

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（概要版）



令和8（2026）年4月 現在

農研機構 生物系特定産業技術研究支援センター



I	生研支援センター研究開発構想について	3
II	テーマの背景と目的	4
III	対象技術等	5
IV	調査方法	6
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. 論文等の動向	10
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) 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	18
	(2-1) 飼料・餌料等（添加物を含む）の生産技術開発【畜産】	32
	(2-2) 飼料・餌料等（添加物を含む）の生産技術開発【水産】	40
	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）	46
	(1) 伝統発酵による高付加価値食料生産技術開発	47
	(2) 微生物による食料生産技術開発（伝統発酵以外）	54
	3. 微生物を産業として活用することに資する研究開発	60
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	66
VIII	微生物に纏わる安全問題とリスクへの対策について	70
IX	まとめ	74
	用語解説	86

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：FA）であり、

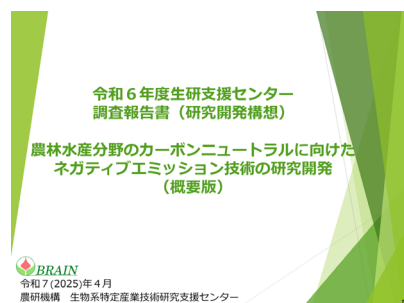
- ①民間企業、大学、国立研究開発法人などから、幅広く研究課題の提案を募集し、
- ②採択した課題に委託研究費を供給しつつ、社会実装を見据えて研究管理を行うとともに、
- ③その研究成果の情報発信や事業化支援などを通じて、社会実装を推進

している。

また、FAとしての機能強化のため、令和3年度から「研究開発構想」を策定。農林水産・食品分野の重要課題をテーマとして設定し、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。策定した構想は、関係機関・企業等に広く周知すべく、ホームページやシンポジウムなどで公表している。

これまで、

- ・令和3年度「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」
- ・令和4年度「我が国の水産業におけるリスク強靱性の強化」
- ・令和5年度「スマート農機の中山間地域への展開」
- ・令和6年度「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」に関する研究開発構想をとりまとめ。本報告書は5本目。



生研支援センターHP
「研究開発の提案（研究開発構想）」
https://www.naro.go.jp/laboratory/bbrain/contents/research_information/info_gathering_analysis/index.html



II テーマの背景と目的

テーマ：

農林水産・食料分野における微生物活用技術の研究開発

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。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**を追及していくことも求められ、その手法としては**微生物の活用が有用**である。

微生物は人類の長い歴史の中でも、いまだ僅かしか有効利用されていないため、**未開発の微生物機能を活用**することができれば、**食料生産・農林水産業においても大きなイノベーション**が見込まれる。

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。

我が国では、味噌、酒、醤油などの発酵食品を製造してきたため、**微生物の取扱いをはじめとした発酵による製造手法に関する技術の蓄積**がある。

微生物の活用については、近年、**政府（内閣府）も「バイオ戦略（2019年）」、「バイオエコノミー戦略（2024年）」**を策定し、微生物等によって物質を生産する**「バイオものづくり」**等を推進している。また、米国、中国、EU等海外においても、**バイオものづくり市場の拡大を見据えた投資誘導など産業政策の競争が活発化**している。

このため、**農林水産・食料分野における微生物活用技術の研究開発**について、日本及び海外の研究開発動向について調査・分析を行い、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。

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。

以上を踏まえた、本報告書の対象技術の具体的な分類は次のとおり。

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、温室効果ガス資化等の新規微生物活用、未利用バイオマス活用、糞尿処理、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、原生動物や大型藻類、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、報告書の原案について、ご助言をいただいた。

<開催実績>

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）

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



- 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。

	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、微生物農薬等により、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、代替タンパク質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ぶならヨーロッパ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、代替タンパク質、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及びスタートアップ・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、代替タンパク質・精密発酵食品、食品安全を重点的に支援。 ・Novel Food制度による精密発酵由来成分を含む新規食品の安全性評価・承認プロセスの整備。
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。

1. 主要国の政策と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研究開発5領域（①肥料・農薬・バイオスティミュラント・人工土壌、②飼料・餌料（畜産・水産）、③発酵食品、④発酵食品以外の食料生産、⑤微生物を産業として活用する研究開発）が対象とされているかを整理した（下表）。
- 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。

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⁾				✓	✓
	・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⁾				✓	
	・GX先端技術開発プログラム(GteX)(JST) ¹⁹⁾				✓	✓
	・ムーンショット型農林水産研究開発事業 ²⁰⁾	✓				✓

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)}				✓	✓
	・BioMADEが提供する研究プログラム ^{23,24)}		✓		✓	✓
	・The Agriculture and Food Research Initiative（国立食糧農業研究所が提供） ²⁵⁾	✓				

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) 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。

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)}		✓		✓	✓
	・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⁾			✓	✓	✓
	・EUミッション「A Soil Deal for Europe（EUの土壤協定）」 ^{29,30)}	✓				✓

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⁾					✓

2. 論文等の動向 | 論文

(1) 調査のアプローチ

- 論文データベースはLens.orgを用い、対象期間は2015年1月～2025年9月とし、本調査が対象とする研究領域に該当する論文数を調査した。

【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。
5. 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、論文数を分析。

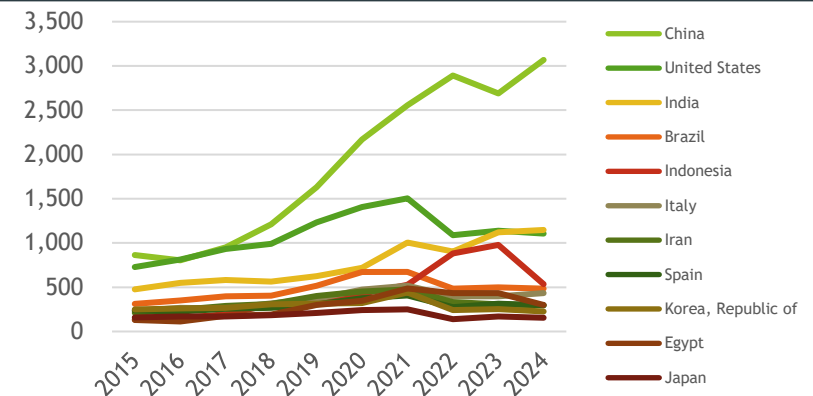
(2) 研究領域全体の国別論文数の動向

- 研究領域全体の論文数は1位が中国、2位が米国であった。なお、全ての研究領域（本調査が対象とする研究領域も含む）においては、1位が米国、2位が中国であった。（下表参照）
- 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が盛んな国が、5位以内に位置している。

対象期間内累計の論文数

本調査対象の研究領域	比較参照) 全ての研究領域
1.中国	1.米国
20,883	6,941,055
2.米国	2.中国
11,607	5,530,807
3.インド	3.英国
7,807	1,983,425
4.ブラジル	4.ドイツ
4,992	1,356,465
5.インドネシア	5.インド
4,511	1,245,645
6.イタリア	6.インドネシア
3,903	1,188,646
7.イラン	7.ブラジル
3,449	1,163,523
8.スペイン	8.日本
3,136	1,121,485
9.韓国	9.カナダ
2,982	1,115,715
10.エジプト	10.オーストラリア
2,971	1,079,966
16.日本	1,934

本調査対象の研究領域の論文数推移 (2015年~2024年)



(3) 研究領域ごとの論文数の傾向

微生物肥料、発酵食品以外の食料生産、微生物の産業活用の3領域は比較的論文数が多い。

(4) 各研究領域の国別論文数の傾向

- 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。
- その他の上位国における、領域毎の特徴は、以下の通り。
 1. インドはおよそ全分野に亘り、中位（4～7位）～上位に位置し、とくに肥料・農薬・バイオスティミュラントの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、畜産飼料等、水産飼料等において上位であり、特に後者では、中国に次ぎ、2位である。
 4. 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～上位である。
 5. 韓国は、発酵食品の論文数が多く、中国に次ぎ、2位である。
 6. 日本は、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位に位置している。

研究領域ごとの論文数とランキング（2015年～2025年累計） ※数字は論文数とカッコ内にそのランキング

<凡例> ■ 中国、米国を除き1位 ■ 中国、米国を除き2位 ■ 中国、米国を除き3位

	全項目合計	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		3. 微生物の産業活用	
		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	畜産飼料等	水産飼料等	発酵食品	発酵食品以外	
中国	20883 (1)	3167 (1)	2396 (1)	2406 (1)	54 (1)	3160 (1)	1725 (1)	2172 (1)	7712 (1)	5359 (1)
米国	11607 (2)	1593 (3)	1525 (2)	1191 (3)	47 (2)	2213 (2)	512 (3)	499 (3)	4847 (2)	2887 (2)
インド	7807 (3)	3083 (2)	1343 (3)	1871 (2)	5 (12)	471 (6)	488 (4)	311 (6)	1620 (5)	834 (5)
ブラジル	4992 (4)	1242 (5)	662 (4)	754 (4)	5 (12)	603 (4)	415 (5)	264 (8)	1618 (6)	834 (5)
インドネシア	4511 (5)	1278 (4)	561 (5)	431 (11)	3 (22)	1078 (3)	741 (2)	141 (14)	700 (14)	345 (18)
イタリア	3903 (6)	425 (12)	416 (7)	752 (5)	19 (6)	328 (12)	98 (19)	471 (4)	1779 (3)	1174 (3)
イラン	3449 (7)	607 (7)	189 (18)	448 (10)	8 (8)	335 (11)	330 (7)	110 (20)	1693 (4)	316 (20)
スペイン	3136 (8)	515 (8)	364 (8)	569 (8)	29 (3)	285 (15)	251 (8)	408 (5)	1078 (10)	866 (4)
韓国	2982 (9)	204 (22)	249 (15)	319 (14)	2 (28)	439 (8)	161 (13)	697 (2)	1242 (8)	598 (12)
エジプト	2971 (10)	776 (6)	537 (6)	528 (9)	1 (33)	462 (7)	342 (6)	61 (35)	527 (18)	372 (15)
日本	1934 (16)	293 (18)	139 (22)	178 (21)	2 (28)	304 (14)	135 (14)	251 (9)	779 (13)	462 (13)

