

論壇

先端技術と国土をフル活用した牛肉生産システムの変革とその可能性

北海道大学北方生物圏フィールド科学センター教授

後藤貴文

はじめに

今回、人類は新型コロナウイルス感染症のパンデミックの辛い体験に遭遇し、その中で食の大切さを実感させられた。ロシアのウクライナ侵攻による現実には、世界で今後予期せぬ戦争が勃発する不安や世界世情、特に経済状況の悪化もいつ起きるかわからないと印象付けた。大切な人と分かち合う体験が食の価値となる食べる楽しみは、たとえ 30 年後の 2050 年になっても切望されるだろう。近年は、昆虫食や培養肉などの高級で先進的な代替タンパク質が登場している。技術としてはおもしろく、様々な場面でバックアップとして重要であるが、人類は、やはり有史から変わらない地球やヒトにやさしい「自然の中から生まれた食べ物」を基盤的に求めるように思う。その生産過程は自然に根差す普遍的な生産の仕組みを基盤にするが、そこにこそ新しい生物学に基づく家畜能力の最大化、作業の無人化、自動化、ロボット化が必要であり、動物福祉を厳守した飼育を目指した DX (デジタルトランスフォーメーション)、AI 化、ロボット開発が求められるだろう。

私は植物資源をタンパク質 (食肉) に変換するルーメン微生物と、牧草を繁茂させる土壤微生物の能力を最大化して、ヒトが制御困難な地域、山、耕作放棄地、限界集落及び離島等、国土をフル活用して、放牧により植物資源をタンパク質に変換する食料生産システムを構築したいと考えて教育研究を進めてきた。その放牧牛管理には、DX、AI、宇宙科学技術、ロボット技術を駆使してアフターコロナの目指す無人化・自動化を目標としている。牛におけるエピジェネティクスを活用した技術により胎児期や新生児期に体質を制御し、ルーメン内微生物も制御する代謝プログラミング技術という世界にほとんどない技術の実現も目指して研究を進めている。これにより、未利用地や山、過疎地を放牧活用した低コスト化を実現し、牛肉生産を強固なビジネスとして地方創生に貢献させたいと思っている。

1 牛を放牧で飼養したい

私は 20 年近く大学の牧場で主に黒毛和牛を用いた牛肉生産に関する研究を行ってきた。良質な和牛肉を国内の飼料で生産して、現状の牛肉自給率が約 40% の状況を改善し、日本の消費者に供給することが大きな目標である。そのために注目してきたものが放牧である。牛は本来、草食動物 (反芻動物) である。日本の地方には耕作放棄地が急激に増加している。また、未利用な土地、

山などが豊富にある。そこには植物が繁茂している。この植物を使って、牛本来の草食動物としての機能を活かして牛肉を効率的に生産できないかをずっと考えてきた。

そこで課題となるのが産業レベルでの生産性である。牛は草食動物だが、産業的には草を主体的な飼料として肥育すると太りにくい。また、肉質がよくなるのに時間を要する。その課題を解決するためのひとつの戦略として、代謝プログラミングというコンセプトを採用して研究を進めてきた (図 1)。

牛の飼養を放牧にすると、牛舎の中で人が餌を給与するのではなく、山や草原、そこにある草を牛に自発的に食べてもらうことになる。人にとっては日々の餌やりや牛舎の中の糞尿の処理もなくなり、労力が低減され楽になる。一方、牛にとっては自由に歩きまわり、草食動物の本能的な行動欲求を満たして開放されることになると思われる。すなわち、いわゆるアニマルウェルフェアに準じた飼養ができる。しかしながら、広大な面積に牛群を放つと放牧牛の日々の管理や発育の把握が難しくなる。牛舎の中とは異なり、屋外の放牧では細かい管理ができなくなる。そのような放牧のデメリットを IT 技術で解消できないかと考えて研究を行ってきた。最終的には、放牧により子牛の生産だけでなく牛肉も生産する。その牛肉は適度な脂肪を含む赤身肉を目指してきた。現在、新型コロナウイルス感染症の拡大で消費者の食に対する認識が変わってきたように思う。日々食べるものは、これまで以上に安心・安全な、あるいは健康に貢献するような食材を求めるようになる。これまで主流であった脂肪交雑の高い霜降り牛肉のマーケットは、在宅での食事が多くなってきた今日、変革の必要性があるように思われる。牛本来の放牧や草を中心に生産される牛肉は赤身肉が主体で、そのマーケットは日本では未だ成熟していない。この赤身肉マーケットをレストラン業界等とタッグを組んで消費者に定着させていく必要がある。今回、このような概観の上に立つ筆者がどのようなことに取り組み、目指そうとしているのか、その一部を皆さんにご紹介したい。



図 1 筆者が目指している次世代型牛肉生産システムの概要

2 現状の牛肉産業についての疑問

日本の牛肉の自給率は約 4 割であり、海外から約 6 割の牛肉を輸入している。主要な輸入先はオーストラリア、アメリカ合衆国、ニュージーランド等である。一方で、和牛肉の輸出が推進されている。脂肪交雑の高い高級牛肉を輸出しようと、香港、カンボジア、アメリカ等に輸出されている。カンボジアになぜ和牛肉が輸出されているのか、不思議に思われるが、これはカンボジア経由で和牛肉の輸入を禁止している中国等に、流通させているとの見方である。我々日本国民の多くが食べている牛肉は約 6 割の安価な輸入牛肉であり、高級な和牛肉はどちらかといえば輸出されているという、流通としてはいびつな構図となっている。本来、日本の牛肉生産は、まず自国の自給率を一定レベル保ちながら、その上の戦略として輸出するというのが筋であろう。

和牛肉生産は経営的にはどうであろうか。例えば、一頭の和牛を生産して農家が出荷し、東京市場で A5 という最高ランクの BMS-12 という評価を得た場合、現在の相場であれば価格は約 140 万円程度になる。それに対するコストを挙げると、最近の仔牛の平均価格は高騰しており、約 80 万円である。その上に肥育に要する飼料費が約 30 万円で、この部分をエコフィード等の活用によりコストを押さえるように工夫している農家も見られる。さらに、一頭当たりの光熱水代金が約 6 万円、減価償却費が 2 万円程度で、合計すると約 130 万円となる。最高ランクの格付けが付けられたとしても利益は 10 万円程度しかないことになる。農林水産省が平成 26 年に出したデータでは、一頭当たり生産費が 101 万で、利益が 4.5 万円と示されている。

和牛肉生産は現実には利益が非常に小さいと言える。評価が下がると利益のない状態になりかねない。そのために様々な補助金が必要となる。和牛肉生産とはこのようになかなか難しいビジネスである。

日本は BSE や口蹄疫の悲劇も経験した。このような伝染病は農家経営を苦しめるだけでなく、BSE のような人畜共通感染症となると食料安全保障に関わる。これらの原因となるプリオンやウイルス等は目に見えないので、原因は特定されないが、輸入飼料に混入や付着等してきたものと推測されており、今後も輸入飼料に過度に依存すればこのようなリスクを負わなければならない。今後、未知のウイルスなどが飼料に混入するようなことがあれば、家畜を通して、農家や消費者に甚大な被害を及ぼす可能性もある。

