

## 加工型畜産から環境と調和したタンパク質生産へ向けた 畜産のパラダイムシフト

後藤貴文\*

〔キーワード〕: ウシ, 放牧, 代謝プログラミング,  
IoT, 宇宙技術

### 1. はじめに

ウシは極めて巧妙なバイオリクターである。本来、草食動物（反芻獣）であるウシは植物で育ち、穀物飼料はほとんど必要ない。ニワトリやブタの飼養には一定量の穀物飼料が必要である。しかし、ウシは反芻獣として放牧地の牧草と水を摂取することで500-600kgの体を維持することができる。植物の成分は80%以上が水分で、栄養成分はわずかである。つまり、ウシはほとんど水分しか摂取していないことになる。妊娠した母牛は、山に放牧しておくで牧草と水だけを摂取して、受胎から10カ月後には30~40kg程度の自走する子牛を生産して、共に山からおりてくる。ほとんど水分だけで、どのようなメカニズムで自走できる30kgの生物体をつくることのできるのか？ 一見、マジックのように思われる。著者は、いつも学生の実習の最初の時間に、学生の目の前にペットボトルの水と生草を示して、これで子牛をつくる方法を説明しなさい、と質問する。この巧妙なバイオリクターであるウシは、ヒトが利用できない植物（特に繊維成分であるセルロースやヘミセルロース）を材料にして、ヒトに必要な牛肉とミルクを生産することができる。

### 2. 加工型牛肉生産システムの問題点

ところが、現在世界では、このウシの飼養に大量の穀物を使用し、肥育するようになってきた。アメリカを中心に“フィードロット”という肥育システムが採用されている。これは、肥育期である後半の6カ月程度、穀物飼料により集約的に肥育するシステムである。家畜への穀物給与は広がり、世界で生産されるトウモロコシの約7割は家畜の飼料として使用されている。アメリカのフィードロットでは、

1頭当たりの肥育に約2tの穀物飼料が必要とされる。特に日本では、骨格筋内の脂肪含有量が多い、所謂、霜降り肉や、乳脂率を高く、および乳量を多くするために大量の穀物飼料が給与される。和牛1頭を生産するためには、現在5t以上の穀物飼料を必要としている。わが国の約390万頭の肉牛および乳牛を飼養するために給与される穀物飼料の約90%が輸入に依存している（1,000万t以上）。反芻獣（草食動物）に、これほどの穀物飼料を給与するのは、産業構造における深刻なフードロスと言えるかもしれない。

世界では8億人の飢餓者が存在し、1年に約500万人の子供たちが餓死している。一方、わが国の食料自給率は40%を下回り、牛肉の自給率も35%程度である。現在、わが国では、ロシアのウクライナ侵攻等による穀物相場の攪乱により、世界的な穀物価格高騰により、畜産農家経営は困難を極める。また、感染症のパンデミック等によるサプライチェーンの寸断リスク等からも、わが国の食料安全保障のもろさと食料自給の重要性を痛感させられた。さらに、多くの食料や資材を輸入に依存するわが国では、世界世情の影響による物価高騰で満足に食事を取る事が出来ない国民が増加し、今後の社会保障費の増加が懸念される。その中で畜産システムの構造的なフードロス回避は重要と考える。

わが国が行っている草食家畜への大量の穀物給与を中心としたフードロスの肉牛および牛乳生産システムから脱却するために、新しい畜産システムをどう構築すべきか、どうあるべきか、を考える時期に来ている。今、推進されている現状の畜産のしくみへのスマート技術の導入や効率化だけでは解決はできない。今こそ、先端科学を基盤としてパッケージングしたパラダイムシフトが必要である。

\*北海道大学北方生物圏フィールド科学センター (Takafumi Goto)

### 3. バイオリクターとしてのウシ

ウシは極めて巧妙なバイオリクターアニマルである。植物を摂取して牛肉やミルクを生産する。すなわち、植物を原料としてタンパク質を生産する巨大なバイオリクターである。ウシは生後から6カ月程度の時間をかけて、環境中の微生物を摂取して、第一胃内（ルーメン）内に住まわせて、その後の成長と成熟に必要な微生物をコレクションする。それら微生物は、植物繊維を分解し、また発酵によりエネルギーを産生する。環境中の微生物は、見えにくいので、ウシは一見牧草と水だけしか摂取していないように見える。牧草の成分はほとんど水なので、水しか摂取していないように見える。しかし、ウシは生後直後から、少しずつ、この微生物を特殊な胃に必要な微生物を“コレクション”して、さりげなく牛肉とミルクを生産する。これがウシのトリックである。

