓄積が始まる時期まで増加し，その後，減少した．最大根長は，生育期間の短かった高温期作で低温期作の 1/3 にすぎなかった．この結

果は，少ない根で多くの地上部を負担する高温期の厳しい一面を示す．ハウス栽培では，蒸散抑制，高頻度潅水による体内水分上昇が,根の伸長をさらに抑制するため,少ない根でさらに多くの地上部を負担することになり，根の量と質の低下を抑制する配慮が必要である．

高温期に根の量を増やし，質を維持するうえで葉面積の確保が欠かせないため，温帯の栽培指針にある整枝，剪定を熱帯，亜熱帯に適用することは禁物である．さらに高温期には，施肥や塩類集積による土壌溶液濃度の上昇が根の被害を助長する．この被害は，条溝施肥などで根の逃げ場を作ることで改善できる．とくに過剰施肥を避けること，成分の溶出が遅い緩効性肥料，元肥を施肥しない養液土耕栽培の利用が有効な対策である．

栄養塩の吸収時刻

作物には，特異的に栄養塩を吸収しやすい時刻帯がある．石垣島での水耕キュウリでの実験では，硝酸態窒素吸収のピークが蒸散の卓越する 12 時ころと,蒸散のない日没直後にあった．著者らは，後者のピークを，早夜間吸収（Early Night Absorption，ENA)と呼んでいる．エンサイ，ニガウリでの水耕実験で遮光した昼に続く夜に硝酸態窒素を吸収しなかったことから，ENA の原動力は光合成で生産されたエネルギーに関係するといえた．

ENA には，作物，栄養塩による差がある．1 日の硝酸態窒素吸収に及ぼす ENA の割合は，水耕のキュウリ，コマツナ，トマト，エンサイ，水稲で，それぞれ 41，32，29，28，20 %で，作物間差が大きかった．カリの吸収は，エンサイで遮光に続く夜まで，ニガウリで翌日の無遮光の昼まで抑制され，アンモニア態窒素の吸収はエンサイ，ニガウリとも昼夜一定速度で，遮光の影響はなかった．

固形肥料を施肥した土耕栽培のトマトに早夜間に水供給を続けても増収しなかったが，培養液では増収した．固形肥料と，吸水のない夜の水供給との組合せでは，根表面へ移動する栄養塩が少ないため ENA は起こらなかったと考えられる．しかし，ENA の作用だけでは土壌水分の乏しい耕土層からの吸肥は説明できず，根を介して湿潤土壌から乾燥土壌に水を運ぶ Hydraulic lift の関与を考える必要がある．

ENA の詳細には未だ不明なことが多いが，養液土耕栽培では ENA を有効に活用した高温対策が可能になる．日中に培養液の替りに水を供給して水ストレスを軽減し，早夜間に日中に不足した栄養塩を高濃度培養液で補う．これにより，夏のキュウリでは，陸前高田での 30%増収などの有効な結果が得られている．一方で，トマトでは ENA の効果が明確でなく，原因の解明が必要である．

根の部分的吸水吸肥

側枝から発根させた２根系を持つトマト個体を作り，それぞれの根系に，別々に，濃度の異なる培養液を満たしたワグネルポットを組合せて水耕した．その結果，作物体は高濃度と低濃度の培養液を，葉との水ポテンシャル差に基づいて吸収し，あたかも適正濃度に近づけるように双方の培養液からの割合を調節して吸収する．この割合は一定でなく，晴天日には葉の水ポテンシャルが低下するので高濃度培養液の吸収割合が増えるので，生育の定常性を保つうえで有益である．

単独では障害を受ける高濃度培養液中の根でも，一方の根が低濃度培養液中にあると障害を受けない．蒸散がほとんどなくなる夜間に高濃度培養液中の根の水ポテンシャルが上昇することから，低濃度培養液中の根からの体液の移動が関係していると考えられる．

このような根の機能は，根圏の土壌溶液濃度をヘテロに管理する有益性を示唆する．条溝施肥，耕盤破砕などが具体的な手法である．

高温対策

根圏の土壌水分，地温を安定させることで，作物体の水ストレスを軽減できる．この最も簡単で現実的な方法が，根を深く伸長させることである．

水の葉面噴霧

トマトなどが高温期の定植直後に作物体が水ストレスを強く受けると，気孔コンダクタンスが低下して体内水分を多く保ち，葉が小さく厚くなり，葉身や葉柄が上向きに角度を変えることが頻繁にある.この現象に陥ると，吸水の減少で土壌水分の減少が抑制され，水を供給しても回復に 1 か月以上かかり，収量は大きく低下する．これは乾燥環境での植物の生存戦略である乾生形態に類似することから，著者らはこの形態に陥る過程を乾生反応（Xeromorphic Reaction）と呼ぶことを提唱している．

葉の濡れで気孔コンダクタンスが上昇することは広く知られている．水ストレス環境下で，定植直後から毎日 15 から 16 時に，5 から 10 日間， 1 日 1 から 2 回，水を霧吹き程度に葉面噴霧することで乾生反応を回避できる作物がある．中国の新疆ウイグルで，サツマイモとキャベツの苗を植付直後に潅水し，その後，毎日 16 時に 10 日間，葉面噴霧した結果，葉面噴霧が生育を，サツマイモで促進し，キャベツで抑制した． 父島では同様にトマトで促進し，メロンで抑制した．双方での効果は多潅水より大きかった．

父島でルートボックスにトマトを定植し，葉面噴霧を時刻別に処理した結果，15 時の葉面噴霧が，処理直後の根の伸長を促進し,この効果は 9 時と 12 時の噴霧では得られなかった.父島で露地圃場に定植し,定植後 9 日間，葉面噴霧したトマトの第 5 花房までの収量は， 15 時噴霧区で 9 時と 12 時の噴霧区,潅水量を 1.8 倍に増やした多潅水区より多かった．15 時噴霧による根の伸長で噴霧直後だけでなく午前中の葉の水ポテンシャルも上昇したことから，葉面噴霧で根の伸長が促進され，根が包容す

る土壌容積が増えたことで,吸水量,体内水分が増加し,根の伸長がさらに促進され,増収したといえる.葉面噴霧による根の伸長,光合成速度の増加は,定植直後のパパイヤでも認められたが,この効果は作物体の吸水能力が高まった1カ月後にはみられなくなった.

葉面噴霧が有効な作物と,無効な作物との差には,Pressure-Volume Curveが影響するようだ.これは,体内水分と水ポテンシャルの関係曲線で,体内水分低下に対する水ポテンシャル低下が,トマト,パパイヤ,セルリ,トウガラシ,オクラ,サツマイモで大きく,メロン,キュウリ,カボチャ,ツケナ,インゲン,キャベツで小さい.気孔コンダクタンスの上昇による体内水分の低下で,前者で吸水能力の上昇が大きい.

溝底栽培

地表面に溝や穴を作り,その底に栽培することで地温の日変化を小さくし,高温被害を軽減できる.石垣島でハウスの地表面に,深さ10㎝,幅20㎝の溝を作り,12月にトマトをマルチなしで定植し,5月まで収量を平畝と比較したところ,溝底で23%増収した.同様に東北タイで乾期の落水水田に,高畝(高さ20㎝,幅40㎝),平畝,溝(深さ20㎝,幅40㎝)を作り栽培したトウガラシの生育は溝底栽培で優れ,それぞれの個体収量は223,310,466gであった.溝底栽培では15時以降に気孔コンダクタンスが上昇する特徴があった.

溝底栽培には,土壌水分保持,塩集積抑制の効果もあり,中国の新疆ウイグルでのコマツナでは発芽率,播種2週間後の個体葉面積ともに平畝に比べて2倍であった.溝底栽培の欠点は水が貯まり易いことで,雨の多い地域,時期での利用には雨よけの併用などの工夫が必要である.

遮光時刻と期間

遮光は,栽培環境では光,地温,土壌水分に,生体反応では光合成,葉温,体内水分,地下部に対する地上部の割合に,商品性では果実の日焼け,着色,糖度などに影響するので,収量,品質との関係は複雑である.

Mihara and Hayashi(1978)が低温対策のために考案した半地下式のトレンチハウスは,周辺土壌との熱交換で冬に暖かいだけでなく,夏に涼しい.そこで,石垣島に幅6m,深さ2mの南北向きでネットとフィルムを被覆したトレンチハウスを施工し,高温被害の軽減効果を評価した.トレンチハウスでは,向き,幅,深さ,太陽高度との関係でハウス内の光条件が日変化する.南北向きでは,朝にハウス内西側から直達光が当たり始め,太陽高度の上昇にともなって直達光の到達範囲がハウス内東側に広がり,南中時には影がなくなる.その後,夕刻に向けてハウス内西側から影がハウス内東側に拡大する.作物体に当たる直達光は,作物体の上部ほど多い.

実験に用いた6種類の全野菜で,生育,収量はトレンチハウスで冬と夏に優れたものの,春と秋に劣り,年間を通じた利点はなかった.一方,80Lポットで育成した2年生パパイヤでは,8から11月の収量はトレンチハウスで対照ハウスの3倍だった.対照ハウスでは,座死する幼果が多かったうえに果実肥大が抑制された.

同様のパパイヤをトレンチと対照のハウスそれぞれの西側,中央,東側の3列に配置した.対照ハウスに比べて1日の光合成速度は,トレンチハウスの中央と東側の個体で低下したが,午後遮光される西側の個体では高かった.ポット土壌の地温はトレンチハウスで日中に低く,最大差は西側で3.2℃,東側で0.9℃,中央で0.5℃であったが,トレンチハウス内での収量差はなかった.

夏の石垣島で,キュウリの初期生育に及ぼす午前と午後の遮光の影響を,根圏温度が遮光の影響を受ける土耕と,培養液の循環で受けない水耕で比較した.その結果,無遮光に比べて地上部乾物重は,土耕では午前遮光で1.11,午後遮光で1.34であったのに対して,水耕では午前遮光で0,49,午後遮光で0.52であった.このことは,午後遮光による地温上昇の抑制効果が大きいことを示す.

父島でトマトの第1花房開花開始期から20日間,花房と個体を個別に遮光し,無遮光と比較した.2重の白寒冷紗#300(公称遮光率22%)を,花房遮光には1辺5㎝に加工して花房直上に固定し,個体遮光では袋状に全面に被覆した.その結果,個体遮光が開花数,着果率,果実肥大を抑制するだけでなく,花房遮光だけでも着果率,果実肥大を抑制した.

通常のハウスでの35%(公称)の通日遮光処理したパパイヤでは,開始2週間までに開花した花で,無処理に比べて開花速度に差はなく,これら花のその後の果重は増加した.しかし,開始2週間以降に開花した花で,開花速度,その後の果重は低下したことから,本実験条件での遮光効果は,処理開始2週間までであった.

遮光制御には,理論的な背景に基づいた増収のためのガイドラインが求められる.しかし,作物の種類と生育ステージ,遮光の時刻と時期,資材の光と熱に対する特性といった多くの要素が関与する.従来の手法にとらわれない巧妙な実験方法が求められる.

養液土耕栽培における高温培養液の被害軽減

養液土耕栽培で高温期の供給培養液温度の上昇は,避けられない問題である.ハウス内にチューブを配管すると,断熱しても日中には作物体に35℃ほどの培養液を供給することになる.この対策実験は,夏に石垣島のコンクリート床のハウスで実施した.ヤシ殻培地を充填したポットにキュウリを定植し,地下タンクからポリエチレンチューブを通して水と培養液を供給した.水あるいは培養液の供給をそれぞれ昼と夜で組合せ,この処理をチューブの長さが異なるタンク近くと遠くにを設けた.ポットに供給される液温は,近くでは昼32℃,夜30℃で,遠くでは昼34℃,夜28℃で変化した.収量は,タンクから近くでは,昼と夜の水と培養液の供給で影響なかった.

一方，タンクから遠くでは，昼に培養液，夜に水の供給で収量は大きく低下した一方，昼に水，夜に培養液の供給では収量は低下しなかった．この結果は，昼に水だけを供給することにより，夜間の栄養塩吸収が長時間に及ぶことを示唆する．

低温対策

根圏環境の改善は，低温対策にも通じる一面がある．

べたがけ溝底栽培

溝の底では地温の日変化が抑制されるので，低温対策としても有効である．深さ 5 ㎝，幅 10 ㎝ほどの連続した溝を作り，その底に播種し，べたがけを被覆して保温する．この方法で，冬の寒冷地で無加温ハウスを使ったコマツナ，ホウレンソウなどの栽培が容易になる．べたがけ被覆下の深さ 4 ㎝の地温は，従来の平床に比べて溝底では日射の多い日に続く夜に 1℃，少ない日に続く夜に 0.4℃高まる．一方，日中は逆に平床で高まり，日平均地温はほぼ同じである．温度勾配チャンバーにコマツナを平床と溝底に播種してべたがけ被覆して評価したところ，溝底での生育は，平床での 1.3℃気温上昇に匹敵した．この差は，冬の盛岡を 85 ㎞南の一ノ関に移す効果である．

地温上昇効果の特異時刻

盛岡で 5 月末に雨よけハウスに定植したトマトに，直後から時刻別に土壌加温し，生育，収量に及ぼす影響を解析した．定植 3 日後の深さ 10 ㎝の地温は，9:00 に最低で 15℃，15:30 に最高で 22℃であった．一方，日射量，気温は地温に先立って 6 時ころから急な上昇を始めていた．この日の蒸散速度をスーパーポロメータで 8:00，12:30，15:30 に測定した．その結果，9-12 時加温で，加温中と加温終了後の蒸散速度の上昇が大きかった．

定植 28 日後の葉の乾物重は，9-12 時と 12-9 時の加温で多く，15-18 時加温では無加温と同等に少なかった．加温処理を定植から 40 日間継続し，第 3 花房までの収量を比較したところ，9-12 時加温で，24 時間加温並みに多く，それも，晴天日 9-12 時加温で同等の収量が得られた．一方，曇天日 9-12 時加温では，無処理と同等の収量しか得られなかった．6-9 時加温，12-15 時加温での収量は，9-12 時加温より少なかった．

これらの結果から，地温上昇効果が高い時刻帯は，9-12 時といえ，日射，気温の上昇で地上部は光合成に好適な条件にあるにもかかわらず，根圏温度の上昇が熱伝導の影響で遅れている時刻帯である．著者は，地温を，「日変化のミスキャスト」と呼んでいる．

究極の低温対策，寒締め栽培

究極の低温対策は，低温活用である．寒冷地で冬に向けて無加温ハウスで栽培したホウレンソウ，コマツナなどの葉菜類を収穫サイズに達するころに，サイドフィルムを開放して寒さに暴露する．すると，生育が抑制されて 10 日ほどで糖，カロテン，リコペンなどの栄養価が高まり，美味しくなる．これに「寒締め栽培（Cold Enriched Cultivation）」と名付けた．技術のポイントは，「ハウス開けてもべたがけとるな」で，低温馴化開始後の耐寒性を高める期間に，日最低葉温を急に下げないことである．馴化終了後にはべたがけをはがす．

おわりに

近年，先端技術が農家に普及している一方で，常識を疑うような制御の過ちを目にすることが多い．とくに，古い研究成果が見落とされがちで，先人たちの努力の一端を知る著者にとって，痛恨の極みである．

怪しげな技術利用の背景には，現場の研究者，技術者の知識不足がうかがえる．正しい知識と理解を広めるためには，県の試験研究機関などで，専門家が実験現場をみせながらデータを示すことが効果的である．ところが近年，多くの県では施設改修の結果，実証展示する立派な大型ハウスは整備されたが，そこに至る技術を構築するための小型の実験ハウス群が減ってしまった．また，職員も減って，事務量も増えて，研究者の負担は限界を超えている．さらに，頻繁で半強制的な職種間異動が研究者の意欲と長期ビジョンの喪失を招いている．現役の諸兄諸姉には，現状に泣き寝入りせず，廃墟と負債を抱えた農家を増やさないために知恵を絞ってもらいたい．

謝辞

このたび栄誉ある日本農業工学会賞に推薦くださった日本農業気象学会と関係者に深く感謝する．著者は 1977 年に大学卒業後，東京都農業試験場に就職したものの，研究環境に不満で，大学院への受入れを恩師の故中山敬一先生に懇願したところ，「馬鹿野郎」と一喝された．これがなければ，今ごろ，こじんまりした研究で，面白くない人生を送っていたことであろう．長期間にわたる研究で中山先生をはじめ多くの方にお世話になった。とくに、岡田益己（岩手大学），三原義秋（故人），和田実（元東京都小笠原亜熱帯農業センター），高垣美智子（千葉大学），深町浩（農研機構果樹研），奥山洋大（㈱レックスインターナショナル），松尾直樹（農研機構九沖センター），高橋正史（国際農研）には，格別のご支援をいただいたことに感謝する（敬称略）．さらに、研究資金の多くを支援くださった農林水産省と関係者に深くお礼申しあげる．

引用文献

小沢　聖（2019）作物反応を活用した高温対策制御，生物と気象，19：47-59.

