

No. 1113 (2020. 9. 15)

## 代替肉の開発と今後の展開

—植物肉と培養肉を中心に—

はじめに

### I 代替肉が注目される背景

- 1 食料供給
- 2 環境保全
- 3 動物福祉

### II 代替肉の需要動向

- 1 フレキシタリアンの増加
- 2 消費者の意識
- 3 市場規模

### III 代替肉の開発経緯と現状

- 1 植物肉
- 2 培養肉

### IV 代替肉をめぐる論点

- 1 植物肉—「健康」をめぐる議論—
- 2 培養肉—コスト削減と風味の改善—
- 3 代替肉開発の新しい展開

おわりに

キーワード：植物性たんぱく、クリーンミート、菜食主義、添加物、フードテック

- 植物性たんぱくから作る植物肉や、畜産動物の細胞を培養して作る培養肉の普及は、畜産に伴う食料供給、環境保全及び動物福祉の悪化への懸念を緩和する可能性がある。また、消費者の動向や意識からは、今後の市場拡大が見込まれる。
- 植物肉は既に商品化されている。近年、食感や風味が大きく改善し、食品メーカー、小売店、外食産業などが次々に参入している。培養肉は未だ研究段階にあるが、コスト削減などが進んでおり、近い将来に商品化される可能性がある。
- 植物肉が健康的かどうかについては、情報開示や丁寧な説明が求められる。培養肉は商品化に向けたコスト削減や風味の改善などが課題である。また、添加物を使わない植物肉や3Dフードプリンタの活用など新しい取組も始まっている。

国立国会図書館 調査及び立法考査局

農林環境課長 えんどう まさひろ 遠藤 真弘

## はじめに

世界的に畜産動物（家畜）に由来する食肉（畜肉）の消費量が増加する一方で、畜産の拡大により、食料供給、環境保全、動物福祉などの悪化が懸念されている。そうした中、これらの解決策として、畜産に依存しない畜肉の代替食品（代替肉）が注目を集めている。政府の「食料・農業・農村基本計画」（令和2年3月31日閣議決定）には、食料安定供給を確保する施策の1つとして、代替肉の研究開発等が掲げられた<sup>1</sup>。

本稿では、植物性たんぱくを原料とする食品（植物肉<sup>2</sup>）と、家畜の細胞を培養したものを原料とする食品（培養肉<sup>3</sup>）を取り上げ、これらが注目される背景と近年の開発と事業化の動向を紹介する。また、今後の普及に向けた論点を示す。

## I 代替肉が注目される背景

以下に示すように、畜産の拡大による食料供給、環境保全、動物福祉の各側面への悪影響が懸念されている。これに対し、代替肉は、従来の畜産とは全く異なるプロセスで生産されるため、代替肉が普及すれば、これらの懸念が緩和される可能性がある。

### 1 食料供給

世界食糧農業機関（FAO<sup>4</sup>）は、今後の人口増加及び1人当たり畜肉消費量の増加により、2010年から2050年にかけて世界全体の畜肉消費量が1.7倍、特に開発途上国では2倍以上に増加すると予測し、需要に見合った供給が困難になりつつあると警鐘を鳴らしている<sup>5</sup>。

また、畜産は多くの穀物を消費する。世界のトウモロコシ消費量の約6割、小麦消費量の約2割が飼料用である<sup>6</sup>。畜肉1kgの生産に必要な穀物の量は、牛肉で11kg、豚肉で6kg、鶏肉で4kgとされる<sup>7</sup>。しかし、近年、穀物の収穫面積は増えておらず、面積当たり収穫量（単収）の増加によって収穫を増やしているのが実情である<sup>8</sup>。地球温暖化の影響などから、今後は単収を

\* 本稿におけるインターネット情報の最終アクセス日は2020年8月24日である。

<sup>1</sup> 「食料・農業・農村基本計画」（令和2年3月31日閣議決定）p.28.

<sup>2</sup> 本稿では、植物に由来し、かつ畜肉に似せている点に着目し、「植物肉」（Plant-based Meat）を用いる。豆腐やテンペ（インドネシアの伝統的な大豆発酵食品）のように、畜肉の代用品となり得るが畜肉に似せていない食品（Meat Substitutes / Alternatives）とは区別する。

<sup>3</sup> 本稿では取り上げないが、動物の細胞ではなく菌類を培養したものを原料とする代替肉も製造されている。例えば、イギリスでは、発酵によって菌類（糸状菌）を培養し、その菌体からマイコプロテイン（Mycoprotein）と呼ばれる素材を得て代替肉を製造する技術が確立され、1985年から食品として販売されている。たんぱく質と食物繊維を豊富に含んでおり、かみごたえがあつて鶏肉に近い味がするという。Jack Edelman, “The Development of a New Food,” *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, Volume 43 Issue 4, 1988, p.280.

<sup>4</sup> Food and Agriculture Organization of the United Nations

<sup>5</sup> FAO, *World Livestock 2011: Livestock in food security*, Rome: FAO, 2011, pp.78-80. <<http://www.fao.org/3/i2373e/i2373e.pdf>>

<sup>6</sup> アメリカ農務省（United States Department of Agriculture）のPS&Dウェブサイト <<https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/downloads>> で公表されている「PSD Reports」のうち、「World Corn and Barley: Supply and Demand」及び「World Wheat and Coarse Grains: Supply and Demand」のデータを参照した。

<sup>7</sup> 農林水産省「知ってる？日本の食料事情」2019.9, p.2. <[https://www.maff.go.jp/j/zyukyu/zikyu\\_ritu/attach/pdf/panfu1-38.pdf](https://www.maff.go.jp/j/zyukyu/zikyu_ritu/attach/pdf/panfu1-38.pdf)>

<sup>8</sup> 農林水産省大臣官房政策課食料安全保障室「2050年における世界の食料需給見通し」2019.9, p.12. <<https://www.maff.go.jp/j/press/kanbo/ampo/attach/pdf/190917-1.pdf>>