※（注意）項目間で論文に重複があるため（例：1と3）、全項目の数字を足しても、全項目合計の列の数値が算出されるわけではない。

(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）。

【調査の対象】

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。

- (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

(注意) SCP : Single Cell Protein

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」については、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。

【プロセス概要】

1. 検索式の設計	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. 論文等の動向 | 特許 上位出願国 (2015年1月～2025年8月)



(2) 研究領域ごとの特許数の傾向

「肥料～人工土壌」「発酵食品」の2領域は比較的特許数が多い。

(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。伝統食文化が反映されている。
- ◇日本は、肥料～人工土壌5位、飼料・餌料4位、発酵食品3位、精密発酵～微細藻類3位。なお、出願者の大半は企業である。

	(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・バイオ マス発酵・SCP・ 微細藻類	合計
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)	3,048
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。

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 Biomanufacturing 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) 肥料・農薬・バイオスティミュラント・人工土壌—概要①

■ 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微生物肥料、②微生物農薬、③バイオスティミュラント（BS）、④人工土壌の四分野は、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1,500億ドル、化学農薬市場：約800億ドル）と密接に関係している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²⁾
 - 肥料の環境負荷：窒素肥料は強力な温室効果ガスN₂O発生源。地下水や湖沼の水質汚染要因にもなる
 - 生産地の偏り：窒素肥料はエネルギー価格が低い地域、鉍石由来のリンやカリウムは産出地に依存
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
 - 開発費の高騰：2012-2014年の対象期間で平均開発コスト2.86億ドル、開発期間11.3年³⁾
 - 耐性菌株・耐性害虫の出現：開発の“いたちごっこ”状態であり、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
 - 肥料の有効利用：環境負荷が高く、高騰する化学肥料使用量の効率化
 - 干ばつ・高温耐性：気候変動による収量減の回避
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
 - 劣化土壌の再生：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

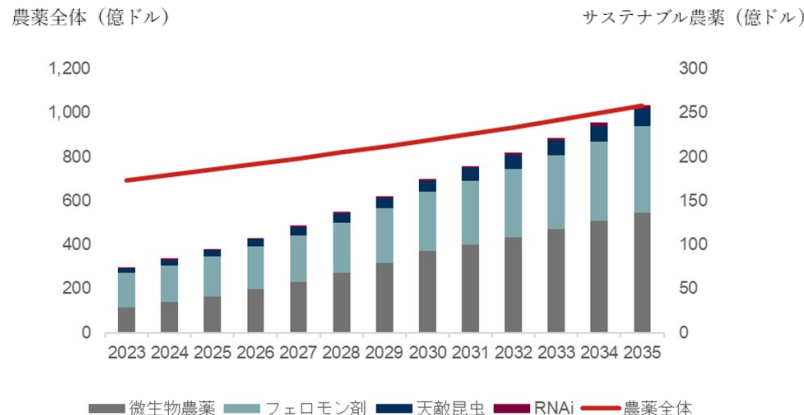


図1. 化学農薬と微生物農薬の市場規模予測¹⁾

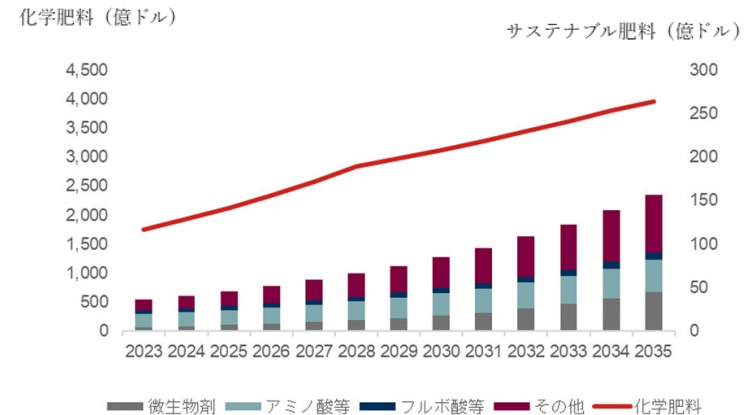


図2. 化学肥料と微生物肥料の市場規模予測¹⁾

(1) 肥料・農薬・バイオスティミュラント・人工土壌—概要②

■ BSについての各国の認識・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。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⁾。EUでは、BSはEU肥料製品の製品機能カテゴリー6（PFC 6）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BS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。

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」を策定⁷⁾。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、BSであってもこれらの法律に則る必要がある。現在、我が国で流通しているBSには、栄養吸収効率の改善、環境ストレス耐性の向上等の効果が期待されるものがある。

EU	米国	日本
<ul style="list-style-type: none"> ● 農薬に係る規則（Regulation (EC) No 1107/2009）において、BSは農薬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。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 2022年に農薬の定義から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。 	<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>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 非生物的ストレスへの耐性 ③ 品質形態 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><small>*1 Regulation (EC)1107/2009のCHAPTER I Article3の「Definition」を仮訳</small></p>	<p>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><small>*2 「S.802-Plant Biostimulant Act of 2023」/「H.R.1472-Plant Biostimulant Act」の「Definition」を仮訳</small></p>	<p>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><small>*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</small></p>

<図3. BSに係るEU・米国・日本の動き> ⁸⁾

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—研究動向

- 重点4分野で以下の研究開発動向が見られる。作用機序の解明、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）、合成生物学を利用した機能向上は全ての分野で共通して進展。

技術領域別の主な研究動向

技術領域	研究動向
微生物肥料	<ul style="list-style-type: none">● 菌株探索と機能性評価：根圏における窒素固定菌 (<i>Azospirillum</i>, <i>Rhizobium</i>)、リン溶解菌 (<i>Pseudomonas</i>, <i>Bacillus</i>) で進展^{9,10}。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が進展¹¹、微生物のカリウム蓄積に関する代謝経路の研究が進展¹²、カリウム溶解菌 (<i>Bacillus cereus</i>) の代謝系解明¹³、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の解明¹⁴。● 合成生物学：窒素固定微生物の窒素固定酵素ニトロゲナーゼの改良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¹⁶。
微生物農薬	<ul style="list-style-type: none">● スクリーニングの進展：特に放線菌群の発見が加速¹⁷。● 作用機構や物質生産機構の解明：能力向上に寄与。● 他技術との融合：昆虫病原性真菌 (<i>Metarhizium</i>, <i>Beauveria</i>) + RNAiによる「次世代微生物農薬」¹⁸。
BS	<ul style="list-style-type: none">● 定着性：コミュニティ形成特性、担体による機能安定化¹⁹。● 複合資材の開発：藻類抽出物などとの併用化²⁰。● 現場での機能検証：生産資材としての効果の検証²¹。● 非標的影響調査：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²²。
人工土壌	<ul style="list-style-type: none">● 微生物設計と担体開発：実用的な人工土壌の開発^{23,24}。● 機能性評価：資材としての評価と環境影響評価²⁵。

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—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。
- 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。

技術領域別の主な実装化動向

技術領域	実装化動向
微生物肥料	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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。中国でもBeijing Dabeinongがリン溶解菌資材を投入。 ・ 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といった分野が目立つ。
微生物農薬	<ul style="list-style-type: none"> ・ 以前よりBayer（独）の<i>Bacillus subtilis</i>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・BS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。 ・ 特許動向は微生物農薬と化学剤のハイブリッド化³¹、<i>Bacillus thuringiensis</i>（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。
BS	<ul style="list-style-type: none"> ・ 欧米企業ではSymborg（Corteva傘下）、Novonesisが先行（Ratchet®、Torque® IF等）。住友化学も大規模投資を発表。 ・ 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BS開発に成功。 ・ 中国では放線菌由来のグベルメクチンが、収量をもめる種子処理剤として利用されている³⁶。 ・ BS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。
人工土壌	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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CEA（Circular Economy Act）事業者により、バイオフィル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。 ・ 日本ではゼオライト系人工培地へ<i>Bacillus/Trichoderma</i>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。 ・ 特許分野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が目立つ。

	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	Syngentha	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>

図4. Novonesisグループの微生物農薬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) 肥料・農薬・バイオスティミュラント・人工土壌—研究・実装化課題

- (4分野に共通する研究課題) 実証データの蓄積、作用機序の解明が不可欠であり、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。
- (4分野に共通する実装化課題) 安定した効果と低コストでの生産体制の両立が実装化での課題である。製剤安定化や長期保存性向上を狙った製造プロセス・担体設計の特許は多いものの、常温輸送・長期貯蔵を前提とした低コスト生産は依然限定的で、装置投資や品質保証体制の構築など資本集約的要件がベンチャーのボトルネックとなっている。さらに、規制下の資材であるため開発から上市までの時間とコストがかさみ、微生物培養という装置産業の特性上、単独での生産設備投資も難しい。

技術領域別の主な研究課題

技術領域	研究課題	実装化課題
微生物肥料	<ul style="list-style-type: none"> ● 効果の安定性：土壌や気候条件による変動の解決。根圏での定着性・持続性。 ● 実証データ：長期的な実証データ及びモニタリング体制・データベースの確立。 ● 作用機序の解明：規制の観点からも重要。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 輸送安定性と生産コスト：低コストかつ常温での安定的な保管。難培養微生物の安定生産。 ● 法令等への対応：活用する遺伝子工学技術に応じた対応が必須。
微生物農薬	<ul style="list-style-type: none"> ● データサイエンスとAIの活用：スクリーニングと機能強化に必要。 ● 低コスト安定生産：既存農薬に劣るコスト競争力の解決。 ● ゲノム編集技術等、遺伝子工学技術の活用：米国ではゲノム編集微生物（微生物肥料のProven）活用例もあるが、EU・日本では規制等の枠組みが異なる点は注意が必要。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 農薬登録のコスト：ベンチャー企業にとって登録に必要なコストが高額で時間がかかる。 ● 防除効果の改善：化学農薬に比べて即効性や安定性に欠ける。 ● 法令等への対応：活用する遺伝子工学技術に応じた対応が必須。
BS	<ul style="list-style-type: none"> ● 作用機序の解明：法規制の観点から作用機序の解明は必須。 ● 定着性：定着性の改善が課題。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 法規制：世界的にまだ未整備な部分がある。 ● 表示義務：効果の表示に対するガイドライン。 ● 農薬・肥料との混用適合性：併用時の効果の最大化。
人工土壌	<ul style="list-style-type: none"> ● 統一モデルの整備：人工土壌担体、付加微生物、土着微生物、作物の根圏などの相互作用の解明と統一モデルが未整備。 ● 現場での利用方法の確立：施設園芸で一般的な土壌殺菌等との併用方法が未整備。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 効果の実証：新しい技術であり、安定的な効果の実証が不足。 ● 効果の持続性：効果を最大限発揮させ、長時間安定化させるにはビジネスモデルの確立も必要。