カバークロップによる農耕地環境改善と作物生産性向上に関する研究

荒木　肇

北海道大学北方生物圏フィールド科学センター（現在；新潟食料農業大学食料産業学部）

要旨

カバークロップ（CC，緑肥）は持続的農耕地管理の生物的ルールである．秋季に播種した麦類を春季成熟後に刈倒し，敷藁とリビングマルチを混在させてスイカを栽培し，除草作業を軽減した．マメ科 CC のヘアリーベッチ（HV）をオーガニック（植物残渣）マルチとして活用し，不耕起と結合した栽培体系を施設トマトに導入した．HV の窒素供給効果が認められたが，すき込み処理がより効果的であった．HV 窒素の無機化はすき込み後 1 か月で生じ，HV でトマト初期生育を，化学肥料により後期生育を維持させる体系を提示した．出穂直後のライムギ Rye と HV の残渣を混合して CN 比を低下させると，後期においても HV からの窒素供給も可能となった．

キーワード

カバークロップ（CC），ヘアリーベッチ（HV），ライムギ（Rye），植物残渣，減肥料生産

緒言

1990年代にアメリカでは土壌流亡を抑制する技術として，不耕起栽培とともにカバークロップ(CC)が推奨され，CCのオーガニックマルチ（残渣マルチ）を地表面に残して不耕起状態で栽培するオーガニックマルチ・不耕起がLISA（Low Input Sustainable Agriculture）の１形態として研究されていた．日本ではカバークロップは緑肥の呼称から養分供給が強調されてきたが，有機物や肥料分供給以外にも，風食防止，残留窒素の吸収，雑草抑制等の視点をあてて栽培体系が示された．つまり，圃場環境制御のための生物的ツールと考える（荒木2005）．

１．オーガニックマルチの活用

1-1. 麦類の生態系の中でのスイカ栽培

前年秋季に小麦や大麦を播種する．翌春 4 月下旬から出穂するが，その直後にスイカ畝部分を耕起し，黒マルチ・平畝を成型する．5 月中下旬に種子が成熟した頃に畝間のムギを刈り倒し，麦稈マルチを地表に形成する．スイカをマルチ畝に定植する．地表面が保湿され，麦稈先端から穂発芽が起こり，麦稈マルチとリビングマルチの混合状態になる．スイカ茎は麦稈上を伸長するが，リビングマルチの茎葉に絡みつき，スイカ茎葉を固定させる．スイカ果実は 7 月中旬に成熟し，リビングマルチの茂みの中で果実が肥大し，直射光も少なくなり，過熟状態が緩和された（図 1）（Araki et al.,1999）．

麦稈マルチでは刈倒し直後には地表面へ到達する光量子密度を 20%以下に低減し，麦稈マルチとリビングマルチの併存は地表面の遮光を高めて 7 月期の雑草量を大きく抑制した．

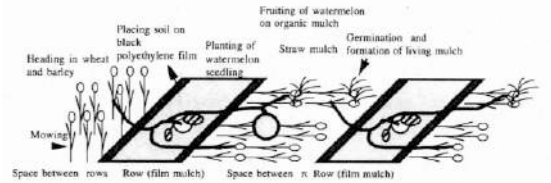


図 1 麦稈マルチとリビングマルチ環境でのスイカ栽培のイラスト

このシステムによる雑草抑制にはムギ種が関与した．オオムギは葉が大きくリビングマルチでの遮光能力は高いが，茎葉とも分解が早い．コムギは細稈で緻密な麦稈マルチを形成して分解も遅いため，最終的な雑草抑制はコムギで高かった．

夏季に播種して茎葉を繁茂させたオオムギの地表面遮光を画像処理により評価し，緑肥用コムギ（地表面遮光率 50%）より大きな遮光能力を有するオオムギ 3 系統が選抜された（中野ら 2003）．

1-2. オーガニックマルチ・不耕起栽培

日本ではカバークロップは緑肥の呼称から養分供給が強調されてきたが，有機物や肥料分供給以外にも，風食防止，残留窒素の吸収，雑草抑制等の視点をあてて栽培体系が示された．つまり，圃場環境制御のための生物的

ツールと考える（荒木2005）.

当時，アメリカでは土壌流亡を抑制する技術として，不耕起栽培とともにカバークロップ(CC)が推奨され，CCのオーガニックマルチ（植物残渣マルチ）を地表面に残して不耕起状態で栽培するオーガニックマルチ・不耕起がLISA（Low Input Sustainable Agriculture）の１形態として研究されていた（Abdul-Baki et al.,1996; Abdul-Baki et al.,1997; Sainju et al., 2000）.

緑肥用コムギと1年性マメ科牧草・ヘアリーベッチ（以下HV）を栽培し,9月に刈り倒して「オーガニックマルチ・不耕起」状態で結球型レタスを無肥料で試作すると，HVマルチ圃場での収量が増加した(Araki and Ito,1999). オーガニックマルチ圃場の地温は無マルチ耕耘圃場より安定し,夏季や初秋では地温を低下させ,晩秋には地温を上昇させた. 土壌水分に関して，地中15cmのpF値は無マルチ耕耘圃場では梅雨終了後急速に上昇したが, HVマルチ圃場ではpF1.5～1.8に維持され，保水性が示された.

2. カバークロップを導入した施設トマト生産

2-1. HVマルチ不耕起でのトマト栽培

CCの中でHVに注目して, 施設トマト栽培への導入を検討した．その理由は ①施設野菜は多窒素施用，これをHVで代替（乾物当たり窒素含有率は４%で，CN比も低い） ②HVの多量バイオマスによる雑草抑制・保湿効果 ③アレロパシー効果もあること ④刈り倒し後のハンドリングのしやすさであった. HVは乾燥しても粗剛でなく, アメリカでも「不耕起＋HVマルチ」状態での野菜機械定植が実施されている．施設栽培（土耕）では塩類集積が問題にはなっているが, 海外でのCC導入研究は限られていた（Kumar et al.,2005）.

新潟大学農場のハウストマトへ不耕起とHVを導入すると，不耕起−HV では不耕起土壌の硬度を低下させ，土壌３相の構成比率の変化を緩和した（Araki and Fujji,2013）．トマト収量は耕起-HV で最大となり，ついで耕起と不耕起−HV で，不耕起では減少した．HV マルチはトマト生育初期にトマト植物体中の硝酸含有量を高め, それが生育促進と収量増加に結びつくと考えられた.

2-2. HV による減肥料体系

北海道大学に移動して，HV を活用した減肥料を含めた環境保全研究を遂行した．当時は積雪地越冬が可能なHV 品種がなく，３月下旬に除雪し，ハウスにフィルム設置→4 月上旬に CC 播種（エンバク Oats と HV またはこれらの混合 Mix），約２か月育成して６月上旬に緑肥を刈り取り，マルチまたはすき込みの処理→トマトを定植する体系である．播種量（/10a）について，HV は 5 kg, Oats は 10 kg，Mix 区は HV 3.5 kg + Oats 5 kg であった.

トマト栽培時の窒素施肥量は, HVを導入せず耕起した慣行区のみ24kgN/10a，他は12kgN/10aとした．この体系を2007年から2012年まで継続したが，2009年からはCC導入区は窒素施肥量を8kg/10aに減じた.

2007年には慣行（耕起N24kg）とHVマルチ（N12kg）は他より高い収量を示した（表１）(Araki et al., 2009). この傾向はN肥料を1/3減した2012年まで同じ傾向を示した．収穫期間変動による年次間の収量変動は認めたが，常に慣行（N24kg耕起）とHVマルチ，HVすきこみ区は高め収量で，Oats区，Mix区は低い値を示した．従って，HVは化学肥料と代替できる可能性があり, 特にすき込み処理でその効果は大きい傾向にあった. 2011-12年の可販

表１ トマト可販収量に及ぼすカバークロップの影響

処理区	可販果実収量 t/10a)					
	2008	2009	2010	2011	2012	平均
N24	7.7	3.9	4.5 a	4.9	5.6 a	4.7 a
HVマルチ	7.9	3.6	4.0 ab	4.2	4.5 ab	4.1 a
HVすきこみ	7.0	3.4	4.6 a	4.4	4.8 ab	4.3 a
Oats	6.2	2.0	2.6 b	2.5	3.1 b	2.6 b
Mix	7.1	2.5	3.0 b	2.7	3.9 ab	3.0 b
平均	7.2	3.1	3.7	3.8	4.4	3.8
Tukey's test	NS	NS	*	NS	*	*

1果実重が2008年と比べて約50 g減少し，長期間の不耕起状態の影響も示唆された.

全炭素含有率について，10-15cm 深では処理間差異はなく，土壌表層 0-5 cm において，CC バイオマスが大きかった Mix 区で全炭素含有率がやや高くなる傾向を示した．HV やエンバクのマルチ処理では，土壌表層に土壌動物が増え，CC の導入圃場では微生物の呼吸速度が増加した.

2-3. 安定同位体を利用した HV 由来窒素の動態

HV 由来窒素の動態把握が肥培管理には必要であり，安定同位体 15N を活用して調査した．HV を育成する段階で窒素成分が 15N の塩化アンモニウムを施用して HV に吸収させ，その HV 茎葉を充分量ポット土壌にすき込み，HV から放出される 15N のトマト吸収や土壌残存を調査した. ポットへの窒素施肥量は 0, 8, 24kg/10a として，速効性と緩効性を 2:8 で混合した（Sugihara et al., 2013）.

株（ポット）あたりのトマト収量はどれも約 1000g/株で，N 施肥量が変化してもトマト収量に差異はなかった．植物体全体の窒素吸収量は N24 が最大で 2420mg，N8 と N0 は 1800mg 前後で N24 より少なかった（表 2）. 他方，HV 由来窒素は N8 と N0 では 640，660mg で N24 の 580mg より多くなった．HV 由来窒素の全吸収窒素に対する割合（HV 寄与率 HV/Total）は N8 と N0 で 35-39%，N24 で 24%であった. この結果は窒素肥料が少ない時には HV

表２トマトの由来別窒素吸収に及ぼす N 施肥量の影響

N施肥	由来別N吸収量(mg/株)			HV寄与率
(kg/10a)	Total	土壌＋肥料	HV	(HV/Total)
0	1,780	1,120	660	39
8	1,810	1,170	640	35
24	2,420	2,140	580	24

由来窒素を相対的に多く吸収して発育することがわかる．

HV 由来窒素の吸収は定植 1 週後から始まり，定植 4 週後までに吸収された（図 2）．トマトは茎葉を生育させるために常に窒素肥料を吸収し続け，N24kg では収穫時まで窒素が吸収された．土壌中の HVHV 由来窒素濃度の推移をみると，窒素施肥量に関係なく 4 週間で約 6-8mg にまで減少し，その後はあまり変動せず，HV を土中にすき込んで約 1 か月間にトマトに吸収されたといえる（図 3）．

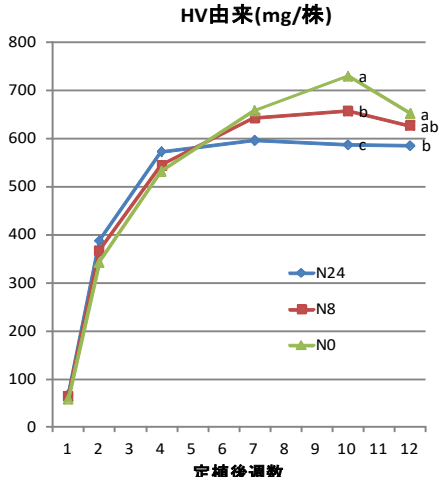


図 2 異なる施肥窒素量におけるトマトによる HV 由来窒素の吸収の経時的変化

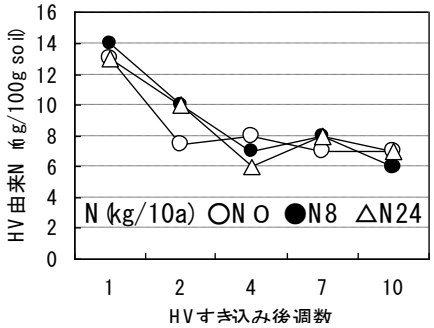


図 3 土壌中における HV 由来窒素量のトマト栽培中の推移

以上から HV はトマト生育前半の代替肥料として活用し，生育後半には化学肥料の施用が必要である(Sugihara et al.,2014; Muchanga et al,2017).

2-4. 施用翌年以降の HV 窒素の肥料的効果

CC 由来窒素は土壌中に残存し，翌年以降も影響を与えると考えられる．2011 年に安定同位体 ^{15}N を標識した HV をポット土壌にすき込んでトマトを栽培し，栽培後の土壌を保存して 2012 年にもトマトを栽培して，HV 由来窒素の経年動態を調査した．施用当年（2011 年）には HV 窒素の約 50%がトマトに吸収され，ロス（脱窒や流亡）もあるが，45%が土壌に残存する．翌年 2012 年には約 4%がトマトに吸収，8%がロス（脱窒や流亡），30%以上が土壌中に残存した（図 4　2011 年投入 HV の窒素を 100%とする）(Sugihara et al.,2016)．HV の肥効について，施用当年は化学肥料的に効果を示すが，翌年以降は他の有機物と同様に，徐々に無機化すると理解された．

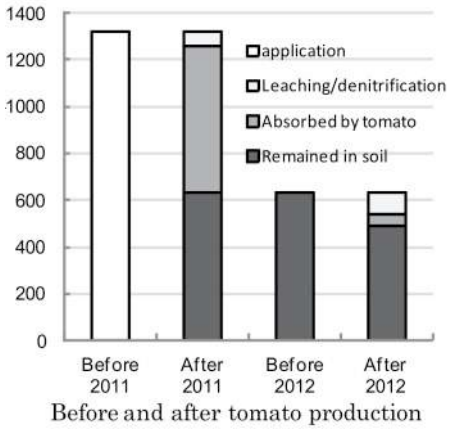


図 4　2011 年に投入された HV 由来窒素の 2011 年と 2012 年のトマト栽培における動態

2-5. HV と Rye の混作残渣の効果（Bi-culture）

従来，ライムギ（以下 Rye）やエンバク等のイネ科緑肥は CN 比が大きく，土壌にすき込んだ場合の分解が遅いために，圃場への有機物供給や土壌炭素増加に特徴があるが，作物収量増への寄与は小さいとされてきた (Kuo et al., 1997)．しかし，すき込み時の Rye の植物体 age やマメ科 HV との混合割合を変動させることで (Sainju et al., 2005)，肥料的価値を発揮させることが見いだされた．

2017 年のハウストマト栽培の前作において Rye を HV と混作し，出穂直後の Rye 植物体を供試することで，混合残渣の CN 比を 17.6 に低下させ，窒素吸収を増加させてトマトの増収に寄与した (表 3) (Muchanga et al, 2020 a)．他方, 2018 年の Rye と HV の混合では CN 比が 23.7 になり，窒素吸収や収量には寄与できなかった．

表 3 異なる CC 施用における投入された HV と Rye の残渣量, CN 含量およびトマト吸収窒素量と果実収量

Year & Cover crop	HV DW (kg/ha)	Rye DW (kg/ha)	Total N (kg/ha)	Total C (kg/ha)	C/N	N Uptake (kg/ha)	Tomato Yield (t/ha)
2017							
Bare						186	101 c
HV	6,803		302	3,028	10.1	313	116 b
HV+Rye	3,414	4,608	197	3,465	17.6	312	134 a
2018							
Bare						184	60.1 b
HV	2,489		99.4	1,015	10.2	233	84.3 a
HV+Rye	1,502	5,048	117	2,777	23.7	188	60.7 b
Rye		6,189	43	2,639	61.3	153	49.8 c

安定同位体 15N を Rye に吸収させ，HV と Rye の混作残渣すき込み後の 15N でラベルされた Rye 由来窒素の挙動を解析した．Rye 由来窒素はトマト定植後 4-8 週に無機化されてトマトに吸収され，果実肥大が促進される時期が無機化のピーク時期が合致していた．

Rye 由来窒素の回収率は，Rye 単独（26.9%）より Rye＋HV 併用（34%）で増加した．Rye 由来窒素の土壌中で

の残存は，Rye 単独（投入窒素量 1943 mg/pot）で 52.5%であったが，Rye + HV 併用（投入窒素量 972 mg/pot）で 47.0%と低下し，トマトに吸収される割合が増加したといえる．

Rye + HV 併用での HV 由来窒素のトマトへの吸収は Rye 由来窒素より 46.2%多かったが，その吸収はトマトの生育初期（定植後 0-4 週）より生育後期（定植後 4-8 週）で多くなった（表 4）(Muchanga et al, 2020 b)．このように Rye + HV 併用においても，トマトへの窒素供給効果は HV が大きい．しかし，これまでの研究では HV 単独施用では無機化およびトマトへの吸収時期はすき込み後 1 か月間であったが（Suguhara et al.,2013)，Rye との混合により，HV の窒素放出をトマト生育の初期から後期まで継続されることが可能と考えた．これは生物資源を活用した窒素供給時期の制御につながる。

表 4 HV と Rye の混合残渣施用におけるトマトの HV と Rye 由来窒素の吸収推移

CC	N uptake (mg/plant)				Frequency
	0-2	2-4	4-8	total	%
HV	120	111	253	484	25.3
Rye	84	95	151	331	17.3

カバークロップ（CC，緑肥）は持続的農耕地管理の生物的ルールであり，今回の研究より作物種や処理方法を組み合わせて活用することで，農耕地を適切に管理し、収量性向上に寄与でき，前述の研究はその一助としたい．

謝辞

研究への助言・指導および協力をいただいた遠藤織太郎（元筑波大），伊藤道秋（元新潟大），中野和弘（元新潟大），福山利範（元新潟大），小松崎将一（茨城大），上野秀人（愛媛大），中元朋美（東京大・現京都府大），平田聡之（北海道大），内田義崇（北海道大），堀元栄枝（京都府大），Abdul－Baki（元 USDA），John Teasdale（元 USDA），Upendra Sainju（USDA），Knut Schumidtke (Dresden Univ.)の各先生方，および新潟大学と北海道大学の多数の教職員・学生各位に御礼申し上げる．

引用文献

Abdul-Baki, A.A., J.R. Teasdale, R. Korcak, D.J. Chitwood, and D.J Huettel. (1996) Fresh-market tomato production in a low-input alternative system using cover-crop mulch. HortScience 31:65−69.

