令和７年度環境省委託業務

令和７年度脱炭素型循環経済システム構築促進事業

（うち、プラスチック等資源循環システム構築実証事業）

（化石資源由来の肥料被覆材を海洋分解性木質系樹脂で代替した肥料による実証事業）

委託業務成果報告書

令和８年３月

王子マテリア株式会社

成果報告書概要

１．業務目的

マイクロプラスチックとは、一般に直径 5mm 以下の微小なプラスチック粒子を指し、ペットボトルやレジ袋、容器包装材などが、紫外線や波浪、摩耗作用によって細かく砕け、河川を通じて海洋へ流出することで発生する。こうしたマイクロプラスチックは回収が極めて困難であり、海水中や海底堆積物、生物の体内などから検出されており問題となっている。

このマイクロプラスチックの原因となるものに水田から流出する肥料の被覆材がある。これは肥料の表面をポリプロピレンで被覆し､表層の小さな孔から徐々に肥料成分を水田等に放出させる緩効性肥料によるもので、一発施肥が可能で複数回の散布を行う手間が省けるため広く普及するようになった。しかし､肥料溶出後に残る樹脂殻が河川を通じて海洋に流出しマイクロプラスチック化する問題があり、解決策が求められていた。

その課題に対して複数の解決策が検討されているが課題もあり、大規模な普及には至っていない。例えば、肥料の被覆に使う石油由来樹脂を生分解性樹脂に代替したものは田圃の中で十分に生分解できず海洋流出し、マイクロプラスチック化する可能性があり、硫黄を肥料にするものでは、肥料の溶出量のコントロールが困難という問題があった。

本実証事業は水稲生育向けに用いられている石油由来樹脂で被覆された肥料ペレットの樹脂を海洋環境において分解性を有する木質系樹脂に代替し、さらに植物繊維を配合して樹脂被覆肥料の製造法を簡略化させる新規肥料製造の確立を目指すものである。使用する原材料はサステナブルなものとし、製造時の CO_2排出量の低減を図るようにする。また、肥料放出後に木質系樹脂が海洋流出した場合でも海洋分解することが可能であるが、これらの特性を実際の田圃とラボで実証実験し、さらに LCA と生態系での環境負荷を最小限に抑えることを目標に取り組むこととする。本実証事業は、マイクロプラスチックによる汚染防止のための化石資源由来素材からの代替実証事業として、化石資源由来素材の肥料被覆材を海洋分解性木質系樹脂で代替する肥料開発とその検証を行ったものである。本実証事業はサステナブルな木質資源の活用と、原材料と製造、廃棄まで CO_2 の排出量削減と、原材料の海洋生分解性と水田での生分解性を立証することを目的とする。

２．本年度の業務内容と結果

(1) 肥料被覆用木質系樹脂に関する技術開発

令和７年度は、最初に肥料の主体である尿素と木質系樹脂であるロジン(ハリマ化成品)、木材由来のパルプ(王子製袋品)を当社内のラボにて加熱混合してペレット成型し、

ペレット成型の可否から尿素/ロジン/解繊パルプの配合比最適化を検討した。尿素/ロジン/解繊パルプ配合比は70/30/10～80/20/10で肥料のペレット化が行いやすいことを確認した。この結果を株式会社DJKの二軸混錬機により実機での再現性試験を行い、尿素/ロジン/解繊パルプ配合比は80/20/6での押出し、ストランド成型が可能なことを確認した。

作製した肥料についての尿素溶出率は蒸留水中で浸漬・攪拌して経時的に濾別して重量の減量から求め、比較対象のポリプロピレン(PP)被覆の肥料と同レベルの溶出傾向にあることを確認した。尿素溶出後の海洋生分解性については、ロジン単独と尿素溶出後のロジンと解繊パルプについて疑似海洋水条件で浸漬・攪拌してその重量減から求める王子タック株式会社簡易法で測定し、ロジンでは11日間で10%、尿素溶出後のロジンと解繊パルプについては 15 日で 15%、60 日で約 50%の海洋生分解性があることを確認した。

（２）木質系樹脂を使用した被覆肥料による水稲育成実証試験

水稲の生育性については、共同実施者である筑波大学 T-PIRC の水田で比較対象のポリプロピレン(PP)被覆肥料と本検討の肥料を栽培し検証した。

両者について草丈の成長は、ほぼ同一、茎数は本検討肥料でやや多く推移し、葉の　クロロフィル含量を推定する指標のSPAD値も大差なく、栄養成長にはほとんど差は　みられず、最終的なコメの収量は、両者について大差ない結果が示された。

（３）ＬＣＡの検証・評価

ＬＣＡ計算では、株式会社Green Guardianでの既存のポリプロピレン(PP)被覆肥料の製造フロー調査を行い、本検討肥料は、既存の肥料と比較してCO_2削減量は、1tあたり 68.3 kg-CO_2eq、削減率で約3.7%の削減量を示した。

今後、ポリプロピレン(PP)被覆品と本検討肥料の田圃への残存・蓄積、海洋流出の数量を把握して数値算出に反映させる。また、現段階でポリプロピレン(PP)被覆品に比べ、尿素に対して多いロジン＋解繊パルプ量の配合比率を低減させ、二軸混錬条件の効率向上検討を進め製造時のCO_2排出量を低減させる。

Purpose of the Project

This study examines a previously underrecognized pathway contributing to marine microplastic contamination: the polymeric shells of controlled-release fertilizers used extensively in rice production. Although polypropylene-coated fertilizers have gained widespread adoption due to their capacity to facilitate single-application nutrient management and reduce labor requirements, the residual polymer fragments remaining after urea dissolution are susceptible to hydrological transport and may ultimately enter marine systems, where they undergo progressive fragmentation into microplastics. While several coating alternatives have been explored, current options remain inadequate. Biodegradable plastics frequently exhibit incomplete degradation under submerged paddy-field conditions, thereby permitting untransformed residues to escape into aquatic environments, whereas sulfur-based coatings exhibit limited controllability over nutrient-release kinetics.

To address these limitations, the present research seeks to develop and validate a novel coating system composed of marine-degradable, wood-derived resin supplemented with plant-based fibers, designed to streamline processing while reducing reliance on fossil-derived materials. The selection of raw materials was guided by considerations of renewability and carbon intensity, and the manufacturing strategy was structured to minimize life-cycle greenhouse gas emissions. Through a coordinated program integrating laboratory characterization, field-scale agronomic evaluations, and life-cycle and ecological impact analyses, this study aims to rigorously assess degradability under both paddy-field and marine conditions and to quantify associated environmental burdens. The initiative serves as an empirical demonstration of the feasibility of replacing conventional fossil-based fertilizer coatings with environmentally benign alternatives capable of mitigating microplastic generation at source.

2. Activities and Results for the Fiscal Year

2.1 Development of Wood-Derived Resin for Fertilizer Coating

During FY2025, urea, rosin, and defibrated pulp were thermomechanically blended under controlled laboratory conditions to determine optimal formulation boundaries conducive to pellet formation. Pellet integrity and processing stability were consistently achieved within the range of 70/30/10

to 80/20/10 (urea/rosin/pulp). Pilot-scale validation using a twin-screw extruder at DJK demonstrated robust reproducibility, with stable extrusion and strand formation observed at a formulation ratio of 80/20/6, thereby confirming the system's scalability.

Urea-release dynamics were evaluated by immersing pellets in distilled water under continuous agitation and quantifying temporal mass loss. The dissolution profile exhibited close correspondence with that of conventional polypropylene-coated fertilizers, thereby affirming functional parity with incumbent technologies. Marine degradability was assessed via Oji TAC's simplified assay under simulated seawater conditions. Rosin alone exhibited approximately 10% mass loss over 11 days, whereas the rosin–pulp composite following urea release achieved approximately 15% degradation after 15 days. Extended assays are ongoing to resolve long-term degradation kinetics and mechanistic pathways.

2.2 Rice Cultivation Trials Using Rosin-Based Coated Fertilizer

A field-scale agronomic assessment was conducted at the T-PIRC research paddy fields of the University of Tsukuba to evaluate the performance of the newly formulated fertilizer relative to a conventional polypropylene-coated product. Growth trajectories in plant height were effectively indistinguishable across treatments, while the wood-based formulation yielded marginally higher tiller counts. SPAD indices, reflecting chlorophyll content, did not differ appreciably between treatments. Final grain yields were statistically comparable, indicating that the wood-derived coating does not impose agronomic penalties and performs equivalently to the prevailing industry standard.

2.3 Life-Cycle Assessment

A cradle-to-gate life-cycle assessment was undertaken using process data for polypropylene-coated fertilizer production obtained from Green Guardian Co. The analysis revealed that the wood-derived fertilizer coating achieves a net reduction of 68.3 kg-CO_2eq per metric ton, corresponding to an approximate 3.7% decrease in life-cycle greenhouse gas emissions relative to the conventional fossil-based coating.

Subsequent research will focus on quantifying the persistence, environmental transport, and potential accumulation of both coating systems within paddy-field and marine environments, with the goal of incorporating these data into a refined LCA model. Additional efforts will target reductions in the required proportion of rosin and pulp and optimization of twin-screw extrusion parameters to further decrease energy consumption and associated emissions.

目次

1.	背景	1
1.1	海洋プラスチック問題と被覆肥料について	1
1.2	被覆肥料について	1
1.3	被覆肥料の製造方法	2
1.4	脱プラスチック肥料と問題点	2
1.5	被覆構造から担持構造への発想転換	3
1.6	担持構造による溶出制御機構の仮説	4
1.7	本実証事業の目的	4
2.	本実証事業について	5
2.1	本実証事業の目標	5
2.2	本実証事業の体制	5
2.3	本実証事業の参加大学と企業	7
2.4	本実証事業の目標達成のための課題	16
2.5	本実証事業の事業化時期と戦略	17
3.	本実証事業の予備検討	18
3.1	既存の緩効性肥料と肥料に求められる性能	18
3.2	尿素、木質系樹脂ロジン、乾式粉砕パルプ配合肥料の検討	19
3.3	木質系樹脂ロジンについて	23
3.4	使用ロジンの選定	24
3.5	乾式粉砕パルプについて	25
4.	本検討肥料の海洋環境中での分解性の検討	29
4.1	トール油ロジンの海洋環境における溶解性	29
4.2	簡易法による海洋溶解性評価	29
4.3	海洋生分解性と肥料適用性の整理	30

5. 本実証事業の肥料製造検討 33
5.1 二軸混錬機での製造検討 33
5.2 材料設計および製造方法 33
5.3 ペレット化の成立と乾式解繊パルプの役割 38
5.4 ペレット内部構造の評価結果 39
5.5 溶出挙動および機能設計への示唆 39

6. 木質系樹脂を使用した被覆肥料による水稲育成実証試験 40
6.1 水稲作現場の問題点 40
6.2 実証試験の目的 40
6.3 試験内容 41
6.4 まとめ 78
6.5 今後の課題 80
6.6 筑波大学 T-PIRC 農場での栽培検証(写真) 82

7. 本検討肥料と PP 被覆肥料のＬＣＡ 85

8. 本検討肥料の事業性 90

9. まとめと今後の進め方 102

引用文献、出典 110

視察会、報告会、審査会等の実施 114

1. 背景

1.1 海洋プラスチック問題と被覆肥料について

近年、プラスチックごみによる海洋汚染は地球規模で深刻化しており、海洋生態系への影響のみならず、漁業・観光産業への悪影響、さらには船舶航行の障害など、多方面にわたる社会的課題として認識されている[1,2]。海洋に流出したプラスチックは自然環境下で分解されにくく、長期にわたり残留・蓄積することから、回収や清掃といった下流対策のみでは限界があり、製品設計や素材選択を含むライフサイクル全体での対策が求められている[1]。

この問題意識は、容器包装などの一般消費財に限らず、農業分野にも及んでいる。水稲栽培においては、省力化や施肥効率向上を目的として、肥料成分の溶出を制御する被覆肥料が広く利用されてきた[3]。被覆肥料は、追肥作業の省略や肥料流亡の抑制といった利点を有する一方で、肥料成分溶出後に残存する被膜殻が回収されず、水田から用排水路、河川を経て海洋へ流出する可能性が指摘されている[4,5]。実際、水田からの被覆肥料由来粒子の流出や、土壌中への残留・蓄積が観測されており、農地起源のプラスチックが河川輸送を通じて下流域へ移行し得ることが示唆されている[4-6]。

このように、被覆肥料は農業生産上の有用性と引き換えに、使用後の被膜殻が環境中に残留・移行するという構造的問題を内包している。被覆肥料の流出率自体は一見小さいように見える場合でも、水稲作が広域かつ反復的に行われることを考慮すると、低率であっても不可避な流出と蓄積が長期的に無視できない環境負荷となる可能性がある[4,6]。したがって、水管理等による流出防止策と並行して、肥効機能を果たした後に環境中で分解・同化され得る材料設計への転換が求められている。

1.2 被覆肥料について

被覆肥料は、肥料成分の溶出速度を制御することで、施肥回数を削減し、省力化と肥料利用効率向上を同時に実現する資材として位置づけられている[3,7]。とりわけ、尿素などの水溶性肥料を樹脂や硫黄等の膜で被覆する被覆肥料は、肥効発現を作物の生育ステージに合わせて設計する緩効性肥料として、日本の水稲栽培を中心に広く普及し

てきた[7]。一方で、被覆肥料はその構造上、肥料成分溶出後に被膜殻が残存する。この残存被膜は圃場内に留まる場合もあるが、代かき、降雨、排水などを通じて圃場外へ移し得る[4,6]。この点が、1.1で整理した海洋プラスチック問題の構造と直接接続する。

1.3 被覆肥料の製造方法

被覆肥料は、肥料粒子表面に連続膜を形成し、その膜厚や欠陥の有無によって溶出挙動を制御する資材である。そのため、完全被覆と膜欠陥の抑制が機能成立の前提となる[7,8]。工業的には、流動層、回転ドラムなどの装置が用いられ、噴霧、乾燥、硬化といった多段の熱・粉体プロセスが不可避となる[7]。

これらの製造プロセスは、高い溶出再現性を実現する一方で、大型設備による高いエネルギー消費を伴うことと、設備投資・運転コストが構造的に発生する点が指摘されている[8]。

1.4 脱プラスチック肥料と問題点

被膜殻問題への対応として、生分解性樹脂被覆肥料や硫黄被覆肥料などが検討されてきた[8]。PLAやPHA類などの生分解性材料は候補とされるものの、その分解性は環境条件に強く依存する。実際、海洋環境における分解挙動を評価した実証事業では、PLAは実海洋条件下では分解されにくい材料として報告されている[9,10]。

このように、「生分解性」という用語自体が、使用環境と評価条件に依存する点が、脱プラスチック肥料の実装を難しくしている[9]。さらに、生分解性材料は材料コストが高く、低付加価値用途である肥料被覆材では経済合理性が成立しにくいことも指摘されている[8]。

被覆肥料における化石資源由来被覆材の代替として、ロジンなどの天然由来樹脂を用いる試みはこれまでも提案されてきたが、先行特許ではロジン単独では被覆性や溶出制御の安定性が不十分であり、結果としてポリオレフィン系樹脂を併用する設計が多く見られる[11,12]。このような状況下において、従来の被覆構造の枠内で材料のみを置換するアプローチは、技術的・社会的要請の両面から限界に近づいていると考えられる。

1.5 被覆構造から担持構造への発想転換

本実証事業において、「被覆」とは異なる「担持」という構造概念に至った背景には、当初検討していた製造仮説と、その検証過程で得られた実験事実がある。初期段階では、ロジンをアルコール系溶剤に溶解し、これをパルプ繊維および尿素肥料と加熱混練する工程を想定していた。この際、乾燥工程におけるアルコールの蒸発に伴い、溶解していたロジンが相対的に肥料粒子の外層側へ移動・濃縮し、結果として肥料表面にロジンが集積して被覆層を形成するという仮説を立てた。実際、初期試作においては、乾燥後の粒子でロジンが肥料外周部に偏在する傾向が確認され、この仮説は一定程度支持されると考えられる。

しかしながら、アルコール系溶剤の使用は、原料コスト、設備の防爆対応、作業安全性といった観点から、実用および量産プロセスとして大きな制約となることは明らかである。そこで、溶剤を使用しない条件で同様の構造形成が可能かを検討した結果、ロジンは溶剤を用いずとも、加熱混練後の乾燥過程において比較的肥料粒子の外層側に配置され得ることが確認された。一方で、この条件下では、ロジンが肥料粒子全体を連続的に覆う完全な被膜を形成するには至らず、従来の被覆肥料で想定されるコアシェル型構造とはやや異なる状態となった。

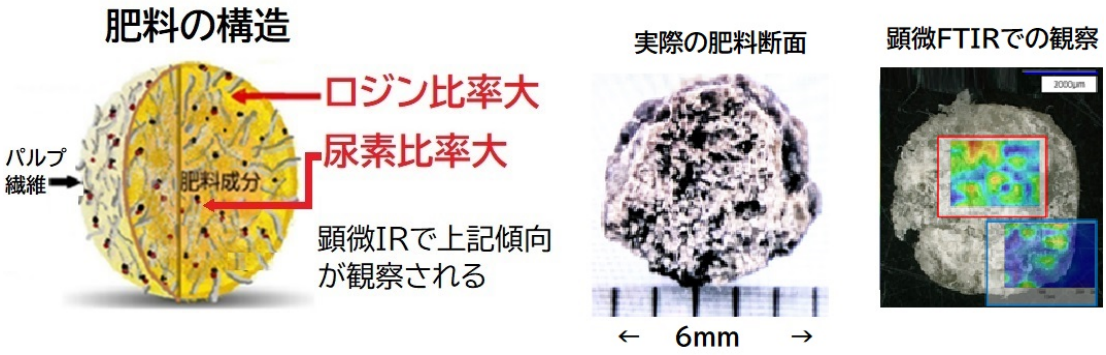


図 1-1　検討した肥料の構造

このような構造を観察・評価した結果、ロジンが連続膜を形成しなくとも、パルプ繊維を把持・結着する形で肥料成分を複合体中に保持し得ること、すなわちロジンとパルプ繊維のネットワークによって尿素がマトリクス内に担持された構造を形成することが明らかとなった。さらに、この担持構造においては、尿素の水への接触および溶解が、パルプ繊

維およびロジン相を介して間接化されるため、完全な被膜を有さないにもかかわらず、肥料溶出に緩効性が付与されると考えられる。

1.6 担持構造による溶出制御機構の仮説

本実証事業で採用する担持構造における溶出制御機構は、肥料粒子表面に連続的な膜を形成して水の浸入を物理的に遮断する被覆構造とは異なり、ロジンとパルプ繊維からなる複合マトリクス内に尿素を保持・分散させることで、水との接触経路を間接化し、結果として溶出速度を低下させる点に本質がある。すなわち、被覆構造が膜の存在とその完全性によって溶出挙動を制御するのに対し、担持構造では、連続膜を形成しない場合であっても、ロジンによって結着されたパルプ繊維ネットワークが水の浸透および尿素の溶解・拡散を段階的に制限することで、緩効的な溶出挙動が発現すると仮定される。

1.7 本実証事業の目的

以上の背景および検討経緯を踏まえ、本実証事業の目的は、ロジンおよびパルプ繊維を用いた担持構造型肥料を設計・製造し、その溶出挙動および環境適合性を、従来の被覆肥料とは異なる構造概念に基づいて体系的に評価することにある。具体的には、溶剤を使用しない混練・乾燥プロセスにより形成される担持構造が、完全な被膜を形成しない条件下においても緩効性を発現し得るかを、実際の施肥による水稲の育成試験において検証するとともに、その効果を構造的観点だけでなく、肥効による水稲の生育性の観点から明らかにすることである。

また、本実証事業では、担持構造が製造プロセスの簡素化や安全性向上に資する可能性を有する点に着目し、従来の被覆工程とは異なる製法について検討する。これにより、被覆材の単素材置換にとどまらず、構造および製造プロセスの両面から、農業資材における環境負荷低減と機能性の両立に資する新たな設計指針を提示することを目指す。

そして、なにより従来の化石資源由来素材の被覆による肥料では果たされなかった海洋分解性付与による環境対応を果たすこと、特に海洋分解性については、簡易的な方法でその可能性を検証し、さらに本質的な海洋生分解性について見通しをつけることである。

2. 本実証事業について

2.1 本実証事業の目標

本実証事業は、水稲栽培において広く利用されている化石資源由来樹脂被覆肥料を対象に、その被覆材について海洋分解性を有する木質系材料へと代替することにより、農業生産性を維持・確保しつつ、農地・河川・海洋におけるマイクロプラスチック汚染の低減に資する新たな肥料設計概念を実証することを目的とする。

本実証事業の目標は、第一に、溶剤を使用しない混練・成形プロセスにより、実用的な担持構造型肥料を製造可能であること、第二に、実際の水田条件下において、従来のポリプロピレン被覆肥料と同等の水稲生育および収量を確保できることを実証することである。第三に、肥料成分溶出後に残存する材料が、河川を通じて海洋流出した場合においても、海洋環境下で生分解される可能性を有することを示すことである。

これらを通じて、本実証事業は、従来の「被覆肥料の脱プラスチック化」という枠組みだけでなく、従来の肥料設計における構造概念を転換した新たな可能性を提示し、概念的なことにとどまらず、水田での水稲の生育性、事業化について見通しをつけることを最終的な目標とする。

2.2 本実証事業の体制

本実証事業は、材料設計、肥料製造、農業実証、環境評価を同時並行で進める必要があることから、単独主体による実証事業ではなく、複数機関が役割分担する共同実施体制とする。

事業全体の統括および基本設計を担うのは王子マテリア株式会社であり、木質系材料の活用設計、担持構造という新たな肥料概念の構築、ならびに環境省事業としての全体管理を担当する。王子マテリアは、製紙・木質資源利用分野で蓄積してきた繊維分散・混練・成形技術を、本実証事業における基盤技術として提供する。

木質系樹脂材料に関しては、ロジン製造および樹脂化技術に知見を有する化学メーカーであるハリマ化成株式会社が参画し、ロジンの物性制御、配合設計、分解挙動評価

に関する技術検討を行う。これにより、肥料用途としての性能、海洋分解性と事業化への道筋を具体化する体制を構築する。

肥料の製造工程については、二軸混練機を用いた混練・ペレット化試験を外部試験機関である株式会社 DJK と連携して実施し、ラボスケールに留まらない製造成立性の検証を行う。

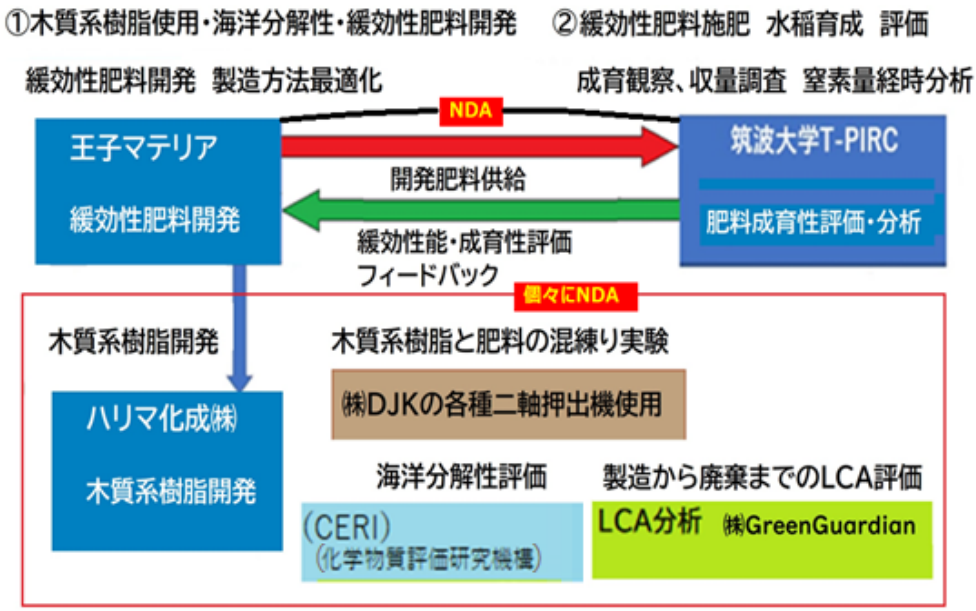


図 2-1　実証事業の体制

農業実証については、筑波大学の T-PERC の農場等の実圃場を活用し、水稲栽培における施肥試験を実施する。ここでは、従来の被覆肥料との比較に基づき、生育状況、収量、施肥作業性といった農業的指標を総合的に評価する。

さらに、環境影響評価については、LCA 算出の専門機関である株式会社 Green Guardian と連携し、従来の PP 被覆肥料と本実証事業で開発する肥料とのライフ　サイクル全体での環境負荷を定量的に比較する体制を整備する。

このように、本実証事業は、材料科学、農学、環境評価を横断的に結びつけた分野融合型の実施体制を特徴とする。

2.3 本実証事業の参加大学と企業

本実証企業に参加する大学および参加企業について以下に示す。

（1）王子マテリア株式会社

王子マテリア株式会社は、王子ホールディングス株式会社を中核とする王子グループの一員として、段ボール原紙、白板紙、特殊板紙、包装用紙などの紙系包装素材を中心に供給する素材メーカーであり、同グループが長年掲げてきた「森を育て、森を活かす」という理念のもと、森林資源を再生可能な自然資本として捉え、その持続的管理と高度利用を通じて環境・社会・経済の調和を図る事業活動を展開している[1)2)]。

王子グループにおける森林経営は、原材料調達の枠を超え、二酸化炭素の吸収・固定、生物多様性保全、水源涵養といった森林の多面的機能を重視した計画的かつ科学的な管理を基盤としており、紙素材の安定供給と環境負荷低減を両立する循環型バイオマス産業の実践例として位置づけられる[1)]。その中で王子マテリアは、こうした持続可能な森林資源を背景とする紙素材を社会に供給する役割を担い、包装素材という社会インフラを通じて、人と人、人と社会、そして人と自然環境をつなぐ上流素材企業として機能している[2)]。

農業分野においては、段ボール包装が青果物や農産加工品の輸送・流通における標準的資材として不可欠な存在であり、軽量性、強度、通気性、リサイクル性といった特性が農業物流インフラの要件を満たしてきたが、王子マテリアは段ボール原紙の供給を通じて、農業向け包装の品質安定性と環境適合性を支える素材基盤を提供している[2)]。

また、米、麦、飼料、肥料などを対象とする農業資材分野では、クラフト紙を用いた重包装紙袋が長年使用されており、内容物重量や充填・輸送条件に耐える機械特性と加工適性が要求されるが、王子マテリアは未晒クラフト紙をはじめとする包装用原紙を供給することで、農業用紙袋産業の上流を担ってきた[2)]。さらに、王子グループには従来から肥料を取り扱う事業会社が存在し、農業資材としての肥料の製造・流通に関与してきた経緯があり、王子マテリアはそうしたグループ内事業との連携を通じて、肥料用途に適した包装資材用紙の供給を継続的に行っている[3)]。このため同社は、単に

紙素材を供給する立場にとどまらず、肥料という農業資材の特性–粉体・粒状体の物性、吸湿性、充填・保管条件、流通形態–を踏まえた包装要求に関する実務的知見を蓄積してきた企業と位置づけることができる。

すなわち王子マテリアは、肥料製品そのものを製造する主体ではないものの、肥料を扱うグループ事業と肥料包装用紙の供給実績を背景として、肥料製造・流通プロセスに付随する包装・材料要件について一定の理解と経験を有しており、農業分野における段ボールおよび紙袋包装を、森林資源を起点とする循環型素材の観点から下支えしているということが示される[2)3)]。

以上の点から、王子マテリア株式会社は、農業および肥料分野における紙系包装資材産業において、完成品メーカーではなく、持続可能な森林資源を基盤とする素材供給と産業横断的知見の蓄積を通じて、農業物流と環境配慮型包装の基盤を形成する上流材料企業として位置づけることが出来る[1)2)]。

図 2-2　王子マテリアの原紙を使用した製品

（２）国立大学法人筑波大学、T-PIRC

筑波大学つくば機能植物イノベーション研究センター（Tsukuba-Plant Innovation Research Center, T-PIRC）は、産官学研究機関が集積するつくば地域の立地特性を活かし、植物科学および農業生産技術に関する基礎研究から社会実装に至るまでを一体的に推進することを目的として設置された研究拠点である[4)]。