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—研究開発の方向性

- (4分野に共通する研究開発の方向性) 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。

技術領域別の主な研究開発の方向性

技術領域	研究開発の方向性
共通課題	<ul style="list-style-type: none">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。
微生物肥料	<ul style="list-style-type: none">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）。
微生物農薬	<ul style="list-style-type: none">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」。防除効果の改善手法：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手法開発。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。
BS	<ul style="list-style-type: none">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。
人工土壌	<ul style="list-style-type: none">作物の多様化：野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

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) 参考①：農薬登録コスト

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

- 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。
- 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4,200万ドルに、2010-14年のEUでは2000年の3倍の3,300万ユーロに増加している。

※ 左の図5は、AgribioInvestor「Time and Cost of New Agrochemical Product Discovery Development and Registration」⁴¹⁾中にある表を改変。

※ Registrationとは、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であり、手数料、社内作業費用、外部試験費用の合計。

図5. 米国・EUの農薬開発費の内訳推移⁴¹⁾

Cost (\$ million) は米国、Cost (€ million) はEU

(1) 参考①：農薬登録コスト

- 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220万ドルと低下傾向、米国でも210万ドルと低下傾向。（日本の農薬登録手数料719,300円） ※ Registration feesは、規制当局に支払う公式審査手数料
- 追加試験（Additional studies）費用は、2014-19年において、EUで1740万ドル、米国で1440万ドルとどちらも増加傾向。
- 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470万ドル、米国で100万ドルとどちらも低下傾向。

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6. 米国・EUの新農薬登録費の内訳推移⁴¹⁾

(1) 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あることも指摘されている。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①⁴²⁾ (総説)

- 作物収量及び養分利用効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 $+16.2 \pm 1.0\%$ 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(アーバスキュラー菌根菌)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($=90\text{kg/ha} \times 25\% \times 0.77\text{米ドル/kg} - 2\text{米ドル/ha}$)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 $+452\text{ kg/ha}$ 、I単独は $+447\text{ kg/ha}$ 、P+Iは $+777\text{ kg/ha}$ 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%であり、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。

(1) 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）はいずれの試験においても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、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、同じく微生物農薬の*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* ICPE20またはICPE69 《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 (ICPE20処理区 / ICPE69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* ICPE20が4.3・2.8、ICPE69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。

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) 参考④：バイオスティミュラントの費用対効果

- 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。

$$\text{BSによる収量増効果} + \text{BSによるコスト削減効果（肥料等）} - \text{BS施用コスト} > 0$$

- 過去の遺伝子組換え種子等の例⁴⁸⁾（1 USD/haの投資で5.22 USD/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150~400 kg/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⁾

- 右表は、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150 kg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1 haあたり200 ml（=25 kgの種子に対し）処理

注2：NBPT尿素とは土壤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。

N Doses (kg ha ⁻¹)	Without <i>Azospirillum brasilense</i>								
	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
N Doses (kg ha ⁻¹)	With <i>Azospirillum brasilense</i>								
	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

※総施業費用（TOC）、収量（YIELD）、売上（GR）

図9. ブラジルにおけるトウモロコシでのBS費用対効果⁴⁹⁾（下段がBS処理区）

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—参考文献①

1. 公開情報をもとにした野村證券フード&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>

(1) 肥料・農薬・バイオスティミュラント・人工土壌—参考文献②

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*. WO2018/183381 A1.
27. Syngenta Crop Protection AG, 2020. Pesticidal composition with 8-fluoroquinoline-3-carboxamide and *Bacillus subtilis*. WO2020/064696 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*. WO2024/075782 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>

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—参考文献③

37. Sanskrit Seedlings Co., Ltd., 2023. Use of functional filamentous fungi as biostimulants. WO2023/167135 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>

(2-1) 飼料・餌料等（添加物含む）【畜産】一概要

- 日本の畜産業は飼料原料の大部分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。更に昨今の飼料コストの高騰により、**生産性の向上**、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、微生物活用技術の主要技術領域を「①飼料原料確保・多様化」「②生産性向上」「③環境対策」の3領域とし、それぞれを2つのサブ領域に分けて整理する。

主要技術領域

技術領域	サブ領域	技術概要
飼料原料の確保・多様化	未利用資源のアップサイクル	<ul style="list-style-type: none"> 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。
	SCPの利用	<ul style="list-style-type: none"> バイオガス由来メタン/CO₂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。
生産性向上	微生物産生機能物質 (酵素・有機酸など)	<ul style="list-style-type: none"> 微生物発酵によりフィターゼ・キシラナーゼ・ムラミダーゼ等を製造・利用し、栄養利用性向上や病原菌制御を通じてFCR改善・環境負荷低減を図るもの。
	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)	<ul style="list-style-type: none"> 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（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。
環境対策	反芻動物のGHG排出削減	<ul style="list-style-type: none"> 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。
	単胃動物（豚・鶏等）のGHG・窒素排出削減	<ul style="list-style-type: none"> 単胃動物では腸内メタンよりも、後腸発酵と糞尿由来CH₄・N₂O・NH₃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。

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



(2-1) 飼料・餌料等（添加物含む）【畜産】一研究動向

- 近年、①未利用資源・C1資源を活用した飼料タンパク質生産、②酵素・抗菌酵素・有機酸等の機能性添加物と腸脳相関（MGBA）研究、③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。

技術領域別の主な研究動向

技術領域	サブ領域	研究動向
飼料原料の確保・多様化	未利用資源のアップサイクル	<ul style="list-style-type: none"> 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)}。
	SCPの利用	<ul style="list-style-type: none"> 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た。 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LCA及び経済性評価の知見が蓄積されてきている⁷⁻⁹⁾。
生産性向上	微生物産生機能物質（酵素・有機酸など）	<ul style="list-style-type: none"> 飼料用酵素の腸内環境・栄養利用・リン排泄への影響、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、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)}。
	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）	<ul style="list-style-type: none"> 家禽・豚のプロ/プレ/ポストバイオティクスが成長・FCR・抗病性・腸内多様性・排泄窒素・臭気に与える影響、及びマウス等でのMGBAを介した行動・ストレス応答改善が、家畜応用につながりつつある^{10, 12-17)}。
環境対策	反芻動物のGHG排出削減	<ul style="list-style-type: none"> ルーメン微生物叢のH₂フロー動態とメタン生成古細菌の機能解析に関する知見が進展¹⁸⁾。メタン削減のカギとなるプロピオン酸生産増強菌 <i>Prevotella lacticifex</i> 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、削減効果だけでなく、発酵プロファイルの変化や副作用、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が蓄積している²⁰⁻²²⁾。
	単胃動物（豚・鶏等）のGHG・窒素排出削減	<ul style="list-style-type: none"> 豚後腸での腸内細菌叢とメタン排出の関係²³⁾、栄養設計により糞便メタンポテンシャルを制御する試験²⁴⁾、糞尿処理でのGHG・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)}。

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



(2-1) 飼料・餌料等（添加物含む）【畜産】一実装化動向

- 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。

技術領域別の主な実装化動向

技術領域	サブ領域	実装化動向
飼料原料の確保・多様化	未利用資源のアップサイクル	<ul style="list-style-type: none"> 酒粕・食品残さ・稲わら等を乳酸発酵等で飼料化する取組みは古くから存在。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の利用	<ul style="list-style-type: none"> CALYSTA社のFeedKind®（メタン酸化細菌由来SCP）は水産・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を生産する技術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の特許が出願されている。
生産性向上	微生物産生機能物質（酵素・有機酸など）	<ul style="list-style-type: none"> 安定性・活性を高めたフィターゼ等の飼料用酵素は配合飼料メーカーの標準ツールとして広く普及し^{10,28}、家禽向けの消化率向上を狙ったムラミダーゼ製剤等は、消化性改善機能に加え、抗菌薬代替資材としても注目され、製品導入等が進んでいる^{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）	<ul style="list-style-type: none"> 乳酸菌・酵母等のプロバイオティクス製品は家禽・豚向けに多数上市。抗菌性飼料添加物の代替として成長・FCR・腸内環境改善を目的に利用されている^{2,3,16,17}。
環境対策	反芻動物のGHG排出削減	<ul style="list-style-type: none"> 3-NOP（Bovaer®）などメタン生成抑制剤は北米、EU等に加え、日本でも承認され、海外を中心に、乳牛・肉牛のメタン排出削減の商用事例も報告されている²⁰⁻²²。また、<i>Bacillus/Lactobacillus</i> 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	<ul style="list-style-type: none"> 単胃動物向けの専用メタン抑制添加物は限られるものの、栄養設計・飼料酵素・発酵飼料等により後腸発酵と糞便メタンポテンシャルを調整し得ることが示されており²³⁻²⁵、糞尿処理では嫌気消化・堆肥化・コンポスト化等の技術が普及しつつある^{4,24}。