Abdul-Baki, A.A., J.R. Teasdale, and R. Korcak. (1997) Nitrogen requirements of fresh-market tomatoes on hairy vetch and black polyethylene mulch. HortScience 32:217−221.

荒木 肇 (2005) カバークロップと野菜生産．農作業研究 40:27−34

Araki H., S. Hane, Y. Hoshino and T. Hirata. (2009) Cover Crop Use in Tomato Production in Plastic High Tunnel. Hort. Environ. Biotechnol. 50:324-328.

Araki H. and M. Ito. (1999) Soil properties and vegetable production with organic mulch and no-tillage system. Japan. J. Farm Work res. 34:29-38.

Araki H., Y. Yamashita, M. Ito, Fukuyama T., and K. Nakano (1999) Watermelon cultivation with fall-planted small grain plants intercropped as cover crop. Japan. J. Farm Work Res. 34:261-268.

Araki H., and T. Fujii. (2013) Effect of No-Tillage and Hairy Vetch Mulch on Soil Properties and Tomato Yield in Plastic Greenhouse. Japan. J. Farm Work Res.48:11-20.

Kumar, V., A. A. Abdul-Baki, J. D. Anderson and A. K. Mattoo. (2005) Cover crop residues enhance growth, improve yield, and delay leaf senescence in greenhouse-grown tomatoes. HortScience 40: 1307–1311.

Kuo, S., U.M. Sainju, and E.J. Jellum. (1997) Winter cover crop effects on soil organic carbon and carbohydrate. Soil Sci. Soc. Am. J. 61:145−152.

Muchanga R. A., Hirata T. and Araki H. (2017) Hairy Vetch Becomes an Alternative Basal N Fertilizer in Low-input Fresh-market Tomato Production in a Plastic High Tunnel. The Horticulture Journal 86:493-500.

Muchanga R. A., T. Hirata, Y. Uchida, R. Hatano and H. Araki (2020 a) Soil carbon and nitrogen and tomato yield response to cover crop management. Agronomy J. (In press)

Muchanga R. A., T. Hirata, Y. Uchida, R. Hatano and H. Araki (2020 b) Dynamics of N Derived from ^{15}N-labeled Rye in Soil−tomato System as Influenced by Cover Crop Residue Management. The Horticulture J. (In press)

中野和弘・福山利範・濱田智和・荒木 肇．(2003) 画像処理によるムギ類茎葉の地表面遮光能力の評価．農業情報研究 12:105-112.

Sainju, U.M., B.P. Singh, and W.F. Whitehead. (2000) Cover crops and nitrogen fertilization effects on soil carbon and nitrogen and tomato yield. Can. J. Soil Sci. 80:523−532.

Sainju, U.M., W.F. Whitehead, and B.P. Singh. (2005) Biculture legume-cereal cover crops for enhanced biomass yield and carbon and nitrogen. Agronomy. J. 97:1403−1412.

Sugihara Y., H. Ueno, T. Hirata and H. Araki. (2013) Uptake and Distribution of Nitrogen Derived from Hairy Vetch Used as a Cover Crop by Tomato Plant. J. Japan. Soc. Hort. Sci. 82:30–38.

Sugihara Y., H. Ueno, T. Hirata and H. Araki. (2014) Hairy Vetch Derived-N Uptake by Tomato Grown in a Pot Containing Fast- and Slow-release N Fertilizer. J. Japan. Soc. Hort. Sci. 83:222-228.

Sugihara Y., H. Ueno, T. Hirata, M. Komatsuzaki and H. Araki. (2016) Contribution of N derived from a hairy vetch incorporated in the previous year to tomato N uptake under hairy vetch-tomato rotational cropping System. The Horticulture Journal 85:217-223.

積雪寒冷地域における施設園芸の環境制御と強靭化に関する研究

古野　伸典

山形県農林水産部園芸農業推進課

要旨

日本列島は年間を通しての四季がはっきりしているとともに，南北に長いため気候の地域間差が大きい．植物工場のように周年的に利用する場合，夏期冷涼な地域への設置にメリットがあるが，そうした地域は積雪寒冷地域でもあるため降雪等の特有の気象条件に適応させる必要がある．積雪寒冷地域での施設園芸に関する諸問題を解決するため，連棟ハウスの屋根谷部の融雪システムや，地下水を熱源としたヒートポンプシステムの開発に取り組んだ．結果的に，再生可能エネルギーの利用促進や，園芸用施設の強靭化等に資する研究成果が得られた．

キーワード

ヒートポンプ，連棟ハウス，地中伝熱，融雪，再生可能エネルギー

はじめに

国民に新鮮な野菜や果物，花き等を供給するために施設園芸は発展してきた．また，近年は国際競争力の高い日本農業を実現するために，植物工場に代表されるような生産性が高く周年供給が可能な施設園芸のさらなる発展が必要とされている．植物工場に代表されるような園芸用施設の高機能化が進むにつれて，周年利用される施設が増加している．当初は，冬季温暖な関東以南を中心に発展してきたが，周年利用の拡大に伴い，東北や北海道のように夏季冷涼な地域への設置も拡大している．

夏季冷涼な地域の多くは，積雪寒冷地域である．固体降水である降雪という現象は，内外気温差の拡大による暖房経費の増大にとどまらず，施設の倒壊や環境制御機器の効率低下などの危険性を孕んでいる．実際に，積雪寒冷地域での施設園芸は，常に雪害との戦いであった．また，平成 26 年 2 月の北関東のように，従来は雪が降らないような地域でも甚大な雪害が生じている．こうした背景から，国土強靭化の一環として園芸用施設の強靭化が求められている．強固な構造にすれば強靭化が図られるが，施設園芸は経済行為であるため費用対効果の視点も含めた課題解決が求められる．

園芸用施設の強靭化に限らず，課題解決，技術開発のシーズやヒントは生産現場にあることが多い．また，生産現場には，様々な工夫を凝らして施設園芸に取り組む優秀な農業経営者が活躍している．本稿では，そのような生産現場で活躍する優秀な経営者とともに開発・実用化してきた技術のいくつかを紹介したい．

連棟ハウス屋根谷部の融雪システム

全国のハウス強靭化対策として

屋根を連ねた連棟ハウスは，作業効率や土地利用効率，暖房効率が高い．このため，ほとんどの大規模園芸用施設が連棟式となっている．しかし，積雪地域に連棟ハウスを導入する場合は屋根谷部への積雪荷重が問題となるため，有効に作動する融雪システムが必要である．従来は谷樋部の屋外に温湯管を配置する方式などが提案されていた．しかし，融雪専用の給湯，配管設備を新たに装備しなければならないなどのコストの課題の他に，急激な温度変化による温湯管の損傷や，温湯管付近のみ融雪してしまうブリッジ現象の発生などの危険性があるため広く普及するには至っていない．そこで，屋根内面から温風を送風して融雪する新しい発想の「温風送風式融雪システム」について，生産現場で実践する農業経営者とともにシステム開発と能力評価に取り組んだ．

温風送風式融雪システムは，屋根内側の谷樋付近に 1 対の温風送風ダクトを設置し，屋根内表面に温風を吹き付ける方式である．実験の結果，山形などの積雪寒冷地域でも実用に耐えうる融雪能力を有することが明らかとなった（古野ら，2003；古野ら，2006）．また，本システムは，谷樋付近の屋根内表面から熱を供給するため，融雪と滑雪が連続的に行われ，融雪に用いられる熱の利用効率が極めて高いことも特徴である（古野ら 2004）．

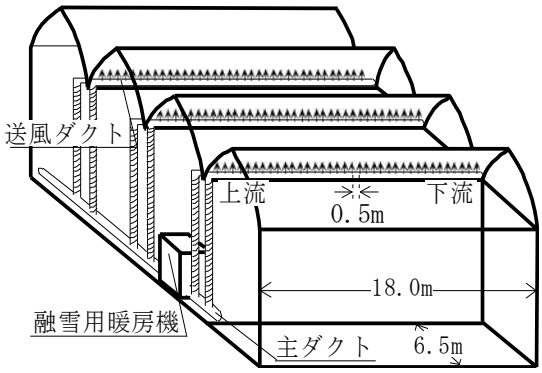


図 1　実験ハウスと温風送風式融雪システムの概要

温風送風式融雪システムに関する研究では，実用規模のハウスを用いて実験を行ったため，生産現場で実践する際にすぐに活用できるようなデータを収集することができた．連棟ハウス屋根谷部への積雪荷重の計測もその一つである．降雪量と融雪量の差が屋根谷部への積雪荷重となるが，それぞれのセンサーの誤差の範囲で３者の関係を説明することができた．また，融雪システムが稼働することで，熱源に近い上流側ではほとんど積雪荷重が記録されず，送風温度が低下する下流でも約 4kg･m^{-2}･h^{-1} と園芸用施設として必要とされる強度の 1/10 程度の荷重しか負荷されないことが示された（古野ら，2007）．

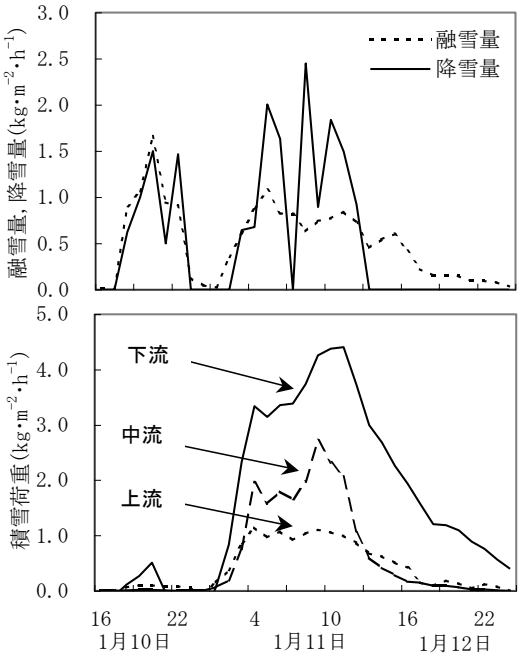


図 2　降雪量，融雪量（上）と屋根谷部への積雪荷重（下）の推移（2004 年 1 月 10～12 日）

このようなデータの積み重ねや，現地で実践されている優良事例の解析を踏まえて，連棟ハウス屋根谷部の融雪装置の実用性が認められ，（一社）日本施設園芸協会が発行する「園芸用施設設計施工標準仕様書」に採用されるに至っている（古野，2019）．園芸用施設の強靭化が求められている中，普段は降雪がみられない地域でも，連棟ハウスの屋根谷部への積雪荷重の軽減策を準備する必要がある．本システムは，暖房用としてハウス設置されている一般的な温風暖房機と送風ダクトがあればすぐに運用できる．温風送風式融雪システムが，全国の園芸用施設の強靭化に少しでも貢献できれば幸甚である．

地下水熱源ヒートポンプシステム

再生可能エネルギーの利用と経済性の両立

2008 年以降の原油価格の高騰により，相対的にランニングコストが安価であるヒートポンプの利用が拡大している．当初は，冬期間でも比較的外気温が高い関東以西で導入されていたが，徐々に積雪寒冷地域へ拡大している．

ヒートポンプとは，その名の通り，heat（熱）を pump（吸い上げる）装置である．燃油式暖房機による暖房は，燃料の消費量と燃油の単位体積当たり発熱量の積で計算でき，屋内外の気象条件の影響をほとんど受けない．一方，ヒートポンプによる暖房は，電気等の力で熱を移動させるため，施設内外の気象条件の影響を強く受ける．現在，生産現場に導入されているヒートポンプのほとんどが外気を熱源とする空気熱源ヒートポンプである．このため，関東以西でヒートポンプの導入により暖房コストの低減が実現したとしても，積雪寒冷地域で同様な効果が得られる訳ではない．また，積雪寒冷地域では屋外の外気温が低いだけでなく，相対湿度が高かったり，降雪があったりするため，ヒートポンプの室外機への結霜が発生し（図 3），それらを除去するためのデフロスト運転によりさらに運転効率が低下することが指摘されている．

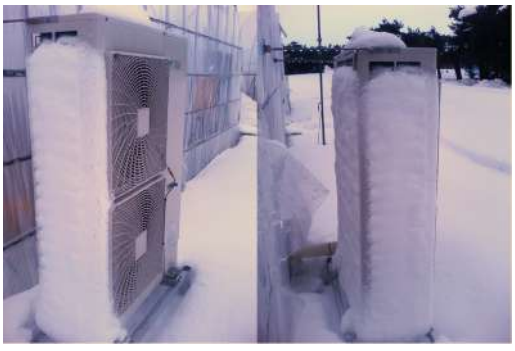


図 3　空気熱源ヒートポンプの着霜

生産現場に導入されているヒートポンプの運転効率を正確に評価できれば問題ないのだが，熱源側，出力側ともに空気の場合，計測は極めて困難である．カタログ等には JIS 規格で定められた条件での運転効率（Coefficient

of Performance ，以下 *COP*）が記載されているが，積雪寒冷地域での運転条件とはかけ離れているため，実際の *COP* が不明確なまま導入されていた．

本研究では，積雪寒冷地域でも年間を通して安定している地下水熱もしくは地中熱を熱源とした施設園芸用ヒートポンプシステムの開発に取り組んだ．これらは熱源側が液体であるため，流量と出入り口の温度差を測定することで簡単に暖房熱量を測定することができ，消費電力量で除することで *COP* を算出できる．また，同じ職場の技能職員の協力で，まったく同じ規模，同じ被覆条件の 3 棟の実験ハウスを隣接して設置できたことも研究を大きく前進できた要素であった．隣接した同じ被覆条件のハウスであれば，それらのハウスの放熱係数は同じと見なすことができる．このため，実験では地中熱を熱源としたヒートポンプで暖房したハウスの放熱係数を求め，これを空気を熱源としたヒートポンプで暖房したハウスの放熱係数として，内外気温差との積で暖房熱量を計算した．こうして従来は一般論として述べられていた積雪寒冷地域での空気を熱源としたヒートポンプの *COP* の実測が可能となり，運転条件によってはカタログ値の半分程度であること，地下水熱や地中熱を熱源とすることで高い運転効率となることなどが明らかとなった（Furuno et al., 2016；古野ら，2012）．

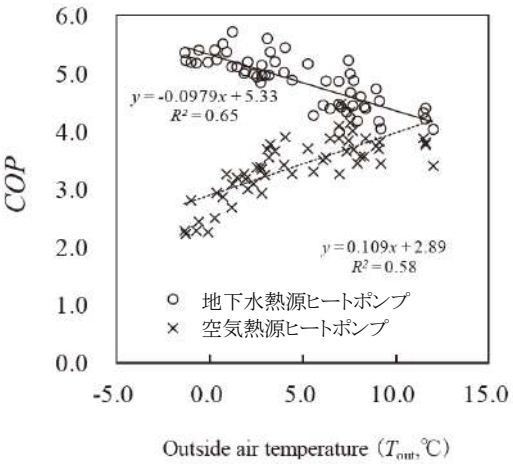


図 4　熱源の違いが *COP* に及ぼす影響

このような研究を行っている時期に，東日本大震災が発生し，施設園芸においても大きな転換点を迎えた．地下水熱や地中熱を熱源としたヒートポンプシステムについても，単なる積雪寒冷地域におけるコスト低減ツールだけでなく，再生可能エネルギーの利用促進や低炭素社会の実現などの社会的要請に応える技術という意味合いが強まったと感じている．また，太陽光発電に代表されるように，とかく再生可能エネルギーのコストは，従来方式よりも高い場合が多く，その価格差を補填しながら普及拡大を図っているのが現実である．しかし，この地下水熱や地中熱を利用したヒートポンプシステムは，再生可能エネルギーを活用しつつ，経済的な優位性も高いことが明らかとなった．本システムは，生産現場での導入も始まっており，大幅なコスト低減と二酸化炭素の排出量の削減となることが実証されている（図 5）．これらの技術を核として再生可能エネルギーとしての地下水熱や地中熱の利用がさらに普及・拡大するため，引き続き尽力したい．