和牛の場合、骨格筋、特にロース芯（胸最長筋）の中にできるだけ多く脂肪を入れるのが目標であった。しかし、動物生理的に、脂肪は余剰なエネルギーの蓄積場所であり、まず内臓脂肪に始まり、腎脂肪、皮下脂肪、筋間脂肪と蓄積され、最終的に筋内脂肪に蓄積される。すなわち、筋内脂肪を高めようとするれば、自ずと無駄な内臓脂肪、皮下脂肪が蓄積される生理的仕組みである。実際、一頭当たり 200 kg 以上の内臓脂肪や皮下脂肪、筋間脂肪といった無駄な脂肪が廃棄される。高価な輸入飼料を購入して、利益を削られながら、無駄な廃棄脂肪も生産するということになる。生産効率としては、見直しが必要であろう。

これらの状況を現場で牛を育てながら見てくると、このような和牛肉生産の仕組みは変えなければならないと強く思った。この仕組みを日本は今後 100 年、200 年と続けていくことができるだろうか。とてもそうは思えない。世界的には SDGs が叫ばれており、日本も 2030 年までに持続

的社會を達成していこうとしている。農産業でも、環境に配慮した持続的な農産業、かつ、社会に貢献できるような農産業であるべきという哲学が考慮されるべきである。

日本の世界産業である車産業界では、いち早く車製造に関する仕組みを変えてきた。将来、ガソリンを燃やして走っている車は売れなくなる。車業界はそれに気づき、環境にやさしいエンジン、電気自動車、水素エンジンで動く自動車開発というイノベーションを起こしてきた。軽量で強固なリサイクル素材にしても、IT 部品にしても、車に導入されて様々な新技術を用いたデザインインシステムによる車づくりを模索してきた。5 年に一度の程度で新しい仕組みで製造した自動車を消費者に販売する。こういう産業だから世界で活躍できる。日本に外貨をもたらし、我々はその恩恵に預かっている。農産業はどうだろうか。環境意識であるとか、いろいろな素材であるとか、循環型の生産であるとか、IT であるとか、その生産の仕組みを、世界を変えるような意識で牛肉産業を創ってきただろうか。

日本の和牛肉生産の現状は、輸入飼料に依存して、和牛に多くの脂肪を生産させている。輸入穀物飼料を与え、排出される糞尿は日本に蓄積され、様々な問題が発生している。飼料から牛肉・ミルク・糞尿・堆肥への生産が一方通行で循環がない。牛は植物資源を分解・吸収し、タンパク質である牛肉やミルクを生産してくれる動物である。牛が草を食べることで、国内に糞尿をして、その糞尿がまた堆肥となって草を生やしていく、そうすれば循環系を保つことができる。このような循環系を基盤として牛肉生産業を新しい仕組みに変えていけないかということが牛肉生産業の「問い」になる。

3 生産コスト：牛を穀物飼料で飼うか？ 放牧で飼うか？

この研究を始めた 20 年前には「和牛を草で飼うなんて馬鹿げているよ」と言われてきた。しかしながら、最近は様々な雑誌で牧草牛、いわゆる赤身肉が注目されている。牧草で生産された肉はヘルシーというイメージがあり、赤身肉を好む消費者も増えてきている。

近年の日本は食に関して豊かな国であるが、国民一人のタンパク質摂取量を見ると 50 g/日程度で低下傾向が認められる。日本人のタンパク質摂取量は、経済のバブル期と言われた 1980 年代は非常に高かったけれども、近年、国民一人当たりのタンパク質摂取量は低迷している。タンパク質はエネルギーというよりも、体の部品をつくる重要な材料である。医学界では、体重 1 kg 当たり 1.5 g から 2 g 程度のタンパク質摂取を推奨する声もある。今後、良質なたんぱく質を国内で生産し、国民に供給する必要がある。

私は、以上のような背景から国土を活用し、国内の植物資源で牛肉を生産しようという研究を始めた。しかしながら、草のみでの肥育では、脂肪体質の和牛とはいえ、太りにくいという課題があった。研究を開始した当初、様々なパターンの草による肥育を試みた。通常肥育期間である生後 30 カ月齢では、穀物で肥育した牛の約半分の体重にしかならなかった。こんなに体重が違うのかという壁に打ちのめされた。肉質も完全な赤身だった。特に餌の量、すなわち草の量を制限しているわけではない。牛にとっては非常に幸せな状況である。牛はルーメンの微生物の力に頼ってしまうと、太るのには非常に時間がかかる。もちろん肉質がよくなるのも時間がかか

る。結果として、牛肉の量を生産するのも時間がかかることが課題となった。

US ビーフの 1 kg 当たりの取引額は平均 400~700 円程度で、オーストラリアのオーギービーフでも 700 円程度である。日本ではロース芯では卸価格で 1 kg 当たり 6000 円程度の取引額となる。輸入牛肉と和牛肉では単価の価格差がかなり大きく、日本の外食産業やファストフード店にとっては魅力的であり、海外の牛肉を使わざるを得ない。この価格差の根底には生産のコスト感に大きな違いがある。日本では牛舎で 30 カ月間に 5 トンの穀物飼料を給与して、100 万円以上のコストをかけて和牛肉を生産する。どちらかという脂肪交雑の高い牛肉ができれば、コストは惜しまない生産文化がある。しかし、アメリカでは一頭当たりの牛枝肉の価格は 20 万~25 万円である。日本の牛枝肉の 4 分の 1 以下程度の価格である。このような経済的な面を考慮して輸出産業を考えて海外と勝負しなければならない。生産におけるコスト感や生産物に対する費用対効果の考え方、環境や食の安全に根差した生産の方法というのを考えなければならない。

4 ひとつの戦略として：牛肉生産における代謝プログラミング

日本の牛肉生産の戦略はどのようにしたら良いのか。日本は亜熱帯気候で雨量も多い。植物資源が豊富にある。しかしながら、どのようにして草でも和牛をできるだけ早く太らせ良い肉質をつくるのか、それが課題だ。その課題を解決するために採用したのが、DOHaD (Developmental origins of health and disease の略称) であり、健康や病気の起源は、その発生や初期の発達過程にあるというコンセプトである。世界的には産婦人科医や小児科医が中心となった国際 DOHaD 学会という組織があり、具体的には胎児期や新生児期の栄養や他の環境刺激が疾病や健康に密接に関連しているといった意味になる。

