

細胞性食品の将来展望

細胞性食肉の普及における課題や 実装への技術・社会的取り組み

監修：

吉富 愛望アビガイル（一般社団法人細胞農業研究機構）

鈴木 健夫（株式会社マイオリッジ）

井形 彬（東京大学先端科学技術研究センター）



WideType 社 / 細胞性サーモン



UPSIDE Foods 社 / 米国で販売されている細胞性チキン



タイバースファーム(株) /
培養鶏肉の炭火焼き



BlueHalu 社 / 細胞性まぐろ

インテリカルチャー(株) / 食べられるアヒル肝臓由来細胞



監修者 紹介



一般社団法人細胞農業研究機構 代表理事

吉富 愛望 アビガイル

細胞農業や、細胞性食品（いわゆる「培養肉」など）の業界で2019年よりルールメイキング活動として政策提言などに関わる。

農林水産省 フードテック官民協議会 細胞農業WT 事務局長、東京大学先端科学技術研究センター 客員研究員を兼務するほか、経済産業省バイオものづくり革命推進WGの委員を務める。それ以前は欧州系投資銀行のM&Aアドバイザー部門、暗号資産や伝統産業×機械学習をテーマとして開発を行うスタートアップ等に勤務。2020年にForbes Japanの選ぶ「世界を変える30歳未満30人の日本人」のLaw and Policy 部門を受賞。



株式会社マイオリッジ 鈴木 健夫

株式会社マイオリッジ取締役事業推進本部長 Chief Marketing Officer (現任)。

再生医療等製品の開発、再生医療等製品及び細胞加工物の製造開発受託に携わった後、2020年から京都大学発スタートアップの株式会社マイオリッジにて培地最適化の事業を立ち上げ、統括する。再生医療等製品におけるヒト細胞での経験を細胞性食品の領域で応用することで、培地の技術的課題を解決し、細胞性食品の社会実装を支援する。



東京大学 先端科学技術研究センター

井形 彬

東京大学先端科学技術研究センター特任講師。ワシントンDCの新アメリカ安全保障センター(CNAS)、ホノルルのパシフィック・フォーラム(PF)、キャンベラの豪州戦略政策研究所 (ASPI)、プラハのプラハ安全保障研究所(PSSI) と世界各国のシンクタンクにてシニアフェローを兼任。また、食料安全保障の観点から細胞農業研究機構(JACA)の理事を務める。その他様々な立場から国内外の議会、省庁、民間企業に対してアドバイスをを行う。

専門分野は、経済安全保障、インド太平洋における国際政治、先端技術と食料安保(細胞農業)など。

執筆者紹介

第1章

吉富 愛望アビガイル 一般社団法人細胞農業研究機構

第2章

第1節

鈴木 健夫 株式会社マイオリッジ

第2節

知念 秋人 味の素株式会社 シニアマネージャー／博士（生命科学）

第3節

山中 久美子 東京女子医科大学 先端生命医科学研究所 特任助教／
博士（医学）

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）

第4節

近藤 裕昭 インテグリティカルチャー株式会社 シニアアドバイザー

新谷 圭佑 インテグリティカルチャー株式会社 プロジェクトリーダー

川島 一公 インテグリティカルチャー株式会社 CTO／農学博士

第3章

第1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）

第2節

加藤 好一 佐竹マルチミクス株式会社 常務取締役

第3節

Lou Cooperhouse M.S., Food Science, B.S., Microbiology, Rutgers University
BlueNalu, Founder, President & CEO

執筆者紹介

第4節

Mihir Pershad BS, Biochemistry – University of North Carolina at Chapel Hill
UMAMI Bioworks Pte Ltd., Founder & CEO

Dr. Dhiraj Singh PhD, Biological and Biomedical Sciences –
Nanyang Technological University
UMAMI Bioworks Pte Ltd., Head of R&D

第4章

第1節

田中 龍一郎 東京女子医科大学 先端生命医科学研究所 ポストドクター／
博士（工学）

第2節

古澤 和也 福井工業大学 環境学部 環境食品応用化学科 教授／
博士（工学）

第3節

大野 次郎 ティンユーバイネット株式会社／
ダイバースファーム株式会社 代表取締役社長

第4節

兒玉 賢洋 TOPPANホールディングス株式会社 総合研究所 課長

北野 史朗 TOPPANホールディングス株式会社 総合研究所 課長
(先端細胞制御化学 (TOPPAN) 共同研究講座
招へい准教授を兼任)／博士（工学）

Fiona Louis 大阪大学大学院 工学研究科 先端細胞制御化学 (TOPPAN)
共同研究講座 特任助教／Ph.D

松崎 典弥 大阪大学大学院 工学研究科 教授／博士（工学）

執筆者紹介

第5章

第1節

吉富 愛望アビガイル 一般社団法人細胞農業研究機構

第2節

柴野 相雄 TMI総合法律事務所／弁護士

山田 拓 TMI総合法律事務所／弁理士・博士（農学）

鍛冶 亮太 TMI総合法律事務所／弁護士

第3節

日比野 愛子 弘前大学 人文社会科学部 教授／博士（人間・環境学）

第4節

島村 雅晴 雲鶴 代表取締役料理長

第6章

第1節

井形 彬 東京大学

第2節

Dr. Dean Powel Science & Technology Department, The Good Food
Institute Asia Pacific (GFI APAC) /Adjunct Assistant
Professor, School of Chemical and Biomedical Engineering,
Nanyang Technological University, Singapore.

Dr. Elliot Swartz Science & Technology Department, The Good Food
Institute (GFI)

執筆者紹介

インタビュー

インタビュー1

Roe Nir

B.Sc Biotechnology Engineering, MBA

Forsea Foods, Co-founder and CEO

インタビュー2

Eric Schulze

UPSIDE Foods, VP of Global Regulatory and Public Policy

インタビュー3

Dr. Aryé Elfenbein

MD, PhD

Wildtype, Co-founder

What's

目 次

はじめに～細胞農業産業が注目される背景～	001
細胞農業、細胞性食品とは	001
なぜ細胞性食品なのか	001
細胞性食品の作り方	003
細胞性食品業界のあゆみ	004
各章の位置づけ	005
第 1 章 細胞性食品領域の市場拡大における課題	009
一般社団法人細胞農業研究機構 吉富 愛望アビガイル	
はじめに	010
1. 市場規模	010
2. 供給力や価格競争力	012
3. 味・香りの再現	014
4. ルール 形成活動の進捗	015
おわりに	016
第 2 章 細胞性食品の実現に向けて～新たな培地、基盤技術の探索～	019
第 1 節 細胞性食品領域における培地の位置づけと最適化	020
株式会社マイオリッジ 鈴木 健夫	
はじめに	020
1. 細胞性食品のコスト構造と培地の重要性	020
1.1 再生医療等製品のコスト	020
1.2 細胞性食品のコスト	021
1.3 コスト削減の可能性と培地の重要性	021
2. 培地成分の選定と最適化	022
2.1 細胞培養における培地の位置づけ	022
2.2 培地コスト削減の取り組み	022
2.3 培地成分の由来に関する分類と各成分の安全性	024
2.4 培地成分の最適化	025
3. 細胞性食品の実現に向けた協業体制	025
おわりに	026

