

微生物除草剤によるギンギン類の選択的管理の可能性

京都大学

泉 真隆

新潟食料農業大学

佐藤 豊三

はじめに

化学除草剤は、現代農業における雑草防除の中心的手段として、作物生産の効率化を支えてきた。しかし近年、化学除草剤の連続使用に伴う抵抗性雑草の出現が世界各地で広がりつつある (Heap 2025)。新しい作用機構を持つ除草剤の登場が以前と比べて著しく少なくなっているなかで、抵抗性問題への対応は難しさを増している (Umetsu and Shirai 2020)。加えて、化学農薬の規制強化による代替防除手段への転換を求める社会的な要請も高まっている。このような背景から、化学除草剤を代替する雑草防除技術の研究開発への関心は、以前にも増して強くなっている。

こうした流れのなかで、植物病原菌を利用した微生物除草剤は、化学除草剤への依存を低減しうる代替的な防除手段として注目されてきた。特に、化学合成農薬の使用を抑えたい場面や、有機農業などに適用可能な雑草防除技術を求める文脈において、微生物除草剤への期待は小さくない (Duke et al. 2022)。また、登録・利用例が限られていることもあり、化学除草剤で問題となっている抵抗性雑草と同様の問題は、現時点では大きく顕在化していない。一方で、除草効果の不安定性、製剤化や大量生産の困難さなど、実用化への壁は低くない (Gressel 2024)。世界的に見ても、登録・販売にまで至った製品は限られており、「期待の割に

実用化が進まない分野」という印象が長く続いてきた。

これまでに筆者らは、植物の白化症状を引き起こす微生物を例に、化学除草剤に代わる新たな雑草防除技術としての微生物除草剤の可能性を紹介してきた (泉・岡崎 2024)。一方で本稿では、そのような「化学除草剤の代替」という観点から視点を移し、高い宿主特異性を活かして特定の雑草を選択的・抑制的に管理する技術として、微生物除草剤を捉え直すことを試みる。その具体例として、牧草地におけるギンギン類の管理に着目し、これらに感染する糸状菌 *Teratoramularia rumicicola* を素材として進めてきた一連の研究を紹介する (Izumi and Sato 2025; Izumi, Oka, and Sato 2026; Izumi and Sato 2026)。この研究は、1990 年代に萌芽的な検討がなされながらも中断した研究資源を掘り起こし、現代の分類学・ゲノム解析を加えながら、微生物除草剤研究の基盤を再構築する試みである。

1. 微生物除草剤の歴史と課題

微生物除草剤の歴史と課題については、「微生物除草剤の歴史と今後の展望」および「微生物除草剤の歴史と課題解決に向けた新展開」で述べてきたため、ここでは本稿の議論に必要な範囲で概要のみを述べる (泉・岡崎 2024; 泉 2025)。微生物除草剤は、植物病原菌などの微生物を一時期に大量に処理することで、標的雑草を

防除する技術である (郷原 1998)。その研究開発は 20 世紀後半から進められてきたが、1980 年代初頭に、柑橘類の雑草 *Morrenia odorata* を標的とした DeVine® と、水稻・ダイズの雑草 *Aeschynomene virginica* を標的とした Collego® が米国で相次いで登録・上市されたことにより、この分野への関心は大きく高まった (Kenney 1986; Bowers 1986)。その後、各地で製品化の試みが続き、日本でもスズメノカタビラ (*Poa annua*) を標的としたキャンペリコ液剤™ が 1997 年に上市された (Imaizumi et al. 1999)。1990 年代には、微生物除草剤の研究開発がさらに活発化し、将来的な市場形成への期待も高まった (郷原 1998)。