T-PIRC は、高機能・高付加価値を有する次世代植物の創出と、それらを持続可能に生産・利用するための次世代農業技術の開発を主要なミッションとして掲げ、遺伝子レベルの基礎研究、作物生産・栽培技術の実証、さらには産業界との共同研究やスタートアップ創出を含むインキュベーション機能を備えた、学際的かつ実装志向の研究体制を構築している。同センターは、遺伝子研究部門、次世代農業研究部門、遺伝資源・国際共同研究部門、産官学・共同研究部門など複数の部門で構成されており、植物の形質設計、農業生産システム、流通・社会実装までを連続的に捉える研究枠組みを特徴とする。この体制により、基礎的な植物機能解析と、実際の農業現場での検証・評価を往復させる研究が可能となっており、学術的知見の蓄積と実用技術への展開を同時に進める点に T-PIRC の大きな特徴がある[4)]。

T-PIRC の研究活動の重要な基盤となっているのが、センターが管理・運営する実験農場（T-PIRC 農場）である。この農場は、大学附属施設としては比較的広い耕作地を有し、畑作圃場および水田圃場の双方を備えている。畑作圃場では、複数作物の輪作体系や施肥条件の異なる試験区を設定した長期的な栽培試験が行われており、作物生産、土壌管理、施肥技術に関する体系的なデータの蓄積が進められている[6)]。一方、水田圃場では、水稲を対象とした栽培試験が継続的に実施され、長期施肥試験や水管理条件の異なる区画設定などを通じて、水稲生産における収量、品質、環境影響の評価が行われてきた。

特に水田を利用した研究では、施肥条件の違いが水稲の生育や収量に与える影響を長期にわたり検証する試験や、炭素材の施用による土壌炭素貯留および温室効果ガス排出への影響評価など、持続可能な水稲生産と環境保全を両立させるための研究が実施されている。これらの研究は、単年度試験にとどまらず、複数年にわたる実証を通じて知見を蓄積する点に特徴があり、水田農業の実態を踏まえた科学的評価を可能としている。また近年では、ドローンを用いた直播技術や水位モニタリング技術の導入な

ど、水田における省力化・高度化を目指した新たな栽培技術の実証も行われており、現場適用を意識した研究開発が進められている。

このようにT-PIRCは、植物の機能解明から農業生産技術の社会実装までを連続的に扱う研究拠点であると同時に、広い耕作地を有する実験農場を基盤として、実際の農業条件下での検証を重視する点に特徴を持つ。とりわけ水田圃場を活用した水稲栽培に関しては、施肥、水管理、環境影響評価といった要素を含む包括的な研究が長期にわたり実施されており、水稲生産システムに対する実証的かつ蓄積的な知見を有する研究拠点として位置づけることができる[6)]。

図 2-3　T-PIRC の農場・田圃と研究イメージ図

（3）ハリマ化成株式会社

ハリマ化成株式会社は、松から得られるロジン（松脂）、脂肪酸、テレピン油といった「パインケミカル」を基盤とする化学素材メーカーとして、1947 年の創業以来、木質由来資源の高度利用を中核に事業を展開してきた企業である[7)8)]。ロジンは、松に特有の樹脂成分を主成分とする天然由来物質であり、樹脂酸を主体とする化学構造を持つことから、製紙用薬品、接着剤、塗料、印刷インキ、ゴム、電子材料など、幅広い産業分野において機能性材料の基盤原料として利用されている。ハリマ化成は、このロジンを中心としたパインケミカル分野において、原料調達から精製、誘導体化、最終用途に適した機能材料への展開までを一貫して手がける数少ない企業の一つであり、天然資源と化学技術を融合させた材料供給を通じて、長年にわたり国内外の産業を支えてきた[7)8)]。

ロジンは、その取得方法によりガムロジン、ウッドロジン、トール油ロジンに大別されるが、ハリマ化成はこれら複数のロジンを用途特性に応じて使い分ける技術的基盤を有している点に特徴がある。なかでもトール油ロジンは、製紙用クラフトパルプ製造工程において副生する粗トール油を原料とするロジンであり、製紙産業と化学産業を結節するバイオマス由来原料として位置づけられる。クラフトパルプ製造時には、木材中の樹脂酸や脂肪酸が黒液中に石けんとして移行し、この黒液を酸処理・精留することで粗トール油が得られるが、ハリマ化成はこの粗トール油を蒸留・分離することにより、トール油ロジンおよびトール油脂肪酸を工業的に製造している[8)]。

特筆すべき点として、ハリマ化成は、日本国内において唯一、製紙会社のパルプ製造工程で発生する黒液由来の粗トール油を原料としたトール油ロジンの商業生産を行う精留プラントを保有している[9)]。このプラントは兵庫県加古川市に立地し、クラフトパルプ製造という既存産業プロセスの副生成物を高度に分離・精製することで、ロジンという高付加価値化学素材へと転換する役割を担っている。すなわち、ハリマ化成のトール油ロジン製造は、単なる天然物精製にとどまらず、製紙工程に内在する未利用資源を回収・再資源化するバイオリファイナリー的取り組みとして位置づけることができ、国内他社とは異なる独自性を有している。

このようにして得られたトール油ロジンは、製紙用サイズ剤、接着剤用粘着付与樹脂、塗料・インキ用樹脂、合成ゴム用乳化剤などへと展開され、紙、包装、建築、輸送、

電子機器といった多様な分野において機能を発揮している。ロジンは石油由来原料とは異なり、森林資源の適切な管理と再生を前提とした再生可能資源であるため、ハリマ化成の事業は、化石資源依存からの転換や環境負荷低減を志向する現代の材料産業において重要な位置を占めている。とりわけ、製紙産業と連動したトール油ロジンの供給体制は、紙・パルプ産業における循環型資源利用を下支えする要素技術として評価されている。

以上の点から、ハリマ化成株式会社は、ロジンを中核とするパインケミカル分野において、森林資源に由来する副生成物を高度に利用し、製紙工程の黒液からトール油ロジンを製造するという国内でも特異な技術基盤を有する企業であると位置づけられる。その産業的役割は、単なる化学素材供給にとどまらず、製紙産業と化学産業を結びつける循環型バイオマス材料の実装主体として、持続可能な素材利用と産業横断的な価値創出を担う点に特徴がある[9)]。

図 2-4　ハリマ化成トール油ロジンプラント

（４）株式会社 DJK

株式会社 DJK は、高分子材料および複合材料を対象とした研究開発支援を専門とする企業であり、材料合成、混練・成形、物性評価、分析、少量試作までを一体的に担う受託研究機関として、企業・大学・公的研究機関の材料開発を支えてきた[10)]。

DJK の特徴は、特定の製品や材料を自社で量産・販売する立場ではなく、材料開発プロセスそのものを高度化・加速するための「研究基盤」を提供する点にあり、材料メーカー、化学メーカー、成形加工メーカーなど多様な主体と連携しながら、研究段階から実装前評価に至るまでの技術的支援を行っている。

同社の研究支援の中核を成す技術の一つが、同方向回転型を中心とした二軸混練（混錬）・押出プロセスである[11)]。二軸混練は、ポリマー、添加剤、フィラー、繊維などを高精度に分散・分配混合できる連続プロセスとして、現代の高分子材料開発において不可欠な技術であり、DJK は試験・研究用途に最適化された小型～中型の二軸混練押出機を複数保有することで、少量材料からの条件検討や反応押出、スケールアップ検討を可能としている。

DJK における二軸混練研究支援は、単なる装置貸与や試作代行にとどまらず、材料特性や研究目的に応じたスクリュ構成設計、添加位置の最適化、混練条件（温度、回転数、滞留時間、脱気条件など）の体系的検討を含む点に特徴がある。これにより、ポリマーアロイ、フィラー高充填コンパウンド、繊維強化材料、機能性添加剤系材料、さらにはリアクティブプロセッシングを伴う反応混練まで、多様な研究テーマに対応した共同研究的アプローチが可能となっている[11)12)]。

また、DJK は二軸混練を材料開発の「前工程」として位置づけるだけでなく、その後段に位置する成形性評価、物性測定、耐久性評価、規格試験までをワンストップで提供できる体制を構築している。このため、企業や研究機関は、材料設計から試作、評価、改良までを一貫して進めることが可能となり、DJK はその過程において、知見の蓄積とフィードバックを通じて技術的ハブとして機能している。

近年では、DJK は従来型の二軸押出機に加え、繊維長保持や高充填系材料に適した新たな混練技術の検証にも取り組んでおり、二軸混練技術そのものの高度化に関する評価・研究も行っている。こうした活動は、装置メーカーや材料メーカーとの共同検証と

いう形で進められており、DJK が二軸混練技術に関する中立的な評価・研究プラットフォームとして機能していることを示している[10)]。

以上のように株式会社 DJK は、二軸混練（混錬）機を核とする高分子加工プロセスに関して、装置・材料・評価を横断した知見を有し、特定の材料や製品に依存しない立場から、多様な企業・研究機関と共同研究を行う研究支援主体として位置づけられる。その役割は、材料開発における試行錯誤の場を実験室スケールから工業スケールへと橋渡しすることにあり、二軸混練を通じて新材料の実現可能性を検証・可視化する技術基盤を提供する点に特徴がある[10)12)]。

図 2-5　DJK の二軸混錬機

（５）株式会社 Green Guardian

株式会社 Green Guardian は、LCA（ライフサイクルアセスメント）を中核とする環境評価・可視化を専門としたコンサルティング企業であり、製品・技術・事業活動に伴う環境負荷を科学的根拠に基づいて定量化し、その結果を意思決定や社会実装へと結びつける支援を行っている。2018 年に設立されて以降、Green Guardian は、企業や自治体を対象として、製品 LCA、サプライチェーン全体を対象とする排出量評価(Scope3 算定)、ウォーターフットプリントや生物多様性影響評価など、多様な環境指標の算定と活用を手がけてきた。

同社の特徴は、LCA を単なる数値算定業務として扱うのではなく、研究的厳密性と実務的有用性の両立を重視している点にある。代表をはじめとするメンバーは、LCA の基礎研究や論文執筆に携わってきた専門家で構成されており、国際規格（ISO）に準拠した算定手法や最新の研究動向を踏まえつつ、個別製品や技術の特性に即した評価設計を行う体制を有している。このため、Green Guardian は、研究開発段階にある新材料や新技術に対しても、前提条件やシナリオ設定を含めた柔軟な LCA 設計を行い、開発初期から環境性能を検討するための分析基盤を提供している[13)14)]。

また、Green Guardian は、分析結果の「見える化」と活用に重点を置いており、算定後のデータを、研究報告書、対外説明資料、第三者認証用文書、学会・論文発表資料などへと展開する支援を行っている。分析して終わりではなく、その結果を製品改良や事業戦略、マーケティング、政策対応へと接続する伴走型の支援を特徴としており、企業の脱炭素経営やサステナビリティ戦略の実装を後押しする役割を担っている。

このような立ち位置から、Green Guardian は、材料メーカー、化学メーカー、研究機関などと連携し、新素材・新プロセスの環境優位性を定量的に評価する役割を果たしている。特に、バイオマス由来材料や循環型材料といった、従来材料との比較評価が不可欠な分野において、機能・性能評価とは独立した中立的な視点から LCA を設計・実施することで、技術の社会的妥当性や環境的価値を可視化する役割を担っている。こうした活動は、研究段階の成果を社会実装へと橋渡しする上で不可欠な評価基盤として位置づけられる。

以上のように株式会社 Green Guardian は、LCA を軸とした環境影響評価とその活用を専門とする研究・実装支援主体であり、材料開発やプロセス開発を直接担う企業や

研究機関とは異なる立場から、科学的評価に基づいて技術の環境価値を定量化・可視化する役割を果たしている。その位置づけは、王子マテリアやハリマ化成が担う素材供給、T-PIRC が担う実証研究、DJK が担う加工・試作支援を横断的につなぎ、技術開発の成果を環境・社会的価値として社会に提示する評価基盤を提供する点に特徴がある。

2.4 本実証事業の目標達成のための課題

本実証事業の遂行にあたっては、従来の被覆肥料開発とは異なる性質の課題が複数存在する。

第一の課題は、生分解性評価での不確実性である。生分解性や海洋分解性は評価条件に強く依存する概念であり、短期間の簡易試験結果のみから最終的な環境適合性を断定することはできない。しかし、本実証事業では、まず簡易的な評価により方向性を示し、将来的に標準試験法による評価へと接続する段階的アプローチを採用する。当然ながら、その解釈整理は重要な課題となる。

第二の課題は、緩効性機能の評価軸に関するものである。これらは実際の筑波大学の田圃での生育性をもって第一評価とする。これは、従来の被覆肥料では連続被膜の存在を前提として溶出挙動が設計・評価されてきたのに対し、本実証事業で採用する担持構造の肥料では、水の浸透および尿素溶解が繊維・樹脂ネットワークを介して徐々に果たされ、肥料中の尿素が溶出する概念に基づく。そのため、溶出曲線のみをもって機能の有無を単純に判断することは適切ではなく、実圃場での生育結果と結びつけた総合評価が不可欠となる。

第三の課題は、農業資材としての安全性および社会受容性である。ロジンは天然由来材料である一方、その成分組成や分解生成物については、農業用途として十分な説明責任が求められる。水田環境中での挙動、作物への影響、下流環境への移行可能性について、過不足のない情報整理が必要である。これらについて調査と筑波大学での評価をもとに道筋をつける。

第四の課題は、事業化を見据えた製造プロセスの成立である。溶剤使用を前提としない混練プロセスで、安定した品質の肥料を量産可能か、既存設備との親和性をどこまで確保できるかは、事業化判断に直結する要素である。このため実機と同等の二軸

混錬の設備を使用して問題点の抽出を行いながら新たな価値観に基づく肥料製造を進めていく。

本実証事業では、これらの課題に対し、単年度で結論を出すのではなく、技術的な不確実性を明示した上で、段階的に検証を積み重ねる方針を採る。

2.5 本実証事業の事業化時期と戦略

本実証事業は、直ちに市販製品の創出を目的とするものではなく、将来的な事業化を見据えた概念実証段階として位置づけられるが、事業化を想定したプロセスを下記の①～④について構築していく。

① 環境省事業期間中における技術実証と課題整理
② 肥料メーカー等との共同検討による製品仕様の具体化
③ 特定用途・地域に限定した試験導入
④ 規格・制度整備と連動した本格展開

という段階的展開である。

特に重要なのは、既存の被覆肥料市場を一挙に置き換えるのではなく、環境対応の必要性が高い用途・地域から段階的に導入する戦略である。これにより、技術的リスクと事業リスクを同時に低減する。

また、本実証事業で得られる知見は、従来の肥料分野と異なるものもあるため、実際の肥料メーカーとの連携を図り、現実的な取り組みを環境配慮型製品として進めていく。

以上より、本実証事業は、短期的な製品化を目的とするものではなく、中長期的な農業資材設計の転換点を提示する戦略的実証事業として位置づけられるが、水稲の生育性、収量が現行肥料と遜色ないものとなる様、検討しながら市場展開を見据え速やかな事業化、遅くとも 2030 年より前に市場展開が出来るよう進めていく。

3. 本実証事業の予備検討

本検討は、従来の「尿素粒子表面を連続膜で被覆する」という設計思想から転換し、尿素を三次元構造体内部に保持する「担持型」構造に着目して、木材由来の木質系樹脂であるロジンを結着相、解繊パルプを骨格相として用い、尿素をマトリクス内部に分散・担持させることで、溶出挙動の制御と環境中での崩壊・分解性の両立を図ることに至ったが、これらの考え方を構成する木質系樹脂のロジンと乾式粉砕パルプの特徴を整理し、これらを配合した肥料製造の予備検討結果について述べる。

3.1 既存の緩効性肥料と肥料に求められる性能

既存のプラスチック被覆型緩効性肥料は被覆材として、主にポリプロピレン（PP）などのオレフィン系の熱可塑性樹脂が使用されている。被覆型緩効性窒素肥料は、内部の尿素等の肥料成分をゆっくりと染み出させることで、肥料効果を緩効的に持続させることが特徴である。図 3-1 に肥料の構造を示す。

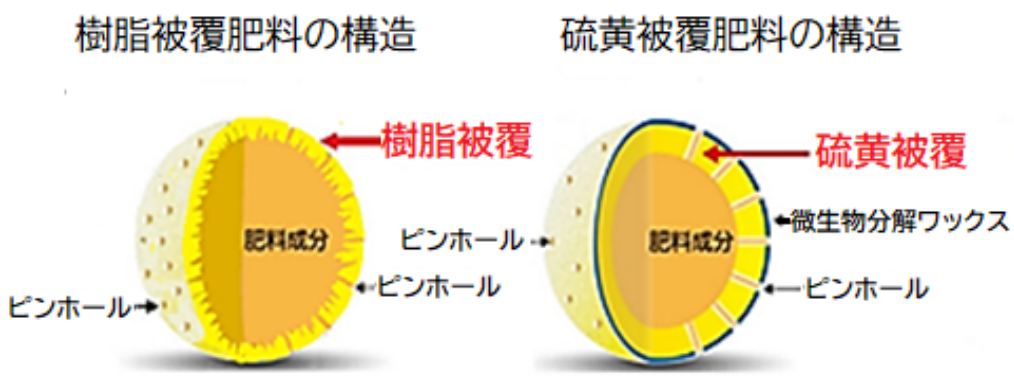


図 3-1

図 3-1 樹脂および硫黄被覆肥料
（サンアグロ社資料より引用）

プラスチック被覆型緩効性肥料は 1 回の施肥で長期間肥料の効果を持続させることができるので、追肥の手間を省くメリットがある。一方で、肥料成分が溶出したあとの被覆殻は、生分解されにくく、収穫後も田圃に残り、次作や周辺環境に影響を及ぼす

可能性がある。さらに、海洋へ流出した際には、海洋マイクロプラスチックとして、海洋汚染につながる懸念がある。

以上を踏まえ、本実証事業で検討する既存のプラスチック被覆材の代替となる、肥料に求められる性能を下記に示す。

・適度な耐水性　：水溶性の肥料成分の溶出を緩効的に持続させるためには、適度な耐水性が必要である。オレフィン系の熱可塑性樹脂については、非水溶性であるが、ピンホールなどで肥料成分の溶出スピードをコントロールしている。

・海洋生分解性　：海洋に流出した際に、海洋マイクロプラスチックとならないように、自然環境中で速やかに二酸化炭素と水まで生分解性される必要がある。

その他にも、田圃中に残存した場合に、田圃の生態系に悪影響を及ぼさないことが求められる。また、脱炭素型循環型社会の構築という観点からは、従来のプラスチック被覆型緩効性窒素肥料よりも製造や使用上の環境負荷が低いことが好ましい。

これらの観点で化石資源由来素材の肥料被覆材を代替する肥料開発の検討経緯について以下に述べる。

3.2　尿素、木質系樹脂ロジン、乾式粉砕パルプ配合肥料の検討

王子では、2009～2013 年に「植物繊維含有樹脂組成物の製造方法および成形物の粉砕物の製造方法、植物繊維含有樹脂組成物」として、樹脂(ゴム)とパルプ繊維を混練分散した成形物製造を研究した。これは、乾式粉砕パルプを混錬することで樹脂の強度アップを図る検討であるが、この製造方法で肥料製造について検討した。

検討した方法は、パルプシートを乾式粉砕して綿状にして、粉末尿素と木質系樹脂ロジンを混錬したのち加熱乾燥させ、ペレタイザーでペレット化するものである。

これにより作製した肥料ペレットは下図 3-3 のような構造となった。

概念的には土壁や馬糞でイメージされるように尿素を木質系樹脂ロジンでパルプに担持、構造体化させた形である。

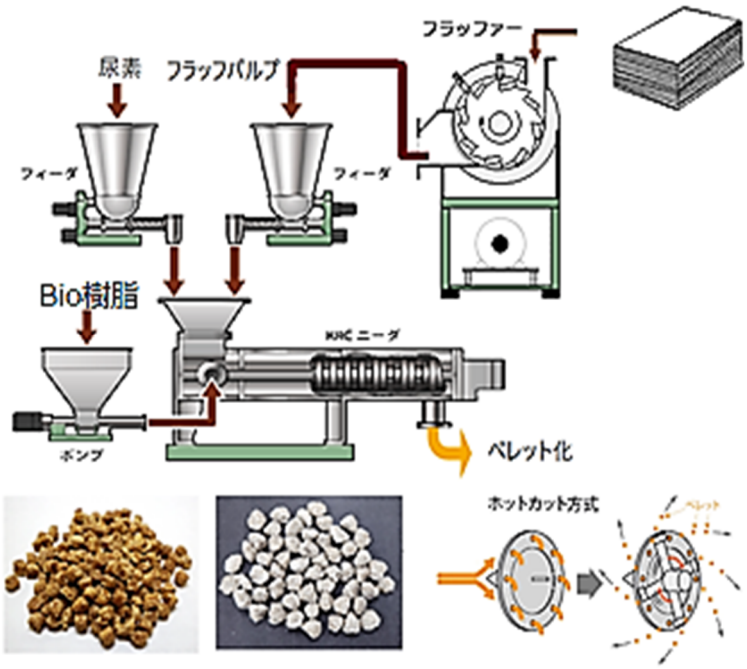


図 3-2　乾式粉砕パルプと樹脂混錬方法

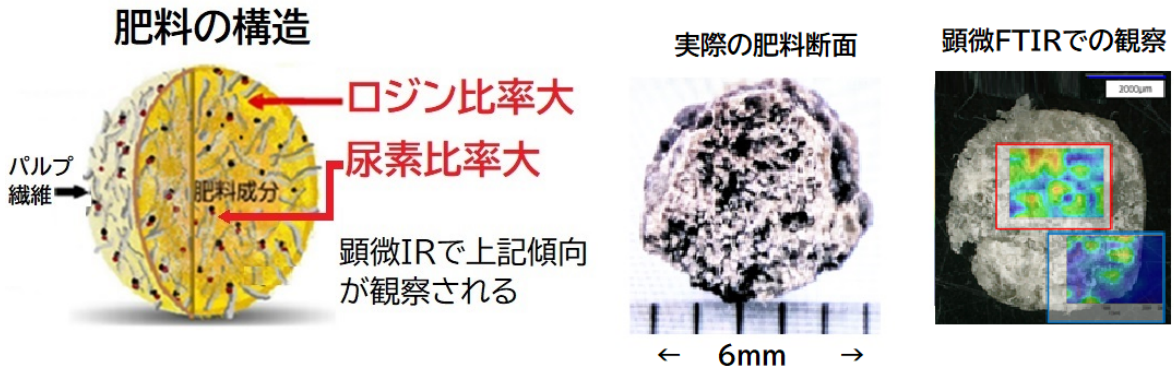


図 3-3　作製した肥料の構造

顕微鏡観察+FT-IR 測定にて定性定量分析実施したところ特徴的なピークが見えた尿素のみでマッピングすると内側には尿素量の多い部分が存在し外側の尿素量は少ない傾向がみられた。

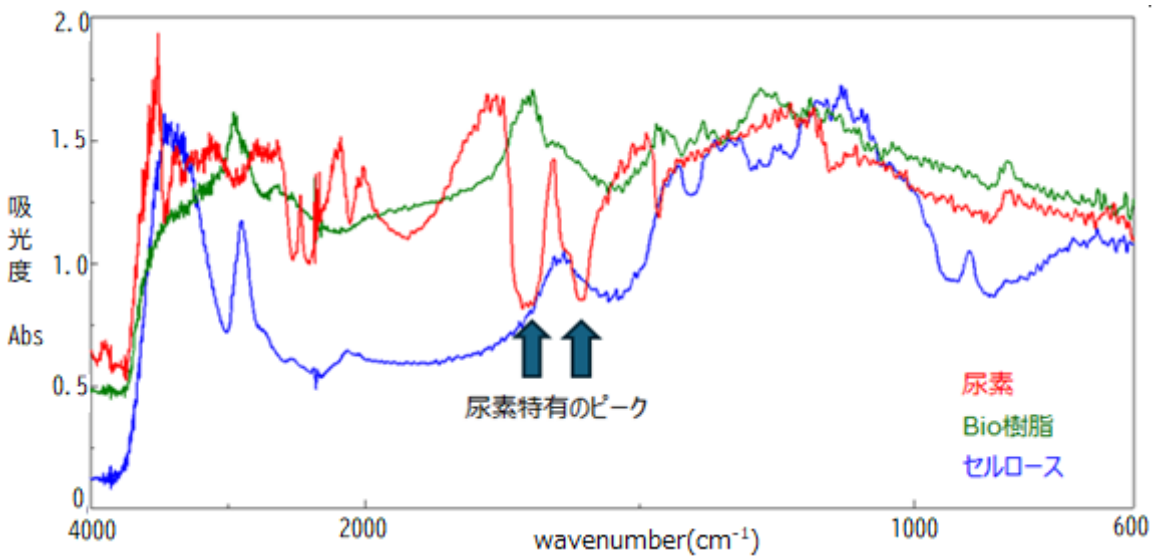


図 3-4　顕微 IR の測定結果

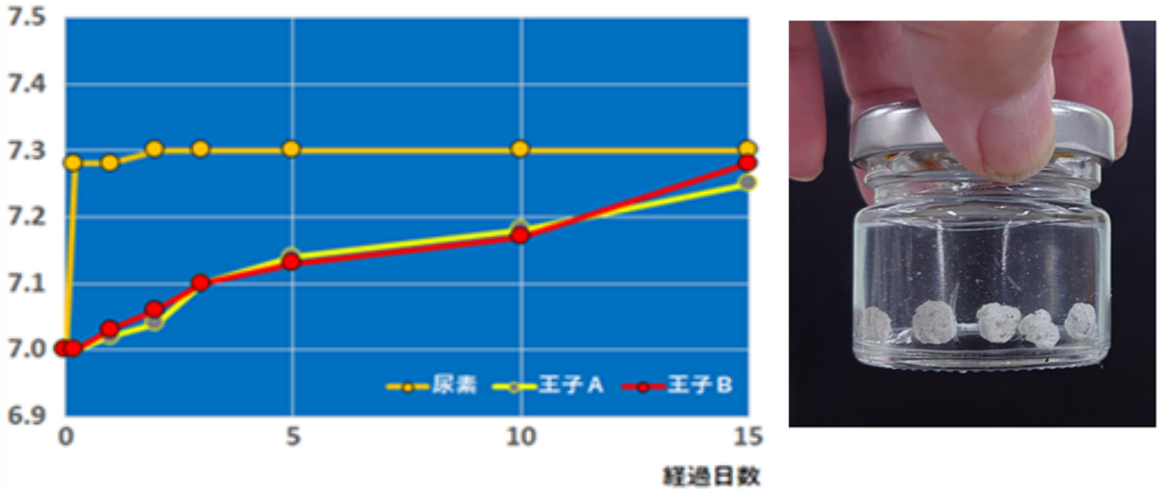


図 3-5　各肥料の蒸留水投入後の pH 変化

この混錬肥料を尿素単独の肥料をそれぞれ蒸留水が入ったガラス瓶中に入れ経過日数での pH 変化を見ると、尿素単独肥料に比較して pH 変化が緩やかで尿素の溶出が徐々になされるという緩効性付与に効果があることがわかった。

3.3 木質系樹脂ロジンについて

上記の肥料被覆材に求められる性能を踏まえ、本実証事業では松から産出されるロジンに着目した。ロジンは、比較的安価かつ多量に供給し得る再生可能な天然資源として、紙、ゴム、塗料、インキ、接着剤などの分野において使用されている。ロジンは、図 3-6 に示すような複数の樹脂酸の混合物であり、その樹脂酸の割合は松の種類、産地、製造方法により異なる。

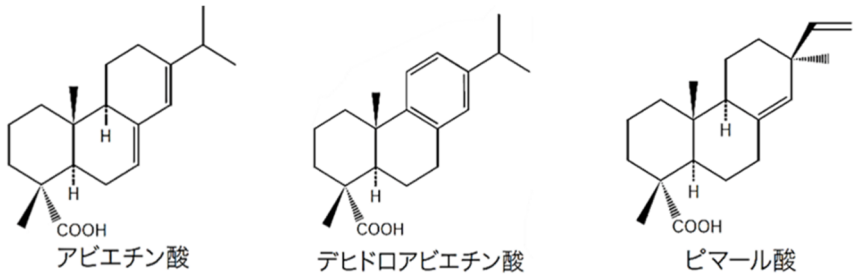


図 3-6　代表的なロジン成分（樹脂酸の構造）

ロジンを構成する樹脂酸は親水性のカルボキシル基と大きな疎水性基を有している。この構造により、ロジンは紙の分野において、親水性の紙に耐水性を付与するサイズ剤として利用されている。また、ロジンはアルカリ条件下でカルボキシル基が塩になることで水に溶解するという特徴も持つ。

表 3-1 にロジンおよびロジン塩の水への溶解度を示す。

表 3-1　ロジンの水への溶解性

	水への溶解度(0.9mg/L)
ロジン	0.9 mg/L
ロジン－カリウム塩	水溶性
ロジン-ナトリウム塩	水溶性

（ECHA CHEM Registration Dossier - ECHA より数値抜粋）

表 3-1 のデータより、ロジンは水に溶解しにくく、肥料被覆材に求められる耐水性を有すると考えられる。一方で、弱アルカリ性でナトリウムイオンを豊富に含む海水中においては、カルボン酸が部分的に解離し、ナトリウム塩になり得ると推察される。

