

植調

JAPR Journal

第55巻

第7号

日本のコムギの倒伏抵抗性と強稈性 松山 宏美

ハナスベリヒユの花の開閉とトランスクリプトーム解析 柴田 道夫

パッシブサンプリング法による環境水中の除草剤(農薬)のモニタリング

矢吹 芳教・野呂 和嗣・伴野 有彩

マイクロバブルを用いた液滴の微粒化 川口 清司



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)

新提案!「中期にジャンボ」ラクラク散布!

新技術

ソニックスプレッド®

テクノロジーだから

拡散力が違う!

ノビエ

コナギ

ホタルイ

クログワイ

オモダカ

各種雑草に幅広い効果!

水稲用中期除草剤

セカンドショット® ジャンボMX

農林水産省登録
第23867号

アトカラ® ジャンボMX

農林水産省登録
第23866号

アジムスルフロン・ペノキスラム・メソトリオン粒剤

セカンドショット、アトカラ、ソニックスプレッドは三井化学アグロ(株)の登録商標です。

動画を
チェック!



ソニックスプレッド® テクノロジーとは……

独自のキャリアーと数種の界面活性剤の絶妙な配合によって、拡散性能を飛躍的に向上させた三井化学アグロ独自のジャンボ剤新製剤技術です。



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 <http://www.mitsui-agro.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。○容器・空袋などは圃場などに放置せず、適切に処理してください。○防除日誌を記録しましょう。



カウンシル®
コンプリート

新登場



ノビエ、難防除多年生雑草を「一発処理」で枯らす除草力。鉄コーティング直播栽培にも適応。多角化・大規模化に貢献できる次世代の水稲用除草剤です。

除草力“の”
カウンスシル。
高葉齢ノビエも! 難防除も!



●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。●(R)カウンスシルはバイエルグループの登録商標

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・祝日を除く



雑草防除対策の新たな展開

公益財団法人日本植物調節剤研究協会 評議員
一般社団法人日本植物防疫協会 代表理事・理事長
早川 泰弘

本年 6 月 30 日に農林水産省植物防疫課主催による「植物防疫の在り方に関する検討会」が、『植物防疫の在り方について（中間論点整理）』をとりまとめ、公表した。その内容は、検疫や国内防除における国内外の昨今の状況、さらには直近（5 月 12 日）に同省が策定・公表した「みどりの食料システム戦略」を踏まえ、技術面のみならず政策面も含めて多岐にわたっており、意欲的なものである（詳細は農水省 HP 掲載「中間論点整理（植物防疫の在り方について）」参照）。筆者も検討員として参加する機会を得たので、本誌では、雑草対策に絞ってその内容とそれらをめぐる議論についてご紹介したい。

中間論点整理全体としては、(1) 国内防除については、みどりの食料システム戦略で掲げられた「2050 年までに農業の使用量をリスク換算ベースで 50%削減」という目標を意識しつつ、① IPM のさらなる推進、② AI、ICT 等の積極的な活用、③ 効果的な侵入警戒調査、④ より迅速な緊急防除、(2) 輸入検疫については、① 中古農機等植物以外の物品の検査、② 輸入携帯品に対する検査の実効性向上、③ 緊急的な水際強化措置の整備、(3) 輸出検疫については、農産物等の輸出促進の取組強化を背景に、① 第三者機関の活用も含めた検査の効率性向上、② 検疫協議の迅速化、等が骨子となっている。

雑草については、本誌でも何回か取り上げられた外来雑草の問題、すなわち、輸入される牧草や飼料穀物に混入した外来雑草の種子が家畜排泄物由来堆肥等を通じて農地へ侵入・拡散し難防除雑草となり、農作物に大きな被害をもたらしている問題が取り上げられた。その原因は、雑草種子が水際で規制できていないためであり、制度的な問題点として、現行の植物防疫法では、「有害植物（定義：真菌、粘菌、細菌、寄生植物及びウイルスであって、直接又は間接に有用な植物を害するもの）」に雑草が含まれていないことが指摘された。一方、主要国（米国、カナダ、EU、オーストラリア、ニュージーランド、中国、韓国、台湾）では、雑草（種子）も植物検疫の対象となっている。例を挙げると、日本から米国・カナダ向けに輸出した工業製品について、チガヤ等の雑草種子が付着していたとして、輸入差し止めや製品・コンテナの洗浄指示等がなされていることが、植物防疫所の HP で報告

されている。

国内防除においても、前述の理由から雑草防除が植物防疫法に規定されていないため、植物防疫の対象としての位置づけが弱い。特に県段階では、病害虫防除所が雑草防除を担当している県もあるが、多くの県では栽培部局等植物防疫以外の部局が担当しており、病害虫防除のように国・都道府県が一貫した体制の下に対応している状況にないことも指摘された。

以上を踏まえ、「中間論点整理」では、「4. 今後の対応方向」の章において、今後は雑草も病害虫と同等に取り扱っていくことが明確にされた。また、輸入検疫においてはさらに、「雑草種子の混入を水際で規制する実効性のある検査に向けたリスク分析手法の開発等を検討することが必要である」旨明記された。

今後の展開としては、「中間論点整理」の内容の実現を目指し、植物防疫法改正も含め各種対策が実施されていくこととなるが、その効果について筆者なりに考察してみたい。輸入検疫（水際措置）については、雑草（種子）が規制対象となることにより、牧草や飼料穀物の輸出国に輸出検疫の実施が義務づけられる。これにより、混入した雑草種子が我が国に入り込むリスクは確実に減少するだろう。もちろん、水際の混入雑草種子の検査はこれまで実施したことがないため、前述のリスク分析手法の早急な開発が必要となるが、この点については、既に実施している国の事例も参考にしつつ進めて欲しい。国内防除については、病害虫防除と雑草防除が一体的に実施されることとなり、そのために必要な都道府県における体制の整備が促され、これにより現場でより効果的かつ効果的な指導・対策が可能になるだろう。

今回の「中間論点整理」は、今後の雑草防除対策に向けた大きな第 1 歩になるものと筆者は確信している。新たな時代を迎えることとなる雑草防除に対する貴協会会員をはじめとした関係者の一層のご支援・ご協力を切に期待したい。

日本のコムギの倒伏抵抗性と強稈性

農研機構中日本農業研究センター
転換畑研究領域
松山 宏美

はじめに

コムギやイネは、倒伏すると受光態勢が悪化して光合成量が減退し、通導道組織が破壊されて転流が阻害され、収量と子実品質が低下する(図-1)。多肥栽培をすると倒伏しやすくなるため、増収には倒伏抵抗性の向上が不可欠である。

コムギの倒伏は、クロルメコート剤、エテホン剤などの植物成長調整剤による節間伸長の抑制によって防ぐことができる。世界的なコムギの多収地域ではクロルメコート剤の使用が広く普及し、稈長 1m 以上になる長稈品種を葉剤で短稈化させることで倒伏抵抗性を高め、多肥栽培を行っている(図-2)



図-1 倒伏したコムギの様子(上:茨城県つくば市, 下:茨城県桜川市)



図-2 ニュージーランド農家園場で観察した飼料用多収コムギの開花期頃の様子 2012年12月撮影。クロルメコート剤を2回、トリネキサバックエチル剤を1回散布しており、稈長は約70cmであった。

(松山 2013; 渡邊 2014)。日本では、北海道のコムギ作の一部で使用されているものの、本州以西には普及しておらず、現状では、植物成長調整剤の使用以外の方法で倒伏抵抗性を確保する必要がある。

欧米のコムギ作における倒伏は、稈が曲がって折れる Stem lodging と、真っ直ぐな稈が傾き根元から倒伏が起る Root lodging の二つに分類される(Pinthus 1973)。対して日本では、稈が折れる挫折型倒伏、稈が曲がる湾曲型倒伏、根系が関与し根元から倒伏

が起こる転び型倒伏の三つに分類している(図-3)。日本のコムギでは、登熟期に穂が風雨にあたることにより重みを増し稈が曲がって戻らなくなる湾曲型倒伏が多く発生し(江口 2001)、倒伏抵抗性には稈の長さだけでなく強度も関係すると考えられる。

日本の近年のコムギ品種も含めた品種群を対象とした倒伏抵抗性や強稈性に関する研究は、ほとんど行われていない。本稿では、コムギの多収化のため、強稈性に着目した倒伏抵抗性に関する育種および栽培学的な研究を紹介する。

1. 「日本のコムギコアコレクション」の倒伏抵抗性と強稈性

(1) これまでの品種育成における倒伏抵抗性と強稈性の変化

「日本のコムギコアコレクション」は、膨大な数の遺伝資源の中から日本のコムギの遺伝的変異を幅広く反映するように選定された品種のセットで、国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 遺伝資源研究センターの農業生物資源ジーンバンクに保存されている。このセットのうち 94

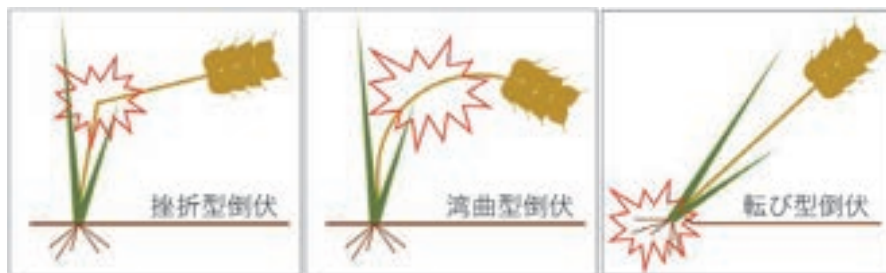


図-3 倒伏の種類

品種・系統を茨城県つくば市の圃場で2年間栽培し、倒伏の発生状況や強稈性を調査した。

倒伏抵抗性に関わる稈長と稈基部の挫折時モーメント（折れ曲がりに抵抗する強さを示す）の変化を検討したところ、1976年以降に成立した品種の中には稈長100 cmを超える長稈の品種はなかった一方で、稈基部の挫折時モーメントはいずれの年代でもほぼ変わらないばらつきがあった（図-4）。稈長は品種育成の過程で必ず調査される形質である上、達観でも判断できるが、強稈関連形質は達観では判断しにくい。また、強稈性は稈の太さや稈壁の厚さ、かたさなど、複数の形質の影響を受けるため、倒伏抵抗性育種の過程では単一遺伝子で決定される短稈化が進み、強稈化はあまり進まなかったものと考えられる。

短稈化に関与する遺伝子は収量性にも影響し、減収を引き起こす可能性が高い（柏木ら 2007）。草丈が低いと葉面積密度が増加し、CO₂および水蒸気の拡散効率が減少して群落光合成が低下する（黒田ら 1989）。コムギの育成品種は、40年程前から80 cm～85 cmの短稈品種になっており、近年では、収量性の観点から短稈化が限界を迎えている可能性がある。

(2) 倒伏抵抗性と強稈性の関係

試験に供試した「日本のコムギコレクション」94品種・系統のうち、2年とも倒伏した57品種・系統を稈長の大小によって3グループに分け、

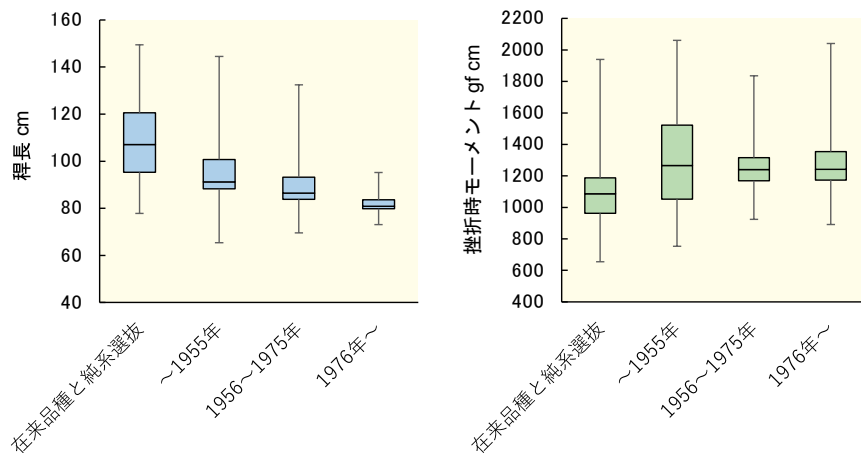


図-4 品種・系統の成立時期別の稈長および稈基部の挫折時モーメントの箱ひげ図
「日本のコムギコレクション」に含まれる94品種・系統の2年の栽培の平均値を元に作図。稈基部の挫折時モーメントは、支点間距離4 cmの支点上に切り出した節間を置き、中央部に8.3 mm 秒⁻¹の速度で荷重を加えて得られた最大応力として読み取った。

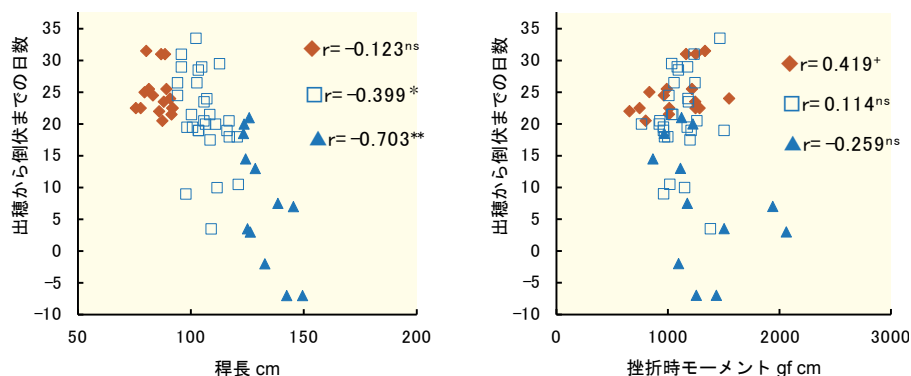


図-5 稈長および稈基部の挫折時モーメントと出穂から倒伏までの日数の関係
「日本のコムギコレクション」に含まれる94品種・系統のうち2年とも倒伏した57品種・系統の2年の平均値。◆は稈長93.4 cm未満の短稈グループ、□は稈長93.4 cm以上121.5 cm未満の中稈グループ、▲は稈長121.5 cm以上の長稈グループの値を示す。rは相関係数。図中の**は1%水準、*は5%水準、+は10%水準で相関係数が有意であることを示し、nsは有意でないことを示す。

各形質と出穂から倒伏までの日数の関係を検討した。グループの分け方は、94品種・系統の稈長の値の最小値（「小麦農林10号」の65.4 cm）と最大値（「札幌春小麦」の149.5 cm）の間を等しい長さの3区間に区切り、稈長93.4 cm未満の品種を短稈グループ、稈長93.4 cm以上121.5 cm未満の品種を中稈グループ、稈長121.5 cm以上の品種を長稈グループとした。中稈および長稈グループでは、稈長と出穂から倒伏までの日数の間に有意な負

の関係があったが、短稈グループでは、稈長と出穂から倒伏までの日数に関係はなく、稈基部の挫折時モーメントが小さいほど倒伏までの日数が短かった（図-5）（松山ら 2014）。短稈な品種群では稈基部が脆弱なほど倒伏抵抗性が低く、短稈品種の倒伏抵抗性をさらに向上させるためには強稈化が有効である。

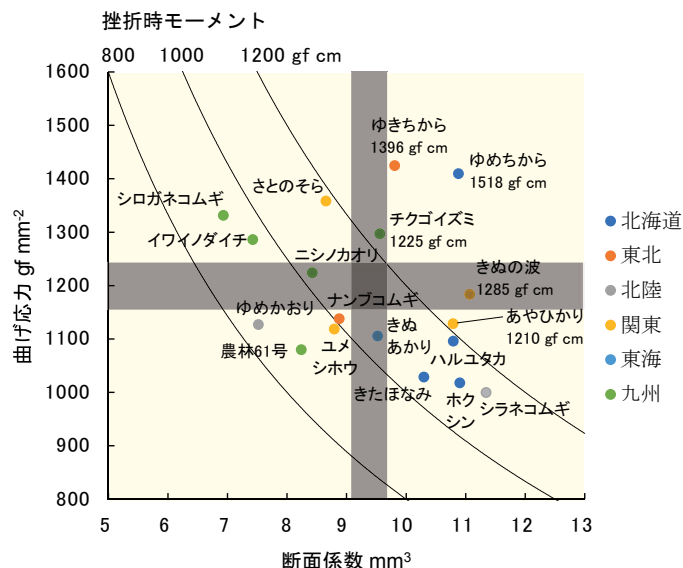


図-6 現在主力として栽培されている 18 品種の稈基部の断面係数と曲げ応力
2 年の栽培の平均値。灰色の範囲は 18 品種の平均値 ± 標準誤差の範囲。断面係数は節間の横断面を中空楕円とみなして形状を測定し算出した。曲げ応力は挫折時モーメントを断面係数で除した値として求めた。

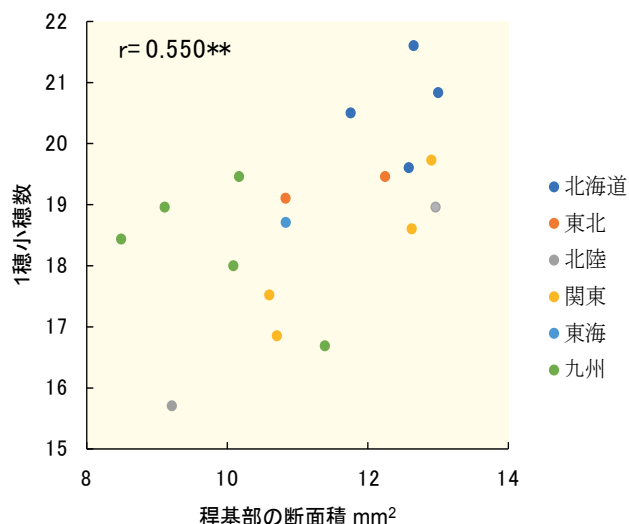


図-7 現在主力として栽培されている 18 品種の稈基部横断面の断面係数と 1 穂小穂数
2 年の栽培の平均値。r は相関係数で、** は 1% 水準で相関係数が有意であることを示す。

