

A portrait of Shoji Takeuchi, a man with dark hair and glasses, wearing a dark blue button-down shirt, smiling. He is sitting in front of a computer monitor displaying a red and white abstract image. The background is a blurred office setting.

たけうち しょうじ
竹内 昌治

東京大学 大学院情報理工学系研究科・生産技術研究所 教授
2018年より未来社会創造事業研究代表者

特集1

培養肉が拓く新たな食の可能性 「たんぱく質クライシス」に挑む

途上国・新興国を中心とした人口増がこのまま続けば、畜産だけでは食肉によるたんぱく質供給が限界を迎えると懸念されている。この「たんぱく質クライシス」の解決に挑むのは、東京大学大学院情報理工学系研究科・生産技術研究所の竹内昌治教授だ。最先端の生命科学と工学を駆使し、ステーキサイズの肉を人工的に作り出すという。食料問題を初めとした持続可能な開発目標であるSDGsの解決に貢献するだけでなく、新たな食の可能性を拓くことが期待される「培養肉」研究の最前線に迫る。

人口増で食料増産が急務 フードテックから新市場も

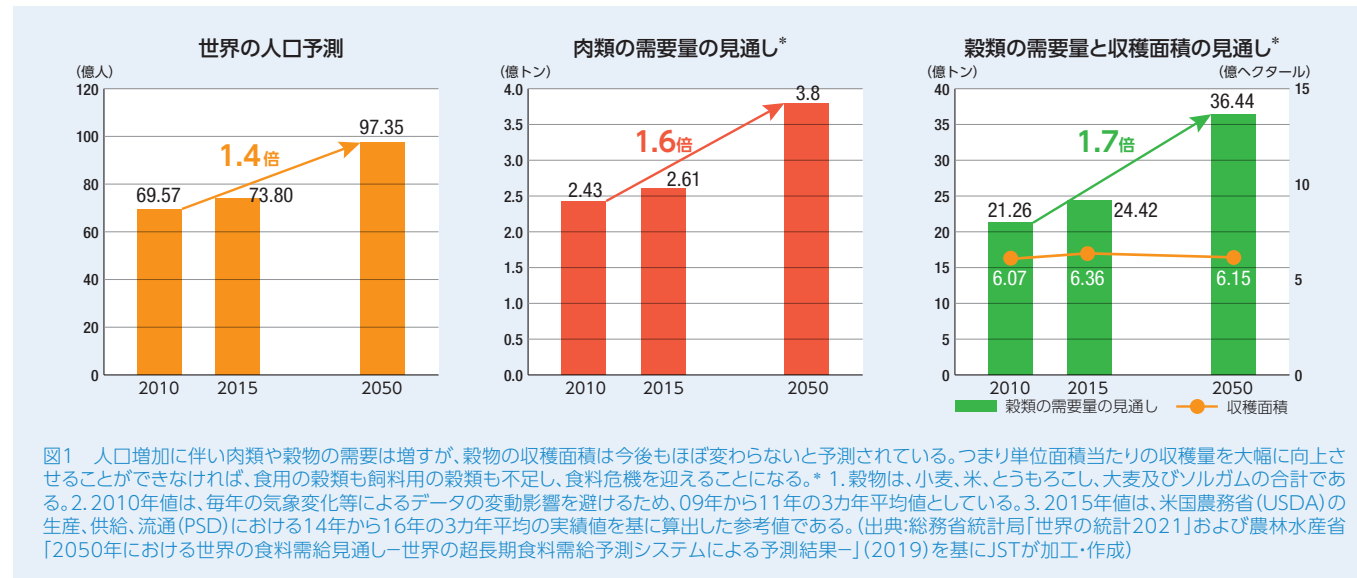
世界人口77億人のうち、2020年には最大8億人以上が飢餓に直面したとされる。50年には人口が97億人になるとも試算されており、食料増産は急務といえる。しかし農耕地を新たに増やそうとすれば、森林伐採が必要となり、地球温暖化対策に逆行することは避けられない。また家畜を増やせば、飼料となる穀類や水は人との奪い合いになるだろう(次ページ図1)。こういった課題への解決策としてフードとテクノロジーを融合した「フードテック」が注目を集めている。