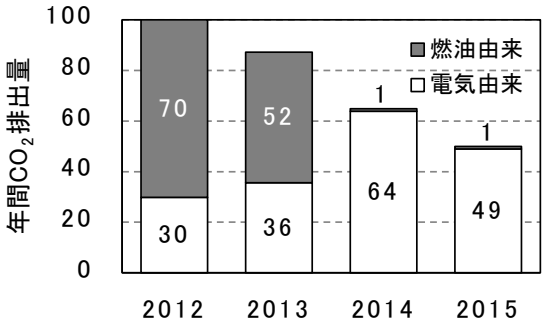


図 5　山形県寒河江市の大型バラ栽培ハウスの CO_2 排出量の推移（2012 年度以降に地下水熱源ヒートポンプを導入）

園芸用施設における地中伝熱

残されたブラックボックスの実態

暖房を中心とした園芸用施設の熱収支解析は，昭和 50 年代に集中的に取り組まれた．この当時のデータや考え方は，40 年以上経った今日でも暖房計画を立てる基本となっている．しかし，いくつかの項目が「暫定値」となっており，それ以来，データの蓄積や解析がほとんど進んでいない．貫流熱負荷，隙間換気伝熱負荷，地中伝熱負荷の３つに分けられる暖房負荷のうち，特に地中伝熱負荷は測定例がほとんどない未解明な領域となっている．また，貫流熱負荷と隙間換気伝熱負荷は，基本的に暖房負荷が増加する方向のみで考えればよいが，地中伝熱負荷は，暖房負荷が増加する（温室空間から地中に熱が移動する）方向だけでなく，暖房負荷が減少する（地中から温室空間に熱が移動する）方向となる場合もある．さらに，昼間の日射量やその地表面への到達度，マルチ被覆の有無などの地表面の条件，地温と室温の温度差など様々な条件の影響を受けて変化する，まさにブラックボックスである．こうしたデータは，実際に作物を栽培しているハウスでなければ計測できない．そこで，本研究では野菜花きにとどまらず，果樹も含めた篤農家の園芸用施設を対象に地中伝熱量の実態調査を実施した．その結果，バラのベンチを利用した養液栽培のように床面の全面が茎葉で覆われているようなハウスの地中伝熱は両方向とも相対的に少ないこと，果樹のように季節の進行に伴って茎葉が大きく展開するような作物が栽培されているハウスの地中伝熱量は，日射量の季節変化だけでなく作物の生育の影響を強く受けることなどが明らかとな

った（古野ら，2009；古野ら 2011）．

地中伝熱の動態に注目するようになって，もう一つ新しい発見があった．積雪寒冷地域では，空気を熱源としたヒートポンプでは十分な運転効率が得られないことは前述の通りであるが，積雪寒冷地域の生産者からも「空気熱源ヒートポンプを導入して暖房コストが削減された」という声が少なからず聞こえてきた．知り合いのバラ生産者の大型温室でよく考えてみると，ヒートポンプを導入しているハウスのほとんどでバラが栽培されていること，従来は送風ダクトを地表面に配置した燃油式暖房機のコストとの比較であることに気が付いた．つまり，燃油式暖房機で暖房した場合は，送風ダクトが地表面に配置してあるため，暖房機からの熱の一部が地中に逃げていたのである．逆に，ヒートポンプでは室内機の上部から温風送風されるため，地中への熱損失はほとんどないことが明らかとなった．ヒートポンプ導入によるコスト削減の要因の一つは，送風方式の違いによるものだったのである（古野ら，2013）．送風ダクトからの伝熱がなくなれば地温が低下するため，土耕栽培であれば生育差に気が付くはずであるが，バラはベンチを利用した養液栽培であるため，コスト削減のメリットが際立ったのであろう．

ハウス地上部の保温性や機能性の向上は，光合成の基本となる太陽光の透過率の低下と相反関係であることが多い．逆に，未だブラックボックスとなっている地中伝熱には，コスト削減や生産性向上の可能性を秘めており，今後とも研究テーマの一つとして取り組みたいと考えている．

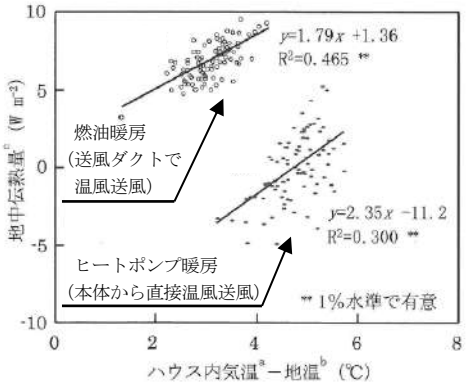


図 6　暖房機の送風方式が地中伝熱量に及ぼす影響

謝辞

この度の日本農業工学会賞受賞に際しましては，ご高配を賜りました塩沢昌会長をはじめとする役員の皆様に謹んでお礼申し上げます．また，御推薦いただきました農業施設学会理事会の皆様に厚くお礼申し上げます．

本稿の研究を行うにあたっては，篠原温千葉大学名誉教授，佐瀬勘紀日本大学教授，奥島里美博士，農研機構農村工学研究部門の石井雅久ユニット長，森山英樹上席研究員はじめ多くの皆様からの御指導，御助言，お力添えをいただきました．また，山形県新庄市の（有）クリタ園芸　代表取締役社長栗田義夫氏をはじめ，多くの優れた農業経営者の皆様から貴重な御示唆をいただきました．屋外実験を行うにあたっては，山形県農業総合研究センター園芸試験場と，山形県庄内総合支庁産地研究室の多くの仲間の協力がなければ実施できませんでした．ここに記して，関係各位に深くお礼申し上げます．

引用文献

Shinsuke FURUNO, Limi OKUSHIMA, Sadanori SASE（2016）Comparison of coefficient of performance (*COP*) between an underground water source heat pump system and an air source heat pump system for greenhouse heating in cold and snowy areas in Japan, Journal of Agricultural Meteorology, 72（3−4）173−177.

古野伸典（2019）園芸用施設設計施工標準仕様書　積雪地域に装備された連棟ハウスの具体例，一般社団法人日本施設園芸協会，東京都中央区，74−80.

古野伸典・佐瀬勘紀・石井雅久（2004）融雪システムを有する連棟ハウスと単棟ハウスの暖房および融雪に要する熱量の比較，農業施設，35（3）181−188.

古野伸典・佐瀬勘紀・石井雅久・川村啓造・阿部清（2003）積雪地域における連棟ハウスの融雪システムの評価，農業施設，33（4）225−231.

古野伸典・佐瀬勘紀・石井雅久（2006）連棟ハウスの温風送風式融雪システムにおける最大融雪能力の推定と能力向上のための試算，農業生産技術管理学会誌，13（1）29−34.

古野伸典・佐瀬勘紀・森山英樹（2007）連棟ハウスに設置した温風送風式融雪システムの積雪荷重軽減効果の検証，農業施設，38（3）191−198.

古野伸典・佐瀬勘紀・佐藤裕則（2009）積雪寒冷地域における園芸用施設の暖房負荷の実態調査，農業施設，40（2）113−120.

古野伸典・佐瀬勘紀・佐藤裕則（2011）栽培条件が異なる園芸用施設における地中伝熱量の実態調査，農業施設，42（2）59−64.

古野伸典・菅原敬・奥島里美・佐瀬勘紀（2013）ヒートポンプシステム等の施設園芸用暖房機の温風送風方式が異なる暖房負荷等の測定事例，農業施設，44（4）159−166.

古野伸典，・菅原敬・高杉真司・桂木聖彦・奥島里美・佐瀬勘紀（2012）寒冷地域の施設園芸における地中熱源ヒートポンプシステムと空気熱源ヒートポンプシステムの暖房時運転特性，農業施設，43（4）131−137.

農業における IoT、ビッグデータ、AI の研究

平藤　雅之

東京大学大学院農学生命科学研究科
ドリームサイエンスホールディングス株式会社

要旨

農業は「経験と勘」といわれる。勘に頼らざるを得ない大きな理由は、圃場の環境や作物の生育に関するデータが不足していることである。逆に十分なデータがあれば農業生産管理や育種等の大幅な効率化が可能となる。近年は、ビッグデータと機械学習によって、新知見の発見やさまざまなアプリケーションの生産ができるようになった。大量のデータを自動収集し新知見を発見するための、IoT、ビッグデータ、AI に関する手法を開発した。

キーワード

農業，ICT，人工知能，ビッグデータ，IoT

緒言

農業は勘と経験といわれるが、それはデータの不足が大きな理由である。農業は生物、生態系、環境等の複雑さが関わるが、それらに比べて得られているデータはごくわずかである。2015 年 9 月の国連サミットで採択された持続可能な開発目標（SDGs）の第一目標は「あらゆる場所のあらゆる形態の貧困を終わらせる」、第二目標は「飢餓を終わらせ、食料安全保障及び栄養改善を実現し、持続可能な農業を促進する」となっている。この第二目標をあと 10 年で実現できるだろうか?

幸いなことに、情報通信技術（ICT）の指数関数的な進化によって各部門で生産性が向上し、さらに世界の人口増加率も減り始めている。しかし、農業における生産性の向上のペースはまだ遅い。農業従事者は減少し、高齢化も進んでいる。また、気候変動の激甚化、農薬への抵抗性を持つ新病虫害の発生などの問題も起きている。これらに対応するには、現在の研究開発のスピードを大幅にアップする必要がある。

その一つの方法は、ICT の破壊的なパワーを農業に積極的に導入することである。RTK-GPS を活用した農業機械の無人走行技術は普及しつつあるが、農作業のロボット化だけではなく品種や栽培技術の開発を加速する手法が必要である。具体的には、圃場におけるデータの自動収集技術、多種多様のデータを統合したビッグデータ（農業ビッグデータ）を構築する技術、ビッグデータを解析する技術がそのキーテクノロジーとなる。

AI（人工知能）

今回の人工知能ブームは第 3 次人工知能ブームであるが、前回の第 2 次人工知能ブーム（1980 年代～1990 年代）では、専門家の知識を収集し、コンピュータに専門家と同等の判断をさせるプログラム（エキスパートシステム）の開発が試みられた。専門家の知識の収集及び収集した知識を矛盾なく統合するには膨大な人手を要した。あいまいな知識を扱うための確信値やファジィ理論などが導入されたが、そのチューニングも困難な作業であった。第 2 次人工知能ブームの中盤、これらの問題を解決する新しい AI 技術として、ニューラルネットワークが登場した。これらの技術を用いて、農業分野でも様々なアプリケーションが試作された（星・平藤・本條, 1990）。しかし、実際に取り組んでみると収集できた農学的知識は不十分であり、環境と生育に関するデータはほとんどないことが明らかとなった。

IoT（Internet of things）

農業は年に 1 回しかできないため、農業に 50 年従事しても 50 回の経験しか得られない。大量のデータを収集するには、

① 多様な環境条件下における生育データを自動収集するにはグロースチャンバー等によって環境を制御し様々な環境における光合成速度等のデータを収集する

② とセンサセットワーク、UAV（ドローン）、UGV（地上移動ロボット）、ロボット農機等を用いて世界各地の多様な屋外環境における環境及び作物の形質データ等を収集する

の二種類がある。

①の具体的な方法として、気温、相対湿度、CO_2 濃度、光合成有効光量子束密度、気圧等を PC で自動的に変更しながら、その時の光合成速度、生長速度、蒸散量のデータを自動収集するフェノタイピングシステム（図１）を開発した。これによって得られた時系列データから（図２）、環境変化に対して光合成速度等は非常に複雑なカオス的応答をすることが分かった（平藤・窪田, 1994）。

図１ 植物個体生長のフェノタイピングシステム。光合成速度、生長速度（茎径）、蒸散速度等の時系列データを自動収集。

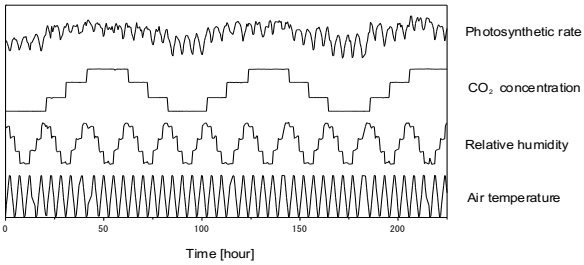


図２ CO_2 濃度、相対湿度、気温を周期的に変化させたときの光合成速度の応答

植物の環境応答にカオス性が見られることから、②の野外における作物の環境及び形質データについても時系列的に収集する必要がある。野外における環境データ及び植物画像を長期間にわたって自動収集する IoT デバイスとして、フィールドサーバ（図３）を開発した（深津・平藤, 2003）。フィールドサーバは国内外の様々な圃場、生産施設に設置された。地球環境モニタリングのため、ヒマラヤのイムジャ氷河湖にも設置され（図４）、氷河湖の湖面が凍結し融解するまでの画像及び環境データが収集された（Lee et al., 2010）。

2001 年

2003 年

2013 年

2018 年

図３ フィールドサーバ

図４ フィールドサーバによるヒマラヤ・イムジャ氷河湖のモニタリング（2008. 5～10）

パーソナルファブリケーション

コンピュータの登場以来、コンピュータの性能はこの半世紀以上にわたって、「３年で４倍」というペースで指数関数的に向上し続けている。そのため、CPU 等 LSI は短期間で製造終了（ディスコンと呼ばれる）になる。CPU 等のディスコンに対応してフィールドサーバのメイン基板（フィールドサーバエンジン）も２～数年ごとに再設計が必要であった（図５）。指数関数は何度微分しても指数関数であり（$de^x/dx = e^x$）、ICT の進歩の加速度も指数関数的に増大している。そのため、近年はさらに短い期間で再設計する必要が出てきた。そこで、ハード

ウェアの主要部分をオープンソースハードウェアに切り替えた（平藤ら, 2013）。また、フィールドサーバのケース（筐体）も３D プリンタで製造することにした。その結果、現在は新しいフィールドサーバを作るたびに、その時点での最新技術を活用できるようになった。

Ver.1 (H8 CPU)

Ver.2 (H8 CPU)

Ver.3 (H8 CPU)

Ver.4 (H8 CPU)

Ver.5 (H8 CPU)

2011 年 ⇒ オープンソースハードウェアへ移行

Arduino UNO 版 Ver.1

Arduino UNO 版 Ver.2

2017 年 ⇒ CPU を ESP32 に変更 LPWA の導入

ESP32 版 Ver.1

ESP32 版 Ver.2

ESP32Ver.3

2019 年 ⇒ 自作基板を M5Sctak に変更 複数拡張モジュールの追加

M5staock(ESP32) + LoRa + RTK-GPS

図５　CPU、通信技術の進歩に対応したハードウェア（フィールドサーバ用メイン基板）の更新

ビッグデータ

近年、オープンデータは API 経由でアクセス可能になってきた。フィールドサーバのデータも Web API でアクセスできる。そこで，農業関連のクラウドサービスに格納されているデータにも API を用意し，API マッシュアップによって統合し、ビッグデータを構築するオープンなプラットフォーム(CLOP: CLoud Open Platform)を提案した(Hirafuji et al., 2012)。

CLOP では，多数の超小型 PC 基板(Raspberry Pi 等)を用いたパーソナル PC クラスタにオープンソースソフトウェア(Hadoop と Mahout)をインストールしてプライベートクラウドサーバを構築し，この上にパーソナルデータ，センサデータ，オープンデータ等からなるパーソナルなビッグデータを構築するようにした（図６）。このビッグデータを用いた機械学習モデルによる予測結果は Twitter に Tweet することで共有化した（図７）。。

CLOP はその後も拡張され（xCLOP）、農業データ連携基盤 WAGRI（https://wagri.net/ja-jp/）のもととなった。

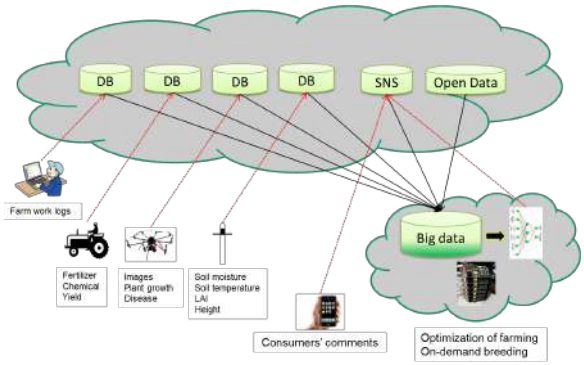


図６　CLOP によるデータ統合

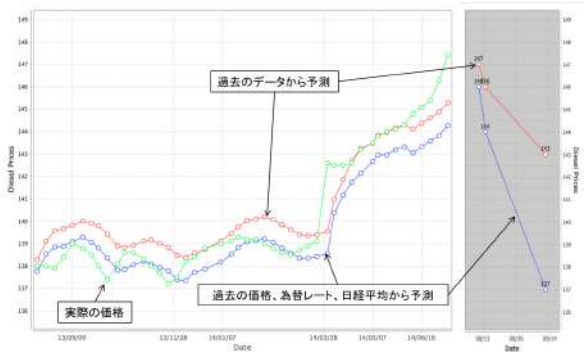


図７　ニューラルネットワークによる機械学習を時系列データで行い予測した例

データファーム

作物の生育において、土壌水分や地温は大きな影響を与えるが、アメダスでは土壌水分と地温は測定されていない。そのため、自ら測定する必要がある。しかし、多地点にセンサを設置するには様々な障害がある。

例えば、大規模圃場では農業機械による作業を前提としており、フィールドサーバを多数設置と様々な問題がある。フィールドサーバを作物の近くに設置すると、ブームスプレーヤによる農薬散布作業の邪魔となる。機械作業の邪魔にならないように丈を短くする作物が繁茂したとき、見えなくなる。また、離れたところに設置しても除草作業時に邪魔となる。一方、超音波センサで草高や積雪深を測定する場合には、ある程度の高さが必要である。

さて、現在の大規模圃場は機械作業に合わせて改善されて来た。これと同様、データを収集するための専用圃場（データファーム）を農場の一角に作ることとにした（図８）。リモートセンシングや機械学習では、検量線の作成や学習時の教師値のために実測値（グランド・トゥルース・データ）が不可欠である。データファームではこれらを自動収集する。また、データファームでは周囲の生産圃場と異なる環境を生成することで多様なデータ収集を行うことができる。

データファーム　Ver.1（2017）

データファーム Ver.2（2018）

データファーム Ver.3（2019）

図８ 生産圃場の一角に設置されたデータファーム（データ収集専用圃場）

通常の圃場は作物を生産することが目的であるが、データファームは有用なデータ及びアプリを自動生産する圃場である。ここで、得られたデータによってアプリが機械学習によって自動生成されることから、データファームは人工知能アプリを量産する圃場でもある。例えば、データファームで雑草、病害虫等のビッグデータを生産することで、雑草診断システムや病害虫診断システムを機械学習によって自動生産できる。

結言

分子生物学においては、膨大なDNAデータを収集・解析するためゲノミクス及びバイオインフォマティクスという新研究分野が生み出された。農学では圃場における形質データ（フェノーム）を収集するためのフィールドフェノミクスという新研究分野が近年、生み出された。本研究はフィールドフェノミクスの研究の一つでもある。将来、ゲノム、フェノーム、環境データからなるビッグデータが自動的に構築できるようになると、農学は飛躍的に進歩することが期待される。

謝辞

本研究の一部は，JST, CREST, JPMJCR1512（フィールドセンシング時系列データを主体とした農業ビッグデータの構築と新知見の発見）の支援を受けたものである。

引用文献

深津時広，平藤雅之 (2003)圃場モニタリングのためのフィールドサーバの開発，農業情報研究，12(1),1-12

平藤雅之，窪田哲夫（1994），変動環境下における植物生長のカオス性，生物環境調節, 32(1), 31-39.