第2節 細胞性食品の製造に必要な成長因子 027

味の素株式会社 知念 秋人

はじめに	027
1. 成長因子とは	027
2. 成長因子の製造方法	027
3. 細胞性食品製造に使用される成長因子に求められる要求事項	029
3.1 コスト	029
3.2 品質（必要機能及び安全性）	029
4. 要求品質とコストを満足する成長因子の開発例	030
おわりに	030

第3節 微細藻類と動物細胞を用いた細胞性食肉生産システムの創出 033

東京女子医科大学 山中 久美子・清水 達也

はじめに	033
1. 微細藻類の利用	033
1.1 藻類種	034
1.2 培養方法	034
1.3 抽出方法	035
1.4 基礎培地への利用	036
2. 動物細胞の培養上清	037
2.1 FBSの役割	038
2.2 培養上清に含まれる増殖因子	038
2.3 細胞性食肉生産への利用	039
3. 微細藻類と動物細胞の培養上清	040
4. 微細藻類の増殖促進効果	041
おわりに	042

第4節 細胞性食肉製造および安全性確保に向けた取り組みと培養装置の開発 049

インテグリカルチャー株式会社 近藤 裕昭・新谷 圭佑・川島 一公

はじめに	049
1. 細胞性食肉	049
1.1 細胞性食肉の製造について	049
1.2 培養技術について	049
1.3 体内環境に近い環境を維持するために必要なもの	050
1.4 臓器間相互作用について	050
1.5 培養装置の開発に向けて	051
1.6 培養装置の課題と今後の進め方	052

2. 食品としての安全性の確認と社会受容に向けた取組み	052
2.1 食品としての安全性の確認	052
2.2 社会受容に向けた取組み	053
おわりに	054
第3章 大量生産に向けた取組み～より多くの消費者に届けるために～	057
第1節 細胞性食品生産に向けた大量細胞培養	058
東京都市大学 坂口 勝久	
はじめに	058
1. 細胞性食品スタートアップ	059
2. 細胞種を選択	060
3. 培養液を選択	061
3.1 基礎培地	061
3.2 血清	062
3.3 サイトカイン	062
4. バイオリアクター	062
おわりに	063
第2節 細胞性食肉の大量培養・大量生産に適した バイオリアクターの開発とスケールアップ	067
佐竹マルチミクス株式会社 加藤 好一	
はじめに	067
1. 「細胞性食肉」大量生産の動向と一般論	067
1.1 培養で用いられる撹拌翼の特性	068
1.2 培養槽条件	071
1.3 バイオリアクターのスケールアップ手法	072
1.3.1 剪断耐性の強い微生物培養	073
1.3.2 剪断耐性の弱い細胞・マイクロキャリア培養	074
2. 大量培養に適したバイオリアクターの開発と製品化	074
2.1 低剪断型バイオリアクター	075
2.2 超大容量低剪断型バイオリアクター	079
2.3 高剪断型バイオリアクター	081
2.4 高粘性型バイオリアクター	083
おわりに	084

第3節 Cell-Cultured Seafood: A Supply Chain Solution to Supplement Global Demand

087

BlueNalu, Lou Cooperhouse

Introduction	087
1. Consumer Demand for Seafood	088
1.1 Global Demand	088
1.1.1 Demand in Japan	088
2. Seafood Supply Chain Challenges	089
2.1 Seafood's Impacts on Food Security	089
2.2 The Global Supply Gap	089
2.2.1 Japan's Seafood Supply Challenges	090
2.3 Overfishing	091
2.3.1 Overfishing in Japan	092
2.4 Destructive Fishing Practices	092
2.5 IUU Fishing and Related Issues	092
2.5.1 IUU Fishing in Japan	094
2.6 Bycatch and Food Waste	094
2.7 Climate Change	094
2.8 Labor Issues in the Fishing Industry	095
2.8.1 An Aging Japanese Workforce	095
2.8.2 Additional Challenges for the Japanese Seafood Industry	096
3. Consumer Health Concerns	096
3.1 Fraud & Mislabeling	096
3.2 Global Environmental Contaminants	096
3.3 Mercury Contamination in Seafood	097
4. Consumer Behavior	097
5. Cell-Cultured Seafood: A Sustainable and Safe Solution	098
5.1 BlueNalu	099
5.1.1 BlueNalu's Species Selection & Focus on Bluefin Tuna Toro	100
5.1.2 Techno Economic Assessment (TEA) and Scalability	101
5.1.3 Strategic Partners	102
5.1.4 Nomenclature	102
6. Regulations for Cell-Cultured Seafood	104

第4節 Cultivating the Future of Sustainable Seafood: An Assessment of Challenges and Opportunities

111

UMAMI Bioworks Pte Ltd.,

Mihir Pershad and Dr. Dhiraj Singh

1. Introduction	111
1.1 The State of Seafood	111
1.1.1 Demand Growth	111
1.1.2 Current Seafood Production	112
1.1.3 Gaps in Seafood Production	112
2. Current State of Cultivated Seafood	113
2.1 Current Approaches	113
2.1.1 Species focus	113
2.1.1.1 Price risk with commodities	113
2.1.1.2 Market and product 'selectivity' risk	113
2.1.1.3 A better path forward	114
2.1.2 Traditional scaling processes	114
2.1.2.1 Stirred tank reactors	114
2.1.2.2 Batch production	115
2.1.3 Product	115
2.2 Challenges	116
2.2.1 Gaps in basic fish scientific knowledge	116
2.2.2 Cost Challenges	117
2.2.2.1 Cell culture media	117
2.2.2.2 Sourcing new suppliers	117
2.2.2.3 Cost of capital	118
2.2.3 Scale	118
2.2.3.1 Capital Inefficiency of Batch vs. Continuous Processes	118
2.2.3.2 Cell biology is unpredictable!	118
2.2.3.3 Limited computational tools to modernize process development	119
2.2.4 Talent for research and production	119
2.2.5 Product selection and pricing	119
2.2.6 Financing	120
2.2.6.1 Building new markets	120
2.2.6.2 CapEx & owning their factories	120
2.2.7 Summary	121
3. How cultivated goes mainstream	121

