

## スマート飼養衛生管理システム創出による畜産物の安定供給

眞鍋 昇\*

〔キーワード〕：スマート畜産，ゲノム編集，アニマルウェルフェア，人獣共通感染症，DX・AI技術

## 1. はじめに

人類の長い歴史を紐解いていくと、私たちの祖先はその時代その時代における最先端科学技術を活用して食料増産に取り組んできた。その結果、食料確保に従事しないですむ人たちが現れ、集住できるようになって都市が発生し、多くの文明を築くことができ、学術や芸術が開花してきた。

20世紀初頭、大気中窒素をアンモニアに固定できるようになって、作物育成に不可欠な窒素肥料の人工合成が可能となった。安定して安価な窒素肥料を供給できるようになって作物の収穫量は革命的に増加し、それに伴って人口も飛躍的に増加した。その後も農業技術は革新され続け、1950年からの50年間で収穫面積はほとんど増加していないにもかかわらず、単位面積当たりの収穫量が激増して世界の食料生産量は3倍以上増加した。これによって人口が爆発的に増加し、1987年に50億人、1998年に60億人、2011年に70億人を超え、2019年には77億人に達した。一方で、化学肥料が誕生してから100年以上、人類は大量のエネルギー消費と二酸化炭素排出を伴うアンモニアの製造を続けてきたが、近年気候変動に対応した改善策が欠かせなくなってきた。2019年、新たに発明された触媒を活用することで常温常圧下でもアンモニアの合成反応を進められる技術が開発され、エネルギーの大量消費が不要になった。このように最先端科学技術は常に人類が抱える課題を解決し、繁栄と幸福をもたらしてきた。

国連が発表した「世界人口予測2019年版 (United Nations, 2019)」によると、1950年時点で25億人だった地球人口は、2000年には61億人、2020年に

は78億人に達し、2030年には85億人、2050年に97億人、2100年には100億をこえて109億人に達すると予測されている。このような人口増加の中で、世界の畜産物の生産量は過去40年間に急激に増加してきた。特に、東アジア、東南アジア、ラテンアメリカ・カリブ海地域における需要の拡大は顕著である。畜産物はアミノ酸スコアが高い高品質タンパクの供給に重要であるが、人間にとって摂取が不可欠な食物ではなく、摂取が望ましくかつ嗜好される食品であると考えられてきた。適切な量の食肉、乳、卵およびこれらの加工品は、タンパクと必須微量栄養素を包括的かつ消化しやすい形で摂取できる貴重な栄養源で、長寿を実現することに大きく貢献してきた。しかし過剰な摂取は健康上の問題につながるとも考えられている。本来、畜産は野生動物を家畜化して遊牧・放牧して利用するもので、農耕より早い時期にはじまり、過酷な自然環境のなかで家畜の力を借りて人類が安定して生存するためのものであった。農耕がはじまると、牧草だけではなく、稲や麦類の藁などの人類の食料には適さないものや農作物の不可食部などの農場廃棄物などの人間にとって非食用である飼料を高品質な畜産物に変換することにより、食料供給に貢献するものであった。しかし、近年畜産の専門化と並行して人間の食用となり得る玉蜀黍や麦類などの穀物や大豆などを飼料として大量に消費するようになってきており、2015年に国連によって設定された持続可能な開発目標 (Sustainable Development Goal : SDGs) の目標2「飢餓をゼロに」という視点にたつと、現行の家畜飼養システムはパラダイムシフト的な大転換が求められる状況になってきている。

しかしながら、経済的に裕福になった国々では美味しいタンパク性食品として畜産物の持つ役割はますます大きくなってきている。2050年までに、畜産物の消費は世界全体で1.7倍、特に経済発展が目覚ましいアジアや中南米の開発途上諸国では2倍以

\*大阪国際大学学長補佐，家畜改良センター理事，東京大学名誉教授，日本中央競馬会経営委員，日本学術会議会員 (Noboru Manabe)

