第 2 部

実践技術及び最新技術を活用した雑草防除へのアプローチ

- ◆ 雑草の生態を活用した抑草技術に関する基礎知識
- ◆ 雑草を味方にするイネの有機栽培技術
- ◆ 米ぬか散布はコナギの発芽にどう影響するのか？
- ◆ AI を活用して難防除雑草を芽生えのうちに発見する
- ◆ 畑用除草ロボットの開発状況と課題

雑草の生態を活用した
抑草技術に関する基礎知識

小林 浩幸

宇都宮大学 雑草管理教育研究センター

水稲栽培で雑草防除に要する時間は 1950 年代には 10a あたり約 50 時間だったのが、現在では 1 時間ほどにまで減っている。これは、除草剤の普及によるところが大きい。有機栽培ではこの有力な防除手段を使わないが、当時のように多くの人手は期待できないとすれば経営の持続性を担保する意味でも相応の能力を有する代替技術が必要になる。

有機栽培であれ、除草剤の使用を前提とする慣行栽培であれ、防除しようとする雑草の生態的特性を知ることが、合理的な防除の第一歩である。そこで、特に重要と思われる耕地雑草の特性をいくつか概説し、ついで防除技術の原理を「選択性」の観点から整理する。

1. 耕地雑草の生態的特性

(1) 撹乱に適応している

農耕地では、耕起・整地、除草剤散布など撹乱が次々と加えられ、そのたびに多くの雑草個体が死亡する。このような撹乱をかいくぐって生きのびやすい特性をもっているものだけが個体群を維持できる。以下は、そのような特性の具体的例である。

(2) 生活環は短く、多くは一年草である

多くの草本作物は一年生で、作付けの直前に耕起・整地が行われ、収穫が終われば改めて耕起されることも多い。ていねいな耕起でほとんどの個体は死亡するので、種子をつけるのに 1 年以上を要する草種が圃場内で生き残ることはあまり期待できない。特に、年に複数回の作付けが行われる葉物野菜などでは撹乱と次の撹乱までの間隔がより短く、例えば栽培期間が 3 か月なら、3 か月以内に発生から種子散布までを済ますことができる早生の種でないと生き残れないことになる。ただし、果樹などの木本作物では不耕起で、刈り取り除草など比較的弱い撹乱で維持されることも多いため、多年草も生存しやすい。要するに、耕地雑草の特性としては、栽培される作物と生活環を同調させることができることが本質的に重要である（図 1）。同じ品目を連作するのではなく、作期の異なる品目からなる輪作が雑草防除に有効とされるのはそのためである。

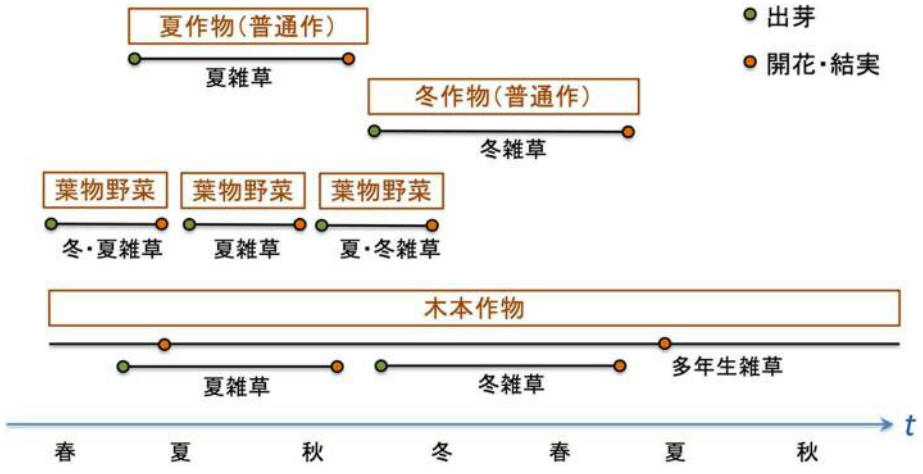

図 1 作物の作期と雑草の生育期間の同調
非作付時に行われる徹底防除を逃れるため、耕地雑草は生活史を作物と同調させる。木本作物は作期が長く、長期間徹底防除が行われない場合には多年生雑草が優占しやすい

(3) 耕起などの撹乱を契機として一斉に発芽する

生活環を同調させて、短時間で繁殖を成功させるためには、多くの耕地雑草は最後の耕起が終わって作物の作付けの開始直後に出芽が一斉に始まる。これをもたらす生理的なメカニズムとして光や変温による発芽促進効果がある（図 2）。このうち光が種子の発芽を促進する特性は光発芽性と言われ、ごく短時間の露光でも有効とされている。例えば、作付け前の耕起・整地の際に土中にあった種子が掘り上げられて瞬間的にでも露光すれば、発芽が促される。不耕起栽培でも、刈り取り除草や非選択性除草剤の散布によって地表面の植被が取り払われれば一時的に地表面付近の照度が上がり、昼夜の変温も大きくなるので、雑草の発芽は促進される。マルチに雑草抑制効果があるのは、出芽後の光合成の制限による生育抑制だけでなく、光発芽性の雑草種子の発芽抑制にもよっている。

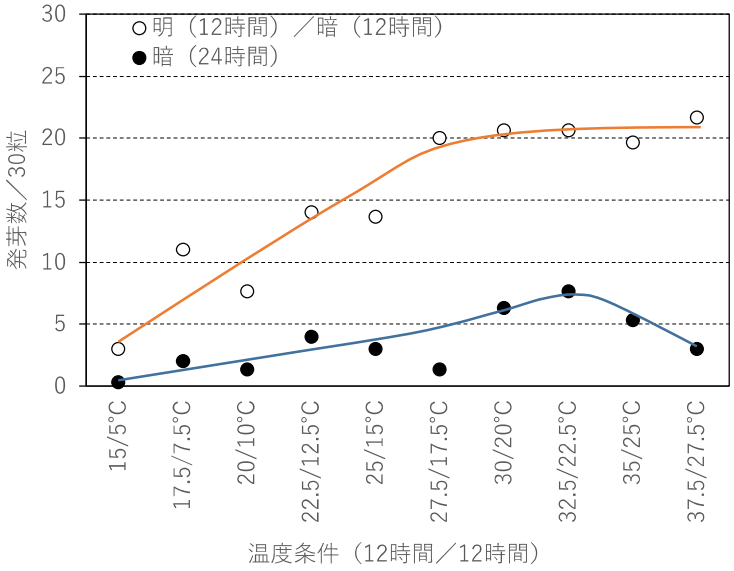

図 2 ホウレンソウ畑由来のゴウシュウアリタソウ（ヒユ科）の温度と光条件の効果
暗条件では発芽率が劣るが（光発芽性）、発芽適温（昼間の温度で 30～35℃）では光の条件はやや緩和される（小林・加賀 未発表）

(4) だらだらと発生を続ける

耕地雑草の発生時期は比較的長期に及ぶことが多い。これは、上述の播種時に一斉に出芽する性質と矛盾するものではなく、中耕作物などで中間管理が行われる場合には、そのたびに発生のピークが見られる（図 3）。

図 3 大豆圃場におけるシロザの出芽消長
播種後の一斉の発芽の後も、中耕のたびに小さなピークが見られる。このようにして出芽は春から初夏まで続いた Kobayashi *et al.* (2004) を一部改変

全面耕起や中耕でいったん防除できたとしても、それがきっかけで再び発生する特性は防除する側からみれば厄介である。だらだら発生を続ける要因としては、発芽可能な環境条件の広さや休眠性をばらつかせる遺伝的な制御機構、あるいは休眠性に関する集団内多型などが想定される

が、事情は草種によって異なる。不耕起・無培土栽培では耕起が行われないので、こうした一斉の発生は見られず、雑草の出芽はなんとなく始まってだらだらと続き、なんとなく終わることも多い。

(5) 小さな種子を多数つける

子実を大きくする方向に育成された穀物などと比べると、雑草は 1 個体が生産する種子数が多く、その分、一つひとつは小さい傾向がある。例えばタデ類（タデ科）の種子は耕地雑草としては大きな方だが、同じタデ科のソバの種子よりはずっと小さい。小さな種子を多く生産する特性は、撹乱による死亡率の高さを数で補っている面がある。種子の大きさはしばしば休眠性の深さとも関係し、小さい種子の休眠性はより深い傾向があって、埋土種子集団の形成にも関係する（次項参照）。

小さい種子の初期生育は緩慢で、種子の大きな他の個体との競争では不利だが、耕地雑草は裸地、つまり競争相手がまだだれもいない時に一斉に発生が始まることが多いので、他個体との競争力を高める方向には強い選択圧がかかっていない。防除上は、このような緩慢な初期生育が、後述する作物との選択性を確保するポイントになりうる。

(6) 種子は休眠性をもち、埋土種子集団をつくる

耕地の一年生雑草の種子は、散布直後には休眠性を持っていて（一次休眠）、すぐには発芽せず、寿命も比較的長いので土壌に大きな埋土種子集団をつくりやすい（図 4）。秋に散布された夏雑草の種子休眠は次の発芽適期である春には覚醒して、温度などの条件が整えば発芽できるようになる。しかし、発芽適期に発芽せず、土中に残った種子の休眠は再び深まり、温度条件が春と似る秋には発芽しないのが普通である。こうした休眠性の季節変動（Baskin & Baskin 1998）は、種子以外の世代では越冬できない夏雑草が秋に発生して無駄死するのを回避するための機構と考えられている。冬雑草では季節変動の位相が半年ずれる。

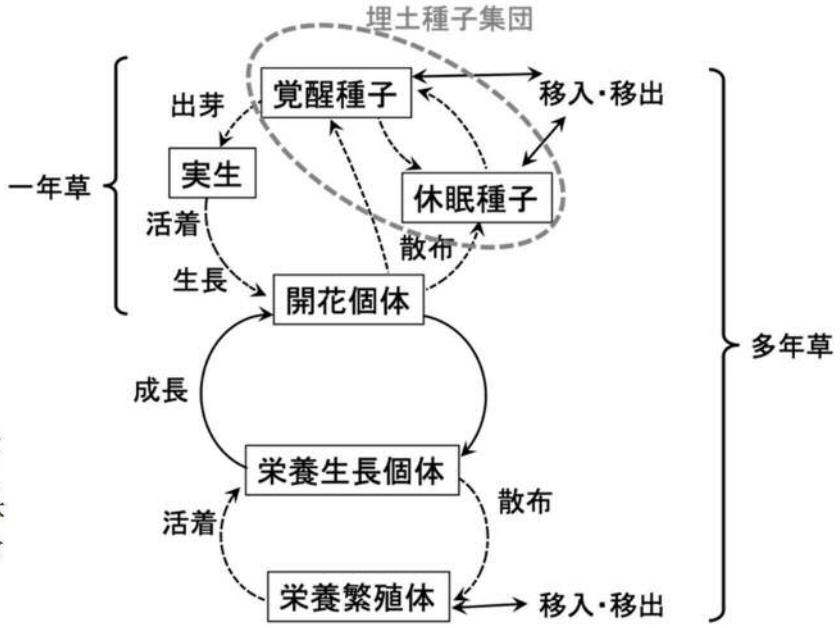

図 4 耕地雑草の生活環
一年草は種子休眠を持つことで、膨大な埋土種子集団をつくる。このため、地上部の植物体が完全に防除されても個体群を維持できる

私たちは植物個体群を調べようとするとき、地上部だけに目を向けがちだが、地上部は氷山の一角であり、特に耕地雑草の個体群は地上部に現れた個体と土中の膨大な埋土種子集団から構成されていると考えたほうが良い。埋土種子集団を持っていると、耕起などの徹底的な撹乱で地上の植物体が全滅しても、種子として個体群を存続させることができる。耕地雑草の多くが埋土種子集団を形成する大きな理由はそこにある。これを防除する側からみれば、地上部を防除できた

としても個体群全体を防除したことにはならないことを意味する。

2. 農耕地での雑草防除の原理

雑草防除の考え方は、作物が栽培される農耕地とそれ以外の場所で異なる。農耕地では雑草に防除効果がある一方で、作物には害を及ぼさないことが前提である。この点で、同じく作物保護の観点から防除対象になる病害虫とは大きな違いがある。防除対象である雑草が作物と同じ植物であることに起因する「選択性」確保の重要度が格段に高いということである。管理作業に対する感受性が作物と雑草の間でそれなりに違っていれば雑草防除技術として成立する可能性があるが、違いがなければ技術は成立しない。したがって、農耕地における雑草防除の原理は選択性にあると言うことができると思う。

現在、私たちは生理的・生化学的に洗練された除草剤を便利に利用できるが、除草剤が普及する以前から、作物に害を与えることなく雑草をいかに効率化に取り除くかが栽培上の主要な課題の一つであり続けた。選択性を有する手段が考案され、実装されてきた歴史は、作物栽培技術の発展の歴史でもある。例えば、耕起作業は時期により、さまざまな効果を期待して行われるものだが、実際には雑草防除の意味が極めて大きい。そこで、明確な選択性をねらって開発された技術だけでなく、農作業全般を雑草防除技術として見た場合も含めて、選択性の観点から分類し、概説する。選択性の考え方は主に除草剤の作用機構を解説するなかで用いられるが（植木・松中1985）、本項では除草剤技術全般に対象を広げて整理する。

(1) 生理的・生化学的な選択性

作物と雑草の生理的・生化学的な特性の違いを選択性に利用しようとするものであり、最も本質的な選択性である。選択性の意味は、除草剤の処理量と植物の反応の関係を示す用量反応曲線を用いると理解しやすい（図 5）。