2. 近年の代表的なコムギ品種の強稈性

(1) 品種ごとの強稈性の特徴

強稈化は明確には進んでおらず、現在主力品種として栽培されている品種の中には稈が強いものも弱いものもある。最近育成された品種を含む近年の代表的なコムギ 18 品種について、稈の折れ曲がりに抵抗する強さを示す挫折時モーメントに加え、横断面の形状で決まる強さの値である断面係数を測定し、挫折時モーメントを断面係数で除した値として曲げ応力を算出し、比較した。

北海道で 2010 年に育成された「ゆめちから」は、稈基部の挫折時モーメントが大きく、比較に用いた 18 品種中で最も強稈であった (図-6) (松山ら 2020)。また、強稈である品種のうち、「ゆきちから」および「チクゴイズミ」は、曲げ応力は大きく断面係数は中程度であった一方で、「きぬの

波」および「あやひかり」は、曲げ応力は中程度で断面係数は大きい特徴を持ち、挫折時モーメントが大きい要因は異なった。

極強稈の水稲多収品種「リーフスター」(加藤ら 2010) は、親である「中国 117 号」の断面係数が大きい形質と「コシヒカリ」の曲げ応力が大きい形質を引き継いでいるとされている (大川・石原 1997)。コムギにおいても、異なった特徴を持つ強稈品種間で交配することによって、これまでの品種以上に倒伏抵抗性の大きい形質を付与できるかもしれない。稈の物理的な形質を測定して品種・系統の強稈性の特徴を明らかにすることで、強稈化によって倒伏抵抗性を強化した品種の育成を、効率的に行える可能性がある。

(2) 強稈性と収量性

18 品種の稈基部の横断面の断面係数と 1 穂小穂数の間には、有意な正の関係があった (図-7)。水稲の染色体断片置換系統群を用いて同定された強い稈の量的形質遺伝子座 SCM2 は、穂

構造を制御することが報告されている遺伝子 *APO1* と同一であり、この遺伝子の多面発現によって茎の強度が高まり、籾数も増加することが明らかになっている (Ookawa *et al.* 2010)。コムギでも同様の制御が存在する可能性が考えられ、コムギの品種育成におけるシンク能の強化と強稈化は相反しない可能性が示された。

また、断面係数と 1 穂小穂数には同じ傾向の育成地域間差がみられ、コムギの主要な産地である北海道、関東、九州の品種を比べると、北海道の品種の稈基部の断面係数と 1 穂小穂数は大きく、関東の品種は中間、九州の品種は小さい範囲にあった。同じ育成地で作られた品種は、同じ環境で選抜され、共通の交配親を持つことも多いため、ある程度共通の特徴を持っている。例えば、北海道では株の閉じた品種、九州では株の開いた品種が多く、株の開閉のような草型は、分けつの消長と関係している。水稲では、有効茎歩合が高い生育をした場合、押し倒し抵抗値が顕著に大きく、倒伏抵抗性に寄与す

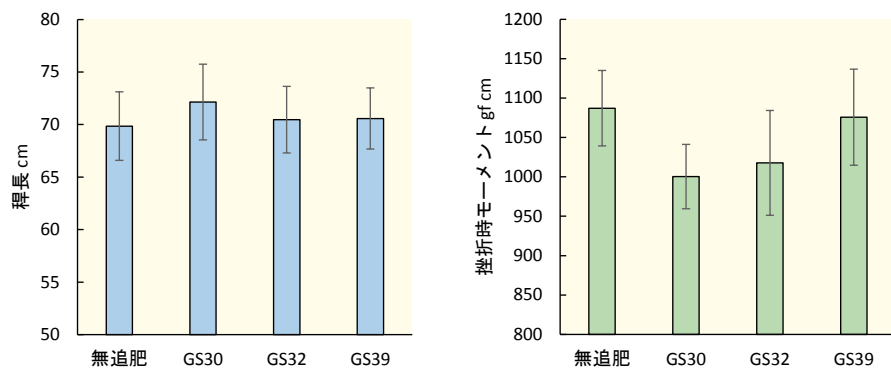


図-8 窒素追肥の施用時期が稈長と稈基部の挫折時モーメントに及ぼす影響
供試品種は「あやひかり」と「イワイノダイチ」。稈長は2年の栽培の平均値、挫折時モーメントは1年の栽培の値。GSはZadoksの成長スケール(Growth Stage)で、GS30は茎基部(第1葉の付け根)から幼穂の先端までが1cm以上になった時期、GS32は第2節間2cm以上かつ第3節間2cm未満の時期、GS39は止葉展開期にあたる。

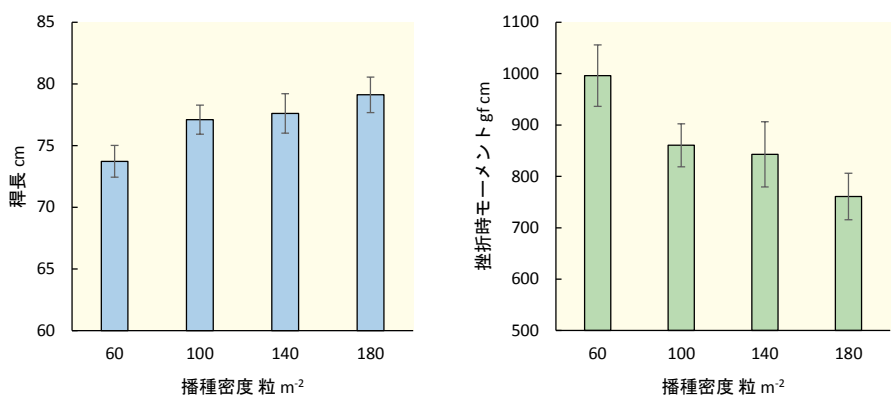


図-9 播種密度が稈長と稈基部の挫折時モーメントに及ぼす影響
供試品種は「あやひかり」と「イワイノダイチ」。2年の栽培の平均値。栽培試験を行った関東の慣行の播種量はm²あたり180～200粒。

る稈の形質が優れるという報告がある(吉永ら 2001)。草型と関連した分けつ特性を介して、強稈関連形質が地域ごとに異なる傾向を持つ可能性が考えられる。

3. 栽培管理がコムギの倒伏抵抗性と強稈性に及ぼす影響

(1) 窒素追肥

増収には窒素追肥が不可欠だが、追肥窒素量が多くなると稈長は長くなり、稈強度は低下し、倒伏しやすくなる(Crook and Ennos 1995; 倉井ら 1998; Berry *et al.* 2000)。窒素追肥の施用時期を変化させた栽培試験を

行って倒伏抵抗性と強稈性への影響を調査したところ、GS30 (GS: ZadoksのGrowth Stage, GS30は茎基部から幼穂の先端までが1cm以上になった時期) からGS32(第2節間2cm以上かつ第3節間2cm未満の時期)の追肥は稈基部の挫折時モーメントを低下させ、倒伏抵抗性を低下させることが明らかになった(図-8)。加えて、GS30の追肥では稈長の増大も見られたため、窒素追肥は茎立期以前より以降に施用した方が、倒伏抵抗性の観点からは有利である(Matsuyama *et al.* 2021)。

しかしながら、多収を狙った栽培の場合、多量の窒素をコムギ作物体に吸収させるために分施を行う必要があ

り、茎立期周辺で複数回の窒素追肥を行うことは避けられない。倒伏抵抗性の高い強稈品種を活用し、施肥管理以外の栽培管理によってその品種の倒伏抵抗性を最大限に利用することが望ましい。

(2) 播種密度

施肥と並んで重要な栽培技術である播種について、播種密度がコムギの収量と倒伏抵抗性および強稈性に及ぼす影響を検討した。播種密度が低いほど稈長は短く、稈基部の挫折時モーメントは大きく、倒伏抵抗性が高かった(図-9)。なお、この栽培試験では、播種密度が低いほどm²あたり穂数が少なかったが1穂粒数が多く、収量は播種密度が低い区でやや多かった。従って、収量性と倒伏抵抗性を両立する方法として播種密度の抑制が有効と推測される(Matsuyama *et al.* 2019)。

強稈で倒伏抵抗性が高い品種を選択し、播種密度を抑制して強稈性と倒伏抵抗性を向上させることは、コムギの倒伏抵抗性と多収性を両立する栽培技術になり得ると考えられる。

おわりに

「緑の革命」では、半矮性遺伝子 *Rht1*, *Rht2* を持つ「小麦農林10号」を用いた交配で、多肥栽培が可能な短稈品種が開発され、コムギの大量増産が可能になった。これまでの日本のコムギ品種育成においても、倒伏抵抗性

の向上は主に短稈品種の開発によって達成されてきており、近年の育成品種のほとんどは *Rht1* か *Rht2* のいずれかを持つ短稈品種である (小島ら 2017)。しかしながら、短稈品種でも単収 600 kg 程度になると倒伏する場合があります、これまで以上の多収を狙うには倒伏抵抗性を強化する必要がある。

加えて、コムギの多収地域であるイギリス、ドイツおよびニュージーランドの多収コムギ品種は、1 穂粒数と千粒重が大きい穂重型に改良されている (松山 2013; 渡邊 2014)。日本の水稻育種においても近年、業務・加工用や飼料用の穂重型多収品種が数多く開発されており、多収コムギ品種も穂重型の方向へ育成される可能性がある。穂重型の品種は地上部モーメントが大きく倒れやすいため、より高い倒伏抵抗性を備えていなければならない。

これまでの研究から、日本のコムギの強稈性には大きな品種間差があり、強稈性の特徴にもバリエーションがあることが分かった。異なった特徴の強稈性を持つ品種間で交配することによって、これまでの品種以上に倒伏抵抗性の大きい形質を付与した多収コムギ品種の育成が可能と考えられる。そのためには、まず、育種素材となり得る品種・系統の稈の物理的な形質を測定して、強稈性の特徴を明らかにする必要がある。

また、イネでは量的形質遺伝子座 (QTL) 解析により、異なる生態型の品種に由来する強稈遺伝子 *APOL/SCM2*, *FCI/SCM3* が同定され、コシヒカリに

集積することによって強稈化することが明らかにされている (Ookawa *et al.* 2010; Yano *et al.* 2015)。今後コムギでも、遺伝解析集団を用いた QTL 解析やゲノムワイド関連解析 (GWAS) を通じて、強稈 QTL とその原因遺伝子の同定や、イネで同定されている稈や穂の形態形成の遺伝子のオーソログの発見が進み、コムギ品種の倒伏抵抗性と収量性の改良が飛躍的に進むことが期待される。

また、栽培試験の結果から、播種密度の抑制によってコムギの強稈性と倒伏抵抗性が向上することが示された。先進的な多収栽培を行う北海道の一部のコムギ農家は、倒伏を防ぐために、植物成長調整剤を用いた短稈化のほか、播種量や施肥体系の最適化による茎数の管理など、コストと労力をかけた栽培管理を既に行っている (高橋 2017)。水稻裏作である本州以西のコムギ作では、湿害の発生による苗立ち不足を懸念して播種密度は高めに設定されることが多かったが、近年では、水田における長期畑輪作や排水対策など、苗立ちの安定化に寄与する技術が普及してきている。本州以西においても、播種密度の抑制による倒伏抵抗性と収量性を両立させた多収栽培技術の開発・普及が望まれる。

謝 辞

本稿は、日本作物学会第 25 回研究奨励賞を受けた研究内容の一部をまとめたものです。研究の遂行にあたっては、農林水産・食品産業技術振興協会

渡邊好昭博士、東京農工大学大学院農学研究大学院 大川泰一郎先生に、懇切丁寧なご指導を頂きました。ここに記して、心から感謝いたします。

引用文献

- Berry, P.M. *et al.* 2000. Controlling plant form through husbandry to minimise lodging in wheat. *Field Crops Research*, 67, 59-81.
- Crook, M.J. and A.R. Ennos 1995. The effect of nitrogen and growth regulators on stem and root characteristics associated with lodging in two cultivars of winter wheat. *Journal of Experimental Botany* 46, 931-938.
- 江口久夫 2001. 倒伏の原因と対策. 転作全書 第一巻 ムギ. 農文協, 東京. pp.295-299.
- 柏木孝幸ら 2007. イネの湾曲型倒伏に対する抵抗性の付与. *日作紀* 76, 1-9.
- 加藤浩ら 2010. 稲発酵粗飼料向け茎葉多収型水稻品種「リーフスター」の育成. *作物研報* 11, 1-15.
- 小島久代ら 2017. 「日本のコムギコアコレクション」の作成と評価. *農研機構報告 作物開発センター* 1. 1-13.
- 倉井耕一ら 1998. 小麦の追肥による生育パターンの変化と追肥技術への応用. *栃木農試研報* 47, 1-12.
- 黒田栄喜ら 1989. 草高の異なる水稻品種の乾物生産の相違とその要因の解析, とくに個体群内におけるガス拡散に着目して. *日作紀* 58, 374-382.
- 松山宏美 2013. 麦類の収量性向上に向けた今後の研究展開 ニュージーランドにおける多収小麦の現状調査 各論: 栽培. *NARO 研究戦略レポート* 4, 111-115.
- 松山宏美ら 2014. コムギの耐倒伏性の品種間差とその要因. *日作紀* 83, 136-142.
- 松山宏美ら 2020. 近年育成された品種を含む代表的なコムギ品種の倒伏抵抗性および強稈関連形質の相違とその要因. *日作紀* 89, 119-125.
- Matsuyama, H. and T. Ookawa 2021.

- Effects of Timing of Supplemental Nitrogen Application on Lodging Resistance and Yield of Wheat (*Triticum aestivum* L.). Japanese J. of Farm Work Research 51, 17-27.
- Matsuyama, H. and T. Ookawa 2019. The Effects of seeding rate on yield, lodging resistance and culm strength in wheat, Plant Production Science (DOI:10.1080/1343943X.2019.1702469).
- 大川泰一郎・石原邦 1997. 水稻の稈基部の挫折強度形質の遺伝的特徴—コシヒカリと中国 117 号との交配 F1 ~ F3 を用いて—, 日作紀 66, 603-609.
- Ookawa, T. *et al.* 2010. New approach for rice improvement using a pleiotropic QTL gene for lodging resistance and yield. Nature Communications 1, 132-143.
- Pinthus, M.J. 1973. Lodging in wheat, barley, and oats : The phenomenon, its causes, and preventive measures. Adv. Agron. 25, 209-263.
- 高橋義雄 2017. 小麦 1 トンどり 薄まき・しっかり出芽 太茎でくず麦をなくす. 農山漁村文化協会, 東京. pp.97-99.
- 渡邊和洋 2014. ヨーロッパにおける多収小麦の現状報告 4. 各論:栽培, NARO 研究戦略レポート 5, 23-33.
- Yano K. *et al.* 2015. Isolation of a novel lodging resistance QTL gene involved in strigolactone signaling and its pyramiding with a QTL gene involved in another mechanism. Molecular Plant 8, 303-314.
- 吉永悟志ら 2001. 打込み式代かき同時土中点播栽培による湛水直播水稻の耐倒伏性向上—播種様式及び苗立ち密度が耐倒伏性に及ぼす影響—, 日作紀 70, 186-193.

