監修者紹介

石川　伸一

宮城大学　食産業学群　教授
新潟大学　フード＆ヘルスイノベーション共創センター　特任教授
京都芸術大学　通信教育部食文化デザインコース　客員教授を兼任
博士（農学）

【略　歴】

1996年　東北大学農学部卒業。1998年　同大学大学院農学研究科修士課程修了。2002年学位取得。博士（農学）。1998年　日本学術振興会特別研究員（DC1）、2000年　北里大学獣医畜産学部助手、2005年　カナダゲルフ大学食品科学部客員研究員、2007年　北里大学獣医学部講師、2010年　宮城大学食産業学部准教授等を経て、2017年より現職。

【専　門】

食品学、調理学、栄養学分野。料理・調理、食の進化、食の未来に関心を持っている。食を「アート×サイエンス×デザイン×エンジニアリング」とクロスさせて研究している。

【主な業績】

著書に『クック・トゥ・ザ・フューチャー』（グラフィック社、2024年）、『絵巻でひろがる食品学』（化学同人、2023年）、『分子調理の日本食』（オライリー・ジャパン、2021年）、『「食べること」の進化史』（光文社、2019年）、『料理と科学のおいしい出会い』（化学同人、2014年）等がある。
分子調理学研究会代表、一般財団法人バイオインダストリー協会（JBA）Food Bio Plus研究会副会長、Gastronomy Innovation Campus Tokyoサイエンスアドバイザー等を務める。

AndTech

執筆者紹介

石川　伸一　　宮城大学　食産業学群　教授
新潟大学　フード＆ヘルスイノベーション共創センター　特任教授
京都芸術大学　通信教育部食文化デザインコース　客員教授
博士（農学）・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・（序章）

渡邊　敏明　　大阪青山大学　評議員・教授・学長補佐
地域連携・SDGs推進センター　センター長
兵庫県立大学　環境人間学部　特任教授
マエカワテイスト（株）前川TSH研究所　所長
医学博士・博士（理学）・・・・・・・・・・（第1章　第1節）

酒井　杏匠　　天野エンザイム株式会社　イノベーション本部　研究員　博士（農学）
・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・（第1章　第2節）

小林　幸子　　キユーピー株式会社　研究開発本部
・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・（第1章　第3節）

志村　　洋　　キユーピー株式会社　研究開発本部
・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・（第1章　第3節）

磯部　和宏　　キユーピー株式会社　研究開発本部
・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・（第1章　第3節）

齋藤　　努　　不二製油株式会社　経営企画本部　風味基材事業部　部長
・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・（第1章　第4節）

水上　　創　　TPCマーケティングリサーチ株式会社　リサ・リューション事業部
課長・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・（第1章　第5節）

今村　　亮　　カゴメ株式会社　商品開発本部　課長・・・・（第1章　第6節）

江坂　　駿　　カゴメ株式会社　マーケティング本部・・・・（第1章　第6節）

佐藤　宏祐　　フジッコ株式会社　未来市場戦略部・・・・・（第1章　第7節）

高久　洋暁　　新潟薬科大学　応用生命科学部　学部長・教授　博士（農学）
・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・（第1章　第8節）

佐藤　里佳子　　新潟薬科大学　応用生命科学部　特任助教　博士（応用生命科学）
・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・（第1章　第8節）

AndTech

執筆者紹介

早坂　浩史　株式会社味香り戦略研究所　コンサルティング事業部
事業部長（取締役副社長）
一般社団法人　おいしさの科学研究所　専務理事
・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　（第1章　第9節）

島　　亜衣　東海大学　工学部　生物工学科　講師　博士（学術）
・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　（第2章　第1節）

吉田　杏美　東京女子医科大学　先端生命医科学研究所　助教　博士（医学）
・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　（第2章　第2節）

高橋　宏信　東京女子医科大学　先端生命医科学研究所　准教授　博士（工学）
・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　（第2章　第2節）

清水　達也　東京女子医科大学　先端生命医科学研究所　所長　教授
博士（医学）　医師・・・・・・・・・・・・・・・　（第2章　第2節）

成田　貴行　佐賀大学　理工学部　教授　博士（工学）・・・　（第2章　第3節）

加野　浩一郎　日本大学　生物資源科学部　教授　博士（農学）
・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　（第2章　第4節）

坂口　勝久　東京都市大学　理工学部医用工学科　准教授　博士（工学）
早稲田大学・東京女子医科大学　非常勤講師
・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　（第2章　第5節）

藤本　貴男　株式会社オルガノイドファーム　研究開発部長
・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　（第2章　第6節）

村岡　　仁　ZACROS株式会社
大阪大学　大学院工学研究科　特任准教授・・　（第2章　第7節）

小若　雅伸　株式会社浜野製作所　開発部・製造部
インテグリカルチャー株式会社　生産開発部
・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　（第2章　第8節）

池田　大介　北里大学　海洋生命科学部　准教授　博士（農学）
・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　（第2章　第9節）

AndTech

執筆者紹介

岸野　恵理子　地方独立行政法人東京都立産業技術研究センター
食品技術センター　主任研究員　博士（農学）
千葉大学　園芸学部　非常勤講師・・・・・・（第2章　第9節）

辻本　直規　西村あさひ法律事務所・外国法共同事業　弁護士
・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・（第2章　第10節）

ながさき　一生　株式会社さかなプロダクション　代表取締役フェロー
一般社団法人さかなの会　理事長
東京海洋大学　非常勤講師・・・・・・・・・（第2章　第11節）

藤元　次郎　株式会社CO2資源化研究所　研究員　博士（医学）
・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・（第3章　第1節）

