

PRESS RELEASE

2026年2月10日
理化学研究所、九州大学
広島大学、北里大学

家畜の暑熱ストレス耐性と腸内環境

—環境保全型畜産管理に貢献する好熱菌の機能性評価—

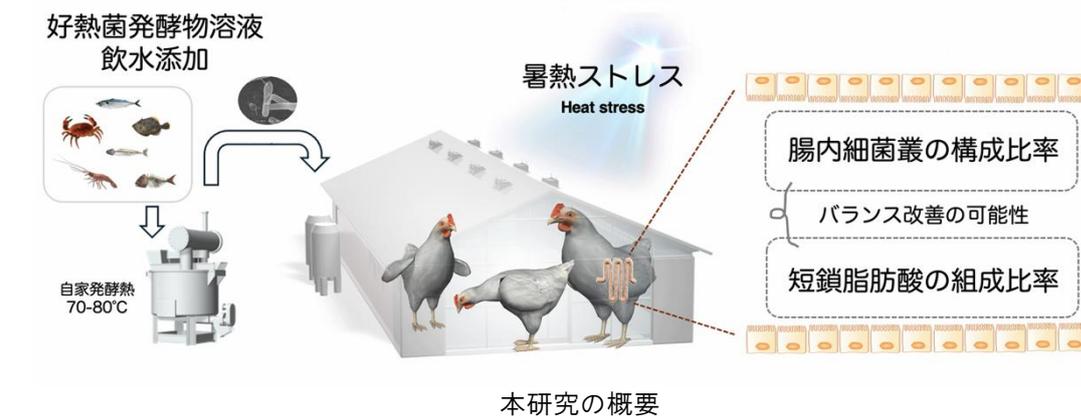
概要

理化学研究所（理研）生命医科学研究センター粘膜システム研究チームの大野博司チームディレクター、宮本浩邦客員主管研究員、環境資源科学研究センター環境代謝分析研究チームの菊地淳チームディレクター、黒谷篤之特別研究員（研究当時）、光量子工学研究センター光量子制御技術開発チームの守屋繁春専任研究員、和田智之チームディレクター、九州大学大学院農学研究院の山野晴樹大学院生、高橋秀之准教授、広島大学大学院統合生命科学研究科の稲生雄大助教、北里大学医療衛生学部血液学研究室の佐藤隆司講師らの共同研究グループは、累積60万羽を超える採卵鶏の大規模調査の結果、高温環境下での鶏の死亡率を下げる飼育管理手法として好熱菌^[1]群を活用した高温発酵飼料を溶液にして投与することが効果的であり、腸内環境の変化が暑熱ストレス耐性に関与し得ることを確認しました。

本研究の成果は、質の高い高温発酵飼料の活用が、高温条件下における家畜の生命維持につながることを示すとともに、その作用機序として腸内細菌叢（さいきんそう）の制御が重要である可能性を示唆しています。

地球温暖化がますます加速する中で、生命を脅かす暑熱ストレスが看過できなくなっています。「人」と「動物」と「環境」を包括的に捉えて守る「One Health（ワンヘルス）^[2]」という概念の重要性が国際的に強調される中で、さまざまな分野で環境配慮型の新たな持続可能技術の開発が求められています。本研究では、高温発酵技術を活用することで、暑熱ストレス環境で飼育した鶏の死亡率が下がることを見いだすとともに、実際に糞便（ふんべん）を対象とした計算科学的なアプローチによって、高温発酵飼料が腸内細菌叢の構成比率と短鎖脂肪酸^[3]の組成比率のバランスを改善している可能性を明らかにしました。

本研究は、Springer Natureの科学雑誌『*Animal Microbiome*』オンライン版（2月3日付）に掲載されました。



背景

地球温暖化は、人間の健康と経済活動に深刻な損害を与えており、畜産業でも、熱波による家畜の死亡率の増加によって多大な経済的損失が発生しています。特に、鳥類は羽毛の覆いと汗腺の欠如により、暑熱環境における生理的な負荷（暑熱ストレス）の影響を受けやすいことが知られています。