上に増加すると見込まれている。20世紀になってから、畜産は欧米を中心に家畜を一か所で集中的に飼養する、いわゆる工場化をすすめて一人が飼養できる家畜の数を増やすことにより効率化を実現して急増する需要に対応してきた。しかし、極度の生産の集約化は、環境への負荷を増大させるとともに様々な家畜疾病を引き起こす要因となってしまう。限られた土地、人材、飼料資源の中で急激に増加する畜産物の需要増加に対応していくためには、集約的生産が必要ではあるものの、家畜を使い捨てる機械部品のように扱うのではなく、生命体としての尊厳を保って飼養するアニマルウェルフェア規格を遵守するとともに、土壌・水・大気など多面的環境への負荷を軽減し、資源利用の効率性を高めるだけでなく、積極的に未利用資源の飼料化にも取り組むことが回避できないレベルに至っている。加えて、世界規模で活発になっている人流や物流の影響で家畜感染症、人獣共通感染症、新興感染症などが地球規模で拡散し、様々な障害が発生し続けている。これらの多方面にわたる諸課題を解決するためには、急速に発展している Digital Transformation (DX) 技術を活用して、我が国に最適化された未来志向型先端的家畜・畜産物生産管理システム（アニマルウェルフェアの遵守、家畜疾病対策の強化、未利用飼料資源の活用と収穫後ロスの低減、休耕地や中山間地を利用した Artificial Intelligence (AI) 化放牧、少人数で高品質を保てる AI 化農場管理、バイオ燃料副産物の利用、輸送インフラの整備と市場アクセスの改善など）を創出することが欠かせない。

畜産の専門化が進んでいる先進諸国のなかで個々の国の畜産の規模が日本に比較的近い欧州連合 (European Union: EU) 諸国が行っている対策は、我が国にとっての重要な指針となる。EU 圏では、地球規模での急激な人口の増加に歯止めをかけられることを前提としながらも、従来のようにやみくもに食料の増産を目指すのではなく、多面的に環境負荷を軽減しながら畜産物の高品質化を実現することで生産を持続可能なものとするパラダイムシフト的生産技術革新が進められている (Chaplin-Kramer ら, 2019)。すなわち、EU 圏では (1) 世界の動物衛生の向上を目的として設置された国際機関である国際獣疫事務局 (Office International des Epizooties: OIE) が勧告している「国

際的アニマルウェルフェア規格」を満たして家畜が快適に暮らせかつ環境負荷を軽減させられる持続可能な飼養管理システムを創出して、その普及を進めている。これによって家畜のストレスと疾病が減少して畜産物の生産性が向上し、安全性が確保されることが実証されてきている。(2) 急速に広まっている地球規模での家畜感染症、人獣共通感染症、新興感染症に対応するために最先端のゲノム編集技術を駆使して素早く高耐病性の家畜を作出すること、数値目標を掲げて生産効率の高い家畜の作出することなどを進めている。併行して、新型コロナウイルスのような新興人獣共通感染症を含む感染症を地球規模で連携して防疫・統御する DX システムの開発も具現化しつつある。薬剤耐性菌の増加は深刻な課題で、2020年4月に国連が、このまま適切な手立てを実施しないと、2050年には薬剤耐性菌によって毎年1千万人が死亡する事態となると警告している。高耐病性の家畜作出は、多くの抗生剤に対して耐性を獲得してしまった多剤耐性菌を統御することに大きく貢献する。(3) DX・AI 技術を活用して家畜の飼養管理と衛生管理システムの自動化、搾乳システムの自動化や放牧の無人化システムを開発して普及させてきている。加えて、生乳、鶏卵、精肉などの畜産物やチーズ、ハム、ソーセージ、ベーコンなどの畜産加工品の安全性を担保するための DX・AI 技術を活用したトレーサビリティ・システムの構築、減少し続けている新規農業従事者を短期間に高度技術者化するための DX・AI 支援教育研修システムの構築と運用による後継者問題の解決なども図っている。さらに、このように高度に自動化が進むことで家畜飼養管理の分野で障碍者が容易に働くことができるようになり、農福連携が進展されようとしている。このような EU 圏における多面的な取組は、我が国においても早急に具現化しなくてはならない喫緊に取り組むべき課題である。

## 2. アニマルウェルフェア

これまで主に家畜衛生や人獣共通感染症に関する国際基準の策定等を行ってきた OIE が、家畜を快適な環境下で飼養することによって家畜の疾病を減らすことが重要であるとの考えから「国際的アニマルウェルフェア規格」を勧告している。アニマルウェルフェアの考え方では、家畜を快適な環境下で