湯川　英明　株式会社CO2資源化研究所　CEO/CSO　農学博士
・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・（第3章　第1節）

堀口　和真　株式会社 ちとせ研究所 Tech&Biz Development Div.　Researcher
・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・（第4章　第1節）

渡邉　崇人　徳島大学　バイオイノベーション研究所　講師　博士（工学）
・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・（第4章　第2節）

鈴木　丈詞　東京農工大学　大学院農学研究院　教授　博士（農学）
・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・（第4章　第3節）

内山　昭一　NPO法人昆虫食普及ネットワーク　理事長
・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・（第4章　第4節）

落合　　優　北里大学　獣医学部　准教授　博士（農学）
・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・（第4章　第5節）

鈴木　健吾　株式会社ユーグレナ　共同創業者 兼 エグゼクティブフェロー
博士（農学）　博士（医学）
理化学研究所　藻類資源アップサイクル研究チーム
チームディレクターを兼任・・・・・・・・・（第4章　第6節）

西　　秀樹　西包装専士事務所　代表
日本包装専士会　元会長・・・・・・・・・・（第5章　第1節）

AndTech

目　次

序章　新規代替タンパク質食品の開発動向と受容拡大に向けた将来展望 001

宮城大学　　石川　伸一

はじめに 002
1. 代替タンパク質食品の分類と技術開発動向 002
　1.1　プラントベースフード（植物由来代替食品） 002
　1.2　培養肉（細胞性食品） 003
　1.3　菌糸体食品（菌糸体タンパク質） 003
　1.4　微細藻類および食用昆虫 004
　1.5　精密発酵（Precision Fermentation） 004
2. 社会実装と受容拡大（Consumer Acceptance）に向けた課題 005
　2.1　感性科学・ガストロノミー的視点からの「おいしさ」の創出 005
　2.2　食の心理学と「食物新奇性恐怖（Food Neophobia）」の克服 005
　2.3　コストダウンとスケールアップ 006
　2.4　安全性評価・法規制・表示ルールの国際的調和 006
3. 持続可能な食の未来とウェルビーイング社会の創出 006
おわりに 006

第 1 章　プラントベースフードおよび植物由来代替タンパク質の開発動向と課題、将来展望 009

第 1 節　プラントベースフード開発の背景と特徴、課題、将来展望 010

大阪青山大学　　渡邊　敏明

はじめに 010
1. プラントベースの歴史的展開 010
　1.1　プラントベースの起源 010
　1.2　栄養的アプローチ 010
　1.3　環境的アプローチ 011
2. 食品の分類と特徴 011
　2.1　プラントベースフードとは 011
　2.2　アニマルベースフードとは 011
　2.3　精進料理とは 012
3. プラントベースフードの意義と背景 012

AndTech

3.1　健康面での効果　012
3.2　環境面での効果　013
3.3　食料面での効果　013
4.　プラントベースフードの栄養学的特徴　014
4.1　栄養学的メリット　014
4.2　栄養学的デメリット　014
4.2.1　タンパク質　014
4.2.2　ビタミン　014
4.2.3　ミネラル　015
5.　ベジタリアン　015
5.1　ベジタリアンとヴィーガン　015
5.2　食事パターンと健康影響　016
6.　だしとプラントベース　016
7.　ベジだしの開発　016
7.1　味覚の基本と評価　017
7.2　核酸系うま味成分の比較　017
7.3　アミノ酸組成の特徴　018
おわりに　019

第２節　植物性代替食品における酵素利用の現在地と将来展望　023
天野エンザイム株式会社　　酒井　杏匠
はじめに　023
1.　食品産業を支える酵素と植物性代替食品への応用　024
1.1　酵素の基本概念　024
1.2　食品産業における酵素利用　024
1.3　植物性代替食品で酵素が有効な理由　024
2.　代替肉における酵素利用　025
2.1　色調の課題に対する酵素利用　025
2.1.1　カタラーゼによる脱色　025
2.1.2　ラッカーゼによる褐色化　026
2.2　大豆臭の課題に対する酵素利用　027
2.2.1　グルカノトランスフェラーゼによる大豆臭抑制　027
2.2.2　プロテイングルタミナーゼによる大豆臭抑制　027
2.3　呈味性の課題に対する酵素利用　028
2.3.1　プロテアーゼとプロテイングルタミナーゼによるうま味向上　028
2.3.2　プロテアーゼによる塩味増強　028
2.4　テクスチャーの課題に対する酵素利用　029

AndTech

3. 代替乳における酵素利用 029
3.1 各種アミラーゼによる甘味コントロール 030
3.2 プロテイングルタミナーゼによるコーヒー凝集性抑制 030
3.3 グルカノトランスフェラーゼによる起泡性改善 030
4. その他の植物性代替食品における酵素利用 030
4.1 プロテアーゼによる代替チーズのストレッチ性改善 031
4.2 プロテイングルタミナーゼとトランスグルタミナーゼによる代替ヨーグルトのマウスフィール改善 031
4.3 トランスグルタミナーゼによる代替卵の凝集性改善 031
おわりに 032

第３節 独自の再現技術を活用したプラントベースの卵代替食品の開発 035
キユーピー株式会社 小林 幸子・志村 洋・磯部 和宏
はじめに 035
1. スクランブルエッグ風の「HOBOTAMA」について 035
1.1 開発背景 035
1.2 開発経緯・課題 036
1.3 活用例・反響 036
1.4 まとめ・今後 037
2. HOBOTAMA 加熱用液卵風について 037
2.1 開発背景 037
2.2 開発経緯・課題 038
2.3 活用例・反響 039
2.4 まとめ・今後 040
おわりに 040