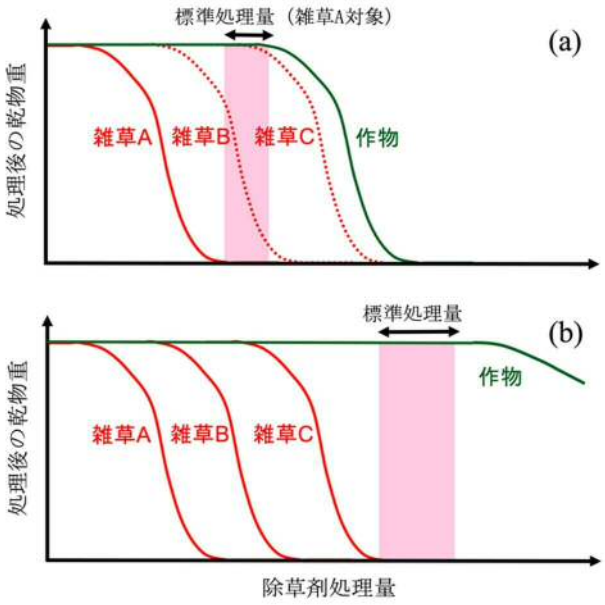

図 5 2 種類の除草剤（a、b）に対する 3 種の雑草(A、B、C)と作物の用量反応曲線
(a)雑草 A だけに有効な除草剤の例。雑草 B、C は作物と反応に大きな違いがないので、作物には無害で雑草は完全に枯死するような処理量を設定できない
(b)作物の耐性が極めて高い除草剤の例。3 種草に対して利用可能である

この図には 2 種類の除草剤に対する 3 種の雑草と作物の用量反応曲線が描かれている。3 草種ともに、より少ない除草剤処理量で乾物重の減少が見られることから、作物よりは感受性が高いといえる。しかし、(a)では雑草 B と C ではその差が小さいため、作物には無害だが雑草は完全に枯死するような処理量を設定できない。唯一、雑草Aに対してだけは赤い帯の範囲の処理量で、この作物の栽培に雑草 A を対象として利用できる。(b)は作物の除草剤耐性が極めて高い場合を示したもので、これなら全種草を対象として除草剤が利用可能である。非選択性除草剤と耐性品

種の組合せも、このような関係として捉えることができる。

系統分類上近縁なものどうしは総じて生理的・生化学的な特性が近く、除草剤に対する感受性も似ている傾向があって、選択性を確保しづらい。例えば、アブラナ科野菜でスカシタゴボウ（アブラナ科）、大豆栽培でヤブツルアズキ（マメ科）が残草しやすいのはそのためである。ただし、同じ草種でも個体間で除草剤に対する感受性は異なることがあり、その差が著しく大きい場合には除草剤抵抗性と呼ばれる。(a)で雑草 A、B、C が同一種と考えれば、雑草 A は感受性個体、雑草 C は抵抗性個体ということになる。

湛水や深水管理といった耕種的防除も、嫌気条件や過湿な条件に対する耐性の違いを利用するもので、生理的な選択性を活用したものといえる。深水管理でノビエ類の防除が容易でもコナギなどが残草するのは、草種間の耐性の違いを反映したものである。

(2) 時間的な選択性

農耕地であっても、作物が栽培されない時期がある。一年生作物の 1 年 1 作なら収穫後から次作が始まるまでの半年近くの間、1 年 2 作、2 年 3 作でも期間は短いとしても作物は生育していない時期は必ずある。その間であれば、ていねいな耕起などによる徹底的な防除が可能である。そのような防除は、作物と雑草の生育時期に重なりがないことを利用した時間的な選択性に基づいているということができる。時間的な選択性に基づく雑草防除は、基本的な農作業にあらかじめ内包されていて、雑草防除の手段と意識されないことも多い。作物の収穫後や作付け前に行われる耕起はその例である。

難防除雑草が蔓延して手に負えなくなったときにはしばらく休閑して徹底防除を行うことが推奨される。また、作期・品目を変えることで徹底防除の機会が得られることがある。大豆栽培で、春から初夏にかけて発生する一年生雑草の防除が困難なとき、秋ソバに切り替えて盛夏まで作物を栽培せず、その間徹底防除するのも、時間的な選択性の活用例である。土地利用型作物では、作目を変更しなくても、晩播で雑草の発生を減らすことができることが多い。南東北における大豆の慣行的な播種晩限は 6 月中旬とされているが、半月ほど播種を遅らせるだけで栽培期間の雑草の発生量を大幅に減らすことができる場合がある。これは、東北で優占しがちな重要雑草がシロザ（ヒユ科）やタデ類（タデ科)といった低温発芽性の広葉雑草であり、晩播によって播種期の気温が上昇することで、それらの発生が抑制されることによると考えられる（Kobayashi & Oyanagi 2006)。麦類栽培でも、東北では 11 月以降に播種すれば越冬する雑草はほとんどなくなる。どちらの場合も、播種前に発生する雑草量は増加するが、耕起などによって徹底防除が可能である。

作物と雑草の生育ステージを大きく変えることも選択性の確保につながる。どのような防除法でも、一般に植物体が大きく、生育ステージが進んだ個体の方が防除に対する抵抗性が強いことがその背景にある。移植栽培では程度生育が進んだ個体が移植されるので、広い意味では時間的な選択性を活用しているといえる。また、作物体自らの茎葉がつくる被蔭によってその下の空間の照度が大きく低下して雑草の新たな発芽や現存する雑草の生育が強く抑制されるので（1.(3)の項参照)、それを積極利用しようとする耕種的防除でも、時間的な選択性が念頭におかれている。

(3) 空間的な選択性

作物を条に植える最も大きな意義は栽培期間中の管理をしやすくすることにある。雑草防除でも、作物を条に集中させれば、条と条の間は徹底的な除草作業がしやすい。中耕による土壌撹拌や機械除草はほぼ非選択的な除草技術であり、位置による選択性が不可欠である。作物を条に植えることで、こうした防除技術がはじめて適用可能になる。しかし、実際には雑草は条の中、株間にも発生する。中耕と同時に行われる培土は、こうした雑草を防除するためのもので、作物よりも小さな雑草の植物体を土中に埋めて枯死させる。しかし、雑草が作物と同じ程度のサイズにまで生育していれば、防除効果は期待できない。作物と雑草の生育差に基づく時間的な選択性と

垂直方向の空間的な選択性を利用した技術といえるだろう。

(4) 物理的な選択性

回転刃や爪で土壌を撹拌するロータリーやカルチベーターには植物を物理的に土中に埋め、引き抜き、または切断する効果があり、作物栽培における雑草防除に極めて普通に用いられる。しかし、作物と雑草の間に選択性はないので、作期中に用いる場合には作物の条にあたる部分の回転刃や爪を抜くか、作業幅が条と条の間隔未満の機械を用いることで、空間的な選択性を確保する。これが中耕である（前項参照）。一方、主に北海道の畑作では一定の柔軟性を備えた針金で作られたカルチやレーキからなる除草機が普及しつつある。作物は条に植えるのが前提条件で、カルチは条間の雑草を非選択的に枯殺し、レーキは作条にそって、作物の株間に発生した雑草だけを選択的に防除する（図 6）。

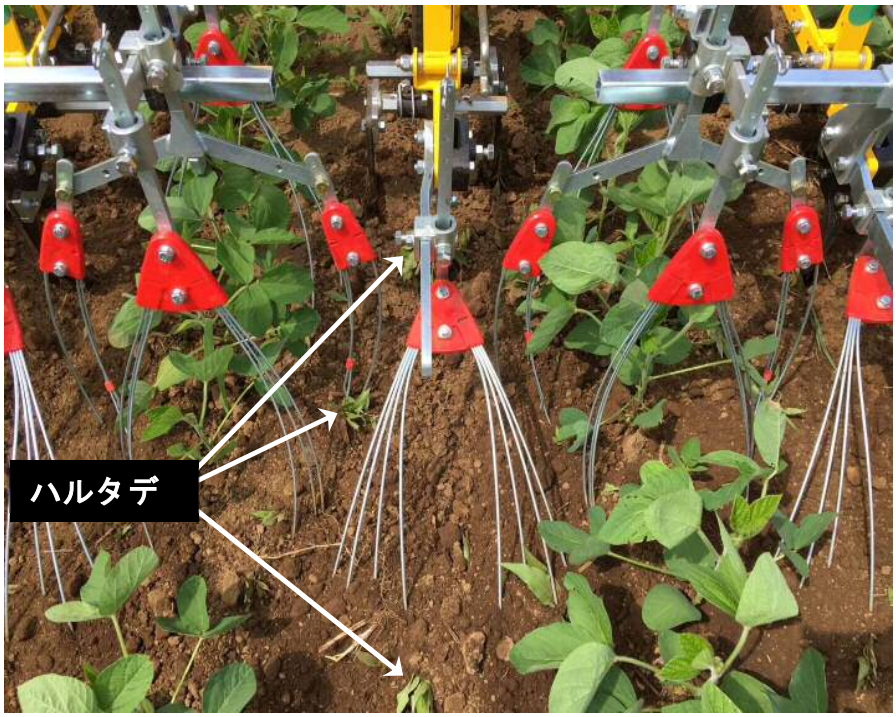

図 6 レーキ、カルチからなる除草機による大豆畑の除草
条間ではカルチ、株元近くではレーキに引っかかり、ハルタデが除かれているが、大豆に損傷は見られない

レーキはスチール製の針金状の器具で、土壌の浅い層をトラクタなどの走行方向に水平に移動しながら根張りが弱くて引き抜かれ安い雑草を引き抜き、あるいは茎を切断する。作物の引き抜きや切断に対する抵抗性が雑草よりも十分に強ければ、レーキの強度をうまく調整することで雑草だけを故殺できる。図 5 に示した除草剤の用量反応曲線の横軸を植物体に加えられる物理的な強度と読み替えれば、レーキによる除草の選択性を表現できる（図 7）。このいわば「防除強度反応曲線」は、圃場の条件やレーキの種類によって変化する。標準処理量は、この場合、適用可能なレーキの強度の範囲を示しており、レーキのしなやかさや角度調整、走行速度などによって調整される。(b)のように、作物と雑草の強度が大きく異なる場合には、作物に害作用を与えることなく全草種を防除することができるが、(a)では雑草 A のみに適用できる。現時点ではレーキの強度を除草剤ほどには柔軟に変化させることができないので、選択性確保のため、事前のなんらかの防除法や作期の調整など、別の手段を組み合せることが前提となる。いずれにしても、使い勝手の良い技術にするためには、もう一段のブレークスルーが必要と思われる。なお、図 7 の防除強度反応曲線は、他の多くの防除法で選択性の説明に使用できる。

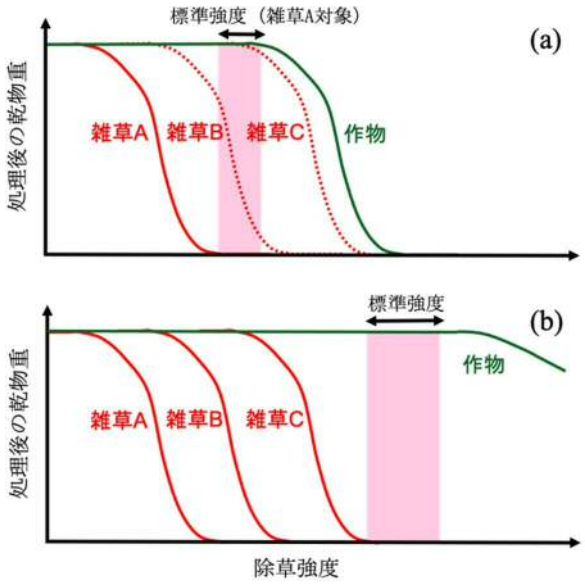

図 7 2 種類の防除法（a、b）に対する 3 種の雑草(A、B、C)と作物の防除強度反応曲線
(a)雑草 A だけに有効な防除法の例。雑草 B、C は作物と反応に大きな違いがないので、作物には無害で雑草は完全に枯死するような処理量を設定できない
(b)作物の耐性が極めて高い防除法の例。3 種草に対して利用可能である

(5) 組合せによる選択性の確保

これまでにしばしば例示してきたように、選択性が不完全なために作物に害が生じ、あるいは除草効果が不十分なとき、中核となる技術に別の技術を組み合わせることで選択性を強化して技術として成り立たせることができる場合がある。これは、模式的には図 7 で(a)の防除法を組み合わせによって(b)に近づける方策と表現できる。省力化のためにはできるだけ少ない回数の管理作業で全ての雑草を防除でき、作物には無害な技術が理想だが、選択性確保のためには一つひとつの技術の効果が不十分にならざるを得ないことが多く、多くの場合、複数の技術が組み合せられることになる。水稲栽培の初中期一発処理は、有効な選択性除草剤を複数混合することで除草剤の散布作業を飛躍的に効率化したが、一般的には移植栽培を前提としたもので、直播栽培では初期剤や中後期剤との体系処理が必要になる。総合的雑草管理（IWM = Integrated Weed Management）は、一つひとつの技術の効果は不十分でも、合理的に組み合せることで十分な効果を持続的に得ようとする考え方で、選択性確保の観点からは、それを強化するための方策にほかならない。現時点で最も有力な技術と考えられる除草剤をいっさい用いない有機栽培では、このような考え方が本質的に重要で、優れた代替技術の可能性を追求すると同時に、複数の除草手段を有効に組み合せることが慣行栽培以上に求められる。

一般的に言って、雑草や作物といった生物の個々の生態的特性や相互関係を活用した技術の有効性は気象条件など多くの要因に左右されやすく、安定した効果を得るのが難しい。しかし、情報技術や分析技術の飛躍的発展によって、雑草を含む生物群集の膨大で複雑なネットワークが詳らかになれば、様々な、あるいは単純な要素の組み合わせによって、極めて有効で頑健な雑草管理技術がいずれできあがる可能性があると私は思っている。

3. 環境保全や人の健康をめぐる課題

農業技術としての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。自給的な生活の一要素として有機農業をとらえるのなら個人の人生観、価値観の問題で済まされるが、日本における農業生産の相当部分を有機農業に変換していくのだとすれば、だれにでも理解できるかたちで、有機農業を真に持続的なものとして発展させる必要がある。そのためには、技術の性能を不断に評価して開発に反映させ、向上させていく努力が必要と思う。ここでいう性能には、経営に直結する性能だけでなく温室効果ガス排出や炭素貯留、生物多様性に対する効果、あるいは人の健康に対するリスクなども含まれる。これらに係る性能が科学的な手続

きを経てライフルサイクル全体として評価され、客観的に示される必要があるということだ。例えば、除草剤の代替として耕起作業が行われる場合、条件によってはライフサイクル評価において温室効果ガス排出を助長し、土壌動物にも負の効果を与える可能性がある。こうしたマイナス面も含めて、あくまでも科学的・客観的な評価が行われるべきだろう。

2019 年の G7 メッス環境大臣会合で採択された生物多様性憲章は、実効性のほどはともかく、私は画期的だったと思っている。そこには、「生物多様性や生態系サービスの価値評価、意思決定過程への主流化を強化」すると明記されている。一般的には生産性と生物多様性などの環境保全機能にはトレードオフの関係があるとされている。しかし、生物多様性憲章は、生物多様性や生態系サービスの価値は、経済性など他の価値評価よりも優先されるべきだと言っている。私には、人類による人種や性による差別の認識と、それを出発点とする是正の努力の歴史と似たようなことが、生物多様性でも始まりつつあるような気がしてならない。

引用文献

Baskin CC, Baskin JM (1998) Seeds-ecology, biogeography, and evolution of dormancy and germination: 49-86, Academic Press, San Diego.