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



(2-1) 飼料・餌料等（添加物含む）【畜産】一研究・実装化課題

- 未利用資源アップサイクルや C1 資源由来SCP は、原料ばらつきや発酵・乾燥・濃縮工程の最適化を要する一方で既存飼料よりコスト高になりやすい。国内で持続的に実装するには、国産株・国産プロセスの確立と原料・製品の品質管理技術の確立が必要。更に粗飼料・濃厚飼料・配合飼料にわたる適用条件の標準化と家畜種・成長段階別の栄養・機能設計、飼養試験による性能データの蓄積が不可欠である。

技術領域別・研究と実装の課題

技術領域	サブ領域	研究課題	実装化課題
飼料原料の確保・多様化	未利用資源のアップサイクル	<ul style="list-style-type: none"> 原料組成の季節・地域変動を踏まえた発酵挙動・栄養価のモデル化と、安全性の評価が十分でない^{5,6,24}。 	<ul style="list-style-type: none"> 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^{1,5}。
	SCPの利用	<ul style="list-style-type: none"> C1資源由来のSCPの培養挙動・栄養価・嗜好性・長期給与影響の家畜種・ライフステージ別の比較データが不足している⁷⁻⁹。 	<ul style="list-style-type: none"> 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^{2,3,7,8}。 SCPの製造コストが既存飼料（魚粉・大豆粕等）より高く、普及の大きな制約。
生産性向上	微生物産生機能物質（酵素・有機酸など）	<ul style="list-style-type: none"> 新規酵素・抗菌酵素や有機酸について、作用機構・ターゲット菌・腸内細菌叢・AMRへの影響を包括的に評価する試験体系が整備途上である^{3,10-12}。 	<ul style="list-style-type: none"> 高生産株育種・培養条件最適化・下流工程簡素化を通じたコスト低減が不十分。 ペレット化等の加工条件下での安定性を確保しつつ、法規制・安全性評価に対応する負担が大きい。
	腸内環境・生体機能制御（プロ/ブレ/ポストバイオティクス等）	<ul style="list-style-type: none"> 畜種・系統・飼料・飼養環境が腸内細菌叢と応答に与える影響を整理し、望ましい腸内機能プロファイルやMGBA指標を定義する研究が進行中である^{2,3,12,14,15}。 	<ul style="list-style-type: none"> 効果が出やすい条件の標準化、胃酸・胆汁に耐える製剤化や用量最適化、また農場レベルでの長期的なエビデンスの取得が十分ではない^{2,3,16,17}。
環境対策	反芻動物のGHG排出削減	<ul style="list-style-type: none"> メタン抑制剤や飼料戦略がルーメン機能・健康・生産性に与える長期影響を評価する試験が限られており、メタン削減と生産性・福祉のトレードオフの把握が課題²⁰⁻²²。 	<ul style="list-style-type: none"> 農場～地域レベルでのメタン削減量を測定・報告・検証するMRV手法の整備と、クレジット等の経済インセンティブとの接続が不十分であり²⁰⁻²²、現場導入の動機づけが弱い。
	単胃動物（豚・鶏等）のGHG・窒素排出削減	<ul style="list-style-type: none"> 腸内細菌叢・後腸発酵・糞尿由来GHG（CH₄・N₂O）との関係を統合的に評価するモデルが発展途上であり、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^{23,25}。 	<ul style="list-style-type: none"> 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の設計と、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}。

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



(2-1) 飼料・餌料等（添加物含む）【畜産】一研究開発の方向性

- 未利用資源の発酵飼料化は標準化を進め、C1活用SCPはスケール化とコストの見える化を図る。
- 生産性向上は、微生物関連素材の効果の再現性と製剤安定性の評価を標準化する。
- 環境対策はルーメンGHG削減と糞尿資源化の長期実証と測定法の統一を進める。
- また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・実証することが重要である。

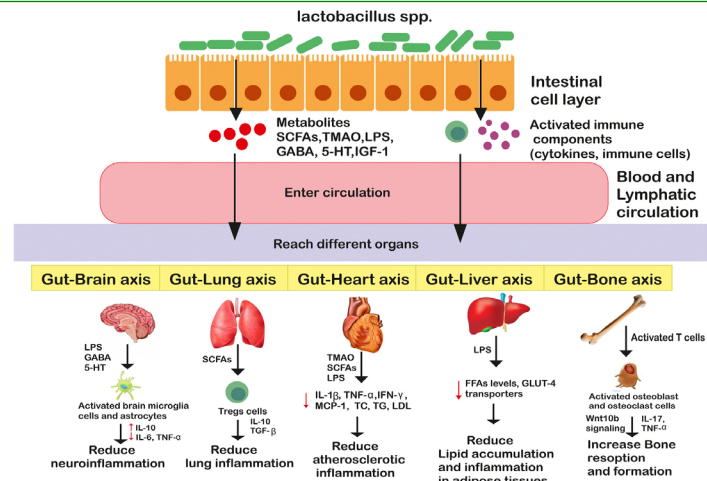


図1. プロバイオティクス (*Lactobacillus*属) の全身臓器への波及効果¹³⁾

技術領域別・研究開発の方向性

技術領域	サブ領域	研究開発の方向性
飼料原料の確保・多様化	未利用資源のアップサイクル	<ul style="list-style-type: none"> 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。
	SCPの利用	<ul style="list-style-type: none"> 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。
生産性向上	微生物産生機能物質 (酵素・有機酸など)	<ul style="list-style-type: none"> 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。
	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)	<ul style="list-style-type: none"> 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。
環境対策	反芻動物のGHG排出削減	<ul style="list-style-type: none"> 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。
	単胃動物 (豚・鶏等) の GHG・窒素排出削減	<ul style="list-style-type: none"> 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。

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

(2-1) 飼料・餌料等（添加物含む）【畜産】一参考文献①



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>

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

(2-1) 飼料・餌料等（添加物含む）【畜産】一参考文献②



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. WO2023/215488A1, PCT.

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



(2-1) 飼料・餌料等（添加物含む）【畜産】—参考文献③

27. DSM IP Assets B.V. 2025. Dried yeast single-cell-protein product using ethanol or molasses as feedstock.WO2025/036975A1, PCT.
28. Novozymes A/S. 2022. Modified phytase with improved stability, activity and performance in animal feed.WO2022/034211A1, 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. WO2023/110957A1, PCT
30. Biomedit, LLC. 2024. Compositions containing one or more Bacillus or Lactobacillus strains for reducing methane emissions from animals. WO2024/197162A1, 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.WO2023/119206A1, PCT.

- 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実要因であり、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。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¹⁾。
- 養殖拡大に伴い、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。
- 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。

主要技術領域

FIGURE 1 WORLD FISHERIES AND AQUACULTURE PRODUCTION OF AQUATIC ANIMALS

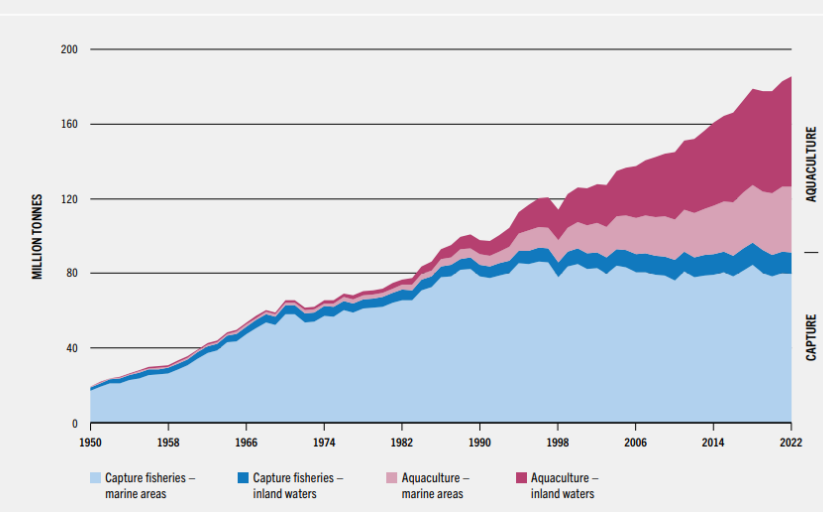


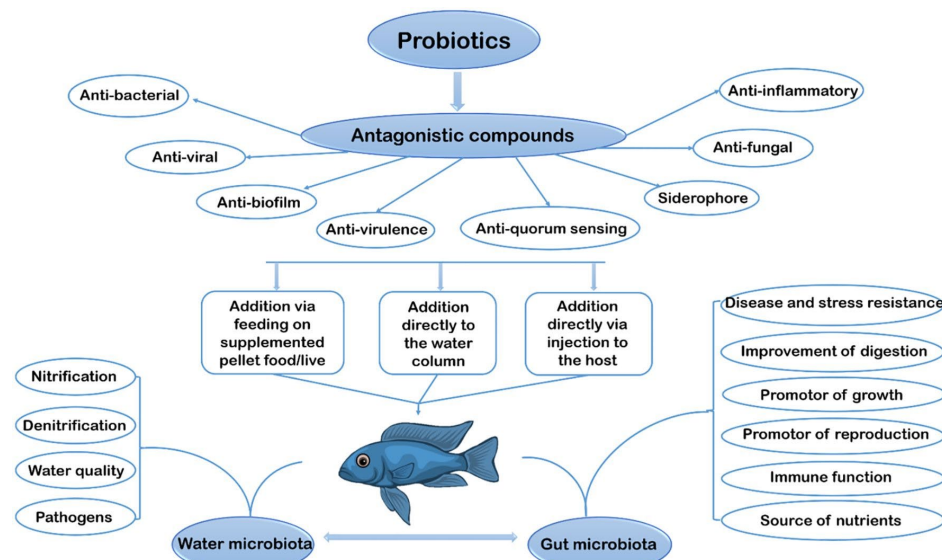
図1. 世界の漁獲漁業・養殖業の生産量の推移¹⁾

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。

技術領域	技術概要
魚粉/魚油代替飼料	<ul style="list-style-type: none"> 水産養殖用飼料の原材料は依然として魚粉・魚油への依存が高く、価格・供給量・環境負荷の観点から代替原料の開発が求められている。 微生物発酵や酵素分解を利用し、未利用副産物（食品・水産加工副産物等）の栄養価・消化性を高める研究が進展している²⁾。 微細藻類由来油脂（EPA/DHA）や、SCP等の微生物由来素材をタンパク質源・脂質源として用いることで、魚粉代替と同時に機能性（免疫・色揚げなど）も付与し得る^{5,7,9,13)}。
養殖の集約化・陸上化	<ul style="list-style-type: none"> 世界的に養殖比率が増加し、高密度・閉鎖循環型システム（バイオフィロック技術BFTや循環式陸上養殖RAS）が拡大する中で、水質維持・排水処理・疾病制御の重要性が高まっている⁶⁾。 BFTやRASでは、餌由来有機物・排泄物を微生物群集が分解・再同化することで水質浄化と栄養循環を実現し、好氣的脱窒菌などを活用した排水処理技術も開発されている^{6,8)}。