しかしながら、その後、期待されたような普及には至らなかった。登録を維持しているものの、実際に製品として入手できる微生物除草剤は現在も限られている (Morin 2020)。この背景には、除草効果の不安定性、製剤化や大量生産の困難さ、そして商業的利益性の問題など、複数の課題が重なっている (Duke 2024; Gressel 2024)。これらの課題を克服するため、病原力の向上、製剤化技術の改善、微生物の混用、処理条件の最適化など、さまざまな研究が行われてきた。しかし、実用化に結びついた例は依然として限られており、微生物除草剤は長く「可能性は大きいが、実用化が難しい技術」として位置づけられてきた。



図-1 牧草地に侵入したエゾノギンギン

2. 選択的・抑制的な雑草管理技術としての微生物除草剤

微生物除草剤は、化学除草剤に代わる新たな雑草防除技術として期待されてきた。一方で、その実用化を考えると、化学除草剤と同じ尺度で性能を評価するだけでは限界がある。化学除草剤に近い速効性や広いスペクトラムを追い求める方向性がある一方、微生物ならではの特性を活かして、化学除草剤とは異なる役割を担わせるという発想も、古くから研究者のあいだに存在していた。微生物除草剤の価値が「安全性」や「環境負荷の低さ」を前面に出して語られることが多かったのは、市場形成や社会的受容を意識した文脈の反映でもある。いずれにせよ、実用化に至った製品が限られているという現実、この分野が抱える課題の根深さを示している (Duke 2024; Morin 2020)。

こうした課題のなかで、「殺草スペクトラムが狭い」という特性は、しばしば商業的な弱点とみなされてきた。一般に、市場価値の高い除草剤には、より多くの雑草種を対象とする性能が期待されやすく、限られた雑草にしか効かない微生物除草剤は、販売上の訴求力に劣ると評価されやすい。しかし、

この「狭さ」を宿主特異性の高さとして捉え直せば、それは同時に、周囲の植生に影響を与えないという特性でもある。もちろん、この視点は過去の研究者たちも持っていたことがうかがえるが、その意義を改めて強調する価値があると考えている。

その意義が特に明確に現れる場面として、牧草地が挙げられる。牧草地は、イネ科牧草、マメ科牧草、そして各種雑草が混在する複合的な植生空間である。そのため、一般的な作物栽培とは異なり、複数の有用草種を維持しながら問題雑草を抑制する必要がある、高い選択性が求められる。また、牧草地での雑草管理では、問題雑草を完全に枯殺することだけが目標ではなく、牧草の優位性を維持できる程度にその繁茂を抑制することにも管理上の意義がある。したがって、特定の雑草のみを選択的に弱らせ、完全枯殺ではなく生育抑制を通じて牧草群落の回復を促すという微生物除草剤の性質は、牧草地管理の考え方とよく合致している。なお、このような考え方は、牧草地に限らず、将来的により広い農業体系においても意義を持つ可能性がある。近年、リビングマルチやカバークロップなど、主作物と有用植物を同一圃場内で共存させながら雑草を抑制する栽培体系への関心が高まっている (Bhaskar

et al. 2021)。こうした場面では、圃場内の有用な植生を維持しながら、特定の問題雑草だけを選択的に抑制する技術が求められる可能性がある。本稿では、その具体的なモデルとして、牧草地におけるギンギン類の管理に焦点を当てる。次節では、このギンギン類という雑草の問題と、選択的管理の必要性について述べる。

3. 牧草地におけるギンギン類問題と選択的管理の必要性

日本の牧草地で問題となるギンギン属雑草のなかでも、エゾノギンギン (*Rumex obtusifolius* L.) は特に防除困難な雑草として知られている (図-1)。旺盛な多年生の繁殖力を持ち、牧草と競合して飼料生産量を低下させるとともに、一旦牧草地に侵入すると根を深く張り、機械的・化学的防除のいずれにおいても完全な除去が容易でない (Zaller 2004)。ナガバギンギン (*R. crispus* L.) もまた問題となりうる外来雑草であり、温帯域を中心に世界各地でも広く防除困難な雑草として知られている (Zaller 2004)。ギンギン (*R. japonicus* Houtt.) は在来種であるが、同様に牧草地に侵入して問題となることがある。エゾノギンギンとギンギンは、日本草地畜産種子協会の飼料