第４節 味の再現を超えて、満足感（感情的価値）を設計する
―MIRACORE® による感情的価値創出とダシ OS のアップデート― 041
不二製油株式会社 齋藤 努
はじめに 041
1. 植物性食品開発における「おいしさ」の再定義 041
1.1 これまでの研究アプローチの主流とその課題 041
1.2 「満足感」を設計するという新たなアプローチ 043
2. MIRACORE®による満足感設計技術とMIRA-Dashi® 044
2.1 MIRACORE®の基本思想― 知覚を起点とした満足感設計 044
2.2 組み立て型アプローチによる知覚体験の構築 044
2.3 動物性食品の骨格を再構成する設計原理 044

AndTech

2.4　知覚補完を前提とした風味設計　046
2.5　植物性ダシMIRA-Dashi®における実装　046
3.　ダシは食品のOSである― 感情的価値を制御する基盤要素　048
3.1　ダシは満足感を創り出すOSである　048
3.2　従来のダシというOSの構造と制約　048
3.3　MIRA-Dashi®によるOSのアップデート　049
4.　植物性のダシが解決する食産業の課題　049
4.1　外食産業の人手不足　049
4.2　食品・外食の輸出　050
4.3　フードダイバーシティ対応　051
4.4　資源枯渇とサステナビリティ　052
おわりに　052

第５節　プラントベースフード市場の最新動向と将来展望：脱ブームで問われる新価値設計　055
TPCマーケティングリサーチ株式会社　水上　創
はじめに　055
1.　世界のプラントベースフード市場動向　055
1.1　グローバル市場の規模と成長要因　055
1.1.1　欧米市場における需要拡大の背景　056
1.2　グローバル有力企業の戦略動向　057
2.　日本のプラントベースフード市場の現状と課題　057
2.1　日本市場の規模とグローバルにおける位置づけ　057
2.2　技術開発動向と海外からの特許出願　058
2.3　市場の足踏みをもたらす日本特有の課題　059
3.　脱ブームで問われる新価値設計　061
3.1　野菜　061
3.2　軽さ　062
3.3　背徳感　062
3.4　日本らしさ　062
3.5　美しさ　063
おわりに　063

第６節　プラントベースフード設計の課題と野菜の知見を活かした解決アプローチ　065
カゴメ株式会社　今村　亮・江坂　駿
はじめに　065
1.　なぜカゴメがプラントベースフードに取り組むのか　066
2.　プラントベースフード設計における課題と対策　066

AndTech

2.1　コク・うま味の付与　066
2.2　ネガティブフレーバーの抑制　067
2.3　食感コントロール　068
3.　動物性食品の代替にとどまらないプラントベースフードの価値　068
4.　「おいしさ」と「健康」の設計思想　069
5.　カゴメのプラントベースフードへの取り組みと提供価値　069
おわりに　070

第７節　大豆を主原料とした高たんぱく・低糖質な米状食品「ダイズライス」の開発と課題、将来展望　073

フジッコ株式会社　　佐藤　宏祐

はじめに　073
1.　世界と日本における栄養課題について　073
1.1　世界的なタンパク質需要の増加と供給構造の課題　073
1.2　日本人の食生活と主食改善の可能性　074
2.　ダイズライス開発の背景　075
2.1　開発目的　075
2.2　従来の大豆食品および大豆ミートとの違い　075
2.3　主食市場へ参入する難しさ　076
3.　ダイズライスの技術的特徴　076
3.1　基本的な原料設計　076
3.2　パスタマシンを応用した米粒状成形　076
3.3　トランスグルタミナーゼによる保形性の付与　077
3.4　乾燥条件と品質　078
3.5　食感評価と官能評価　078
3.6　栄養的特徴と混合炊飯　079
4.　商品化における課題　079
4.1　技術課題：大豆由来臭と加熱生成臭　079
4.2　技術課題：食感、型崩れおよび継続喫食性　080
4.3　事業課題：原料コストと価格競争力　080
4.4　市場課題：認知、食文化との適合、リピート購入　081
4.5　販路課題：DtoC・BtoBそれぞれの特性を踏まえた販路拡大　081
5.　代替タンパク質市場における位置づけ　082
6.　将来展望　083
6.1　国内市場：外食、中食、健康志向市場　083
6.2　BtoB展開：OEM、協業、業務用　083
6.3　グローバル展開　084

AndTech

6.4　今後の技術開発　084
おわりに　085

第８節　持続可能な食品油脂供給に向けた油脂酵母 *Lipomyces starkeyi* による発酵型油脂生産　087
新潟薬科大学　　高久　洋暁・佐藤　里佳子
はじめに　087
1.　油糧微生物と油脂酵母 *Lipomyces starkeyi*　088
1.1　油糧微生物と油脂酵母の特徴　089
1.2　油脂酵母 *L. starkeyi*　090
1.3　*L. starkeyi* 油脂の脂肪酸組成と食品油脂代替への可能性　090
2.　*L. starkeyi* におけるパーム油代替油脂の高生産化　091
2.1　油脂高蓄積変異株の取得　091
2.2　油脂超高蓄積変異株の取得　092
2.3　アシルCoA合成経路およびケネディ経路　092
2.4　油脂超高蓄積変異株における遺伝子発現解析　093
3.　脂肪酸組成の改変を目的とした *Lipomyces starkeyi* の分子育種　094
3.1　変異育種から分子育種への展開　094
3.2　*L. starkeyi* の遺伝子組換え技術の開発　094
3.3　脂肪酸の伸長および不飽和化経路　094
3.4　ココアバター様油脂生産株の分子育種　096
3.5　ω3系多価不飽和脂肪酸含有油脂生産株の分子育種　096
おわりに　097