- 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んでいる。

図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。



技術領域別の主な研究動向

技術領域	研究動向
魚粉/魚油代替飼料	<ul style="list-style-type: none"> ● 未利用資源の酵素分解・発酵の利用：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行われている²⁾。 ● SCPの利用：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～全量代替の妥当性について成長・生存・官能面から検証されている⁷⁾。 ● 微細藻類の利用：微細藻類を餌原料・添加物として用いた場合の脂肪酸プロファイル、免疫賦活、色揚げ、水質への影響などを整理し、魚粉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⁾。
養殖の集約化・陸上化	<ul style="list-style-type: none"> ● プロバイオティクスの利用：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が得られる事例を整理し、菌株選抜・投与経路・複合利用の研究方向性が提示されている⁴⁾。 ● BFTの利用：炭素源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⁶⁾。 ● 好氣的脱窒菌による養殖排水処理：好氣的条件での<i>Pseudomonas hunanensis</i> の脱窒メカニズムを検討し、養殖排水の浄化能力を評価した⁸⁾。

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

(2-2) 飼料・餌料等（添加物含む）【水産】一実装化動向

- 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。

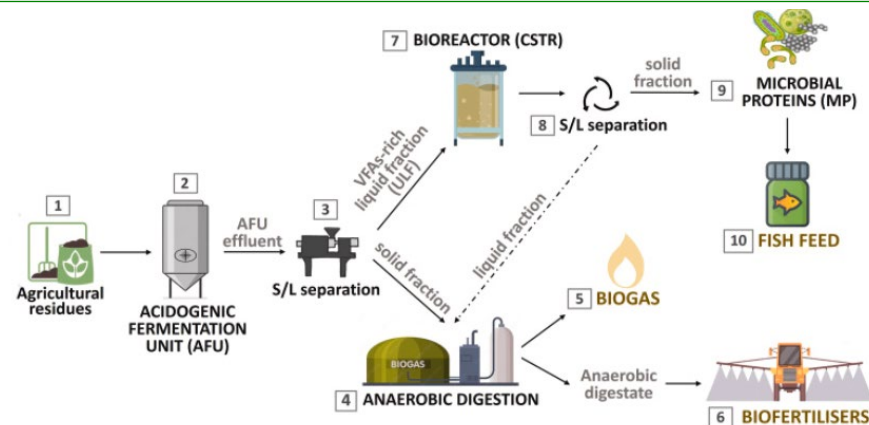


図3. 農業廃棄物からの循環型微生物タンパク質生産⁹⁾

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。

技術領域別の主な実装化動向

技術領域	実装化動向
魚粉/魚油代替飼料	<ul style="list-style-type: none"> ● バイオガス連携型微生物タンパク質生産：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SCPを生産して魚類用飼料原料として利用する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製品の商用化：メタノール資化細菌由来SCPは、サーモン・スズキ目等に対して魚粉の部分代替原料として商用利用が始まり、中国では水産飼料用途で当局承認を取得^{7,13)}。 ● 微細藻類・色素添加物：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。
養殖の集約化・陸上化	<ul style="list-style-type: none"> ● BFTの商業導入：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：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)}。 ● 脱窒バイオリクター：好氣的脱窒菌（<i>P. humanensis</i>）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⁾。

(2-2) 飼料・餌料等（添加物含む）【水産】一研究・実装化課題

- 魚粉／魚油代替飼料では、栄養バランス・消化性・長期給与時の健康影響やコスト・規制対応が課題であり、集約化・陸上化では、微生物群集を安定制御しつつ運転コスト・メンテナンス負荷を抑える技術・ビジネスモデルの確立が求められている。

技術領域別・研究と実装の課題

技術領域	研究課題	実装化課題
<p>魚粉／魚油代替飼料</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 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い^{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。 • 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^{4,5}。 • 水素細菌活用では、安全かつ効率的なガス基質の供給方法、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。 	<ul style="list-style-type: none"> • 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}。 • 養殖対象種の飼料への嗜好性も重要であり、SCP・微細藻類の配合設計や加工方法の開発が不可欠である。 • 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⁹⁻¹³。 • 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。
<p>養殖の集約化・陸上化</p>	<ul style="list-style-type: none"> • BFT／RAS内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、メタゲノム等を用いて定量的にモデル化する研究が途上^{4,6}。 • 好氣的脱窒菌やプロバイオティクスなどの追加投入と、もともとの微生物群集との相互作用・長期安定性の解明が必要^{4,6,8}。 	<ul style="list-style-type: none"> • 高密度養殖システムの初期投資・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い^{6,8}。 • 排水規制・臭気規制への適合や、環境価値（栄養塩回収・GHG削減）をビジネスとして評価・還元する枠組みが不十分。

(2-2) 飼料・餌料等（添加物含む）【水産】一研究開発の方向性

- 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・生産性・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。

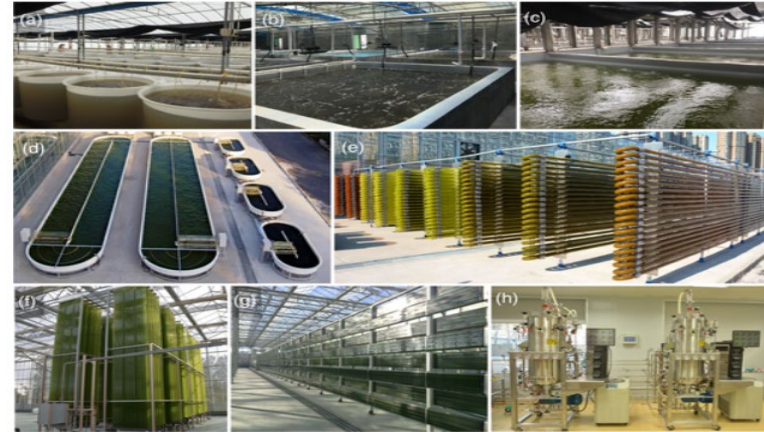


図4. 餌原料・飼料添加物として用いる微細藻類培養のための多様なバイオリアクター—5)

技術領域別・研究開発の方向性

技術領域	研究開発の方向性
魚粉/魚油代替飼料	<ul style="list-style-type: none"> ● 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。 ● 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。 ● 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。
養殖の集約化・陸上化	<ul style="list-style-type: none"> ● 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。 ● 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。 ● 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。

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

(2-2) 飼料・餌料等（添加物含む）【水産】一参考文献



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. WO2025/125658A1, 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. WO2021/216387A1, PCT.

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⁾。

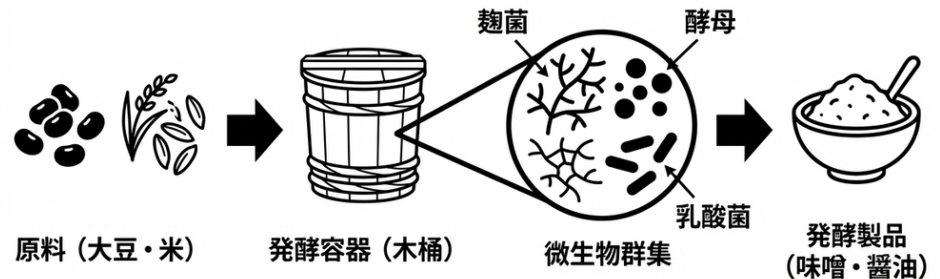


図1. 発酵食品における微生物群集の形成プロセス¹⁾を基に生研支援センター作成

伝統発酵と非伝統発酵の整理

区分	定義・対象技術	主な目的・利用分野
伝統発酵	<ul style="list-style-type: none"> 乳酸菌・酵母・麹菌など多菌叢による自然発酵（味噌・醤油・清酒・漬物など） 	<ul style="list-style-type: none"> 美味しさ・健康機能・保存性・地域ブランドの創出
非伝統発酵 （精密発酵・バイオマス発酵・SCP・微細藻類）	<ul style="list-style-type: none"> 精密発酵、バイオマス発酵、SCP生産、微細藻類利用など、工学的に設計・制御された微生物等の培養・発酵 	<ul style="list-style-type: none"> 代替タンパク質・機能性成分・食品素材・飼料・農業資材

