

令和 7 年度生研支援センター調査報告書（研究開発構想）

「農林水産・食料分野における微生物活用技術の
研究開発」

令和 8 (2026) 年 4 月



目 次

I	生研支援センター研究開発構想について	4
II	テーマの背景と目的	4
III	対象技術等	6
IV	調査方法	
1.	日本及び海外の研究開発動向調査	7
2.	アドバイザー委員会	7
V	微生物活用技術全体を巡る動向	
1.	主要国の政策と主な研究開発プロジェクト	8
2.	論文・特許の動向	11
VI	各技術について	
1.	微生物を活用した農林水産業の生産性向上に資する技術開発	
1-1	肥料・農薬・バイオスティミュラント・人工土壌	
(1)	技術概要	22
(2)	研究動向	25
(3)	実装化動向	26
(4)	研究課題	28
(5)	実装化課題	29
(6)	研究開発の方向性	30
参考①	：農薬登録コスト	31
参考②	：微生物肥料の費用対効果	32
参考③	：微生物農薬の費用対効果	34
参考④	：バイオスティミュラントの費用対効果	34
1-2	飼料・餌料等（添加物含む）【畜産】	
(1)	技術概要	40
(2)	研究動向	41
(3)	実装化動向	44
(4)	研究課題	45

(5) 実装化課題.....	46
(6) 研究開発の方向性	46
1-3 飼料・餌料等（添加物含む）【水産】	
(1) 技術概要.....	50
(2) 研究動向.....	52
(3) 実装化動向.....	53
(4) 研究課題.....	54
(5) 実装化課題.....	55
(6) 研究開発の方向性	55
2. 微生物を活用した食料生産技術開発（健康に資する食品を含む）	
発酵技術の高度化と多様化－伝統発酵と非伝統発酵の整理.....	58
2-1 伝統発酵による高付加価値食料生産技術開発	
(1) 技術概要.....	59
(2) 研究動向.....	60
(3) 実装化動向.....	61
(4) 研究課題.....	62
(5) 実装化課題.....	63
(6) 研究開発の方向性	63
2-2 微生物による食料生産技術開発（伝統発酵以外）	
(1) 技術概要.....	67
(2) 研究動向.....	69
(3) 実装化動向.....	70
(4) 研究課題.....	71
(5) 実装化課題.....	72
(6) 研究開発の方向性	72
3. 微生物を産業として活用することに資する研究開発	
(1) 技術概要.....	75
(2) 研究動向.....	77
(3) 実装化動向.....	78
(4) 研究課題.....	79
(5) 実装化課題.....	80
(6) 研究開発の方向性	82

VII	微生物を活用した農林水産業または食品産業において 事業化に成功した具体的事例	85
VIII	微生物に纏わる安全問題とリスクへの対策	
1.	バイオテロリズム.....	88
2.	アグロテロリズム.....	88
3.	食中毒.....	88
4.	微生物に起因する健康被害	89
IX	まとめ	
1.	研究開発の方向性一覧	91
2.	微生物活用技術を取り巻くグローバルな動き	94
3.	日本の強みを活かすための5つの戦略	98
参考.	社会的懸念が高いと見込まれる技術の社会受容性	103
X	謝辞.....	104
	(参考)用語解説.....	105

I 生研支援センター研究開発構想について

生物系特定産業技術研究支援センター（生研支援センター）は、農林水産・食品分野における「Society5.0」の早期実現を通じ、この分野で我が国が直面する諸課題を克服するため、農林水産・食品分野における研究開発の支援を専門とする唯一の資金配分機関（ファンディング・エージェンシー）であり、①民間企業、大学、国立研究開発法人などから、幅広く研究課題の提案を募集し、②採択した課題に委託研究費を供給しつつ、社会実装を見据えて研究管理を行うとともに、③その研究成果の情報発信や事業化支援などを通じて、社会実装を推進する、業務を担っている。

こうした資金配分機関としての機能を強化し、農林水産・食品分野の研究開発とその成果の社会実装を一層推進するため、生研支援センターでは令和3年度から、今後の研究開発の方向を提案する「研究開発構想」の策定に取り組んでいる。

研究開発構想では、毎年度、農林水産・食品分野において解決すべき重要課題をテーマとして設定し、これに関する国内外の研究開発の動向等の情報を収集・分析した上で、今後必要と考えられる研究開発の方向性を取りまとめている。その内容は、研究開発やその推進に取り組む関係機関・企業等にも広く周知すべく、ホームページやシンポジウムなどによって公表している。

これまで、令和3年度には「食品企業における研究開発動向と取り組むべき研究開発」、4年度には「我が国の水産業におけるリスク強靱性の強化」、5年度には「スマート農機の中山間地域への展開」、6年度には「農林水産分野のカーボンニュートラルに向けたネガティブエミッション技術の研究開発」をテーマとした研究開発構想をとりまとめた。令和7年度に取りまとめる本報告書が、5本目の研究開発構想となる。

II テーマの背景と目的

近年の国際情勢や地球温暖化の進行等に伴い、食料の安定供給及び気候変動対応の取組みがより一層求められている。

世界の食料需要量が2050年には2010年比1.7倍と見通される¹⁾一方で、我が国では穀物、油脂類の大部分を輸入に依存しており、穀物等を完全自給するためには現在の2倍以上の農地が必要とされる²⁾など、今後も輸入に頼らざるを得ない状況である。さらに、人口増加や食生活の変化に伴い、畜産物を中心としたタンパク質需要が急増することで、世界的に供給が追いつかないタンパク質不足が懸念さ

れている。このような状況を踏まえ、我が国では、みどりの食料システム戦略（令和3年5月）、改正食料・農業・農村基本法（令和6年6月）においても、環境と調和のとれた食料システムの確立を推進することを明確化した。気候変動に対応しつつ、将来にわたって食料を安定的に供給していくためには、持続可能かつ高い生産性を持つ農林水産業の実現、及び農林水産業とは異なる食料生産へのアプローチを追求していくことが求められる³⁾。

その手法として、今回、微生物の活用に注目した。わが国は、伝統的に味噌、醤油、納豆などの発酵食品生産に微生物を活用しており、我が国の各地やアジア地域も含めて微生物資源が豊富である⁴⁾。また、それらを用いた生産技術は、常温常圧の穏やかな条件下で反応が進むことから、環境に優しい、気候変動に対応した、将来にわたる安定的な食料供給技術として重要である。例えば、微生物は、発酵・ガス発酵によって土地・水・気候の制約を受けにくいタンパク質源を短期に量産し、タンパク質供給の量・質・持続可能性を同時に高め、既存の農畜水産依存を分散・補完する役割が期待されている。

微生物の活用を巡っては、内閣府の令和元年の「バイオ戦略」、令和6年の「バイオエコノミー戦略」において、遺伝子改変技術を活用して微生物等によって有用化合物・タンパク質等の物質を生産する「バイオものづくり」等の市場拡大に向けた取組を推進している。また、米国、中国、欧州、シンガポール、韓国等海外においては、バイオものづくり市場の拡大を見据えた投資など産業政策の競争が活発化している⁵⁾。

以上の状況を踏まえ、令和7年度研究開発構想では、「農林水産・食料分野における微生物活用技術の研究開発」をテーマとした。食料安定供給の確保に向けた微生物の活用のアプローチとして、（1）微生物を活用した農林水産業の生産性向上に資する技術開発、（2）微生物を活用した食料生産技術開発（健康に資する食品を含む）、（3）微生物を産業として活用することに資する研究開発、をターゲットとし、国内外における研究開発の動向を調査分析し、その結果を踏まえ、さらなる技術開発や社会実装に向けた課題を特定しつつ、今後の研究開発の方向性を提案する。

参考文献

1. 「フードテックをめぐる状況」（令和7年6月 農林水産省大臣官房 新事業・食品産業部）<https://www.maff.go.jp/j/shokusan/sosyutu/attach/pdf/meguji.pdf>
2. 「食料・農業・農村政策の新たな展開方向 参考資料集」（令和5年6月 農林水産省）https://www.kantei.go.jp/jp/singi/nousui/shokunou_dai4/sankou2.pdf
3. 「農林水産研究イノベーション戦略2025」（令和7年6月 農林水産省）

<https://www.affrc.maff.go.jp/docs/innovate/attach/pdf/index-19.pdf>

4. 「微生物を利用した無塩発酵技術 ―伝統技術と革新技術―」木村啓太郎 美味技術学会誌 21(2) : 137-138, 2022

https://www.jstage.jst.go.jp/article/bimi/21/2/21_137/_pdf/-char/en

5. 「バイオ政策の進展と今後の課題について」(令和5年5月 経済産業省)

https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/shomu_ryutsu/bio/pdf/016_04_00.pdf

Ⅲ 対象技術等

本報告書で取り扱う技術の分類に当たっては、まず、農林水産・食料分野における微生物*の用途の観点から、①一次産業活動における生産資材等としての活用技術と、②食料生産における活用技術に分類し、さらに①では農業分野の技術と畜水産分野の技術に、②では伝統発酵**の延長線上にある技術とそれ以外の技術に、それぞれ分類した。

また、微生物活用技術は、ラボレベル → パイロットレベル → 実機レベルにスケールアップするプロセスにおいて大きな課題があると思われることから、①・②とは切り口を変えて、微生物を産業化するために必要な研究開発を独立して論じることとした。

以上を踏まえ、本報告書の対象技術の具体的な分類は次の通りとする。

1. 微生物を活用した農林水産業の生産性向上に資する技術開発
 - (1) 肥料・農薬・バイオスティミュラント・人工土壌の生産技術開発
 - ・窒素固定、病害対策、化学肥料・農薬削減に資する微生物の活用等
 - (2) 飼料・餌料等（添加物含む）の生産技術開発
 - ・微生物・微生物由来物質の機能活用、温室効果ガス（Green House Gas; GHG）資化等の新規微生物活用、未利用バイオマス活用、養殖システムにおける微生物活用、その他発酵技術の活用 等
2. 微生物を活用した食料生産技術開発（健康に資する食品を含む）
 - (1) 伝統発酵による高付加価値食料生産技術開発
 - ・味噌、醤油、日本酒、納豆、漬物、パン、ヨーグルト、チーズなどの伝統発酵に関する生産技術及び改良された生産技術（麹菌、酵母、納豆菌、乳酸菌等の微生物の活用） 等
 - (2) 微生物による食料生産技術開発（伝統発酵以外）

- ・精密発酵、バイオマス発酵、単細胞タンパク質（SCP）生産、微細藻類利用等の伝統発酵以外の技術 等

3. 微生物を産業として活用することに資する研究開発

- ・探索・育種、デジタルツイン・AI最適化、AIスケールアップ制御等

* 微生物：本報告書が対象とする微生物は、原核生物（細菌、古細菌）、真核生物のうち菌類（真菌）、偽菌類及び微細藻類とした。なお、原生生物や大型藻類、ウイルスなどは対象外とした。

**伝統発酵：微生物を用いて独特の風味や栄養、食感を有する食品を生産する方法

IV 調査方法

1. 日本及び海外の研究開発動向調査

農林水産・食料分野における微生物活用技術に関連する国内外の論文・研究発表・情報誌、特許、スタートアップや企業の動向を、外部への委託を含め調査し、研究者や専門家から研究開発や社会実装の動向・課題及び解決に向けたヒアリングを推進。

2. アドバイザリー委員会

有識者からなるアドバイザリー委員会を開催し、

- ・研究開発構想の調査対象や方法等調査全般に関すること
- ・研究開発構想の調査結果の分析に関すること

等についてご意見をいただくとともに、報告書の原案にご助言をいただいた。

また、1. の調査結果やこれらのご意見を踏まえて作成した報告書の原案について、ご助言をいただいた。

アドバイザリー委員会の開催実績は次のとおり。またアドバイザリー委員は表IV-2-1のとおりである。

- ・第1回：令和7年10月29日（水）13:00～16:00 オンライン開催
- ・第2回：令和8年2月16日（月）13:00～16:00 オンライン開催

表Ⅳ－２－１ アドバイザリー委員会委員一覧（五十音順、敬称略）

氏名	所属・役職
おおにし やすお 大西 康夫	国立大学法人東京大学 大学院農学生命科学研究科 応用生命工学専攻発酵学研究室 教授
きたざわ はるき 北澤 春樹	国立大学法人東北大学 大学院農学研究科 教授
さわの たけし 澤野 健史	(株)三井物産戦略研究所 技術・イノベーション情報部 コンシューマーイノベーション室 シニアプロジェクトマネージャー
しみず ひろし 清水 浩	国立大学法人大阪大学 大学院情報科学研究科 バイオ情報工学専攻代謝情報工学講座 教授
すずき けんご 鈴木 健吾	(株)ユーグレナ 共同創業者 エグゼクティブフェロー
たかぎ ひろし 高木 博史	国立大学法人奈良先端科学技術大学院大学 名誉教授 研究・イノベーション推進機構 研究推進部門長 発酵科学研究室 特任教授
にしはら ひろふみ 西原 宏史	国立大学法人茨城大学 学術研究院応用生物学野 教授
のうとし よしてる 能年 義輝	国立大学法人岡山大学 学術研究院環境生命自然科学学域 教授

V 微生物活用技術全体を巡る動向

1. 主要国の政策と主な研究開発プロジェクト

(1) 政策

各国がバイオ政策を展開しており、微生物や発酵に関する技術はその中の一つに含まれる場合が多い。

米国では、2025年に国家バイオテクノロジーイニシアチブ法案が議会に提出された一方でトランプ大統領によりバイデン政権が制定したバイオものづくりに関する大統領令等が撤回された。

EUは従来規制が厳格であったが、そのスタンスの軟化が進み、バイオエコノミーとフードシステムの転換を柱に、官民連携による発酵・微生物関連イノベーションを後押しする政策が出されている。

中国は2021-25年の間でバイオ製造産業が力強い成長を遂げた。同期間における同産業の総規模は1兆1000億元（約24兆4000億円）に達し、バイオ発酵製

品の生産量は世界全体の70%超を占めた。

表V-1-1 主要国のバイオ政策

	政策	政策の概要
日本	<ul style="list-style-type: none"> バイオエコノミー戦略¹⁾ みどりの食料システム戦略²⁾ 農林水産研究イノベーション戦略2024³⁾ 	<ul style="list-style-type: none"> 微生物・発酵を含むバイオものづくりを成長エンジンと位置付け、農林水産・食料、環境・エネルギーを横断的に推進。土壌・作物・家畜・水産のマイクロバイオーム、バイオステイミュラント、微生物農業等により、生産性向上と環境負荷低減、有機農業拡大を図る。
米国	<ul style="list-style-type: none"> バイオテクノロジー及びバイオマニュファクチャリング推進大統領令⁴⁾ バイオエネルギー・技術局 (BETO) によるバイオエネルギー政策・ロードマップ⁵⁾ 	<ul style="list-style-type: none"> バイオ製造を国家安全保障と競争力の柱と位置付け、微生物セルファクトリー、農業マイクロバイオーム、代替タンパクなどへの投資を拡大。エネルギー省 (DOE) BETOを通じて、燃料・化学品・素材・農業生産に関する微生物・発酵技術のR&Dと実装を支援。
EU	<ul style="list-style-type: none"> ECバイオエコノミー戦略⁶⁾ Farm to Fork戦略⁷⁾ バイオテクノロジー・バイオマニュファクチャリングに関する新政策文書⁸⁾ ライフサイエンスで選ばれるヨーロッパ⁹⁾ 	<ul style="list-style-type: none"> バイオマスとバイオテクノロジーに基づく持続可能なバイオエコノミー構築を目的とし、土壌・腸内マイクロバイオーム、発酵食品、代替タンパク、バイオベース化学品等を重点分野に位置付け。EUの公民連携による共同事業体によりバイオマス発酵・精密発酵の実証・商業化を加速。 官民連携のイノベーション推進およびスタートアップ・中小企業支援を通じ、持続可能な先進的発酵技術のスケールアップと普及を目指す。
中国	<ul style="list-style-type: none"> バイオエコノミー第14次5カ年計画 (2021-2025)¹⁰⁾ 	<ul style="list-style-type: none"> 生物医薬・バイオ農業・バイオエネルギー・素材を統合した生物経済の成長を掲げ、産業バイオテクノロジー/合成生物学・微生物発酵を重点領域として育成。
韓国	<ul style="list-style-type: none"> グリーンバイオ産業育成戦略¹¹⁾ バイオ大転換国家戦略¹²⁾ 	<ul style="list-style-type: none"> 合成生物学・スマート農業・バイオマニュファクチャリングを束ねた国家戦略により、農業マイクロバイオーム、機能性発酵食品、バイオ肥料・飼料など「グリーンバイオ」産業を輸出産業として推進。
シンガポール	<ul style="list-style-type: none"> シンガポール・グリーンプラン2030¹³⁾ 新規食品の安全性評価に関する規制枠組み (SFA)¹⁴⁾ 	<ul style="list-style-type: none"> 2030年までに国内栄養需要の30%を国産化する「30 by 30」を掲げ、都市農業、養殖、代替タンパク・精密発酵食品、食品安全を重点的に支援。 Novel Food制度により、精密発酵由来成分を含む新規食品の安全性評価・承認プロセスを整備。
インドネシア	<ul style="list-style-type: none"> 国家中期開発計画 2020-24、2025-29¹⁵⁾ 有機質肥料・バイオ肥料・土壌改良材に関する規則¹⁶⁾ 	<ul style="list-style-type: none"> 中期開発計画で食料安全保障と持続的な農業生産を重視し、有機農業・低投入型生産の拡大を掲げる。有機肥料・バイオ肥料・土壌改良材の制度整備により、窒素固定菌・リン溶解菌などを活用した微生物肥料・土壌改良材の開発・普及を促進。なお、近年、論文数をKPIとする規則改定により数は増加したが、量先行により論文の質や研究倫理などが課題。

(2) 主な研究開発プロジェクト

主要国バイオ分野のプロジェクトを採り上げ、本調査で設定した微生物を用いた5領域が対象とされているかを整理した (表V-1-2 参照)。

表V-1-2 5領域

微生物を活用した農林水産業の生産向上に資する技術開発	① 肥料・農薬・バイオステイミュラント・人工土壌 ② 飼料・餌料 (畜産・水産)
微生物を活用した食料生産技術開発	③ 発酵食品 ④ 発酵食品以外
微生物を産業として活用することに資する研究開発	⑤ 微生物の産業活用

予算規模は、国やプロジェクトの大きさにより異なり、数十億円～数千億円と幅広い。

EUは①～⑤、米国・中国・韓国・シンガポールは①②④⑤、日本は①④⑤が該当する。

表 V-1-3 主要国のバイオ分野における大型研究開発プロジェクト

主要研究開発プロジェクト	プロジェクト概要	①	②	③	④	⑤	
日本	・バイオものづくり革命推進事業 (NEDO) ¹⁷⁾	・事業期間:2023-2032 ・予算規模:約3,000億円 ・微生物関連テーマ:環境保護と食品供給の安定化を実現する精密発酵技術の開発				✓	✓
	・カーボンリサイクルを加速するバイオ由来製品生産技術の開発 (NEDO) ¹⁸⁾	・事業期間:2020-2026 ・予算規模:約27億円 (2025年度) ・微生物関連テーマ:植物等の生物を用いた高機能品生産技術の開発 (高生産性微生物設計システムの開発)					✓
	・GX先端技術開発プログラム(GteX)(JST) ¹⁹⁾	・事業期間:2023-2033 ・予算規模:数百億円 ・微生物関連テーマ:多様な微生物機能の開拓のためのバイオものづくりDBTL技術の開発				✓	✓
	・ムーンショット型農林水産研究開発事業 ²⁰⁾	・事業期間:2020-2025 (継続中) ・予算規模:課題毎 数十億円 ・微生物関連テーマ:土壌微生物叢アトラスに基づいた環境制御による循環型協生農業プラットフォーム、牛ルーメンマイクロバイオーム完全制御牛ルーメンマイクロバイオーム完全制御	✓				✓

主要研究開発プロジェクト	プロジェクト概要	①	②	③	④	⑤	
米国	・ Agile BioFoundryが提供する研究プログラム ^{21,22)}	・事業期間:2016-2025 (継続中) ・予算規模:累計 数百M USD (数億円) ・ Agile BioFoundryはエネルギー省 (DOE) 所属の7つの国立研究所で構成されるコンソーシアム。DOEのバイオエネルギー技術局が資金提供。テーマの中に「新しいバイオ製造手法の開発」がある。				✓	✓
	・ BioMADEが提供する研究プログラム ^{23,24)}	・事業期間:2021-2025 (継続中) ・予算規模:1億USD超 (官民合計) (約158億円) ・ BioMADEは国防省支援の製造イノベーション研究所。テーマの中に「発酵スケールアップ設備、バイオ由来化学品や農業バイオプロダクトの産業化」がある。		✓		✓	✓
	・ The Agriculture and Food Research Initiative (国立食糧農業研究所が提供) ²⁵⁾	・事業期間:通年公募 ・予算規模:課題毎 数十万~数M USD (数千万~数億円) ・募集テーマの一つに「植物システムの中の農業微生物叢と自然資源」がある。	✓				

主要研究開発プロジェクト	プロジェクト概要	①	②	③	④	⑤	
EU	・ CBE-JU循環型バイオベース欧州共同事業 ^{26,27)}	・事業期間:2021-2031 ・予算規模:約20億EUR (官民合計) (約3644億円) ・研究実績の中に「微細藻類系タンパク質・脂質・色素・炭水化物の持続生産」「バイオ肥料」がある。		✓		✓	✓
	・ Horizon Europeクラスター6「食料・バイオエコノミー・天然資源・農業・環境」 ²⁸⁾	・事業期間:2021-2027 ・予算規模:数M~数千万EUR (数億~十数億円) /件 ・テーマの中に「発酵技術の開発と規模拡大」がある。			✓	✓	✓
	・ EUミッション「A Soil Deal for Europe (EUの土壌協定)」 ^{29,30)}	・事業期間:2021-2030 ・予算規模:全体で数十億EUR (数千億円) ・テーマの中に「土壌健康の回復を目指す土壌マイクロバイオーム、炭素貯留、農業削減に関するR&Iと実証」がある。	✓				✓

主要研究開発プロジェクト	プロジェクト概要	①	②	③	④	⑤
中国	・国家重点研究開発計画「合成生物学」 ^{31,32)}		✓		✓	✓
	・バイオエコノミー第14次5カ年計画に基づく農業・食料関連プロジェクト ³³⁾	✓	✓			✓

主要研究開発プロジェクト	プロジェクト概要	①	②	③	④	⑤
韓国	・グリーンバイオ産業育成R&Dプログラム ³⁴⁾	✓	✓			✓
	・K-Biofoundry：国家バイオファウンドリー ³⁵⁾				✓	

主要研究開発プロジェクト	プロジェクト概要	①	②	③	④	⑤
シンガポール	・シンガポール・フードストーリー研究開発プログラム ^{36,37)}	✓	✓		✓	✓

(注) 予算規模の日本円への換算は、三菱UFJ銀行2026年3月18日の為替相場TTBを用いて行った。

2. 論文・特許の動向

(1) 論文

(1-1) 調査のアプローチ

論文データベースとしてLens.orgを利用し、本研究領域に該当する論文数を調査した。調査対象及び調査プロセスの概要は、表V-2-1-1及び表V-2-1-2の通り。

表V-2-1-1 調査対象概要

データベース名	Lens.org
対象期間	2015年1月～2025年9月
対象文献	Journal Article
対象技術開発領域	① 肥料・農薬・バイオスティミュラント・人工土壌 ② 畜産飼料等・水産飼料等 ③ 発酵食品 ④ 発酵食品以外 ⑤ 微生物の産業活用

表V-2-1-2 調査プロセス概要

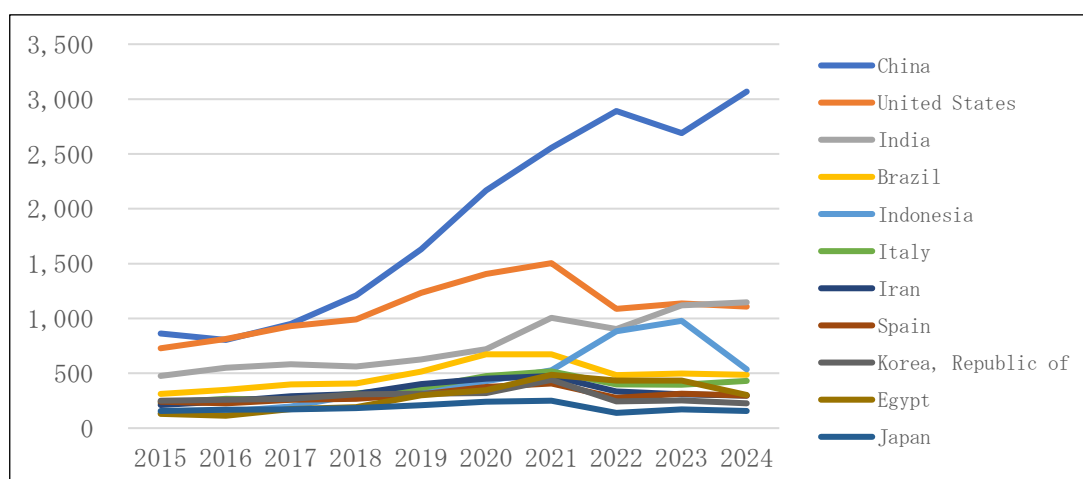
1. 検索クエリ設計	対象研究領域に対して、25の検索クエリを策定。
2. 初期データセット作成	Lens.orgに検索クエリを入力し、初期的なデータセットを作成。
3. AIによる整合性判断	対象研究領域毎の定義及び初期データセット等をAIに入力し、対象研究領域毎に整合性・妥当性をAIが判断。
4. データセット最終化	AIの判断を、人間がサンプルチェックし、対象研究領域毎に含むべき論文を最終化し、データセットを作成。
5-1. 国別年次別の定量分析	最終化されたデータセットの書誌情報（出版年、著者所属機関の国名）を用いて、国別・年次別の論文数を分析。
5-2. 被引用数Top10%の定量分析	最終化されたデータセットから、年毎の被引用数Top10%の論文（整数カウント法、境界同率は全件含む）を抽出。その被引用数Top10%の論文データセットにおいて、国別の論文数を分析。
5-3. キーワード定量分析	最終化されたデータセットの書誌情報（キーワードタグ）を用いて、国別（中国とそれ以外）・年次別・キーワード別の論文数を分析

(1-2) 研究領域全体の国別論文数の動向

対象研究領域の全領域合計かつ対象期間累計では、論文数の1位が中国、2位が米国であった。なお、本調査の対象研究領域以外も含めた全ての研究領域においては、論文数の1位が米国、2位が中国である。3位以降は本調査の特徴が表れており、インドやブラジル、インドネシアといった農畜水産業国が5位以内に入っている。

表V-2-1-3 論文数（上位10か国と日本）

対象研究領域の 全領域・対象期間累計の論文数		比較参照) 対象研究領域以外も含 む全領域・対象期間累計の論文数	
1. 中国	20,883	1. 米国	6,941,055
2. 米国	11,607	2. 中国	5,530,807
3. インド	7,807	3. 英国	1,983,425
4. ブラジル	4,992	4. ドイツ	1,356,465
5. インドネシア	4,511	5. インド	1,245,645
6. イタリア	3,903	6. インドネシア	1,188,646
7. イラン	3,449	7. ブラジル	1,163,523
8. スペイン	3,136	8. 日本	1,121,485
9. 韓国	2,982	9. カナダ	1,115,715
10. エジプト	2,971	10. オーストラリア	1,079,966
16. 日本	1,934		



図V-2-1-1 論文数（年次推移：2015年～2024年）

（1-3）各研究領域の国別論文数の傾向

「（1-2）研究領域全体の論文数の動向」に類似して、中国と米国は、どの研究領域においても、およそ上位（1～3位）に入っている。研究領域全体の論文数の上位国のうち、中国と米国を除く国について、研究領域毎の特徴は次の通り。

- ①インドは「人工土壌」を除く全分野に渡り、中位（4～7位）～上位に入っており、とくに「肥料」「農薬」「バイオスティミュラント」による生産性向上に

資する生産技術開発においては、米国と中国に肩を並べるほど上位に位置している。

②ブラジルは「人工土壌」「発酵食品」を除く全分野にわたり、中位である。

③インドネシアは、とくに「畜産飼料等」「水産飼料等」の生産技術開発において上位であり、後者においては、中国に次ぐ、2位に位置している。

⑤イタリアは「発酵食品」「発酵食品以外」「微生物の産業活用」において、中位～上位に入っている。

⑥韓国は「発酵食品」の論文数が多く、中国に次ぎ、2位である。

⑦我が国は、多くの研究領域で11位以下という結果であったが、「発酵食品」においては、9位に位置付けている。

表V-2-1-4 対象研究領域毎の論文数（2015年～2025年累計）^a

	1. 微生物を活用した農林水産業の生産性向上に資する技術開発					
	微生物肥料	微生物農薬	バイオフィロラット	人工土壌	畜産飼料等	水産飼料等
中国	3167 (1)	2396 (1)	2406 (1)	54 (1)	3160 (1)	1725 (1)
米国	1593 (3)	1525 (2)	1191 (3)	47 (2)	2213 (2)	512 (3)
インド	3083 (2)	1343 (3)	1871 (2)	5 (12)	471 (6)	488 (4)
ブラジル	1242 (5)	662 (4)	754 (4)	5 (12)	603 (4)	415 (5)
インドネシア	1278 (4)	561 (5)	431 (11)	3 (22)	1078 (3)	741 (2)
イタリア	425 (12)	416 (7)	752 (5)	19 (6)	328 (12)	98 (19)
イラン	607 (7)	189 (18)	448 (10)	8 (8)	335 (11)	330 (7)
スペイン	515 (8)	364 (8)	569 (8)	29 (3)	285 (15)	251 (8)
韓国	204 (22)	249 (15)	319 (14)	2 (28)	439 (8)	161 (13)
エジプト	776 (6)	537 (6)	528 (9)	1 (33)	462 (7)	342 (6)
日本	293 (18)	139 (22)	178 (21)	2 (28)	304 (14)	135 (14)

^a 表中の数字は『論文数（順位）』で表記されている。また、当該領域における中国・米国を除く1～3位の国を緑色セルにしている。

表V-2-1-5 対象研究領域毎の論文数（2015年～2025年累計）^b

	2. 微生物を活用した食料生産技術開発		3. 微生物を産業として活用することに資する研究開発
	発酵食品	発酵食品以外	微生物の産業活用
中国	2172 (1)	7712 (1)	5359 (1)
米国	499 (3)	4847 (2)	2887 (2)
インド	311 (6)	1620 (5)	834 (5)
ブラジル	264 (8)	1618 (6)	834 (5)
インドネシア	141 (14)	700 (14)	345 (18)
イタリア	471 (4)	1779 (3)	1174 (3)
イラン	110 (20)	1693 (4)	316 (20)
スペイン	408 (5)	1078 (10)	866 (4)
韓国	697 (2)	1242 (8)	598 (12)
エジプト	61 (35)	527 (18)	372 (15)
日本	251 (9)	779 (13)	462 (13)

なお、詳細は「付属資料1 論文の分析（論文数）」参照のこと。

（1-4）被引用数に関する分析

論文の質を表す指標の一つである被引用数分析を行った結果、中国等の非欧米諸国もTop10以内にランクインしており、質の良い論文を報告していると言える。

また、用いたデータベースについては、Elsevier, Springer, Wiley等主要出版社が支配的なものであり、かつジャーナルアークティクルで絞ったことから、多くは査読付である。

なお、詳細は「付属資料1 論文の分析（被引用数）」参照のこと。

表V-2-1-6 被引用論文数（上位10か国と日本）

全論文数 Top10+日本		被引用数 Top10%以内の論文数 Top10+日本	
1.中国	20,883	1.中国	4,619

^b 表中の数字は『論文数（順位）』で表記されている。また、当該領域における中国・米国を除く1～3位の国を緑色セルにしている。

2.米国	11,607
3.インド	7,807
4.ブラジル	4,992
5.インドネシア	4,511
6.イタリア	3,903
7.イラン	3,449
8.スペイン	3,136
9.韓国	2,982
10.エジプト	2,971
16.日本	1,934

2.米国	2,153
3.インド	897
4.イタリア	791
5.オーストラリア	585
6.カナダ	579
7.英国	554
8.スペイン	541
9.ブラジル	431
10.サウジアラビア	425
19.日本	238

(1-5) 研究テーマのトレンドに関する分析

研究テーマのトレンドを把握することを目的とし、研究領域別に、各論文にタグ付けされているキーワード毎に論文数を集計した。

その結果、次を把握することができた。

◇研究が盛んと思われる研究テーマ：数が多いキーワード

◇研究が盛んになりつつある研究テーマ：数が増加傾向のキーワード

なお、詳細は「付属資料1 論文の分析（キーワード）」参照のこと。

(2) 特許

(2-1) 調査のアプローチ

データベースとして IFI Claims を用い、対象期間 2015 年 1 月～2024 年 10 月、本調査の対象研究領域に該当する特許文献数を調査した（特許調査は 2025 年 9 月から 2026 年 1 月の間に実施）。

