

「食べ物・腸内細菌・免疫力！ゲノムでつながる三角関係」

(作物ゲノムおよび微生物メタゲノムに基づく食事・腸内発酵・免疫機能の統合的理

第一部：計算機科学と食の未来：ゲノムと構造解析が導く発酵食品の革新

(食の科学を支える計算機技術：ゲノム解析と構造予測の最前線)

- | | |
|--------------------------------|-------------|
| 1. 酒米と食用米を分ける遺伝子は何？ | 吉田英樹（発酵醸造研） |
| 2. 味噌も醤油も！大豆の色を決める遺伝子の謎 | 菅波眞央（発酵醸造研） |
| 3. ダイズの光合成を強くする！ゲノムからの挑戦 | 高橋秀和（食農学類） |
| 4. お酒の“苦味”はどこから？AIが解き明かす分子のしくみ | 西尾俊亮（発酵醸造研） |

第二部：ワインと日本酒を育む農場の科学

(発酵文化を支える農業フィールド研究：葡萄畠と酒米水田の現場から)

- | |
|---|
| 5. 葡萄樹の健康を守る：葉緑素蛍光リモートセンシングによる診断技術 牧 雅康（食農学類） |
| 6. ワイン葡萄の病理学：カビとRNAウイルスの科学 岡野夕香里（食農学類） |
| 7. 有機農業 vs 慣行農業：水田圃場における土壤環境の違いとその影響 二瓶直登（食農学類） |
| 8. 同じ酒米でも育ちが違えばお酒の香りが違う！？：日本酒を科学する 吉永和明（食農学類） |
| 9. 気候変動で日本酒の香りが変わる！？：酒米×科学の実験 藤井 力（食農学類） |

第三部：食事と腸内環境が支える恒常性と免疫力：健康維持のメカニズムを探る

- | |
|---|
| 10. 糖の鎖と腸内細菌との深イイ関係：腸内環境が導く健康の鍵 尾形 慎（食農学類） |
| 11. 免疫調節へのアプローチ：酵母の糖鎖による食物アレルギー抑制 戸田雅子（発酵醸造研） |
| 12. 食事で高める感染抵抗力：大豆全粒食と腸管免疫の関係 長谷耕二（発酵醸造研） |
| 13. ママの食べ方が赤ちゃんの未来をつくる？～腸内環境のふしき～ 種村菜奈枝（食農学類） |

第一部：計算機科学と食の未来：ゲノムと構造解析が導く発酵食品の革新

(食の科学を支える計算機技術：ゲノム解析と構造予測の最前線)

1. 酒米と食用米を分ける遺伝子は何？

○ 吉田英樹、松岡 信

福島大学食農学類附属発酵醸造研究所

現在日本で栽培されているイネの種類には、主に炊いて食べる「食用米」と日本酒の原料となる「酒米（酒造好適米）」がある。一般的に、酒米は食用米よりも粒が大きく、また粒の中心に「心白」と呼ばれる白く濁った部分が生じることが知られている。これらの特徴は日本酒づくりにとって重要であり、これまでのイネの育種の中で受け継がれてきている。そこで我々は食用米と酒米およびその元になった在来品種を含む 202 品種のゲノム情報を活用することで、酒米の 2 つの大きな特徴（大粒・心白）を生み出す遺伝子の特定を試みた。その結果、食用米のゲノムには、酒米や在来とは異なる領域が複数存在することが明らかになった。この『食用米と酒米間で異なるゲノム領域』の中に、「酒米の 2 大特徴（大粒・心白）」を生み出す遺伝子が存在すると考えて、さらに詳細に解析を進めた結果、心白を誘導する遺伝子として米粒の細胞壁に関与するマンナンの合成に関わる遺伝子 *OsMnS* と、米粒の幅を制御する遺伝子 *OsWOX9D* を特定した。さらなる生化学的・分子生理学的解析により、これらの遺伝子が正常に機能することで酒米の特徴が生み出されていることを証明した。