増やせなくなる可能性も指摘されており<sup>9</sup>、畜産の拡大は穀物不足の要因にもなり得る。

## 2 環境保全

畜産は、温室効果ガスである二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）、メタン（CH<sub>4</sub>）、亜酸化窒素（N<sub>2</sub>O）を排出する。その排出量は、他分野を含めた総排出量の14.5%を占めており、畜産は地球温暖化の一因となっている<sup>10</sup>。主な排出源は2つある。まず、牛などの腸内ではメタンが発生し、「げっぷ」などとして排出される。

もう1つは、畜産飼料に関連した排出である。森林は成長に伴い二酸化炭素を吸収するため、飼料用の農地や牧草地を確保するために森林を伐採すれば、自然破壊をもたらすだけでなく、二酸化炭素の吸収源が消失する。世界最大の畜肉輸出国とされるブラジルは、牧草地を拡大するためにアマゾンの森林を破壊しているとして国際的な非難を浴びている<sup>11</sup>。また、飼料作物の栽培に使う肥料の製造又は使用においては亜酸化窒素が排出され、飼料を加工又は輸送する際には二酸化炭素が排出される。

畜産の拡大は、水消費の大幅な増加にもつながる。飼料作物を栽培する際、畜肉1kgにつき、牛肉で20.7t、豚肉で5.9t、鶏肉で4.5tの水を必要とするためである<sup>12</sup>。

## 3 動物福祉

従来、畜産は畜産品を安価に提供するため、生産性の向上に努めてきた。例えば、品種改良、栄養を最適化した配合飼料（トウモロコシ等）、檻（おり）やケージなど狭いスペースでの飼育などにより生産の効率化が進化した<sup>13</sup>。しかし近年、動物の視点から生きるに値する生活をしているかを考慮する、いわゆる動物福祉<sup>14</sup>の概念が普及するにつれ、こうした効率化が家畜にとっての福祉を低下させているとの批判が高まった。

国際獣疫事務局（OIE<sup>15</sup>）は、2004年以降、家畜の飼育環境や食肉処理に関する条項を含む動物福祉規約<sup>16</sup>の整備を進めており、OIE加盟各国もこれに沿った対応を始めている。また、アメリカの外食産業や小売店は、動物福祉の向上を求める市民の声に応え、2025年頃までにケージを使わない養鶏によって生産された鶏卵だけを扱うと宣言している<sup>17</sup>。このように家畜の福祉向上は世界的な潮流となっており、畜産業は飼育方法等の見直しを迫られている。

<sup>9</sup> 農研機構ほか「(研究成果) 温暖化の進行で世界の穀物収量の伸びは鈍化する」2017.8.28. <[https://www.naro.affrc.go.jp/publicity\\_report/press/laboratory/niaes/077072.html](https://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/press/laboratory/niaes/077072.html)>

<sup>10</sup> FAO, “Livestock Solutions for Climate Change,” 2017. <<http://www.fao.org/3/I8098EN/i8098en.pdf>>; *idem*, *Tackling Climate Change through Livestock*, Rome: FAO, 2013, p.7. <<http://www.fao.org/3/i3437e/i3437e.pdf>>

<sup>11</sup> 例えば、「牛肉需要 アマゾン壊す 食の風景@ブラジル 違法な開拓、火災原因に」『東京新聞』2020.3.24, 夕刊。

<sup>12</sup> Taikan Oki et al., “Virtual water trade to Japan and in the world,” Arjen Ysbert Hoekstra, ed., *Virtual Water Trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade*, Delft: IHE Delft, 2003, p.225. Water Footprint Network Website <<https://waterfootprint.org/media/downloads/Report12.pdf>>

<sup>13</sup> 佐藤衆介「生きているウシ・ブタ・ニワトリについて思いを馳せてみませんか」打越綾子編『人と動物の関係を考える—仕切られた動物観を超えて—』ナカニシヤ出版, 2018, pp.48-50, 69-70.

<sup>14</sup> 動物福祉は、動物の「5つの自由」（①飢えと渇きからの自由、②不快からの自由、③痛み、けが、病気からの自由、④正常な行動を発現する自由、⑤恐怖と苦悩からの自由）などを実現することを目標としている。

<sup>15</sup> World Organisation for Animal Health. 世界動物保健機関とも訳される。世界の動物衛生の向上を目的とした国際機関。1924年設立。

<sup>16</sup> Terrestrial Animal Health Code, Section 7. “Animal Welfare.” OIE Website <[https://www.oie.int/index.php?id=169&L=0&htmfile=titre\\_1.7.htm](https://www.oie.int/index.php?id=169&L=0&htmfile=titre_1.7.htm)>

<sup>17</sup> Deena Shanker, “Companies Are Rushing to Meet Cage-Free Egg Deadline,” *Bloomberg Wire Service*, 2019.3.8.

## II 代替肉の需要動向

### 1 フレキシタリアンの増加

2008年、国連気候変動に関する政府間パネル（IPCC<sup>18</sup>）のラジェンドラ・パチャウリ（Rajendra Pachauri）議長（当時）は、地球温暖化対策に貢献したいなら週に1度、畜肉を食べない日を設けるべきであると述べた<sup>19</sup>。その後、欧米の大学や公立学校などで、「ミートフリーマンデー」（畜肉を食べない月曜日）<sup>20</sup>などの運動が広がっている。例えば、ニューヨーク市は、2019年から市内の全公立学校で給食に「ミートフリーマンデー」を導入している<sup>21</sup>。このように、食生活の一部で畜肉を避ける消費者をフレキシタリアン<sup>22</sup>という。

近年、フレキシタリアンの割合は、菜食主義者<sup>23</sup>を上回っている。しかも、アメリカでは菜食主義者よりも早いペースで増加している（表1）。アメリカでの市場調査（2018～2019年）によれば、植物肉ハンバーガーを購入した者のほとんど（95%）が、牛肉のハンバーガーも購入するフレキシタリアンであった<sup>24</sup>。代替肉の購入者としてのフレキシタリアンの存在感は今後更に高まりそうである。