作物種子証明規程において、精選種子への混入防止が求められる「特定雑草」とされている（日本草地畜産種子協会 2019）。このことから、ギシギシ類が飼料作物種子の品質管理上、注意を要する雑草群として扱われていることがわかる。

化学的防除にはチフェンスルフロンメチルなどの除草剤が用いられているが、利用できる薬剤の選択肢は限られており、処理適期、マメ科牧草への影響など、利用上の制約もある。また、フランスではエゾノギシギシにおいてアセト乳酸合成酵素阻害型除草剤への抵抗性が報告されており（Heap 2025）、こうした問題が今後他地域にも波及する可能性は否定できない。こうした状況を踏まえると、牧草群落を維持しながらギシギシ類を選択的に抑制する技術の開発は、牧草地管理にとって切実な課題の一つである。ギシギシ類に特異的に感染する植物病原菌を利用した生物的防除は、そのような管理を実現しうるアプローチとして、日本でも 1990 年代に着目されていた。次節では、その先行する探索研究の経緯を振り返る。

4. ギシギシ類病原菌への着目——1990 年代の探索研究

ギシギシ類の生物的防除を目的とした病原菌の探索は、日本でも 1990 年代に着手されていた。四国農業試験場（当時）の佐藤豊三らは、牧草地の難防除雑草として問題となっていたギ

シギシ類を対象として、植物病原菌を利用した雑草防除技術の開発を検討した。その記録は、日本菌学会での発表要旨（佐藤ら 1997）および国際会議資料（Sato and Tomioka 2006a, b）として残っており、各地での病原菌の調査・採集、分離菌株の病原性評価、分生子の人工増殖・保存、野外交種までを視野に入れた検討が行われていたことが読み取れる。小笠原諸島・母島で採集された *Ramularia pratensis* GR1 株はギシギシ類に対する病原性が認められ、のちに NARO ジーンバンクに MAFF 238946 として登録・保存された。しかし、これらの研究は担当者の異動などにより中断し、実用化に向けた継続的な発展には至らなかった。

こうした研究の存在は、通常であれば容易には参照しにくいものであった。筆者の一人（泉）がこの研究の経緯を知ったのは、佐藤が自身のブログに公開していた記事（佐藤 2023）がきっかけである。その記事を読んで連絡を取ったことが、本研究の共同研究としての出発点となった。学会発表要旨として記録されていながら広く継承されることのなかった研究資源が、このようにして現在の研究につながっている。

その後、*Ramularia* 類縁菌の分類体系は、複数遺伝子領域に基づく分子系統解析を軸とした大規模な再検討によって根本的に見直されることになる。旧来の *Ramularia* 属は多系統であることが明らかとなり、*Teratoramularia*、*Xenoramularia* など複数の新属が設立された（Videira et al. 2016）。さらに、

旧来「*R. pratensis*」と記録されていた材料は、改訂分類体系のもとでは複数の種にまたがるものが含まれることも指摘された。これにより、GR1 株の分類学的位置づけを現在の体系に照らして改めて確認する必要性が生じた。過去に蓄積された研究資源を、現代の分類・分子解析手法で改めて見直すことは、微生物除草剤研究の基盤を再構築するための第一歩である。次節では、GR1 株の再評価の結果を述べる。

5. GR1 株の再同定とその意義（Izumi and Sato 2026）

GR1 株の分類学的再評価は、ITS・LSU rDNA 領域の塩基配列解析、分子系統解析、形態観察、宿主情報、地理的由来を組み合わせで行われた。総合的に検討した結果、GR1 株は現時点では *Teratoramularia rumicicola* と再同定された。ただし、近縁種 *T. rumicis* との種境界については、現在公開されている配列情報や菌株数が限られており、なお検討の余地が残っていることを付記しておく。あわせて、GR1 株のギシギシ類に対する病原性が改めて確認された。ギシギシ、ナガバギシギシ、エゾノギシギシの 3 種への接種試験では、いずれの種においても発病と生育抑制が認められた。