調査対象及び調査プロセスの概要は表 V-2-1-1 及び表 V-2-2-2 の通り。

一般に、特許出願書類の作成においては、権利範囲が限定的に解釈されるのを防ぐため、発明の用途を明確に記載することを避ける、様々な可能性を並列に列挙するなどして、具体的な記載を省略することが行われる。

今回、例えば「飼料・餌料（添加物含む）の生産技術開発」に関して、畜産と水産の母集団を分離しようと試みたが、畜産用か水産用か明記されていない特許出願や、畜産にも水産にも利用できる記載されている特許出願が多数存在し、キーワード検索や特許分類を使用した検索式では分離が困難であったため、分析では以下の 4 つの母集合を作成し、分析を実施した。

なお、「微生物を産業として活用することに資する研究開発」は、対象が広範か

つ絞り込みが技術的に困難なことから、対象外とした。

表 V-2-2-1 調査対象概要

データベース名	IFI Claims
対象期間	2015年1月～2024年10月
対象文献	特許申請
対象技術開発領域	(a) 肥料・農薬・バイオスティミュラント・人工土壌の生産技術開発 (b) 飼料・餌料の生産技術開発 (c) 発酵食品の生産技術開発 [(d) を除く] (d) 精密発酵・バイオマス発酵・SCP生産・微細藻類利用による食料生産技術開発 (注) SCP: Single Cell Protein

表 V-2-2-2 調査プロセス概要

1. 検索式的设计	4つの対象研究領域に対して、検索式を策定*。 *特許分類、発明の名称・要約・請求の範囲のキーワード、出願日による絞り込み。
2. 母集合の作成	IFI Claims に検索式を入力し、4つの母集合を作成。
3. 特許出願件推移の分析	年毎に特許申請数を集計。
4. 出願人ランキングの分析	出願人別に特許申請数を集計。
5. 出願国・地域別の特許出願件数の分析	出願国・地域別に特許申請数を集計。

(2-2) 研究領域ごとの国別特許数の傾向

「肥料・農薬・バイオスティミュラント・人工土壌」「伝統発酵」の2領域は比較的特許数が多い。

(2-3) 各研究領域の国別特許数の傾向

全領域で中国が突出していた。ただし、権利化された有効な特許は申請件数の12～15%であり、20%台の日米より低く、欧州と同程度である。

中国を除くと、各領域とも、米国・韓国・欧州・日本・オーストラリアが多

く、次いで、ブラジル、カナダ、台湾、ロシアが続く。

発酵食品では、1位中国、2位韓国、3位日本、4位米国、5位欧州、6位ロシアの順となる。伝統食文化が反映されている。

日本の特許出願順位は、肥料～人工土壌で5位、飼料・餌料で4位、発酵食品で3位、精密発酵～微細藻類で第4位。なお、出願者の大半は企業である。

表V-2-2-3 各研究領域の国別特許数

	1. 微生物を活用した農林水産業の生産性向上に資する技術開発				2. 微生物を活用した食料生産技術開発				合計
	(a) 肥料～人工土壌		(b) 飼料・餌料		(c) 発酵食品 [(d) を除く]		(d) 精密発酵 ～微細藻類		
中国	88,699	(1)	38,932	(1)	59,755	(1)	4,608	(1)	191,994
米国	10,242	(2)	2,485	(3)	4,193	(4)	1,046	(2)	17,966
韓国	5,873	(3)	3,114	(2)	13,141	(2)	680	(4)	22,808
欧州	4,763	(4)	1,128	(5)	2,353	(5)	508	(5)	8,752
日本	4,627	(5)	1,408	(4)	5,196	(3)	712	(3)	11,943
オーストラリア	3,035	(6)	631	(7)	1,202	(7)	317	(6)	5,185
ブラジル	2,481	(7)	405	(9)	856	(9)	112	(8)	3,854
カナダ	2,306	(8)	977	(6)	1,139	(8)	294	(7)	4,716
台湾	1,110	(9)	302	(10)	851	(10)	—		2,263
ロシア	1,046	(10)	422	(8)	1,484	(6)	96	(9)	3,046
フランス	—		—		—		92	(10)	92
合計	124,182		49,804		90,170		8,465		272,621

(注1) IFI Claims を用い野村証券が集計。

(注2) 各領域に該当する特許申請の絞り込みに技術的制約があるため、件数はあくまで参考値として捉えることが妥当である。

(注3) 出願毎に1件と集計(例:PCT出願を日本、米国に移行した場合は3件)。

(注4) 同一特許が複数の領域でカウントされていることを許して集計している。

(注5) 表中「欧州」は欧州特許条約締約国(39ヶ国)による欧州特許庁への特許出願であり、「フランス」はフランス産業財産庁への特許出願である。

なお、詳細は「付属資料2 特許の分析」参照のこと。

参考文献

1. Cabinet Office, Government of Japan, 2024. *Bioeconomy Strategy*.
<https://www8.cao.go.jp/cstp/english/>
2. 農林水産省, 2021. みどりの食料システム戦略. 農林水産省ホームページ:
<https://www.maff.go.jp/>
3. 農林水産省 農林水産技術会議, 2024. 農林水産研究イノベーション戦略 2024.
農林水産技術会議 (AFFRC) : <https://www.affrc.maff.go.jp/>
4. The White House, 2022. Executive Order on Advancing Biotechnology and
Biomufacturing Innovation for a Sustainable, Safe, and Secure American
Bioeconomy. The White House - Briefing Room: <https://www.whitehouse.gov/>
5. U.S. Department of Energy, Bioenergy Technologies Office (BETO).
Bioenergy Technologies Office:
<https://www.energy.gov/eere/bioenergy/bioenergy-technologies-office>
6. European Commission, 2018. A Sustainable Bioeconomy for Europe: Strengthening
the Connection between Economy, Society and the Environment.
EU Bioeconomy portal: <https://research-and-innovation.ec.europa.eu/>
7. European Commission, 2020. A Farm to Fork Strategy for a fair, healthy and
environmentally-friendly food system.
Farm to Fork Strategy page: <https://food.ec.europa.eu/>
8. European Commission 「Factsheet: Boosting biotechnology & biomanufacturing in
EU」
https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/attachment/877867/Factsheet_biotech_Industry.pdf
9. European Union 「Choose Europe for life sciences」
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52025DC0525>
10. 国務院ほか, 2022. 「生物経済発展計画 (十四五)」.
中国政府公式ポータル: <https://www.gov.cn/>
11. MAFRA (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Republic of Korea),
2023. Green Bio Industry Promotion Strategy.
MAFRA English site: <https://www.mafra.go.kr/eng/>
12. Government of Korea, 2025. Bio-Great Transformation National Strategy.
政府政策ポータル (首相室・産業通商資源部等). 14) KRIBB, 2022-. Korea National
Biofoundry (K-Biofoundry). KRIBB: <https://www.kribb.re.kr/>
13. Government of Singapore, 2021. Singapore Green Plan 2030.
Green Plan 2030: <https://www.greenplan.gov.sg/>
14. Singapore Food Agency, 2019-. Novel Food Regulatory Framework and Requirements

- for the Safety Assessment of Novel Foods.
SFA Novel Food page: <https://www.sfa.gov.sg/>
15. Ministry of National Development Planning/Bappenas, Republic of Indonesia, 2019. National Medium-Term Development Plan (RPJMN 2020-2024; 2025-2029).
Bappenas: <https://www.bappenas.go.id/>
 16. Ministry of Agriculture, Republic of Indonesia, 2011. Regulation No.70/Permentan/SR.140/10/2011 on Organic Fertilizer, Biofertilizer and Soil Improvement. Ministry of Agriculture:<https://www.pertanian.go.id/>
 17. NEDO, 2023-. Bio-manufacturing Revolution Promotion Project.
NEDO Bio-manufacturing Revolution:
https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100246.html
 18. NEDO, 2020-. Development of Bio-derived Product Production Technologies Accelerating Carbon Recycling. NEDO Carbon Recycling projects:
https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100170.html
 19. MEXT, 2023. Environmental-related document (Japanese, PDF). Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT):
https://www.mext.go.jp/content/20230516-mxt_kankyoku-000029710_1.pdf
 20. NARO, 2020-. Moonshot Research and Development Program (BRAIN). NARO Moonshot Program: https://www.naro.go.jp/laboratory/brain/moon_shot/index.html
 21. U.S. Department of Energy, Bioenergy Technologies Office (BETO). Agile BioFoundry (ABF). Agile BioFoundry: <https://agilebiofoundry.org/>
 22. U.S. Department of Energy (DOE) BETO, 2024. 2023 BETO Project Peer Review Report: Agile BioFoundry. https://www.energy.gov/sites/default/files/2024-04/beto-2023-peer-review-report_03-agile-biofoundry.pdf
 23. BioMADE, 2021-. Bioindustrial Manufacturing Innovation Institute.
BioMADE: <https://www.biomade.org/>
 24. Manufacturing USA. BioMADE Institute:
<https://www.manufacturingusa.com/institutes/biomade>
 25. USDA NIFA: FY2026 AFRI FAS RFA (PDF):
<https://www.nifa.usda.gov/sites/default/files/2025-08/FY26-AFRI-FAS-RFA-2P.pdf>
 26. Circular Bio-based Europe Joint Undertaking (CBE-JU), 2021-2031.
CBE-JU: <https://www.cbe.europa.eu/>
 27. CBE JU Strategic Research and Innovation Agenda (SRIA) PDF:
<https://www.cbe.europa.eu/system/files?file=2022-06/cbeju-sria.pdf>
 28. Horizon Europe Work Programme 2025: Food, Bioeconomy, Natural Resources, Agriculture and Environment (PDF): <https://ec.europa.eu/info/funding->

- [tenders/opportunities/docs/2021-2027/horizon/wp-call/2025/wp-9-food-bioeconomy-natural-resources-agriculture-and-environment_horizon-2025_en.pdf](#)
29. Soil Mission Implementation Plan (European Commission, PDF): https://research-and-innovation.ec.europa.eu/system/files/2021-09/soil_mission_implementation_plan_final_for_publication.pdf
 30. Wiley Online Library: European Journal of Soil Science article: <https://bsssjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/ejss.13466>
 31. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, School of Mathematics: Notice on Applications for National Key R&D Program “Mathematics and Applied Research” and “Intergovernmental International S&T Innovation Cooperation” (2025) <https://math.nuaa.edu.cn/2025/0831/c17251a381896/page.htm>
 32. Tsinghua-GD RDDC: Exchange page 419 <https://rddc.tsinghua-gd.org/exchange/419>
 33. National Development and Reform Commission (NDRC): The 14th Five-Year Plan for Bioeconomy Development (PDF): <https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202205/P020220920619611864364.pdf>
 34. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA): English PDF download: <https://www.mafra.go.kr/bbs/english/25/566013/download.do>
 35. Korea National Biofoundry: About page https://kbiofoundry.org/01_about.html
 36. Singapore Food Story (SFS) R&D Grant Call - Official SFA page for SFS R&D grant opportunities, including eligibility, focus areas, and application information: <https://www.sfa.gov.sg/recognition-programmes-grants/grants/singapore-food-story-rd-grant-call>
 37. SFA Media Release on SFS R&D 2.0 (PDF) - Announcement of S\$165 million for the second phase of the SFS R&D Programme, highlighting focus areas (aquaculture, agriculture, future foods, food safety) and emphasis on food security, sustainability, and circularity (issued 26 Oct 2022): <https://www.sfa.gov.sg/docs/default-source/food-for-thought-doc/sfa-media-release-on-sfs-r-d-2.pdf>

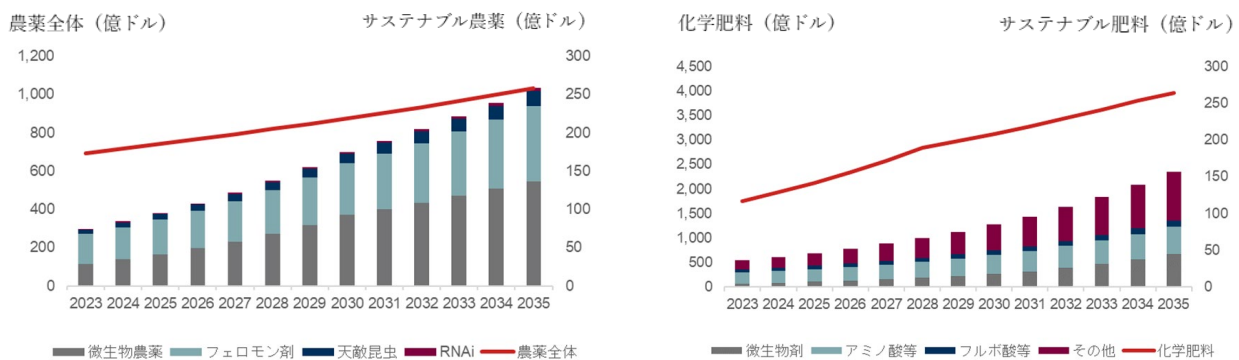
VI 各技術について

1. 微生物を活用した農林水産業の生産性向上に資する技術開発

1-1. 肥料・農薬・バイオスティミュラント・人工土壌の生産技術開発

(1) 技術概要

農林水産業の生産性向上に資する微生物活用技術のうち、①肥料微生物、②微生物農薬、③バイオスティミュラント、④人工土壌の4分野は、平均数%の成長が見込まれる重要産業分野（化学肥料市場：約1,500億USD、化学農薬市場：約800億USD）と密接に関係している¹⁾。



図VI-1-1-1

(左) 化学農薬と微生物農薬の市場規模予測¹⁾ (右) 化学肥料と微生物肥料の市場規模予測¹⁾

① 微生物肥料

環境対応だけではなく、高騰する化学肥料を代替し、農業生産性の改善に寄与する²⁾。窒素化学肥料は強力な温室効果ガスである亜酸化窒素（ N_2O ）の発生源であり、地下水や湖沼の水質汚染要因にもなる。また、窒素化学肥料はエネルギー価格が低い地域に依存し、リン化学肥料・カリウム化学肥料は鉍石産出地に依存する構図となっている。

② 微生物農薬

環境対応に加え耐性株の出現や化学農薬の開発費高騰から代替品の需要が高まっている。特に近年、化学農薬は高い安全性と防除効果の達成が求められるようになり、2012～2014年の対象期間で平均開発コストが2.86億USD、開発期間が11.3年と高コスト化している³⁾。さらに、耐性菌・耐性害虫が発

生しており、近年は開発が“いたちごっこ”状態となっており、グローバルな規制強化により新規系統の選抜・評価や登録に必要な試験データの整備が求められ、開発・登録コストの増加要因となり得る⁴⁾。

③ バイオスティミュラント

高温や干ばつなど、気候変動への対応や化学肥料高騰から需要が高まっている。環境負荷が高く高騰する化学肥料の使用量削減・効率化を目的としてVA菌根菌 (Vesicular-Arbuscular Mycorrhiza、AM菌) などが開発されている。また、気候変動による収量減を回避するため、作物の高温ストレスに対する研究の進展とともに、微生物または微生物の生産物をバイオスティミュラントとして活用する動きがある (例：中国のグベルメクチン等)。

④ 人工土壌

土壌劣化に左右されない高度農業資材として、将来的に有望と考えられる。劣化した土壌でも高い生産性を実現できる可能性があることから研究が進められているが、まだ研究段階にある。

New Crop Protection Product Discovery and Development Costs (2014-19 vs 2010-14, 2005-08, 2000 and 1995)						
Category	Subcategory	Cost (\$ million) 1995	Cost (\$ million) 2005-08	Cost (\$ million) 2014-19	Cost (€ million) 2000	Cost (€ million) 2010-14
Research	Chemistry	32	42	64	41	49
Research	Biology	30	32	52	44	51
Research	Toxicology/ Environmental Chemistry	10	11	11	9	7
Research	Research total	72	85	127	94	107
Development	Chemistry	18	36	30	20	35
Development	Field Trials	18	54	58	25	47
Development	Toxicology	18	32	22	18	29
Development	Environmental Chemistry	13	24	22	16	35
Development	Development total	67	146	133	79	146
Registration		13	25	42	11	33
Total		152	256	301	184	285

図VI-1-1-2 アメリカ・EUの新農薬登録費の内訳推移⁴⁾

(参考) 各国の認識・制度化状況

EU：EU肥料製品に関する規則（EU 2019/1009、以下FPR）⁵⁾で *Azotobacter*, *Azospirillum*, *Rhizobium*, アーバスキュラー菌根菌（AMF）を対象微生物に明記し、性能評価と安全性基準を制度化している。具体的には重金属の含有基準、サルモネラ菌などの病原菌の検出基準として定めている⁶⁾。バイオスティミュラントはEU肥料製品の製品機能カテゴリー6（PFC6）に規定されているが、更に15の構成材料分類が存在するため、農薬及び肥料に該当しないという機能だけではなく、原材料の分類も記載しなければならず、日本よりも多くのデータを必要とする。このように、EUは厳格な体制を取っているため他国よりも上市のハードルが高い。

米国：米国植物肥料規制担当官協会（AAPFCO）が定義を採択。登録は州ごとに異なり、性能主張によっては米国環境保護庁（EPA）の農薬規制対象となる。

中国：微生物肥料の規格の中にバイオスティミュラントを包含。独立制度は未整備。

韓国：肥料管理法の下で微生物肥料として管理、性能試験指針を公表している。

日本：農林水産省が2025年5月に「バイオスティミュラントの表示等に係るガイドライン」⁷⁾を策定した。肥料・農薬のいずれにも属さない機能資材として整理を進めるが、農薬取締法、肥料法、地力増進法で定められている定義に該当する場合、バイオスティミュラントであってもこれらの法律に則る必要がある。「みどりの食料システム戦略」にて、バイオスティミュラントの活用について掲げられている。日本でも、2025年のガイドライン策定以前よりバイオスティミュラントとして売られているものは、農薬取締法、肥料法、地力増進法で定められている定義に該当する物は従前よりそれらの法律に則っていたが、一方でそれらの法律に該当しない資材として流通している商品も見られるのが現状である。

EU	米国	日本
<ul style="list-style-type: none"> ● 農業に係る規則 (Regulation (EC) No 1107/2009) において、BSは農業に該当しない旨を規定。 ● 新肥料法 (Regulation (EU) 2019/10 09) において、BSを肥料製品の1つとして位置づけ。 <p style="text-align: center;">BSの定義※1</p> <p>▶ 植物又は植物根圏の以下の特徴の1つ以上を改善することを唯一の目的として、製品の栄養成分とは無関係に植物の栄養過程を刺激する製品</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 栄養素の利用効率 ② 非生物学的ストレスへの耐性 ③ 品質形質 ④ 土壌又は根圏における非可給態栄養素の利用可能性 <p>※1 Regulation (EC)1107/2009の CHAPTER I Article3の「Definition」を仮訳</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 2022年に農業の定義からBSを除外する法案 (Plant Biostimulant Act) が米国議会下院に提出され、2023年にも同文の法案が同議会上下両院に提出されたが、審議には至っていない。 <p style="text-align: center;">BSの定義※2</p> <p>▶ 種子や植物、根の周りの環境 (根圏)、土壌やその他の栽培培地に用いるもので、栄養成分そのものに依存せずに植物が本来もつ働きを助けることで、栄養素の利用可能性・吸収・利用効率を高め、乾燥や高温、塩害などの非生物学的ストレスへの耐性を強め、結果として成長・発育・品質・収量を改善する作用をもつ物質や微生物、またはその混合物</p> <p>※2 「S.802-Plant Biostimulant Act of 2023」/「H.R.1472-Plant Biostimulant Act」の「Definition」を仮訳</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 2025年5月に農林水産省が「バイオスティミュラントの表示等に係るガイドライン」を策定。 ● 「みどりの食料システム戦略」にて、バイオスティミュラントの活用について掲げられている。 <p style="text-align: center;">BSの定義※3</p> <p>▶ 農作物又は土壌に施すことで農作物やその周りの土壌が元々持つ機能を補助する資材であって、バイオスティミュラント自体が持つ栄養成分とは関係なく、土壌中の栄養成分の吸収性、農作物による栄養成分の取込・利用効率及び乾燥・高温・塩害等の非生物学的ストレスに対する耐性を改善するものであり、結果として農作物の品質又は収量が向上するもの</p> <p>※3 農林水産省「バイオスティミュラントの表示等に係るガイドライン」より</p>

図 VI-1-1-3 バイオスティミュラント(BS)に係る EU・米国・日本の動き⁸⁾

(2) 研究動向

次の研究開発動向が見られる。①作用機序の解明、②メタゲノム解析やデータサイエンスを活用したスクリーニング強化 (特に難培養微生物)、③合成生物学を利用した機能向上。これらは微生物肥料、微生物農薬、バイオスティミュラント、人工土壌の重点4分野で共通して進展がみられる。

① 微生物肥料

菌株探索と機能性評価では、根圏における窒素固定菌 (*Azospirillum*, *Rhizobium*)、リン溶解菌 (*Pseudomonas*, *Bacillus*) で進展がみられる^{9) 10)}。また、リン溶解菌で難溶性リン酸を可溶化し、リンの固定化による利用低下を軽減する研究においても進展がみられる¹¹⁾。カリウム関連では、微生物のカリウム蓄積に関する代謝経路の研究が進展しており¹²⁾、またカリウム溶解菌 (*Bacillus cereus*) の代謝系解明が見られた¹³⁾。また、水田土壌の窒素固定能を有する鉄還元菌が介在するメタン排出削減メカニズム解明¹⁴⁾ など、従来知られていなかった他種の微生物の介在も解明されてきている。

合成生物学に関して、窒素固定微生物の窒素固定酵素ニトロゲナーゼの改良や¹⁵⁾、リン溶解菌におけるリン酸加水分解酵素遺伝子の強化株などが開発されている¹⁶⁾。

② 微生物農薬

スクリーニングに関する研究が進展しており、ゲノミクスの進歩により、スク

リーニング効率が飛躍的に向上し、特に放線菌群の発見が加速している¹⁷⁾。

他技術との融合も進展しており、昆虫病原性真菌 (*Metarhizium*, *Beauveria*) にRNAi技術を追加した「次世代微生物農薬」の開発が行われている¹⁸⁾。

③ バイオスティミュラント

定着性は、バイオスティミュラントの効果に直結する重要な課題である。投入した微生物が作物や土壌環境で安定してコミュニティを形成できるかが鍵となるため、微生物の定着・共存特性や、微生物担体(キャリア)を用いた機能の安定化に関する研究が行われている¹⁹⁾。

複合資材の開発については、バイオスティミュラントの機能をさらに強化することを目的に、藻類抽出物など他資材との併用が検討されている。これにより、単独では得にくい相乗的な効果を引き出し、栄養利用効率やストレス耐性の向上を目指す取り組みが行われている²⁰⁾。

現場での機能検証は、バイオスティミュラントが比較的新しい資材であるがゆえに重要性が高い。化学肥料や化学農薬のような長期の効果検証がまだ十分ではないため、圃場条件下での有効性や再現性を確認する試験が実施されている²¹⁾。

非標的影響の調査では、バイオスティミュラントとして微生物を投入する際に、在来の微生物叢への影響を最小限に抑えることが求められる。そのため、生物多様性保全の観点から、導入微生物が対象作物以外の在来微生物叢、土壌生態系、周辺動植物、水質等に及ぼす影響を系統的に評価し、安全基準設定のためのデータを取得する環境影響評価を行い、安全性と持続可能性を担保するための研究が行われている²²⁾。

④ 人工土壌

微生物設計と担体開発については、微生物が安定して機能を発揮できるように、適切な組成や相互作用を考慮した設計が進められている。併せて、微生物の定着や活性を支える担体(キャリア)の改良が行われており²³⁾²⁴⁾、機能性評価に関しては、土壌の代替となり得る資材としての性能評価と、導入に伴う環境影響評価が実施されている²⁵⁾。

(3) 実装化動向

特許は機能強化や大量生産に関するものが目立ち、企業では欧米勢が先行している。また、米国で販売され、140万エーカー(56.6万ha)の農地で利用されているPivot Bioの窒素固定微生物製剤「Proven®」はゲノム編集を使っているが、日本や欧州で上市される場合は米国とは規制等の枠組みが異なる点には留意する必要がある。

① 微生物肥料

欧米企業が先行しており、窒素固定菌、リン溶解菌製剤が目立つ。Pivot Bio(米

国)、Novonesis(欧州)(JumpStart®、Optimize® 等)による製品上市が先行している。中国でも Beijing Dabeinong がリン溶解菌資材を投入している。

特許は微生物を活用した肥料の機能強化²⁶⁾、微生物と肥料・農薬組み合わせる場合の安定性²⁷⁾、大量生産及び安定化、微生物コンソーシアム²⁸⁻³⁰⁾などでの出願が目立つ。

② 微生物農薬

以前より Bayer (独) の *Bacillus subtilis* 剤をはじめ、Syngenta (瑞) などが先行している。近年では Novonesis (欧州) が多数の製剤を上市。日本勢では住友化学が 2025 年から 2030 年までにバイオラショナル(バイオ農薬・バイオスティミュラント等)分野に M&A も含めて積極的な投資を行うことを発表し、国内外企業の買収も活発化している。

特許動向は微生物農薬と化学剤のハイブリッド化³¹⁾、*Bacillus thuringiensis* (BT) 由来の Cry/Vip タンパク質(改変型を含む)の利用³²⁾、ドリフト低減や製剤の安定化³³⁾、RNAi と併用した害虫対策³⁴⁾、センチュウ対策³⁵⁾などが見られる。

	開発	販売	販売国	種別	製品分類	対象	菌株
Taegro® 2	Novozymes	Novozymes	米国・カナダ	生菌剤	殺菌剤	野菜	<i>Bacillus subtilis</i> var. <i>amyloliquefaciens</i> strain FZB24
Taegro®	Novozymes	Syngenta	EU	生菌剤	殺菌剤	野菜	<i>Bacillus subtilis</i> var. <i>amyloliquefaciens</i> strain FZB24
Actinovate® Biocontrol solution	Novozymes	Novozymes	米国	生菌剤	殺菌剤	野菜	<i>Streptomyces lydicus</i> WYEC 108
Actinovate® Lawn and Gard	Novozymes	Novozymes	米国	生菌剤	殺菌剤	家庭園芸用	<i>Streptomyces lydicus</i> WYEC 108
Actinovate® SP	Novozymes	Novozymes	米国・カナダ	生菌剤	殺菌剤	園芸作物	<i>Streptomyces lydicus</i> WYEC 108
Actinovate® AG	Novozymes	Novozymes	米国	生菌剤	殺菌剤	施設園芸農業	<i>Streptomyces lydicus</i> WYEC 108
Bovemax EC	Novozymes	Novozymes	ブラジル	生菌剤	殺虫剤	マテ、コーヒー、柑	<i>Beauveria bassiana</i> cepa CG716
Bovacillus™	Novozymes	Novozymes	-	生菌剤	飼料添加物	乳牛・肉牛	<i>Bacillus licheniformis</i> および <i>Bacillus subtilis</i>

表 VI - 1 - 1 - 4 Novonesis グループの微生物農薬¹⁾

③ バイオスティミュラント

欧米企業では Symborg (Corteva 傘下)、Novonesis (Ratchet®、Torque® IF 等) が先行しているが、住友化学も大規模投資を発表しているなど、日本企業も注力しはじめています。

日本のスタートアップ AGRI SMILE はメタノール資化細菌を利用したバイオスティミュラント開発に成功するなど、独自のアプローチも見られる。

中国では放線菌由来のグベルメクチンが、収量を高める種子処理剤として利用されている³⁶⁾。

バイオスティミュラントの特許では糸状菌³⁷⁾・酵母及びそれらの抽出物の活用³⁸⁾や製剤の安定化など、有効成分利用に関するものが多い特徴がある。

④ 人工土壌

人工土壌に関してはまだ開発の余地が大きい分野である。欧州ではC E A (Circular Economy Act) 事業者により、バイオフィーム担体を活用した人工土壌と灌漑システムと組み合わせた「循環養分・微生物管理」を提供されている。日本ではゼオライト系人工培地へ *Bacillus/Trichoderma* を含むスタート培土をプレコートした製品、ココピート・バーク堆肥に微生物顆粒を混合した「半人工土壌」が流通している。

特許では微生物の機能を強化する技術³⁹⁾、担体の能力向上とコスト削減に関するもの⁴⁰⁾が出願されている。

(4) 研究課題

4分野に共通する課題として、実証データの蓄積、作用機序の解明が不可欠である。それに基づき、従来品に対してコストでも競争力がある生産技術を開発すること及び輸送安定性の確保が課題である。各項目①～④の課題は、以下に記載する。

① 微生物肥料

効果の安定性については、化学肥料よりも効果の安定性が低い傾向があるものの、化学肥料との併用が効果的であるとの結果や、費用対効果が見られたという研究もある。具体的には土壌や気候条件による変動の解決を目的とした安定化技術の研究、根圏での微生物定着性・持続性向上技術が不可欠である。実証データに関しては、新しい資材であるがゆえに蓄積が十分ではなく、長期的な実証データの収集と、継続的なモニタリング体制及びデータベースの整備が喫緊の課題となっている。

② 微生物農薬

微生物で安定的な効果を出すには、効率的な微生物株のスクリーニングや作用機序の高効率化などのアプローチが不可欠である。その際に大量の情報を扱う必要があるため、データサイエンスやA Iの知見活用が求められる。

低コストで安定的に生産する観点では、微生物を高効率かつ再現性高く培養できる生産プロセスの構築が不可欠である。

防除機能の強化に関しては、効果検証に関する論文は複数あるが、費用対効果が高いとは言えない結果となっており、化学農薬と同等か高い防除能力への改善が求められている。

③ バイオスティミュラント

作用機序の解明は、微生物肥料・微生物農薬と同様に法規制の観点から必須である。また、資材としての安定使用のためには、圃場における対象微生物の定着性の改善が課題である。

④ 人工土壌

統一モデルの整備は、人工土壌の開発が進んでいる一方で、機能評価に必要な

一モデルの開発が未整備である。具体的には、人工土壌担体、付加微生物、土着微生物、作物の根圏の相互作用の解明と統一モデルの構築が必要である。

現場での利用方法の確立については、施設園芸で一般的な移植前の土壌殺菌等との併用方法が未整備であり、現場での利用方法の確立が必要である。

(5) 実装化課題

4分野すべてで安定的な低コスト生産と効果の安定化が特に大きな課題となっている。また、開発から上市まで時間とコストがかかり、法規制の元にある資材であるため、開発費がかさみやすい。

量産体制の確立に関しても、微生物培養は装置産業であり、ベンチャー企業単独での生産設備投資が難しい点が課題である。

① 微生物肥料

輸送安定性と生産コストについては、低コストかつ常温での安定的な保管方法の確立が必要であり、対象微生物が難培養微生物である場合には、安定的なタンク培養生産法の確立も求められる。

対象微生物の機能強化に遺伝子組換えを用いる場合、各国で法規制対応が必要である。ゲノム編集によるノックアウトの場合でも各国で規制のスタンスが異なり、アメリカでは Pivot Bio が遺伝子組換え生物の規制対象外として機能強化窒素固定細菌を既に上市している一方、欧州や日本では異なる対応が求められる。

② 微生物農薬

農薬登録のコストについては、農薬が多くの国で規制対象であるため、登録に際して安全性や効果の試験に多くのコストがかかる。ベンチャー企業にとっては、登録に要する事務手続きと費用が高額で時間を要することが事業継続の障害となり得る。

防除効果の改善については、化学肥料に比べて即効性や安定性が劣る傾向があるため、機能強化が重要な課題である。

③ バイオスティミュラント

法規制については、日本ではバイオスティミュラントであっても肥料法、農薬取締法、地力法に該当する場合は別途の規制対応が必要であり、バイオスティミュラントに特化した法規制は世界的に未整備な部分がある。

表示義務については、効果の表示に関するガイドラインが各国で整備途中であり、日本では 2025 年 4 月に農林水産省がガイドラインを公表した。

農薬・肥料との混用適合性については、バイオスティミュラントが他資材との併用を前提に利用されることが多く、併用時の効果を最大化する利用体系の構築が課題となっている。

④ 人工土壌

効果の実証については、新しい技術であるため安定的な効果の実証が不足しており、実験室内及び圃場での長期的な効果の実証が必要である。

効果の持続性については、効果を最大限発揮し長時間安定化させるための技術開発が重要であり、併せてビジネスモデルの確立も必要である。

(6) 研究開発の方向性

共通課題として、作用機序の解明と機能強化（スクリーニング、合成生物学的アプローチを含む）、製剤化技術と担体技術の革新（低コスト安定培養、輸送性・保存性・定着性の改善）、データベースの整備、スマート農業との融合（ソリューションビジネス化）、共同利用型スケールアップ化施設の整備が挙げられる。そのため、4分野すべてにおいて、作用機序の解明、スマート農業との融合、製剤化技術と担体技術の革新、低コスト安定生産を目指した研究開発が求められる。