(1) 伝統発酵による高付加価値食料生産技術開発一概要

- 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以下の4つの技術領域に整理する。

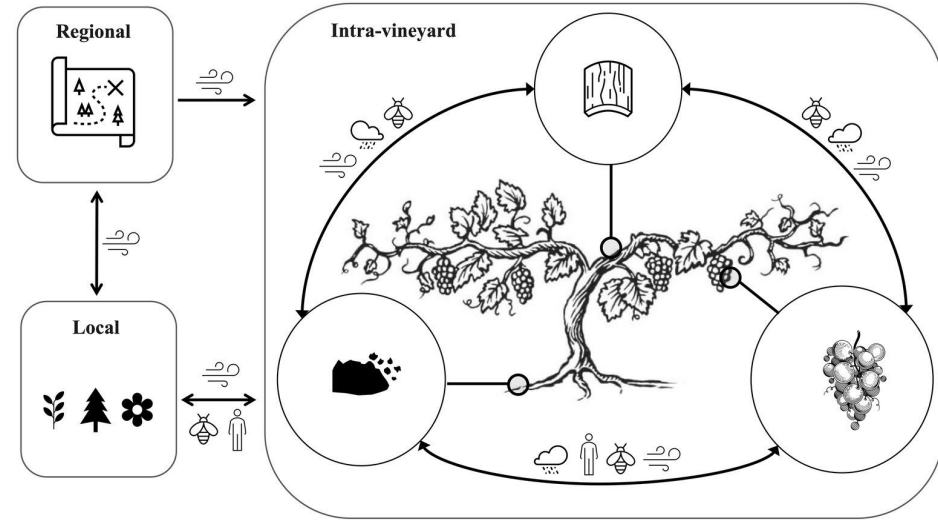


図2. ブドウ園における地域テロワール形成の概念図⁹⁾

主要技術領域

技術領域	技術概要・役割
菌叢生態・発酵メカニズムの可視化・モデル化	<ul style="list-style-type: none"> メタゲノム・メタトランスクリプトーム等により、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^{1,3-5)}。
スターター・複合微生物群集設計と工程安定化	<ul style="list-style-type: none"> 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し、安定生産を実現³⁻⁷⁾。
官能・機能の統合設計（美味しさ×健康）	<ul style="list-style-type: none"> 官能評価（味・香り・食感）と健康機能（腸内環境・免疫等）を統合的に設計し、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)}。
地域テロワール設計・ブランド化	<ul style="list-style-type: none"> 地域固有の原料・気候・微生物を生かし、国際的に通用するブランド価値を創出する^{1,9)}。

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—研究動向

- 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。

技術領域別の主な研究動向

技術領域	主な研究動向
菌叢生態・発酵メカニズムの可視化・モデル化	<ul style="list-style-type: none"> • 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}。
スターター・複合微生物群集設計と工程安定化	<ul style="list-style-type: none"> • 伝統食品由来の菌株バンク構築と価値（低塩性・フレーバー・安全性）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^{3,6,7,12,13}。
官能・機能の統合設計（美味しさ×健康）	<ul style="list-style-type: none"> • ヒト試験・疫学研究により、発酵食品摂取と腸内環境・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と化学成分分析の連結が進む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が進む^{14,15}。 • 乳酸菌などが分泌する細胞外小胞（EVs）を新たなポストバイオティクスとみなす研究が進展。<i>Lactobacillus</i>属由来EVs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ている¹⁶。
地域テロワール設計・ブランド化	<ul style="list-style-type: none"> • 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}。

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—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。

技術領域別の主な実装化動向

技術領域	実装化動向
菌叢生態・発酵メカニズムの可視化・モデル化	<ul style="list-style-type: none"> 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ある^{2,19)}。
スターター・複合微生物群集設計と工程安定化	<ul style="list-style-type: none"> 多くの発酵食品（パン、酒類・乳製品・漬物等）では、在来株由来の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⁾。 国内企業で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)}
官能・機能の統合設計（美味しさ×健康）	<ul style="list-style-type: none"> 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た「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^{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、プラスマ乳酸菌（免疫機能表示）のような大型製品も生まれつつある²⁵⁾。 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)}。 リコピン含有野菜と乳酸菌を組み合わせた高血圧対策食品や、ニコチンアミドモノヌクレオチド（NMN）含有ヨーグルトなど、伝統的な発酵プロセスに新たな機能性素材を組み合わせる特許が出願されている^{27,28)}。
地域テロワール設計・ブランド化	<ul style="list-style-type: none"> 発酵食品・調味料を地域の食文化や環境と結びつけ、地理的表示（GI）などの制度を活用して観光資源（フード/ガストロノミーツーリズム）化する可能性が注目されている。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・情報発信と統合することで、越後・秋田・越中味噌や、沖縄・鹿児島調味料や麴づくりを体験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⁾。

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—研究・実装化課題

- 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。
- 機能性発酵食品に関する特許は菌株・配合・製造条件を詳細に特定しているため、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。

技術領域別・研究と実装の課題

技術領域	研究課題	実装化課題
菌叢生態・発酵メカニズムの可視化・モデル化	<ul style="list-style-type: none"> 汎用的な解析プロトコル・指標が食品ごとにばらばらで、比較・統合が難しい^{2,19,20}。 多菌叢システムの長期安定性（変異・ウイルス・汚染など）の理解不足^{2,19,20}。 	<ul style="list-style-type: none"> 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^{19,20}。 解析コストが高く、中小企業が導入しにくい。
スターター・複合微生物群集設計と工程安定化	<ul style="list-style-type: none"> 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^{4,19}。 	<ul style="list-style-type: none"> 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。
官能・機能の統合設計（美味しさ×健康）	<ul style="list-style-type: none"> 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ない^{21,22}。 プロ・プレ・ポストバイオティクスとしての効果指標・用量設定が未整備^{21,22}。 	<ul style="list-style-type: none"> 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¹。 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・相互作用データが不足。
地域テロワール設計・ブランド化	<ul style="list-style-type: none"> 「テロワール」を定量化する指標（微生物×原料×環境）が確立していない¹⁷。 	<ul style="list-style-type: none"> 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ていない。

(1) 伝統発酵による高付加価値食料生産技術開発—研究開発の方向性

- 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・研究開発の方向性

技術領域	研究開発の方向性
菌叢生態・発酵メカニズムの可視化・モデル化	<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。
スターター・複合微生物群集設計と工程安定化	<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。
官能・機能の統合設計（美味しさ×健康）	<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、「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。
地域テロワール設計・ブランド化	<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・観光プログラムを構築する。



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—参考文献①

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>

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—参考文献②

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.WO2025/037618A1, 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. WO2019/093858A1, EP3682747B1, etc.).
28. Meiji Holdings Co., Ltd. 2024. Method for producing yogurt using NMN-producing lactic acid bacteria.WO2024/225438A1, 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「「伝統的醸造」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/ctrjrjrsupport/2024/ctrjrjrs2024-3.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) 微生物による食料生産技術開発（伝統発酵以外）一概要

- 伝統発酵以外の微生物による食料生産では、精密発酵・バイオマス発酵・SCP生産・微細藻類利用※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。

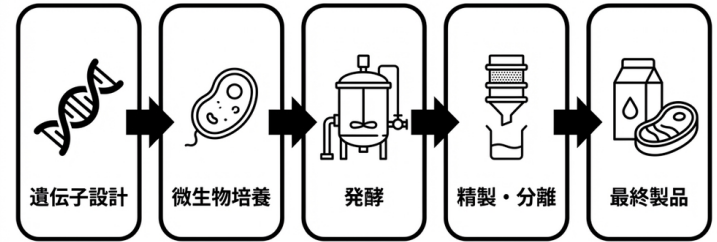


図1. 精密発酵食品の生産プロセス³⁾を基に生研支援センター作成

主要技術領域

技術領域	技術の概要	主な対象成分・用途例
精密発酵	<ul style="list-style-type: none"> 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¹⁻³⁾。 	<ul style="list-style-type: none"> 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¹⁻³⁾。
バイオマス発酵	<ul style="list-style-type: none"> 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・色素等の有用物質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資源として利用する発酵技術⁴⁻⁶⁾。 	<ul style="list-style-type: none"> 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⁴⁻⁶⁾。微生物菌体由来の飼料・食品原料。
SCP	<ul style="list-style-type: none"> 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質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。 	<ul style="list-style-type: none"> ガス発酵由来タンパク質（CO₂/H₂/CH₄）、メタノール・酢酸利用SCP、飼料・食品用高タンパク質粉末⁴⁻⁶⁾。
微細藻類	<ul style="list-style-type: none"> 微細藻類を光合成や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⁶⁻⁸⁾。SCP同様、菌体利用の側面を持つ。 	<ul style="list-style-type: none"> 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⁶⁻⁸⁾。

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）

(2) 微生物による食料生産技術開発（伝統発酵以外）－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。

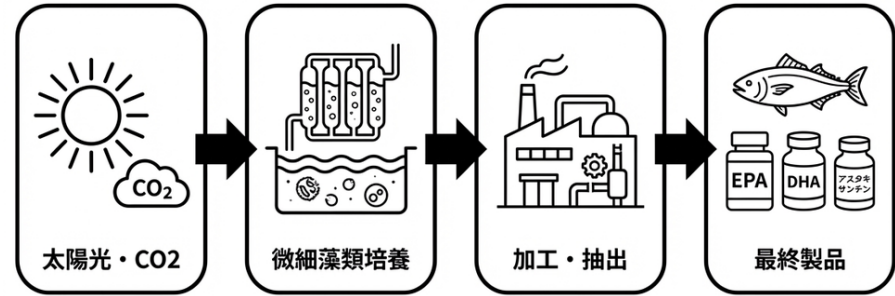


図2. 微細藻類による持続可能な食料・飼料供給⁷⁾を基に生研支援センター作成

技術領域別の主な研究トレンド

技術領域	主な研究動向
精密発酵	<ul style="list-style-type: none"> 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^{1,2)}。 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^{1,2,10)}。
バイオマス発酵	<ul style="list-style-type: none"> 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^{4-6,9)}。 固体発酵・混合培養による風味・機能性向上の検討も進む^{4-6,9)}。
SCP	<ul style="list-style-type: none"> 多様な基質（糖、グリセロール、メタノール、CO₂/H₂/CH₄ 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)}。
微細藻類	<ul style="list-style-type: none"> 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^{7,8,10,12)}。光利用効率・CO₂固定・水利用の観点からの培養プロセス最適化も進展^{7,8,10,12)}。

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）



(2) 微生物による食料生産技術開発（伝統発酵以外）—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。

技術領域別の主な実装化動向

技術領域	実装化動向
精密発酵	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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等で製品化され、乳製品・アイス・パン向け材料として利用¹⁻³⁾。 ・ 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。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。米国を起点に計6地域で製造拠点を展開。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¹⁵⁾。
バイオマス発酵	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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^{4-6,9)}。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)}。
SCP	<ul style="list-style-type: none"> ・ 天然ガスや工業由来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⁴⁻⁶⁾。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¹⁶⁾。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を取得、ADMと連携して商用化を推進中¹⁷⁾。 ・ 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)}。
微細藻類	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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)}。