中でも食肉に代わる新たな食材として、市場を開拓しつつあるのが「代替肉」だ。大豆などの植物由来成分を原料とした代替肉はすでに市場に出回っているが、細胞培養技術を使い、肉の風味や食感を再現した「培養肉」の開発も加速している。培養肉の生産技術を世界で初めて示したのは、オランダ・マーストリヒト大学のマーク・ポスト教授だ。それまでは医療への応用が期待されていた細胞培養技術や組織工学を利用し、ウシなどの動物由来細胞を体外に取り出して培養することで、食肉の生産に

成功した(次ページ図2)。

13年には英国ロンドンで培養肉ハンバーガーの試食会も開催され、世界中で大きな反響を呼んだ。しかし、当初は研究費を含めるとハンバーガー1個の価格が3,500万円と高額だったこともあり、培養肉が食卓に登場することは夢物語だと思われていた。その後、研究の進展とともに、動物を殺す必要がないことや、生産にかかる環境負荷が低いといった利点から、地球規模課題の解決の切り札として、世界各国で研究開発が進んでいる。

東京大学大学院情報理工学系研究



科・生産技術研究所の竹内昌治教授も、培養肉研究に取り組む1人だ。その構想は10年から約6年間行われたERATO竹内バイオ融合プロジェクトまでさかのぼる。細胞をつかったモノづくりの応用分野として培養肉にも注目していた。

現在は未来社会創造事業の「持続可能な社会の実現」領域で「3次元組織工学による次世代食肉生産技術の創出」の研究開発代表者を務め、培養肉を使った持続可能な資源循環型社会の構築に取り組んでいる(図3)。「全ての食肉を培養技術だけで生産できるわけではありません。しかし、食料危機はすでに大きな問題となっています。食肉の一部を培養肉で担うことができれば、より多くの人に安定して食料を届けることができるよう

になります」と意義を語る。

筋肉細胞のシートを積み重ね 世界初の「サイコロステーキ」

多くの企業が手がけている培養肉は、筋肉細胞を集めて凝集させたミンチ肉が主流だ。一方、竹内さんたちが目指すのは天然の肉と同じような筋肉の線維、血管、結合組織などを3次元構造で再現したステーキ状の肉だという。「技術的なハードルは高いですが、実現できれば歯ごたえや風味も本物の肉と全く変わらないおいしい肉になるだろうと考えています。おいしいから食べたい。そう思ってもらえるものを目指しています」。

実際に培養肉を作製するためには、まず増殖させるための種となる

細胞をウシから採取する。得られた種細胞は培養液の中で細胞分裂を繰り返し、数を増やしていく。一般的な細胞培養では、細胞は2次元平面上にバラバラの向きで成長するので3次元構造にはならないが、大量に増やした筋細胞を集めて成形するミンチ肉であれば、現状の技術を応用することで、安く大量に生産することも可能だ。

しかし本物の筋肉は、細長く一方向にそろった筋線維を束ねた構造をしており、この構造が肉の食感や歯ごたえを生み出している(図4)。こうした本物の肉と同じ構造を再現するためには筋線維の向きをそろえて培養する技術や、細胞同士を融合させて筋組織特有のしま状の「サルコメア構造」を形成させる成熟化の技術も必