現在、培養肉など研究に投資が集まっており、科学技術としては重要であるが、著者から見ると、ウシは極めて巧妙に肉を体内で培養している動物である。ウシは植物を材料とした、巧妙なバイオリクタープラントとして、美味なタンパク質を生産している。電力も施設も必要なく、培養のための化学添加物もいらない。草原があれば、他の材料を供給する必要もなく、自分で草を食み、自動的にタンパク質を作り出すのである。これこそ自然に肉を培養する、究極のバイオリクターと言え。培養肉の研究も技術として必要であるが、我々がまずやらなければならないのは、地球上の植物と単胃動物をつなぐ反芻獣の環境内でのバランスを最適化する未来型の畜産システムを構築することにある。

### 4. 長期的な視点での高度な生産性と戦略

日本には多くの植物資源がある。一方、人口は都市部に集中し、地方には、限界集落、中山間地域の耕作放棄地など、その活用が模索されている。また、わが国の6,900島以上にも及ぶ離島も食料安全保障だけでなく国土安全保障を見据えて、今後積極的に活用していく必要もある。これまで我々は生産性を追求し、牛肉生産に穀物飼料を牛舎の中で大量に使用することで生産性を上げてきた。しかし、現在では、この生産性を考える上での条件が異なってい

る。生産の持続性、環境への負荷、アニマルウェルフェア、バイオダイバーシティ等を含む高度な生産性である。この生産性を考える時、物理的スケールだけでなく、時間的なスケールも異なることになる。日本は、水資源が枯渇傾向にある海外に比較して、亜熱帯気候の上に雨量も多く、植物資源が豊富にある。そこにある植物資源をウシにより、タンパク質に変換してもらうことは、わが国の食料安全保障、特に低コストでのタンパク質供給に貢献し、環境と共生できる重要な施策となると考えている。

ここで、ウシを、植物資源を材料としてタンパク質を生産するバイオリクターととらえ、それを基盤としたビジネスを考えた場合、ネックとなるのが、植物資源（粗飼料）での飼養では、肉量と肉質が成熟するために相当の時間を要することである。カロリーの高い穀物飼料（濃厚飼料）を給与した場合のように比較的短期に成熟や肥満させることが難しい。粗飼料による肥育、特に放牧飼養は、ウシが勝手に草を摂取してくれるので農家にとっては、こんなに楽なことはないが、生産に時間がかかり、また肉量がとれたとしても肉質を制御することが難しい。これではビジネスとしては、粗放的すぎる。また、放牧という形態をとった場合には、日本の場合、山間部も活用した比較的広大な土地での飼養となり、そこでの放牧牛の管理をどのようにするかという問題がある。高度なビジネスとするためには、放牧地でウシが何をどれくらい採食したのか、体重の増加を把握すること、放牧地の草量変化を把握すること等、放牧地での飼養を緻密に管理する必要がある。すなわち草資源での飼養に関して、放牧を主要な形態とした場合に、1) 放牧で肥育する場合の肉質や肉量の制御、及び2) 放牧牛の省力的・効率的な管理のための技術が必要ということになる。

### 5. 放牧肥育における肉量と肉質制御：

#### DOHaD 学説の応用

近年、動物は、胎児期や新生児期の栄養的・環境刺激等により、DNA塩基配列の変化を伴わない細胞分裂後も継承される遺伝子発現の変化及び最終的な表現型の変化を伴うことが明らかとなってきた。いわゆるエピジェネティクスという学問分野として注目される。生物は発生・分化の各ステージにおいて、必要な遺伝子のみを発現させ、不要な遺伝子の発現

を止める。生物は、遺伝情報の時系列的かつ選択的な厳密な調節を行う。肥満やそれに関連した疾病との関連で研究されてきたエピジェネティクスには、“可塑性”があり、遺伝子発現の状態が、環境や生活習慣等の外部からの刺激、特に栄養や老化などの影響を受けて変化する。