暑熱ストレスは、免疫機能を低下させることによって感染症の流行にもつながる可能性もあるため、抗菌薬の過剰使用を助長する要因の一つにもなっています。抗菌薬の過剰使用は薬剤耐性菌の増加をもたらすことから、世界保健機関（WHO）は、家畜の成長促進のための抗生物質の使用廃止を含む、薬剤耐性（AMR）に対する行動計画を提示しています。このような背景から、暑熱ストレスが動物に及ぼす影響とその対策に関する研究は不可欠であり、行動学および生理学的影響を含めて多面的に評価する必要があります。

近年、好熱性のバシラス科（*Bacillaceae*）を含む好熱菌群を用いた閉鎖系のバイオリアクター（生体触媒を用いて生化学反応を行う装置）を活用することで、未利用海産資源から植物の肥料や動物の飼料として有効な発酵物を持続的にリサイクル生産できることが報告されています^{注1)}。これらの好熱菌の機能性は、理研内外のさまざまな共同研究の連携によって徐々に明らかになりつつあります。肥料として使用した場合は、空気中の窒素を固定して生産性に貢献しつつ、温室効果ガスである一酸化二窒素の発生を抑制する傾向があります。この肥料を使用した土壌微生物叢では病原性真菌やセンチュウなどによる被害が出にくい傾向も確認されました^{注2)}。畜水産用の飼料の一部として少量添加することによって、母豚の死産率の減少や養殖魚の生産性の向上のみならず、その養殖場の近海での海草繁茂（ブルーカーボン（海洋炭素）への貢献）をもたらす可能性があることも明らかになりました^{注3)}。さらに、好熱菌の一つであるカルディバシラス・ヒサシイ（*Caldibacillus hisashii*）（製品評価技術基盤機構<NITE>国際寄託番号 BP-863）は、家畜（ウシ）の腸内におけるメタン産生菌を減らす傾向があることが示されています^{注4)}。腸内細菌叢の制御が、家畜由来の温室効果ガスの排出に貢献することは重要な知見と捉えられています^{注5)}。

本研究では、このような環境改善機能を幅広く有する、好熱菌によって発酵さ

せた高温発酵飼料の希釈溶液を飲水に極少量添加(飲水 1cm³ 当たり 100 個の菌体数相当)することによって、暑熱環境下で飼育された鶏に対する死亡率の低減効果进行评估するとともに、その効果を腸内細菌叢によって評価することを目的としました。

注 1) 宮本浩邦、宮本久、田代幸寛、酒井謙二、児玉浩明 日本生物工学会・生物工学技術賞受賞論文「好熱性微生物を活用した未利用バイオマス資源からの高機能性発酵製品の製造と学術的解明」生物工学会誌、第 96 巻、第 2 号 p.56-63 (2018)

