

牛肉らしい食感の培養肉の事始め サイコロステーキ状の筋組織を作製

インタビュー：ジャーナリスト 小川 明

地球の人口増や温暖化などへの対策は差し迫った課題だ。経済成長で牛肉の消費は増えつつあるが、牛の畜産は最も大量の飼料が必要で、地球環境を脅かす一因になっている。その解決策として浮上してきたのが培養肉だ。東京大学と日清食品ホールディングスは「サイコロステーキ状の培養肉を世界で初めて作製した」と今年3月に日本農芸化学会で発表した。研究を率いる竹内昌治東大教授にその可能性を聞いた。

一番難しい ステーキ肉

小川 培養肉の研究が世界的に盛んになっています。一方植物由来の代替肉などもあります。竹内 一般論として代替肉の一つに培養肉があると思います。代替肉は肉もどきの大豆ミートや豆腐ミートで実用化されています。精進料理の時代からずっと肉もどきは作られてきました。もう少し肉に近づけようと、大豆を遺伝子改変してミンチにした植物肉が出回っています。作

っているのはアメリカの新興企業で、米国のハンバーガーショップで食べることが出来ます。ただ、遺伝子組み換えは日本になかなか受け入れられません。一方、肉本来の味を追求して、いこうとして、ウシの筋肉のものととなる細胞を体外で増やし、それを組織にした培養肉が出てきました。2013年にオランダのマーストリヒト大学のマーク・ポスト教授がウシの培養肉を作って、一気に研究が広がりました。この方法では、基本的には遺伝子操作はしません。培

養肉のミンチは世界レベルで来年、市場に出回るかという状況です。これに対し、僕は肉本来のブロック、筋の通ったステーキ肉を作ろうとしています。

：広い意味でのタンパク質代替肉は4段階に分かれる。まず古くから精進料理などで出される肉もどき、次に遺伝子改変した植物ミート、3番目に培養のミンチ肉が続く、培養ステーキ肉は最終段階だ。マーク・ポスト教授がウシの筋肉細胞を体外で培養して作ったのはミンチ肉で、竹内教授らが目指す培養ステーキ肉は最も難しく、「究極の培養肉」といえる。飼育に要する飼料は鶏、豚、牛の順で急増する。このため牛肉消費の伸びは地球環境の脅威となっている…

竹内 技術的な課題は、少ない

細胞からいかに安く大量の細胞を増やすかです。もう一つは培養液のコストを下げることです。これがミンチ肉作りの2要素でした。培養細胞ができたとしても、ステーキ肉はこれに加えて人工的に3次元組織の形成をしないといけません。僕はその3次元組織形成を10年間ずっと研究してきたので、培養肉の分野に入ってきました。

小川 人類史的に見て、培養肉の可能性はいかがでしょう。

竹内 人類史上、狩猟採集から始まり、畜産が発達し、将来は培養肉も選択肢に入ると思いますが。全部が入れ替わることはありません。今でも、野生鳥獣の肉食をするジビエのように狩猟はあります。安全な培養肉ができて、狩猟や畜産はなくなりません。人口が増え、人々がリッチになればなるほど牛肉は食

未来技術の旗手たち

東京大学大学院情報理工学系研究科教授
東京大学生産技術研究所教授

竹内昌治 氏



PROFILE

たけうち・しょうじ

1972年、東京生まれ。甲府市で幼稚園から高校まで過ごす。95年、東京大学工学部卒、2000年、同大学院博士課程修了。01年、東大生産技術研究所講師、03年、助教授を経て14年から教授、19年に東大大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻教授。09年からは（公財）神奈川科学技術アカデミー（現・神奈川県立産業技術総合研究所）のプロジェクトグループリーダーも兼務。細胞や生体分子を使った、やわらかいモノづくりによるバイオハイブリッド研究に取り組む。（写真・宮沢一二三）

べられてきています。2050年に地球上の人口は100億人に近づくといわれています。そうなれば肉の生産は追いつかなくなりそうです。培養肉は植物工場と同じように細胞食品工場で作られるでしょう。農業というより工業ですね。

筋線維を培養、立体化

小川 サイコロステーキ状のウシ培養肉はどう作りますか。

竹内 まず筋肉のもととなる細胞をウシから採取します。その細胞を無菌状態で大量に培養して増やし、コラーゲンのゲルに入れます。その中で細胞は自由

に動き回ってコンタクトして、細胞膜が融合してどんどんつながって筋線維ができます。長細く加工したゲルの中に入れると、筋線維は長い方向にそろいます。その時にビタミンCを加えると、筋細胞の成熟が促され、タンパク質がタテのシマ模様を成す筋肉特有のサルコメア構造を作りやすくなります。