表1 消費者に占める菜食主義者とフレキシタリアンの割合

調査対象	世界 28 か国	イギリス	アメリカ	
(調査年)	(2018年)	(2018～2019年)	(2016年)	(2019年)
菜食主義者	11%*	7%	3.3%**	4%**
フレキシタリアン***	14%	14%	33.7%	42%
調査主体	イプソス (Ipsos) 社 (市場調査会社)	ユーガブ (YouGov) 社 (市場調査会社)	ベジタリアン・リソース・グループ (Vegetarian Resource Group) (非営利団体)	

\* 例えば、インドでは宗教などの理由で菜食主義者の割合が41%を占めている。

\*\* アメリカの調査では、菜食主義者の割合はビーガンとベジタリアンの合計であり、ペスカタリアンは含まれない。

\*\*\* 調査によってフレキシタリアンの定義が若干異なる。世界28か国及びイギリスの調査では「主に菜食をするが時には畜肉も食べる。」、アメリカの調査では「外食の際、時々菜食をする。」である。

(出典) Ipsos, “An exploration into diets around the world,” 2018.8, pp.2, 6. <[https://www.ipsos.com/sites/default/files/ct/news/documents/2018-09/an\\_exploration\\_into\\_diets\\_around\\_the\\_world.pdf](https://www.ipsos.com/sites/default/files/ct/news/documents/2018-09/an_exploration_into_diets_around_the_world.pdf)>; YouGov, “Is the future of food flexitarian?” p.4. <<https://campaign.yougov.com/rs/060-QFD-941/images/Is%20the%20future%20of%20food%20flexitarian.pdf>>; Charles Stahler, “How many people are vegan? How many eat vegan when eating out? Asks the Vegetarian Resource Group.” Vegetarian Resource Group Website <[https://www.vrg.org/nutshell/Polls/2019\\_adults\\_veg.htm](https://www.vrg.org/nutshell/Polls/2019_adults_veg.htm)>; “The Vegetarian Resource Group Asks in a 2016 National Poll Conducted by Harris Poll.” *idem* <[https://www.vrg.org/nutshell/Polls/2016\\_adults\\_veg.htm](https://www.vrg.org/nutshell/Polls/2016_adults_veg.htm)> を基に筆者作成。

<sup>18</sup> Intergovernmental Panel on Climate Change

<sup>19</sup> Juliette Jowit, “UN says eat less meat to curb global warming,” *The Observer*, 2008.9.7.

<sup>20</sup> イギリスの歌手ポール・マッカートニー (Paul McCartney) 氏らが2009年に始めたとされる。“About.” Meat Free Monday Foundation Website <<https://www.meatfreemondays.com/about/>>

<sup>21</sup> “Mayor de Blasio, Chancellor Carranza, and Brooklyn Borough President Adams Announce Citywide Meatless Mondays,” 2019.3.11. City of New York Website <<https://www1.nyc.gov/office-of-the-mayor/news/135-19/mayor-de-blasio-chancellor-carranza-brooklyn-borough-president-adams-citywide>>

<sup>22</sup> 「柔軟」を意味する「フレキシブル」と、「ベジタリアン」とを組み合わせた造語である。本来の意味は、「主に菜食をするが時には畜肉も食べる人」であるが、「菜食を週に何回以上」といった明確な基準はない。“Vegan v flexitarian – which will save the planet?” BBC Website <[https://www.bbc.co.uk/food/articles/vegan\\_vs\\_flexitarian](https://www.bbc.co.uk/food/articles/vegan_vs_flexitarian)>

<sup>23</sup> 動物の肉を食べない食生活を営む消費者。ビーガン（乳製品や鶏卵を含め動物由来の食品を一切食べない。）、ベジタリアン（動物の肉を食べない。）、ペスカタリアン（魚介類以外の動物の肉を食べない。）が含まれる。

<sup>24</sup> “Quick Service Burger Buyers Mix It Up Between Plant-Based and Beef,” 2019.7.17. NPD Group Website <<https://www.npd.com/wps/portal/npd/us/news/press-releases/2019/quick-service-burger-buyers-mix-it-up-between-plant-based-and-beef/>>

## 2 消費者の意識

アメリカでの意識調査（2019年）によれば、過去1年間に畜肉を食べる量を減らした消費者は全体の23%に上り、その約3分の1（36%）が畜肉の代わりに植物肉を食べると回答している。日本での意識調査（2018年）では、畜肉が「好きだが、食べるのを控えている」と回答した消費者の割合は、牛肉で22.0%、豚肉で15.6%に上った。畜肉を控える理由としては、両調査とも「健康」が「環境」や「動物福祉」を上回っている<sup>25</sup>。

また、日本での別の調査（2017年）では、植物肉を食事に取り入れたいと回答した消費者の割合は、1980年代以降に生まれた世代（いわゆる「ミレニアル世代」）が50%強、それより上の世代が40%弱であった<sup>26</sup>。これらの調査結果は、今後、消費者の健康志向などを背景に植物肉が普及し、特に比較的若い層で普及が進む可能性が高いことを示唆している。

## 3 市場規模

代替肉市場は今後、国内外で大きく拡大すると予測されており（表2）、世界の食肉産業全体に占めるシェアは1%未満（2019年）から10%（2029年）まで高まるとの見立てもある<sup>27</sup>。植物肉については、現時点では北米と欧州の市場がそれぞれ約4割を占めるが、今後は中国などで市場が拡大すると見られている<sup>28</sup>。

表2 植物肉及び培養肉の市場規模予測

	世界全体	日本
植物肉	【2019年】121億米ドル（約1.3兆円）	【2020年】390億円
	【2025年】279億米ドル（約3兆円）	【2025年】1740億円 【2030年】2860億円
培養肉	【2025年】2.14億米ドル（約229億円）	【2025年】75億円
	【2032年】5.93億米ドル（約635億円）	【2030年】350億円
調査主体	マーケッツアンドマーケッツ (MarketsandMarkets) 社 (市場調査会社)	野村アグリプランニング&アドバイザリー株式会社 (調査・コンサルティング会社)

