

培養肉が描く未来

東京大学大学院情報理工学系研究科 知能機械情報学専攻

特任助教 島 亜衣 教授 竹内 昌治

1 はじめに

きのう食べたものを思い出してみる。朝食にハムとキュウリのサンドイッチ、ランチにハンバーガー、夜はちょっとヘルシーに鶏ムネ肉のソテー。私たちは毎日いろいろな肉を食べる。ベジタリアンやヴィーガンと呼ばれる意識的に動物性食品を口にしない人や、肉食が宗教上禁忌である人を除き、多くの人は一日に一度は肉を含む食事をとるのではないか。特に、牛肉、豚肉、鶏肉は、スーパーマーケットに行けば、安価で手軽に手に入れることができる。これらの身近な肉が、あと数十年後には食べられなくなるとしたら？

世界の人口は2050年には97億人に達すると予測される¹⁾。また、経済的に余裕のある中間階級層が拡大し、これらの人々の間で肉への嗜好が高まることから、食肉需要は今後増加の一途をたどると考えられる。一方で、大量の水やエサとしての穀物、広大な土地を必要とする畜産による食肉生産は、環境負荷が高いために持続可能性が低く、いずれは食肉を含むタンパク質の需要が供給を上回る可能性が危惧されている。すなわち、「タンパク質クライシス」である。

この問題に対して、各国の研究者やフードテック企業などが様々な解決方法を模索している。完全養殖による昆虫食の推進、大豆などに由来する植物性タンパク質を用いた代替肉の作製、細胞培養と組織形成の技術を駆使した培養肉の開発などである。なかでも培養肉は、従来の肉と全く同等の味や食感、栄養を再現できる可能性があることから、未だ上市されておらず、研究開発段階にあるにもかかわらず、大きな期待が寄せられている。本稿では、培養肉の利点や作り方を紹介し、培養肉が描き出す私たちの未来の生活について考えてみたい。

2 培養肉とは

培養肉とはその名の通り、細胞培養技術を用いて作る肉

である。具体的には、ウシやブタなどの動物から細胞を採取し、これを培養して増やした後、立体的な組織に成型する。使用する細胞は、組織幹細胞である筋衛星細胞（サテライトセル）や間葉系幹細胞など、増殖能と筋分化能が共に高い細胞が適している。分化万能性を有する人工多能性幹細胞（iPS細胞）は、原理的には利用可能だが、作製過程で遺伝子改変が必要となる点が食品に使用する上で懸念されている。2013年にマーストリヒト大学（オランダ）のマーク・ポスト教授らのグループが世界で初めて作製した培養肉は、ウシから採取した筋衛星細胞を培養してできた未熟な筋線維の集合体であり、ミンチ肉に近かった。85gのハンバーグを作るのに1万本もの“ひも状筋肉”を必要としたという（この“ひも状筋肉”は1本あたり150万個の細胞をゲルに入れて3週間培養して作られた）²⁾。この培養ミンチ肉は実際にハンバーグとして調理され、食べられ、「ジューシーさには欠けるが、肉の味に近い。歯ごたえもある。」という評価を得た。この培養ミンチ肉を作るための大量の筋細胞は、元々少数だったものを、7～8週間かけて50回ほど分裂させて得たという。このように細胞を増殖させる過程を経ることで、元の動物から得られるよりも多くの食肉を生産できる点が培養肉の利点である。しかも、筋細胞だけを培養すればよいため、動物の個体を数年にわたって飼育する必要がなく（ウシの場合、可食部は体重の4割程度に過ぎない³⁾）、効率的で環境に優しい。ある試算によれば、従来の畜産に対して培養肉作製に必要な土地は99%、水は82～96%、エネルギーは7～45%少なくてもよく、温室効果ガスの排出も78～96%減少するという⁴⁾。また、細胞を得るためにはバイオプシー（筋生検）をして少しの組織を採取すればよく、動物を死なせる必要がないため、動物愛護の観点からの支持も高い。