田畑の草種

昼顔 (ヒルガオ)

ヒルガオ科ヒルガオ属のつる性多年草。全国の陽当たりのいい野原や道端、線路際や空き地などに普通。周りの草やフェンスに巻き付くと背高く伸びる。葉は互生し鉞型〜矢尻型。葉腋から長い花柄を出し淡紅色〜白紅色の花をつける。普通結実せず地下茎で増える。

日本原産の在来種である。

真夏の昼間から、直径 5 ~ 6cm の薄紅色のロート状の花をつけるのであるから、古来、目立たないはずはなかった。地下茎は食用になるので、縄文人や弥生人たちもその花を目印に利用していたと考えられる。

その後万葉仮名が使われるようになると、その目立って美しい「昼顔」が記載されだした。美しい花という意味で「容花」と呼ばれ、万葉集に恋の歌として 4 首詠われている。しかし遣唐使が中国から「朝顔」を持ち帰ると、「容花」は「朝顔」へと移っていく。同じころ、ウリ科ではあるが同じような花を咲かせる「夕顔」も「朝顔」の対として平安貴族たちに愛されるようになる。清少納言は枕草子の「草の花は」で「朝顔」、「夕顔」を取り上げ、紫式部は源氏物語の中に「夕顔」や「朝顔の姫君」を登場させる。

(公財)日本植物調節剤研究協会
兵庫試験地 須藤 健一

朝の早いうちから咲き始め、昼前には萎んでしまう朝顔、同じように夕方に咲き始め翌日の午前中には萎んでしまう「夕顔」。平安貴族たちはそれらの艶やかな一日花に儚さを重ね合わせた。

平安期以降、「朝顔」「夕顔」を詠った歌は多い。しかし「昼顔」は、となると近代まで待たねばならない。

大正期の歌人木下利玄にこんな歌があった。

真昼野に昼顔咲けりまじまじと

待つものもなき昼顔の花 (1914 年『銀』)

爽やかな朝の「朝顔」、暮れ泥む夏の夕べの「夕顔」と違って「昼顔」には真っ青な空と灼熱の太陽が似合う。こんな情景である。

真夏の炎天下、灼熱の太陽を浴びながら自転車走らせる。道幅は自転車同士がお互いに走りながらすれ違えるほど。ペダルを踏む青年の額に汗が沁る。昼下がりで誰もいない。左手には生け垣が、右手には長い間手入れもされていないで草生した公園。子供たちが走り回っているのだろうか公園の草はあちこちで踏みつけられている。公園の片隅に小さな花壇。その花壇に並ぶようにして 5cm ほどのピンク色の花が咲き誇る。ヒルガオである。

ハナスベリヒユの花の開閉とトランスクリプトーム解析

東京大学大学院農学生命科学研究科
名誉教授

柴田 道夫

1. ハナスベリヒユとは？

ハナスベリヒユ (*Portulaca umbraticola*) が含まれる *Portulaca* 属植物は熱帯、亜熱帯を中心に世界中に約 100 種が分布するとされている (Ocampo and Columbus 2012)。同属のマツバボタン (*P. grandiflora*) に「ヒデリソウ (日照り草)」や「ツメキリソウ (爪切り草)」といった別名があるように、ハナスベリヒユも真夏の強光、高温、乾燥条件下でも生育できる強健な性質を有しており、爪で茎の先を切って土に挿すだけで簡単に発根できる。このような *Portulaca* 属の特性は、 C_4 植物であることに加え、極端な乾燥条件下においては CAM 植物に変化できることが関係している。また花の寿命が一日しかない一日花であるにもかかわらず、毎日次々と花を咲かせ続けることから、花壇用苗物としての適性も有している。松のような細い葉をもつマツバボタンに対し、へら形の葉をもつハナスベリヒユは、より生育が旺盛で花壇の被覆性に優れており、近年、夏場の花壇用としての利用が進んできてい



図-1 ハナスベリヒユ (左) とスベリヒユ (右)

る (図-1)。

ハナスベリヒユは、我が国では当初、スベリヒユ (*P. oleracea*) (柴田 1984) あるいはその変種 (柴田 1989) やマツバボタンとスベリヒユとの雑種 (Skirvin *et al.* 1982) などと記載されていた。1984 年出版の花卉園芸大事典 (養賢堂) では、八重複色品種が図版で示され、学名としては *P. oleracea* var. *granatus* が与えられ、また、1989 年出版の園芸植物大事典 (小学館) では、学名は *P. oleracea* var. *sativa* とされ、「1982 年にアメリカで発売の観賞用のワイルドファイヤーは、花径 2.5cm の一重咲きで、黄、桃、鮭肉などの花色をもち 70cm に広がるという。これとは別に八重と一重咲きで結実せず、芽増殖する園芸品種もある。」と記載されている。筆者は 1990 年頃にハナスベリヒユの正体を明らかにするために、我が国に普及しつつあった栄養繁殖系の 11 種類の一重および八重系統の染色体数を調べたところ、すべてが $2n=18$ の二倍体であり、少なくとも六倍体とされるスベリヒユではないことを確認できたものの種名については依然不明のまま



図-2 ハナスベリヒユの染色体 (白一重系統, $2n=18$, 柴田 1991)

あった (図-2, 柴田 1991)。

2012 年以降に改めてハナスベリヒユの品種・系統を収集し直すとともに、その学名について調べ直してみたところ、アメリカのノースキャロライナ大学の Matthews (1992) がアメリカ南西部に分布する *P. umbraticola* およびその 2 つの変種について記載しており、二倍体の *P. umbraticola* については 1823 年に初めて南米のベネズエラで報告された種と同一であるとの報告があった。その文献の中で、1982 ~ 83 年に種苗会社の Pan American 社により、白色、黄色、オレンジ色、珊瑚色、赤色で、それぞれの色の濃淡の変異をもつ種子繁殖性の園芸品種 'Wildfire Mixed' が導入されたとの前述の園芸植物大事典とほぼ同様の記載があった。また、Matthews は *Flora of North America* (2003) において、*P. umbraticola* は蒴果に翼がある点および種子の星形の表面突起の形が異なる点で、スベリヒユやマツバボタンと区別できることを報告していた。そこで、筆者は収集した品種・系統を調べたところ、すべて翼がある蒴果を有していること (図-3)、また、多くの品種・系統を栽培する中、偶発的に結実して得られた種子の表面構造を調べたところ、尖った星形の突起構造を示し、スベリヒユの丸みを帯びた星形の突起構造とは明らかに異なることを確認した (図-4)。さらに、2012 年には Ocampo と Columbus が *Portulaca* 属植物に関する分子系統および染色体の進化について報告してお



図-3 ハナスベリヒユに特徴的な朔果の翼
(柴田・間 2013)

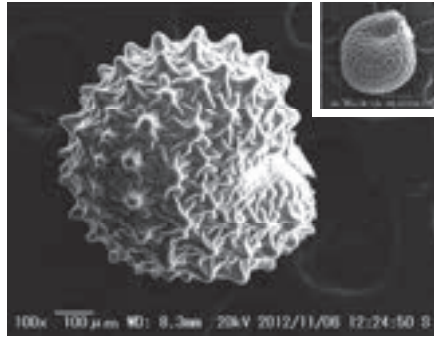


図-4 ハナスベリヒユに特徴的な種子表面の
星状突起 (右上はスベリヒユの種子表
面) 柴田・間 2013

り、その中で *Portulaca* 属は African-Asian, Australian, Oleracea, Umbraticola および Pilosa の 5 つの clade に分かれ、ハナスベリヒユは Oleracea clade に属するスベリヒユとも、Pilosa clade に属するマツバボタンとも異なる植物であることが判明した。以上のようなことから、筆者はハナスベリヒユの学名は *P.umbraticola* Kunth とすることが妥当であることを 2013 年の平成 25 年度園芸学会春季大会で示した。なお、ハナスベリヒユは通称名で正式な和名ではなく、正確には「いわゆるハナスベリヒユ」と記載すべきであるが、本稿では通称名を使用させていただく。

2. 我が国で進められたハナスベリヒユの品種改良

ハナスベリヒユについては当初我が国への導入経過が明らかでなかった。最初に普及が進んださまざまな花色の一重品種は、ほとんど結実せず挿し芽繁殖されていたが、まれに花色変異が出現することから枝変わりによるものではないかと推測された。また、文献に登場する ‘Wildfire Mixed’ は種子繁殖性品種で、かつ花径が 2.5cm あまりとの記載から、やや大輪である栄養繁殖性品種とは異なると考えられた。その後、これらの栄養繁殖性品種は肥土邦彦氏が 1983 年にドイツ経由

で日本に導入したこと（これらの育成経過は依然不明のまま）、肥土氏の導入した材料を元に鹿児島県の育種家、松木園裕美氏が改良を進め、ゆうびシリーズと名付けた大輪、複色、八重、葉の斑入りなどの多くの新品種が育成され、我が国におけるハナスベリヒユの育種が進んだことが明らかになってきた。筆者は肥土氏による導入品種、松木園氏育成の新品種を中心に、フローサイトメーターを用いて倍数性を調べた結果、ほとんどの品種は二倍体と判定されたのに対し、松木園氏育成の大輪の品種の中に三倍体、四倍体が見いだされた (マグヴラ 2013)。松木園氏により倍数性育種が進められたことも明らかになった。なお、本報告の中で二倍体のハナスベリヒユよりも六倍体とされるスベリヒユの核 DNA 量がやや小さかったことから、ハナスベリヒユとスベリヒユが全く別の植物種であることが改めて確認されている。松木園氏育成の品種については品種登録はされていないが、現在、農林水産省の品種登録のページでみると、植物名スベリヒユとしてこれまでの 35 品種の登録および出願 (令和 3 年 8 月 15 日現在) がなされており、近年品種育成がさかんに行われていることが理解できる。

3. ハナスベリヒユの花の開閉

ハナスベリヒユは早朝に開花し、午後になると閉花する一日花である。花壇用花きとして優れているハナスベリヒユではあるが、マツバボタンが正午近くになると花を閉じ始めることから eleven o'clock (11 時) と呼ばれているように、同様に夕方まで咲き続けてくれない点は花壇苗として大きな欠点となっている。1990 年ころ、農林水産省野菜・茶業試験場の須藤憲一氏はハナスベリヒユが主に訪花昆虫による受粉のために閉花するのではと考え、ハナスベリヒユの花壇を防虫網で覆い昆虫の訪花を防いだところ、夕方まで咲き続けることを見いだした。次いで、Ichimura と Suto (1992) はハナスベリヒユの花がエチレン感受性であり、授粉やおしべへの刺激が閉花時間に大きく影響することを報告し、さらにハナスベリヒユの開花には光と温度が不可欠であり、十分に花卉が展開するには光照射と 25℃以上の高温が必要なことを明らかにした。

2012 年我が国の種苗会社サカタのタネから、夕方まで咲き続ける新品種サンちゅうらかシリーズが発売された (菅野 2012)。ハナスベリヒユとしては画期的な初めての終日開花性品種の出現である。図-5 に筆者らが実際に

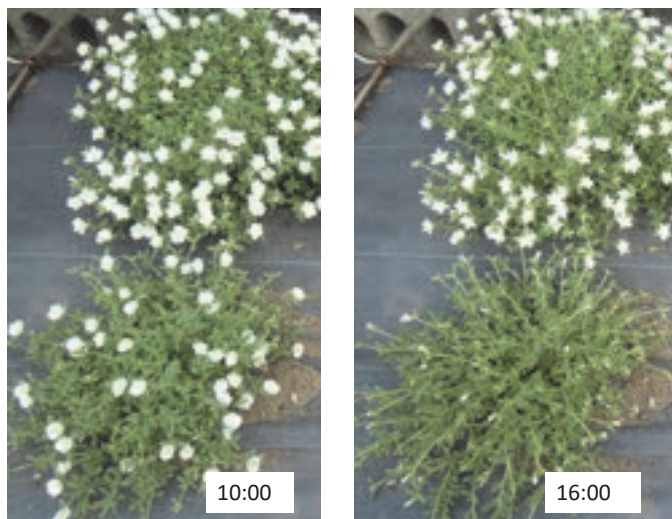


図-5 従来系統と終日開花性品種の相違
(上はサンちゅらかホワイト、下は一重白)

サンちゅらか品種と在来品種とを比較栽培した例を示したが、在来品種では16時には完全に花が閉じてしまっているものの、サンちゅらか系品種では咲き続けている様子が理解できる。筆者らはこの違いについて詳細に調べたところ、サンちゅらか系品種は在来品種と比べて開花してから閉花するまでの時間が明らかに長く、花糸の切除や受粉刺激によって閉花は早まるものの在来品種よりは長く咲き続けることが明らかになった。また、自然老化時のエチレン生成についても、サンちゅらか系品種ではエチレン生成が遅れて起こりかつ少量であることがわかった(図-6 Maguvu *et al.* 2016)。従来品種に比べて約3倍の優れた花持ち性を有するカーネーション新品種においては、花弁老化時の雌蕊および花弁からエチレン生成がほとんど起こらないとの報告があり(小野崎ら 2006)、一日花であるハナスベリヒユにおいても同様に花弁老化時にエチレン生成が抑えられることにより閉花時間が遅くなっている可能性が考えられた。

一方、前述したようにハナスベリヒユの開花速度には光と温度が関わっていることが報告されているが、毎朝ほぼ同調して起こる開花リズムを制御す

る内的要因についてはほとんど知見がなかった。筆者らは、タイムラプス撮影の手法を用いて、鉢栽培したハナスベリヒユの株全体の開花リズムに及ぼす光周期および光質の影響を調べた。その結果、24時間連続した白色光の照射条件下では、開花は急速に起こり、ほとんどの花が満開となったのに対して、連続暗期条件下では、開花初期までは光照射下と同様に進行したものの、その後の開花の進行はゆっくりと進み、ほとんどの花が満開には達しなかった(図-7 A)。一方、連続暗期条件下では約24時間周期の開花リズムが3日間にわたり観察され、鉢内における開花は強く同調していた。対照的に、連続した白色光および赤色光照射下では、2日間にわたり21～22時間周期の弱い開花リズムが観察されたが、3日目になると開花リズムはほぼ失われた。また、異なる日長条件下(20, 16, 12, 8および4時間)では、明期の時間が長くなるにつれ開花時刻が早まる傾向が認められた(図-7 B)。野外での開花状況をみると、曇天下では満開には至らずに閉花時間が遅くなる傾向があること、また、秋になって日長時間が短くなると開花時間が遅くなり、その結果、閉花時間も遅くなる

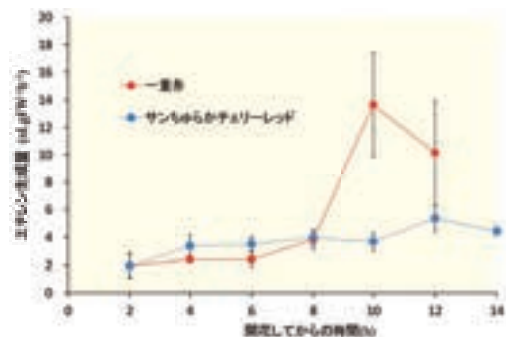


図-6 ハナスベリヒユの花からのエチレン生成 (●: 在来系統, ●: 終日開花性品種)

傾向があることが観察される。このことは光周性がハナスベリヒユの開花リズムに関わっていることを示唆していると考えられた。

これまでにハナスベリヒユのような花壇用花きでは積極的な開花調節はほとんど行われていない。しかし、開花株を一旦適切な日長下で管理した上でタイミングよく光照射および昇温を行うことで、ハナスベリヒユを夕方や夜間などの任意の時刻に咲かせることができる。特殊な利用方法であるが、イベントなどで活用できる可能性がある。

4. ハナスベリヒユのトランスクリプトーム解析と開花および閉花関連遺伝子の発現解析

シロイヌナズナではエチレン関連遺伝子や開花関連遺伝子の解析が進んでいるものの、ハナスベリヒユについてはゲノム情報がほとんど整備されていない。イギリスのキュー植物園が提供している植物ゲノムデータベース(Leitch *et al.* 2019)によれば、スベリヒユのゲノムサイズがシロイヌナズナのほぼ10倍であることがわかる。前述したように二倍体であるハナスベリヒユは六倍体であるスベリヒユよりもやや大きなゲノムサイズであると推測されることからおよそ1Gb程度と思われる。

筆者らはこの度ハナスベリヒユとし

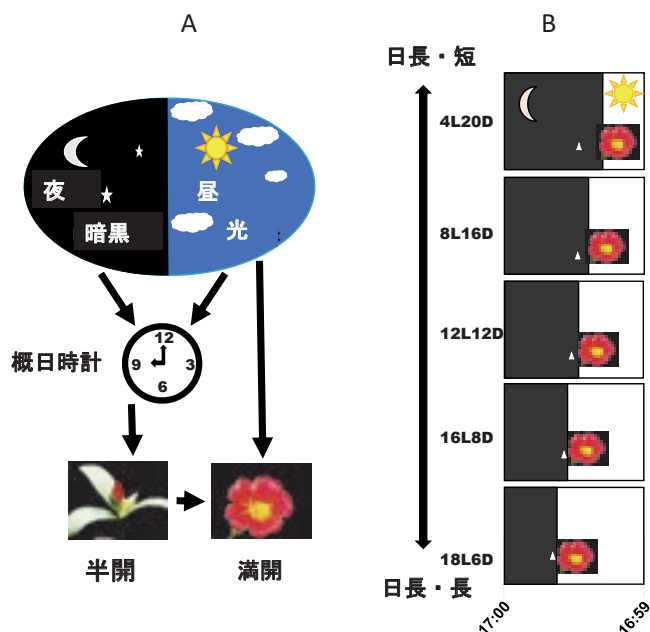


図-7 ハナスベリヒユの開花への光の関わり
(A：半開および満開の必要条件, B：日長の影響)

て最も一般的と考えられる栄養繁殖性品種である赤一重を材料とし、花の開閉に関与する遺伝子のトランスクリプトーム解析を行った (Maguvu *et al.* 2021)。開花関連遺伝子の解析を目的に朝晩の葉における RNA を抽出、また、エチレン関連遺伝子の解析を目的に満開時および閉花開始時の花における RNA を抽出し、次世代シーケンサー (Illumina 社 HiSeq4000) により RNA-seq 解析を行った。その結果、シーケンス解析により 22.15Gb の塩基配列を取得、*de novo* アセンブリングの結果、68,928 個の unigene と 43,880 の CDS を取得することができた。10,784 の unigene 上に 13,603 の SSR を検出できたほか、1,444 の転写因子の存在が予測できている。ハナスベリヒユと同じくナデシコ目に含まれるカーネーションでは既に全ゲノム解読が報告されており、ゲノムサイズが 613Mb、予測遺伝子が 43,266 とされているので、カーネーションと同等かそれ以上の遺伝子を有しているものと推測される (Yagi *et al.* 2014)。

さらに、花卉老化や開花リズムに関連する遺伝子の探索を行った結果、シロイヌナズナで同定されているエチレン合成、受容体、および情報伝達関連遺伝子、ならびに概日時計関連遺伝子の大部分を同定することができた (表-1)。概日時計関連遺伝子として、*ZTL* について 2 種類の遺伝子が同定された点がシロイヌナズナと異なっているが、これは同じナデシコ目に属し多肉植物であるマツバギクと同様である点は興味深い。エチレン生合成系の *PuACSI* (ACC 合成酵素遺伝子) と *PuACO2* (ACC 酸化酵素遺伝子) の 2 種類のエチレン生合成系遺伝子について花持ち性の異なる 2 品種における発現動態を調べたところ、両遺伝子ともに花持ち性の長い品種と比較して、

短い品種はより高くかつ早いタイミングで発現していたことから、図-6 に示した内生エチレンの生成の相違を反映する結果を示した (図-8)。一方、概日時計の中心振動体を構成する遺伝子の発現解析から、*PuLHY* (朝方に発現) と *PuTOC1* (夕方に発現) がシロイヌナズナや他の植物種と同様に相互の概日発現制御を受けていることが示唆された (図-9)。以上のようにトランスクリプトーム解析は、ハナスベリヒユにおける開花特性の分子基盤を理解する上で、最初のステップを提供することができたものと考えられる。