この技術を2018年にマウスの筋肉で実現して、ロボットのアクチュエーター（駆動装置）に使うとしていました。さらにウシの筋肉に応用すれば培養肉になると考えて、技術を開発し、ウシ細胞でも筋細胞同士の融合やサルコメア構造を持

たせることができることを示しました。それらをシート状に加工し、そのシートを積層するとサルコメア構造を有する厚みのある立体筋組織ができることがわかってきました。

ほかの培養肉では、筋肉の細胞をぐっと固めて混ぜたものをミンチ肉といっています。僕らが独自に考案した方法が使えたので、ミンチ肉より一歩先に進んだステーキ肉を研究できるようになってきたと考えています。できる限り筋肉に近づけた肉を作りたいのです。筋肉とは何かというと、検討すべき項目はたくさんあるのですが、少なくともそろった筋線維やサルコメ

ア構造を持つことが必要な条件だと思っています。しかし、どのくらいのレベルの筋肉になっているかを解析して示さないと、食に対して厳しい文化を持つている日本では受け入れられないでしょう。

現時点での、最先端の組織工学や再生医療の技術をもつても、生体と見間違えうほどの筋肉組織を体外で作れる技術はまだありません。同じように肝臓や脾臓すいぞうができたといっても、体の臓器と同じレベルでできた例はありません。そのくらい体外で組織培養するのは難しい。アカデミアとしてはその目標に向かって研究を進めていきます。いろんなアプローチがありますが、僕らは「筋肉に近くなればなるほどおいしくなる」という仮説のもとにやっています。

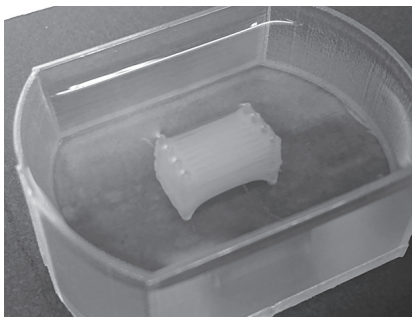
：筋肉特有の遺伝子発現や、電気刺激を与えた時に収縮するなどの特性が本来の筋肉とみて、そこまで確かめようとこだわって、培養肉作りを進める。今回できたのは縦1センチ、横0・8センチ、厚さ0・7センチ

のサイコロステーキ状だ。日清食品との共同研究で、見た目はカップ麺の具としては十分という感じはするのだが…

竹内 体外で作られてきた培養肉では、筋肉に最も近いと思いますが、本物の筋肉とはまだまだ違います。筋肉は筋細胞だけで成り立つものではなくて、脂肪も血管、神経もあります。筋肉がもつと成長して成熟するまでには、それぞれが必要になると思います。

社会の受け入れが課題

小川 血管や神経、脂肪まで考えると、すごく難しいですね。
竹内 そこまでいなくても



竹内教授らが研究室で作ったサイコロステーキ状ウシ培養肉

「ちゃんと食感や味、おいしさを評価して、おいしい肉」となれば、売れると思います。アカデミックには「筋肉とは何か」まで考えてモノづくりを究めるわけですが、その手前からどんな産業化はされますか。

小川 問題は消費者の反応です。
竹内 心理的な部分も重要です。同じ技術でも、大学の研究者が「はい、これ肉ですから、食べてください」と言うより、共同研究している日清食品が作れば、よほど信頼されます。大企業がベンチャーに出資している場合がありますが、大企業が真面目に培養肉研究に直接取り組んでいるのは世界でも日清食品と僕らだけです。日本は安全性や安心感が非常に大事です。
小川 作った培養肉は、ご自身で食べてみたのですか。

竹内 大学では、作ったものを勝手に食べてはいけません。人体試験になるので、倫理委員会の承認が必要ですが、議論できる材料を整えないと、倫理委員会も判断できません。

基本的に今、医薬品の試薬を培養に使っているため、食品扱

いになっていません。食品グレードで作った培養液やプロセスででき上ったものを食べるとなれば、倫理委員会を通しやすいでしょう。僕はできるだけ早く食べたいのですが、大学ではルールを守らないと研究を進めることができません。

食品として扱っていたものを食べるのは何の問題もありません。しかし、それは古くから食経験があるものと、法律にのっとった食品添加物しかないんです。研究で使う試薬の培養液はそれに入っていないわけです。新しい分野なので、ルール作りは必要です。海外は結構構いなしのところもあるようですが、特に日本はそういった敷居が高いので、焦らずにしっかりとやっていきます。

こういった食品は社会受容性が非常に重要です。そのために研究の情報は常に出していきま。説明していけば培養肉の知識が社会に浸透します。社会が受け入れられるように、培養肉の研究は社会と歩調を合わせて進めていきます。本格的に売りだした時に「では、食べてみよ