また、ロジンが田圃の生態系に及ぼす影響については、表 3-2 に示す米国環境保護庁（EPA）のデータより有害でないと考える。これは、本実証事業で想定する肥料（尿素/ロジン/パルプ=80/20/10）を水深 5cm の田圃 10a に窒素量換算で 10 kg/10a 撒く場合に、ロジン濃度は 100 mg/L となる推定に基づいた。これらについての実証は次年度検討する。

表 3-2　ロジンの水生環境への無影響負荷率

	甲殻類 48hr.NOEL	藻類 72hr.NOEL	魚類 96hr.NOEL
ロジン量	750 mg/L	1000 mg/L	1000 mg/L

（米国環境保護庁（EPA）のデータより数値抜粋）

3.4　使用ロジンの選定

ロジンは、その製法によって主にトール油ロジン、ガムロジン、ウッドロジンの 3 種類に分類される。トール油ロジンは、松材からクラフトパルプ法でパルプを製造する工程で副生する粗トール油を、精密蒸留（精留）することで得られるロジンである。世界のロジン生産量のうち約 30%を占めており、精留工程を経るため、組成比が安定しているという特徴を持つ。樹脂酸組成比については、デヒドロアビエチン酸が多いという特徴を持つ。ガムロジンは、松の幹に切り傷をつけ、そこから流れ出る生松脂をろ過精製し、水蒸気蒸留によりテレピン油を除去することで得られるロジンである。世界のロジン生産量のうち約 70%を占め、最も生産量が多いが、産地や樹種によって組成が異なる。ウッドロジンは松の切り株のチップから溶剤抽出して得られるロジンである。現在では、世界のロジン生産量のうち約 1%にしかすぎず、徐々に衰退している。以上より、生産量が多く、入手しやすいトール油ロジンとガムロジンから、本実証事業で使用するロジンを選定することとした。

図 3-17 にハリマ化成株式会社が保有するトール油ロジンとガムロジンの OECD 301F による生分解性評価結果を示す。ともに 28 日間で生分解度が 60%以上であり、良分解性であることを確認した。また、トール油ロジンの方がガムロジンよりもわずかに生分解されやすいことが分かった。

以上の知見より、本実証事業においては①パルプ製造工程から得られる副生物であることから環境負荷が低いと考えられる点、②組成比が安定している点、③生分解性が高い点からトール油ロジンを使用することとした。

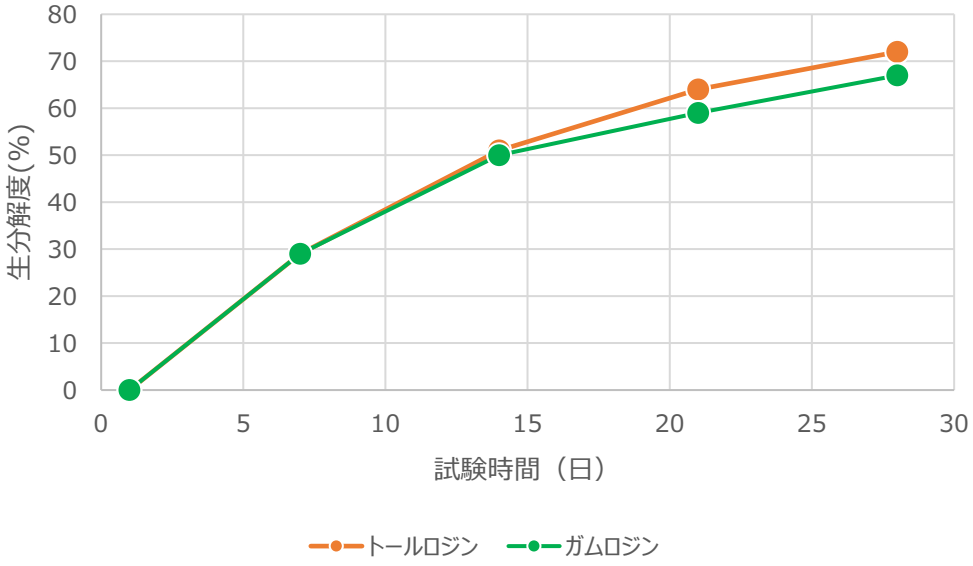


図 3-7　トール油ロジンとガムロジンの生分解性（OECD301F）

3.5　乾式粉砕パルプについて

乾式粉砕パルプ(図 3-8)は、水を用いずに機械的衝撃によりパルプ繊維間結合を解き、綿状の嵩高構造を有する繊維材料である。湿式解繊に比べて脱水乾燥工程を要さず、繊維間結合が弱いため、樹脂や他成分との混練時に三次元骨格相として機能しやすい。本実証事業では、この特性に着目し、尿素および木質系樹脂であるロジンを担持する構造材として乾式粉砕パルプを用いた。

尿素を三次元マトリクス内部に担持させる担持型肥料構造を成立させる上で、マトリクス骨格を形成する材料として乾式粉砕パルプを採用することには、材料科学的・プロセス工学的に次のような明確な必然性が存在する。それは、乾式粉砕パルプが水を用いずに機械的衝撃やせん断力によってパルプ繊維間結合を解き、繊維形状を保持したまま綿状（フラッフ状）に解繊した材料であるため、湿式解繊と異なり、繊維間に

強固な水素結合が形成されにくく、嵩高で三次元的な空隙構造を有することが特徴である。

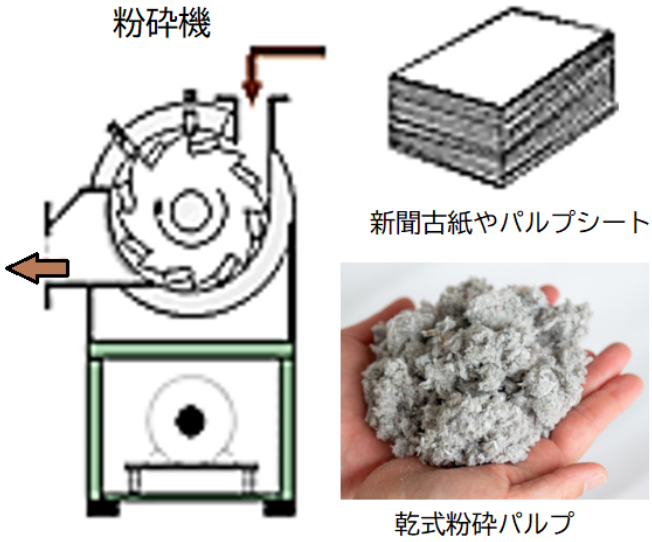


図 3-8　乾式粉砕パルプと粉砕機

さらに木質系樹脂ロジンと尿素と乾式粉砕パルプを混錬する際、湿式パルプを用いると水溶性の尿素が溶出してしまい混錬機内部での混錬効率が低下するからである。

今回検討している担持型肥料では、乾式粉砕パルプを単なるバイオフィラーとしてではなく、尿素および木質系樹脂のロジンを乾式粉砕パルプによって内部に保持する「骨格相」として位置づけている。乾式粉砕パルプの繊維ネットワークは、マトリクス全体にわたり連続した支持構造を形成し、尿素粒子の局在化、樹脂の分散点の空間配置、ならびに崩壊挙動の制御、抑止に寄与する。このような三次元骨格形成能は、繊維が再結合しやすい湿式乾燥パルプでは十分に発現しにくい。

また製造プロセス上も必然性がある。担持型肥料の製造プロセスでは、尿素、木質系樹脂のロジン、パルプ繊維を混練・成形する工程が中核となる。乾式粉砕パルプは初期状態で水分をほとんど含まず、繊維同士が弱く結合した状態にあるため、乾式混練・溶融混練プロセスとの親和性が高い。湿式由来パルプを用いた場合、乾燥工程において繊維間結合が強化され、再分散や混練時に高いエネルギーを要する。一方、乾式粉砕パルプでは、混練時に繊維が容易にほぐれ、ロジン樹脂との界面接触が均一化しやすい。

この特性は、溶剤を用いない連続混練・押し出しプロセスの成立性を高める点で重要である。さらに、機能発現上のメリットとして溶出制御と崩壊挙動の設計の自由度が高いことがあげられる。乾式粉砕パルプを骨格相とする担持型構造では、尿素は連続膜で覆われるのではなく、繊維ネットワークと樹脂結着点によって空間的に拘束される。このため、溶出挙動は「膜厚」ではなく、「拡散経路」「構造崩壊速度」「水の浸入経路」によって支配される。

乾式粉砕パルプの嵩高構造は、水中での初期吸水を許容しつつ、尿素の一括溶出を抑制する効果を持つ。また、環境中では、パルプ繊維が徐々に解繊・分散することで構造が崩壊し、最終的には自然由来の繊維として環境中に拡散する。この崩壊挙動は、被覆殻が固形残渣として残存する従来型被覆肥料と本質的に異なる点である。

また、乾式粉砕パルプは、繊維長・解繊度・嵩密度を調整可能であり、配合比や混練条件と組み合わせることで、溶出速度や沈降挙動の設計自由度を高めることができる。

なお、本実証事業では当初新聞古紙を用いた乾式粉砕古紙を用いて検討した。しかし、肥料の品質の確保等に関する法律（旧肥料取締法）においては、古紙または古紙パルプを肥料原料として使用することを一律に禁止する明文規定は存在しないものの、同法が目的とする肥料の品質保全、公正な取引および安全な施用、さらには農産物を介した国民の健康保護という観点から、肥料に使用される原料については由来の明確性、成分組成の再現性、有害物質混入リスクの管理可能性が強く求められており、古紙は印刷インキ、トナー、接着剤、感熱紙成分、樹脂ラミネート、顔料由来重金属等が回収・流通・使用履歴に依存して混入する可能性を本質的に内包する材料であるため、農林水産大臣が経験的安全性と品質識別性を前提として指定する特殊肥料の範疇には含まれておらず、また普通肥料として登録・流通させる場合には原料管理、成分分析、植害試験、ロット間再現性および表示妥当性について極めて厳格な審査が求められることから、実務運用上は「古紙は肥料に使用できない」と理解される状況が形成されている。一方で、古紙パルプ自体はセルロースを主成分とする炭素系材料であり肥料三要素（窒素・リン酸・カリ）をほとんど含まず、分解しても二酸化炭素と水へと転化するため肥効成分としての機能を有しないこと、さらに分解過程で一時的な窒素飢餓を引

き起こす可能性があることから、肥料制度上も「肥料成分」としてではなく管理困難な副次的構成物として扱われている。

今回検討している担持型尿素肥料においては、古紙由来の乾式解繊パルプを肥効成分としてではなく、尿素という明確な登録肥料成分を三次元的に保持し、溶出挙動および崩壊挙動を構造的に制御するための非肥効・構造材として位置づけており、この設計思想は古紙を「肥料そのもの」と誤認させるものではなく、むしろ肥料成分と製剤構成材を機能的に分離した合理的整理に基づくものである。

このため、現行制度の枠内においても理論的説明が可能であり、将来的には肥料と土壌改良資材または製剤構成材との組合せという形で制度適合性を検討し得る余地を有するものと考えられる。

王子製紙では、新聞製造に使用するパルプ原料として TMP(Thermo-Mechanical-PULP)も用いており、TMP には古紙と異なりインキ等の古紙由来の不特定の成分はないため当初検討に使用していた新聞古紙由来の乾式粉砕パルプは使用せず TMP の乾式粉砕パルプを用いることとした。

4. 本検討肥料の海洋環境中での分解性の検討

4.1 トール油ロジンの海洋環境における溶解性について

OECD 301F の試験結果より(P15、図 3-7)、トール油ロジンは好気水系において良分解性であることがわかった。海洋生分解性の評価については、外部機関の協力が必要であり、時間を要するため、本年度は簡易法による海洋環境における溶解性の評価を試みた。簡易法については、王子タック株式会社が、30 メッシュ(590 μmφ)～60 メッシュ(250 μmφ)のナイロンシートにサンプルシートを入れて経時的に重量の減量を測定する方法を確立している。本実証事業でも、王子タック株式会社の簡易法を参考に、ロジンの海洋溶解性を評価した。

4.2 簡易法による海洋溶解性評価

海洋溶解性評価（簡易法）:

１）試験方法

①疑似海水の調整

撹拌機と温度計を備えた４つ口 1L 容量の丸型セパラブルフラスコ内に 1L のイオン交換水と市販の人工海水 Red Sea Salt　40.3g を加え、20℃で 2 時間撹拌した。Red Sea Salt が完全に溶解したことを確認したのちに、アドバンテック No.1 ろ紙にて吸引ろ過した。また、ろ液は卓上 pH メーター（HORIBA, F-71）にて、pH を測定し、pH が 8.2～8.5 の間であることを確認してから試験に使用した。

②ロジンの溶解性試験

①の疑似海水にトール油ロジン粉末 3g を加え、35℃、200rpm で 10～20 日間撹拌した。撹拌した疑似海水をアドバンテック No.1 ろ紙でろ過し、未溶解ロジンを回収した。

下記式に示す通り、重量差で溶解性を評価した。また、卓上 pH メーターにて、疑似海水ろ液の pH も測定した。

溶解性（%）＝［ロジン粉末添加量(g)-ろ過残渣(g)］/ロジン粉末添加量(g)

２）試験結果

試験結果を表 4-1 に示す。11 日間で７％の溶解を確認したが、頭打ちとなり、試験期間を 20 日に延長しても溶解性の向上は見られなかった。また、疑似海水ろ液 pH は低下しており、ロジン成分のカルボン酸が解離したことで、H+イオンが系内で増加したことが示唆された。pH についても 11 日間でほぼ頭打ちとなり、溶解性の傾向と一致する結果となった。

表 4-1　疑似海水中でのロジンの溶解性

試験期間(日)	溶解性(%)	疑似海水ろ液 pH
0	0	8.44
11	6.78	7.33
20	6.80	7.29

疑似海水を用いた、トール油ロジンの海洋溶解性試験より、トール油ロジンが海水に溶解する可能性が示唆された。しかし、11 日間で頭打ちとなっており、1L の系内においては、ロジンの溶解が飽和状態に達したと考えられる。実際の海洋中では、水もナトリウムイオンも十分量存在しているため、ロジンの溶解性はさらに向上すると推察される。

4.3 海洋生分解性と肥料適用性の整理

本年度は海洋環境中での分解性評価を簡易的な検討で、次年度以降に本格的な生分解性評価へとつなげるための基礎的な知見を得た。特にトール油ロジンの持つ、耐水性、生分解性、海洋溶解性により、緩効性肥料の PP の代替として使用できる可能性が示されてはいるが、実使用に向けてはトール油ロジンの海洋生分解性を明確にする必要がある。P15 の図 3-7 より、好気水系におけるトール油ロジンの生分解性が認められているが、海洋条件における生分解性については、OECD 301F の試験と分解に寄与する植種源が異なるため、別途調査が必要である。海洋生分解性については、海洋環境におけるプラスチック材料の好気性生分解の標準試験方法として確立されている ASTMD-6691 の試験を、さらに実施する予定である。

また、トール油ロジンが田圃環境に及ぼす影響を把握するために、田圃環境中での生分解速度、生分解経路を把握する必要がある。これらについても、田圃環境を模擬した生分解性試験（好気・嫌気）で行い、トール油ロジンの生分解生成物を分析する予定である。

もう一つは、海洋生分解性、水田での分解性に対して、肥料としての緩効性性能との両立である。これらは緩効性肥料の被覆材として用いるために、施肥後一定期間にわたり肥料成分の溶出を制御する機能と、使用後に環境中へ残留しないことの双方が求められる材料である。一般に、緩効性機能の向上を目的としては、ロジンに対するアセチル化等の化学的変性や高分子化による耐水性付与が有効な手段と考えられる。

ハリマ化成株式会社の知見では、これらの改質は材料の化学的安定性を高める方向に作用するため、海洋環境中での分解性や非残留性の観点では必ずしも適合しないとの見解が示されている。このため、ロジン単独での改質によってすべての要求性能を満たそうとする設計には、内在する機能間のトレードオフがある。

そこで本実証事業では、ロジン単体の化学構造を過度に安定化させる方向での変性に依存するのではなく、肥料全体の設計によって各機能を分担させるという考え方に基づき検討を進めることとする。具体的には、緩効性肥料としての基本性能については、ロジンの耐水性向上のみで担保するのではなく、尿素との加熱混錬および乾式粉砕パルプ（セルロース）との複合化による構造設計によって、施肥初期における形状保持性と肥料溶出制御を確保する構成とする。この構成により、水田環境下では尿素の溶解およびセルロースの膨潤を伴いながらも、肥料が急激に崩壊することなく、緩効的な肥効を発現することを目指す。

一方で、使用後に肥料残渣が河川や海洋へ流出した場合を想定すると、ロジンを高度に耐水化・高分子化した被覆材は、固形物として長期間環境中に残留する可能性がある。本検討肥料ではこのことからロジンの化学構造を必要以上に固定化せず、複合材料としての構造が環境条件に応答して変化することを前提とした設計を検討する。すなわち、海洋環境において想定される弱アルカリ性条件、紫外線照射、塩分の存在といった要因の影響を受けることで、ロジン表面の酸化や親水化が進行し、

セルロース成分の分散挙動と相まって、固形の被覆殻として残留することなく、徐々に分散・低分子化していく挙動を示すことを重視する。

以上から、本実証事業におけるロジンの位置付けを整理すると、単体材料としてすべての機能を担わせるものではなく、肥料設計全体の中で役割を分担させる構成となる。緩効性という施肥時の性能については複合構造としての設計によって確保し、生分解性および海洋環境中での非残留性については、使用後に材料が固形物として環境中に長期残存しない挙動を重視するという考え方に基づいて次年度の検討を進めることとする。

ロジンのアセチル化や高分子化による耐水性向上は、緩効性肥料としての溶出制御には有効である一方、海洋環境中での分解性や非残留性を低下させるおそれがある。

ロジン単体の化学的安定性を高める設計は、使用後に被覆材が固形物として環境中に残留するリスクを高める可能性がある。

これらの要求性能を両立させるためには、ロジン単独の変性に依存するのではなく、肥料全体の構造設計によって機能を分担させる考え方が有効である。

表 4-2　肥料設計の考え方得失整理表

設計アプローチ	緩効性（溶出制御）	海洋生分解性・非残留性	評価・位置づけ
ロジン未変性（単体）	△	◎	分解性は高いが緩効性が不足
ロジンのアセチル化等の化学変性	○	△	緩効性は向上するが分解性低下
ロジンの高分子化・耐水化	◎	×	被覆殻として環境残留リスク
ロジン単体改質による最適化	—	—	機能間にトレードオフが内在
ロジン＋セルロース複合設計（本事業）	◎	◎	

5. 本実証事業の肥料製造検討

尿素・乾式粉砕パルプ・ロジンを配合した担持型肥料の二軸混錬機での製造検討

5.1 二軸混錬機での製造検討

従来の緩効性肥料の多くは、尿素粒子表面をポリプロピレン（PP）等の合成樹脂で被覆することにより溶出制御を達成してきたが、施用後に残存する被覆殻が土壌中に長期残存し、微細片化して河川・海洋へ流出することが環境面での大きな課題として認識されている。この問題に対し、被覆という二次元的な制御概念から脱却し、肥料粒子全体を三次元構造体として設計する新たなアプローチを実機の二軸混錬機を用いて検討した。

尿素を連続被膜で覆うのではなく、乾式粉砕（解繊）パルプを骨格相、木質系樹脂のロジンを結着相として尿素を三次元的に担持させる担持型肥料構造について、その製造実現および工程成立性を実機レベルで検証することを本実証事業の目的とした。

5.2 材料設計および製造方法

本実証事業で検討した肥料組成は、主肥効成分である尿素に対し、当初乾式粉砕した古紙由来パルプを繊維状骨格材として配合し、さらに木質由来の木質系樹脂のロジンを結着材として加える三成分系で構成される。乾式解繊パルプは、新聞古紙を原料としてフラッフ化処理したものであり、湿式パルプに比べて繊維間結合が弱く、嵩高な三次元ネットワーク構造を有する点に特徴がある。

製造工程としては、粉末尿素、乾式解繊パルプ、木質系樹脂のロジンを二軸混錬機に投入し、混錬中に加熱を行うことでロジンを軟化・分散させるとともに、当初は粘度調整のために使用した溶剤（IPA：イソプロピルアルコール）を揮散させながら乾燥を進行させた。その後、混錬物を押し出し、ニーダ出口から排出された材料をペレタイザーによって所定粒径の　ペレットに加工するプロセスを採用した。これらは株式会社 DJK 社において行った。

尿素／ロジン比については、80/20、90/10 といった複数条件で試作した。さらに IPA 有無の違いによる混錬挙動および成形性の比較を行った。

二軸混錬機での混錬試験は、「3.本実証事業の予備検討」で行った処方を基本として検討した。予備検討の処方と混錬方法は以下のとおりである。

処方は、まず粉末尿素とロジンを 70/30 の比率である。これらをパン種ミキサーで混合分散し、尿素とロジンの混合品を調整した。次に尿素とロジンの混合物 100 に対して乾式粉砕して綿状にしたパルプを 10%、IPA を 16%添加してさらに混合分散し、挽肉用のミンサーで練りながら挽肉状にして、その後 110℃の乾燥機で加熱乾燥した。最終的に加熱乾燥後、ハンマーで粉砕してペレット化している。

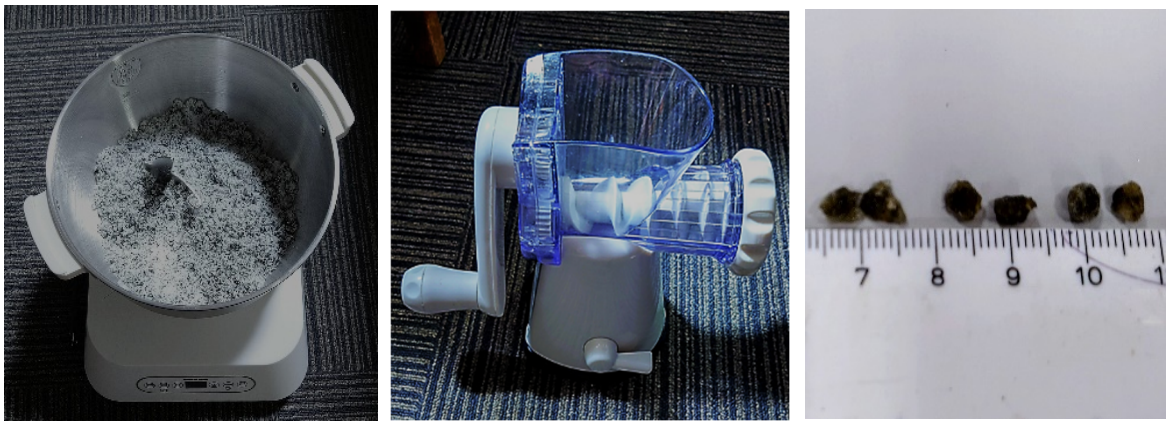


図 5-1　パン種ミキサーと挽肉用のミンサー、乾燥後のペレット

この方法を二軸混錬機での加熱混錬する方法に置き換えて検討した。表 5-1 に二軸混錬での条件検討の結果を示す。予備試験の配合の尿素/ロジン=70/30 の配合に乾式粉砕パルプ(新聞古紙) を 10%、IPA を 16%添加した処方を二軸混錬機 110℃加熱で混錬したものでは、ほぼ同様の混錬性を示した。この混錬状況を○として、混錬品がまとまらず、粉瘤状のままのものを×、これよりは良いが均一性がないもの、液状に近く柔らかすぎてまとまらないものを△評価とした。

表 5-1　二軸混錬での材料設計および条件検討

	① 予備検討配合	② 尿素/ロジン比	③ パルプ増量	④ 溶剤カット	⑤ パルプ増量	⑥ 尿素/ロジン比
尿素 %	70	80	80	80	80	90
ロジン %	30	20	20	20	20	10
乾式粉砕パルプ %	10	5	10	5	10	10
IPA %	16	16	16	0	0	0
温度条件 ℃	110	50	110	110	110	110
混錬性○×評価	○	×	△	◎	△	×△

混錬性の評価結果を次ページ図 5-2 の二軸混錬機の混錬状況として二軸混錬機の出口写真を示す。②のように二軸混錬機の加熱温度が低いと混錬品はまとまらず、粉瘤状のままで×である。加熱温度を上げると、さらに乾式粉砕パルプを増やしても③のように液状に近く柔らかすぎてまとまらず△評価であった。この状態から IPA を添加しないで混錬したものでは、混錬性は良化し均一にまとまり①よりも均一な混錬状況となった。このため、判定を◎表記としている。さらに、乾式粉砕パルプを増やすと⑤のように均一性がやや劣り△判定となった。⑥の尿素/ロジン比率を 80/20 から 90/10 としたものでは、混錬品はまとまりにくくなり△○評価であった。

二軸混錬機による加熱混錬で、尿素とロジンが混錬中にパルプ繊維のネットワーク内へ取り込まれ、④のように全体として固形状の混錬物が形成されることが確認された。IPA を添加しない条件においても、加熱混錬で混錬物は均一化し、連続押し出しが可能であることが示され、溶剤レス製造プロセスへの展開が可能であることが分かった。

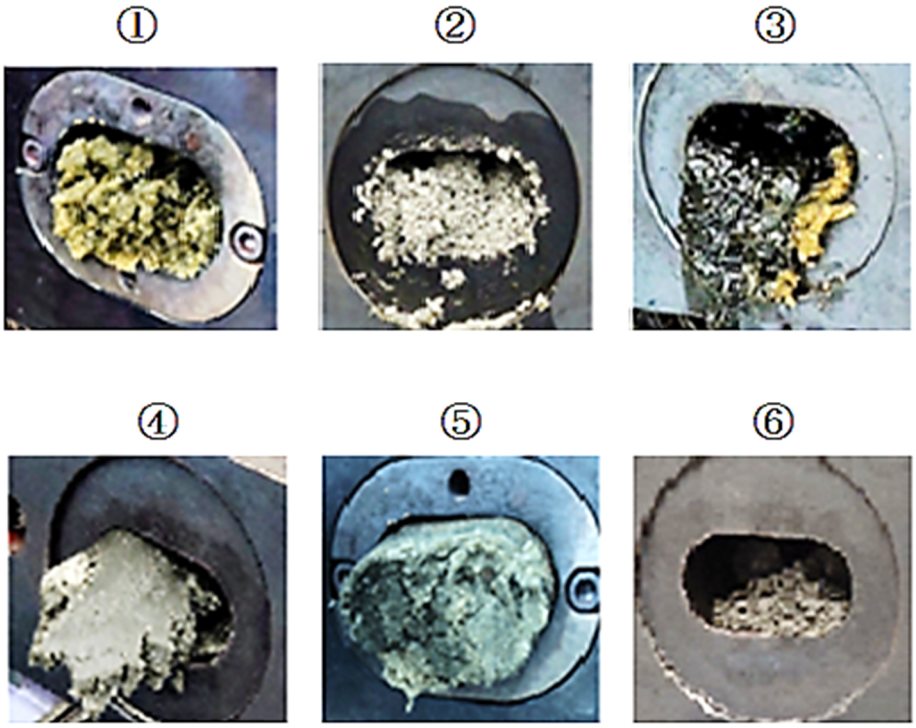


図 5-2　二軸混錬機での混錬状況

次ページ図 5-3 に二軸混錬機での混錬物製造概念図と、実際の二軸混錬機、さらに混錬機出口に 3mmφの三口孔をつけて押し出して、細い棒状のストランドまで製造した状況を示す。

図 5-3　混錬条件による二軸混錬機での混錬状況

5.3 ペレット化の成立と乾式解繊パルプの役割

二軸混錬機を用いた尿素とロジンの配合肥料製造において特筆すべき成果は、乾式粉砕パルプの配合が、ペレット化成立の条件となることが確認された点である。今回の検討で、解繊パルプは混錬時において核剤的に機能し、尿素およびロジンを三次元的に保持する構造を形成することで、押し出し後の材料に形状安定性を付与している。