なお、ハナスベリヒユは植物体がコンパクトで、交配から種子を得るまではほぼ 1 ヶ月、種子から開花まではほぼ 2 ヶ月という比較的短期間で生育開花に至るので、年間数世代を進めることが可能であり、諸特性の遺伝解析が容易である。また、ハナスベリヒユはナデシコ目スベリヒユ科に属し、植物色素としてベタレインを蓄積することから機能性研究においても注目を集めている。他の植物色素のアントシアニンやカロテノイドと比較するとベタレインによる知見は乏しいが、今

表-1 ハナスベリヒユで同定された開花・閉花関連遺伝子

関連遺伝子群	ハナスベリヒユ同定された遺伝子
エチレン関連遺伝子 (生合成系、感受性 関連、情報伝達系)	<i>PuACSI</i> (2), <i>PuACO</i> (2), <i>PuETR1</i> , <i>PuETR2</i> , <i>PuERS1</i> , <i>PuEIN4</i> , <i>PuRTE</i> , <i>PuCTR</i> (3), <i>PuEIN2</i> , <i>PuEBF1/2</i> (3), <i>PuEIN3</i> , <i>PuEIL1</i> , <i>PuERF</i> (2)
概日時計関連遺伝子	<i>PuLHY</i> , <i>PuCCA1</i> , <i>PuTOC1</i> , <i>PuPRR5</i> (2), <i>PuPRR7</i> , <i>PuPRR9</i> , <i>PuGI</i> , <i>PuRVE4/8</i> , <i>PuLUX</i> , <i>PuELF3</i> , <i>PuELF4</i> , <i>PuZTL</i> (2), <i>PuFKF1</i> (2)
括弧内の数字は同定遺伝子数	

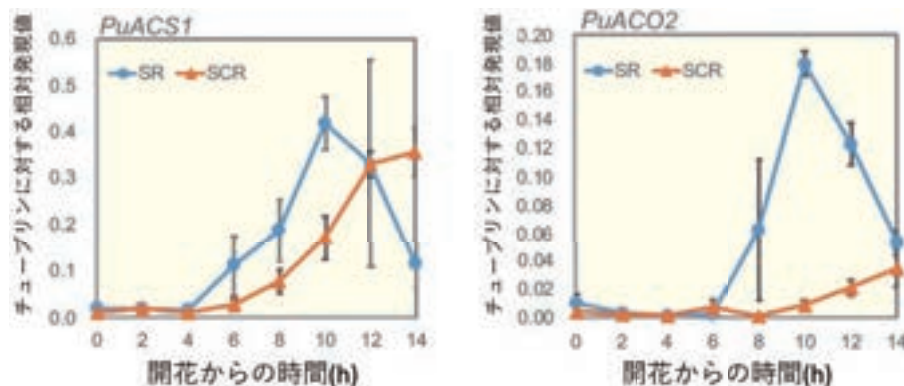


図-8 ハナスベリヒユの花におけるエチレン生合成系遺伝子の発現
(*PuACS1*: ACC 合成酵素遺伝子, *PuACO2*: ACC 酸化酵素遺伝子,
SR (一重赤): 従来系統、SCR (サンちゅらかチェリーレッド: 終日開花性品種)

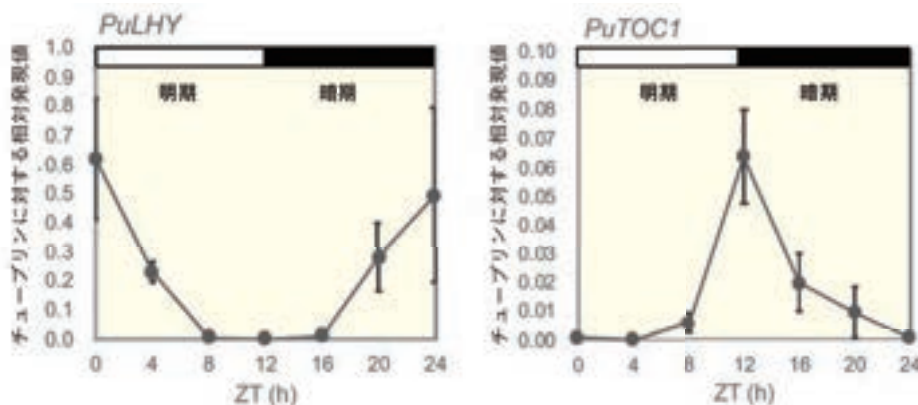


図-9 ハナスベリヒユの概日時計関連遺伝子の発現の日周変動
(*PuLHY*: 夜に発現が高まる遺伝子, *PuTOC1*: 昼に発現が高まる遺伝子)

後、トランスクリプトーム解析により
ベタレイン生合成系に関しても情報が
整う可能性がある。最初に述べたよう
に、ハナスベリヒユは真夏の強光、高
温、乾燥条件下でも生育できる強健な
性質を有しており、急速に進む気候温
暖化に対応した観賞植物の開発研究に
も役立つ可能性がある。今後、ハナス
ベリヒユを対象として分子遺伝学、生
物工学および生理学的研究が進展して
いくことを期待したい。

謝 辞

本稿の作成にあたり、東京大学大学
院農学生命科学研究科園芸学研究室の
樋口洋平准教授に貴重な助言をいた
だきました。この場を借りて御礼申し
上げます。

引用文献

- 肥土邦彦 2007. ポーチュラカが今また熱
い NHK テレビテキスト 趣味の園芸 7 月
号, 50-51.
- Ichimura, K. and K. Suto 1998.
Environmental factors controlling
flower opening and closing in a
Portulaca hybrid. *Ann.Bot.* 82, 67-70.
- 菅野政夫 2012. 特集 閉じない花を求め
て. 園芸通信 4 月号.
- Leitch, I.J. *et al.* 2019. Plant DNA C-values
Database. <https://cvalues.science.kew.org/>
- Maguvu T.E. *et al.* 2016. Difference in
flower longevity and endogenous
ethylene production of *Portulaca*
umbraticola cultivars. *The Horticulture*
Journal 85, 70-75.
- Maguvu T.E. *et al.* 2018. Effect of different
photoperiods on flower opening time in
Portulaca umbraticola. *The Horticulture*
Journal 87, 124-131.
- Maguvu, T.E. *et al.* 2020. *De novo* whole

transcriptome analysis of wingpod
purslane, *Portulaca umbraticola*, and
its application to the discovery of
genes related to flower senescence
and opening rhythm. *The Horticulture*
Journal 90, 97-107.

マグヴ・タワング・エリアスら 2013. ハナ
スベリヒユ品種の核DNA量および倍数性.
園芸学研究 12(別 1), 436.

Matthews, J.F. 2003. *Portulaca*. *Flora of*
North America 4, 496-501.

Matthews, J.F. *et al.* 1992. *Portulaca*
umbraticola Kunth (Portulacaceae) in the
United States. *Castanea* 57, 202-208.

Ocampo, G. and J.T. Columbus 2012.
Molecular phylogenetics, historical
biogeography, and chromosome number
evolution of *Portulaca* (Portulacaceae).
Mol. Phylogenet. Evol. 63, 97-112.

小野崎隆ら 2006. 花持ち性の優れたカー
ネーション農林 1 号 ‘ミラクルルージュ’
および同 2 号 ‘ミラクルシンフォニー’ の
育成経過とその特性. 花き研究所研究報告
5, 1-16.

柴田道夫 1991. いわゆるハナスベリヒユの
染色体数について 園芸学会雑誌 60(別 1),
410-411.

柴田道夫・間竜太郎 2013. ハナスベリヒユ
の学名について. 園芸学研究 12(別 1),
215.

柴田義明 1984. ポーチュラカ・オレラケア.
花卉園芸大事典, p.711(図版 p.190). 養賢
堂, 東京.

柴田義明 1989. ポーチュラカ. 園芸植物大
事典, pp.451-452. 小学館, 東京.

Skirvin, R.M. *et al.* 1982. Natural and
tissue culture-induced variation in
Portulaca hybrid. -In variability in
plants regenerated from tissue culture
(ed. Earle E.D. and Demartly Y.).
pp.245-267. Praeger Publishers, New
York, NY.

Yagi, M. *et al.* 2014. Sequence analysis
of the genome of carnation (*Dianthus*
caryophyllus L.). *DNA Res.* doi:10.1093/
dnares/dst053

パッシブサンプリング法による 環境水中の除草剤（農薬）の モニタリング

地方独立行政法人
大阪府立環境農林水産総合研究所
矢吹 芳教
野呂 和嗣
伴野 有彩

はじめに

農薬は、農作業の省力化、農作物の生産性向上および安定的な供給のための不可欠な資材であり国内外の農耕地等で多く使用されている。近年、殺虫剤や殺菌剤の出荷量が減少の一途をたどる中で、除草剤の出荷量は2010年付近を底として、上昇傾向にある。農耕地等に散布された農薬は農作物、樹木あるいは土壌に付着するだけでなく、一部は降雨等により田面水や土壌を経て河川や湖沼のような水環境へ非意図的に輸送される。このため、農薬は環境水中での検出事例が最も多い化学物質のひとつとなっている。

農薬使用にかかる安全性については、農薬取締法や食品衛生法などの法律により農薬の使用基準や作物残留基準が設定され、また環境基本法により、人への健康影響を考慮した水環境中での農薬濃度基準値が定められている。さらに、農薬取締法における農薬の登録を認める判断基準として、水域の生活環境動植物の被害防止に係る農薬登録基準（2021年4月26日現在447農薬）及び水質汚濁に係る農薬登録基準（2021年4月26日現在341農薬）が定められている（環境省ホームページ）。環境中へ排出される農薬は、生態系あるいは人の健康に影響を及ぼす恐れがあることから、その影響を適切に評価・管理するため、水環境モニタリングおよび農薬使用実態に基づく予測によって環境中濃度を正確に把握す

る必要がある。

従来、農薬を含む環境水中の化学物質濃度モニタリングはグラブサンプリング (grab sampling: GS) 法によって実施されてきた。GS法は環境水をガラスあるいはポリ容器等に一定量（約1L程度）採取して持ち帰り、実験室で固相カラムによる濃縮および分析妨害成分の除去を行い、ガスクロマトグラフや液体クロマトグラフなどで定量する。GS法は、スポットサンプリング (spot sampling) とも称される方法で、採水時の化学物質の正確な濃度が得られる。しかし、化学物質の一時的・突発的な流出時にサンプリングを実施できなかった場合、それらの農薬は捕捉できない。特に農薬には田植の時期に集中的に施用される除草剤や病害虫の発生に応じて散布する殺虫剤および殺菌剤など、様々な剤型・使用法があり、農薬の種類によって使用される地域・時期は大きく異なること、水環境への農薬の流出は降雨などの気象条件に依存することから、水環境中で検出される農薬濃度は期間の短いスパイク状であることが多い。したがって、GS法で農薬の環境水中の濃度変化を正確に捉えるためには、高頻度サンプリングを長期に渡って継続しなければならず、多大なコストと労力が必要となる。例えば、我々は、大阪府の南河内地域の河川において水田施用除草剤を中心に様々な農薬を10年以上モニタリングしているが、濃度実態の正確な把握のため、農薬が頻繁に検出される時期（初夏～）には3回／週

のGS法によるサンプリングを実施している（環境省ホームページ）。環境水中において高頻度で検出される除草剤はプレチラクロール、ブタクロールおよびプロモブチドなど主に移植前後に水田に施用される剤である（環境省ホームページ；Iwafune *et al.* 2010）。

近年、GS法のデメリットを解消できる手法として、受容相（吸着剤）を水環境中に静置・暴露し、吸着した化学物質の質量からその濃度を算出できるパッシブサンプリング (passive sampling: PS) 法が注目を集めている。本稿では、環境水中の農薬のモニタリング方法として研究が進みつつあるPS法について、その概説、研究例および今後の発展性や課題について紹介する。

1. パッシブサンプリング法の概要と理論

PS法を環境水の化学物質モニタリングへ応用するための研究は1990年代から米国、EU諸国およびオーストラリアを中心に行われ、2000年以降に国際誌に掲載された論文数は年々増加の一途を辿っている。それらの対象物質は、極性有機化学物質（極性農薬や医薬品など）、非極性有機化学物質（非極性農薬、多環芳香族炭化水素およびポリ塩化ビフェニルなど）のような有機化学物質や金属イオンまで多岐にわたっている（Gimpel *et al.* 2003; Zhang and Davison 1995; Verweij *et al.* 2004; Harman *et al.* 2008）。

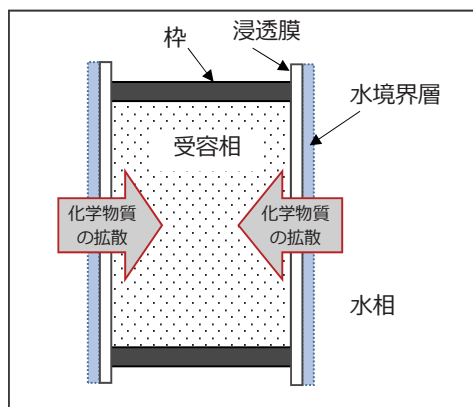


図-1 パッシブサンプラーの構成の概略図

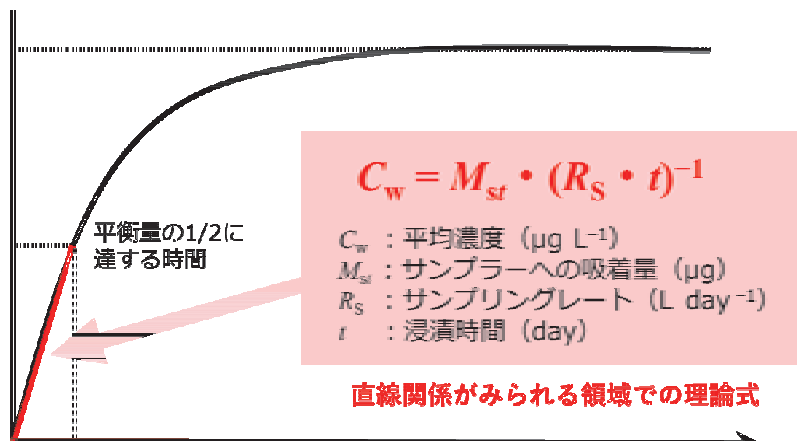


図-2 目的物質のサンプラーへの吸着量の時間変化

PS 法は、平衡型とキネティック型との2種類に大別される。平衡型 PS 法は、環境水中の化学物質濃度と受容相への吸着量とが短時間で平衡に達する場合に吸着量と平衡定数を用いて環境水中の濃度を逆算することができ、濃度変化の少ない環境での使用が有効である。キネティック型 PS 法は、サンプラー内の受容相中に環境水中の化学物質を徐々に蓄積するため、校正試験によって吸着速度を算出しておけば、受容相への吸着量から時間加重平均濃度 (time-weighted average: TWA) を算出できる (Vrana *et al.* 2005)。一般的に、TWA の算出が可能なキネティック型 PS 法は化学物質濃度が変動する河川水等のモニタリングに広く使用されていることから、本稿ではこのキネティック型 PS 法について解説する。

パッシブサンプラーの構成の概略図を図-1に示す。サンプラー内部の受容相は膜によって環境水と隔てられており、膜を透過した溶存物質のみが受容相に到達・吸着される。PS はサンプラー内部と外部の濃度勾配による拡散が化学物質の受容相への輸送を支配していることから、受容相への吸着量の時間変化は図-2に示す関係となる。吸着量の時間変化は1次反応速度式に従うことが知られており、また、最大

吸着量の半値までは吸着量の時間変化を直線近似できる(式(1))。この半値までの期間を直線範囲 (linear range: LR) と呼び、キネティック型 PS 法はこの LR 内でサンプリングを行う。

$$C = M \cdot (R_s \cdot t)^{-1} \quad (1)$$

ここで、 C ($\mu\text{g/L}$) は環境水中の化学物質濃度、 M (μg) は吸着量、 R_s (L/d) はサンプリングレート、 t (d) はサンプリング期間である。この式からもわかるように、吸着量から環境水中の濃度を算出するためには、一定濃度のサンプル溶液を用いた校正試験によって求めた R_s が必要となる。 R_s は物質に固有の値であるが、概ね $0.05 \sim 1.0$ (L/d) の範囲で得られていることが多い。

農業のモニタリングを目的としたパッシブサンプラーとして、polar organic chemical integrative sampler (POCIS), semipermeable membrane device (SPMD) あるいは Chemcatcher (Ibrahim *et al.* 2013; Alvarez *et al.* 2004; Hofelt and Shea 1997; Vrana *et al.* 2006) など、様々なタイプが開発されてきた。これらの中で、POCIS は広範囲のオクタノール/水分分配係数 (Log Kow) を有する化学物質に対して適用されているなど、

汎用性が高い (Vrana *et al.* 2005)。

2. POCIS の概要

POCIS の外観および構成を図-3に示す。POCIS は、化学物質を吸着する受容相、膜、さらに膜を固定する金属リングから構成される。受容相は目的の化学物質が浸透可能な膜で包まれる。一般的な POCIS は、受容相として Oasis HLB 樹脂、膜として polyethersulfone (PES) を使用し、市販されている。また、目的化学物質に応じて様々な吸着剤と膜の組合せが検討されてきた。前項で示した通り、校正試験で得られる R_s と、サンプリング期間、吸着量から環境水中の化学物質の TWA が得られる。