第９節　「代替」を入口に、「独自のおいしさ」へ ―食味の違いから考えるプラントベースフードの可能性―　101
株式会社味香り戦略研究所　　早坂　浩史
はじめに　101
1.　世界・日本市場におけるPBFの動向　101
2.　PBFのおいしさを考える ―期待、参照点、ネガティブ要因―　102
3.　測定データで読み解く ―「どこが違うか」から「何がおいしさを損なうか」へ―　102
3.1　味分析　103
3.2　香りの分析　104
3.3　食感の分析　104
3.4　「有意差がない」ではなく「実用上同等」を示す　105
3.5　分析データの見せ方　105
4.　植物性肉のおいしさの再構築に向けて　105

AnaTech

4.1　ネガティブ要因を抑える　105
4.2　料理として期待される基本的な満足を整える　105
4.3.　異なる特徴を選択理由に変える　106
5.　名称と伝え方の役割　106
おわりに　106

第２章　培養肉の開発と技術課題、用途、将来展望　109

第１節　「組織工学」による培養肉の開発における技術課題と将来展望　110
東海大学　　島　亜衣

はじめに　110
1.　お肉とは「骨格筋」である　111
1.1　骨格筋の再生能と筋衛星細胞　111
1.2　組織工学による骨格筋の構築　112
1.3　培養肉に求められる条件　112
2.　組織工学による培養肉の開発　113
2.1　トップダウン的手法による培養肉作製　113
2.2　ボトムアップ的手法による培養肉作製　113
2.2.1　シート状モジュールの利用　114
2.2.2　ひも状モジュールの利用　115
2.3　灌流培養との組み合わせ　115
3.　培養肉開発の将来展望　116
おわりに　117

第２節　微細藻類の力で実現する低コスト、低環境負荷の循環型細胞培養システムの開発と細胞性食品生産技術の課題、将来展望　121
東京女子医科大学　　吉田　杏美・高橋　宏信・清水　達也

はじめに　121
1.　細胞性食品生産と培養液　121
2.　微細藻類由来培養液の開発　123
3.　細胞が分泌する増殖因子を用いる無血清培養システムの開発　124
4.　培養廃液の再利用　126
5.　循環型細胞培養（CCC: Circular Cell Culture）システム　127
6.　微細藻類の新たな活用法の検討　128
7.　細胞性食品生産技術の課題と将来展望　129
おわりに　129

AndTech

第３節　自己組織化型の多孔性マルチチャネルコラーゲンゲルの開発と培養肉生産への応用、課題、将来展望 133

佐賀大学　　成田　貴行

はじめに 133
1. 世界の研究・産業潮流 133
2. 培養肉製造における技術課題の全体像 134
3. MCCGの形成原理 134
4. 物理的パラメータによる精密構造設計 135
5. 灌流培養システムへの統合 137
6. MCCGを用いた筋組織工学 138
7. ハニカム型コラーゲンエアロゲル 139
8. 残る課題と克服戦略 139

第４節　種々の細胞に分化する新規の多能性前駆細胞 DFAT の開発と培養肉用途に向けた期待と課題 143

日本大学　　加野　浩一郎

はじめに 143
1. 脱分化脂肪細胞（DFAT: Dedifferentiated Fat cells）とは 144
2. DFATの樹立とその特性 144
   2.1　成熟脂肪細胞（MA）画分の調製 145
   2.2　MA（浮遊）画分の単一性の検証 145
   2.3　天井培養法によるMAからのDFATの誘導 147
   2.4　細胞表面抗原マーカーによるDFATの均一性評価 148
   2.5　MAから生成されたDFATの増殖能力 149
   2.6　DFATは細胞株としての特性をもつ 150
3. DFATの多分化能（Multipotency） 151
   3.1　DFATの脂肪細胞への分化能 151
   3.2　DFATの骨格筋細胞への分化能 152
   3.3　DFATのクローン解析 153
4. 家畜におけるDFATの樹立とその特性 154
   4.1　ブタDFAT 154
   4.2　ウシDFAT 154
   4.3　ニワトリDFAT 154
5. 培養肉用セルソースにおけるDFATの有用性 155
   5.1　セルソースの入手コストの決定的な差（可食肉 vs 未利用脂肪） 155
   5.2　細胞集団としての高い均一性 155
   5.3　セルソースとしてのDFATの優位性と特性 156

AndTech

6. 実用化に向けた主要な技術的課題（問題点） 157
6.1 天井培養（Ceiling Culture）工程の大量生産におけるボトルネック 157
6.2 高濃度動物由来血清（FBS）への依存 157
6.3 3D足場材料（スキャフォールド）内での均一な増殖および分化制御 157
おわりに 157

第５節 食品廃棄物・副産物由来培養液を用いたアップサイクル培養肉の生産技術と課題、特徴、将来展望 161
東京都市大学 坂口 勝久
はじめに 161
1. 培養肉生産における培養液の重要性 163
2. 食品廃棄物・副産物の培養液原料としての可能性 164
3. 培養肉生産コスト 165
4. アップサイクル培養液の製造技術 166
5. 技術的課題 167
6. 研究実例 167
おわりに 169