DOHaD 仮説の基礎は Epigenetics という生物学の機構をベースとおり、Epi と genetics という語の組み合わせでできているが、Epi というのは“後天的な”という意味であり、“genetics”は遺伝子という意味である。すなわち、遺伝子の配列の違いではなく、後天的な要因によって遺伝子発現量が変わり、表現型の変化をもたらすことである。つまり、後天的な栄養環境や環境要因によって遺伝子の配列は同じでも、その遺伝子から作られるものの量 (メッセンジャーRNA) が変化するということである。これは 1940 年代にワディントン博士 (Dr. Conrad Waddington) が提唱したものである。この DOHaD 仮説の基盤となる Epigenetics は先に述べたように、遺伝子の配列の違いではなく、その後天的な要因により遺伝子発現の量が増減するという意味である。この Epigenetics の定義としては、Critical window plasticity というのがある。これは Critical window、すなわち、窓のようなものが想定され、その窓が開いている時期、つまり感受性時期 (胎児期や赤ちゃんの時期) に受けた刺激 (おもに栄養刺激や環境刺激) によって様々な遺伝子の発現レベルが制御されて、結果として体の様々な基盤的な仕組みが決まる (Waterland, 2012)。この窓は離乳時期 (お母さんの乳から離れる時期) になると閉まるとされる。その窓が閉まってしまってもう自分の身体の様々な仕組みは変わりづらくなる。DOHaD 仮説は時に fetal origins hypothesis (胎児起源仮説) や、Metabolic programming (代謝のプログラミング)、Metabolic imprinting (代謝の刷り込み)、あるいは、Predictive Adaptive Responses (予測して適応して反

応する) というような表現で表される。

Epigenetics は最終的な表現型 (Phenotype) に影響を与えるというのが条件である。このワディントン博士が提唱した Epigenetics は動物のサバイバル戦略にも大きく関係していると考えられている。野生動物では厳しい自然環境の中で生き残り、次世代をつくって種の保存をするのが基盤的な重要ミッションである。このため、動物は生まれた後に身体づくりをしていては環境への適応が厳しい状況となるので、胎児期から身体づくりを始めている。例えば、母親の栄養が非常に少なく厳しい環境であれば、胎児はその栄養をモニターして、生後生き抜くために自分の体を小さくして代謝を高める。すなわち、胎児は生後の少ない栄養をうまく使っていく小さな身体にする。身体を小さくすることで栄養環境の悪い世界でも生き残るようにし、さらに代謝を節約的にすることで少ない栄養でも生きていく身体をつくる。

生まれた後も母乳をモニターし、このままで良いかどうかを判断する。母乳をモニターしてこれで良いと判断すれば母乳を離れ、自立して生きていくときには適応した身体を準備しているので生き残る確率が高くなる。最終的にはパートナーをみつけて、種の保存を達成していく。

このように、胎児や新生児は栄養環境をモニターして、予測し、適応して反応していく。そのため、この DOHaD 仮説を “Predictive Adaptive Responses” と言うことがある。ニュージーランドの Gluckman 博士がこの表現を用いた (Gluckman et al., 2007)。

Epigenetics は、先に述べたように、DNA 配列の変化は伴わない。遺伝子の配列をいじるわけではない。胎児期のおもに栄養刺激によって DNA メチレーションが変化する。この DNA メチレーションは簡単に言うと遺伝子のフタのようなもので、遺伝子が発現しないようにフタをイメージである。栄養刺激によって自分が生きていくために、多く発現してほしい遺伝子と、あまり多く発現してほしくない遺伝子を選別し、それらに対してフタをしたり、しなかったりするのである。遺伝子はこのようなシステムで多く発現させる遺伝子と、少量しか発現させない遺伝子を環境に応じて制御しているわけである。二次的なシステムとしてヒストン修飾 (Histone modification) もある。これは、遺伝子が巻き付いている糸巻きのようなヒストン上の遺伝子が発現するときの、“ほぐれ具合” を調節する機構である。このような機構により、動物は環境に適応するために感受性時期に生涯にわたる遺伝子の発現量の基盤をチューニングする。胎児期の栄養や赤ちゃんの栄養が様々な遺伝子のフタの具合を変えるわけである。フタの具合が変わると遺伝子の発現量が変わる。そうすると、様々な体内の化学反応に関わるタンパク質が生産される量が違ってくる。そうすると化学反応の結果が異なる。これは細胞の分化や増殖に影響を与え、細胞数や器官形成も変化させ臓器の大きさや、そのなかで営まれる代謝のレベルなどに影響し、最終的には表現型が変わることになる。

医学の分野では、胎児期の様々な栄養や赤ちゃんの栄養が様々な病気 (生活習慣病、肥満症、糖尿病、心臓疾患、動脈硬化症など) につながっていることが報告されている (Hanson and Gluckman, 2011)。例えば、太る体質を考えると、先に述べたように、母親の栄養が少ないと非常に節約的な代謝となる。少ない栄養でも生きていける身体となる。しかしながら、生後通常の栄養を摂ってしまうだけで、子供にとっては栄養過剰になってしまい、結果として肥満となり、さらに肥満が

様々な疾病をもよおす原因となる。医学分野では、胎児期や赤ちゃんの栄養をどのように制御すれば健康に長生きできるのか、というようなことが研究されている。

筆者らは家畜の胎児期や赤ちゃん(新生児期)の頃の栄養を積極的にコントロールすることで、太りやすい体質にして放牧等により草で育てていく、あるいは飼料が少なくても比較的大きく育つ可能性を持つ動物の生産技術に応用したいと考えている。放牧牛では、草からの栄養をできるかぎり吸収する能力をあげて利用性を向上させ、そして草でも肉量と肉質が良くなるようにできないかという研究を目指している(図2)。

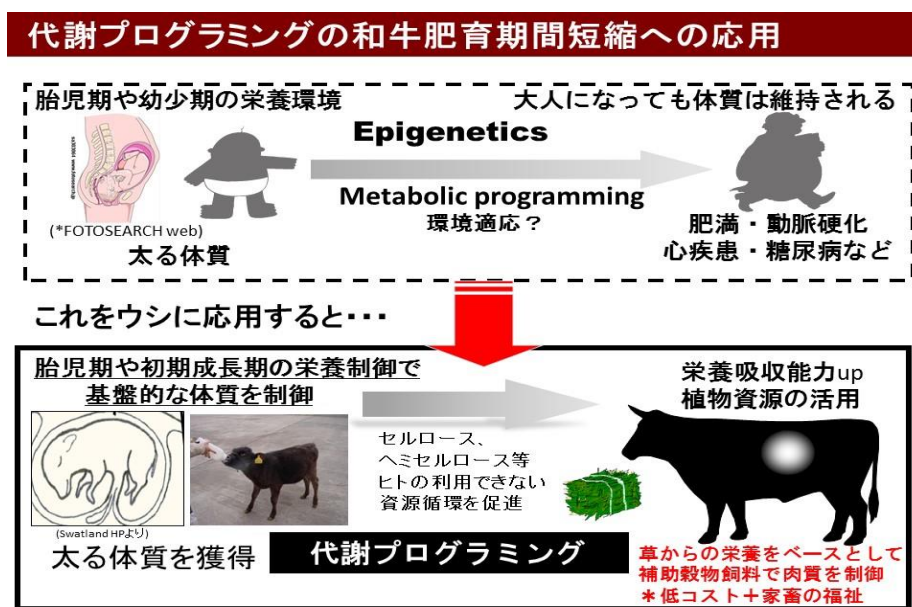


図2 代謝プログラミングの放牧和牛肉生産への応用

筆者は、胎児期の後半3カ月間で母牛の栄養を60%と100%にした場合、その生まれてきた仔牛の骨格筋を形態学的及び分子生物学的に調査した。ロース芯(胸最長筋)では60%群で脂肪生成に関するPPAR γ やC/EBP α の発現が高まっており、DOHaDと同様の現象が牛でも起こることが明らかとなった。続いて、妊娠中に栄養要求量の60%と120%の2群をつくり、分娩直前の胎児の体組織の影響を調べた。その結果、低栄養と高栄養では体組織のサイズと分子レベルの動態が著しく異なることが明らかとなった。特に高栄養では脂肪の動態が異なることが明らかとなっている(Zhang et al., 2021)。