飼養することで家畜のストレスや疾病を減らすことができ、このことが家畜の生産性の向上や安全な畜産物の生産に直結するとされている。このため、アニマルウェルフェアの考え方を踏まえた新しい家畜の飼養管理システムを開発して普及させることが重要である。

1770年ごろに連合王国（イギリス）で産業革命がはじまるまでは、殆どの人々は農業に従事して自給自足的な生活を送り、牛や馬などの大型家畜は現在のトラクターのように農耕、土木作業、運搬などに欠かせない使役動物であった。欧州諸国のような冬の長い地域の人々にとっては、豚肉を加工した保存食のハム、ソーセージ、ベーコンなどや牛乳、山羊乳、綿羊乳などから製造したチーズやバターなどは欠かせない命の糧・保存食であった。20世紀初頭に化学肥料が発明されてからは食料生産に余裕ができ、家畜を集約的に飼養して卵、乳、食肉などを専門的に生産する畜産業がはじまった。現在では主要先進国における農業分野の最も重要な産業に発展してきた畜産業は、我が国でも重要な産業となっている。2019年度の我が国の農業総産出額は8兆8,938億円であり、その約三分の一の2兆9,631億円（33.3%）は畜産業によって産出されている。家畜の飼養は、産業革命がはじまるまでの約1万年間は牧歌的なものであったが、産業革命後の約250年間で専門化が進み、主要な先進国では20世紀後半には大規模で工場的な農場で集中的に家畜を飼養する集約的畜産（集中家畜飼養施設における畜産）が一般的になった。我が国では、集約的畜産は1950年代に産卵鶏の飼養で始まった。続いて、肉養鶏、その後豚に広がり、肉用牛や乳用牛にも広がった。いずれの家畜でも、飼養農家数は一旦増加したが、その後減少しつづけているが、一戸当たりの飼養家畜数は増加し続けて集約的畜産に最適化された技術革新が普及している。しかし、あまりに生産の効率化を図るあまり、アニマルウェルフェアはないがしろにされてきてしまった。

このようなアニマルウェルフェアをないがしろにする状況にEU圏を先導者として反省する機運が高まってきており、我が国もこの機運を無視するわけにはいかない状況になってきている。世界の食肉貿易量は、2030年には2018年より720万t増加して3,800万tに達し、特に世界の輸入需要の大部分

をアジア・アフリカ諸国が生み出すと予測されている。しかしながら、EU圏では、食肉（牛、羊、山羊、豚および鶏や家鴨などの家禽類の肉）の消費量と生産量は減少してきており、有機飲用乳と高品質チーズの消費が増加しているため、このような状況に対応して生乳生産量の増加がはかられてきている。このようなEU圏における変化は、若い消費者を中心として進行している。家畜に対する倫理観の変化とアニマルウェルフェアの重要視によって家畜を殺さないといけぬ肉食を控え、家畜を殺すことなく貴重な動物性タンパクを継続して得ることができる酪農（生乳生産）へとシフトしている。さらに一歩踏み出して、植物由来のタンパクを摂取する食生活へ移行している消費者「フレキシタリアン（準菜食主義者）、ベジタリアン（菜食主義者）、ビーガン（完全菜食主義者）」が増加し、併せて動物性食品として昆虫を工場規模で飼養するビジネスも広まってきている。日本では、人口の減少、高齢化にともなう健康への懸念、家畜飼養に起因する水質汚染や土壌汚染などの環境悪化、メタンなどの温室効果ガス排出の増加を介した気候への悪影響、消費者の安全・安心への関心の高まりにともなう生産プロセスの透明化（食肉の原産地、有機飼養の確認、時には生産者や飼養管理プロセス、流通経路、加工プロセスなど）、量から品質重視へのシフト、肉食から中食へのシフトに伴った生鮮食肉から加工調理食品への移行などによって食肉消費量は減少していくものと考えられている。しかしながら、家畜に対する倫理観の変化・アニマルウェルフェアの重要視への対応が遅れており、OIEが勧告している「国際的アニマルウェルフェア規格」に準拠しながら我が国の社会情勢に適合して実現可能な家畜飼養管理システムを創出し、早急に普及させて実体化させなくてはならない。畜産物や畜産加工品がアニマルウェルフェア基準に準拠していることを表示することを義務化できるようにするための基盤科学としての畜産学をより一層充実させることが避けて通れない緊急な課題となってきている。