Kobayashi H, Miura S, Oyanagi A (2004) Effects of winter barley as a cover crop on the weed vegetation in a no-tillage soybean. Weed Biology and Management, 4: 195-205.

Kobayashi H, Oyanagi A (2006) Soybean sowing date effects on weed communities in untilled and tilled fields in north‐eastern Japan. Weed biology and management, 6: 177-181.

植木邦和・松中昭一（1985）雑草防除大要 第 11 版, 養賢堂, 東京.

雑草を味方にするイネの有機栽培技術

舘野 廣幸

舘野かえる農場

1. はじめに

有機農業の理念は、月並みな表現ですが「自然と人間が生かし合いながら暮らせる世界の実現」であり、単なる人間の利益のための有機農業ではないことだけは明確であると思います。こうした理念に反しない限り、自然環境も人も地域も多種多様のように、有機農業へのアプローチも多種多様であること当然と考えます。

したがって、考えると有機農業にマニュアルは必要かという疑問も出るわけですが、技術マニュアルは、その奥にある理念を実現する手段であり、理念を忘れたマニュアル化するのは形だけの有機農業になると思います。どの田んぼでも一枚一枚性格が異なるように、それぞれの田んぼに合った有機稲作の技術を追求して行くことが大切であると思います。

自然と向き合い、自分で考えるということが有機農業の本質なのだと思います。

舘野かえる農場の経営概要

（栃木県下都賀郡野木町）

1992 年より無農薬・無化学肥料で栽培

・有機稲作：12ha ・有機野菜：0.2ha
・有機小麦：1ha ・有機果樹：0.1ha
・有機大豆：1ha ・雑木林：2ha

使用する有機資材：雑草、稲わら、大豆、米ぬか、小麦

2. 有機稲作への思考の転換（資源循環は生き物の働きで）

私が有機農業を始めたのは、1992 年（平成 4 年）からです。以来、苦節 30 年、いや現在も苦節の途中なのですが、多く生き物の皆様の犠牲によってここまで歩んできました。これまで様々な農法を試行しましたが、失敗も多く落ち込む日々でした。その失敗の原因は自然の仕組みを知らず、自分（人間）の都合で判断していたことが最大の原因でした。

田畑の自然をよく見て、その働きを活かすことができれば、自然と人の協同作業による有機農業ができると考えています。

舘野かえる農場の有機稲作

現在に至って、雑草の性格を利用した草取りをしない田んぼ、肥料を入れなくとも微生物が生み出す養分で稲が育つ田んぼ、生き物が害虫を食べて稲を守る田んぼを実現しようと、努力しています。もちろん、農作業にはトラクターや田植機（ポット式田植機）などを用いています。今後、IT 技術なども農業に導入され、有機農業の分野にも応用されると思われます。こうした IT 技術の農業への導入は、人間の労働の軽減や圃場管理の情報を与えてくれるなどの一定の効果が期待されます。しかし、有機農業を支える田畑で活動する生き物の複雑多様な能力は、IT 技術をはるかに凌ぎます。IT 技術は人間の能力を補うことはできても、自然に勝ることはできないと思います。

カエルの働きで稲を栽培する

例えば田んぼに棲むカエルは害虫を食べ、オタマジャクシのときは雑草も防ぐ優れものです。実際に、田んぼでは私よりカエルたちの方が働いています。私の田んぼのお米はカエルが育てていると言っても過言ではありません。したがって有機稲作では、カエルたちが喜ぶ環境をつくることが重要な農作業となります。すなわち、カエルの快適な住居である畦畔に草むらを維持すること、カエルの食べ物である虫を増やすこと、オタマジャクシの生育中は水を切らさずの子育てしやすい田んぼにすることなどです。こうしてできるカエルたちの楽園は、人間の楽園でもあるのです。

3. 多様な生き物を増やす有機農業技術

一般的に有機農業の定義では、「農薬を使わない」「化学肥料を使わない」「遺伝子組換え技術を使わない」農業とされています。こうした定義は、禁止条項として多くの農業者に敬遠される要因となっています。しかし、有機農業を実践すると「使わない」という禁止条項ではなく、それらを「使う必要がない」農業であることが分かります。有機農業は豊かな生態系を創出することによって、健康な農作物も育つのですから、「有機農業とは多様な生命の働きによって行なわれる農業」と定義される方が適切だと思います。したがって、有機農業技術とは「多様な生き物を増やす」技術であると言えます。

(1) 「虫を増やす技術」

ここで虫と呼ぶのは分類学的な昆虫を言うのではなく、いわゆる「虫」偏の付く生き物のことです。つまり、カエル（蛙）やミミズ（蚯蚓）も虫の仲間に入ります。残念ながら世の中にはこうした虫が嫌いな人が多くて困ります。虫たちの多くは害のない「ただの虫」です。もし、特定の虫が多発する場合は生態的バランスの乱れが生じていることになります。虫の種類と発生数は、田畑の健康診断票でもあります。できるだけ多くの虫たちがバランス良く棲める環境を整えることが「害虫」の多発を防ぐことになります。「害虫」もカエルにとっては大切な食糧ですので、必要な生き物なのです。

(2) 「菌を増やす技術」

有機農業は、いまだに「有機質を肥料にする農業」であると誤解されているように感じますが、そうではありません。有機農業において田畑の土壌に有機質を投入するのは、菌類が活動し易い環境を造り、そこで働く菌類の生活環境を豊かにすることによって、菌類が栄養分を生み出し、農作物が育つためであると考えます。菌類が少ない田畑に多量の有機物を投入することは、未熟有機物の分解ができず、むしろ有害となります。菌類を増やすには、あえて微生物資材を投入するより土着菌類を活用することが有効です。土着菌類の多くは雑草の根と共生しているため、雑草を活用することが有効です。

(3) 「草を増やす技術」

雑草は農業の最大の敵とされてきました。有機農業においても、除草剤を使わずにいかに雑草を生やさないようにするかという技術開発が行われています。しかし、そもそも雑草が田畑を守り、虫を増やし、菌を増やしているのです。雑草こそ有機農業にとっての「宝」であり、雑草を抜き取る度に田畑は栄養分と生物多様性を失うのです。しかし、ほとんどすべての農民は自分の田畑に雑草が生えてくると怒るか恨みます。「憎き雑草どもめ、なんで生えて来るんだ！」と心で思いながら「草取り」を始めるのです。しかし、雑草から見れば「生えやすい環境」だから生えただけですので、農業に敵対も恨みもありません。農地の豊かさを考えたら、田畑に雑草が生えたらまず喜び、次にその活用を考えるべきと思います。

4. 雑草の養分を蓄える力を利用

除草について、私も最初はいかにして草を生やさないようにするかということに頭を悩ませ、

草を退治することばかり考えていました。農家にとって、草と名がつくと全部雑草、すべて悪者です。農業の技術書にも、「雑草は栄養分を奪う」「日光を遮る」「病害虫の棲みかになる」などと悪いことばかり書いてあります。そこですべての草を除草剤で全滅させているわけですが、考えてみれば草の中にもちゃんと稲と相性の良い草もあります。それに、草が生えるということはそれだけ土に養分があるということで、その養分を引き出す力は作物よりも雑草の方が強いのです。この力をうまく利用すれば、堆肥や有機物の投入が少なくても有機稲作ができるようになります。

雑草（スズメノテッポウ）を生やした圃場

私は冬の水田には何も作っていませんが、できるだけ草を生やすようにしています。慣行栽培の多くの水田、特に太平洋側の地域の水田は冬の間草一本生えないように耕しています。私は秋のうちに１回だけ雑草が生えるように軽く浅く耕します。軽く耕すことで藁が適当に土と混ざり、空気の出入りもよくなり、冬期の雑草がよく生えます。冬の間の太陽の光と養分をできるだけ雑草に蓄えてもらおうというわけです。そうすると、この雑草の養分だけで稲は育つことができます。

雪で冬の間雑草の生えない地域では、「冬水田んぼ」などの方法もあります。関東から南の雑草の生える地域ではできるだけ雑草を生やすこと、あるいは米麦二毛作をすることも冬の間の太陽の光をうまく有機物に変えるという意味では重要だと思います。

5. 有機稲作の育苗

(1) 先祖の知恵が生み出した「成苗植え」

日本では我々の祖先が 2000 年間以上にわたって稲作を行ってきたわけですが、技術的に重要なものは田植えです。田植えというのは、雑草対策のための技術です。基本的には直播が水稲の生育にも自然条件にも合っているのですが、雑草との戦いになります。それで、我々の先祖はあえて手間のかかる育苗と田植えという技術を生み出した訳です。苗も雑草に負けない体力を持った成苗（5 葉苗）を育て、移植するという稲作を完成させました。

成苗田植えというのは、実は雑草の発生を抑える技術だと思います。「苗半作」「苗七分作」という言葉があります。丈夫な苗は生育力が強く雑草に負けないし、雑草に対する抑制力、アレロパシーを発揮することができます。アレロパシーは生育の盛んな 5 葉期から出穂期に高まります。そういうことを先祖は経験知として活かし、成苗植えの技術である「苗半作」「苗七分作」という諺を残してくれたと思うのです。

(2) 丈夫な苗を作るための芽出し技術

育苗するときにいちばん大事なのは種籾の選定です。種籾は「塩水撰」で選別します。より病気を出さないためには温湯処理（60℃、7 分間）」をします。種籾は 3 月に浸水します。普通は「芽出し」といって暖かいところで芽を出させるわけですが、私は「芽出し」はせずに、逆に冷蔵庫に入れます。5℃の冷蔵庫に入れて１週間から 10 日置き、それを都合の良いときに播きます。

加温して芽出しした種子を屋外に出すと、種籾は芽が出たときより低い温度にさらされます。作物にとってはいきなり暖かいところから寒いところへ持っていかれるわけで、不自然でストレスがかかります。それよりは冷たい状態から暖かくなることが自然です。自然界でも 25℃から 30℃の時期に芽が出るわけではありません。だからむしろ冷たい状態にしておきます。そうすることで、がっちりした芽がでます。加えて耐寒性がつきます。冷たい中に種を置くと、どんな寒い時期にも種播きができますし、播いた次の日が大霜だとしても平気です。さらに芽が出てきた後に芽を板やローラーで踏んでやるなどすると、さらにがっちりした苗ができます。

(3) 床土も生育を左右する

温度のほかに大事なことは、種籾を播く床土です。以前私は原木シイタケを栽培していました。山に古くなったホダ木を積み、落ち葉をかけ堆肥状態にしたものを使っていました。シイタケ菌等の白色腐朽菌は酸性で、それが稲には非常に良いのです。また、山林内の雑木や落ち葉の朽ちた堆肥は、放線菌など多様な雑菌の働きで、非常に生育が良くなり、立ち枯れ病にもなりません。

種籾は、発芽するときは必ずしも肥料を必要としません。葉が大体、2.5 葉に展開するまでは全く肥料は必要なく、稲の母乳に相当する種籾の持っている胚乳で育ちます。葉が 2 枚出てからは、自分で食べ物、つまり肥料を吸わなくてはいけません。最初は順調に発芽したけど、途中で枯れてゆくというのはその切り替えがうまくできていないのです。この母乳から離乳食に切り替わる時期に重要なのが、他の病気にかかりやすいということです。稲は周りにいる菌を根や体に取り込みます。発芽して自分で養分を取り込み始める時期に、菌を取り込む力がいちばん強いといわれています。これは免疫力にも関係します。この時期にどのような菌が周囲にいるかによって生育が変わってきます。良い菌がいることが大事だと思います。

(4) 育苗中は水で保温

播種したあとは発芽するまでは育苗シートを掛けていますが、発芽したらシートを取ってしまいます。鳥対策には網をかけておきます。寒い日は水を入れて、稲の成長点を守ります。水で保温をするわけです。水を成長点より上に貯めておけば、どんなに寒い日でもビニールを掛ける必要がありません。代かきをしたところにこの育苗箱を並べ育苗をします。

自然の気候で育苗

一般の指導書には苗に散水をするのは早朝で、夕方に水をかけてはいけないと言われますが、私は逆に夕方、日が落ちた頃に水を入れます。育苗期間の 4 月～5 月、夜の気温が下がり、大体 10℃以下になると水を入れます。地下水の水温は 13℃～15℃ありますので、夜間に水をかけますと暖かい。冷える夜間には、生長点まで水中に浸しておくと、朝まで水が守ってくれます。