第６節 大量生産に向けた不死化ウシ筋芽細胞株の樹立と三次元培養技術の開発 173
株式会社オルガノイドファーム 藤本 貴男
はじめに 173
1. 株式会社オルガノイドファームについて 173
2. 不死化ウシ筋芽細胞株の樹立 174
2.1 ウシ筋前駆細胞の取得 174
2.2 不死化細胞株の樹立 175
2.3 遺伝子組換えによる不死化の懸念点 176
3. 不死化細胞株の浮遊化培養技術の開発 176
3.1 平面培養法と三次元培養法 176
3.2 三次元培養法の種類 176
3.3 ウシ筋芽細胞の三次元培養法 177
4. 食品素材としての細胞培養物 177
4.1 食品成分分析の結果 177
4.2 細胞培養物の加工 178
5. 細胞性食品製造のスケールアップの課題 179
5.1 CAPEX／OPEXの低減化 179
5.2 培地コストの低減化 180
5.3 培養スケールの大型化 180

AndTech

おわりに 181

第７節　細胞性食品に向けたウシ細胞培養スケールアップ技術と課題、特徴、将来展望 183

ZACROS株式会社　　村岡　仁

はじめに 183
1. 技術動向 184
1.1 細胞性食品の動向：「ペースト・ミンチ様」から「構造化（ステーキ様）」へ 184
1.2 グローバル市場および法規制・市場参入の動向 184
1.3 組織構造の再現技術 185
1.4 「代替品」から「選択される高価値食品」へのシフト 186
2. 社会実装に向けた技術課題と開発 186
2.1 産業化・工業化における技術課題 186
2.2 ZACROSのコア技術：槽振とう方式によるスケールアップ 187
2.3 食品製造用資材への転換とコストダウン実証 187
2.4 シングルユース技術とクローズドラインの構築 188
3. 社会実装に向けた課題と取組み 188
3.1 事業化を支える三領域の構造整理（技術・制度・社会受容） 188
3.2 細胞性食品の製造コスト構造 189
3.3 安全性・品質保証体制と実証 189
3.4 社会受容性の向上 190
おわりに 190

第８節　細胞性食品の社会実装に向けた接着細胞と可食性足場を用いたリアクター培養法と課題、特徴、将来展望 193

株式会社浜野製作所　　小若　雅伸

はじめに 193
1. 細胞性食品の開発におけるリアクター開発の概況と課題 193
1.1 生産施設や許認可の状況について 193
1.2 撹拌浮遊系の強みと課題 194
1.3 接着培養系の概要と可能性 195
2. Packed-Bed Stirrer-Reactor（PBSR）の開発 196
2.1 従来型Packed-bed方式の技術的課題 196
2.2 PBSRの設計コンセプトと実証 197
3. ベンチスケール（10 kg/月）の安定生産と社会実装への取り組み 198
3.1 安定製造ラインの構築と製品化検討 198
3.2 許認可取得に向けた法規制対応と安全性確保 201
4. 今後の課題と将来展望 202

AndTech

4.1　パイロットプラント規模への拡張に向けた、エンジニアリング上の課題や、
固形状バイオマス生産技術としての中長期的な展望　202
4.2　社会受容の醸成（情報発信や呼称の工夫等）　203
おわりに　204

第９節　ニホンウナギ由来細胞株を基盤とした細胞性魚肉研究：現状と今後の展望　209
北里大学　池田　大介
地方独立行政法人東京都立産業技術研究センター　岸野　恵理子
はじめに　209
1.　ニホンウナギ細胞性魚肉研究の背景　210
2.　ニホンウナギ由来細胞株の開発　210
3.　細胞培養手法の検討と課題　211
4.　組織化・食品化に向けた今後の課題　213
おわりに　214

第 10 節　代替タンパク質の開発における規制について　217
西村あさひ法律事務所・外国法共同事業　辻本　直規
はじめに　217
1.　主な代替タンパク質　217
2.　代替タンパク質に関する規制の全体像（食品衛生法、食品表示法、景品表示法）　218
3　個々の代替タンパク質と規制　218
3.1　細胞培養食品　218
3.1.1　安全性の確保　218
3.1.2　表示　220
3.1.3　今後の展望　220
3.2　プラント（植物）を原料とする代替タンパク質　220
おわりに　221

第 11 節　細胞培養による魚介類生産「細胞水産業」の可能性・課題と将来展望　223
株式会社さかなプロダクション　ながさき　一生
はじめに　223
1.　細胞水産業が期待される背景　223
1.1　プロテインクライシスと天然資源の限界　223
1.2　養殖の拡大と、第三の生産手段への期待　224
2.　培養肉と培養魚介類の共通点・相違点　225
2.1　培養条件の違い　225
2.2　研究基盤の成熟度の違い　226

AndTech

2.3　対象生物種の多様性　226
3.　細胞水産業によって漁業・養殖業はどうなるか　226
3.1　天然魚の位置付け　～多種多様な魚と「旬」を味わう～　227
3.2　養殖魚の位置付け　～一尾丸ごと、狙った品質を安定供給～　228
3.3　培養魚介類の位置付け　～需要の高い部位・品質を狙ってつくる～　228
4.　世界の細胞水産業の産業動向　228
4.1　「参入ラッシュ」から「選別と商業化」へ　228
4.2　魚種と製品形態は多様化　229
4.3　量産化の最大課題は「できる」から「安く、安定してつくる」へ　230
4.4　世界の認可・上市は進展、一方で規制は一枚岩ではない　230
5.　世界初の培養シーフード商業販売：Wildtype社の事例　231
5.1　FDAの「No Questions」まで約3年　231
5.2　レストランでの販売開始と、州規制による逆風　231
5.3　2026年、KickstarterでD2Cへ　232
6.　日本における研究開発・企業・制度動向　232
7.　細胞水産業の今後　233
おわりに　234