(注) 報告省令レート（令和2年7月分）に基づき、1米ドルを107円として換算した。

(出典) “Plant-based Meat Market by Source (Soy, Wheat, Pea, Quinoa, Oats, Beans, Nuts), Product (Burger Patties, Sausages, Strips & Nuggets, Meatballs), Type (Pork, Beef, Chicken, Fish), Process, and Region - Global Forecast to 2025,” 2019.5. MarketsandMarkets Website <<https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/plant-based-meat-market-44922705.html>>; “Cultured Meat Market by Source (Poultry, Beef, Seafood, Pork, and Duck), End-Use (Nuggets, Burgers, Meatballs, Sausages, Hot Dogs), and Region (North America, Europe, Asia Pacific, Middle East & Africa, South America) - Global Forecast to 2032,” 2019.9. *idem* <<https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/cultured-meat-market-204524444.html>>; 佐藤光泰・石井佑基, 野村アグリプランニング&アドバイザリー株式会社編『2030年のフード&アグリテック—農と食の未来を変える世界の先進ビジネス70—』同文館出版, 2020, pp. 219-221 を基に筆者作成。

<sup>25</sup> Justin McCarthy and Scott Dekoster, “Nearly One in Four in U.S. Have Cut Back on Eating Meat,” 2020.1.27. Gallup Website <<https://news.gallup.com/poll/282779/nearly-one-four-cut-back-eating-meat.aspx>>; 「食と健康意識に関する調査」2018.10.31. 株式会社ネオマーケティングウェブサイト <<https://www.neo-m.jp/investigation/2341/>>

<sup>26</sup> まめプラス推進委員会「<食への意識に関する調査結果> 大豆製品、たん白源として肉類・乳製品を上回る「Plant-Based Food（植物性由来食）」国内で定着の兆し」2018.2.22. @Press ウェブサイト <<https://www.atpress.ne.jp/news/150244>>

<sup>27</sup> Barcleys, “Global Food: I Can’t Believe It’s Not Meat,” 2019.5.22, pp.10-11. <[https://eu30.salesforce.com/sfc/p/#1t00000wCuV/a/1t000000Xg33/q3Bm\\_z\\_oiIm8K7s4mnGLApU.WpmqvU6rEsBaiqGRob4](https://eu30.salesforce.com/sfc/p/#1t00000wCuV/a/1t000000Xg33/q3Bm_z_oiIm8K7s4mnGLApU.WpmqvU6rEsBaiqGRob4)>

<sup>28</sup> “Plant-based Meat Market by Source (Soy, Wheat, Pea, Quinoa, Oats, Beans, Nuts), Product (Burger Patties, Sausages, Strips & Nuggets, Meatballs), Type (Pork, Beef, Chicken, Fish), Process, and Region - Global Forecast to 2025,” 2019.5. MarketsandMarkets Website <<https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/plant-based-meat-market-44922705.html>>

### Ⅲ 代替肉の開発経緯と現状

19世紀末、フランスの化学者マルセラン・ベルテロ (Marcellin Berthelot) は、2000年頃には化学が発展し、畜肉と同じ成分や栄養を備えた食品が、家畜からではなく人工的に生産されると予言していた<sup>29</sup>。以下では、20世紀以降の代替肉開発の経緯と現状について概観する。

#### 1 植物肉

植物肉の開発は、実に100年以上の歴史がある。コーン・フレークの発明者として知られるアメリカのジョン・ハーベイ・ケログ (John Harvey Kellogg) は、小麦に含まれるグルテンと牛乳に含まれるカゼインから、畜肉に似た硬さと香りを持つとされる食品を製造する方法を考案し、1907年に特許<sup>30</sup>を取得した<sup>31</sup>。

植物肉の製造技術が大きく進展する契機となったのは、アメリカの化学者ロバート・アレン・ボイヤー (Robert Allen Boyer) <sup>32</sup>の研究である。大豆から抽出した植物性たんぱくを束ねて筋繊維の構造に似せることで、かみごたえなどの食感を畜肉に近づける製法を考案し、1954年に特許<sup>33</sup>を取得した。その後、アメリカの食品メーカーは、ボイヤーの製法を基に植物肉の製品化を進めた。ただし、食感が畜肉に近づいたとはいえ、外観、風味なども含め、畜肉との差はまだかなりあったようである<sup>34</sup>。

#### (1) 欧米での開発と事業化

しかし近年、加工技術や添加物を駆使して、食感、風味、外観などを畜肉に更に近づけた製品が開発され、再び注目を集めている。以下に紹介するアメリカの2社は、畜肉を好む消費者の需要を視野に入れて、植物性たんぱくを使って畜肉を完全に再現することを目指している。

2009年に設立されたビヨンド・ミート (Beyond Meat) 社は、肉の組成を分子レベルで徹底的に分析し、えんどう豆の植物性たんぱくを使って、食感や風味に加え、血合いなどの外観や、焼くときの音、焼き色や肉汁なども再現したハンバーガー用パティを開発した。2013年からアメリカの大手スーパーマーケットで同社製品の販売が始まり、2016年には同社のハンバーガー用パティが植物肉売り場ではなく精肉売り場に置かれたことが話題になった<sup>35</sup>。大手ハンバーガーチェーンでも同社製品が採用されている<sup>36</sup>。

<sup>29</sup> Henry Jackson Wells Dam, "Foods in the Year 2000: Professor Berthelot's Theory that Chemistry will Displace Agriculture," *McClure's Magazine*, Vol.3 No.4, 1894.9, pp.303-306.

<sup>30</sup> John Harvey Kellogg, U.S. Patent 869,371, Patented Oct. 29, 1907.

<sup>31</sup> Albert Marchant Pearson, "Meat Extenders and Substitutes," *BioScience*, Vol.26 No.4, April 1976, p.249.

<sup>32</sup> ボイヤーは、1930年代にフォード自動車 (Ford Motor Company) の研究所で、大豆繊維やプラスチック製部材などの研究に従事した。同社の創設者であるヘンリー・フォード (Henry Ford) は、大豆からプラスチックを製造し、これを自動車の部材として利用するという夢を抱いていたという。Ford Richardson Bryan, *Henry's Lieutenants*, Detroit: Wayne State University Press, 1993, pp.47-48.

<sup>33</sup> Robert Allen Boyer, U.S. Patent 2,682,466, Patented June 29, 1954.