項目①～④の研究開発の方向性については、以下に記載する。

① 微生物肥料

化学肥料との適切な組合せにより機能を最大化（ソリューション化）し、農業生産者にとってのメリットを最大化することが必要である。

② 微生物農薬

開発コスト負担の低減が課題であり、スタートアップは探索や機能強化は行っても認可取得の人的・資金的リソースに乏しいため、バイオ医薬品と同様の導出・M&A体制の整備が有効である。

I P M体系として、A Iを活用した病害リスク予測と連動し最適な防除を選択する「処方設計型防除」の確立が求められる。

また、効果の改善として、高い防除能力に向けた合成生物学的アプローチや製剤技術、R N A i や化学農薬との併用などによる複合技術製剤の手法開発が必要である。

③ バイオスティミュラント

制度整備と市場形成の強化が必要であり、日本ではバイオスティミュラントに関するガイドラインが制定された。

また、モニタリング技術として、施用微生物の環境中での動態追跡技術及び環境影響のリアルタイム監視技術の開発が求められる。

さらに認証制度の整備状況は各地域で異なる。日本においては統一的な第三者認証制度は未だ整備されていない。一方、E UにはF P R（食品リサイクル規格）に基づく性能・安全性の認証制度が存在し、米国では州ごとに任意の品質認証プログラムが運用されている。

④ 人工土壌

作物の多様化については、野菜類から他の作物への拡大とコスト低減が課題である。

また、長期運用における微生物群集の遷移評価については、安定的な長期運用と能力の維持に向けた研究開発が求められる。

(参考①) 農薬登録コスト

農薬登録のコストは全体的に審査の厳格化に伴って増加傾向にある。その中でも研究費合計 (Research total) は、代謝物評価や内分泌かく乱評価など、複数の規制強化が同時進行したことから、米国、EUともに増加傾向にある。

新規農薬を販売するために正式に承認を得るプロセス全体のコストとして、手数料、社内作業費用、外部試験費用がある。手数料、社内作業費用、外部試験費用を合計した登録コスト (Registration) は、複数の規制強化が同時進行したことから、2014-19年の米国では1995年の約3倍の4,200万USDに、2010-14年のEUでは2000年の3倍の3,300万EURに増加している。

New Crop Protection Product Discovery and Development Costs (2014-19 vs 2010-14, 2005-08, 2000 and 1995)						
Category	Subcategory	Cost (\$ million) 1995	Cost (\$ million) 2005-08	Cost (\$ million) 2014-19	Cost (€ million) 2000	Cost (€ million) 2010-14
Research	Chemistry	32	42	64	41	49
Research	Biology	30	32	52	44	51
Research	Toxicology/ Environmental Chemistry	10	11	11	9	7
Research	Research total	72	85	127	94	107
Development	Chemistry	18	36	30	20	35
Development	Field Trials	18	54	58	25	47
Development	Toxicology	18	32	22	18	29
Development	Environmental Chemistry	13	24	22	16	35
Development	Development total	67	146	133	79	146
Registration		13	25	42	11	33
Total		152	256	301	184	285

図VI-1-1-8 アメリカ・EUの農薬開発費の内訳推移⁴¹⁾

(上表は、AgrificioInvestor「Time and Cost of New Agrochemical Product Discovery Development and Registration」⁴¹⁾中にある表を改変。)

規制当局に支払う公式審査手数料である農薬登録手数料 (Registration fees) は、2014-19年において、EUでは、電子申請システム導入や各国評価書のテン

プレート統一等により 220 万 USD と低下傾向、米国でも 210 万 USD と低下傾向にある。参考値として、日本の農薬登録手数料は 719,300 円 となっている。

追加試験 (Additional studies) 費用は、審査の厳格化を背景として、2014-19 年において、EU で 1,740 万 USD、米国で 1,440 万 USD とどちらも増加傾向にある。

企業が登録申請のために社内で行う作業コスト (Internal Registration Costs) は、社内作業効率化等により 2014-19 年において、EU で 470 万 USD、米国で 100 万 USD とどちらも低下傾向にある。

Detailed Comparison of Historical Results (2014-19 versus 2010-14 & 2005-08)						
Category	Sub-category	Sector	Cost (\$ million)		Change %	
			2005-08	2010-14	2014-19	2014-19 / 2010-14
Registration	EU	Registration fees	5.7	5.2	2.2	-58.5
Registration	EU	Internal Registration Costs	13.5	5.6	4.7	-15.6
Registration	EU	Additional studies*	2.3	9.1	17.4	91.6
Registration	EU Total		21.5	19.9	24.3	22.2
Registration	US	Registration fees	0.6	2.9	2.1	-26.9
Registration	US	Internal Registration Costs	1.3	3.0	1.0	-68.2
Registration	US	Additional studies*	1.5	7.4	14.4	94.6
Registration	US Total		3.4	13.3	17.5	31.4

図 VI-1-1-9 アメリカ・EU の新農薬登録費の内訳推移 ⁴¹⁾

(参考②) 微生物肥料の費用対効果

微生物肥料は、作物収量を概ね改善し、費用対効果も良いことが示唆されている。一方で、条件によっては、有意な増収が確認できない場合も指摘されている。したがって、環境条件に合わせた「効きやすい使い方」を設計し、その便益を含めて生産者に共有していくことが重要であると考えられる。

文献① ⁴²⁾ (総説)

- 作物収量及び養分利用率に対する微生物肥料の影響を定量化することを目的に、圃場試験データを含む査読論文 171 本を対象にメタ分析 (複数の独立した研究結果を統計的に統合し、全体の効果の大きさや傾向を定量的に評価) を実施。
- 微生物肥料接種は非接種対照に比べ、作物収量を 平均 +16.2 ± 1.0% 改善することが報告されている。また、その効果は一様ではなく、乾燥地域で相対的に効果が大きいこと、土壌中の利用可能リン量が効果発現に関与し得ること、ならびに有機物含量が低く pH が中性といった条件で AMF (アーバス

キユラー菌根菌) の定着が良好になり得ること等、効果を左右する要因が整理されている。

文献②⁴³⁾ (普及に向けた市場面での課題)

- PGPM (植物成長促進微生物) について、開発プロセスを整理しつつ、最新動向と課題、今後の方向性をレビューした論文である。
- 普及に向けては、研究・生産面の課題に加え、市場において便益 (増収・生産性向上) や費用対効果が十分に共有されていない点を指摘している。一方で、効果は環境条件に依存してばらつきやすいという問題もあるため、その問題に対処するために、施用タイミング・用量・作物適合性など「効きやすい使い方」を設計し、条件付きの推奨として提示する必要があるとしている。

文献③⁴⁴⁾ (トウモロコシ)

- トウモロコシの収量に対する、*Azospirillum brasilense* の種子接種等の影響を評価するために、ブラジルの 13 地点で 10 年間 30 件の圃場試験を実施。
- 非接種・窒素施肥 0%、75%、100% 区画に対し、接種区画はそれぞれ +6.9%、+4.6%、+5.2% と有意に増収した。なお、非接種・窒素施肥 50% 区画については、接種効果が有意ではなかった (マイナス傾向)。
- 接種・窒素施肥 75% 区画と、非接種・窒素施肥 100% 区画の収量に、統計的な有意差が見られないことに着目し、微生物接種によって、窒素肥料を 25% 減らせる可能性に言及。窒素施肥 100% は 90kg/ha に相当し、また窒素肥料の平均価格が 0.77 米ドル/kg (ブラジル 2021 年 10 月時点)、微生物接種費用が約 2 米ドル/ha であることから、農家が約 15 米ドル/ha (=90kg/ha×25%×0.77 米ドル/kg - 2 米ドル/ha) の肥料費を減らせる可能性について言及している。

文献④⁴⁵⁾ (大豆)

- 大豆の収量に対する、リン酸肥料 (過リン酸石灰) (P)、根粒菌接種剤 (I)、P+I の影響を評価し、それらの経済性を分析するために、ナイジェリア北部の 145 の農家における圃場試験を実施。
- 平均で、P 単独は +452 kg/ha、I 単独は +447 kg/ha、P+I は +777 kg/ha の増収が見られた (ただし圃場間のばらつきは大きい)。損益分岐点に達した農家の割合は、P 単独、I 単独、P+I のそれぞれで 62%、95%、83%、費用便益比 (便益を費用で除したもの) = 2 (※) に達した農家の割合は、それぞれ 38%、94%、66% であった。

※ 本文献 (④) では、「ある技術が導入されるには、一般的に費用便益比が 2 : 1 である必要があると考えられている (引用なし)」とし、費用便益比

= 2 を技術導入基準として採用している。また、本文献での費用便益比=1 は、接種コストと、得られた便益（接種による増収分の金額換算）が同額であることを示す。

（参考③）微生物農薬の費用対効果

微生物農薬の効果は、現時点では化学農薬には劣る傾向が見受けられるものの、その費用便益比（便益を費用で除したもの）は 2.0 を上回っており、経済的に実用可能な水準にあることが示されている。

文献①⁴⁶⁾（トマト）

- ネパール ルーパンデヒの圃場で、微生物農薬や植物性農薬、化学農薬を、15 日間隔でトマト（Pusa Rubi）に計 4 回散布し、オオタバコガへの防除効果、費用便益等を評価。
- 収量・防除効果は低毒性の化学農薬の Chlorantraniliprole（Alcora®）と Spinosad（Tracer®）が高く、その費用便益比は、Chlorantraniliprole が 6.53 と Spinosad が 6.14 と高水準だった。
- 他の処理の費用便益比は、低毒性の化学農薬の Abamectin（Biotrine®）が 4.16、微生物農薬の *Metarhizium anisopliae*（Pacer®）が 3.63、同じく微生物の *Bacillus thuringiensis*（Mahastra®）が 3.61、そして植物性農薬（Neemraj Super® Azadirachtin 含有）が 4.36 であった。なお、本文献での費用便益比=1.0 は、苗床準備から収穫までを含む生産コストと、得られた便益（農薬による増収分の金額換算）が同額であることを示す。

文献②⁴⁷⁾（トマト）

- ウガンダの圃場で、微生物農薬（*Metarhizium anisopliae* ICIPE20 または ICIPE69 《Mazao Campaign®》）、または微生物由来成分 abamectin を含む薬剤（Dudu Acelamectin：abamectin+acetamiprid 含有）をトマトに散布し、2 シーズンで防除効果と費用便益を評価した。
- トマトの収量損害（fruit yield loss）は未処理区に比べ、全処理区（ICIPE20 処理区/ICIPE69 処理区/ Dudu Acelamectin 処理区）で有意に抑制され、Dudu Acelamectin が最も低い損害を示した。費用便益比は、シーズン 1・2 のそれぞれで、Dudu Acelamectin が 8.9・6.3、*M. anisopliae* ICIPE20 が 4.3・2.8、ICIPE69 が 3.4・2.1 であった。なお、本文献での費用便益比=1.0 は、農薬処理コストと、得られた便益（農薬による増収分の金額換算）が同額であることを示す。

（参考④）バイオスティミュラント（BS）の費用対効果

BS が生産者に利用されるためには、以下の式を満たす必要がある。

式1) BSによる収量増効果+BSのコスト削減効果(肥料等)

-BS施用コスト>0

この式を変換すると以下のようになり、BSによるメリット(増収効果とコスト削減効果)がBS施用コスト(人件費も含む)を上回り、更にそのメリットが大きいほど生産者には訴求力が高まる。

式2) BSによる収量増効果+BSによるコスト削減効果(肥料等)

>BS施用コスト

過去の遺伝子組換え種子等の例⁴⁸⁾(1USD/haの投資で5.22USD/haのリターン)を見るとBS施用コストの2倍以上の利益増が見込めると競争力が高まると考えられる。地域や作目によって施肥量や播種量が変わるが、施肥量が多い南北アメリカ大陸のトウモロコシ(尿素施肥量150~400kg/ha)では肥料コストが高いため、特に効果が高い。

ブラジルの例⁴⁹⁾を見ると、下表は通常尿素(Conventional Urea)、ポリマー尿素(Polymer-Coated Urea)、NBPT尿素(Urea with NBPT)の3種類の窒素肥料にBS(*Azospirillum brasilense*)を組み合わせた場合の総施業費用(TOC)、収量(YIELD)、売上(GR)を示したものであり、上段がBS無接種、下段がBSを接種した場合を示している。BSの接種は、施用量に拘らず有益であり、接種により収量・利益が一貫して増加。なかでも、NBPT尿素150kgとの組合せの場合に、一番効果が大きくなった。(収量、売上ともに約1.61倍)

注1: BSは1haあたり200ml(=25kgの種子に対し)処理

注2: NBPT尿素とは土壌中に存在する酵素ウレアーゼの働きを一時的に抑制する「ウレアーゼ阻害剤」を添加した窒素肥料

注3: ポリマー尿素、NBPT尿素は、窒素吸収効率を高めた尿素で、通常尿素よりも収量改善効果がある。

Without <i>Azospirillum brasilense</i>									
N Doses (kg ha ⁻¹)	Conventional Urea			Polymer-Coated Urea			Urea with NBPT		
	TOC	YIELD	GR	TOC	YIELD	GR	TOC	YIELD	GR
	BRL	60 kg ha ⁻¹	BRL	BRL	60 kg ha ⁻¹	BRL	BRL	60 kg ha ⁻¹	BRL
0	2215.32	84.93	4433.31	2215.32	87.93	4590.10	2215.32	89.72	4683.32
50	2600.50	82.36	4299.42	2600.50	61.74	3222.61	2600.50	106.25	5546.16
100	2985.32	96.17	5020.29	2985.32	116.44	6078.29	2985.32	131.27	6852.27
150	3370.32	106.83	5576.57	3370.32	145.52	7595.94	3370.32	137.34	7169.30
200	3756.06	137.09	7156.28	3756.06	146.68	7656.63	3756.06	146.76	7661.00
Mean	2291.44	101.48	5297.17	2291.44	111.66	5828.72	2291.44	122.27	6382.41

With <i>Azospirillum brasilense</i>									
N Doses (kg ha ⁻¹)	Conventional Urea			Polymer-Coated Urea			Urea with NBPT		
	TOC	YIELD	GR	TOC	YIELD	GR	TOC	YIELD	GR
	BRL	60 kg ha ⁻¹	BRL	BRL	60 kg ha ⁻¹	BRL	BRL	60 kg ha ⁻¹	BRL
0	2235.32	99.97	5218.39	2235.32	94.69	4942.72	2235.32	95.98	5010.41
50	2620.50	114.94	5999.74	2620.50	151.03	7883.68	2620.50	158.54	8275.66
100	3005.32	140.79	7349.45	3005.32	154.35	8057.08	3005.32	147.26	7687.07
150	3390.32	150.83	7873.25	3390.32	149.58	7807.92	3390.32	220.46	11,508.12
200	3776.06	138.44	7226.58	3776.06	154.83	8082.08	3776.06	182.47	9525.15
Mean	3005.50	128.99	6733.48	3005.50	140.89	7354.69	3005.50	160.94	8401.28

図VI-1-1-13 ブラジルにおけるトウモロコシでのバイオスティミュラント（BS）

費用対効果（下段がBS処理区）⁴⁹⁾

※総作業費用（TOC）、収量（YIELD）、売上（GR）

参考文献

1. 公開情報をもとにした野村証券フード&アグリビジネス・コンサルティング部による調査・予測値.
2. 農林水産省（MAFF），2024. 我が国と世界の肥料をめぐる動向.
https://www.maff.go.jp/j/zyukyu/jki/j_rep/monthly/attach/pdf/r5index-3.pdf
3. クロップライフジャパン，n.d. Q&A. https://www.croplifejapan.org/qa/a4_16.html
4. 日本農薬学会誌，農薬開発の変遷と今後.
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjpestics/50/1/50_W25-11/_pdf/-char/ja
5. European Union, 2019. Regulation (EU) 2019/1009... EU fertilising products (Text with EEA relevance). <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/1009/oj/eng>
6. The Biorefine Cluster network 「How to bring plant biostimulant products to the EU market」 https://www.biorefine.eu/wp-content/uploads/2023/03/Factsheet_final-1.pdf
7. 農林水産省，2025. バイオスティミュラントの表示等に係るガイドライン.

- <https://www.maff.go.jp/j/press/syouan/nouan/attach/pdf/250530-1.pdf>
8. 農林水産省, 2025. バイオスティミュラントの現状と課題について.
<https://www.maff.go.jp/j/syouan/attach/pdf/biostimulant-6.pdf>
 9. Seema, B. et al., 2021. Phosphorus transitions in traditional eco-knowledge versus chemical based agri-amendment systems of stress-prone semi-arid tropics: Finding the real game-changer. *Ecological Indicators*, 121, 107145.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107145>
 10. Rezaei-Chiyaneh, E. et al., 2021. Co-inoculation of Phosphate-Solubilizing Bacteria and Mycorrhizal Fungi: Effect on Seed Yield, Physiological Variables, and Fixed Oil and Essential Oil Productivity of Ajowan (*Carum copticum* L.) Under Water Deficit. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21, 3159-3179. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00596-9>
 11. Faller, L. et al., 2024. Enhancing phosphate-solubilising microbial communities through artificial selection. *Nature Communications*, 15, 1649.
<https://doi.org/10.1038/s41467-024-46060-x>
 12. Sarikhani, M.R. et al., 2018. Isolation and identification of potassium-releasing bacteria in soil and assessment of their ability to release potassium for plants. *European Journal of Soil Science*, 69(6), 1078-1086.
<https://doi.org/10.1111/ejss.12708>
 13. Ali, A.M. et al., 2020. Effect of potassium solubilizing bacteria (*Bacillus cereus*) on growth and yield of potato. *Journal of Plant Nutrition*, 44(3), 411-420. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1822399>
 14. Masuda, Y. et al., 2024. Ferrihydrite Addition Activated Geobacteraceae, the Most Abundant Iron-reducing Diazotrophs, and Suppressed Methanogenesis by Heterogeneous Methanogens in Xylan-amended Paddy Soil Microcosms. *Microbes and Environments*, 39(3), 2024. <https://doi.org/10.1264/jsme2.ME24028>
 15. Bennett, E.M. et al., 2023. Engineering Nitrogenases for Synthetic Nitrogen Fixation: From Pathway Engineering to Directed Evolution. *BioDesign Research*, 5, 0005. <https://doi.org/10.34133/bdr.0005>
 16. Shulse, C.N. et al., 2019. Engineered Root Bacteria Release Plant-Available Phosphate from Phytate. *Applied and Environmental Microbiology*, 85, e01210-19.
<https://doi.org/10.1128/AEM.01210-19>
 17. Ayushi, S. et al., 2022. Exploring the potential of endophytes and their metabolites for bio-control activity. *3 Biotech*, 12, 277.
<https://doi.org/10.1007/s13205-022-03321-0>
 18. Wang, Y., 2021. Integration of dsRNA against host immune response genes

- augments the virulence of transgenic *Metarhizium robertsii* strains in insect pest species. *Microbial Biotechnology*, 14(4), 1433-1444.
<https://doi.org/10.1111/1751-7915.13748>
19. Pathak, D. et al., 2024. Community-forming traits play role in effective colonization of plant-growth-promoting bacteria and improved plant growth. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1332745
<https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1332745>
 20. Cristina, C. et al., 2021. A Biostimulant Based on Seaweed (*Ascophyllum nodosum* and *Laminaria digitata*) and Yeast Extracts Mitigates Water Stress Effects on Tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Agriculture*, 11(6), 557.
<https://doi.org/10.3390/agriculture11060557>
 21. Sretenović, M. et al., 2024. Productivity, biocontrol and postharvest fruit quality of strawberry cultivar ‘Clery’ using plant growth promoting microorganisms. *Cogent Food & Agriculture*, 10.
<https://doi.org/10.1080/23311932.2024.2310896>
 22. Barros-Rodríguez, A. et al., 2020. Regulatory risks associated with bacteria as biostimulants and biofertilizers in the frame of the European Regulation (EU) 2019/1009. *Science of the Total Environment*, 740, 140239.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140239>
 23. Yu, Y. et al., 2023. Artificial Soil-Like Material Enhances CO₂ Bio-Valorization into Chemicals in Gas Fermentation. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 15(46), 53488-53497. <https://doi.org/10.1021/acsami.3c12627>
 24. Mehmood, N. et al., 2023. Multifaceted Impacts of Plant-Beneficial *Pseudomonas* spp. in Managing Various Plant Diseases and Crop Yield Improvement. *ACS Omega*, 8(25), 22296-22315. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c00870>
 25. Fernández-Caliani, J.C. et al, 2024. Unveiling a Technosol-based remediation approach for enhancing plant growth in an iron-rich acidic mine soil from the Rio Tinto Mars analog site. *Science of the Total Environment*, 922, 171217.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171217>
 26. Bayer CropScience LP, 2018. Pesticide using *Paenibacillus* or *Bacillus*. W02018/183381 A1.
 27. Syngenta Crop Protection AG, 2020. Pesticidal composition with 8-fluoroquinoline-3-carboxamide and *Bacillus subtilis*. W02020/064696 A1.
 28. The Regents of the University of California, 2024. Fertilizer compositions using SynCom mimicking phyllosphere diversity. US12329161 B2.
 29. Niha Corp., n.d. Fertilizer comprising acclimatized effective microorganisms

- (AEM) consortia. US12024477 B2.
30. DPH Biologicals LLC, 2024. Fertilizer compositions containing microbial consortia stabilized with humus extracts. US2024/0246876 A1.
 31. BASF Agrochemical Products BV, n.d. Pesticide combining a carboxamide compound with *Beauveria bassiana*. US11219211 B2.
 32. BioConsortia Inc., 2024. Pesticides using engineered *Bacillus thuringiensis* strains. US2024/0389601 A1.
 33. Sumitomo Chemical Co., Ltd. & Sumitomo Chemical Garden Products Co., Ltd., 2024. Stabilized pesticide formulations containing *Bacillus*. W02024/075782 A1.
 34. TransAlgae Israel Ltd., n.d. Insect control using *Phaeodactylum tricornutum* with RNAi. US10781447 B2.
 35. Bayer CropScience AG, n.d. Nematicidal compositions combining *Paecilomyces lilacinus* 251 or *Coniothyrium minitans* with thiocarbamates. US9730455 B2.
 36. Zhang, B. et al., 2022. Guvermectin promotes growth and high-temperature tolerance of maize. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1025634.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1025634>
 37. Sanskrit Seedlings Co., Ltd., 2023. Use of functional filamentous fungi as biostimulants. W02023/167135 A1.
 38. AGRI SMILE Inc., n.d. Biostimulant containing beer-yeast cell-wall hydrolysate and histidine. JP7364296 B1.
 39. California Institute of Technology, 2025. Modifying soil microbiomes using chemoattractants and carbon substrates. US2025/0187998 A1.
 40. Kansai Bunri Sogo Gakuen Educational Foundation & Shimamoto Microbial Industry Co., Ltd., 2024. Soil microbiome improving agent with microorganisms, substrates and carrier. JP2024-060152 A.
 41. AgribioInvestor [Time and Cost of New Agrochemical Product Discovery Development and Registration] <https://croplife.org/wp-content/uploads/2024/02/Time-and-Cost-To-Market-CP-2024.pdf>
 42. Schütz, L. et al., 2018. Improving Crop Yield and Nutrient Use Efficiency via Biofertilization—A Global Meta-analysis. *Front. Plant Sci*, 8:2204.
<https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2017.02204/full>
 43. Alondra María Díaz-Rodríguez . et al., 2025, Microbial Inoculants in Sustainable Agriculture: Advancements, Challenges, and Future Directions, *Plants*, 14(2):191. <https://doi.org/10.3390/plants14020191>
 44. Mariangela Hungria. et al., 2022. Improving maize sustainability with partial

- replacement of N fertilizers by inoculation with *Azospirillum brasilense*. *Agronomy Journal*, 114(5), 2969-2980,
<https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/agj2.21150>
45. E. Ronner . et al., 2016, Understanding variability in soybean yield and response to P-fertilizer and rhizobium inoculants on farmers' fields in northern Nigeria, *Field Crops Research*, 186, 133-145,
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.10.023>
46. Khanal, D . et al., 2025, Evaluation of sustainable biorational pesticides for managing *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) on tomato in Nepal. *Discov Agric*, 3, 199. <https://doi.org/10.1007/s44279-025-00308-2>
47. Kabaale, F. P . et al., 2022, First Report of Field Efficacy and Economic Viability of *Metarhizium anisopliae*-ICIPE 20 for *Tuta absoluta* (Lepidoptera: Gelechiidae) Management on Tomato. *Sustainability*, 14(22), 14846.
<https://doi.org/10.3390/su142214846>
48. PG Economics Ltd, 2022. GM crops: global socio-economic and environmental impacts 1996-2020.
<https://pgeconomics.co.uk/pdf/Globalimpactbiotechcropsfinalreportoctober2022.pdf>
49. Damasceno, L.J. et al., 2024. Economic analysis of *Azospirillum brasilense* with EENF in corn (Brazilian Amazon). *Nitrogen*, 5(3), 544-552.
<https://doi.org/10.3390/nitrogen5030036>

1－2．飼料・餌料等（添加物含む）の生産技術開発 【畜産】

（1）技術概要

日本の畜産業は飼料原料の大部分（令和5年実績でトウモロコシなどの濃厚飼料は87%、乾草など粗飼料は20%）¹⁾を輸入に頼っており、飼料原料の安定確保、多様化は重要な課題である。更に国際情勢や為替の影響等による昨今の飼料コストの高騰により、生産性の向上、各種コスト削減による収益性改善は喫緊の課題である。また、畜産業を取り巻く社会課題として、薬剤耐性菌（AMR）対策、温室効果ガス（GHG）削減及び糞尿処理を含む環境対策が、持続可能な畜産を実現するうえで重要な課題となっている¹⁻⁵⁾。これら課題に対して、微生物活用技術を「①飼料原料確保・多様化」「②生産性向上」「③環境対策」の3つの主要領域に位置づけ、

各領域を2つの観点から整理する。

① 飼料原料確保・多様化

この領域は、国内での飼料自給率向上とコスト安定化を目的とする。

「未利用資源のアップサイクル」は、農業残渣・食品副産物等を発酵・固形発酵で飼料化し、国産タンパク質源の確保と廃棄物・GHG削減を両立する技術である。

「SCP（単細胞タンパク質）の活用」は、バイオガス由来 CH_4/CO_2 等のC1資源や有機廃液を利用し増殖させた細菌・酵母等のSCPを飼料原料として利用する技術である。

② 生産性向上

この領域は、飼料効率の改善と家畜の健康維持を目的とする。

「微生物産生機能物質（酵素・有機酸など）」は、微生物が産生するフィターゼ・キシラナーゼ・ムラミダーゼ等の酵素や、有機酸などを工業的に製造し、飼料添加物として飼料に混合給与することで栄養利用性向上や病原菌制御を通じて飼料要求率（FCR）改善・環境負荷低減を図るものである。

「腸内環境・生体機能制御（プロ／プレ／ポストバイオティクス等）」は、乳酸菌・酪酸菌・酵母などの生菌・死菌・菌体成分等を投与し、腸内環境の改善と、腸脳相関（腸内細菌叢－腸－脳軸；MGBA）など腸を起点とした全身臓器への機能波及を促すことで、家畜の成長・健康・ウェルフェアの向上を図るものである。

③ 環境対策

この領域は、畜産由来の環境負荷低減を目的とする。

「反芻動物のGHG排出削減」は、ルーメン発酵とメタン生成古細菌をターゲットに、飼料設計・メタン抑制飼料添加物・微生物群集制御によりメタン排出を低減する技術である。

「単胃動物（豚・鶏等）のGHG・窒素排出削減」は、単胃動物では腸内メタンよりも、後腸発酵と糞尿由来 $CH_4 \cdot N_2O \cdot NH_3$ が問題となるため、腸内細菌叢・栄養設計・糞尿処理を通じて排出削減・窒素利用効率向上を図る技術である。

(2) 研究動向

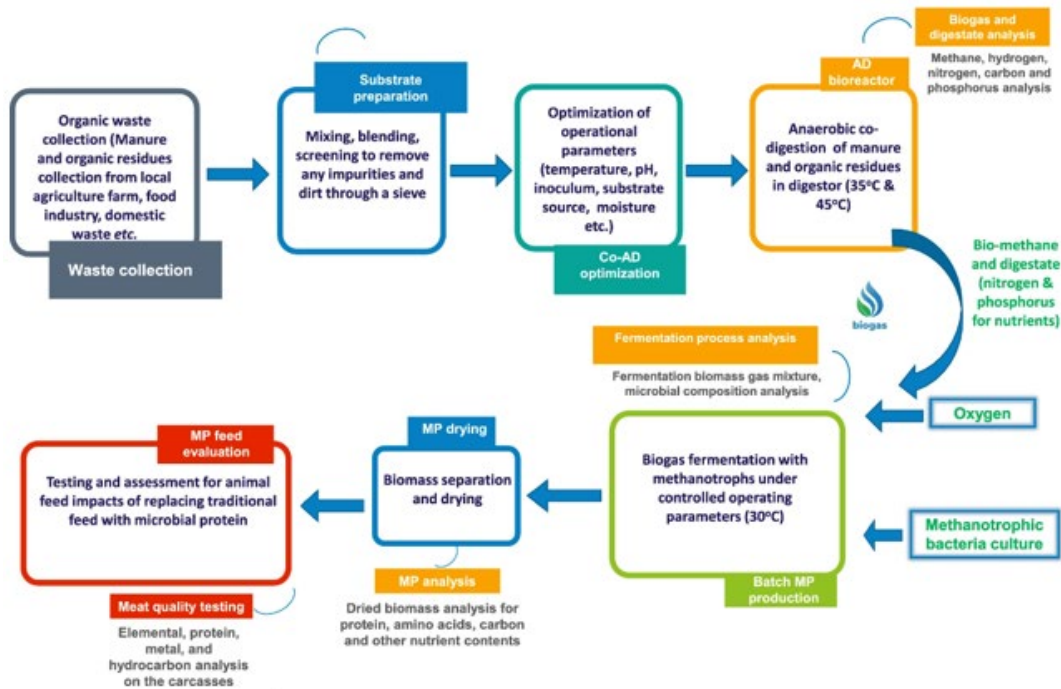
近年、「未利用資源・C1資源を活用した飼料タンパク質生産」、「酵素・抗菌酵素・有機酸等の機能性添加物の高性能化と拡大」、「腸脳相関（MGBA）など腸から全身への機能波及に関する研究」、「ルーメン発酵及び単胃動物の後腸発酵・糞尿処理におけるGHG・窒素動態の解明」が進展しており、畜産分野の微生物活用研究の主要な潮流となっている。研究開発における現在の動向を各項目①～③について

て、以下に記載する。

① 飼料原料確保・多様化

未利用資源のアップサイクルの分野では、農業残渣・食品副産物の混合発酵によるタンパク質増強・抗栄養因子低減・消化性向上に関する研究が拡大している^{5) 6)}。特に、複数の副産物を組み合わせることで、アミノ酸バランスの最適化や発酵効率の向上を図る研究が進展している。また、発酵により嗜好性も高まることから、飼料価値向上につながる。

SCPの活用においては、メタン資化細菌やメタノール資化酵母等によるSCPの栄養価評価と、魚類・家禽・豚など家畜種別の給与試験が行われている。また、農業残渣や食品残渣など有機物の嫌気性消化（AD）由来のバイオガスを原料とする「AD+SCP」統合プロセスについて、GHG排出や資源効率を含むライフサイクルアセスメント（LCA）及び経済性評価の知見が蓄積されてきている⁷⁻⁹⁾。



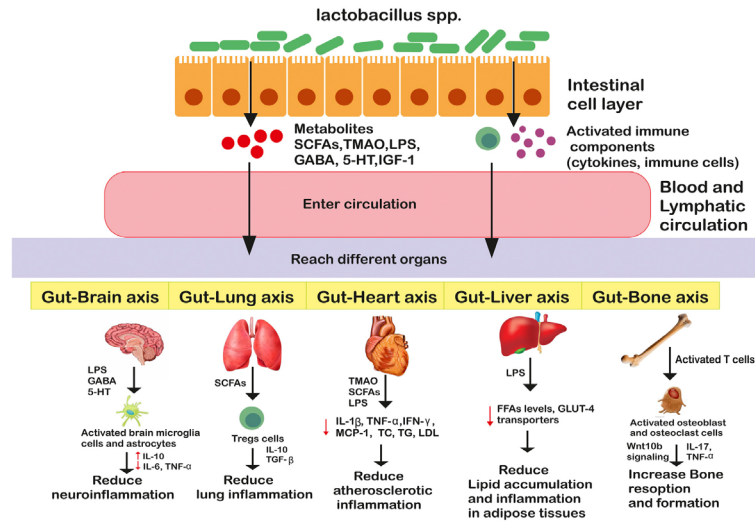
図VI-1-2-1 農業廃棄有機物の嫌気性消化由来バイオガスの飼料用MP生産⁶⁾