https://www.sbj.or.jp/wp-content/uploads/file/sbj/9602/9602_gijutsu.pdf

注 2) 2023 年 4 月 12 日プレスリリース「持続可能な農業のための堆肥-土壌-植物相互作用モデル」

https://www.riken.jp/press/2023/20230412_1/

注 3) 2023 年 1 月 12 日プレスリリース「ブルーカーボンのための海草底泥の共生環境を予測」

https://www.riken.jp/press/2023/20230112_3/

注 4) 2022 年 3 月 25 日プレスリリース「好熱菌を黒毛和種仔牛に投与!」

https://www.riken.jp/press/2022/20220325_4/

注 5) 2023 年 4 月 28 日プレスリリース「抗菌薬に依存しない仔牛の飼養管理」

https://www.riken.jp/press/2023/20230428_1/

研究手法と成果

本研究では、120 日齢の採卵鶏の四つのグループ(群)が準備されました(計約 22 万羽)。一つは秋期から飼育された非暑熱ストレス群(非暑熱区)で、夏期直前から飼育された三つの暑熱ストレス群(暑熱区 1、暑熱区 2、暑熱+好熱菌区)が試験対象となりました。そして、暑熱+好熱菌区には、飼育開始時より継続して、高温発酵飼料の 100 倍希釈溶液を飲水添加して 1 カ月間飼育管理しました。その結果、暑熱区 1 および 2 では、最高気温 30 度以上で、死亡率(特に壊死性腸炎が原因)が統計的に有意に増加しましたが、暑熱+好熱菌区では増加しにくい傾向が確認されました(統計学的有意差の指標 p (数値が低いほど有意水準が高い) <0.001) (図 1)。また、この傾向は、非暑熱区と同程度でした。そこで次年度に、異なる地域を含めて、新たに七つの鶏舎(計約 38 万羽)を対象として、暑熱区と暑熱+好熱菌区に分けて再現性の評価をした結果、同様の傾向を確認することができました。これらの結果から、高温発酵飼料の希釈溶液は暑熱ストレス耐性機能を増強することが明らかになりました。

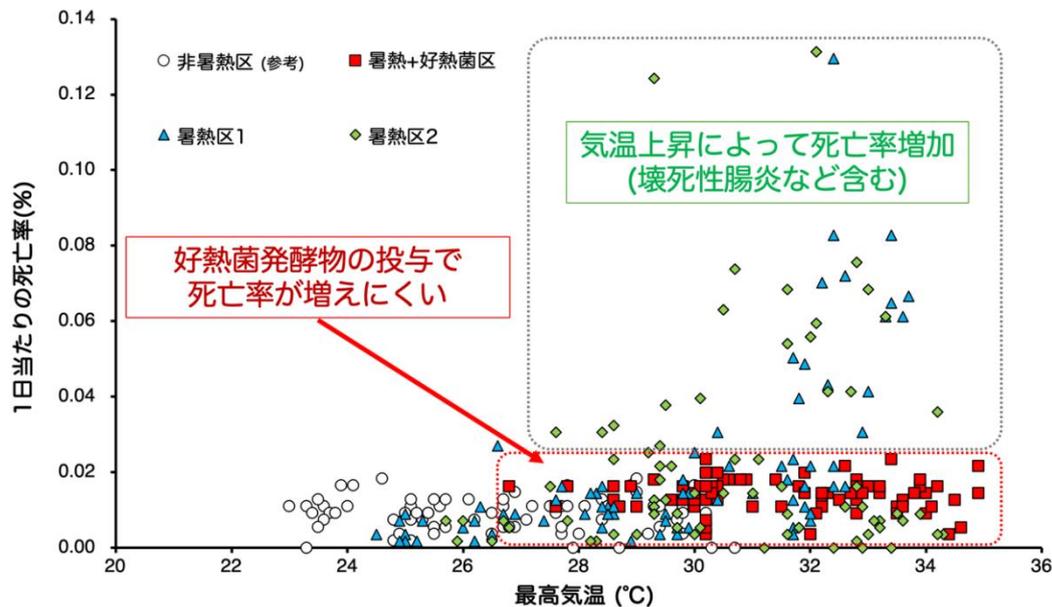


図1 鶏の死亡率と温度、ならびに好熱菌を活用した高温発酵飼料溶液投与の有無との関係

未利用海産資源を70~80°Cで高温発酵させた飼料の希釈溶液（カルディバシラス・ヒサシイ含有）を飲水に添加し、1カ月間飼育した後における死亡率と最高気温との関係を示している。

非暑熱区（参考）：秋季に飼育開始した高温発酵飼料溶液（高温発酵飼料の粉末を100倍希釈した溶液）の非添加群、暑熱区1および2（数字は異なる鶏舎を示す）：夏季直前に飼育開始した異なる鶏舎の非添加群、暑熱+好熱菌区：高温発酵飼料溶液を飲水添加した群。

これらの結果を踏まえて、腸内細菌叢との関係性を評価するために、腸内（糞便）診断を実施しました。具体的には、当該試験系の鶏舎からケージ単位におけるランダムサンプリングによって鶏糞（けいふん）を採取し、それらを対象として統合オミクス解析^[4]を実施しました。共通する重要因子候補を機械学習アルゴリズム^[5]、ROC曲線^[6]などによって選抜し、それらに基づいて、最適値を示す構造方程式モデル^[7]を計算し、重要因子グループの候補を推定しました。これによって、地域性の異なる鶏舎において、共通する腸内細菌叢と代謝物のパターンを推察することが可能となりました（図2）。