これまでに、発表されている論文の中で POCIS の R_s が求められている化学物質のうち、“農業”として記載されている化学物質は約 300 種類ある。それらの農業のうち約 8 割は、膜に PES、受容相に Oasis HLB を用いた POCIS (PES-HLB POCIS) が用いられている。PES-HLB POCIS の R_s は物質ごとに異なり、その範囲は 0.001 から 3 (L/d) であり、9 割近くが $0.05 \sim 1.0$ (L/d) である (Ahrens *et al.* 2018; Kaserzon *et al.* 2013)。また、親水性が高いなどの理由で代表

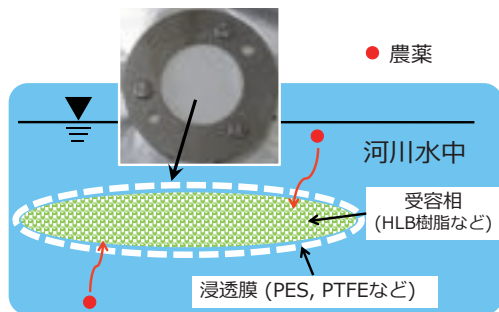


図-3 POCISの外観および構成

的な PES と Oasis HLB の組合せでは検出が難しい物質についても、様々な膜と吸着剤の組合せが試されており、現在では、POCIS 開発のための膜と吸着剤の選定方法も確立されている (Noro *et al.* 2020)。

3. POCIS の測定値に影響を与える環境因子

POCIS に限らず PS 法の R_s に影響を与える環境因子としては、共存有機物濃度、流速、温度および膜に吸着する浮遊物質 (SS) などが挙げられる。共存有機物の影響については、溶存有機態炭素 3～5 mg/L の共存下では、 R_s に及ぼす影響は明白ではないが、下水など、有機物が高濃度に含有されている場合は有機物濃度の上昇とともに R_s が低下することが報告されている (P.A. Helm *et al.* 2011; Bailly *et al.* 2013)。サンプラー周辺の流速がゆるやかな条件下では膜表面に水相とは濃度の異なる水境界層が存在し、流速が遅くなるにしたがってその水境界層が厚くなることから理論的に R_s は低下する。いくつかの論文では、流速の上昇に伴って R_s 値が有意に増加することが示唆されているが、流速が 6 cm/s 以上の条件では溶液から膜を透過する速度が R_s の支配要因であり、流速の影響はないことが報告されている (Toteu Djomte *et al.* 2018)。また、Harman *et al.* (2012) は、流速の変化が 2.6～37 cm/s の範囲であれば、

流速による R_s の補正は必要ないと考察している。したがって、河川等の一定程度の流速がある場所での観測において、流速による R_s への影響は小さいと推察される。温度が高くなると化学物質の拡散速度が上昇し、 R_s も上昇することも明らかになっている。この R_s の温度依存性はアレニウス式で記述され、いくつかの温度条件で R_s を算出しておくことで、任意の温度の R_s を計算できる (Toteu Djomte *et al.* 2018; Yabuki *et al.* 2016)。近年、膜に蓄積する SS の影響についても報告されている。PES 膜表面への SS の蓄積によって膜の表面構造が破壊されていることが走査電子顕微鏡で観察されたが、 R_s への影響は無視できる程度であった (Toteu Djomte *et al.* 2020) ことから、現時点での補正等の必要はないと考えられる。

4. POCIS の性能評価試験

上述のように、 R_s は環境要因の影響を受けることから、環境要因を再現あるいは制御した条件で実験可能な人工水路やチャンバーが開発され、POCIS の性能評価が進められている (Noro *et al.* 2019; Vermeirssen *et al.* 2008)。スイス国立水環境科学技術研究所 (Eawag) に設置された人工水路では、河川水を引き込み、流速と温度を制御した条件で PS 法の性能評価を行うことができる。また、排水を活性炭で処理しているため、低濃

度 ($<1 \mu\text{g/L}$) であれば親水性有機化合物を添加した条件で実験することができる。この人工水路は、様々なタイプのパッシブサンプラーについて、温度、流速、共存物質、濃度変化の影響を評価するために利用されてきた (Kaserzon *et al.* 2013; Noro *et al.* 2021a; Becker *et al.* 2021; Li *et al.* 2010)。我々の研究グループでは、POCIS の性能を評価するチャンバーを開発し、半減期が 1 日程度のピークであれば POCIS の測定値は水中濃度の理論値と大差がないことを報告している (Noro *et al.* 2019; Noro *et al.* 2021b)。チャンバー試験は、少量 (27 L) の水道水に対象化学物質を添加して試験を行うため、人工水路と比べると低コストで高濃度条件 ($<1 \text{mg/L}$) の試験ができるという利点があり、POCIS について人工水路試験とチャンバー試験による性能評価結果を比較したところ、両試験区間の農薬濃度は 50～150 % の範囲内であったことから、チャンバー試験は簡易な性能評価手法として有効であることが示唆されている。

5. PS 法による環境水中の農薬モニタリング

室内実験で R_s が得られ、様々な環境因子による R_s の変化の程度が明らかになりつつあるとはいえ、実際に PS 法で環境水中の農薬をモニタリング可能かどうかは現地調査での PS 法と GS 法との比較が欠かせない。

実際のフィールドにおいてPS法とGS法とで得られる結果は概ねよく一致していることが報告されている(Noro *et al.* 2020; Yabuki *et al.* 2018; Booi *et al.* 2017)。例えばYabuki *et al.*(2018)の調査では、POCISを河川に2週間設置し、その間にGSを週に3回以上実施した。2年間に4地点で3回実施した調査で、GS法では延べ84種の農薬が検出され、PS法では延べ98種が検出された。PS法とGS法の農薬平均濃度を比較した結果、おおむね1:1の関係(傾き=1.00, $r=0.897$, $n=79$)が得られている。このように、PS法とGS法の平均濃度が一致し、かつPS法ではGS法で捕捉できていない農薬を検出できていることが報告されている。

PS法は化学物質を積算するため、前述のようにスポット的にサンプリングするGS法では検出されなかった化学物質が検出されることがある(Noro *et al.* 2020; Yabuki *et al.* 2018)。GS法で検出されなかった要因として、GSとGSの間に濃度のピークが存在したことや、GSでサンプリングした試料中の農薬濃度が検出下限値未満で推移していたことなどが考えられる。いずれにせよ、PS法がGS法と比較して取りこぼしの少ない観測方法であることを示唆しており、例えば、「農薬が使用されているはずなのに検出されていないのは、農薬散布時期に採水できていないからではないか」という懸念の払拭につながる。

6. 農薬モニタリングに求められるPS法の課題と発展

これまで述べてきたように、平均濃度の測定が可能で、さらにGS法で見逃した化学物質の捕捉が可能なPS法は環境水中の農薬モニタリング法として有効である。加えて、POCISは膜を透過した化学物質の受容相への蓄積量を評価しており、これは水生生物への化学物質暴露評価に近いと考えられる。したがって、PS法は一定期間の平均濃度で判断する基準項目のモニタリングの他に、水生生物への慢性毒性評価などに有用である。今後は、PS法とGS法との比較データの蓄積や水生生物への影響評価とリンクした調査の進展が期待される。

PS法が国際的に認知されるにつれ、各機関の分析精度差が問題となってきた。このため、同一のサンプルを各国の研究機関に配布し、分析結果をとりまとめることでPS法の精度を担保する取り組みが行われている(Vrana *et al.* 2016; Hageman *et al.* 2019)。単独の研究機関内の分析結果と比べると、研究機関間の変動が5倍程度あったことから、PS法の誤差要因は、サンプリングではなく、分析手順にあったことが示唆された(Vrana *et al.* 2016)。この取り組みは、PS法、対象物質、参加機関を拡大しながら現在も続けられており、2021年度から筆者らも参画している。このような取組が進むことにより、PS法の精度向上

につながることを期待されている。

限定された地域で使用される農薬のように検出対象をある程度絞り込めるものから、災害時に流出する化学物質のように対象の絞り込みが難しい化学物質まで、我々が水環境中で測定しなければいけない化学物質は多岐にわたる。現在、ガスクロマトグラフ/液体クロマトグラフ質量分析計の精度向上に伴い、スペクトルデータを活用した農薬を含む化学物質のノンターゲット分析あるいは半定量分析(スクリーニング分析)法とPS法を組合せた手法が提案されている(Rico *et al.* 2019)。この手法は、当然ながら新規の製剤が次々と登録・使用される農薬のモニタリングにも有効である。 R_s を算出する煩雑な校正試験がこのような研究の課題であるが、校正試験を行わずに R_s を求める方法として、化学物質の物性や構造等から、機械学習を活用したモデル計算による予測が試みられている(Miller *et al.* 2016)。その精度はいまだ不十分ではあるものの、将来的に校正試験を経ずに R_s を推定できる方法を確立することで、PS法と定量網羅分析との組合せが実現し、使用した農薬の濃度や生態影響評価が網羅的に進むことを期待したい。

謝 辞

本解説における文献調査及び取り纏めは、JSPS 科研費(17K00543)および環境省環境研究総合推進費(JPMEERF18S11713)の一部として実施された。

参考文献

- Ahrens, L. *et al.* 2018. Concentrations, fluxes and field calibration of passive water samplers for pesticides and hazard-based risk assessment. *Sci. Total Environ.* 637-638, p.835-843.
- Alvarez, D.A. *et al.* 2004. Development of a passive, in situ, integrative sampler for hydrophilic organic contaminants in aquatic environments. *Environ. Toxicol. Chem.* 23(7), 1640-1648.
- Bailly, E. *et al.* 2013. Calibration and field evaluation of polar organic chemical integrative sampler (POCIS) for monitoring pharmaceuticals in hospital wastewater. *Environ. Pollut.* 174, 100-105.
- Becker, B. *et al.* 2021. Passive sampler phases for pesticides: Evaluation of AttractSPE™ SPD-RPS and HLB versus Eempore™ SDB-RPS. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 28(9), 11697-11707.
- Booij, K. *et al.* 2017. Laboratory performance study for passive sampling of nonpolar chemicals in water. *Environ. Toxicol. Chem.* 36, 1156-1161.
- Gimpel, J. *et al.* 2003. In Situ Trace Metal Speciation in Lake Surface Waters Using DGT, Dialysis, and Filtration. *Environ. Sci. Technol.* 37(1), 138-146.
- Hageman, K.J. *et al.* 2019. Current-use pesticides in New Zealand streams: Comparing results from grab samples and three types of passive samplers. *Environ. Pollut.* 254, 112973.
- Harman, C. *et al.* 2008. Uptake rates of alkylphenols, PAHs and carbazoles in semipermeable membrane devices (SPMDs) and polar organic chemical integrative samplers (POCIS). *Chemosphere* 72(10), 1510-1516.
- Harman, C. *et al.* 2012. Calibration and use of the polar organic chemical integrative sampler—a critical review. *Environ. Toxicol. Chem.* 31(12), 2724-2738.
- Hofelt, C.S. and D. Shea 1997. Accumulation of Organochlorine Pesticides and PCBs by Semipermeable Membrane Devices and *Mytilus edulis* in New Bedford Harbor. *Environ. Sci. Technol.* 31(1), 154-159.
- Ibrahim, I. *et al.* 2013. Polar organic chemical integrative sampler (POCIS) uptake rates for 17 polar pesticides and degradation products: laboratory calibration. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 20(6), 3679-3687.
- Iwafune, T. *et al.* 2010. Behavior of paddy pesticides and major metabolites in the Sakura River, Ibaraki, Japan. *J. Pestic. Sci.* 25(2), 114-123.
- 環境省・農業登録基準について. http://www.env.go.jp/water/dojo/noyaku/touroku_kijun.html (2021年8月27日閲覧)
- 環境省・農業残留対策総合調査(河川モニタリング, 後作物残留等)の結果について. <http://www.env.go.jp/water/dojo/noyaku/zanryutaisaku.html> (2021年8月27日閲覧)
- Kaserzon, S.L. *et al.* 2013. Characterisation and comparison of the uptake of ionizable and polar pesticides, pharmaceuticals and personal care products by POCIS and Chemcatchers. *Environ. Sci. Process Impacts.* 16(11), 2517-2526.
- Li, H. *et al.* 2010. Controlled field evaluation of water flow rate effects on sampling polar organic compounds using polar organic chemical integrative samplers. *Environ. Toxicol. Chem.* 29(11), 2461-2469.
- Li, H. *et al.* 2011. The effects of dissolved organic matter and pH on sampling rates for polar organic chemical integrative samplers (POCIS). *Chemosphere* 83(3), 271-280.
- Miller, T.H. *et al.* 2016. The First Attempt at Non-Linear in Silico Prediction of Sampling Rates for Polar Organic Chemical Integrative Samplers (POCIS). *Environ. Sci. Technol.* 50(15), 7973-7981.
- Noro, K. *et al.* 2019. Validation of the Application of a Polar Organic Chemical Integrative Sampler (POCIS) in Non-steady-state Conditions in Aquatic Environments. *J. Water Environ. Technol.* 17(6), 432-447.
- Noro, K. *et al.* 2020. Development and Calibration of the Polar Organic Chemical Integrative Sampler (POCIS) for Neonicotinoid Pesticides. *Environ. Toxicol. Chem.* 39(7), 1325-1333.
- Noro, K. *et al.* 2021a. Comparative Evaluation of the Polar Organic Chemical Integrative Sampler (POCIS) in Two Types of Validation Systems Simulating Peak Concentration Events. *Environ. Toxicol. Chem.* Accepted Author Manuscript.
- Noro, K. *et al.* 2021b. Development and Evaluation of the Performance of the Polar Organic Chemical Integrative Sampler for Linear Alkylbenzene Sulfonate. *ChemRxiv*. doi:10.26434/chemrxiv.14608164.v2.
- Rico, A. *et al.* 2019. Identification of contaminants of concern in the upper Tagus river basin (central Spain). Part 1: Screening, quantitative analysis and comparison of sampling methods. *Sci. Total Environ.* 666, 1058-1070.
- Toteu Djomte, V. *et al.* 2018. Effects of hydrodynamic conditions and temperature on polar organic chemical integrative sampling rates. *Environ. Toxicol. Chem.* 37(9), 2331-2339.
- Toteu Djomte, V. *et al.* 2020. Effects of suspended sediment on POCIS sampling rates. *Chemosphere* 241, 124972.
- Vermeirssen, E.L.M. *et al.* 2008. The role of hydrodynamics, matrix and sampling duration in passive sampling of polar compounds with empore™ sdb-rps disks. *J. Environ Monit.* 10(1), 119-128.
- Verweij, F. *et al.* 2004. Assessment of bioavailable PAH, PCB and OCP

concentrations in water, using semipermeable membrane devices (SPMDs), sediments and caged carp. Chemosphere 54(11), 1675-1689.

Vrana, B. *et al.* 2005. Passive sampling techniques for monitoring pollutants in water. TrAC, Trends Anal. Chem. 24(10), 845-868.

Vrana, B. *et al.* 2006. Calibration of the Chemcatcher passive sampler for the monitoring of priority organic pollutants in water. Environ. Pollut. 142(2), 333-

343.

Vrana, B. *et al.* 2016. An interlaboratory study on passive sampling of emerging water pollutants, TrAC Trends in Anal. Chem. 76, 153-165.

Yabuki, Y. *et al.* 2016. Temperature dependence on the pesticide sampling rate of polar organic chemical integrative samplers (POCIS). Biosci. Biotechnol. Biochem. 80(10), 2069-2075.

Yabuki, *et al.* Y. 2018. Determining the

suitability of a polar organic chemical integrated sampler (POCIS) for the detection of pesticide residue in the Ishikawa River and its tributary in Osaka, Japan. J. Pestic. Sci. 43(1), 18-23.

Zhang, H. and W. Davison 1995. Performance Characteristics of Diffusion Gradients in Thin Films for the in Situ Measurement of Trace Metals in Aqueous Solution. Anal. Chem. 67(19), 3391-3400.