M. Hirafuji, Y. Hamada, T. Yoshida, A. Itoh, T. Kiura, Strategy and Concept of Open Cloud Application Platform in Agriculture (2012) Proc. of AFITA/WCCA 2012, Sep.3-6, Taipei.

平藤雅之, 世一秀雄, 三木悠吾, 木浦卓治, 深津時広, 田中慶, 松本恵子, 星典宏, 根角博久, 澁谷幸憲, 伊藤淳士, 二宮正士, Adinarayana J., Sudharsan D., 斉藤保典, 小林一樹, 鈴木剛伸 (2013)オープン・フィールドサーバ及びセンサクラウド・システムの開発,農業情報研究, 22: 60-70

星岳彦，平藤雅之，本條毅（1990）.バイオエキスパートシステムズ，コロナ社., 東京

W.S. Lee, V. Alchanatis, C. Yang, M. Hirafuji, D. Moshou, C. Li (2010) Sensing technologies for precision specialty crop production, Computers and Electronics in Agriculture, 74 (1), 2-33

コンバインの自動化・ロボット化・情報化に関する研究

飯田　訓久

国立大学法人京都大学大学院農学研究科
京都市左京区北白川追分町

要旨

稲や麦を収穫する自脱コンバインの自動化に関する研究として，選別制御に関わる穀粒流れモデルを提案し，2番還元流量制御を行った。また，コンバインの情報化として、スマート農業（精密農業）に必要となる圃場内の収量の空間変動を可視化するため，穀粒流量センサを用いた収穫量の測定とともに、人工衛星測位システム（Global Navigation Satellite System, GNSS）によって測位した位置情報を使って収量マップを作成した。さらに、コンバインによる収穫作業のロボット化・無人化のため、GNSS や慣性測位システム（IMU）を用いた自動刈取や、マシンビジョンを用いた穀粒の自動排出を実現した。

キーワード

精密農業，自動制御，コンバイン，農業ロボット，収量モニタ

緒言

日本で開発された自脱コンバインは，難脱粒性の稲に対応するとともに，普通コンバインに比べて小馬力かつコンパクトな機体で，収穫作業の省力化や高能率化に大きく貢献した．また，様々な条件の稲や圃場に対応し，穀粒ロスを低減するため，選別自動などの制御機構が開発され，搭載されている．近年は，収穫という農作業だけでなく，米の収量や品質を計測し，それらデータをクラウドに蓄積する情報化機能や，農作業の生産効率をさらに向上し省人化をはかるため，自動化・ロボット化に関する研究が進められている．本稿では，自脱コンバインの自動化・ロボット化，および情報化に関して，取り組んできた研究について述べる．

コンバインの選別制御に関する研究

1996 年頃から日本における水稲作体系へ精密農業（Precision Agriculture）を適用する研究が始まり，生研機構（当時）、新技術・新分野創出のための基礎研究推進事業「新生物資源生産・変換のための機械・装置に関する基礎研究」（平成 8 年度～平成 10 年度），「生物資源の低投入型生産機械システムの基礎研究」（平成 10 年度～平成 12 年度）にて，主に①自脱コンバイン用収量モニタと収量マップ作成技術の開発，②そのマップに基づく可変施肥機の開発，ならびに③コンバインの群管理の研究を行った．

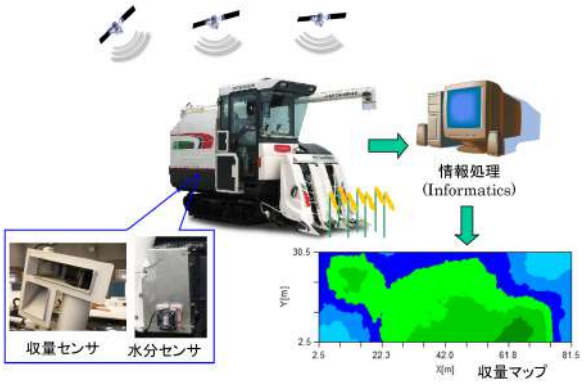


図 1　自脱コンバインのための収量モニタリング

①の研究では圃場単位だけでなく，圃場内の収量のバラツキ（空間変動）を測定し（李ら，1999；李ら，2001），収量の多少を等高線図として可視化するもので，現在のスマート農業に通じる情報化技術であった（図 1）．この収量の計測には，グレーンタンクに流入する穀粒流量を測定するセンサの開発が必要であった（李ら，2000）．それに加えて問題となったのが，稲を収穫するコンバインには穀粒を選別するために，コンバインの中で穀粒が循環（2 番還元）しており，グレーンタンクへの流入量の計測のみでは，刈取り位置での収量が計測できないことだった．そこで，2 番還元される穀粒流量をリアルタイムで計測し，その流量を一定に制御することで刈取り位

置での収量を測定するとともに，選別性能への影響を評価した．この結果から 2 番還元流量制御による選別自動を提案した．

③のコンバインの群管理では，当時高価であった GPS（Global Positioning System）を用いずに行ったコンバインの自動運転に関する研究である（飯田ら，1999a, 1999b, 2001; Iida et al., 2003）．有人運転のコンバインを無人コンバインが後ろから追いかけながら刈取り作業を行うシステムで，車両間の相対的な位置と姿勢角を赤外線通信と超音波距離センサからなる装置で計測し，無人コンバインの操舵と速度の制御を行い，コンバイン 2 台での刈取りを行った。

図 2　無人追走夫方式による自脱コンバインの群管理

コンバインの自動走行に関する研究

2000 年代に入ると，欧米では RTK-GPS（Real-Time Kinematic GPS）を利用したトラクタ用自動操舵システムが市販化され，農業機械の自動運転に高価な人工衛星測位システムを利用する敷居が一段下がり，日本でも RTK-GPS と FOG（Fiber Optical Gyro）を組み合わせたトラクタ（木瀬ら，2002）や田植機（Nagasaka et al., 2004）の無人運転に関する研究が盛んになった．著者らも RTK-GPS と FOG を用いて自脱コンバインの無人刈取作業に関する研究（飯田ら，2007）を開始した。基本的には，トラクタや田植機の無人運転と同様に，作業前に圃場に応じて走行経路を設定し，その経路に追従走行するように車速と操舵を制御するものである．しかし，自脱コンバインの走行部は，トラクタや田植機の車輪型とは異なり，クローラ型で旋回特性が異なるため，人による旋回方式を模してαターンと U ターンの 2 つの旋回方式を開発した（Iida et al., 2013；内田ら，2013）．また，圃場の隅では自動で隅刈り（斜め刈り）を行って，コンバインが旋回を行っても稲を踏み倒さないで旋回できる手法を提案した（望月ら，2015）．

また，レーザセンサにより稲の未刈取りと既刈取りの境界線を推定し，その境界線に追従しながら刈取りを行う自脱コンバインの操舵制御を行った（Cho et al., 2014a；Cho et al., 2014b）．

自脱コンバインによる無人収穫を考えた場合には，収穫した穀粒をコンバインのグレーンタンクから運搬車へ積み替える作業があるため，これを自動で行う必要があった．これを実現するため，AR（Augmented Reality）技術を応用した画像処理により，運搬車を検出してコンバインが自動で排出オーガの吐出口を位置決めして自動で排出するシステムを開発した（Kurita et al., 2012, 2014；栗田ら，2015）。このシステムを無人刈取り制御と組み合わせることで，圃場内での刈取り→穀粒排出→刈取り→穀粒排出を繰り返して無人収穫することを実証した（栗田ら，2014；Kurita et al., 2017）．

さらに，作業能率の向上と省力化のために，2 台のロボットコンバインで同時に収穫作業を行うシステムの開発と実証を行った．

図 3　マシンビジョンによる自動穀粒排出

図 4　2 台のロボットコンバインによる収穫作業

今後，ロボットコンバインによる無人作業を実現するためには周辺環境を認識し，人やモノに衝突しないことや，ロボットの誤動作や暴走の防止を行うことである．ロボットの誤動作や暴走を防ぐため，ファイルセーフ装置の導入が進められている．人やモノに対する衝突回避では，産業機械や自動車でも進められている技術を農業ロボットにも応用し，センサで周辺の人や物体を検出し，減速や停車を行って安全に衝突を回避する研究を行っている．具体的な事例として，3D LIDAR（3 Dimensional Light Detection and Ranging）やカメラを用いて，ロボット前方の障害物を検出し（久重ら，2017），その位置関係に応じた衝突回避行動として，減速と停車を行う（朝田ら，2019）．また，障害物が何であるかを識別して衝突回避を行うため，深層学習により，撮影画像中の物体検出を行う手法について研究を行った（Li et al., 2020）．加えて，ロボットの行動を周辺の作業者に示すため，カラー

表示灯の点灯とブザーによる警告音を発する機能についても研究を行った.

コンバインの情報化に関する研究

ロボット農機の完全無人作業（自動化レベル 3）に向けて，ロボットを遠隔地で監視するシステムの構築が進められている．ロボットコンバインの開発でも，図 5 に示すようにロボットの作業状態や圃場毎の収量や品質をモニタリングするための Web アプリケーションの開発を行った（石橋ら，2014）．このシステムでは，遠隔地，例えば圃場と農家事務所といった離れた場所でロボットの作業状況を監視するため，移動通信システム（3G/LTE）を利用して，ロボットから位置や作業状態（速度，作業機速度，燃料残量，収穫量など）をサーバへ送信して記録すると共に，監視者がパソコンやスマートフォンなどの情報端末でサーバに Web ブラウザで接続することでコンバインの作業状態を確認することができる.

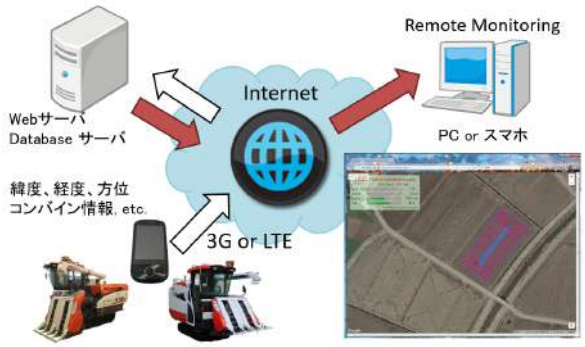


図 5　Web アプリケーションによるロボットコンバインの遠隔監視システム

結言

これまで自脱コンバインの自動化・ロボット化・情報化に関する研究に取り組んできたが，今後も農業機械やシステムの情報化・自動化を進め，農業生産の低コスト化と効率化に資する技術開発に取り組んで行きたい。

謝辞

本稿に関する研究は，農研機構や農機メーカとの共同研究をはじめ，京都大学農学研究科フィールドロボティクス分野の教員や学生の多大なる協力を得て実施できた成果であり，ここに記して謝意を表する.

引用文献

朝田諒，飯田訓久，村主勝彦，増田良平 (2019) ロボットコンバインのためのステレオカメラを用いた物体検出および衝突回避，農業食料工学会誌，81(6)，392-402.

飯田訓久，前川智史，梅田幹雄（1999）無人追走方式の研究（第１報），農業機械学会誌，61(1) ，99-106.

飯田訓久，前川智史，工藤壮司，梅田幹雄 (1999) 無人追走方式の研究（第２報），農業機械学会誌，61(6) ，141-147.

飯田訓久，工藤壮司，小野圭太，梅田幹雄 (2001) 無人追走方式の研究（第３報），農業機械学会誌，63(4) ，80-84.

Iida, M. (2003) An automatic following vehicle system for agriculture, *Journal of the Korean Society of Agricultural Machinery*, 2, 63-68.

飯田訓久，山田祐介 (2007) GPS とジャイロを用いた無人コンバインによる稲収穫，農業機械学会誌，68(6) ，138-143.

Iida, M., Uchida, R., Zhu, H., Suguri, M., Kurita, H., Masuda, R. (2013) Path-Following Control of a Head-Feeding Combine Robot, Engineering in Agriculture, Environment and Food, 6(2), 61-67.

石橋茉耶，村主勝彦，飯田訓久，増田良平 (2014) Web アプリケーションによるコンバインロボットの遠隔モニタリング，農業情報研究，23(1): 12-20.

内田 諒，飯田訓久，祝 華平，栗田寛樹，村主勝彦，増田良平 (2013) 自脱コンバイン・ロボットの経路追従制御，計測自動制御学会論文集, 49(1), 119-124.

木瀬道夫，野口伸，石井一暢，寺尾日出男 (2002) RTK-GPS と FOG を使用したほ場作業ロボット（第 3 報），農業機械学会誌，64(2)，102-110.

Kurita, H., Iida, M., Suguri, M., Masuda, R. (2012) Application of Image Processing Technology for Unloading Automation of Robotic Head-Feeding Combine Harvester, Engineering in Agriculture, Environment and Food, 5(4), 146-151.

Kurita, H., Iida, M., Suguri, M., Masuda, R., Cho, W. (2014) Efficient searching for grain storage container by combine robot, Engineering in Agriculture, Environment and Food, 7(3), 109-114.

栗田寛樹，飯田訓久，趙元在，村主勝彦 (2014) 稲のロボット収穫作業における作業能率の予測手法, 農業食料工学会誌, 76(5), 405-414.

栗田寛樹，飯田訓久，趙元在，村主勝彦 (2015) 画像特徴量による移動式マニピュレータの位置決め制御，システム制御情報学会論文誌，28(3)，85-90.

Kurita, H., Iida, M., Cho, W. J., Suguri, M. (2017) Rice Autonoumous Harvesting: Operation Framework, Journals of Field Robotics, 34(6), 1084-1099, DOI: 10.1002/rob.21705.

Cho, W., Iida, M., Suguri, M., Masuda, R., Kurita, H. (2014a) Vision-based uncut crop edge detection for automated guidance of head-feeding combine, Engineering in Agriculture, Environment and Food, 7(2), 97-102.

Cho, W., Iida, M., Suguri, M., Masuda, R., Kurita, H. (2014b) Using multiple sensors to detect uncut crop edges for autonomous guidance systems of head-feeding combine harvesters, Engineering in

Agriculture, Environment and Food, 7(3), 115-121.
Nagasaka, Y., Umeda, N., Kanatani, Y., Taniwaki, K., Sasaki, Y. (2004) Autonomous guidance for Rice Transplanting using Global Positioning System and Gyroscopes, Computers and Electronics in Agriculture, 43, 223-234.
久重隆之，増田良平，村主勝彦，飯田訓久 (2017) 画像処理による収穫期水田の人検出手法の開発，農業食料工学会誌，79(1), 49-58.
望月裕貴，飯田訓久，栗田寛樹，趙元在，村主勝彦 (2015) 自脱コンバインロボットによる隅刈制御，農業食料工学会，77(6), 464－469.
李　忠根，飯田訓久，梅田幹雄，下保敏和 (1999) 水田におけるモミとワラの収量マップ，農業機械学会誌，61(4) ，133-140.
李　忠根，飯田訓久，下保敏和，梅田幹雄 (2000) 自脱コンバインのためのインパクト式収量センサの開発，農業機械学会誌，62(4) ，81-88.
李　忠根, 矢内純太, 下保敏和, 飯田訓久, 梅田幹雄, 小崎　隆, 松井　勤 (2001) 水田におけるほ場情報マップの作成, 農業機械学会誌，63(5) ，45-52.
Li, Y., Iida, M., Suguri, M., Masuda, R. (2020) Regional Segmentation of Field Images Based on Convolutional Neural Network for Rice Combine Harvester, JSAM, 82(1), 47-56.