2. 味噌も醤油も！大豆の色を決める遺伝子の謎

○ 菅波真央、松岡 信

福島大学食農学類附属発酵醸造研究所

ダイズは醤油、味噌、など日本食を彩る発酵食品の原料となる作物であり、一般的な黄豆の他にも、黒豆、茶豆、青豆、鞍掛豆など様々な色の品種が存在する。この色の違いはどのように生まれたのだろうか。私たちは、国内外から様々なダイズ品種を集めてゲノム解析を行い、色の違いを生み出す 4 つの重要な遺伝子を特定した。さらに、種皮の色ごとに機能している遺伝子の解析や蓄積している色素成分の分析を行った結果、4 つの遺伝子の組み合わせによって、種皮で合成される色素が変化し多様な色が生じていることが分かった。例えば、黒豆では、プロアントシアニジン、アントシアニンという色素が多量に合成され、種皮が黒くなる。一方、茶豆ではアントシアニンを合成する遺伝子が働かないため、プロアントシアニジンのみが蓄積していた。黄豆では、色素のもととなる物質自体が合成されず、透明な種皮を通して豆の黄色が見えている。アズキと似た赤色の種皮を持つ赤豆では、赤色のアントシアニンを合成する遺伝子のみが働いていた。長い栽培の歴史の中で、人々はこれらの遺伝子の変化を巧みに利用し、現代の多彩なダイズの色を生み出してきた。

3. ダイズの光合成を強くする！ゲノムからの挑戦

高橋秀和

福島大学食農学類、福島大学食農学類附属発酵醸造研究所

光合成効率の向上は作物の収量増加の鍵であり、その研究の歴史は長い。しかし、日本のダイズ生産（令和 6 年の 10a 当たり収量 164kg）は、アメリカの半分程度という関係性が依然として解消されていない。この課題に対し、本研究では葉緑体ゲノムに着目する。葉緑体は、光合成に必要な酵素機構をすべて備えた細胞小器官であり、核とは異なる独自のゲノムを持つ。そこで、高光合成効率を持つ品種を見出すため、多数の品種間で葉緑体ゲノムの多様性を詳細に解析した。具体的には、光合成の根幹をなす光化学系 I・II 構成遺伝子、Rubisco、シトクロム複合体、および電子伝達系の効率やチラコイド膜の機能に関わる遺伝子群について比較解析を行った。ダイズの葉緑体は種子親（母親）から子へ受け継がれる母性遺伝をする。従来の交雑育種では目的形質を持つ株を選抜するために一般に 10 年を要するが、葉緑体の特性は家

系内で共通であり、遺伝的背景の追跡が容易である。本発表では、この葉緑体ゲノム解析の知見と母性遺伝の特性を利用することで、効率的かつ効果的な品種改良の方法を皆さんと一緒に考えていく。

4. お酒の“苦味”はどこから？AIが解き明かす分子のしくみ

○西尾俊亮¹⁾、高橋秀和^{1, 2)}、松田 幹^{1, 2)}

¹⁾ 福島大学食農学類附属発酵醸造研究所、²⁾ 福島大学食農学類

苦味は毒物や腐敗物を想起させ、本来忌避すべき感覚である。しかし、私達はコーヒーなど食品中の苦味を許容し、むしろ好むこともある。日本酒には、原料のコメに由来する苦味を呈する短いタンパク質断片（ペプチド）が複数種類含まれており、これらのペプチドは日本酒特有の味わいに寄与することが知られている。苦味を含む食品の味は、舌の味蕾を構成する味覚細胞で発現している味覚受容体によって認識される。苦味受容体は約30種類存在するが、苦味を呈するペプチド（苦味ペプチド）をどのように認識しているかは不明である。本研究では、質量分析法による日本酒由来苦味ペプチド群の同定と、Artificial Intelligence (AI) による高精度のタンパク質構造予測および複合体構造予測とを組み合わせて、苦味受容体タンパク質と苦味ペプチドの相互作用を網羅的に解析した。その結果、既知の日本酒由来苦味ペプチドと類似の特徴を有するペプチドが市販の日本酒に多数含まれていることを見出した。また、複合体予測により、苦味受容体に対するそれらのペプチドの指向性を推測した。