本計算結果から推察された重要因子グループの候補は、腸内細菌としてはロムブツシア属（the genus *Romboutsia*）（図2の菌A）とトゥリシバクター属（the genus *Turicibacter*）（図2の菌B）であり、代謝物としては、短鎖脂肪酸の一つである酢酸と酪酸でした。ロムブツシア属は、腸内の役割としては二面性を持つことが示唆されており、トゥリシバクター属は、壊死性腸炎との関係が疑われている菌の一つです。また、酢酸や酪酸は、それぞれ生体防御や腸管保護機能、制御性T細胞^[8]の誘導などに関わることが知られています。本試験では、ロムブツシア属とトゥリシバクター属は、高温発酵飼料溶液を投与した群において統計的に有意に減少しており（ $p < 0.001$ ）、逆に酢酸や酪酸は有意に増加していました（ $p < 0.05$ ）。

以上の結果から、当該構造方程式モデルを構成する因子組成のバランスが、暑熱ストレス耐性と関与し得る可能性が明らかになりました。

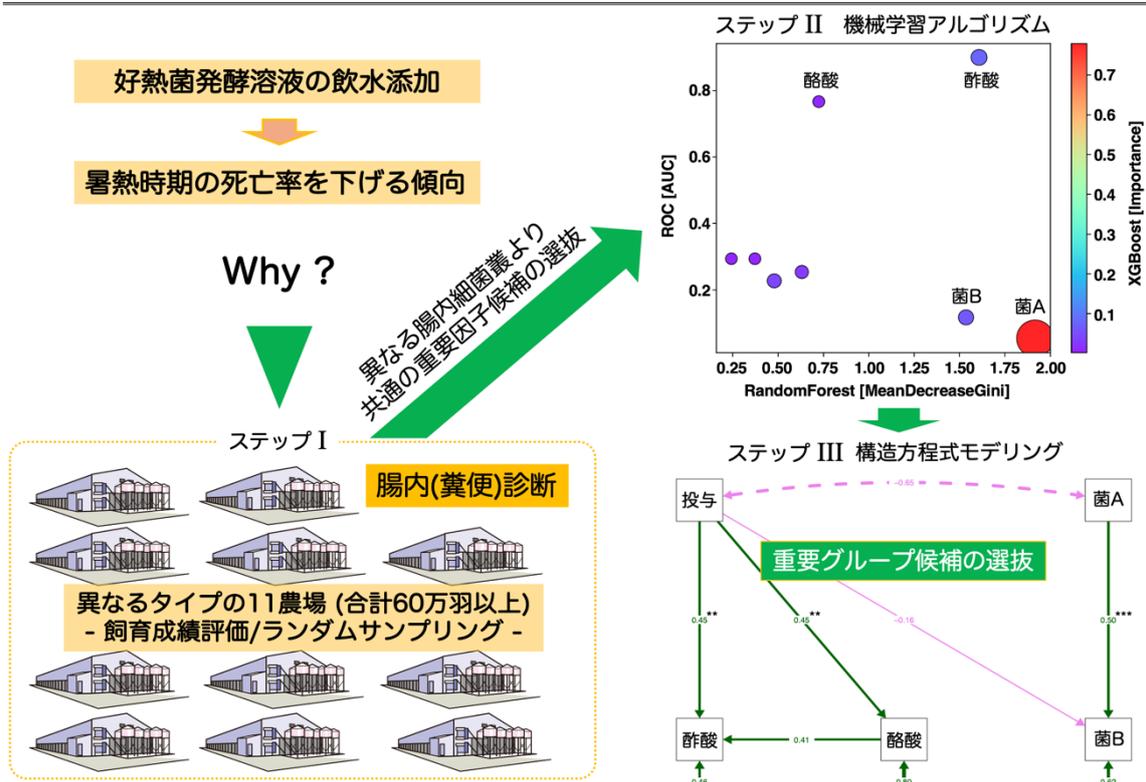


図2 計算科学的手法を活用した本技術の評価

暑熱ストレスに対して、鶏の死亡率が下がる原因を探る手順を示している。

ステップI: 異なるタイプの農場で飼育成績の評価と糞便のランダムサンプリングによる腸内(糞便)診断

ステップII: 機械学習アルゴリズムを活用した重要因子候補の選抜

(菌A: ロムプシヤ属、菌B: トウリシバクター属)