開水路用排水路系における流れの解析と制御に関する研究

久保成隆

東京大学名誉教授

要旨

開水路では水輸送に際して移動波が形成される．この波は伝播の過程で変形し，伝播速度が遅い．このため，この波の基本的な挙動を理解し制御方法を探求することは，水利用の効率性と利便性を高める上から重要である．まず，定常から別の定常への遷移過程で形成される移動波（送水波）を対象に，この波が基本的に２つの parameter により分類可能なこと，また Burgers 方程式近似により，基本的な変形過程を説明できることを示した．次いで，開水路での用水到達遅れの解消を目的に，Check Gate の機能と操作の在り方を検討して MC 方式を提案し，開水路においても管水路に近い即応性を確保できることを示した．

キーワード

開水路，送水波，Burgers 方程式，Check Gate，MC 方式

緒言

灌漑排水路の幹線部分は多くの場合，開水路形式である．開水路での流れは管水路の場合とは異なり，自由水面を有し，流れの情報は重力波（gravity wave）によって上下流に伝播される．このため開水路で送水する場合，送水に要する時間（用水到達時間）と送水過程における送水量の変形を考慮する必要がある．本報告では，前半部において送水に際して現れる移動波（送水波）の移動速度や変形過程に関する研究成果を報告する．一方，後半部分では，開水路では実現不可能と思われてきた用水到達時間を必要としない開水路送水方式に関する研究成果を報告する。

送水波の水理

送水波の分類

開水路では様々な移動波が形成される．正段波や負段波，洪水波や単斜上昇波，転波列などで，これらの波は St. Venant 方程式により，或いはその弱解として記述できる．他に，波状段波，クノイダル波，孤立波なども移動波であるが St. Venant 方程式では記述できない．ここでの対象は St. Venant 方程式で記述できる波に限定する．これらの波においても，水路条件，流量条件，時間スケールなどにより様々な形態をとる。そこで，基本的な波の特徴を損なうことなく，できる限り方程式を単純化し，現象を特徴つけるパラメータを見出すことが重要となる．

幅広矩形断面の一様水路における送水波を考えると，現象を支配するパラメータは．①水路底勾配，②粗度係数，③初期流量，④変更後流量の４つである．また支配方程式は以下となる．

$$\frac{\partial h}{\partial t}+u\frac{\partial h}{\partial x}+h\frac{\partial u}{\partial x}=0$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+g\frac{\partial h}{\partial x}=g(S_x-S_f)$$

$$S_f=\frac{n^2|u|u}{h^{4/3}}\left(\left(\frac{|u|u}{C^2h}\right)\right)$$

x：上流端からの水路底に沿っての距離，t：時間，
h：水深，u：断面平均流速，g：重力の加速度

これらの式を H:水深方向の代表的長さ（初期等流水深），L:水路方向の代表的長さ（H/Sx），U:代表的速度（$U^2=gH$），T:代表的時間（L/U）で無次元化すると，運動方程式は以下となる．

$$\frac{\partial u'}{\partial t'}+u'\frac{\partial u'}{\partial x'}+\frac{\partial h'}{\partial x'}=1-\frac{1}{Fr_0{}^2}\frac{|u'|u'}{h'^{2m}}$$

m は定数（マニング式では 2/3，シェジー式では 1/2）であるので，この式に含まれるパラメータは Fr_0 だけである．初期条件は無次元化により，$h'=1.0$，$u'=Fr_0$ となるので，流量変更を瞬時に行うとすれば，流量変更率 α がもう一つのパラメータとなる．即ち，幅広矩形一様水路上での送水波に関わる現象は，Fr_0 と α という二つのパラメータによって分類できることになる．

現象を分類する方法として，①上流端における流況変

化に注目する方法と，②波形に注目する方法が考えられる．①では，常流－射流，安定－不安定，水深増－水深減などの流況変化により Fr_0－α平面を分割する．計算過程[1]は省略するが**図１**は，シェジー式を用いた場合の結果である．マニング式の場合には幾つかの分割線が分離して図は多少複雑になる．

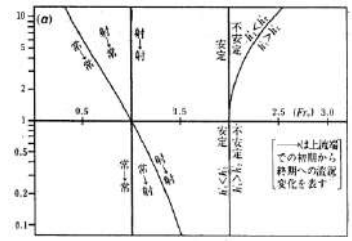


図１流況から見た送水波の分類

図１において，例えば「射→常」の領域では，送水波発生直後は射流であった流れが時間の経過に伴い常流になることを，「Fr_0=2.0」は流れが安定と不安定の分割線であることを，「h_1'＜h_2'」は時間の経過に伴い上流端水深が増加することを示す。

一方，形状変化せずに一定の速度で移動する一様進行波に注目して分類する方法もある．計算過程[1]は省略するが，シェジー式を用いた場合の結果を**図２**に示す．

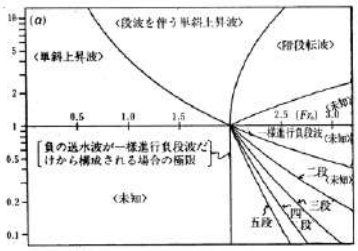


図２ 一様進行波から見た送水波の分類

図２において，例えば，＜単斜上昇波＞の領域は，十分に時間が経過すれば送水波が単斜上昇波になる必要条件であることを示す．一方，＜未知＞の領域は最終的に一様進行波にならない条件であることを示す．

送水波の遷移過程

開水路上流端で流量が急増すると正段波が，急減すると負段波が生じることは既知である．また，Fr_0とαにより，一様進行波形成の可能性の可否も分かっている．しかし，遷移過程と実際に一様進行波が形成されるかは不明である．そこで Fr_0－α平面上で分割された領域全てに対して，数値シミュレーションによって検討した．詳細[2]は省くが，比較的フルード数が小さな場合の流量急増時と急減時の送水波の遷移過程を**図３**に示す．

図３の右側は流量急増時の正の送水波の遷移過程である．急増直後には正段波が発生し急速に減衰する．上流部では水深が漸増し上流側から等流水面が形成される．先端部では段波が消滅して連続な波面となり，最終的には波面形状が変化しない一様進行波が形成される．

一方，右側は流量急減時の負の送水波の遷移過程である．急減直後には負段波が形成されるが波面は急速に平滑化される．上流部では水深が漸減し上流側から等流水面が形成される．波形は経過時間に比例して伸長する．

図２のフルード数の大きな領域においては，一様進行波による考察から，階段転波や一様進行負段波が形成される可能性が示された．しかし数値シミュレーションでは，そのような波は初期段階に形成されたが，次々と転波を誘発して流れ全体が転波で覆われる結果となった．

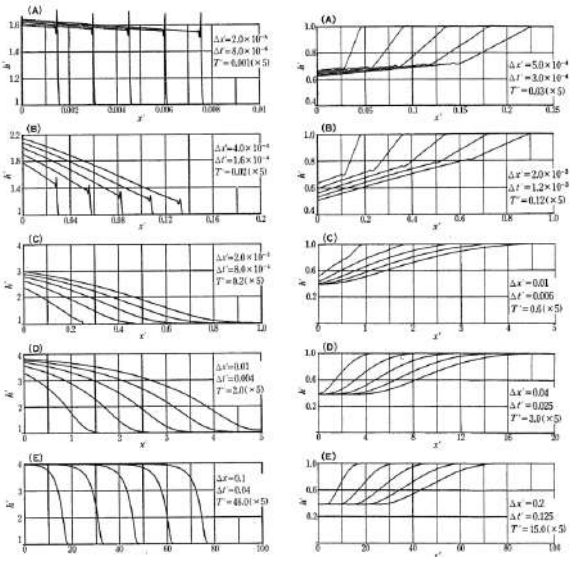
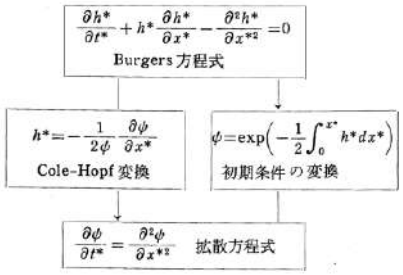


図３ 送水波の遷移過程（左：流量増，右：流量減）

Burgers 方程式近似による解析

実用的観点からは，**図３**のようなフルード数の小さな送水波が重要である．数値シミュレーションにより，発生後，十分に時間が経過すると正の送水波では単斜上昇波に漸近すること，負の送水波では波長が伸長し続けることが明らかとなった．これを理論的に説明するため、Saint-Venant 方程式を Burgers 方程式で近似する．

Burgers 方程式は非線型波動現象を記述できる方程式の一つで，Cole-Hopf 変換により拡散方程式へ変換される．この方程式は，Riemann 問題に対して，初期においては拡散効果が現れ，その後は，圧縮波では拡散効果と非線形な移流項の効果が釣り合い，膨張波では非線形効果が卓越する現象を記述できる．このため，送水波の漸変現象が Burgers 方程式で記述できる可能性を示唆する．誘導過程の詳細[3]は省略するが，送水波の現象においては，最終的に Saint-Venant 方程式は，以下の Burgers 方程式で近似することができる．更に，この方程式と初期条件は，Cole-Hopf 変換により拡散方程式とその初期条件に変換される．送水波の漸変現象は，不連続な初期値（大きな距離スケールから見ると初期の波形は不連続的変化）からの発展を問う Riemann 問題と見ることができる．不連続な初期値としては，「－1→＋1」と「＋1→－1」の



２通りがあり，前者は負の送水波で後者が正の送水波に対応する．それぞれの初期値に対して理論解が得られるので，その解から送水波の波長の変化を求め，数値シミュレーションで得られた結果と比較したものが**図４**である．

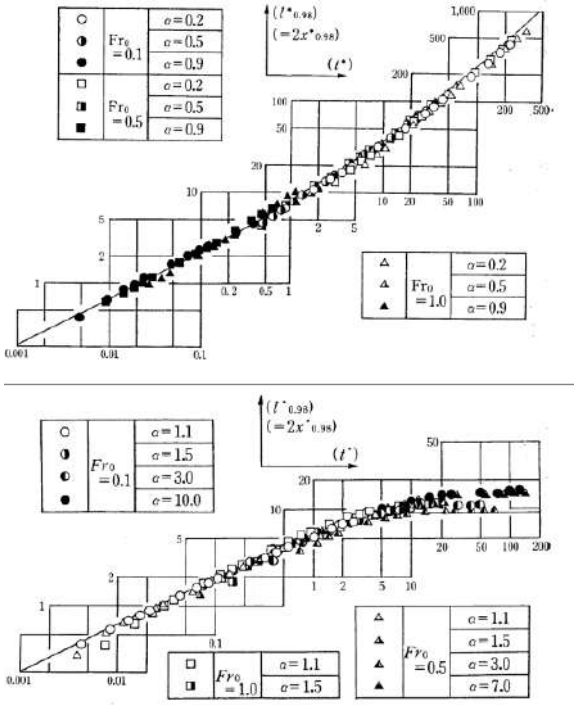


図４ 送水波の波長の時間変化の比較
上：負の送水波，下：正の送水波）

図４から波長変化に注目した場合，広範囲な Fr_0 と α に対して，Burgers 方程式の解と数値シミュレーション結果がよく合い，漸変送水波現象を説明できると考える．

Multiplied Offset Control（MC）方式

開水路での送水では時間遅れ（用水到達時間）は不可避と考えられてきたが，Check gate 操作に ICT を活用し多少の水路改修により，管水路のような送水の可能とする技術を紹介する．詳細は文献[4]を参照．

A 用水二期事業

この研究はA用水の先進的配水システムに触発されて始めたものである．A 用水では二期事業に際し，水利用の利便性を上げるため，①支線水路の管路化，②幹線水路の嵩上げ，③新型 Check gate（CK）の導入などを実施した．新型 CK は上流側に２つ，下流側に１つの設定水位を持ち，水路嵩上げで生じた水路内貯留を活用して下流水位一定制御（DC）を行うことができる．またこの CK は CK 近傍の上下流水位に反応する自立型である．

ところで，CK の操作方式には上流水位一定制御（UC）と DC があり，前者は供給主導型の配水方式に，後者は需要主導型の配水方式に適する．利便性では後者が優れているが，施設規模が大きくなる．**図５**は A 用水の縦断図で，それぞれの制御方式を採用した場合の計画通水時と静水時の水面形を示している．

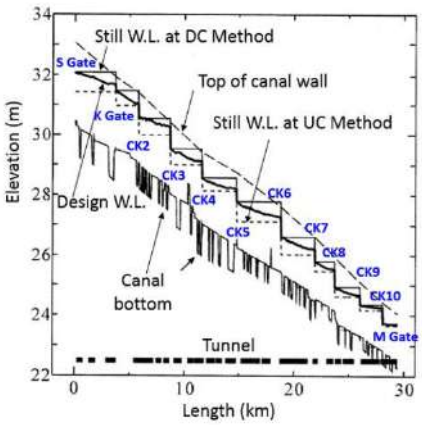


図５ A 用水の縦断図

図５から DC 方式では静水時の水面形が水路天端を越える．DC 方式で施設が大きくなるのは，下流での需要情報が上流側の CK に波の速さで伝達されるまで，水需要を水路内貯留量で賄う必要があるからである．そこで，下流の水需要情報を Telemeter で伝えることで水路内貯留量，即ち，施設規模を小さくできる可能性がでてくる。

HyFLO and EL-FLO

下流の情報を水の波ではなく電信で伝えて下流の水需要に素早く対応しようとする試みは，既に California 州の Corning Canal で米開拓局によって実施されている．Hydraulic Filter Level Offset (HyFLO)と呼ばれる方式で，その概略を**図６**に示す．

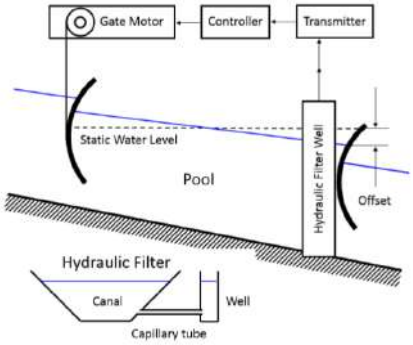


図６ Hydraulic Filter Level Offset (HyFLO)方式

当初，下流 CK 上流水位と静水時の水位の差（Offset）を細管を用いて指数移動平均していたが，後に電気的に行う方式 Electric Filter Level Offset (EL-FLO)に代えられた．この方式は，指数移動平均した Offset から CK 開度を計算し，CK の開度を変更する方式である．実用的には小流量時には安定して高い性能を示したが，大流量時には通常の上流水位一定制御方式に変更する必要があったと報告されている．

EL-FLO の改良と MC 方式の提案

EL-FLO による制御方式の画期的なところは，上流 CK の開度を Offset に比例（比例定数はゲイン）させたところにある．準定常流において，プール内のある地点の水深を一定に保った状態で流量を変化させると，水面形は Pivot と呼ばれる点を中心に回転する．その際，流量は水面勾配と Offset に比例する． 例えば，**図７**に示すように，流量が 2 倍のとき Offset は 4 倍に，CK 開度は 4 倍に，CK の上下流水位差は 1/4 に調整される．

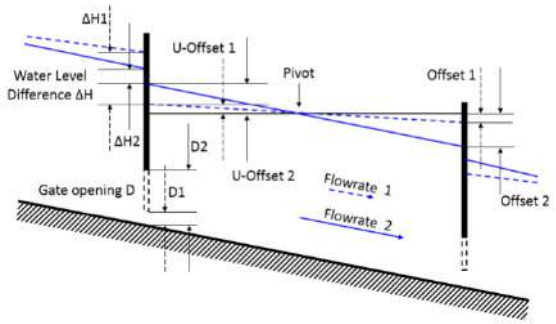


図７ Offset, U-Offset, 流量，CK 開度の関係（EL-FLO）

通常，流量増に伴って CK の上流水位は低下するので，下流側の水需要増は，連鎖的に，短時間のうちに上流側に伝えられ，上流端に至って供給量が増加される．流量減の場合はこの逆の動作となる．また，Pivot での水位は流量ゼロ時の水位に等しいので Pivot を下流に移動させるほど水路天端の嵩上げ高を小さくできる。ただし，Pivot を下流に移動させるとプール内の流れは不安定になりやすく，それを抑制する必要が生じる．