さらに、新生児期の代謝プログラミング実験も実施した。離乳までの栄養を高めた牛群と幼少期から草のみで飼養した牛群とを比較した。肥育期は両群とも放牧を想定して草のみで肥育した。その結果、肥育終了時の体重や肉質は離乳時期まで栄養を高めた牛群が良好であった。体重では100 kg以上の差異が認められた。体重については黒毛和牛だけでなく、ホルスタイン種でも同様の結果が得られた。骨格筋の遺伝子発現も異なっていることが明らかとなった(Gotoh, 2015)。

最後に、ミルクのタンパク質と脂肪分を増やし、離乳期までの栄養を高める放牧肥育試験を家畜改良センターの協力を得て実施した (Khounsaknalath et al., 2021)。その結果、新生児期のミルクの質と量を増やすことで放牧肥育試験の結果は最も良好になった。肉質は代謝プログラミング群で適度な脂肪が入り、中には現状で程よい脂肪交雑で人気のある A3 等級の肉質を示した (図 3)。筋線維のタイプも調査したが、マラソン型からスプリンタータイプに変わっていることが明らかとなった。また、筋内の遺伝子発現などもドラマチックに変化していることが判明している。一方、新生児期のミルクと飼料を高栄養にした後に放牧肥育した牛群は、全く新生児期から草を中心に飼養された牛群に比べて比率として、無駄な体脂肪分 (枝肉の脂肪割合) は増えていなかった。通常、穀物飼料で肥育した牛群の廃棄脂肪は 200 kg 以上ある。割合にすると 40% 以上あることになる。放牧牛では無駄な脂肪分は 20% 程度の半分になった。

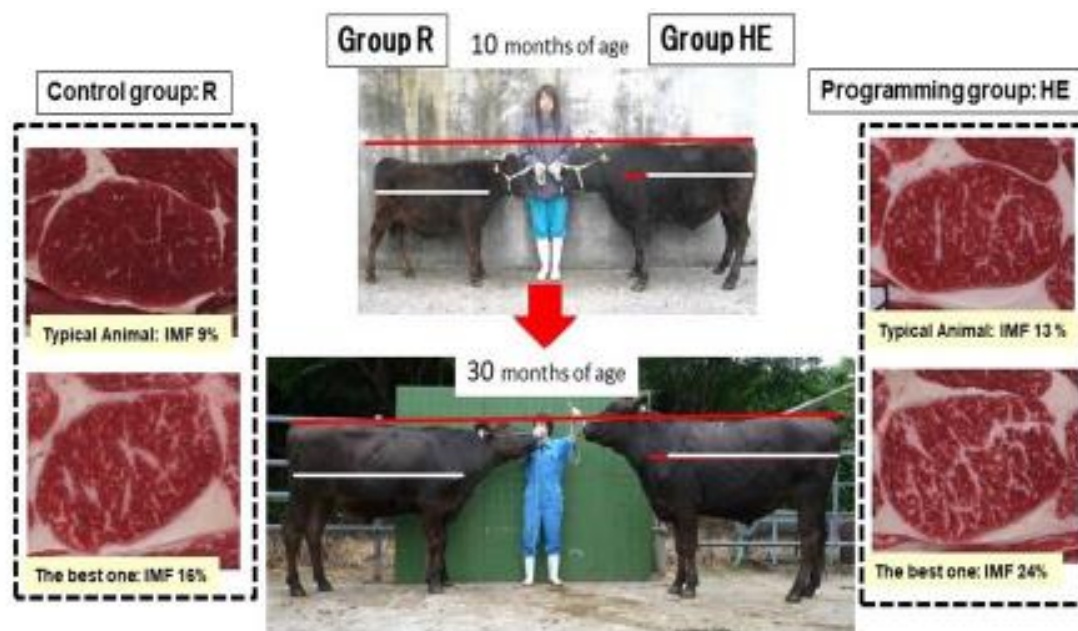


図 3 代謝プログラムの放牧和牛への実証実験の結果 (Gotoh et al., 2018)

GroupHE : 代謝プログラミング牛。GroupR : 対照牛 (草のみで飼養)。

代謝プログラミング牛で対象牛より体格が大きくなり、肉質も向上していた。

筋内脂肪、筋間脂肪、皮下脂肪の脂肪酸構成を見ると、後半の肥育期の 20 カ月間は同じ草を給与しているにも関わらず、代謝プログラミング群の脂肪は、対象群に比較して不飽和脂肪酸が多くなり、人の体に良い脂肪酸が増えていることが明らかとなった。また、面白いことに、ルーメン内の微生物の構成割合も離乳期までの飼料によって影響を受け、その後も同様の放牧や粗飼料肥育になっても変わらないことが明らかとなった。後半の肥育期は、20 カ月間同様の草を給与したので、ルーメン内の微生物の構成割合は変わらないと仮説を立てていたが、離乳期までの飼料でルーメン内の微生物構成割合は変化し、それは肥育期まで続くことがわかってきた (非公表デー

タ)。このように離乳期までの栄養を高栄養にすることで体質が変わり、遺伝子発現等も変化させ、最終的な肉質と産肉性が変化することが明らかとなった。このような代謝プログラミングと放牧を組み合わせ、特に放牧地には山や耕作放棄地等を活用していく形の技術として使って行こうと考えている。

5 狭い国土を言い訳にしない：未利用な国土の活用

放牧をするとなると、阿蘇久住のような九州の高原地帯や、従来の高原は簡単だが、地方では、農家が耕作を何らかの理由でやめてしまった耕作放棄地が増えており、日本で登録されている耕作放棄地は富山県の面積程度あると言われている。山もうまく活用すれば放牧に使用できるが、地権者がわからなくなった土地が多く、借りることもできない状態である。以前、山の中の耕作放棄地になった畑で放牧実験してみると、牛は非常にきれいに食べてくれることがわかった。

「先生、山で放牧なんてできないよ」と言われる方も多い。しかしながら、やってみると山で十分に和牛は過ごせた。そんなに傾斜のきついところであれば山も十分使える（図 4）。ウシはある程度の傾斜は積極的に歩いて行ける。