② 生産性向上

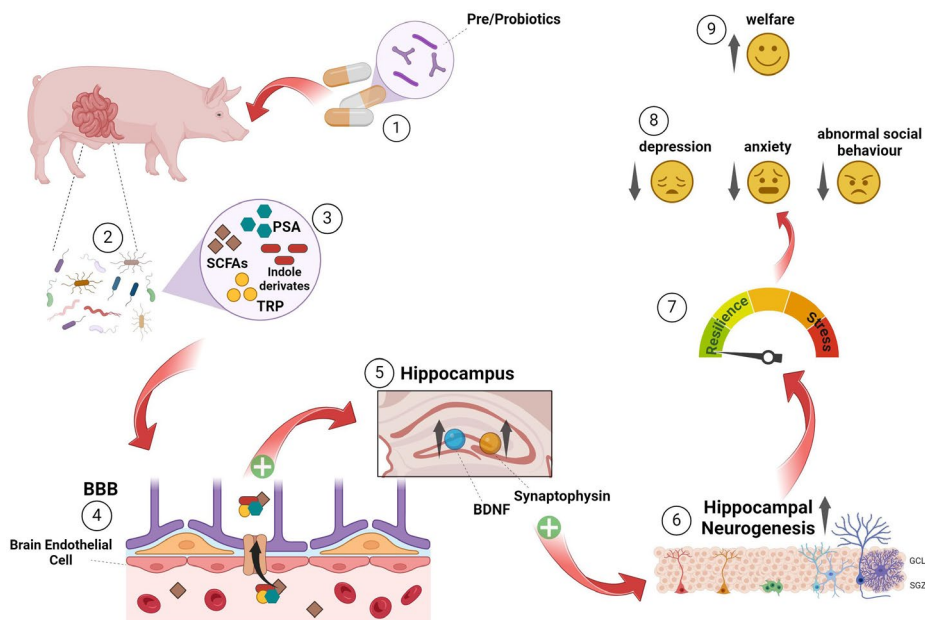
酵素・有機酸などの微生物産生機能物質の分野においては、飼料用酵素の腸内環境・栄養利用・リン排泄への影響に関する研究が進んでいる。特に、ムラミダーゼ等の抗菌酵素による腸管バリア機能改善・成長成績向上効果や、微生物由来有機酸・ペプチドのAMR低減ポテンシャルが整理されている^{10) 11)}。

内環境・生体機能制御の分野では、家禽・豚のプロ／プレ／ポストバイオティ

クスが成長・F C R・抗病性・腸内多様性・排泄窒素・臭気に与える影響に関する研究が進んでいる。特にAMR対策の観点からプロ、ポストバイオティクスによる免疫増強作用による感染症予防、A G P代替に関する研究や全身臓器への波及効果に関する研究が進んでいる^{10) 12) 13)}。また、マウス等でのM G B Aを介した行動・ストレス応答改善効果が確認され、アニマルウエルフェア向上の観点から家畜応用への展開が期待されている^{12) 14-17)}。



図VI-1-2-2 プロバイオティクス (*Lactobacillus*属) の全身臓器への波及効果¹³⁾



図VI-1-2-3 プロバイオティクスと腸内細菌叢が促す神経新生とアニマルウエルフェア(仮説)¹⁵⁾

③ 環境対策

反芻動物のGHG排出削減については、ルーメン微生物叢におけるH₂フローの動態及びメタン生成古細菌の機能解析に関する知見が進展している¹⁸⁾。また、メタン削減のカギとなるプロピオン酸生産増強菌 *Prevotella lactificifex* の発見、大量培養も行われ、飼料添加資材化の検討も進んでいる¹⁹⁾。メタン抑制飼料添加物については、削減効果のみならず、発酵プロファイルの変化、副作用、馴化による効果減衰の有無など、持続性に焦点を当てた情報も蓄積している²⁰⁻²²⁾。

単胃動物のGHG・窒素排出削減については、豚の後腸における腸内細菌叢とメタン排出の関係²³⁾、栄養設計による糞便メタンポテンシャルの制御試験²⁴⁾、さらに糞尿処理過程におけるGHG排出及び抗菌薬耐性遺伝子(ARG)の動態に関する研究が報告されている^{4) 23-25)}。

(3) 実装化動向

未利用資源アップサイクル・SCP生産などの技術は既存発酵設備と組み合わせた新たな飼料タンパク質供給モデルとして、また、プロバイオティクス・メタン抑制添加物などの技術は家畜の健康増進とGHG排出削減を両立する機能性飼料ソリューションとして、海外では商業化が進む一方で、日本では地域実証や限定的な導入にとどまるものが多い。コストや制度・情報面でのギャップが残っている。実装化における現在の動向を各項目①～③について、以下に記載する。

① 飼料原料確保・多様化

未利用資源のアップサイクルについては、酒粕・食品残さ・稲わら等を乳酸発酵により飼料化する取組みが従来から行われているが、近年は農業残渣・食品副産物の混合発酵や品質管理に関する知見が整理され、地域循環型モデルとしての実装が進展している^{5) 6) 24)}。

SCPの活用については、CALYSTA社のFeedKind[®](メタン酸化細菌由来SCP)が水産・畜産飼料向けとしてEU・中国等で承認・上市されており⁹⁾、メタン・バイオガス由来SCPや、他のガス発酵プロテインの商用プラントも稼働しつつある^{7) 8)}。食品廃棄物を基質として飼料用SCPを製造する技術²⁶⁾やエタノール/糖蜜由来の副産物を利用した高タンパク質酵母SCP製品に関する技術²⁷⁾の特許が出願され、実用化に向けた動きが加速している。

② 生産性向上

微生物産生機能物質(酵素・有機酸など)については、安定性・活性の高い飼料酵素が既に標準的ツールとなっており、Novozymes社やDSM社等の製品が普及している^{10) 28)}。ムラミダーゼ製剤については特許出願や製品開発が進展し、従来の腸内細菌残屑の分解による腸管での栄養吸収改善、FCR改善効果に加え、免疫への影響や抗菌作用の研究進展から抗菌剤代替としての期待が高まっている

る^{11) 29)}。

腸内環境・生体機能制御(プロ/プレ/ポストバイオティクス等)については、乳酸菌・酵母等のプロバイオティクス製品が家禽・豚向けに多数上市されており、成長促進や健康維持を目的として広く利用されている^{2) 3) 16) 17)}。

③ 環境対策

反芻動物のGHG排出削減については、3-NOP (Bovaer) 等のメタン生成抑制剤が北米、EUに加えて日本でも承認されており、さらに海外を中心に商用利用されている²⁰⁻²²⁾。また、*Bacillus/Lactobacillus* を組み合わせた組成物³⁰⁾ や、乳酸菌を利用したメタン生成古細菌抑制技術³¹⁾ の特許が出願されており、飼料・飼養管理との組み合わせによるパッケージ導入も始まりつつある。

単胃動物(豚・鶏等)のGHG・窒素排出削減については、専用のメタン抑制添加物は限られるものの、酵素・発酵飼料等により後腸発酵及び糞便メタンポテンシャルを調整する取り組みが行われており²³⁻²⁵⁾、糞尿処理では嫌気性消化(A/D)・堆肥化等の技術が普及しつつある^{4) 24)}。

(4) 研究課題

各項目①～③の課題について、以下に記載する。

① 飼料原料確保・多様化

未利用資源のアップサイクルに関して、原料組成の季節・地域変動を踏まえた発酵挙動・栄養価のモデル化及び安全性評価が未だ十分ではない^{5) 6) 24)}。

SCPの活用では、培養挙動・栄養価・嗜好性・長期給与影響について家畜種・ライフステージ別の比較データが不足している⁷⁻⁹⁾。

② 生産性向上

微生物産生機能物質(酵素・有機酸など)に関して、新規酵素等の作用機構、腸内細菌への影響、AMR(抗菌薬耐性)への影響の包括的な評価体系が未成熟である^{3) 10-12)}。

腸内環境・生体機能制御(プロ/プレ/ポストバイオティクス等)については、畜種・系統・飼料・飼養環境が腸内細菌叢及び応答に与える影響、ならびに望ましい腸内機能プロファイルやMGBA指標に関する研究が進行中である^{2) 3) 12) 14) 15)}。

③ 環境対策

反芻動物のGHG排出削減に関し、メタン抑制剤・飼料戦略がルーメン、生産性、動物福祉に与える長期影響評価が限られており、メタン削減と生産性・福祉のトレードオフの把握が課題である²⁰⁻²²⁾。

単胃動物(豚・鶏等)のGHG・窒素排出削減に関しては、腸内細菌叢・後腸発酵・GHGとの関係を統合したモデル構築が不十分であり、栄養設計・腸内制

御・糞尿処理を一体で評価する枠組みが必要である^{23) 25)}。

(5) 実装化課題

各項目①～③の実装化における課題について、以下に記載する。

① 飼料原料確保・多様化

未利用資源のアップサイクルに関し、既存飼料との価格競争力のある生産のための、原料収集・前処理・発酵設備等のプロセス設計が限定的である^{1) 5)}。

S C Pの活用では、可燃性ガスを扱う大規模培養の安全対策・自動制御や、バイオガスプラント等との連携を含むサプライチェーン構築が課題であり、加えてS C Pの製造コストが既存飼料（魚粉・大豆粕等）より高く、普及の制約となっている^{2) 3) 7) 8)}。

② 生産性向上

微生物産生機能物質（酵素・有機酸など）に関し、高生産株育種・培養条件最適化・下流工程簡素化を通じた生産コスト低減、ペレット化等の加工条件下での安定性、安全性評価を含む法規制対応が負担となっている。

腸内環境・生体機能制御（プロ／プレ／ポストバイオティクス等）については、コマーシャルコンディションでは安定して効果が得られないことも多く、効果発現条件の標準化、飼料製造加工、胃酸、胆汁耐性等を付与する製剤化や用量最適化、目的に応じた選択と組み合わせ、農場レベルでの長期的なエビデンスの取得などが必要とされる^{2) 3) 16) 17)}。

③ 環境対策

反芻動物のGHG排出削減に関し、農場～地域レベルでのメタン削減量のMRV（測定・報告・検証）手法の整備、及びクレジット等の経済的なインセンティブへの接続が不十分であり²⁰⁻²²⁾、現場導入の動機付けが弱い。

単胃動物（豚・鶏等）のGHG・窒素排出削減に関しても、飼料側と糞尿処理側の対策を組み合わせた最適パッケージ設計やその費用対効果・環境効果を農場経営の意思決定に結びつける指標・インセンティブが不足している^{4) 23-25)}。

(6) 研究開発の方向性

畜産業を持続的に発展させるためには、①飼料原料確保・多様化、②家畜飼育生産における生産性向上、③環境対策に加え糞尿処理等、有機廃棄物からの肥料、エネルギーの再生産など、各技術領域を統合し畜産クラスター単位の循環モデルとして設計・実証していくことが重要である。

各項目①～③の研究開発の方向性について、以下に記載する。

① 飼料原料確保・多様化

微生物発酵により安価・大量・安定供給可能な飼料原料を創出し、未利用バ

イオマスの高付加価値化を推進する。また、メタン資化菌・水素細菌等を活用し、カーボンリサイクル資源やCCS回収CO₂（C1資源）C1資源からタンパク質への低コスト変換技術を確立する。

② 生産性向上

酵素、ペプチドなど微生物が産生する機能性物質の継続的な探索と更なる高活性化を図り、飼料添加物として活用できるよう工業的製法、製剤化と適用設計を高度化する。プロ／プレ／ポストバイオティクス等については、生産性・品質向上、健康維持、抗菌物質不使用に資する有用微生物の探索を進め、ポストバイオティクスを基本軸に腸を起点とした全身への効果の研究を進める。利用面では畜種・ステージ別「望ましい腸内機能プロファイル」とMGBA指標を定義し、農場条件に応じた「プロ／プレ／ポストバイオティクス＋製剤技術」設計により、最適な剤の選択・組み合わせで効果の最大化、安定化を図る。

③ 環境対策

反芻動物では、ルーメン発酵制御や資材投入でメタン排出を下げ、カーボンクレジットやサプライチェーン全体の気候対策と連携し、環境負荷低減と原単位改善を図る。

さらに、家畜の糞尿処理においては、反芻、単胃動物共通して、嫌気発酵によるバイオガス化と栄養塩回収で循環システムを構築し、エネルギー・肥料価値を創出して経済メリットを高めることを目指す。

参考文献

1. Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries (MAFF), 2024. 飼料の現状と課題の整理. 食料・農業・農村政策審議会 畜産部会（第42回）資料3-1.
<https://www.maff.go.jp/j/council/seisaku/tikusan/attach/pdf/241113-42.pdf>
2. Shini, S. & Bryden, W.L., 2022. Probiotics and gut health: linking gut homeostasis and poultry productivity. *Animal Production Science*, 62(12), 1090-1112.
<https://doi.org/10.1071/AN20701>
3. Kholif, A.E. et al., 2024. Microbial feed additives in ruminant feeding. *AIMS Microbiology*, 10(3), 542-571.
<https://doi.org/10.3934/microbiol.2024026>
4. Lima, T. et al., 2020. Manure as a potential hotspot for antibiotic resistance dissemination by horizontal gene transfer events. *Veterinary Sciences*, 7(3), 110.
<https://doi.org/10.3390/vetsci7030110>

5. He, D. et al., 2025. Fermentation of organic wastes for feed protein production: focus on agricultural residues and industrial by-products tied to agriculture. *Fermentation*, 11(9), 528.
<https://doi.org/10.3390/fermentation11090528>
6. Rasool, K. et al., 2023. Comprehensive insights into sustainable conversion of agricultural and food waste into microbial protein for animal feed production. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 22(2), 527-562.
<https://doi.org/10.1007/s11157-023-09651-6>
7. Shahzad, H.M.A. et al., 2024. Challenges and opportunities in biogas conversion to microbial protein: a pathway for sustainable resource recovery from organic waste. *Process Safety and Environmental Protection*, 185, 644-659.
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.03.055>
8. Ye, Y. et al., 2025. Industrial microbial technologies for feed protein production from non-protein nitrogen. *Microorganisms*, 13(4), 742.
<https://doi.org/10.3390/microorganisms13040742>
9. Calysta, 2024. FeedKind® - single cell protein for aqua and livestock feeds. Calysta corporate website.
<https://calysta.com/>
10. Perera, W.N.U. & Ravindran, V., 2025. Role of feed additives in poultry nutrition: historical, current and future perspectives. *Animal Feed Science and Technology*, 326, 116371.
<https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2025.116371>
11. Amer, S.A. et al., 2023. New insights into the effects of microbial muramidase addition in the diets of broiler chickens. *Animals*, 13(8), 1356.
<https://doi.org/10.3390/ani13081356>
12. Chen, S. et al., 2022. Gut microbiota implications for health and welfare in farm animals: a review. *Animals*, 12(1), 93.
<https://doi.org/10.3390/ani12010093>
13. Rastogi, S et al., 2022. Gut microbiome and human health: Exploring how the probiotic genus *Lactobacillus* modulate immune responses. *Frontiers in Pharmacology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fphar.2022.1042189>
14. Kraimi, N. et al., 2019. Influence of the microbiota-gut-brain axis on behavior and welfare in farm animals: a review. *Physiology & Behavior*, 210, 112658. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2019.112658>
15. Hillerer, K.M. et al., 2024. Adult neurogenesis and the microbiota-gut-brain

- axis in farm animals: underestimated and understudied parameters for improving welfare in livestock farming. *Frontiers in Neuroscience*, 18, 1493605.
<https://doi.org/10.3389/fnins.2024.1493605>
16. Lallemand Animal Nutrition, 2023. Yeast derivatives - in-feed solutions. 製品カタログ.
<https://www.lallemandanimalnutrition.com/en/europe/products/in-feed-solutions/yeast-derivatives/>
 17. Lallemand Animal Nutrition, 2023. Yeast and bacteria probiotics - in-feed solutions. 製品カタログ.
<https://www.lallemandanimalnutrition.com/en/europe/products/in-feed-solutions/yeast-and-bacteria-probiotics/>
 18. Greening, C. et al, 2019. Diverse hydrogen production and consumption pathways influence methane production in ruminants. *The ISME Journal*, 13(10), 2617-2632. <https://doi.org/10.1038/s41396-019-0464-2>
 19. 生物系特定産業技術研究支援センター・ムーンショット型農林水産研究開発事業 成果報告 (2020-2024)
https://www.naro.go.jp/laboratory/brain/moon_shot/results/files/MSPJresult5_1.pdf
 20. Palangi, V. et al., 2022. Strategies to mitigate enteric methane emissions in ruminants: a review. *Sustainability*, 14(20), 13229.
<https://doi.org/10.3390/su142013229>
 21. Ungerfeld, E.M., 2022. Opportunities and hurdles to the adoption and enhanced efficacy of feed additives towards pronounced mitigation of enteric methane emissions from ruminant livestock. *Methane*, 1(4), 262-285.
<https://doi.org/10.3390/methane1040021>
 22. dsm-firmenich, 2024. Bovaer® - ルーメン由来メタン排出削減のための飼料添加物 (日本語版ブローチャー) .
https://www.dsm-firmenich.com/content/dam/dsm/anh/en/documents/dsm-f_Bovaer_climate-change_brochure_A4_8pp_JP.pdf.pdf
 23. Royer, E.B. et al., 2024. Reducing the formation of enteric methane and influencing the methane potential of manure via nutrition of pigs: literature study. *Wageningen Livestock Research Report* 1485, 88 pp.
<https://doi.org/10.18174/657546> PubMed
 24. Bang, D. et al., 2024. Influence of effective microbial additives inoculation on indigenous bacterial community dynamics and co-occurrence patterns during the composting of mixed food waste and livestock manure. *Agronomy*, 14(12),

2973.

<https://doi.org/10.3390/agronomy14122973>

25. Yang, J. et al., 2023. The role of gut archaea in the pig gut microbiome: a mini-review. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1284603.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1284603>
26. Hyfé Foods, Inc. 2023. Upcycling of underutilized resources (food waste) by fermentation to produce microbial protein for feed. W02023/215488A1, PCT.
27. DSM IP Assets B.V. 2025. Dried yeast single-cell-protein product using ethanol or molasses as feedstock. W02025/036975A1, PCT.
28. Novozymes A/S. 2022. Modified phytase with improved stability, activity and performance in animal feed. W02022/034211A1, PCT.
29. DSM IP Assets B.V.; Novozymes A/S. 2023. Feed or feed additive containing microbial-derived muramidase for improving laying performance and egg quality in poultry. W02023/110957A1, PCT
30. Biomedit, LLC. 2024. Compositions containing one or more Bacillus or Lactobacillus strains for reducing methane emissions from animals. W02024/197162A1, PCT.
31. Fonterra Co-operative Group Limited; AgResearch Limited. 2023. Feed compositions comprising lactic acid bacteria for suppressing growth of methanogenic bacteria/archaea and reducing methane emissions in ruminants. W02023/119206A1, PCT.

1－3. 飼料・餌料等（添加物含む）の生産技術開発

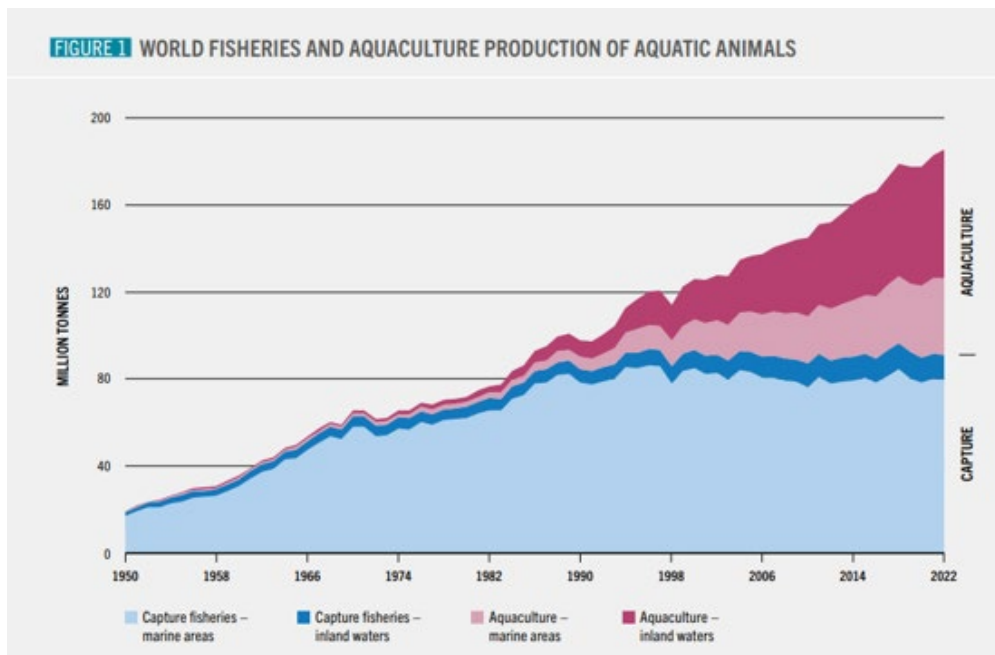
【水産】

（1）技術概要

世界的な魚粉・魚油の価格変動と需給逼迫は、養殖事業の最大の不確定要因であり、魚粉を代替する高品質タンパク質や魚類の必須脂肪酸（EPA/DHA）の安定供給確保が国際的最優先課題となっている。国際連合食糧農業機関（FAO）も、養殖生産の拡大に伴い、魚粉／魚油の代替原料・新素材への転換が不可避であることを指摘している¹⁾。

養殖拡大に伴い、単細胞タンパク質（SCP）や藻油、微生物由来の必須脂肪酸などへの原料転換は不可避である。また、養殖の集約化・陸上化の進展で水質維持や病原管理は高度な微生物制御に依存し、プロバイオティクスや生物防除を含む

「微生物生態系設計」が競争力の鍵になりつつある。特に再循環システムでは、微生物群集による硝化・脱窒・有機物分解の最適化が飼育密度と生産性を左右するため、飼料（代替飼料原料：SCP／藻油／発酵副産物等）と、養殖システム（BFT／RAS等における微生物群集制御：水質浄化・病原管理）を一体で設計・評価・実証する研究開発が求められる。これら課題に対して、微生物活用技術の主要技術領域を「①魚粉／魚油代替飼料」「②養殖の集約化・陸上化」の2領域とし、それぞれのサブ領域について整理する。



図VI-1-3-1 世界の漁獲漁業・養殖業の生産量の推移¹⁾

漁獲漁業生産量（青・水色）は1990年代以降伸び悩み、伸び続ける養殖業生産（赤・桃色）に必要な魚粉/魚油の供給に必要な天然魚の確保が困難になりつつある。

① 魚粉/魚油代替飼料

この領域は、持続可能な水産養殖の実現を目的とする。「未利用資源の酵素分解・発酵利用」は、食品・農業残渣、水産加工副産物等を酵素分解と微生物発酵で処理し、抗栄養因子の低減と消化性の向上を図る技術である²⁾。

「SCP及び微細藻類の利用」は、微細藻類由来脂肪酸（EPA/DHA等）や、微生物バイオマス由来タンパク質（SCP）等の微生物由来素材を魚粉代替・機能性原料として利用する技術である^{5) 7) 9) 13)}。

② 養殖の集約化・陸上化

循環式陸上養殖（RAS）は陸上で高度な環境制御と高密度養殖を実現するシステムであり、バイオフィロック技術（BFT）はそのシステム内などで効率的な

生産を支える技術要素の一つである。BFTは、従属栄養細菌群がアンモニア等を同化してフロックを形成し、魚介類がこれを採食することで栄養循環と給餌削減を実現する技術であり、養殖の集約化（高密度化）に寄与する。BFTは開放系にも活用できるが、RASとの親和性が高い^{6) 8)}。

「プロバイオティクス及び好氣的脱窒菌による水質管理」は、乳酸菌等のプロバイオティクス投与や好氣的脱窒菌を活用し、養殖環境の水質改善・疾病制御を図る技術である⁴⁾。

(2) 研究動向

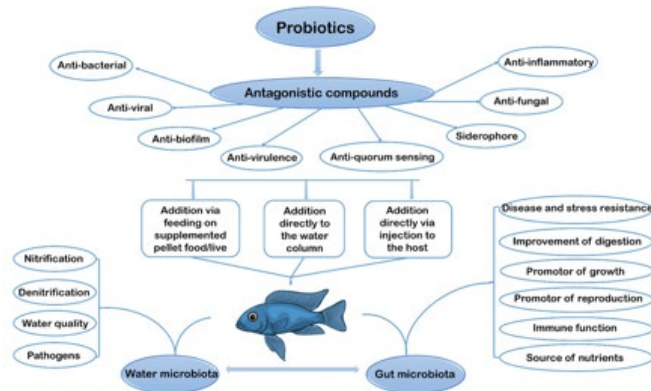
魚粉代替となる微生物由来タンパク質や微細藻類の栄養特性評価、プロバイオティクスによる腸管・免疫機能の制御、BFT・RASにおける微生物群集制御や排水処理技術の高度化など、餌原料と養殖システムの両面で研究が進展している。現在の動向を各項目①～②について、以下に記載する。

① 魚粉/魚油代替飼料

未利用資源の酵素分解・発酵利用については、食品残渣・農業残渣等を酵素分解や微生物発酵で処理し、抗栄養因子の低減と消化性の向上を目指す研究が進展している²⁾。特に、発酵によるアミノ酸組成の改善や、酵素処理によるリン利用効率の向上に関する知見が蓄積されつつある。SCP及び微細藻類の利用については、メタノール資化細菌由来SCPをエビ・サーモン等で評価し、魚粉の部分～全量代替の妥当性を成長・生存・官能面から検証する報告がみられる⁷⁾。また、微細藻類を餌原料・添加物として活用した場合の脂肪酸プロファイル、免疫賦活、色揚げ、水質への影響が整理され、魚粉の部分代替や機能性原料としての可能性が示されている⁵⁾。

② 養殖の集約化・陸上化

BFT及びRASでは、炭素源の追加によりヘテロ栄養細菌群がアンモニア等を同化してフロックを形成し、魚介類がこれを採食することで栄養循環と給餌削減を同時に達成し得ることが示されている⁶⁾。BFT環境下の微生物群集動態解析や最適C/N比の検討も進んでいる。プロバイオティクス及び好氣的脱窒菌による水質管理では、乳酸菌等の投与により魚類・甲殻類の成長・免疫・生存率向上や水質改善の効果が整理され、菌株選抜・投与経路・複合利用の方向性が提示されている⁴⁾。さらに、好氣的条件での *Pseudomonas hunanensis* の脱窒メカニズムが検討され、養殖排水の浄化能力が評価されている⁸⁾。



図VI-1-3-2 水生動物にプロバイオティクスを投与した際の主な利点⁴⁾

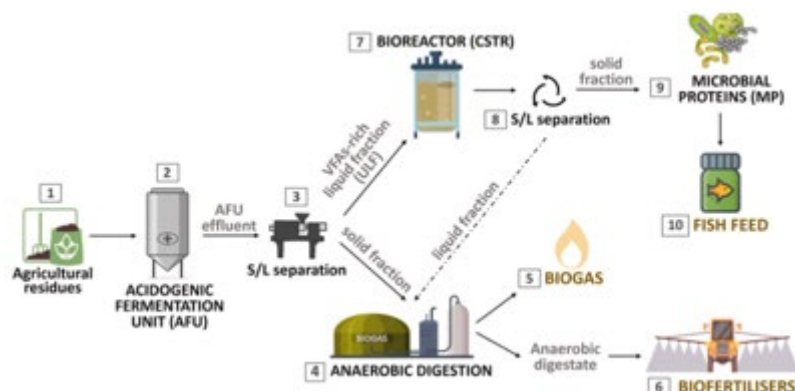
水生動物にプロバイオティクスを投与した際の主な利点は、(1) 水環境中の微生物(硝化、脱窒、水質、病原体)に関するものと、(2) 腸内微生物(疾病・ストレス耐性、消化の改善、成長促進、繁殖促進、免疫機能、栄養素供給源)に関するものの2群に大別される。

(3) 実装化動向

一部の代替タンパク質や微細藻類製品、天然アスタキサンチン含有添加物、BFT・RASなどは既に商業レベルで導入されており、微生物の活用は水産飼料原料・養殖システムとして一定の実績を持つが、魚種・地域・価格帯は更なる改善が望まれる。実装化における現在の動向を各項目①～②について、以下に記載する。

① 魚粉/魚油代替飼料

既存バイオガスプラントを嫌気性消化プラントとして活用し、農業残渣の発酵により微生物タンパク質を生産して魚類用飼料原料として利用する循環プロセスが提案されている⁹⁾。メタン発酵細菌等によるSCPを活用することで餌の魚粉依存度低減を狙う特許も複数出願されている¹⁴⁻¹⁶⁾。SCP製品では、メタノール資化細菌由来SCPがサーモン・スズキ目等で魚粉部分代替原料として商用利用を開始し、中国では水産飼料用途で当局承認を取得している^{7) 13)}。



図VI-1-3-3 農業廃棄物からの循環型微生物タンパク質生産⁹⁾

農業残渣を嫌気消化（バイオガス化）し、揮発性脂肪酸（VFA）の豊富な液相を発酵させて微生物タンパク質（MP）を生産→固液分離→飼料化する循環プロセスを示す。固形分は肥料、バイオガスはエネルギーとして回収される。

微細藻類・色素添加物では *Nannochloropsis* 濃縮液が稚魚用餌料・生物餌の栄養強化に利用され¹⁰⁾、*Paracoccus* 由来アスタキサンチン製剤¹¹⁾や藻類プロテイン¹²⁾がサーモン・マス・マダイ等の色揚げ・抗酸化目的で市販されている。

② 養殖の集約化・陸上化

高密度養殖システムにおいてBFTやRASを活用した商業規模施設が国内外で増加している。BFTの商業導入では、エビ類・ティラピア等を対象に、東南アジア・南米などで大規模BFT養殖が行われており、給餌量削減・増肉係数改善・水質管理などの効果が報告されている⁶⁾。RASの普及では、高付加価値魚種を中心に欧米で大規模RAS施設が稼働し、プロバイオティクス投与やバイオフィルター管理を組み合わせた微生物制御により疾病リスク低減・水質安定化が図られている^{4) 6)}。脱窒バイオリアクター関連では、好氣的脱窒菌 (*P. hunanensis*) などを用いた好氣的脱窒リアクターが、循環水や排水の硝酸除去プロセスとして試験されており、簡便な運転条件で高い除去率が得られることが示されている⁸⁾。

(4) 研究課題

各項目①～②の課題について、以下に記載する。

① 魚粉／魚油代替飼料

SCP・微細藻類ごとのアミノ酸バランス・ペプチド・機能性成分の評価や、魚種・ライフステージ別の最適配合率の科学的根拠が十分でなく^{2) 3) 5) 7)}、加えて、対象生物種ごとに好ましいSCPの要件が異なるため、SCPとして使用する微生物種の探索・選定・改良を行う必要がある。また、原料処理条件（酵素分解・発酵）と腸内細菌叢・免疫応答との関係を指標とした評価系の整備が必要である^{4) 5)}。水素細菌活用では、安全かつ効率的なガ斯基質の供給方法、カーボンリサイクルによる大規模生産への対応等新しい培養技術の開発が不可欠である。

② 養殖の集約化・陸上化

BFT・RAS内部の微生物群集構造と物質循環（窒素・有機物・病原菌抑制）の関係をメタゲノム等で定量的にモデル化する研究が途上であり^{4) 6)}、好氣的脱窒菌やプロバイオティクス等の追加投入と在来微生物群集との相互作用・長期安定性の解明が求められる^{4) 6) 8)}。

(5) 実装化課題

各項目①～②の実装化における課題について、以下に記載する。

① 魚粉/魚油代替飼料

SCP・微細藻類原料は、原料コストの高さやスケールアップ時の収率低下、]安全性対策・自動制御等の技術課題に加え、原料供給から培養生産、加工、流通・販売までのサプライチェーンを構築し、必要量を安定供給できる体制を確立することが求められる^{2) 3) 9) 13)}。対象種の嗜好性も重要であり配合設計や加工方法の開発が不可欠である。また、SCPの社会実装には採算性確保が重要であり、タンパク質生産の効率化に加えて、脂質・色素・機能性成分等の高付加価値副産物を組み合わせた事業モデルの検討も求められる。SCPや新規微細藻類原料に関する規制承認及び表示・トレーサビリティ対応に時間と費用を要することも課題となっている⁹⁻¹³⁾。さらに、飼料・餌料として利用する際の安全性評価と、その結果の適切な情報開示を通じた社会的受容性の確保が、実装化に向けた重要課題となる。