第二部：ワインと日本酒を育む農場の科学

（発酵文化を支える農業フィールド研究：葡萄畠と酒米水田の現場から）

5. 葡萄樹の健康を守る：葉緑素蛍光リモートセンシングによる診断技術

○牧 雅康^{1, 2)}、菅波眞央²⁾、岡野夕香里^{1, 2)}

¹⁾ 福島大学食農学類、²⁾ 福島大学食農学類附属発酵醸造研究所

近年、地球温暖化や異常気象により、安定的な食糧生産が困難になってきている。特に農業分野においては、植物病害による被害が増してきている。このような植物病害に対処するために、ドローンを用いて植物の生育状態を把握する技術の研究が進められている。しかし、べと病のように初期の病害部位が小さく淡色の場合、ドローンを用いた上空からの撮影では検出が困難である。そのため、ブドウの側面から計測を行う必要があるが、側面から計測を行う場合、昼間は太陽光の影響による逆光や過度な明るさの影響により、高品質な画像を取得することが難しい。そこで本研究では、夜間に安定した光を当てることで計測を行う事が可能であるクロロフィルa（以下、Chl a）蛍光画像計測手法を用いて、病気によって光合成反応に障害が出ている状態を把握する事を考えた。本研究ではPFI (Photosynthetic Function Index) を算出し、PFIを画像として可視化することを目的とした。また、従来からChl a 蛍光の測定に用いられてきたPAM (Pulseamplitude Modulation, パルス振幅変調蛍光測定) 法による結果と比較して提案する方法の有効性を評価した。その結果、PFI画像による病害部位の可視化の可能性が示唆された。

6. ワイン葡萄の病理学：カビとRNAウイルスの科学

○ 岡野夕香里、高橋秀和、二瓶直登、牧 雅康

福島大学食農学類、福島大学食農学類附属発酵醸造研究所

醸造用ブドウは生食用ブドウと比較して病害に弱く、特に温暖湿潤な日本では安定生産が難しい。本発表では、福島県内の圃場を事例として、厳しい気象条件下におけるブドウ栽培の実態と課題を報告する。とくに、日本の栽培において恒常的な問題となるブドウベと病に着目した。本病は卵菌類 *Plasmopara viticola* によって引き起こされる。2022～2024年の3年間にわたり、気温・湿度・降雨などの環境条件を経時的に記録し、べと病の発生との関連を解析した。これらのデータは、日本の気候に適した防除戦略

構築の基礎情報となる。さらに調査中、生育不良と葉のモザイク症状を示す株を発見し、次世代シーケンス解析を行った結果、近年報告された植物 RNA ウィルスの感染を確認した。圃場内の複数品種を広く調査したところ、同ウィルスは多くの品種で検出されたが、それらの樹は葉に僅かなモザイクを示すのみで、必ずしも顕著な症状は伴わなかった。

7. 有機農業 vs 慣行農業：水田圃場における土壌環境の違いとその影響

○ 二瓶直登^{1), 2)}、矢部修平³⁾

¹⁾ 福島大学食農学類、²⁾ 福島大学食農学類附属発酵醸造研究所、

³⁾ 理化学研究所環境資源科学研究センター

会津地域の T 酒造では各地区に自社水田をもち、「一田一醸」の理念のもと、各圃場で収穫した酒米「五百万石」を用いた圃場別の酒造りを行っている。本研究では、圃場ごとの酒米および酒質に影響を与える要因として、水田土壌の菌叢に注目し、2023 年および 2024 年に各圃場の土壌を採取して菌叢解析を実施した。対象とした圃場は有機栽培圃場 A、B、C、特別栽培圃場 D、E、F、G、慣行栽培圃場 H と位置づけられている。解析の結果、*Actinobacteria*、 α/γ -*Proteobacteria*、*Planctomycetes*、*Anaerolineae* など、一般的な水田に多い分類群が優占していた。各圃場の細菌の多様性（ α -多様性）は圃場間で統計的な差はみられなかつたが、有機栽培圃場 A と C で多様性が高い傾向があつた。各圃場間での多様性の比較（ β -多様性）では 2023 年と 2024 年で菌叢が大きく異なる一方、圃場 A・C・H、圃場 E・F、圃場 B の三つのグループがそれぞれクラスターを形成し、圃場間で菌叢パターンが異なることが示された。また、2024 年の畠と株元の比較では大きな差異は認められなかつた。今後は、圃場間の菌叢の類似性が酒米や酒質にどのように反映されるのか、より詳細に検証する予定である。