### 3. ゲノム編集技術

シャルパンティエ博士とダウドナ博士らは、2012年にClustered regularly interspaced short palindromic repeat (CRISPR) が原核生物へのゲノム編集に活用

しうることを見出し (Jinek ら, 2012), 次いで CRIPR のガイド RNA としてレンサ球菌の RNA を用いることに成功し, CRISPR と酵素 Cas9 による高効率のゲノム編集技術を創出した。この功績によって, 8 年後 (2020 年) にノーベル化学賞を受賞した。ゲノム編集技術は, 生物が持つ遺伝子の中の目的とする場所を高い精度で切断することなどにより, 特定の遺伝子が担う形質を人為的に素早く改良することができる技術であり, 作物, 家畜, 魚介など広く農畜水産業分野での育種改良に活用されてきている。これまでの育種法や遺伝子組み換え法と比べて, より容易に品種を改良することが可能となってきた。特に, 1 年間で 1 頭しか出産しない牛のような大型単胎家畜の改良には長い時間と経費が欠かせないので, 短期間に家畜改良を実現できるゲノム編集技術は, 畜産研究領域において最優先すべき課題である。我が国でも和牛のゲノム編集の実用化を目指した基盤的研究は進展している (Ikeda ら, 2012)。この研究によって, 一塩基置換によって引き起こされる黒毛和種の遺伝性の疾患であるイソロイシル tRNA シンテターゼ (IARS) 症候群の原因となるゲノム上の遺伝子 (IARS 変異) が, CRISPR/Cas9 ゲノム編集システムを用いることで正しく修復できることが実証された (この研究では, 34 日齢の胎児を用いて修復を確認している)。これまで非常に優れた遺伝形質を保有しながら一塩基に起因する遺伝性疾患のために種畜として用いることを断念されていたものを, 実用化段階のゲノム編集技術を活用することで復活させることができ, 家畜改良にパラダイムシフト的進展をもたらすものである。我が国の家畜改良の実務を担っている家畜改良センターでも実用化を目指した研究に取り組もうとしている。

EU 圏では漫然と家畜改良に取り組むのではなく, 明確に数値目標を掲げた高効率な家畜改良が進められている。特に人間と食が競合する穀物類や芋類を主な飼料とする鶏や豚などの家畜より, 人間とは食が競合することなく人間のための高品質な食料を生産することが難しい荒地や寒冷地でも生育できる牧草や穀物の藁などの農場残渣を飼料として飼養できる乳用の反芻動物の家畜改良に力が注がれている (牛肉の輸出大国であるニュージーランド, オーストラリアや南米諸国で盛んになりつつある

肉用牛を放牧を主体として牧草のみを飼料として飼養するグラスフェッド・grass-fed とは異なる)。EU 圏では, 生乳の生産量を 2030 年までに対 2018 年比 9.4% (130 万 t/年) 増加させること, および取引価格を 16.2% 増加させることが数値目標として掲げられており, この目標を実現するためのゲノム編集技術を活用した乳用牛の改良と DX・AI 技術を有効利用したマーケット改革が進められている。

一方, EU 圏では, 家畜の飼料も含めて穀物の遺伝子操作には否定的である。GM (Genetically modified) フリー飼料を給与して乳牛を飼養することを実現し, DX・AI 技術を活用して家畜や畜産物の生産者や生産地域, 生産プロセスなどを明確化すること (トレーサビリティシステム) で付加価値を高め, 消費者が安心して積極的に購入する高価格チーズの生産が推奨されている。実際に, EU 圏内では高価格なモッツァレラチーズの消費が順調に増加しており, 2030 年のチーズ消費量は 2018 年比 7% 増加すると推測されている。EU 圏外への輸出も堅調に増加しており, この 10 年間で約 40% 増加した。このような高価格チーズの消費の増加から, 2030 年のチーズの総生産量は 120 万 t に達するとみられている。120 万 t のチーズを生産するためには 4,100 万 t の生乳が必要である。EU 圏では, この生乳生産を実現するために, 乳牛 1 頭当たりが 1 年間に生産する乳量を 15.2% 増加するという数値目標を掲げ, そのためにゲノム編集などの先端科学技術を駆使した品種改良のために巨額を投資している。並行して, 家畜に対するゲノム編集の有用性だけでなく安全性の評価も注力されており, 法令の整備も併行して進められている。我が国では基盤的レベルでの研究は行われているものの, 実用レベルには至っていない。明確に数値目標を掲げた先端的家畜改良の一層の進展, およびグローバルな整合性が整っている法令の整備が避けて通れない状況である。

