

植調

第56巻
第8号

JAPR Journal

タマネギの直播栽培を安定させるための溝畝施肥播種機 松尾 健太郎

省力樹形として期待されるリンゴのカラムナー性のメカニズム 岡田 和馬

オープンソフトウェアRによる再現可能な数理モデル解析

—水稲用除草剤の水中残留データ解析を例に— 近藤 圭

水稲に安全性の高いフェンキトリオンの選択性機構と利用場面 大野 修二・山本 峻資

〔植調講座〕「ノビエ」の個性を見極める1. 日本産ヒエ属植物の変異(序章に代えて) 清水 矩



公益財団法人日本植物調節剤研究協会

JAPAN ASSOCIATION FOR ADVANCEMENT OF PHYTO-REGULATORS (JAPR)

しつこい畑地雑草を きれいに抑えます!



作用性の異なる3種の除草剤の混合剤です。

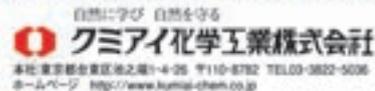
大豆、小麦・大麦、とうもろこし、ばれいしょ、にんじんの雑草防除に

クリアターン®

乳剤 細粒剤F



●使用前にはラベルをよく読んでください。 ●ラベルの記載以外には使用しないでください。 ●本剤は小児の手の届く所には置かないでください。 ●取扱日誌を記録しましょう。



©クミアイ化学工業株式会社の登録商標



ストレングス® 1キロ粒剤

イネ1葉期から使える。
直播も一発!



4葉期のノビエも、枯らす。
あなたの除草は、強くなる。

- 3成分で高い除草効果
- ノビエへの高い除草効果
(殺草効果・残効性)
- SU抵抗性雑草に対する高い除草効果
(ホタルイ・コナギ・アゼナ類・ミスアオイ等)
- 匍匐性雑草への高い除草効果
(キシュウスズメノヒエ・エソノサヤヌカグサ・アシカキ)
- 難防除雑草への高い除草効果
(クログワイ オモダカ コウキヤガラ・アメリカセンダングサ等)
- 広い散布適期幅
(移植後5日～ノビエ4葉期)
- 速い殺草スピード
(クサネム・イボクサ・アメリカセンダングサ)
- 直播水稲にも使用可能
(イネ1葉期～ノビエ4葉期)



製品のより詳しい
情報はこちら!



●使用前にはラベルをよく読んで下さい。 ●ラベルの記載以外には使用しないで下さい。 ●本剤は小児の手の届く所には置かないで下さい。
◎ストレングスはバイエルグループの登録商標。 TM コルテバ・アグリサイエンスならびにその関連会社商標

バイエル クロップサイエンス株式会社

東京都千代田区丸の内1-6-5 〒100-8262 <https://cropscience.bayer.jp/>

お客様相談室 ☎0120-575-078 9:00～12:00、13:00～17:00
土日祝日および会社休日を除く



ESG投資は社会変革のドライバーになり得るか

公益財団法人日本植物調節剤研究協会 理事

宇都宮大学教授

小林 浩幸

財務だけでなく環境 (E)、社会 (S)、統治 (G) の要素も考慮する ESG 投資の考え方は、いくつかの個別企業の取り組みを見聞きしてなんとなく知ってはいたが、きちんとした概念として理解したのは前職の農環研 (農研機構) に異動してからで、ほんの 4 年ほど前のことである。当時は、農環研は気候変動、生物多様性、農業のリスク管理など、農業や関連産業における環境問題をあつかう研究所だからこそ環境 (E) の観点から ESG 投資に関心があるのであって、日々の経営で精一杯の農業者や企業経営者には面倒くさく、さしあたっての配当を求める投資家に対しても強く響く考え方とは思えなかった。だから、これほど急速に浸透しつつある状況には少々驚いている。

農業も農業以外の企業も社会的な存在なのだから、仮に短期的には経営上の不利益があったとしても、社会全体や地域、世界の環境の持続性を考慮しない商売は排除されていって然るべきだろう。なにより、政府による税金を原資とした施策を伴わない ESG 投資がドライバーとなってそのような社会変革が実現するなら、それは画期的なことだと思う。

ただ、その判断が常に合理的になされていくかどうかについては不安がなくもない。ヨーロッパが先導して推し進める電気自動車への移行の流れは急で、日本の政府や業界もそれに追随する方向にある。私も総論としては反対しない。しかし、トヨタ自動車の豊田社長が懸念を示したのは驚いた。内燃機関を前提とする車作りをしてきた会社のトップとしては自然な発言で、特に不思議なことではない。驚いたのは、ライフサイクル全体としての評価が必要、という指摘に対してである。分析によって結論はさまざまだが、重要なのは使用される電源の発電方法、そしてバッテリー製造時の CO₂ 排出で、少なくとも現在の技術水準を前提にすれば、電気自動車、より端的には搭載バッテリーが廃棄またはリサイクルされるまでである程度長期にわたって使用されないとライフサイクル全体としての排出量はかえって多くなる可能性さえあるという点ではだいたい一致しているようだ。この期に及んで、業界のトップがそんなことを言わなければいけないほど、このことに関する世間や関係者の認識は不十分だったということなのだろうか。

農業の使用や農業生産方式についても同様だ。減農薬や有機農業はやり方を示す言葉であって、そこには必ずしも性能に関する含意はない。上述の ESG 投資の考え方に立てば、当然、経営に直結する性能だけでなく、温室効果ガス排出量の多寡、生物多様性に対する影響、あるいはヒトの健康に対するリスクについても科学的な手続きを経てライフサイクル全体として評価され、その性能が客観的に示される必要がある。もちろん、環境影響やヒトの健康に関する評価方法は開発途上であって、将来、大きな変更が加えられる余地も大きいものだと思う。仮にそうであったとしても、投資の是非の判断にあたっては、その時点で最大限の努力を傾けて導き出された科学的な評価が尊重されるべきだろう。ESG 投資が科学的根拠を持たない主観的あるいは作爲的な評価に基づいて行われるとするなら、投資をする側、される側の双方に短期的には経済的効果をもたらすことがあったとしても、社会全体の持続的な発展の原動力にはなり得ない。

ところで、私が持続性という言葉の聞いて真っ先に思い浮かべるのは雑草に埋もれる中山間地域の惨憺たる状況だ。行政コスト削減のため、人影がまばらな郊外は捨てて街に出よ、という施策は地方行政の持続性を担保するために案出されたものなのだろうが、結果として放棄された場所は自動的に美しい極相に至るわけではない。中山間地域の社会や環境の持続性にも、目配りをする必要がないだろうか。ときには除草剤の力を借りて景観を整え、野生鳥獣による被害も軽減しながら人を呼び戻そうとする取り組みもまた、地域の持続可能性を追求する有力な選択肢の 1 つであるはずだ。

教育研究機関に身を置く者としては、あくまでも科学的に技術の性能を評価しようとするマインドと技能を有する人材を育成するのが第一で、研究の場面でも、科学的な評価を不断に行いながら後世の評価に耐える持続的な技術の開発を追求していくほかない。半ば公的な機関に長く在籍していると、評価される側の立場を忘れてしまいがちだが、自らも、客観的・合理的に行われる ESG 投資の対象として選ばれる存在になれるかどうか問われているのだと肝に銘じたい。

タマネギの直播栽培を安定させるための溝畝施肥播種機

農研機構九州沖縄農業研究センター
暖地畑作物野菜研究領域
松尾 健太郎

はじめに

タマネギは、2020年の国内生産量が約135万tで、野菜の中で3番目に多い生産量である（農林水産省2021）。さらに、同年のタマネギの輸入量は約22万tで、輸入される生鮮野菜の中でもっとも多く、ほとんどが加工業務用に使用されている。このようにタマネギは、日本人に必要な不可欠な野菜である。国内のタマネギの生産地域には大きな偏りがあり、2020年は3道県だけで日本全体の約82%が生産されている。このように生産地域が大きく偏っているために、天候不順などで主産地が不作になると価格が大きく変動する。例えば、2022年5月の1kgあたりの国産タマネギの卸売価格は250円で、例年の約3倍の価格であった。産地の不作に加えて、世界的なコロナ蔓延の影響で中国からの輸出が止まり、国産タマネギの価格の高騰に拍車をかけた。このような価格の変動を少なくして安定供給を実現するためには、生産地の偏りを無くし、外国産タマネギに負けないような国産タマネギを増産する必要があると考えられる。

日本のタマネギ生産は、ほとんどが移植栽培によって行われている。育苗期間は約2ヶ月と長く、育苗には施設や資材などが必要で、移植作業でも機械や多くの人手が必要である。しかし、高齢化により労働力の確保が難しく、タマネギ生産の規模拡大や新規参入を

妨げる要因になっている。

これらの問題を解決する栽培方法として、育苗をせずに直接圃場に播種する直播栽培が考えられる。しかし、直播栽培における出芽や初期生育は、温度や土壌水分などの環境の影響を受けやすく、不安定である。そこで、出芽や生育を促進させることを目的に溝畝施肥播種機を開発したので紹介する。

1. 出芽や生育を促進させる技術

溝畝施肥播種機は、出芽や生育を促進させる技術として農研機構が開発した「溝底播種技術」と「リン酸直下施肥技術」を活用する。

(1) 溝底播種技術

溝底播種技術は、圃場表面に深さ5cm、幅10cmの小さな溝に播種する技術である（図-1、Ozawa and Okada 1996）。溝底は、畝の上面と比べて直射日光が当たる時間が短く、風もあたりにくいことで、日中の地温の上昇や土壌水分の低下および夜間の地温の低下が抑制されると考えられる。この効果により、雨よけハウス内において、冬期にべたがけと溝底播種

を利用して、低温期における葉菜類の安定栽培を可能とした。その後、道県でも試験が行われ、べたがけを行わない条件で夏期のハウス内における地温の低下と土壌水分保持の効果が示されている（福岡県農林業総合試験場2005）。ただし、露地の圃場表面に溝底播種を行うと、降雨によって水が溜まり、湿害を起こす可能性がある。

(2) リン酸直下施肥技術

リン酸直下施肥技術は、種子の直下に過リン酸石灰を施用することで、圃場条件に関わらず発芽直後から効果的にリン酸を吸収させて、生育を促進させる技術である。タマネギ直播栽培においては、基肥リン酸量の1/3～1/4（リン酸成分量で約10kg/10aの過リン酸石灰）を、種子の直下約2～4cm（幅3～4cm）に局所施用すると、生育が促進されることが明らかになっている（白木ら 2015, 白木ら 2016）。ただし、褐色低地土の圃場では、リン酸直下施肥の効果が小さいこと（末貞ら 2018）が報告されており、土壌のタイプや圃場のリン酸含量によっては、効果が表れない場合があると考えられる。

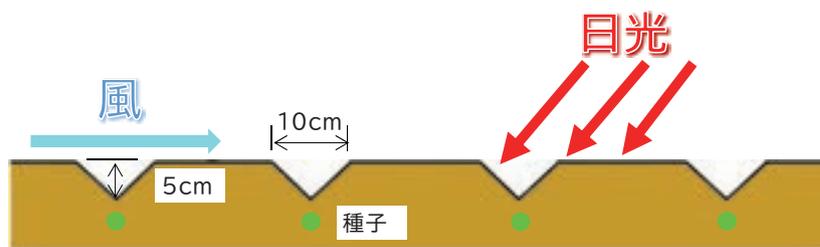


図-1 溝底播種技術

2. 溝畝施肥播種機の特徴

「溝底播種技術」は、露地では湿害を起こす可能性があるため、畝立て栽培に「溝底播種技術」と「リン酸直下施肥技術」を利用することで、畝がない場合よりも排水性は良く、畝立て栽培で問題になる乾害も回避できると考えた。しかし、畝立て後に溝を成型すると畝が崩れることがあったので、耕うんして畝を立て、畝の上に小さな溝を4本作り、溝底に施肥と播種を1工程でできるようにした。溝畝施肥播種機は、耕うん部、畝および溝の成型部、施肥部、播種部、粒剤の施薬部（オプション）から構成される（図-2）。特徴は、畝の成型部から播種部にある（図-3）。①溝成型器は、畝成型部の内部に取り付けられ、畝成型部から後方に飛び出している。これにより、畝と溝が同時に成型されるので、畝を壊すことなく溝が成型される。②肥料は、溝成型部内の誘導管から落とされ、確実に溝底に施肥される。③肥料の覆土は、溝の壁面の一部を削って行われる。④肥料の覆土の上に播種用溝切りで溝を作り、そこに播種をする。⑤種子覆土板で、もう一度覆土する。⑥鎮圧輪（播種機の駆動輪）で鎮圧して溝を整形する。さらに、市販された溝畝施肥播種機は、耕うん部がアップカットロータリになっており、畝の表面の土を細かくすることができる。トラクタの適応馬力は、28PS以上である。成型した畝の形状は、幅150cm、高



図-2 溝畝施肥播種機

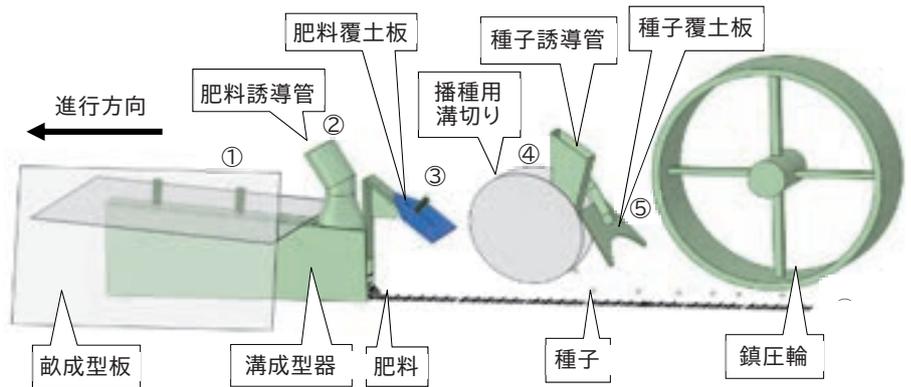


図-3 畝成型部から播種部の概略図

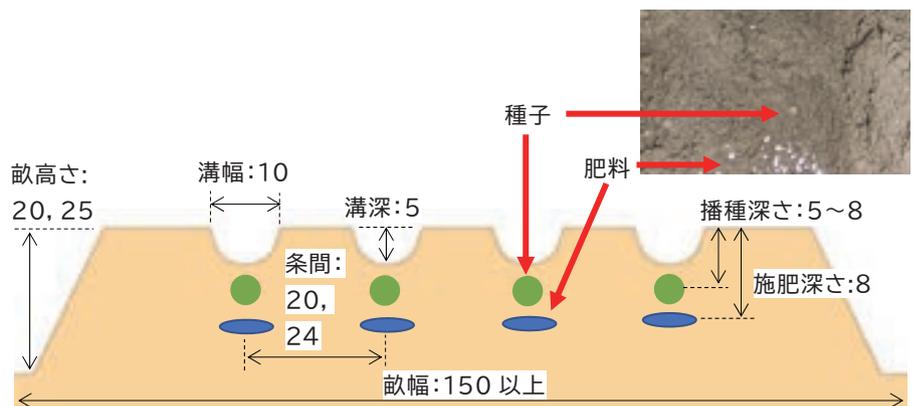


図-4 溝畝施肥播種機で作られる畝形状と種子および肥料の位置
※図中の数値の単位は、cmである。

さ20cmもしくは25cm、畝上面の幅100cmである（図-4）。溝は、深さ5cm、幅10cm程度である。施肥の深さは、畝の上面から8cm（溝底から3cm程度）と一定である。種子の深さは調節が可能である。調節は、土の状態によって変動するので、ほ場で実際に作業を行い、播種用溝切り器の

取り付け高さを調節して、種子の深さを溝底から2cm程度に調整する。条間（溝間隔）は20cmもしくは24cmで、播種間隔は、播種機のベルトの交換等により、4～40cmに調節できる。

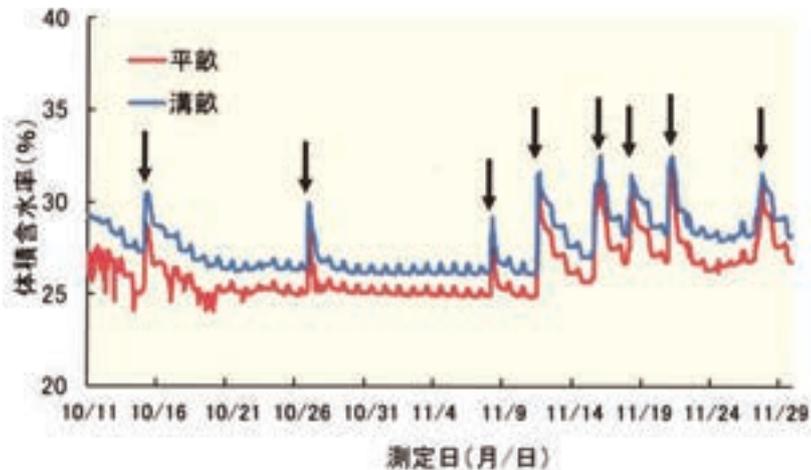


図-5 溝畝と平畝の土壌の体積含水率の推移
 ※計測深さは、溝畝は溝底から深さ5cm, 平畝は畝上面から深さ5cm
 ※図中の矢印は降雨があったことを表す。

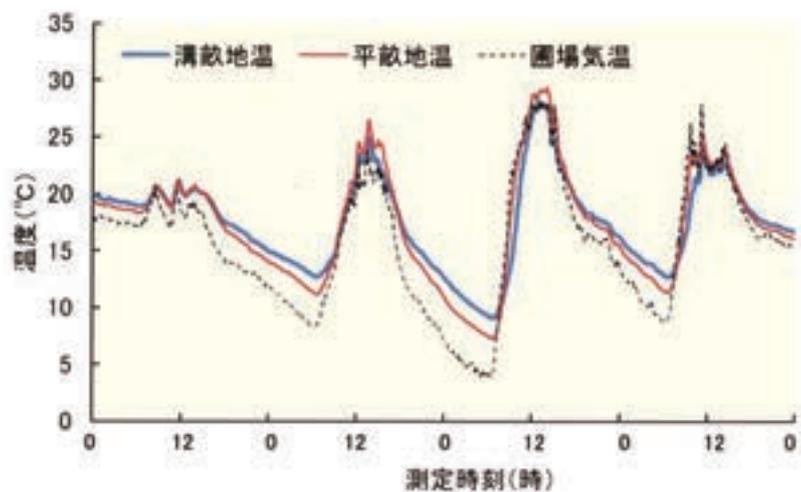


図-6 溝畝と平畝の地温の推移
 ※測定日は、2018年10月11日から14日
 ※地温の測定位置は、溝畝は溝底から深さ2cm, 平畝は畝上面から深さ2cm

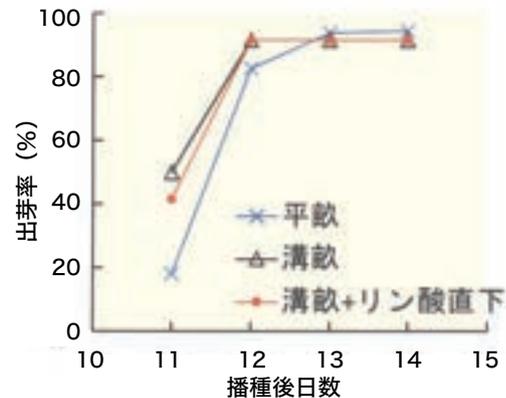


図-7 溝畝播種とリン酸直下施肥が出芽に与える影響
 ※品種：スパート
 ※播種日：2018年10月18日, 播種後8日間は降雨なし

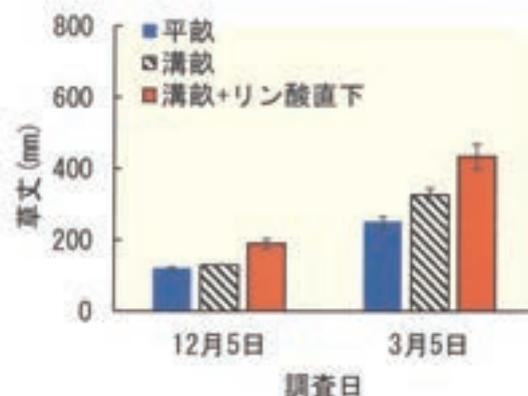


図-8 溝畝播種とリン酸直下施肥が草丈に与える影響
 ※品種：スパート
 ※播種日：2018年10月18日, 播種後8日間は降雨なし

3. タマネギ直播栽培における効果

農研機構九州沖縄農業研究センター都城研究拠点の黒ボク土の圃場で得られたデータをもとに、溝畝施肥播種機の効果について説明する。

(1) 土壌水分と地温

畝上に溝底播種を行った場合(以後、'溝畝')の土壌の体積含水率は、畝上に通常の播種を行った場合(以後、'平畝')の体積含水率よりも高く推

移した(図-5)。また、降雨後の'溝畝'の体積含水率の推移は、'平畝'と同様な傾向で下がり、'平畝'よりも高い水準で一定になった。'溝畝'の最高地温は、溝底に日射の当たる時間が短いので、'平畝'の地温よりも低くなり、'平畝'の最高地温は、日射の当たる時間が長いので気温よりも高くなったと考えられた(図-6)。「溝畝」の夜間の地温は、「平畝」の夜間の地温よりも高かった。「溝畝」は、「平畝」よりも地温の上下が少なく、安定した温度になった。

(2) 出芽と生育

'溝畝'における出芽率は、「平畝」と比較して揃いが良くなる傾向があった(図-7)。この試験では播種後8日間降雨がなかったため、「平畝」と比較して「溝畝」の土壌水分が高くなり、出芽が速くなったと考えられた。播種後9日目に降雨があったので、「平畝」でも出芽が増えて、最終的に出芽率は同等になったと考えられた。生育期間中の草丈も、「平畝」と比較して「溝畝」が高く、さらに畝上に溝底播種とリン酸直下施肥を行った場合(以後、「溝畝+リン酸直下」)で高かった(図-8)。この試験の調査期間中に7日間