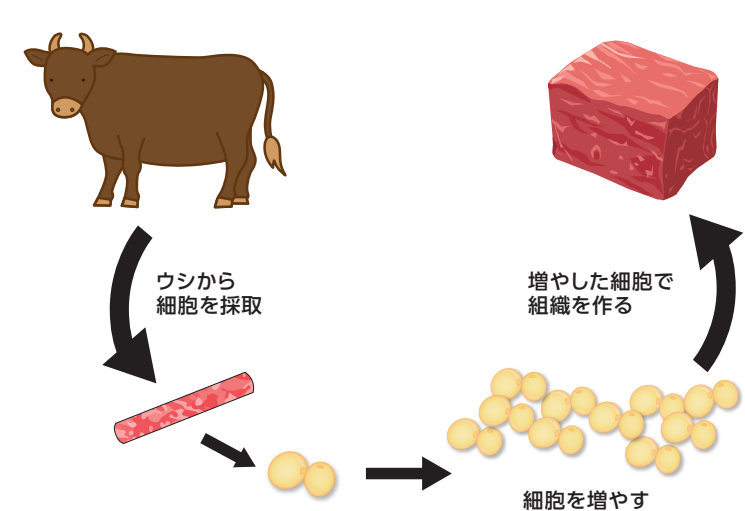


図2 培養肉は動物細胞を生体外で増殖させ、増やした細胞を組織培養することで生産する。

共同研究機関
「低コスト・持続可能な培養液を用いたウシ筋細胞の大量培養技術の開発」(1) 東京女子医科大学 清水 達也
「低コスト・持続可能な培養液を用いたウシ筋細胞の大量培養技術の開発」(2) 早稲田大学 坂口 勝久
「ウシ筋細胞の大量培養技術の開発」 筑波大学 石川 博
「脂肪細胞の作製と脂肪組織の構築」 大阪大学 松崎 典弥
「培養肉の社会受容性の向上」 弘前大学 日比野 愛子
「ウシ筋組織の食品的特性評価」 日清食品ホールディングス

図3 未来社会創造事業・竹内プロジェクトの実施体制

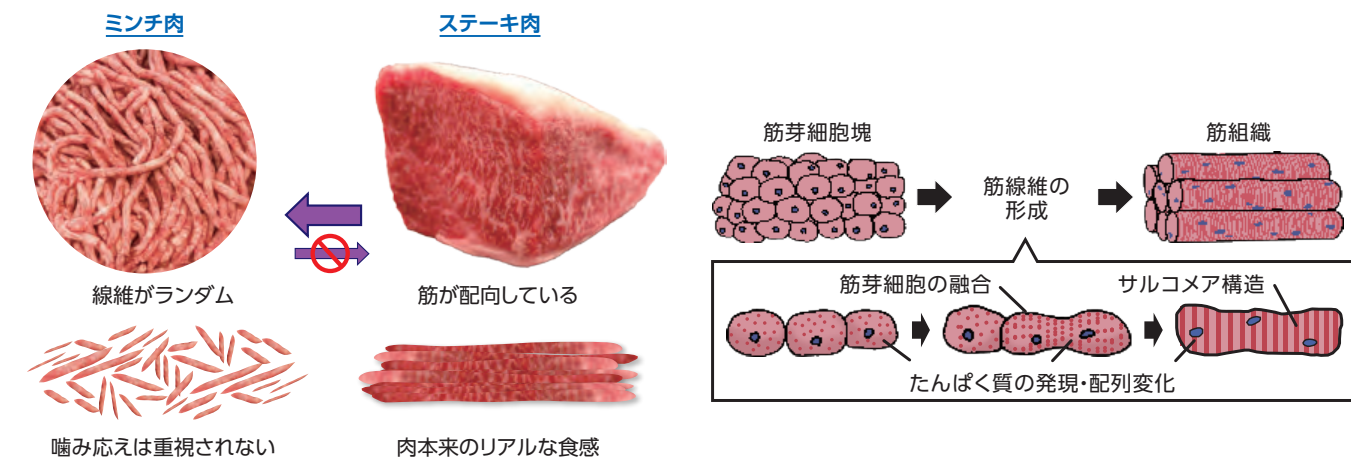


図4 開発の主流となっている線維が配向していないミンチ肉(左)と竹内さんが目指す筋が配向しているステーキ肉(右)