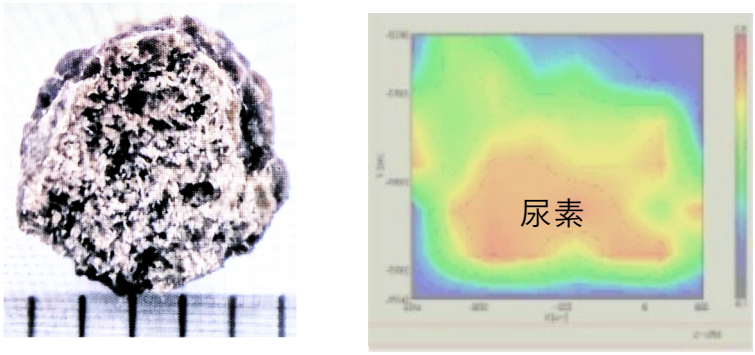
解繊パルプを含まない系では、尿素とロジンのみの混錬物が流動状あるいは脆弱となり、安定したペレット形状を形成することが困難であったのに対し、解繊パルプを配合した系では、ペレタイザーによる粒径制御が可能となり、実用的なペレット化が達成された。この結果は、乾式解繊パルプが単なる副資材ではなく、担持型肥料構造を成立させる中核材料であることを示している。

さらに図 5-3　混錬条件による二軸混錬機での混錬で 3mmφの孔径を持つ孔からの押出しで得られたストランドをペレタイザーでカットしてペレット製造する方法と、15mm×50mm のスリットから押し出して得られた混錬物を冷却後、クラッシャーで粉砕し細粒化させたものでは、いずれも概ね 3mm 程度のペレットが出来ることが示された。

図 5-4　ペレタイザー使用によるペレット(左)　クラッシャー使用によるペレット(右)

5.4 ペレット内部構造の評価結果

得られたペレットについては、顕微鏡観察および FT-IR マッピングによる断面評価を実施した。その結果、尿素由来の特徴的な吸収ピークを指標としてマッピングを行うと、尿素は粒子内部に多く分布し、外層部では相対的に少ない分布を示すことが確認された。



←　5mm　→　顕微 FTIR 画像

図 5-5　顕微鏡写真と FTIR マッピング断面評価

この分布特性は、本実証事業で意図した担持型構造、すなわち尿素がロジンとパルプからなるマトリクス内部に取り込まれている状態を反映しており、従来の被覆肥料のように尿素表面を連続膜が覆っている構造とは本質的に異なる。このような内部構造は、混錬条件や配合比を調整することで制御可能であることが示され、構造設計による機能制御の可能性が示唆された。

5.5 溶出挙動および機能設計への示唆

パルプ／尿素／ロジンの配合比を変化させることにより、肥料の比重、溶出挙動、さらには施肥後の浮遊・沈降特性が変化することが確認されており、これらの特性は既存の被覆肥料における溶出速度規格との対比の中で評価・最適化が進められている。

本担持型肥料では、溶出挙動が被膜厚ではなく、三次元マトリクス構造内での水の浸入経路や構造崩壊挙動に支配されるため、設計自由度が高く、今後の配合最適化により多様な緩効性設計が可能になると考えられる。これらについての肥料としての肥効、水稲生育への影響については、次年度実証事業において検討していく。

6. 木質系樹脂を使用した被覆肥料による水稲育成実証試験

－肥料施肥による水田での育成試験と検証－

6.1 水稲作現場の問題点

日本の水稲作現場においては、緩効性窒素肥料を使用した基肥一発肥料が広く普及している。この窒素成分の溶出を遅らせる被覆肥料の使用により、追肥作業を省略できるとともに、窒素有効利用につながるため、省力と環境負荷低減の観点から、基肥一発肥料の普及が進んでいる。しかし、この被覆材としてプラスチックが使用されているため、栽培後の被覆プラスチックのマイクロプラスチック化が環境問題となっている。

農林水産省および業界団体では、「緩効性肥料におけるプラスチック被覆殻の海洋流出防止に向けた方針」として、① 環境への流出状況の把握、② 流出量の削減および回収のための報告体制の整備、③ 生分解性素材等による代替製品の実証事業開発、を進めている。

6.2 実証試験の目的

本実証事業では、プラスチック被覆材に代替するものとして、海洋分解性木質系樹脂を使用する緩効性窒素肥料を開発した。「プラスチックを使用した被覆肥料に頼らない農業」を実現するためには、当該被覆肥料が慣行のプラスチック被覆肥料の施肥効果を代替できることを証明する必要がある。

本実証事業では、水稲栽培で一般に利用されている、プラスチック被覆型緩効性窒素肥料を使用した慣行の基肥一発肥料を対照区として、プラスチック被覆肥料に代えて、本実証事業で試作した木質系樹脂肥料（以下、「新奇肥料」と呼ぶ）を使用する処理区（新奇肥料区）を設定して、試験水田において通常の水稲移植栽培を行い、イネの生育、収量および品質を評価することにより、新奇肥料により従来のプラスチック被覆肥料を代替できるかどうかを検証した。

6.3 試験内容

筑波大学つくば機能植物イノベーション実証事業センター農場（以下、T-PIRC 農場）の水田圃場において、本実証事業「(1) 肥料被覆用木質系樹脂に関する技術開発」において開発試作された新奇肥料を使用して水稲栽培を行った。栽培試験としては、通常の水稲栽培を想定して一般水田圃場で機械移植栽培を行うとともに、施肥試験用の小型水田での手植え栽培およびポット栽培を行い、新奇肥料がイネの生育、収量および米品質に及ぼす影響を検証した。また、栽培水田および実験室において、新奇肥料の土壌埋設試験を行い、新奇肥料の水田土壌での分解および窒素溶出特性を検証した。

表 6-1　2025 年 T-PIRC 農場栽培試験歴
（本実証事業開始前の作業含む）

	機械移植試験（3号圃）	手植え試験（13号圃）	その他
5月2日	播種		
5月8日		播種	
5月13日	肥料秤量・肥料散布		
5月15日	代かき		
5月20日	移植・肥料埋設		
5月23日		肥料散布・代かき	
5月30日		移植・肥料埋設	ポット移植
6月9日	肥料回収 DAT20		
6月12日	第1回生育調査		
6月19日		肥料回収 DAT20	
6月20日		第1回生育調査	
6月24日	第2回生育調査		
6月29日	肥料回収 DAT40		
7月1日			光合成速度（ポット）
7月4日		第2回生育調査	
7月8日	第3回生育調査		
7月9日		肥料回収 DAT40	
7月15日	分げつ期サンプリング		
7月18日		第3回生育調査	
7月19日	肥料回収 DAT60		
7月22日	第4回生育調査		
7月29日		肥料回収 DAT60	
7月31日	出穂調査開始		
8月1日		第4回生育調査	
8月3日	出穂期（50%出穂）		
8月5日	出穂終		
8月6日	サンプリング予備調査		ポット出穂期
8月7日	出穂期サンプリング		
8月8日	肥料回収 DAT80		ポット出穂終
8月10日		出穂期（50%出穂）	
8月12日		出穂終	
8月18日		肥料回収 DAT80	
8月28日	肥料回収 DAT100		
8月30日			光合成速度（ポット）
9月7日		肥料回収 DAT100	
9月11日	サンプリング予備調査		
9月12日	成熟期サンプリング		
9月16日	収量調査サンプリング 品質調査試料収穫		
9月17日	肥料回収 DAT120		
9月24日	コンバイン収穫		
9月26日	脱穀・籾摺り	収量調査サンプリング	
9月27日		肥料回収 DAT120	
9月28日	調査試料調製開始（脱穀）		
9月30日	収量調査開始（穂数調査）		

試験１：機械移植栽培試験

（１）筑波大学 T-PIRC 農場水田３号圃（19.6a）を 9 区画（1 区 10m×20m）に区切り、肥料 3 処理×3 反復の試験設計で試験栽培を行った。圃場全体の施肥量は、窒素 N：リン酸 P_2O_5：カリ K_2O = 10：10：8 kg/10a として、以下の３処理区を設定した（図 6-1）。試験処理および施肥設計は以下の通りとした。

対照区：プラスチック被覆型緩効性窒素肥料を使用した基肥一発肥料
（使用肥料：「マジ軽一発ドラゴン」（くみあい LP コート入り複合肥料 4282）、
N：P_2O_5：K_2O = 24：12：8 %、N 成分のうち LP コート 100 40%、LP コート S120 15%）
処理（新奇肥料）区：対照区の基肥一発肥料中のプラスチック被覆型緩効性窒素肥料（LP コート）を新奇肥料で代替、リン酸およびカリは単肥を施用
混合区：基肥一発肥料と新奇肥料を 1：1 で混合

施肥設計

新肥料評価試験2025
肥料計算　　基準施肥量:　　N 10 kg/10a　P_2O_5 10 kg/10a　K_2O 8 kg/10a

対照区　にじのきらめき用緩効性肥料使用、リン酸、カリ補填
使用肥料　　マジ軽一発ドラゴン　　N–P_2O_5–K_2O = 24 – 12 – 8
N成分 速効性 10.8 %　緩効性(LP100 (9.6%) + LPS120 (3.6%)) 13.2 %

慣行肥料	41.7 kg/10a					
N	10 kg/10a	うち	速効性N	4.5 kg/10a	緩効性N	5.5 kg/10a
P_2O_5	5 kg/10a	追加	5 kg/10a	重過石	14.7 kg/10a	
K_2O	3 kg/10a	追加	5 kg/10a	硫加	10.0 kg/10a	

処理区　新奇肥料(緩効性N 40%)　速効性N(硫安)、リン酸、カリ 単肥追加

N	10 kg/10a	速効性N	4.5 kg/10a	緩効性N	5.5 kg/10a
		塩安	18 kg/10a	新奇肥料	16.92 kg/10a
P_2O_5	10 kg/10a	重過石	29.4 kg/10a		
K_2O	8 kg/10a	硫加	16.0 kg/10a		

混合区　慣行肥料と新規肥料半々
緩効性N　5.5 kg/10a　のうち　慣行肥料　2.75　新奇肥料　2.75　kg/10a

N	10 kg/10a	うち	速効性N	4.5 kg/10a	緩効性N	5.5 kg/10a
慣行肥料	20.8 kg/10a					
N	5.0 kg/10a	うち	速効性N	2.3 kg/10a		2.8 kg/10a
		追加		2.3 kg/10a		2.8 kg/10a
			塩安	9 kg/10a	新奇肥料	8.46 kg/10a
P_2O_5	2.5 kg/10a	追加	7.5 kg/10a	重過石	22.1 kg/10a	
K_2O	1.7 kg/10a	追加	6.3 kg/10a	硫加	12.6 kg/10a	

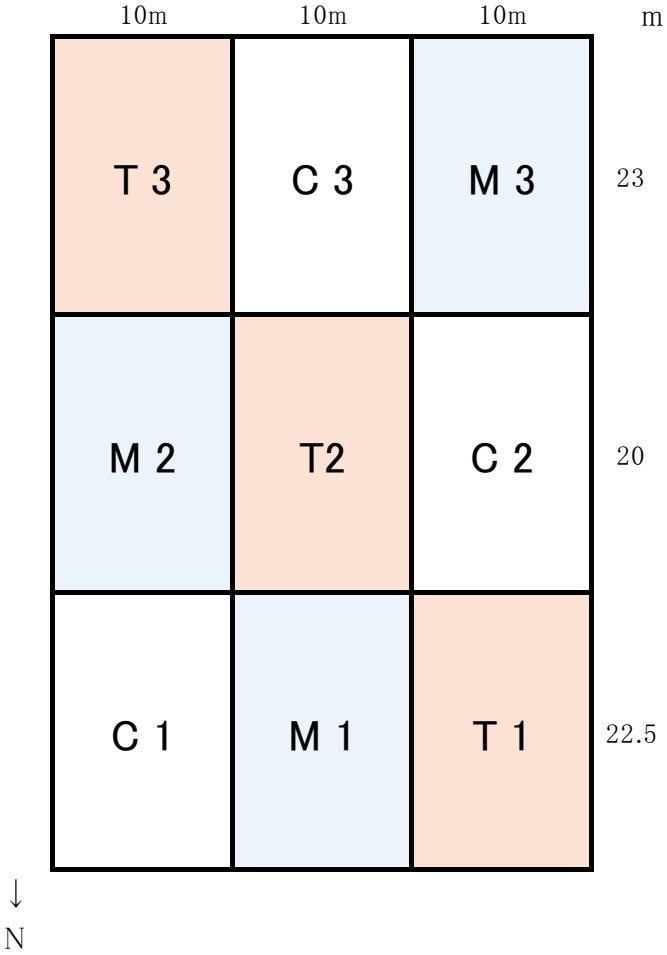


図 6-1　T-PIRC 農場水田 3 号圃試験区画設定（3 処理 3 反復）

C：対照区　　T:処理区　　M:混合区

（２）栽培

水稲品種「にじのきらめき」を以下の手順で栽培した。

種子消毒：2026 年 4 月 25 日　温湯消毒

播種：5 月 2 日　育苗箱

肥料秤量・施肥：5 月 14 日　1 区画 10 × 20 m　手散布

代かき：5 月 17 日

移植：5 月 20 日

苗調査　葉齢 3.7±0.2　　苗丈　11.5±1.2 cm　　乾物重　0.17±0.03 g/本

6 条植田植え機（井関）　栽植密度　30cm×21cm（15.9 株/m^2）　5～8 本植/株

防除は、移植前日に殺虫殺菌剤（ブーンパディート箱粒剤（クミアイ化学、成分：シアントラニパプロール、ジクロベンチアゾクス）を苗箱施用し、出穂期にカメムシ防除として殺虫剤（スタークル液剤（クミアイ化学、成分：ジノテフラン）を散布した。除草は代かき前にサキドリ EW（クミアイ化学、成分：ブタクロール、ペントキサゾン）、移植 1 週後にプライオリティフロアブル（クミアイ化学、成分：トリアファモン、フェンモノトリオン）を散布した。

水管理は農場の慣行に従い、7 月中旬に約 1 週間の中干しを行った。

（3）調査

① 生育調査

移植約 3 週後から出穂期前まで 2 週間隔で各反復の連続する 10 株について、草丈、茎数を計測するとともに、葉色計（SPAD 計、SPAD502、コニカミノルタ）により最上位完全展開葉の SPAD 値を測定した。また、調査株列付近においてプラントキャノピーアナライザー（LI2200、Li-Cor）により葉面積指数（LAI）を測定した。

② 乾物重および成長解析

分げつ期（7 月 15 日）、出穂期（8 月 7 日）および成熟期（9 月 12 日）に、以下の手順により乾物重サンプリングを行った。

サンプリング前に各反復隣接する 9 株の茎数を調査し、平均値に近い中庸 3 株を掘り取り、洗浄後、地下部を除去し、地上部を稈＋葉鞘、葉身、穂（出穂期および成熟期）に分別した。分別した器官は反復ごとに紙袋に入れて、大型通風乾燥機により 80℃で 3 日以上乾燥させて、乾物重を測定した。なお、分別時に葉身の一部を面積計（AAM-9、林電工）で葉面積を測定し、乾燥後の乾物重から比葉面積（cm^2/g）を計算し、これを葉乾物重に掛けて葉面積を計算した。

各反復の乾物重および葉面積データは栽植密度から単位面積当たりに換算して、分げつ期～出穂期および出穂期～成熟期における各成長関数を以下の式により計算した。

成長関数

個体群成長速度（CGR：crop growth rate）　$CGR = (W_2 - W_1)／(t_2 - t_1)$

純同化率（NAR：net assimilation rate）　$NAR = 1／L \times dw／dt$

$$= [(W_2 - W_1) \times (\ln L_2 - \ln L_1)]／[(t_2 - t_1) \times (L_2 - L_1)]$$

葉面積指数（LAI：Leaf area index）　$LAI = (L_2 - L_1)／(\ln L_2 - \ln L_1)$

相対成長率（RGR　：relative growth rate）

$RGR = 1／W \times dw／dt = (\ln W_2 - \ln W_1) ／ (t_2 - t_1)$

それぞれ時間 t_1、t_2 における乾物重 W_1、W_2 、葉面積 L_1、L_2

③ 窒素含有率および窒素吸収量

各時期の乾物重測定試料は器官別にカッティングミル(SM100、レッチェ)で粉砕し、窒素含有率を NC アナライザー（NC220F、住友化学）で測定した。

器官別窒素含有率に乾物重をかけて各時期各器官の窒素吸収量を算出した。

④ 収量および収量構成要素

収穫期（9 月 16 日）に代表株法により収量調査株を収穫して、以下の手順により収量および収量構成要素を測定した。

各反復について対角線法により連続する 10 株×5 か所、計 50 株を地際で刈り取り、調査株とした。調査株は束ねてビニルハウスで風乾後、株ごとに穂数を調査し、平均値に近い穂数中庸の 20 株を選抜し、最長稈長および穂長を測定後、穂を切断して株当たり穂重を測定した。平均穂重に近い中庸 5 株を選抜して収量調査株とした。収量調査株は脱穀して、塩水選（比重 1.06）により、浮上籾と沈下籾に分け、それぞれマルチオートカウンター（KC-1M5、藤原製作所）で籾数を測定し、沈下籾数／（浮上籾数＋沈下籾数）として登熟歩合を計算した。沈下籾は籾摺り後、砕粒を除いて玄米重および玄米数を測定して、玄米重／玄米数×1000 として玄米千粒重を計算した。なお、玄米水分含有率を水分計（ライスタ f 、ケット）で測定して、以下の式により、玄米千粒重は水分 15%に換算した。

玄米千粒重（水分 15%換算） ＝ 玄米千粒重（水分 X%） × （100 － X）/85

収穫後に反復ごとに条間および株間を測定し、実際の栽植密度を計算した。各測定値から以下の式により、玄米収量（水分 15%）を計算した。

玄米収量 ＝ 面積当たり株数 × 1 株穂数 × 1 穂籾数 × 登熟歩合 × 玄米千粒重

⑤ 玄米外観品質および食味値

各反復 5 か所×15 株、計 75 株を刈取り、ビニルハウスで風乾後、坪刈り脱穀機(TS3H、笹川農機）で脱穀、 脱ぼう機（DB53、みのる産業）で脱芒後、籾摺り機（FC2R、大

竹製作所）で籾摺りして玄米とした。玄米は篩選別（1.85mm 縦目篩）して精玄米として品質調査に供した。

精玄米は、穀粒判別機（RGQI、サタケ）で玄米外観品質として整粒、未熟粒、被害粒、死米割合および粒長・粒幅を測定し、米粒食味計（RCTA11A、サタケ）により食味値および関連形質を測定した。

なお、精玄米重を測定して、栽植密度から玄米収量を推定した。

⑥ 気象データ [1)]および統計解析気温、降水量、日射量等の気象データは T-PIRC 農場水田近傍に設置した気象観測システムおよび気象庁過去の気象データを用い、測定データは分散分析により施肥処理間の有意差を検証した。

（4）結果

① 生育経過

2025 年栽培期間中つくばの日平均気温、日射量および降雨量の推移を平年値（1991 年から 2020 年の 30 年平均値）とともに図 6-2～6-3 に示す。

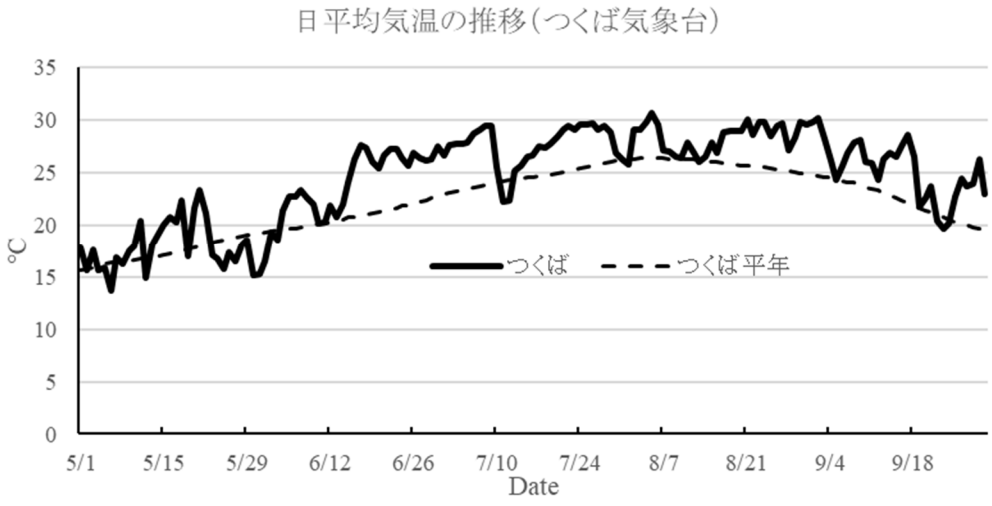


図 6-2　栽培期間中の日平均気温の推移

移植した 5 月中は降水日が多く、日平均気温は平年並みに推移したが、6 月以降は平年を大きく上回り、日平均気温の平年差は 6 月 3.1℃、7 月 3.0℃、8 月 2.5℃、9 月 2.9℃と非常に暑い日が続いた。月平均日射量の平年差は、降水日の多かった 5 月は-2.45MJ

と少なかったが、6 月 2.98MJ、 7 月 4.88MJ、8 月 2.38、9 月 2.19MJ と晴れた日が多かった。

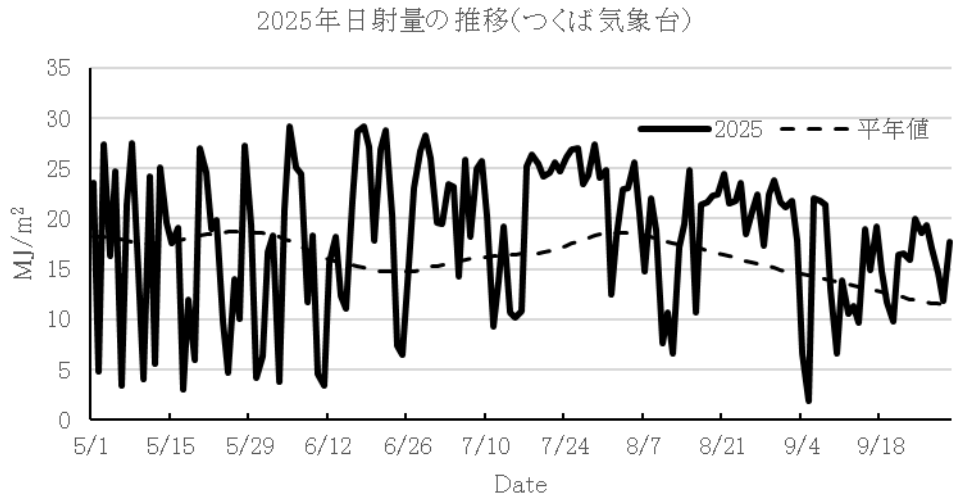


図 6-3　栽培期間中の日射量の推移

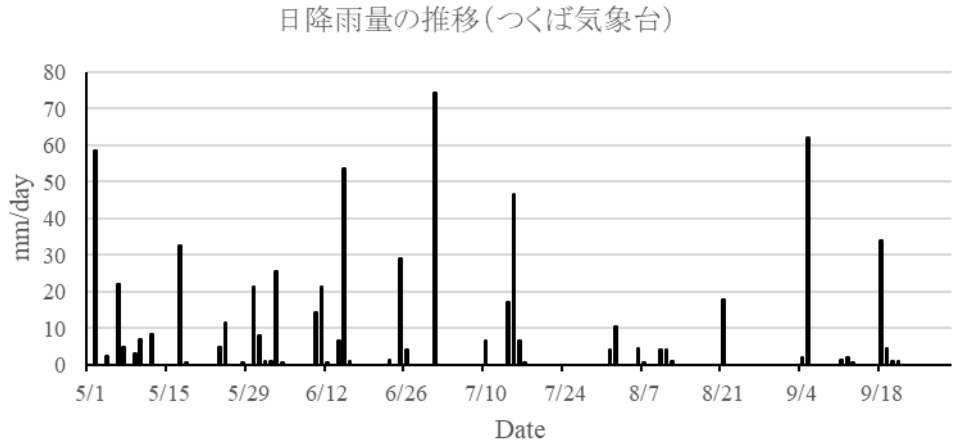


図 6-4　栽培期間中の日降雨量の推移

以上のように 2025 年は移植直後を除き好天に恵まれ、気温が高推移したことから、イネの生育は順調であるが、平年に比べてやや早く進み、出穂日（50%出穂日）は 8 月 3 日（移植後 74 日）で、8 月 7 日には出穂がほぼ終了した。なお、出穂には施肥処理間の差はなかった。

栄養成長期間中の草丈、株当たり茎数、葉身 SPAD 値および葉面積指数 LAI の推移を図 6-5～6-8 に示す。草丈の推移には施肥処理間の差はほとんどなかった。株当たり

茎数は、生育初期は処理区でやや多く、移植後 35 日では対照区に対して株当たり約 6 本多かったが、生育に連れてその差は小さくなった。最上展開葉の SPAD 値には処理間の差はほとんどなかった。葉面積指数 LAI の推移にも処理間の差はなかった。

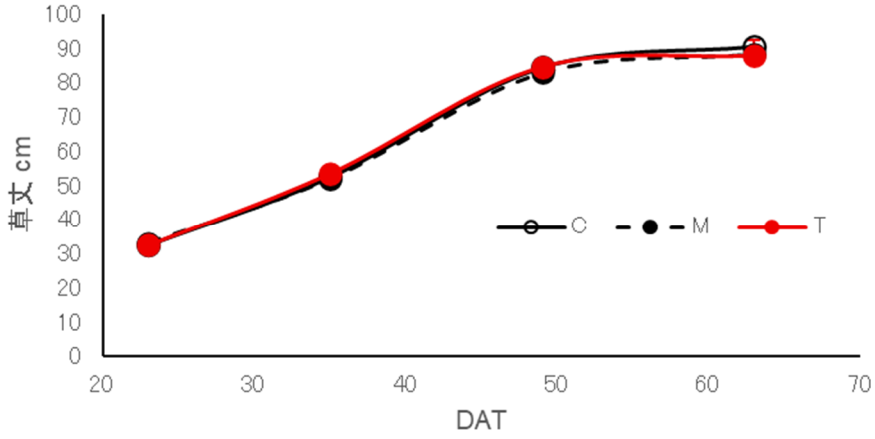


図 6-5　栄養成長期間中の草丈の推移
C：対照区、M：混合区、T：処理区　垂線は標準誤差（n=3）

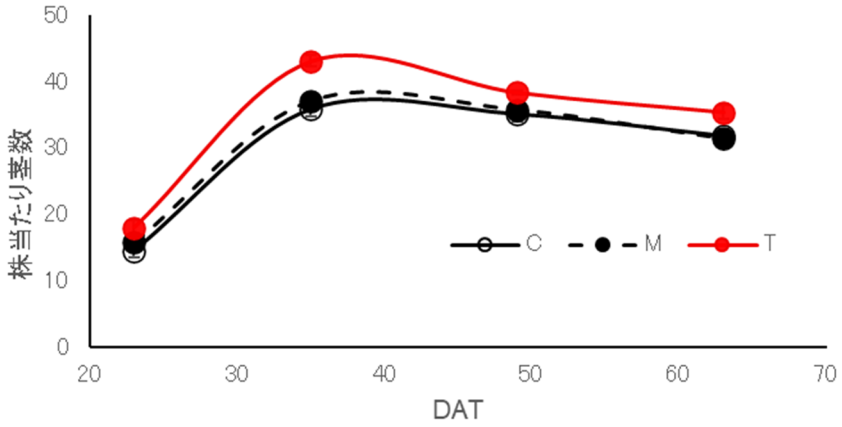


図 6-6　栄養成長期間中の株当たり茎数の推移
C：対照区、M：混合区、T：処理区　垂線は標準誤差（n=3）

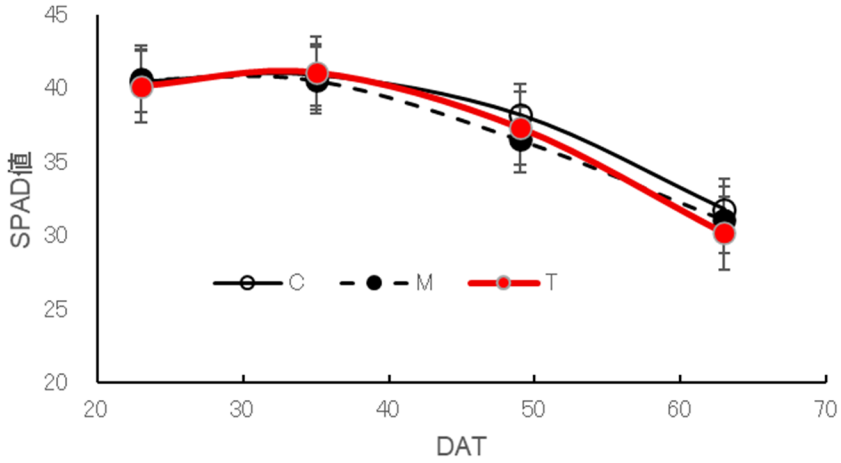


図 6-7　栄養成長期間中の SPAD 値（最上位完全展開葉）の推移
C：対照区、M：混合区、T：処理区　垂線は標準誤差（n=3）

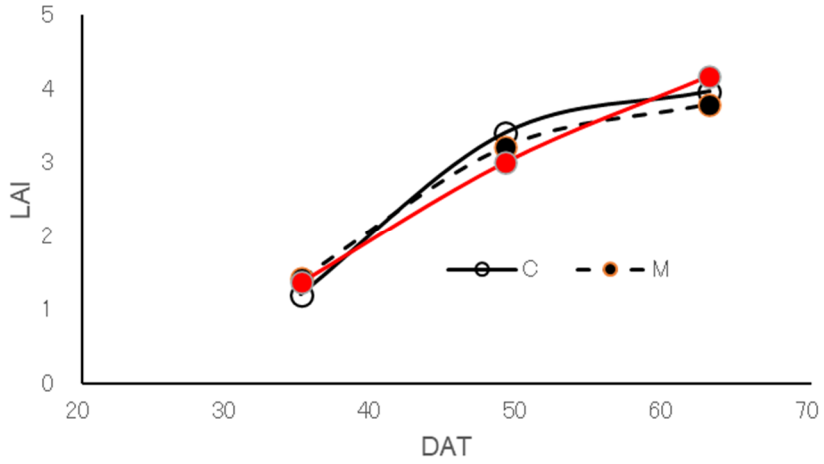


図 6-8　栄養成長期間中の葉面積指数 LAI（m^2/m^2）の推移
C：対照区、M：混合区、T：処理区　垂線は標準誤差（n=3）

② 乾物生産

分げつ期（7 月 15 日）、出穂期（8 月 7 日）および成熟期（9 月 12 日）におけるサンプリング調査結果を表 6-2、表 6-3 および表 6-4、地上部乾物重の推移を図 6-9 に示す。各時期における成長形質、乾物重とも施肥処理間の差はみられなかった。地上部乾物重は出穂期 1200 ～ 1300 g/m^2、成熟期 1600 ～ 1700 g/m^2 であり、乾物生産量はイネの平均的な値であった。各時期における器官別乾物分配割合にも差はなかった。