② 養殖の集約化・陸上化

高密度養殖システムの初期投資に加え、運転コスト（水温・水質維持のためのエネルギー、循環ポンプ動力、専門人材の人件費等）が高く中小規模事業者には導入ハードルが高い⁶⁾。BFTの濁度管理・フロック制御、RASのバイオフィルム汚れや機器維持などメンテナンス負荷が高く^{6) 8)}、排水規制・臭気規制への適合や、栄養塩回収・GHG削減等の環境価値をビジネスとして評価・還元する枠組みが不十分である。

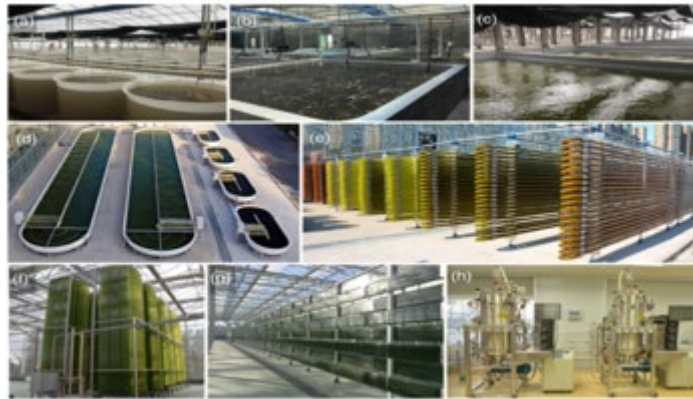
(6) 研究開発の方向性

微生物活用による魚粉代替飼料・集約化養殖システムの研究開発は、栄養バランス・消化性・水質安定性・コスト・スケール化・規制等の課題に直面している。魚粉依存からの脱却と環境負荷低減を同時に達成するためには、代替飼料開発とBFT・RAS等の集約型養殖システムを、微生物機能・腸内細菌叢・水質制御を含めて一体的に設計・実証する研究開発が重要である。各項目①～②の研究開発の方向性について、以下に記載する。

① 魚粉/魚油代替飼料

未利用資源の酵素分解・発酵利用については、持続性の観点からバイオマス資源の高度利用とCO₂の資源化技術を開発する。次に、SCPの利用に関しては、培地原料として穀物に依存しない代謝系を有する微生物（水素細菌やメタン資化菌など）の活用を検討するとともに、培養系の高効率化（ガス移送・基質利用効率の向上、エネルギー負荷低減）及び大規模化（安全設計を含むスケ

ールアップ、生産コスト最適化)の技術を開発する。さらに、原料調達から発酵・下工程・物流・配合に至るまで一貫したサプライチェーンと品質管理を構築し、供給の安定性を確保する。加えて、微細藻類の利用については、SCP・微細藻類を組み合わせたブレンド設計と魚種・成長段階別の最適配合モデルを構築するとともに、社会受容性の確保に向けて原料由来や製造工程の透明な情報開示ならびに表示・トレーサビリティ体制を整備する。



図VI-1-3-4 餌原料・飼料添加物として用いる微細藻類培養のための多様なバイオリアクター⁵⁾

② 養殖の集約化・陸上化

プロバイオティクスの水産利用については、健全で高品質な水産物を生産するための腸内細菌活用技術を開発する。次に、BFTの利用については、養殖場の水質管理や生物防除機能を高めるために微生物を活用する技術を高度化するとともに、日本の地域条件(用水制約・電力コスト・気候)を踏まえた小～中規模向けBFT・RASモジュールの開発と、代替タンパク質原料との組合せによる「低魚粉・高効率・低排水」モデルを構築する。さらに、好氣的脱窒菌による養殖排水処理については、BFT・RAS・脱窒処理・藻類培養等を組み合わせた「統合微生物システム」の標準フローを設計し、実証試験を通じて運転条件と魚体成績・環境指標の関係を定量化する。

参考文献

1. FAO, 2024. The State of World Fisheries and Aquaculture 2024 - Blue Transformation in action. Rome: FAO. <https://doi.org/10.4060/cd0683en>
2. Wang, Q. et al., 2024. Research and Prospects of Enzymatic Hydrolysis and Microbial Fermentation Technologies in Protein Raw Materials for Aquatic Feed. *Fermentation*, 10(12), 648. <https://doi.org/10.3390/fermentation10120648>

3. Shini, S. et al., 2021. Probiotics and gut health: Linking gut homeostasis and poultry productivity. *Animal Production Science*, 62(12), 1090-1112. <https://doi.org/10.1071/AN20701>
4. Rahayu, S. et al., 2024. Probiotics application in aquaculture: Its potential effects, current status in China and future prospects. *Frontiers in Marine Science*, 11, 1455905. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1455905>
5. Ma, M. & Hu, Q., 2024. Microalgae as feed sources and feed additives for sustainable aquaculture: Prospects and challenges. *Reviews in Aquaculture*, 16(2), 818-835. <https://doi.org/10.1111/raq.12869>
6. Matishov, G. et al., 2025. Using BioFloc Technology to Improve Aquaculture Efficiency. *Fishes*, 10(4), 144. <https://doi.org/10.3390/fishes10040144>
7. Tlustý, M.F. et al., 2017. A transdisciplinary approach to the initial validation of a single cell protein as an alternative protein source for use in aquafeeds. *PeerJ*, 5, e3170. <https://doi.org/10.7717/peerj.3170>
8. Sui, X. et al., 2024. Denitrification Mechanism of Heterotrophic Aerobic Denitrifying *Pseudomonas hunanensis* Strain DC-2 and Its Application in Aquaculture Wastewater. *Water*, 16(11), 1625. <https://doi.org/10.3390/w16111625>
9. Pesante, G. et al., 2024. Upgrading biogas plants to produce microbial proteins for aquaculture feed. *Journal of Cleaner Production*, 459, 142559. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142559>
10. DIC Healthcare, UltraNanno™ Microalgae Feed. <https://dic-healthcare.jp/en/product/business/ultra-nanno/>
11. ENEOS Techno Materials Co. Ltd., Panaferd® - Naturally-sourced astaxanthin feed additive. <https://www.tmc.eneos.co.jp/english/products/astaxanthin/>
12. Fermentalg SA, KALVEA® PLUS - nutritious algal protein concentrate for aquafeed. <https://www.fermentalg.com/>
13. Calysta, 2024. FeedKind® protein receives MARA approval for use in aquaculture feeds. <https://calysta.com/calystas-feedkind-protein-receives-mara-approval-for-use-in-aquaculture-feeds/>
14. DSM IP Assets B.V. 2025. Use of single-cell protein, especially Saccharomycetales yeast cells, as fishmeal replacement in feeds for carnivorous fish. W02025/125658A1, PCT.
15. Qingdao Agricultural University. n.d. Single-cell protein produced by bacterium strain JC03 using methanol as the sole carbon source and its use as fishmeal alternative in feeds for fish, crustaceans and sea cucumbers to enhance immune activity. CN119432671A, China.

16. KnipBio, Inc. 2021. Use of microbial biomass, including single-cell protein, in feed or aquaculture water to reduce off-flavors in edible fish and other aquatic organisms. W02021/216387A1, PCT.

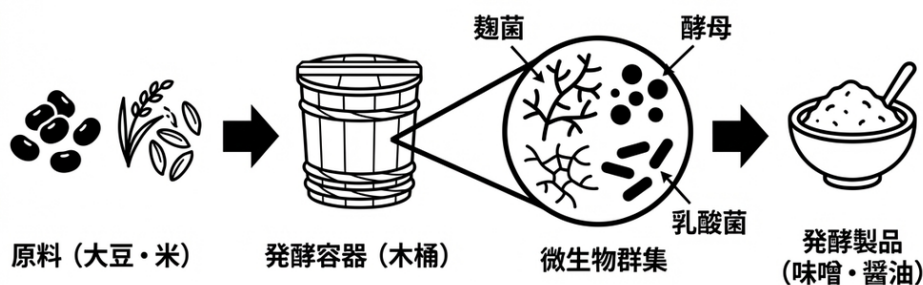
2. 微生物を活用した食料生産技術開発（健康に資する食品を含む）

発酵技術の高度化と多様化 — 伝統発酵と非伝統発酵の整理

世界的な食料需要の増大と、日本の人口減少・高齢化進行の中で食料供給力を維持しつつ、環境負荷低減と健康志向に応えるため、農林水産分野では、日本が得意とする微生物発酵技術を最大限に活用した「微生物を軸とした新しい食料システム」の構築が求められている。

その中で、中核をなすのが、日本が長い歴史の中で培ってきた伝統発酵（多菌叢による食品発酵¹⁾）と代替タンパク質や高機能成分などを生み出す非伝統発酵（精密発酵・バイオマス発酵・SCP生産・微細藻類利用）である。なお、本構想では、世界的なタンパク質不足への対応策としてSCPを、また新たな食料生産技術として期待される微細藻類を、それぞれ重要領域としてクローズアップして整理する。

伝統発酵は、「文化・テロワール・健康」を支える食文化基盤として、非伝統発酵は「新たなタンパク質源・機能性素材・資源循環」を担う技術として位置付けられ、いずれも微生物・発酵プロセスの科学的理解とエビデンスの蓄積が鍵となる²⁾。



図VI-2-1 発酵食品における微生物群集の形成プロセス¹⁾を基に生研支援センター作成

2-1. 伝統発酵による高付加価値食料生産技術開発

(1) 技術概要

伝統発酵は、乳酸菌・酵母・麹菌等の多菌叢が原料を分解・変換し、香味・機能性・保存性・安全性を同時に実現する複合技術である。日本では味噌・醤油・清酒・漬物など多様な製品群がある。

近年、メタゲノム・メタボロミクスなどのマルチオミクス解析やAIを活用した解析が進み、微生物間の相互作用や環境条件が風味・健康機能に与える影響が明らかになりつつある。

その価値を科学的に再設計するため、伝統発酵における微生物活用の主要技術領域を①菌叢生態・発酵メカニズムの可視化・モデル化、②スターター・複合微生物群集設計と工程安定化、③官能・機能の統合設計（美味しさ×健康）、④地域テロワール設計・ブランド化、の4領域として整理する。

① 菌叢生態・発酵メカニズムの可視化・モデル化

この領域は、発酵プロセスのブラックボックス解消を目的とするものであり、メタゲノム・メタトランスクリプトーム解析等を用いて多菌叢の構成・代謝ネットワーク・発酵ダイナミクスを可視化・モデル化する技術である^{1) 3-5)}。

② スターター・複合微生物群集設計と工程安定化

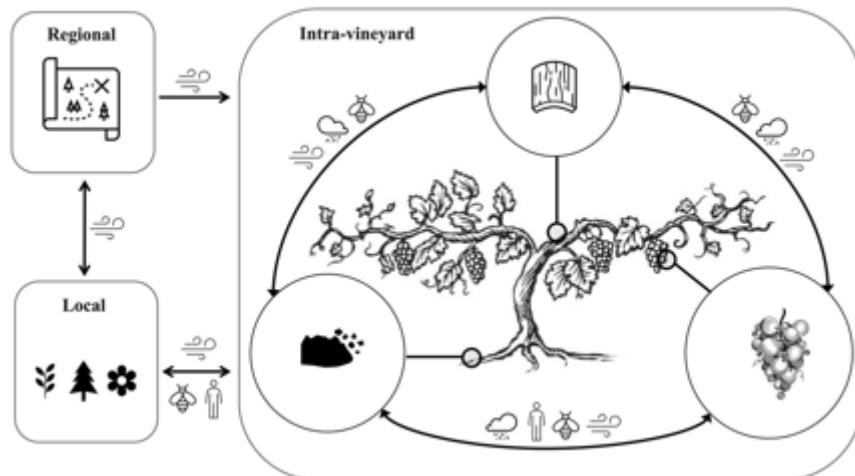
この領域は、発酵品質の安定化と制御を目的とするものであり、目的とする風味・機能をもつスターター菌株／混合微生物群集を設計し、品質ばらつきと衛生リスクを低減する技術である³⁻⁷⁾。

③ 官能・機能の統合設計（美味しさ×健康）

この領域は、高付加価値化を目的とするものであり、官能評価（味・香り・食感）と健康機能（腸内環境・免疫等）を統合的に設計する技術である。発酵プロセスの中で、プロ／プレ／ポストバイオティクスの組成や活性をコントロールすることで、「美味しさ」と科学的エビデンスに基づく機能性を両立させるエビデンスに基づく製品設計を行う^{1) 8)}。

④ 地域テロワール設計・ブランド化

この領域は、地域ブランドの創出を目的とするものであり、地域固有の発酵環境（気候・水・原料・設備）と菌叢構造・官能特性を関連づけ、微生物テロワールを科学的に指標化して国際的に通用するブランド価値を創出する技術である^{1) 9)}。



図VI-2-1-1 ブドウ園における地域テロワール形成の概念図⁹⁾

(2) 研究動向

伝統発酵による食料生産技術開発では、メタゲノム／メタオミクスや高スループット培養に加え、機械学習・AIを用いて菌叢構造・代謝ネットワーク・官能特性を統合的に解析し、再現性の高い発酵プロセス設計へとつなげる研究が進展している。

同時に、プロバイオティクス・プレバイオティクス・ポストバイオティクスの概念を取り込んだ「健康発酵食品」の設計及び微生物テロワールに基づく地域ブランド化・観光資源化の可能性が検討されている。

現在の動向を各項目①～④について、以下に記載する。

① 菌叢生態・発酵メカニズムの可視化・モデル化

伝統発酵食品のメタゲノム・メタトランスクリプトーム解析により、主要菌叢・代謝経路・発酵段階ごとの遷移が整理されつつある^{1) 3) 10) 11)}。また、AIを活用して複雑な微生物間相互作用を解明する試みも始まっている。

② スターター・複合微生物群集設計と工程安定化

伝統食品由来の菌株バンク構築と、低塩性・フレーバー・安全性などの価値向上を目指したスターター／複合微生物群集の設計が進展している^{3) 6) 7) 12) 13)}。特に、複数微生物を組み合わせた共培養スターターの研究が注目されている。

③ 官能・機能の統合設計（美味しさ×健康）

ヒト試験・疫学研究により、発酵食品の摂取と腸内環境・代謝・炎症指標との関連が検討され、健康効果の整理と官能評価・化学成分分析の連結が進んでいる⁸⁾。乳酸菌・酵母由来のプロバイオティクス、発酵原料・食物繊維由来のプレバイオティクス、ポストバイオティクスの候補探索も進展している^{14) 15)}。

さらに、乳酸菌などが分泌する細胞外小胞（E V s）を新たなポストバイオティクスとみなす研究が進み、*Lactobacillus* 属由来 E V s が腸管バリアや炎症応答を調節し、腸内細菌叢や宿主免疫を介して代謝疾患や炎症性腸疾患の改善に寄与しうることが示唆されている¹⁶⁾。

④ 地域テロワール設計・ブランド化

地域固有の発酵環境（気候・水・原料・設備）と菌叢構造・官能特性を関連づけ、「微生物テロワール」を科学的に指標化する研究が進展している^{17) 18)}。これにより、地域の独自性を科学的に証明する手法が確立されつつある。

（3）実装化動向

伝統発酵の産業化では、職人の経験知を再現性の高い工程へ落とし込むスターター設計と標準操作手順の整備を軸に、機能性とストーリー性を備えた高付加価値商品の開発が進んでいる。

科学的エビデンスに基づく機能性表示や輸出、地域テロワールを活かした観光・ブランド戦略といった価値の「見える化」も広がり、発酵乳・飲料分野ではビフィズス菌の生残性向上や腸内細菌叢の改善を目指す設計が進展している。

現在の動向を各項目①～④について、以下に記載する。

① 菌叢生態・発酵メカニズムの可視化・モデル化

製品ごとの「標準菌叢プロファイル」を設定し、品質管理やトレーサビリティに活用する動きがみられる^{2) 19)}。これにより、製品の安定供給とブランド保護が可能となることが期待されている。

② スターター・複合微生物群集設計と工程安定化

パン、酒類、乳製品、漬物等の多くの発酵食品で在来株由来スターター製剤の商品化が進み、各国で市場が拡大している²⁰⁾。国内企業においても、ビフィズス菌の生残性向上や腸内細菌叢の改善を狙った発酵乳の製造方法・スターター設計に関する特許が出願されている^{21) 22)}。

③ 官能・機能の統合設計（美味しさ×健康）

プロバイオティクス乳酸菌や発酵由来ペプチド等を活用し、「血圧・血糖・腸内環境」などをターゲットとする機能性発酵食品が商業的に展開されている²³⁾²⁴⁾。特に、死菌体や代謝産物が健康機能を発揮する「ポストバイオティクス」は、生菌の生存性を問わないため加工食品への応用が容易であり、プラズマ乳酸菌（免疫機能表示）のような大型製品も生まれつつある²⁵⁾。

また、プロバイオティクス/プレバイオティクス/ポストバイオティクスを用いた、肥満・血糖・脂質代謝、ストレスなどを対象としたヨーグルトや発酵乳飲料、オリゴ糖の機能性食品・サプリメントの開発が進み、国内外で臨床試験データが蓄積しつつある^{23) 24) 26)}。

さらに、近年は、伝統的な発酵プロセスを基盤にしつつ、機能性成分の保持（発酵・流通過程での低下抑制）や機能性素材の付加によって健康価値を高める製品設計の動きもみられる。例えば、リコピン含有野菜と乳酸菌スターターの組み合わせにより、発酵食品中のリコピン低下を抑制しつつ、疾患（高血圧等）への機能を訴求する特許出願例やニコチンアミドモノヌクレオチド（NMN）含有ヨーグルトの出願例も見られる^{27,28)}。

④ 地域テロワール設計・ブランド化

発酵食品・発酵調味料を地域の食文化や環境条件と結び付けて捉え、また地域ブランドの制度的裏付けとして地理的表示（GI）等の仕組みを活用し、観光資源（フード／ガストロノミーツーリズム）として活用する可能性が注目されている³¹⁻³⁵⁾。発酵は文化と自然が交差する食の変換プロセスであり、食の遺産や景観（food heritages/landscapes）と結び付けて「場所の価値」を可視化し得ることが指摘されている³²⁾。ユネスコの無形文化遺産に登録された「和食」や「伝統的醸造」が示すように、日本各地では「風土に即した発酵技術」（味噌・醤油・日本酒など）が発達しており²⁹⁻³¹⁾、こうした地域固有の原料・菌・製法の物語を品質設計・体験設計・情報発信と統合した、越後・秋田・越中味噌や、沖縄・鹿児島調味料や麴づくりをプログラム化した宿泊施設など、いわゆる「発酵テロワール」として地域ブランド（観光・輸出等）に展開する手法が検討されている³²⁻³⁵⁾。

（４）研究課題

各項目①～④の課題について、以下に記載する。

① 菌叢生態・発酵メカニズムの可視化・モデル化

汎用的な解析プロトコルや指標が食品ごとにばらばらで、比較・統合が難しいという課題がある²⁾¹⁹⁾²⁰⁾。さらに、多菌叢システムの長期安定性（変異・ウイルス・汚染など）に関する理解が不足している²⁾¹⁹⁾²⁰⁾。

② スターター・複合微生物群集設計と工程安定化

共培養スターター設計の一般原理（種の組み合わせ・比率・接種タイミング等）が未整理であることが課題として挙げられる⁴⁾¹⁹⁾。

③ 官能・機能の統合設計（美味しさ×健康）

官能評価・化学分析・臨床試験の結果を統合する標準的フレームワークが存在せず、プロ・プレ・ポストバイオティクスとしての効果指標・用量設定も未整備である²¹⁾²²⁾。

④ 地域テロワール設計・ブランド化

個別でのブランド化の構築が進む一方、「テロワール」を定量化する共通指標（微生物×原料×環境）が確立していない¹⁷⁾。

(5) 実装化課題

各項目①～④の実装化における課題について、以下に記載する。

- ① 菌叢生態・発酵メカニズムの可視化・モデル化
蔵・工場ごとにデータ形式が異なり、横断的な知見共有が困難であるうえ、解析コストが高く中小企業には導入障壁が大きい^{19) 20)}。
- ② スターター・複合微生物群集設計と工程安定化
在来株・自社株の有効な知財化を図る上でのエビデンス不足や、共培養する上での生産技術開発が不十分である。
- ③ 官能・機能の統合設計（美味しさ×健康）
機能性表示や海外規制に対応するための標準化された評価法・表示枠組みが整備途上である¹⁾。また、ポストバイオティクスについては、菌体成分や代謝物の同定・規格化に関する国際的な合意形成も課題となっている。長期摂取時の安全性・相互作用データも不足している。
- ④ 地域テロワール設計・ブランド化
研究・データ蓄積が異なることから、地域ごとのテロワール設計をする上での水平展開ができにくい。

(6) 研究開発の方向性

伝統発酵は、長い歴史の中で安全性・美味しさ・地域性が経験的に担保されてきたが、その価値を科学的に説明し、国際市場で展開するための「エビデンスと標準化」が依然としてボトルネックとなっている。地域ごとの多様な菌叢や伝統的製法と両立させながら、菌叢の多様性・職人技・地域性といった強みを損なうことなく、再現性・機能性・安全性評価・社会受容性・知財・人材といった横断課題をどのように解決するかが、今後の研究開発における主要な論点である。

そのため、今後の伝統発酵に関する研究開発では、①複合微生物群集の生態と発酵メカニズムを多層オミクスで解明し、②スターター及び工程設計に落とし込み、③プロバイオティクス・プレバイオティクス・ポストバイオティクスを組み合わせ「美味しさ」と「健康機能」を統合設計し、④テロワール科学とブランド戦略に結び付ける橋渡し研究が求められる。これにより、経験知として蓄積されてきた日本の発酵文化を、新しい食品の開発や食品の差別化・高付加価値化といったゴールを見据えた形で、国際的に通用するエビデンスベースの産業・観光・健康戦略として再構築することが期待される。例えば、さらに機能性を付与した発酵食品や、和食の伝統と先端バイオを融合させた高付加価値製品の開発など、「美味しさ」と「健康機能（ポストバイオティクスの活用等）」を両立させた次世代型発酵食品の開発を目指し、新たな市場の創出を図る。

技術領域別の詳細な研究開発の方向性について、以下に記載する。



図VI-2-1-2 研究開発の方向性の流れ

- ① 菌叢生態・発酵メカニズムの可視化・モデル化
多菌叢の動態と代謝ネットワークをメタゲノム／メタトランスクリプトーム／メタボロームで統合解析し、失敗せずに狙った香味を出すための設計指針として整理する。さらに、簡便な指標菌・バイオマーカーを用いた現場向けモニタリング技術を開発する。
- ② スターター・複合微生物群集設計と工程安定化
在来株を核としたスターター／複合微生物群集の設計法（株の組合せ・比率・条件）を体系化し、モデル化・データベース化を図る。温度・pH・塩分などの工程条件とリンクさせた「デジタルレシピ」を構築する。
- ③ 官能・機能の統合設計（美味しさ×健康）
伝統発酵食品由来の乳酸菌・酵母・麹菌を対象にプロバイオティクスとしての条件（株レベルの同定・安全性・機能性）を整理し、臨床・介入研究と連携する。また、プロバイオティクス・プレバイオティクス・ポストバイオティクスのマイクロバイオームに対する機能を整理したうえで、発酵食品中の微生物・基質・代謝産物を統合的に組み合わせ、「美味しさ」と「エビデンスに基づく健康機能」を両立させる製品設計と評価手法を確立する。
- ④ 地域テロワール設計・ブランド化
菌叢構造・官能評価・機能性指標を統合した「テロワール・プロファイル」を作成し、その可視化を行う。さらに、テロワール・ストーリーと科学データを組み合わせたエビデンスベースのブランド戦略・観光プログラムを構築する。

参考文献

1. Marco, M.L. et al., 2021. The ISAPP consensus statement on fermented foods. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*, 18, 196-208 <https://doi.org/10.1038/s41575-020-00390-5>
2. Shi, H. et al., 2022. Advances in fermented foods revealed by multi-omics: A new direction toward precisely clarifying the roles of microorganisms. *Frontiers in Microbiology*, 13, 1044820 <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1044820>
3. Ray, R.C. et al., 2009. Traditional and novel fermented foods and beverages

- from tropical root and tuber crops: review. *International Journal of Food Science and Technology*, 44(6), 1073-1087 <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2009.01933.x>
4. Tamang, J.P. et al., 2016. Review: Diversity of microorganisms in global fermented foods and beverages. *Frontiers in Microbiology*, 7, 377 <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00377>
 5. Elhalis, H. et al., 2024. Soybean fermentation: Microbial ecology and starter culture technology. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(21), 7648-7670 <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2188951>
 6. Pino, A. et al., 2022. Microbial consortia involved in traditional Sicilian sourdoughs: Characterization of lactic acid bacteria and yeast populations. *Microorganisms*, 10(2), 283 <https://doi.org/10.3390/microorganisms10020283>
 7. Riccardo, H. et al., 2024. Optimizing lactic acid bacteria proportions in sourdoughs to enhance antifungal activity and quality of partially and fully baked bread. *Foods*, 13(5), 2318 <https://doi.org/10.3390/foods13152318>
 8. Stiemsma, L.T. et., 2020. Does consumption of fermented foods modify the human gut microbiota? *The Journal of Nutrition*, 150(7), 1680-1692 [https://jn.nutrition.org/article/S0022-3166\(22\)02221-0/fulltext](https://jn.nutrition.org/article/S0022-3166(22)02221-0/fulltext)
 9. Griggs, R.G. et al., 2021. Sources and Assembly of Microbial Communities in Vineyards as a Functional Component of Winegrowing. *Frontiers in Microbiology*, 12, 673810 <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.673810>
 10. Wang, H. et al., 2024. Core microbiome identification and synthetic microbiota construction for the production of Chinese light aroma Baijiu. *Food Research International*, 183(6), 114196 <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114196>
 11. Zhao, S. et al., 2023. Revealing the succession of spatial heterogeneity of the microbial community during broad bean paste fermentation. *Food Microbiology*, 89(7), e00621-e00623 <https://doi.org/10.1128/aem.00621-23>
 12. Winters, M. et al., 2019. Defined co-cultures of yeast and bacteria modify the aroma, crumb and sensory properties of sourdough bread. *Journal of Applied Microbiology*, 127(3), 778-793 <https://doi.org/10.1111/jam.14349>
 13. Simpraga, R. et al., 2017. Application of lactic acid bacteria and yeasts as starter cultures for reduced-salt soy sauce (moromi) fermentation. *LWT - Food Science and Technology*, 78(3), 181-188 <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.12.019>
 14. Ji, J., 2023. Probiotics, prebiotics, and postbiotics in health and disease. *MedComm*, 4(6), e420 <https://doi.org/10.1002/mco2.420>

15. Park, I., 2025. Fermented Foods as Functional Systems: Microbial Communities and Metabolites Influencing Gut Health and Systemic Outcomes. *Foods*, 14(13), 2292 <https://doi.org/10.3390/foods14132292>
16. Li, M. et al., 2024. Lactic acid bacteria derived extracellular vesicles: emerging bioactive nanoparticles in modulating host health. *Gut Microbes*, 16(1), 2427311 <https://doi.org/10.1080/19490976.2024.2427311>
17. Peraza, R. et al., 2022. Investigating the microbial terroir of fermented foods produced in a professional kitchen. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 28, 100509 <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2022.100509>
18. Ito, K. et al., 2023. A dark matter in sake brewing: Origin of microbes producing a Kimoto-style fermentation starter. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1112638 <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1112638>
19. Louw, N.L. et al., 2023. Microbiome Assembly in Fermented Foods. *Annual Review of Microbiology*, 77, 381-402 <https://doi.org/10.1146/annurev-micro-032521-041956>
20. Sionek, B. et al., 2023. Traditional and New Microorganisms in Lactic Acid Fermentation of Food. *Fermentation*, 9(12), 1019 <https://doi.org/10.3390/fermentation9121019>
21. Morinaga Milk Industry Co., Ltd. 2025. Fermented food and method for improving survival of bifidobacteria. W02025/037618A1, PCT.
22. Ito En, Ltd.; Chichiyasu Co., Ltd. 2025. Method for producing fermented milk and starter for improving gut microbiota. JP2025-075637A, Japan.
23. Salminen, S. et al., 2021. The ISAPP consensus statement on the definition and scope of postbiotics. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*, 18, 649-667 <https://doi.org/10.1038/s41575-021-00440-6>
24. Swanson, K.S. et al., 2020. The ISAPP consensus statement on the definition and scope of synbiotics. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*, 17(11), 687-701 <https://doi.org/10.1038/s41575-020-0344-2>
25. KIRIN 「”免疫” お役立ちコラム」 (2025)
<https://health.kirin.co.jp/column/vol30/index.html>
26. Ji, J. et al., 2023. Probiotics, prebiotics, and postbiotics in health and disease. *MedComm*, 4(6), e420. <https://doi.org/10.1002/mco2.420>
27. CJ CheilJedang Corporation. 2021. Functional fermented food with high lycopene content. US20210360957A1, United States (family incl. W02019/093858A1, EP3682747B1, etc.).
28. Meiji Holdings Co., Ltd. 2024. Method for producing yogurt using NMN-producing

- lactic acid bacteria. WO 2024/225438A1, PCT.
29. 文化庁「日本食文化の無形文化遺産 記載提案書の概要」（2012年）
https://www.bunka.go.jp/seisaku/bunkazai/shokai/mukei_bunka_isan/pdf/shokubunka_120925.pdf
 30. 農林水産省『「和食」がユネスコ無形文化遺産に登録されています。』
<https://www.maff.go.jp/j/keikaku/syokubunka/ich/>
 31. 文化庁「「伝統的酒造り」のユネスコ無形文化遺産登録（代表一覧表記載）」（2024年）
https://www.bunka.go.jp/koho_hodo_oshirase/hodohappyo/pdf/94142301_01.pdf
 32. 出口, 竜也, 2024. 発酵食の経営人類学：地域観光との関連から. 和歌山大学 観光学研究センター <https://www.wakayama-u.ac.jp/ctr/research/projects/ctrjrjsupport/2024/ctrjrsp2024-3.html>
 33. Berno, T. et al., 2023. Fermenting Tourism: Look Back to Move Forward. *Journal of Responsible Tourism Management*, 3(2) <https://doi.org/10.47263/JRTM.03-02-03>
 34. World Tourism Organization (UNWTO), 2012. Global Report on Food Tourism.
https://webunwto.s3.eu-west-1.amazonaws.com/s3fs-public/2019-09/food_tourism_ok.pdf
 35. Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries (MAFF) Japan. Geographical Indication (GI) protection system.
https://www.maff.go.jp/e/policies/intel/gi_act/index.html

2-2. 微生物による食料生産技術開発（伝統発酵以外）

（1）技術概要

伝統発酵以外の微生物による食料生産では、①精密発酵、②バイオマス発酵、③SCP生産、④微細藻類利用※などの微生物や技術を用いて、タンパク質・脂質・機能性成分を高効率に生産する動きが世界的に加速している。

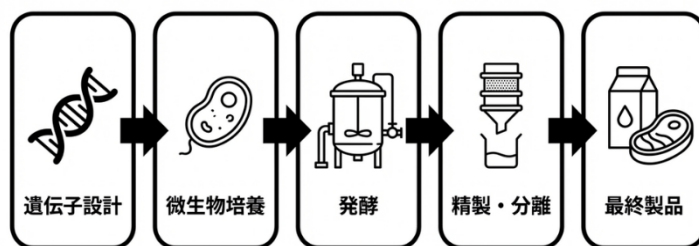
これらは、家畜・水産・植物由来に依存した供給構造を補完しつつ、環境負荷の低減や未利用資源の高度利用を目指す食料システムの中核技術として位置づけられる。

※技術分類上の留意点：広義の「バイオマス発酵」には、SCP生産や微細藻類利用も含まれるが、本構想では「タンパク質不足への対応としての「SCP生産」と、光合成利用や多機能成分生産が可能な食料生産技術として有望な「微細藻類利用」について、その重要性に鑑み独立した項目としてクローズアップして記載している。なお、技術領域としての「SCP生産」「微細藻類利用」

は以下、「SCP」「微細藻類」と記載している。

① 精密発酵

遺伝子導入・ゲノム編集等により設計した微生物を用い、特定のタンパク質・ペプチド・脂質等を高選択的に生産する発酵技術である¹⁻³⁾。主な対象成分・用途例としては、乳タンパク質（ホエイ・カゼイン・ラクトフェリン）、酵素、甘味タンパク質、ヘム様色素、機能性ペプチド等がある。



図VI-2-2-1 精密発酵食品の生産プロセス³⁾を基に生研支援センター作成

② バイオマス発酵

農産副産物・食品残渣などの有機バイオマスを基質とし、有機酸・色素・油脂・タンパク質等へ変換あるいは増殖した微生物菌体そのものを高付加価値なタンパク質を資源として利用する発酵技術であり、サーキュラーエコノミーの実現に寄与する⁴⁻⁶⁾。主な対象成分・用途例としては、カカオ果皮や果実搾りかすからの香味成分・色素・有機酸、油脂やタンパク質のアップサイクルがある。また、微生物菌体由来の飼料・食品原料がある。