表-1 溝畝播種と品種の早晩性が倒伏に与える影響

早晩性	品種	倒伏日	
		平畝	溝畝
早	濱の宝	4月27日	4月15日
	スパート	4月27日	4月23日
	ターザン	5月22日	5月21日
	ネオアース	5月29日	5月24日
	もみじ3号	5月29日	5月29日
晩	マルソー	5月31日	5月30日

※播種日：2017年10月5日

※倒伏日は、栽培本数の80%以上が倒伏した日。

以上雨が降らないことが5回あり、最長では18日間雨が降らなかつたことなどにより土壌水分が高く維持できる‘溝畝’で生育が良くなり、さらに‘溝畝+リン酸直下’では、生育初期からリン酸を効率良く吸収できたために、生育が促進されたと考えられた。

(3) 倒伏日と収量および形状

倒伏日は、早生の品種ほど、‘平畝’よりも‘溝畝’で速くなる傾向があった(表-1)。また、鱗茎重は、晩生の品種ほど、‘平畝’よりも‘溝畝’で大きくなる傾向があった(図-9)。倒伏は、球径が大きくなるにつれ、また、鱗茎重が重いほど、草丈が高く地上部が重くなるほど、増大するとされている(加藤 1973)。一般的に球肥大の開始は、早生品種では短い日長時間で始め、晩生になるほど長い日長時間を必要とする。この試験の播種日は、早生品種の播種日としては遅く、生育期間が短くなった。このために、早生品種では球肥大時期の苗の大きさは両区とも小さくなった。ただし、‘平畝’よりも‘溝畝’の苗の生育は進んでおり、‘溝畝’では速く倒伏する大きさになり、‘平畝’では遅れて倒伏する大きさまで成長して倒伏した。この結果、‘溝畝’で倒伏が速くなり、鱗茎

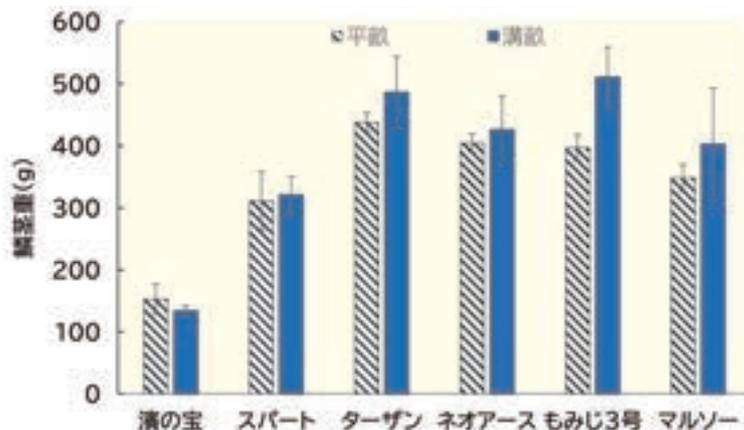


図-9 溝畝播種と品種の早晩性が鱗茎重に与える影響

※播種日：2017年10月5日

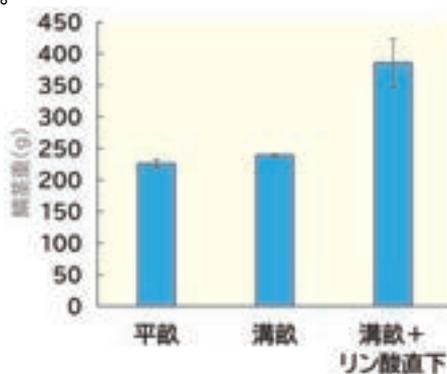


図-10 溝畝播種とリン酸直下施肥が鱗茎重に与える影響

※品種：スパート

※播種日：2018年10月18日

重は同等になったと考えられた。これに対して晩生品種では、球肥大開始期の苗は両区とも十分な大きさになっており、倒伏時期は同じになった。ただし、‘平畝’よりも‘溝畝’の生育が良く、生育差が鱗茎重に表れたと考えられた。‘溝畝+リン酸直下’では、早生品種の場合でも‘平畝’よりも鱗茎重が増加した(図-10)。この試験の倒伏日は、‘溝畝+リン酸直下’と‘溝畝’が5月5日、‘平畝’が5月7日であった。黒ボク土の圃場においては、‘溝畝+リン酸直下’は‘溝畝’よりも生育が促進されるので、早生品種でも‘溝畝+リン酸直下’の苗は、球肥大開始時期までに十分に大きくなり、倒伏も早く鱗茎重も大きくなったと考えられた(図-10)。

以上、溝畝施肥播種機で作業を行うことで、「溝底播種技術」と「リン酸直下施肥技術」を同時に利用が可能となり、タマネギ直播栽培の出芽や生育が促進され、収量が増加すると考えられた。

おわりに

溝畝施肥播種機は、株式会社クボタから令和3年度から販売され、普及を進めているところであり、いくつか注意点が明らかになっている。まず、図-6で示したように溝畝播種は、大幅に昼間の地温を低下させるわけではないので、30℃以上が続くような極端な高温条件下では、出芽率の向上は難しい。出芽前に豪雨が降り、溝が埋まるかクラストが発生すると、出芽が低下する。これらの対策としては、天気予報を確認して播種日を決定することが基本であるが、突然の豪雨を防ぐことは難しいので、有効なクラスト対策技術が必要である。また、タマネギ直播栽培に使える除草剤は少なく、雑草対策で失敗する場合があった。今後、除草剤の登録拡大が進むことを期待する。

溝畝施肥播種機の研究の一部は、食料生産地域再生のための先端技術展開事業 JPJ000418「大規模露地野菜の効率的栽培管理技術の実証研究(農林

水産省・復興庁)」により実施した。

参考文献

加藤徹 1973. IV球肥大充実期の整理. 農業技術大系野菜編. 第8-2巻, 基37-基46
福岡県農林総合試験場 2005. 雨よけ施設における夏季の若どりレタスの品種選定と出芽促進法. <https://farc.pref.fukuoka.jp/farc/seika/h16a/06-13.pdf> (2022年8月閲覧)
松尾健太郎ら 2020. 東北地域のタマネギ春まき直播栽培における溝畝播種法の効

果. 農作業研究 55 (2), 65-70.
農林水産省 2021. 令和2年産野菜生産出荷統計 <https://www.e-stat.go.jp> (2022年8月閲覧)
末貞辰朗ら 2018. 播種時期とリン酸の播種条下への局所施肥が温暖地の秋播きタマネギ直播栽培の収量性に及ぼす影響. 園芸学研究 17(1), 49-54.
Ozawa, K. and M. Okada 1996. Furrow bottom seeding under row cover to accelerate vegetable growth in a cold season. International Society for

Horticultural Science. 440, 87-92.
白木一英ら 2015. 黒ボク土におけるリン酸の施肥位置と施肥量が直播タマネギ (*Allium cepa* L.) の生育に及ぼす影響. 園芸学研究 14 (2), 157-161.
白木一英ら 2016. 黒ボク土圃場のタマネギ (*Allium cepa* L.) 直播栽培における種子直下のリン酸局所施用がリン酸吸収および初期生育・収量に及ぼす影響. 園芸学研究 15 (3), 241-246.

田畑の草種

蛇苺 (ヘビイチゴ)

ある地方にこんなお話があるそう。

その地方では、どこの家でも年に一度、地元の氏神様から神主を呼んで、御馳走を食べさせて注連縄を張った神棚に祝詞を挙げてもらう祭礼があった。ところが神主にとって御馳走はたっぷり出るのだが一日に四軒、五軒と回っても食べられる量は決まっているし、それに祝詞を挙げてその御礼はほんの僅かなものであった。

ある時、この神主が隣村の高齢の神主に「出された御馳走をみんな食べてしまうことはできないのか」と問うたところ、何でも蛇苺という苺があって、蛇はこの苺を食べた後水を飲むと大きな蛙や卵を飲み込んでも瞬く間にこなれてしまうということであった。ただ、同じような苺があって、間違えると腹が大きくなってそれ以上は食べられなくなるということでもあった。

それを聞いたこの神主は、早速、蛇苺と思われる苺を探して食べ、水を飲んでから家を回った。しかし、どうにも腹が張って一軒目の家の御馳走でさえ、食べきるどころか少しだけ箸をつけただけで残ってしまった。さては苺を間違えたかと思い、次の日は別の蛇苺を探して食べ、水を飲んだ。すると一軒目で

(公財)日本植物調節剤研究協会
兵庫試験地 須藤 健一

出された御馳走をべろっと平らげて、四軒目、五軒目に出された御馳走もすっかりと食べてしまった。

これはいい、ということでこの神主は次の日もその次の日もこの蛇苺を探して食べ、水を飲んで家々を回った。ところがそのうちに、この神主は御馳走で腹がいっぱいになるということがなくなってきた。食べても食べても腹が空き、とうとうやせ細って骨と皮だけになってしまった。

爾来、間違えてこの蛇苺を食べてしまわないように、このヘビイチゴから味がなくなってしまった、ということである。

ヘビイチゴはバラ科キジムシロ属の多年草。全国の畦、道端、草地、樹園地などのやや湿り気のある日当たりの良いところを好む。匍匐茎を伸ばし、地面を這って広がっていく。全体に軟毛があり、葉は3出複葉。5-6月に黄色い5弁花をつけ6-8月に1-1.5cmほどの赤色球形の偽果をつける。このイチゴ様の偽果は毒もなく食べられなくはないが、ぼそぼそして味がなく食用には好まれない。味があって美味しいのはシロバナヘビイチゴである。

省力樹形として期待されるリンゴのカラムナー性のメカニズム

農研機構果樹茶業研究部門
果樹品種育成研究領域
岡田 和馬

はじめに

日本の果樹生産量は戦後徐々に増加し、1979年に685万トンとピークに達した。しかし、その後は生産者の減少や高齢化、後継者不足などにより、生産量は緩やかに減少を続けており、2019年には270万トンとピーク時に比べて約6割も減少している。また、2020年には、果樹の栽培農家のうち経営者が60歳以上の割合が約8割を占め、高齢化が深刻になっている。このような状況の中、2020年に公表された新たな果樹農業振興基本方針では、「供給過剰基調に対応した生産抑制的な施策から、低下した供給力を回復し、生産基盤を強化するための施策に転換する」という方向性が打ち出されている（農林水産省 2022a）。

果樹栽培は、受粉・摘果などの細かな作業、収穫などのデリケートな作業、整枝・せん定などの熟練技術を要する作業が多いため機械化が難しく、労働時間の削減や規模拡大が進んでいない。樹形は、摘果・収穫などの果実生産、整枝・せん定などの樹体管理、栽植密度などに影響を与える重要な要素の1つであり、新たな果樹農業振興基本方針においても生産基盤を強化するため「省力樹形の導入」が推進されている。

省力樹形の例として、ミカンの根域制限栽培、リンゴの超高密植栽培、ナシのジョイント栽培などが挙げられている。いずれも①小さい樹を直線上に植えるため作業動線が単純で効率的、

②密植することで単収が増加、③均一に日が当たり品質が揃いやすい、④成木までの期間が早く未収益期間が短いなどの利点を持ち、省力化・機械化による労働生産性の向上が見込まれている（農林水産省 2022b）。

本稿では、省力樹形の1つとして期待されているリンゴのカラムナー性の特徴とメカニズムについて紹介する。

1. リンゴのカラムナー性

「ふじ」や「つがる」、「王林」など普通のリンゴ品種は、主幹から出た多数の側枝が横に伸び、円錐状の樹形を形成する（普通樹形、図-1A）。普通樹形では、枝や果実が3次元の複雑な配置となるため、①整枝・せん定に熟練を要する、②収穫などの機械化が困難という欠点があった。一方、1960年代初めに「マッキントッシュ」の突然変異体として発見された「ウィジック」は、側枝がほとんど伸びずに短果枝になり、枝が太く節間が短いため、細長い円柱状の樹形になる（図-1B）。これらの特徴はカラムナー（columnar）性と呼ばれ、①側枝が少なく枝の配置が単純であることから整枝・せん定が簡単、②樹列が揃って平面的に結実するため収穫作業の省力化・機械化が可能、③超高密植栽培により単収が増加するなどの利点があり、労働生産性の向上が見込まれる省力樹形として期待されている。

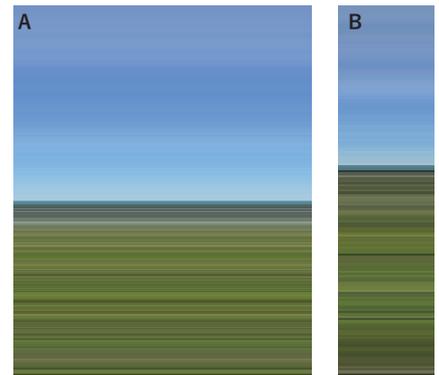


図-1 リンゴの樹形
(A) 普通のリンゴ、(B) カラムナー性のリンゴ

2. 「ウィジック」の突然変異の原因

「ウィジック」のカラムナー性は、遺伝解析により1つの顕性遺伝子（*Co* 遺伝子）によって制御されていることが明らかにされていた。我々は「ウィジック」の突然変異の原因を特定するため、カラムナー性のリンゴ（*Co/co*）と普通樹形のリンゴ（*co/co*）を交雑して得られた1,657個体の後代を用いて遺伝解析を行い、*Co* 遺伝子の位置を第10染色体の約100 kbの領域に絞り込んだ（Moriya *et al.* 2012; Okada *et al.* 2016）。次に、この100 kbの領域に対応するDNA断片を、カラムナー性のリンゴ品種「テラモン」（*Co/co*）と原品種の「マッキントッシュ」（*co/co*）から単離し、*Co* と *co* 遺伝子座乗領域の塩基配列を決定・比較した。その結果、*Co* 遺伝子座乗領域には、約8.2 kbのレトロポゾン（転移因子）が挿入されているこ

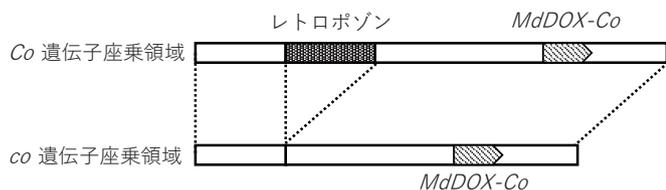


図-2 *Co* と *co* 遺伝子座乗領域のゲノム構造の模式図

とが明らかになった (図-2)。その他に違いは見られなかったことから、この挿入変異がカラムナー性を引き起こした原因であると考えられた (Okada *et al.* 2016)。

3. *Co* 候補遺伝子の探索

「ウィジック」で見つかった挿入変異は、タンパク質のコーディング領域ではなく、遺伝子間領域に位置すると推察されたため、挿入変異の近くにある遺伝子の発現を調査した。RNAシーケンスにより「マッキントッシュ」と「ウィジック」の茎頂で発現量に差がある遺伝子を調べたところ、挿入変異の約 16 kb 下流に位置する遺伝子 (*MdDOX-Co*) (図-2) が「ウィジック」の茎頂だけで発現していたことから、*Co* 遺伝子の有力な候補と考えられた (Okada *et al.* 2016)。RT-PCR により *MdDOX-Co* の発現組織を詳細に調べたところ、普通樹形のリングゴでは主に根で発現し、茎頂や側芽、葉ではほとんど発現していなかったのに対し、カラムナー性のリングゴでは根に加えて茎頂や側芽、葉でも発現していた (Wolters *et al.* 2013; Wada *et al.* 2018)。これらの結果から、カラムナー性のリングゴでは挿入変異の影響により *MdDOX-Co* が地上部 (茎頂、側芽、葉) で異所的に発現するようになり、カラムナー性を引き起こしたと考えられた。

4. *MdDOX-Co* の機能解析

MdDOX-Co は 339 個のアミノ酸から構成される 2-オキソグルタル酸依存性ジオキシゲナーゼ (DOX) をコードしている。DOX は、酸素添加反応を触媒する代謝酵素であり、3つのクラス (DOXA, DOXB, DOXC) に分類される。*MdDOX-Co* の機能を推定するため分子系統解析を行ったが、*MdDOX-Co* はアルカロイドやムギネ酸の生合成に関与する酵素が属する DOXC41 の系統群に分類され (Okada *et al.* 2016)、*MdDOX-Co* が樹形にどのように関与しているかについて手ごかりは得られなかった。

MdDOX-Co が植物へ与える影響を調べるため、*MdDOX-Co* を過剰発現



野生型
過剰発現体

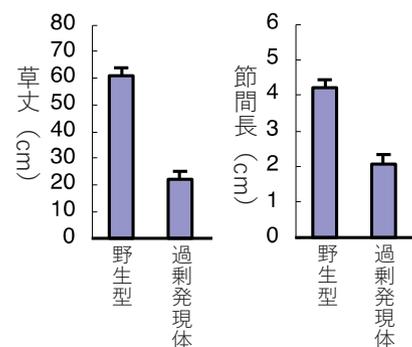


図-3 *MdDOX-Co* 過剰発現タバコの形態

する形質転換タバコを作成した。過剰発現タバコは、草丈が低い、節間が短い、葉が縮れる、葉が濃緑色になるなどわい性植物の特徴を示し (図-3)、ブラシノステロイドやジベレリンの生合成/受容・情報伝達が欠損したわい性変異体に酷似していた。そこで、*MdDOX-Co* を過剰発現するわい性タバコに、ブラシノステロイドあるいはジベレリンを処理したところ、ブラシノステロイド処理では大きな変化は見られなかったが、ジベレリン (GA_3) 処理では草丈と節間が長くなり、野生型 (非形質転換体) に近い形態に戻ることが明らかになった (図-4)。このことから、*MdDOX-Co* は、ジベレリンを減少させる機能を持つことが示唆された (Okada *et al.* 2020)。



水処理
10 μ M GA_3
100 μ M GA_3

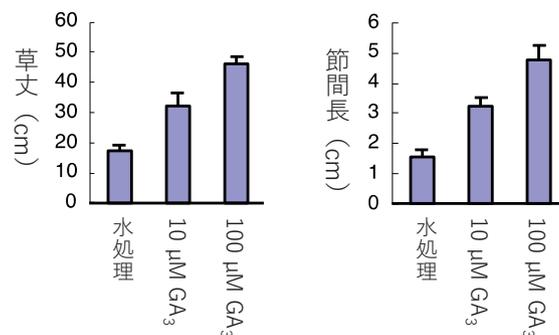


図-4 ジベレリン (GA_3) 処理した *MdDOX-Co* 過剰発現タバコの形態

表-1 ジベレリン (GA₃) 処理した接ぎ木当年のリンゴ苗の形態

品種名	処理区	主幹延長枝長 (cm)	節間長 (cm)	側枝数 (本)	側枝長 (cm)
ウィジック	無処理	48.4	1.6	2.2	0.8
	0.1 mM GA ₃	50.4	1.6	1.0	1.3
	1 mM GA ₃	97.5	2.4	5.9	3.4
マッキントッシュ	無処理	122.5	2.8	7.4	10.6
	0.1 mM GA ₃	141.2	2.8	11.5	13.9
	1 mM GA ₃	154.8	2.9	13.6	15.8

5. 「ウィジック」へのジベレリン処理

リンゴのカラムナー性にもジベレリンが関係しているかどうか確かめるため、「ウィジック」と「マッキントッシュ」の苗木にジベレリンを処理した(表-1)。「ウィジック」にジベレリン(1 mM GA₃)を処理した時、主幹延長枝と節間が長くなり、無処理の「マッキントッシュ」に近い形態になることが明らかになった。また興味深いことに、ジベレリン(1 mM GA₃)を処理すると、「ウィジック」、「マッキントッシュ」ともに側枝(副梢)が増加することが明らかになった。このことから、ジベレリンはリンゴの枝や節間の伸長に加えて、側枝の形成にも重要な役割を果たしていることが示唆された(Okada *et al.* 2020)。

6. MdDOX-Co がジベレリン合成に与える影響

植物の代表的な活性型ジベレリンである GA₄ は、GA₁₂ から2種類の酵素(GA20酸化酵素とGA3酸化酵素)の働きにより合成される(図-5A)。MdDOX-Co がジベレリン代謝経路のどこで働くかを調べたところ、MdDOX-Co は GA₁₂ → GA₁₁₁、GA₉ → GA₇₀、GA₄ → GA₅₈ の反応を触媒することが明らかになった(図-5B)。また、MdDOX-Co を過剰発現する形質転換シロイヌナズナへ GA₁₂

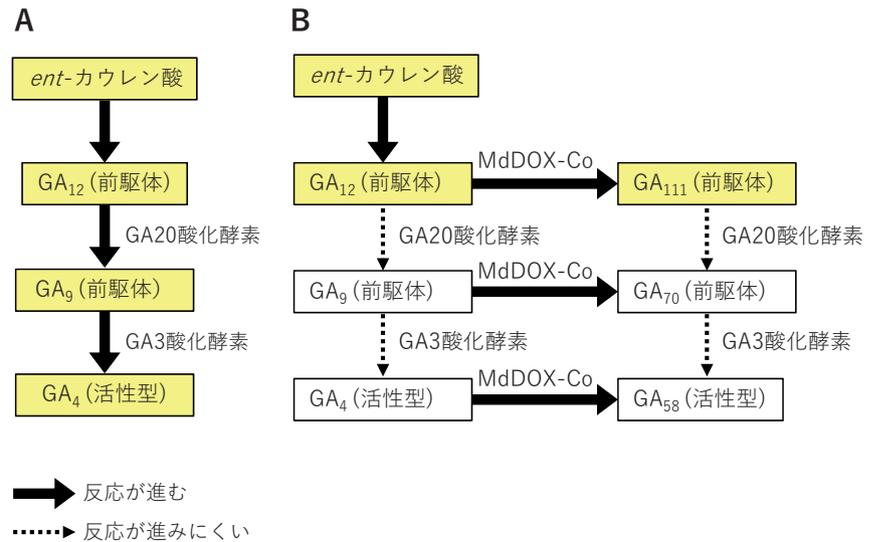


図-5 MdDOX-Co がジベレリン合成に与える影響
(A) 植物の主要なジベレリン合成経路。GA₁₂ から活性型の GA₄ が合成される。
(B) MdDOX-Co により GA₁₂ が GA₁₁₁ に代謝され、活性型ジベレリンが減少する。