#### 4. 世界規模で拡散する感染症への対策

飛行機で運搬される家畜・畜産物の貿易量の急増や旅行者の激増などに起因して, 地球規模で急速に拡散する家畜感染症を統御できなくなってきた。例えば, 2010 時点では 2030 年までに北米諸国や欧州諸国から東アジア諸国への豚肉貿易量は

70～80万t増加すると見込まれていたが、アフリカから欧州に拡散し、感染が広がり続けて予断を許さない状況のアフリカ豚熱（African swine fever：ASF）の影響で欧州諸国からの供給は滞り始めている。ASFは、強い伝染力と高い致死率が特徴で、治療法が無いので発生した場合には畜産業界への影響が甚大であるために「家畜伝染病」に指定されている。2018年8月にはロシア連邦からいきなり1,200km離れた中華人民共和国に侵入し、3年後の2021年7月15日でもアジア諸国では新規発生が報告され続けている。中華人民共和国では国内で発生が続いており、3.1億頭以上の豚が飼育されている国内畜産業に対する被害は甚大なものとなっている。2019年から2020年にかけてモンゴル、ベトナム、カンボジア、ラオス、フィリピン、ミャンマー、インドネシア、インドへと次々に広がり、2021年にはマレーシア、ブータンでも発生した（2021年2月3日現在）。これらアジア諸国における豚肉生産は大幅に減少しており、この状況をうけて豚肉の国際価格は上昇し続けている。我が国は、このように東アジア、東南アジア、南アジア諸国へ拡散し続けているASFに対して常に臨戦態勢で水際防疫につとめて国内侵入を阻止し続けてきているが、万が一国内への侵入を許してしまったら、我が国でも豚肉生産が甚大打撃をうけることになってしまう。加えて、我が国では2018年9月（1992年の発生以来26年ぶり）ASFとは全く異なるウイルスを病原体とする豚熱（Classical Swine Fever：CSF）の発生が、岐阜市の養豚農場で確認され、その後70事例以上の発生が確認され続け、現在も継続している。CSFも、強い伝染力と高い致死率が特徴で、治療法が無く、発生した場合の家畜業界への影響が甚大であるので「家畜伝染病」に指定されている。CSFの感染拡大を防ぐために多くの養豚農場でワクチン接種が行われた。しかし、最近になってワクチン接種農場においてもCSFが発生してしまっており、対策が手詰まりになっている。

我が国では、カロリーが控えめで良質なタンパクを豊富に含み、価格が手ごろな家禽肉（主に鶏肉）の生産量・消費量が激増しており、2020年に12.6kg/人/年である消費量が10年後には2倍以上の25kg/人/年に達するとの予測もある。しかし、家禽から家禽への伝染にとどまっていた高病原性鳥インフ

ルエンザウイルス感染（Highly pathogenic avian influenza：HPAI）が、ウイルスの変異によって家禽から直接人間にも感染するようになってきているため、家畜だけの感染症に過ぎなかったHPAIに対する防疫対策を人獣共通感染症に対するより高度で経費がかかる防疫システムへと構築し直し、人間に対する安全性を担保することが求められるようになってきている。2020～2021年シーズンにかけて、2020年夏季にシベリアの営巣地の水鳥類で検出されたH5N8亜型ウイルスによるHPAIがユーラシア大陸全域で大発生した。すなわち、2020年9月から2021年3月にかけて、ユーラシア大陸の西側（フランスで492件、ドイツで223件など大発生した）と東側（韓国で88件、日本で52件など）でH5N8亜型ウイルスが猛威をふるった。我が国では、18県にわたる広範な地域で52件発生し、過去最大となる約987万羽（採卵鶏約904万羽・肉養鶏約81万羽）を殺処分（これまでは約183万羽が最大殺処分羽数であった）しなくてはならなかった。HPAI大発生のためにユーラシア大陸の西と東の主要な家禽生産国で生産が減少したこと、家禽の主な飼料である玉蜀黍の人間の食品としての需要の高まりやバイオエタノールの製造原料としての消費増などの影響で価格が上昇し続けていることも加わって、家禽肉はいつまでも低コストで生産可能なものではなくなってきている。