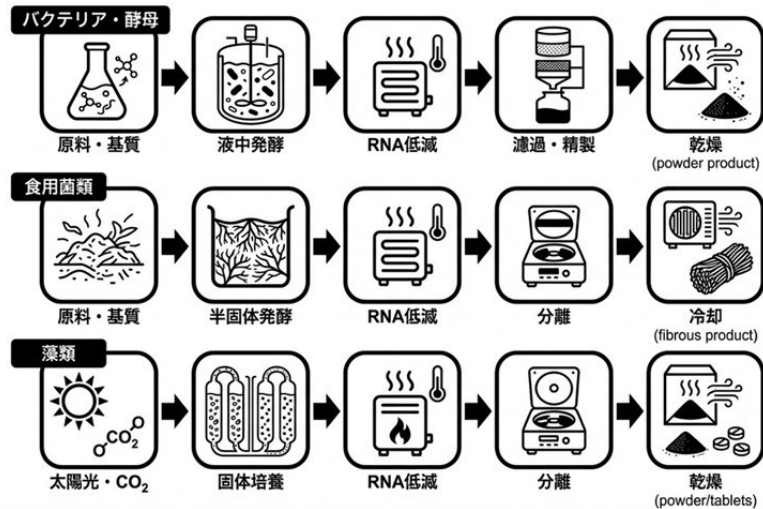
③ SCP

細菌・酵母・糸状菌・藻類などの微生物バイオマス自体を高タンパク原料として利用する技術⁴⁻⁶⁾。バイオマス発酵の一形態であるが、代替タンパク質源としての重要性が極めて高いため特記する。主な対象成分・用途例としては、ガス発酵由来タンパク質（ $\text{CO}_2/\text{H}_2/\text{CH}_4$ ）、メタノール・酢酸利用SCP、飼料・食品用高タンパク質粉末などが挙げられる⁴⁻⁶⁾。

④ 微細藻類

微細藻類を光合成またはミックス栄養で培養し、タンパク質、脂肪酸（EPA/DHA）、色素・多糖を生産する技術である⁶⁻⁸⁾。SCP同様、菌体利用の側面を持つ。主な対象成分・用途例は、食品・飼料用タンパク質、EPA/DHA、アスタキサンチン、ルテインなどの機能性成分がある⁶⁻⁸⁾。

微生物由来タンパク質の生産プロセス比較 (Comparison of Microbial Protein Production Processes)



図VI-2-2-2 代替タンパク質の生産プロセス（微生物由来タンパク質（C））⁹⁾

（2）研究動向

非伝統発酵に関する研究は、①精密発酵による高機能タンパク質の設計、②バイオマス発酵による未利用資源の高付加価値化、③SCPの代謝工学・ガス発酵、④微細藻類の栄養・機能性評価と培養プロセス高度化という4つの軸で急速に進展している。

また、共通してライフサイクル環境負荷の低減と栄養・機能性の両立を狙った設計指向の研究が増加している。各項目①～④の研究動向については、以下に記載する。

① 精密発酵

乳タンパク質（カゼイン、ホエイプロテイン）、卵白タンパク質（オボアルブミン）、肉タンパク質（ミオグロビン、コラーゲン）等の動物由来タンパク質の構造・機能を模倣したタンパク質設計、糖鎖修飾・分泌経路の最適化、宿主の代謝工学・シャーシ設計に関する研究が拡大している^{1) 2)}。

また、環境影響・資源利用の観点から、基質多様化（副産物糖液等）や副産物の循環利用を前提とした原料・プロセス設計の研究も増加している^{1) 2) 10)}。

② バイオマス発酵

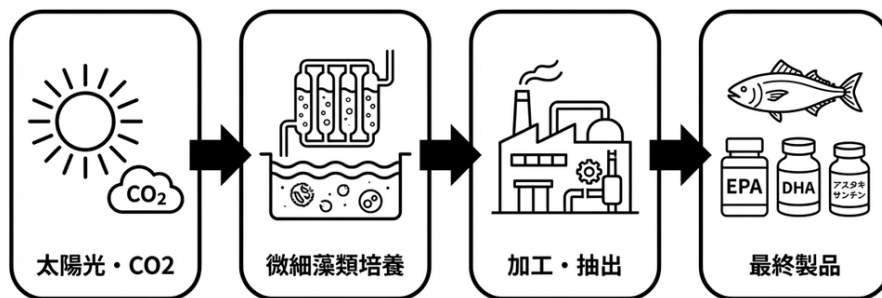
果実搾りかす・穀類副産物・カカオ果皮などの低価値バイオマスからの機能性成分（ポリフェノール、有機酸、色素）の回収・安定化、人の腸内環境や官能特性に与える影響評価に関する研究開発が進んでいる^{4-6) 9)}。また、固体発酵・混合培養による風味・機能性向上の検討も進展している^{4-6) 9)}。

③ SCP

多様な基質（糖、グリセロール、メタノール、 $\text{CO}_2/\text{H}_2/\text{CH}_4$ 等）を利用する微生物の代謝工学と培養設計が進展している⁴⁻⁶⁾。特にガス発酵では、ガス溶解・安全性を踏まえたリアクター設計と菌株改良に関するレビュー・事例研究が蓄積してきている^{4-6) 11)}。

④ 微細藻類

高タンパク質株や高EPA/DHA株、カロテノイド高生産株の探索とゲノム・トランスクリプトーム解析が進み、栄養・機能性と培養条件を結びつける研究が増加している^{7) 8) 10) 12)}。また、光利用効率・ CO_2 固定・水利用の観点からの培養プロセスの最適化に関する研究も進展している^{7) 8) 10) 12)}。



図VI-2-2-3 微細藻類による持続可能な食料・飼料供給⁷⁾を基に生研支援センター作成

(3) 実装化動向

実装化の面では、精密発酵乳タンパク質やSCPを用いた食品・飼料、微細藻類由来機能性成分などの製品が既に市場に登場している。

一方で、EUのNovel Foodや米国のGRAS（自己認証）の制度下で、各国ごとに承認・ラベリング要件が異なり、LCA・安全性評価・規制対応のためのデータ整備が事業拡大の前提となっている。現在の動向を各項目①～④について、以下に記載する。

① 精密発酵

乳タンパク質（ホエイ・カゼイン・ラクトフェリン）、卵白タンパク質、ヘム様色素等が北米・シンガポール等で製品化され、乳製品・アイス・パン向け材料として利用され始めている¹⁻³⁾。一方で、米国・シンガポールでは承認事例が蓄積しているが、承認手続きには数年単位を要することも多い。また、EUでは、Novel Food規制により承認プロセスに時間を要しており、多くの製品が申請中または開発段階にある^{9) 10) 13) 14)}。

Liberation Bioindustriesは、米国インディアナ州で総発酵容量60万L規模の精密発酵工場を建設中であり、同設備により年産1,000t程度のタンパク質生産を見込んでいる。同社は、米国を起点に計6地域で製造拠点を展開しており、

NEOM Investment Fund の支援の下、サウジアラビアへも進出し、バイオマニュファクチャリング拠点の構築を加速している¹⁵⁾。

② バイオマス発酵

カカオ果皮・果汁搾りかす等の副産物からの香味成分・有機酸・色素の回収・製品化事例が増加している^{4-6) 9)}。また、一部企業では、アップサイクル認証やカーボンフットプリント表示と連動したブランド展開が進んでいる^{4-6) 9)}。

③ SCP

天然ガスや工業由来のCO₂を利用したSCPの商業プラントが稼働し、飼料向けが中心だが、食料生産へも展開中である⁴⁻⁶⁾。個別企業では、味の素がフィンランド企業のソーラーフーズが開発したCO₂由来タンパク質のソレインを使用した製品をシンガポールで上市した¹⁶⁾。また、米国のAir Proteinは、CO₂由来タンパク質を最短4日で生産する低資源プロセスを確立し、米国でGRAS自己認証を取得、ADMと連携して商用化を推進中である¹⁷⁾。他方、CO₂由来タンパク質やメタノール・酢酸を利用したSCP生産は、規制評価と消費者受容性の課題を抱えつつ、パイロット～商業実証段階にある^{4-6) 11)}。

④ 微細藻類

EPA/DHA・アスタキサンチン・ルテイン等の機能性成分としてのサプリメント・飲料素材が既に市場に定着している^{7) 8) 10) 12)}。一方で、藻類タンパク質を主要タンパク質源とする食品・飼料はコスト・色・風味・消費者受容性の面で実証段階にとどまる事例が多い^{7) 8) 10) 12)}。

(4) 研究課題

非伝統発酵の各技術では、「多様な基質・株を扱うための標準化」、「プロセス・安全性・LCAの統合指針」が共通のボトルネックとなっている。各項目①～④の課題について、以下に記載する。

① 精密発酵

宿主・製品タンパク質の安全性・栄養・機能の長期データ、LCAとリンクしたプロセス設計指針が限定的である¹⁻³⁾。また、複雑な糖鎖構造や官能特性の再現に関する基礎知見も不足している^{1) 2)}。

② バイオマス発酵

原料ごとの組成変動・安全性（汚染物質・アレルゲン等）を踏まえた標準的評価フレームが不足している^{4-6) 9)}。また、固体発酵・混合培養のメカニズムもまだ未解明な部分が多い^{4-6) 9)}。

③ SCP

多様な基質利用と代謝フローを統合したモデル化・安全性評価（核酸、細胞壁成分等）が十分に確立されていない^{4-6) 9) 10)}。また、人の栄養・腸内環境への

長期影響の知見も限られている^{4-6) 9) 10)}。

④ 微細藻類

種・株ごとの栄養・機能性・安全性データの体系化が不十分である^{7) 8) 10) 12)}。
また、培養条件と成分プロファイルを結びつけるモデルも確立されていない^{7) 8) 10) 12)}。

(5) 実装化課題

非伝統発酵の各技術では、「生産規模拡大時の安定性」、「規制・コスト・社会受容性」が共通のボトルネックとなっている。精密発酵・SCP・藻類等の個別事情はあるものの、「データ標準化・評価法・共用インフラ」が不足している点が、産業化全体を制約している。各項目①～④の実装化における課題について、以下に記載する。

① 精密発酵

規模を拡大していく中での物性変化（酸素供給・混合・粘度）への対応が難しい¹⁻³⁾。また、Novel Food/GRAS（自己認証）の審査に必要なデータセットの標準が不明瞭で、企業側の負担が大きい^{9) 10) 13) 14)}。加えて、遺伝子組換えへの懸念を背景に、消費者受容性・表示の在り方も課題となっている^{9) 10) 13) 14)}。

② バイオマス発酵

原料調達・前処理コスト、品質のばらつきがビジネスとしての採算性を圧迫している^{4-6) 9) 18)}。また、アップサイクル表示・認証の基準が地域ごとに異なり、市場展開が複雑化している点も課題である⁹⁾。

③ SCP

ガス発酵SCPなどでは、ガス供給・エネルギーコスト、設備安全性が経済性を左右する点が課題として挙げられる^{4-6) 9) 10)}。また、新規タンパク質源としてのラベリング・許可取得も時間とコストがかかる^{9) 10)}。加えて、麹菌由来SCPは麹特有の香味・色調が残るため、味・食感・色の設計も重要な課題となっている¹⁹⁾。

④ 微細藻類

培養・回収・乾燥のエネルギーコストや、特有の色・風味による受容性の課題が大きい^{7) 8) 10) 12)}。また、食品・飼料としての規格・評価方法も国・用途ごとにばらつきがある点も産業化に向けての課題となっている^{7) 8) 10) 12)}。

(6) 研究開発の方向性

世界的な食料需要の増大が見込まれる中、日本の国際競争力と優位性を高めるため、日本が得意とする発酵技術を最大限に活用し、非伝統発酵（精密発酵・バイオマス発酵・SCP・微細藻類）を基盤とした代替タンパク質や機能性成分の研究開

発を推進する。

今後の研究開発の方向性として、「微生物・藻類株の高度設計」、「共用パイロット設備・CDMOの活用によるスケールアップ支援」、「LCA・安全性・社会受容性を統合した評価基盤の整備」などが、伝統発酵以外の食料生産には共通して重要である。併せて農林水産分野に適した原料・用途を明確化して既存の食品・飼料・農業資材のサプライチェーンへ組み込むことが求められる。技術領域別の研究開発の方向性について、以下に記載する。

① 精密発酵

機能性タンパク質の設計に加え、スケールアップ時の物性変化（粘度・酸素移動等）を制御するプロセス開発と、糖鎖・官能特性の再現を含めた「食品科学としての最適化」を行う。

Novel Food 等の規制承認や社会受容性の確保に資するため、食品・農業用途に特化した安全性・栄養・LCAデータの取得方法を標準化し、業界全体で利用可能な共有基盤を整備する。

② バイオマス発酵

原料の組成変動や品質のばらつきに対応可能な固体発酵・混合培養プロセスの制御技術を確立する。

安全性・機能性に関する標準的な評価フレームワークを構築し、アップサイクル認証・環境ラベリング等の国際基準と整合した製品設計・LCA手法を整備する。

③ SCP

多様な基質利用に対応した微生物設計に加え、麹菌等の課題である香味・色調を改善する育種・加工技術を開発する。

経済性を左右するエネルギーコスト低減と安全性を両立するリアクター・プロセス開発を行うとともに、核酸等の安全性・栄養評価データを蓄積し、迅速な許可取得・ラベリングに資する一体的な評価系を設計する。

④ 微細藻類

高機能株の探索・改良を進めるとともに、種・株ごとの栄養・機能性・安全性データを体系化し、培養条件による成分変動を予測するモデルを構築する。

培養・回収・乾燥のエネルギーコストを低減する技術と、特有の色・風味を制御し既存食品・飼料への利用を促進する加工技術を開発する。

参考文献

1. Augustin, M.A. et al., 2024. Innovation in precision fermentation for food ingredients. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(18), 6218-6238
<https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2166014>

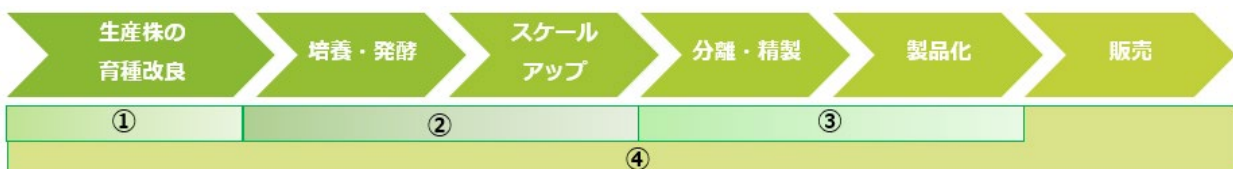
2. Knychala, M.M., et al., 2024. Precision Fermentation as an Alternative to Animal Protein: A Review. *Fermentation*, 10(6), 315 <https://doi.org/10.3390/fermentation10060315>
3. Sawano, T., 2024. Precision Fermentation: The Next-Generation Food Production Technology. Mitsui & Co. Global Strategic Studies Institute. https://www.mitsui.com/mgssi/en/report/detail/_icsFiles/afieldfile/2024/04/15/2402t_sawano_e_1.pdf
4. Zhuang, Z., et al., 2024. Metabolic engineering for single-cell protein production. *Advanced Biotechnology*, 2(4), 35 <https://doi.org/10.1007/s44307-024-00042-8>
5. Marcellin, E., 2022. Recycling carbon for sustainable protein production using gas fermentation. *Current Opinion in Biotechnology*, 76, 102723 <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2022.102723>
6. Li, Y.P. et al., 2024. Recent advances and challenges in single cell protein (SCP) technologies for food and feed production. *npj Science of Food*, 8(1), 66 <https://doi.org/10.1038/s41538-024-00299-2>
7. Ahmad, A., et al., 2023. Sustainable food and feed sources from microalgae: Food security and the circular bioeconomy. *Algal Research*, 74, 103185 <https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103185>
8. Eilam, Y., et al., 2023. Microalgae-Sustainable Source for Alternative Proteins and Functional Ingredients Promoting Gut and Liver Health. *Global Challenges*, 7(5), 2200177 <https://doi.org/10.1002/gch2.202200177>
9. Malila, Y., et al., 2024. Current challenges of alternative proteins as future foods. *npj Science of Food*, 8, 53 <https://doi.org/10.1038/s41538-024-00291-w>
10. Hefferon, K.L., et al., 2023. Alternative protein innovations and challenges for industry and research. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, 1038286 <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1038286>
11. Lever VC, 2024. Gas Fermentation for Single Cell Protein Ingredient Production. <https://www.levervc.com/wp-content/uploads/2024/07/Lever-VC-Insights-Gas-Fermentation-for-Single-Cell-Protein-Ingredient-Production.pdf>
12. Mosibo, O.K., et al., 2024. Microalgae Proteins as Sustainable Ingredients in Novel Foods. *Foods*, 13(5), 733 <https://doi.org/10.3390/foods13050733>
13. Ronchetti, F., et al., 2024. The Regulatory Landscape in the EU for Dairy Products Obtained Through Precision Fermentation. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-49692-9>
14. Good Food Institute APAC, 2021. Novel Food Regulations Around the

- World. <https://gfi-apac.org/novel-food-regulations-around-the-world/>
15. Liberation Labs heads to Saudi Arabia as NEOM Investment Fund ventures into biomanufacturing <https://agfundernews.com/liberation-labs-heads-to-saudi-arabia-as-neom-investment-fund-ventures-into-biomanufacturing>
 16. Solar Foods Oy, 2025. The Japanese food giant Ajinomoto continues to introduce new Solein-powered products in Singapore (News 26/3/2025). <https://solarfoods.com/the-japanese-food-giant-ajinomoto-continues-to-introduce-new-solein-powered-products-in-singapore/>
 17. ADM, 2023. ADM, Air Protein Sign Strategic Agreement to Advance Development and Production of Unique Landless Protein. <https://www.adm.com/en-us/news/news-releases/2023/5/adm-air-protein-sign-strategic-agreement-to-advance-development-and-production-of-unique-landless-protein/>
 18. Universiteits van Amsterdam. 2023. Valorization of discarded vegetables via Lactobacillus reuteri fermentation. W02023/073061A1, PCT.
 19. National Agriculture and Food Research Organization (NARO). 2025. Production of high-protein single-cell protein (SCP) composition using koji mold. W02025/173298A1, PCT.

3. 微生物を産業として活用することに資する研究開発

(1) 技術概要

微生物の代謝・酵素作用を活用した製造は、農業資材、飼料用素材、食品成分及び食品の高付加価値化や持続可能性の向上、原料・エネルギー制約への対応において中核となる。一方、得られた研究開発成果を基に、さらに、規格化生産にはサプライチェーン全体を見据えた技術体系が必要であり、①育種改良、②培養・発酵・スケールアップ、③分離・精製・製品化、④LCA・安全性・社会受容の統合が不可欠である。特に国際的な品質管理（食品グレード）、LCA及び食品安全性評価の枠組みに整合したプロセス設計が事業化の前提となる。サプライチェーン全体の流れと調査項目①～④は以下の通りとなる。



図VI-3-1 農林水産の生産性向上及び食品生産で扱う個別技術を支える技術

サプライチェーンの各項目では、必要な中核技術は異なる。以下に各項目①～④

における既存技術の課題と解決策となる中核技術を記載する。

① 育種改良

微生物の商業利用において安定生産・コスト競争力を確保するためには、収率、副生成物、ストレス応答（温度・pH・溶存酸素変動への耐性等）を含む特性を、人為的に制御できるよう育種改良していくことが前提となる。特に目的物質を効率的に生産することや、温度・pH・溶存酸素変動に対する安定性不足がスケールアップ時の歩留まり低下や精製負荷増大を招いている。また、微生物が持つ代謝ネットワークや制御機構の理解が不十分のため、改良設計が属人的で試行錯誤に依存する点もボトルネックである。これらを克服する中核技術として、標的遺伝子の精密改変を可能にする遺伝子導入・ゲノム編集に加え、微生物株の代謝・発現・ストレス応答を体系化したデータベースの構築が不可欠となる。こうしたデータベースが整備されれば、改良設計の合理化、代謝経路の最適化、耐性強化方針の定量化が進み、微生物の高機能化と産業化の加速が期待できる。

② 培養・発酵・スケールアップ

培養・発酵・スケールアップの各段階で微生物挙動がスケールに応じて大きく変化することが根本課題となる。実験室では高収率でも槽径拡大に伴い酸素移動、混合不均一、熱・物質移動の偏りが生じ、生産速度や代謝フラックスが大きく変動する。また、pH、溶存酸素、栄養濃度のマイクロ環境が揺らぐことでストレス応答が誘発され、歩留まり低下や副生成物増加が発生しやすい。さらに、現場ではSOPや運転条件は実験・検証に基づき設定されているものの、原料ロット差やスケール依存の揺らぎ等により想定外の事象が生じることがある。その際の原因推定や暫定対処は個人の経験・技能に依存しがちで、スケールアップ検討には依然として試行錯誤の部分が残る。これらを克服する中核技術として、培養槽内部の物理・代謝挙動を仮想空間で再現するデジタルツイン、ならびに大量の運転データを学習して最適条件を導出するAIプロセス最適化技術が重要となる。AI制御を組み込むことで、攪拌・曝気・給餌をリアルタイムに最適化し、スケール間の挙動差を補正した生産検討が期待できる。

③ 分離・精製・製品化

多くの場合、目的物が希薄で不純物が多いことから、膜分離・クロマトグラフィー・濃縮などの複数工程を要し、コストとエネルギー負荷が生産全体のボトルネックとなる。特に、大量水分の除去や高粘度培養液の処理は設備負荷が大きく、スケールアップ時には歩留まり低下や品質変動が起りやすい。また、工程内の品質・安全性をリアルタイムで把握できていないため、過剰精製や再処理が発生し、効率がさらに悪化する。これらの課題を解決する中核技術として、膜分離の高度化や低圧濃縮、選択的吸着材料などによる省エネルギー

型分離プロセスの開発が重要となる。同時に、成分濃度や不純物をリアルタイムで監視し、工程を自動補正するインライン計測・制御技術を導入することで、品質安定化と工程短縮が実現し、製品化プロセス全体の効率向上が期待される。

④ L C A ・ 安全性 ・ 社会受容

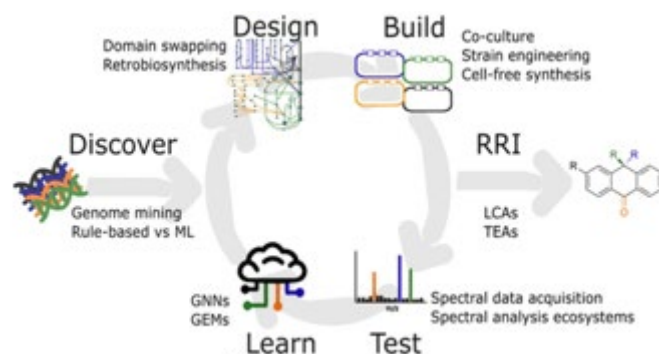
環境性能やリスク評価がプロセス条件や原料選択に大きく依存し、製品ごとの差異が大きいため一貫した比較、説明が困難である。培地やエネルギー源の違いでL C A結果が大きく変動し、安全性評価も用途別規制が複雑に絡むため、社会に対する透明性や信頼性の確保が難しい。また、遺伝子組み換え生物利用に対する慎重な姿勢や、新規バイオ製品への理解不足が市場浸透の障壁となり、科学的データをわかりやすく伝える仕組みが不足している。これらを克服する中核技術として、L C Aと安全性評価を一体で扱う統合基盤の構築、環境・安全指標の標準化、国際的枠組みとの整合性確保が重要である。さらに科学的エビデンスに基づく情報発信を体系化することで社会受容性を高め、バイオモノづくりの信頼性と市場需要の創出につながることを期待される。

(2) 研究動向

研究開発における現在の動向を各項目①～④について、以下に記載する。

① 育種改良

D B T Lサイクルを高速に回すための自動化プラットフォームが進み、メタゲノム・メタオミクス解析を用いた有望酵素・代謝経路の探索が体系化されつつある。さらに、A Iによる酵素機能予測や株候補スクリーニング、代謝フラックス解析を組み合わせ、特定表現型を合理的に設計する研究が増加している。C R I S P R / C a s、C R I S P R i / a、ベース編集・プライム編集など精密改変手法の普及により、複数遺伝子の同時制御や微量発現調整が可能となり、資化性拡張、分泌性向上、ストレス耐性強化などの高機能化が加速している¹⁻³⁾。



図VI-3-2 DBTLサイクルの概略図¹⁾

② 培養・発酵・スケールアップ

スケール依存の流動特性・酸素移動・熱収支・泡形成などを統合的に扱うハイブリッドモデルの開発が進み、実験とシミュレーションを融合した最適設計が可能になりつつある。発酵データをリアルタイム収集し、制御条件との関連を学習するデジタルツインや機械学習モデルも整備され、特にDO制御・給餌プロファイル・攪拌条件などの動的最適化が研究の中心になっている。また非モデル微生物や高粘度培養液など、従来スケールアップが困難だった系への適用も広がりつつある⁴⁻⁶⁾。

③ 分離・精製・製品化

膜ろ過、遠心分離、乾燥などの単位操作を最適化し、エネルギー消費や資材投入量を最小化する研究が進む一方、クロマトグラフィーを回避する低コスト精製プロセスの設計も進んでいる⁷⁾。さらに、最終製品の物性・風味・色調・機能性を踏まえた分離設計が重視され、タンパク質や脂質・色素などの構造特性と加工性を連動させた「製品起点型プロセス開発」が主流になりつつある。食品・飼料・素材用とで求められる規格に合わせた純度・形態制御の研究も進展している^{7) 8)}。

④ LCA・安全性・社会受容

SCPや精密発酵素材を対象とするLCAデータが蓄積し、培地原料・精製工程・エネルギー構成などが環境負荷に与える影響が体系的に整理されつつある^{2) 7)}。また、ex-ante LCA（事前LCA；新しい製品が将来どのような環境負荷を生み出すかを、開発段階で科学的・定量的・客観的に予測・評価する手法）による開発初期段階での環境最適化手法も検討されている。安全性評価では、新規微生物・新規成分への評価枠組み、遺伝子組み換え生物由来製品のリスクコミュニケーション、農業・飼料・食品分野における規制整合性が議論の焦点となっている。社会受容性については、透明性の高い表示、利用目的別の受容度調査、倫理・ガバナンスの整備が研究テーマとして重要性を増している⁸⁻¹⁴⁾。

(3) 実装化動向

実装化における現在の動向を各項目①～④について、以下に記載する。

① 育種改良

一般産業用・医薬用分野では、モデル微生物のゲノム・発現データ、代謝マップ、耐性特性が体系化され、遺伝資源バンクや大規模データベースを基盤とした設計駆動型の株改良が進んでいる。一方、農業・飼料・食品用途では、風味、機能性、消化性、GRAS（一般に安全と認められる）など目的特性が多様で、共有可能な微生物データ基盤が限定的であるため、企業や国研が固有の菌株ライブラリを保有し、分泌性改良や資化性拡張など用途特化の高機能化を個別に進めて

いる^{2) 15)}。こうした分野では、A Iによる表現型予測やゲノム編集と組み合わせたD B T Lの構築が差別化要素となりつつある。

② 培養・発酵・スケールアップ

海外では、食品・素材向け発酵産業の需要拡大を背景に、5～数万L規模の発酵設備が相次いで稼働し、C D M Oや共同利用型プラントがスタートアップの事業化を後押ししている^{7) 8) 16)}。MycoTechnologyのF a a S (Fermentation as a Service)は300～9万Lの設備群を活用し、発酵槽・運転条件・品質保証・規制文書まで含めた包括的支援を提供し、企業が自前インフラなしで量産検証に進める体制を整えている¹⁷⁾。

③ 分離・精製・製品化

乳タンパク質、カロテノイド、脂質、機能性オリゴ糖など高付加価値素材では、用途要求(色・色調・純度・機能性)に応じた精製プロセスが確立され、商業化が進展している。特に食品用途では、タンパク質のフォールディング状態、脂質の酸化耐性、色素の熱安定性など、分子特性と加工・保存プロセスの統合設計が求められる。一方、飼料・農業用途のように単価制約が大きい領域では、膜ろ過・遠心・乾燥といった単位操作の電力コストや設備負荷がネックとなり、クロマトグラフィー非使用の粗精製ルートの探索、発酵液ごと利用する低精製・直接利用型の製品化が重要な方向性となっている^{7) 8)}。

④ L C A・安全性・社会受容

精密発酵タンパク質やS C Pでは、温室効果ガス排出・水使用量・土地利用などのL C Aデータ、安全性データ(毒性、アレルギー性、不純物プロファイル)が蓄積し、米国やシンガポールを中心にノベルフード承認・市場投入が増加している⁷⁻¹⁰⁾。食品用途では、初期段階からL C Aと安全性評価を統合し、H A C C Pや原料トレーサビリティの仕組みを構築する企業が増加している¹⁸⁾¹⁹⁾。一方、新規微生物や遺伝子組み換え生物利用に対する社会的懸念は依然根強く、透明な情報開示、用途別のリスク評価、規制調和の議論が今後の普及を左右する。

(4) 研究課題

研究開発における課題として、サプライチェーンの各フェーズに固有のボトルネックが存在するが、「データ基盤・評価指標」「設備・人材」「制度・社会受容」が共通課題として存在する。また、国際的な品質・安全性管理・L C Aの枠組みを踏まえた生産プロセス設計と、それらに係る情報の整備、さらには消費者や農林水産・食品産業関係者との情報共有の環境づくりが重要である。各項目①～④の課題について、以下に記載する。

① 育種改良

農業・飼料・食品用途に用いる微生物については、安全性・栄養価・官能特

性・環境影響といった複数の指標が体系的に整理されておらず、表現型とゲノム情報が十分に紐づいていないため、DBTLサイクルを高速に回すための基礎データが不足している¹⁻³⁾。特に食品用途では、風味、テクスチャ、消化性、加工耐性などの評価指標が研究機関・企業間で統一されていないうえ、測定方法やスケール依存性も標準化されていない。結果として、改良のターゲットが属人的になり、合理的な株設計が困難となっている^{2) 8)}。

② 培養・発酵・スケールアップ

ラボスケールから実機に至る過程で生じる攪拌・溶存酸素・熱収支・泡形成などのスケール依存性を定量的に扱うモデルや設計指針が未発達であり、微生物種・藻類ごとの最適運転条件が体系化されていない^{4) 7)}。また、オンライン計測データ、CFD解析、代謝モデルを統合し、リアルタイムで最適化する発酵プロセス制御の実装例もまだ限られている⁷⁾。結果として、実機スケールでの収率低下やロットばらつきが頻発し、商業化に向けた安定生産技術の確立が課題となっている。

③ 分離・精製・製品化

目的成分ごとの分離・精製コスト、エネルギー負荷、LCA影響を踏まえたプロセス設計指針が十分に整備されておらず、粗精製レベルで利用可能な用途の探索や製品物性と加工・保存条件を連動させた最適設計が進んでいない^{7) 8)}。さらに、農業・飼料・食品資材として利用するに際に重要となる、加熱・乾燥・押出成型・調理などの加工工程で機能性・風味・物性がどの程度維持されるかに関する科学的知見も不足している^{2) 8)}。これにより低コスト・低環境負荷の製造プロセスの最適化が遅れている。

④ LCA・安全性・社会受容

LCA・毒性・栄養影響・マイクロバイーム変動など複数の評価項目を統合的に扱うデータ基盤が不足しており、試験・評価方法の標準化が進んでいないため、製品・用途間の比較や技術選択の最適化が困難となっている^{2) 7) 9) 10)}。また、遺伝子組み換え生物の利用や新規微生物に対する社会受容性を定量的に把握する方法も未成熟で、国・地域・用途ごとの受け入れ度合いの分析が限定的である^{3) 9) 10)}。結果として、規制適合やリスクコミュニケーションの戦略設計が難しく、事業化判断の不確実性が高い。

(5) 実装化課題

各項目①～④の実装化における課題について、以下に記載する。

① 育種改良

遺伝資源や菌株ライブラリの利用には、COP10で採択された名古屋議定書に基づくABS（遺伝資源へのアクセスと利益配分）や各国独自の知財・輸出

入規制が絡み、特に中小・スタートアップにとっては手続き負担が大きく実務上の参入障壁となっている。国内外のジーンバンクや産業用株ライブラリは整備されつつあるものの、農業・飼料・食品分野が求める安全性、風味、機能性などの評価指標と十分に接続されておらず、用途ニーズに基づく株選択・改良を支援するシステム構築が限定的である。このため、企業が個別に菌株収集や評価を行う必要があり、開発スピードやコストに大きく影響している。