3.1	Designing for Scale	122
3.1.1	Better cell lines	122
3.1.2	Better process development	122
3.1.3	Academic partnerships to develop fundamental knowledge	123
3.1.4	Consortium-based development	123
3.1.5	Automation & standardization	124
3.1.6	Creation of common quality & safety standards	125
3.2	Making great food	125
3.2.1	Capturing prized flavors and origins	125
3.2.2	Leveraging traditional food expertise	126
3.2.3	New technical approaches to making great fish textures	126
3.3	Financing global scale	127
3.4	Product & brand localization	128
3.5	Consumer Acceptance	128
3.5.1	Building consumer trust	128
3.5.2	Building New Categories	129
4.	Conclusion	131
第 4 章 食品に適した形状や品質の追求～組織化や味の再現等に係る研究～		133
第 1 節 細胞シート技術によって作られるスキャフォールドフリー細胞性食肉		134
東京女子医科大学 田中 龍一郎		
	はじめに	134
1.	細胞シート技術	134
1.1	温度応答性培養皿	134
1.2	これまでの応用展開	135
1.2.1	再生医療	135
1.2.2	創薬・疾患モデル	135
2.	細胞シートを使ったスキャフォールドフリーの細胞性食肉	136
2.1	ウシ筋芽細胞シート細胞性食肉の作製	136
2.2	ウシ筋芽細胞シート細胞性食肉の食感	136
2.3	ウシ筋芽細胞シート細胞性食肉の栄養素	137
3.	細胞シート細胞性食肉の実用化に向けて	137
3.1	細胞の大量培養技術	137
3.2	細胞シートの自動積層化技術	137
3.3	細胞シートへの血管構造の付与	137
3.4	食品としての安全性	138
	おわりに	138

第2節 食肉の食感を再現した細胞性食肉製造技術の開発 141

福井工業大学 古澤 和也

はじめに	141
1. 食品の食感の評価法	141
2. 粘弾性	143
3. 簡単な粘弾性模型	144
4. 食肉の食感を再現する試み	147
おわりに	151

第3節 ネットモールド法による細胞結合技術

～人工臓器から細胞性食品（細胞性食肉）まで～ 153

ティッシュバイネット株式会社／ダイバースファーム株式会社 大野 次郎

はじめに	153
1. 細胞結合技術の課題と可能にする新領域	154
2. ネットモールド法について	155
3. 細胞性食肉の種類とそれらの特性	157
4. 安全性試験	159
おわりに	160

第4節 3D バイオプリンターを活用したテラーメイド細胞性食肉の創製 161

TOPPANホールディングス株式会社 兒玉 賢洋・北野 史朗

大阪大学 Fiona Louis・松崎 典弥

はじめに	161
1. 3Dプリントによる「和牛」細胞性食肉への挑戦	161
1.1 ウシ初代細胞の回収と分化誘導の検討	161
1.2 3Dバイオプリントによる線維組織の作製	162
1.3 線維組織の配置制御による構造化「和牛」細胞性食肉の作製	164
2. 3Dプリント細胞性食肉の将来技術	165
2.1 肉質のデザイン	165
2.2 家庭用ミートメーカー	165
おわりに	166

第5章 社会実装に向けたルール形成及び需要性向上のための取り組み 169

第1節 細胞性食品の上市環境構築に向けた国内の社会的合意形成の動き 170

一般社団法人細胞農業研究機構 吉富 愛望アビガイル

はじめに	170
1. ルール形成における重要論点	170
1.1 安全性	170
1.2 定義	171
1.3 名称・食品表示	172
1.4 既存産業との関係性	172
1.5 国内外におけるコミュニケーションの推進	173
2. 細胞農業領域におけるルール形成の困難さ	173
3. 国内の細胞農業領域におけるルール形成の動き	173
おわりに	175

第2節 細胞性食品の知的財産法による保護 177

TMI 総合法律事務所 柴野 相雄・山田 拓・鍛治 亮太

はじめに	177
検討	177
1 タネ細胞の知的財産法による保護	177
1.1 特許法	177
1.1.1 物の発明	178
1.1.2 単純方法の発明	178
1.1.3 物を生産する方法の発明	178
1.1.4 小括	178
1.2 不正競争防止法	179
1.2.1 営業秘密	179
1.2.2 限定提供データ	179
1.3 家畜遺伝資源に係る不正競争の防止に関する法	180
2. 細胞性食品のブランド化による保護	180
2.1 商標	180
2.2 地理的表示	181
おわりに	182

第3節 人文社会科学の観点からみた細胞性食肉の受容性に関する課題と展望

弘前大学 日比野 愛子

はじめに	185
1. 細胞性食肉の社会受容性の現状	185
2. 細胞性食肉の社会受容性の課題	186
2.1 「不自然さの認知」への対応	186
2.2 信頼	187
2.3 技術の情報をいかに伝えるか	188
3. 細胞性食肉をめぐる社会課題の多層性	189
4. 社会受容性の醸成への展望	189
おわりに	190

第4節 細胞培養技術と伝統料理技術の融合

雲鶴 島村 雅晴

はじめに	193
1. 飲食業界と細胞性食品	193
1.1 飲食業界の役割	193
1.2 飲食業界における細胞性食品の位置づけ	194
1.3 従来の肉との棲み分け	194
1.4 細胞性食品は食料か嗜好品か	195
2. 調理特性と培養技術	195
2.1 求められる調理特性・機能・品質	196
2.2 生肉販売と加工肉・加工食品販売	197
2.3 美味しければハイブリッドでも良いのか	197
2.4 鶏細胞性食肉の食味	197
おわりに	198

第6章 細胞農業領域に係るグローバルトレンド

第1節 細胞農業を取り巻く国際政治

東京大学 井形 彬

はじめに	202
1. 各国政府が細胞農業技術を促進する理由	202
1.1 食料安全保障の強化	203
1.2 新規産業の育成	204
1.3 環境や人権といったサステナビリティへの貢献	205
2. 細胞農業分野における民間の動き	207