Corning 水路では，CK は巻き上げ式であるため，Offset から CK 開度を求める必要がある．しかし A 用水では，CK の下流水位は下流設定水位に追随できるので，Offset と U-Offset の比（増幅率 a）を決めればよい．U-Offset はプールの上流端水位と静水時水位の差である．即ち，CK 直下流の設定水位は一定ではなく Offset に依存することになる．増幅率 a は，プール下流端水位を許容最低水位とした時の計画最大流量時の定常流水面形と静水時の水平な水面形を比べることで求めることができる．この時 Offset と U-Offset は最大になるので，より小さい流量では、Offset と U-Offset はより小さな値となる．このため分水に支障をきたすことはない．この制御方式を**Multiplied Offset Control（MC）方式**と呼ぶことにする．

MC 方式の A 用水への適用

A 用水に MC 方式を適用する場合を数値シミュレーションにより検討した. A 用水の農水専用区間には 52 の分水工がある．**図８**は 7 日間の需要量と供給量を示す．上側の図は全 52 分水工での需要量と上流端の S ゲートの実測流量を比較したものである．用水の到達に 3 時間程度要するので，3 時間ほど供給を先行させる必要がある．

一方，下側の図は MC 方式で配水操作を行った場合の需要流量と S ゲート流量を比較したものである．MC 方式では昼間の高流量時には，供給が需要に対してよく追随していることが分かる．一方，夜間の低流量時には若干の流量の振動が見られる．この振動はプール内の擾乱が低流速のために摩擦損失が少なく減衰せず，CK と共鳴することにより起こる．Offset の平滑化係数の変更や CK の追随性の変更等，改善の余地がある．

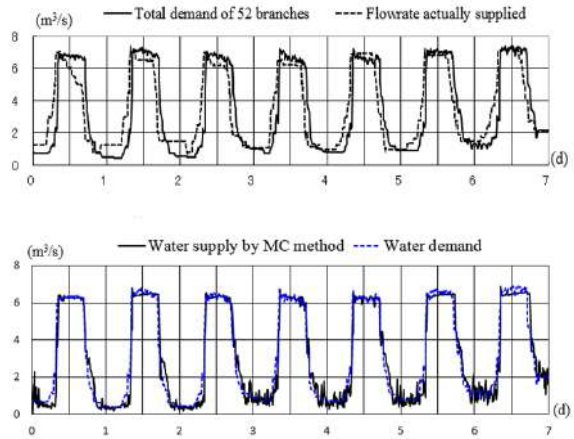


図８ 従来方式と MC 方式による用水供給の比較

謝辞

これまでの研究を行うに当たり，指導し励まし支えて下さった多くの先生方，特に，志村博康先生，中村良太先生，山本光男先生に深く感謝し御礼を申し上げます．

引用文献

1. 久保成隆 (1987) Saint-Venant 方程式で記述できる送水波のパターン分類―等流上を流下する送水波の基礎的研究（Ⅰ）―農業土木学会論文集 128 号：pp.75－84

2. 久保成隆, 志村博康 (1988) フルード数の小さな送水波の数値シミュレーションによる解析 ― 等流上を流下する送水波の基礎的研究（II）―農業土木学会論文集 138 号：pp. 11－24

3. 久保成隆, 志村博康 (1988) フルード数の小さな送水波の過渡現象の理論的解析―等流上を流下する送水波の基礎的研究（III）―農業土木学会論文集 138 8 号：pp.25-36

4. Naritaka KUBO (2019) Effective and convenient water management by tele-metering and controlling check gates in main open canal, Paddy and Water Environment, Vol.17, No.2, pp109-120

日本農業工学会賞受賞者

（2014 年度 ～ 2020 年度）

日本農業工学会賞 2014（第 1 回）

受賞者	受賞業績
白井　清恒	灌漑方法の理論的研究
中川昭一郎	学会の国内外における地位の確立
田淵　俊男	土壌、水、窒素の動態研究
橋本　　康	国際学術振興を目指して
木谷　　収	農業工学の国際化
中野　政詩	土壌中の物質移動に関する研究
真木　太一	農業環境工学の研究
町田　武美	農業情報化に関する研究

日本農業工学会賞 2015（第 2 回）

受賞者	受賞業績
古在　豊樹	閉鎖型植物生産システムに関する研究
後藤　隆志	水田耕うん整地用機械の高速化に関する研究
田中　忠次	土構造物の構造安定解析の研究
橋口　公一	固体の非可逆力学現象の支配法則：下負荷面モデルの提案
野口　伸	生物環境情報とロボットによる食料生産システムに関する研究

日本農業工学会賞 2016（第 3 回）

受賞者	受賞業績
玉浦　裕	太陽エネルギー利用による生態工学システム
安永　円理子	安全・安心の消費者志向を考慮したプレ・ポストハーベスト技術
鈴木　義則	地形気象ならびに都市熱対策に関する研究
干場　信司	家畜生産システムの総合的評価に関する研究
永木　正和	農業経済学と情報学のリンクした領域を拓く
近藤　直	マニピュレータ、マシンビジョンを有する農業ロボット
青山　咸康	農業水利構造物の地震時挙動の解析と耐震性評価に関する研究

日本農業工学会賞 2017（第 4 回）

受賞者	受賞業績
竹内俊郎	閉鎖生態系循環式魚類飼育システムの構築
吉田　敏	植物生産システムにおける制御環境下の根機能
早川誠而	大気中の熱・物質輸送と農業気象災害に関する研究
小松崎将一	カバークロップを利用した農作業システムに関する研究
佐竹隆顕	生物生産・流通プロセスの高度化に関する研究
岸田義典	日本・世界の開発途上国の農業機械化の促進
川村周三	米の収穫後プロセスにおける品質食味向上技術の開発
中　達雄	農業水利システムの性能照査型設計手法の開発
千賀裕太郎	地域資源としての水・土地の特性解明と利用計画手法の構築

日本農業工学会賞 2018（第 5 回）

受賞者	受賞業績
野並　浩	細胞膨圧計測に伴うソフトイオン化細胞分子計測の開発
原薗　芳信	各種生態系における温室効果ガス収支の観測と収支評価
田島　淳	環境保全型農作業システム構築のための局所耕うん栽培技術の開発
中野　和弘	ハウス栽培篤農家のノウハウ抽出に関する研究
亀岡　孝治	農作物・農産物のマルチ分光計測に関する研究
酒井　憲司	カオス理論農学応用の為の頑健カオス解析法
増本　隆夫	流域規模の農地水利用と自然・人為的水循環変化に関する研究
星野　敏	グローバル化時代に対応した新たな農村コミュニティ計画論の確立

日本農業工学会賞 2019（第 6 回）

受賞者	受賞業績
木部　勢至朗	閉鎖生態系生命維持技術を用いた宇宙居住系技術の研究
後藤　英司	植物工場における植物の生育制御に関する研究
小林　和彦	大気環境変化が農業に及ぼす影響の圃場実験による解明
宮崎　昌宏	傾斜地果樹園における機械化作業体系に関する研究
奥島　里美	園芸施設内部の気流と環境制御に関する研究
大政　謙次	植物機能リモートセンシングと空間情報解析に関する先駆的研究
渡邉　紹裕	農業用水管理と地域環境の関係に関する研究

日本農業工学会賞 2020（第 7 回）

受賞者	受賞業績
船田　良	木質バイオマスの形成制御機構に関する研究
田中　道男	洋ランのクローン苗生産に関する先駆的技術の開発
小沢　聖	作物反応を活用した環境制御技術の開発
荒木　肇	カバークロップによる農耕地環境改善と作物生産性向上に関する研究
古野　伸典	積雪寒冷地域における施設園芸の環境制御と強靱化に関する研究
平藤　雅之	農業における IoT,ビッグデータ、AI の研究
飯田　訓久	コンバインの自動化・ロボット化・情報化に関する研究
久保　成隆	開水路用排水路系における流れの解析と制御に関する研究

日本農業工学会フェロー受賞者

（1999 年度～2020 年度）（合計 384 名）受賞
年度（受賞者数）（総会報告年月日）

平成 11 年度（19 名）
平成 12 年 5 月 19 日
岡本　嗣男
角屋　　睦
木谷　　収
久保　七郎
古在　豊樹
佐野　文彦
白井　清恒
白石　英彦
須藤　清次
世良田和寛
田渕　俊雄
茶谷　　仁
中川昭一郎
中村　良太
橋本　　康
前川　孝昭
真木　太一
安富　六郎
和田　完司

平成 12 年度（11 名）
平成 13 年 5 月 18 日
近藤　次郎
塩谷　哲夫
庄司　英信
杉　　二郎
鈴木　義則
中村　武夫
行方　文吾
野口　正三(辞退)
林　　弘宣
八幡　敏雄
福田　仁志

平成 13 年度（11 名）
平成 14 年 5 月 17 日
相賀　一郎
遠藤織太郎
緒形　博之
菊岡　武男(辞退)
久保　祐雄
沢田　敏男
高倉　　直
藤川　武信(辞退)
古谷　　将(辞退)
松田　良一
山本　　茂

平成 14 年度（11 名）
平成 15 年 5 月 16 日
上森　千秋
岩崎　和巳
岸上　定男
田中　宏平
田中弥寿男
長野　敏英
中山　敬一
新田　慶治
細川　　明
山澤　新吾
米村　純一

平成 15 年度（11 名）
平成 16 年 5 月 14 日
不破敬一郎
高井　宗宏
町田　武美
渡部　一郎
川村　　登
堂腰　　純
清水　邦夫(辞退)
白滝　山二
長　　智男(辞退)
藤田　則之
山本　光男

平成 16 年度（45 名）
平成 17 年 5 月 13 日
矢吹　萬壽
有馬　　博
高辻　正基
獅山　慈孝
蔵田　憲次
松井　　健
宮山平八郎
坂上　　務
羽生　寿郎
三原　義秋
藍　　房和
田中　　孝
前田　耕一(辞退)
増田　正三
三箇山正雄
山下　律也
石光　研二
小出　　進
長﨑　　明
市村　一男
村瀬治比古
関谷　光博
中原　通夫
穴瀬　　真
松下　　玄
徳永　光一
河野　　洋
渡辺　　潔
石川　　明
田中礼次郎
篠邉　三郎
河原田禮次郎
中村　　充
井上　自然
佐藤　晃三(辞退)
難波　直彦(辞退)
岩田　進午
野村　安治
土崎　哲男
岸本良次郎
鈴木　光剛
湯川　清光
中川　　稔
浅原　辰夫
中島　哲生

平成 17 年度（50 名）
平成 18 年 5 月 12 日
堀部　和雄
大島　泰郎
大矢　晴彦
須藤　隆一
高桑　栄松
都留　信也
筑紫　二郎
内嶋善兵衛
内島　立郎
小元　敬男
吉野　正敏
小中　俊雄
坂井　　純
並河　　清
村田　　敏
森嶋　　博
立花　一雄
海老澤　勲
相原　良安
内海　修一
今尾　昭夫
長堀　金造
梅田　安治
戸原　義男
村上　康蔵
細山田健三
酒井　信一
近森　邦英
浅井喜代治
須藤良太郎
四方　田穆
内藤　克美
吉田　昭治
南　　信弘
丸山　利輔
鈴木　　敬
佐藤　晃一
大根　義男
仲野　良紀
岡本　雅美
谷山　重孝
翁長　謙良
江崎　　要
黒田　正治

長谷川高士
北村貞太郎
川尻裕一郎
冨田　正彦
豊田　　勝
坂井　直樹

平成 18 年度(19 名)
平成 19 年 5 月 11 日
松岡　孝尚
橋口　公一
今井　　勝
上村　賢治
山崎　　稔
長島　守正
速水　昭彦
多田　　敦(辞退)
矢橋　晨吾
藤井　弘章
高山　昌照
笹野　伸治
松田　　豊
澁谷勤治郎
河野　　広
中野　政詩
飯本　光雄
永田　雅輝
岸田　義典

平成 19 年度(5 名)
平成 20 年 5 月 9 日
堀口　郁夫
谷信　　輝
西山　喜雄
上野　久儀
原　　道宏

平成 20 年度(12 名)
平成 21 年 5 月 22 日
堀尾　尚志
森泉　昭治
岸田　恭充
泊　　功
瀬尾　康久
笹尾　　彰
市川　友彦
伊藤　和彦
佐藤　洋平
山本　　敏
仁科　弘重
矢澤　　進

平成 21 年度(19 名)
平成 22 年 5 月 13 日
高山　真策
松山　正彦
高田　吉治
石川　文武
小池　正之
唐橋　　需
石橋　憲一
岡太　　郎
海田　能宏
辻厚　　志
藤居　宏一
藤澤　　和
福桜　盛一
矢野　友久
高橋　　強
大政　謙次
花形　将司
米川　智司
駒村　正治

平成 22 年度(14 名)
平成 23 年 9 月 12 日
林真　紀夫
早川　誠而
中司　　敬
伊藤　信孝
梅田　幹雄
園部　和彦
真勢　　徹
田中　雅史
松田　誠祐
堤　　聰
中野　俊郎
常松　　哲
桑原　孝雄
長澤　徹明

平成 23 年度(14 名)
平成 24 年 5 月 15 日
位田　晴久
清野　　豁
瀧川　具弘
喜多　　毅
澁澤　　栄
保坂　幸男
三野　　徹
今井　敏行
杉山　博信
田中　忠次
青山　咸康
有田　博之
竹内　俊郎
奥島　里美

平成 24 年度(16 名)
平成 25 年 5 月 14 日
田中　道男
野並　　浩
青木　正敏
小林　　恭
大下　誠一
行本　　修
相良　泰行
中野　芳輔
宜保　清一
宮崎　　毅
河地　利彦
小前　隆美
森　　健
千賀裕太郎
平藤　雅之
木部勢至朗

平成 25 年度(13 名)
平成 26 年 5 月 13 日
石川　勝美
北野　雅治
岡田　益己
細川　寿氏
近藤　直氏
後藤　隆志
志賀　　徹
渡部　良朋
藤井　克己
内田　一徳
竹内　睦雄
亀岡　孝治
玉浦　　裕

平成 26 年度(15 名)
平成 27 年 5 月 12 日
平間　淳司
森本　哲夫
大場　和彦
東城　清秀
野口　伸
内野　敏剛
干場　信司
塩沢　昌
石田　朋靖
高橋　順二
石田　憲治
中野　和弘
北宅　善昭
中　達雄
田川　彰男

平成 27 年度(13 名)
平成 28 年 5 月 20 日
船田　良
後藤　英司
清水　浩
浦野　慎一
小松崎　将一
山口　智治
永木　正和
小田原　哲一
川村　周三
庄子　和博
小泉　健
春山　成子
平松　和昭

平成 28 年度(21 名)
平成 29 年 5 月 16 日
泉谷　直昭
田澤　信二
星　岳彦
門田　充司
吉田　敏
小林　和彦
小沢　聖

荒木　肇
宮崎　昌宏
佐竹　隆顕
佐瀬　勘紀
二宮　正士
井上　英二
芋生　憲司
杉山　隆夫
森井　俊広
渡邉　紹裕
後藤　章
毛利　栄征
糸長　浩司
山路　永司

平成 29 年度(22 名)
平成 30 年 5 月 15 日
水谷　広
白石　文秀
桶　敏
槐島　芳徳
牧野　義雄
皆川　秀夫
菅野　洋光
富士原　和宏
林　久喜
岩崎　浩一
池口　厚男
五十部　誠一郎
南石　晃明
木下榮一郎
酒井　憲司
豊田　淨彦
山本　徳司
河端　俊典
溝口　勝
佐々木　長市
廣田　純一
星野　敏

平成 30 年度(21 名)
2019 年 5 月 14 日
多胡　靖宏
大西　充
伊藤　博通
羽藤　堅治
奥田　延幸
山本　晴彦
鮫島　良次
宮田　明
佐藤　禎稔
田島　淳
河野　澄夫
後藤　清和
中村　典裕
滝岸　誠一
飯田　訓久
小竹　一男
久野　貴敬
久保　成隆
白谷　栄作
荘林　幹太郎
中村　和正

2020 年度(22 名)
2020 年 5 月 15 日
渡邊　博之
中林　和重
江口　壽彦
西浦　芳史
村上　克介
本條　毅
青野　靖之
大野　宏之
武田　純一
亀井　雅浩
大森　定夫
豊田　裕道
平石　武
吉田　智一
川越　義則
藤村　博志
坂口　栄一郎
原田　和夫
籾井　和朗
向後　雄二
土居　邦弘
辻　修

2020 年度日本農業工学会フェロー受賞者

2020 年 5 月15 日授与

氏名	推薦学会	所属・職名等
渡邊　博之	生態工学会	玉川大学　農学部　教授
中林　和重	生態工学会	明治大学　農学部農芸化学科　准教授
江口　壽彦	日本生物環境工学会	九州大学　准教授
西浦　芳史	日本生物環境工学会	大阪府立大学　准教授
村上　克介	日本生物環境工学会	三重大学　教授
本條　毅	日本農業気象学会	千葉大学　教授
青野　靖之	日本農業気象学会	大阪府立大学　准教授
大野　宏之	日本農業気象学会	農研機構　研究管理役
武田　純一	日本農作業学会	岩手大学 農学部食料生産環境学科　教授
亀井　雅浩	日本農作業学会	農研機構　西日本農業研究センター 営農生産体系研究領域長
大森　定夫	農業施設学会	農研機構　専門員
豊田　裕道	農業施設学会	元東京農業大学　教授
平石　武	農業情報学会	ソリマチ株式会社　取締役
吉田　智一	農業情報学会	農研機構　農業技術革新工学研究センター　革新工学研究監
川越　義則	農業食料工学会	日本大学　生物資源学部生物環境工学科　准教授
藤村　博志	農業食料工学会	農研機構　農業技術革新工学研究センター　所長
坂口　栄一郎	農業食料工学会	東京農業大学　地域環境科学部生産環境工学科　教授
原田　和夫	農業電化協会	北海道電力株式会社　総合研究所　主幹
籾井　和朗	農業農村工学会	鹿児島大学　農水産獣医学域農学系　教授
向後　雄二	農業農村工学会	前　東京農工大学大学院　農学研究院　教授
土居　邦弘	農業農村工学会	農研機構　農村工学研究部門　部門長
辻　修	農業農村工学会	帯広畜産大学　環境農学研究部門　教授