(5) 丈夫な成苗では様々な除草技術が可能

私は昔と同じように葉が 5 枚展開するまで育苗しています。ところが一般の農家は 5 月の連休に、葉が 2 枚の苗を植えます。たくさん植えますので立派なように見えますが、1 本 1 本は貧弱な苗です。一般の苗と私のやり方で育てた苗で何が一番違うかというと、葉の付く位置です。

完成したポット成苗（約 5～6 葉苗）

普通の温度をかける育苗では、第 1 葉が高いところにつきます。稲の葉は、第 1 葉より第 2 葉が大きく、第 2 葉より第 3 葉が大きいというように、順番に大体 12 葉まではあとから出る方が大きくなります。最初に大きい葉を作ってしまうと、5 枚葉にするには次々に大きな葉を出さないといけませんから、第 1 葉はできるだけ小さく作ります。小さい葉を低い位置に作るというのが、成苗、大きながっちりした苗を作るためには必要です。そのためには温度をかけずに育苗し、それでも暖かくて伸びるときは踏むとよいのです。

2 葉を超えて自分で栄養を吸うようになると、さらに伸びてゆきますので、がっちりした苗ができます。苗作りがうまくいけば、いろいろな除草技術を使えます。たとえば深水管理やアイガ

モ除草、機械除草をするにしても、貧弱な苗では、苗自体がつぶされてしまいます。この面からも、私は我々の先祖が生み出した成苗植えというやり方は非常に重要であると考えています。

6. 代かきの重要性

(1) 5 月の連休田植えでは雑草との戦いは必至

成苗の田植えは 5 月の下旬から 6 月の下旬の 1 か月間です。代かきを 5 月 1 日にして、最初の田植えは 5 月 30 日にします。普通の農家は 5 月の連休に植えてしまいますが、昔はみんな 6 月、旧暦の 5 月に田植えをしました。昔はビニールがなく、苗作りも田植えも遅くにしかできなかった。もう一つは、梅雨の雨を利用したからです。また、自分でやってみて分かったのですが、6 月に植えた方が雑草の発生が少ない。これを我々の先祖は知っていて、6 月に田植えをしたのではないかと思います。

田んぼには 5 月に水を入れますが、水を入れて代かきをすると、田んぼの土の中に眠っていた水田雑草の種が発芽します。連休に田植えをするのはこの雑草の発芽に合わせて田植えをするようなもので、どんどん草が生えるのは当然です。それだから除草剤を使わなくてはいけなくなる。雑草が生えるときに植えるからです。私は最初に水を入れた後は雑草を生やさないようにするのではなくて、「生えたいものは止められない、どんどん生えてください」という考えでいます。雑草も生えるだけ生えれば満足します。田植えの数日前に 3 回目の代かきをしますが、それまでにできるだけその田んぼに生える雑草を生やす。そうするとそこにどういう雑草が生えるかが分かりますし、たくさん発芽させれば当年の雑草の種子埋蔵量が減ります。

(2) 代かきは雑草を生やす技術

雑草の種は何年もたってからでも発芽しますが、その年に発芽する種はある程度決まっています。その年に生える分が生えてしまえば、後からはそんなに生えてきません。代かきという技術は、雑草を生やさないようにするのではなくて、雑草を生やすために行うものだと考えています。だから 1 回目の代かきをした後には浅水を貯め、水温を高めてできるだけ雑草が生えるようにします。発芽力が強い種子ほど早く生えてきます。そうしてできるだけ生やしてしまう。その後の 2 回目の代かきで発芽した雑草を丁寧に埋め込むか浮遊させれば、再生しません。成苗を作り、代かきをして 6 月に植えるという伝統的な稲作技術は、雑草や稲の特性を利用した、自然の摂理にかなったものだと考えます。

(3) 代かきの回数と間隔について

代かきの回数は、2 回行う場合と 3 回行う場合があります。有機物が少ない水田や秋の耕起で稲わらの分解が進み十分に腐熟している水田などは 2 回の代かきで雑草の発生を抑制できます。土壌が黒ボク土や粘土質の灰色低地土なども 2 回代かきでトロトロ層が形成できます。3 回代かきが必要な水田は冬から春に雑草を生やしている水田、秋耕ができずに春に耕起して稲わらが分解していない水田などは、3 回の代かきを行う必要があると思います。すなわち、1 回目は雑草や稲わらなどを田面の表層に鋤き込むための代かき、2 回目は鋤き込んだ有機質の分解促進のための酸素を供給する代かき（この時に水田雑草が芽生えている）、3 回目は分解した有機質と微細土壌粒子がトロトロ層を形成して層状に堆積させるための代かきです。

1 回目の代かき（雑草の鋤き込み）

代かきの間隔は、水温や土壌微生物の活性によって前後しますが、5 月頃では 10 日位、6 月では 5 日位が目安と思います。最初の代かきは入水直後ですから、2 回代かきの場合には田植えは

入水から 15 日後、3 回代かきの場合には田植えは入水から 25 日後となります。この期間を考慮して成苗を準備します。

(4) 代かき時の水位と雑草の発生

代かき時の水位は、その後の雑草種子の発芽に大きく影響する重要なポイントです。慣行農法の代かきの水位は浅水（水位 1～2cm）程度で行っています。この代かき水位では、表層の有機物が深く練り込まれ、吸水した雑草種子や重い土壌粒子などが表層に出て来ます。さらに土壌面が露出して酸素が補給されて、雑草種子が一斉に発芽することになります。また、コナギなどの光発芽性の種子も発芽の準備が完了し、その後の湛水により無酸素条件となれば発芽を開始します。

2 回目の代かきは土が見えない水位で

有機稲作水田を無除草で行うために、稲の田植え後の雑草種子の発芽を抑制するためには、深水代かきが必須となります。水深は 5cm 程度で田面全体を覆うような水位です。深い水位では田面の土壌が見えず代かきの耕跡が分からないため、トラクターの運転が難しくなります。しかしながら、ドライブハローの回転数を 2 速に上げて、目標を定め丁寧にゆっくりと代かきを行います。ドライブハローで撹拌された水田土壌は、水中でゆっくりと沈降してきます。このときに重い土壌粒子から沈降し、次に吸水した雑草種子が沈降し、その上に軽い腐熟有機質や微細な土壌粒子が覆います。この黒い腐植質を多く含む層が「トロトロ層」と呼ばれます。このトロトロ層は 1～数 cm になり、埋没した雑草種子の発芽を抑制します。このときに発芽を抑制された雑草種子は死滅しているわけではないので、トロトロ層が無くなれば再度発芽を開始します。このトロトロ層を維持するため代かき後はもちろん、田植えから 2 週間以上は田面土壌を露出させないような水管理が重要となります。

たっぷり水でトロトロ層を作る

7. 田植え後の水管理

(1) 光で発芽を判断する雑草

田植え後にも雑草は生えますが、どこからでも発生すると思っていたら大間違いです。雑草は繊細です。自分が生えるべきかどうか、時と場所、環境を考えて発生しています。むしろ品種改良された作物の方が発芽に無頓着ですから、暗闇でも発芽してしまいます。雑草の種は土のいちばん表面にあるものしか発芽しない。土の下の方から生えたら自分が死んでしまうからです。では種は、自分が表面にあるかどうかはどうやって分かるのでしょうか。種が発芽するのに必要なのは、水分、空気、温度という 3 条件です。雑草にはそれに加えて光発芽性といって、光を感じ、光が当たるということは土の表層にいると判断して、生える種があります。雑草の多くは光発芽性を持っていて、表面にある種が光を感じて発芽します。ですから、雑草の発芽時期にうまく光を遮断することができれば雑草は生えません。

(2) 光を遮断する技術—水を濁らせる

ではどうやって光を遮断するのか。ひとつには水を濁らせることです。これには水田の生物たちも一役買います。彼らが泳ぎ回ることで水が濁り、土の表面に届く光が少なくなります。特に

コナギはかなり光発芽性があり、水に濁りがあると生えません。有機物が地面近くで微生物による発酵が始まり、土の表面近くに濁りが生じますが、高さ 1cm でも濁りが生じると、土の表面にある種の発芽が止まります。場所によってはアミミドロや藻やウキクサが発生することもあり、そうした雑草が他の雑草の発生を抑えます。

(3) 光を遮断する技術—トロトロ層

もうひとつは、いわゆる「トロトロ層」を作ることです。クリーム状になり、土と水が分からない層です。これは短期間ではできません。これを作るために必要なのは、有機物です。有機物というと堆肥が頭に浮かびますが、いちばんトロトロ層ができやすい有機物は緑肥、さらに言えば雑草です。5 月の入水前に生やした雑草は、約 1 か月間水を張ることによって分解してきます。雑草は枯死するとすぐ分解酵素が働き、分解はじめると同時に有機物を分解する土壌菌が増殖します。その分解過程で生成するアルコールや有機酸などは雑草の発芽を抑えます。また有機物をエサとする土壌動物が大量に発生し、動き回ることで雑草の発芽はさらに抑えられます。

トロトロ層（上）とトロトロ層による雑草の抑制

こうして分解された有機物は土壌と混じり合ってトロトロ層になります。種はトロトロ層に比べ比重が重いので、トロトロ層に埋没してしまいます。こういう条件ができれば光発芽性のコナギや 1 年生の雑草はほとんど防除できます。ですから耕す時も代かきをするときも浅く耕し、できるだけ表面に有機物が集まるような状態にすると良いのです。

理想としては、耕さないで表面だけに有機物があるようにすればいちばん良いのかもしれません。このような水田の不耕起栽培も一部部分で実験しましたが、不耕起の場合と代かきをする場合では、雑草の種類や発生が全然違ってきます。1 年生の雑草、特にコナギが減りますが、宿根性・多年生の雑草が増えます。水田の不耕起栽培は、田植えや水位の維持などに課題があります。

(4) ヒエの発生は深水管理で防ぐ

田植え後は深水管理を 2 週間続ける
（苗は 40～45 株/3.3 ㎡）

慣行栽培の農業者から、「除草剤を使ってもヒエが生えて困る」などと言うことを言われますが、ヒエの発生は、代かきと田植え後の深水で防げます。最初の代かきでは、必ずヒエが発生します。その時に田植えをせず、約 10 日後に 2 回目の代かきを行い、その後は深水管理を行います。水を落とさずに田植えをして、その後も稲の生育に合わせて深水を維持すれば、ヒエは完全に防除できます。ヒエは深水によって生えなくなります。このメカニズムは簡単で、ヒエは発芽しても水中では 7cm 位しか伸びません。ヒエはその間に水面に葉が出なければ、死んでしまうか浮いてしまうかです。そこで約 10cm の水位を 2 週間

続ければ、ヒエの発生は防げます。除草剤のように雑草が抵抗性を持つこともありません。ヒエの除草は深水管理で済むのです。ただし、畦などが漏水してしまうと、たとえわずかな時間でもヒエは発芽しますので、除草は失敗です。ここのところはきちんと水管理をしなくてはなりません。

6 月の夏至を過ぎると雑草の発芽が止まってきます。雑草も、あまり遅く発芽するとその年に実ることができないですし、夏至を過ぎると日が短くなってくるのを感じ、発芽に適さないと判断するからだと思います。田植えが遅くなり 7 月入ってから植えたこともありますが、雑草の発芽自体が減っていますので､かなり雑草を抑えることができました｡ただし稲の収量からすると、稲も分げつに要する期間が減少し日射量も減りますので、収量も減少します。

8. 球根性雑草の性質を知る

(1) やっかいな球根性雑草

もうひとつの問題は、種から生える雑草ではなく球根性の雑草です。球根性の雑草はクログワイとオモダカですが、これは上にトロトロ層を作っても、地下に球根があり地下から伸びて生えてきますので防げません。しかも、球根性の雑草は遅れて発芽してくるので困ります。

クログワイとオモダカでは、オモダカの方が発芽温度が低いので早くに出ます。クログワイのほうが少し遅いようです。ですからオモダカの方は少し長めに代かきをし、代かきから田植えまでの期間を長く置けば大体発芽しますので、それを土の中に埋め込んでしまうと、そのあとはそんなに影響がありません。ただ、クログワイはあとから生えてくるので少し問題です。

(2) 窒素と乾燥と寒さに弱いクログワイ

いろいろ観察していると、クログワイは田んぼに窒素分が多く地力が高い方が生えず、やせている土地に生えます。窒素が苦手な雑草かもしれません。マメ科緑肥を作付けして田んぼの窒素量を増やすとクログワイは生えません。ただしマメ科植物をあまり多く作付けすると、コシヒカリなどの場合は稲の方が倒伏してしまいます。肥料をたくさん吸う品種であればマメ科を鋤き込めばクログワイにはかなり有効と思います。

また、クログワイは乾燥と寒さに弱いですから、冬季に乾く田んぼでは生えません。例えば二毛作で小麦を作った田んぼは、クログワイ、オモダカともに生えません。麦の持つ別の作用があるのかもしれませんが、少し乾くところはそういうものを作付ける方法もあります。水田を田畑転換して畑作物を栽培すれば、湿地性の球根ですから、やがて無くなります。

球根性というのは厄介ですが、いきなり増えたりはしません。ヒエは 1 本の草から何千粒、コナギだと 1 万粒に近い種子がでるといわれていますから、1、2 本残しただけでも、田んぼが草だらけになる可能性は十分あります。しかし、球根性というのは一斉には増えませんし、球根はカルガモなどの野鳥のエサにもなっています。

9. 畦の雑草も活用する

(1) 天敵の棲みかにもなる畦の雑草

水田内のヒエは深水管理で防げますが、畦の方にはヒエがたくさん生えます。しかし、畦と田んぼの中に生えるヒエは種類が全然違います。畦に生えるヒエは、ケイヌビエで水の中では発芽しません。慣行栽培の農業者には、畦のヒエから種が落ちると大変だと言う方がいますが、全く心配いりません。田んぼの中に生えるヒエはタイヌビエですので、種類が異なります。