を投与した場合、GA₁₁₁ は産生されたが、GA₉、GA₄、GA₇₀、GA₅₈ は産生されなかった。さらに、シロイヌナズナの GA20 酸化酵素は、GA₁₁₁ を GA₇₀ に代謝しにくいことが明らかになった。以上のことから、MdDOX-Co が GA₁₂ を GA₁₁₁ へ代謝することにより、前駆体である GA₉ と GA₇₀ の量が減少し、活性型のジベレリン(GA₄、GA₅₈)の合成が阻害されると考えられた(Watanabe *et al.* 2021)。

MdDOX-Co (DOXC41) は、既知のジベレリン合成酵素である GA20 酸化酵素(DOXC7)や GA3 酸化酵素(DOXC3)、ジベレリン不活性化酵素である GA2 酸化酵素(DOXC12, 13)とは異なるクレードに分類されることから、新規のジベレリン代謝酵素であると考えられる。

7. カラムナー性のメカニズム

以上の知見をまとめると、①普通のリンゴでは根で発現していた MdDOX-Co が、カラムナー性のリンゴではレトロポゾンの挿入によって、地上部(茎頂、側芽、葉)でも異所的に発現するようになった→②地上部組織で作られた MdDOX-Co がジベレリンの前駆体である GA₁₂ を GA₁₁₁ へ代謝することにより、活性型ジベレリンの量が減少した→③地上部の活性型ジベレリンが減少することにより、枝や節間が短くなり、側枝数も減少した→④これらの形態が複合的に組み合わせられて、円柱状の樹姿を形成すると考えられた。

8. 今後の展望

カラムナー性のリングは省力樹形の特長を持つと期待されているが、まだ経済栽培されるカラムナー性のリング品種は育成されていない。農研機構果樹茶業研究部門では、1980年代後半から食味の良いカラムナー性リングの品種改良を進めており、2015年には「ウィジック」から数えて第5世代目となるカラムナー性の有望系統「盛岡74号」を選抜している。現在、リング主産県で果実品質や栽培特性が調査され、新品種候補として普及性が検討されているところである。

また、カラムナー性のリングは普通のリングと全く樹形が異なることから(図-1)、カラムナー性の特長を活かした新しい栽培方法を開発する必要がある。農研機構果樹茶業研究部門では、「カラムナータイプリングを用いた片面着果栽培」(岩波 2018)や「カラムナータイプ樹の隔年交互結実法」(岩波ら 2021)、カラムナー性のリングの主幹伸長が劣る場合に「ジベレリン処理(液剤あるいは塗布剤)によって伸長を促進する方法」(Okada *et al.* 2020; 馬場ら 2022)を開発している。ただし、ジベレリンはリングにおいて

生育調節剤として登録されていないため、現在、登録に向けて効果・葉害の確認試験が行われている(日本植物調節剤研究協会 2022)。さらに、産学が協力して省力樹形に対応した果実収穫ロボットの研究も進められており、果樹生産の機械化に向けて試作機が開発されている(農研機構 2020)。

このように、近い将来、食味の良いカラムナー性のリング新品種やカラムナー性に適した省力栽培方法、省力樹形に対応した作業用機械が開発・実用化されることにより、労働生産性が向上し、高品質な国産リングが安定的に生産・供給されることを願っている。

引用文献

馬場隆士ら 2022. ジベレリンペーストによる当年生リング苗の新梢伸長の促進効果. 園芸学研究 21(2), 149-156.
岩波宏 2018. リングカラムナータイプを活用した省力化の可能性. 果実日本 73(2), 44-49.
岩波宏ら 2021. 効率的な加工用途向けリング生産のためのカラムナータイプ樹の隔年交互結実法と収穫方法. 農研機構研究報 7, 63-72.
Moriya, S. *et al.* 2012. Fine mapping of *Co*, a gene controlling columnar growth habit located on apple (*Malus × domestica* Borkh.) linkage group 10. Plant Breed. 131, 641-647.
日本植物調節剤研究協会 2022. 2021年度リング・落葉果樹関係除草剤・生育調節剤試

験判定結果. 植調 56(2), 13-18.
農研機構 2020. 果実収穫ロボットのプロトタイプを開発. https://www.naro.go.jp/publicity_report/press/laboratory/nifts/137793.html (2022年9月5日閲覧)
農林水産省 2022a. 果樹をめぐる情勢(令和4年8月). <https://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/fruits/attach/pdf/index-77.pdf> (2022年8月22日閲覧)
農林水産省 2022b. 令和3年度補正予算及び令和4年度予算概算決定の概要. <https://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/fruits/attach/pdf/index-1.pdf> (2022年8月22日閲覧)
Okada, K. *et al.* 2016. Expression of a putative dioxygenase gene adjacent to an insertion mutation is involved in the short internodes of columnar apples (*Malus × domestica*). J. Plant Res. 129, 1109-1126.
Okada, K. *et al.* 2020. Columnar growth phenotype in apple results from gibberellin deficiency by ectopic expression of a dioxygenase gene. Tree Physiol. 40, 1205-1216.
Wada, M. *et al.* 2018. A root-localized gene in normal apples is ectopically expressed in aerial parts of columnar apples. Plant Growth Regul. 85, 389-398.
Watanabe, D. *et al.* 2021. The apple gene responsible for columnar tree shape reduces the abundance of biologically active gibberellin. Plant J. 105, 1026-1034.
Wolters, P.J. *et al.* 2013. Evidence for regulation of columnar habit in apple by a putative 2OG-Fe(II) oxygenase. New Phytol. 200, 993-999.

オープンソフトウェア R による 再現可能な数理モデル解析 —水稲用除草剤の水中残留データ解析を例に—

一般財団法人残留農業研究所
化学部
近藤 圭

はじめに

自然科学におけるモデルは複雑な現象を仮定に基づき簡略化することでその解釈を支援するツールである。現象のモデル化は、そのプロセスやメカニズムを記述するのに十分な要素のみを抽出し、ダイアグラムやフローチャートで表現する概念モデルを構築することから始まる。この過程は、仮説を立て、それに基づきデータを観測する実験計画にも共通していることから、モデルはあらゆる科学的手法において必須である。概念モデルは、続いて各要素を変数として扱い、対象とするプロセスやメカニズムを微分方程式により定式化することで数理モデルとなる。ここで、得られたデータからモデルを構築する統計モデルや機械学習モデルも広義の数理モデルであるが、本稿では上述の定義のものに限定して数理モデルと呼ぶこととする。数理モデルは、与えられたルール（パラメータや境界条件）に対する挙動（出力）を調べることで、現象に由来するデータ生成メカニズムを理解することに有用である。一般に、数理モデルは観測データに基づきそのパラメータをキャリブレーションすることで、データ間の補間あるいはデータ範囲外への外挿が可能となる。さらに、実験では観測できない要素の定量化や新たな実験を行うことなくその結果を予測することもできる (Soetaert and Herman 2009)。

上述の利点から、これまでに農業の

環境中動態を評価する様々な数理モデルが開発・利用されており (Ippolito and Fait 2019)、我が国においても水田環境中における農業動態を予測する数理モデルの研究が盛んに行われてきた (Inao and Kitamura 1999; Watanabe *et al.* 2006)。これらの多くは、MS Excel[®] を用いたスプレッドシート上で実装されており (以下、スプレッドシートモデル)、数理モデルに不慣れなユーザーにも配慮した作りとなっている。

ところで近年、研究のオープンサイエンス化が全世界で急速に進んでいる。例えば FAIR 原則 (Wilkinson *et al.* 2016) は、データのオープンネス (openness) を進めるうえで、優れたデータ管理とは何かを具体的に記述したもので、この考え方に則ったデータ整備や提供のサービス化が進められている (青木 2021)。一方、統計解析や数理モデリングといったデータ解析では、これに加えてさらに透明性 (transparency) や再現性 (reproducibility) が求められている (Choi *et al.* 2021)。前者はステークホルダーのモデルの構造、支配方程式、パラメータおよびモデルの仮定を認識しやすいことであり (Eddy *et al.* 2012)、後者は同じ入力データ、計算手順、方法、コード、解析条件を用いて一貫した結果を得ることである (National Academies of Sciences and Medicine 2019)。

これらの点で、上述のスプレッドシートモデルは、生データの前処理、モデル解析条件また出力結果の作図等の操作における逐次記録性や追跡性が

弱く、それらがユーザー間での再現性に大きく影響する。そのため、最近ではスクリプトベースでの解析環境が好まれる傾向にあり、オープンソフトウェア R およびその統合開発環境 (IDE) である RStudio を用いたデータ解析がスプレッドシートモデルの代替手段となりつつある (Alarid-Escudero *et al.* 2019)。くわえて、近年の計算機科学の発展、特にモンテカルロシミュレーション等の確率論的アプローチが広く利用されるようになり、それらの実装の困難さや膨大な計算量とデータの取り扱いの煩雑さからも、スプレッドシートモデルから多数の計算パッケージやアプリケーション例が多い R への転換が求められている (Baio and Heath 2017)。

本稿ではオープンサイエンスを進めるうえでの 3 課題 (オープンネス、透明性および再現性) の内、再現性について、R で構築した数理モデルによる水稲用除草剤の水中残留データ解析の模擬実演を通じた話題共有を主題とする。また実演内容は、読者の方が実際にソースコードをダウンロードして演習的に体験することも可能となっていることを申し添えておく。

1. 問題設定と解析手順

本稿で取り扱う問題として、任意の除草剤 X を有効成分として 8% 含有する乳剤 A の水質汚濁性試験データ (試験区名: LC) をもとに、標準的な流域における河川水中濃度を予測し、

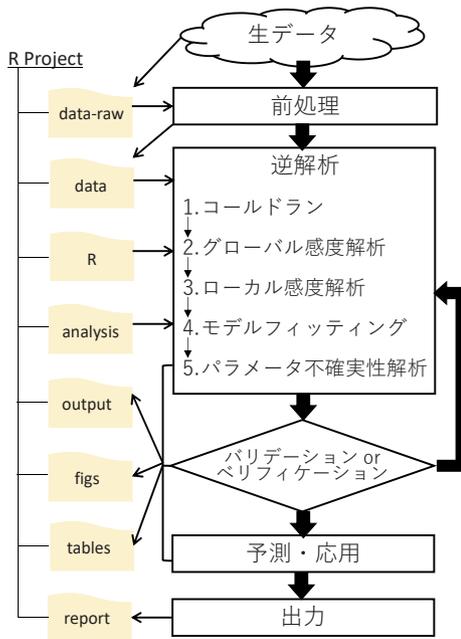


図-1 解析フローチャートおよびRプロジェクトでのフォルダ構成（黄色枠は各フォルダを表す）

その影響要因を調査することを取り上げる。データ解析には水田環境中での農薬動態を予測する数理モデル PCPF (Pesticide Concentration in Paddy Field)-1R モデルを用いた (Kondo *et al.* 2019; Kondo *et al.* 2020; Kondo 2022)。オリジナルモデルは、東京農工大学で開発されており、MS Excel® を用いたスプレッドシートモデルとして設計されている。PCPF-1R モデルはオリジナルモデルにおける基礎理論はそのままに、オープンソフトウェア R で再構築したモデルである。このモデルを R の逆解析パッケージである “FME” (Soetaert and Petzoldt 2010) を組み合わせることにより、実験データをもとにしたオートキャリブレーションが実装可能となる。

解析手順を図-1 に示す。解析は、R の IDE である RStudio を用いた。本稿で紹介する RStudio のインストール方法や機能の詳細については高橋 (2018) の書籍を参照されたい。RStudio では R Project 機能が備わっており、データ解析をプロジェクト

ベースで管理することができる。これにより、PC 上での作業ディレクトリ指定が絶対パスから相対パスに簡略化されるため、解析データの出入力が容易になる。その結果、図-1 に示す通り用途毎にフォルダ分けをすることができ、解析データの散逸を防止できる。

解析ではまず、必要とするデータを収集し、それらを生データとしてフォルダ (“data-raw”) に保存する。次に、これらの生データを R 上で取り扱いやすく前処理してから解析に供する。解析では、前処理済みデータ (“data”), 解析に必要なユーザー定義関数 (“R”) およびそれら进行处理するコード (“analysis”) を各フォルダから取り出して逆解析を実行する。得られた解析結果やそれらをもとに作成した図表についてもそれぞれ対象フォルダ (“output”, “figs” および “tables”) に保存する。必要に応じて後述する R マークダウン機能を用いて解析レポート (“report”) を作成することもできる。これらの一連の作業は細かな違いはあるが、統計解析および数理モデリングのいずれの場合にも共通の推奨操作となっている (Alarid-Escudero *et al.* 2019; BES and Cooper 2017)。

2. ハンズオン

(1) 解析準備～データの前処理

PCPF-1R モデルを用いた具体的な解析について説明する。モデルのソースコードは、分散型バージョン管理

システム Git を用いて維持・管理され、そのオンラインプラットフォームである GitHub が提供するリモート環境 (リポジトリ) で共有可能な状態にしている (図-2)。はじめに GitHub 上のリポジトリ (<https://github.com/k-kondo-IET/PCPF-1R>) から PCPF-1R のプロジェクトソースをダウンロードし、自身の PC にローカルリポジトリを作成する。次に解析のために必要な生データを入力する。実験データから対象農薬の水中残留濃度 (“data_conc_label_1.csv”), 水収支 (“data_wb_1.csv”), 実験圃場の情報 (“input_experiment.csv”) および処理農薬製剤情報 (“input_pesticide_label_1.csv”) を入力する。対象農薬中有効成分の物理的・化学的パラメータ (“input_pesticide_physchem.csv”) は、分子量、水溶解度、蒸気圧、土壌吸着性および分解情報が必要になる。これらの情報に関するデータソースは様々あるが、本稿では原則として、全てが一括で入手可能である農薬抄録あるいは農薬の審査報告書からの取得を推奨する。生データの入力が完了したら、“analysis” フォルダから解析スクリプト (“Hands-on.R”) を開き、解析に使用するモデルや収集した生データを読み込み、表-1 に示す PCPF-1R モデルの入力パラメータセットを前処理済みデータとして作成する。

(2) 逆解析～バリデーション

続いて逆解析の工程に移る。“data” フォルダから前処理済みデータと呼び

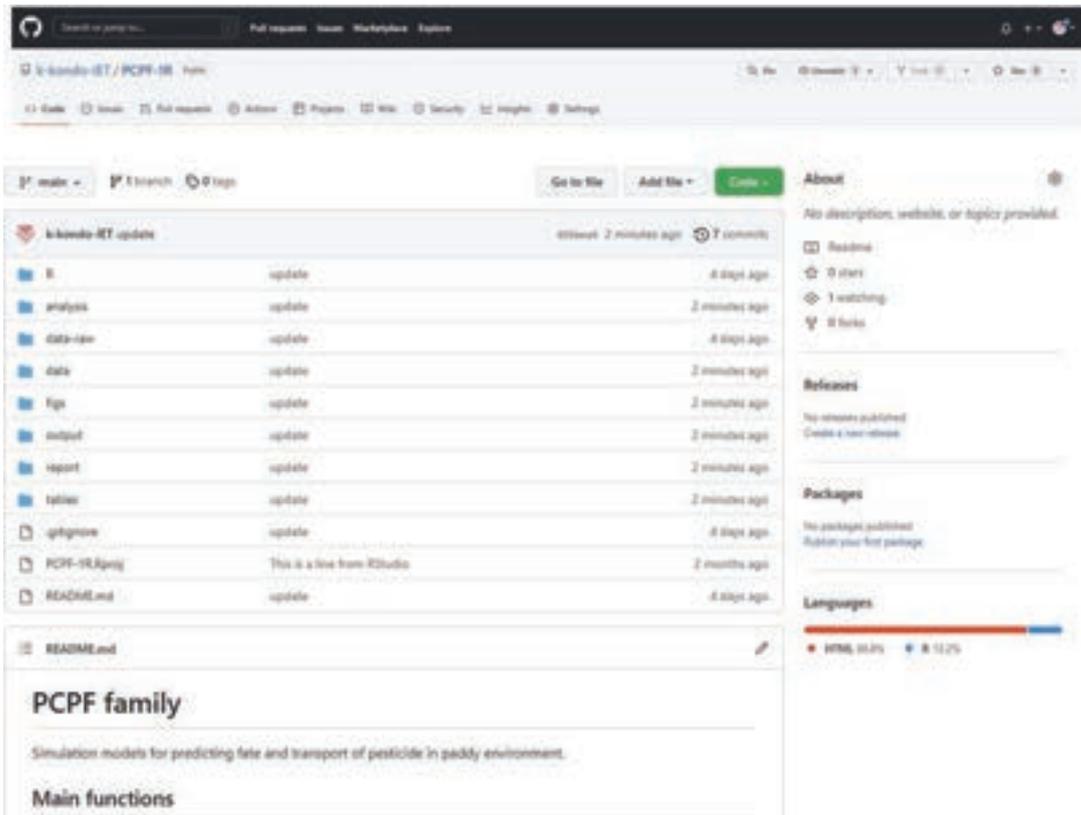


図-2 PCPF-1R モデルのソースコードが共有可能な GitHub 上のリモートリポジトリ (<https://github.com/k-kondo-IET/PCPF-1R> にアクセスし、画面に表示される緑色の“Code” ボタンをクリックして“Download ZIP” を選択してダウンロードする。Rstudio から“PCPF-1R.Rproj”を開くと図-1 に示した R プロジェクトが表示される。)

出し、表-1 の入力パラメータをキャリブレーションせずにシミュレーションを行う（コールドラン）。これにより、実験データに対するモデルの挙動を視覚的・統計的に確認し、モデルの仮定が実験データに対して妥当であるか、表-1 の入力パラメータを実験データに合わせて調整するパラメータキャリ

ブレーションを必要性があるか確認する。パラメータキャリブレーションを行う場合には、除草剤 X の水中残留濃度に関する実測データとモデル出力との誤差の平方和を目的関数として定義する。ここで各データに対して 1/（実測データ）の重みを付与したが、これは重みなしのデータで解析を進め

た結果、後述するバリデーションまたはベリフィケーション工程で得られた結果が不適と判断されたためである。FOCUS（2006）のガイダンスでも推奨されている通り、はじめは重みなしでの解析を進めることが適当である。

続いて実施するグローバル感度解析では、比較的広いパラメータ範囲を

表-1 PCPF-1R モデルのパラメータとその算出根拠

パラメータ	Rでの名前	コールドランでの値	算出に用いた生データ
圃場面積 (m ²)	Area	1	実験情報
土壌の仮比重 (g/cm ³)	bulk	1.04	土壌情報
飽和体積含水率 (cm ³ /cm ³)	SatWC	0.62	土壌情報
農薬散布量 (g/m ²)	AppR	0.04	実験情報
攪拌速度定数 (1/day)	alp	1	—
水溶解度 (mg/L)	CSLB	74	水溶解度
土水平衡分配係数 (L/kg)	Kd	30.56	実験情報、 Freundlichパラメータ
見かけ吸着フラクション (—)	f	1	—
拡散速度定数 (m/day)	kdifff	0.0026	分子量、土壌情報
吸脱着速度定数 (1/day)	ksorp	0.028	土壌情報
揮発速度定数 (m/day)	kvolf	0.00019	分子量、水溶解度、蒸気圧
水中分解速度定数 (1/day)	kbulk	0.12	半減期（加水分解、水中光分解、土壌動態）
土壌中微生物分解速度定数 (1/day)	kbios	0.036	半減期（土壌動態）

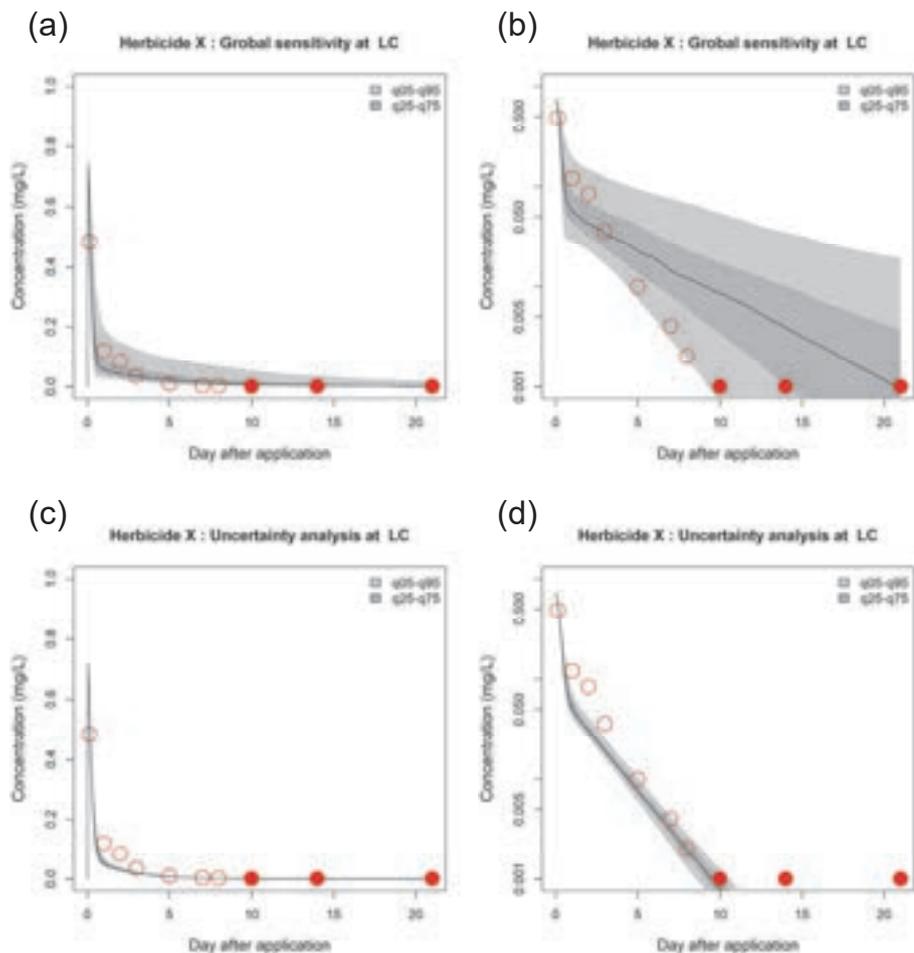


図-3 PCPF-1R モデルによる除草剤 X 解析結果の線形および対数スケールプロット ((a) および (b) グローバル解析結果, (c) および (d) パラメータ不確実性解析の結果; q05-q95 は 5-95 パーセンタイル, q25-q75 は 25-75 パーセンタイル, 実線は 50 パーセンタイル, 赤丸は実測値であり, 塗りつぶしは定量限界未満であることを表す)