第３章　マイコプロテインおよび微生物由来代替タンパク質の特徴と生産技術、食品応用、将来展望　237

第１節　CO_2を炭素源として増殖可能な水素菌を用いた代替タンパク質の生産技術と課題、特徴、将来展望　238

株式会社CO2資源化研究所　　藤元　次郎・湯川　英明

はじめに　238
1.　SCP研究の歴史と水素菌SCPの位置づけ　238
1.1　SCP概念の成立と初期の産業化　238
1.2　NASAによる閉鎖型生命維持系の研究　239
1.3　現代における水素菌SCPの再評価　239
2.　水素菌によるCO_2資化と菌体タンパク質生産の原理　239
2.1　水素菌の代謝　239
2.2　原料供給とプロセス全体の評価　240
3.　生産プロセス　240
3.1　培養方式　240
3.2　気液物質移動　240
3.3　水素・酸素混合系の安全性　240
3.4　回収・加工　241
4.　代替タンパク質素材としての特徴　241

AndTech

4.1　栄養特性　241
4.2　食品素材としての利用可能性　241
5.　環境性・経済性を左右する要因　242
5.1　環境面での特徴　242
5.2　経済性とスケールアップ　242
6.　社会実装に向けた課題　242
6.1　食品安全性評価と規制対応　242
6.2　品質設計と標準化　242
6.3　消費者受容と市場形成　243
7.　将来展望　243
7.1　水素供給と生産立地の最適化　243
7.2　菌株とプロセスの協調最適化　243
7.3　日本における展開可能性　243
おわりに　244

第４章　昆虫・藻類由来の代替タンパク質の特長と課題、将来展望　247

第１節　顕微鏡から地球規模の食卓へ：独立栄養微細藻類が変えるタンパク質供給と新産業の未来　248

株式会社 ちとせ研究所　　堀口　和真

はじめに　248
1.　ちとせグループとは？：「バイオで循環する社会」へ向けて　249
2.　各種代替タンパク質技術の問題点と、微細藻類（独立栄養培養）の優位性　249
3.　顕微鏡から食卓へ：現場で直面するリアルと社会実装の壁　252
4.　『MATSURI』：千年先の礎を築く、バイオ産業創出への挑戦　254
おわりに　257

第２節　循環型食品としての食用コオロギの社会的意義と普及へ向けての課題と将来展望　259

徳島大学　　渡邉　崇人

はじめに　259
1.　食用コオロギ普及への社会的意義　259
2.　食用コオロギの飼育方法　260
3.　フードロスを活用したコオロギ養殖　261
4.　食用コオロギの品種改良　262
5.　食用コオロギ普及へ向けての課題　263
おわりに　264

AndTech

第３節　食用昆虫の安定供給に向けた生産技術 265

東京農工大学　　鈴木　丈詞

はじめに 265
1. 昆虫の生産システム 265
1.1 昆虫の採集と生産 265
1.2 施設園芸に由来する生産システムの分類 266
1.3 資源利用効率という評価軸 266
2. LCAからみた環境負荷 267
2.1 評価の枠組み 267
2.2 報告値の幅と事例 268
2.3 既存の畜産との比較 269
2.4 ホットスポットと改良の対象 269
3. 国内における課題と改良の方向 270
3.1 飼料原料の確保と未利用資源の活用 270
3.2 空調と施設設計 270
3.3 生産管理と育種 271
おわりに 272

第４節　昆虫食の歴史と普及への課題そして未来への展望 277

NPO法人昆虫食普及ネットワーク　　内山　昭一

はじめに 277
1. 昆虫を捕る術を磨いた夜の暮らし 277
2. 世界は昆虫を食べてきた 277
3. 我が国における昆虫食 278
4. 昆虫食普及への課題　―かつての日常食から嫌悪の対象へ― 281
5. 注目される昆虫食 282
6. 昆虫食の未来 284
おわりに 284

第５節　代替タンパク質としての食用昆虫の栄養価値と生理機能および昆虫食普及のための課題と将来展望 285

北里大学　　落合　優

はじめに 285
1. 食用昆虫に関する研究論文数の推移と国内外における食用昆虫の取扱いの変化 285
2. 食用昆虫に含まれるタンパク質の量と質 287
3. 食用昆虫に含まれる含窒素食物繊維キチンがタンパク質定量に及ぼす影響 289
4. トノサマバッタ粉末に期待される栄養生理機能 290

AndTech

5. 食用昆虫に関する課題、期待および展望 291
おわりに 292

第６節　微細藻類ユーグレナによる食料資源開発の現状・課題・将来展望 295
株式会社ユーグレナ　　鈴木　健吾
はじめに 295
1. 微細藻類ユーグレナとは ―― 生物学的特徴と食料資源ポテンシャル 295
1.1 混合栄養性をもつ単細胞真核生物 295
1.2 59種類の栄養素と高い消化性 296
1.3 ユーグレナ特有の貯蔵多糖「パラミロン」 296
1.4 タンパク質源としてのポテンシャル 297
2. 食料資源開発の現状 297
2.1 世界初の食用屋外大量培養の確立 297
2.2 食品・飲料・サプリメントへの社会実装 297
2.3 栄養課題の解決に向けたソーシャルビジネス（GENKIプログラム） 297
2.4 培養技術の進展 ―― 従属栄養・高密度培養 298
3. 技術的課題 298
3.1 培養：コンタミネーション制御とスケールアップ 298
3.2 生産コストと資源・エネルギー収支 298
3.3 タンパク質源としての位置づけ 298
3.4 食味・テクスチャーと消費者受容 299
3.5 規制・表示・安全性 299
4. 将来展望 299
4.1 バイオマスの「5F」利用と資源循環の高度化 299
4.2 未利用バイオマスの糖源化と「Food vs Fuel/Feed」の緩和 300
4.3 育種・代謝制御による高タンパク化 ―― パラミロン合成の制御という研究仮説 301
4.4 グローバル食料安全保障と栄養 301
4.5 極限環境・宇宙での食料生産 302
おわりに 302