表 6-2　分げつ期サンプリング（ 7 月 15 日）における形質および乾物重

A:形質

処理	穂数/株	草丈 cm	SPAD	LAI
対照区	30.4 ± 1.3	83.6 ± 1.1	33.7 ± 0.4	5.74 ± 0.27
新奇区	30.1 ± 1.0	84.8 ± 1.5	34.2 ± 0.7	5.87 ± 0.29
混合区	30.6 ± 1.3	84.2 ± 0.9	34.2 ± 0.8	5.74 ± 0.31

平均値±標準誤差(n=3)

B:地上部乾物重 (g/m^2)

処理	葉身	稈+葉鞘	計
対照区	244 ± 8	414 ± 18	657 23
新奇区	248 ± 17	412 ± 24	660 41
混合区	237 ± 10	373 ± 18	610 24

平均値±標準誤差(n=3)

表 6-3　出穂期サンプリング（8 月 7 日）における形質および乾物重

A:形質

処理	穂数/株	草丈 cm	SPAD	LAI
対照区	27.4 ± 0.2	104.6 ± 1.8	33.6 ± 0.5	6.45 ± 0.17
新奇区	25.7 ± 0.2	104.5 ± 0.9	32.6 ± 0.8	6.45 ± 0.30
混合区	27.0 ± 0.7	102.8 ± 2.6	32.3 ± 0.9	6.40 ± 0.62

平均値±標準誤差(n=3)

B:地上部乾物重 (g/m^2)

処理	葉身	稈+葉鞘	穂	計
対照区	296 ± 6	812 ± 16	158 ± 4	1,267 ± 20
新奇区	292 ± 14	812 ± 16	154 ± 2	1,258 ± 26
混合区	303 ± 24	871 ± 26	166 ± 4	1,340 ± 50

平均値±標準誤差(n=3)

表 6-4　成熟期サンプリング（9 月 12 日）における形質および乾物重

A:形質

処理	穂数/株	草丈 cm	稈長 cm	穂長 cm	SPAD	LAI
対照区	24.9 ± 0.8	97.6 ± 0.9	76.1 ± 0.7	21.5 ± 0.2	28.3 ± 0.1	3.05 ± 0.44
新奇区	25.8 ± 0.9	98.2 ± 0.7	76.4 ± 1.1	21.8 ± 0.4	27.4 ± 0.5	3.08 ± 0.26
混合区	24.1 ± 1.7	94.8 ± 1.7	73.4 ± 1.0	21.4 ± 0.6	28.8 ± 0.5	2.84 ± 0.33

平均値±標準誤差(n=3)

B:地上部乾物重 (g/m^2)

処理	葉身	稈+葉鞘	穂	計
対照区	166 ± 21	773 ± 38	770 ± 22	1,710 ± 78
新奇区	162 ± 14	768 ± 59	763 ± 29	1,693 ± 103
混合区	150 ± 17	722 ± 28	692 ± 54	1,564 ± 98

平均値±標準誤差(n=3)

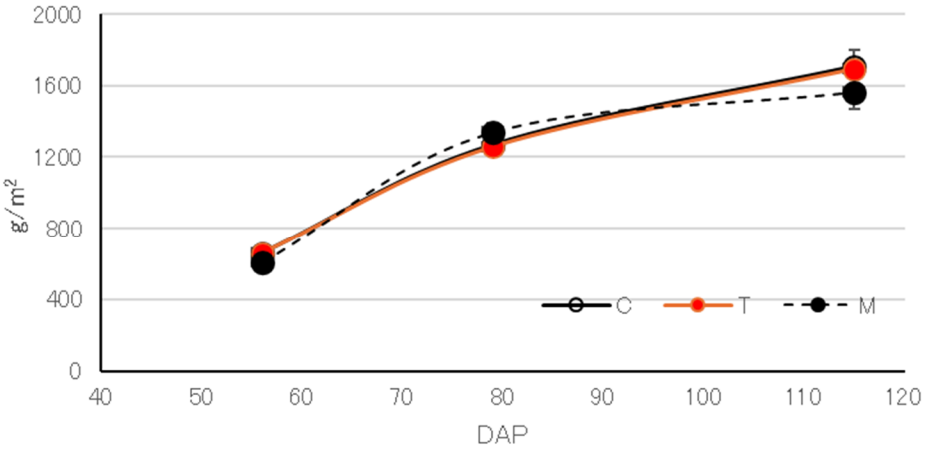


図 6-9　地上部乾物重の推移

C：対照区、M：混合区、T：処理区　垂線は標準誤差（n=3）

地上部乾物重と葉面積データから分げつ期～出穂期、出穂期から登熟期の期間中における成長関数を計算したところ、乾物生産の指標となる個体群成長速度、純成長速度、相対成長率とも対照区と新奇肥料区との間には差はみられなかった（表 6-5）。

表 6-5　分げつ期～出穂期および出穂期～成熟期の成長関数の比較

分げつ期～出穂期(7/15－8/7)

	CGR	NAR	LAI	RGR
	$g/m^2/day$	$g/m^2/day$	m^2/m^2	g/g/day
対照区	26.5 ± 1.8	4.39 ± 0.46	6.08 ± 0.21	0.029 ± 0.002
新奇区	26.0 ± 0.7	4.26 ± 0.32	6.16 ± 0.29	0.028 ± 0.002
混合区	31.8 ± 1.8	5.27 ± 0.29	6.05 ± 0.31	0.034 ± 0.002

出穂期～成熟期(8/7－9/12)

	CGR	NAR	LAI	RGR
	$g/m^2/day$	$g/m^2/day$	m^2/m^2	g/g/day
対照区	12.3 ± 2.7	2.66 ± 0.44	4.53 ± 0.34	0.008 ± 0.002
新奇区	12.1 ± 3.5	2.64 ± 0.75	4.55 ± 0.09	0.008 ± 0.002
混合区	6.2 ± 1.3	1.39 ± 0.15	4.38 ± 0.46	0.004 ± 0.001

平均値±標準誤差(n=3)

③ 窒素含有率および窒素吸収量

各サンプリング時期における各器官の窒素含有率を表 6-6 に示す。各器官の窒素含有率には処理間の差はみられなかった。窒素含有率に器官別乾物重を掛けて計算した窒素吸収量を合計した地上部窒素吸収量は、分げつ期 8 g/m^2、出穂期 10 g/m^2、成熟期 11 g/m^2 となり、分げつ期ですでに 8 g/m^2 の窒素を吸収しており、出穂期までやや増加するが、登熟期間中の増加量はわずかであった（表 6-7、図 6-10）。

表 6-6　各サンプリング時期における窒素含有率

		稈＋葉鞘(%)	葉身(%)	穂(%)
分げつ期	対照区	0.73 ± 0.04	2.18 ± 0.06	±
	新奇区	0.70 ± 0.03	2.16 ± 0.06	±
	混合区	0.77 ± 0.04	2.30 ± 0.05	±
出穂期	対照区	0.43 ± 0.01	2.01 ± 0.05	0.86 ± 0.02
	新奇区	0.41 ± 0.02	1.94 ± 0.04	0.79 ± 0.03
	混合区	0.40 ± 0.02	1.93 ± 0.10	0.78 ± 0.03
成熟期	対照区	0.39 ± 0.01	1.15 ± 0.02	0.82 ± 0.02
	新奇区	0.38 ± 0.02	1.15 ± 0.04	0.82 ± 0.02
	混合区	0.35 ± 0.02	1.07 ± 0.04	0.77 ± 0.01

平均値±標準誤差(n=3)

表 6-7　各サンプリング時期における窒素吸収量

(g/m^2)

		稈＋葉鞘	葉身	穂	計
分げつ期	対照区	3.01 ± 0.16	5.31 ± 0.25		8.32 ± 0.39
	新奇区	2.91 ± 0.27	5.37 ± 0.52		8.29 ± 0.79
	混合区	2.87 ± 0.08	5.44 ± 0.32		8.31 ± 0.40
出穂期	対照区	3.53 ± 0.05	5.97 ± 0.25	1.37 ± 0.07	10.86 ± 0.29
	新奇区	3.30 ± 0.21	5.67 ± 0.39	1.22 ± 0.06	10.19 ± 0.53
	混合区	3.50 ± 0.22	5.89 ± 0.73	1.30 ± 0.04	10.69 ± 0.96
成熟期	対照区	2.99 ± 0.07	1.91 ± 0.23	6.33 ± 0.32	11.24 ± 0.60
	新奇区	2.90 ± 0.07	1.85 ± 0.11	6.22 ± 0.24	10.96 ± 0.36
	混合区	2.53 ± 0.21	1.62 ± 0.24	5.31 ± 0.49	9.45 ± 0.90

平均値±標準誤差(n=3)

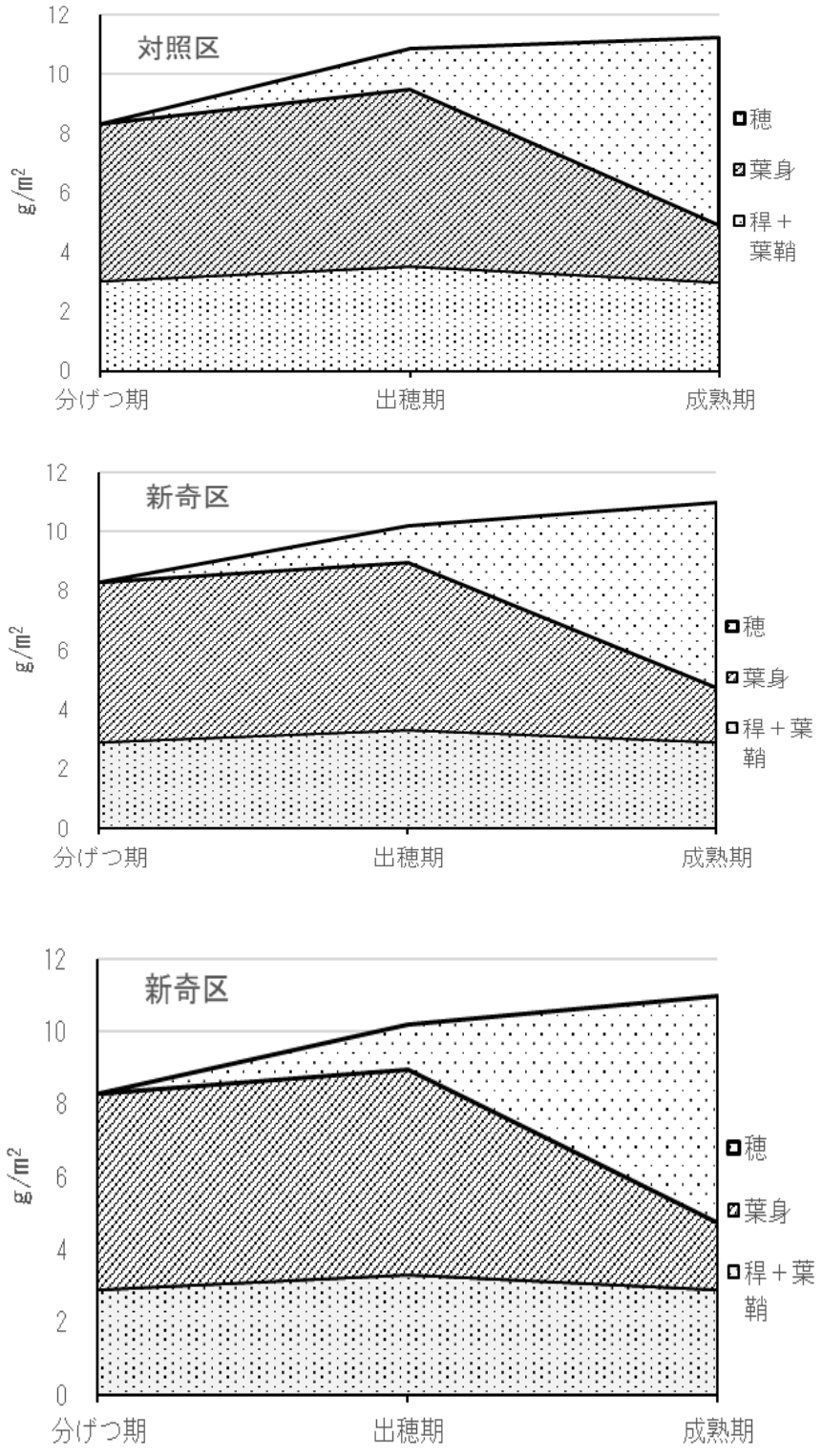


図 6-10　地上部窒素吸収量（g/m^2）の推移

④ 収量および収量構成要素

玄米収量は対照区 661 g/m^2、新奇肥料区 611 g/m^2、混合区 640 g/m^2 であり、いずれも 600 g/m^2 以上となり、多収性品種である「にじのきらめき」の平均的な収量を示しており、新奇肥料区でやや少ないものの処理間の有意差はなかった（図 6-11）。

収量構成要素をみると、新奇肥料区で穂数と 1 穂籾数がやや少ないことから、1m^2 当たり籾数がやや少なくなったために収量がやや少なかった。登熟歩合と玄米千粒重には処理間の差はなかった（表 6-8）。

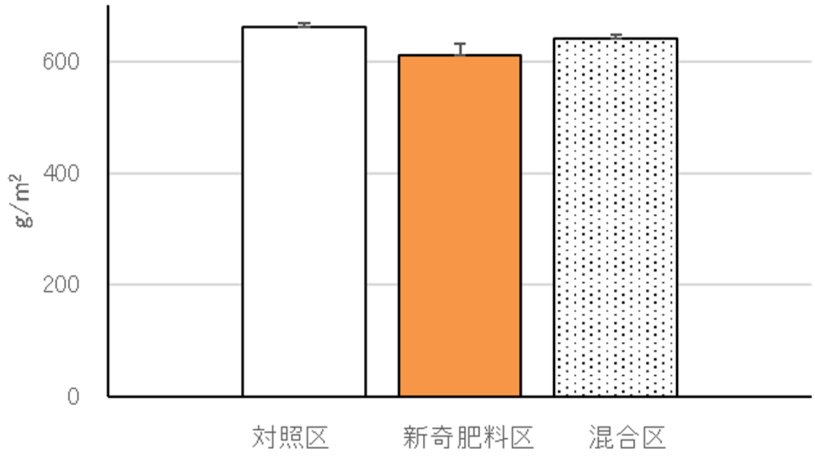


図 6-11　玄米収量の比較
垂線は標準誤差（n = 3）

表 6-8　収量および収量構成要素の比較

処理	株当たり穂数（本／株）	1穂籾数（個／穂）	面積当たり籾数（個／㎡）	登熟歩合（%）	玄米千粒重（g／1000粒）	玄米収量（g／㎡）
対照	26.7 ± 0.1	76.3 ± 0.7	32,362 ± 401	80.5% ± 0.7%	25.4 ± 0.2	661 ± 6
新奇肥料	26.1 ± 0.4	72.6 ± 1.2	29,373 ± 738	81.7% ± 0.2%	25.2 ± 0.2	611 ± 19
混合	27.4 ± 0.2	74.0 ± 0.7	32,214 ± 309	80.1% ± 0.4%	24.8 ± 0.1	640 ± 7
分散分析	NS	NS	NS	NS	NS	NS

平均値±標準誤差（n=3）

⑤ 玄米外観品質

玄米の外観品質を示す整粒歩合は、新奇肥料区でやや低かったが、各処理とも 60%程度であり、農産物検査の玄米検査規格では 2 等相当であった。新奇肥料区では未熟粒および死米の比率がわずかに高かったので、整粒歩合がやや下がった。玄米粒の大きさは、粒長 5.2mm、粒幅約 3mm であり、施肥処理間の差はなかった（表 6-9)。

表 6-9　玄米外観品質の比較（整粒歩合、未熟粒・被害粒比率、粒サイズ）

整粒 %

	整粒	胴割	計
対照区	62.5 ± 1.0	3.0 ± 0.7	65.5 ± 0.7
新奇肥料区	59.6 ± 1.7	2.1 ± 0.7	61.7 ± 1.1
混合区	62.4 ± 2.2	1.7 ± 0.4	64.1 ± 1.8

未熟粒 %

	乳白粒	基部未熟	腹白	青未熟	その他	計
対照区	8.4 ± 0.1	7.9 ± 0.3	2.7 ± 0.2	0.1 ± 0.1	11.0 ± 1.0	30.1 ± 1.0
新奇肥料区	8.4 ± 0.5	11.7 ± 1.5	2.5 ± 0.3	0.0 ± 0.0	10.7 ± 1.3	33.3 ± 0.7
混合区	9.1 ± 0.4	9.2 ± 1.1	2.6 ± 0.1	0.1 ± 0.1	10.8 ± 0.3	31.8 ± 1.6

被害粒 %

	砕粒	茶米	奇形粒	計
対照区	2.6 ± 0.8	0.8 ± 0.4	0.2 ± 0.0	3.7 ± 1.0
新奇肥料区	2.2 ± 0.9	1.5 ± 0.3	0.4 ± 0.2	4.1 ± 0.8
混合区	1.8 ± 0.8	1.0 ± 0.1	0.4 ± 0.0	3.2 ± 0.7

%

	着色粒	死米
対照区	0.3 ± 0.0	0.4 ± 0.1
新奇肥料区	0.4 ± 0.1	0.5 ± 0.1
混合区	0.4 ± 0.0	0.5 ± 0.1

粒大 mm

	粒長	粒幅
対照区	5.17 ± 0.03	2.95 ± 0.02
新奇肥料区	5.17 ± 0.02	2.94 ± 0.00
混合区	5.18 ± 0.02	2.94 ± 0.00

平均値±標準誤差(n=3)

⑥ 玄米食味値

米粒食味計による玄米食味値および関連形質では、食味値は対照区 78.3、新奇肥料区 81.6、混合区 79.7 といずれも良食味とされるポイントを示した。関連形質では、新奇肥料区のタンパク質含量は 6.7%とやや低かった（表 6-10）。

表 6-10　玄米食味値、アミロース含量、タンパク質含量の比較

処理	食味値	アミロース含量 %	タンパク質含量 %
対照	78.3 ± 0.69	18.8 ± 0.07	7.1 ± 0.06
新奇肥料	81.6 ± 1.79	18.5 ± 0.18	6.7 ± 0.23
混合	79.7 ± 0.69	18.6 ± 0.07	7.0 ± 0.08

平均値±標準誤差（n=3）

（5）まとめ

生育経過を比較すると、生育初期の茎数は新奇肥料区で多いが、その後の茎数、草丈、SPAD の推移には施肥処理間の差はなかった。

乾物生産を比較すると、成熟期の地上部乾物重は混合区でやや少なかったものの、乾物生産量の推移には施肥処理間差はなかった。乾物成長速度および成長効率を表す、時期別の成長関数にも施肥処理間差はみられなかった。

窒素吸収量の比較では、器官別窒素含有率には施肥処理間差はみられず、各時期の窒素吸収量にも対照区と新奇肥料区の間には差はなかった。移植 59 日後の分げつ期には 8 g/m^2、移植 79 日後の出穂期には約 10 g/m^2 の窒素を吸収しており、出穂期以降の窒素吸収量は少なかった。

本試験では窒素施肥量 10 g/m^2、うち速効性窒素 4.5 g/m^2、緩効性窒素 5.5 g/m^2 の施肥設計で栽培した。窒素吸収量から判断すると、速効性窒素は速やかに吸収利用されたが、緩効性窒素は対照区、処理区とも有効に吸収利用されなかった可能性がある。

収量の比較では、新奇肥料区では 1 株穂数および 1 穂籾数がやや少ないことから、シンクキャパシティを表す単位面積当たり籾数がやや少なかった。登熟歩合および玄米千粒重には処理間差はないため、玄米収量は、有意差はないが、新奇肥料区でやや低かった。

玄米の外観品質および食味の比較では、玄米外観品質については、新奇肥料区で未熟粒割合がやや多いことから整粒歩合はやや低かった。玄米サイズには処理間差はなかった。食味計による測定では、いずれの区も 80 ポイント程度の良食味評価で、新奇肥料区ではややタンパク質含有率がわずかに低かったことから食味値はやや高かった。

以上、イネの生育経過、乾物生産、窒素吸収過程、玄米収量、玄米品質および玄米食味値を総合的に評価すると、施肥処理間に有意な差はみられなかったことから、緩効性肥料と新奇肥料の効果の差はないと判断される。

しかし、生育経過および収量構成要素を詳しく解析すると、新奇肥料の窒素溶出が少し早い可能性も排除できない。すなわち、生育調査での茎数の経過を見ると、生育初期の移植後 35 日の株当たり茎数は新奇肥料区が対照区より有意に多く、その後の茎数増加は減少して最終的な穂数は新奇肥料区でやや少なくなっている。

最高分げつ数に対する最終的な穂数の割合を示す有効茎歩合は、対照区が約 70%に対して、新奇肥料区では約 60%と低かった。このことから新奇肥料区では窒素の溶出が早く、生育初期の分げつ発生を促して茎数が多くなったが、後半に溶出する窒素が少なくなって退化する茎が多くなり、無効分げつが多くなった可能性を示唆している（表 6-11）。

さらに収量構成要素をみても、新奇肥料区では 1 穂籾数がやや少ないことから穂形成期において窒素が少なくなり退化籾数が多くなった可能性を示している。

食味関連形質では、新奇肥料区の食味値がやや高かった。これは玄米タンパク質含有率が低いことが貢献しているが、新奇肥料区では登熟期の窒素溶出量が少ないことが寄与している可能性がある。

表 6-11　機械移植栽培における生育調査の茎数減少と有効茎歩合

		茎数 本/株		低下率	穂数 本/株		有効茎歩合 %	
		DAT35	DAT63	DAT35-63	出穂期 ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ	収穫期 ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ	出穂期 ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ	収穫期 ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ
対照区	1	36.7	32	87.2	27.7	23.3	75.5	63.6
	2	35.9	32.8	91.4	27.7	25.3	77.2	70.6
	3	34.7	30.4	87.6	27	26.0	77.8	74.9
				88.7			**76.8**	**69.7**
処理区	1	41.3	37.2	90.1	25.3	24.3	61.3	58.9
	2	43.6	33.6	77.1	26	27.3	59.6	62.7
	3	44.2	35.2	79.6	25.7	25.7	58.1	58.1
				82.3			**59.7**	**59.9**
混合区	1	36.5	27.9	76.4	28.6	27.3	78.4	74.9
	2	37.1	31	83.6	27.3	23.7	73.6	63.8
	3	37.6	35.3	93.9	25.7	21.3	68.4	56.7
				84.6			**73.4**	**65.1**

乾物重×窒素含有率から計算した窒素吸収量については、処理間に大きな差はなく、分げつ期に約 8 g/m^2 の窒素を吸収しており、その後は出穂期までに約 2g/m^2 増加、登熟期にはほとんど増加しておらず、処理区を問わず、出穂期以降の窒素溶出が少ないか、有効に利用されていないことが分かった。

生育前半における窒素吸収については、窒素含有率を実測していないので、生育調査の結果から、以下の式により窒素吸収指標値を推定した。この指標値に一定の係数をかけることによって非破壊で単位面積当たりの窒素吸収量を推定することができる。

推定窒素吸収指標値 ＝ 草丈（cm） × 単位面積当たり茎数（本/m^2） × SPAD
× 有効積算温度（基準温度 10℃）

成長調査期間中の窒素吸収指標値をみると、移植後 23 日から 35 日にかけては新奇肥料区で窒素増加量が大きく、その後は小さくなることから、新奇肥料区では窒素の溶出が早く、後半には少ないことがうかがわれる（図 6-12、6-13）。

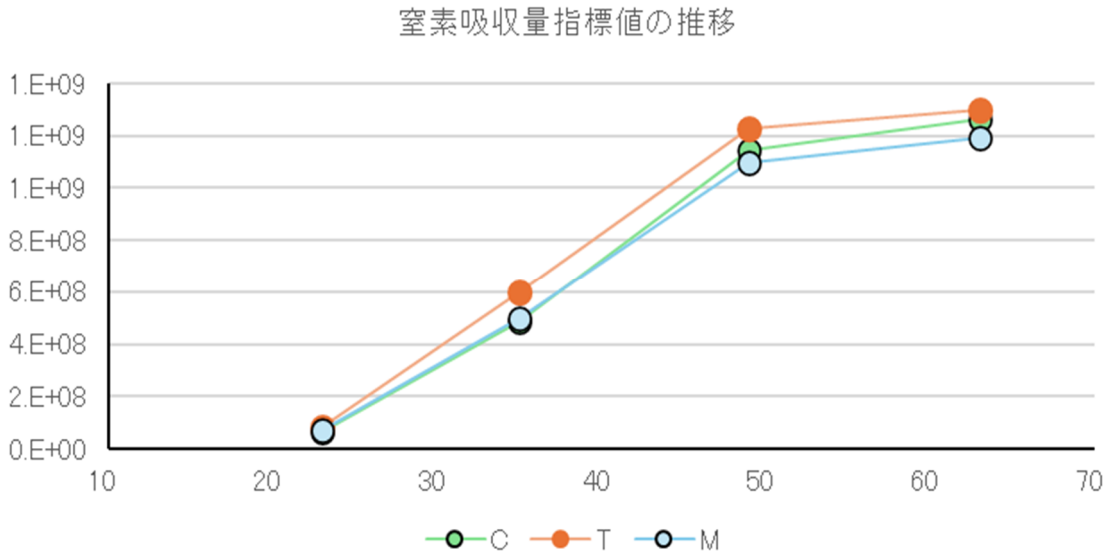


図 6-12　生育調査結果から計算した窒素吸収指標値の推移

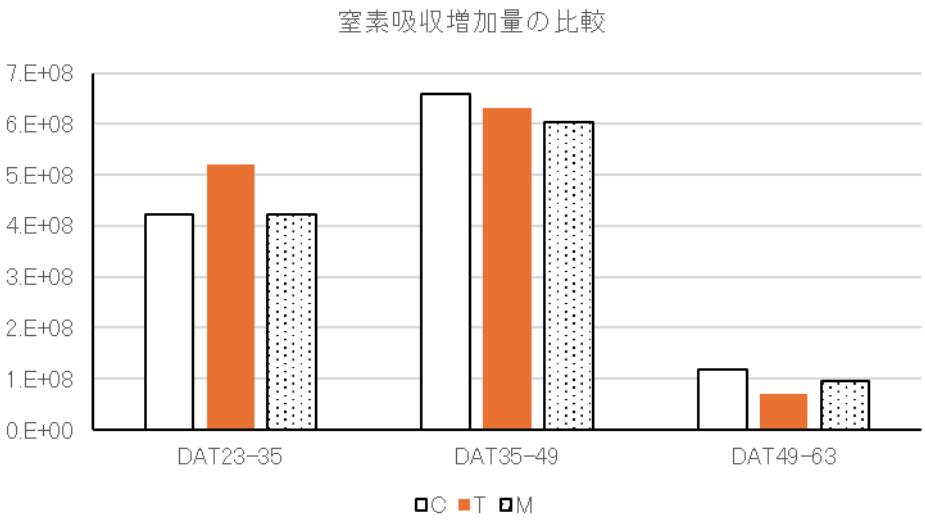


図 6-13　窒素吸収指標値増加量の比較

試験 2：手植え移植栽培

機械移植栽培とは別に、T-PIRC 農場 13 号水田の一角（10m×5m）において、慣行の基肥一発肥料を対照区、慣行肥料の LP コート肥料を新奇肥料に代える処理区を設けて、手植え栽培を行い、生育、収量および品質を比較した。