2.1 細胞性食品に関する世界の業界団体	208
2.2 細胞性食品に関する世界の主要な会議体	209
3. 国際機関における細胞農業	211
おわりに	212
第2節 Life Cycle Assessment and Environmental Impact of Cultivated Meat	217
Dr. Dean Powell and Dr. Elliot Swartz	
Introduction	217
1. Sinke et al. (2023) Life Cycle Assessment of Cultivated Meat	218
1.1 Life Cycle Assessment design	218
1.1.1 Scenario Variation Sensitivity Analyses	219
1.1.2 Conventional meat comparison	220
1.2 Comparative environmental impacts of cultivated meat production	221
1.2.1 Lower carbon footprint	222
1.2.2 More land available for climate mitigation & biodiversity	223
1.2.3 Reduced air pollution	223
1.2.4 Eutrophication	224
1.2.5 Reduced soil acidification	224
1.2.6 Water use	225
1.2.7 Efficient resource utilisation	225
1.2.8 Other potential benefits	225
1.3 Sensitivity analyses	226
2. Other LCAs of cultivated meat	227
3. Conclusion	228
インタビュー1 Forsea Foods社	233
インタビュー2 UPSIDE Foods社	241
インタビュー3 Wildtype社	251

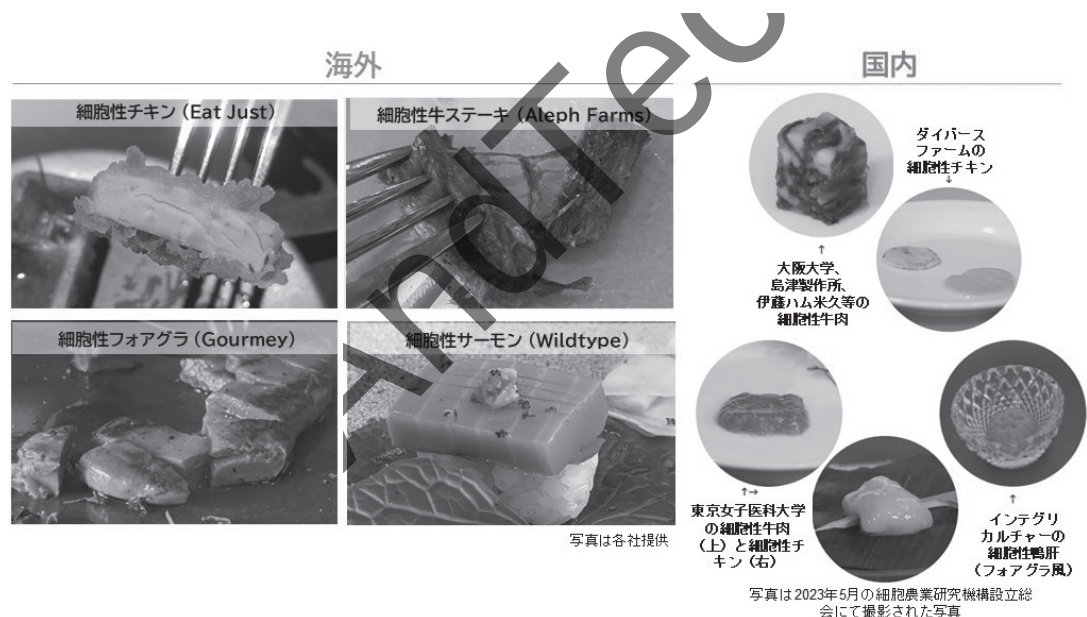
はじめに

～細胞農業産業が注目される背景～

一般社団法人細胞農業研究機構
吉富 愛望アビガイル

細胞農業、細胞性食品とは

「細胞農業」とは動物や植物から採取した細胞に栄養を直接与えることで増やし、それを食品として生産する技術だ。「細胞性食品」とは細胞農業技術を用いて生産した肉や魚などを指し、細胞性食品のうち、「肉」にあたるものは「培養肉」と呼ばれることもある。世界各国で開発が進んでいる。



世界で開発されている細胞性食品

なぜ細胞性食品なのか

世界的な人口増加からたんぱく質需要は今後も増加するとみられる一方で、地球温暖化の進行や頻発する異常気象、さらに新興国における食肉や養殖魚の需要拡大等によって、穀物をはじめとする飼料資源の需給がタイトになる可能性が高まりつつある。国連経済社会局（UNDESA）が発表した『世界人口推計（2022年版）』によると、現在の世界人口は約80億人であり、2030年には85億人、

2050年には97億人、2080年には104億人に達すると推定されている。この世界総人口の増加や開発途上国の経済発展により高まる動物性たんぱく質の需要に対して、伝統的な畜産業により全てをサステナブルな形で供給することは難しいのではないかと、という懸念が生じている。

また、国際紛争に起因する穀物需給の乱れによって、食品や飼料の価格高騰に対する備えも必要な状況にある。例えば、ロシアのウクライナ侵攻により食料・飼料・肥料の供給が減少したことによる価格高騰を受けて、食料安全保障の重要性に対する認識が国際的に高まっている。

たんぱく質の安定供給が脅かされる可能性に備える観点で、新たに代替たんぱく質源を見出す取り組みが進んでいる。代表例が代替肉と呼ばれ、植物性代替肉や細胞性食品等で構成される。植物性代替肉とは、大豆ミートなどに代表され、「肉」の食体験を模した形の食経験を得ることができるようデザインされたもので、穀物を原料に作られた、従来の肉と化学的には大きく異なるものである。また、「細胞性食品」とは細胞農業技術を用いて生産した肉や魚などを指し、細胞性食品のうち、「肉」にあたるものは「培養肉」とも呼ばれることもある。細胞農業とは動物や植物から採取した細胞に栄養を直接与えることで増やし、それを食品として生産する技術である。細胞性食肉は、粗く言うと肉の細胞を培養して原料とするため、植物性代替肉と異なり化学的には従来の肉に近くなる。例えば2023年6月にアメリカ政府から販売承認が下りたUPSIDE Foods社の「培養肉」（鶏肉）は、99%が鶏の細胞でできている。

なぜ代替肉が注目されているのかというと、今後たんぱく質の需要が拡大していくなかで、穀物を育てそれを家畜に消費させて肉を生産するよりも、人間が穀物を直接消費したり、家畜から採取した細胞に穀物由来の栄養を直接与えることで増やし、それを食品として生産したりする方が、少ない資源でたんぱく質を得ることができると考えられているためである。三井物産戦略研究所の2020年11月のレポート「培養肉生産技術の課題と今後の展開」によると、従来の家畜の場合、100%のエネルギーを有する穀物から4%のエネルギー分の肉が生産され、残りは糞・尿、熱、メタンとして放出されるが、穀物を直接人間が食すのであれば75%のエネルギー、細胞性食肉の場合70%を摂取できることになる。国際的な穀物市況等の影響を比較的受けにくいたんぱく質源を確保しておくことは、国内で消費される飼料の約75%を輸入に頼る日本にとって、必要なことではないだろうか。