良いこと尽くしのようだが、現時点では培養肉にもいくつか問題点がある。一つ目は、生産コストである。細胞を効率的に増殖させるために必要となる、多種多様な成長因子を含んだ培養液は非常に高額であり、マーク・ポストの作った

培養肉ハンバーグは当時1枚約3,500万円もした。現在では数千円程度にまでコストを抑えたとされるが、未だ従来の肉より高額である。二つ目は、法律の整備である。人工的に作製した培養肉は「肉」と認められるのか、従来の食品に関する法律で規制できるのか、安全性を確保するためにはどのような規制が必要なのかといった点が米国の農務省（USDA）や食品医薬品局（FDA）、欧州委員会（EC）で議論され、法整備が進められつつある。日本でも、2020年4月に農林水産省が「フードテック研究会」を立ち上げ、法整備にむけた議論を開始している。三つ目は、ミンチ肉ではないステーキ肉（かたまり肉）の作製方法の確立だ。ステーキ肉は市場価値も高く、料理の幅を広げるが、厚みのある大きな組織の構築は非常に困難であり、解決しなければならない技術的課題が多い。

3 培養ステーキ肉の作り方

ミンチ状の培養肉は、すでに一般消費者への販売を目前に控えている（米国のベンチャー企業、メンフィス・ミーツ社のミートボールやジャスト社のチキンナゲットなど）。食品としての安全性やコスト以外の技術面では、ミンチ肉は、筋細胞を効率的に増殖させ、ある程度分化させることができれば達成できる。一方、現在、研究が進められているのは分厚く大きな培養ステーキ肉の開発である。一般に、血管のない組織は数100μm以上の厚さになると、内部の酸素と栄養素が不足するために細胞が壊死する。また、肉の噛みごたえを生み出すには太い筋線維が一方方向に並んでいる必要があるが、筋線維の配向には、培養中に一方方向の張力を与え続けることや、細胞外基質（ECM）を予め配向させることが必要であり、大きな組織で達成するのは難しい。

これまでに提案された培養ステーキ肉の作製方法の一つに、細胞が育つ足場（スキャフォールド）をゼラチンや大豆タンパクなどの食べられる材料で作製し、その上で筋細胞を培

養する方法がある⁵⁻⁶⁾。この方法の利点は、最終的に出来上がる培養肉の大きさや形をスキャフォールドで自在に調整できるという点だ。多孔質や配向性構造の材料をスキャフォールドに使用することで、内部への酸素・栄養素の到達や筋細胞の配列が容易になるのではないかと期待されているが、未だ充分な筋細胞の成熟は達成されていない。

一方、私たちの研究グループが提案するのは、筋細胞を高密度でコラーゲンなどのECMゲルに懸濁してシート状に成型し、積層する方法である **図1**。この方法を用いてラット初代筋細胞から組織を構築すると、筋収縮運動を示したこと⁷⁾、本方法は生体に近い成熟筋を構築する方法として有効であると考えている。シートにはスリットを設けて、酸素や栄養素が内部まで到達するような工夫をした。また、積層したシートを左右のアンカで固定することで、細胞に一方方向の張力がかかるようにして、筋線維の配向を促した。1週間ほど培養すると積層したシート同士は密着し、一塊の組織としてアンカからはずすことが可能であった。この方法を用いて、ウシ筋細胞から約1cm角のサイコロステーキ状培養肉の作製に成功している **図2**。ただし、筋線維の太さや組織としての硬さ（≒歯ごたえ）は従来の肉にはまだ及ばず、より