（１）試験設計

試験区画を半分に区切り（10m×2.5m)、施肥量　N、 P、 K＝10、10、 8 kg/10a として、以下の通り、対照区と処理区を設定した。

対照区：プラスチック被覆型緩効性窒素肥料を使用した基肥一発肥料

（3 号圃機械移植栽培と同様、マジ軽一発ドラゴン）

新奇肥料区：プラスチック被覆型緩効性窒素肥料を新奇肥料で代替

13号圃必要量(kg/0.5a)

処理	新奇肥料	慣行肥料	塩安	重過石	硫加
対照区	-	1.043	-	0.368	0.250
処理区	0.423	-	0.450	0.735	0.400

（２）材料および方法

水田 13 号圃（0.5a）において以下の手順で栽培した。

品種「にじのきらめき」

播種：　2026 年 5 月 8 日　ポット苗育苗箱　1 穴 3 粒播き

肥料秤量・施肥：　5 月 13 日

代かき：　5 月 23 日

移植：　5 月 30 日　栽植密度 30 cm × 15 cm、１株 4 本　手植え

各処理区　60 株×8 列

水管理、防除は T-PIRC 農場慣行に従った。

（３）調査

① 生育調査

移植 3 週後から 2 週間隔で各処理の連続する 10 株について、草丈、茎数、SPAD（最上位完全展開葉）を測定した。

② 収量および収量構成要素

収穫期（９月 26 日）に各処理から代表株法により、10 株×5 列、計 50 株を地際で刈り取り、3 号圃の機械移植栽培試験と同様の手順により、収量および収量構成要素を測定した。

③ 玄米外観品質および食味値

収量調査株以外の株を刈取り、ハーベスターで脱穀後、サントグラス内で風乾後、脱芒（脱ぼう機）、籾摺り（籾摺り機）、篩選別（1.85mm 縦目篩）を行い、精玄米について玄米外観品質（穀粒判別機）および玄米食味値（食味計）を測定した。

（４）結果

① 生育経過

草丈は両施肥区とも移植後 63 日には約 100cm に達したが、施肥処理間の差はなかった。株当たり茎数は 3 本植えからスタートしたが、両区とも分げつ増加は緩慢で最高時の移植後 49 日でも約 13 本と機械植栽培に比べてかなり少なかった。SPAD は移植後 35 日に 40 以上となり、その後徐々に低下し、施肥処理区間に差はなかった（図 6-14）。

出穂期（50%出穂）は 8 月 10 日（移植後 72 日）で、8 月 12 日には出穂終了した。出穂にも施肥処理区間に差はなかった。

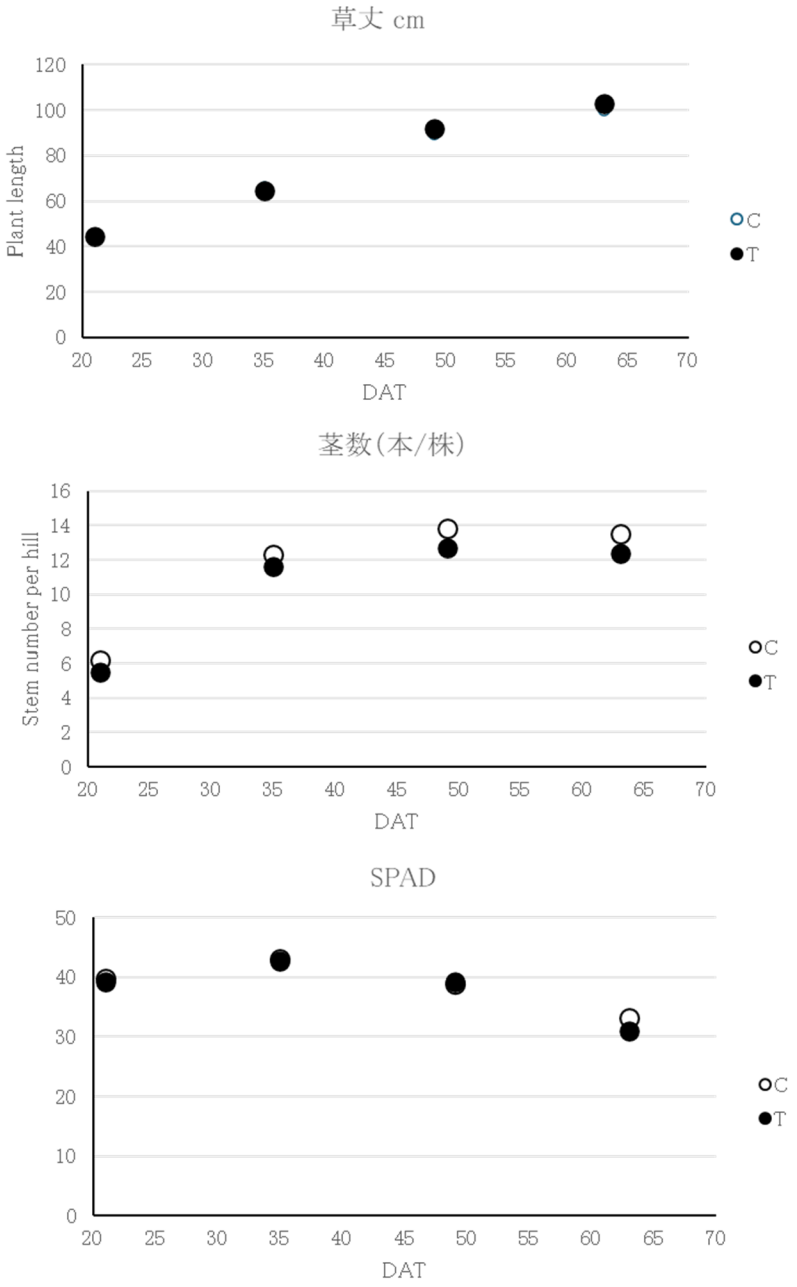


図 6-14　手植え栽培試験における草丈、茎数および SPAD の推移

○　対照区　　●　新奇肥料区　各区 10 株の平均値

② 収量および収量構成要素

玄米収量は対照区 506 g/m^2、新奇肥料区 546 g/m^2 で、機械移植栽培とは逆に新奇肥料区でやや多かった。収量構成要素については、新奇肥料区では株当たり穂数が少なかったものの、1 穂籾数が対照区 88 個、新奇肥料区 102 個と多いことから、1m^2 当たり籾数はやや多く、登熟歩合もやや高いことから、玄米収量は多くなった。玄米千粒重には処理間の差はなかった（表 5-12）。

表 6-12　手植え栽培試験における収量および収量構成要素の比較
（処理区の反復なし、代表株法による 50 株からの測定値）

	㎡当たり株数 (株／㎡)	株当たり穂数 (本／株)	㎡当たり穂数 (本／㎡)	1穂籾数 (個／穂)	面積籾数 (個／㎡)
対照区	22.2	14.0	311	88.5	27,541
新奇肥料	22.2	12.7	281	102.3	28,757

	登熟歩合 (%)	千粒重 (g／1000粒)	収量 (g／㎡)
対照区	80.6%	22.8	506
新奇肥料	84.8%	22.4	546

③ 玄米品質

手植え栽培試験の玄米品質については、穀粒判別器による外観判別では、対照区、新奇肥料区とも未熟粒割合が多く、整粒歩合が 30%未満と非常に低いために、農産物検査等級では規格外相当であった。また、玄米サイズについても、玄米千粒重、粒長、粒幅のいずれも機械移植栽培に比べて小さかった。なお、いずれの形質も施肥処理間の差はなかった（表 6-13)。

食味については、機械移植栽培試験に比べて玄米タンパク質含量が 8%と高いことから食味値は 60 ポイント台と低く、処理間の差はなかった（表 6-14)。

表 6-13　穀粒判別器による玄米外観形質（反復なし）

	整粒 %			未熟粒 %					
	整粒	胴割	計	乳白粒	基部未熟	腹白	青未熟	その他	計
対照区	26.2	1.7	27.9	17.1	22.8	10.5	0.3	10.0	60.7
新奇肥料区	23.9	1.8	25.7	17.6	22.1	11.8	0.0	11.3	62.8

	被害粒 %				%		粒大 mm	
	砕粒	茶米	奇形粒	計	着色粒	死米	粒長	粒幅
対照区	0.6	8.4	1.5	10.5	0.6	0.4	5.07	2.84
新奇肥料区	0.3	8.6	1.9	10.8	0.3	0.1	5.02	2.80

表 6-14　食味値の比較（反復なし）

処理	食味値	アミロース含量 %	タンパク質含量 %
対照	64.3	20.1	8.0
新奇肥料	63.3	20.2	8.1

（５）まとめ

栄養成長期間における草丈、茎数および SPAD の推移には肥料区間に差がなく、生育経過には施肥処理間の影響はみられなかった。

水田 13 号圃は長期施肥連用展示圃の一画であり、地力水準が低く、また、移植時期も機械移植圃場よりも 10 日遅かったことから、分げつが少ないことから十分な穂数が確保できずに、収量水準は機械移植栽培に比べて低かったが、玄米収量は新奇肥料区でやや多い傾向にあった。収量構成要素の１穂籾数が新奇肥料区で多かったことから、穂形成期に新奇肥料の窒素が有効に利用された可能性がある。

玄米品質については、整粒歩合は一般水田試験に比べて著しく低いが、施肥処理間の差はなかった。食味値も一般水田試験に比べて低いが、施肥処理間差はなかった。

一般水田の機械移植栽培に比べて収量レベルは低いが、玄米収量、玄米品質とも施肥処理間に差はなかった。

試験 3：ポット移植栽培

（1）試験設計

手植え栽培試験で用いた苗をポットに移植して、ビニルハウス内で栽培して生育経過を観察するとともに、生育期間中に光合成速度を測定し、栽培後に主な形質を測定した。

施肥処理は、ポット当たり N、 P、 K 各 1g として、以下の通り対照区と処理区を設定して各 3 ポットで栽培した。

ポット試験2025

肥料計算　　基準施肥量:　N 1g/pot　P_2O_5 1g/pot　K_2O 1g/pot

1/5000aワグネルポット

対照区 にじのきらめき用緩効性肥料使用、リン酸、カリ補填

マジ軽一発ドラゴン　　$N-P_2O_5-K_2O$ = 24 - 12 - 8

N成分 速効性 10.8 %　緩効性(LP100 (9.6%) + LPS120 (3.6%)) 13.2 %

慣行肥料	4.20 g

N	1.008	うち	速効性N	0.454 g	緩効性N	0.554 g
P_2O_5	0.504	追加	0.496 g	重過石	1.46 g		
K_2O	0.336	追加	0.664 g	硫加	1.33 g		

処理区 新規肥料(緩効性N 40%)　速効性N(硫安)、リン酸、カリ 単肥追加

N	1 g	速効性N	0.45 g	緩効性N	0.55 g
		塩安	1.81 g	新規肥料	1.71 g
P_2O_5	1 g	重過石	2.94 g		
K_2O	1 g	硫加	2.00 g		

（2）材料および方法

対照区および新奇肥料区の施肥設計で計算した肥料を秤量して、無肥育苗培土 2kg に混和して 1/5000a ワグネルポットに充填し、湛水後、「にじのきらめき」苗をポット当たり 2 株移植した。各処理 3 ポットを用意した。

（３）調査

分げつ期(7 月 1 日)および登熟後期(8 月 30 日)に光合成蒸散測定装置(LI6400XT 、LI-Cor、）により、光合成速度および関連形質を測定した。

収穫期に地際で刈取り、稈長、穂長、穂数、籾重、地上部風乾重を測定した。

（４）結果

ポット個体の生育経過には、肥料処理間に明瞭な差はみられなかった。

分げつ期は、光合成速度 36～38 μmol/m^2/s、気孔コンダクタンス 0.52～0.59 mol/m^2/s、蒸散速度 10～12 mmol/m^2/s、SPAD 42～43 であり、新奇肥料区でやや高い傾向があった（表 6-15)。登熟後期は、光合成速度 7～9 μmol/m2/s、SPAD 18～20 であり、新奇肥料区でやや高い傾向があった（表 6-16)。

収穫時の地上部風乾重、籾重はじめ各形質にも施肥処理間の明確な差はなかった（表 6-17)。

表 6-15 分げつ期における光合成速度および関連形質の比較

Pot	光合成速度 μmol/m^2/s	気孔コンダクタンス mol/m^2/s	蒸散速度 mmol/m^2/s	SPAD
新奇肥料	38.4 ± 4.8	0.589 ± 0.106	12.0 ± 1.9	43.0 ± 2.8
対照	35.6 ± 5.8	0.516 ± 0.139	10.1 ± 2.1	41.5 ± 2.3

平均値±標準誤差(n = 12)　各肥料2ポット　各ポット最上位完全展開葉6枚

2025年7月1日　T-PIRC農場　ビニルハウス

測定装置:LI-6400XT, Li-Cor

天候:曇り時々晴　ハウス内気温40℃以上

測定条件:光強度 1500 μmol/m^2/s

チャンバー温度　32℃（葉温 33～35℃）

表 6-16　登熟後期における光合成速度の比較

Leaf	光合成速度 μ mol/m^2/s	SPAD
新奇肥料	9.3 ± 4.0	19.8 ± 3.1
対照	6.7 ± 2.0	17.8 ± 2.5

（平均値±標準誤差、n=12）

2025年8月30日　T-PIRC農場　ビニルハウス外側
天候:晴
各肥料 3ポット　止葉4枚
測定条件:光強度 1400 μ mol/m^2/s
装置:LI-6400XT, Li-Cor
チャンバー温度　32℃（葉温 33℃）

表 6-17　ポット栽培成長形質の比較

	稈長 cm	穂長 cm	穂数 本/pot	全籾数 個/pot	一穂籾数
新奇肥料	59.7	20.7	43.7	2643	60.6
慣行肥料	60.8	20.4	36.0	2455	68.1

	登熟歩合	玄米千粒重 g	玄米重 g/pot	茎葉重 g/pot
新奇肥料	43.8%	19.6	22.7	96.2
慣行肥料	44.5%	20.3	22.4	91.5

（５）まとめ

ポット栽培でも対照区と新奇肥料区で生育経過を観察したが、生育、収量には施肥処理間差はなかった。分げつ期および登熟後期の葉身の光合成速度は新奇肥料区でやや高い傾向はあったが、測定葉間の変動が大きく明確な差はなかった。成長量（地上部風乾重)、収量（ポットあたり玄米重）にも処理間差はみられなかった。

試験 4：肥料埋設試験

新奇肥料の窒素溶出特性を調査するために、水田および実験室内において土壌中に肥料を埋設して定期的に取出し、残存量および窒素含有率を測定する試験を行った。対照として、栽培試験の対照区に用いた基肥一発肥料（マジ軽一発ドラゴン）から緩効性窒素肥料（LP100 および LPS120）を選別して用意した。

（１）水田埋設試験

対照肥料、新奇肥料各 15g を秤量して、不織布のお茶パックに封入したものを 30 個用意した。

栽培試験を実施した 3 号圃から 4 か所、13 号圃から 1 か所、計 5 か所に秤量肥料各 6 個を移植日に埋設した。移植後 20、40、60、80、100 および 120 日に各箇所から 1 個ずつ埋設肥料を回収して、静水中で洗浄して不織布から残存肥料を回収し、乾燥後、残量を秤量後、乳鉢で粉砕して窒素含有率を測定した（NC アナライザー）。

（２）室内試験

対照肥料、新奇肥料各 5g を秤量して、不織布のお茶パックに封入したものを各 30 個用意した。

水田（3 号圃）土壌を 30ml ビーカーに詰め、各肥料を埋めて、水道水で湛水状態として、実験室内（25℃）に静置した。埋設後 10、20、30、40、50、60、70，80、90，100 日に各 3 個の不織袋を回収し、水田埋設試験と同様にして、肥料残量および窒素含有率を測定した。

（３）結果

水田試験では対照肥料、新奇肥料とも埋設後 20 日の時点で重量は 30%未満まで低下し、新奇肥料はその後一定、対照肥料は徐々に低下して 80 日以降は 10%以下になった（図 6-15）。一方、室内試験では、対照肥料の重量は徐々に低下し、70 日後でも 40%残存した。新奇肥料は 10 日後に 20%まで急激に低下し、その後は一定であった（図 6-16）。

窒素含有率は、水田試験、室内試験ともに対照肥料は 40%から徐々に低下するのに対して、新奇肥料は 1 回目回収時点から 1%未満に低下しており（図 6-17、6-18）、本試験法では新奇肥料の窒素成分の緩効性は確認できなかった。

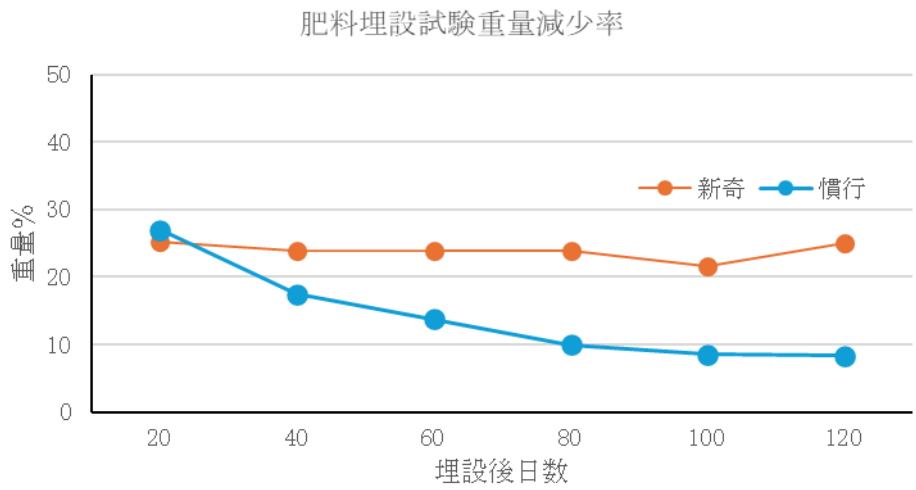


図 6-15　水田埋設試験における残渣重量の推移

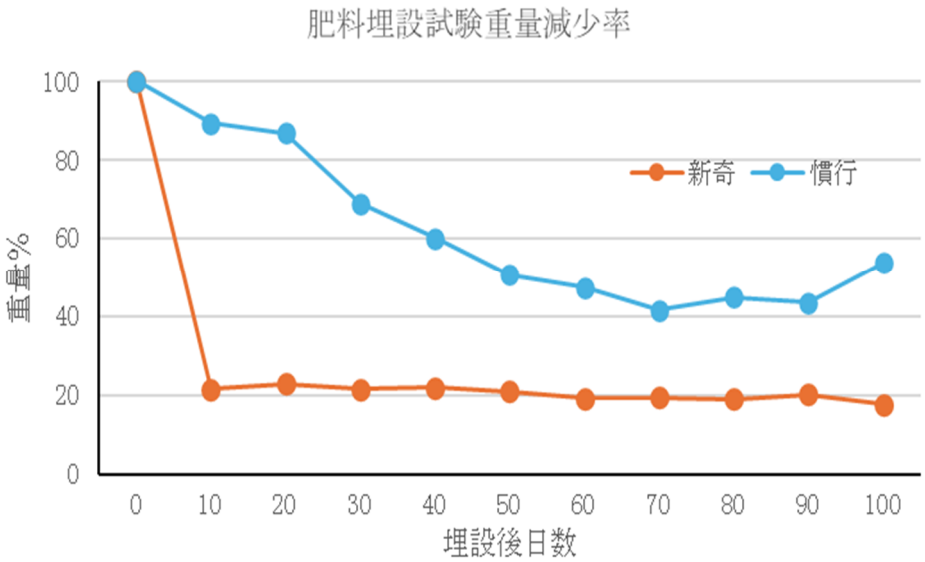


図 6-16　室内埋設試験における残渣重量の推移

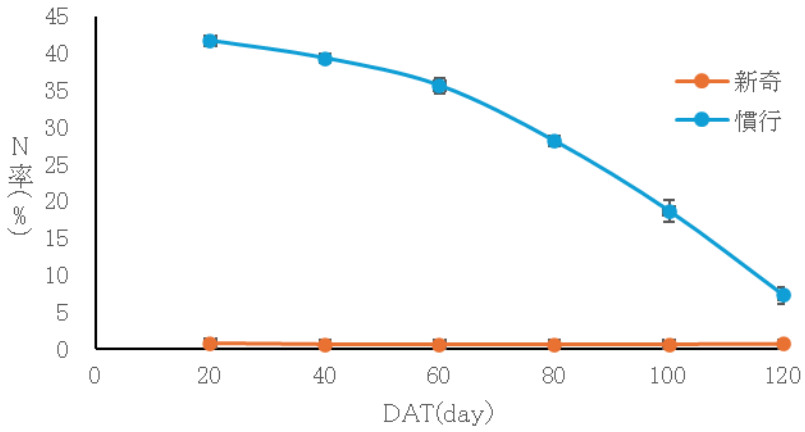


図 6-17　埋設肥料残渣の窒素含有率（水田）

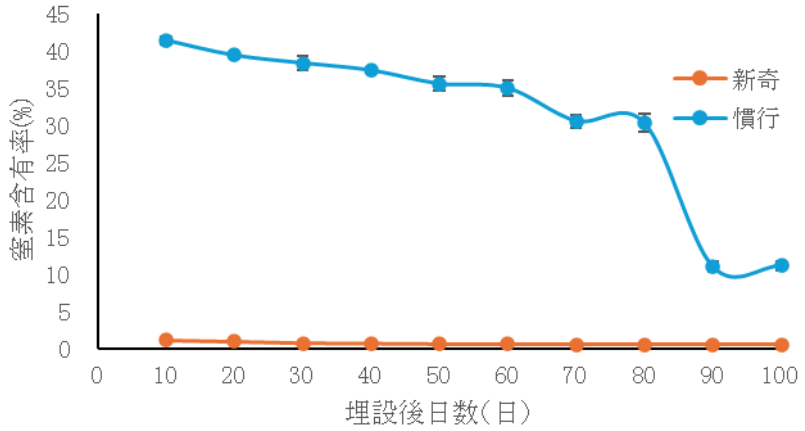


図 6-18　埋設肥料残渣の窒素含有率（ビーカー試験）

（4）まとめ

水田試験と室内試験では、重量変化には肥料間の差がみられたが、いずれも新奇肥料は第 1 回回収時から重量が 20%程度まで減少した。残渣の窒素含有率は対照肥料は埋設後徐々に減少して徐々に窒素が溶け出していることが確認できたが、新奇肥料は第 1 回回収から 0%台となり、窒素成分が流出してしまっていることを示している。そのため、本埋設試験の結果からは新奇肥料の緩効性は確認できなかった。回収後の洗浄時に窒素が溶出した可能性もあり、回収方法の検討が必要である。

試験 5　土壌調査

栽培終了後、各試験区から常法により対角線上 5 か所から作土を採取し、ビニルハウスで風乾後、1mm 篩を通して土壌化学分析を行った（外注）。分析項目および分析法は以下の通りである。

EC（電気伝導率）　　土壌環境分析法 V.4（白金電極法）
ｐH（水素イオン濃度）H_2O（1:5）　　土壌環境分析法 V.1（ガラス電極法）
CEC（塩基置換容量）土壌環境分析法 V.17.A(セミミクロ Schollenberger 変法)
CaO（交換性石灰）　土壌環境分析法 V.7.A （原子吸光法）
MgO（交換性苦土）　土壌環境分析法 V.7.A （原子吸光法）
K_2O（交換性加里）　土壌環境分析法 V.7.A （炎光法）
石灰飽和度　CEC 値及び当量値より換算
苦土飽和度　CEC 値及び当量値より換算
加里飽和度　CEC 値及び当量値より換算
塩基飽和度　各飽和度の総和より算出
P_2O_5（有効態リン酸）土壌環境分析法 V.12.A（トルオーグ法）
リン酸吸収係数　　土壌環境分析法 V.17.A
NH_4-N（アンモニア態窒素）　土壌環境分析法 V.9.B.b
NO_3-N（硝酸態窒素）塩化アルミニウム抽出＆紫外分光法
全炭素・全窒素　　土壌環境分析法 V.8（乾式燃焼法）

化学成分については処理区間に大きな差はなかったが、機械移植栽培試験の 3 号圃では新奇肥料区において、アンモニア態窒素および硝酸態窒素とも低い傾向があった（表 6-18）。

表 6-18　栽培後の土壌化学性

3号圃

処理	反復	EC mS/cm	pH	CEC meq/100g	CaO mg/100g	MgO mg/100g	K_2O mg/100g	石灰飽和度 %	苦土飽和度 %
対照区	1	0.09	6.3	20.7	279.5	25.9	22.6	48.2	6.2
	2	0.08	6.3	19.4	258.6	24.1	24.0	47.5	6.2
	3	0.08	6.3	18.4	251.5	24.3	26.7	48.7	6.6
	平均	**0.08**	**6.3**	**19.5**	**263.2**	**24.8**	**24.4**	**48.1**	**6.3**
混合区	1	0.09	6.3	20.6	279.0	24.3	27.0	48.3	5.9
	2	0.08	6.4	20.7	277.6	26.6	24.6	47.8	6.4
	3	0.08	6.3	19.2	249.0	24.3	22.8	46.3	6.3
	平均	**0.08**	**6.3**	**20.2**	**268.5**	**25.1**	**24.8**	**47.5**	**6.2**
新奇肥料区	1	0.08	6.3	17.6	238.0	22.2	34.6	48.2	6.3
	2	0.09	6.4	21.0	285.3	24.9	23.6	48.5	5.9
	3	0.08	6.3	18.3	252.6	26.8	27.0	49.2	7.3
	平均	**0.08**	**6.3**	**19.0**	**258.6**	**24.6**	**28.4**	**48.6**	**6.5**

処理	反復	加里飽和度 %	塩基飽和度 %	P_2O_5 mg/100g	NH_4-N mg/100g	NO_3-N mg/100g	腐植 %	全炭素 g/kg	全窒素 g/kg
対照区	1	2.3	56.7	4.3	1.3	0.7	5.6	45.07	3.58
	2	2.6	56.3	3.5	1.6	0.5	5.5	43.68	3.46
	3	3.1	58.4	4.0	1.1	0.8	4.9	39.71	3.18
	平均	**2.7**	**57.1**	**3.9**	**1.3**	**0.7**	**5.3**	**42.82**	**3.41**
混合区	1	2.8	57.0	4.8	0.9	0.7	5.8	45.48	3.56
	2	2.5	56.7	3.6	1.1	0.6	5.4	42.45	3.35
	3	2.5	55.1	3.6	1.0	0.5	5.2	42.13	3.35
	平均	**2.6**	**56.3**	**4.0**	**1.0**	**0.6**	**5.5**	**43.35**	**3.42**
新奇肥料区	1	4.2	58.7	4.1	1.0	0.4	5.4	41.05	3.25
	2	2.4	56.8	4.2	0.8	0.6	5.4	44.98	3.54
	3	3.1	59.6	3.9	1.2	0.6	4.5	38.12	3.06
	平均	**3.2**	**58.4**	**4.1**	**1.0**	**0.5**	**5.1**	**41.38**	**3.28**

13号圃

処理	EC mS/cm	pH	CEC meq/100g	CaO mg/100g	MgO mg/100g	K_2O mg/100g	石灰飽和度 %	苦土飽和度 %
対照区	0.11	6.1	21.1	202.3	42.0	18.5	34.2	9.9
新奇肥料区	0.13	6.0	22.6	188.5	37.3	14.5	29.7	8.2

処理	加里飽和度 %	塩基飽和度 %	P_2O_5 mg/100g	NH_4-N mg/100g	NO_3-N mg/100g	腐植 %	全炭素 g/kg	全窒素 g/kg
対照区	1.9	46.0	3.2	1.4	1.2	6.6	48.76	3.75
新奇肥料区	1.4	39.3	3.0	1.1	1.3	6.9	49.08	3.82