GR1 株の再評価が持つ意義は、種名の更新にとどまらない。1990 年代に「*Ramularia pratensis*」として蓄積された探索・病原性・保存に関する知見が、現代の分類体系のもとで *T. rumicicola*

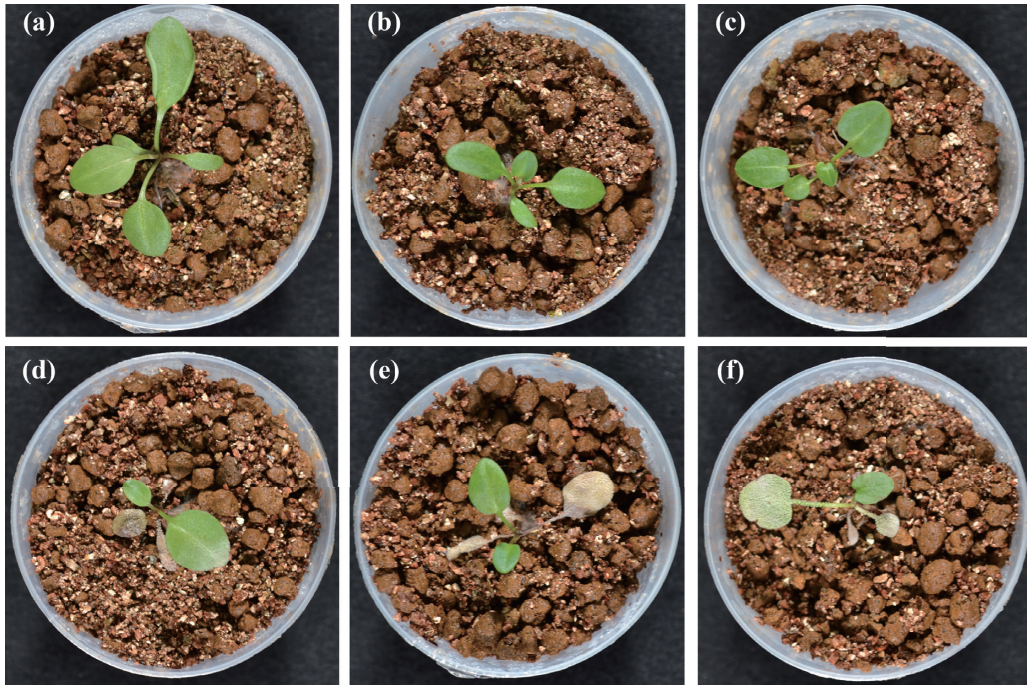


図-2 TR4 株接種によるギシギシ類 3 種の発病と生育抑制
(a-c：無処理, d-f：TR4 接種；a, d：ナガバギシギシ, b, e：ギシギシ, c, f：エゾノギシギシ)
1-2 葉期に菌懸濁液を噴霧処理した。噴霧処理した葉に明瞭な病徴が認められ、以後の生育も抑制された。

に関する情報として位置づけ直された。GR1 株は、微生物除草剤候補としての本格的な基礎評価の主役というよりは、埋もれていた過去の研究資源を現代的に再評価し、現在の研究へ接続するための足がかりとして位置づけられる。この再評価を経て、本州のギシギシ類から新たに分離された TR4 株の評価へと研究は展開した。次節では、TR4 株の宿主範囲と特性を述べる。

6. 本州のナガバギシギシ病斑から分離された TR4 株 (Izumi and Sato 2025)

GR1 株の再評価を進める過程の 2024 年、茨城県つくば市においてナガバギシギシの葉に、*T. rumicicola* の感染に特徴的な白色粉状の病斑が確認された。この病斑から単孢子分離によって得られた菌株を TR4 株と命名し、GR1 株と同様の手法で *T. rumicicola* と同定した。TR4 株は NARO ジーンバンクに MAFF 248116 として登録・保存されている。GR1 株が小笠原・母島で採集された