また、より少ない資源で生産できるという意味で、代替肉は従来のたんぱく質生産に比べて環境負荷が小さく、持続可能性が高いととらえることができる。Good Food Instituteが2021年に発表した“Anticipatory life cycle assessment and techno-economic assessment of commercial cultivated meat production”によると、細胞性食品は既存の肉の生産に比べて、動物の種類によるが20～90%環境負荷を減らすことが可能だとの試算がある（ただし、再生エネルギーを活用した場合）。この背景から、サステナブルな食料生産の観点でも細胞性食品は注目されている。

代替肉の中でも細胞性食品が注目される背景の一つとして、植物性代替肉で「肉食」への消費者需要を満たすには限界があり、環境負荷等に配慮しながらより本物に近い食経験を得たいというニーズはあり続けるのではないかと、という推察があるためだろう。ちなみに、細胞性のシーフードについても開発が進むが、この背景については第3章第4節の“Cell-Cultured Seafood : A Supply Chain Solution to Supplement Global Demand”にて記載されている。

細胞性食品の作り方

企業によって少しずつ作り方が異なるものの、基本的には下記の5ステップで構成される。

①細胞の採取

動物の中には様々な細胞があり、企業によって使用するものが異なる。例えば筋肉に成長する筋芽細胞を動物の筋肉から採取したり、その他多様な幹細胞を使ったりする企業もある。幹細胞を使う場合、幹細胞をそのまま食べるのではなく、筋肉や脂肪など様々な細胞に成長させる工程が必要だ。幹細胞を動物から取り出し、動物の体の外で、動物の体内で通常起きているような、幹細胞の増殖と分化（筋肉や脂肪など様々な細胞に成長させること）を再現する。幹細胞の段階から動物の外で細胞を育てる細胞性食品は、海外では主流の作り方の一つとなっている。

②細胞の保存・回収及び③セルバンクでの管理

この工程には、大量培養に向けた細胞の前処理の工程を含む。例えば、ごく少量の筋肉のかたまり（筋肉組織）をバラバラの細胞にほぐすなどして増やしやすくしたり、細胞を保存したりする工程があったりする。その際に使う保存液などは医療現場では使用されているが、食品として使用されたことがないものを使う場合がある。この場合、使用した保存液が残らないようにするための施策や、残留基準について業界ですり合わせをする必要がある。また、株化の処理がなされる場合もある。動物からいただいた細胞を何回か（何世代分か）培養していくなどの処理をすると、増える能力の高い細胞が生まれるときがある。こういった細胞を株化細胞と言い、株化細胞を選んで量産に用いる企業がある。株化の処理をせずに、採取した動物の細胞をそのまま培養する方法もある。本書執筆時点では、日本国内で開発されている細胞性食品は、この株化をしていない細胞を使用したものが主という理解だ。

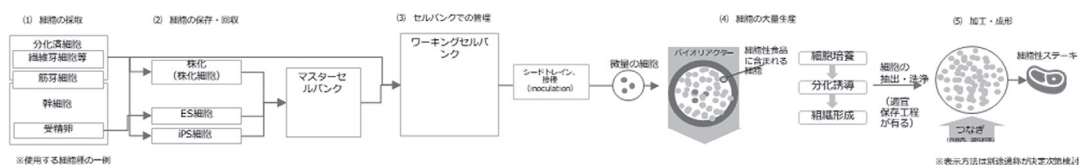
他にも、大量培養工程④に向けての準備的な工程として、いきなり数千リットルのバイオリアクターで培養するのではなく、段階的に培養規模を大きくする工程も含まれる。

④細胞の大量培養と分化

穀物由来等の糖やアミノ酸、成長因子等を含む培養液の中で、細胞を培養する工程。培養液中に細胞を浮遊させて培養する場合や、表面積の広い（スポンジのような隙間が空いた）食品素材の中で細胞を育てる場合などがある。後者の場合、隙間の多い素材の中で細胞を育てると、素材の表面に細胞が付着し、その表面を「足場」として細胞が増殖する。このとき、素材の隙間を栄養が詰まった培養液が流れるため、細胞にまんべんなく栄養を行き渡らせることができる。

⑤加工・成形

現時点では増やした細胞をそのまま食べずに大豆ミートなどの「つなぎ」と混ぜて形を整え、食感を出す商品が代表的である。ただ細胞を増やしただけの物は「すり身」のような状態で、肉や魚の食感に似せるにはこの「つなぎ」の使用が重要なことが多い。「つなぎ」を使用する意味で、細胞性食品は増やした細胞を原料とした加工食品ととらえていただければわかりやすいだろう。



細胞性食品の製造工程（細胞農業研究機構作成）

細胞性食品業界のあゆみ

世界で初めて細胞農業により作られた食品は、2013年の細胞性食肉バーガーだ。オランダ・マーストリヒト大学のチームが開発し、当時英国にて試食会が行われた。当時はこのバーガーをひとつ生産するのに、研究費も含めて約3,500万円かかっていたが、技術発展でコストダウンが進んでいる。詳しい詳細は第2章にて触れられている。

食品として安全・安心であることは大前提として、それに加えて食料安全保障や環境負荷の低減に貢献する可能性があるならばと、多くのベンチャー企業や大手企業が開発に参入している。海外では世界的食肉大手のTyson Foods社や穀物メジャーのADM社、国内では日本ハム、味の素などの大手食品企業などが開発や資金面などでの企業連携を進めている。国内のベンチャー企業としては、独自技術で細胞性食品に取り組むインテグリカルチャー社や、細胞性チキン（いわゆる「培養鶏肉」）の開発を目指すダイバースファーム社などがある。

こういった産業界での動きに対応し、本領域におけるルール形成でイニシアチブをとる国及び国際機関も出てきた。詳細は第6章の「第1節 細胞農業を取り巻く国際政治」にて紹介があるが、シンガポール政府は2019年に細胞性食肉等の新規食品“Novel Food”について、市場投入前の安全性評価を求める食品規制を導入し、翌年の2020年12月に世界で初めて細胞性鶏肉の販売承認を行った。また米国では、アメリカ食品医薬品局（FDA）が2022年11月に UPSIDE Foods 社の、2023年3月に GOOD Meat 社の細胞性鶏肉の安全性について「これ以上質問はない」とコメントし、事実上の安全性確認の完了を発表。その後両者についてアメリカ合衆国農務省（USDA）が食品表示の議論を終えたと発表。両社の細胞性鶏肉に対して、「細胞培養」チキンという用語を使用したラベルを承認した。主要国における当該産業の振興の動きや細胞性食品の上市に対応し、国際機関においても議論が進んでいる。2022年11月、FAOとWHOが細胞性食品に関する初の専門家会合を開催し、名称や安全な生産工程に関する初期的な考え方を発表したほか、2023年4月頃には細胞性食品の安全性に関する考え方の指針を発表した。