② 培養・発酵・スケールアップ

大型発酵槽やバイオリクターの導入には高額な初期投資が必要で、特に食品・農林水産系スタートアップにとって設備調達は大きなハードルとなる。また、バイオ製造向け共有設備やCDMOの選択肢は国内ではまだ限られており、需要予測の不確実性が投資意思決定を難しくしている¹⁶⁾。農業・飼料用途向けの微生物発酵に特化したスケールアップ検証設備整備や人材育成も不足しており、稼働率や需要予測の不確実性克服も投資判断に対する課題となっている¹⁶⁾。商業規模への移行において運転条件の最適化や生産安定性の確保が遅れがちであり、これらが量産化コストを押し上げ、価格競争力の確保を難しくしている。

③ 分離・精製・製品化

新規微生物由来成分を既存の食品・飼料加工ラインへ組み込む際には、工程適合性、衛生管理、安定性試験など多面的な調整が必要だが、規格設定や品質評価の枠組みが十分に整っておらず、受け入れまでに時間を要するケースが多い^{7) 8)}。特に農業・飼料用途では価格制約が厳しく、分離・精製工程のコスト削減が不可欠だが、現行技術では膜ろ過や乾燥などのエネルギー負荷が高く、低コスト化が課題になっている。また、食品用途では食味、食感、機能性のバランスを踏まえた市場ポジショニングを考慮した製品設計が不十分な例も多く、製品化後の差別化戦略が不明瞭になりがちである。

④ LCA・安全性・社会受容

新規成分・新規微生物を扱う場合、国・地域によって承認プロセスが長期化しやすく、データ要求も高いため、中小企業にとっては費用面・人的リソース面の負担が大きい^{7-9) 16)}。消費者や一次産業とのサイエンスコミュニケーションツールが限られていることから、バイオ由来成分に対するリスク認知と便益のバランスに関する情報提供が不十分であり、社会受容性の向上に時間を要することが課題である⁹⁻¹⁵⁾。さらに、培地原料や精製溶媒、クロマト樹脂などの使用量によっては二酸化炭素排出量が増大し、環境負荷が石油由来製品より高くなる懸念がある。

(6) 研究開発の方向性

各項目①～④の統合評価を「共通インフラ」として整備することで、農林水産の生産性向上及び食品生産で扱う個別技術の産業化を横断的に支える。

① 育種改良

微生物の代謝特性・ストレス応答・分泌挙動を高精度に解析し、ゲノム編集、マルチオミクス解析、代謝シミュレーション、AIによる機能予測を統合したDBTLサイクルを高度化する。これにより、特定成分の高生産化や分泌性強化、低コスト炭素源の利用など、狙った機能を計画的に改良する仕組みを確立する。農業・飼料・食品用途に特化した遺伝資源・表現型データベースを整備し、用途特性（風味・栄養・加工耐性・GRASなど）に応じた微生物選択を可能にする。基盤整備後はデジタルツインやAI制御と連携し、改良ターゲットの自動抽出や最適株設計を実現する。

② 培養・発酵・スケールアップ

AI・IoT・ロボティクスを組み合わせたデジタルツインと自律型制御により、DO制御、給餌、攪拌、温度など発酵条件の動的最適化を進める。ラボ～パイロット～実機間で顕在化する流動特性・酸素移動・熱収支・泡形成などのスケール依存性を定量化し、微生物種・藻類種に対応した設計指針を整備する。これら技術を反映した汎用パイロット設備を設計、整備し、農林水産分野でも利用可能なスケールアップ検証環境（CDMO含む）を構築する。また、CO₂・CH₄・H₂資化菌の活用による炭素循環型生産プロセスや、水・エネルギー消費を低減する環境配慮型発酵技術を開発する。

③ 分離・精製・製品化

膜ろ過・遠心分離・クロマトグラフィー代替技術、低温乾燥などの省エネ型分離・精製技術を高度化し、インライン計測・プロセスアナリティクスと連動した品質保証プロセスを確立する。さらに、農業・飼料・食品資材への組み込みを見据え、タンパク質・脂質・色素などの物性、テクスチャ、溶解性、加工耐性を体系的に評価し、調理・加工プロセスにおける機能性維持を測定する指標群を整備する。これにより、バイオ由来成分を最終用途の特性から逆算して設計する「製品起点型プロセス開発」を可能にする。真空・凍結乾燥の適用限界やメンブレンカスケードの設計指針を指標化し、飼料・食品の規格要件とのマッピングを行う。

④ LCA・安全性・社会受容

省エネルギー化、廃棄物リサイクル、副産物活用などを組み込んだLCA指向型の生産技術を開発し、原料～製品～廃棄までのバイオマス・水資源利用を最適化する。安全性評価では、毒性・栄養・マイクロバイーム影響の統合的解析手法を整備し、ゲノム編集・合成生物学など先端技術のリスク・便益を科学的に説

明する仕組みを構築する。さらに、消費者・生産者と対話するサイエンスコミュニケーションを実装し、社会受容性向上を図る。最終的には、HACCP、GMP、SOPなど国際的な食品・生産管理規格や各国規制との整合を取りつつ、信頼性の高い品質・安全性評価指標を策定し、制度設計への橋渡しを行う。ex-ante LCAを開発初期から適用し、主要な環境負荷ドライバーを定量化、設計へフィードバックする運用を標準化する。

参考文献

1. Foldi, J. et al., 2024. Synthetic Biology of Natural Products Engineering: Recent Advances Across the Discover-Design-Build-Test-Learn Cycle. *ACS Synthetic Biology*, 13(9), 2684-2692 <https://doi.org/10.1021/acssynbio.4c00391>
2. Li, Y.P. et al., 2024. Recent advances and challenges in single cell protein (SCP) technologies for food and feed production. *npj Science of Food*, 8(1), 66 <https://doi.org/10.1038/s41538-024-00299-2>
3. Gurdo, N. et al., 2023. Automating the design-build-test-learn cycle towards next-generation bacterial cell factories. *New Biotechnology*, 74, 1-15 <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2023.01.002>
4. Albino, M. et al., 2024. Hybrid Modeling for On-Line Fermentation Optimization and Scale-Up: A Review. *Processes*, 12(8), 1635 <https://doi.org/10.3390/pr12081635>
5. NEDO「AIを活用した自動培養制御システム」
<https://www.nedo.go.jp/content/100954004.pdf>
6. GlobeNewswire「Pow.Bio Unveils State-of-the-Art Facility in Alameda, Expanding Biomanufacturing Capabilities to Support Demand for Continuous Fermentation」
<https://www.globenewswire.com/news-release/2025/03/05/3037427/0/en/Pow-Bio-Unveils-State-of-the-Art-Facility-in-Alameda-Expanding-Biomanufacturing-Capabilities-to-Support-Demand-for-Continuous-Fermentation.html>
7. Fernández-López, L. et al., 2024. Life cycle assessment of single cell protein production - A review of current technologies and emerging challenges. *Cleaner and Circular Bioeconomy*, 8, 100079 <https://doi.org/10.1016/j.clcb.2024.100079>
8. Eastham, J.L. and Leman, A.R., 2024. Precision fermentation for food proteins: ingredient innovations, bioprocess considerations, and outlook - a mini-review. *Current Opinion in Food Science*, 58, 101194 <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2024.101194>

9. FAO and WHO, 2023. Food safety aspects of cell-based food. Rome, FAO&WHO <https://doi.org/10.4060/cc4855en>
10. Sturme, M. et al., 2025. Precision fermentation-With a focus on food safety. Rome, FAO <https://doi.org/10.4060/cd4448en>
11. Food Standards Agency, 2025. A rapid evidence review on consumer responses to precision fermentation. *FSA Research and Evidence*, 1-55 <https://doi.org/10.46756/001c.136898>
12. Zollman, T.O. et al., 2023. Not getting laid: consumer acceptance of precision fermentation made egg. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7 <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1209533>
13. Chezan, D., Flannery, O. and Patel, A., 2022. Factors affecting consumer attitudes to fungi-based protein: A pilot study. *Appetite*, 175, 106043 <https://doi.org/10.1016/j.appet.2022.106043>
14. Szczepanski, L. et al., 2024. Germans' attitudes toward the microbial protein Solein® and willingness to consume it - The effect of information-based framing. *Food Quality and Preference*, 117, 105132 <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2024.105132>
15. 農林水産省 農林水産技術会議, 2024. 農林水産研究イノベーション戦略 2024 本文・資料編 <https://www.affrc.maff.go.jp/docs/innovate/index.html>
16. The Good Food Institute, 2023. 2023 State of the Industry: Fermentation-enabled meat, seafood, eggs, and dairy. The Good Food Institute https://gfi.org/wp-content/uploads/2024/04/State-of-the-Industry-report_Fermentation_2023.pdf
17. NewProtein.net, 2025. ACCELERATE YOUR BIOTECH SCALE-UP WITH MYCOTECHNOLOGY'S FERMENTATION AS A SERVICE PLATFORM (FAAS) . <https://go.mycoiq.com/faas>
18. Abbaspour, N., 2024. Fermentation's pivotal role in shaping the future of plant-based foods: An integrative review of fermentation processes and their impact on sensory and health benefits. *Applied Food Research*, 4(2), 100468 <https://doi.org/10.1016/j.afres.2024.100468>
19. Farid, M. S. et al., 2024. Recent trends in fermented plant-based analogues and products, bioactive peptides, and novel technologies-assisted fermentation. *Trends in Food Science & Technology*, 149, 104529. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104529>

VII 微生物を活用した農林水産業または食品産業において 事業化に成功した具体的事例

本研究開発構想では、農林水産業または食品産業における微生物活用技術の研究開発に関する国内外の情報を収集・分析した上で、今後必要と考えられる研究開発の方向性を取り纏めることを目的としている。本項では、その社会実装の一里塚である事業化に成功している具体的事例を紹介する。

表VII-1 日本の事業化に成功した具体的事例

	肥料～人工土壌	飼料・餌料	伝統発酵	伝統発酵以外
企業名	トーヨー養父バイオエネルギー ¹⁾	ENEOS テクノマテリアル ²⁾	獺祭 ³⁾	クオンタムフラワーズ & フーズ ⁴⁾
本社	兵庫県養父市	東京都港区	山口県岩国市	茨城県水戸市
中核事業	バイオメタンガス発電	合成樹脂加工製品製造販売	日本酒製造販売	品種改良サービス
活用微生物	嫌気性微生物	<i>Paracoccus</i> 菌	麹菌	乳酸菌、食用微生物
製品	メタン発酵バイオ液肥	Panaferd®	獺祭	Neutron Breeding®
事業概要	<p>家畜排せつ物や食品残渣を活用したメタン発酵バイオガス発電、発酵残渣の有効利用に取り組む。</p> <p>バイオ液肥の効果実証や周知によって利用量を著しく拡大。</p> <p>発電・発酵残渣の利用の他、近隣トマトハウスへの熱源供給等地域内資源循環に積極的に取り組んでいる。</p>	<p>Panaferd は自然由来のアスタキサンチンを豊富に生産する海洋性微生物 <i>Paracoccus</i> 菌から成る飼料原料。</p> <p>同社が約 50 年に亘り培った独自の発酵培養技術を利用。</p> <p>自然由来色素として色調を良くし、抗酸化成分により動物の健康性向上に寄与する機能性飼料素材。</p>	<p>精米歩合を高め、タンパク質や脂質など雑味の元を取り除き、より純粋に米のデンプンに由来する香味成分を引き出す。</p> <p>低温での長期発酵や、丁寧な麹造り、小ロットでの管理、機械と手作業の組合せにより、吟醸香と呼ばれるリングゴやメロン、洋ナシを思わせるフルーティーな香りと、滑らかな口当たりの両立に成功し事業を拡大。</p>	<p>中性子線照射を用いた品種改良サービス。</p> <p>従来技術と比較して 15～300 倍の突然変異率を実現し、植物では 1～3 年、微生物では 1～2 ヶ月の短期間で新規系統を創出可能。</p> <p>同技術を活用し農作物や乳酸菌をはじめとする食用微生物の高機能化、新素材開発、バイオガス生産効率向上等に取り組んでいる。</p>

備考	生産量： H29年度 20ト R4年度 13,146ト	—	売上高： 195億円（2024年9月 期）	—
----	-----------------------------------	---	-----------------------------	---

表VII-2 海外の事業化に成功した具体的事例

	肥料～人工土壌	飼料・餌料	伝統発酵	伝統発酵以外
企業名	Pivot Bio Inc. ⁵⁾	P D V (飼料協会) ⁶⁾	Domaine de la Romanée-Conti ⁷⁾	Solar Foods Ltd. ⁸⁾
本社	米国カリフォルニア	オランダ	仏国ブルゴーニュ	フィンランド
中核事業	微生物農薬の製造販売	飼料製造・販売、リキッドフィード製造販売	ワインの製造販売	食品製造用タンパク質原料の製造販売
活用微生物	窒素生成微生物	酵素	酵母菌	水素酸化細菌
製品	PROVEN 40、PROVEN 40 OS、他	混合飼料	Romanée-conti 等のワイン	Solein®
事業概要	<p>合成窒素肥料に代わる持続可能な農業技術を提供するバイオテクノロジー企業。</p> <p>植物の根に共生する微生物を活用し、大気中の窒素をアンモニアに変換して作物に供給する技術を開発して事業展開。</p>	<p>食品産業から排出された生ごみは食品工場の貯蔵タンクもしくはリキッドフィード製造業者のタンクに集められ農家に配達される。農家は数種のリキッドフィード及び配合飼料を混合し、混合飼料とし家畜に与える。</p> <p>貯蔵時に有害な菌が繁殖しないよう、酵素、有機酸の添加を行って pH4 以下に保つ。</p>	<p>製法は伝統を重んじ、常に革新が追求されている。収穫は全て手作業で熟練スタッフによる厳格な葡萄選別が実施される。</p> <p>発酵は温度管理されたステンレスタンクを使用、その後新樽 100% で 18 ヶ月間熟成、定期的な澱引きにより品質を管理。</p> <p>環境配慮から、ビオダイナミ農法を導入している。</p>	<p>水素酸化細菌が有する遊離水素を酸化する反応により生じるエネルギーを用いて炭素同化を行う性質を利用したタンパク質の生産。</p> <p>水素の生産に電力が必要だが、太陽エネルギーを利用している。</p>
備考	—	—	—	—

参考文献

1. 株式会社 AGRI SMILE, 2025. 株式会社 AGRI SMILE | テクノロジーによって、産地とともに持続可能な農業と地域をつくる。株式会社 AGRI SMILE.
<https://agri-smile.com/>
2. Novonosis A/S, 2025. Novonosis | The time for biosolutions is now. Novonosis A/S.
<https://www.novonosis.com/en>
3. Pivot Bio, Inc., 2025. Pivot Bio - Nitrogen for Corn, Wheat and Small Grains. Pivot Bio, Inc.
<https://www.pivotbio.com/>
4. ENEOS Techno Materials Co., Ltd., 2025. Panaferd® (Naturally-Sourced Astaxanthin). ENEOS Techno Materials Co., Ltd.
<https://www.tmc.eneos.co.jp/english/products/astaxanthin/>
5. Solar Foods Oy, 2025. Solar Foods - Solein® - protein out of thin air. Solar Foods Oy.
<https://solarfoods.com/>
6. Perfect Day, Inc., 2025. Sustainable Animal-Free Dairy & Protein. Perfect Day, Inc.
<https://perfectday.com/>
7. Quantum Flowers & Foods Co., Ltd., 2025. Quantum Flowers & Foods - World's First Neutron Breeding Service. Quantum Flowers & Foods Co., Ltd.
<https://qff.jp/en/>
8. PtBio Inc., 2025. Genome Editing | PtBio. PtBio Inc.
<https://www.pt-bio.com/en/feature/genome>

VIII 微生物に纏わる安全問題とリスクへの対策について

本報告書においては、微生物の活用面に焦点を当て、「農林水産業の生産性向上」、「食料生産」、「産業化」に関する研究開発を採り上げた。

他方、微生物は、その取扱い次第では負の影響を及ぼすため、そのリスクを予め理解しておくことが望まれる。本項では、特に留意が必要な4テーマを採り上げた。これらに関しては、現状把握、微生物の取扱い、問題の発生防止対策が重要となる。

1. バイオテロリズム

バイオテロの事例としては、国外では2001年にアメリカで炭疽菌によるバイオテロが発生して捜査は大規模かつ複雑になり多くの人命が失われた事件が挙げられる。日本においては1993年のオウム真理教による亀戸炭疽菌事件及び1995年の地下鉄霞ヶ関駅構内ボツリヌス毒素散布未遂事件が挙げられる。

竹内（聖路加国際大学特任教授）らは「生物兵器として使用されうる生物剤は多数存在する。過去に生物兵器として開発されていた微生物は、感染症の発生頻度としては稀な病原体が多く、発生した際に診断に難渋する可能性が高い。また、ワクチンを含む医薬品が存在しないものも多い。これらに対する診断薬、医薬品の商業的開発は困難であることから、国が関与すべきこと。生物兵器として使用されうる生物剤に対する診断薬、医薬品について、優先的に開発すべきこと。」を2015年に提言している¹⁾。

行政側の対応としては、防衛省・自衛隊による「生物兵器対処に係る基本的な考え方について」²⁾、経産省による「生物テロ対策等」³⁾、厚生労働省による「バイオテロ対応ホームページ」⁴⁾、国土交通省による「テロ対策マニュアル等策定指針」⁵⁾が公表されている。

2. アグロテロリズム

2018年10月以来、国際獣疫事務局（WOAH）、国際連合食糧農業機関（FAO）と国際刑事警察機構（INTERPOL）の三者は、国際的な「農業犯罪・農業テロに対するレジリエンス構築」プロジェクトを通じて連携し、動物の健康、農業、犯罪捜査の各分野における専門知識を持ち寄り、犯罪やテロ行為によって発生する緊急事態に備えるために加盟国を支援している⁶⁾。

3. 食中毒

農林水産省は「食中毒から身を守るには」⁷⁾において、食中毒のポイント、“食中毒をおこす細菌・ウイルス・寄生虫凶鑑”等を示して注意喚起を行っている。

内閣府食品安全委員会による「食中毒予防のポイント」⁸⁾、厚生労働省による「食中毒」⁹⁾がそれぞれのホームページに掲載されている。

他方、農林水産省は「有害微生物による食中毒を減らすための農林水産省の取組（リ

スク管理)」¹⁰⁾において、微生物と食品との関係を示して注意喚起を行っている。その中で、“農場、農畜水産物等の汚染実態調査”の項目において“食品の安全性に関するサーベイランス・モニタリングの結果（有害微生物）”と“安全な畜産物を生産するために農場でできること（食中毒を減らすための取組）”を公表している。

4. 微生物に起因する健康被害

2024年、小林製薬紅麹サプリメント問題による健康被害が発生した。原因は、原料から検出された青カビ由来の「ペベルル酸」が、腎障害を引き起こした原因物質であることが判明したが、原料を作る前の紅麹菌の培養段階で青カビが混入してペベルル酸が生成されたことがペベルル酸混入の原因とされている¹¹⁾。

対策として、サプリメントの製造方法を含む規制が消費者庁の審議会で検討されている¹²⁾。

参考文献

1. 株式会社 厚生労働科学研究委託費 新興・再興感染症に対する革新的医薬品等開発推進研究事業 バイオセキュリティの向上に資する基盤的研究 平成 26 年度委託業務成果報告書 業務主任者 竹内 勤 平成 27 (2015) 年 3 月 [201447022A.pdf](#)
2. [防衛省・自衛隊：生物兵器対処に係る基本的考え方について](#)
3. [生物テロ対策等 \(METI/経済産業省\)](#)
4. [バイオテロ対応ホームページ - 厚生労働省研究班](#)
5. [Microsoft Word - 00 テロ対策マニュアル等策定指針](#)
6. [Partnering with WOAHP | FAO and UN System Partnerships | Food and Agriculture Organization of the United Nations](#)
7. [食中毒から身を守るには：農林水産省](#)
8. [食中毒予防のポイント | 食品安全委員会 - 食の安全、を科学する](#)
9. [食中毒 | 厚生労働省](#)
10. [有害微生物による食中毒を減らすための農林水産省の取組 \(リスク管理\)：農林水産省](#)
11. [紅麹関連製品による被害の発生状況について | ニュースリリース | 小林製薬株式会社](#)
12. [ウェルネスデイリーニュース | サプリの定義、議論スタート 【規制のあり方検討】消費者庁食品衛生基準審議会「形状だけで判断すべきでない」](#)

Ⅸ まとめ

1. 研究開発の方向性一覧

今回、農林水産・食料分野における微生物活用技術に関して、国内外の研究開発等の動向を調査・分析し、各研究領域が抱える課題を明確化するとともに、その達成に向けた研究開発の方向性について提案した。各研究領域の研究開発の方向性を一覧表にすると、表Ⅸ－１－１～６のとおりである。

表Ⅸ－１－１ 微生物を活用した農林水産業の生産性向上に資する技術開発（１）

	研究開発の方向性
(1) 肥料・農薬・ バイオスティ ミュラント・ 人工土壌の 生産技術開発	<p>4分野に共通して、作用機序の解明、スマート農業との融合、製剤化技術と担体技術の革新、低コストによる安定生産技術の開発が挙げられる。</p> <p>共通課題： 作用機序の解明と機能強化（スクリーニング、合成生物学的アプローチ含む）。製剤化技術と担体技術の革新（低コスト安定培養、輸送性・保存性・定着性の改善）。データベースの整備。スマート農業との融合（ソリューションビジネス化）。共同利用型スケールアップ化施設に向けた技術の整備。</p> <p>微生物肥料： 化学肥料との適切な組合せ：化学肥料と組み合わせた場合の機能最大化（ソリューション化）。</p> <p>微生物農薬： IPM体系：AIを活用した病害リスク予測と連動させて最適な防除を選択する「処方設計型防除」。 効果の改善：高い防除能力の改善に向けた合成生物学的アプローチや製剤技術、RNAiや化学農薬との併用などの開発。 開発コスト負担の低減：バイオ医薬品と同様の導出・M&A等の活用。</p> <p>BS： 制度整備と市場形成の強化：日本ではバイオスティミュラントに関するガイドラインが制定された。 モニタリング技術：施用微生物の環境中での動態追跡技術及び環境影響のリアルタイム監視技術。 認証制度の整備：日本:統一的な第三者認証制度は未整備。EU:FPRに基づく性能・安全性認証あり。米国:州ごとに任意の品質認証プログラムが存在。</p> <p>人工土壌： 作物の多様化：蔬菜類から他の作物への拡大。コスト低減も含む。 長期運用における微生物群集の遷移評価：安定的な長期運用と能力の維持</p>

表区－１－２ 微生物を活用した農林水産業の生産性向上に資する技術開発（２）

	研究開発の方向性
<p>(2-1) 飼料・餌料等 (添加物を含む) の生産技術開発 【畜産】</p>	<p>1)飼料原料の確保・多様化 未利用資源のアップサイクル： 微生物発酵で安価・大量・安定供給可能な飼料原料を創出し、地域の未利用バイオマスを高付加価値化する。</p> <p>SCPの利用： メタン資化菌・水素細菌などでカーボンリサイクル資源やCCS回収CO₂ (C1資源) を直接タンパク質等の飼料原料に低コスト変換する技術を推進する。</p>
	<p>2)生産性向上 微生物産生機能物質（酵素・有機酸など）： 酵素、ペプチドなど微生物が産生する機能性物質の継続的な探索と更なる高活性化を図り、飼料添加物として活用できるよう工業的製法、製剤化と適用設計を高度化する。</p> <p>腸内環境・生体機能制御（プロ/プレ/ポストバイオティクス等）： ・生産性・品質向上、健康維持、抗菌物質不使用に資する有用微生物の探索を進め、ポストバイオティクスを基本軸に腸を起点とした全身への効果の研究を進める。 ・畜種・ステージ別「望ましい腸内機能プロファイル」とMGBA指標を定義し、農場条件に応じた「プロ/プレ/ポストバイオティクス+製剤技術」設計により、最適な剤の選択・組み合わせで効果の最大化、安定化を図る。</p>
	<p>3)環境対策 反芻動物のGHG排出削減： 反芻動物では、ルーメン発酵制御や資材投入でメタン排出を下げ、カーボンクレジットやサプライチェーン全体の気候対策と連携し、環境負荷低減と原単位改善を図る。</p> <p>単胃動物（豚・鶏等）のGHG・窒素排出削減： 家畜の糞尿処理においては、反芻、単胃動物共通して、嫌気発酵によるバイオガス化と栄養塩回収で循環システムを構築し、エネルギー・肥料価値を創出して経済メリットを高める。</p>

表区－１－３ 微生物を活用した農林水産業の生産性向上に資する技術開発（３）

	研究開発の方向性
<p>(2-2) 飼料・餌料等 (添加物を含む) の生産技術開発 【水産】</p>	<p>1) 魚粉/魚油代替飼料 未利用資源の酵素分解・発酵の利用：持続性の観点から、バイオマス資源の高度利用とCO₂の資源化技術を開発する。</p> <p>SCPの利用：培地原料として穀物に依存しない代謝系を持つ微生物（水素細菌やメタン資化菌など）の活用を検討することが望ましい。また、培養系の高効率化（ガス移送・基質利用効率の向上、エネルギー負荷低減）と大規模化（安全設計を含むスケールアップ、生産コスト最適化）を見据えた技術を開発する。さらに、原料調達から発酵・下工程・物流・配合まで一貫したサプライチェーンと品質管理を構築し、供給の安定性を確保する。</p>
	<p>微細藻類の利用：SCP・微細藻類を合わせたブレンド設計と、魚種・成長段階別の最適配合モデルを構築する。また、社会受容性の確保に向けて、原料由来や製造工程の透明な情報開示、表示・トレーサビリティ体制の整備を行う。</p> <p>2) 養殖の集約化・陸上化 プロバイオティクスの水産利用：健全で高品質な水産物を生産するための腸内細菌活用技術を開発する。</p>
	<p>BFTの利用：養殖場の水質管理や生物防除機能を高めるために微生物を活用する技術を高度化する。日本の地域条件（用水制約・電力コスト・気候）を踏まえた小～中規模向けBFT・RASモジュールの開発と、代替タンパク質原料との組合せによる「低魚粉・高効率・低排水」モデルを構築する。</p> <p>好氣的脱窒菌による養殖排水処理：BFT・RAS・脱窒処理・藻類培養等を組み合わせた「統合微生物システム」の標準フローを設計し、実証試験を通じて運転条件と魚体成績・環境指標の関係を定量化する。</p>

表区－１－４ 微生物を活用した食料生産技術開発（健康に資する食品を含む）（１）

	研究開発の方向性
(1) 伝統発酵による高付加価値食料生産技術開発	<p>1) 菌叢生態・発酵メカニズムの可視化・モデル化</p> <ul style="list-style-type: none"> 多菌叢の動態と代謝ネットワークを、メタゲノム/メタトランスクリプトーム/メタボロームで統合解析し、失敗せずに狙った香味を出すための設計指針として整理。 簡便な指標菌・バイオマーカーを用いた現場向けモニタリング技術の開発。 <p>2) スターター・複合微生物群集設計と工程安定化</p> <ul style="list-style-type: none"> 在来株を核としたスターター/複合微生物群集の設計法（株の組合せ・比率・条件）を体系化し、モデル化・データベース化する。 温度・pH・塩分などの工程条件とリンクさせた「デジタルレシピ」を構築する。 <p>3) 官能・機能の統合設計（美味しさ×健康）</p> <ul style="list-style-type: none"> 伝統発酵食品由来の乳酸菌・酵母・麹菌を対象に、プロバイオティクスとしての条件（株レベルの同定・安全性・機能性）を整理し、臨床・介入研究と連携する。 プロバイオティクス・プレバイオティクス・ポストバイオティクスのマイクロバイオームに対する機能を整理したうえで、発酵食品中の微生物・基質・代謝産物を統合的に組み合わせ、「おいしさ」と「エビデンスに基づく健康機能」を両立させる製品設計と評価手法を確立する。 <p>4) 地域テロワール設計・ブランド化</p> <ul style="list-style-type: none"> 菌叢構造・官能評価・機能性指標を統合した「テロワール・プロファイル」の作成と、その可視化を行う。 テロワール・ストーリーと科学データを組み合わせたエビデンスベースのブランド戦略・観光プログラムをする。

表区－１－５ 微生物を活用した食料生産技術開発（健康に資する食品を含む）（２）

	研究開発の方向性
(2) 微生物による食料生産技術開発（伝統発酵以外）	<p>1) 精密発酵</p> <ul style="list-style-type: none"> 機能性タンパク質の設計に加え、スケールアップ時の物性変化（粘度・酸素移動等）を制御するプロセス開発と、糖鎖・官能特性の再現を含めた「食品科学としての最適化」を行う。 Novel Food等の規制承認や社会受容性の確保に資するため、食品・農業用途に特化した安全性・栄養・LCAデータの取得方法を標準化し、業界全体で利用可能な共有基盤を整備する。 <p>2) バイオマス発酵</p> <ul style="list-style-type: none"> 原料の組成変動や品質のばらつきに対応可能な固体発酵・混合培養プロセスの制御技術を確立する。 安全性・機能性に関する標準的な評価フレームワークを構築し、アップサイクル認証・環境ラベリング等の国際基準と整合した製品設計・LCA手法を整備する。 <p>3) SCP</p> <ul style="list-style-type: none"> 多様な基質利用に対応した微生物設計に加え、麹菌等の課題である香味・色調を改善する育種・加工技術を開発する。 経済性を左右するエネルギーコスト低減と安全性を両立するリアクター・プロセス開発を行うとともに、核酸等の安全性・栄養評価データを蓄積し、迅速な許可取得・ラベリングに資する一体的な評価系を設計する。 <p>4) 微細藻類</p> <ul style="list-style-type: none"> 高機能株の探索・改良を進めるとともに、種・株ごとの栄養・機能性・安全性データを体系化し、培養条件による成分変動を予測するモデルを構築する。 培養・回収・乾燥のエネルギーコストを低減する技術と、特有の色・風味を制御し既存食品・飼料への利用を促進する加工技術を開発する。

表区－1－6 微生物を産業として活用することに資する研究開発

研究開発の方向性	
3. 微生物を産業として活用することに資する研究開発	<p>1) 育種改良</p> <ul style="list-style-type: none"> ・微生物の代謝・機能解析を高度化しつつ、ゲノム編集・オミクス解析・シミュレーション（AI含む）を統合運用してDBTLを加速し、狙った機能を向上させた既存微生物の計画的な育種改良を行う。 ・農業・飼料・食品用途に特化した遺伝資源・機能データベースを構築する。データベース構築後はデジタルツイン/AI制御により改良・高機能化をさらに効率化する。
	<p>2) 培養・発酵・スケールアップ</p> <ul style="list-style-type: none"> ・AI・IoT・ロボティクスを活用したデジタルツイン/AI制御により発酵プロセスの最適化・自動化を進める。 ・ラボ～実機でのスケール依存性を定量化したモデル・設計指針を作成する。 ・上記2点を反映した汎用パイロット設備を設計、整備し、農林水産分野でも利用可能なスケールアップ検証環境を構築（CDMO含む）する。 ・CO₂・CH₄・H₂資化菌等の利用拡大と環境配慮型生産技術を開発する。
	<p>3) 分離・精製・製品化</p> <ul style="list-style-type: none"> ・省エネ型分離・精製プロセス（膜ろ過・遠心分離・クロマトグラフ代替等）とインライン計測・制御による品質保証プロセスを確立する。 ・農業・飼料・食品資材への組込みを見据えた物性・テクスチャ設計と、加工・調理プロセスを含めた機能性維持の評価指標を作成する。
	<p>4) LCA・安全性・社会受容</p> <ul style="list-style-type: none"> ・省エネルギー・廃棄物リサイクル等のLCAを意識した生産技術を指向し、投入エネルギーだけでなく、原料・製品・副産物・廃棄物に含まれるバイオマスや水を最大限有効活用する生産技術開発を進める。 ・ゲノム編集・合成生物学等の先端技術の社会受容性を研究し、対話型サイエンスコミュニケーションを実装する。 ・国際的な食品生産、安全性管理の考え方（HACCP、適正製造規範（GMP）、標準作業手順書（SOP）等）や諸外国の規制等と整合する評価指標・ガイドラインの策定に資する効率的な生産・管理と品質・安全性管理技術の開発を推進し制度設計への橋渡しを行う。

2. 微生物活用技術を取り巻くグローバルな動き

農林水産・食品事業分野における伝統的或いは先進的技術による微生物の活用を巡っては、研究開発だけではなく、近年、グローバルな規模で様々な研究開発から実装化・事業化を取り巻く動きがみられる。

特に食品に係る品質管理や安全性の確保に係る研究開発を取り巻く情勢として、国際連合食糧農業機関（FAO）、欧州食品安全機関（EFSA）、米国食品医薬品局（FDA）あるいは、アジアではシンガポール食品庁（SFA）等の国や地域がそれぞれ、伝統発酵や精密発酵による食品に関するガイドラインを公表している。国際的な枠組みと整合する評価指標、ガイドラインの策定に資する試験研究・研究開発を推進するためには、これらの動きを把握する必要がある。