6.4 まとめ

機械移植栽培、手植え移植栽培とも、慣行の緩効性窒素肥料（LP コート肥料）を新奇肥料で代替した処理区におけるイネの生育経過、乾物生産、窒素吸収、収量および収量構成要素、玄米外観品質、食味値を比較したところ、慣行肥料の対照区と明確な差はみられなかった。

イネの生育、収量および品質の調査結果からは、慣行の緩効性窒素肥料は新奇肥料で代替できると判断されるが、新奇肥料の窒素溶出が早く、初期成長がやや旺盛で後半の成長がやや抑制される傾向はみられた。

しかしながら、生育、収量には施肥処理間の明確な差はなかった。機械移植栽培（3号圃）の収量調査結果では新奇肥料区は対照区に比べて収量が約 10%低かったが、品質調査株から推定した精玄米収量は約 5%の差であった（表 5-19）。手植え栽培の 13 号圃では地力も移植時期も異なるが、玄米収量は新奇肥料区の方が約 8%多かった。

表 6-19　品質調査株からの玄米収量の推定

	玄米重 >1.85	玄米重 <1.85	水分 %	精玄米重(15%)	玄米収量 g/m^2
対照区	2925	153	13.4	2979	632
新奇肥料	2812	107	13.6	2857	606
混合区	3046	124	13.4	3102	658

75株/区　約 5m^{2}相当

肥料埋設試験結果では、新奇肥料はすぐに分解して、残量および窒素含有率とも埋設後、急激に低下した。しかし、イネの生育経過からは窒素成分がすぐに溶出したとは考えられない。新奇肥料では回収時に分解・溶出した可能性もあるので、検証方法については検討する必要がある。

（参考）

別表　玄米および新奇肥料の重金属分析

玄米	ヒ素	鉛	カドミウム	水銀
対照区	0.1 ppm	検出せず	検出せず	検出せず
新奇肥料区	0.1 ppm	検出せず	検出せず	検出せず
混合区	0.1 ppm	検出せず	検出せず	検出せず
肥料				
新奇肥料	検出せず	検出せず	検出せず	検出せず

分析：一般財団法人　日本食品分析センター

6.5 今後の課題

今年度栽培試験は、同一水田内を施肥処理区に区切って肥料散布は手作業で実施した。処理区間の肥料混入の影響が少ないように試験区の大きさは十分に取り（10m×20m)、調査・サンプリングには試験区のできるだけ中央に近い箇所から平均的な株を選択するように配慮した。しかし、肥料散布は手作業で行ったために、処理区内での生育ムラはみられた。実際の水稲栽培では肥料は機械散布で行われるので、今後は条件の等しい２枚の水田を使用して、機械散布による栽培試験での生育比較が必要である。

栽培試験は筑波大学 T-PIRC 農場内の水田で実施したが、水田土壌は火山性の黒ぼく土壌であり、リン酸利用効率が悪く、収量水準は高くない。また、代表的な水田土壌である沖積土地帯での検証も必要である。

肥料埋設試験では、水田土壌中における新奇肥料の窒素溶出率を明らかにできなかった。木質系樹脂肥料は土壌中で分解しやすいため、回収作業中に窒素成分が流出したことが原因と考えられ、試験方法の検討が必要である。

栽培試験では、茨城県においても作付面積が増えている高温耐性の良食味品種である「にじのきらめき」を供試して、推奨されている基肥一発肥料を対照肥料として使用した。当該肥料は緩効性窒素として PP 被覆肥料(LP コート肥料)が使用され、速効性窒素と緩効性窒素が 4.5：5.5 の割合で配合されている。本試験では、この配合に合わせて､新奇肥料区では窒素施肥量 10 g/m^2 のうち速効性窒素として塩安で 4.5 g/m^2、緩効性窒素として新奇肥料で 5.5 g/m^2 の施肥設計で栽培した。窒素吸収量から判断すると、生育後半、特に出穂期以降の窒素吸収量は少なく、速効性窒素は速やかに吸収利用されたが、緩効性窒素は対照区、新奇肥料区とも有効に吸収利用されなかった可能性がある。新奇肥料の緩効性効果を検証するためには、速効性窒素と緩効性窒素の配合割合を変えた形での栽培試験も必要と思われる。

今後､新奇肥料の実用化のためには､基肥一発肥料として､速効性窒素､リン酸肥料､カリ肥料などと混合した配合肥料としての性能の検証も必要である。

今回の現行 PP 被覆肥料と､新奇のロジン担持肥料では代かき前の全層散布法によって肥料施肥して評価し、収量等に大きな差は出なかった。今後は代かき前の全層散布

だけではなく、苗床から田植え時の移植時に田植え機による側条施肥する場合の対応が必要であり、側条施肥田植え機による検証実験が必要である。

6.6　筑波大学 T-PIRC 農場での栽培検証(写真)

写真 6-1　T-PIRC 農場水田全景

写真 6-2　水田空撮図（2026 年 7 月 3 日）

写真 6-3　生育（8 月 12 日　登熟初期）

写真 6-4　成熟期サンプリング（9 月 12 日）

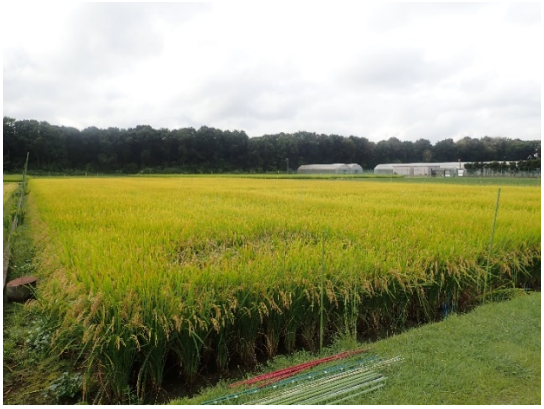


写真 6-5　収量調査サンプリング（9 月 12 日）

写真 6-6　コンバイン収穫（9 月 24 日）

写真 6-7　収穫後水田（10 月 23 日）

7. 本検討肥料と PP 被覆肥料のＬＣＡ

本検討では、従来のポリプロピレン（PP）被覆肥料と、ロジンおよび乾式粉砕パルプ（セルロース）を用いた複合化肥料について、ライフサイクルアセスメント（LCA）の観点から温室効果ガス（GHG）排出構造を比較し、代替肥料の環境影響の変化を整理した。

LCA 算定の結果、PP 被覆品からロジン＋古紙複合化品へ切り替えた場合の GHG 排出削減量は、製品 1t あたり 68.3 kg-CO_2eq であり、これは約 3.7%の削減率に相当する。本算定では、環境条件に対して保守的な前提を採用しており、具体的には、

①ロジン＋古紙複合化品の施用後にメタン（CH_4）が 2.5 kg 発生すると仮定

②廃棄・リサイクル工程において、PP 被覆品の 20%が回収・焼却されると仮定

した条件下で評価を行った。

工程別寄与の内訳を見ると、両製品に共通して最大の GHG 排出源は尿素製造工程であり、これは被覆・担持材料の種類に依存しない構造的特徴である。一方で、被覆・担持材料の違いは、GHG 排出の副次的要因として評価結果に影響を与える。PP 被覆品では、被覆材である PP が環境中でほとんど分解せず、短期的に CO_2や CH_4として排出されることは想定されないため、GHG 排出は主として製造、輸送、ならびに一部焼却工程に限定される。

これに対し、ロジン＋乾式粉砕パルプでは、ロジンおよびセルロースが生分解性材料であることから、施用後の環境条件によっては非エネルギー起源排出として CH_4が発生する可能性を内包する。本算定では、この点を明示的に織り込み、2.5 kg-CH_4という仮定値を GHG 換算に含めている。それにもかかわらず、PP 被覆品からの切替えにより、なお GHG 削減が成立するという結果は得られている。

この点は、結果解釈において重要な意味を持つ。すなわち、本算定で示された約 3.7%の削減率は、最良条件を仮定した理想値ではなく、不利に働く要因（CH_4発生）を含めた上でなお成立する評価に基づく削減効果である。このため、本結果は GHG 削減効果

を過大評価するものではなく、現実的かつ政策的検討に耐えうる水準を示していると位置付けられる。

ロジン＋乾式粉砕パルプ複合化品においてパルプ（セルロース）は、単なる環境配慮材料ではなく、担持型構造を成立させるために不可欠な構成要素である。セルロース繊維は混練時に物理的骨格として機能し、尿素およびロジンを保持・分散させることで、ペレット形状の安定化と緩効性機能の発現を可能にする。このため、古紙配合は削減可能な付加要素ではなく、製品としての成立性と機能確保のために必要な設計要件と位置付けられる。

一方で、セルロースは生分解性材料であるがゆえに、嫌気条件下では CH_4 を生成する可能性があり、これが GHG 評価上の不利要因となる。すなわち、ロジン＋古紙複合化品は、生分解性・非残存性という環境上の便益を有する一方で、GHG 評価、とりわけ CH_4 を含む指標においては不利になり得るという構造的なトレードオフを内包している。

しかしながら、このトレードオフでは、パルプ配合を削減すれば CH_4 発生ポテンシャルは低下し、GHG 評価は改善する可能性があるが、その場合には担持型構造の安定性や緩効性制御性能が損なわれ、製品としての成立性そのものが確保できなくなるおそれがある。したがって、本技術におけるトレードオフは「克服すべき弱点」ではなく、機能と環境影響を両立させるために最適化すべき設計課題である。

この設計課題は、施用後の環境条件や材料構造の工夫によって管理・低減できる可能性を有している。CH_4 発生は好気・嫌気条件に強く依存するため、使用環境の想定、構造設計、配合比率の最適化によって、GHG 排出のさらなる低減余地が存在する。したがって、現時点で示された約 3.7%の GHG 削減率は、本技術の到達点ではなく、設計改善の出発点としての保守的評価と位置付けることが適切である。

また、本技術の評価においては、GHG 削減効果のみを単一指標として捉えることには限界がある。PP 被覆品は、GHG 指標上は有利に見える一方で、環境中に樹脂殻が長期残存し、微細片化によるマイクロプラスチック問題や生物多様性への影響を引き起こす可能性がある。これらの影響は GHG 指標には反映されないが、政策的には無視できない環境課題である。

ロジン＋古紙複合化品は、GHG 削減という量的効果に加え、環境中に残存しない、マイクロプラスチックを発生させないという質的な環境便益を同時に有している。したがって、本技術の価値は、約 3.7%という削減率の大小のみで評価されるべきものではなく、GHG 削減と環境中残存性の解消を同時に達成する技術選択肢として総合的に評価される必要がある。

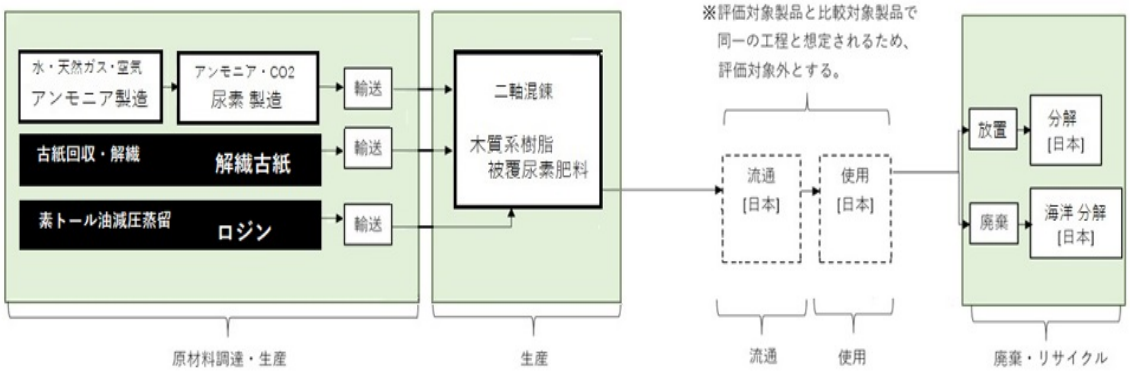
以上より、PP 被覆肥料からロジン＋古紙複合化肥料への切替えは、1t あたり 68.3 kg-CO_2eq（約 3.7%）の GHG 削減効果を示しつつ、マイクロプラスチック問題への対応という GHG 指標外の環境課題にも資するものである。このため、本技術が内包するトレードオフは、否定的に捉えるべき欠点ではなく、今後の設計最適化によって管理・改善すべき課題であり、政策的・技術的検討に値する現実的な代替技術として位置付けられる。

ライフサイクルでのCO2削減効果

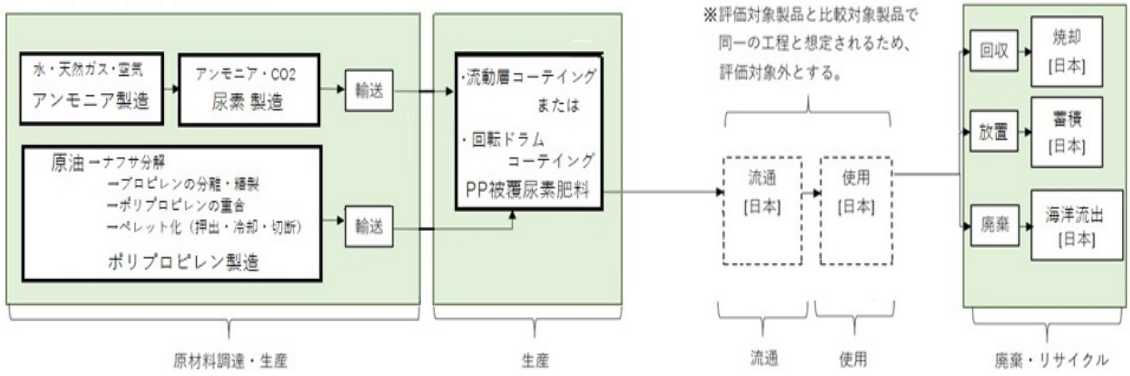
条件設定

<機能単位> 尿素肥料として1,000kg製造時のkg-CO2eq●

<評価対象製品：新規>



<ベースライン：PP被覆肥料>



ライフサイクルでのCO2削減効果

検討･評価の状況、結果

(単位)	①評価対象製品(ロジン+解繊古紙)						②ベースライン(PP被覆)						③削減量 (②ー①)					
	原材料調達・生産	生産	流通	使用	廃棄・リサイクル	合計	原材料調達・生産	生産	流通	使用	廃棄・リサイクル	合計	原材料調達・生産	生産	流通	使用	廃棄・リサイクル	合計
エネルギー起源	1403.2	280.1	-	-	0	1683.3	1,490.5	274.0	-	-	56.1※	1820.6	81.2	-	-	-	56.1	137.3
非エネルギー起源	2.1	0.4	-	-	68.8※	71.2	1.4	0.3	-	-	0.5	2.2	-0.7	-	-	-	-68.3	-69
合計	1405.3	280.5	-	-	68.8	1754.5	1491.9	274.3	-	-	56.6	1822.8	80.4	-	-	-	-12.2	68.3

PP 被覆品を尿素、ロジン+解繊古紙(古紙粉砕パルプ)複合化品に切替えた時の CO_2削減量は、肥料 1t あたり 68.3 kg-CO_2eq となり、削減率は、約 3.7%となる。

この計算では、古紙複合化品からメタンが 2.5kg 発生すると仮定、一方、PP 被覆品は**廃**棄リサイクルで 20%回収･廃棄と仮定**している。**

PP 被覆肥料由来のプラスチックは環境中で生分解しにくい素材であり、通常の環境条件下で CO_2やメタンなどの GHG を大量に排出して分解するものではないため、廃棄に関する LCA では回収したプラスチックの廃棄のみを算定することに留めた。この結果、サステナブルな生物原料を基にしたロジン+解繊古紙(古紙粉砕パルプ)複合化品の対 PP 被覆品比の削減率は、約 3.7%にとどまった。

来年度の検討予定

来年度は、PP 被覆品、ロジン＋古紙粉砕パルプ、いずれも田圃への残存・蓄積、海洋流出の数量を把握して数値算出することとし、さらに尿素に対するロジン＋古紙粉砕パルプの配合比率低減と、二軸混錬条件を検討して効率向上による製造時の CO_2排出量低減、さらに、発生するメタンの低減方法を検討する。

また、今まで検討されていない PP による生物多様性への影響、劣化について株式会社 Green Guardian と算定評価を進めていく。

8. 本検討肥料の事業性

日本における PP 被覆肥料は、水稲施肥体系の中核を成す資材として長年にわたり使用されてきた。その数量規模は、被覆尿素換算で年間約 40 万トンに達すると推定される。PP 被覆肥料の市場規模については、金額ベース・数量ベースのいずれにおいても、単独で整理された公的統計が存在しない。

そこで、本稿では、水稲施肥体系に着目し、

「水稲作付面積 × 一発肥料普及率 × 被覆尿素配合率」

から PP 被覆肥料の数量ベース市場規模（t/年）を推定する。

（1）推定に用いる前提条件の整理

①水稲作付面積

農林水産省の作物統計によれば、近年の日本における水稲作付面積（主食用）は、125～136 万 ha の範囲で推移。そこで水稲作付面積：130 万 ha とする。

②一発肥料（全量基肥）普及率

水稲における被覆肥料の主要用途は、「一発施肥（全量基肥施用）」である。一発肥料は、施肥回数削減、労働時間短縮、高齢化対応といった理由から、特に平坦地・大規模水田を中心に普及してきた。普及率について、全国一律の公的統計は存在しないので、現場ヒアリング(全農等の情報)から、全国平均では 30～50%程度と仮定する。そこで、一発肥料普及率を 40%とする。

③被覆尿素配合率

一発肥料において、全肥料量のうち、溶出制御を担う成分として被覆尿素が使用される。ただし、一発肥料＝全量が被覆尿素ではなく、一部は速効性成分、一部は非被　覆尿素・化成肥料で構成される。現行の配合設計事例を踏まえると、被覆尿素比率は、30～60%程度が一般的な範囲と考えられる。そこで被覆尿素配合率：40%（質量比）とする。

④水稲施肥量（窒素基準からの換算）

水稲の窒素施肥量は、地域・品種・作型により差があるが、慣行的には 8～10 kg-N/10a 程度が一般的である。そこで窒素施肥量：9 kg-N/10a 尿素換算（N 含有率 46%）として換算する。

⑤ PP 被覆肥料数量の推定

・推定式

以上の前提より、PP 被覆肥料（被覆尿素）使用量は、以下で表される。

PP 被覆尿素量［t/年］
＝ 水稲作付面積［ha］
× 一発肥料普及率［-］
× 10a あたり尿素施肥量［kg/10a］
× 被覆尿素配合率［-］

・代入数値（基準ケース）

水稲作付面積：1,300,000 ha

一発肥料普及率：0.40

窒素施肥量：9 kg-N /10a

尿素換算：9 / 0.46 ≒ 19.6 kg 尿素/10a

被覆尿素配合率：0.40

一発肥料対象面積：1,300,000 × 0.40 = 520,000 ha

被覆尿素量：19.6 kg/10a × 0.40 = 7.84 kg/10a

年間被覆尿素量：520,000 ha × 100 × 7.84 kg≒ 408,000 t/年

⑥推定結果

以上より、日本における PP 被覆肥料（被覆尿素）市場規模は、数量ベースで約 40 万 t/年規模と推定される。

したがって、2030 年に向けて掲げられている「プラスチックを使用した被覆肥料に依存しない農業」という目標は、環境配慮の理念として語られるだけでは不十分であり、この 40 万トン規模の市場をどのような時間軸と論理で変化させていくのかを明示しなければ、本実証事業の実効性を持ち得ない。

40 万トンという数量は、実証事業段階の新素材や一部地域での実証によって自然に吸収される規模ではない。この市場は、長年にわたる技術蓄積の上に構築されており、被覆材としての PP は、溶出制御精度、機械的強度、輸送・保管安定性といった性能を総合的に満たす素材として選択されてきた。さらに、水稲という主食作物においては、施肥の失敗が収量や品質に直結するため、新技術の導入に対する慎重さが構造的に存在する。このため、PP 被覆肥料の環境問題が明確になった現在においても、「問題があるから直ちに代替する」という単純な意思決定は成り立たず、結果として PP 被覆肥料は「課題を抱えつつも使われ続ける資材」という位置に置かれている。

こうした状況を踏まえると、2030 年という期限は、全面的な技術転換を一気に達成するための期限ではなく、既存市場の構造を段階的に変質させるための到達目標として再解釈する必要がある。すなわち、2030 年時点で目指すべき状態とは、PP 被覆肥料が市場から完全に消滅することではなく、標準的な選択肢ではなくなり、例外的な用途に限定されることである。このような再定義は、技術的現実性と産業的持続性の両立という観点からも合理的である。

この前提に立てば、2030 年に至るまでのロードマップは、明確に段階分けされた時間軸として理解される。まず初期段階においては、40 万トン市場全体を対象とするのではなく、その中に含まれる多様な利用形態を分解し、どの部分が比較的早期に変え得るのかを見極めることが中心課題となる。一発肥料の普及率が高く、被覆尿素の配合割合が大きい地域や作型では、代替技術の効果が比較的明瞭に現れる可能性が高く、この段階では数万トン規模の先行的代替領域が現実的な対象となる。この時点で重要なことは、PP 被覆肥料を否定することではなく、「PP を使わずとも、どの程度まで既存機能を担えるのか」という選択肢を、農業現場と産業側の双方に提示することである。

次の段階では、PP 被覆肥料を全面的に置き換えるという発想そのものから距離を取り、「PP 使用量を減らす」という視点が中心となる。この段階においては、被覆厚の低減、被覆率の低下、あるいは PP 以外の材料との複合化など、既存の製造・施肥体系を大きく崩さずにプラスチック依存度を下げる方法が現実味を帯びてくる。数量的には、40 万トン市場のうち 10 万トン規模、場合によってはそれ以上が、完全な PP 被覆肥料以外の形態へと移行する可能性が生じる。この移行は、農業現場にとっては施肥設計を根本的に変えずに対応できる範囲で進むことが重要であり、肥料メーカーにとっても既存設備やノウハウを活かしながら対応できる点に意義がある。

2030 年が視野に入る最終段階では、PP 被覆肥料は市場に残存するものの、その位置付けは大きく変化していることが想定される。40 万トン市場のうち 7〜8 割が非 PP 系技術へと移行し、残余は特殊用途や例外的条件下でのみ使用される。この状態においては、政策的にも「PP を用いない肥料」が標準として扱われ、実証事業開発や補助制度、普及指導もそれを前提としたものへと再編される。ここで重要なのは、PP 被覆肥料が「禁止されるから使われない」のではなく、「選ばれなくなるから使われなくなる」という状態を実現することであり、そのためには代替技術が性能面・供給面・価格面で現実的な選択肢として成立している必要がある。

このようなロードマップの中で、ロジンを用いた非 PP 系技術が持つ意義は多層的である。

第一に材料特性の観点から見ると、ロジンは疎水性と一定の熱可塑性を併せ持つ天然由来樹脂であり、肥料成分の溶出制御に必要な「水の浸入を緩やかに制限する」という機能を本質的に備えている。これは、PP の単純な代替材料というよりも、被覆という概念そのものを再設計する際の構成要素として位置付けることができる。

第二に産業構造の観点から見ると、ロジンは製紙工程、とりわけクラフトパルプ製造における副産物として得られる資源であり、国内外に安定した発生源を有している。この点は、原油価格や国際情勢に強く影響される PP 樹脂とは対照的であり、長期的な価格安定性や供給リスク低減という観点で大きな意味を持つ。さら

に、黒液回収という既存インフラを活用できることから、新規資源開発ではなく「既存産業の延長線上での高度利用」として位置付けられる点も、事業化の現実性を高める要因となる。

第三に政策適合性の観点から見ると、ロジンは再生可能資源由来であり、プラスチック削減、バイオマス利用促進、国内循環資源の活用といった政策目標と整合的である。2030 年に向けたプラ不使用目標を、単なる規制ではなく産業転換の契機として捉える場合、ロジンを基盤とする技術は「環境に良いから採用される」のではなく、「政策・産業・技術の三者が交差する合理的選択肢」として位置付けることができる。

以上を総合すると、40 万トンという数量規模を起点とした 2030 年シナリオは、理想的な代替技術を一つ見つける物語ではなく、既存市場をどの速度で、どの構造に変えていくかという変質のプロセスとして理解されるべきである。ロジンを用いた非 PP 系技術は、そのプロセスにおいて、初期の部分代替から中期の削減フェーズ、そして最終的な主流転換に至るまで、連続的に関与し得る数少ない選択肢である。2030 年のプラ不使用目標を現実の事業として成立させるためには、このような数量と時間軸を共有し、その中で各技術が果たす役割を具体的に位置付けていくことが不可欠である。

事業性を持たせるには、社会環境、理念だけでは対応できない。コストメリット、あるいは、法整備の中で PP 被覆肥料が使用できなくなるという状況が必要である。そこで現行の PP 被覆肥料と本検討肥料の推定価格と外因、例えば石油価格が上昇した場合価格差が縮まるかを推定する。

（２）材料単価の前提（2024-2025 年の公開相場ベース）

① PP（ポリプロピレン）

原料ナフサ・プロパン価格に強く依存

平常時：**180-220 円/kg**

原油高騰時（Brent 120 USD/bbl 級）

：300-350 円/kg(アメリカ・イスラエルのイラン攻撃による高騰時の概算値)

平常時：200 円/kg

高騰時：320 円/kg

② ロジン（ガムロジン／トール油ロジン混合想定）

木材・パルプ副産物、原油非依存

想定レンジ：180-250 円/kg

実証事業・工業用途平均：**220 円/kg**

③ セルロース系充填材（解繊古紙）

新聞古紙、非古紙の工業用パルプ代替

想定原価：30-50 円/kg

評価用：**40 円/kg**

④ 本検討肥料の被覆組成（例）

ロジン：20 wt%

粉砕パルプ：6 wt%

（３）コスト比較（被覆材 1 kg あたり）

ケース A：尿素 90 / PP10（1000 kg 中：尿素 900、PP100）

材料費

= 900×77 + 100×182

= 87,500 円/t

被覆加工費（PP 100 kg × 10 円/kg）

= 1,000 円/t

合計：88,500 円/t

（単価根拠：尿素 77、PP182）

ケース B：尿素 80 / ロジン 20 / 乾式粉砕パルプ 6（比を正規化）

（1000 kg 中：尿素 754.7、ロジン 188.7、パルプ 56.6）

材料費

= 754.7×77 + 188.7×230 + 56.6×40

= 103,774 円/t

被覆加工費（ロジン+パルプ 245.3 kg × 10 円/kg）

= 2,453 円/t

合計：**106,226 円/t**

（単価根拠：尿素 77、ロジン 230）

ということから、

現行 PP 被覆肥料は 88 円/kg、ロジン乾式粉砕パルプ混錬は 106 円/kg となる。

ここで、2026 年 3 月の国際情勢、特にアメリカ・イスラエルとイラン間の攻撃による石油価格の上昇という局面から、以下に石油価格上昇による現行 PP 被覆肥料とロジン乾式粉砕パルプ混錬品の価格について再推定を試みる。

（４）石油価格上昇時の価格差の検証（2026 年 3 月 26 日時点の国際情勢を踏まえた数値分析）

2026 年 3 月に入り、イラン情勢の緊張化に伴い、原油市場は供給量そのものよりも、ホルムズ海峡の通航制限・海上保険料の急騰・VLCC チャーター料の上昇 といった「物流リスク」を中心とした価格上昇圧力が強まっている。この結果、Brent 原油価格は 110〜120 USD/bbl 帯に再上昇し、ナフサ価格および PP(ポリプロピレン)価格に直接的な影響を与えている。PP 価格は原油価格に加え、輸送・保険コストの増大によって構造的に高止まりしつつあり、2026 年 3 月 26 日時点では 280〜320 円/kg のレンジに達していると推定される。

この水準は、前節で示した「原油高騰時（Brent 120 USD/bbl 級）」の想定値と整合的である。以下では、PP 価格が上昇した場合に、PP 被覆肥料と本検討肥料

（ロジン＋乾式粉砕パルプ）の価格差がどのように変化するかを、(3)と同じ計算手法で数値検証する。

① PP 価格：280 円/kg（原油 110 USD/bbl 級）
材料費（PP：280 円/kg）加工費合計：98,300 円/t（＝98 円/kg）
→ 本検討肥料（106 円/kg）との差：8 円/kg
② PP 価格：300 円/kg（原油 120 USD/bbl 級）
材料費（PP300 円/kg）加工費合計：100,300 円/t（＝100 円/kg）
→ 差：6 円/kg
③ PP 価格：320 円/kg（原油 130 USD/bbl 級、物流リスク高）
材料費（PP320 円/kg）加工費合計：102,300 円/t（＝102 円/kg）
→ 差：4 円/kg
④ PP 価格：350 円/kg（原油 150 USD/bbl 級、海上保険料急騰）
材料費（PP350 円/kg）加工費合計：105,300 円/t（＝105 円/kg）
→ 差：1 円/kg