ランダムサンプリングして繰り返し計算を行うモンテカルロ法により探索し, 目的関数に対するモデルパラメータの影響度合いを定量化する。ここではモデルパラメータの内, 変動が予想される分解, 吸脱着, 拡散に関わる速度定数や土壌吸着係数等, 計 8 パラメータを選択し, $1/X \times M \sim X \times M$ (M はコールドランで使用したパラメータ値, X は任意の倍数) の範囲でラテンハイパーキューブ法により 250 組のパラメータセットを生成してモンテカルロシミュレーションを行う。この結果から, R パッケージ "sensitivity" (Iooss *et al.*) を用いて, 重回帰モデルを作成し, その標準化ランク偏回帰係数 (SRRC) を

算出することで目的関数に対するパラメータ感度を求める (Boulangé *et al.* 2012; Kondo *et al.* 2012)。ここでは SRRC の絶対値が 0.01 以上である 6 パラメータ ("ksorp", "Kd", "f", "kvol", "kbulk", "kbios") を抽出 (後述する図-8 中のグラフも参照), 再度モンテカルロ法を行い, 実測データがモデルパラメータの事前不確実性に起因するモデルの挙動範囲に含まれていることを確認する (図-3 (a) および (b) のグレーバンド)。視覚的評価では, 一般的に農業が指数関数的な減衰挙動をとるという観点から, 図-3 に示すように, 線形および対数スケールの両面で確認することが望ましい。

グローバル感度解析で選定したパラ

メータについて, ローカル感度解析を行う。ローカル感度解析ではパラメータを微小変化させ, その鋭敏比を算出し, その情報からパラメータの同定性 (collinearity) を確認することができる。"FME" のパッケージでは, キャリブレーションするパラメータの組み合わせでの collinearity が 20 未満であれば安定して同定可能であるとされており, これにより本解析では最終的にキャリブレーションするパラメータを 3 つ ("ksorp", "Kd", "kbulk") に絞り込んだ。これで全ての条件設定が完了となり, モデルフィッティングを行うことで, 3 パラメータの最適化を行う。"FME" では勾配ベースの様々なアルゴリズムが利用可能であるが, ここでは Price (1977) が開発した非勾配型で初期値に依存しないランダムベースの方法 ("pseudo") により実行した。

モデルフィッティングによって得られた結果をもとにバリデーションを行うことでもよいが, 得られたパラメータが局所解に最適化されていないかまたキャリブレーションによりパラメータ不確実性がどの程度削減されたかについては確認することができない。そこでマルコフ連鎖モンテカルロ (MCMC) 法によるパラメータ不確実性解析により上述の問題点を克服する。"FME" では標準的な方法である Metropolis-Hastings 法に加え, パラメータ生成のための共分散行列を更新する Adaptive Metropolis (AM) 法, パラメータ棄却率を調整する Delay-

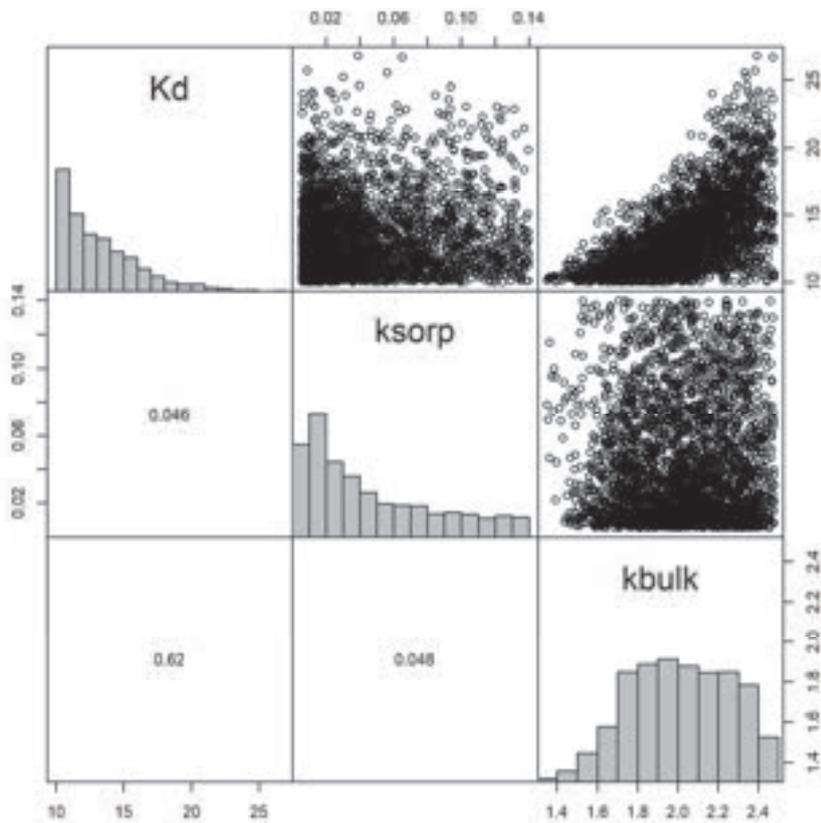


図-4 マルコフ連鎖モンテカルロ (MCMC) 法によるパラメーターの事後分析。(右上の散布図はパラメータ間の相関図、左上から右下のヒストグラムが事後分布として採択されたパラメータの度数、左下の数値がパラメータ間の相関係数をそれぞれ示す)

rejection (DR) 法およびそれらを組み合わせた DRAM 法 (Haario *et al.*, 2006) が利用できる。これらを駆使してパラメータの採択率をうまく調整

することで、キャリブレーションパラメータを事後分布として得ることができる。本解析では総試行回数を 6000 回、0 ~ 1000 回目までの試行

を burn-in 期間として削除するシングルチェーンの DRAM 法として実行した。得られた事後分布を図-4 に示す。これらの事後分布から 100 回サンプリングして得られたパラメータセットを用い、実測データに対するパラメータの事後不確実性を確認する (図-3 (c) および (d) のグレーバンド)。その結果、図-3(a) および (b) の結果と比較してパラメータ不確実性が大幅に削減されていることが確認できる。

MCMC 法によるキャリブレーション結果から得られたシミュレーション結果を用いてバリデーションを実施する。バリデーションの考え方およびその実施方法は利用するモデリング手法によって様々あるが、本解析では、モデルがキャリブレーションに使用した実測データを、キャリブレーション

表-2 R パッケージ "hydroGOF" による各種統計指標の算出結果

統計指標	Rでの名前	コールドラン	パラメータ不確実性解析	目標値
ナッシュ-サトクリフ指標	NSE	0.74	0.91	1
相対ナッシュ-サトクリフ指標	rNSE	-360.85	0.96	1
重み付きR ²	bR2	0.71	0.83	1
パーセントバイアス	PBIAS %	54.9	0.8	0
実測値標準偏差に対するRMSE比	RSR	0.47	0.28	0

表-3 PCPF-BR モデルのパラメータとモンテカルロ法実行時の変動幅

パラメータ	Rでの名前	標準シナリオ	変動幅
水田割合 (%)	pfr	5	1 - 20
農薬普及率 (%)	usage	10	5 - 30
河川流量 (m ³ /s)	hflow	3	1 - 10
農薬散布日の標準偏差	AppStdev	1	1 - 5
止水期間 (day)	WHP	3	0 - 7
日畦畔浸透量 (cm/day)	dseep	0.1	0.05 - 1
日水田排水量 (cm/day)	ddrain	0.3	0.1 - 1
日降下浸透量 (cm/day)	dperc	0.5	0.1 - 1
田面水深 (cm)	Hmax	5	1 - 10

表-4 PCPF-1R モデルのパラメータ算出に必要な農薬の主な物理的・化学的性状および EPI SUITE と VEGA による予測結果

パラメータ	Rでの名前	実験値	データソース	主なメタデータ	予測値	
					EPISUITE	VEGA (適用範囲 ^{a)})
水溶解度 (mg/L)	CSLB	74	OECD 105	実験温度, pH	12.59	12.59 (○)
蒸気圧 (Pa)	VP	0.00065	OECD 104	実験温度	0.00053	NA
有機炭素補正土壌吸着係数 ^{b)}	KOC	1346	OECD 107	土壌情報	1890	463 (△)
加水分解半減期 (day)	DT50_HYD	200	OECD 111	実験温度, pH	NA	20.93 (×)
水中光分解半減期 (day)	DT50_PHT	32.4	OECD 316	光照射条件, 実験温度, pH, 媒体情報	NA	NA
水中微生物分解半減期 (day)	DT50_BIOW	7	OECD 307	実験温度, 土壌情報, 実験系情報 (乾土重, 土壌水相の厚さ, 実験容器形状), 微生物活性	NA	26 (△)
土壌中微生物分解半減期 (day)	DT50_BIOS	19	OECD 307		NA	70 (△)

NA: 該当モデルなし

^{a)} ○: モデルの適用範囲内である, △: モデルの適用範囲内か疑わしい, ×: モデルの適用範囲外である

^{b)} 実際のモデル解析では Freundlich 土壌吸着係数および Freundlich 次数を使用。ここでは比較のため 4 土壌の中央値を記載。

の結果どの程度の精度で再現できているかを確認する内部バリデーション (ベリフィケーション) により行う。実測データに対するモデルの出力を図示し、視覚的に得られた結果を評価したところ、パラメータキャリブレーションにより、モデルが実測データの消失過程を正確に再現できていることが判る (図-3 (c) および (d) の実線)。また R のパッケージである "hydroGOF" (Zambrano-Bigiarini 2017) を用いて多種多様な統計指標を算出し、統計的な評価を実施する。この内、本解析では表-2 に示す 5 種の指標を参考とし、コールドランと比較して、各指標が大幅に改善されていることを確認できる。以上から視覚的・統計的に問題ないと解析者が判断すればキャリブレーションモデルを得ることができる。

(3) 予測

前項で得られたキャリブレーションモデルを用いたケーススタディとして、標準流域における河川水中濃度を予測し、その影響要因を調査した例を示す。河川水中濃度を予測するため、PCPF-1R モデルをベースに Phong *et al.* (2011) が開発した PCPF-B モデルに拡張して使用する。実際の解析では、R フォルダから "PCPF-BR.R" お

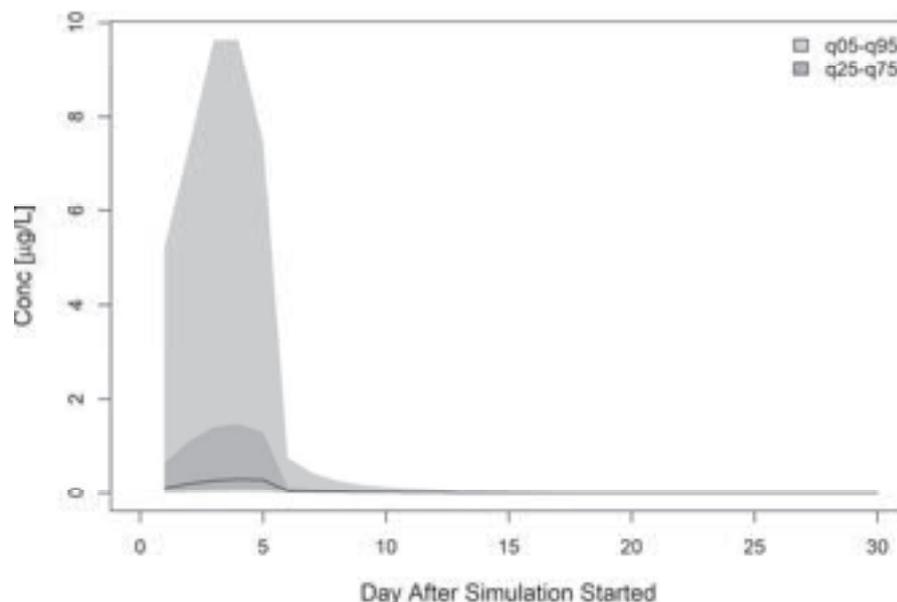


図-5 PCPF-BR モデルによる乳剤 A 中有効成分除草剤 X の河川水中予測濃度 (q05-q95 5-95 パーセンタイル, q25-q75 は 25-75 パーセンタイルおよび実線は 50 パーセンタイルを表す)

よび "WBcalc.R" を読み込み、表-3 に示す水田内での水管理、農薬使用および流域特性に関わるパラメータを "data" フォルダから読み込み実行することで簡易的に河川水中濃度が計算できる。ここで、問題設定した流域の規模やその標準パラメータは、環境中予測濃度 (PEC) 算出のためのモデル流域で採用されているものを一部流用している。

表-3 の標準シナリオ下におけるパラメータとともに示した変動幅に基づき、ラテンハイパーキューブ法で 500 のパラメータセットを作成した。

このパラメータセットと前項で得られた事後分布からサンプリングした 500 のキャリブレーションパラメータを結合し、モニタリング期間を 30 日間として河川水中濃度を 500 回繰り返し計算して求めた。この計算結果から予測された河川水中濃度を図-5 に示す。今、対象の除草剤 X の河川水中最高濃度を、任意のエンドポイント (3 µg/L) と比較することとする。まず河川水中最高濃度に対するパラメータセット感度解析を行う。すると図-6 に示す通り、水田内での田面水深 ("Hmax"), 流域内での水田

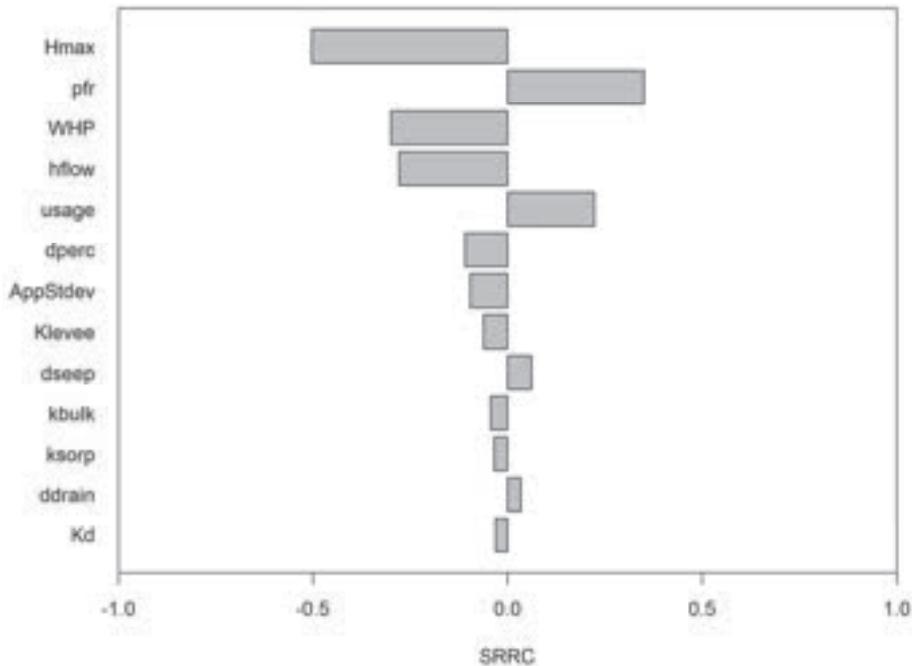


図-6 PCPF-BR モデルによるパラメータ感度解析結果 (各パラメータ記号の対応は表-1 および表-3 を参照)

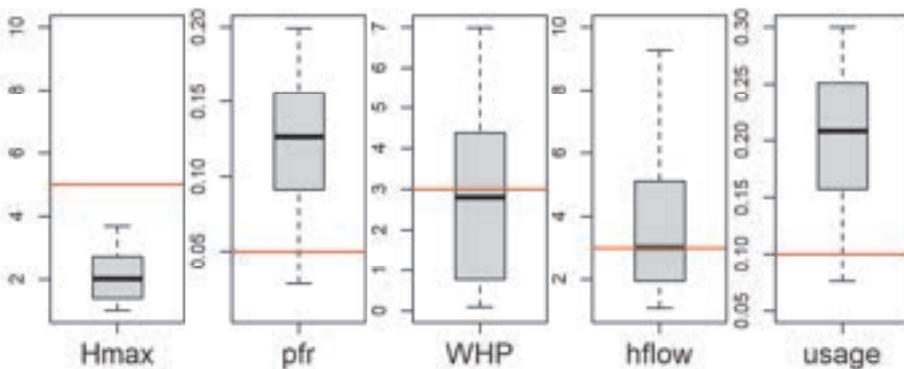


図-7 除草剤 X のエンドポイント (3 µg/L) を超過した計算 (n=79) における感度解析上位 5 パラメータの変動 (各パラメータ記号の対応は表-3 を参照, また赤線は同表中の標準シナリオにおける値を示す。注: “pfr” と “usage” は小数表記)

割合 (“pfr”), 河川流量 (“hflow”), 止水期間 (“WHP”) および普及率 (“usage”) の 5 パラメータが大きく影響していることが分かる。この結果をもとに、予測される河川水中最高濃度がエンドポイントを超えた試行のみを抽出し、全 500 試行中 79 試行における 5 パラメータの傾向を図示すると、図-7 の様になる。この結果から、水田割合が 10% 以上の流域で、8% 乳剤の普及率が 20% を超える場合、田面水深が 3 cm 以下の浅水管理や散布後の止水期間が 3 日程度となる水田が多いとエンドポイントを超

する傾向が確認できる。

上述の通り、水質汚濁性試験のような水中残留データがあれば、本解析によって事前に河川水中濃度を把握すること、またエンドポイントとの比較により特定の条件に絞り込むことが可能になる。これらの情報は、新規にモニタリング試験を行う際の採水地点や採水頻度の設定等、実験計画の立案に有益な情報となる。さらに PCPF-BR によるモデル解析では、モニタリングで取得した河川水中濃度の分析結果、河川流量、気象データ等を入力することで、採水地点における対象農薬の濃

推移を再現可能であるため、実験の事後評価も可能となる。このように、実験と数理モデル解析を組み合わせることにより、実験コストの最適化をより効率的に行うことができる (Holvoet *et al.*, 2007)。

3. より再現性の高い数理モデル解析に向けての諸課題

(1) ユーザー主観

ユーザー主観 (user subjectivity) によるモデル操作は、モデルや扱う問題に対するユーザー自身の理解度に依存しているため、数理モデル解析における再現性に大きく影響することが知られている (Beulke *et al.* 2006; Boesten 2000)。そのため、開発者はユーザー主観が発生する操作を予め特定し、文書化しておくなどして、この影響を可能な限り排除することが望ましい。PCPF-IR モデルの様な農業の環境中動態を予測する数理モデルでは、入力パラメータセット構築あるいはそのための生データ収集、とりわけ物理的・化学的性状の選択においてユーザー主観が影響する恐れがある。これはユーザーがどのようなデータソースにアクセスして生データを取得するかという要因と、データソースの中から適切な生データを取得できているかという要因に分解される。前者は第 2 項の (2) で示したように、取得するデータソースを予め限定しておくことで概ね解決可能である。一方後者では、対

象データを説明するデータ（メタデータ）を正しく読み解けるかが重要である。例えば、実験温度が25°Cと50°Cの蒸気圧データがある場合、より解析したいデータを取得した実験温度に近い25°Cのものを選択することが適当である。このようにメタデータが少ない場合はよいが、好氣的湛水土壤動態試験（OECD307）のように、メタデータが膨大にあり、かつ、記載内容が一樣でない資料を読み込まなくては取得しづらいデータもある。そのため、農薬抄録や農薬の審査報告書等で情報公開が進んでいる農薬については、可能な限り関連するデータを予め抽出しておき、物理的・化学的性状のプリセットデータライブラリを構築しておくことが解決策となるだろう。特に水質汚濁性試験のような水中残留試験データをPCPF-1Rモデルで解析する場合、農薬の土壤中濃度は実測データには含まれないため、パラメータ化の段階で信頼性の高い分解性指標を取得しておくことが、より質の高いデータ解析結果につながると期待される。Fenner *et al.* (2016) は、残留性（persistence）の評価のため、OECD308の水-底質中での移行性試験およびOECD309の表層水中での生分解性試験の信頼性評価を行い、最終的に13種の医薬品と14種の農薬について、解析データとそのメタデータを抽出し、残留性指標の抽出を実施した。筆者もこのような先行事例を参考に、現在、農薬抄録および農薬の審査報告書からOECD307に基づく土壤中動態試験成績の解

析を行っており、PCPF-1Rモデルと構造互換性のある数理モデル（Kondo *et al.* 2020）を用いた土壤の分解情報抽出も含めデータ整備を進めている。

(2) 機械学習モデル利用の可能性

対象農薬の物理的・化学的性状に関わる生データが入手できない、またはデータの品質が著しく低い場合には、定量的構造活性相関（Quantitative Structure-Activity Relationship: QSAR）のような機械学習モデルによる予測値によって代替する手法がある。現在、比較的利用しやすいフリーソフトウェアとして、US EPAのEPI SUITE（US EPA 2012）や欧州のプロジェクトで開発されたVEGA（Benfenati *et al.* 2013）がある。いずれのモデルも対象農薬のSMILES（Simplified Molecular Input Line Entry System）を入力することで目的のデータを得ることができる。表-4にはPCPF-1Rモデルで必要となる物理的・化学的性状データについて、EPI SUITE および VEGA の予測値を取りまとめた。QSARでは予測値の精度も重要であるが、入力した農薬の情報が、予測モデルの適用範囲内（applicability domain: AD）であるか否かも同じように重要である。VEGAでは複数の規定に基づく総合指標としてAD内か否かを判定してくれるが、EPI SUITEではユーザー自身が判断する必要がある。さらに、QSARがどのようなデータで訓練されたかについても確認が必要である。