8. 同じ酒米でも育ちが違えばお酒の香りが違う！？： 日本酒を科学する

○ 吉永和明、藤井 力、松田 幹

福島大学食農学類、福島大学食農学類附属発酵醸造研究所

日本酒の香りは、ビール、ワイン、ウイスキーなど他の酒類とは異なる特徴を持っている。また、同じ日本酒でも、種類や銘柄、産地などによって香りが異なる。香り成分の中には、ごく微量 (ppm や ppb のレベル) でも人の嗅覚で感知できるものがある。エタノール以外の主な香り成分としては、高級アルコール類、有機酸、エステル類、アルデヒド／ケトン類、硫黄化合物などが挙げられる。日本酒の醸造によって生成する香り成分は、原料の米（酒米）や発酵微生物（酵母、麹菌）、醸造条件などによって変化する。本研究では、福島で酒米を自家栽培し日本酒を醸造している蔵元の協力を得て、水田土壌、農業用水、地理的条件などが異なる 7 か所の水田で栽培された同一品種の酒米を原料とし、他の条件をほぼ同一にして醸造した 7 種類の日本酒の香り成分を、先端機器分析技術を用いて比較した。その結果、7 か所の水田のうち 3 か所の米で醸造した日本酒では、「吟醸香」と呼ばれるフルーティーな香りに関するエステル類が多く、一方、別の 3 か所の米では高級アルコール類が多いことが分かった。

9. 気候変動で日本酒の香りが変わる！？： 酒米 × 科学の実験

藤井 力

福島大学食農学類、福島大学食農学類附属発酵醸造研究所

日本酒の香味は原料米そのものの香味ではなく、麹菌や酵母の働きによってつくられる。今回、気温が日本酒の香気成分に影響を与えると示唆される結果が得られたので紹介したい。日本酒の香味には麹菌や酵母の菌株、発酵環境、米品種・精米歩合等が影響するが、原料米である稻の栽培環境と酒質をつなぐ研究はほとんどされてこなかつた。我々は、米の品種、精米歩合、仕込み水等や製品規格が同一にもかかわらず、製成酒の香味が官能的にも分析値的にも異なる日本酒群を見出した。これら日本酒の原料米の圃場は半径 2 km 圏内と近隣にもかかわらず、稻の登熟期（でんぶん形成期）の気温に違いが見られた。登

熟期気温は田植え時期、圃場にひく水の系統、流量、圃場の広さ等の影響を受けている可能性がある。稻の登熟期気温は米のでんぶん構造に影響を与え、米の酵素消化性に影響する。我々は全国新酒鑑評会出品酒の分析値から登熟期気温が高い年は出品酒の香りが低いことを見出した。米の酵素消化性は酵母へのグルコース供給量に影響し、香氣成分量を左右していることが示唆された。

第三部：食事と腸内環境が支える恒常性と免疫力：健康維持のメカニズムを探る

10. 糖の鎖と腸内細菌との深イイ関係：腸内環境が導く健康の鍵

○尾形 慎^{1, 2)}、神山恵美莉¹⁾、田中裕基¹⁾、西尾俊亮²⁾、松田 幹^{1, 2)}

¹⁾ 福島大学食農学類、²⁾ 福島大学食農学類附属発酵醸造研究所

食物に含まれる糖質は、糖の鎖の長さ（重合度）によって単糖、オリゴ糖、多糖に分類される。ヒトは重合した糖質をそのまま吸収できないため、デンプンを麦芽糖、さらにブドウ糖へと分解するように、消化酵素によって単糖まで分解して利用している。一方、穀類・豆類・野菜・果物などの植物性食品には、デンプンやショ糖のように消化・吸収される糖質に加え、ヒトの消化酵素では分解できない糖の鎖が多く含まれ、これらは食物繊維や難消化性オリゴ糖と総称される。また、デンプンの中にも構造的に消化されにくい難消化性デンプン（レジスタンストスター）が存在する。これら難消化性糖鎖は小腸を通過して大腸に届き、大腸内の細菌によって嫌気的に代謝され、多様な代謝産物を生成する。近年、これらの代謝産物が大腸から吸収され、宿主の恒常性維持や健康増進に寄与することが明らかになってきた。腸内細菌は種類によって利用できる糖鎖や生成する代謝産物が異なるため、摂取する難消化性糖鎖の種類や量は腸内細菌叢や代謝産物、さらには健康への作用に影響を及ぼす。本シンポジウムでは、レジスタンストスターを例に、単独では利用できず有益な代謝産物も生成しない2種類の腸内細菌が、共存することで協働的に有用な代謝産物を産生することを、嫌気培養実験により実証した最新の研究成果を紹介する。