歴史的な保存菌株であるのに対し、TR4 株は本州で新たに分離された菌株であり、*T. rumicicola* の宿主範囲と病原性を評価する本格的な基礎試験の主役として位置づけられる。

TR4 株について、ギシギシ、ナガバギシギシ、エゾノギシギシの 3 種と、牧草 5 種（オーチャードグラス、イタリアンライグラス、チモシー、アルファルファ、シロクロバ）を対象に、制御環境下での接種試験を実施した。その結果、3 種のギシギシ類すべてで接種後に明瞭な病徴と生育抑制が確認されたのに対し（図-2）、供試した牧草 5 種では明瞭な病徴は認められなかった。TR4 株はギシギシ類の生育を明瞭に抑制したが、完全な枯殺には至らなかった。しかし、本稿で述べてきた選択的・抑制的管理の観点からは、ギシギシ類の競争力を低下させ、牧草群落の優位性を維持・回復させることでも十分に意義がある。この点は、完全枯殺を前提とする評価では弱点とみなされうるが、選択的・抑制的管理の文脈では、管理目標に合致した性質

として評価できる可能性がある。また、TR4 株は液体培地での培養が可能であることが確認されており、将来的な大量生産を考えるうえで重要な手がかりとなる。ただし、生産効率の具体的な評価はこれからの課題である。

なお、この宿主範囲試験は制御環境下での予備的スクリーニングである。より広い植物種への影響、圃場条件下での効果、環境中での挙動、非標的生物への影響については、今後の検討が必要である。これらの点をクリアすることが、実用化に向けた基盤として求められる。また、GR1 株と TR4 株を比較することで、日本産 *T. rumicicola* の病原性、宿主範囲、地理的多様性への理解が深まるものと期待される。

7. ゲノム情報から始まる作用機構研究 (Izumi, Oka, and Sato 2026)

TR4 株の宿主範囲と液体培養性が確認されたことで、微生物除草剤候補としての基礎的な評価が一段階進んだ。次の課題は、病原性や宿主特異

性の分子的基盤を理解することである。そのための第一歩として、筆者らはTR4株のドラフトゲノムを公開した。*Teratoramularia* 属ではゲノム配列情報がこれまで公開されておらず、本ゲノムが属として初の公開配列となる。このゲノム情報は、近縁種との比較解析、病原性に関わる遺伝子群の探索、宿主特異性の分子的基盤の解明、さらには二次代謝産物研究や感染機構研究の出発点として幅広く活用されることが期待される。ゲノム配列が得られたことは、直ちに作用機構が解明されたことを意味するものではない。しかし、作用機構の理解とそれに基づく病原力の向上が実用化に向けた技術設計の核心となりうることは、*Fusarium oxysporum* を有効成分とするストライガ防除剤 Kichawi Kill™ の開発事例が示しており（泉・岡崎 2024; Baker et al. 2024）、*T. rumicicola* においても同様の視点が重要になると考えられる。

今後 GR1 株についても同様のゲノム解析が進めば、両株の比較ゲノム解析を通じて、種レベルで共通する病原性基盤と菌株間の差異を区別することが可能になると期待される。こうしたゲノム情報の蓄積は、単一菌株の性能評価を超えた、より広い視点での微生物除草剤開発の基盤となるものである。