ステップIII: 構造方程式モデリングによる重要因子グループ候補の選抜

今後の期待

地球温暖化は世界的な問題ですが、人だけでなく、動物にも影響を与えます。さらに、暑熱ストレスによって動物の生体防御機能が低下し、結果として抗菌薬の使用過多にもつながる可能性があります。人畜共通の感染症や薬剤耐性菌のまん延を防ぐためには、薬剤耐性対策が重要ですが、これらの対策は、「人」「動物」「環境」を包括的に守る「One Health (ワンヘルス)」のアプローチと密接に関連しており、さらに生物多様性の回復を目指す「ネイチャー・ポジティブ^[9]」との取り組みとも表裏一体であることが分かります。

本研究では、資源循環型(リサイクル型)高温発酵技術を活用して、暑熱ストレス環境で飼育した鶏の死亡率を下げることを見いだしていることになり、腸内環境の制御に伴い、生体防御機能の低下を防いでいる可能性が示されました。そして、実際に糞便を対象とした計算科学的なアプローチによって、腸内細菌叢の構成比率と短鎖脂肪酸の組成比率のバランスを改善している可能性を示しました。

まとめると、本研究における重要な観点は少なくとも五つあり、①高付加価値

化した資源循環（未利用海産資源由来の肥料や飼料）、②暑熱ストレス回避、③抗菌薬の使用を未然に防ぐ生体防御機能の向上、④これらの環境配慮型の飼育管理（家畜における腸活など）に伴って生産され得る、良質な畜産品（卵・肉製品）、⑤良質な堆肥（質の高い腸内細菌叢に依存した完熟堆肥）の付加価値化に関わります。実際に、この五つの観点における現場レベルでの知見としては、新しい循環型農業のモデルケースとして四半世紀以上進められており（茨城県・都路グループの農場管理における取り組み）、その実績を踏まえた研究成果となります。

本研究で用いた飼料は、未利用海産資源を好熱性バシラス群などによって 70～80℃で高温発酵させた発酵飼料であり、これによって暑熱ストレスによる鶏の死亡率を低減させていることとなります。その作用機序として予測された重要因子グループは、国際的にも学術報告が多い因子に絞られました。例えば、粘膜システム研究チームの研究成果として、モデル動物実験系における短鎖脂肪酸の重要性を Nature 誌などに報告していますが^{注6~9)}、本研究成果はフィールドレベルでの実証の一つである可能性があります。今後、幅広い環境条件での研究知見が集積し、適切な腸内細菌叢の制御が可能になれば、「人」「動物」「環境」を包括的に守る「ワンヘルス」の重要なアプローチの実現に貢献し得るものと期待されます（図3）。

以上の観点から、本研究成果は、国際連合が定めた 17 の目標「持続可能な開発目標（SDGs）^[10]」のうち、イノベーションに関わる「9.産業と技術革新の基盤をつくろう」、リサイクルに関わる「12.つくる責任、つかう責任」、気候変動対策に関わる「13.気候変動に具体的な対策を」、ネイチャー・ポジティブに関わる「14.海の豊かさを守ろう」、「15.陸の豊かさを守ろう」への貢献につながるものです。