少なくとも土壤中での分解モデルでは、土壤が湛水状態で得られたデータではないため、VEGAによる予測値を代用したとしても解析結果の信頼性は乏しい。こうした観点からも、前項のデータライブラリを活用した予測モデルの構築についても今後並行して進めていく必要がある。

(3) 文芸的プログラミングの活用

近年、査読前原稿を保存・公開可能なarXivの出現や、一定のアクセス不可期間（エンバゴ）を経た査読済み最終稿を各種リポジトリにセルフ・アーカイブするグリーンOA化等、最新の学術情報の共有がより身近になっている。こうした動きはオープンネスや透明性の観点からオープンサイエンスの促進において大変重要である。しかし、数理モデルをはじめ、多くのデータ解析分野において、論文中に掲載されている方法を再現しようとする際に、どのようにしてコード化するかという問題にしばしば直面する。こうした問題は再現可能性に大きく影響する。この対応として、近年では、第2項(1)で示したGitHubのようなりポジトリを原稿中にリンクすることでプログラムのサンプルコードが入手可能となるよう推奨するジャーナルも少なくない（Bernard 2017）。より応用的な対応として、文芸的プログラミング（literate programming）による解析レポートや電子書籍の作成が挙げられる。文芸的プログラムは、図-8に示すように、コードチャンク／セグ

Rマークダウンによる文芸的プログラムの例

近藤 圭

2022-10-06

テキストチャンクの見出し

この部分がテキストチャンクである。以下のコードチャンクは、例としてグローバル尺度解析で得られたSRRCを再出力する。knitして出力すると、裏地した操作、出力結果および図が表示される。

```
# この部分がコードチャンクである。
```

```
X <- CRL1[,1:8]  
y <- as.vector(CRL1[,9])  
SRRC <- src(X, y, rank = TRUE)  
print(SRRC)
```

```
##  
## Call:  
## src(X = X, y = y, rank = TRUE)  
##  
## Standardized Rank Regression Coefficients (SRRC):  
##      original  
## alp  -0.006893145  
## Kd   0.206075587  
## ksorp 0.006407545  
## f    0.117025877  
## kvol  -0.024194051  
## kdiff -0.007151567  
## kbulk -0.898434244  
## kbios -0.121900301
```

```
plot(SRRC)  
abline(h=0, col="red")
```

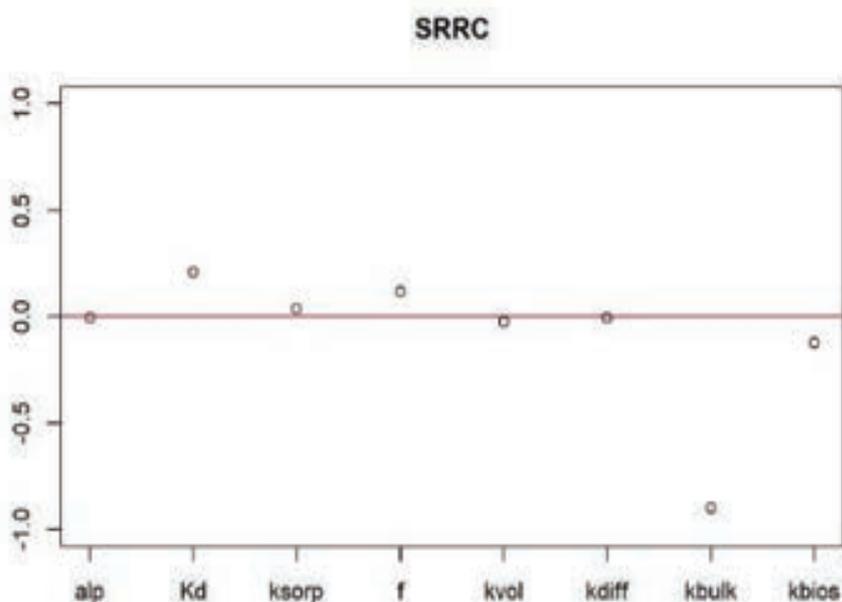


図-8 Rマークダウンを用いた文芸的プログラムの例

メントとテキストチャンク／セグメントが混在し、コンピュータではなく人間が読めるように書かれ、フォーマットされ、構成されている文書である (Zheng 2021)。これにより読者は、文章や数式による説明、それらを表現したコード、そしてコードから生成された図表が一体となった形式で解析をトレースすることができる。第1項でも紹介したが、R および RStudio を用いた解析では、“rmarkdown” および “knitr” パッケージによって制御される R マークダウンという機能を利用することにより、文芸的プログラムを作成することができる。作成した R マークダウンファイル (*.Rmd) は、“pandoc” と呼ばれるドキュメント・コンバーターにより HTML, PDF, Word 等、出力形式を選択することが可能である。R マークダウンの応用として、“rticles” パッケージを使用して R マークダウンファイルを学術雑誌用フォーマットに合わせ、論文原稿を文芸的プログラムで作成することもできる (Holmes *et al.* 2021)。また “bookdown” パッケージ (Xie 2016) を利用すればオープンフォーマットの電子書籍ファイルフォーマット規格である ePub 形式で書籍を作成することができ、モデルのユーザーマニュアル作成に有用である。このように、文芸的プログラムは、作成者の側から見ても、データ解析からレポートの作成までの一連の作業を統一した環境下で実行できるため、解析データの散逸やファイルの互換性を気にする必

要もなくなり、結果として再現性を高めることに大きく寄与することが期待される。

おわりに

本稿では、数理モデル PCPF-1R および PCPF-BR による水田用除草剤の水中残留データの解析および流域中での河川水中濃度予測への応用の模擬実演を通じ、オープンソフトウェア R およびその IDE である RStudio を用いた再現性の高い解析方法についての解説を行った。さらに、より再現性を高めるための諸課題と、それらに対する取り組みについても述べた。R はスクリプトベースでの解析になるため、これまで MS Excel[®] のようなスプレッドシートソフトウェアでの解析を行ってきたユーザーにとって、(筆者がそうであったように) その操作を苦痛に感じる部分もあるかもしれない。しかしこの欠点を補って余りあるほどの利便性が享受できることは既に述べた通りである。さらに、R はオンライン上の集合知が充実していることも大きな利点の一つであり、高額な書籍やセミナーがなくとも一通りの知識や技術を習得することができる。こうした環境が充実している理由は、R が多くの R ユーザーにとって商用ではなく、オープンサイエンスのためのツールとして位置づけられ、利用されてきたからに他ならない。本稿を通じ、読者の方々が少しでも R に興味を持ち、使用するきっかけとなれば幸いである。

また筆者が公開したコードがユーザーの研究や新たなイノベーションの支援となれば望外の喜びである。

謝辞

本研究は一般財団法人残留農薬研究所・公益目的支出計画 (企業コード: A012055) の一環として実施しました。関係者の皆様に御礼申し上げます。

参考文献

- Alarid-Escudero, F. *et al.*, 2019. A Need for Change! A Coding Framework for Improving Transparency in Decision Modeling. *Pharmacoeconomics*. 37(11), 1329-1339.
- 青木学聡 2021. オープンサイエンスと研究データ管理の動向. *情報処理* 62(5).
- Baio, G. and A. Heath 2017. When Simple Becomes Complicated: Why Excel Should Lose its Place at the Top Table. *Global & Regional Health Technology Assessment* 4(1), grhta.5000247.
- Benfenati, E. *et al.* 2013. VEGA-QSAR: AI Inside a Platform for Predictive Toxicology, *Proceedings of the Workshop Popularize Artificial Intelligence co-located with the 13th Conference of the Italian Association for Artificial Intelligence (AIXIA 2013)*, Turin, Italy.
- Bernard, C. 2017. Editorial: Code Case - Investigating Transparency and Reproducibility. *eneuro*, 4(4): ENEURO.0233-17.2017.
- BES, Cooper, N., 2017. *A Guide to Reproducible Code in Ecology and Evolution*. British Ecological Society.
- Beulke, S. *et al.* 2006. User subjectivity in Monte Carlo modeling of pesticide exposure. *Environ. Toxicol. Chem.* 25(8), 2227-2236.

- Boesten, J.J.T.I. 2000. Modeller subjectivity in estimating pesticide parameters for leaching models using the same laboratory data set. *Agric. Water Manag.* 44(1), 389-409.
- Boulangé, J. *et al.* 2012. Analysis of parameter uncertainty and sensitivity in PCPF-1 modeling for predicting concentrations of rice herbicides. *J. Pestic. Sci.* 37(4), 323-332.
- Choi, Y.-D. *et al.* 2021. Toward open and reproducible environmental modeling by integrating online data repositories, computational environments, and model Application Programming Interfaces. *Environ. Modell Softw* 135, 104888.
- Eddy, D.M. *et al.* 2012. Model Transparency and Validation: A Report of the ISPOR-SMDM Modeling Good Research Practices Task Force-7. *Med. Decis. Making* 32(5), 733-743.
- Fenner, K. *et al.* 2016. Suitability of laboratory simulation tests for the identification of persistence in surface waters (Tech. Rep. FKZ 3715 65 415 3), Dessau, Germany. German Environment Agency (Umweltbundesamt).
- FOCUS 2006. Guidance Document on Estimating Persistence and Degradation Kinetics from Environmental Fate Studies on Pesticides in EU Registration. Report of the FOCUS Work Group on Degradation Kinetics, EC Document Reference Sanco/10058/2005 version 2.0.
- Haario, H. *et al.* 2006. DRAM: Efficient adaptive MCMC. *Stat. Comput.* 16(4), 339-354.
- Holmes, D.T. *et al.*, 2021. Reproducible manuscript preparation with RMarkdown application to JMSACL and other Elsevier Journals. *Journal of Mass Spectrometry and Advances in the Clinical Lab.* 22, 8-16.
- Holvoet, K.M.A. *et al.* 2007. Monitoring and modeling pesticide fate in surface waters at the catchment scale. *Ecol. Modell.* 209(1), 53-64.
- Inao, K. and Y. Kitamura 1999. Pesticide paddy field model (PADDY) for predicting pesticide concentrations in water and soil in paddy fields. *Pestic. Sci.* 55(1), 38-46.
- Iooss, B. *et al.* sensitivity: Global Sensitivity Analysis of Model Outputs, R package version 1.15.2 <https://CRAN.R-project.org/package=sensitivity> [accessed 24 October 2018].
- Ippolito, A. and G. Fait 2019. Pesticides in surface waters: from edge-of-field to global modelling. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 36, 78-84.
- Kondo, K. *et al.* 2012. Probabilistic assessment of herbicide runoff from Japanese rice paddies: The effects of local meteorological conditions and site-specific water management. *J. Pestic. Sci.* 37(4), 312-322.
- Kondo, K. *et al.* 2019. Inverse analysis to estimate site-specific parameters of a mathematical model for simulating pesticide dissipations in paddy test systems. *Pest. Manag. Sci.* 75(6), 1594-1605.
- Kondo, K. *et al.* 2020. Inverse modeling of laboratory experiment to assess parameter transferability of pesticide environmental fate into outdoor experiments under paddy test systems. *Pest Manag Sci.* 76(8), 2768-2780.
- Kondo, K. 2022. Use of mathematical modeling and its inverse analysis for precise assessment of pesticide dissipation in a paddy environment. *J. Pestic. Sci.* 47 (3), 146-153.
- 高橋康介 2018. 再現可能性のすゝめ: RStudio によるデータ解析とレポート作成. *Wonderful R / 市川太祐 [ほか] 編*, 3. 共立出版, 164 pp.
- National Academies of Sciences, Engineering, Medicine 2019. *Reproducibility and Replicability in Science*. The National Academies Press, Washington, DC. 256 pp.
- Phong, T.K. *et al.* 2011. Exposure risk assessment and evaluation of the best management practice for controlling pesticide runoff from paddy fields. Part 2: Model simulation for the herbicide pretilachlor. *Pest. Manag. Sci.* 67(1), 70-76.
- Price, W.L. 1977. A controlled random search procedure for global optimisation. *Comput J.* 20(4), 367-370.
- Soetaert, K. and P.M.J. Herman 2009. *A Practical Guide to Ecological Modelling: Using R as a Simulation Platform*. Springer Netherlands, Dordrecht.
- Soetaert, K. and T. Petzoldt 2010. Inverse Modelling, Sensitivity and Monte Carlo Analysis in R Using Package FME. *J. Stat. Softw.* 33(3), 1-28.
- US EPA, 2012. Estimation Programs Interface Suite™ for Microsoft® Windows, v 4.11 or insert version used, United States Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA.
- Watanabe, H. *et al.* 2006. Simulation of mefenacet concentrations in paddy fields by an improved PCPF-1 model. *Pest. Manag. Sci.* 62(1), 20-29.
- Wilkinson, M.D. *et al.* 2016. The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. *Scientific Data* 3(1), 160018.
- Xie, Y. 2016. Bookdown: Authoring books and technical documents with R markdown. Online version.
- Zambrano-Bigiarini, M. 2017. hydroGOF: Goodness-of-fit functions for comparison of simulated and observed hydrological time series, R package version 0.3-10 <https://CRAN.R-project.org/package=hydroGOF> [accessed 24 October 2018].
- Zheng, Z. 2021. Reasons, challenges, and some tools for doing reproducible transportation research. *Communications in Transportation Research* 1, 100004.

水稻に安全性の高いフェンキノトリオンの選択性機構と利用場面

クミアイ化学工業株式会社
生物科学研究所

大野 修二・山本 峻資

はじめに

フェンキノトリオン (ブランドネーム: エフィーダ[®], 図-1) は, クミアイ化学工業株式会社が創製・開発した新規水稻用除草剤である。作用性は 4-hydroxyphenyl pyruvate deoxygenase (4-HPPD) 阻害で, ノビエ, クログワイを除く広範な水田雑草に対して殺草スペクトラムを有するとともに, 水稻に対して高い安全性を示すことが報告されている (玉井ら 2014; 小林ら 2014)。これらの特長のうち, 本稿では水稻安全性に焦点を当て, フェンキノトリオンのイネに対する選択性の機構を解説するとともに, その安全性を活かした直播水稻場面での適用性について紹介する。

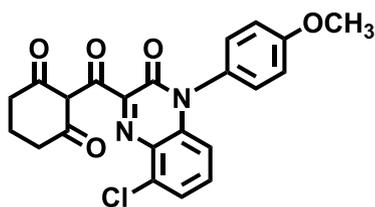


図-1 フェンキノトリオンの化学構造式

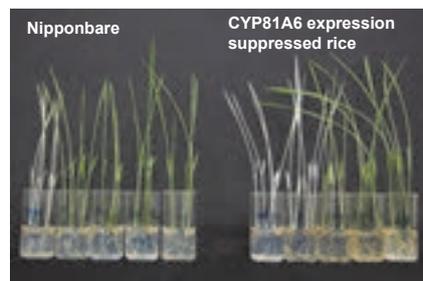
1. フェンキノトリオンのイネ体内での代謝機構

フェンキノトリオンの水稻安全性要因について, まず草種間の標的酵素への親和性の違いを検証するため, イネとシロイヌナズナ由来のリコンビナント HPPD 酵素に対するフェンキノト

リオンの酵素阻害活性を評価した。その結果, どちらの HPPD 酵素に対しても高い阻害活性を示したことに加え, 単子葉類・双子葉類の HPPD 酵素のアミノ酸配列はイネとシロイヌナズナの配列と 70% 以上の高い相同性を示し, フェンキノトリオンと結合するアミノ酸残基もすべて保存されていた (Yamamoto *et al.* 2021)。一方, 本剤を処理したイネ幼苗を分析すると, 同じ 1, 3-ジケトン骨格を有する既存 HPPD 阻害剤に見られないフェンキノトリオンに特異的な代謝物としてフェンキノトリオンの脱メチル体とそのグルコース抱合体が検出された。この脱メチル化のような酸化反応を触媒する酵素は一般的に Cytochrome P450 (以下, P450) が知られている。ジャポニカ種において除草剤の代謝に関与する P450 は CYP81A6 のみが知られているため, 本酵素がフェンキノトリオンを代謝するかについて検証した。

まず, CYP81A6 遺伝子の発現が

(A)



(B)

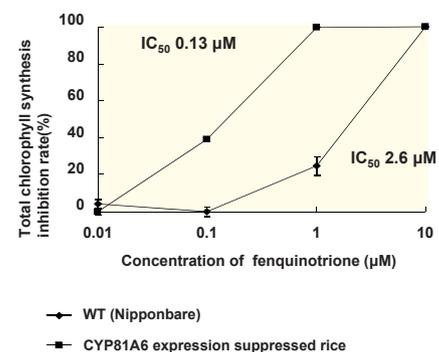


図-2 CYP81A6 発現抑制イネにおけるフェンキノトリオン感受性の評価 (A) 播種 7 日後のイネを示す。フェンキノトリオン濃度は左から順に 10, 1, 0.1, 0.01 μM, 無処理区とし, 無処理区には 0.1% DMSO を添加した。(B) 日本晴および CYP81A6 発現抑制イネにおけるフェンキノトリオン処理時の総クロロフィル合成阻害率を示した。

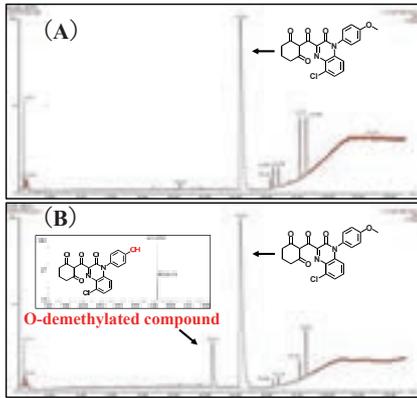


図-3 フェンキノトリオン代謝反応液の LC/MS 分析

(A) 空ベクター導入株由来粗酵素反応液の HPLC クロマトグラム。(B) CYP81A6 と OsCPR 粗酵素反応液の HPLC クロマトグラム。枠内は RT=12.5 のマススペクトルを示す。

しかしながら、脱メチル体のイネに対する活性はフェンキノトリオンに比べて大きく低下していたことから、この脱メチル体はイネ体内にて速やかにグルコース抱合を受けることで無害化されると推察された。

以上のことから、フェンキノトリオンの水稻安全性要因は CYP81A6 による脱メチル化反応と、それに続くグルコース抱合による無害化であることが明らかとなった。

2. トリケトン系 4-HPPD 阻害剤感受性品種における安全性

近年、主食用米の需要の減少、食糧安全保障を背景とした国産飼料への需要の高まり、助成金を中心とした政策面での推進などの要因から、飼料用イネの栽培が増加傾向にある。飼料用米等（米粉用米、WCS用稲、新市場開拓用米などを含む）の作付面積は、2009年にはわずか0.4万haであったが、2021年には11.6万haまで増加している（農林水産省農産局穀物課 2022a）。飼料用米の栽培には食用品種が流用される他、各地域での栽培に適した多収品種の利用も増加しており、2021年には飼料用米栽培面積の

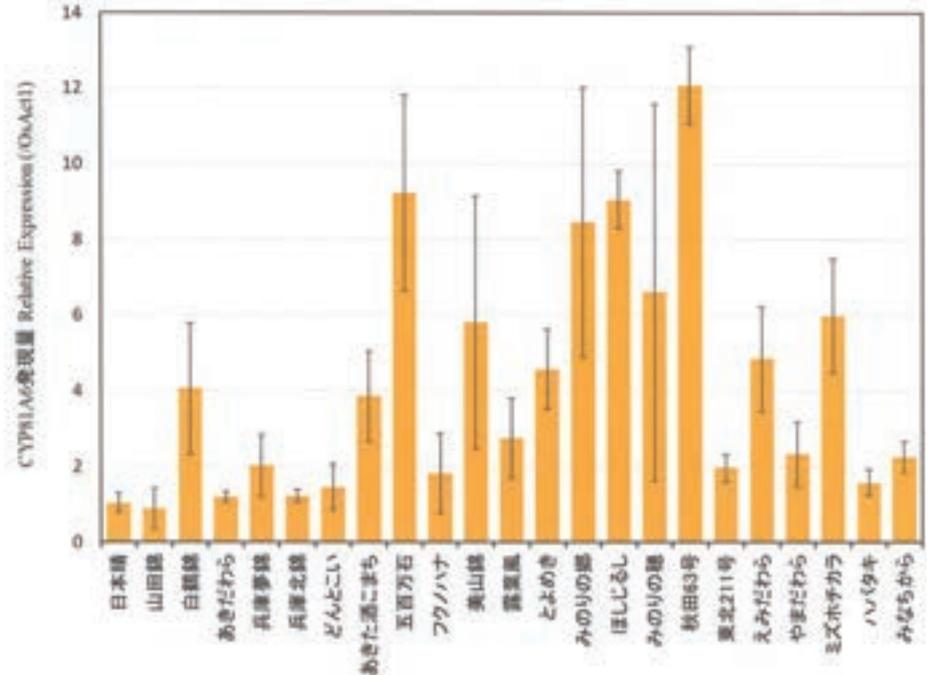


図-4 各水稻品種における CYP81A6 遺伝子発現解析（佐藤ら 2022 より改編）
Hoagland's No.2 固形培地で 1 週間栽培した各水稻品種における CYP81A6 遺伝子の発現量をリアルタイム RT-PCR により測定した。実験は 3 連で行った。