図 4 耕作放棄地放牧試験における同一場所の景観の変化の様子 (Gotoh et al., 2018)

A : 放牧牛を導入直後の耕作放棄地。B : 放牧牛導入 3 カ月後の耕作放棄地。

このように山での放牧を考えると、日本は土地の 73% が山地であり、その周辺に耕作放棄地がある。日本の全面積は 3779 万 ha ある。そのうち森林面積が 66% で約 2500 万 ha となる。例えば、その 3 割を牛肉生産の放牧地に使うとすると 752 万 ha となる。一頭当たり、余裕を考慮して 1 ha から 2 ha 必要と考え、約 370 万頭の牛が飼養できることになる。一頭当たり 200 kg 程度の牛肉が生産できるとすれば、75 万トンの牛肉が生産できる。現在、日本が輸入しているのは 50 万トンである。すなわち、各県が面積のうち耕作放棄地、山、限界集落の土地等を集めて 30% 程度の土地を放牧利用していけば、かなりの量の牛肉を生産できる可能性がある。

また、日本は離島が多く 6847 島ある。その土地を有効に守っていく必要がある。牛飼いを営ん

でいた農家も高齢化して徐々に人がいなくなっている。こういうところを活用しなければ、国家安全保障上も問題がある。そのような土地に牛を放牧活用して食料生産できれば、有効ではないかと考えている。

6 放牧和牛肉のマーケットとダイレクトマーケティング

放牧で生産する牛肉は通常赤身肉になるが、先にお話しした代謝プログラミングと放牧牛の運動量から補助飼料を調整して与えれば 4 等級程度までは十分に生産できると考えている。現在は、多くの牛肉生産農家は 5 等級を目指して一頭当たり 5 トン程度の穀物を与えている。その結果、5 等級ができたり 4 等級が出来たりする（現在は技術が向上して、多く農家が 4 等級以上の肉質の和牛肉を生産して高級肉がダブついていると言われる）。しかし、放牧はボトムアップ的に、例えば、放牧だけであれば 2 等級、代謝プログラミングをすれば 3 等級、さらに補助飼料を調整すれば 4 等級と生産を調整できる。需要に応じて調節が可能である。このように生産物のバリエーションを取り揃えてダイレクトマーケットで生産することができないかどうか模索している。

一時期、農業の六次化ということがはやったが、農家の皆さんがマーケティングに携わり成功するのはなかなか難しい。一方で、熱い思いがあって牛を生産している農家もたくさんいる。そういう哲学をもった生産者と消費者を直接に結んでいかななくてはならない。宅配便のシステムは非常に発達しており、農家の熱い思いを理解した消費者はその牛肉をダイレクトに購入することができる。

さらにダイレクトマーケットのために哲学をもって牛を生産するだけでなく、エシカル (Ethical)、すなわち倫理的な意味を含めることが求められる。牛の生産にあたりどのように環境に配慮しているのか、アニマルウェルフェアも含めてこのエシカルという感覚が必要となっている。そしてその情報をメディアに流す。BtoB、あるいは BtoC、両方あって良いと思われる。流通業者、レストラン、小売店に販売していく、Ethical ダイレクトマーケットを作っていきたい。

エシカルマーケティングが現実となると“エグイ”ことになる。なぜならば、どのようにその牛肉が生産されているかをエシカルな点を消費者に説明しなければならないからである。例えば、US ビーフを販売する場合は適度な脂肪が入っており、おいしい牛肉と思うが、フィードロットと呼ばれる 6 カ月にわたる集中肥育の直前にホルモン剤を使用して筋肉増強をはかるのが一般的である。このホルモン剤は出荷までに分解消失すると報告されている。US ビーフの集中的肥育には約 2 トンの穀物飼料を給与する。屋根のない 200 頭程度の牛が同一牛群として柵で囲まれ、6 カ月間肥育される。これが US ビーフ生産の概要である。和牛肉の場合はどうなるのか。和牛の生産者には申し訳ないところもあるが、明確に言うと、外観はきれいな霜降りで溶けるような味わい、キャラメルのような舌ざわりでおいしい。しかし生産においては、ビタミン A をギリギリまで制限し、霜降りの度合いを増やす措置をしている。健康を害さない最低限のレベルで抑えている。筋肉の中に脂肪を入れるためには、皮下脂肪や内臓脂肪、筋間脂肪がかなり蓄積されており、免疫が低下する。ヒトで言えば、健康を害さないギリギリの肥満状態で、ちょっとした体調不良には抗生物質投与で対応する。もちろん出荷時に体に残留しないように配慮されている。飼養と肥

育には一頭当たり穀物を 5 トン程度飼養して、一貫して牛舎の中で食べては寝てというような状態で飼養している。放牧牛肉の場合はどうなるのか。放牧牛の牛肉は硬くて赤身が黒くて色も悪いというのが一般的な印象である。グラス臭という日本人には苦手な臭い（ニュージーランドやオーストラリア人はこれが好き）がある。説明では、まず赤身肉であるとなり、飼養形態の説明では、“放牧牛はのびのびと放牧で育ち、里山の草をたくさん食べて、その景観を維持する”となる。また、地域の草原や鳥や虫の多様性を保ち、糞尿も循環している。このように販売されている US ビーフ、和牛ビーフ、牧草牛肉の生産過程が赤裸々に説明され、すべてが同じ価格で販売されていたら、消費者は見た目や先入観で購入するのではなく、購買行動が少し変わってくるのではないかと思っている。

エシカルマーケットというのは、どのように生産されたかを価値にするものである。ただ、現実これを実行するには、あからさまにすることができない現実があり、営業妨害等の問題にもなり難い。様々なクレームも来るだろう。しかしながら、本来は生産の過程を消費者に詳細に明らかにして、消費者がそれをきちんと評価し、購入していく仕組みが農業を消費者が支え、国や国土を守ることになる。本来このような仕組みをつくらなければ、農家の熱い哲学というのは生き残ることはできない。

しかしながら、日本はシステムにおける既得権益者の意識を変えていくのは難しい国である。現在の日本の牛肉生産システムを放牧を中心としたシステムへ変換することは、現況の既得権益のある方たちからいろいろなクレームが来るだろう。そうではなく、このシステムは、脂肪交雑度の高い牛肉生産とは別の地域創生や限界集落における対策としての牛肉生産の普及としての位置づけが良いように思う。

日本の消費者は一律ではない。農産物もこのような消費者の需要レベルに合わせて、国産の農産物を供給していくような政策と生産技術が問われるところである。それぞれのレベルの人たちに利益の出る形で販売できるものを生産しなければならない。牛肉の場合は 50 万トンの輸入肉が消費の 60%を賄っているとすれば、多くの人が外国産牛肉を食しており、ほとんどの牛肉生産農家は富裕層のためだけに牛肉を生産していることになる。これは今後考え方をシフトしていく部分であろう。