日本では、2022年6月に自民党の有志議員が「細胞農業によるサステナブル社会推進議員連盟」を設立。甘利明前幹事長、松野博一官房長官、赤沢亮正衆院議員が共同代表を、中山展宏議員が事務局長を務め試食のルール等について検討を開始した。また、2023年2月の衆院予算委員会にて中山展宏議員からの質問に対して、岸田首相は「細胞性食品を含むフードテックは、持続可能な食料供給の実現の観点から重要な技術だ」と答弁した。農林水産省は2023年2月に、細胞性食品に関する各種検討を進める内容を含んだフードテック推進ビジョンを発表（ただし、細胞農業市場に不可欠な食品と

しての安全性要件の設定時期等について明確な時間軸を示していない)。厚生労働省は2022年12月に開催された薬事・食品衛生審議会食品衛生分科会新開発食品調査部会にて、細胞性食品のハザードについての情報収集を開始、同年3月及び8月に開催の同部会にて事業者ヒアリングを実施した。経済産業省は令和4年度補正予算としてバイオモノづくり革命推進事業に3,000億円を確保（細胞性食品の社会実装に係る取り組みも補助対象）した。

国内の民においても、細胞性食品の上市に向けた動きが進んでいる。まず筆者が代表理事を務める一般社団法人細胞農業研究機構がルール形成に係る議論を行っている。同機構の前身組織（細胞農業研究会、2019年に設立）は、細胞性食品の販売や細胞の知財等に係る論点整理などを目的とした提言書を作成し、2022年11月に各関係省庁に提出した。現在は①知財、②名称、③安全性・品質管理、④定義・食品表示、⑤コミュニケーション推進、⑥大阪万博の6つのテーマに基づく委員会を主体として、提言作成活動に従事する。そのほか、産業振興に向けた情報発信や企業交流の促進、国際的な議論への日本の参画を促す国際機関・海外当局・国際NPOを含む様々なステークホルダーとの意見交換や、国内におけるルール検討の議論が分散しないよう外部の業界団体との連携を行う。例えば国内では、バイオエコノミーの全体的な推進に注力する一般財団法人バイオインダストリー協会と、フードテックに関する研究会（Food Bio Plus研究会）を通じて連携している。2023年5月には設立総会を実施し、国会議員や関係省庁、本領域に関心のある企業、海外の大使館関係者、メディア等を招き、5種類の細胞性食品の展示・炙りの実演を実施した。

各章の位置づけ

本章にて細胞性食品が注目される背景について紹介をしたが、一方で当該食品に期待されている社会的役割の実現可能性についてはまだ様々なことがわかっていない。『第一章 細胞性食品領域の市場拡大における課題』（一般社団法人細胞農業研究機構 吉富愛望アビガイル）では、細胞性食品市場を検討する上で重要かつ議論が分かれる4つのポイント（市場規模、供給力や価格競争力、食経験（味・香り・食感等）の再現、他国の検討状況）について紹介する。

当該4つのポイントでも紹介された、「市場規模」や喫緊の課題である「供給力・価格競争力」に向けて、「コスト削減」の観点で様々な取り組みやその実現可能性や展望についてまとめたのが『第2章 細胞性食品の実現に向けて～新たな培地、基盤技術の探索』である。『第1節 細胞性食品領域における培地の位置づけと最適化』（株式会社マイオリッジ 鈴木 健夫）では、細胞性食品の生産コストが大きく影響される培地に焦点を当て、培地に含まれる成分の選定や組み合わせの最適化の取り組みについて国際的な議論も踏まえて論じる。『第2節 細胞性食品の製造に必要な成長因子』（味の素株式会社 知念 秋人）では、成長因子に焦点を当て、その製造方法や要求事項（コスト、品質、安全性）、その開発の実現可能性について深堀する。『第3節 微細藻類と動物細胞を用いた細胞性食肉生産システムの創出』（東京女子医科大学 山中 久美子・清水 達也）では、微細藻類の基礎培地や細胞性食品生産への利用に着いて論じる。『第4節 培養肉製造および安全性確保に向けた取り組みと培養装置の開発』（インテグリカルチャー株式会社 近藤 裕昭・新谷 圭佑・川島 一公）では同社の開発する

CulNet systemにて成長因子を製造する生産システムについて紹介する。

「市場規模」や喫緊の課題である「供給力・価格競争力」に向けて、「大量培養技術」の観点で様々な取り組みやその実現可能性や展望についてまとめたのが『第3章 大量生産に向けた取り組み～より多くの消費者に届けるために～』である。『第1節 細胞生食品生産に向けた大量細胞培養』（東京都市大学 坂口 勝久）では、細胞培養における現状の論点や課題の紹介、東京都市大学にて研究が進む細胞培養方法を紹介する。『第2節 培養肉の大量培養・大量生産に適したバイオリクターの開発とスケールアップ』（佐竹マルチミクス株式会社 加藤 好一）では、より培養槽に求められる物理的な条件やそのスケールアップにおける論点、様々なバイオリクターの特徴について解説する。また第3章では、国内における知見の蓄積が肉と比べて少ないと言える細胞性シーフードの開発会社であるBlueNalu社及びUMAMI Meats社（執筆時の社名。その後UMAMI Bioworks社に改名）より、現在の魚介類の調達を取り巻く様々な課題や、企業としての取り組みについて深掘する。