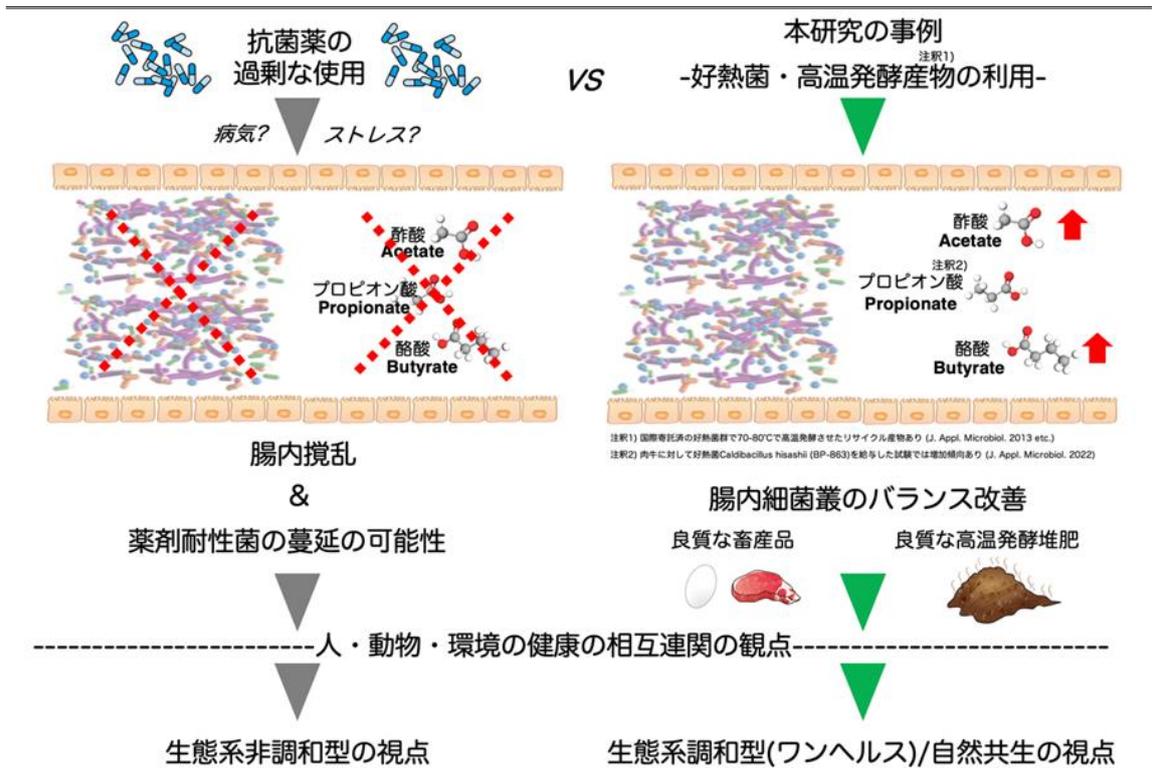


図 3 本研究成果が生態系調和型（ワンヘルス）社会実現に果たす役割と展望

左) 生態系非調和型の視点。抗菌薬の過剰な使用は、腸内細菌叢と重要な機能性代謝物である短鎖脂肪酸（酢酸・プロピオン酸・酪酸）の機能性を損なうことを示している。
 右) 生態系調和型（ワンヘルス）／自然共生の視点。本研究の結果と過去の知見により、腸内細菌叢と短鎖脂肪酸（酢酸・プロピオン酸・酪酸）の機能性を損なわないことを示している。

注 6) 2011 年 1 月 27 日プレスリリース「ビフィズス菌の作る酢酸が O157 感染を抑制することを発見」
https://www.riken.jp/press/2011/20110127_2/

注 7) 2013 年 11 月 14 日プレスリリース「腸内細菌が作る酪酸が制御性 T 細胞への分化誘導のカギ」
https://www.riken.jp/press/2013/20131114_1/

注 8) 2021 年 7 月 15 日プレスリリース「酢酸による免疫グロブリン A の機能制御」
https://www.riken.jp/press/2021/20210715_1/

注 9) 2023 年 5 月 10 日プレスリリース「授乳期の短鎖脂肪酸が子の気管支喘息を改善する」
https://www.riken.jp/press/2023/20230510_2/