<sup>34</sup> 田村鶴央「人造肉の現状と将来—人造肉雑感—」『食品と科学』9巻10号, 1967.9, pp.37-39.

<sup>35</sup> Thomas Heath, "One of these burgers is not like the others," *Washington Post*, 2016.10.27. <<https://www.washingtonpost.com/news/business/wp/2016/10/26/whole-foods-has-made-a-big-change-in-the-meat-department/>>

<sup>36</sup> "The Beyond Burger is Officially Joining TGI Fridays Menus Nationwide!" 2018.1.2. Beyond Meat Website <<https://www.beyondmeat.com/whats-new/the-beyond-burger-is-officially-joining-tgi-fridays-menus-nationwide/>>

インポッシブル・フーズ (Impossible Foods) 社は、スタンフォード大学の生化学教授らによって 2011 年に設立され、主に大豆の植物性たんぱくを使った植物肉を製造している。同社は、ヘム<sup>37</sup>という物質が植物肉の外観や風味を畜肉に近づける鍵になると考え、大豆由来のヘム<sup>38</sup>を製品に添加している。ヘムは、大豆から直接抽出するのではなく、酵母に大豆由来のヘムを合成する遺伝子を組み込み、その酵母を培養することによって効率よく生産されている<sup>39</sup>。2016 年、同社の植物肉を使った「インポッシブル・バーガー」が初めて商品化され、2019 年には、大手ハンバーガーチェーンが、同社のパティを使ったハンバーガーを発売した<sup>40</sup>。

既存の食品メーカーも次々と植物肉事業に参入している。アメリカでは 2019 年、食肉大手のタイソン・フーズ (Tyson Foods) 社が自ら植物肉事業に参入することを発表し<sup>41</sup>、加工食品大手のケロッグ (Kellogg) 社も、自社の菜食主義者向けブランドに植物肉を加えると発表した<sup>42</sup>。

買収による参入事例もある。食品大手のネスレ (Nestlé) 社は、菜食主義者向け食品を製造するアメリカのスイート・アース (Sweet Earth) 社を 2017 年に買収した<sup>43</sup>。食品・日用品大手のユニリーバ (Unilever) 社は、オランダで植物肉を製造するベジタリアン・ブッチャー (Vegetarian Butcher) 社を 2018 年に買収した<sup>44</sup>。植物肉は、消費者に身近なものとなりつつある。

## (2) 我が国での開発と事業化

我が国を含む仏教圏には、動物性の食材を避けた精進料理が古くから伝わる。例えば、豆腐に人参、蓮根などを混ぜて油で揚げた「がんもどき」の名は、水鳥である雁 (がん) の肉に似せたことに由来するとの説がある。しかし、その食感や風味は本物の肉とはかなり異なる。

1960 年代後半になると、我が国でも大豆などの植物性たんぱくを原料とした植物肉の開発ブームが起きた。しかし、畜肉に代わる食材とするには食感や風味などが十分でなく、多くは畜肉に混ぜて利用されるにとどまった<sup>45</sup>。

他方、当時の政府は、資源制約の厳しい我が国における新しいたんぱく源として、植物性たんぱくに注目した。1975 年、農林省の農政審議会 (当時) は、「大豆等植物たんぱく質の高度加工による食用への利用の拡大」を掲げる報告書<sup>46</sup>を取りまとめ、翌年には、植物性たんぱくに関する日本農林規格 (JAS)<sup>47</sup>が定められた。その後も大豆などの植物性たんぱくの研究が続けられた結果、今日の加工技術は、畜肉に代わる食材を作る水準にまで向上してきたという。

<sup>37</sup> ヘムは、血液や食肉の色を生み出すヘム色素に含まれる物質である。

<sup>38</sup> マメ科植物の根には、ヘム色素の一種であるレグヘモグロビンが存在する。

<sup>39</sup> “Heme + The Science behind Impossible.” Impossible Foods Website <<https://impossiblefoods.com/heme/>>; Michael Eisen, “How GMOs can save civilization (and probably already have),” 2018.3.17. Medium Website <<https://medium.com/impossible-foods/how-gmos-can-save-civilization-and-probably-already-have-6e6366cb893>>

<sup>40</sup> “Now Available at Burger King.” Impossible Foods Website <<https://impossiblefoods.com/burgerking/>>

<sup>41</sup> “Tyson Foods Unveils Alternative Protein Products and New Raised & Rooted Brand,” 2019.6.13. Tyson Foods Website <<https://www.tysonfoods.com/news/news-releases/2019/6/tyson-foods-unveils-alternative-protein-products-and-new-raised-rooted>>

<sup>42</sup> “Introducing Incogmeato by MorningStar Farms, The Newest Addition to Kellogg Company’s Plant-Based Portfolio,” 2019.9.4. Kellogg’s Website <<http://newsroom.kelloggcompany.com/2019-09-04-Introducing-Incogmeato-TM-by-Morning-Star-Farms-R-The-Newest-Addition-to-Kellogg-Companys-Plant-Based-Portfolio>>

<sup>43</sup> “Nestlé USA agrees to acquire Sweet Earth,” 2017.9.7. Nestlé Website <<https://www.nestle.com/media/news/nestle-us-a-acquires-sweet-earth>>

<sup>44</sup> “Unilever acquires The Vegetarian Butcher,” 2018.12.19. Unilever Website <<https://www.unilever.com/news/press-releases/2018/unilever-acquires-the-vegetarian-butcher.html>>

<sup>45</sup> 青木宏「人工肉の現状と問題点」『調理科学』3 巻 1 号, 1970.2, p.28.

<sup>46</sup> 農林省『食糧問題の展望と食糧政策の方向』1975.4, p.35.