統計データから

令和2年度のカロリーベースの食料自給率は、1人1日当たり供給熱量2,269kcalに対し、国産供給熱量843calは米の需要減少や小麦の単収減により、前年度より1ポイント低い37%となった。また、飼料自給率を反映しない食料国産率では、畜産物の生産増加により、国産供給熱量が1,052kcalとなり、前年度同の46%であった。なお、飼料自給率は前年度と同じ25%である。供給熱量に占める品目の割合は、高い順に米21%、畜産物18%、油脂類15%、小麦13%、砂糖類8%

令和2年度の食料自給率

となっている。

生産額ベースの食料自給率は、国内消費仕向額15兆4,308億円に対し、国内生産額10兆4,032億円で、前年度より1ポイント高い67%である。また、生産額ベースの食料国産率は71%である。消費仕向額に占める品目の割合は、畜産物32%、野菜16.4%、魚介類15.6%、米11%、果実9%の順である。(K. O)

表 カロリーベースと生産額ベースの食料自給率（令和2年度）

品目	国産供給熱量 (kcal / 人・日)	供給熱量	自給率 (%)	国内生産額 (億円)	国内消費仕向額	自給率 (%)
米	467	475	98	16,740	16,811	100
小麦	45	300	15	505	2,701	19
いも類	25	38	66	2,175	2,930	74
でん粉	13	147	9	450	1,102	41
大豆	16	77	21	435	923	47
野菜	51	67	76	22,832	25,362	90
果実	20	65	31	9,047	13,892	65
畜産物 (食料国産率)	64	408	16	28,922	49,830	58
	258		63	34,987		70
魚介類	43	83	51	11,745	24,004	49
砂糖類	65	177	36	1,630	2,880	57
油脂類	11	349	3	2,625	5,590	47
その他	24	84	29	6,929	8,285	84
合計 (食料国産率)	843	2,269	37	104,032	154,308	84
	1,052		46	110,098		71

令和3年8月 農林水産省

注) 畜産物及び合計の下段の数字は、飼料自給率を反映しない国内生産額

修正のご連絡

55巻4号に掲載した「統計データから」の中で、「農業・食料関連産業の国内生産額は全経済活動の1割」の記事に誤りがありました。申し訳ありませんが、修正をお願いします。

右段4行より

農業部門における国内生産額（表-2）は、1兆7,543億円（9.1%）で、そのうち、野菜が2,152億円（農業部門の20%）、米が1,823億円（16.9%）、肉用牛が1,197億円（11.1%）、酪農が1,055億円（9.8%）、農業サービス（稲作共同育苗、青果物共同選果等の売上高等）が937億円となっている。（赤字が誤植部分）



農業部門における国内生産額（表-2）は、10兆7,543億円（9.1%）で、そのうち、野菜が2兆1,520億円（農業部門の20%）、米が1兆8,230億円（16.9%）、肉用牛が1兆1,970億円（11.1%）、酪農が1兆550億円（9.8%）、農業サービス（稲作共同育苗、青果物共同選果等の売上高等）が9,370億円となっている。

マイクロバブルを用いた 液滴の微粒化

富山大学工学部
工学科 機械工学コース
川口 清司

はじめに

液体の微粒化技術は現在、内燃機関・噴霧塗装・農業・化学・食品・医療品など多くの分野に応用されており、環境問題や省エネルギーの問題にも直接関係している。例えば、内燃機関のような連続燃焼装置では、液体燃料を効率よく燃焼させるために、まず液体を微細な噴霧にし、燃料の表面積を増加させて蒸発の促進を図る必要がある。また、農業分野では農薬を散布する際に少量の農薬を広い面積に様に散布するために、農薬の微粒化が必要になる。その他、医薬品や食料品製造分野では顆粒体を製造する際に、液滴を乾燥させて固体粒子を生成する噴霧造粒法が用いられているが、微粒化した液滴を大量に製造する必要がある。

上記の問題を解決するために、低コストで噴霧可能な微粒化装置が求められているが、大きな液体の状態から直接小さな液滴を生成することは困難で

あり、外力を加えて液体を液膜あるいは液柱、さらに細い液糸に変化させ界面の不安定性などを利用して液滴へと分裂させる必要がある。そのため、課題は多くのエネルギーが必要となることである。

近年、マイクロバブルと呼ばれる直径が数十 μm 以下の微細気泡が注目されている。このマイクロバブルは、直径が数 mm のミリバブルにはない様々な特性を有しており、例えば水の浄化作用、油水分離作用、生物の成長促進、摩擦抵抗の低減作用等が報告されている (S. Deutsche *et al.* 2004; 後藤 2006)。このマイクロバブルを液体中に混入させることにより、液体の微粒化効果が期待できる。

そこで、本稿では水を対象として、マイクロバブル径やボイド率を変えた場合、マイクロバブル混入水を噴射することによって、更なる微粒化が可能かどうかを検討した研究 (川口 2020) について紹介する。

1. マイクロバブル発生方法

先述したようにマイクロバブルは広い範囲で応用されているが、図-1に主なマイクロバブル発生方法について示す。多孔質膜に存在する微細孔から空気を押し出す多孔質方式、水の中に空気を注入してモータにより空気を微細気泡に分裂させる機械方式、ベンチュリー管を用いて気泡を崩壊・収縮させてマイクロバブルを発生させるベンチュリー方式、図-2に示すような空気と水の二相流を高速で旋回させ速度差によって生まれるせん断力で気泡を微細化させる二流体ノズル方式 (旋回流方式)、その他に加圧して空気を溶解させた水を減圧することで過飽和を起こし気泡を析出させる加圧溶解方式などがある。

一般に微細で均一なマイクロバブルを発生させるためには、高圧を発生させるポンプと大掛かりな装置が必要となるため、マイクロバブル発生装置の

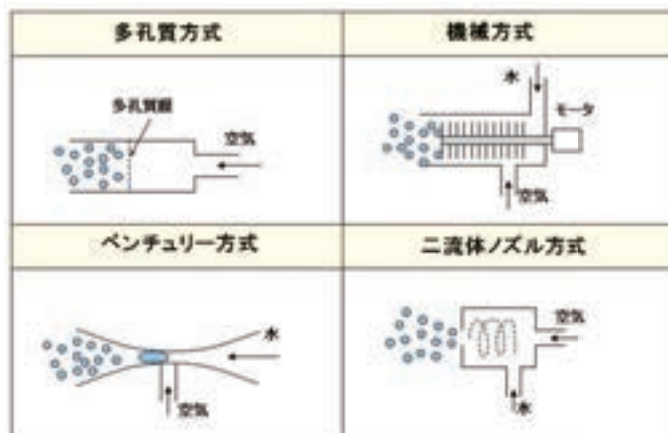


図-1 マイクロバブル発生方法

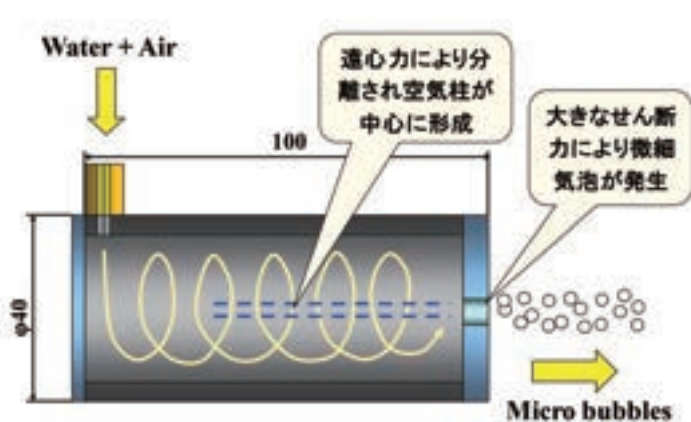


図-2 旋回流式マイクロバブル発生器

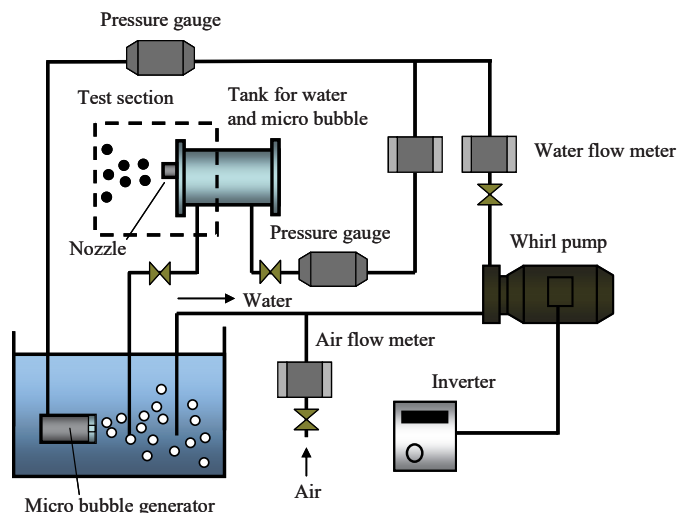


図-3 マイクロバブルを用いた液滴微粒化実験装置

導入や長期にわたって駆動させる場合に、設置場所やコストの面が課題として挙げられる。マイクロバブルを発生させる際の圧力を低減することは、使用するポンプを小さくすることができ、安価な渦巻きポンプで代用が可能となるため、コストや設置場所などの面で有利となると考えられる。本研究で取り扱う旋回流方式は、他の発生方式と比較して簡単な構造で微細な気泡を発生させることができ、さらなる低圧力化を見込むことができると考えられる。

2. マイクロバブルを用いた液滴の微粒化方法

マイクロバブルを用いた液滴微粒化実験装置の全体図を図-3に示す。実験装置はマイクロバブル発生セクションと液滴微粒化を行うテストセクションから構成される。

マイクロバブル発生セクションでは、マイクロバブルを水槽の中で発生させるために、旋回流式マイクロバブル発生器を用いた。この発生器は中空円錐状の渦流室側面に偏心させて設けた流入口から水と空気が供給され、渦流室内部で高速の旋回流が形成される構造となっている。そのために、高い

吐出圧を発生できる渦流ポンプを用いて、高圧水をマイクロバブル発生器へ供給している。渦流ポンプの回転数はインバーターで調節し、バルブで圧力を調節すると共に、高精度面積式流量計を用いて供給水の流量を測定した。マイクロバブル発生器へ供給する水の圧力は、精密ブルドン管圧力計で測定した。空気はポンプの吸い込み側から吸入負圧を利用して水に混入される。吸入空気流量は、流量測定のために設けた高精度面積式流量計に付加されたバルブによって調節する。

液滴微粒化を行うセクションでは、ポンプから吐出されたマイクロバブル混入水がバブル混入水槽に供給される。供給水量はバルブで調節され、高精度面積式流量計を用いて測定する。また、供給圧力は精密ブルドン管圧力計を用いて測定する。バブル混入水槽の端面には微粒化を行うためのアトマイジングノズルが設けられている。本実験ではアトマイジングノズルとして、低圧力噴霧時に比較的均一な粒子径を得ることができ、かつ良好な噴霧状態を維持することができるホロコーン型渦巻噴射弁を使用した。図-4にホロコーン型渦巻噴射弁の構造を示す。オリフィス径は0.51mm、スプレー角は45～95°である。

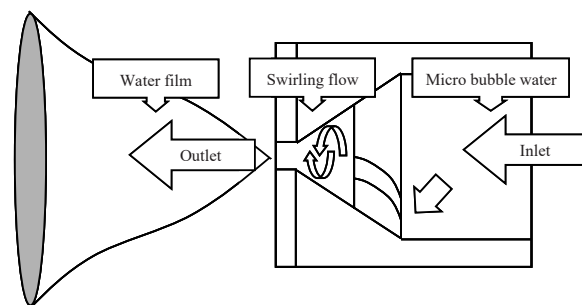


図-4 ホロコーン型渦巻噴射弁の構造

3. マイクロバブルの気泡径とボイド率測定

水槽内におけるマイクロバブルの水に対する充填率であるボイド率の測定画像を図-5に示す。ボイド率は0.05%、マイクロバブル平均直径は44.1 μm である。通常の撮影では焦点深度以外のマイクロバブルまで撮影されているが、画像処理によって焦点深度内のマイクロバブルのみを選択的に取り出して測定をすることが可能である。このとき、マイクロバブルの平均直径は実質的には体積の大きさを表しており、ボイド率にも影響を及ぼす。すなわち両者は相関関係にあるといえる。したがって、小さな平均直径を持つマイクロバブルを発生させた場合、

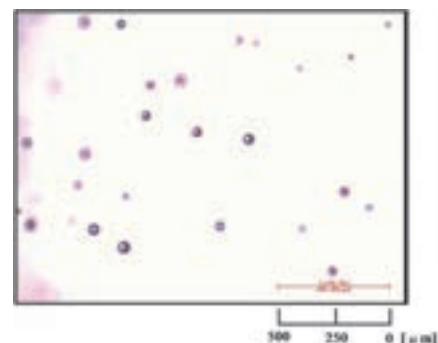


図-5 ボイド率の測定画像
(ボイド率 $\varepsilon = 0.05\%$ 、平均マイクロバブル直径 DMB=44.1 μm)

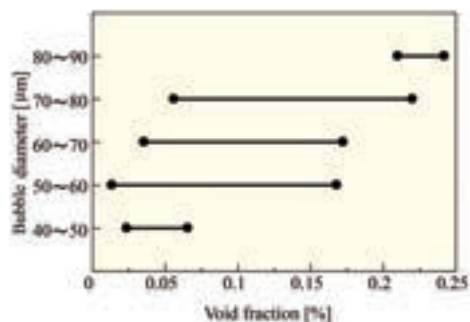


図-6 マイクロバブル平均直径に対するボイド率変化域

高いボイド率を実現するには大きな平均直径を持つマイクロバブルの場合より単位体積あたりの水に対する含有個数が多くなければならない。実験によって明らかになった各マイクロバブル平均直径に対するボイド率変化域を図-6に示す。図よりマイクロバブル平均直径 $D_{MB}=40 \sim 50 \mu m$ のものは高ボイド率になることは難しく、また $D_{MB}=80 \sim 90 \mu m$ のものが低ボイド率になることも難しいと言える。

4. 液滴径測定

図-7～図-10にマイクロスコープで撮影した液浸法による液滴採取

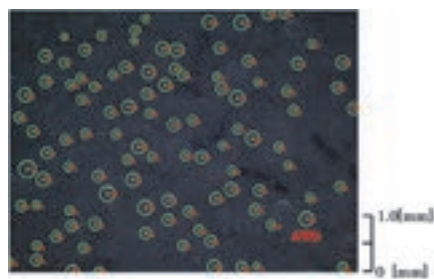


図-7 液浸法による液滴採取画像 ($P_s=0.2MPaG$ におけるマイクロバブル無し)

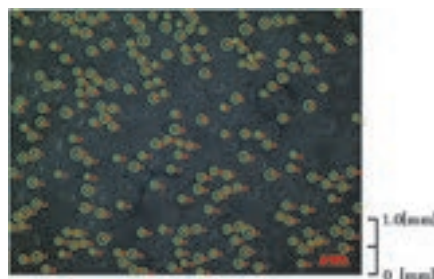


図-8 液浸法による液滴採取画像 ($P_s=0.2MPaG$ におけるマイクロバブルあり)

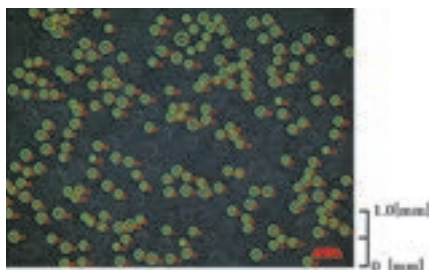


図-9 液浸法による液滴採取画像 ($P_s=0.4MPaG$ におけるマイクロバブル無し)

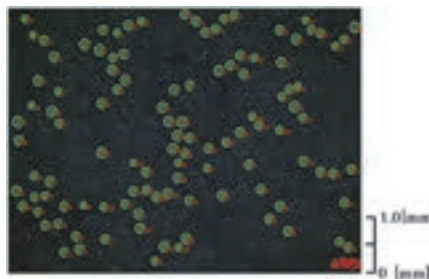


図-10 液浸法による液滴採取画像 ($P_s=0.4MPaG$ におけるマイクロバブルあり)

取画像を示す。図-7は噴射圧力 $P_s=0.2MPaG$ におけるマイクロバブル無しの条件、図-8は噴射圧力 $P_s=0.2MPaG$ 、ボイド率 $\varepsilon=0.059\%$ 、マイクロバブル直径 $D_{MB}=51.1 \mu m$ の条件である。画像を比較すると直径の小さい液滴が増えていることがわかる。また、図-9は $P_s=0.4MPaG$ におけるマイクロバブル無しの条件、図-10は $P_s=0.4MPaG$ 、 $\varepsilon=0.064\%$ 、 $D_{MB}=53.2 \mu m$ の条件である。圧力エネルギーが大きいので、初期液滴直径が小さくなるために、画像のみから微粒化効果を確認することは難しい。

図-11～図-14に $P_s=0.2MPaG$ と $0.4MPaG$ において、マイクロバブル無しと有りの条件における液滴径分布を示す。図-11と図-12を比較すると、 $P_s=0.2MPaG$ 、マイクロバブル有りの場合、液滴径が小さくなり、液滴径の下限値も小さくなることからわかる。これは小さなマイクロバブルが多数混入して、噴霧される液滴全体に対し、平均直径を低減する効果があるためと考えられる。図-13と図-14を比較する

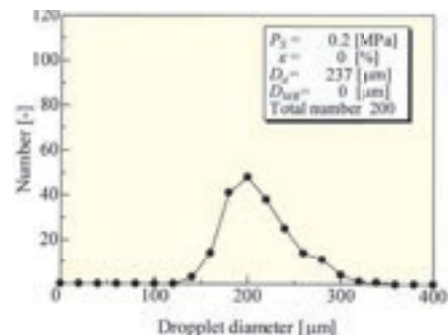


図-11 液滴径分布 ($P_s=0.2MPaG$ 、マイクロバブル無し)

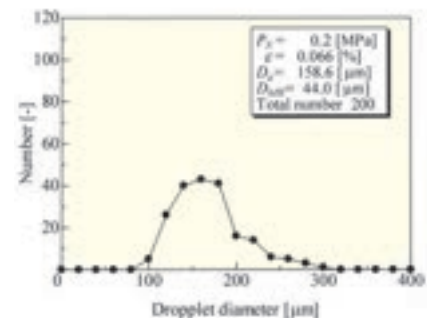


図-12 液滴径分布 ($P_s=0.2MPaG$ 、マイクロバブルあり)

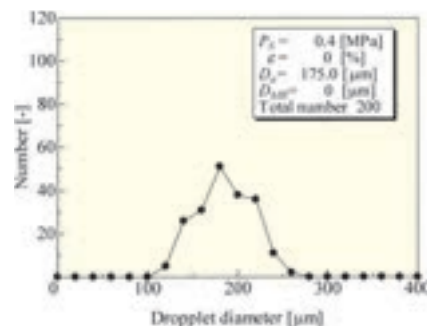


図-13 液滴径分布 ($P_s=0.4MPaG$ 、マイクロバブル無し)

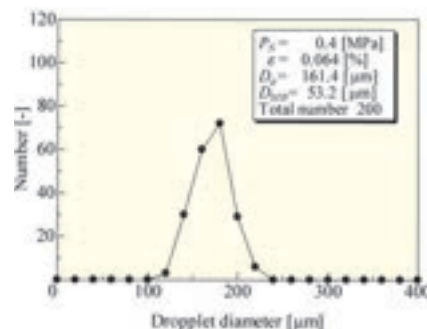


図-14 液滴径分布 ($P_s=0.4MPaG$ 、マイクロバブルあり)