私はむしろ畦にはたくさん草を生やすようにします。草を生やして草刈りをするときに、約 5cm 残して刈ります。草に対して憎しみをもって刈ると疲れますので、草の再生を願って刈ります。雑草も葉がたくさん茂ってきますと次の草が生えませんから、次の草を生やすために刈るのです。先に生えた草を刈って下から次の草を生やす。そうすると背の低い草がそろってきます。

そういうところにはクモが棲みかを作り、害虫を予防します。

(2) すべての雑草は肥料である

雑草を生やす､あるいは生えている雑草を土壌に還元することは､土壌を肥沃にする基本です。雑草の多くは、吸肥力が強く土壌内の栄養分を体内に吸収します。このことが作物と雑草の同時発生が嫌われる最大の理由です。しかし、休閑期の雑草は栄養分を集積して流亡を防ぎ、さらに根圏微生物や窒素固定菌の作用で栄養分を増やします。固定されたリン酸や岩石内のミネラル成分なども体内に取り込みます。耕作放棄地のような雑草に覆われた田畑では、当初無施肥でも多収穫が得られる事例があります。これは、それらの栄養分が、雑草が腐熟し分解されることによって作物に吸収可能になると思われます。

(3) 畦の雑草も肥料に活用

私の農場では、稲刈りをした後に畦の雑草の草刈りをしています。別に刈らなくても良いのですが､雑草がもったいないので刈って田んぼの中に入れています｡そうすると田んぼの周囲約 2m 位は周囲の雑草が入りますので、そこはほとんどこの雑草によって稲の栄養分が補給できます。堆肥や米ぬかを入れるにしても田んぼの真ん中の方にだけ入れれば良いのです。比較的広めの畦を作ってそこに生えた雑草を冬に田の中に入れ、春にはできるだけ雑草が種をつけてから耕したり、刈ったりします。

10.雑草こそ最良のパートナー

(1) 有機農業的除草技術の目指すもの

現在、何種類もの除草法があると思いますが、水田によってどういう草が生えるか、またどういう土の質なのかを考えることが必要だと思います。砂質だとトロトロ層ができ難いのですが、私の田んぼの土は、黒ボク土や火山灰土が多く、トロトロ層ができ易く除草はうまくいきます。

多くの除草技術は「どうすれば雑草が生えないか」を基本に成り立っています。しかし､「これをやれば除草剤の代わりになる」というものを目指すのではなく、雑草の生育や稲作り全体を見通して除草のあり方を考えるべきだと思います。雑草が生える条件が分かれば生えない条件も分かります。作物と相性の良い草もあります。有機農業的除草技術とは、雑草を抑えるのではなくて、いかに生やすかということを考える技術であると思います。雑草は土壌を豊かにします。真の有機稲作の技術は雑草なくしては成り立たないと考えています。

(2) 持続可能な農業への転換

近年の地球環境の異変は、社会の産業構造や生活様式の変革なしには防げないことは明らかです。こうした産業構造の変革は、農業の分野においても不可避です。持続可能な農業への転換は、有機農業の普及が重要です。農林水産省も 2021 年 5 月には「みどりの食料システム戦略」を発表し、有機農業の大幅な普及を掲げました。しかしこの戦略の中に、自然の多様性や循環機能を混乱させて、持続不可能なゲノム編集など遺伝子操作技術などが含まれていることは問題です。

収穫期をむかえたコシヒカリ

私は水利の改善によって、水田稲作を中心にした有機農業は十分に可能であることを実践によって確証しています。さらに有機質肥料の補給は、外部からの資材投入ではなく、圃場内の資源の循環的利用が不可欠であると考えます。そのためには、圃場周辺や地域の雑草という資源の有効活用が重要となって来ると考えています。

雑草こそ､「土を豊かにし、生き物たちを育む有機農業の最良のパートナー」と思います。

米ぬか散布は
コナギの発芽にどう影響するのか？

野副 卓人

（元）農研機構

はじめに

水稲の有機栽培において、コナギは最も防除が困難な雑草である（図 1）。広く普及している米ぬか施用による防除は有効だが、その効果は年次や施用場所により大きく変動し、これがこの技術の普及を妨げる大きな要因となっている。また、慣行栽培ではさほど問題とならないこの植物が、有機栽培においてなぜ最悪の難防除雑草となるのか、その原因については未だよく解明されていない。演者らによるこれまでの研究により、米ぬかが有するコナギ発芽抑制力は、それぞれの土壌によって特徴的で、かつ大きく異なること、さらに、土壌はコナギの発芽促進能を有しており、これが米ぬかの効果を不安定化していること等を明らかにした(Nozoe *et al.* 2022)。本報告では、これまでの一連の成果をとりまとめ、ここに報告するものである。

図 1 有機水田圃場でのコナギの繁茂

1. コナギの発芽に対する相反する力　—米ぬかによる抑制と土壌による促進—

水田から採取した土壌に米ぬかを添加し、30℃で湛水して 0、1、2、3 または 4 日後に土壌溶液を採取した(Nozoe *et al.* 2018)。それぞれの溶液にコナギ種子を沈めて 2 日間 30℃で培養した後、発芽率を測定した。

① 湛水 0 日での土壌溶液中の発芽は、米ぬか添加有無にかかわらず、蒸留水中での発芽を上回った（図 2）。この結果は、土壌溶液がコナギの発芽を促進することを示している。

② 米ぬか（0.6%）添加区では湛水培養の期間が長くなるに従って発芽率が減少した。これは、湛水期間中に、米ぬか中の成分が分解され、例えば有機酸などコナギ発芽抑制物質が生成したためと推察される。

③ 米ぬか無添加区での発芽率は、湛水期間の長さにかかわらず一定であった。

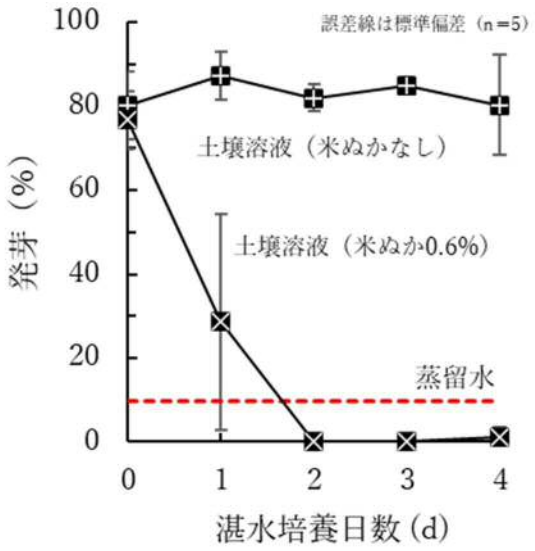

図 2 湛水培養期間が土壌用植木中でのコナギの発芽に及ぼす影響

すなわち、土壌による発芽促進は、土壌が本来有している性質に起因しており、湛水により影響されなかった。

2. 米ぬか添加によるコナギ発芽抑制—土壌による違い—

いくつかの国内圃場から採取した水田土壌 8 点（灰色低地土 4、黒木 4）それぞれに米ぬか粉末（0、0.15、0.3、0.45%；圃場では 100 kgの米ぬかを 10a に散布し、土壌表面の 1cm と混ざったときに約 1%に相当）を添加してかき混ぜ、30℃で湛水培養した後、土壌溶液を採取し、そのEC（電気伝導度）を測定した(Nozoe *et al.* 2021)。これらに、コナギ種子を沈めて 30℃で培養し、発芽率を調査した。

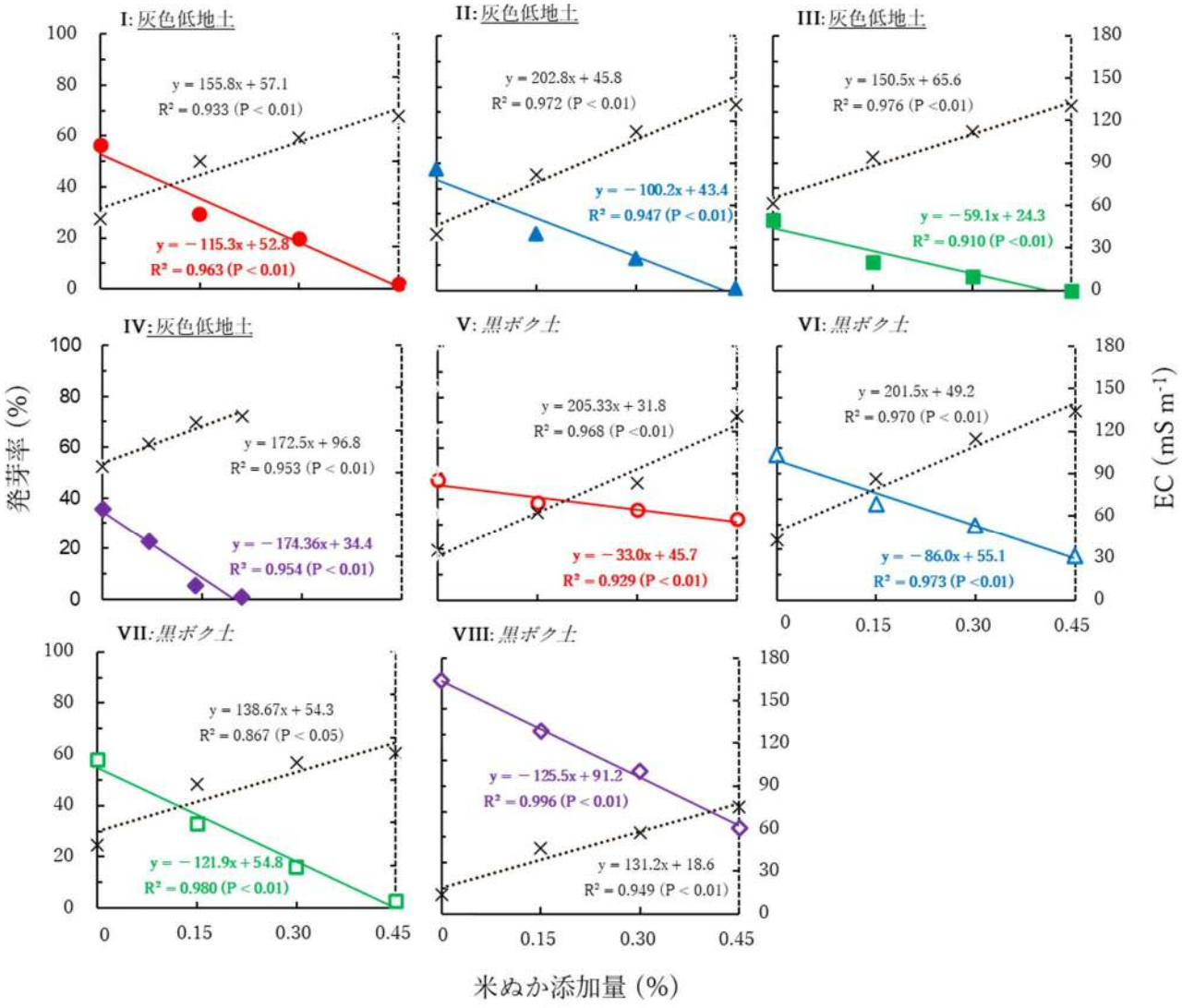

図 3 米ぬかの添加が土壌溶液中でのコナギの発芽及び EC に及ぼす影響

① すべての土壌で米ぬか添加量（%）と、発芽率に有意な負の相関があり、米ぬか添加が、コナギの発芽を抑制した（図 3）。

② 上記、負の相関は土壌により大きく異なが、いずれも米ぬか無添加区の発芽率（y 切片）と、米ぬか添加量当たりの発芽率の減少（傾き）により特徴づけられる。

③ いずれの土壌でも、土壌溶液の EC と発芽率間に、有意な負の相関が確認された。このことは、EC が発芽抑制物質の指標として利用できることを示している。

④ 横軸を EC、縦軸を発芽軸として図 3 を再構成すると（図 4）、灰色低地土ではいずれの土壌でも溶液 EC が 130 mS m^{-1} 以上で発芽はなかったが、黒ボク土では、旺盛に発芽するものもあった。おそらく、黒ボク土など火山灰土とそれ以外の土壌には、発芽に関して異なった