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）



(2) 微生物による食料生産技術開発（伝統発酵以外）—研究・実装化課題

- 非伝統発酵の各技術では、研究面では「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。
- 実装面では「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おり、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。

技術領域別・研究と実装の課題

技術領域	研究課題	実装化課題
精密発酵	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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。 ・ 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}。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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。 ・ 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}。 ・ 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^{9,10,13,14}。
バイオマス発酵	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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}。 ・ 固体発酵・混合培養のメカニズム解明も限定的である^{4-6,9}。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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}。 ・ 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⁹。
SCP	<ul style="list-style-type: none"> ・ 多様な基質利用と代謝フローを統合したモデル化・安全性評価が十分ではない^{4-6,9,10}。 ・ 人の栄養・腸内環境への長期影響の知見も限定的である^{4-6,9,10}。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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^{4-6,9,10}。 ・ 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}。 ・ 麹菌由来SCPは麹特有の香味・色調が残るため、味・食感・色の設計が重要な課題である¹⁹。
微細藻類	<ul style="list-style-type: none"> ・ 種・株ごとの栄養・機能性・安全性データの体系化が不十分^{7,8,10,12}。 ・ 培養条件と成分プロファイルを結びつけるモデルも発展途上^{7,8,10,12}。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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}。 ・ 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^{7,8,10,12}。

(2) 微生物による食料生産技術開発（伝統発酵以外）—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、日本が得意とする微生物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、① 微生物・藻類株の高度設計、② 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、③ LCA・安全性・社会受容性を統合した評価基盤の整備が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は、以下の表に記載する。

技術領域別・研究開発の方向性

技術領域	研究開発の方向性
精密発酵	<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。
バイオマス発酵	<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。
SCP	<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。
微細藻類	<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。

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）



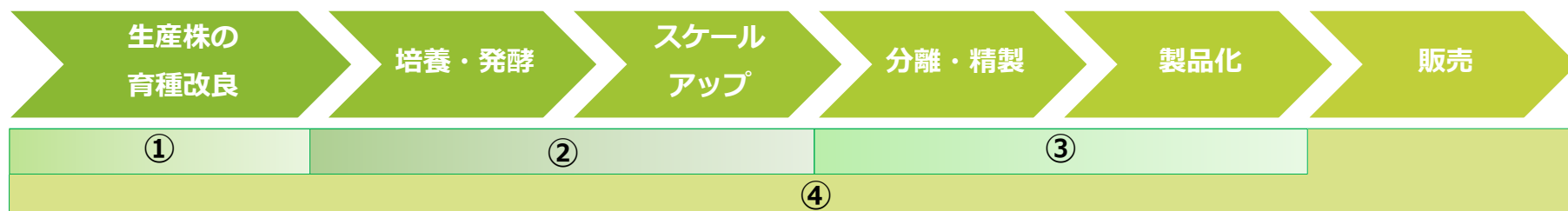
(2) 微生物による食料生産技術開発（伝統発酵以外）—参考文献

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.WO2023/073061A1, PCT.
19. National Agriculture and Food Research Organization (NARO). 2025. Production of high-protein single-cell protein (SCP) composition using koji mold.WO2025/173298A1, 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一概要



- 微生物がもつ代謝や酵素作用を活用して、農業資材・飼料用素材・食品成分及び食品としての規格化生産するためには、得られた研究開発成果を基に、さらに、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・社会受容というサプライチェーン全体を視野に入れた技術体系が必要である。とりわけ、国際的な品質管理・LCA及び安全性評価の枠組みに適合したプロセス設計が不可欠である。



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		技術概要	主な中核技術
①	育種改良	<ul style="list-style-type: none"> 目的物質をより高効率・高安定で産生できる微生物株にするための育種改良。 	<ul style="list-style-type: none"> CRISPR/Cas、CRISPRi/a、ベース/プライム編集などの遺伝子導入・ゲノム編集技術。微生物株の機能を体系的に理解するためのデータベース構築。
②	培養・発酵・スケールアップ	<ul style="list-style-type: none"> ラボ～パイロット～実機スケールでの培養・発酵条件設計、ガス発酵・固体発酵・藻類培養など多様なプロセスの確立。 	<ul style="list-style-type: none"> デジタルツイン・AI活用による培養プロセス最適化技術開発、AI制御によるスケールアップ生産検討。
③	分離・精製・製品化	<ul style="list-style-type: none"> 細胞回収、タンパク質・脂質・機能性成分の分離・精製、乾燥・粉末化・テクスチャ設計等による製品化。 	<ul style="list-style-type: none"> 省エネルギー型分離・精製プロセス、品質・安全性を担保するインライン計測・制御技術。
④	LCA・安全性・社会受容	<ul style="list-style-type: none"> 原料～製品までのLCA評価、栄養・毒性・アレルギー性評価、ラベリング・リスクコミュニケーション、各国規制への適合。 	<ul style="list-style-type: none"> LCA・安全性の統合基盤、評価指標の標準化、国際枠組みとの整合、科学的エビデンスに基づく情報発信。

3. 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・実装化動向

- 研究開発では、育種改良からスケールアップまでを一体で捉え、DBTLサイクル¹⁾やデジタル解析を活用して開発の高速化を図る取り組みが増えている。
- 実装化の段階では、スケールアップ設備やCDMO、LCA・安全性データの整備状況が技術ごと・国ごとに大きく異なり、産業化の速度に差が生じている。特にフードグレードの設備・品質管理体制の有無がボトルネックとなる。

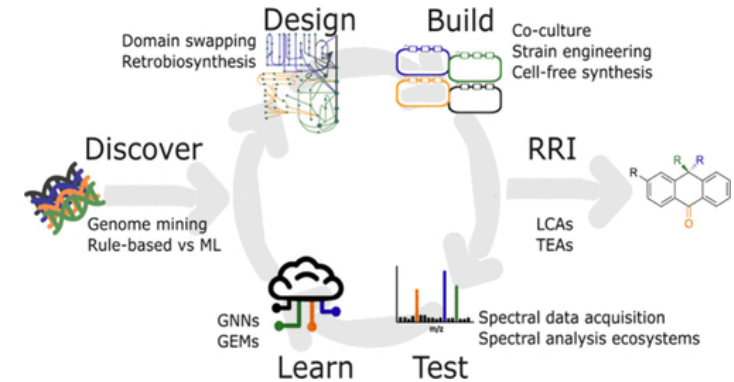


図1. DBTLサイクル¹⁾

サプライチェーン別 主な研究開発・実装化動向

サプライチェーン	研究動向	実装化動向
育種改良	<ul style="list-style-type: none"> DBTLサイクルに基づく菌株設計フローの高度化や、メタゲノム・メタオミクス解析、AIによる菌株候補スクリーニング、ゲノム編集等を組み合わせた高効率株への改良研究が進む¹⁻³⁾。 	<ul style="list-style-type: none"> 一般産業用・医薬用では遺伝資源のバンク化・データベース化が進む一方、農業・飼料・食品用途に特化した共有基盤は限定的であり、企業・国研が個別に菌株ライブラリを構築している段階^{2,15)}。
培養・発酵・スケールアップ	<ul style="list-style-type: none"> スケール依存性を考慮した流動・酸素移動・熱収支のハイブリッドモデルや、発酵データと制御条件を組み合わせたデジタルツイン・AIによる最適化研究が進展している⁴⁻⁶⁾。 	<ul style="list-style-type: none"> 海外を中心に、5～数万L規模のプラントやCDMO・共同プラントが立ち上がりつつある^{7,8,16)}。 MycoTechnologyは300～9万Lの設備でFaaS (Fermentation as a Service) を展開。発酵タンクと運転ノウハウ、品質管理をサービスとして提供¹⁷⁾。
分離・精製・製品化	<ul style="list-style-type: none"> 膜ろ過や遠心・乾燥の採用と環境評価が進み、クロマト非使用の低コスト精製も検討が進む⁷⁾。 得られたタンパク質・脂質・色素・機能性成分の物性・風味設計と結びつけた分離・加工設計も検討されている^{7,8)}。 	<ul style="list-style-type: none"> 乳タンパク質や機能性成分など高付加価値素材では商業化が進む一方、飼料用・バルク用途では分離・精製コストとエネルギー消費が課題^{7,8)}。
LCA・安全性・社会受容	<ul style="list-style-type: none"> SCPや精密発酵を対象としたLCAや環境影響評価の情報が蓄積^{2,7)}。 安全性の評価枠組みや社会的懸念が高いと見込まれる技術の社会受容性も調査・議論⁸⁻¹⁴⁾。 	<ul style="list-style-type: none"> 精密発酵タンパク質や一部SCPではLCA・安全性データが整備され、米国を中心に承認・上市が増加しつつある⁷⁻¹⁰⁾。 精密発酵に取り組む企業では、初期段階から食品の安全性に加えて、HACCPを組み込む事例が増加している^{18, 19)}。

3. 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・実装化課題



- 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。国際的な品質・安全管理・LCA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。