と、 $P_s=0.4MPaG$ 、マイクロバブル有りの場合、液滴径の低減は顕著ではないが、ヒストグラムの尖度が増す。これは大きな液滴が、マイクロバブルの

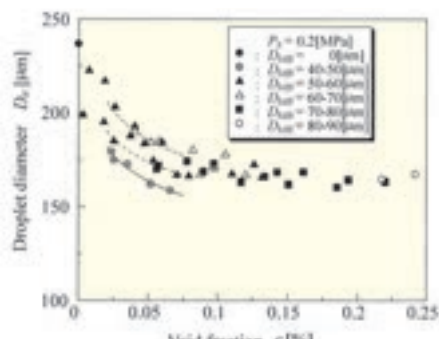


図-15 ボイド率と平均液滴径の関係 ($P_s=0.2\text{MPaG}$)

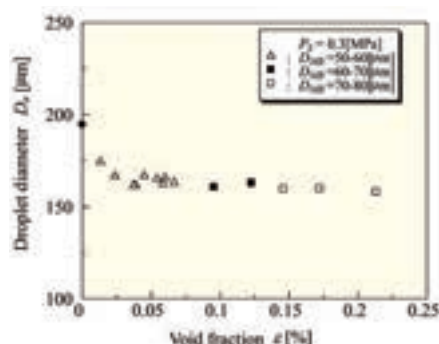


図-16 ボイド率と平均液滴径の関係 ($P_s=0.4\text{MPaG}$)

効果によって微粒化されたためと考えられる。

5. 液滴径とボイド率の関係

上記の液滴径分布から得られたボイド率、マイクロバブル平均直径、平均液滴径の関係を図-15と図-16に示す。噴霧圧力 $P_s=0.2\text{MPaG}$ において、ボイド率の増加に伴い平均液滴径が減少する。マイクロバブルが液系等に混入した場合、混入した箇所において分裂が発生すると考えられる。従って、ボイド率が大きいということはマイクロバブル径が等しい場合はバブルの個数が多いということであるから、それだけ多くの細かい液滴に分裂することになる。微粒化現象が顕著に現れるのはボイド率 $\varepsilon=0 \sim 0.1\%$ ほどの間で、それ以降は目立った微粒化は見られない。これはある一定の液滴径になった場合、表面張力が液滴体積に対して安定するため、分裂促進が行なわれない

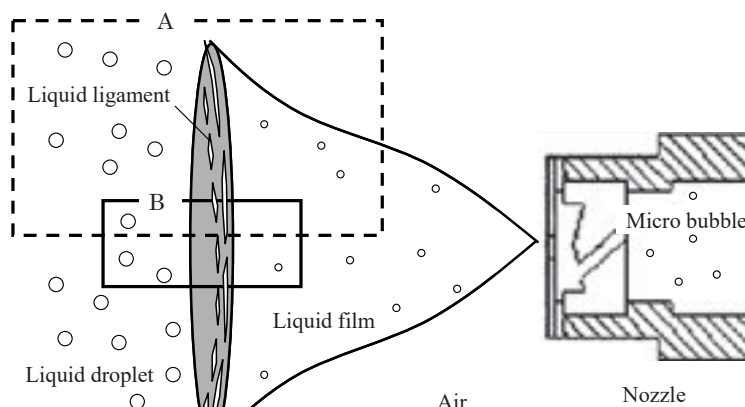


図-17 撮影箇所

ことが考えられる。

次にマイクロバブル平均直径が小さいほど、同程度のボイド率に対しては液滴微粒化効果が著しい。この理由としては、マイクロバブル平均直径が小さい方が単位体積あたりのマイクロバブル個数が増え、一つ一つのマイクロバブルが及ぼす影響が増えるからである。

$P_s=0.4\text{MPaG}$ においては噴霧圧力が高く、マイクロバブル無しの条件でも平均液滴径が小さくなるため、マイクロバブルの微粒化への影響が顕著ではない。そのため、微粒化促進効果を得る場合は低圧力状態において、圧力エネルギーなど他の微粒化要因が支配的ではない場合が好ましいと思われる。

6. 噴霧画像の撮影

図-17にハイスピードカメラによって撮影を行なった箇所の詳細を載せる。セクションAでは噴霧を行なった際の中空円錐噴霧の輪郭及び液膜から液系、さらに液滴への分裂観察、セクションBでは液系内のマイクロバブルの混入状態を確認するための観察を目的として実験を行なった。

図-18に、噴霧圧力 $P_s=0.2\text{MPaG}$ における噴霧直接観察画像(セクションA)を示す。図には(a)マイクロバ

ブル無しの噴霧と、(b)マイクロバブル混入噴霧を示す。これらの画像から、50倍での噴霧観察ではマイクロバブルの効果を噴霧状態から確認できなかった。このことから微粒化効果はさらに微視的な領域で起こっていると思われる。また、噴霧は液膜部分、液系部分、および液滴部分で構成されており、ノズル先端からまず液膜が中空円錐状かつ薄膜状態で回転噴霧され、不安定状態から液系に分裂し、さらに空気との摩擦せん断力などによって液滴が生成されるというメカニズムである。(a)、(b)の両方の画像から、液膜や液系先端に至るまでは液滴への分裂現象が起こらないことが確認できる。したがって、外力的な作用が最も現れる場所も液系先端位置、または液滴内部であるといえる。

図-19に液系直接観察画像(セクションB)を示す。画像の条件として、写真-7(a)には噴霧圧力 $P_s=0.2\text{MPaG}$ 、ボイド率 $\varepsilon=0.05\%$ 、平均マイクロバブル直径 $D_{MB}=40 \sim 50 \mu\text{m}$ での液系、写真-7(b)には $P_s=0.2\text{MPaG}$ 、 $\varepsilon=0.05\%$ 、 $D_{MB}=60 \sim 70 \mu\text{m}$ での液系を示す。これらの画像から、液系内部にマイクロバブルが混入している様子が見て取れる。このことから、水槽内、及びボイドタンク内に充填されているマイクロバブルの状態がそのまま液膜

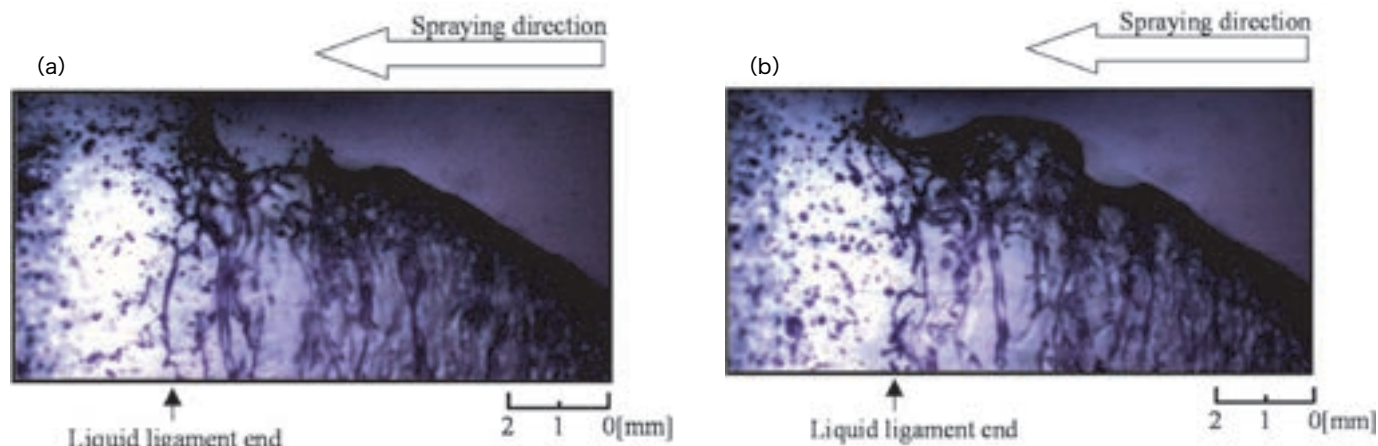


図-18 噴霧直接観察画像 (セクション A)
(a) マイクロバブルなし
(b) マイクロバブルあり

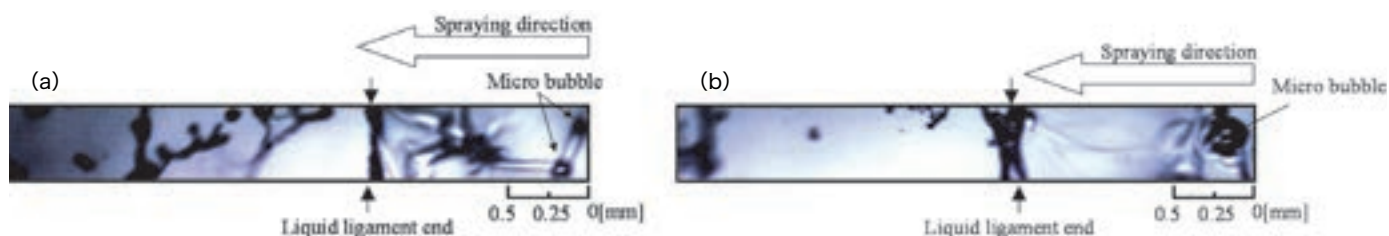


図-19 噴霧直接観察画像 (セクション B)
(a) $D_{MB}=40\sim50\ \mu\text{m}$
(b) $D_{MB}=60\sim70\ \mu\text{m}$

や液系内に混入すると考えられる。したがって液系内部に混入するマイクロバブルの直径としては妥当であると考えられる。

$\varepsilon=0.1\%$ 以上の高ボイド率状態においては、 $\varepsilon=0.1\%$ の状態とマイクロバブルの直径、マイクロバブル個数など、マイクロバブルの混入状態に大きな変化は見られなかった。したがって直接観察画像からも、図-15と図-16における $\varepsilon=0.1\%$ 以降の微粒化促進効果における停滞が説明できる。

おわりに

マイクロバブルと呼ばれる直径が数十 μm の微小気泡を用いて、渦巻き型噴射弁からマイクロバブル混入噴霧水を噴霧することによって、微粒化効

果を調べた結果、マイクロバブルを利用した水滴の微粒化を行う場合、 $0.2\sim0.3\text{MPaG}$ 程度の低噴射圧での噴霧が、他の外力の影響を受けず顕著に微粒化されることを明らかにした。噴霧圧力 $P_s=0.2\text{MPaG}$ の低圧力噴霧を行う場合、マイクロバブル混入噴霧水を使用することによって、最大 32% の微粒化効果を得ることができた。

本研究の成果を活用することによって、水と同程度の低粘性の液体を用いる場合、低圧力で微粒化が可能であり、ポンプの低消費電力化やポンプの小型・軽量化、および低コスト化が期待できる。

また、応用分野については、自動車の車体や建築・土木構造物等の表面塗装において、均一な塗装面が要求されるために塗料の微粒化が必要な塗装分

野、少量で広い面積を消毒するために散布する農薬の微粒化が要求される農業分野、液滴を噴霧して乾燥させて大量の顆粒体を製造する医薬品や食料品製造分野等、幅広い応用分野が挙げられる。

引用文献

- Deutsch *et al.* 2004. Microbubble drag reduction in rough walled turbulent boundary layers with comparison against polymer drag reduction, *Experiments in fluids*, 37(5), 731-744.
後藤世至男 2006. マイクロバブルを用いた油汚染土壌浄化と油分分解機構. 混相流学会論文誌 20(1), 39-49.
川口清司・加瀬篤志 2020. マイクロバブルを利用した液滴の微粒化 (気泡径とボイド率が液滴径に及ぼす影響). 産業応用工学会論文誌 8 (2), 173-180.

アスパラガスの花とオス，メスの話

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

渡辺 慎一

野菜として利用されているアスパラガスは、キジカクシ科クサスギカズラ属の中の *Asparagus officinalis* L. という種である。令和元年度野菜生産出荷統計（農林水産省）によると、日本国内での作付面積は5,010ha、収穫量は26,800tである。筆者が所属している農研機構九州沖縄農業研究センターが位置する九州、とくに北部九州は国内の主要な産地の一つであり、佐賀県、長崎県、福岡県、熊本県の4県で全国の出荷量の1/3以上を占めている。アスパラガスは多年生の草本植物であるとともに、雌雄異株、すなわちオスとメスがあり、野菜の中ではちょっと変わった植物である。

アスパラガスの花と果実

アスパラガスの花は、10～15mmの花柄をもつ釣鐘状の小花であり、雄株には雄花が、雌株には雌花が着生する（図-1）。花被は6枚で通常白色か淡黄色である。雄花には十分に発達した6本の雄ずい（葯、花糸）があり、中心部の雌ずい（子房、花柱、柱頭）は退化している（図-2A、C左）。一方、雌花には1本の雌ずいがあるが6本の雄ずいは退化している（図-2B、C右）。花の中心部を正面から見ると、雄花では葯の色で黄色く見え、雌花では柱頭の色で薄緑色に見える。若茎（店頭で見かけるいわゆるアスパラガス）が伸長した主枝や一次側枝、二次側枝の節に、2花ずつ着生することが多い（図-3）。開花は枝の基部の方から先端部に向けて順次進んでいく（図-4）。一般に雄花は雌花よりも大きく、雄株のほうが雌株よりも着花数が多い。



図-1 開花期のアスパラガス



図-2 アスパラガスの花

A: 雄花, B: 雌花, C: 雄花では子房や花柱、柱頭が退化し（左）、雌花では葯や花糸が退化している（右）

アスパラガスは虫媒花であり、受粉はミツバチ、マルハナバチ等の訪花昆虫によって行われる。雌花の受粉により、雌株には直径7～8mm程度の赤い果実が着生する（図-5）。なお、雄花しか着生しない雄株には通常果実は着生しないが、ごくまれに雌ずいの発達が抑制されずに受粉能力を有する両性花（間性花）を着生する個体があり、間性株と呼ばれる。アスパラガスの雌雄性は1つの遺伝子座によって決定され、性決定遺伝子座をMで表記し、通常の雄はMm型、雌はmm型である（雄をXY型、雌をXX型と表記する場合もある）。間性株（Mm）が自殖（Mm×Mm）することにより、MM、Mm、mmが1：2：1に分離する。MM型の雄株は超雄株と呼ばれる。通常の雄株（Mm）と雌株（mm）を交配すると後代には雄株と雌株が1：1で生じることになるが、超雄株（MM）と雌株（mm）を交配すると後代はすべて雄株（Mm）になる。

雌雄での特性の違い

アスパラガスに雄雌があるという話をすると、どちらが収量が多いのかとか、味に違いはあるのか、ということを知りたい。



図-3 一次側枝への花の着生状況
上：雄株、下：雌株。一節に2花着生することが多い

れることがある。食味については、筆者の経験上は雌雄間での明らかな違いはないと思われる。ただし、収穫時期による差はあり、一般に春の収穫物のほうが夏の収穫物よりも糖度が高く、味は濃厚な感じがする。収量性については、一般的な特性として、雌株よりも雄株のほうが春の萌芽が早く、若茎の平均重はやや軽いが本数が多くて揃いは良く、収量が高い傾向があるとされている。また、雌株では着生した果実が圃場に落ち、その種子から発芽した個体が雑草化するという問題点もある。通常の雄を花粉親としたアスパラガスの品種は雌雄混合型であるが、以上の理由等により、アスパラガスでは雄株のほうが栽培上有利であるとして、先述の間性株の後代から、あるいは薬培養による小孢子由来の半数体 (M) の倍化によって得られた超雄株 (MM) を花粉親とした全雄品種 (すべての個体が雄である品種) の育成が進められている。

一方で、年生 (齢) の若い株を利用する伏せ込み促成栽培等では雌株のほうが若茎の平均重や収量が高い、あるいはハウス長期どり栽培においても、雌株の年間収量は雄株と同等かそれ以上で販売単価の高い春の若茎の平均重や収量は雌株のほうが優れる傾向にあるという報告例もある。また、若茎の重要な外観品質の一つである穂先の締まりは雌株の方がよい傾向がある。以上のことから、同一品種内での雌雄間で比較した場合には、栽培方法によっては雌株の方が有利な場合も考えられる。ただし、最近育成されている全雄品種の中には、従来の雌雄混合型品種の雌株よりも若茎の太さや収量性が優れるものもあるようである。

雄雌の判別法

アスパラガスの雄株には雄花、雌株には雌花が着生するの



図-4 アスパラガスの開花の順序
枝の基部の方から咲いていく

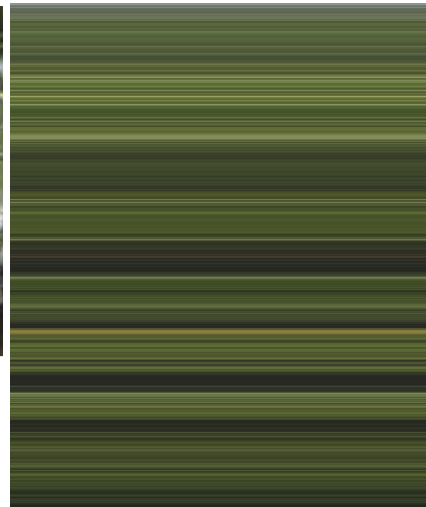


図-5 雌株に着生した果実

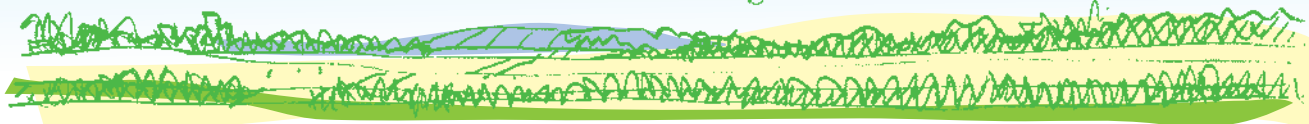
で、花を見れば雌雄の判別が可能である。また、雌株には赤い果実が着生するので、果実の有無によっても判別できる。ただし、植物体がある程度大きくならないと着花や着果に至らないため、育苗時に外観から雌雄を判別することはできない。

苗段階での早期雌雄判別法としては、苗への薬剤処理による早期開花技術が開発されている。フェニルカーバメート化合物である n-propyl N-(3,4-dichlorophenyl) carbonate の種子皮膜処理は、セル成型トレイ育苗中の苗に高率で開花させることが可能で、この技術を利用して雌雄選別された苗がかつて販売されていたこともある (渡辺 1997)。最近では、性決定遺伝子領域を用いた PCR 法によって雌雄を判別できる DNA マーカーが複数開発されており、少量の擬 (ぎ) 葉 (よう) などの組織を用いた幼苗段階での雌雄判別が可能となっている。ちなみに、擬葉というのはアスパラガスの針状の葉に見えるもののことであるが、植物学的には茎が変化したものであり、アスパラガスの植物学上の葉は、茎の節や若茎の頭部の三角形の鱗片状の部分 (鱗片葉) である。アスパラガスは主に「茎」で光合成を行っていることになり、この点でちょっと変わった植物である。

今回はアスパラガスの花や雌雄に関わることについて簡単にご紹介した。アスパラガスは若い地上茎を利用する野菜であり、花に注目することはあまりないと思うが、雌雄の話を含めみなさまに何らかのご参考となれば幸いである。

参考文献

- 菅野明, 2021『アスパラガス大事典』269-272.
- 元木悟, 2021『アスパラガス大事典』91-96.
- 上杉壽和, 2021『アスパラガス大事典』21-32.
- 渡辺博之, 1997, 農耕と園芸 52 (10), 159-162.