人類の歴史は感染症との闘いの歴史である。世界中を震撼させている新型コロナウイルスも新興の人獣共通感染症のひとつであるが、我々は地球規模で連携して人間、家畜、野生動物の感染症を安価で効率的に防疫・統御できるシステムを人智を尽くして開発・普及させることが喫緊の欠かせない課題である。

## 5. DX・AI技術

家畜のための飼料生産に衛星データを活用して環境への負担の軽減すること、搾乳ロボットの導入のような作業の簡素化と自動化を進めて家畜の飼養衛生管理を効率化することで農場経営の収益を向上させることなど多面的なDX・AI技術の活用が急がれている。生産現場で、高い品質を保ちながら省力化を進めて高効率化を実現することは、畜産の躍進に欠かせない。我が国の生産者は、牛乳、鶏卵、

食肉などの価格を食料サプライチェーンの末端が決定するという不公平な取引慣行を長年にわたって強いられてきた。その結果「卵は物価の優等生」と言われるような低価格が常態化してきてしまったため、農家の収益が悪化して疲弊してしまい、後継者不足に陥ってしまっている。他の産業と比較してバランスの良い収入を確保するためには、労力に見合った正当な利益を確保しなくてはならない。そのためにDX・AI技術を活用して生産者と消費者をダイレクトに結ぶことで中間搾取をミニマムにしていくことが欠かせない。価格交渉力が弱い小規模農家でもアニマルウェルフェア規格を遵守した高品質で安全な畜産物を生産すれば、それに見合った収益を確保できるようになることが、国民が長く安定して高品質な動物性食品を摂取できて健康を保ち続けることができるようになるために欠かせない重要な社会的課題である。

## 6. おわりに

安価で高品質な動物性食品を安定して供給することで畜産は我が国が世界でトップレベルの長寿国となることに貢献してきた。畜産業が活性化して一層社会に貢献し、人々の繁栄と幸福に資するため

には、アニマルウェルフェア規格の遵守や伝染病の統御などグローバルな視点にたった最先端の基盤的科学を一層充実させ続けることが欠かせない。今後とも、具体的な数値目標を掲げた家畜改良などの先端的科学研究へ産官学が一体となって実り豊かな支援を継続することを願うばかりである。

## 7. 文献

- 1) United Nations. 2019. World Population Prospects 2019. <https://population.un.org/wpp/>
- 2) Chaplin-Kramer R., Sharp R. P., Weil E., Bennett E. M., Pascual U., Arkema K. K., Brauman K. A., Bryant B. P., Guerry A. D., Haddad N. M., Hamann M., Hamel P., Johnson J. A., Mandle L., Pereira H., Polasky S., Ruckelshaus M., Shaw M. R., Silver J. M., Vogl A. L., Dally G. C. 2019. Global modeling of nature's contributions to people. *Science*, 366 (6462): 255-258. Doi: 10.1126/science.aaw3372
- 3) Jinek M., Chylinski K., Fonfar A. I., Hauer M., Doudna J. A., Charpentier E. 2012. A programmable dual-RNA-guided DNA endonuclease in adaptive bacterial immunity. *Science*, 337 (6096): 816-821. Doi: 10.1126/science.1225829.
- 4) Ikeda M., Matsuyama S., Akagi S., Ohkoshi K., Nakamura K., Minabe S., Kimura K., Hosoe M. 2017. Correction of a disease mutation using CRISPR/Cas9-assisted genome editing in Japanese Black cattle. *Scientific Reports*, 7, 17827. Doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-17968-w>