要になる(図5)。「既存の技術だけでは理想とする培養肉を作ることができないので、新たな細胞培養技術の開発に取り組むことにしました」と説明する。

竹内さんはビタミンCが成熟化を促すことも突き止めると、コラーゲンゲルで作った細長いスリットのある型にウシの筋芽細胞を入れて培養を試みた(図6)。すると、見事にサルコメア構造を作ることになった。「筋芽細胞は互いに融合して、伸びていきます。スリットを入れれば、長細い空間ができるので、長軸方向にしか伸びないのではないかと考えました。これが見事に的中しました」と笑顔を見せる。こうしてできた筋線維を並べることができるシート状のモジュールを作製し、それらを重ねることで世界初となる培養肉のサイコロステーキを作ることになった(次ページ図7)。

安価でアニマルフリー 持続可能な製法を模索

およそ100グラムのステーキ肉を目指す竹内さんにとっては、この成果もあくまで通過点に過ぎない。「より本物の肉に近づけるためには、筋線維を太く大きくし、脂肪や血管などの組織も作り込んでいく必要があります。また持続可能な製法の確立に向けて、検討すべき課題はまだあります」と語る。

図5 筋細胞の成熟過程。筋芽細胞は細胞融合し、多核の筋線維に分化する。さらに分化が進むとたんぱく質がしま状に分布し、筋肉特有の構造であるサルコメア構造を形成する。

現在取り組んでいる課題の1つが培養液の調整だ。培養液には細胞を大きくするための栄養分と、細胞分裂などを促す成長因子を含む血清成分が含まれている。栄養分の方は比較的安価に入手できるが、血清成分はウシの胎児の血液から取り出すため非常に高価だ。「将来的には、動物を殺さないアニマルフリーな手法で持続的に培養肉を作れるよう、血清成分を代替する培養液を模索しています。実現できれば生産コストも下

げられます」と説明する。

2つ目の課題は、筋細胞の増殖効率だ。培養した細胞が全て筋細胞に分化するわけではないため、効率よく増殖し、目的の筋細胞に分化を促す条件を模索している。「増殖しやすいのに筋細胞に分化しない細胞や、その逆の細胞など、振る舞いにも個性があります」と竹内さん。一足飛びに工場で大量生産できる培養条件が見つかるわけではないが、プロジェクトの支援期間中に解決の糸口をつかもうとしている。