図1 ウシ筋細胞含有ECMゲルシートを用いた筋組織構築法



培養肉が描く未来

大きな組織の構築、脂肪や血管の導入と合わせて、これからの課題である。

4 培養肉は受け入れられるか？

以上のように、培養肉はSF小説中の空想の食べ物ではなく、すでに作られ、ごく少数の人々には食されている。技術的な課題を解決することができ、法律が整備されれば、順調に食肉の一つとしてスーパーマーケットに並ぶ日が来るのだろうか？そして、私たちは積極的に培養肉を食べるだろうか？私たちの研究グループは2019年5月に、日本で初めての培養肉に関する大規模意識調査を行った。その結果、「培養肉を試しに食べてみたい」と答えた回答者は約3割にとどまった⁹⁾。人は一般に、新規の食品に対して非常に保守的な態度をとる（すなわち、これまで食べたことのないものは警戒し、食べない傾向にある）。これは、うかつに何でも口にして病気になったり、最悪の場合死んでしまったりすることがないように、進化上獲得した気質であろう。一方で、この調査では、培養肉の利点（例えば、食料危機や動物愛護へ貢献する技術であること）を説明すると受容性が向上するという結果が得られた。このことは、一般消費者に培養肉がどういうものか、きちんと説明し、理解してもらうことの重要性を示している。説明不足によって消費者の拒否感を招いたものの例に、遺伝子組み換え食品がある。同じ過ちを繰り返さないためにも、培養肉研究に携わる者たちは、開発段階から多くの情報を発信し、培養肉への理解を深めてもらう努力をする必要があるだろう。

図2 食紅で着色したサイコロステーキ状培養肉



5 おわりに

培養肉を作製する技術は、近年飛躍的な進歩を遂げている。これまでは、再生医療で培った組織構築技術を応用した、生体に似せた骨格筋組織の構築に主眼が置かれてきた。今後は「食品」としての様々な改良が加えられていくことだろう。世界に誇る和牛を開発してきた日本は、培養肉分野においても、独自の工夫で世界をリードしていけるのではないだろうか。その際、食品香料の使用をはじめ、日本の食品加工業が培ってきた多くのノウハウは、おいしくて安全な培養肉作りを後押ししてくれるに違いない。培養肉には様々な可能性がある。あらゆる栄養素をバランス良く配合した「完全食培養肉」、カロリー控えめ、アレルギー除去など、食べる人や目的に合わせた「デザイン肉」、さらには宇宙ステーションで作る「宇宙肉」……。本稿を読まれた皆さまが、すぐそまで来ている「培養肉のある未来」をワクワクと思い描き、「培養肉を食べてみたいな」と思っただけで、非常にうれしく思う。

参考文献

- 1) 国際連合. 2019年版世界人口予測. <https://population.un.org/wpp/> (参照2020-7-9)
- 2) Post M.J. Cultured beef: medical technology to produce food. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2014, vol. 94, pp. 1039-1041.
- 3) 東京都中央卸売市場. 牛・豚の基礎知識 - 部位別の名称. <https://www.shijou.metro.tokyo.lg.jp/syokuniku/kisotisiki/kisotisiki-01-03/> (参照2020-7-14)
- 4) Tuomisto H.L. and de Mattos M.J.T. Environmental Impacts of Cultured Meat Production. *Environmental Science & Technology*. 2011, vol. 45, no. 14, pp. 6117-6123.
- 5) MacQueen L.A. et al. Muscle tissue engineering in fibrous gelatin: implications for meat analogs. *Science of Food*. 2019, vol. 3, 20.
- 6) Ben-Arye T. et al. Textured soy protein scaffolds enable the generation of three-dimensional bovine skeletal muscle tissue for cell-based meat. *Nature Food*. 2020, vol. 1, pp. 210-220.
- 7) Morimoto Y. et al. Biohybrid robot powered by an antagonistic pair of skeletal muscle tissues. *Science Robotics*. 2018, vol. 3, eaat4440.
- 8) 日清食品ホールディングス. 「培養肉」の受容性の確認と受容性向上の施策検討を目的とした日本初の「培養肉に関する大規模意識調査」を実施. <https://www.nissin.com/jp/news/8281> (参照2020-8-4)