「食経験（味・香り・食感等）の再現」について国内における様々な取り組みを詳しく論じているのが『第4章 食品に適した形状や品質の追求～組織化や味の再現等に係る研究』である。『第1節 細胞シート技術によって作られるスキャフォールドフリー培養肉』（東京女子医科大学 田中 龍一郎）では、細胞シート技術を使い、スキャフォールドフリー培養肉を作る試みについて、細胞シート技術の基本的な仕組みや細胞シート技術を使った培養肉の特性、実用化に向けた課題の観点で解説する。『第2節 食肉の食感を再現した培養肉製造技術の開発』（福井工業大学 古澤 和也）では、食肉の食感を再現する上で特に重要な培養肉の粘弾性に焦点を合わせ、これらの研究開発を行う上での基礎となる知識や実際の研究開発事例について紹介する。『第3節 ネットモールド法による細胞結合技術—人工臓器から細胞性食品（細胞性食肉）まで』（ティシューバイネット株式会社／ダイバースファーム株式会社 大野 次郎）では、もともと人工臓器を作成する手法として開発されたネットモールド法を細胞性食肉に応用する取り組みについて解説する。『第4節 3Dバイオプリンターを活用したテラーメイド培養肉の創製』（凸版印刷株式会社 児玉 賢洋・北野 史朗／大阪大学 Fiona Louis・松崎 典弥）では、骨格筋や脂肪、血管の線維組織を3Dバイオプリント技術により構造化し作製した細胞性「和牛」について紹介するほか、3Dバイオプリント技術の細胞農業への応用の可能性についても言及する。

細胞農業にはコストダウンや量産化技術の確立等の課題が残り、さらなる研究開発が必要とされるが、加えて日本では規制当局において、細胞性食品の製造・販売や輸出入に関する安全性の考え方に関する整理や食品表示に関する具体的な検討が進んでおらず、管轄省庁の決定等（以下、「上市環境の整備」と総称する）の目途が立っていない状況にある（2023年8月執筆時点）。『第5章 社会実装に向けたルール形成及び需要性向上のための取り組み』では、販売のための環境作りにおいて重要な国内における「ルール形成」にかかる現状や、上市後の需要促進に関わる活動について紹介する。前者に関しては、ルール形成における具体的な論点も交えながら『第1節 細胞性食品の上市環境構築に向けた国内の社会的合意形成の動き』（一般社団法人細胞農業研究機構 吉富 愛望アビガイル）にて紹介する。また、特に細胞農業産業の成長や、既存の畜産領域との共存に欠かせない論点の一つとして

『第2節 細胞性食品の知的財産法による保護』（TMI総合法律事務所 柴野 相雄・山田 拓・鍛冶 亮太）について触れる。需要促進の観点では、まず社会科学的観点から『第3節 人文社会科学の観点からみた培養肉の受容性に関する課題と展望』（弘前大学 日比野 愛子）にて培養肉に対する人々の意識を扱った研究を概観し、受容性に関する課題について言及するほか、今後の展望について述べる。加えて、細胞性食品を調理する側の視点も重要である。本書では『第4節 細胞培養技術と伝統料理技術の融合』（雲鶴 島村 雅晴）にて和食料理店に従事する傍ら、自ら細胞培養までを行う料理人の観点で、細胞性食品への期待について語っていただく。

さて、本業界を語る上で外せないのが海外での動向である。海外における細胞農業への注目度の高さは、国内での本産業のダイナミクスに大きく影響することから、『第6章 細胞農業領域に係るグローバルトレンド』の第1節では『第1節 細胞農業を取り巻く国際政治』（東京大学 先端科学技術研究センター 井形 彬）と題して、主要国における細胞農業領域の推進背景や内容について解説する。また、国内の研究開発のみでは見えてこない技術的な展望について、グローバルでは示唆に富んだ研究発表が多くなされている。例えば細胞性食品のライフサイクルアセスメントの研究『Life Cycle Assessment and Environmental Impact of Cultivated Meat』に関して、国際的に代替たんばく質産業の推進を目的に活動するThe Good Food Institute (GFI) の専門家（Dr. Dean Powell, Dr. Elliot Swartz）より紹介する。また、本書の最後には、個別企業の取り組みとして本書編集者が海外企業へ個別インタビューを行った内容についてご共有する。

本書によってより多くの研究者や企業、非営利の機関や団体、行政等が細胞性食品の可能性や課題に触れ、異なるステークホルダー間のご縁につながることを祈る。

（注）

細胞性食品は、培養肉や培養食品等、様々な呼び方で表現される。本書籍では、細胞性食品という呼称を優先して使用するが、各執筆者による記載を優先して異なる呼称のまま掲載する。また、細胞性食品に関する技術発展の考え方や、食品として将来どのように社会へ受け入れられるかといった展望に関しても、各執筆者により見解が異なる場合があることにご留意頂きたい。

第 1 章

細胞性食品領域の
市場拡大における課題

はじめに

『はじめに～細胞農業産業が注目される背景～』にてご紹介したように、可能性のあるものとして注目されている細胞性の食品だが、期待されている社会的役割の実現可能性についてはまだ様々なことがわかっていない。本産業における透明性の低さは、後続の節『第5章第1節 細胞性食品の上市環境構築に向けた国内の社会的合意形成の動き』にて紹介するルール形成の難易度を上げていると言っても過言ではない。本章では、細胞性食品市場を検討する上で重要かつ議論が分かれる次の4つのポイントについて紹介する。

- ①**市場規模**：すなわち「本当にこの食品は消費者に受け入れられるのか」、「潜在的需要はいかほどか」
- ②**供給力や価格競争力**：すなわち「量産化・コストダウンの実現可能性やタイムライン」
- ③**味・香りの再現**：すなわち「味や香り、触感等の『従来の動物由来の食品と比較した時の』再現度の将来性」、「味や香り、触感等の『細胞取得元の動物の肉の味と比較した時の』再現度の将来性」
- ④**ルール形成活動の進捗**：すなわち「日本や他国の細胞性食品に対する法的整理や枠組み形成の内容やタイムライン」

1. 市場規模

数多くの市場規模予測がなされているが、動物性たんぱく質市場の成長見込みからトップダウンで求める方法は市場規模を大きく見積もり、コスト等が従来の肉と同等となる時点や代替する市場が「加工肉」か「食肉か」等の違いなどの技術的な制限に着目して実施する試算は比較的小さく見積もる傾向があると思料する。主要な予測の概要を下記に整理する。

コンサルティングファームのA. T. Kearney社による予測（2019年の試算）¹⁾では、細胞性食肉（cultured meat）の市場規模は2040年までに\$630bnとなるとみている。成長ドライバーとしては下記の3点を想定している。

- (1) 人口増加がインドやアフリカのような肉消費量の少ない地域で生じるとともに、非動物性タンパク質への消費者の嗜好が増大する。
- (2) 細胞性食肉への移行過程では、植物性肉が覇権をとり、最終的には細胞性食肉が最も大きな割合を占めるようになる。
- (3) 細胞性食肉に関する消費者受容や法的整備が世界的に進歩する。