11. 免疫調節へのアプローチ：酵母の糖鎖による食物アレルギー抑制

○戸田雅子^{1, 3)}、尾形 慎^{2, 3)}、西尾俊亮³⁾、松田 幹^{2, 3)}

¹⁾ 東北大学大学院農学研究科、²⁾ 福島大学食農学類附属発酵醸造研究所、³⁾ 福島大学食農学類
酵母などの真菌類の細胞壁には生理活性を持つ機能性多糖類が豊富に含まれているが、菌類の種類によってその構造は異なる。我々は、これらの多糖類のうち、特にマンナンの抗炎症・抗アレルギー作用に着目し、その作用メカニズムの解析を行っている。マンナンは、単糖であるマンノースが重合した構造からなる。マンナンは、免疫系の初期応答を惹起する樹状細胞に作用することが知られていた。我々は特にパン酵母(*Saccharomyces cerevisiae*)に含まれるマンナンが、樹状細胞に作用した際、免疫調節作用をもつサイトカインIL-10の産生を強力に誘導することを見いたした。IL-10は、制御性T細胞(regulatory T cells: Treg)などの誘導を介して過剰な免疫応答を抑制し、炎症やアレルギー反応を鎮静化する役割を担う。パン酵母マンナンの作用を解析するため、我々は食物アレルギーモルマウスを用いた実験を実施した。その結果、マンナンを含む飼料を摂食させると、マウスにおけるアレルギー様症状を緩和する抗アレルギー作用を誘導することが明らかになった。本研究で得られた知見は、パン酵母マンナンが、アレルギーの予防や寛解を促進するための機能性素材としての可能性をもつことを示している。

12. 食事で高める感染抵抗力：大豆全粒食と腸管免疫の関係

○長谷耕二^{1, 2)}、松田 幹^{2, 3)}

¹⁾ 慶應義塾大学薬学部、²⁾ 福島大学食農学類附属発酵醸造研究所、³⁾ 福島大学食農学類

私たちの腸内には、日々、食べ物に含まれる成分や細菌、毒素などが流れ込む。そのため、腸管には体内で最も多くの免疫細胞が集まり、外敵から身を守る強力な免疫系が形成されている。この腸管免疫系は、

IgA 抗体と呼ばれる物質を大量に産生し、腸の内腔に分泌することで、異物の侵入を防いでいる。このように IgA は、粘膜バリア機能の中核を担っている。IgA の産生には、腸に存在するパイエル板と呼ばれる免疫組織に存在する濾胞性ヘルパーT 細胞 (Tfh) 細胞が重要な役割を果たす。しかし、この Tfh 細胞がどのように誘導されるのかについては、これまで十分に理解されていなかった。本研究では、マウスに大豆粉を与えるとパイエル板の Tfh 細胞が顕著に増加し、その結果として IgA の量が増えることを明らかにした。さらに、大豆粉の摂取が腸内細菌叢の構成を大きく変化させ、その変化が Tfh 細胞の増加を促すことを見出した。以上の結果から、大豆の摂取は栄養面での利点だけでなく、腸内細菌を介して腸の免疫力を高め、粘膜バリア機能を強化する可能性があることが示された。

13. ママの食べ方が赤ちゃんの未来をつくる？～腸内環境のふしき～

○種村菜奈枝^{1, 2)}，西尾俊亮²⁾，中野泰至³⁾，下条直樹⁴⁾，松田 幹^{1, 2)}

¹⁾ 福島大学食農学類、²⁾ 福島大学食農学類附属発酵醸造研究所、

³⁾ 千葉大学大学院医学研究院小児病態学、⁴⁾ 千葉大学予防医学センター

食事は文化や習慣などにより多様であるが、個々には一定の摂取パターンがあると思われる。腸内細菌は食事内容に応じて変化し、その種類や数は腸内環境や健康、さらに疾患にも少なからず影響する。本研究では、自身だけでなく胎児の成長も考慮して食事をすることも多い妊娠中の女性に着目し、食事摂取の特徴と腸内細菌叢との関連を調べた。妊娠中期の 62 名に妥当性の高い食事摂取頻度調査票 (FFQ) を実施し、糖質・脂質・タンパク質などの推定摂取量を算出し、摂取エネルギーで補正した後に数理的なデータ分析法により個々の被検者の食事摂取の特徴を調べた結果、高食物纖維型、低糖質・高脂質型、高タンパク質型の 3 つのパターンに分類された。さらに便 DNA を用いて細菌メタゲノム解析を行い各パターンで腸内細菌叢を比較したところ、低糖質・高脂質型において、血糖値を下げるホルモン GLP-1 の発現と相関することが報告された菌種が有意に優勢で、また妊娠糖尿病予防との関連が示唆される菌種が検出される頻度も高い傾向がみられた。今後は、これらの細菌と妊娠中の血糖変動との関係を解明し、食事パターンと胎児の成長にも影響する妊娠糖尿病との関連性を明らかにする必要がある。