FAOの食品安全性に焦点を当てた精密発酵に関する報告書¹⁾では、精密発酵由来食品については、使用する微生物・宿主株の特性評価、培地組成や発酵・分離工程の管理、最終製品の組成・不純物、想定摂取量に基づく毒性・アレルギー性、抗菌薬耐性や環境影響などを共通の評価要素として整理し、各国当局間で議論が進められている。本調査には計35の国・地域の食品安全主管当局が参加、情報収集に貢献していた。

FAOの報告書によると、現行の各国地域の食品安全性の規制枠組みは、精密

発酵による食品の安全性確保も対象としており、規制枠組み間には類似点が多いが、表示に関する規制や要件には大きなばらつきがある可能性が指摘されており、これに対しては国際レベルでの関係当局間のより広範な議論が有益であるとしている。その例としてはFAOと世界保健機関（WHO）が1963年に設立した政府間組織であるコーデックス委員会（Codex Alimentarius Commission；CAC）の関連部会である食品表示部会（Codex Committee on Food Labelling；CCFL）が議論の場として適するとしている¹⁾。

精密発酵由来の食品は、すでに一部の国で商業化され市場に出回っている。本報告書においては、文献から収集した精密発酵の定義の概要によると、精密発酵には多様な記述が存在するが、いくつかの重要な共通要素を特定することが可能とされている。定義によって影響を受ける可能性のある規制枠組みの分野は以下の①から④のとおりとなっている¹⁾。

① 新規か従来型か

一部の国や地域では、精密発酵由来食品を「新規食品」と見なし、関連する規制が存在する場合、それに従って規制される可能性がある。

② 遺伝子組換え生物か否か

すべてではないものの、多くの精密発酵の工程では遺伝子組換え（GM）微生物が使用される。GM微生物の使用に関する特定の規制を持つ国や法域では、最終製品にそれが残存しない場合であっても、規制遵守が必要となる場合がある。

③ 添加物か原材料か

多くの国や地域では、添加物、酵素、香料、加工助剤、ビタミン、乳児用栄養などを他の食品原料カテゴリーとは別に規制している。添加物として使用される精密発酵由来製品は、該当するカテゴリー規制に従う必要がある。

④ 表示に関する問題（アレルギー性や過敏症を含む）

2024年7月時点のコンサルテーション参加国・法域の報告範囲では、精密発酵“特有”の表示要件は報告されていないが、精密発酵由来食品は、従来の生産プロセスで製造された食品と同程度のアレルギー性や過敏症を有し得ると考えられる。

本報告書の表IX-2で示された規制状況は2024年7月時点のものであり、今後の産業の成長、研究開発の進展に伴って変化する可能性がある。同レポートに示されている規制の実践例は一事例であるとしている¹⁾。

F A Oは特定の規制手法や管理手法を推奨するのではなく、関連する規制活動の準備を進める各国を支援し、他国の経験から学び、自国のニーズや状況に最も適したアプローチを特定するための参考情報を提供する立場であり、今後は、米国、欧州等やアジアではシンガポールなどの規制枠組み動向を継続的にウォッチするとともに国際的な議論を基にした、我が国の規制枠組みに資する情報の整備やその試験、研究開発の推進が必要である¹⁾。

表区－2 食品安全に焦点を当てた各国プレジジョン・ファーメンテーション（PF）
の生産の規制概要の抜粋（2024年7月8日現在）¹⁾

* PRECISION FERMENTATION（FAO）Table 4. の転載

Country/jurisdiction	PF definition	PF-specific regulations	Other applicable regulations	Premarket food safety assessment	Food safety assessment guidelines	Presubmission consultation	Categorization of PF products (e.g. additives, ingredients)	Labeling requirements specific to PF	PF-derived products on the market
Argentina	No	No	Yes	Required	Not mentioned	Available	Depends on the intended use	Not specific to PF	Yes
Australia	No	No	Yes	Required	Yes	Available	Depends on the intended use	Not specific to PF	Yes
Brazil	No	No	Yes	Required	Yes	Available	Depends on the intended use	Not specific to PF	Yes
Canada	No	No	Yes	Required	Yes	Available	Depends on the intended use	Yes	Yes
Chile	No	No	Not mentioned	Required	Informal guidelines exist	No	Depends on the intended use	Not specific to PF	No
China	No	No	Yes	Required	Yes	No	Depends on the intended use	Not specific to PF	Yes
European Union	No but a working definition exists	No	Yes	Required	Yes	Available	Depends on the intended use	Not specific to PF	Yes
Guatemala	No	No	Not mentioned	Not mentioned	Not mentioned	Not mentioned	Not mentioned	Not mentioned	Not mentioned
Indonesia	No	No	Yes	No	Not mentioned	Not mentioned	Not mentioned	Not mentioned	Not mentioned
Islamic Republic of Iran	No	No	Yes	Required	Yes but not specific to PF	No	Depends on the intended use	Not specific to PF	Yes
Israel	No	No	Yes	Required	Yes	Available	Depends on the intended use	Not specific to PF	Yes
Japan	No	No	Yes	Required if GMO is used	Yes but for GMO only	Available	Depends on the intended use	Not specific to PF	Yes
New Zealand	No	No	Yes	Required	Yes but not specific to PF	Strongly advised	Depends on the intended use	Not specific to PF	Yes
North Macedonia	No	No	Yes	Not mentioned	No	Available	Depends on the intended use	Not specific to PF	Yes
Qatar	No	No	Yes	Required	Yes	No	Depends on the intended use	Not specific to PF	No
Republic of Korea	No	No	Yes	Required	Yes	Available	Depends on the intended use	Not specific to PF	Yes
Saudi Arabia	No	No	Yes	Required	Not mentioned	Not mentioned	Not mentioned	Not specific to PF	No
Singapore	No but a working definition exists	No	Yes	Required	Yes	Encouraged	Depends on the intended use	Not specific to PF	Yes
Switzerland	No	No	Yes	Not mentioned	Not mentioned	Not mentioned	Not mentioned	Not mentioned	Not mentioned
Thailand	No	No	Yes	Required	Not mentioned	Not mentioned	Not mentioned	Not specific to PF	Not mentioned
United Arab Emirates	No	No	Yes	Required	Yes	No	Depends on the intended use	Not specific to PF	Yes
United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland	No	No	Yes	Required	Yes	Encouraged	Depends on the intended use	Not specific to PF	Yes
United States of America	No	No	Yes	Voluntary but strongly encouraged	Yes	Strongly encouraged	Depends on the intended use	Not specific to PF	Yes

F A Oの報告書とは別に、個別の国や地域の安全性評価枠組みや動向調査を個別に観ると、F D Aの食品安全性に関する認証制度（Generally Recognized as Safe ; G R A S）²⁾、S F Aの発酵による新食品のリスクの概要に関する報告³⁾ 新規食品及び新規食品原料の安全性評価に関する要件の枠組み⁴⁾では、精密発酵由来成分や新規微生物利用食品を既存の制度の中で位置づけ、事前相談スキームや申請要件の明確化を通じて、産業界との対話を図りながら安全性評価の運用が進められている。E F S Aの「バイオテクノロジーの新展開によって得られる微生物とその産物に関する先見的調査報告⁵⁾」では、新たなバイオテクノロジーにより得られる微生物及びその産物について、潜在的なリスクと評価ニーズを整理し、今後のリスク評価枠組みの高度化に向けた論点を提示している。

我が国では、従来の食品にあわせて、微生物を利用した食品についても、食品安全委員会、厚生労働省、農林水産省、消費者庁が連携し、安全性の評価、基準・規制・許認可、情報の表示監督を行っている。

食品分野における安全性の確保の手法は、従来からの危害要因分析重要管理点（H A C C P）⁶⁾、適正製造規範（G M P）⁷⁾、標準作業手順書（S O P）⁸⁾などの管理手法がすでに確立されているが、微生物を利用した食品や、さらには、農林水産資材（肥料、農薬、バイオスティミュラント、飼料など）の品質・安全性の確保にも応用が可能と考えられる。これらの管理手法面に対しても、今後、国際レベルの分析情報、モニタリング・管理技術の動向を基に研究開発を進め、輸出や国際取引に対応し国際競争力を確保していくためにも、我が国への適用に資することが必要である。

3. 日本の強みを活かすための5つの戦略

世界的には、肥料・飼料・新たな発酵食品・精密発酵や微細藻類を含む微生物産業化の分野で、米国・中国・シンガポールを中心に大規模投資と事業化の動きが加速している。一方、日本は風土に即した発酵技術（味噌・醤油・日本酒など）を発展させてきた歴史的背景を有し、この発酵文化を含む「和食」や麹菌を用いた日本酒・焼酎などの「伝統的酒造り」のユネスコ無形文化遺産登録⁹⁻¹¹⁾、食品安全・品質管理の高度な技術力といった強みを有するものの、スケールの大きな設備投資や共用インフラ、国際連携、規制対応のスピード等では後れをとっている側面もある。今後は、これら日本の強みを最大限に活かしつつ、既存の農林水産業を補完し食料の安定供給を支える技術となるよう、基盤技術・共用インフ

ラ・エビデンスとデータ基盤を戦略的に整備し、国際的ガイドラインにも貢献し得る「農林水産・食料×微生物」の研究開発・産業化エコシステムを構築していくことが重要である。本研究開発構想における「VI. 各技術について」の各項目で提示した研究開発の方向性を統合し、我が国の強みを活かすための5つの戦略を以下に整理した。

①【出口戦略】「次世代型発酵食品」の創出とマイクロバイームへの影響等を見据えた技術設計

微生物活用技術の普及には、生産者や食品事業者のメリットだけでなく、新しい食品の開発や食品の差別化・高付加価値化といったゴールを見据えることが重要である。我が国の水田・畑・森林・養殖などの長年の蓄積データを活かし、土壌・水域・家畜・人のマイクロバイームや生態系への影響にも配慮しつつ、現場の生産性と健康・環境保全を両立させ、消費者に新たな食体験を提供する「次世代型発酵食品」や「新しい食料・食品」を見据え、コスト競争力や環境負荷低減といった差別化可能な技術要素を明確にした技術設計を行う。

②【資源戦略】バイオマス・水資源を最大活用する循環型バイオエコノミー構築と世界的タンパク質不足への対応

剪定枝、家畜ふん尿、食品残渣、製造副産物などのバイオマスや水を最大限有効活用し、地域で完結する循環型バイオエコノミーを構築する。微生物・微細藻類・発酵技術で我が国の多様な資源を高付加価値化し、肥料・飼料・機能性成分・エネルギー等として循環利用することで、世界的タンパク質不足に対応する「新しい食料」の確保や、脱炭素と資源制約への対応に寄与する。

③【製造戦略】LCA・安全性・品質設計を一体で捉えた「新食品」のプロセス設計

微生物利用プロセスでは、省エネルギー化、廃棄物リサイクルなどライフサイクルアセスメント（LCA）を意識した生産技術の開発が求められる。FAO、EFSA、FDAなどが示す食品安全評価の枠組みを踏まえつつ、我が国の強みである発酵食品等の品質管理技術を活かし、食品としての品質・差別化要因を科学的に担保できるプロセスを構築し、HACCP、GMP、SOP等の既存の食品生産安全管理手法と統合した国際レベルの分析情報・モニタリング・管理技術の導入を進める。併せて、有効性実証や評価系の標準化を進めることで、研究成果の比較可能性と信頼性を高め、量産・品質管理を含めた再現性と規格化を一体的に推進する。

④【基盤戦略】データ・共用インフラの整備と知財戦略強化によるスタートアップ

ブ・エコシステムの構築

微生物活用の産業化を進めるうえでは、探索・育種から培養・スケールアップ、分離・精製、LCA・安全性評価に至るまでのデータを体系的に蓄積・共有し、評価指標や試験系の標準化を図ることが重要である。これを支えるパイロット設備・バイオフィアウンドリー・CDMO等の共用インフラの整備、人材の育成、効率的にデータを蓄積する技術の開発、我が国の農業・森林・水産試験研究機関などの長期にわたり蓄積された微生物データを用いてデジタルツイン・AIを活用したプロセス設計・最適化ができるプラットフォームの整備を進め、フードテック・スタートアップを含む多様なプレイヤーが参画できるイノベーション・エコシステムを構築する。併せて、研究成果の社会実装を加速するため、特許・周辺特許・用途特許を含む知財戦略を強化し、データ基盤と連動した知財ポートフォリオの構築を推進する。

⑤【グローバル戦略】国際的ガイドライン形成の主導と日本発モデルの海外展開

微生物活用技術は、農林水産の現場だけでなく、輸出向け農産物・水産物や海外のフードシステムの脱炭素・資源循環にも貢献し得る。FAO/WHO、EFSA、FDA等による国際的な食品安全・環境評価・バイオリスクの議論に対して、日本発の科学的知見と実証データを通じて国際標準・ガイドラインの形成を主導する。同時に、日本の強みである研究と技術を積極的に海外に発信し、世界に向けて日本の価値をアピールしつつ、地域資源や食文化と結び付いた高付加価値なソリューションを海外パートナーと共創し、日本の発酵技術が世界市場をリードする形で、我が国の地域特性を活かしたビジネスモデルや人材育成も含めた連携・展開を図ることが重要である。

微生物発酵技術は、酵素による有機化合物の生成、改変、分解機能を活用し、食料・食品のみならず、医薬、工業化学、バイオマテリアルから燃料生産にまで広がる技術といえる。この点から技術の展開においては、従来から行われている微生物の機能の解析や改変に加え、それら解析・改変情報に基づき情報技術（IT）を用いた高度スクリーニングによる、新規微生物株の探索、ゲノム編集などによる遺伝子レベルでの機能向上を含めた育種、いわゆるインシリコ（in silico；コンピュータ上でのシミュレーションや解析等）での探索・育種のシミュレーションを活用した、生産物を精密にターゲットした微生物の創成も研究されている¹²⁾。

農林水産・食品分野においては、多様な物質の生産技術のみならず、安全性・

社会受容性・健康や美味しさなどの嗜好性等の情報も含めて考慮したインシリコでの微生物の探索・育種が必要となろう。

これらを纏めてVI章に提起した各技術に共通的に関係するさらなる研究開発の方向性を、表IX-3に纏めた。

表IX-3 技術横断の研究開発の方向性

項目	研究開発の方向性
基盤技術の高度化と共有化	<ul style="list-style-type: none"> 未利用微生物・マイクロバイオームの探索・育種、ゲノム編集・合成生物学、マルチスケールシミュレーション等の基盤研究を長期視点で強化。 精密発酵・バイオマス発酵・SCP・微細藻類などを対象に、共用バイオファウンドリー/パイロット培養施設を整備し、株設計～培養～ダウンストリームまでをワンストップで支援。特許は各機関・企業に帰属させつつ、装置・データ・ノウハウを「場」として共有する仕組みを構築。 既存CDMOや民間プラントを、サプライチェーン上の重要プレイヤーとして位置付け、基盤設備・人材育成プログラムと連携させる。
デジタルツインとエビデンス基盤の整備	<ul style="list-style-type: none"> 肥料・飼料・食料・産業利用の各領域で蓄積される生産プロセス・環境影響・安全性・経済性データを統合管理する「微生物×農林水産・食料データ基盤」を構築。 培養プロセスや圃場・養殖システムのデジタルツインを構築し、AIによる条件最適化・スケールアップ設計・故障予知を実現（精密発酵、バイオマス発酵、SCP・微細藻類などを優先分野とする）。 BSM・SCP等については、LCA・TEAを組み合わせた経済性試算と費用対効果評価を行い、農家・企業・行政が導入判断しやすい指標づくりを進める。
社会受容・安全性・国際標準への貢献	<ul style="list-style-type: none"> 微生物肥料・BSM・発酵食品・精密発酵タンパク等について、作用機序・安全性・環境影響のエビデンスを体系的に取得し、わかりやすいリスクコミュニケーションに展開。また、農家・漁業者・食品企業・消費者と対話しながら、「どのようなメリット/リスクがあるのか」を共通言語で説明できるガイドラインや評価指標を整備。 GRAS/Novel Foodをはじめとする国際的な制度・基準制定に資するデータ提供を行い、日本発の知見を国際ルール形成につなげる。 安全性情報の蓄積を前提に、合成生物学・ゲノム編集など高度な微生物改変技術の社会実装を段階的に進める。
食料安全保障・レジリエンス・バイオセキュリティ	<ul style="list-style-type: none"> 細胞培養肉のみならず、SCP・精密発酵乳製品・微細藻類など微生物利用型タンパク質生産を組み合わせ、穀物輸入依存を補完する「第2のタンパク源」としての役割を明確化。 バイオテロ・パンデミック等を想定し、病原性微生物の検知・同定・拡散予測・封じ込め技術と、危機時にも稼働可能な発酵・培養設備ネットワーク（緊急食料・飼料・ワクチン候補の生産を想定）を整備し、食料供給のレジリエンスを高める研究開発を推進。

これまでの基盤研究成果、オミクス解析による知見やデータの蓄積をビッグデータとして活用し、デジタルツイン技術等によるシミュレーションにより、高性能な微生物の効率的な創成を、我が国やアジア地域の風土の下で展開し、一方では、ビッグデータを品質・安全性データとして国際展開や社会受容性の推進に活用するなど、地域独自の先端技術として定着させることで、国際競争力のある産業として確立できるものとする。

最後に、今回の研究開発構想で採り上げた微生物の利用については、農林水産・食品分野において様々な研究開発が進められているが、生産技術も含めれば、事業化に向けた課題も多い。一方で、国内外の研究動向等についてはさらに深堀も必要であろうとも考えられる。これらの点について、さらなる調査・分析や検討が行われることを期待する。本報告書が、農林水産・食品分野における食料供給研究開発の進展、現場への社会実装・普及の実現の一助となることを祈念するものである。

参考文献

1. Precision fermentation With a focus on food safety 2025 Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) March 2025 Precision fermentation - Beyond the buzzword Food safety Q&A FAO
<https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/dc0652b7-8ca5-4587-a259-a28198f59e0c/content>
<https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/5c70c2f6-10c6-40ad-a4e5-f2e53eb8a5e9/content>
2. Generally Recognized as Safe (GRAS) U.S. Food and Drug Administration
<https://www.fda.gov/food/food-ingredients-packaging/generally-recognized-safe-gras>
3. New Foods from Fermentation 16 May 2023 Singapore Food Agency (SFA)
<https://www.sfa.gov.sg/food-safety-tips/food-risk-concerns/risk-at-a-glance/new-foods-from-fermentation>
4. Requirements for the Safety Assessment of Novel Foods and Novel Food Ingredients Updated 17 Mar 2025 Singapore Food Agency (SFA)
https://www.sfa.gov.sg/docs/default-source/regulatory-standards-frameworks-and-guidelines/requirements-for-the-safety-assessment-of-novel-foods-and-novel-food-ingredients_17032025.pdf
5. Horizon scanning on microorganisms and their products obtained by new developments in biotechnology European Food Safety Authority (EFSA) 22 December 2023
<https://www.efsa.europa.eu/en/supporting/pub/en-8503#efsa-page-title>
6. 厚生労働省 「HACCP（ハサップ）に沿った衛生管理の制度化」
<https://www.mhlw.go.jp/content/11130500/000662484.pdf>
7. 消費者庁「適正製造規範（GMO）とは」
https://www.caa.go.jp/policies/policy/food_labeling/foods_with_health_claims/info_session/assets/food_labeling_cms206_241021_08.pdf
8. 厚生労働省 「食品製造における HACCP 入門のための手引書」
<https://www.mhlw.go.jp/file/06-Seisakujouhou-11130500-Shokuhinzenbu/0000098995.pdf>
9. 文化庁「日本食文化の無形文化遺産 記載提案書の概要」（2012年）
https://www.bunka.go.jp/seisaku/bunkazai/shokai/mukei_bunka_isan/pdf/shokubunka_120925.pdf
10. 農林水産省『「和食」がユネスコ無形文化遺産に登録されています。』
<https://www.maff.go.jp/j/keikaku/syokubunka/ich/>
11. 文化庁「「伝統的酒造り」のユネスコ無形文化遺産登録（代表一覧表記載）」（2024年）
https://www.bunka.go.jp/koho_hodo_oshirase/hodohappyo/pdf/94142301_01.pdf
12. In Silico Modeling of Metabolic Pathways in Probiotic Microorganisms for Functional Food Biotechnology Fermentation 2025, 11(8)
[In Silico Modeling of Metabolic Pathways in Probiotic Microorganisms for Functional Food Biotechnology | MDPI](https://www.mdpi.com/2304-8045/11/8)

参考 社会的懸念が高いと見込まれる技術の社会受容性

食品分野における社会受容性については、新しい技術を用いるものほど、社会的懸念が高くなる。精密発酵やSCP等の食料品生産においては、現状、およそ半数は試用を受け入れる傾向にあり、それは動物福祉（EU圏内）の点から、また、環境配慮、健康、好奇心の観点によって支えられている。近年、精密発酵やSCPに対する社会受容性の傾向に関する総説や論文も観られる。

① 英国食品基準庁（Food Standards Agency；FSA）の精密発酵に関する総説¹⁾

精密発酵に関する19件の論文をレビューし、英国人の半数以上（52～68%）は、精密発酵乳製品・卵を試してみたいと考えている。その他、英国で販売すべきか確信を持ってない（37%）、販売すべきでない（34%）という調査報告がなされている。購入動機は、味への好奇心、製品の安全性、従来食品と味/食感/香りの類似性、食料安全保障への有益性、動物福祉への有益性、健康性、環境配慮性が挙げられ、障壁は、安全性への懸念、不自然さ、価格としている。

「動物不使用」や「発酵製」という言葉が好意的に受け止められる傾向にあるようである。

② ドイツ、シンガポールの研究者による精密発酵の受容性に関する論文²⁾

精密発酵卵製品への消費者受容性に関して、ドイツ・米国それぞれ1,000名、シンガポール1,001名を対象にオンライン調査を実施したところ、試用にポジティブな回答が半数以上（ドイツ；61%，米国；51.3%，シンガポール；56.2%）であり、受容理由は、好奇心、健康・コレステロールゼロ、動物福祉、価格等とされている。とくにベジタリアンやビーガンが受容する傾向にあるとされていた。

③ 英国の研究者による菌類由来タンパク質に対する消費者の態度に影響を与える要因に関する研究論文³⁾

欧州を対象に真菌タンパク質に関するアンケート（N=102）、インタビュー（N=6）を実施し、ネオフォビアスコア（食物新奇性嫌悪スコア）においてはおよそ中立的で、肯定がわずかに上回り52.9%だったこと、肯定的評価のポイントは、持続可能性、環境配慮、倫理的配慮、衛生、清潔さ、面白さ、現代性、将来性であったことが示されている。

④ ドイツの研究者による水素酸化細菌を培養して得られる微生物タンパク質に関するアンケート結果のレポート⁴⁾

対象者 642 名において、ネオフォビアスコア（食物新寄性嫌悪スコア）においてはやや肯定的な傾向で、24.4%が肯定的、10.6%が否定的であったこと、微生物タンパク質を試用するうえでの障壁は、味（51.6%）、不自然さ（46.0%）、価格懸念（38.0%）である、という結果が示されていた。

いずれも、精密発酵やSCPに対しては受容する傾向が示されているが、健康への効果、機能性等に加え、安全性に対する懸念を払しょくする評価枠組みの構築や管理手法の確立が必要で、それらに資する分析、モニタリング手法等の研究開発が重要である。

参考文献

1. Food Standards Agency, 2025. A rapid evidence review on consumer responses to precision fermentation. FSA Research and Evidence, 1-55 <https://doi.org/10.46756/001c.136898>
2. Zollman, T.O. et al., 2023. Not getting laid: consumer acceptance of precision fermentation made egg. Frontiers in Sustainable Food Systems, 7 <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1209533>
3. Chezan, D., Flannery, O. and Patel, A., 2022. Factors affecting consumer attitudes to fungi-based protein: A pilot study. Appetite, 175, 106043 <https://doi.org/10.1016/j.appet.2022.106043>
4. Szczepanski, L. et al., 2024. Germans' attitudes toward the microbial protein Solein® and willingness to consume it - The effect of information-based framing. Food Quality and Preference, 117, 105132 <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2024.105132>

X 謝辞

本報告書の作成に当たり、貴重なご意見・ご助言をいただいた大西委員長をはじめとするアドバイザー委員の皆様、海外の研究開発等動向調査業務及びアドバイザー委員会運営支援業務を実施していただいた野村証券株式会社様ほか、本報告書作成にご協力をいただいたすべての皆様に、心より感謝を申し上げます。

用語解説

B E T O (米国 DOE : Bioenergy Technologies Office)	発酵・合成生物学・スケールアップ等を含むバイオ製造／カーボンリサイクル関連の研究開発を資金面から牽引する。
Agile BioFoundry (A B F : 米国)	微生物の設計・育種・プロセス開発を支援する共用基盤で、標準化とスケールアップを通じて商用化を後押しする。
B i o M A D E (米国 : Manufacturing USA 拠点)	バイオ産業製造の人材育成・標準化・設備整備・サプライチェーン構築を産官連携で支援する。
C B E - J U (EU : Circular Bio-based Europe Joint Undertaking)	発酵・微生物利用を含むバイオベース産業の研究～事業化を公的資金で後押しするEUの共同事業体。
K-Biofoundry (韓国 : K R I B B 等)	設計～試作～評価までの共用基盤を提供し、微生物・発酵製品の産業化を加速する国家バイオフィュードリ。
M A F F (日本 : 農林水産省)	日本の農林水産行政を担い、政策立案・研究支援・制度設計を行う。
N A R O (日本 : 農研機構)	農林水産・食品分野の基礎から実装までを担う日本の国立研究開発法人。
Novel Food (EU)	EUの新規食品の審査・承認制度。安全性データや製造管理を求め、精密発酵やSCP等の市場導入の前提となる。
G R A S (米国 : Generally Recognized As Safe)	食品成分等について「一般に安全と認められる」根拠に基づき市場投入を進める際の概念(規制ルート)。
微生物肥料	窒素固定・リン溶解等の機能で植物に栄養供給を補助する資材。定着性と土壌適合性の設計が重要。
窒素固定	微生物が大気中N ₂ をアンモニア等へ変換する作用で、化学肥料代替と環境負荷低減に資する。
種子処理 (Seed treatment / 種子コーティング)	播種前に種子へ資材(微生物・栄養成分等)を処理し、初期生育・定着性・ストレス耐性の向上を狙う。
微生物農薬	微生物や代謝産物で病害虫を防除する資材。化学農薬と併

	用した I P M や耐性対策に有効。
I P M (Integrated Pest Management : 総合的病害虫管理)	複数手段を組み合わせ、環境負荷と防除効果を両立させる考え方。
B T (<i>Bacillus thuringiensis</i>)	C r y / V i p 等の殺虫性タンパク質を産生する土壌細菌で、害虫防除用途に広く利用される。
C r y / V i p タンパク質	B T 由来の殺虫性タンパク質群で、標的害虫の消化管等に作用して防除効果を示す。
R N A i (RNA interference : R N A 干渉)	二本鎖 R N A 等で標的生物の遺伝子発現を抑制する技術で、選択性が高い次世代防除の選択肢となる。
バイオスティミュラント (B S)	栄養供給そのものではなく、栄養利用効率・非生物ストレス耐性等を高めて生育や収量安定化を支援する資材群。
人工土壌	土壌の物理性・化学性・微生物相等を設計した培地 / 基盤資材 (培土等)。作物生産の安定化・機能付与を狙う。
温室効果ガス (G H G)	C O ₂ ・C H ₄ ・N ₂ O 等の地球温暖化要因。農業では肥料起因排出や発酵由来排出の管理が重要。
F P R (Fertilising Products Regulation : EU 肥料製品規則)	肥料・改良資材の共通規格、表示、適合評価を定め、資材の市場流通と信頼性を支える制度。
メタゲノム解析	環境中微生物群集の総遺伝子を網羅解析する手法で、難培養微生物の機能探索やテロワール解析に有用。
合成生物学 (Synthetic biology)	生物機能を設計・再構成する学問・技術で、微生物の代謝改良や発酵高効率化に直結する。
ゲノム編集 (CRISPR-Cas 等)	狙った D N A 配列を改変する技術で、微生物育種や形質改良に用いられる。
精密発酵 (Precision fermentation)	設計した微生物で目的成分 (タンパク質等) を高効率生産する技術で、食品・飼料等へ展開される。
バイオマス発酵	糖質系等のバイオマス原料を微生物で発酵し、有用成分・素材を生産する技術。
単細胞タンパク質 (S C P)	微生物や藻類由来の高タンパク質原料。栄養・安全性・L C A が重視される。
代替タンパク質	畜産由来に代わる新規タンパク質源の総称で、S C P・微

	細藻類・精密発酵等が供給多様化に寄与する。
固形発酵	水分の少ない固形基質上で行う発酵（麹等）。伝統発酵から工業利用まで幅広く用いられる。
ガス発酵	CO/CO ₂ /H ₂ 等を基質に微生物で有用物質を生産する発酵で、カーボンリサイクルと資源循環に資する。
C1資源	メタン、CO、CO ₂ 、メタノール等の一炭素化合物で、ガス発酵やSCP生産の原料として資源循環・低炭素化に貢献する。
FCR (Feed Conversion Ratio: 飼料要求率)	増体・生産量に対する飼料投入量の指標で、低いほど飼料効率が高い。
MGBA (Microbiota-Gut-Brain Axis: 腸脳相関)	腸内細菌叢が神経系・行動・ストレス応答に影響する相互作用で、家畜福祉や健康設計の基盤。
AMR (Antimicrobial Resistance: 薬剤耐性)	抗菌薬等に対して微生物が耐性を獲得する現象で、畜産・養殖の衛生管理と国際的課題の一つ。
薬剤耐性菌	抗菌薬に耐性を獲得した微生物で、畜産・養殖におけるAMR対策と衛生管理の重要課題。
バイオティクス (プロ/プレ/ポスト)	腸内環境に作用し健康効果を狙う概念群。プロ=有益菌、プレ=有益菌の餌、ポスト=代謝産物等の機能性成分。
RAS (Recirculating Aquaculture System: 再循環式養殖)	水を浄化・再循環して高密度飼育を可能にする養殖設備で、水質制御・微生物管理・エネルギー効率が競争力を左右する。
BFT (Biofloc Technology: バイオフィロック技術)	水中微生物群のフロック化を活用して水質浄化と栄養循環を高め、高密度養殖の生産性・安定性を改善する。
硝化・脱窒	硝化=アンモニア態窒素を硝酸態へ酸化、脱窒=硝酸態を窒素ガスへ還元。水質改善やRASの窒素管理に不可欠。
微細藻類	高タンパク質・脂質・機能性成分を産生する藻で、餌料・健康素材・色素等として利用される。
アスタキサンチン	強い抗酸化作用を持つ赤色カロテノイドで、飼料添加や機能性素材として健康性・色調を改善する。

微生物テロワール	地域固有の微生物相が風味・品質へ与える影響を捉え、発酵食品のブランド化や再現性設計に活用する概念。
スターター（スターターカルチャー）	発酵を安定に立ち上げるための選抜微生物（単独または混合）で、風味再現性・安全性・工程適合性が重要。
多層オミクス（マルチオミクス）	ゲノム・転写・タンパク質・代謝等を統合解析し、作用機序の解明や工程最適化に役立てる。
微生物コンソーシアム（複合微生物群集）	2つ以上の異なる種が一緒に働き、単独で機能するよりも高いレベルで機能するグループのこと。
シャーシ（Chassis：細胞工場の基盤宿主）	目的生産に用いる標準化された宿主微生物（基盤株）で、精密発酵の再現性・生産性を左右する。
DBTLサイクル（Design-Build-Test-Learn）	設計・構築・試験・学習を反復する開発プロセスで、合成生物学や発酵最適化の速度と再現性を高める。
CDMO（受託開発・受託製造）	発酵・培養・下流工程（分離・精製等）の受託開発・受託製造を担い、設備・ノウハウで事業化を支援する。
スケールアップ	研究室レベルの培養・発酵を工業規模へ拡大する工程で、制御安定性・コスト・品質一貫性の確保が要点。
品質・安全管理（HACCP/GMP/SOP）	HACCP＝危害要因分析と重要管理点、GMP＝適正製造規範、SOP＝標準作業手順。製造の安全性・再現性を担保する枠組み。
MRV（Measurement, Reporting and Verification）	排出削減等の成果をクレジット化する際に必要な、測定・報告・第三者検証の枠組み。
CCS（Carbon Capture and Storage）	CO ₂ を回収して地中等に貯留する技術で、排出削減策の一つとして議論される。
Solar Foods（Solein®）	CO ₂ と電力等を起点に微生物タンパク質を生産するモデル（企業：Solar Foods／製品：Solein®）。土地・水資源依存の小さい供給を狙う。