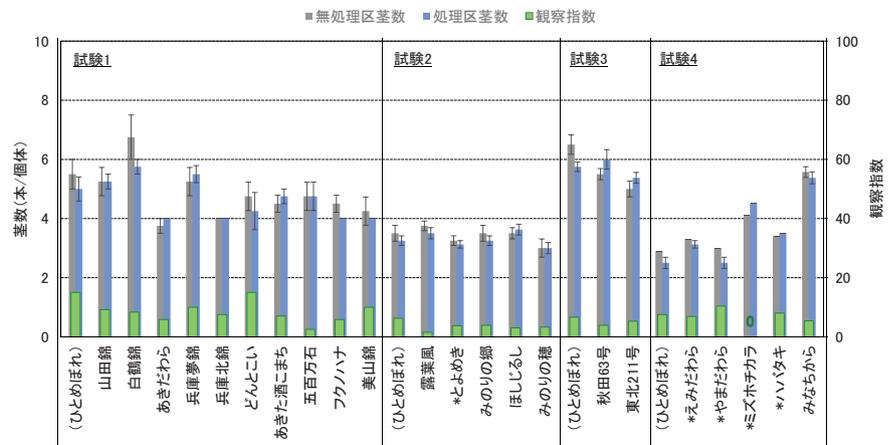


図-5 フェンキノトリオンの水稻 22 品種に対する感受性試験（佐藤ら 2022 より改編）
各品種にフェンキノトリオン 10%水和剤 30g a.i./10a を湛水処理し、0= 葉害無し～100= 完全枯死（20 以上が許容外の葉害）の基準で観察指数調査を実施。また、個体ごとの茎数を測定し無処理区と比較した。
*印はトリケトン系 HPPD 阻害剤に感受性を示すことが報告されている品種。
[試験条件] 試験 4 は砂質植壤土、2 葉期移植イネの移植当日処理、その他の試験は植壤土、表面直播イネの 1 葉期処理。観察調査は処理後 11～17 日、茎数調査は処理後 20～36 日に実施。

4 割弱を占めている。これら多収品種のいくつかはトリケトン系 4-HPPD 阻害剤に対する感受性が高く、甚大な葉害を生じる場合があることが報告されている（渡邊ら 2010）。フェンキノトリオンもトリケトン構造を有する 4-HPPD 阻害剤であるため品種間での感受性差を確認する必要があると考え、上記の多収品種を含む水稻品種

22 種の感受性について、分子生物学的手法および生物検定により確認した（佐藤ら 2022）。

前項で述べたように、フェンキノトリオンの水稻安全性要因は CYP81A6 による代謝分解に起因する。そこで、CYP81A6 遺伝子の保存性と遺伝子発現量を調べることでフェンキノトリオンのこれら品種に対する安全性を評

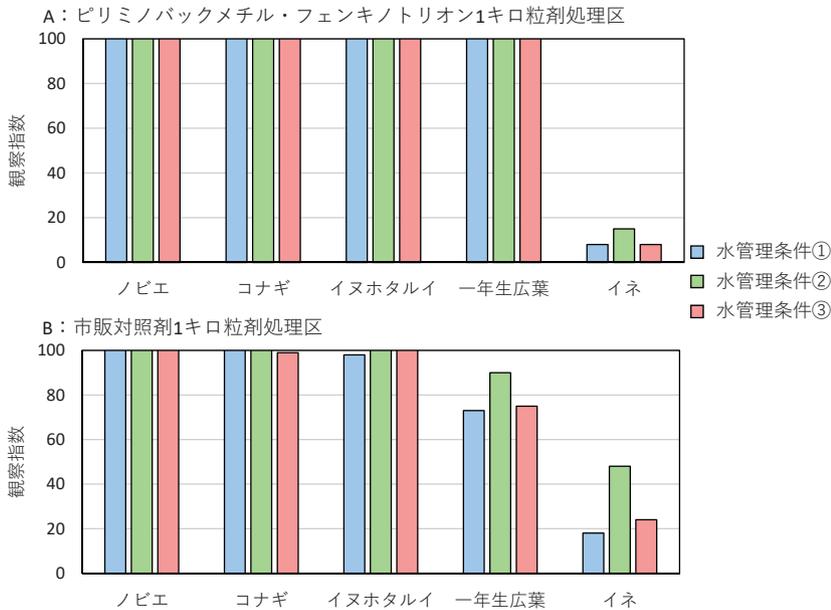


図-6 ピリミノバックメチル・フェンキノトリオン1キロ粒剤の直播水稻播種直後処理における水管理条件の違いによる生物効果（処理後30日）（永松ら2018より改編）

〔試験条件〕試験規模：0.5m×0.5m（作土層15cm）屋外ポット、反復：2、土壌：埴壤土、供試イネ：0.5倍量鉄コーティング粉（品種：あいちのかおり）、供試雑草：タイヌビエ、イヌホタルイ（植代時に土壌混和）、コナギ（土壌表層に播種）、一年生広葉雑草（自然発生）、評価方法：0＝作用なし～100＝完全枯死の基準で観察調査（除草効果は90以上が極大、葉害は20未満が許容内）
 水管理条件①：湛水深4cmで薬剤処理し、処理後7日に全落水、処理後9日に走水を行った。
 水管理条件②：湛水深0.5-1cmで薬剤処理し、落水状態で管理。処理後4、7、9日に走水を行った。
 水管理条件③：湛水深4cmで薬剤処理し、処理後10日まで入落水を行わず自然減水させた。
 いずれの条件でも処理後10日（イネ1葉期）に湛水深4cmまで入水し、以降は湛水状態を維持した。

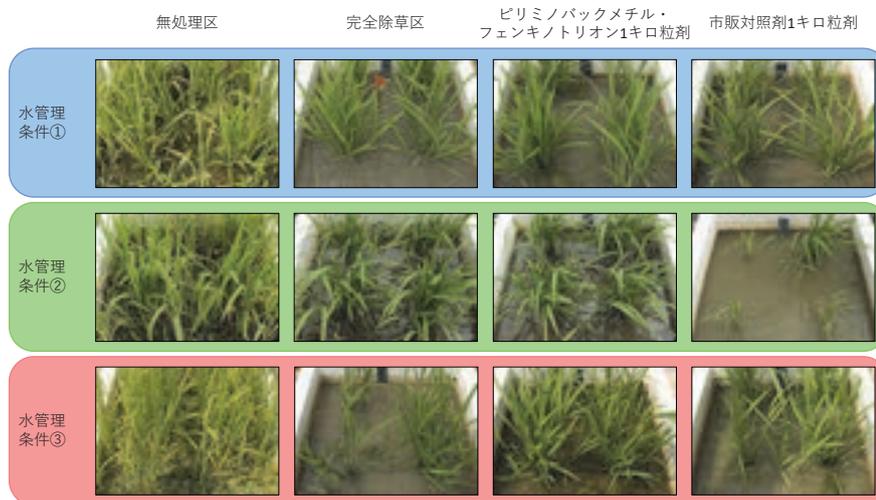


図-7 ピリミノバックメチル・フェンキノトリオン1キロ粒剤の直播水稻播種直後処理における水管理条件の違いによる生物効果（処理後30日の様子）（永松ら2018より改編）

価した。これら品種のcDNA配列のシークエンスの結果、すべての品種でデータベース記載の配列（Genbank Accession No. DM143459）と完全一致した。加えて、播種1週間後の幼苗における本遺伝子の発現量をリアルタイムRT-PCRにより定量した結果、すべての品種が日本晴と同等以上の高いレベルで発現していることが確認された（図-4）。

生物検定では、温室内ポット試験において、表面播種湛水直播のイネ1葉期処理または2葉期移植水稻の移植当日処理で、フェンキノトリオンの影響について調査した（図-5）。観察

調査の結果、供試した22品種はいずれも極軽微な生育抑制が見られたのみで、白化などの葉害症状は観察されず、茎数調査においても無処理区と同等の生育が認められた。トリケトン系4-HPPD阻害剤に対して感受性を示すことが報告されている品種に対しても、フェンキノトリオンは高い安全性を示した。これらの結果から、フェンキノトリオンは品種を問わず高い水稻安全性を有しており、飼料用多収品種栽培なども含めた幅広い場面で利用できる資材であると考えられた。

3. 水稻湛水直播栽培場面での適用性

水稻の直播栽培は、経営面積の拡大が進む状況の中で水稻栽培の省力化技術の一つとして注目されており、その面積は2020年には約3.5万haまで増加し水稻作付面積全体の約2.4%を占めている（農林水産省農産局穀物課2022b）。水稻直播栽培においては以前から雑草防除が課題に挙げられることが多いが、湛水直播栽培では播種時に除草剤を散布する技術が確立されたことで作付面積の拡大が後押しされた。高い水稻安全性を有するフェン

キノトリオンも播種時処理の適用を取得しているが、湛水直播栽培の水管理に関しては、播種後の湛水が水稻の出芽、苗立ちに影響を及ぼすこと（古畑2009）や、芽干しの有無や期間により雑草の生育量が変化し水稻との競合に影響を及ぼすこと（川口ら1998）などが報告されていることから、様々な水管理体制における効果、葉害を評価する必要があると考え、モデル試験系にて検討を行った（永松ら2018）。

試験は屋外設置のFRPポット（0.5m×0.5m）で行った。0.5倍量で鉄コーティングしたイネ籾を代掻きした土壌の表面に播種し、播種当日に薬剤処理を行った。水管理条件として、①湛水深4cmで薬剤処理、処理後7日目に全落水し再入水まで落水状態で管理（一般的な水管理）、②湛水深0.5～1cmで薬剤処理、再入水まで落水状態で管理（落水期間が長く除草剤の効果が低下しやすい条件）、③湛水深4cmで薬剤処理後、入落水を行わず湛水状態を維持（湛水期間が長く除草剤の葉害が出やすい条件）、の3条件を設定した。いずれの条件でも播種後10日（イネ1葉期）に再入水し、以降は湛水状態を維持した。試験の結果、ピリミノバックメチル・フェンキノトリオン1キロ粒剤処理区では、いずれの条件においてもノビエ、コナギ、イヌホタルイ、一年生広葉雑草に対して極大効果を示した（図-6）。完全除草区のイネの生育は、湛水状態が続いた水管理条件③において他の管理条件と比べて劣る条件となったが、ピリミ

ノバックメチル・フェンキノトリオン1キロ粒剤処理区ではいずれの条件においても良好な水稻安全性を示した（図-7）。なお本試験では、効果が低下しやすく葉害が出にくいと想定していた水管理条件②において、市販対照剤の葉害が強くなる結果となったが、この要因として落水管理期間中に土壌の過乾燥を防ぐために度々走水を行ったことで、浅い田面水中で薬剤成分が高濃度化し、イネへの影響が強くなった可能性が考えられた。

本試験より、ピリミノバックメチル・フェンキノトリオン1キロ粒剤は水管理条件に因らず安定した除草効果と水稻安全性を有すると考えられ、湛水直播栽培の様々な管理方法の中でも有効に利用できる資材であると考えられた。

おわりに

フェンキノトリオンは創製当初から水稻安全性の高さが際立っており、このことが選抜の決め手の一つとなった。この水稻安全性のメカニズムを本稿で述べたような生化学的、分子生物学的手法により解明できたことは、除草剤の選択性に関する研究において重要な知見になったと考えている。また、これらの理論に基づき、実際の利用場面を想定した実証研究を積み重ねることでフェンキノトリオンの特性をより明確にすることができ、今日の普及基盤を構築することができたと考えている。今後もフェンキノトリオンの優れた特性を現場の課題解決に活用してい

ただけるよう、鋭意研究に取り組んでいく。

参考文献

- 古畑昌巳 2009. 湛水直播水稻の出芽・苗立ち向上に向けて、日本作物学会紀事 78, 153-162
- 川口俊ら 1998. 湛水条件下における直播水稻と雑草の競合に及ぼす芽干しの影響. 雑草研究 43, 54-46
- 小林方美ら 2014. 新規除草剤フェンキノトリオンに関する研究（第2報）—水稻用除草剤としての特性— . 日本農薬学会第39回大会講演要旨集, 76
- 永松敦ら 2018. ピリミノバックメチル・フェンキノトリオン1キロ粒剤を用いた湛水直播水稻栽培における雑草防除技術に関する研究 . 日本雑草学会第57回大会講演要旨集, 99
- 農林水産省農産局穀物課 2022a, 飼料用米をめぐる情勢について, <https://www.maff.go.jp/j/seisan/kokumotu/attach/pdf/siryouqa-51.pdf> (2022年9月14日アクセス)
- 農林水産省農産局穀物課 2022b, 令和2年産水稻直播栽培の面積, <https://www.maff.go.jp/j/syouan/keikaku/soukatu/attach/pdf/chokuha-6.pdf> (2022年7月7日アクセス)
- 佐藤敦ら 2022. 水稻22品種のフェンキノトリオンに対する感受性, 日本作物学会第253回講演会要旨集, 111
- 玉井龍二ら 2014. 新規除草剤フェンキノトリオンに関する研究（第1報）—合成及び構造と活性— . 日本農薬学会第39回大会講演要旨集, 128
- 渡邊寛明ら 2010. 飼料用イネや米粉等の新規需要米向け多収水稻品種の4-HPPD阻害型水稻除草剤に対する感受性 . 第229回日本作物学会講演会講演要旨集, 32
- Yamamoto, S. *et al.* 2021. Mechanism of action and selectivity of a novel herbicide, fenquinotriolone. *J. Pestic. Sci.* 46, 249-257.

日本産ヒエ属植物の変異 (序章に代えて)

元草池試験場
清水 矩宏

はじめに

日本のヒエ属植物は、我が国の風土に適応した数少ない C₄ 型植物の一つである。ヒエ属には大きく分けて野生種と栽培種があるが、野生種は水田、畑などの強害草として、農業上駆除すべき対象とみなされ、多くの関心を集めてきた。ヒエ属にはいくつかの種・変異が含まれるが、水田をはじめとする雑草防除の現場ではこれらヒエ属植物を「ノビエ」の総称のもとに識別せずに扱われることが多かった。ヒエ属植物の分類については多くの研究があるが、1950 年以降は藪野による細胞遺伝学的アプローチによってその分類群が整理された。野生種については 4 倍体 (2n=36) のタイヌビエ [*Echinochloa oryzicola* Vasing.] と 6 倍体 (2n=54) の *E. crus-galli* に属する 1 種・2 変種、すなわちイヌビエ [*E. crus-galli* Beauv. var. *crus-galli*], ヒメタイヌビエ [*E. crus-galli* Beauv. var. *formosensis* Ohwi], ヒメイヌビエ [*E. crus-galli* Beauv. var. *praticola* Ohwi] に統一されてきてい

る (本講座では、これら分類単位を便宜的に種と表記する)。ヒエ属植物の特徴についても多くの文献的記載があり、それをまとめたのが表-1 である。同一条件でのデータではないので、種間の差異については厳密には比較できないが、量的形質については、文献記載の最大値と最小値をとった。

ヒエ属植物の野生種は、その環境適応性の豊かさから、ヒメタイヌビエを別にしていずれの種も北海道から九州まで全国的に分布していることが知られている。しかしながら、全国的に分布する植物であるにもかかわらず、その種間・種内変異や地理的変異について統一的に記載された文献は、永松 (1951) によるごく初期の調査報告以外には見当たらない。

著者は、1970 年代後半から 1980 年代にかけて暖地型草種の我が国での家畜の飼料利用について研究を進めていたが、その一環として、我が国の風土に適応した C₄ 型 (暖地型) のヒエ属植物を研究対象に加え、全国から多数の系統を収集し、形態的、生理生態的諸特性を栃木県で調査した。これらのデータは約 45 年前に調査して得られた古いものであるが、

表-1 文献記載によるヒエ属植物の特徴

形質	タイヌビエ	ヒメタイヌビエ	イヌビエ	ヒメイヌビエ	栽培ヒエ
1) 分布	全国 (北海道~沖縄)	関東以西 (四国・九州)	全国 (北海道~九州)	全国 (北海道~沖縄)	全国 (北海道~九州)
2) 生育適地	水田のみ	水田	水辺, 水湿地, 水田	乾燥地 (路地, 空き地)	畑地, 水田, 冷涼地
3) 草型	直立型	直立型	直立~匍匐型	直立~匍匐型	直立型
4) 草丈 (稈長)	40~110cm	50~110cm	80~150cm	20~80cm	109~247cm
	中	中	高	やや低	高
5) 稈径	2.9mm		3.3~4.4mm	2.5mm	17~35mm
	中	中	太い	細い	
6) 葉縁の白色肥厚	有	有	無	無	
7) 葉鞘	長鞘	長鞘	長鞘	短鞘	長鞘
8) 毛	無or有	無	無	無	
9) 葉身長	10~20cm		20~50cm		39.5~63.1 (止葉)
10) 葉身幅	5~12mm	5~15mm	10~20mm	5~10mm	18~38mm
11) 葉身性状	硬	硬	柔	柔	
12) 穂の形状	紡錘・直立	紡錘・直立	紡錘・直立	紡錘・斜上	変異大
13) 穂長	8~15cm	6~15cm	10~25cm	13cm	10.8~28.5cm
14) 小穂長	3.7~5.0mm (大)	3.0~4.0mm	3.0~4.0mm	2.5~3.0mm (小)	
15) 小穂幅	1.5~2.2mm	1.3~1.5mm	1.7~2.0mm	1.5~1.6mm	
16) 小穂厚	1.1~2.0mm	0.9~1.0mm	1.0~1.18mm	0.8mm	
17) 穎果長	2.0~2.7mm	1.7~1.8mm	1.8~2.0mm	1.4~1.8mm	2.1~2.9mm
18) 穎果幅	1.6~1.9mm	1.2~1.3mm	1.1~1.3mm	1.0~1.3mm	1.7~2.2mm
19) 穎果厚	0.7~1.0mm	0.5~0.6mm	0.6~0.7mm	0.5~0.7mm	1.4~1.7mm
20) 第 1 苞穎長/小穂長比	1/2	2/5	1/3	1/3	
21) 第 3 穎の光沢	有	有	無	無	有
22) 芒の有無	無or短	無	変異大	無or短	変異大
同長さ	0.8~5.0mm		0~50mm		0~34.5mm
23) 花青素 (葉鞘・芒・稈基部)	-~+	-~+	+++	++~++++	-~++++
24) その他	C型~F型がある	晩生		極早生	



図-1 本講座で解説する4種のヒエ属野生種の出穂の様様

表-2 同定基準

形態		第1苞穎長/小穂長	
		1/2以下	1/2以上
第1小花 外穎	光沢有	ヒメタイヌビエ	タイヌビエC型
	光沢無	イヌビエ	タイヌビエF型

表-3 調査地(栃木)における年次ごとの平均気温(°C)

	1978	1979	1980	1981
年平均	12.3	13.3	11.5	11.3
4-9月	19.3	18.9	17.9	17.9
7-8月	25.3	23.3	21.4	23.5

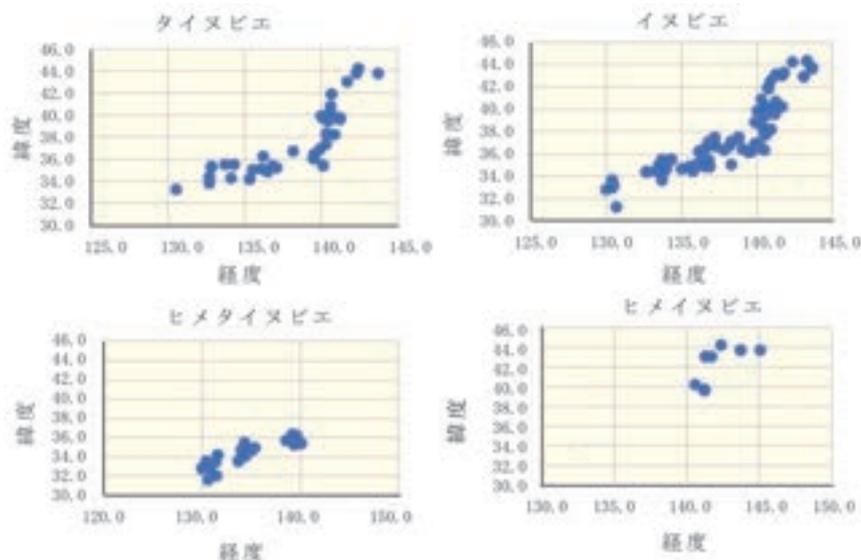


図-2 種ごとの採取地点の緯度および経度

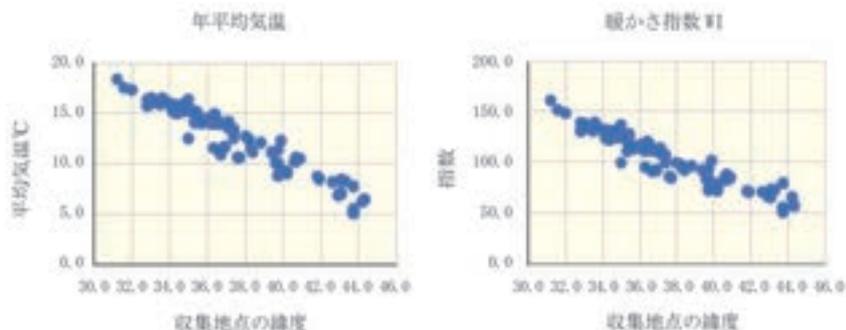


図-3 採種地点の平均気温と暖かさの指数

して寄稿することにした。

この45年の間に、我が国の雑草あるいは雑草防除をとりまく環境は大きく変化した。この変化に対して雑草の側がどのように変わってきたかは生物多様性の観点からも興味深いところであり、この45年前のデータが今後のヒエ研究の進展に役立つのであればこれに増す喜びはない。なお、ここで扱った全てのヒエ属植物系統の種子は農研機構のジーンバンクに保存されており、研究目的であれば誰でも利用することができる。この記事を読んで興味を示してくれる研究者が出てくればと期待をしている。

供試材料の入手方法と系統数

1977年に、沖縄を除く全国の都道府県の農業改良普及所に依頼して、管内に自生している野生ヒエの稔実種子あるいは稔実種子が着いた穂を送ってもらった。また、各地の農業関係の試験研究機関や大学からも稔実種子を入手した。採取地の所在が明確な1地点1株から由来する個体を1系統として扱った。種名については採種地の記載をもとに表-2の基準にしたがって採種系統の種同定を行ったところ、タイヌビエF型が18系統、同C型が

37系統、ヒメタイヌビエが51系統、イヌビエが221系統、ヒメイヌビエが13系統、合計340系統であった。

それぞれの種における採種地の緯度と経度を図-2に示した。イヌビエとタイヌビエは全国から採種されているが、ヒメタイヌビエは関東以西(東経140度>・北緯38度>)からしか採種されていない。ヒメイヌビエはサンプル数が少なく、東北以北に偏っていた。採種地の環境要因として平年

の年平均気温と暖かさの指数について緯度との関係を図-3に示した。ここで暖かさ指数とは、月平均気温から5°Cを差し引いて1年(12か月)を積算した値である。年平均気温、暖かさ指数ともに緯度と極めて高い相関を示した。なお、調査地の各調査年次における平均気温は表-3に示す通り、1978年に比べて1980、1981年は冷夏であった。

以降の計画

次号以降次の項目について取り上げる予定である。

草型、稈・葉の形状、穂・小穂の形状、早晚性、発芽特性、生育特性、温度反応、暖地における種間差異。

参考文献

- 笠原安夫 1970. 雑草としてのヒエ属植物について. 日本雑草図説. 養賢堂, 東京.
- 宮原萬芳・沼川武雄 1976. ヒエ品種の青刈適性と飼料成分に関する一実験的考察. 東北農試研究速報 20.
- 永松土巳 1951. 水田野生ヒエの種生態学的研究 第4報. 日作紀 20,3-4.
- 農林省農業改良局研究部 1954. 水田雑草ノビエの防除に関する研究. 農業改良技術資料 47.
- 農林省草地試験場 1978. ヒエ属植物の分類と種・品種の特性に関する文献抄録. 草地試資料 12-16.
- 小原哲二郎 1937. ヒエの研究. 日作紀 9.
- 大井次三郎 1953. *Echinochloa* P.Beauv. ヒエ属. 日本植物誌, 至文堂, 東京.
- 大井次三郎 1962. 日本のヒエ属植物について. Acta Phytotax. Geobot 20.
- 藪野友三郎 1975. ヒエ属植物の分類と地理的研究. 雑草研究 20.