第５章　代替タンパク質／プラントベースフードの規制 305
第１節　代替タンパク質／プラントベース食品の表示に関する国内外法規制の最新動向 306
西包装専士事務所　　西　秀樹
はじめに 306
1. プラントベース食品の概要 306
1.1 世界の食品需要見通し 306
1.2 プラントベース食品の定義 307

AndTech

2. 食品表示に関する各国の法規制 307
2.1 コーデックス規格 307
2.2 日本 308
2.3 EU（欧州連合） 309
2.4 米国 309
3. プラントベース食品の表示に関する規制動向 310
3.1 何が問題なのか 310
3.2 日本 310
3.3 EU 311
3.3.1 EUにおけるプラントベース食品規制の課題 311
3.3.2 欧州議会の表示に関する新規則 312
3.4 米国 313
3.4.1 ガイダンス案 313
3.4.2 州の動き 313
3.5 ISO（国際標準化機構）の新規格 314
おわりに 315

AndTech

序 章

新規代替タンパク質食品の開発動向と受容拡大に向けた将来展望

AndTech

宮城大学　　石川　伸一

はじめに

21 世紀の地球社会は、人類史上かつてない食料需給の構造的転換点に直面している。国連の推計によれば、世界人口は 2080 年代半ばに約 103 億人でピークに達すると予測されており[1)]、それに伴い 2050 年における世界の食料需要量は 2010 年比で約 1.7 倍、中でも肉類などの畜産物需要は 1.8 倍に急増すると試算されている[2)]。特に新興国や低所得国における経済成長と都市化は、生活水準の向上とともに炭水化物中心の食生活から動物性タンパク質中心の食生活へのシフトを加速させている。

しかしながら、従来の畜産業に過度に依存した供給システムをこのまま拡大することは、農地・水資源の制約や温室効果ガス（GHG）排出、生物多様性の喪失といった観点から物理的・環境的に限界を迎えている[3)]。地球規模での需給ギャップが生じる「タンパク質危機（Protein Crisis）」に対し[4)]、従来の動物性タンパク質を補完・代替する「代替タンパク質（Alternative Proteins）」およびそれを支えるフードテック（Food Tech）への期待は揺るぎないものとなっている[5)]。

一方で、近年見られた投機的な代替肉ブームが一巡した現在、市場は一過性の期待感から「現実的な社会実装と価値の厳選」という成熟フェーズへと移行した[6)]。単に肉を模倣した製品の淘汰が進む一方で、代替タンパク質は単なる代替品や緊急避難的対策にとどまらず、環境負荷低減（SDGs）、アニマルウェルフェアの推進、さらには個人の健康維持や食の多様性・ウェルビーイング（Well-being）の実現といった多角的な価値を提供する「新たな食の選択肢」として再定義されつつある。

本書『代替タンパク質／プラントベースフードの開発技術動向と課題および将来展望』は、これら代替タンパク質に関する最先端の技術動向、社会実装上の課題、商用化に向けた将来展望を網羅的・体系的に論じるものである。本稿では総論として、主要な代替タンパク質の開発動向を概観するとともに、それらが社会に受容され、持続可能な食文化として定着するための課題と展望について論じる。

1．代替タンパク質食品の分類と技術開発動向

代替タンパク質食品は、その原料となる生物資源や生産プロセスによって多様なカテゴリーに分類される。一過性のトレンドを超えて持続可能な食インフラとして定着しつつある各領域の技術的特徴と開発動向について整理する。

1.1　プラントベースフード（植物由来代替食品）

プラントベースフードは、大豆、エンドウ豆、緑豆、小麦などの植物性原料加工物を主体として、肉や乳製品、卵の食感・風味・外観を再現した食品である。代替タンパク質市場の中で最も商業化が進んでおり、既に多くのスーパーマーケットや外食チェーンで展開されている。

製造技術の核となるのは「エクストルーダー（押出成形機）」を用いた組織化加工技術である[7)]。

AndTech

粉末状の分離大豆タンパクなどに水や油脂を加え、スクリュー内で加熱・加圧・せん断力を加えることでタンパク質を変性・再配向させ、組織状の構造を形成する。ここで用いられる押出成形は、水分条件によって二つの方式に大別される点に留意が必要である。水分 50% 未満で行う低水分押出は、多孔質でスポンジ状の組織をもつ粒状大豆タンパク（TVP）を与え、吸水復元を前提としたひき肉様素材として長く用いられてきた。これに対し、水分 50 ～ 70% の条件でダイ出口に冷却ダイを設ける高水分押出（HMMA）では、ダイから冷却部にかけての相分離とタンパク質の架橋によって異方性の繊維状構造が形成され、鶏胸肉に近い層状の食感が得られる。

近年の技術革新により、従来のひき肉状（ミンチタイプ）の単なる模倣にとどまらず、高水分押出を基盤としつつ、フレーバーネットワーク解析や AI を活用した異風味マスキング技術、さらには融点や口溶けを最適化した発酵由来代替油脂の応用などにより、テクスチャーとジューシーさを高める「第 2 世代」のプロダクトへと急速に進化している [8]。