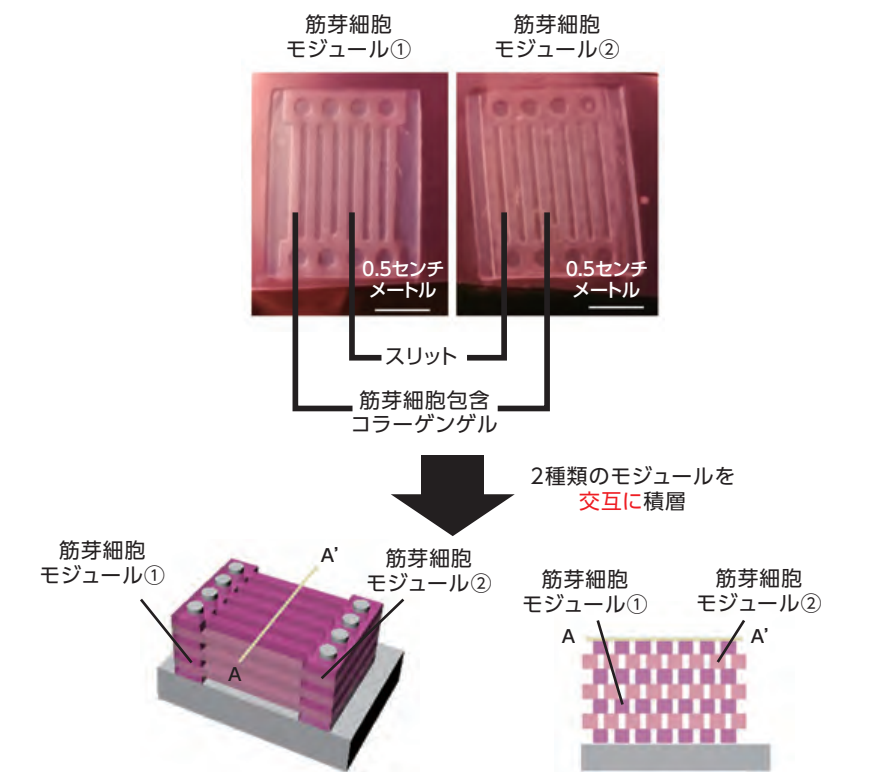


図6 スリットの入った型に入れた筋芽細胞のモジュールを作る。それらを交互に積層させることで、立体構造を作る。細胞はスリットによって区画化された細長い空間に沿って、それぞれが融合し向きのそろった筋線維を作る。



図7 世界初のサイコロステーキ状の培養肉(左、1.0センチメートル×0.8センチメートル×0.7センチメートル)。食紅で色を付け、実際の肉に近い風合いを持つ培養肉(右)

3つ目の課題は、立体構造の内部への栄養供給だ。これまで2次元で培養していた際には細胞が培養液に必ず漬かっており、どの細胞にも栄養が十分に行き渡っていた。しかし、立体的に大きくなると、培養液に接していない内部の細胞には栄養分が届かず、死んでしまう。「シートを積層することで立体構造を作れるようになりましたが、さらに大きな塊にするために、培養中に養分を供給できる血管のような構造を張り巡らそうとしています」と語る。竹内さんの専門でもある組織工学の知見が生かされることになるだろう。

4つ目の課題は成熟化だ。ビタミンCがウシ筋細胞の成熟を促すことはすでに確認していたが、他にも電気刺激を

筋繊維に与えることで成熟化が進むことが知られている。しかし、生体の中で当たり前に行っていることを、実験室の中で再現することは簡単ではない。ビタミンCや電気刺激を与える際の最適なタイミングや量といった条件を、無限にある組み合わせから見つけださなければならないからだ。しかしこれらの課題が解決すれば、培養肉を効率よく作れるようになるだけでなく、再生医療や組織工学、生化学などにも有益な知見をもたらすと期待されている。

安全性の担保を検討 「おいしさ」評価も必要

シンガポールでは20年から培養肉を使ったチキンナゲットの市販が

始まっているが、竹内さん自身はいまだに自分が作った培養肉を食べられていないという。「私自身も口にしてみたいとずっと思っているのですが、まだ試していません」と残念そうに語る。研究室内で自ら作ったものであっても、実際に食べるとなれば人を使った実験になる。大学内の研究倫理委員会に申請し、承認を受ける必要があるという。「前例のない申請なので、自ら基準を設ける必要がありましたが、プロジェクトメンバーとの協議を重ね、ようやく申請にこぎ着ける段階に至りました。近いうちに研究者が試食できるようにしたいです」と意気込む。

大学内だけでなく、国内でも培養肉の安心・安全をどのように担保するかについては、慎重に検討されている。培養に利用される試薬は医療用としては認可されているが、食品としては流通していない。例えば培養液は、すでに食品として扱われているもの、もしくは国が定めた「食品添加物リスト」の範囲内で材料を選定する必要がある。

食肉生産を含む食料安全保障の強化という観点から、農林水産省は20年にフードテック官民協議会を立ち上げている。既存の畜産業にも配慮

しながら、培養肉が流通した場合の課題を洗い出し、法整備に向けた議論を重ねている。「食品ラベルの表示1つをとっても、どのような名称にすべきか検討されています。海外との競争もありますから、早く販売したいという意見もあるかもしれませんが。しかし新しい技術だからこそ、多くの関係者が集まって、多角的な視点から慎重に議論しています」と竹内さんは推移を冷静に見守っている。