統計データから

令和3年産 原料用ばれいしょ・原料用かんしょ・てんさい・さとうきびの生産費

令和3年産の10a当たりの生産費(資本金子・地代全額算入)をみると、九州・沖縄を主産地とする原料用かんしょ156,626円、さとうきび149,014円に対して、北海道を主産地とするてんさい108,274円、原料用ばれいしょ100,304円と、前者の生産費が高い。

この傾向を経営概況からみると、1経営体当たりの作付面積については、さとうきび140.2a、原料用かんしょ115.3aに対して、てんさい、原料用ばれいしょはそれぞれ832.5a、636.2aと5~6倍も作付規模が大きい。加えて、10a当

り労働時間については、原料用かんしょ57.41時間、さとうきび37.67時間は、てんさい10.93時間、原料用ばれいしょ8.65時間に比べてより多くの労力を要している。

したがって、原料用かんしょ、さとうきびは10a当たりの費用のうちで、労働費の占める割合が最も高く、それぞれ56%、35%を占めている。一方、原料用ばれいしょでは農機具費、てんさいでは肥料費の占める割合が最も高い。

また、農業薬剤費は押しなべて物財費の15%を占めているが、さとうきびはやや低く10%程度となっている。(K.O)

表 令和3年産 原料用ばれいしょ・原料用かんしょ・てんさい・さとうきび生産費

区 分		単位	原料用 ばれいしょ	原料用 かんしょ	てんさい	さとうきび
10a 当たり	物 財 費	円	71,887	62,034	76,722	86,453
	うち					
	農機具費	〃	20,114	16,420	18,466	12,467
	種 苗 費	〃	16,454	3,473	4,186	5,259
	肥 料 費	〃	10,795	10,879	23,282	14,482
	農 業 薬 剤 費	〃	10,745	9,429	12,727	8,466
	労 働 費	〃	15,938	80,890	19,458	45,810
	費用合計	〃	87,825	142,924	96,180	132,263
	資本金子・地代全額算入生産費	〃	100,304	156,626	108,274	149,014
100kg 当たり	同 上	〃	2,415	6,374	1,513	2,491
経営概況	1経営体当たり作付面積	a	636.2	115.3	832.5	140.2
	10a 当たり労働時間	時間	8.65	57.41	10.93	37.67
	10a 当たり収量	kg	4,146	2,457	7,152	5,981

農産物生産費統計 令和4年8月26日公表

2,4-D抵抗性ヒデリコの調査

公益財団法人日本植物調節剤研究協会
技術顧問

渡邊 寛明

はじめに

MADAの熱研チームに合流して間もなく、Ho Nai Kinさんが第3灌漑地区（ムダ平野の南西部）に調べてほしい草があるというので、1992年第二作（雨季作）にその現地であるGulau村の水田に連れていってもらった。そこではヒデリコ（*Fimbristylis miliacea* (L.) Vahl.）が目立って多かった（図-1）。ヒデリコは日本でも水田畦畔や畦際で普通に見られるカヤツリグサ科の一年生雑草で、機械移植（箱育苗）が普及する前は苗代の厄介な雑草だった。落水条件を好み潤土条件で多発するので、熱帯アジアの潤土直播栽培ではイヌビエ、コヒメビエ、アゼガヤ、コゴメガヤツリ等と並んで上位十指以内に入る主要水田雑草である。ムダ平野でもこの地域で特にヒデリコが増えているとのことだった。カヤツリグサ科雑草の防除には2,4-Dが長年広く使用されていたが、この地のヒデリコは2,4-Dの標準量の6倍でも防除できなかったようだ（Ho 1992）。MADAの依頼を受けて、このヒデリコの除草剤感受性を実験的に明らかにすることと、抵抗性バイオタイプのムダ平野での分布を調べるのが私の研究テーマの一つになった。

現地での聞き取り調査

Gulau村でのこれまでのヒデリコ残草の経緯を知るために、MADAにお願いして1992年9月に農民への聞き取り調査の場を設定してもらった（図-2）。集まってもらった農民たちの話を要約すると次のようになる。



図-1 ムダ平野のGulau村の水田で繁茂していたヒデリコ

直播栽培の普及が進む1988年頃までは、ヒデリコはそれほど防除しにくい雑草ではなかった。当時の雑草防除は、移植栽培では移植後15～25日後、直播栽培では播種後20～30日後に、2,4-Dを1kg a.i./ha前後の薬量で処理するのが一般的であり、これでヒデリコも防除できていた。ところが、1989年第一作にAさんの水田で2,4-Dジメチルアミン処理後にヒデリコが残草したので、そのヒデリコに対して2回目の処理として2,4-Dの2倍量を散布したが、それでも部分的に枯れただけで多くは残草した。続く1989年第二作と1990年第一作でもAさんは2,4-Dブチルエステルや2,4-Dジメチルアミンをそれぞれの推奨されている薬量を散布したが、どちらもほとんど効果がなかった。1990年第二作には2,4-Dを推奨薬量の2倍量を散布したところ、ヒデリコには効果がなかったが水稻は除草剤によるダメージを受けて低収だった。Bさんも、2,4-Dを3～4倍量処理してもヒデリコが残草し、水稻のダメージは大きかったと話しておられた。この時点で、Gulau村では15haを超える水田で2,4-Dが効かないヒデリコが発生していたようだ。一方で、1990年からプレチラクロール乳剤（商品名:Sofit）を使うようになった農民の話では、この剤はヒデリコによく効いたようだ。

2,4-Dジメチルアミンに対する感受性

Gulau村での聞き取り調査の後、同年12月にMADA本部から数km離れたところにあるトレーニングセンター（農業技術普及のための研修所）の敷地内に場所を借りて、そこでヒデリコの2,4-Dに対する薬量反応を調べるための試験を



図-2 聞き取り調査のためにGulau村の農民の皆さんに集まってもらった



図-3 2,4-Dジメチルアミン処理後26日目のヒデリコ残草状況 (Watanabe *et al.* 1997より)
標準薬量 (0.087 g a.i./m²) の1/64～128倍の範囲で14段階の処理量を設定した

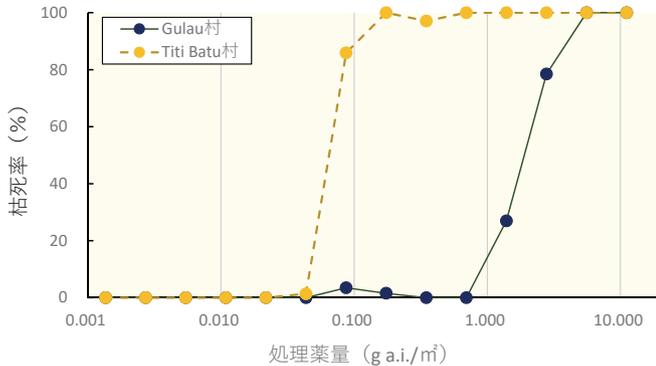


図-4 Gulau村とTiti Batu村ヒデリコの2,4-Dジメチルアミン処理後の枯死率 (Watanabe *et al.* 1997より)



図-5 試験に用いたヒデリコの成植物個体と花序 (Watanabe *et al.* 1997より)

実施した。日本で使っているようなワグネルポットは無かったので、雑貨店で購入したプラスチックバケツ (0.04m² × 0.3m) を試験ポットの代わりにした。プラスチックバケツにGulau村のヒデリコ多発水田の耕土を詰めて代かきを行い、そこから自然発生する個体を試験対象にした。また、ヒデリコが2,4-Dで容易に防除できる第4灌漑地区Titi Batu村の水田耕土を採取して、そこから発生するヒデリコも比較対照として試験に用いた。代かき後は落水 (潤土) あるいはごく浅水状態で管理して本種の出芽と生育を促した。代かき34日後には、ポット当たり30～44個体が出芽し、草丈は約18cmと比較的揃っていたので間引き等による個体数調整は行わず、2,4-Dジメチルアミンを14段階の薬量 (標準薬量の1/64～128倍, 各処理4反復) で処理した。その結果、Gulau村とTiti Batu村の土壌から出芽したヒデリコの薬量反応には明瞭な違いが認められた (図-3)。処理後26日目に調査した残存本数に基づいて枯死率 (出芽個体数に対する

枯死個体数の割合) を示したのが図-4である。Gulau村のヒデリコはTiti Batu村のヒデリコよりも半数致死量 (LD₅₀) が約29倍も高かった (図-4)。なお、両者の小穂や花序の形態に違いは見られなかった (図-5)。

その他の除草剤に対する反応

Gulau村のヒデリコを2,4-D抵抗性バイオタイプ、Titi Batu村のヒデリコを感受性バイオタイプとして、剤型の違いや他の除草剤に対する反応も調べることにした。供試した除草剤は2,4-Dジメチルアミン、2,4-Dイソブチルエステル、2,4-Dエチルエステル、2,4-Dナトリウム塩、MCPAエチルエステル、MCPAナトリウム塩、プロパニル、パラコート、グルホシネートアンモニウムである。供試剤が多いので1993年1月から6月にかけて、2回に分けて試験を実施した。先の試験と同様にプラスチックバケツを用い、ヒデリコの草丈が約15cmになった時期 (代かき約1か月後) に各除草剤の標準薬量、2倍量、8倍量を処理した (各処理3反復)。処理27日後の草丈伸長で評価すると、2,4-Dエチルエステルを除き、2,4-DおよびMCPは抵抗性と感受性のバイオタイプの違いは明瞭であったのに対し、プロパニル、パラコート、グルホシネートアンモニウムに対する反応にバイオタイプによる違いは認められなかった (表-1, 表-2)。

なお、2,4-D抵抗性ヒデリコの防除に関して、ある会社の方から展着剤をうまく使うことで2,4-Dでも防除できないかとの提案をいただいたが、それについては時間の関係もあり取り組めなかった。この場をお借りしてお詫びしたい。

抵抗性バイオタイプの分布

1993年第一作にムダ平野でランダムに選択した99地点で多数のヒデリコを確認した各1枚の水田とGulau村の水田1枚を合わせて、合計100枚の水田から土壌を採取した。同年9月に採取土壌をプラスチックバケツに詰め、代かき後に自然発生した個体に、通常であれば間違いなく枯死するであろう2,4-Dジメチルアミンの標準量の約2倍量にあた

表-1 各種除草剤処理 27 日後のヒデリコ草丈 (1)

供試除草剤	供試系統の採取地	バイオタイプ	処理葉量		
			標準葉量	2倍量	8倍量
			cm	cm	cm
2,4-Dジメチルアミン (標準葉量: 0.087g a. i./m ²)	Gulau村	抵抗性	27.2 **	26.6 **	24.3 **
	Titi Batu村	感受性	0.0	0.0	0.0
2,4-Dイソブチルエステル (標準葉量: 0.068g a. i./m ²)	Gulau村	抵抗性	23.6 NS	28.2 *	24.7 **
	Titi Batu村	感受性	29.5	4.4	0.0
プロパニル (標準葉量: 0.035g a. i./m ²)	Gulau村	抵抗性	26.1 NS	15.6 NS	7.0 NS
	Titi Batu村	感受性	34.7	14.7	0.0
パラコート (標準葉量: 0.032g a. i./m ²)	Gulau村	抵抗性	27.0 NS	19.5 NS	0.0 NS
	Titi Batu村	感受性	30.8	22.7	0.0
グルホシネートアンモニウム塩 (標準葉量: 0.024g a. i./m ²)	Gulau村	抵抗性	32.1 NS	33.0 NS	0.0 NS
	Titi Batu村	感受性	41.0	40.9	0.0

** 1%水準で有意差あり * 5%水準で有意差あり NS 有意差なし (Watanabe *et al.* 1996より)
 代かき: 1993年1月28日 除草剤処理: 同年2月24日 (処理時のヒデリコ草丈は約15cm)

表-2 各種除草剤処理 27 日後のヒデリコ草丈 (2)

供試除草剤	供試系統の採取地	バイオタイプ	処理葉量		
			標準葉量	2倍量	8倍量
			cm	cm	cm
2,4-Dジメチルアミン (標準葉量: 0.087g a. i./m ²)	Gulau村	抵抗性	22.1 **	26.6 *	22.0 **
	Titi Batu村	感受性	4.9	10.5	5.5
2,4-Dエチルエステル (標準葉量: 0.051g a. i./m ²)	Gulau村	抵抗性	22.7 NS	20.2 NS	7.6 NS
	Titi Batu村	感受性	28.5	24.9	4.2
MCPAエチルエステル (標準葉量: 0.042g a. i./m ²)	Gulau村	抵抗性	21.9 NS	19.1 NS	16.9 *
	Titi Batu村	感受性	29.3	13.7	0.8
2,4-D Na塩 (標準葉量: 0.062g a. i./m ²)	Gulau村	抵抗性	24.0 NS	24.2 *	20.9 *
	Titi Batu村	感受性	13.1	12.8	9.8
MCPA Na塩 (標準葉量: 0.043g a. i./m ²)	Gulau村	抵抗性	21.1 **	18.7 **	0.0 NS
	Titi Batu村	感受性	6.0	0.0	0.0

** 1%水準で有意差あり * 5%水準で有意差あり NS 有意差なし (Watanabe *et al.* 1996より)
 代かき: 1993年5月30日 除草剤処理: 同年6月26日 (処理時のヒデリコ草丈は約15cm)

る 0.17 g a.i./m²を処理し、生き残った個体があればそれを抵抗性固体と判断した。その結果、100か所の水田のうち95か所の水田土壌から出芽したヒデリコは全て感受性タイプであり、抵抗性バイオタイプが認められたのは Gulau 村を含むわずか5か所の水田だけだった(図-6)。すなわち、本種の2,4-D抵抗性バイオタイプのムダ平野での分布はごく一部の地点に限られていたことになる。

一方で、Gulau 村内での抵抗性のまん延状況を調べるた

めに、1993年第二作に村内70枚の水田から土壌を採取し、上記と同じ方法で抵抗性固体の有無を調査した。その結果、69枚の水田土壌から抵抗性固体が出芽し、出芽個体数に対する抵抗性固体の割合は0~96%と水田毎に大きく異なっていた(図-7)。ムダ平野全体でみると本種の2,4-D抵抗性は一部地域だけの問題であるが、発生地区では大部分の水田が抵抗性バイオタイプに侵されていることが分かる。以上の試験結果を受けて、2,4-D抵抗性バイオタイプ発生地区には



図-6 ムダ平野全域における 2,4-D 抵抗性ヒデリコの分布 (Watanabe *et al.* 1997 より)

- 抵抗性バイオタイプが認められた (5 か所)
- 抵抗性バイオタイプが認められなかった (95 か所)

2,4-D 以外の有効な除草剤の使用を指導することとなった。これらの結果は、クアラルンプールで開催されたマレーシア植物保護学会で口頭発表し (Watanabe *et al.* 1994), 帰国後に雑草研究に論文投稿した (Watanabe *et al.* 1997)。

マレーシアの水田で確認された除草剤抵抗性雑草には、前任の伊藤一幸さんがナンゴクオモダカ (*Sagittaria guyanensis* H.B.K. Val.) でスルホニルウレア系除草剤抵抗性を確認され (伊藤ら 2000), 後任の中山壮一さんがキバナオモダカ (*Limnocharis flava* (L.) Buychenau) で 2,4-D とスルホニルウレア系除草剤に対する複合抵抗性を確認された (中山ら 1999)。ずいぶん遡るが、フィリピンでは 2,4-D 抵抗性ナガボノウルシ (*Sphenoclea zeylanica* Gaertn.) の報告もある (Migo *et al.* 1986)。数ある除草剤のなかで、植物ホルモン作用を示す 2,4-D は、生合成系の酵素をターゲットとする ALS 阻害剤や ACCase 阻害剤のように頻度高く抵抗性雑草が選抜されるような成分とは考えられていない。それでも、長年にわたりそればかりを使い続けると抵抗性バイオタイプが選抜される。Gulau 村の 2,4-D 抵抗性ヒデリコもこのことを示す事例の一つである。

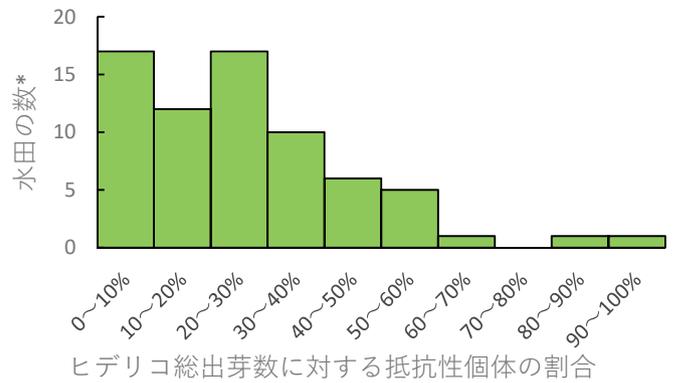


図-7 Gulau 村にお水田における抵抗性個体の割合 (Watanabe *et al.* 1996 より)

* 村内 70 枚の水田を調査した

参考文献

Ho, N-K. 1992. 2,4-D usage and herbicide resistance problems in the Muda area, Malaysia. Note prepared for discussion with extension officers. MADA, Alor Setar, Malaysia.

伊藤一幸ら 2000. マレーシアのセベランペライにおけるスルホニルウレア系除草剤抵抗性のナンゴクオモダカ *Sagittaria guyanensis* H.B.K. Val. 雑草研究 45 (別), 232-233.

Migo, T. R. *et al.* 1986. Response of *Sphenoclea zeylanica* to 2,4-D and other recommended herbicides of weed control in lowland rice. Philippine Journ. Weed Sci. 13, 28-38.

中山壮一ら 1999. 2,4-D および bensulfuron-methyl に対する複合抵抗性を有するマレーシア産キバナオモダカ. 雑草研究 45 (別). 84-85.

Watanabe, H. *et al.* 1994. 2,4-D resistance of *Fimbristylis miliacea* in direct seeded rice fields in the Muda area. Proceedings of the 4th International Conference on Plant Protection in the Tropics. 353-356.

Watanabe, H. *et al.* 1996. Ecology of major weeds and their control in direct seeding rice culture of Malaysia.

Watanabe, H. *et al.* 1997. Response of 2,4-D resistant biotype of *Fimbristylis miliacea* (L.) Vahl. to 2,4-D dimethylamine and its distribution in the Muda plain, Peninsula Malaysia. J. Weed Sci. Tech. 42(3), 240-249.