放牧和牛肉に関するウェブによる調査を実施した。所得階層別に牧草牛 100 g にいくらぐらいまで支払えるかというアンケートを実施した結果、年間所得が 1500 万円以上の消費者の 30%の方は 100g 当たり 3000 円払っても良いと回答した。逆に年間所得が 299 万円以下の方々でも 10%の方は 100g 当たり 3000 円払っても良いと回答した。所得階層に合わせた牛肉の品揃えも必要である (図 5)。

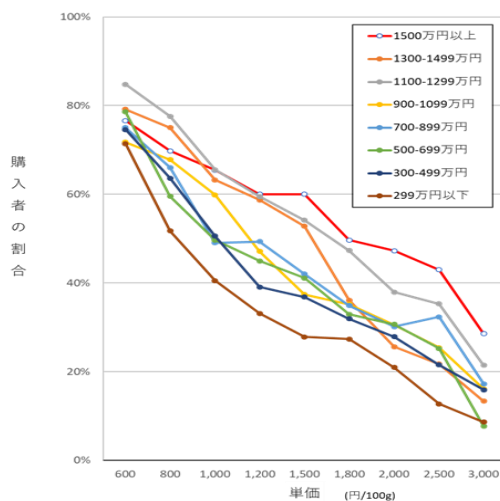


図 5 所得階層別の国内外で生産された牛肉に関する購買時の許容される単価

今後の生産過程に関しては、牛肉生産においてもグローバル GAP や HACCP、あるいは世界基準に則ったアニマルウェルフェア等の認証制度の整備も日本に必要であろう。私は、代謝プログラミングを施した和牛を国内の未利用な山や耕作放棄地や島に放牧し、まず日本国民のため牛肉を生産したい。さらに、それらの土地の景観を良くすると同時に地方にマネーフローも起こす自立した公益的ビジネスとして牛肉産業を成熟させることができないかを模索したい。

私は前職の九州大学時代に、これらの牧草和牛のプロトタイプとして黒毛和牛で“QBeef”と命名し、九州大学ブランドとしての承認を得て、国土を維持する牛肉として提唱した (図 6)。



図 6 代謝プログラミングされた黒毛和牛の放牧牛 (QBeef)

7 IoT による放牧牛管理システムのポテンシャル

ここまでは放牧飼養における牛側の研究であった。そのような代謝プログラミングが可能となった後の放牧牛の管理についての研究の話をしたい。放牧飼養はヒトにとっても牛にとってもよいが、山や広大な中山間地域を用いて、ウシを放牧するとなるとそれなりの管理が必要となる。しかし、それは飼養というより、個体の行動管理や位置モニター等、IoT 技術でカバーできる技術である。そこで我々は、現在の牛肉生産システムとは異なる、山地、中山間地域を活用した新しい環境保全型の生産システムの仕組みを、IoT 技術を導入して確立したいと挑戦している。これは単なる農産物の生産ではなく、倫理的 (エシカル) な意味も含めた次世代型産業の創出である。日本国土の 66% は森林であるが、林産業の経営状態も海外からの安い木材の輸入や後継者不足で悪化している。前述したようにウシは、植物資源を効率的にタンパク質にコンバートしてくれる比較的大型、自立型で移動型プラントともいえる。そこで、IoT 技術とともにウシの放牧を基盤とした日本オリジナルな山地型 Silvopasture (林畜複合経営) 牛肉生産システムの構築を目指したい。限界集落の山地、森林や中山間地域の耕作放棄地の草資源シーズを活用して構築したい。しかしながら、大家畜ウシの放牧管理は、依然、旧型でアナログ的なものである。我々は、このウシの放牧管理を中心に、どのように ICT 技術で管理するかについて、特に放牧時における遠隔地からの位置・生体情報を収集し、家畜管理へ利活用可能な無線生体管理システムの研究開発を行った。

8 牛の行動特性を活用した遠隔給餌システム

畜産業の現場では、いわゆる“餌付け”というシステムをよく使用する。それは放牧している牛群管理に非常に有効である。ウシは群で動く。ウシの群れをコントロールするためには、ウシの行動特性を基盤とした餌付けシステムは、極めて有効である。また、スタンションという個体の首をロックし確保して、均等に餌を与える機器もある。実際には、現地にヒトがおり、そこでウシを呼び、また餌を少し与えることで、ウシが集まり、スタンションで確保できる。筆者らはそれを、IoTにより遠隔から給餌するシステムを構築した。ウシの行動特性を用いて、ウェブカメラ、サウンドシステム、自動給餌機、ロック機構付スタンションを用いて、リモートによる遠隔でのウシ呼び寄せ実験を行い、餌付けシステムを構築した(図7)。放牧実験エリアに機器制御用の無線ノード、制御盤を設置し、関連機器と接続した。スマートフォン/タブレットから操作可能なGUIを準備し、遠隔地からのモニター・機器操作を行った。放牧牛の管理では、通常、条件反射あるいは条件づけを活用して、種々の音により、牛群を集め、給餌を行う。条件反射は、いわゆるパブロフの犬の実験に代表されるように、餌を与えるという無条件刺激と、そのときに与える音が条件刺激としてウシの中で条件づけされ、牛群に対して音を鳴らすことで、広大な放牧地でも音を鳴らす場所を集めることができる。本研究では、スマートフォンを用いて遠隔でウシの呼び寄せる、いわゆる遠隔餌付けシステムを実証した。スマートフォンのアプリケーションを作成し操作画面を構築した。まず画像の目視により、放牧地の状況を観察できる。その後、スピーカーのボタンにタッチすることで、放牧地現地のスピーカーより録音された、ウシを呼び集める声を放牧地に響かせることができる。ウシは放牧地よりゆっくりとウェブカメラの前に集まってくる。さらに自動給餌機のボタンに触れると、ウシはその音を聞いて、ゆっくりとスタンション(首をロックして、強い個体も弱い個体も平等に給餌できる設備)に首を入れる。その後、スタンションのロック用のボタンを押すと、ウシの首がロックされ捕獲することができる(図7)。最近、ウシのタグの画像解析により個体認識装置を取り付け、個体ごとの補助飼料給餌を行えるようにした(図8、9)。遠隔からスマートフォンにて、放牧しているウシに補助給餌および捕獲が可能な装置を構築した。放牧牛は放置しておけばよいというわけではない。繁殖牛であれば、健康管理や生理の把握、人工授精により、妊娠させて子牛を生産しなければならない。また日本では、夏場はダニを予防するための薬剤も定期的にウシに散布する必要もある。また、産業としての補助飼料給与も必要である。このような手間を現地に行けない時、スマートフォンのできるのであれば、非常に効率的に管理ができることになる。