送電線網というサンクチュアリ

生物多様性の保全を謳うにあたって、天然林など、人の手が入り込んでいない環境の重要性は言うまでもない。その一方で、里山、雑木林、公園緑地、社寺林などの機能を見直す活動も地道に続けられている。あるいは、農地にしても、恒常的な耕作地には、そこに依存した生物の営みがある。定期的な火入れによって維持されている草地でも、それ独自の生態系が維持されている。

それ以外にも、これまでなんとなく見過ごされてきた生物多様性のサンクチュアリが存在すると思われる。たとえば山地に設置されている送電線の下には多様なチョウが生息しているという論文が発表されている。研究したのは東京農工大学の小池伸介氏が率いる研究チーム (K. Oki *et al.*, 2021, <https://doi.org/10.1007/s10841-021-00343-6>)。チョウ好きのあいだでは、以前から、送電線の下にはチョウが多いという感触を抱く人が多かったという。

送電鉄塔や電線路の周辺は、障害となる植物の伐採義務が電気事業法によって定められている。そのため、周囲の林地とはちがいで、電線路下が草地になっているのだ。つまり林地の中に草地がはさまっているような状態で、それがチョウの分布に影響を与えているのではないかとするのである。

そこで実際にはどうなのかということで、人工林に設置された送電線周辺、近くの幼齢の人工林、壮齢の人工林、人工林内の林道におけるチョウの種数と個体数を5月、7月、9月に調べたという。

その結果、草地を主な生息場所とするチョウが10種410個体、人里周辺を主な生息場所とするチョウが16種847個体、森林を主な生息場所とするチョウが36種866個体、すべてを合わせると62種類2,123個体のチョウが確認されたという。周辺の調査地との比較では、草原と人里周辺に生息するチョウの種類が明らかに多かったようだ。草地性のチョウとしてはウスバシロチョウ、人里性のチョウはミヤマカラスシジミ、森林性はミヤマカラスアゲハが代表的な種として

あげられている。

送電線下の草地には、幼虫が食べる食草があるほか、森林性のチョウも草本の花の蜜を吸いに訪花するため、種の多様性が増しているのだろう。そしてもちろん、今回の調査対象とはなっていないが、チョウ以外の生物にとっても、送電線下の草地が貴重な生息地になっていることだろう。

失われたメガファウナを補完する

送電線下の草地や火入れが行なわれている草地、耕地、人里・住宅地付近などは人為的な環境であり、そこには人間活動に順応した生物が生息している。その一方で、人間活動により、今や地球規模での大量絶滅が進行中である。その最大の原因は、産業活動が活発化した以降の環境破壊であり、そのことから人新生（アンソロポシオン）という地質年代の提唱もされている。地質年代上では過去5回の大量絶滅があった。現在の人為的な大量絶滅は、6回目の大量絶滅にあたる。人類は、地球環境にとって最大の敵だともいえる。

歴代の大量絶滅にはカウントされていないが、人間活動による大規模な絶滅は、過去にも起こっていた。およそ1万年ほど前のことだ。

10万年前にアフリカから他の大陸に進出した人類が強力な石器を発明したり、環境を変えたり、新規感染症を持ち込んだことに加え、気候変動による氷河の拡大縮小に伴う生息域の変動などにより、1万年ほど前に、各地で大型哺乳類（メガファウナ）の絶滅がシンクロして起こったのだ。

旧大陸のマストドンやマンモス、新大陸では南アメリカにいたオオナマケモノ（メガテリウム）、巨大なアルマジロの仲間グリプトドン、オーストラリアにいた巨大なウォンバットの仲間ディプロトドン、カンガルーの巨大版プロコプトドンなどがその代表例である。

そうした大型草食動物が姿を消したことで、特に新大陸の生態系はその姿を変えたと思われる。栄養循環、一次生産、植生などが大きく変わり、野火が発生する頻度も増大したことだろう。というか、現在の自然環境の多くは、1万年前の



図-1 絶滅種と移入されたそれに近い置換種
(E. J. Lundgren *et al.* 2020 より一部改変の上転載)

激変によって形成されたものという言い方もできるかもしれない。

では、大型草食獣が消えたことで空いた生態的地位（ニッチ）はその後どうなったのか。通常、1万年程度では、大きな進化は起こらない。となると、一時的に空白となったニッチは、絶滅を免れた種か、その後によそから移住した種によって占められている公算が大きい。

そこでアメリカ、オーストラリア、ヨーロッパの生態学者からなる研究チームは、大陸ごとに、かつて分布していた種と現生する種のうち、体重10kg以上の植物食哺乳類のリストをデータベースから作成し、絶滅種、生存種、移入種について、それらの体重、食性、生息場所、反芻型かどうか、形態などの特性を比較した (E. J. Lundgren *et al.*, 2020, www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1915769117)。

俎上にあげた種は全部で427種。そのうちの160種が1万年前に絶滅していた。北アメリカでは67%，南アメリカでは65%，オーストラリアでは64%，ヨーロッパでは56%の種が絶滅していたという。

その一方で、新大陸にはその後33種が人の手によって移入されていた。その結果、オーストラリアとヨーロッパでは50%，北アメリカでは46%，アフリカでは42%，南アメリカでは27%，アジアでは11%の種数が回復していた。また、傾向としては、移入された反芻動物については、同じ生態的地位を占める絶滅種よりも小型化していたという。消化効率がよいため、大きな体を保って基礎代謝を相対的に低くする必要がないからなのだろう。

絶滅した種に代わって同じ生態的地位を占めた動物(図-1)は、近縁種というわけではないが、

結果的に、一時的に失われていた1万年前の生態系を復活させる働きをしている。それらの種の移入にあたっては、積極的な導入ではなく、意図せずして野生化したものもある。

たとえば南アメリカのカバは、もともとは、世に名高いコロンビアの麻薬組織メデジンカルテルの首領パブロ・エスコバルの私設動物園で飼育されていた。エスコバルが治安部隊によって1993年に射殺された後、カバはそのまま動物園内の池に残された。動物園は大都市メデジンの東南に位置するドラダルという町にある。ドラダルはコロンビア最大の川であるマグダレナ川に接しており、カバは動物園からマグダレナ川へも脱出している。野生化した数は、およそ100頭に達し、なおも生息域を広げつつあるようだ。カバは、日中は水の中で過ごす、夜になると上陸して主に草を食べている。つまり草食動物なのである。

とはいえ、環境回復のために外来種あるいは絶滅種の近縁種を積極的に導入することについては保守的であるべきだろう。なぜなら生態系の挙動に関するわれわれの知識は、まだまだ限られているからだ。

協会だより

試験成績検討会（リモート開催）

- 2021年度畑作・草地飼料作関係除草剤・生育調節剤試験成績検討会

日時：2021年12月2日（木） 9:30～17:00
3日（金） 9:30～17:00

- 2021年度水稻関係除草剤直播栽培・畦畔等 適用性試験成績検討会

日時：2021年12月9日（木） 9:30～17:00
10日（金） 9:30～17:00

- 2021年度水稻関係除草剤試験成績中央判定会議

日時：2021年12月13日（月） 9:30～17:00

- 2021年度水稻関係生育調節剤試験成績検討会

日時：2021年12月17日（金） 9:30～17:00

- 2021年度春夏作野菜花き関係除草剤・生育調節剤試験成績検討会

日時：2021年12月20日（月） 9:30～17:00
21日（火） 9:30～17:00

新型コロナウイルス感染拡大防止対策として、いずれもWeb会議形式にて開催いたします。

なお、通信障害リスクの軽減及び会議中の煩雑さ回避のため、参加人数は必要最低限に行います。

植調第55巻 第7号

- 発行 2021年10月18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

SDSの水稲用除草剤有効成分を含有する「新製品」

アシュラ1キロ粒剤/フロアブル/ジャンボ/400FG (ベンゾビスクロン)
 ウィードコア1キロ粒剤 (ベンゾビスクロン)
 ダンクショットフロアブル (ベンゾビスクロン/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 (ベンゾビスクロン)
 パピリカ1キロ粒剤/フロアブル (ベンゾビスクロン/テニルクロール)
 イザナギ1キロ粒剤/フロアブル (ベンゾビスクロン)
 ゲバード1キロ粒剤/ジャンボ/エアー粒剤 (ベンゾビスクロン/ダイムロン)
 ホットコンビ200粒剤/フロアブル/ジャンボ (ベンゾビスクロン/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)
 サスケ粒剤200/サスケ-ラジカルジャンボ/レオンジャンボパワー
 (カフェンストロール/ダイムロン/ベンゾビスクロン)
 ジカマック500グラム粒剤 (ベンゾビスクロン)
 ツルギ250粒剤/フロアブル/ジャンボ (ベンゾビスクロン)
 モーレツ1キロ粒剤/フロアブル/ジャンボ (ベンゾビスクロン)
 アネシス1キロ粒剤 (ベンゾビスクロン)
 ジャイロ1キロ粒剤/フロアブル (ベンゾビスクロン)
 テッケン/ニトウリュウ1キロ粒剤/ジャンボ (ベンゾビスクロン)
 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 (ベンゾビスクロン)
 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)



「ベンゾビスクロン」含有製品

SU抵抗性雑草対策に！アシカキ、イボクサ対策にも！

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)	スマート (1キロ粒剤/フロアブル)
イッテツ (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/ジャンボ/顆粒)
イネキング/クサバルカン (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)
ウエス (フロアブル)	トビキリ (ジャンボ)
オークス (フロアブル)	ナギナタ (1キロ粒剤/豆つぶ250/ジャンボ)
カービー (1キロ粒剤)	ハーディ1キロ粒剤
キクトモ (1キロ粒剤)	ハイカット/サンパンチ1キロ粒剤
クサトリーBSX (1キロ粒剤/フロアブル/ジャンボ)	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/ブレッサフロアブル
サンシャイン (フロアブル)	ブルゼータ (1キロ粒剤/フロアブル/ジャンボ)
忍 (1キロ粒剤/フロアブル/ジャンボ)	フルイニング (ジャンボ/スカイ500グラム粒剤)
ジャイブ (スカイ500グラム粒剤)	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/フロアブル/ジャンボ/顆粒)	ピラクロエース/カリュード (1キロ粒剤/フロアブル/ジャンボ)
シリウスターボ (1キロ粒剤/フロアブル/ジャンボ)	ライジンパワー (1キロ粒剤/フロアブル/ジャンボ)
シロノック (1キロ粒剤/フロアブル/ジャンボ)	



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/>



植物成長調整剤

花類の節間伸長抑制に

ビーナイン[®]
(ダミノジッド) **顆粒水溶剤**

ぶどうの品質向上、新梢管理の省力に

日曹 フラスター[®] 液剤
(メピコートクロリド)

除 草 剤

イネ科雑草の除草に。

－8葉期まで使用できます－

たまねぎ・だいず・あずき・ばれいしょ・てんさい
かんしょ・いんげんまめ・やまのいも・にんじん・そば
(他40作物以上に登録)

生育期処理 **ナブ[®]乳剤**
除草剤 (セトキシジム)

より強く、よりやさしく。
進化した、畑作除草のキラ星

フィールドスター[®]P 乳剤
(ジメテナミドP)

スズメノカタビラを含む
イネ科雑草の防除に

－たまねぎは2回まで使用できます－

ホーネスト[®] 乳剤
(テプラロキシジム)

強さと、優しさで守る！
飼料用とうもろこし専用除草剤

アルファード[®] 液剤
(トプラメゾン)



日本曹達株式会社

本社 〒100-8165 東京都千代田区大手町2-2-1 ☎ 03-3245-6178
ホームページアドレス <https://www.nippon-soda.co.jp/nougyo/>

これはなんだろう？

**みんな農家さんさ
レイミーが
お手伝い！**

あれは
去年どこの畑に出たんだっけ？

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！

農作物に被害を及ぼす病害虫や雑草を写真からAIが診断し、
有効な薬剤情報を提供する、スマートフォン用の防除支援ツールです。

対応作物

水稲

キャベツ

レタス

はくさい

ブロッコリー

ねぎ

アプリの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

日本農業株式会社

SUSTAINABLE GOALS

日本農業株式会社は持続可能な
開発目標(SDGs)を支援しています

※スマホ画面は開発中のもののため実際と異なる場合があります

■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。

エフィーダ含有除草剤ラインアップ

皇帝の品格。
エンペラー®

移植も直播も飼料稲にも。高い安全性。

ベルーガ®

水田除草の未来を切り拓く。

アバンティ®

除草効果優先、使いやすさ優先。

プライオリティ®

この除草剤、ベッカク。

ベッカク®

●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。●防除日誌を記憶しましょう。



自然に学び 自然を守る
クミアイ化学工業株式会社
本社 東京都台東区池之端1-4-26 〒110-8782 TEL.03-3822-5036
ホームページ <https://www.kumiai-chem.co.jp>

水田除草に、新たな風。

新規有効成分エフィーダ®とは

新しい成分「エフィーダ®」配合/水稲用除草剤シリーズ

白化作用を示し、SU剤抵抗性雑草を含めた幅広い雑草に優れた効果があります。

飼料用イネや多収米にも品種を問わず使用できます。

新しい水稲用除草剤をぜひお試しください。



©はクミアイ化学工業(株)の登録商標

豊かな稔りに貢献する 石原の水稲用除草剤

ISHIHARA
BIO
SCIENCE

湛水直播の除草場面で大活躍！

非SU系水稲用除草剤

ブレイク® 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

セーフ® MX 1キロ粒剤 / ジャンボ®

フルパグ® MX 1キロ粒剤 / ジャンボ®

スガダ® A 1キロ粒剤

ヒエクッパ® A 1キロ粒剤

フルチャージ® ジャンボ®

フルニンガ® ジャンボ®

タイズドール® 1キロ粒剤

乾田直播専用 **ハードパンチ**® 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>

私たちの多彩さが、
この国の農業を豊かにします。

®は登録商標です。

〒104-8260 東京都中央区新川1丁目27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・空容器は廃棄等し適切に処理してください。



大粒のあぐり、まっすぐいへ
sco GROUP

住友化学

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
シヤンボ フロアフル

新登場! **ゼータプラス** 1キロ粒剤
シヤンボ フロアフル

マスラオ 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

畑作向け除草剤

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

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® **ユニホッフ**®
サベルDE ハーレイ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

サファゾントWK 丸和 **サファゾント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/>

農耕地から緑地管理まで
雑草防除に貢献します。

第55巻 第7号 目次

- 1 巻頭言 雑草防除対策の新たな展開
早川 泰弘
- 2 日本のコムギの倒伏抵抗性と強稈性
松山 宏美
- 7 〔田畑の草種^{くさくさ}〕 昼顔(ヒルガオ)
須藤 健一
- 8 ハナスベリヒユの花の開閉とトランスクリプトーム解析
柴田 道夫
- 13 バッシブサンプリング法による環境水中の除草剤(農薬)のモニタリング
矢吹 芳教・野呂 和嗣・伴野 有彩
- 18 〔統計データから〕令和2年度の食料自給率
- 19 マイクロバブルを用いた液滴の微粒化
川口 清司
- 24 〔シリーズ・野菜の花〕アスパラガス
渡辺 慎一
- 26 〔連載〕道草 第26回 生態系は誰のものか
渡辺 政隆
- 28 広場

No.78

表紙写真 〔ヒルガオ〕



畑地、樹園地、道ばた、空き地などに生育する在来種。類似するコヒルガオも同じ環境に棲息するが、耕起される土地ではコヒルガオの方が多い。葉身や花の形に違いはあるが、中間的な変異も多い。(写真は©浅井元朗, ©全農教)



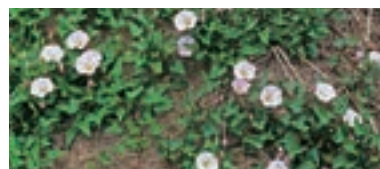
根茎から萌芽した個体。コヒルガオに比べて葉身が長い。



花。花冠は径5~6cm。淡紅色。



種子。広倒卵形。



コヒルガオ。葉柄が長い。