メカニズムが存在すると推察される。

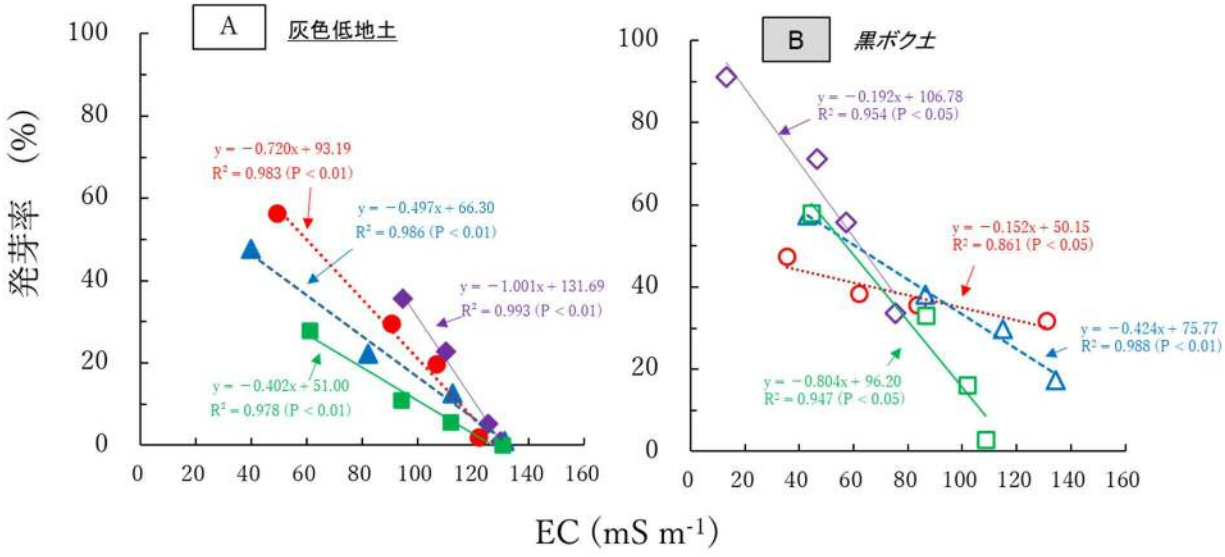

図 4 土壌溶液の EC と発芽率との関係

3. 米ぬか難分解性画分によるコナギ発芽促進

コナギは周囲の酸素濃度が低いほど発芽が促進されることが知られている。一方、米ぬかには抗酸化物質（例えば、酸素分子を分解する能力を有する）が多く含まれており、これにより食品や化粧品などの製造に利用されてることがある。本報告では、水田から採取した土壌を風乾し、米ぬかを混合（土壌に対し 0、0.4、0.8、1.2%）した。これに蒸留水を加えて 30℃で 2 週間湛水培養した後、この風乾サンプルを得た。湛水培養とその後の風乾操作中に米ぬかの易分解性成分はほぼ消滅し、得られた土壌サンプル中には難分解性画分だけが残ったと推察される。このサンプルに蒸留水を加えて激しく振とうし、直ちにろ液を得た。ろ液約 10mL 中にコナギ種子を沈め、30℃で培養後、発芽率を測定した。これとは別に、ビンにろ液 250mL を入れ、同様に培養し、溶液中の溶存酸素（DO）を経時的に測定した。①米ぬか添加量が増加するに伴い、湛水培養後、風乾して得られた土壌の炭素、窒素濃度が上昇し、ろ液中のコナギの発芽率が増加した（図 5）。この結果は、米ぬか中の難分解性の有機物が、コナギの発芽を促進する能力を有していることを示唆している。②ろ液の DO は培養開始 1 日後に最低値を記録し、その後しだいに上昇した（図 6）。培養 4 日間の DO の積算値と発芽率には有意な負の相関があった（図 7；発芽率は図 5A-1、溶存酸素量は図 6B を使用）。これは、米ぬかの難分解性画分に由来する有機物が、ろ液中に存在し、これがろ液中の酸素を減少させることで、コナギの発芽を促進することを示している。

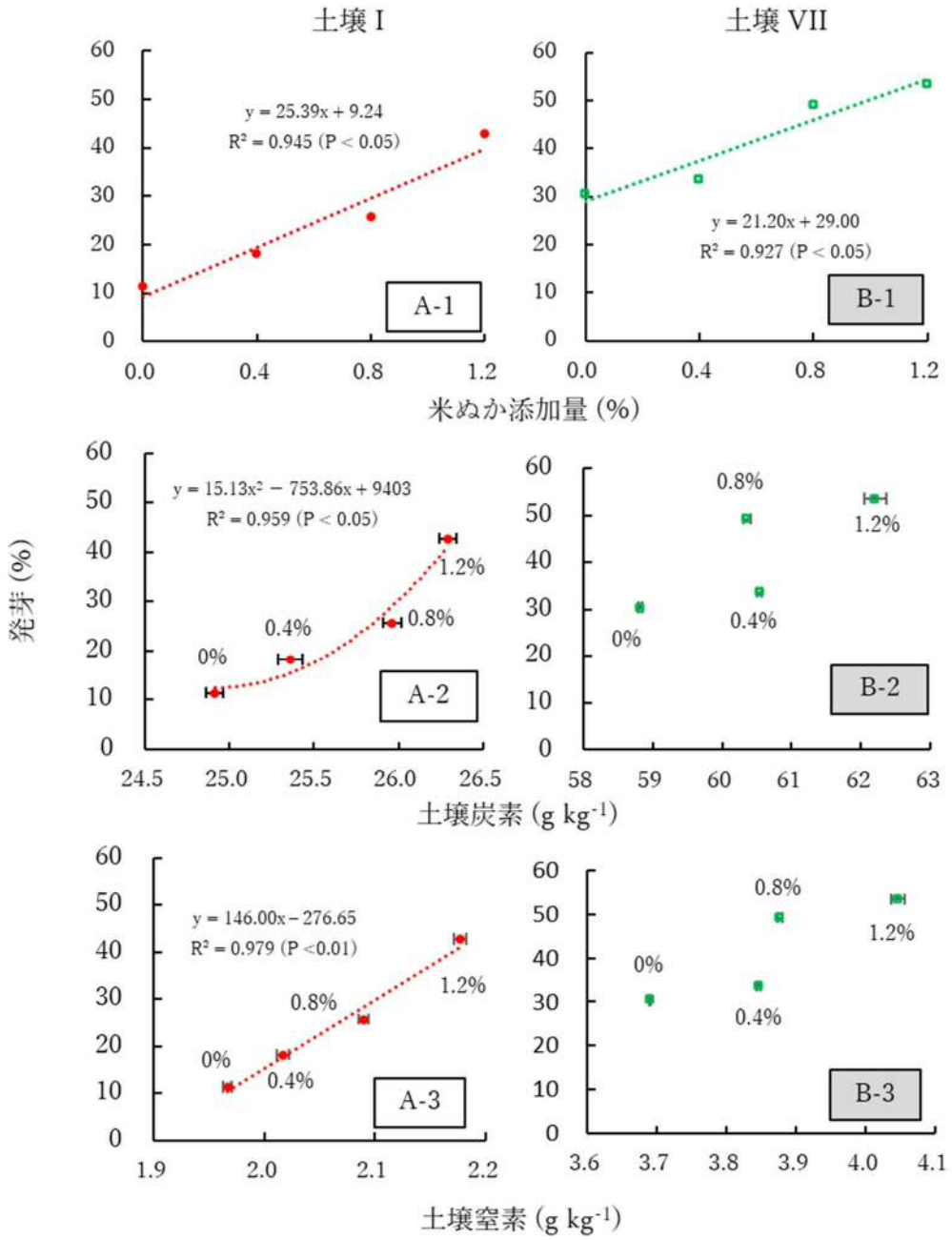

図 5 土壌への米ぬかの添加が、コナギの発芽に及ぼす影響

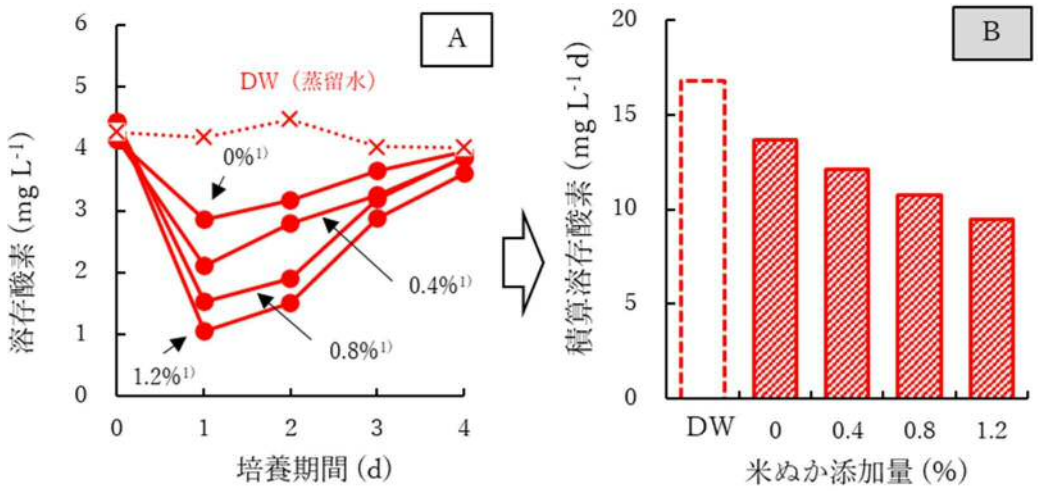

図 6 ろ液培養中の溶存酸素の変化（A）と、その積算値（B）

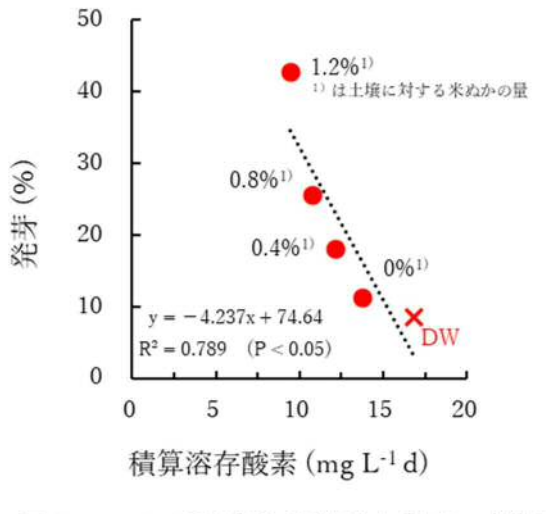

図 7 コナギの発芽と積算溶存酸素の関係

まとめ

米ぬか施用にあたり、それぞれの土壌によって効果が著しく異なるので、施用量を全ての土壌で一律に決めることは、適当ではない。米ぬかの効果を不安定にしている要因の一つは、土壌によるコナギの発芽促進能で、これが米ぬかの発芽抑制能を相殺しているためである。米ぬかは、土壌表面に施用されるが、その易分解成分由来の発芽抑制物質が土壌極表層に蓄積され、コナギの発芽を阻害すると考えられる。易分解性成分は、稲作が終了するとともにほぼ消失し、翌年の栽培時に新たに投入されることになる（図 8）。一方、米ぬかの難分解性成分は、酸素分解能を有しており、これはコナギの発芽を促進する要因となる。これは、コナギが発芽に際し、低酸素条件を好むことに起因している。難分解性成分は、水稲収穫後作土全体にすき込まれて、一定値に達するまで数年にわたり蓄積し、例えば腐植として土壌の構成成分となっていくと考えられる。これらの研究は未だ不十分で今後さらに検討を要する。土壌肥料、雑草、作物等の専門家による分野横断的な研究が是非必要といえる。

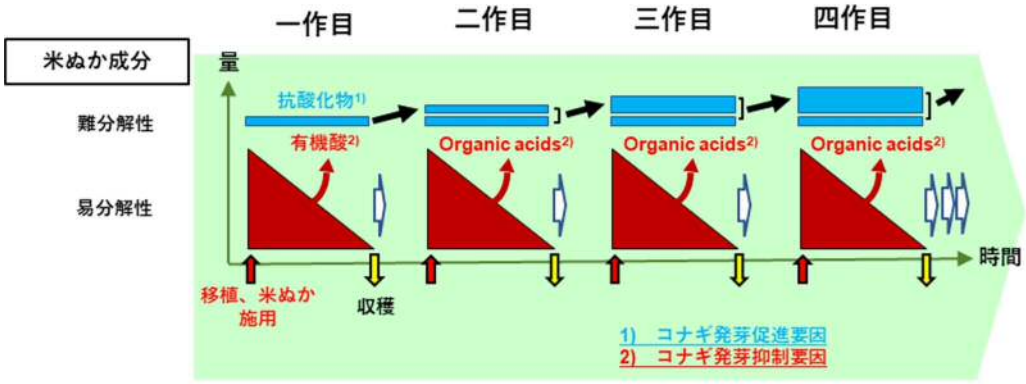

図 8 土壌中における米ぬか成分の消長（推定）

引用文献

Takuhito Nozoe, Junko Tazawa, Akira Uchino and Shigenori Miura (2018), Promotive effect of soil solution on germination of *Monochoria vaginalis* under paddy conditions. *Soil Science and Plant Nutrition*, 64(3), p396-405.

Takuhito Nozoe, Shigenori Miura, Junko Tazawa, Akira Uchino and Yasuhiro Usui (2021), Factors destabilizing the control of *Monochoria vaginalis* by rice bran: its conflicting powers influence both suppression and promotion of germination in paddy soil, *Plant Production Science*, 24(1), p83-93.