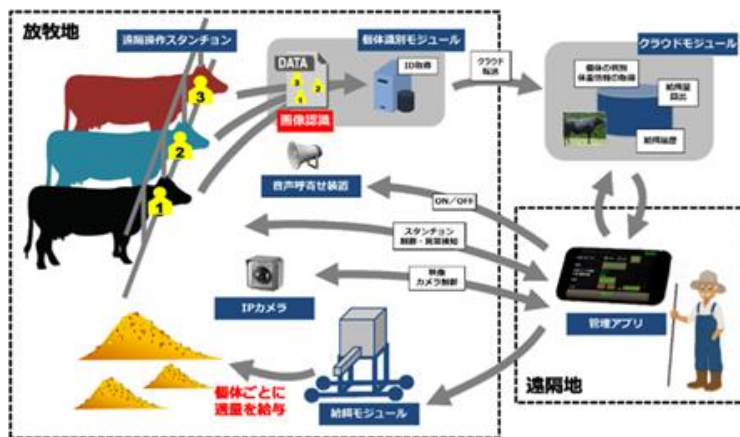


図7 スマートフォンによる遠隔からの捕獲と自動給餌システム



図 8 遠隔自動給餌の様子。

放牧牛を呼び寄せる前（左）と遠隔捕獲後（右）の様子。



図 9 個体識別遠隔自動給餌の様子

9 放牧牛の位置情報を把握するための技術：放牧地におけるネットワーク構築

まず、ウシの放牧地のネットワークを構築することを考えた。例えば、一頭の繁殖牛（母牛）を、放牧地における種々の事故等で死なせることがあれば、約 480 万円（年間に 80 万円以上の価値の子牛を 6 年間生産する場合）以上の価値を農家は失うことになる。また、ウシの放牧軌跡を見ることで、健康状態やエネルギー消費量の推定や、放牧地の草地管理にもその情報は活用することができる。このように放牧地でのウシの測位は重要な情報となる。

測位と言えば、GPS を思いうかべるが、GPS を放牧牛の測位情報収集に使用するには、過去においてコストの問題とバッテリーの耐久性の問題があった。しかしながら昨今、日本も衛星を打ち上げてその利用が求められ、安価なセンサも開発されてきた。そこで、現在は、慶應義塾大学（神武直彦教授、小高暁特任准教授）及び北海道大学（内田義崇准教授）と共同で、高精度測位による各放牧牛個体の行動歴や運動量の把握と評価を実施している（図 10：令和 2 年～4 年度度宇宙航空科学技術推進委託費「過疎地活性化のための地球観測と高精度測位による放牧地と放牧牛をモニタ可能な自動飼養システムの構築」）。我々は本プロジェクトを通称“宇宙牛プロジェクト”と呼ぶ。放牧飼養で放牧牛の成長に個体差が大きい。また、牛が放牧地でどのような行動や移動

をしているのかを把握することが重要となる。放牧飼養は、飼育労力という点ではかなり省力化され、牛にとっても本来の行動欲求が満たされストレスなく、アニマルウェルフェア的にもよいが、一方で、肥育における個体差が生じ、肥育程度の低下はビジネス上の課題である。そこで、牛個体に高精度測位機能や体調モニタ機能を具備したセンサを牛に装着し、牛の行動履歴や運動量などを取得し、体調モニタに関するデータとともに分析することで、放牧牛個体の消費エネルギーや必要エネルギーを算出する。それらデータと放牧地の草量データを活用し、個々の牛にとって最適な肥育のためにどの程度の補助飼料が必要かを評価し、放牧における肥育、牛肉生産における補助飼料の最適化を図る。このような取り組みも国内外で行われておらず学術的にも特徴的で独創的である。

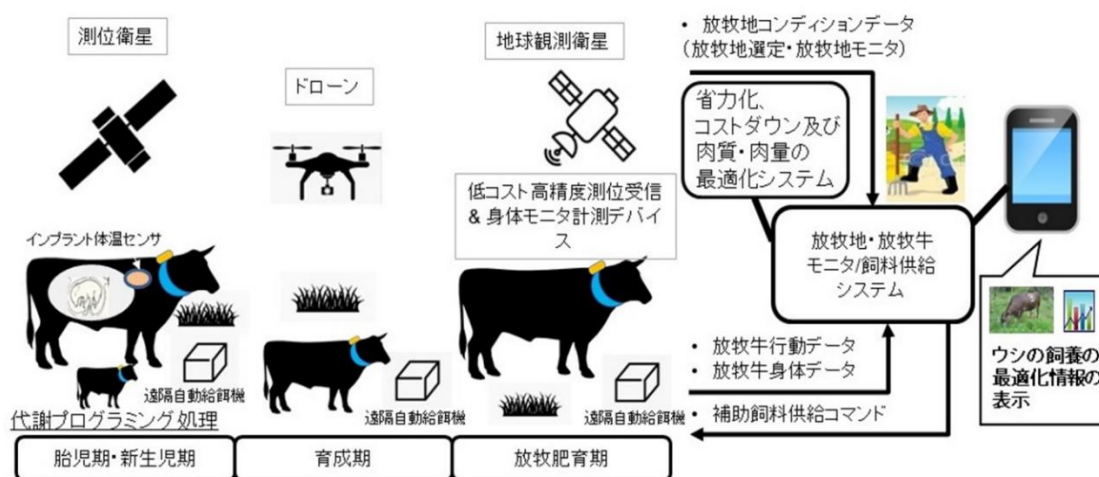


図 10 衛星を活用した放牧牛管理システムのコンセプトイメージ

10 ウシ個体のバイタルセンシングを把握するためのネットワーク構築

インプラントセンサシステムの構築：放牧牛の管理上、重要なことは、測位の他にウシ個体のバイタル情報の把握である。ウシの飼養において農家が最も重要な情報と考えるのは、健康のためのバイタルデータ（体温等）、繁殖牛（母牛）の発情（排卵）や分娩探知のためのバイタルデータである。当初、MEMS センサなどを体表面に張り付けて、センシングする方法を模索したが、ウシには体表面に被毛があり、長期にセンサを取り付けることが困難であった。また、被毛の少ない陰部等も検討したが、センサを張り付ける方法が困難であった。

そこで、数年前より思い切ってインプラント方式に挑戦している。インプラントとは体内にセンサーデバイスを埋め込むことである(図 11)。腕時計サイズの温度センサを皮下に埋設することで、10 カ月程度、屋外で飼養した牛群の安定した体温測定が可能であった。

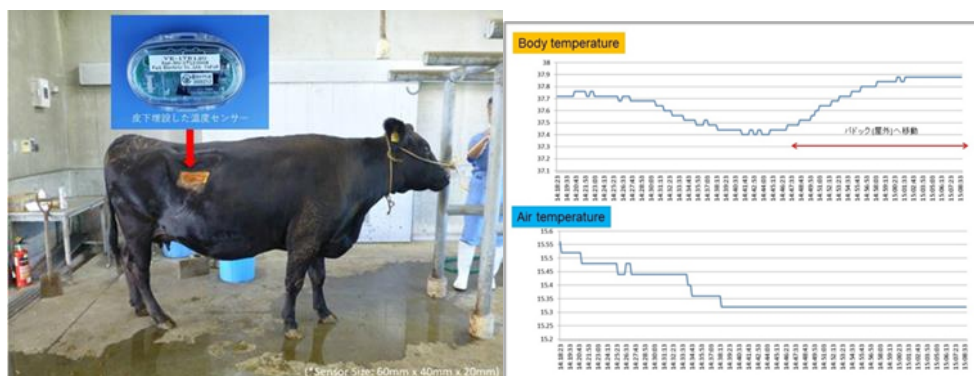


図 11 牛の皮下に埋設された体温センサ（左）とリモートで測定された温度情報（右）

更に、一昼夜にわたって、埋め込んだインプラント無線機に搭載した温度センサのデータを、無線ネットワークを介して受信し、取得したデータの有効性が示された（図 11）。現在、プロトタイプも作製され、パッケージを一緒にやっていただける企業さんや資金を集めたいと思っている（図 12）。