8. 実用化に向けた課題と今後の展望

T. rumicicola を素材とした微生物除草剤の実用化には、現時点の研究成果

を踏まえつつ、さらに解決すべき課題がある。第一に、圃場条件での効果確認が不可欠である。これまでの試験はすべて制御環境下での試験であり、圃場では温度、降雨、日射などの変動因子が加わる。感染成立条件、効果の再現性、環境変動を把握することが、実用化評価の前提となる。第二に、安全性評価の充実が必要である。供試牧草5種で明瞭な病徴が認められなかったことは有望な結果だが、これは予備的なスクリーニングにとどまる。より広範な植物種、非標的生物への影響、および環境中での分散・定着・越冬の実態把握が、農薬登録に向けて求められる。第三に、製剤化と大量生産の技術確立が課題である。液体培養が可能であることは重要な手がかりだが、農薬製品として安定的に供給するための製剤形態、保存安定性、および生産コストの低減が不可欠である。第四に、実用化に向けた技術設計の基盤となる作用機構の解明である。作用機構が明らかになることで、病原力の向上や使用条件の最適化、安全性の科学的な説明、宿主特異性の理解が可能になり、製品設計や使用方法に具体的な指針を与えることができる。

こうした課題を踏まえると、*T. rumicicola* を利用した微生物除草剤はギンギン類を単独で根絶する万能技術ではなく、化学除草剤、草地更新、施肥管理など、既存の技術と組み合わせることで、牧草地管理のなかで役割を担いうる補完的技術として位置づけることが現実的である。ギンギン類の競争力を低下さ

せ、牧草群落の優位性を維持・回復させるという管理目標のもとで、微生物除草剤の可能性を粘り強く評価していくことが重要である。

おわりに

本稿では、牧草地のギンギン類問題を出発点として、微生物除草剤研究の意義と限界を整理したうえで、ギンギン類病原菌 *T. rumicicola* を素材とした一連の研究を紹介した。1990年代に佐藤豊三らが試みたギンギン類病原菌の探索・評価研究は中断したが、その研究資源は現代の分類・分子解析手法によって *T. rumicicola* として新たに位置づけ直された。加えて、本州で自然感染ギンギン類の葉から新たに分離されたTR4株の宿主範囲評価とゲノム情報の取得が進み、ギンギン類病原菌を微生物除草剤候補として考えるための基盤がひとつひとつ整いつつある。

微生物除草剤は、化学除草剤を直ちに置き換えるものではない。除草効果の安定性、製剤化、安全性評価など、解決すべき課題は多い。しかし、高い宿主特異性を活かして特定雑草を選択的に抑制し、望ましい植物群落を維持するという方向性は、牧草地のような場面で特に意義を持ちうる。微生物除草剤を、化学除草剤と同じ役割を担う技術としてのみ評価するのではなく、既存技術と組み合わせながら特定雑草を選択的・抑制的に管理する技術として捉えることが、この分野の研究開発を前進させるうえで重要ではないかと

考えている。GR1 株の再評価と TR4 株の分離・評価、そしてゲノム情報の取得は、その基盤を少しずつ築く作業である。今後、圃場試験、製剤化研究、安全性評価、作用機構解析が着実に積み上げられ、化学除草剤との補完的な防除体系のなかで微生物除草剤がその役割を担える日が来ることを期待したい。

謝辞

本研究の一部は、日本雑草学会研究課題補助事業 (No. 2501)、日本学術振興会科学研究費助成事業 特別研究員奨励費 (24KJ1012) および研究活動スタート支援 (25K23640) の支援を受けた。また、1990 年代の GR1 株に関する研究は、四国農業試験場(当時)における佐藤豊三・富岡啓介・小金澤頌城の各氏による先駆的な検討の上に成り立っている。関係各位に深謝する。

引用文献

Baker, C.S., Sands, D.C. and Nzioki, H.S. 2024. The Toothpick Project: commercialization of a virulence-selected fungal bioherbicide for *Striga hermonthica* (witchweed) biocontrol in Kenya. *Pest Management Science* 80, 65–71.

Bhaskar, V., Westbrook, A.S., Bellinder, R.R. and DiTommaso, A. 2021. Integrated management of living mulches for weed control: a review. *Weed Technol.* 35, 856–868. doi:10.1017/wet.2021.52.

Bowers, R.C. 1986. Commercialization of Collego™—an industrialist's view. *Weed Science* 34(Suppl. 1), 24–25.