<sup>47</sup> 「植物性たんぱくの日本農林規格」(昭和 51 年農林省告示第 838 号)

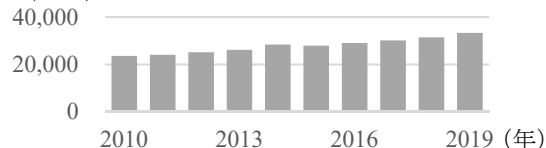
例えば、植物油などを製造する不二製油株式会社は、大豆の不快臭を抑える加工技術<sup>48</sup>や、形状や食感の異なる数十種類の素材を組み合わせる多様な食感を生み出す手法を開発している<sup>49</sup>。

我が国では、植物肉の素材となる粒状植物性たんぱく<sup>50</sup>の生産量(大豆を原料とするもの)が、2010年の23,560トンから2019年の33,297トンへと4割以上も増加している(図1)。

近年、国内の大手食品メーカーが「大豆ミート」などと呼ばれる植物肉食品の販売を拡大しているほか、スーパーマーケットやコンビニエンスストアでも植物肉を使った食品が販売されるようになってきた。大手ハンバーガーショップも、植物肉を使ったハンバーガーの販売を始めている<sup>51</sup>(図2)。

我が国でも、今後、植物肉が消費者に身近なものになっていく可能性がある。

図1 粒状植物性たんぱく(大豆)の国内生産量(トン)



(出典) 「植物性たんぱくの生産、出荷・自社使用量」日本植物蛋白食品協会ウェブサイト <<http://www.protein.or.jp/pdf/seisan.pdf>> を基に筆者作成。

図2 植物肉食品(パスタソース・ハンバーガー)



(出典) 左: 筆者撮影, 右: 株式会社モスフードサービス提供

## 2 培養肉

1930年、イギリスの政治家フレデリック・エドウィン・スミス(Frederick Edwin Smith)は、牛肉や鶏肉などは、いずれ培養によって作られるようになり、家畜の飼育は不要になると予言した<sup>52</sup>。その翌年には、後にイギリスの首相となるウィンストン・チャーチル(Winston Churchill)も、鶏を1羽丸ごと育てるのは合理的でなく、食べる部分だけを培養すべきであると主張した<sup>53</sup>。それから約70年を経て、培養肉の本格的な研究が始まった。

### (1) 欧米での開発

培養肉の研究が本格化する端緒となったのは、オランダのウィレム・フレデリック・ファン・エーレン(Willem Frederik van Eelen)による研究である。ファン・エーレンは、医師として働く傍ら、動物の細胞を培養する研究に取り組み、工業的規模で培養肉を生産する基礎的な手法を考案して、1999年に特許<sup>54</sup>を取得した<sup>55</sup>。2005年には、培養肉の生産方法が科学雑誌に初め

<sup>48</sup> 不二製油株式会社「大豆蛋白の製造法」特許第5058427号(出願日2001年8月6日、発行日2012年10月24日)。

<sup>49</sup> 三井住友フィナンシャルグループ「タンパク質クライシスと気候変動問題を“おいしく”解消する植物性代替肉」『SAFE』129号, 2019.10, p.7. <<https://www.smfg.co.jp/sustainability/report/magazine/pdf/safe129.pdf>>

<sup>50</sup> JASは、植物性たんぱくを、粉末状、ペースト状、粒状、繊維状の4種類に分類している。このうち、粒状植物性たんぱくは、「植物性たんぱくのうち、粒状又はフレーク状に成形したものであって、かつ、肉様の組織を有するもの」と定義される。「植物性たんぱくの日本農林規格」前掲注(47)

<sup>51</sup> 「「グリーンバーガー」全国販売開始！」2020.5.19. 株式会社モスフードサービスウェブサイト <[https://www.mos.co.jp/company/pr\\_pdf/pr\\_200519\\_1.pdf](https://www.mos.co.jp/company/pr_pdf/pr_200519_1.pdf)>

<sup>52</sup> バークンヘッド(佐藤住一郎訳)『二〇三〇年の世界』先進社, 1930, pp.48-49. <<https://dl.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/1180379>>(原書名: The Earl of Birkenhead (Frederick Edwin Smith), *The World in 2030 A.D.*, London: Hodder and Stoughton, 1930)

<sup>53</sup> Winston Churchill, “Fifty Years Hence,” *Maclean’s Magazine*, Vol.44 No.22, 1931.11.15, p.66. チャーチルは、フレデリック・エドウィン・スミスの友人であった。

<sup>54</sup> Willem Frederik van Eelen et al., “Industrial Scale Production of Meat from *in vitro* Cell Cultures,” WO 99/31222, 1999.6.24; *idem*, “Industrial Production of Meat from *in vitro* Cell Cultures,” WO 99/31223, 1999.6.24.

<sup>55</sup> ただし、この手法では細胞分裂が可能な回数に限界があり、筋肉量を継続的に増やせないという問題があった。ポール・シャピロ(鈴木素子訳)『クリーンミート—培養肉が世界を変える—』日経BP, 2020, p.66. (原書名: Paul Shapiro,



て掲載され、オランダ政府は培養肉への研究支援を開始した<sup>56</sup>。また、2011年、イギリス・オックスフォード大学とオランダ・アムステルダム大学は、畜肉よりも培養肉の方が、温室効果ガスの排出量で78～96%、土地利用面積で99%、水消費量で82～96%も少ないとの試算を発表し、注目を集めた<sup>57</sup>。こうして、培養肉の研究は徐々に活発化していった。

2013年、オランダ・マーストリヒト大学のマーク・ポスト (Mark Post) 教授は、牛の骨格筋幹細胞から作った培養肉を世界で初めて発表し、ハンバーガーの試食会を開催した。同教授らは、モサ・ミート (mosa meat) 社を立ち上げ、2022年頃の商業化を目指して普及啓発や生産規模の拡大に取り組んでいる<sup>58</sup>。また、アメリカの循環器専門医と幹細胞生物学者が2015年に設立したメンフィス・ミーツ (Memphis Meats) 社は、2017年に世界で初めて、鶏の幹細胞を使った培養肉の製造に成功し、2021年の商品化を目指している<sup>59</sup>。

## (2) 我が国での開発

2015年に設立されたインテグリカルチャー株式会社は、培養のコストを大幅に削減するため、培養に必要な成長因子を持続的に生成する独自の細胞培養システムを開発し、企業向けに提供している<sup>60</sup>。また、培養肉の製造も手掛けており、2021年に培養フォアグラ、2023年に培養加工肉、2025年に培養ステーキ肉の市場投入を目指している<sup>61</sup>。