近年、疫学調査や動物モデルを用いた研究において、胎児期や新生児期の環境がその後の体質や肥満症、生活習慣病などの疾病に影響を及ぼすことが示唆されている。これはエピジェネティクスが関与した仕組みと想定され、医学分野において、DOHaD (Developmental Origins of Health and Disease) という学説として提唱されている (Barker, 1990 ; Gluckman・Hanson, 2004)。これは、エピジェネティクス研究と関連して代謝インプリンティングあるいは代謝プログラミングとも呼ばれている。エピジェネティクスとは、DNA の配列変化を伴わない後天的修飾により遺伝子発現を調節し、最終的に表現型に変化を及ぼす制御システムである。これまで著者は和牛を用いて、この DOHaD 学説を応用した

体質制御に関して動物生産、牛肉生産、特に穀物ではなく草資源を中心とした牛肉生産に応用できないか、挑戦を続けてきた (図 1 ; Gotoh, 2015)。そして、新生児期の栄養制御による代謝刷り込み (プログラミング) により、牧草で肥育した場合に、肉質や産肉量などが向上することを報告してきた (図 2 ; Khounsaknalath et al., 2021)。このモデルでは体重だけでなく、個々の骨格筋重量の増加、脂肪の部位ごと重量変化、筋内脂肪の増加、骨格筋の脂肪酸構成の不飽和化、筋線維型構成の速筋化、筋線維のサイズの増大、及び骨格筋内脂肪形成関連遺伝子発現の増大等も観察された。

著者らは、この新生児期の初期栄養のみの差異により、その後同様の粗飼料 (植物資源) による肥育をしたにもかかわらず、“表現型が異なるモデル”について、その経時的あるいは屠畜時サンプルを用いて“その原因となるエピジェネティクス修飾”を探索することで、初期栄養とエピジェネティクス及び表現型の関係性を明らかとするフォワード“エピ”ジェネティクス解析を実施した。表現型の異なる