コンサルティングファームのBCG社による予測（2021年3月の試算）²⁾では、2035年までに動物の育成細胞由来の代替たんぱく質源（Animal-cell-based）は600万トン（\$10/kgの場合、\$60bn）生産されると予測している。同予測は、代替肉全体の成長率予測に加え、細胞性食肉の価格パリティ

到達時点が2032年である点を踏まえて試算された。このとき、細胞性食肉が既存の食肉と同等のコスト・味・触感に到達し、既存の肉に比して対等な選択肢となる時点をパリティと呼ぶ。

BCG社は、代替肉全体の成長率予測として、まずベースケースを①「人々の環境意識・持続可能性への意識が高まる」、かつ②「パリティに達する前は、消費は現在の水準で成長し、パリティ到達後は消費が倍増し、5年間はその高水準で成長を続け、その後は5%の成長率を維持する」、と設定。その結果、2035年までに代替肉市場は世界のタンパク質市場全体の11%を占めると結論づけている。同社は\$3/kgと仮定し、2035年では代替肉市場規模は全体で\$290bnと予想している。代替肉市場規模の中で細胞性食肉の規模はたったの\$60bnと予想されている理由として、パリティ到達時点が2023年の植物性代替肉に比べ、細胞性食肉は2032年と到達時点が遅く推定されている点が大きだろう。

コンサルティングファームのMcKinsey社による予測（2021年6月の試算）⁴⁾では、細胞性食肉の市場規模は2030年までにダウンスайдケースで\$5bn、アップサイドケースで\$25bnとされている。各ケースの違いとしては下記の2点がある

- (1) 代替肉が味・食感・価格の面で代替できるのが、加工肉に限られるか、切り出した肉にも広がるか。
- (2) 市場が大きくなる地域が欧米、アジアの一部に限られるか、中国・ブラジル・インドにも広がるか。

市場リサーチ会社Polaris Market Research and Consulting社による予測（2022年2月の試算）³⁾では、2021年時点で細胞性食肉の世界の市場規模は\$133m、以降16.2%のCAGRで成長し、2030年には\$515mの市場になるとされている。成長ドライバーとしては下記の3点を想定している。

- (1) 世界的な人口増加により、タンパク質需要が増大
- (2) 環境の持続可能性や非採食主義の食生活に対する健康上の懸念の高まり
- (3) 組織工学の技術の進歩、研究への投資増大

以上をまとめると、市場規模はおおまかには下記についてどのような前提を置くかで大きく変わり得るものであると理解できる。

- (1) 人口増加等による非動物性タンパク質への需要予測
- (2) サステナビリティや健康への消費者意識の高まり
- (3) 価格・味・触感等に係る技術革新（投資額と一部連動）

表1 細胞性食肉の市場規模に対する各社予想

予測者	市場規模
A.T. Kearney 社による予測（2019年の試算） ¹⁾	細胞性食肉（cultured meat）の市場規模は2040年までに\$630bn
BCG 社による予測（2021年3月の試算） ¹⁾	動物の細胞ベースの代替たんぱく質源の市場規模は2035年までに600万トン（\$10/kgの場合、\$60bnの市場）
McKinsey 社による予測（2021年6月の試算） ³⁾	細胞性食肉の市場は2030年までに\$5bn～\$25bn
Polaris Market Research and Consulting 社による予測（2022年2月の試算） ⁴⁾	細胞性食肉の市場は2030年には\$515 m
（参考）Barclays 社による予測 ⁵⁾	2040年に\$450bn

2. 供給力や価格競争力

供給力や価格競争力の将来展望に関しては、様々な機関が予測を出しているため、本節にて紹介する。

海外の細胞性食品開発企業の中には、量産化に向けて大規模生産設備を構築した、といった発表を行った企業が一定存在する。直近では2023年5月9日にオランダのMosa Meat社が世界最大規模の細胞性食肉生産用設備“scale-up facility”（広さ2,760 m²）のオープンを発表した⁶⁾。ほかにも、細胞性トロを開発するBlueNalu社は、2027年に現在建設中の大規模施設での生産を目指し、140,000 m²の敷地で100,000リットルのターミナルバイオリアクター 8台で高級シーフードを年間600万ポンド生産する予定と発表している⁷⁾。寿司用の培養サーモンを開発するWildtype社は、2021年に世界初のパイロット生産工場をサンフランシスコに開設。新工場は、年間50,000ポンドの培養サーモンを生産でき、最大容量では200,000ポンドに達するとの報道がある⁸⁾。しかし、一方で現時点ではどれほどの量の生産が可能なのかは企業秘密であることが多く、実態は開発者にしか分からない状況である。

価格競争力に関しては2021年ごろに論争が巻き起こったため、その内容についてご紹介する。国際的に代替たんぱく質生産の技術振興を行う非営利団体Good Food Instituteから委託を受け、シンガポール政府（Singapore's Agency for Science, Technology and Research (A*STAR)）や5社の細胞性食品開発企業を含む15以上のインダストリーパートナーの協力のもと、オランダの環境コンサルティングファームCE Delft社が試算した結果によると、2030年までに細胞性食品（細胞100%の場合）の生産コストは1 kgあたり数百円程度となる可能性がある⁹⁾。また、Good Food Instituteに所属するElliot Swartz博士によると、細胞性食品の経済性を考えるうえでは、もちろん培養液・バイオリアクターの技術革新の観点も重要であるが、加えて次の点も考慮して総合的に判断すべきと述べている¹⁰⁾。

- ・細胞性食品は細胞の含有量が100%である必要はなく、植物性の原料と混合したもの（「ハイブリッド」と呼ばれる）を生産すれば、コストを下げる事が可能。
- ・細胞農業により生産したタンパク質を化粧品や食品産業で活用する、知財としてライセンス料を取

細胞性食品の将来展望
細胞性食肉の普及における課題や実装への技術・社会的取り組み

発行 令和5年 12月22日発行 第1版 第1刷

定 価 55,000円（本体 50,000円 + 税 10%）
監 修 吉富 愛望アビガイル（一般社団法人細胞農業研究機構）
鈴木 健夫（株式会社マイオリッジ）
井形 彬（東京大学先端科学技術研究センター）
発行人・企画 陶山正夫
編 集・制 作 牛田孝平、金本恵子、渡邊寿美
発 行 所 株式会社 AndTech
〒214-0014
神奈川県川崎市多摩区登戸 2833-2-102
TEL：044-455-5720
FAX：044-455-5721
Email：info@andtech.co.jp
URL：https://andtech.co.jp/

印 刷・製 本 倉敷印刷株式会社