他方、日清食品ホールディングス株式会社と東京大学の竹内昌治教授は、牛の筋肉細胞を立体的に培養し、分厚いステーキ肉のような食感を持たせる研究に取り組み、2019年に世界で初めてサイコロステーキ状 (1.0cm×0.8cm×0.7cm) の培養肉を作製したと発表した<sup>62</sup>。

## IV 代替肉をめぐる論点

### 1 植物肉—「健康」をめぐる議論—

消費者が食品を購入する基本的な動機は、①風味、②価格、③利便性、と言われる。しかし、仮にこれら3つが満たされたとして、消費者が実際にどの食品を購入するかは、別の付加価値が鍵になると考えられている。そうした付加価値の1つが「健康」である<sup>63</sup>。

---

*Clean meat: how growing meat without animals will revolutionize dinner and the world*, New York: Gallery Books, 2018)

<sup>56</sup> Pieter Edelman et al., “Commentary: In Vitro-Cultured Meat Production,” *Tissue Engineering*, Vol.11 No.5/6, 2005, pp.659-662; Henk Peter Haagsman et al., “Production of animal proteins by cell systems: Desk study on cultured meat (“kweekvlees”),” 2009.10, p.29. <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.732.9877&rep=rep1&type=pdf>>

<sup>57</sup> Hanna Leena Tuomisto and Maarten Joost Teixeira de Mattos, “Environmental Impacts of Cultured Meat Production,” *Environmental Science & Technology*, Vol.45 Issue.14, 2011, p.6117.

<sup>58</sup> “Our Story.” mosa meat Website <<https://www.mosameat.com/our-story>>

<sup>59</sup> “About Memphis Meats: Together we are reimagining how meat is made.” Memphis Meats Website <<https://www.memphismeats.com/about>>; Jacob Bunge, “Startup to Serve up Chicken Strips Cultivated from Cells in Lab; ‘Clean meat’ developers say it avoids towering costs of feeding, caring for livestock; Tyson takes note,” *Wall Street Journal*, 2017.3.15.

<sup>60</sup> 「低コスト細胞培養システム“CulNet System”の商用事業化ソリューションを5月7日(木)より提供開始」2020.5.7. インテグリカルチャー株式会社ウェブサイト <<https://integriculture.jp/news/337/>>

<sup>61</sup> 「第三者割当増資により、シリーズAラウンドで8億円の資金調達実施」2020.5.25. 同上 <<https://integriculture.jp/news/366/>>

<sup>62</sup> 日清食品ホールディングス株式会社ほか「肉本来の食感を持つ「培養ステーキ肉」実用化への第一歩—世界初！サイコロステーキ状のウシ筋組織の作製に成功—」2019.3.22. <<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20190322/index.html>>

<sup>63</sup> Keri Szejda et al., “Accelerating Consumer Adoption of Plant-Based Meat: An Evidence-Based Guide for Effective Practice,” 2020.2, p.5. Good Food Institute Website <<https://www.gfi.org/images/uploads/2020/02/NO-HYPERLINKED-REFERENCES-FINAL-COMBINED-accelerating-consumer-adoption-of-plant-based-meat.pdf>>

植物肉メーカーは、植物肉は健康的であるとアピールしている<sup>64</sup>。確かに、植物肉にはコレステロールが全く含まれない。しかし、カロリーや飽和脂肪<sup>65</sup>は畜肉とほぼ同量を含んでいる。また、過剰に摂取すると高血圧などのリスクを高めるとされるナトリウム（食塩に含まれる成分）は、畜肉よりも植物肉の方が多い（表3）。さらに、食感や風味などを畜肉に近づけるため、植物肉には多くの添加物が加えられる。

これらの事実は、植物肉の健康的なイメージとは必ずしも一致しない。植物肉も販売する大手スーパーマーケットのある経営者は、植物肉が環境や動物福祉の面で畜肉より優れていることを認めた上で、「健康面について言えば、植物肉は勧められない」と述べたという<sup>66</sup>。植物肉が健康的でないとすれば、それは市場におけるリスク要因となり得るとの指摘もある<sup>67</sup>。植物肉メーカーには、健康面に関する情報開示やより丁寧な説明が求められる。

表3 畜肉と植物肉の成分比較

	牛挽肉 (赤身 85%、脂肪 15%)	植物肉 (ビヨンド・バーガー)	植物肉 (インポッシブル・バーガー)
カロリー	240kcal	250kcal	240kcal
飽和脂肪	6g	6g	8g
コレステロール	80mg	0mg	0mg
ナトリウム	80mg	390mg	370mg
たんぱく質	21g	20g	19g

(注) ハンバーガーのパティ 4oz (約 113g) に含まれる成分量を比較したものである。

(出典) Emily Gelsomin, “Impossible and Beyond: How healthy are these meatless burgers?” 2019.8.15. Harvard Health Publishing Website <<https://www.health.harvard.edu/blog/impossible-and-beyond-how-healthy-are-these-meatless-burgers-2019081517448>> を基に筆者作成。

## 2 培養肉—コスト削減と風味の改善—

培養肉の商品化に向けた最大の課題はコスト削減である。特に、培養に利用される細胞の成長因子（牛の胎児から採取した血清）は、大量の入手が難しく高価なため、各社はこれを使わない製造方法の開発に取り組むなどしてコスト削減を競っている。例えば、メンフィス・ミーツ社<sup>68</sup>の培養鶏肉は、2017年には1ポンドにつき9,000米ドル（100gで21万円<sup>69</sup>）であったが、翌2018年には1,000米ドル（100gで24,000円）を下回ったという<sup>70</sup>。また2019年には、スペインの培養肉開発企業であるバイオテック・フーズ（Biotech Foods）社が、培養肉のコストを1kgにつき約100ユーロ（100gで1,170円<sup>71</sup>）まで下げたと報じられた<sup>72</sup>。

<sup>64</sup> “Our Mission.” Beyond Meat Website <<https://www.beyondmeat.com/about/>>; “Food That’s Better for You.” Impossible Foods Website <<https://impossiblefoods.com/health/>>

<sup>65</sup> 飽和脂肪は、過剰に摂取すると動脈硬化や心疾患のリスクを高めるとされる。

<sup>66</sup> Jade Scipioni, “Whole Foods CEO on plant-based meat boom: Good for the environment but not for your health,” 2019.8.21. CNBC Website <<https://www.cnbc.com/2019/08/21/whole-foods-ceo-john-mackey-plant-based-meat-not-good-for-your-health.html>>

<sup>67</sup> Barcleys, *op.cit.*(27), pp.3, 39-40, 79.