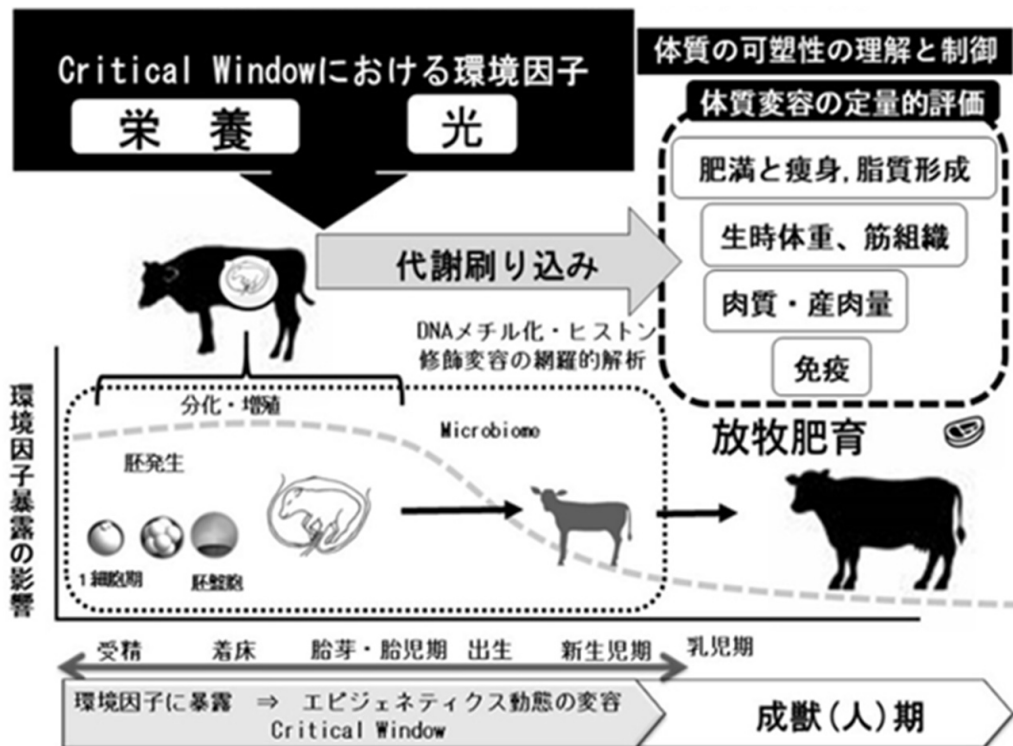


図 1 ウシにおける環境因子による代謝刷り込み(代謝インプリンティングあるいは代謝プログラミング)と牛肉生産

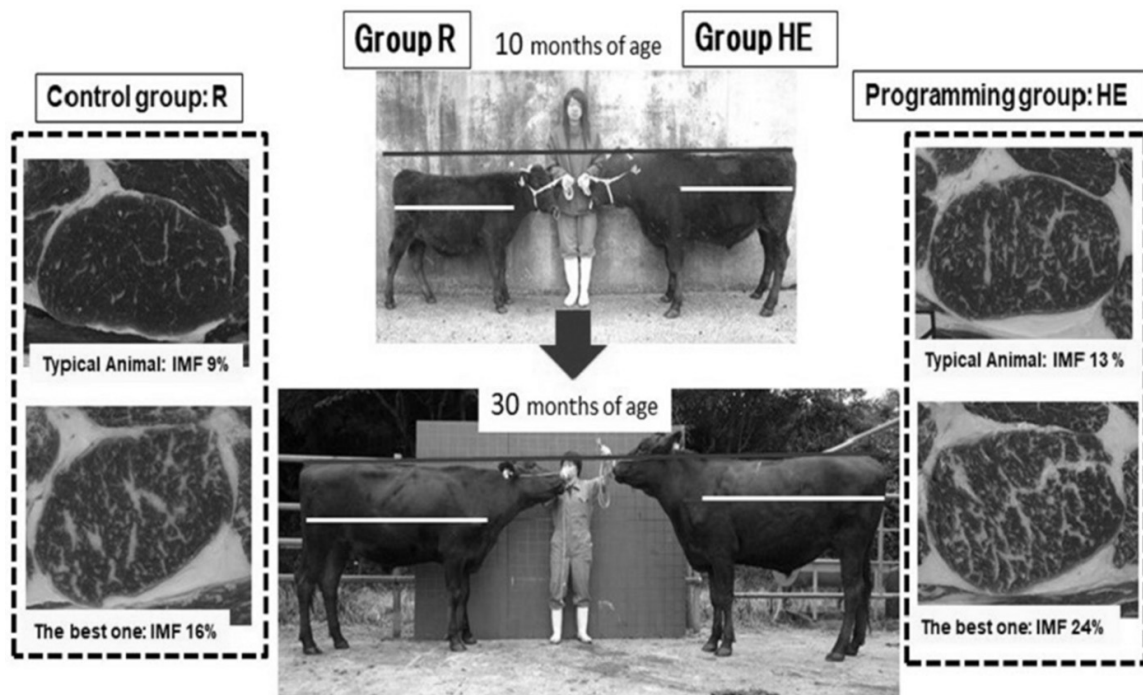


図2 和牛における初期成長期の代謝プログラミング（代謝刷り込み）の産肉性と肉質向上効果  
Group HE：代謝プログラミング区。Group R：対照区（粗飼料のみで肥育区）。  
Gotoh (2015)。

る動物において、遺伝子の違いを探索する研究体系はフォワードジェネティクス（順遺伝学）と呼ばれるが、我々は初期栄養の違いによってのみ表現型の異なる動物モデルを用いて、初期栄養のみの影響によるエピジェネティクス修飾という観点で解析するということである。このモデルでは、ロース芯をなす胸最長筋の Whole Genome Bisulfite Sequence (WGBS：網羅的 DNA メチル化解析) 解析をした結果、表現型が異なることを裏付けるように DNA メチル化の明確な差異が観察された (Nishino et al., 2022)。

一方、胎児期の解析において、和牛における妊娠期の栄養を栄養要求率の 120% と 60% に変化させた場合、胎仔の体重、各器官、骨格筋重量等だけでなく、胎仔骨格筋（胸最長筋）の網羅的な DNA メチル化状態も変化していた (西野ら, 2023: 未発表データ)。この胎児モデルの肝臓における調査でも、妊娠期栄養の異なる 2 群の胎児間で、同様に DNA メチル化動態の有意な差異が認められた (Muroya et al., 2023)。これらのことは、胎児期の栄養の差異が

骨格筋や他の臓器の表現型を変えるだけでなく、DNA メチル化動態も変化させることを示唆した。

以上、現在、上記の WGBS の結果から、フォワードエピジェネティクス解析を行い、影響をうける遺伝子を探索中であり、そこから効果的に体質制御するためのファクターを探索中である。これらの解析により見出されたエピジェネティクス修飾を制御するリガンドを誘導する飼料を開発し、初期栄養のみの制御により放牧肥育する場合の効率性を高め、生産性向上に貢献する飼養システムを開発することを考えている。