論文情報

<タイトル>

Compost fermented with thermophilic Bacillaceae reduces heat stress-induced mortality in laying hens through gut microbial modulation

<著者名>

Yudai Inabu[#], Hirokuni Miyamoto^{*}, Hideyuki Takahashi^{*}, Tamotsu Kato, Shigeharu Moriya, Atsushi Kurotani, Haruki Yamano, Teruno Nakaguma, Naoko Tsuji, Chitose Ishii, Makiko Matsuura, Satoshi Wada, Takashi Satoh, Motoaki Udagawa, Hisashi Miyamoto, Jun Kikuchi, Hiroaki Kodama, Hiroshi Ohno^{*}

([#]筆頭著者) (^{*}共同責任著者)

<雑誌>

Animal Microbiome

<DOI>

[10.1186/s42523-026-00520-5](https://doi.org/10.1186/s42523-026-00520-5)

補足説明

[1] 好熱菌

50℃以上で増殖能を有する細菌群の総称。温泉や海底熱鉱床などに生息する。

[2] One Health（ワンヘルス）

人や動物・環境諸因子全体を、健康のための対象として捉えて、一体的に守る考え方を指す。

[3] 短鎖脂肪酸

主に腸内細菌が食物繊維を分解する際に産生される栄養素の一種で、直鎖の炭素鎖が短い脂肪酸のことを指す。主な代表例としては、酢酸、プロピオン酸、酪酸などがある。腸管内では、主に腸内細菌による発酵作用によって産生される。

[4] 統合オミクス解析

メタゲノム解析、メタボローム解析、プロテオーム解析など複数の階層の網羅的なデータを総合的に解析する手法を指す。ここでは、細菌叢のメタゲノム解析とメタボローム解析のデータセットを対象として解析をしている。

[5] 機械学習アルゴリズム

学習により自動で改善するコンピュータアルゴリズム。本研究では、アソシエーション解析（AA）、ランダムフォレスト（RF）、XGBoostを用いた。アソシエーション解析は、観測データ間の影響を評価する方法の一つであり、ここでは中央値を基準に二値化したデータに基づいて算出されている。ランダムフォレスト、XGBoostは、それぞれバギング法とブースティング法の一つであり、観測された複数の実測値データを用いて、それらの中の特徴量を算出することが可能なアルゴリズムである。

[6] ROC 曲線

分類モデルの性能を評価する曲線グラフを計算によって算出する。ROC 曲線の下での面積（AUC）の数値が性能の高さを示す指標となる。ROC は Receiver Operating Characteristic の略。

[7] 構造方程式モデル

複数の構成因子間の関係性を統計的に評価する手法の一つ。 $y=ax+b$ の関係（回帰）が二つ以上存在するモデル（重回帰モデル）によって評価される。本研究ではロバスト推定法（実験データから得られた母集団の中の外れ値の影響を最小限に抑えて本来の傾向を頑強に推定する方法）を採用している。

[8] 制御性 T 細胞

ヘルパーT細胞に属するT細胞で、免疫反応を抑制する働きがあり、特に自己抗原に対する免疫反応を抑制する。

[9] ネイチャー・ポジティブ

生物の多様性の損失を食い止め、回復させる自然共生型社会を実現する取り組みを指す。

[10] 持続可能な開発目標 (SDGs)

2015年9月の国連サミットで採択された「持続可能な開発のための2030アジェンダ」にて記載された2016年から2030年までの国際目標。持続可能な世界を実現するための17の目標、169のターゲットから構成され、発展途上国のみならず、先進国自身が取り組むユニバーサル(普遍的)なものであり、日本としても積極的に取り組んでいる(外務省ホームページから一部改変して転載)。

共同研究グループ

理化学研究所

生命医科学研究センター 粘膜システム研究チーム

チームディレクター 大野博司 (オオノ・ヒロシ)

客員主管研究員 宮本浩邦 (ミヤモト・ヒロクニ)

(千葉大学 大学院園芸学研究院 連携客員教授、横浜市立大学 客員教授、株式会社サーマス、日環科学株式会社)

専門技術員 加藤 完 (カトウ・タモツ)