1.2　培養肉（細胞性食品）

培養肉（Cultivated Meat ／ Cell-based Food）は、ウシ、ブタ、トリ、魚類などの生体から採取した少量の幹細胞や筋芽細胞を、体外のバイオリアクター（培養槽）内で大規模に増殖・分化させて得られる食品である [9]。再生医療や組織工学の技術を食料生産に応用したものであり、食肉と同じ動物細胞に由来する点で、植物性素材による模倣とは本質的に異なる。ただし、現時点で実用化されている製品は、筋線維・脂肪・結合組織の構成比やミオグロビン含量、鉄・ビタミン B_{12} といった微量成分において従来の食肉と同等とは言えず、栄養学的な等価性の実証は今後の重要な課題として残されている。

技術的課題の筆頭である大量培養に必要な培地コストの低減に向けて、ウシ胎児血清（FBS）を完全に排除した植物由来や精密発酵による無血清培地の開発が集中的に行われている。さらに、可食性足場（スキャフォールド）の設計や 3D バイオプリンティング技術による立体組織形成が進むとともに、近年では植物性タンパク質ベースに培養細胞や培養油脂を一定割合添加することで、コストとおいしさ（満足感）を高度に両立させる「ハイブリッド型」製品が、最も現実的な商業化アプローチとして定着しつつある。

1.3　菌糸体食品（菌糸体タンパク質）

菌糸体食品は、Fusarium 属や麹菌（*Aspergillus oryzae*）などの糸状菌（真菌）を大型タンクで液体培養（発酵）させ、増殖した菌糸体を回収・加工したタンパク質食材である [10]。このうち「マイコプロテイン（Mycoprotein）」は、本来 *Fusarium venenatum* を用いた製品を指す商業的・規制上の名称であり、欧米では「Quorn（クォーン）」ブランドとして 1980 年代以来の食経験と市場実績を有している。麹菌由来素材を含めて本カテゴリーを広く論じる際には、上位概念として「菌糸体タンパク質（mycelial protein）」の語を用いるのが正確である。

菌糸体は微細な繊維状構造を天然の状態で有しているため、植物性タンパク質のように強力な押出成形を行わなくても、肉に近い独特の歯ごたえ（テクスチャー）を形成できる利点がある。さらに、

AndTech

乾燥重量当たり 40 ～ 60%（Quorn のマイコプロテインでは約 45 ～ 50%）という高いタンパク質含有量に加え、β- グルカンやキチンからなる食物繊維や必須アミノ酸を豊富に含み、コレステロールを含まないという優れた栄養特性を示す。

一方で、Quorn 製品については消化器症状やまれにアナフィラキシーの発症例が報告されており、英米では表示のあり方をめぐる議論が継続している。真菌由来タンパク質に固有の感作リスクの評価や、培養・原料管理におけるマイコトキシンの制御を含め、安全性評価と適切なアレルゲン表示は普及の前提条件である。

近年では、日本の国菌である「麹菌」を用いた菌糸体タンパク質の開発も注目されており、長い食経験に裏付けられた安全性、日本固有の醸造技術・菌株リソースの活用、さらには固有の「うま味」成分を活かした独自価値の創出が進められている [11]。

1.4　微細藻類および食用昆虫

微細藻類（スピルリナ、クロレラ、ユーグレナなど）は、高い光合成効率を持ち、単位面積当たりのタンパク質生産速度が陸上植物に比べて格段に早い。砂漠や塩害地など従来の農耕に適さない土地でも生産が可能であり、節水型かつ高効率な次世代タンパク質源として期待されている。特有の緑色や磯臭さを抑えた中性的なタンパク質パウダーの開発や、水産加工品・乳製品代替への応用が進んでいる。

食用昆虫（コオロギ、ミールワームなど）は、変温動物であるため体温維持に用いる代謝エネルギーが少なく、少ない飼料要求量で効率よく高タンパク質（乾燥重量当たり 50 ～ 70%）を生産できる。また、食品廃棄物を飼料としてアップサイクルする循環型（サーキュラーエコノミー）の生産系との親和性も高い。ただし、EU をはじめとする多くの地域では、調理残渣や動物性の食品廃棄物を昆虫飼料に用いることは法的に制限されており、技術的な可能性と現行制度上の制約は区別して論じる必要がある。さらに、消費者感情における心理的抵抗感（嫌悪感・新奇恐怖）の克服が継続的な課題となっている。

1.5　精密発酵（Precision Fermentation）

精密発酵は、遺伝子組換えやゲノム編集を施した微生物（酵母、細菌、カビなど）をバイオリアクターで培養し、目的とする特定のタンパク質や脂質、機能性成分を選択的かつ高純度に発酵生産する技術である [12]。動物を介さずに、乳タンパク質（β- ラクトグロブリンやカゼイン）、卵白タンパク質（オボアルブミン）、あるいは肉特有の風味や血様の色調を再現するために用いられるヘムタンパク質（ダイズ根粒由来のレグヘモグロビンや動物由来のミオグロビン）などを合成することが可能である。動物性原料に依存せずに本物の牛乳と同等の物性を持つ乳製品を実現する技術として、また植物性代替肉の風味補強材として、精密発酵はバイオものづくりの基幹技術として急速に基盤を固めている。

ただし留意すべきは、精密発酵によって得られる乳タンパク質が動物乳タンパク質と分子構造上同

AndTech