## 6. 放牧牛の効率的な管理のための技術： 宇宙牛プロジェクトとスマート放牧技術

体質制御、チューニングされたウシを中山間地域や離島などの過疎地を活用して放牧する。山や限界集落等に含まれる広大な中山間地域を用いて放牧するとなると、ウシにとっても、それらを飼養する農家にとっても労力とストレスはなくなるが、産業として粗放であり、ウシの生育や健康チェック、そ

の後の肥育を制御できず、ビジネスとしての経営が難しくなる。それなりの管理が必要となる。ポイントとして、まずウシを商品と考えると、最も重要なデータは放牧牛の体重の変動の把握である。その他、ウシの位置を把握すること、いわゆる測位、さらにウシの消費エネルギーを知るための運動量の把握等が必要となる。一方、放牧地では、放牧により草量が変化するので、牧区をローテーションする必要がある、広大な牧区の草量変化を網羅的に把握する必要もある。これらのことは現在、農家が人力で行っている。

そこで、まず、放牧牛の体重把握のため、画像で体重を高度に推定するシステムを開発している。ウシの体重測定は現場では、かなりの労力がかかるが、これを効率化する。次に、放牧牛の測位においては、高精度測位機能や体調モニタ機能を具備したセンサーを牛に装着し、測位衛星データを利用した放牧牛の行動履歴や運動量、体調の変化の把握と評価をしており（慶應義塾大学、神武直彦教授および小高暁特任准教授との共同研究）、放牧地については、地球観測衛星データを利用した放牧地の放牧牛採食による草量変化、土壌微生物や土壌栄養バランス等の動態及び放牧地と放牧牛採食の関係性評価を

行っている。また、それらの情報を放牧牛飼養に反映させるためのクラウドシステムとそこからの制御による個体識別できる遠隔自動給餌機を開発している（図3）。

放牧牛の測位において具体的には、GPSや準天頂衛星みちびきなどのマルチGNSSからの信号による高精度測位により、放牧牛の行動履歴や運動量などを把握し、その生産性やアニマルウェルフェアなどの評価も行っている。放牧地の草量の把握について、客観的かつ時系列的に把握するために、地球観測衛星データから放牧地のバイオマスをモニタリングする手法を開発している。放牧地において計測した草地のバイオマス（乾物量や、草高データ）と、同期観測した衛星データから、放牧地におけるバイオマスを推定するモデルを構築している。測位衛星と地球観測衛星のデータを統合して、放牧牛の個体飼養管理に反映させる機器としてAIを用いたタグの画像解析で個体識別できる遠隔自動給餌機も開発している。これらの技術をパッケージング化することで、粗放的な放牧から、アニマルウェルフェアに即したウシにもヒトにもストレスのない緻密で生産性の高い自動飼養を実現する。