サプライチェーン別 研究と実装の課題

サプライチェーン	研究課題	実装化課題
育種改良	<ul style="list-style-type: none"> 農業・飼料・食品用途の微生物について、安全性・栄養・官能・環境影響などの機能情報が十分に紐づいておらず、DBTLサイクルを回すための表現型データが不足している¹⁻³⁾。 食品用途特有の評価指標（風味・テクスチャ・消化性など）も統一されていない^{2,8)}。 	<ul style="list-style-type: none"> 遺伝資源・菌株ライブラリの利用ルールや知財・アクセスと利益配分（ABS）の枠組みが複雑で、中小・スタートアップが活用しにくい。 国内外のジーンバンクや産業用ライブラリと、農業・食品分野のニーズをつなぐシステム構築が限定的。
培養・発酵・スケールアップ	<ul style="list-style-type: none"> ラボ～実機でのスケール依存性を定量化したモデル・設計指針が不足しており、スケールアップ時の挙動予測が難しく、実機導入時の条件設定に多大な試行錯誤を要している^{4,7)}。 オンライン計測データとモデルを統合した発酵プロセス制御の事例も限定的である⁷⁾。 	<ul style="list-style-type: none"> 大型発酵設備・バイオリクター等の初期投資負担が大きく、共用設備・CDMOの選択肢も限られる¹⁶⁾。 スケールアップのための検証設備整備や人材育成、稼働率・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⁾。
分離・精製・製品化	<ul style="list-style-type: none"> 成分ごとの分離精製コストや環境負荷を織り込んだプロセス設計指針が未整備であり、成分・物性情報と最終製品設計（農業・飼料・食品資材）との連携も限定的^{7,8)}。 食品加工・調理過程での機能性維持に関する知見も不足している^{2,8)}。 	<ul style="list-style-type: none"> 既存の食品／飼料加工ラインとの整合性、品質管理・規格設定の標準化が不十分で、新規成分の受入に時間を要する^{7,8)}。 価格・食味・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。
LCA・安全性・社会受容	<ul style="list-style-type: none"> LCA・毒性・栄養・マイクロバイーム等のデータを統合的に扱う基盤や、試験・評価法の標準化が不十分^{2,7,9,10)}。 社会受容性の定量評価手法も未成熟で、国・地域による差異の分析も限定的^{3,9,10)}。 	<ul style="list-style-type: none"> 国・地域による新規の承認プロセスが長期・高コストとなり、特に中小企業にはハードルが高い^{7-9,16)}。 消費者・一次産業とのサイエンスコミュニケーションツールも限られ、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⁹⁻¹⁵⁾。 培地や精製の溶媒、樹脂の使用量が多いと、高いGHG排出になり、環境負荷が高くなる懸念がある。

3. 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



- ①既存株の育種改良、②デジタルツイン・AIを活用した培養・スケールアップ制御、③省エネルギー分離・連続生産、④LCA・安全性・社会受容・規制の統合評価を「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。

サプライチェーン別 研究開発の方向性

サプライチェーン	研究開発の方向性
育種改良	<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。
培養・発酵・スケールアップ	<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（CDMO含む）を構築する。 ・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。
分離・精製・製品化	<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・食品資材への組み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。
LCA・安全性・社会受容	<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。

3. 微生物を産業として活用することに資する研究開発—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

(1) 日本の事例

	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⁾
本社所在地	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	Paracoccus 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 Paracoccus 菌からなる飼料原料。</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トン R4年度 13,146トン	—	売上高： 195億円（2024年9月期）	—

(注意) 伝統発酵の成功事例は、味噌、醤油、納豆、漬物、酒類等の分野で多数存在。

(2) 海外の事例

	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⁾	PDV (飼料協会) ⁶⁾	Domaine de la Romanée-Conti ⁷⁾	Solar Foods Ltd. ⁸⁾
本社所在地	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送される。農家は数種のリキッドフィード及び配合飼料を混合し、混合飼料として家畜に与える。</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、ビオディ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であるが、太陽エネルギーを利用している。</p>
備考	—	—	—	—

(注意) 伝統発酵の成功事例は、チーズ、ザワークラウト・キムチ等発酵食品、ラッシー等乳酸飲料、酒類等の分野で多数存在。

1. Toyo Yabu Bio Energy
[トヨー養父バイオエネルギー | トヨーホールディングス](#)
2. ENEOS Techno Materials Co., Ltd., 2025. Panaferd® (Naturally-Sourced Astaxanthin). ENEOS Techno Materials Co., Ltd.
<https://www.tmc.eneos.co.jp/english/products/astaxanthin/>
3. 獺祭 (日本酒) ウィキペディア
[獺祭 \(日本酒\) - Wikipedia](#)
4. Quantum Flowers & Foods Co., Ltd., 2025. Quantum Flowers & Foods – World’s First Neutron Breeding Service. Quantum Flowers & Foods Co., Ltd.
<https://qff.jp/en/>
5. Pivot Bio, Inc., 2025. Pivot Bio – Nitrogen for Corn, Wheat and Small Grains. Pivot Bio, Inc.
<https://www.pivotbio.com/>
6. 海外における堆肥・飼料利用について
[参考資料3 海外における堆肥・飼料利用について](#)
7. ドメーヌ・ド・ラ・ロマネコンティ ウィキペディア
[ドメーヌ・ド・ラ・ロマネコンティ - Wikipedia](#)
8. Solar Foods Oy, 2025. Solar Foods – Solein® – protein out of thin air. Solar Foods Oy.
<https://solarfoods.com/>

Ⅷ 微生物に纏わる安全問題とリスク への対策について

Ⅳ 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、WOAH(World Organization for Animal Health)、FAO(Food and Agriculture Organization)と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・寄生虫図鑑”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。原料から検出された青カビ由来の「プベルル酸」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プベルル酸が生成されたことがプ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⁾。

1. [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 WOA | 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. 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

	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：野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>

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

	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)：</p> <ul style="list-style-type: none"> 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>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、カーボンプ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>

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（つづき）

	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>

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）

	研究開発の方向性
<p>(1) 伝統発酵による高付加価値食料生産技術開発</p>	<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。 <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、「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。 <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。

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）

	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。

3. 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"> ・省エネルギー型分離・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・安全管理技術の開発を推進し制度設計への橋渡しを行う。

- 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、本章では、国際ガイドラインと各国の規制動向を概観する。
- 食品分野で既に確立されている管理手法（HACCP、GMP、SOP等）は、微生物活用製品（飼料・肥料・食品素材等）の品質・安全性確保にも応用可能な内容となっている。

国際機関・主要国の動向

FAO による精密発酵に関する報告書

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・アレルゲン性、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¹⁾。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。

FDA・SFA による安全性評価枠組みの運用

FDA の GRAS 認証制度や SFA の Novel Food 枠組みでは、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²⁻⁴⁾。

EFSA によるホライズンスキヤニング

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⁵⁾。

品質・安全管理の既存枠組み

HACCP（危害要因分析重要管理点）

原材料受入から製品出荷までの工程で、予測される危害（微生物汚染・異物混入等）を分析し、重要管理点（CCP）を常時監視・記録する衛生管理手法⁶⁾。

GMP（適正製造規範）

原料の受入から製造、出荷に至る全工程において、製品が「安全」に作られ、「一定の品質」が保たれるようにするための製造管理・品質管理基準⁷⁾。

SOP（標準作業手順書）

業務の品質を均一に保つために、作業の手順や方法を詳細に記述した文書。属人化を防ぎ、プロセスの再現性と安全性を確保する基礎となる⁸⁾。

IX まとめ 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「伝統的醸造」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等の強みを有するが、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、こうした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

微生物活用プロセスでは、省エネルギー化、廃棄物リサイクルなど 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生かし、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性管理手法と整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イノベーション・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・バイオファウンドリー・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に長期にわたり蓄積してき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。

社会的懸念が高いと見込まれる技術（精密発酵、SCP等の食料品生産）社会受容性

- およそ半数は、試用を受け入れる傾向にあり、おおよそ動物福祉（※EU圏内）、環境配慮、健康、好奇心の観点によって、その傾向は支えられている。

文献①¹²⁾（精密発酵）

- 精密発酵に関する19件の論文をレビュー。
- 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いない（37%）、販売すべきでない（34%）。
- 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。障壁は、安全性への懸念、不自然さ、価格。「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。

文献②¹³⁾（精密発酵）

- 精密発酵卵製品への消費者受容性に関して、オンライン調査を実施（独1,000名, 米1,000名, シンガポール1,001名）
- 試用にポジティブな回答が半数以上であり、独61%, 米51.3%, シンガポール56.2%
- 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。とくにベジタリアンやビーガンが受容する傾向にあった。

文献③¹⁴⁾（マイコプロテイン, 真菌タンパク質）

- ヨーロッパを対象に、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。
- 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。
- 肯定的な評価のポイントは、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。

文献④¹⁵⁾（水素酸化細菌培養された微生物タンパク質《Solein®》）

- ドイツを対象に、Solein®に関するアンケートを実施（N=642）
- ネオフォビアスコア（食物新奇性嫌悪スコア）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。
- Solein®を試用する障壁は、味（51.6%）、不自然さ（46.0%）、価格懸念（38.0%）

1. FAO, 2025. Precision fermentation – With a focus on food safety. Rome, FAO <https://doi.org/10.4060/cd4448en>
2. U.S. Food and Drug Administration (FDA), 2023. Generally Recognized as Safe (GRAS). FDA <https://www.fda.gov/food/food-ingredients-packaging/generally-recognized-safe-gras>
3. Singapore Food Agency (SFA), 2023. New foods from fermentation. Risk at a Glance. SFA <https://www.sfa.gov.sg/food-safety-tips/food-risk-concerns/risk-at-a-glance/new-foods-from-fermentation>
4. Singapore Food Agency (SFA), 2025. Requirements for the Safety Assessment of Novel Foods and Novel Food Ingredients. 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. Ballester, A.R. et al., 2023. Horizon scanning on microorganisms and their products obtained by new developments in biotechnology. EFSA Supporting Publications 2023:EN-8503 <https://doi.org/10.2903/sp.efsa.2023.EN-8503>
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-Shokuhinanzentu/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. 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>
13. 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>
14. Chezian, 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>
15. 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>

用語解説

用語	解説
BETO (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 (ABF : 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。
BioMADE (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。
CBE-JU (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 : KRIBB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ァウンドリ。
MAFF (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。
NARO (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。
GRAS (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IPMや耐性対策に有効。
IPM (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。
BT (<i>Bacillus thuringiensis</i>)	Cry/Vip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。
Cry/Vipタンパク質	BT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。
RNAi (RNA interference : RNA干渉)	二本鎖RNA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 (BS)	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。

用語	解説
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（GHG）	CO ₂ ・CH 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。
FPR（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DNA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（SCP）	微生物や藻類由来の高タンパク質原料。栄養・安全性・LCA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、SCP・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。

用語	解説
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・エネルギー効率や競争力を左右する。
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。