⑤ PP 価格：360～370 円/kg（原油 160～170 USD/bbl 級、ホルムズ海峡実質封鎖）
材料費（PP360 円/kg）加工費合計：106,300 円/t（＝106 円/kg）
→ 本検討肥料（106 円/kg）と完全に同水準
材料費（PP370 円/kg）加工費合計：107,300 円/t（＝107 円/kg）
→ ロジン系が 1 円/kg 安価となり、価格が逆転

・価格差の交差ポイント（ティッピングポイント）

以上の数値検証から、PP 被覆肥料とロジン系被覆肥料の価格が交差する条件は以下の通りである。

・交差条件

これは、Brent 原油：160～170 USD/bbl ホルムズ海峡の通航制限、海上保険料の危険海域加算の最大化、VLCC チャーター料の高騰が重なる局面に相当する。

2026 年 3 月 26 日時点の国際情勢（イラン情勢の緊張化）を踏まえると、この価格帯は「極端な想定」ではなく、十分に現実的なリスクシナリオ と評価できる。

・総括

価格差は交差点に向けて急速に縮小している。2026 年 3 月時点の PP 価格(280～320 円/kg）は、すでに本検討肥料との差を 4～8 円/kg にまで縮小させており、PP 価格が 360 円/kg に達する局面では、両者の価格は完全に一致し、370 円/kg で逆転する。

すなわち、ロジン系被覆材は「環境配慮型素材」という位置付けを超え、国際情勢の変化によって経済合理性を獲得し得る代替技術 となりつつある。

（５）石油価格の上昇による価格差の検証

PP（ポリプロピレン）価格は、単純な原油価格の関数ではなく、

① 原油価格（Brent）

② 物流リスク（航路遮断・チャーター料）

③海上保険料（戦争保険・危険海域加算）

の三要因が重層的に作用する「複合変数」となる。

特に 2026 年からのイラン情勢に見られるように、ホルムズ海峡の不安定化は、供給量もさることながら輸送リスクを通じて PP 価格に強い上昇圧力を与えている。海峡を通過する原油は世界供給の約 20%を占めており、海上保険の停止や迂回航路の発生は、ナフサ価格・輸送コスト・保険料を同時に押し上げる構造を持つ。このため、PP 価格は以下のような概念式で整理できる。

ここで、a・b・c は市場状況に応じて変動する係数であり、特に b（物流リスク）と c（保険料）は、地政学リスクが高まる局面で急激に増大する。

・シナリオ別の PP 価格レンジ

この「320～380 円/kg」というレンジは、前節で示した 「PP 価格が 360～370 円/kg でロジン系と価格逆転」 の条件に現実味を与えるものとなる。

すなわち、PP 被覆肥料の事業性は、単なる原油価格の動向ではなく、地政学リスクを含む総合的なエネルギー・物流リスクの関数として再評価する必要がある。

（６）ロジン系被覆材の量産時コスト低減カーブ

一方、ロジン系被覆材は、木材・パルプ産業の副産物としての安定供給で原油価格に依存しない価格構造と既存クラフトパルプ工程との親和性、黒液回収ボイラ等の既存インフラ活用といった特性を持ち、量産化に伴う 構造的なコスト低減余地を有している。

ロジン系被覆材のコストは、以下の三要素に分解できる。

・ 段階別のコスト低減イメージ

① 実証段階（現在）

・　　ロジン：220～230 円/kg

・　　パルプ：40 円/kg

・　　加工費：高（ライン専用化前）

→ PP より高いが、環境性能によるプレミアム領域

② 中規模量産段階（専用ライン整備後）

・　　ロジン：200 円/kg 台前半へ低下

・　　パルプ：30～40 円/kg で安定

・　　加工費：二軸混錬条件最適化により低減

→ 現状比で 10～15%のコスト低減余地

③ 本格量産段階（10 万トン級市場）

・　　ロジン：190〜210 円/kg レンジで長期安定

・　　パルプ：低コスト繊維源の活用が進む

・　　加工費：自動化・連続化により PP と同等以下

→ PP 高騰局面では完全に価格競争力を持つ

・コストカーブの交差点（ティッピングポイント）で

PP は

・　　原油価格

・　　物流リスク

・　　保険料

・　　脱炭素政策（炭素税・プラ規制）

により 上昇圧力 を受ける一方、

ロジン系は

・　　副産物利用

・　　量産効果

・　　国内循環資源化

により 低減していく可能性を持つ。

この「逆向きのコストカーブ」が交差する地点こそが、ロジン系被覆材が主流技術へ転換する事業的転換点である。

（７）事業性の再評価（総合）

以上の分析を統合すると、ロジン系被覆肥料の事業性は、単なる環境配慮型素材の域を超え、PP 価格の変動リスクを吸収し得る「経済合理性を備えた代替技術」として位置付けられる。特に、イラン情勢に代表される地政学リスク、ホルムズ海峡の物流遮断リスク、もう一つあまり報道されていない海上保険料の急騰と、さらに脱炭素政策による化石資源コストの構造的上昇が重なる局面では、PP 価格は 360 円/kg を超え、ロジン系が PP を価格面で逆転する現実的シナリオが成立する。

したがって、2030 年に向けた「プラスチック依存からの脱却」は、理念ではなく、市場構造・政策誘導・技術成熟の三者が交差する産業転換プロセスとして捉えるべき状況にある。

ロジン系被覆材は、そのプロセスの初期・中期・最終段階のいずれにも連続的に関与し得る数少ない技術であり、本実証事業の成果は、単なる素材開発ではなく、40 万トン市場の構造転換を支える基盤技術の確立として大きな意義を持つ。

なお、これらは原材料・変動費による価格の推定であるため、設備費と製造にかかるエネルギーの情報も今後収集して、より現実的な価格推定を行っていく。
また、ロジン乾式粉砕パルプ混錬価格のコストアップ要因のロジン比率の低減が可能か今後検討していく。

9. まとめと今後の進め方

本実証事業における検討は、わが国の水稲栽培を中心とする集約的農業体系において長年利用されてきた緩効性被覆肥料が、その高い農業的有効性の背後で内包してきた環境的・資源的課題を、材料設計および製造プロセスの両面から再構成しようとする取り組みとして位置づけられる。

従来の被覆肥料は、一発施肥による省力化、施肥作業の平準化、施肥ムラの低減といった点で農業現場に大きな利便性をもたらしてきた。しかしその利便性の裏側には、被覆材として用いられてきたポリプロピレン（PP）をはじめとする石油由来樹脂が施肥後に自然環境中で分解されず、土壌中に長期残存する、あるいは河川・海洋へ流出し、結果としてマイクロプラスチック問題の一因となるという構造的問題が存在してきた。

この問題は、単に農業資材の一品目に関する個別課題ではなく、農業という生物生産活動が、資材供給、製造、使用、廃棄というライフサイクル全体を通じて、どのように社会的環境負荷と結びついているかを問い直す契機となっている。特に農業資材は使用後に回収されることを前提としない場合が多く、環境中への拡散が避けられないという特性を有している。この点において、被覆肥料はプラスチック包装材や工業製品とは異なる評価軸を必要とし、単純に既存の生分解性材料を代替適用すれば問題が解決するという性質のものではない。むしろ、農業資材に求められる「環境中での最終挙動を設計する」という視点こそが、今後の技術開発において不可欠となる。

こうした認識の下で進められてきた本検討は、「被覆肥料に求められる本質的機能とは何か」「その機能をどのような材料設計とプロセス設計によって実現し得るのか」という根源的な問いを出発点としている。従来の PP 被覆肥料が提供してきた溶出制御機能を無条件に踏襲するのではなく、農業的に許容される溶出特性、被膜の耐久性、施肥後の崩壊挙動を改めて整理し、それらを環境負荷低減と両立させるための設計空間を探索することが、本検討の基本的立場である。

この設計空間の中核材料として位置づけられるのが、ロジンおよびセルロース系材料である。ロジンは松由来の天然樹脂酸を主成分とし、疎水性および一定の

耐水性を有する天然由来材料である。特に、クラフトパルプ製造工程に付随して得られる黒液や粗トール油から回収されるトール油ロジンは、既存の製紙産業インフラの中で必然的に発生する副産物であり、新たな森林伐採や化石資源採掘を必要としない点で、資源循環性およびライフサイクル全体での環境負荷低減という観点から重要な意味を持つ。

ロジンはその化学構造に由来して石油系高分子とは異なる分解挙動や環境応答性を示す可能性が指摘されている一方、材料としては脆性が高く、単独では肥料被覆材として求められる機械的安定性や加工適性を十分に満たすことが難しい。このため、本検討ではロジンを単独材料として用いるのではなく、複合化を前提とした材料設計が採用されてきた。

特に乾式粉砕パルプとの複合化は、ロジンの脆性を補うだけでなく、被覆層内部に微細な構造的不均一性を意図的に形成するという新しい設計思想をもたらした。乾式粉砕パルプは新聞古紙等を乾式で微細化した材料であり、湿式パルプとは異なる繊維形態・分散特性を有している。しかし新聞古紙は回収ロットによって含有成分が変動し得ること、印刷インキや充填剤などの不確定要素を含む可能性があることから、長期的な材料安定性や品質管理の観点で課題が残る。このため、今後は TMP（Thermo Mechanical Pulp：熱機械パルプ）などのバージンパルプを使用する方向へ移行する。TMP は比較的安価で安定供給が可能であり、繊維長や化学成分が一定であるため、混錬複合化材としての品質再現性を高める上で有効である。

ロジンとセルロース系材料の複合化は、単なるバイオマス比率の向上や材料コスト低減にとどまらず、被膜の連続性、溶出制御性、環境中での崩壊挙動を調整するための新たな設計自由度をもたらす。繊維状材料がロジンマトリクス中に分散することで、被覆層内部に微細な水路や応力集中部が形成され、これが尿素溶出経路や被膜の力学的応答に複合的な影響を与える可能性がある。従来の PP 被覆材が均質な高分子膜を形成することを前提としてきたのに対し、本複合体は「構造的多様性を内包した被覆層」を設計対象とする点に特徴があり、肥料被覆材の概念そのものを再定義する試みである。

製造プロセスについても、当初から溶剤を用いない二軸混練プロセスを前提に据えてきた。これは環境負荷低減や工程簡素化といった一般的利点に加え、既存の肥料製造設備や樹脂加工技術との親和性を確保し、将来的な量産・社会実装を見据えた現実的な判断である。ロジン、セルロース系材料、尿素を同時に混練・造粒するこのプロセスは、従来の「尿素粒子を後から樹脂で被覆する」という発想から一歩踏み出し、「肥料成分と被覆材を一体として設計・製造する」という新たな概念を提示している。

配合設計に関しては、単一の最適配合を導出するのではなく、被覆量および組成比を連続的な設計変数として扱うアプローチを採用してきた。初期段階では尿素 90／ロジン 10 といった薄被覆構成を通じて基本特性を把握し、その後、セルロース系材料を加えた尿素 90／ロジン 10／パルプ 10、さらには尿素 80／ロジン 20／パルプ 6 といった構成へと検討範囲を広げてきた。これらの配合は、重量比だけを見れば被覆量の増加に伴う材料コスト上昇という側面を持つが、施肥対象作物、圃場条件、求められる溶出期間、環境規制対応といった利用条件に応じて適切な被覆量・組成が変わり得ることを前提に、設計レンジとして提示している。

製造および品質管理の観点では、ロジン―セルロース複合系は従来の PP 被覆肥料と比較して被膜厚さや溶出挙動に一定のばらつきを内包し得ることも明確になっている。本検討では、このばらつきを単なる欠点として排除するのではなく、農業的に許容される範囲をどのように定義し、管理するかという視点から評価を進めてきた。これは工業製品としての均一性を絶対視する発想から、生物生産系としての農業の特性を踏まえた評価軸へと転換する試みであり、本技術の社会実装を考える上で重要な示唆を与えている。

さらに、本技術の社会的意義を考える上で欠かせないのが「海洋生分解性」である。本年度は製造性・溶出制御性・生育性の評価に重点を置いたため、海洋分解性および水田分解性の評価は簡易測定にとどまったが、これは初年度として自然なステップであり、むしろ次年度以降に向けてどの論点を深めるべきかが明確になったという点で大きな成果である。

特に、2025年初頭にアメリカ農務省（USDA）が「肥料への合成ポリマー使用を認めない」とする方針を示したことは、国際的に肥料被覆材のあり方が大きく転換しつつあることを象徴している。USDAの方針は、農地に投入される資材が環境中でどのように分解し、最終的にどのような形で残留するのかという問いを、世界的な政策課題として明確に位置付けた点に大きな意味がある。日本国内においても、環境省はマイクロプラスチック問題を海洋環境保全だけでなく人体安全性の観点からも重視しており、農地由来プラスチックの海洋流出は政策的にも看過できない課題として扱われつつある。

こうした国際的・国内的な政策動向を踏まえると、ロジン―セルロース複合被覆材は、単なる代替素材ではなく、環境中での最終挙動を設計するという新しい肥料被覆材の概念を体現する技術として位置付けられるべきである。そのためには、海洋模擬条件下での分解速度、分解生成物の化学的特性、微細粒子の残留性、海洋微生物群集との相互作用といった海洋分解性の精密評価に加え、水田土壌中での分解速度、嫌気・好気条件の違い、CH_4排出の可能性、土壌微生物群集への影響といった水田環境に特化した分解モデルの構築が不可欠である。また、分解過程で生成する低分子化合物の毒性評価や食物連鎖を通じた移行可能性の検討など、人体安全性の観点からの評価も求められる。

今年度の実証事業では、ラボスケールの肥料製造を実機想定の二軸混錬機で検討し、筑波大学の水田で生育性評価を行うことで、どの程度の肥効を持ち得るかを現場レベルで検証することを主眼として進めた。海洋分解性および水田分解性については初年度は簡易測定にとどまったが、次年度はより精密で体系的な評価を実施し、技術の実効性を明確にする計画である。私たちは、これらの課題を一つずつ丁寧に解きほぐしながら、次年度の実証事業において、より実効性のある開発へとつなげていく。

さらに、ロジン―セルロース複合被覆材の科学的基盤を強化するためには、ロジンの微生物分解経路の詳細解明が不可欠である。ロジンはアビエチン酸を主成分とする樹脂酸であり、その分解には特定の微生物が関与することが知られているが、水田環境における分解経路は未解明の部分が多い。嫌気的条件下ではロ

ジンの分解が遅延する可能性があり、逆に好気的条件下では分解が促進される可能性がある。これらの分解経路を詳細に解明することで、材料の環境挙動を精密に予測し、より安全で持続可能な材料設計が可能となる。

また、ロジン―セルロース―尿素の三者を加熱混練することで形成される三次元ネットワーク構造のモデル化も、本技術の高度化に向けた重要な課題である。従来の PP 被覆材は均質な膜構造であったため、溶出挙動は比較的単純な拡散モデルで説明できた。しかし、本技術で形成される構造は、ロジン相、尿素相、セルロース繊維が複雑に絡み合った多相系であり、内部に微細な水路や応力集中部が形成される。この構造は、単なる膜厚依存型ではなく、材料内部の構造そのものが溶出挙動を規定する「構造制御型緩効性」を実現している。

この三次元ネットワーク構造を数理モデルとして定式化し、混練条件や材料比率が構造形成に与える影響を解析することは、溶出制御性の精密化に直結する。レオロジー解析、X 線 CT、電子顕微鏡観察などを組み合わせることで、材料内部の構造を可視化し、構造と機能の関係を定量的に理解することが可能となる。

さらに、農業経済への波及効果という観点からも、本技術は大きな可能性を持つ。PP 被覆材は石油由来であるため、原料価格が国際情勢に大きく左右される。特に近年は、地政学的リスクの高まりや産油国の政策変更により、石油価格が不安定化しており、PP 被覆肥料の価格も大きく変動している。これに対し、ロジンや粉砕パルプは国内で安定供給可能なバイオマス資源であり、石油価格の高騰や供給不安の影響を受けにくい。これは、農業資材の価格安定化に寄与し、農家の経営リスクを低減するという重要なメリットを持つ。

総じて、ロジン―セルロース複合被覆材は、従来の PP 被覆肥料とは根本的に異なる材料設計思想に基づいており、環境負荷低減、資源循環性、機能、総じて、ロジン―セルロース複合被覆材は、従来の PP 被覆肥料とは根本的に異なる材料設計思想に基づいており、環境負荷低減、資源循環性、機能性、経済性のすべてにおいて新しい価値を提供する技術である。とりわけ、石油由来樹脂に依存しないという点は、近年の国際情勢を踏まえると極めて重要な意味を持つ。石油価格は地政学的リスク、産油国の政策、国際紛争、為替変動など多様な要因に

よって大きく変動し、PP 被覆肥料の価格もその影響を直接受ける。これに対し、ロジンやセルロースは国内で安定的に供給可能なバイオマス資源であり、原料価格の変動幅が比較的小さい。したがって、本技術は農業資材の価格安定化に寄与し、農家の経営リスクを低減するという経済的メリットを持つ。

さらに、木質系材料を用いる本技術は、国際的なバイオエコノミー政策とも整合する。欧州連合（EU）はバイオベース材料の利用を強く推進しており、森林資源の高付加価値化を重要な政策目標として掲げている。アメリカでも USDA の BioPreferred Program がバイオベース製品の普及を後押ししている。こうした国際的潮流を踏まえると、ロジン―セルロース複合被覆材は、国内のみならず海外市場においても競争力を持つ可能性が高い。特に、USDA が合成ポリマーの使用を禁止する方針を示したことは、世界の肥料市場における材料選択の基準を大きく変える可能性があり、木質系材料を用いた本技術はその変化に先んじて対応し得る。

また、本技術の環境調和性を評価する上で、水田土壌における微生物群集、すなわち菌叢の変化を丁寧に観察することは不可欠である。水田は嫌気・好気が周期的に変動する特殊な生態系であり、メタン生成菌、硝化菌、脱窒菌、セルロース分解菌など多様な微生物が複雑に相互作用しながら物質循環を担っている。ロジンやセルロースが分解される過程で生成される中間代謝物が、これらの微生物群集にどのような影響を与えるのか、またその影響が温室効果ガス排出や養分循環にどのように反映されるのかを明らかにすることは、材料の安全性評価だけでなく、水田生態系の理解を深める上でも重要である。

特に、セルロース分解に伴う CH_4 排出の可能性は、気候変動対策の観点から無視できない論点である。水田はもともとメタン排出源として知られているが、被覆材がその排出量にどの程度寄与し得るのか、あるいは寄与しないのかを科学的に明らかにすることは、技術の社会的受容性を高める上で極めて重要である。今後は、メタゲノム解析やメタボローム解析などの先端技術を活用し、微生物群集の動態を精密に評価することで、材料の分解挙動と生態系応答の関係を明らかにしていく必要がある。

さらに、ロジン―セルロース複合被覆材の緩効性発現メカニズムを科学的に解明することも、本技術の高度化に向けた重要な課題である。従来の PP 被覆肥料は、尿素粒子の外側に均質な高分子膜を形成し、その膜厚と拡散係数によって溶出速度を制御するという比較的単純な構造を持っていた。これに対し、ロジンと粉砕パルプを尿素とともに加熱混練する本技術では、尿素が溶融状態でロジンと相互作用し、さらにその中にセルロース繊維が三次元的に分散・絡み合うことで、従来とは全く異なる複合構造が形成される。

この三次元ネットワーク構造は、尿素の溶出挙動に対して複合的な影響を与える。ロジン相は疎水性であるため水の浸透を抑制し、尿素の溶解速度を低下させる。一方、セルロース繊維は親水性であり、水を吸収して膨潤することで内部に微細な水路を形成する可能性がある。この二つの相反する性質が複雑に組み合わさることで、単純な拡散モデルでは説明できない多段階的な溶出挙動が生じる。さらに、混練時の温度、剪断力、材料比率によってネットワーク構造の密度や連続性が変化し、それが溶出速度の調整に直接影響する。つまり、本技術の緩効性は、従来の膜厚依存型ではなく、材料内部の微細構造に依存する「構造制御型緩効性」であると言える。

この構造制御型緩効性のメカニズムを解明するためには、三次元ネットワーク構造のモデル化が不可欠である。レオロジー解析、X 線 CT、電子顕微鏡観察などを組み合わせることで、材料内部の構造を可視化し、構造と機能の関係を定量的に理解することが可能となる。これにより、混練条件や材料比率を調整することで、溶出特性を精密に制御するための設計指針を確立することができる。

また、海洋生分解性と土中生分解性の両立は、本技術の社会的意義を裏付ける重要な要素である。農地から流出した微細な被覆片が海洋に到達する可能性は否定できず、海洋環境における分解性を確保することは、マイクロプラスチック問題への対応として極めて重要である。一方で、水田土壌における分解性は、肥料の機能性と環境影響の双方に直結する。したがって、海洋と土壌という異なる環境における分解挙動を丁寧に評価し、その結果を材料設計に反映させることで、環境中での最終挙動を精密に制御することが可能となる。

最後に、本技術の社会実装を進める上では、単に材料特性や溶出制御性を評価するだけでは不十分であり、農業現場における実際の使用条件を踏まえた総合的な評価が不可欠である。水田環境は季節変動、土壌条件、湛水・落水管理、微生物群集の変化など多様な要因が複雑に絡み合う動的な環境であり、被覆材の分解挙動や溶出特性はこれらの要因によって大きく左右される。したがって、実証試験においては、単に肥効の有無を確認するだけでなく、被覆材の崩壊過程、分解生成物の挙動、土壌微生物への影響、さらには水管理との相互作用といった多面的な観点からの評価が求められる。

ロジンという木質系樹脂を用いた肥料は、従来の PP 被覆肥料とは異なる材料特性を持つため、新たな肥料として肥料登録を行う必要があるだけでなく、水田耕作地における環境変化を総合的に評価する必要がある。特に、菌叢の変化は水田生態系の機能に直結するため、今後は微生物生態学的な視点からの詳細な解析が不可欠である。ロジンが微生物の基質として利用される可能性、セルロース分解菌の活性変化、メタン生成菌の動態変化など、多様な観点からの研究が求められる。

本技術の真価は、単に「分解する被覆材」を開発することにとどまらず、「生態系と調和する被覆材」を設計するという新たな視点を提示している点にある。水田という生物界の変化を丁寧に観察し、菌叢の変動を科学的に解明することは、ロジン―セルロース複合被覆材の安全性と有効性を確立する上で不可欠であり、同時に持続可能な農業の実現に向けた重要な知見を提供することにもつながる。

今後の実証事業では、これらの観点を深く掘り下げ、水田生態系の変化を包括的に評価することで、本技術の社会実装に向けた確固たる科学的基盤を築いていきたいと考えている。

引用文献、出典

１．背景

1　環境省．海洋プラスチック問題の現状と課題．政府広報オンライン，2025.

2　総務省.海洋プラスチックごみに対する我が国の取組と国際動向.総務省資料,

3　政府広報オンライン．海洋プラスチック問題の解決に向けた取組．政府広報オンライン，2025.

4　環境省．海洋プラスチックごみ対策アクションプラン．環境省，2019.

5　United States Department of Agriculture (USDA) Agricultural Marketing Service. National Organic Program: Materials for Organic Crop Production. USDA,

6　Electronic Code of Federal Regulations. 7 CFR Part 205 National Organic Program. U.S. Government

7　BSI 生物科学研究所．物理的緩効性肥料（Physical controlled release fertilizer）．BSI 生物科学研究所，年不詳.

8　農林水産省.プラスチック被覆肥料の被膜殻の流出防止について.農林水産省,

9　農林水産省.令和 5 年度 緩効性肥料におけるプラスチック被膜殻の流出防止等に関する調査．農林水産省，2024.

10　須戸 幹・岩間 憲治．水田圃場からの被覆肥料カプセルの流出量と流出特性.水環境学会誌，48，135-142，2025.

11　中廣 賢太・他．河川における被覆肥料由来マイクロプラスチックの実態調査.学会講演要旨集，年不詳.

12　環境再生保全機構（ERCA）．農耕地におけるマイクロプラスチックの発生と海域への移行に関する研究【1RF-2001】成果概要．環境再生保全機構，2021.

13　農林水産省.被覆肥料の現状と代替技術に関する整理.農林水産省資料,年不詳.

14　特開平 9-202683．被覆肥料の製造方法．特許庁，1997.

15　特開平 10-25181．被覆粒状肥料の製造方法．特許庁，1998.

16　粕谷 健一・他. 海洋環境における生分解性プラスチックの分解挙動. 日本生分解性プラスチック研究会誌, 年不詳.

17　新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）. 海洋分解性プラスチックの研究開発動向. NEDO 資料, 年不詳.

18　長瀬産業・帝人フロンティア. 海洋生分解性プラスチックに関する技術解説. 企業技術資料, 2025.

19　特開平 11-335193. 分解性を有する被覆粒状肥料. 特許庁, 1999.

20　J-GLOBAL. 分解性を有する被覆粒状肥料（特開平 11-335193）特許情報. 科学技術振興機構, 年不詳.

２．本実証事業について

1　王子ホールディングス株式会社
統合報告書：森林経営、持続可能な林業経営および循環型バイオエコノミーにおける紙・パッケージ事業の役割. 東京：王子ホールディングス株式会社.
https://www.ojiholdings.co.jp/ir/library/integrated-report/

2　王子マテリア株式会社.
包装用紙・板紙製品に関する会社概要および事業内容.
東京：王子マテリア株式会社.
https://www.ojimateria.co.jp/

3　王子グループにおける農業資材、肥料関連事業および包装用途の概要.
東京：王子ホールディングス株式会社.
https://www.ojiholdings.co.jp/　（参照日：2026-03-27）

4　筑波大学 つくば植物イノベーション研究センター（T-PIRC）.
つくば植物イノベーション研究センターの概要：ミッション、組織および研究体制. つくば：筑波大学.
https://www.t-pirc.tsukuba.ac.jp/　（参照日：2026-03-27）

5　筑波大学 T-PIRC ファーム（年不詳）.
実験圃場施設の概要および長期圃場試験・肥料試験の取組.
つくば：筑波大学.
https://farm.t-pirc.tsukuba.ac.jp/ （参照日：2026-03-27）

6　小山 聡, 稲崎史朗, 南川和則, 加藤雅義, 林 宏之（2016）.
イネ殻炭施用による黒ボク土水田における土壌炭素蓄積の増加とCH4およびN2O排出への影響.
Soil Science and Plant Nutrition, 61(5), 873-884.

7　ハリマ化成グループ株式会社（2024）.
統合報告書 2024：松由来化学品事業と森林由来資源の持続可能な利用.
東京：ハリマ化成グループ株式会社.
https://www.harima.co.jp/ （参照日：2026-03-27）

8　ハリマ化成グループ株式会社（年不詳）.
ロジンとは何か：松由来化学品、樹脂酸および産業用途.
東京：ハリマ化成グループ株式会社.
https://www.harima.co.jp/en/pine_chemicals/rosin1.html

9　ハリマ化成グループ株式会社（年不詳）.
クラフトパルプ黒液由来トール油の蒸留およびトール油ロジンの製造.
東京：ハリマ化成グループ株式会社.
https://www.harima.co.jp/products/resins_tall/

10　株式会社 DJK（年不詳）.
高分子材料および複合材料に関する研究開発支援サービスの概要.
横浜：株式会社. DJK
https://www.djklab.com/

11　株式会社 DJK（年不詳）.
二軸混練・押出装置を用いた高分子材料研究およびスケールアップ支援.
横浜： DJK 株式会社
https://www.djklab.com/service/kakousei-290/

12　BUSS AG(2025).DJK 社による高分子・複合材料開発のための試験プラットフォームとしての BUSS Co-Kneader 採用.
https://busscorp.com/news/buss-co-kneader-for-test-center-in-japan/

13　株式会社グリーンガーディアン　会社概要およびライフサイクルアセスメント（LCA）に基づくサステナビリティ評価サービス.
https://www.greenguardian.co.jp/company

14 株式会社グリーンガーディアン　ライフサイクルアセスメント（LCA）コンサルティング、可視化および意思決定への応用.
https://www.greenguardian.co.jp/

６.木質系樹脂を使用した被覆肥料による水稲育成実証試験

1. 気象データ https://www.data.jma.go.jp/risk/obsdl/index.php)

「化石資源由来の肥料被覆材を海洋分解性木質系樹脂で
代替した肥料による実証事業」視察会、報告会、審査会等の実施

現地視察会及び検討会の開催　令和 7 年 12 月 17 日
中間報告会の開催　令和 7 年 11 月 28 日
期末審査会の開催　令和 8 年 2 月 9 日

共同実施者との打合せ・・筑波大学との打合せ　全 15 回(筑波大にて)