う」となればよいと思います。

小川 サイコロ状からもつと大きな筋組織を作るのは大変？

竹内 例えば、100グラムのフィレステーキを僕はイメーシしています。縦横各7センチ、厚さ2センチほどです。そのくらいにはしたいと思っています。大型になるほど、細胞を単に積み上げるだけでなく、中まで養分が行き渡るように血管構造などが必要になってきます。

機械とバイオとの融合を研究

小川 実用化にはコストを下げる必要があります。展望は？

竹内 2013年には培養ミンチ肉のハンバーガー1個が3800万円くらいしました。それが来年に販売されるのは1個12ドル(約1300円)と言われている。コストダウンは急激で、さらに大量生産して売ればどんどん下がります。

小川 専門の分野は機械工学のバイオハイブリッドですね。

竹内 バイオハイブリッドは、生物の器官や細胞、分子を機械に組み込んで、人工物だけでは

未来技術の旗手たち

構成できない機能を実現する工学です。ずっと面白くて研究しています。バイオと機械を融合させる時には、細胞やDNA、タンパク質と機械とをハイブリッドさせます。それはスモールスケールのマイクロ、ナノ加工でやっていくしかないのです。

生物に似た機械を作るバイオミメティクス（生物模倣工学）に対して、バイオハイブリッドは生物そのものを使います。欧米で新しい概念としてどんどん広がっています。仲間を増やして、意味のある研究成果を出し、体系化していくのが重要です。日本はそもそも自然を制御するのではなく、自然と人間の融合を考えます。バイオの力を使った機械に共感を感じていただける風土があると思います。小川 従来の機械工学の体系から見ると異質ですね。

竹内 機械工学では金属やプラスチック、半導体などの人工物の加工とか、設計や制御は学びますが、生物の加工、設計、制御はあまり学びません。僕らが今フォーカスしているのは細胞です。細胞をデバイスの中でど

う機能させるのか、が重要です。

：バイオハイブリッドを応用したセンサー、リアクター、アクチュエーター、プロセスサーの4種類のデバイスを挙げる。半透膜に包まれた脾島（ヒトiPS細胞由来のベータ細胞）はリアクターで、体外で作った小さなデバイスを体の中に入れて、失われた膵臓のインスリン分泌機能を補完できる。竹内教授らはこのカトリッジ型脾島の体内への移植で糖尿病の治療を目指して前臨床研究を進めている。生物は高感度なセンサーをたくさん持っている。視覚、味、におい、触覚など全部、多様な膜タンパク質が関わっている。その膜タンパク質を切り出してデバイスに入れば、センサーができる…

竹内 一番効果的なのは、においやガスの測定です。イヌの鼻レベルで見分ける嗅覚機能は人工物ではできていません。だったら、生物を使おうです。生物そのものを機械のツールとして使っていく新しい流れです。機

械のための生物という考え方はユニークだと思います。

異分野融合で 新発想を

小川 もともと筋肉はアクチュエーターとして研究していたのですが、培養肉はそのバイオハイブリッドの一環です。

竹内 人工物と動く筋肉を融合させて、ロボットの駆動源として、薬をかけて筋肉の病気を明らかにする試験片に使ったりしているうちに、食べようとする培養肉の研究にもつながりました。培養肉は製造過程で機械と融合して作っていくものです。

それぞれ企業と共同研究しており、デバイスの実用化も考えています。いろんな目的のために応用できるのは工学の醍醐味です。生体と機械が融合して生物らしく振る舞います。中学生のころ、「ロボカップ」や「ターミネーター」などSF映画に刺激を受け「いつかは生体と機械が融合したシステムを作ってみたい」とずっと考えていました。小川 バイオハイブリッドは今後、機械やロボット工学でま

ます重要になりそうですね。

竹内 科学技術が社会に浸透していく時、細分化とともに、同時に融合していくアプローチがあります。機械工学だから機械しか勉強しない、生物学だから生物しか勉強しないという時代ではなくっていきます。機械の中に生物があるのを当たり前のように考える時期は必ず来ます。研究室のメンバーは計約70人で、機械や生物、化学、物理、医学、ビジネスマン、アーティストなど多彩です。ラボ内の異分野融合もできて日々の研究がぐるぐる回って、新しい発想が次々と生まれています。

：狩猟や畜産に次いで、工場で作る培養肉は世に出るのか。欧米では植物肉のブームが起きて新興企業に注目が集まる。その先には、本来の肉の食感を持った培養肉がおいしさを競い合い、食をデザインする未来がいろいろやってくる。それは21世紀の時代の要請といえる。バイオハイブリッド工学から派生したユニークな研究で牛肉を作る試みは将来への布石になりそうです…