<sup>68</sup> メンフィス・ミーツ社は、牛の胎児血清を使わない製造方法を既に開発したと主張している。“FAQ: What do you feed your cells?” Memphis Meats Website <<https://www.memphismeats.com/faq>>

<sup>69</sup> 報告省令レート（令和2年7月分）に基づき、1米ドルを107円として換算した。また、1ポンド（重量）については453.6gとして換算した。以下同様。

<sup>70</sup> Chase Purdy, *Billion Dollar Burger: Inside Big Tech’s Race for the Future of Food*, Portfolio, 2020, pp.29-30.

<sup>71</sup> 報告省令レート（令和2年7月分）に基づき、1ユーロを117円として換算した。

<sup>72</sup> Andrés González and Silke Koltowitz, “The \$280,000 lab-grown burger could be a more palatable \$10 in two years,” 2019.7.10. Reuters Website <<https://uk.reuters.com/article/us-food-tech-labmeat/the-280000-lab-grown-burger-could-be-a-more-palatable-10-in-two-years-idUKKCN1U41W8>>

培養肉は、家畜の細胞に由来するという意味では「本物の肉」であり、植物肉よりも畜肉に近い食品として高い付加価値を持つ可能性がある。しかし、培養肉のこれまでの成果は主に筋肉細胞の培養であり、脂肪細胞の培養など風味の改善に寄与する技術開発は今後の課題とされている<sup>73</sup>。アメリカの培養肉開発企業であるジャスト（JUST）社は、和牛の持つうまみに着目し、我が国の和牛農家と連携して、和牛の細胞を使った培養肉の開発に取り組んでいる<sup>74</sup>。

### 3 代替肉開発の新しい展開

他方、代替肉の付加価値を高めるために、従来とは異なる新しい発想も出てきている。例えば、我が国で2015年に設立されたDAIZ株式会社は、添加物を使わない植物肉を研究している。我が国では、通常、植物肉の原料として搾油した後の脱脂大豆を用いるが、同社は、搾油していない大豆を発芽させ、うまみとなるアミノ酸などを増やした原料から植物肉を作ること、添加物なしに植物肉の風味を向上させようとしている<sup>75</sup>。

新しい技術を活用した取組もある。3Dフードプリンタは、3Dプリンタを食品に応用したもので、カートリッジに食材や添加物などを入れ、様々な形状や食感の食品を製造する技術である。スペインのノヴァミート（NOVAMEAT）社は、2018年に3Dフードプリンタによる植物肉の試作に成功し、事業化に向けて食感や風味の改善、製造時間やコストの低減に取り組んでいる<sup>76</sup>。さらには、3Dフードプリンタにより、消費者の嗜好やニーズに応じて、風味や食感、更には栄養面やアレルギーなども調整された個人用の代替肉が生まれるかもしれない<sup>77</sup>。

## おわりに

代替肉は今後の市場拡大が期待されている。しかしながら、これが単に消費者の好奇心によるブームにすぎないとすればニッチ市場の域を出ることはない、といった厳しい論調もある<sup>78</sup>。代替肉を社会にどう定着させていくかという問題も軽視できない。

農林水産省は、代替肉を含むフードテック<sup>79</sup>の育成課題を議論するため、100以上の企業、大学等が参加する「フードテック研究会」を2020年4月に設置した。同研究会では、企業間の連携、農林水産業との連携、認証制度や国際規格の整備などの必要性が指摘される一方で、代替肉が普及したときに畜産がどのような姿になるのか、といった懸念も示された<sup>80</sup>。代替肉の普及に向けては、既存の畜産との連携や共存の在り方も議論になる可能性がある。

<sup>73</sup> 「培養肉・代替肉“本物の味”へ」『読売新聞』2020.4.23, 夕刊。

<sup>74</sup> デハーン英利子「和牛は細胞培養で味わう時代に」『環境ビジネス』2020.夏, p.107。

<sup>75</sup> DAIZ株式会社「植物肉」<<https://www.daiz.inc/meet/>>; 「植物肉、隠し味は発芽大豆」『日経産業新聞』2020.4.23。

<sup>76</sup> Jonathan Shieber, “Novameat has a platform for 3D-printing steaks and has new money to take it to market,” 2019.9.6. TechCrunch Website <<https://techcrunch.com/2019/09/05/novameat-has-a-platform-for-3d-printing-steaks-and-has-new-money-to-take-it-to-market/>>; 佐藤光泰・石井佑基, 野村アグリブランニング&アドバイザー株式会社編『2030年のフード&アグリテック—農と食の未来を変える世界の先進ビジネス70—』同文館出版, 2020, pp.178-179。

<sup>77</sup> 石川伸一『「食べること」の進化史—培養肉・昆虫食・3Dフードプリンター』光文社, 2019, pp.90-91。

<sup>78</sup> Rick Berman, “‘Plant-Based Meat’ Is All Hat and No Cattle,” *Wall Street Journal*, 2019.11.6。

<sup>79</sup> フードテックとは、「食」（Food）と「技術」（Tech）を融合した新しい産業分野をいう。

<sup>80</sup> 農林水産省フードテック研究会参加者一同「農林水産省フードテック研究会 中間とりまとめ」2020.7, pp.12, 18, 20-24. <[https://www.maff.go.jp/j/press/kanbo/kihyo01/foodtech\\_kenkyukai\\_torimatome.pdf](https://www.maff.go.jp/j/press/kanbo/kihyo01/foodtech_kenkyukai_torimatome.pdf)>