環境資源科学研究センター 環境代謝分析研究チーム

チームディレクター 菊地 淳 (キクチ・ジュン)

特別研究員(研究当時) 黒谷篤之 (クロタニ・アツシ)

(現 農業・食品産業技術総合研究機構

農業情報研究センター・データ研究推進室 室長)

光量子工学研究センター 光量子制御技術開発チーム

チームディレクター 和田智之 (ワダ・サトシ)

専任研究員 守屋繁春 (モリヤ・シゲハル)

九州大学 大学院農学研究院

准教授 高橋秀之 (タカハシ・ヒデユキ)

大学院生 山野晴樹 (ヤマノ・ハルキ)

広島大学 大学院統合生命科学研究科

助教 稲生雄大 (イナブ・ユウダイ)

北里大学 医療衛生学部 血液学研究室

講師 佐藤隆司 (サトウ・タカシ)

千葉大学 大学院園芸学研究院

教授 児玉浩明 (コダマ・ヒロアキ)

京葉ガスエネルギーソリューション株式会社

バイオ事業室・部長(研究当時)

宇田川元章(ウダガワ・モトアキ)

株式会社サーマス

研究部門長 (千葉大学 共同研究員)	松浦真紀子 (マツウラ・マキコ)
副主任研究員	辻 直子 (ツジ・ナオコ)
研究員 (研究当時)	石井千歳 (イシイ・チトセ)
研究員 (研究当時)	中熊映乃 (ナカグマ・テルノ)

株式会社三六九

代表取締役	宮本 久 (ミヤモト・ヒサシ)
-------	-----------------

研究支援

本研究は、共同研究機関の研究費によって実施されました。さらに、榎本重男氏（有限会社都路のたまご・創業者）や農場のスタッフの皆様の長年の実績を踏まえて、推進されたものです。また、獣医学的見地から獣医師の足立香奈氏、桐山奈央氏、ならびに須藤大介氏にご指導・ご協力いただきました。

発表者・機関窓口

<発表者> ※研究内容については発表者にお問い合わせください。

理化学研究所

生命医科学研究センター	粘膜システム研究チーム
チームディレクター	大野博司 (オオノ・ヒロシ)
客員主管研究員	宮本浩邦 (ミヤモト・ヒロクニ)
環境資源科学研究センター	環境代謝分析研究チーム
チームディレクター	菊地 淳 (キクチ・ジュン)
特別研究員 (研究当時)	黒谷篤之 (クロタニ・アツシ)
光量子工学研究センター	光量子制御技術開発チーム
チームディレクター	和田智之 (ワダ・サトシ)
専任研究員	守屋繁春 (モリヤ・シゲハル)

九州大学 大学院農学研究院

准教授	高橋秀之 (タカハシ・ヒデユキ)
大学院生	山野晴樹 (ヤマノ・ハルキ)

広島大学 大学院統合生命科学研究科

助教	稲生雄大 (イナブ・ユウダイ)
----	-----------------

北里大学 医療衛生学部 血液学研究室

講師	佐藤隆司 (サトウ・タカシ)
----	----------------

<発表者のコメント>

地球温暖化の影響は、さまざまな形で自然環境に負荷を与えています。今回の研究対象は鶏ですが、高温発酵飼料（好熱菌発酵物）を継続投与した後、おとなしくなること、また糞や堆肥の臭いが改善することから、追加の検証が進められてきました。膨大なデータを扱うことになりましたが、ありがたいことに、多くの皆さま方のお力添えに恵ま



れ、研究成果を報告することができました。(宮本浩邦)

<機関窓口>

理化学研究所 広報部 報道担当

Tel: 050-3495-0247

Email: ex-press@ml.riken.jp

九州大学 広報課

Tel: 092-802-2130

Email: koho@jimukyushu-u.ac.jp

広島大学 広報室

Tel: 082-424-4518

Email: koho@office.hiroshima-u.ac.jp

学校法人北里研究所 広報室

Tel: 03-5791-6422

Email: kohoh@kitasato-u.ac.jp