Duke, S.O. 2024. Why are there no widely successful microbial bioherbicides for weed management in crops? *Pest Management Science* 80, 56–64.

Duke, S.O., Pan, Z., Bajsa-Hirschel, J. and Boyette, C.D. 2022. The potential future roles of natural compounds and microbial bioherbicides in weed management in crops. *Advances in Weed Science* 40, e020210054.

Gressel, J. 2024. Four pillars are required to support a successful biocontrol fungus. *Pest Management Science* 80, 35–39.

Heap, I. 2025. The International Herbicide-Resistant Weed Database. URL: <https://www.weedscience.org/>

Imaizumi, S., Honda, M., Morita, K., Tatenno, A. and Fujimori, T. 1999. Study of the biological control of annual bluegrass using a plant-pathogenic bacterium. *Journal of Weed Science and Technology* 44, 361–369.

Izumi, M. and Sato, T. 2025. Bioherbicidal activity and host range of *Teratoramularia rumicicola* strain TR4 isolated from *Rumex crispus* in Japan. *Weed Biology and Management* 25, e70008.

Izumi, M. and Sato, T. 2026. Reidentification of *Teratoramularia rumicicola* strain GR1 in Japan and its pathogenicity on *Rumex* species. *Journal of General Plant Pathology*. doi:10.1007/s10327-026-01284-1.

Izumi, M., Oka, T. and Sato, T. 2026. Draft genome sequence of *Teratoramularia rumicicola* strain TR4 isolated from *Rumex crispus*. *Microbiology Resource Announcements* 15, e01309–25.

Kenney, D.S. 1986. DeVine® - the way it was developed - an industrialist's view. *Weed Science* 34(Suppl. 1), 15–16.

Morin, L. 2020. Progress in biological control of weeds with plant pathogens. *Annual Review of Phytopathology* 58, 201–223.

Sato, T. and Tomioka, K. 2006a. Possibility of a mycoherbicide agent of *Ramularia pratensis* to *Rumex japonicus*. 11th IUPAC International Congress of Pesticide Chemistry, Book of Abstracts (2) for Poster Session, I-3-03C, p. 88. Kobe, Japan, August 6–11, 2006.

Sato, T. and Tomioka, K. 2006b. Pathogenicity of *Ramularia pratensis* to *Rumex japonicus* and methods of its artificial reproduction and long term preservation. In: Meyer, W. and Pearce, C. eds. The 8th International Mycological Congress, Cairns, Australia, August 20–25, 2006. Medimond International Proceedings, pp. 257–260.

Umetsu, N. and Shirai, Y. 2020. Development of novel pesticides in the 21st century. *Journal of Pesticide Science* 45, 54–74.

Videira, S.I.R., Groenewald, J.Z., Braun, U., Shin, H.D. and Crous, P.W. 2016. All that glitters is not *Ramularia*. *Studies in Mycology* 83, 49–163.

Zaller, J.G. 2004. Ecology and non-chemical control of *Rumex crispus* and *R. obtusifolius* (Polygonaceae): a review. *Weed Research* 44, 414–432.

郷原雅敏 1998. 生物除草剤の現状と展望. *植物防疫* 52, 429–431.

佐藤豊三 2023. 強毒雑草ギンギシの病原菌を利用する試み —*Teratoramularia* 属菌—. 菌を知らば百戦危うからず, 2023 年 2 月 6 日. URL: <https://www.hesodim.or.jp/satoh/313>

佐藤豊三・富岡啓介・小金澤頌城 1997. *Ramularia pratensis* Sacc. のギンギシに対する病原性と分生子の人工増産・保存法. *日本菌学会第 41 回大会講演要旨集*, C-8, p. 32.

日本草地畜産種子協会 2019. 飼料作物種子証明規程.

泉真隆 2025. 微生物除草剤の歴史と課題解決に向けた新展開. *生物防除部会ニュース* 84, 17–23.

泉真隆・岡崎伸 2024. 微生物除草剤の歴史と今後の展望. *植調* 58, 1–6.