消費者としては、安全性とともに気になるのが味だろう。一般的な「おいしさ」の評価として定着しているのは、人の感覚に基づいて好みや品質を評価する「官能評価」だ。しかし、評価は熟練した技能と繊細な感覚が必要となる特殊な業務だ。培養肉のためだけに、こうした評価者を養成するのは現実的ではないだろう。また牛肉ではA5などのランク付けもあるが、これは1頭から取れる肉の量と霜降りの度合いを表したもので、おいしさの評価した指標ではない。

本物の肉を作ることを目指して研究してきた竹内さんだが、肉のおいしさとは何か、という根源的な問いを改めて考えているという。専門家に学ぶ機会も設けているが、まだ明快な答えにはたどり着いていない。「おいしさの評価には複数の要素が絡んでいて難しいとは思いますが、やはり数値で表せるとわかりやすいですね。食べるときにも客観的な評価がある方が安心でしょう」と工学者らしい提案を語る。仮においしさセンサーが開発できれば、既存の食品にも応用できるだけに、センサー開発にも期待したいところだ。

情報提供で「否定」から受容へ 日本ブランドは世界に通用する

おいしく安全な培養肉を作ることができたとしても、それを消費者が選んで購入するとは限らない。新しい技術が登場した際に、一定の拒否反応が生じることは珍しくなく、特に遺伝子組み換え作物のように、食品ではか

なりシビアになることも想定される。しかし、冷凍食品のように生活に溶け込んでいった事例も多い。そこで竹内さんは、共同研究を行っている日清食品ホールディングスや弘前大学の日比野愛子准教授らとともに、培養肉に対する市民の意識調査を続けている。

サイコロステーキサイズの培養肉を作った19年に、2,000人規模のアンケート調査を行った(図8)。培養肉を食べてみたいという人が27パーセントだったのに対し、食べたいと思わない人は44パーセントに上った。その後、培養肉のメリットである、食料危機の解決につながる技術になる可能性があることや、動物愛護に貢献する技術になる可能性があることを説明し、改めて培養肉を食べたいと思うかを質問したところ、いずれも50パーセントの人が食べてみたいと回答したという。

このアンケートは、培養肉に否定的だった人でも、なぜこの技術が重要なのか、この技術があると何が変わるのかといったことを伝えることができれば、受容してもらえる可能性があることを示唆したといえる。「この結果を見て、改めて一般の方との対話の重要性を感じました。19年の時点では、大多数の方が培養肉に特別な興味があるとはいえない状況でした。そういった方にも届く情報発信ができれば、培養肉が受け入れられていくようになるのではないかと感じました」と竹内さんは手応えを語る。

この知見を生かして取り組んだのが、女子美術大学の佐藤暁子特任准教授との連携プロジェクトだ。女子大学生の感性を生かし、培養肉の情報を伝える作品を制作した(図9)。「わかりやすく培養肉を伝えるにはどうすれば良いか、皆で頭を悩ませながら作ってくれました。私もカルタの言葉を考えましたが、とても楽しかったです」と笑顔を見せる。また企業や関係団体との研究会やシンポジウムも開催されており、培養肉の認知度や注目度が確実に高まっていること

を実感していると竹内さんは語る。

再生医療分野や3次元組織工学は日本の得意分野でもある。また長年培われた和食文化やものづくりの文化もある。「日本ブランドの培養肉であれば、世界でも十分に通用すると思っています。日本のいいところを生かして新しい産業を生み出すきっかけにしたいですね」と培養肉の今後に期待をかける。プロジェクトはまだ走り始めたばかりだ。国民の理解と国の支援も欠かせない。「環境にも、動物にも、人間にも優しい培養肉を一緒に実現していきましょう」と竹内さんは力強く語った。



図9 女子美術大学との共同プロジェクトによる「培養肉」関連作品(上:PR動画 長舟麻里作、中央:かるた 伊藤瑞朱作、下:リーフレット 関口宏美作)