### 先端生物学と宇宙技術により植物資源を徹底的にタンパク質に変換システム

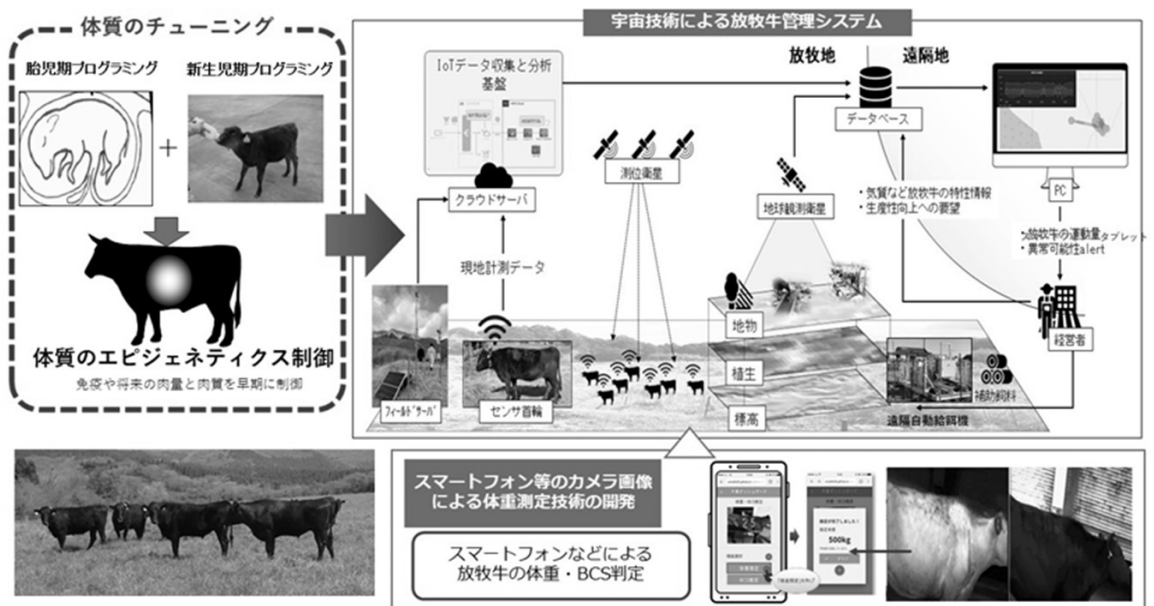


図3 著者の目指す代謝プログラミング、IoT及び宇宙技術による新しい牛肉生産のしくみ概要

## 7. おわりに

わが国の未利用な植物資源、すなわち限界集落の山地、森林や中山間地域の耕作放棄地の草資源シズを放牧活用して、次世代の価値観に基づき生産性の高い新しい牛肉生産システムを構築する必要がある。しかしながら、これまでウシの放牧管理は、依然、旧型でアナログ的なものであった。まず著者は、放牧による肥育でも牛の産肉性を飛躍的に向上させる代謝プログラミング技術を活用した。放牧肥育時の精密な管理のために IoT や宇宙技術や AI をどのように活用できるかを模索した。放牧による牛肉（タンパク質）生産のわが国における基盤の活性化を念頭に、国土をフルに活用した、人工衛星による地球観測や高精度測位から得られたデータによって、放牧地や放牧牛の行動履歴や運動量をモニタ可能とした自動飼養システムを、個体識別機能を有する遠隔自動給餌機で統合することで構築することが目的である。将来はスマートフォンで“牛飼い”ができる世界を想定している。これらをすべて、パッケージングすることで、よりパワーアップしたシステムとなる（図3）。今後の日本を支えるのは、デジタル世代と言われる Z 世代である。これまでの概念を見直し、彼らが受け入れることのできる農業システム、また農家の QOL を向上させる、そしてわが国の食料を支え、国土を保全する農業技術の開発を目指す必要がある。

牛肉生産における現在のわが国のフードロスの加工型畜産システムとの隔絶は、畜産業と社会システムに著しいインパクトを与えて、畜産業のパラダイムシフトを起こすものと確信する。さらに、生産のみならず個人の特性に応じた適切な質・量の牛肉の消費システムの構築も今後行う必要があるだろう。

本稿は、富士通株式会社、NTT 西日本株式会社との共同研究、総務省戦略的情報通信研究開発推進制

度 (SCOPE)、学術振興会頭脳循環プロジェクト (S2305)、科学研究補助金 (25292162, 26310312 及び 19KT0013)、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」、株式会社リバネス、キャノン財団 (R15-0089)、日本中央競馬会、文部科学省令和 4 年度宇宙利用技術創出プログラム「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」および生研支援センター「オープンイノベーション研究・実用化推進事業」における「放牧基盤型飼養のための IoT と宇宙技術による戦略的スマート畜産技術の開発」により実施された研究です。ここに深謝します。

## 引用文献

- Barker, B.J. 1990. The fetal and infant origins of adult disease. *British Medical Journal*. 301: 111.
- Daichi Nishino, D., S. Yasuo & T. Gotoh et al. (他 7 名). 2022. Effects of early high nutrition related to metabolic imprinting events on comprehensive DNA methylation of longissimus muscle in grass-fed Wagyu. 68th international congress of meat science and technology (August 22-25, 2022) Online, Kobe, Japan.
- Gluckman, P.D., Hanson M.A. 2004. Living with the past: evolution, development, and patterns of disease. *Science*. 305: 1933-1936.
- Gotoh, T. 2015. Potential of the application of epigenetics in animal production. *Animal Production Science*. 55: 145-158.
- Khounsaknalath., S., Etoh, K., Sakuma, K., Saito, K., Saito, A., Abe, T., Ebara, F., Sugiyama, F., Kobayashi, E., T. Gotoh. 2021. 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.
- Muroya, S., & T. Gotoh et al. (他 4 名). 2023. DNA Methylation of Genes Participating in Hepatic Metabolisms and Function in Fetal Calf Liver Is Altered by Maternal Undernutrition during Gestation. *International journal of molecular sciences*. 24(13): 2023 Open Access Journal (<https://doi.org/10.3390/ijms241310682>)