Takuhito Nozoe, Shigenori Miura, Junko Tazawa and Akira Uchino (2022), Suppressive and promotive effects of rice bran on germination of *Monochoria vaginalis* in organic rice (*Oryza sativa* L.) production. *Soil Science and Plant Nutrition*, 68(3), 374-382

AI を活用して
難防除雑草を芽生えのうちに発見する

松橋 彩衣子

農研機構植物防疫研究部門

1. はじめに

日本の農業分野においてよく知られた諺の一つに次のようなものがある。

上農は草を見ずして草をとり
中農は草を見て草をとり
下農は草を見て草をとらず

これは古くは 17 世紀の中国に起源するとされているが、雑草の予防的防除と早期発見の重要性が、古から現在にかけて、そして海を越えて共通する、普遍的なものであることを物語っている。警戒すべき雑草をいかに小さいうちに見つけて侵入を防ぐか。それは有機農業を推進する上ではより重要な課題となることは言うまでもない。しかし、警戒すべき雑草を小さいうちに見つけることは決して容易なことではない。

AI 技術の中でもコンピュータビジョンと呼ばれる分野は、「見る」の部分で近年目覚ましい技術革新を遂げ、驚くべき速さでわたしたちにとって身近なものとなった。農業における雑草管理においても例外ではなく、この技術に熱い視線を注ぎ、世界中で雑草管理の省力化・自動化を目指し、雑草を検出するための技術開発に取り組んでいる最中である。近い将来、「草を見る」のあり方が劇的に変化していくことが予想されるが、そもそも、この新しい「見る」の正体とは一体何なのだろうか。本稿では「見る」の中身である深層学習を用いた画像認識技術と、それを用いた雑草管理における技術開発研究の動向について概要を紹介する。

2. 深層学習を用いた画像認識技術

画像から特定の植物を認識するアプリケーションやサービスは、いまや珍しいものではなくなった。しかし、複数の植物が写る画像から特定の植物のみを認識することは、少し前までは困難で挑戦的な課題であった（Hasan *et al.* 2021）。例えば作物の中での雑草は、どちらも似たような色味であり、時に形やテクスチャも似てくる。そうなると、少し前の技術では見分けることが困難だったのだ。しかし、2012 年の画像認識チャレンジコンテスト（ILSVRC: ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge）に登場した、畳み込みニューラルネットワーク（CNN : Convolutional Neural Network）を用いた深層学習によるアルゴリズム（のちの AlexNet）がブレイクスルーとなり、そして GPU による計算能力の向上も追い風となり、認識の精度は劇的に向上した。CNN は、画像の局所的な特徴を抽出する畳み込み層と、その特徴をまとめるプーリング層を繰り返した構造となっているのだが、この構造が画像の特徴抽出に非常にマッチしたのである。その後、CNN を特徴抽出器として備えた画像認識アルゴリズムが主流となり、次々と新しいアルゴリズムが開発されることとなる。農業分野においては 2015 年頃から、雑草管理分野においては 2017 年頃から関連研究が増加するようになったが（Kamilaris and Prenafeta-Boldú 2018, Hasan *et al.* 2021）、恐らく文献として発表されている以上に多くの研究が行われていることだろう。

現在普及している画像認識技術は、大きく 3 つのタイプに分けることができ（図 1）、いずれも

雑草管理の分野においても適用例が蓄積しつつある。3 タイプは次の通りである。

	画像分類	物体検出	領域検出
認識方法	画像の中に対象の雑草があるかを分類	画像の中に対象の雑草がある場合、ボックスによって位置を検出	画像の中に対象の雑草がある場合、その領域を検出
学習データの準備	画像が学習データとなる．ただし、ある対象を学習するには、対象を含まない画像を用意する必要がある．	対象をボックスで囲みクラス情報を付与．	輪郭線で区切ったポリゴンにクラス情報を付与．作成に時間がかかる．
雑草研究で用いられたアルゴリズム	AlexNet, VGG, ResNet, GoogLeNet など	R-CNN, Faster R-CNN, YOLO, SSD など	FCN, SegNet, U-Net, DeepLabなど

図 1 深層学習を用いた物体認識技術の雑草画像への適用例

(1) 画像分類（Image Classification）

画像の中に対象物が含まれるかどうかを分類・判別する。例えば図 1 は、畑作における難防除雑草マルバルコウ（*Ipomoea coccinea* L. 帰化アサガオの一種）の写真であるが、マルバルコウに分類される確率が 0.90、マメアサガオに分類される確率が 0.04 となり、結果としてマルバルコウと判別されている様子を示している。「マルバルコウ」であることを正確に判別させるためには、本種が写っている画像と写っていない画像を沢山用意してクラス分けを行い、画像分類アルゴリズムを用いて学習（training）を行う。

図 1 では、「マルバルコウ」と「マメアサガオ」の 2 クラスを分類する場合の例を示したが、クラスの設定の仕方は目的によって異なる。農業分野における雑草研究の場合は、種ごとにクラス分けを行うものもあるが、「作物」「雑草」というクラス分けを行うものも多い。

画像分類では、画像データをそのまま学習データとして利用できるため、後述の 2 タイプほど、学習データ作成の労力はかからない。前述の AlexNet も画像分類の一つであり、3 タイプのうち最も早く登場した。

(2) 物体検出（Object Detection）

画像の中のどこに対象物があるのかを検出する。検出の際は、図 1 のようにボックスによって対象物の位置が示される。このボックスは bounding box（境界ボックス）と呼ばれ、内側は対象物を含み、外側は含まないことを学習させることになる。学習の際には画像データの他に、クラス情報が付与されたボックスの座標データも必要となるため、学習データ作成に労力がかかる。

物体検出アルゴリズムの開発には「二段階検出」と「一段階検出」という二つの大きな流れがある。前者の方が先に登場しており、最初に対象物のある領域候補を検出し、その後で特徴を抽出するという二段階で構成されている。2014 年の R-CNN を皮切りに、2015 年にはより高速化した Fast R-CNN, Faster R-CNN が登場した。一方、「一段階検出」の代表である YOLO は少し遅れて 2016 年に登場した。画像をグリッドで分割し、グリッドごとに物体を探すことで高速化

し、リアルタイム検出を可能としている。YOLO のスピードは精度とのトレードオフはあるが、雑草分野においても広く利用されている手法である（Rakhmatuiln *et al.* 2021）。

(3) 領域検出（Semantic Segmentation）

画像の中の対象物の領域を検出する。3 タイプの中で最も難しいタスクと言える。検出の際は、図 1 のように輪郭線で区切られた領域によって位置と形が示される。学習の際には画像データの他に、クラス情報を付与したポリゴン情報が必要となる。学習データ作成時には画像の対象物の輪郭線をなぞる必要があるため、3 タイプの中で最も労力がかかる。

CNN を搭載した領域検出が初めて発表されたのは 2015 年の FCN（Fully Convolutional Network）であり、3 タイプの中では最も新しい。

以上が現在普及している画像認識技術であるが、タイプによってできること・できないこと、メリット･デメリットは異なる。実際に自分で画像認識を行う際は、どのタイプを選択するかは、目的と、対象とする画像やターゲットの特性を考慮しながら決定するのが良いだろう。

なお、本稿で紹介している技術の多くがオープンソースとなっており、入手可能な学習データセットも数多く公開されている。誰もが「見る」を自分で作ることができる時代になっていることを忘れてはならない。

3. 雑草管理における画像認識技術の活用

農業分野における雑草管理において、画像認識技術を導入する主な目的として「診断」「モニタリング」「自動除草」が挙げられる。

その雑草の種名を知り、どう対処すべきかを考える「診断」は、ユーザーの知識を高め、素早く実践に結びつける上で重要な役割を持つ。診断には、画像分類が適しているが、画像に複数の草種が写ることを想定するならば物体検出を選択するのが良いだろう。筆者らが参画するプロジェクトでも、飼料作・大豆作における難防除雑草の芽生えを判別し、防除法を回答するアプリケーションを開発中であるが、その後の機能拡張性を考慮して物体検出を選択している。

圃場の状態を「モニタリング」し、いち早く有害雑草の侵入に対応するためにも画像認識技術は有用である。雑草の早期発見は雑草管理における重要な課題であり、特に有機農業の場合は、害を生じうる雑草の侵入を許さないことが、その後の生産性や作業効率に大きく影響する。モニタリング目的では、圃場全体の画像を入手するために、ドローンを用いた研究事例も多い。ただし、撮影高度が高い場合は小さな個体を見落とす可能性があるので注意が必要である。また、同じ圃場を同じカメラで撮影しても、天気や土壌水分等のコンディション変化により、画像の色味や鮮明さは変わってくる。そのため、学習のさせ方には工夫が必要となる。

モニタリングだけではなく、圃場の雑草密度マッピングをも目指す研究もある。密度マップがあると、除草対象エリアを絞り込むことができるので、省力化や減農薬に繋げることが期待できる。モニタリングでは位置まで把握できる物体検出と領域検出が適しているが、密度を正確に知りたい場合は、面積・被度が把握できる後者がより適しているだろう。

マシンビジョンを搭載した「自動除草」は、世界的にも熱く関心が寄せられているトピックである。自動除草の際には、誤って作物が除草されることは絶対に避けなくてはならないので、まずは作物と雑草を確実に判別することが大前提のタスクとなる。雑草の種ごとに的確な処理を行うためには種判別と位置の特定が必要となるため、物体検出か領域検出を選択することとなる。除草方法（例えば切断、噴射等）によっては雑草の「部位」の位置の把握も必要となる。そのため、領域検出を二段階に行って雑草の種類のみならず茎の位置まで特定する試みもなされている（Lottes *et al.* 2018）。選択的自動除草は、農作業の省力化と除草剤使用量の低減化への貢献の大きさから強い期待がかけられている。正確な雑草判別と位置の把握を行うのみならず、確実に選

択的除草を行うことはかなり難しいタスクであることは間違いないが、今後の更なる技術の高度化に期待したい。

4. おわりに

「AI」という言葉はいまや日常単語のひとつとなり、わたしたちは生活の中で当たり前のように目にするようになった。しかし、画像認識の技術革新が始まったのはわずか 10 年前のことであり、雑草管理における研究開発はわずか 5 年程度であることに驚きを隠さずにはいられない。わたしたちは今、「草を見る」のあり方が劇的に変化していく様を目の当たりにしているが、これから 5 年先、10 年先にはさらなる変化を体感していくこととなるだろう。新しい「草を見る」によって、誰もが上農に近づける時代は果たして来るのだろうか。技術革新には様々な課題やリスクが伴うものだが、一歩ずつ確実に生産活動の助けになっていくことを期待していきたい。

本研究は国際競争力強化技術開発プロジェクト「AI を活用したスマート除草システムの開発」により実施した。

引用文献

Hasan ASMM, Sohel F, Diepeveen D, Laga H, Jones MGK. A survey of deep learning techniques for weed detection from images. Comput Electron Agric. 2021;184: 106067. doi:10.1016/j.compag.2021.106067

Kamilaris A, Prenafeta-Boldú FX. Deep learning in agriculture: A survey. Comput Electron Agric. 2018;147: 70–90. doi:10.1016/j.compag.2018.02.016

Lottes P, Behley J, Chebrolu N, Milioto A, Stachniss C. Joint Stem Detection and Crop-Weed Classification for Plant-Specific Treatment in Precision Farming. IEEE Int Conf Intell Robot Syst. 2018; 8233–8238. doi:10.1109/IROS.2018.8593678

Rakhmatuiln I, Kamilaris A, Andreasen C. Deep neural networks to detectweeds from crops in agricultural environments in real-time: A review. Remote Sens. 2021;13. doi:10.3390/rs13214486

畑用 AI 除草ロボットの開発状況と課題

田澤 純子

農研機構 中日本農業研究センター温暖地野菜研究領域 有機・環境保全型栽培グループ

1. はじめに

2021 年 5 月に策定された「みどりの食料システム戦略」では、中長期的な観点から農林水産業の生産力向上と環境負荷軽減・持続性の両立をイノベーションで実現することを目指している。その中で有機農業に関しては、2050 年までに有機農業取組み面積割合を 25%まで引き上げ、100 万 ha に拡大することが掲げられている。その一端を担う野菜有機栽培では雑草対策が最も労力を要し、省力化が重要課題となっている。そこで、我々は農林水産省委託プロジェクト「国際競争力強化技術開発プロジェクト」の助成を受け、県や民間企業と共同で畑用 AI 栽培管理ロボットの試作・開発に取り組んでいる。本稿では、これまでの開発状況と課題について紹介する。

2. 野菜有機栽培における現状の除草対策

野菜栽培にとって雑草は大きな問題であり、慣行栽培では広く除草剤が使用されている。有機栽培では、化学合成農薬が使用できないことから、現状では作物を傷つけないよう手取りもしくは除草器具等を使用して雑草防除を行う場合が多く、繊細かつ多大な労働力を投入している。

ニンジン作等では、太陽熱処理が多く行われている。夏場に播種する場合は、播種前 1～2 か月程度ビニールマルチで覆うことにより雑草種子を死滅させ､雑草害を抑制する効果は非常に高い。しかし、夏場以外で温度が足りない場合等では効果が低減する。また被覆中に土壌表面が固くなり、マルチ処理時に施用した肥料成分の一部は流亡してしまう。加えて資材費および使用後の資材の処理費の値上がりなどコスト面、また使用後のビニールマルチは燃焼時に CO_2 を生じるため、環境負荷の面などの懸念がある。

これらの問題点を踏まえ、「みどりの食料システム戦略」の目標を達成するための環境負荷の少ない大規模栽培に対応できる技術として、AI 除草ロボットによる除草技術の開発が望まれている。

3. 国際競争力強化プロ「AI を活用したスマート除草システムの開発」の概要

本課題には 2 つの中課題が設定されており、我々はそのうちの一つである「有機栽培野菜向け自律型除草ロボットの開発」という課題について農研機構（農業機械研究部門、農業ロボティクス研究センター、中日本農業研究センター）と群馬県、鹿児島県、みのる産業（株)、(株)NTT ドコモと共同で研究開発を行なっている。本課題では、作物列を AI で識別して自律走行し、除草ツースにより機械的な除草を行う畑用 AI 除草ロボットの開発に取り組んでおり､「野菜 3 品目以上で除草作業時間を 5 割削減する」ことを目標に掲げている。プロジェクトとしては中型、および小型ロボットの 2 つのタイプの開発を行なっているが、本稿では開発が先行している小型ロボットについて紹介する。

(1) 開発中の小型 AI 除草ロボット

これまでにいくつかの試作機が作成され、その都度改良が進められている。図 1 に 2022 年度版の試作ロボットを示した。ロボットは全長約 80cm、重量は除草部まで含めて約 27kg で、除草部を取り外せば女性 1 人でもなんとか持ち運びは可能である。