1. 日本農業工学会会則

昭和 59 年 6 月 30 日制定
平成 5 年 5 月 20 日一部改定
平成 20 年 5 月 9 日一部改正
平成 23 年 5 月 11 日一部改正
平成 30 年 5 月 15 日一部改正

第1章 総 則

第 1 条 本会は日本農業工学会(Japan Association of International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering)と称する。
第 2 条 本会は事務所を東京都内に置く。

第2章 目的及び事業

第 3 条 本会は農業工学に関する会員相互の協力により、農業工学及びその技術の進歩発達に資することを目的とする。
第 4 条 本会は、その目的を達成するために次の事業を行う。
(1) 各学会、協会の連絡・協力及びその総合活動
(2) 内外の農業工学関係諸機関・団体及び個人との連絡
(3) 講演会等の開催
(4) その他目的を達成するために必要な事業

第3章 会 員

第 5 条 会員を分けて、正会員・維持会員及び国際会員とする。
(1) 正会員は、農業工学に関する学術団体とする。
(2) 維持会員は、本会の目的に賛助する団体とする。
(3) 国際会員は、正会員に属する個人であって、国際農業工学会に登録したものとする。
第 6 条 本会に入会しようとするものは、別に定める入会申込書を提出し、理事会の承認を得るものとする。
第 7 条 正会員で退会しようとするものは、その旨書面をもって届け出て理事会の承認を得るものとする。
2. 維持会員・国際会員が2年以上会費を滞納した場合は退会したものとみなす。

第4章 役 員

第 8 条 本会に次の役員を置く。
会長 1 名 副会長 2 名 理事 若干名 監事 2 名
会長・副会長は理事とする。
第 9 条 会長は本会を代表し、会務を統べ、総会及び理事会の議長となる。
第 10 条 副会長は会長を補佐し、会長に事故があるとき、または欠けたときはあらかじめ会長が指名した順序で、その職務を代行する。

第 11 条　理事は会長を補佐し、会務を処理する。
第 12 条　監事は会計の状況及び理事の業務執行を監査する。
第 13 条　役員の選任は総会において行う。
第 14 条　役員の任期は 3 年とし、更任期の定時総会までとする。ただし、辞任又は任期満了の役員は後任者が就任するまではその職務を行うものとする。
第 15 条　役員で欠員を生じ、補充の必要があるときは、第 13 条の規定により選任する。後任者の任期は前任者の残存期間とする。ただし、定時総会までの期間は理事会の承認を経て、次回定時総会まで職務を行う者をおくことができる。

第5章　会　議

第 16 条　会議を分けて総会・理事会とする。
第 17 条　総会は定時総会及び臨時総会の2種とする。
第 18 条　総会は正会員および維持会員の推薦による代議員をもって組織する。
2. 代議員の定数及び任期は別に定める。
第 19 条　定時総会は毎年 1 回会計年度終了後 2 ヶ月以内に会長が招集する。
第 20 条　臨時総会は次の場合にこれを開く。
(1) 理事会において必要と認めたとき
(2) 代議員の 5 分の 1 以上から、会議目的である事項を示して請求されたとき
(3) 監事から請求されたとき
第 21 条　総会は会長がこれを招集し、少なくとも 14 日前に会議の目的である事項を書面をもって代議員に通知することを要する。
第 22 条　次の事項は総会に提出してその承認を得る。
(1) 当該年度の予算
(2) 貸借対照表・財産目録及び収支決算書
(3) その他理事会において必要と認めた事項
第 23 条　次の事項を定時総会に報告する。
(1) 前年度事業報告
(2) 会員の状況
(3) 業務及び会計監査の報告
(4) その他理事会において必要と認めた事項
第 24 条　総会は代議員総数の2分の1以上の出席を必要とする。
ただし、欠席者も書面により又は委任により表決権を行使することができる。この場合出席者とみなす。
第 25 条　総会の議決は出席者の過半数をもつて、これを決する。
2. 可否同数の場合は議長がこれを定める。
第 26 条　理事会は会長が必要と認めたとき招集する。
ただし会長は理事現在数の5分の1以上から会議に付議すべき事項を示して理事会の招集を請求された日から 14 日以内にこれを招集する。
第 27 条　理事会の定足数及び議決については第 24 条及び第 25 条を準用する。

第6章　会　計

第 28 条　本会の事業年度及び会計年度は毎年 4 月 1 日に始まり、翌年 3 月 31 日に終わる。

第 29 条　本会の事業計画及びこれに伴う収支予算は、会長が編成し、毎年会計年度開始前に、理事会及び総会の議決を経て、行使する。

2. 前項の規定に係わらず、やむを得ない事情により同項に規定する総会を開催することができないときは、総会を省略することができる。この場合においては、翌会計年度開始後最初に開催される総会において、これに係わる承認を得なければならない。

第 30 条　本会の収支決算は、会長が作成し、財産目録、貸借対照表及び収支決算書に監事の意見をつけ理事会の承認を受けて、定時総会に報告する。

2. 本会の収支決算に剰余金のあるときは、理事会の議決及び総会の承認を受けて、その一部、もしくは全部を基本財産に編入し、または、翌年に繰越すものとする。

第 31 条　基本財産は財産目録の基本財産の部に記載のうえ、確実なる方法により保管し、譲渡・交換または担保に供することはできない。ただし、本会の事業遂行上やむ得ない理由があるときは、理事会及び総会の議決を経て、処分することができる。

第7章　会則の改定及び解散

第 32 条　この会則の変更は、理事会及び総会において各々の 3 分の 2 以上の議決を要する。

第33　条　本会の解散は、理事会及び総会の 4 分の 3 以上の議決を要する。

付則

1. この会則の施行に必要な細則は、総会の議決で定める。細則には会員の入会・役員の選出・理事の職務分担・役員会の規定・代議員の選任定数・会費の額等を規定する。
2. 本会の所在地を東京都目黒区下目黒 3-9-13　目黒・炭やビル　一般財団法人農林統計協会内とする。
3. この会則は昭和 59 年 6 月 30 日から施行する。

付記

本会の設立年月日は昭和59年6月30日である。

2. 日本農業工学会細則

昭和 63 年 5 月 6 日一部改定
平成 4 年 5 月 12 日一部改定
平成 6 年 5 月 13 日一部改定
平成 8 年 5 月 10 日一部改定
平成 11 年 5 月 21 日一部改定
平成 13 年 5 月 18 日一部改定
平成 26 年 5 月 13 日一部改定
平成 28 年 5 月 20 日一部改正

第1章　会　員

第 1 条　正会員として入会しようとするものは、所定の入会申込書に次の事項を記入し、又は書類を添付して提出する。

(1) 団体名
(2) 本部事務所の所在地及び電話番号
(3) 定款及び諸規程
(4) 団体の経歴の概要
(5) 役員の氏名・主要勤務先及び職務
(6) 最近における各種別会員の数
(7) 最近 1 年間の刊行雑誌・図書の表題・発行周期・大きさ・頁数・発行部数

第 2 条　維持会員及び国際会員として入会しようとするものは、所定の入会申込書所要欄に記入して提出する。

第 3 条　入会者は承認通知を受けて後、会費を納めて資格を得る。

第 4 条　会員は、申込書記入事項に変更のあった都度本会に届けなければならない。ただし、正会員にあっては第 1 条第 6 号及び第 7 号は毎年 1 回の届け出とする。

第2章　役員･代議員･委員･名誉顧問･フェロー

第 5 条　理事会は役員候補者を選考し、総会に提出する。

第 6 条　理事会は正会員ごとに各 1 名の役員候補者の推薦を受け、この中から会長・副会長・理事・監事候補を選考し、総会提出案を作成する。

2. 会長は、前項にかかげる理事以外に、理事候補 2 名以内を推薦し、総会の承認を得て、理事とすることができる。

第 7 条　代議員は正会員及び維持会員の推薦によって会長が委嘱し、その任期は 3 年とする。ただし、交替した場合の後任者の任期は残存期間とする。

第 8 条　代議員の数は次を基準とし、理事会で定める数とする。

(1) 会員 500 名以下の正会員にあっては 1 名
(2) 会員 500 名を超える正会員にあっては、会員 500 名を超える数につき 2000 名区切り毎に 1 名。但し、人数は正会員からの申請に基づき変更することができる。
(3) 団体のみで構成される正会員にあっては、構成団体数を会員数とみなす。
(4) 維持会員にあっては 1 名
(5) 国際会員にあっては、正会員別に 1 名

第 9 条　理事会は次の区分により会務を分担する。
庶務・会計・国際・事業
2. 会長は理事のうちから事務局長を指名し、会務の円滑な運営及び理事会から委任された事項の処理に当たらせることができる。
第 10 条　本会は必要に応じ各種の委員会を置くことができる。
委員は、理事会の議決を経て会長が委嘱する。
第 11 条　本会に名誉顧問及びフェローを置くことができる。
2. 名誉顧問は理事会の推薦によって会長が委嘱する。名誉顧問は理事会の諮問に応じ、助言することができる。
3. フェローは理事会の議を経て授与される。フェローは役員ではなく、顕著な功績のあった者を顕彰する称号である。日本農業工学会が返還を求めない限りフェローの称号を保持することができる。

第3章　表　彰

第 12 条　本会は農業工学分野の学術や事業等に貢献した団体・個人を表彰することができる。
表彰は顕彰選考規則により選考し、理事会で審議・決定し、総会で報告する。
(1) 特に優れた業績を上げた個人（日本農業工学会賞）
(2) 特に功労のあった個人・団体（功績賞、貢献賞等）
(3) 本会が主体的に企画・運営した学術的行事における参加学協会等団体（感謝状等）

第4章　会　費

第 13 条　会費は予算に基づき、次のとおり分担せしめる。
(1) 正会員
均等割と代議員数割とし、予算作成の際に夫々の額を定める。
(2) 維持会員
年額 2 万円とする。
(3) 国際会員
国際農業工学会への個人当納入額に事務経費を加算した額とする。

第5章　細則の改訂

第 14 条　この細則の変更は理事会の議決を経て、総会の承認を受ける。

付則
1. この細則は、総会の議決のあった日から施行する。

3. 日本農業工学会顕彰選考規則

平成 26 年 5 月 13 日制定
平成 28 年 5 月 20 日改定

（目的）
第1条　本規則は、細則第 12 条に基づき、本会顕彰ついての選考の方法を定めるものである。

（方針）
第2条　顕彰は細則 12 条に示す内容について顕彰し、業績、社会貢献、国際性、実用性などの項目を考慮し、特に優れた功績に対して授与することを選考の方針とする。

（推薦）
第3条　日本農業工学会（以下本会という）の正会員は本会顕彰方針に則り、日本農業工学会賞候補者1名を別紙様式 1 による推薦書を毎年理事会で定めた期日までに顕彰選考委員会に提出する。
2. 本会役員は細則 12 条に該当する顕彰に該当者がある場合は、別紙様式 1 による推薦書を理事会で定めた期日までに顕彰選考委員会に提出する。

（顕彰の手続き）
第4条　顕彰は正会員及び本会役員の推薦により、「顕彰選考委員会」の審査を経て理事会で審議・決定し、総会で報告する。

（選考）
第5条　会長は顕彰事業を推進するため、顕彰選考委員会（以下委員会という）を設置する。
2. 委員会の委員は 5 人とし、理事会の議を経て会長が指名する。
3. 委員の候補者及び委員の氏名は公開しない。
4. 委員の任期は 3 年とする。
5. 委員会に委員長及び副委員長をおく、委員長及び副委員長は委員の互選による、委員長は委員会を招集しその議長となる。副委員長は委員長を補佐し、委員長に事項ある時は、その職務を代行する。
6. 委員会は定められた審査基準に基づき、推薦書及び審査結果について審議の上、日本農業工学会賞、その他の顕彰を授与するのが適当と認められた候補者を選考し、その結果を会長に報告する。
7. 委員会の議事は公開しない。その他委員会に必要な事項は委員会において定める。
8. 委員会の報告を受けた会長は、理事会で審議し、授与するものを決定する。

（規則改定）
第6条　この規則の変更は理事会で審議し、総会で議決する。

付　則
第7条　この規則は総会で議決した日から施行する。

4. 日本農業工学会賞選考内規

平成 27 年 1 月 24 日理事会承認
平成 27 年 9 月 12 日改正理事会承認

1. 日本農業工学会賞は、加盟正会員の学問分野における優れた研究あるいは技術開発に多大な業績を上げた者を対象とし顕彰する。
2. 業績評価は学術業績、国際性、社会貢献、実用性などの観点から農業工学のパブリシティを高める内容であること。
3. 日本農業工学会賞は加盟正会員各学協会の顕著な賞を授与された個人を選考対象とする。
4. 各学協会の顕彰年度は過去の年度の顕彰も対象とする。
5. 日本農業工学会賞の候補者は本会の指定日に受賞講演することを内諾しているものとする。
6. 受賞者に賞状及び記念楯を授与する。
7. 学会ホームページ上で受賞者氏名、顕彰内容を公告する。

5. フェロー規程

平成 11 年 5 月 21 日制定
平成 13 年 12 月 11 日改定
平成 21 年 5 月 22 日改定
平成 30 年 5 月 15 日改定

（目的）
第1条　管理運営、その他の活動を通じて、日本農業工学会（以下本会という）の関与する分野の学問技術の発展に継続的に顕著な功績のあった者を顕彰するため、フェローの称号を設ける。

（身分）
第2条　フェローは称号であって会員の種別ではない。ただし、フェローの称号を得たものをフェローと呼称することができる。

（資格）
第3条　フェローの称号を授与されるものは傘下の各学協会（以下、推薦者）からの推薦に基づき、フェロー選考委員会及び日本農業工学会理事会の議を経て推薦された者及び日本農業工学会理事会から推薦された者とする。
2. フェローの称号を授与されたものは、日本農業工学会が返還を求めない限りフェローの称号を保持することができる。

（フェローの数）（選考）
第4条　フェローの選考については別に定める。

（顕彰）
第5条　新たにフェローの称号を受けるものには称号授与の証状およびバッジを呈すると共に、その氏名・業績および顕彰理由を総会で告知する。

付　則
第6条　本規定は平成 21 年 5 月 22 日から施行する。

６．フェロー選考規則

平成 11 年 5 月 21 日制定
平成 16 年 5 月 14 日改定
平成 28 年 5 月 20 日改定
平成 30 年 5 月 15 日改定
令和元年 5 月 14 日改定

（目的）

第１条　本規則は、フェロー規程第４条に基づき、フェローの選考の方法を定めるものである。

（方針）

第２条　フェローの称号は、フェロー規程第１条に示す活動項目に関する継続的な功績者に対して授与することを選考の方針とする。

（推薦）

第３条　正会員（以下、推薦者）は、フェロー選考審査基準に則り、代議員数を基準として、理事会で定めた人数までの候補者を推薦することができる。

2. 前項の推薦にあたって、推薦者は別紙様式による推薦書および審査報告書を毎年理事会で定めた期日までにフェロー選考委員会に提出する。

３. 理事会はフェロー選考審査基準に則り、候補者を推薦できる（以下、理事会推薦）。

（審査）

第４条　推薦者は被推薦者について 3 人の審査員をフェローの中から選定し、審査を依頼する。ただし、審査員には被推薦者と異なる機関に属するものが半数以上含まれているものとする。

2. 審査員は推薦書に基づき被推薦者について審査を行い、その結果を別紙様式 2 により推薦者に報告する。

（選考）

第５条　会長はフェローを選考するため、フェロー選考委員会（以下委員会という）を設置する。

2. 委員会の委員は 5 人とし、理事会の議を経て会長が指名する。

3. 委員の候補者及び委員の氏名は公開しない。

4. 委員の任期は 3 年とする。

5. 委員会に委員長及び副委員長をおく、委員長及び副委員長は委員の互選による、委員長は委員会を招集しその議長となる。副委員長は委員長を補佐し、委員長に事故ある時は、その職務を代行する。

6. 委員会は定められた審査基準に基づき、推薦書及び審査結果について審議の上、フェローの称号を授与するのが適当と認められた候補者を選考し、その結果を会長に報告する。

7. 委員会の議事は公開しない。その他委員会に必要な事項は委員会において定める。
8. 委員会の報告を受けた会長は、理事会の議を経て、フェローの称号を授与するものを決定する。

（規則改定）
第6条　この規則の変更は理事会で審議し、総会で議決する。

付　則
第7条　この規則は総会で議決した日から施行する。