図 12 放牧牛のモニタリングシステムの端末プロトタイプ

最後に

筆者が最終的に目指す目標は、消費者にとって「不変の食卓」である。世界的な、①人動態激変（ミレニアム及びZ世代台頭、人口爆発等）、②サステナビリティマインドの浸透（環境保護意識、動物福祉等）、③テクノロジーの進化のメガトレンドに生産面では世界をリードし、消費者に対して30年後であろうとも不変の要求である「安全、安心、安定」かつ健康的で笑顔の絶えない食卓を実現する動物性タンパク質を供給する。放牧と環境という側面では、草食動物における放牧牛の単位肉生産におけるメタン排出量の問題が挙げられる。しかしながら、現状の大量の穀物で飼養する加工型畜産は、その穀物飼料生産や運搬においても多くの温室効果ガスを排出して

おり、一方で放牧牛は、放牧地の土壌微生物、昆虫、鳥、植物、木々の数を増加させ、環境の保全に重要な役割を果たしている。放牧はアニマルウェルフェアにとっても重要な要因となる。放牧は、適正な頭数の生産規模にすることで、地球環境の維持には重要な側面がある。今後の様々な価値観を含めた環境に調和した放牧牛研究が求められる (Provenza et al., 2019)。牛肉生産システムを放牧基盤に変革し、IoT、特に ICT 技術を放牧牛管理に用いることができれば、放牧 DX により、ヒトもウシも含めて畜産業が楽しくなる。経済的なインパクトとして、IoT を超えて DX 等による放牧和牛の畜産システムの普及により、現状、外食産業等のため日本が輸入する約 50 万トンの牛肉や輸入飼料に支払う 1 兆円以上のマーケットを日本に引き戻すだけでなく、良質牛肉を生産し、海外に輸出戦略もとりたい。何としても大切な人と分かち合う有意義な食の体験、すなわち Fun to Eat の価値や食の大切さの実感を味わうことのできる食材としての放牧和牛肉を生産したい。

謝辞

本研究の一部は、富士通株式会社、NTT 西日本株式会社との共同研究、学術振興会頭脳循環プロジェクト (S2305)、科学研究補助金挑戦的萌芽研究及び食料循環研究 (25292162&26310312、19KT0013)、キャノン財団 (R15-0089)、農研機構生研支援センター「革新的技術開発・緊急展開事業 (うち人工知能未来農業創造プロジェクト)」における「AI や ICT を活用した周年親子放牧による収益性の高い子牛生産技術の開発」、宇宙航空科学技術推進委託費「過疎地活性化のための地球観測と高精度測位による放牧地と放牧牛をモニタ可能な自動飼養システムの構築」、及び公益財団法人全国競馬・畜産振興会畜産振興事業「代謝刷り込みによる牛放牧肥育技術開発事業」により実施した。ここに深謝する。

参考文献

- 松石正典, 西村隆徳, 山本克博編. 2015. 肉の機能と科学, 食物と健康の科学シリーズ, 朝倉書店, 東京.
- Gluckman PD, Hanson MA, Beedle AS (2007) Early life events and their consequences for later disease: a life history and evolutionary perspective. *American Journal of Human Biology* 19, 1-19. doi:10.1002/ajhb.20590
- Waterland RA (2012) Nutritional epigenetics. In 'Present knowledge in nutrition'. 10th edn. (Eds JW Erdman Jr, IA Macdonald, SH Zeisel) pp. 14-26. (International Life Sciences Institute; John Wiley & Sons: Singapore).
- Hanson M, Gluckman P (2011) Developmental origins of noncommunicable disease: population and public health implications. *The American Journal of Clinical Nutrition* 94 (Suppl.), 1754S-758S. doi:10.3945/ajcn.110.001206

- Tong JF, Yang X, Zhu MJ, Ford SP, Nathanielsz PW, Du M (2009) Maternal obesity downregulates myogenesis and β -catenin signaling in fetal skeletal muscle. *American Journal of Physiology. Endocrinology and Metabolism* 296, E917-E924. doi:10.1152/ajpendo.90924.2008
- Zhang, Y., Otomaru, K., Oshima, K., Goto, Y., Oshima, I., Muroya, S., Sano, M., Saneshima, R., Nagao, Y., Kinoshita, A., Okamura, Y., Roh, S., Ohtsuka, A., & Gotoh, T. Effects of low and high levels of maternal nutrition consumed for the entirety of gestation on the development of muscle, adipose tissue, bone, and the organs of Wagyu cattle fetuses. *Animal Science Journal*, 92(1) e13600 (2021) (doi:10.1111/asj.13600)
- Gotoh, T. Potential of the application of epigenetics in animal production, *Animal Production Science*, 55, 145-158 (2015).
- 後藤貴文, 衛藤哲次, 塩塚雄二. 放牧や粗飼料を主体とした牛肉生産の可能性, *食肉の科学*, 54, (2), 147-153 (2013).
- Khounsaknalath, S., K. Etoh, K. Sakuma, K. Saito, A. Saito, T. Abe, F. Ebara, T. Sugiyama, E. Kobayashi, T. Gotoh. Effects of early high nutrition related to metabolic imprinting events on growth, carcass characteristics, and meat quality of grass-fed Wagyu (Japanese Black cattle). *Journal of Animal Science*, 99(6)1-9 (2021) (doi: 10.1093/jas/skab123)
- Gotoh, T. Challenges of Application of ICT in Cattle Management: Remote Management System for Cattle Grazing in Mountainous Areas of Japan using a Smartphone, Smart Sensors and Systems. *Innovations for Medical, Environmental, and IoT Application* (Eds. C.-M. Kyung, H. Yasuura, Y. Liu, Y.-L. Lin), Springer, Springer International Publishing Switzerland, 467-484 (2016)
- Gotoh T, Nishimura T, Kuchida K, Mannen H. The Japanese Wagyu beef industry: current situation and future prospects - A review, *Asian-Australasian Journal Animal Sciences*, 31(7), 933-950 (2018) (doi:10.5713/ajas.18.0333)
- Provenza, F.D., S.L. Kronberg & P. Gregorini. 2019. Is grassfed meat and dairy better for human and environmental health? *Front. Nutr.* 6:1-7. doi:10.3389/fnut.2019.00026