メンデル生誕200年を迎えて！

東京大学・法政大学名誉教授

長田 敏行

2022年はメンデル (Gregor Johann Mendel) 生誕 200 年となるが、それは、メンデルは 1822 年 7 月 22 日の生まれであるからである。このため、生誕 200 年を記念して、さまざまな催しがもたれ、チェコ共和国ブルノでの「メンデル遺伝学国際会議」を始めとしてさまざまな催しがあった。筆者はその多くに関わってきたが、その中で強く感じたことは、メンデル (図-1) は遺伝学の祖と言われながら、その実像が実はあまりよく理解されていないか、あるいは、誤解されているのではないかということである。本稿では、その点の要点をまとめて紹介したい。

メンデルの実像追跡

メンデルは存命中には生物学者としては知られた存在ではなかった。メンデルが 1884 年 1 月 6 日に亡くなった時 (図-2)、カトリック教団アウグスチヌス派セント・トーマス修道院の院長であったので、修道院長として悼まれたが、2 番目には貢献ある気象学者として悼まれた。しかしながら、決して生物学者としては悼まれてはいないし、その時点では学問分野「遺伝学」すら存在しなかった。そのため、エンドウの交配実験に使われた実験ノートもデータもほとんど焼却されてしまった。彼の書いた論文は地元の自然科学協会の紀要に発表されていたので今日に残ったが、それ以外のものはほとんど資料がなく、彼の実像の追及が困難であることがその第一原因である。遺伝学者として認識されるのは、1900 年のメンデル法則再発見以来であり、この点をまず指摘したい。

一方、現代におけるメンデル研究の紹介のされ方もメンデル誤解の大きな要因となっているといわざるを得ない。高校の生物学の教科書を開くと、メンデル遺伝法則は生殖・発生の章で取り扱われ、まず、生殖細胞の記述があり、受精が扱われ、その次に減数分裂が扱われ、染色体が登場してから、その後で初めて登場する。このような排列になっている理由が生徒の理解を助けるためであることは理解できるが、これはメンデル自身の研究を正確に理解する上では大きな障壁となっており、著しい誤解を

与えるといわざるを得ない。なぜなら、1865 年にエンドウの交配した子孫の形質の研究を発表し、その翌年論文を書いた時点において、メンデルは、上記の生物現象については全く知らなかったからであり、メンデルの研究はこれら生物現象を前提としない。

彼がいかにしてその法則性を導き出したのであろうか？それは、ほぼ次のようにまとめられよう。エンドウの品種を多く入手し、それらの中から特徴的な品種を 7 種類選びだし、自殖により純系を育てた。それらの間での交配の結果を追跡し、膨大な数量の子孫の数理的解析から子孫の形質の変化の動向から判断したのである。決して、上記生物的現象を背景として、その結論を出しているのではない。ただし、下等藻類であるフシナシミドロ (*Vaucheria*) 等の受精等については友人のナーヴェ (J. Nave) より教えられていた可能性は高い。

一例のみ取りあげると、図-3 にあるような丸い種子のエンドウとシワシワの種子エンドウとを交配すると、その次代では全ての種子が丸となる。これは顕性の発露である。それを自殖するとその子孫の雑種第二代では、丸とシワシワの種子が 3 : 1 の比で出現するが、その比は、数千個の種子の解析によって算定され、それはもっぱら数理的解析によって行われた。これにより、メンデルは遺伝する実体は粒子性のものと確信を持ったと思われるが、同時代人のほとんどがブレンド説に偏っていたことと対蹠的である。また、彼は 1865 年に 8 年にわたる実験結果を地元の自然科学協会に発表するものの、その発表は同時代人から何ら注目を浴びなかった。日の目を見たのは、1900 年の 3 人の科学者による、いわゆるメンデル法則の再発見以来である。



図-1 修道士メンデル
メンデルは 1843 年にセント・トーマス修道院の修道士となった (モラビア博物館メンデルセンター提供)



図-2 修道院長メンデル
メンデルは1868年修道院長となった(モラビア博物館メンデルセンター提供)

ののだろうか? もちろん、メンデルは幼少より園芸家の家に育ち、植物の栽培に習熟していたことは背景にある。それ以上に、ギムナジウムの正規教員となる資格認定試験に失敗したことにより、ウィーン大学で1851年から1853年にかけて2年間学んだことが大きい。その時はヨーロッパに広まっていたフランスの二月革命に始まる1848年の革命の後であり、オーストリア皇帝も帝国政府も当初は民主化の約束をするものの、最終的にはほとんど約束は反故とされてしまった。ところが、この時ウィーン大学は大きく変革し、ギムナジウム教員養成のための哲学学部が新たに設けられた。メンデルが中心的に学んだ物理学のみを取り上げるが、そこは今日でもその名前の残っているドップラー (C. Doppler) により主宰されていた。そこでは、講義に加えて実習コースが設けられていたが、それは大変革であった。というのも、それ以前には大学では講義のみが行われただけだった。しかも、その実習コースでは、行うべき課題の設定を行い、遂行の手順を考え、得られた結果についての解析が要求されていた。時代にやや遅れていたオーストリア帝国にも、科学の進歩を取り入れることが試みられたからである。そのため、近代科学の基本である、問題設定と仮説検証の手順が導入され、メンデルはそれを学んだのである。同様なことは、植物生理学を担当したウンガー (F. Unger) でも同様であった。大学では、その他に、物理数学、確率論、化学、昆虫学も勉強しているが、それらも哲学学部に含まれていた。したがって、メンデルはエンドウの交配した子孫の解析にこれら習得した数理的方法を採用したのであり、二項定理についても詳しくと推定できる。すなわち、研究遂行にあたっては物理学的視点のもと行われたのである。実際、メンデルは後に、彼の専門分野を尋ねられた時、「私の専門は実験物理学者である」と返答していることが知られている。

そして、メンデルの提出した遺伝物質が粒子性であること

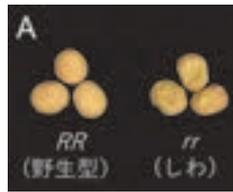


図-3 エンドウ種子
エンドウのマル種子 R とシワシワ種子 r とを交配すると、第一代は全てマルとなるが、それを自殖させると、雑種第二代は、マルとシワシワが3:1の割合で出現する(写真は、広島大学草場信教授提供)

物理学者メンデル

それではこのような実験を計画し、遂行して、結論を得たのはどのような背景によっている

は、1900年のメンデル法則の再発見以来、染色体の発見に支えられて、遺伝子が染色体上に並んでいることを確立して古典的遺伝学の完成に至った。その後、1953年にワトソン (J.D. Watson) とクリック (F. Crick) により、遺伝物質としてDNAが発見されて以来、その後の分子生物学への発展へつながるのである。

気象学者メンデル

ここで略述したことは、一般的に紹介されているメンデル像とはかなり異なっているかもしれないが、今日見過ごされている視点に焦点を与えて紹介している。より詳しく知りたいという方は、「生物の科学—遺伝」に筆者編で「メンデル生誕200年記念号」も出ているので参照されたい(長田2022)。この関りでは、冒頭で触れた気象学者メンデルについても耳慣れないのではないかと思うので、要約すると、メンデルは1870年にブルノを襲った竜巻を自らの修道院長室で体験し、その報告も論文として自然科学協会の紀要に発表している。そこでは、竜巻の生成機構についての物理学的解析を加えているのである。この点についても、竜巻の物理的解析の教科書的説明では、1917年にウェゲナー (A. Wegener) により初めて行われたとされているが、この点でもメンデルは先行的に説明を行い、それは長いこと忘れられていたのであり、彼は気象学者として先端的であったのである。そして、彼の気象学に関する論文は9編発表しているが、遺伝学については2編しか発表していないことも指摘する必要がある。

メンデルは、生前には同時代人に全く生物学者としては認識されていなかったが、メンデル法則再発見後は、遺伝学の創始者として扱われ、現在は学問分野遺伝学の創設者としてみなされ、その実像とはよほどかけ離れているように見える。このような認識がなされることは決して多くないが、本稿がそれを一度考えていただくきっかけとなればと思って攷筆する。

文献

長田敏行 2022. メンデル生誕200年記念号に寄せて. 生物科学-遺伝 76,254.

協会だより

2022年度 植調関東支部雑草防除研究会

日時：2022年12月21日（水）13:15～17:00

Zoom利用によるWeb会議形式にて開催

内容：関東エリアで抱える難防除雑草問題への対応について

参加費：無料（事前申込制）

参加範囲：公益財団法人日本植物調節剤研究協会（関東支部）会員

参加申込み締切：12月9日（金）

申込み問合せ先：

植調関東支部長 酒井 長雄

E-mail: n.sakai@japr.or.jp

研究会等

令和4年度日本学術会議公開シンポジウム

テーマ：持続的な食料保障に向けた植物保護の新技术

主催：日本学術会議農学委員会植物保護科学分科会・日本植物保護科学連合

日時：2022年12月3日（土）13:00～16:50

Zoomによるオンライン配信

講演：①内生微生物を活用した「プロバイオティクス農業」

秋本 千春（農研機構生物機能利用研究部門）

②クオラムセンシングの制御による植物病害防

目指して—抵抗性誘導剤と微生物農薬—

甲斐 建次（大阪公立大学大学院農学研究科）

③青色光の殺虫効果を利用した害虫駆除技術の開発とその展望

堀 雅敏（東北大学大学院農学研究科）

④植物免疫プライミングの調節機構と活用への展望

仲下 英雄（福井県立大学生物資源学部）

⑤ポスト情報社会の持続的雑草管理に向けた技術的、社会的展望

浅井 元朗（農研機構植物防疫研究部門）

参加費：無料（事前申込制）

参加申込み締切：11月26日（土）

申込み問合せ先：

筑波大学名誉教授 松本 宏

E-mail: hmatsu@biol.tsukuba.ac.jp

第29回農業レギュラトリーサイエンス研究会

テーマ：新たに導入された「農業使用者への影響評価」について考える

主催：日本雑草学会

日時：2022年12月15日（木）13:00～17:00

Webexによるオンライン配信

講演：①基調講演 合理的なレギュレーションのための規制影響評価 (RIA) の活用

岸本 充生（大阪大学）

②作業安全性評価の実際と想定影響

元場 一彦（日本農業株式会社）

③農業の使用者暴露評価における圃場試験とその課題

荻山 和裕（一般社団法人日本植物防疫協会）

④Higher tier operator exposure risk assessment in the EU (仮)

Mark Best（CropLife International）

参加費：日本農業学会会員（個人会員）1,000円、その他一般 2,000円

参加申込み締切：12月8日（木）

申込み：日本農業学会ホームページ（<http://pssj2.jp/>）を参照

植調第56巻 第8号

■発行 2022年11月17日

■編集・発行 公益財団法人日本植物調節剤研究協会

東京都台東区台東1丁目26番6号

TEL 03-3832-4188 FAX 03-3833-1807

■発行人 大谷 敏郎

■印刷 (有)ネットワン

© Japan Association for Advancement of Phyto-Regulators (JAPR) 2016
掲載記事・論文の無断転載および複写を禁止します。転載を希望される場合は当協会宛にお知らせ願います。

取 扱 株式会社全国農村教育協会

〒110-0016 東京都台東区台東1-26-6 (植調会館)

TEL 03-3833-1821

株式会社エス・ディー・エス バイオテックの水稲用除草剤有効成分を含有する「新製品」

- イザナギ1キロ粒剤/フロアブル/ジャンボSD (ベンゾピシクロン)
- カイシMF1キロ粒剤 (ベンゾピシクロン)
- バットウZ1キロ粒剤/フロアブル/ジャンボ (ベンゾピシクロン)
- アシュラ1キロ粒剤/フロアブル/ジャンボ/400FG (ベンゾピシクロン)
- ウィードコア1キロ粒剤 (ベンゾピシクロン)
- ダンクショットフロアブル (ベンゾピシクロン/カフェンストロール)
- 天空1キロ粒剤/フロアブル/ジャンボ/エアー粒剤 (ベンゾピシクロン)
- パピリカ1キロ粒剤/フロアブル (ベンゾピシクロン/テニルクロール)
- ゲパード1キロ粒剤/ジャンボ/エアー粒剤 (ベンゾピシクロン/ダイムロン)
- ホットコンビ200粒剤/フロアブル/ジャンボ (ベンゾピシクロン/テニルクロール)
- レプラス1キロ粒剤/ジャンボ/エアー粒剤 (ダイムロン)
- ジカマック500グラム粒剤 (ベンゾピシクロン)
- ツルギ250粒剤/フロアブル/ジャンボ (ベンゾピシクロン)
- アネシス1キロ粒剤 (ベンゾピシクロン)
- ジャイロ1キロ粒剤/フロアブル (ベンゾピシクロン)
- テッケン/ニトウリュウ1キロ粒剤/ジャンボ (ベンゾピシクロン)
- イネヒーロー1キロ粒剤/フロアブル/ジャンボ (ダイムロン)
- ベンケイ1キロ粒剤/豆つぶ250/ジャンボ (ベンゾピシクロン)
- 銀河1キロ粒剤/フロアブル/ジャンボ (ダイムロン)
- 月光1キロ粒剤/フロアブル/ジャンボ (カフェンストロール/ダイムロン)



ベンゾピシクロンはSU抵抗性雑草やアシカキ、イボクサにも高い除草効果を示します。

「ベンゾピシクロン」含有製品

- | | |
|----------------------------------|----------------------------------|
| アールタイプ/シュナイデン (1キロ粒剤/フロアブル/ジャンボ) | タンボエース (1キロ粒剤/ジャンボ/スカイ500グラム粒剤) |
| イッテツ (1キロ粒剤/フロアブル/ジャンボ) | トビキリ (ジャンボ) |
| イネキング (1キロ粒剤/フロアブル/ジャンボ) | ナギナタ (1キロ粒剤/豆つぶ250/ジャンボ) |
| オークス (フロアブル) | ハイカット/サンパンチ (1キロ粒剤) |
| キクトモ (1キロ粒剤) | 半蔵 (1キロ粒剤) |
| クサビ (フロアブル) | フォーカスショット (ジャンボ)/プレッサ (フロアブル) |
| サスケ粒剤200 (200グラム粒剤) | ブルゼータ (1キロ粒剤/フロアブル/ジャンボ) |
| サスケ-ラジカルジャンボ/レオンジャンボパワー (ジャンボ) | フルイニング (ジャンボ/スカイ500グラム粒剤) |
| 忍 (1キロ粒剤/フロアブル/ジャンボ) | プレキープ (1キロ粒剤/フロアブル) |
| シリウスエグザ (1キロ粒剤/ジャンボ/顆粒) | ピラクロエース/カリユード (1キロ粒剤/フロアブル/ジャンボ) |
| シロノック (ジャンボ) | モーレッツ (1キロ粒剤/フロアブル/ジャンボ) |
| スマート (1キロ粒剤/フロアブル) | ライジンパワー (1キロ粒剤/フロアブル/ジャンボ) |
| ダブルスターSB (1キロ粒剤/顆粒) | |



根も止める

有効成分「アルテア」は、多年生雑草の地上部を枯らすだけでなく、翌年の発生原因となる塊茎の形成も抑えます。日本の米づくりを根本から進化させる新しい効き目、「アルテア」配合の除草剤シリーズに、どうぞご期待ください。

これからの日本の米づくりに

アルテア[®]

配合除草剤シリーズ

<https://www.nissan-agro.net/altair/>





オモダカ



ホタルイ



コナギ



イボクサ

サイラ®とは 「サイラ/CYRA」は有効成分の一般名：シクロピリモレート (Cyclopyrimorate) 由来の原体ブランド名です。

サイラは、新規の作用機構を有する除草剤有効成分です。オモダカ、コナギ、ホタルイ等を含む広葉雑草やカヤツリグサ科雑草に有効で、雑草の根部・莖葉基部から吸収され、新葉に白化作用を引き起こし枯死させます。新規作用機構を有することから、抵抗性雑草の対策にも有効です。また、同じ白化作用を有する4-HPPD阻害剤(ピラジレート、テフリルトリオン等)と相性が良く、混合することで飛躍的な相乗効果を示します。

除草剤分類 33 除草剤の作用機構分類(HRAC)においても新規コード33 (作用機構:HST阻害)で掲載され、注目されています。

新規有効成分サイラ配合製品ラインナップ

水稲用一発処理除草剤

水稲用中・後期処理除草剤

シエイソウル®

1キロ粒剤・フロアブル・ジャンボ

ワサウエポン®

1キロ粒剤・フロアブル・ジャンボ

バイスコープ®

1キロ粒剤

ジヤスマ®

1キロ粒剤・フロアブル・ジャンボ

ウルティモZ®

1キロ粒剤・フロアブル・ジャンボ

ルナグロス®

1キロ粒剤



三井化学アグロ株式会社
東京都中央区日本橋1-19-1日本橋ダイヤビルディング
ホームページ <https://www.mitsui-agro.com/>

各剤の
詳しい情報は
こちら



®を付した商標は
三井化学アグロの
登録商標です。

協友アグリ®の省力化技術

FG

FG剤で田んぼの除草が変わる。

水稲用一発処理除草剤 FG剤ラインナップ

アツパレZ

バッチリLX

アットカZ

サラブレッドKAI

ガツンZ

その他もラインナップたくさん ▶▶▶▶▶ アシュラ ジェイフレンド バッチリ ビクトリーZ

●使用前にはラベルをよく読んでください。 ●ラベルの記載以外には使用しないでください。 ●本剤は小児の手の届く所には置かないでください。 ●空袋は圃場などに放置せず、適切に処理してください。

JAグループ
農協 経済連

協友アグリ株式会社 〒103-0016 東京都中央区日本橋小網町6-1

お問い合わせ
<https://www.kyoyu-agri.co.jp/contact/>

®は協友アグリ(株)の登録商標です。



詳しくはこちら



協友アグリ FG剤



病害虫雑草の プロを手の中に!

写真を撮るだけで
病害虫雑草診断
ができる



有効薬剤
がわかる!

診断履歴を
管理・分析
できる!



スマートフォン用アプリ

レイミーの

AI病害虫雑草診断

無料!

※画面は開発中のものです。

対応作物が増えました!!



■本アプリケーションで使用されているAI診断学習モデルは(株)NTTデータCCSと日本農業(株)の共同開発です。■本システムは農林水産省の農業界と経済界の連携による生産性向上モデル農業確立実証事業「防除支援システム研究会(H30~R1)」の成果を社会実装したものです。■学習に用いたデータは、農林水産省委託事業「人工知能未来農業創造プロジェクト・AIを活用した病害虫診断技術の開発」および、「官民共同開発投資拡大プログラム(PRISM)」の成果である「病害虫被害画像データベース」を用いた。

開発 日本農業株式会社 NTT DATA 株式会社 NTTデータ CCS

アプリの
無料
ダウンロード
はこちら

日本農業ホームページから
日本農業 検索



参加 日産化学株式会社 日本曹達株式会社 三井化学アグリ株式会社 エイセイ-エス バイオテック 丸和バイオケミカル株式会社

豊かな稔りに貢献する 石原の水稲用除草剤



湛水直播の除草場面で大活躍!

非SU系水稲用除草剤

ブレキープ® 1キロ粒剤 フロアブル

- ・は種時の同時処理も可能!
- ・非SU系の2成分除草剤
- ・SU抵抗性雑草に優れた効果!



ノビエ3.5葉期、高葉齢のSU抵抗性雑草にも優れた効き目

ゼンアイ® MX 1キロ粒剤 / ジャンボ®

フルパグ® MX 1キロ粒剤 / ジャンボ®

スゲギア® A 1キロ粒剤

ヒイカツパ® A 1キロ粒剤

フルフォーシ® ジャンボ®

フルイニグ® ジャンボ®

タイズエドール® 1キロ粒剤

乾田直播専用 **ハードポイント® DF**

石原バイオサイエンスの
ホームページはこちら▶



●使用前にはラベルをよく読んでください。●ラベルの記載以外には使用しないでください。●本剤は小児の手の届く所には置かないでください。

ISK 石原産業株式会社

販売 **ISK** 石原バイオサイエンス株式会社

ホームページ アドレス
<https://ibj.iskweb.co.jp>



雑草調査のプロに必携の 雑草図鑑

植調雑草大鑑

WEEDS OF JAPAN IN COLORS

浅井元朗 著

企画：公益財団法人 日本植物調節剤研究協会
B5判 360ページ 定価 10,560円(税込)
ISBN978-4-88137-182-4

ひとつの雑草種について種子、芽生え、幼植物、生育中期、成植物から花・果実までのすべてを明らかにした図鑑。研究者から農業関係者まで、雑草調査のプロにお役にたつ図鑑です。

全国農村教育協会

〒110-0016 東京都台東区台東1-26-6
TEL.03-3839-9160 FAX.03-3833-1665

<http://www.zennokyo.co.jp>

私たちの多彩さが、
この国の農業を豊かにします。

大好評の除草剤ラインナップ

新登場!
ゼータジャガー 1キロ粒剤
シヤンボフロアフル

新登場!
バットウZ 1キロ粒剤
フロアフル
シヤンボ

新登場!
ゼータプラス 1キロ粒剤
シヤンボ
フロアフル
200Fg

マズオ 1キロ粒剤
シヤンボ
フロアフル

ゼータタイガー 1キロ粒剤
シヤンボ
フロアフル
300Fg

ズエモン 1キロ粒剤
シヤンボ
フロアフル

メガゼータ 1キロ粒剤
シヤンボ
フロアフル
400Fg

オサキニ 1キロ粒剤

忍 1キロ粒剤
シヤンボ
フロアフル

イッテツ 1キロ粒剤
シヤンボ
フロアフル

ドニチS 1キロ粒剤

®は登録商標です。

〒103-6020 東京都中央区日本橋2丁目7番1号 お客様相談室 0570-058-669 農業支援サイト 農力 <https://www.i-nouryoku.com>

●使用前にはラベルをよく読んでください。●ラベルの記載以外には使用しないでください。●小児の手の届く所には置かないでください。●空袋・空容器は廃棄等々に放置せず適切に処理してください。



大塚のあふみ、まっまごへ
SCC GROUP



畑向け除草剤

アタックショット 乳剤 **ムギレンジャー** 乳剤
丸和 **DDックス**®

果樹向け除草剤

シンバー® **リバー**®

芝生向け除草剤

アトラクティブ® **ユニホック7**®
サベルDE ハレイDE

緑地管理用除草剤

ハイバーX® 粒剤 **パワーボンバー**®

除草剤専用展着剤

サファゴントWK 丸和 **サファゴント30**

MBC 丸和バイオケミカル株式会社

〒101-0041 東京都千代田区神田須田町2-5-2
☎03-5296-2311 <http://www.mbc-g.co.jp/>

第56巻 第8号 目次

- 1 巻頭言 ESG投資は社会変革のドライバーになり得るか
小林 浩幸
- 2 タマネギの直播栽培を安定させるための溝畝施肥播種機
松尾 健太郎
- 6 〔田畑の草種〕^{くさぐさ} 蛇莓(ヘビイチゴ)
須藤 健一
- 7 省力樹形として期待されるリンゴのカラムナー性のメカニズム
岡田 和馬
- 11 オープンソフトウェアRによる再現可能な数理モデル解析
—水稲用除草剤の水中残留データ解析を例に—
近藤 圭
- 22 水稲に安全性の高いフェンキトリオンの選択性機構と利用場面
大野 修二・山本 峻資
- 26 〔植調講座〕「ノビエ」の個性を見極める1. 日本産ヒエ属植物の変異(序章に代えて)
清水 矩宏
- 28 〔統計データから〕令和3年産原料用ばれいしょ・原料用かんしょ・
てんさい・さとうきびの生産費
- 29 マレーシアでの調査研究の思い出(4) 2,4-D抵抗性ヒデリコの調査
渡邊 寛明
- 33 〔連載〕植物の不思議を訪ねる旅 第32回 メンデル生誕200年を迎えて!
長田 敏行
- 35 広場

No.91

表紙写真 〔ヘビイチゴ〕



全国に分布する多年生雑草。道ばた、畦畔、草地、芝地など草刈りされる日当りのよい湿った土地に生育する。匍匐茎で伸長してしばしば農耕地にも入りこむ。花後に花托がイチゴ状に肥大する。(写真は©浅井元朗, ©全農教)



根生葉。長柄があり、細かい毛がある。



花。花柄の先に径約1.5cmの5弁花を着ける。



生育状況。各節から発根し、新たな株を作る。



そう果。花托上に多数のそう果をつける。