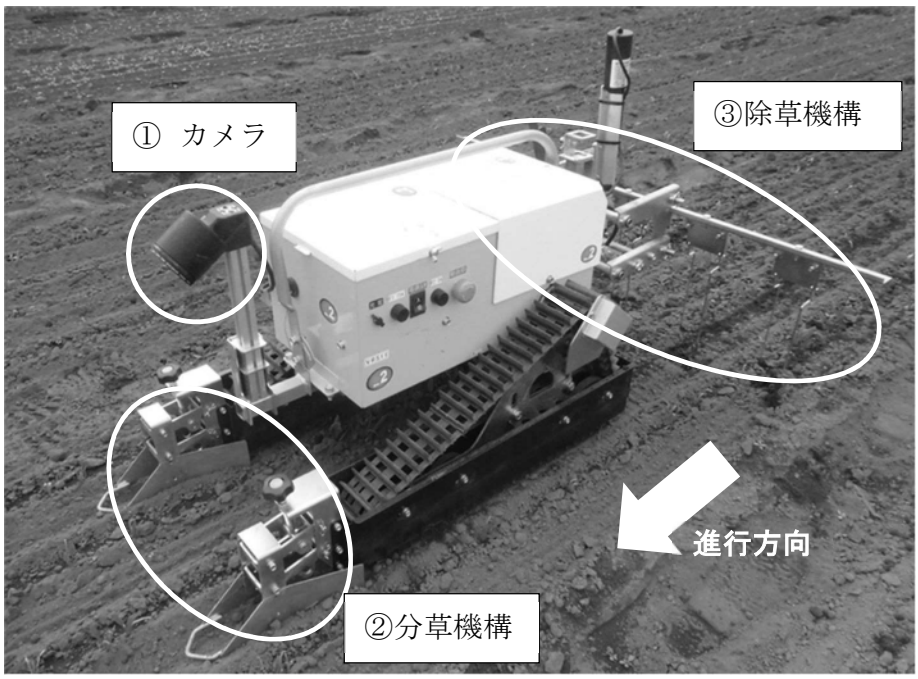

図 1 開発中の除草ロボット（試作機）

現在のところ、条間が狭く除草作業が困難な作目を対象としており、具体的にはホウレンソウ、ニンジン、チンゲンサイ、コマツナ、ベビーリーフなどで除草試験を行なっている。これらは条間 15cm、株間 8cm 程度、4 条播きの播種機を用いて播種し、栽培している（ベビーリーフは条間 7cm）。ロボットのクローラ間は 30～42cm まで変更が可能で、様々な条間に対応することができる。

ロボット前方にはカメラ（図 1①）が取り付けられており、作物列を認識して作物を踏まないように操舵して自律走行する。ロボット除草試験では作目ごとのプログラムを使用しており、例えばホウレンソウはホウレンソウ用のモデルを使用し、ベビーリーフ用のレタスでは緑色と褐色のレタスに対して異なる認識モデルを使用する（圃場では 1 種類ずつ栽培されている）。また、分草機構（図 2②）により条間まで葉が生育して広がった場合もクローラに巻き込まれないような仕様となっている。

機体後方にあるシリンダーに除草機構（図 1③）を取り付ける。作目によりツースの種類を選択することができる。除草ツースは自律走行開始と同時に自動で下がり、走行を停止すると自動的にツースが上がる仕様となっている。現状では、1 回の除草につき作物列を往復走行させることで除草効果が高まることを確認している。

除草作業時間はおよそ 3a/h で、1 回の充電で 3～4 時間程度の走行が可能である。

(2) 除草ツースの検討

除草機構については、複数のツースを供試し比較を行なっている。ここでは、春作ホウレンソウで 4 種類の除草ツース（図 2）を用いて試験を行なった結果を紹介する。

2021 年 5 月初旬に播種したホウレンソウに対して、播種 2 週間後に 1 回目を、3 週後に 2 回目の除草作業を行い、その 1 週間後の残存雑草量を比較した（表 1）。

供試した 4 種類の除草ツースの無除草区に対する除草率は 70%以上を示し、目標の 50%を上回る結果であった。また、ロボット除草を行った区の手取り除草作業時間はロボット除草を行わなかった（無除草）区の約 3 割であった。どのツースにしても株間の除草機能はほぼ無いので、株間の手取り除草は必須となるが、今回の結果では作業時間を 5 割以下に抑えることができた。

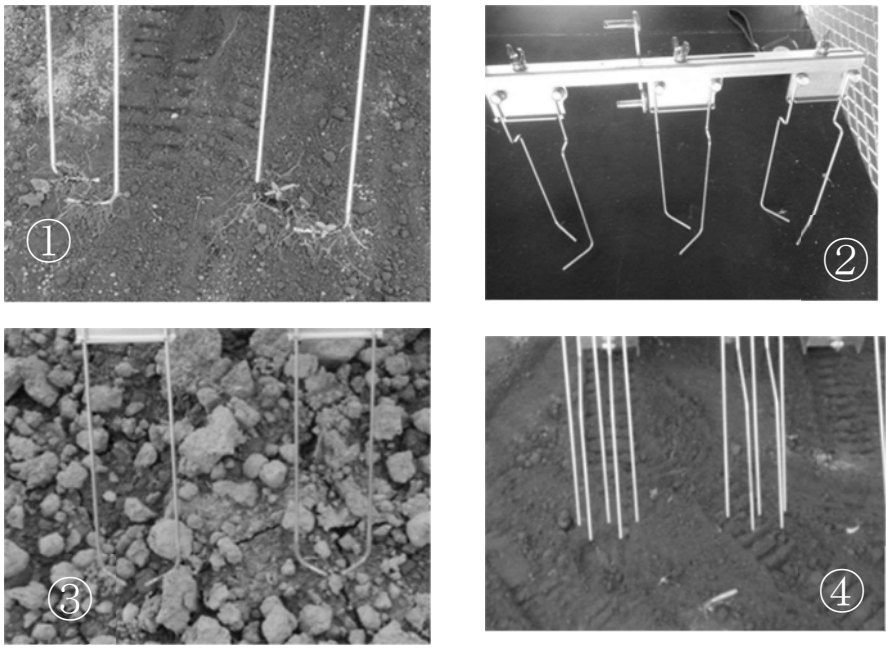

図 2 供試した除草ツース（春作ホウレンソウ）

表 1 雑草調査結果（2021 年 6 月 3 日、9 日）

	調査区（1m^2）あたり		手取り除草作業調査（3m^{2}あたり）	
処理（タインの種類）	残存雑草本数（本）	除草率（%）	作業時間	無除草区に対する割合（%）
無除草区	165.6a	-	8分23秒a	-
①	32.9b	77.9	2分22秒b	28.3
②	30.7b	79.4	2分4秒b	24.8
③	31.1b	79	2分31秒b	30.0
④	44.4ab	70.0	3分3秒b	36.4

※異なる文字間はTukeyのHSD検定（5%）で有意差あり

除草ツースについては更に除草効果の高い、もしくは異なる条間に対応できる形状などについて現在も検討を進めている。除草ツースは形状の差異、また形状によってはツースを入れる深さによっても除草効果や作物損傷程度が異なり、このテーマは実は奥が深い。

(3) 除草時期の検討

同じく、春作ホウレンソウで最適な除草時期についての検討を行った。除草時期の目安を雑草の葉齢で表すことで、栽培時期の違いによらず作業適期を示すことができると考えられる。2022 年春作ホウレンソウ（4 月下旬播種）で、ホウレンソウの子葉～1 葉期（早期）、2～3 葉期（中期）、4～5 葉期（晩期）（図 3）にそれぞれ 1 回目のロボット除草を行った。除草時、雑草についてもホウレンソウとほぼ同等の葉齢であった（図 3）。

それぞれ約 1 週間後に 2 回目のロボット除草を行い、全体の最後の除草から 3 日後に雑草調査を行った。その結果、残存雑草本数は早期、中期、晩期の順で少なくなり（図 4）、早い時期に 1 回目のロボット除草を行うことで除草効率が高まることが示された。

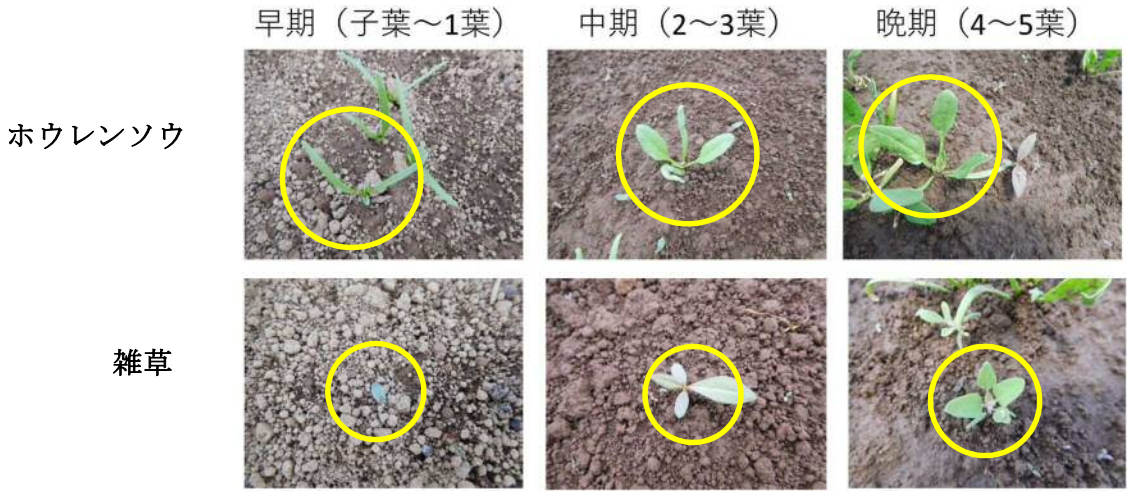

図 3 春作ホウレンソウの 1 回目ロボット除草時のホウレンソウおよび雑草の状況

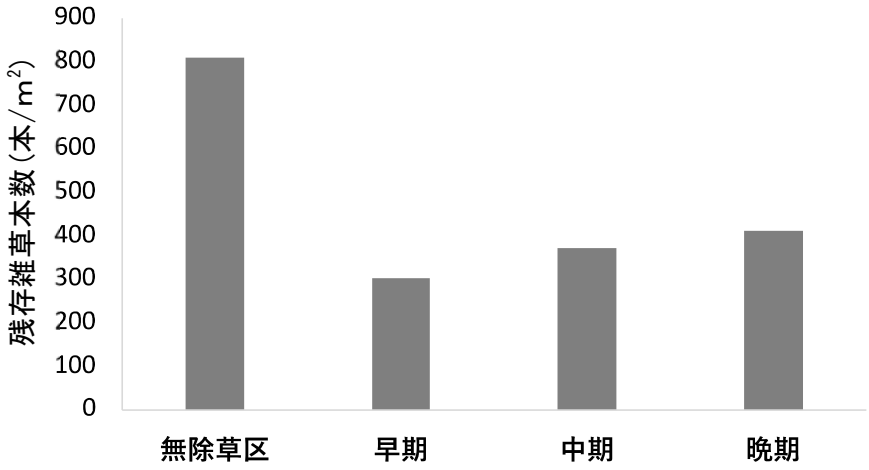

図 4 処理時期の違いによる残存雑草本数の違い

(4) 除草ロボットの課題

これまでの試験走行での現状の除草ロボットの課題については、以下の 3 点が考えられる。

1 点目は、自律走行の安定性である。例えば、傾斜のある圃場などでは片方のツースが深く入り過ぎて負荷がかかり、操舵が困難になる場合がある。（この点は今後の機体の改良により克服される可能性がある。）また、ニンジンなど初期生育の遅い作物では、雑草の生育が優り、現状では適期に自律走行によりロボット除草を行うことは難しい。

2 点目は、自動旋回である。作物列の終端を認識して自動旋回を行うプログラムの開発に取り組んでいるところであるが、圃場状態により回転が不十分で次の列には入れない、また回転後の進入列がずれてしまう等があり、今後精度の向上が必要である。

3点目は、ツースに残る雑草の問題である。ツースに除草した雑草がついたままで走行を続けると、作物を巻き込んでしまう危険性が高まる。また負荷が高まることで走行の安定性が損なわれることも想定される。ツース素材等の改良、もしくは旋回時に振るい落とす機構にするなどが考えられるが、今後検討が必要である。

(5) 本機導入のために現段階で求められる栽培・圃場条件

本機は露地・ハウス栽培どちらでも使用が可能である。現段階で求められる圃場条件としては、次の点が挙げられる。

① 自動旋回のために枕地を確保（2m程度）する必要がある。クローラ回転のためにできればある程度締まった状態が良い。

② できるだけ欠株が少ないことが望ましい。欠株が続く部分では、作物列の誤認識による列の逸脱や、終端であると誤認識して旋回動作が開始されるなどの危険がある。

③ 平畝が望ましい。畝立て栽培の場合でも畝幅がある程度（60cmなど）あればロボットの走行は可能と考えられる。ただし畝を跨いで列を移動することは難しいので旋回するためには工夫が必要である。

4. 除草ロボットの今後の展望

最後に、将来的な展望を示して本稿を締めたい。先にニンジン等初期生育が遅い作目では早期に自律走行することが難しいと書いたが、この対策の一つとしては、位置情報によりロボットを走行できるシステムにするということが考えられる。播種時の位置情報を押さえることができればその情報を元に作物認識なしでも除草することが可能となる。播種機も合わせて開発されれば、最初に圃場の位置情報を取得すれば自動播種に続き自動ロボット除草が可能となると考えられ、今後これらの開発が期待される。加えて、作物を近距離で観察できることから、ドローンなど上方からだけでは見つけることが困難な病害虫等に対して、有機農業でも使用可能な農薬を使用したスポット散布防除などにも応用できる可能性がある。

このような将来も見据えつつ、まずは安定して自律走行・自動旋回を行い、高い除草率で労力を削減できるAIロボットの開発に向けて、今後も取り組みを続ける予定である。

本資料の複製、転載および引用は、必ず原著者
の了承を得た上で行ってください。

2022 年 10 月 19 日発行

有機農業研究者会議 2022 資料集

「有機農業研究者会議 2022」実行委員会事務局
（NPO 法人有機農業参入促進協議会事務局）
〒101-0021 東京都千代田区外神田 6－5－12
偕楽ビル（新末広）3 階 株式会社マルタ内
TEL：050-5362-1815 FAX：050-3457-8516
Email：office@yuki-hajimeru.net