

質量分析法でインド産雑穀の有益脂質を明らかに

～ミレットの機能性食品応用と代謝健康関連脂質研究の発展に寄与～

ポイント

- ・ミレットの機能性食品としての可能性を示す。
- ・代謝健康における生理活性脂質の重要性を強調。
- ・FAHFA（ヒドロキシ脂肪酸エステル）の検出を報告。

概要

北海道大学大学院保健科学研究所のボメ ゴウダ シッダバサーブ ゴウダ准教授及び恵 淑萍教授らの研究グループは、インド産食用ミレットを対象に非標的型 LC/MS による包括的脂質解析を行い、生理活性脂質である脂肪酸エステル型ヒドロキシ脂肪酸（FAHFAs）を同定することで、ミレットの機能性食品としての新たな可能性を明らかにしました。

近年、ミレットは低グリセミック指数食品として注目されており、糖尿病や肥満、心血管疾患などの代謝性疾患予防における機能性食品としての可能性も指摘されています。しかしながら、ミレットに含まれる脂質成分の詳細な分子レベルでの解析は十分に行われておらず、特に脂肪酸エステル型ヒドロキシ脂肪酸（FAHFAs）のような微量かつ生理活性を有する脂質分子についての情報はほとんど報告されていません。

本研究は、こうした知見の不足を補うことを目的とし、複数種類のインド産ミレットを対象に多様な脂質分子を体系的にプロファイリングしました。非標的型 LC/MS 解析と多変量統計解析を組み合わせることにより、ミレットの種ごとに特徴的な脂質プロファイルを明らかにし、機能性脂質の定量を行いました。

その結果、ミレットは栄養源としての価値のみならず、抗炎症作用やインスリン感受性改善作用が示唆される FAHFAs を含む機能性食品としての潜在力を有することが示されました。さらに、品種間で脂質組成に顕著な差異が認められ、特定の品種は機能性脂質の豊富な供給源として有望であることが示唆されました。

これらの結果から、ミレットに含まれる脂質の多様性と機能性脂質の存在に関する基盤的知見が得られたと考えられます。本研究成果は、機能性食品の開発、栄養評価、さらには品種改良や栽培戦略の設計に応用可能であり、ミレットの健康機能性に関する科学的理解を深めるとともに、持続可能な食料システムの構築や国際的な栄養戦略への貢献が期待されます。

なお、本研究成果は、2026年3月7日（土）公開の Food Chemistry 誌にオンライン掲載されました。



複数種類のインド産ミレット

【背景】

ミレットは、ヒエ、アワ、キビ、ソルガムなどを含む小粒穀物の総称であり、アジア及びアフリカ地域において重要な主食資源として長年利用されてきたことが知られています。これらの作物は乾燥や高温などの過酷な環境条件下でも栽培可能であることから、持続可能な農業及び食料安全保障の観点から近年再評価されています。さらに、ミレットは食物繊維、ポリフェノール、ミネラル、ビタミンを豊富に含み、低グリセミック指数（GI）食品として糖尿病や肥満、心血管疾患などの生活習慣病の予防に寄与する可能性が報告されています。

一方で、ミレットに含まれる脂質成分に関する研究は、主に総脂質量や脂肪酸組成の解析にとどまっており、脂質分子レベルでの包括的な解析は未だ十分に行われていません。特に、脂肪酸エステル型ヒドロキシ脂肪酸（FAHFAs）は、抗炎症作用、抗糖尿病作用、インスリン感受性の改善といった生理機能を有する新規脂質分子群として注目されていますが、食品中での分布や存在量に関する知見は限られています。

このような背景から、ミレット中の脂質オミクス解析を通じて、未知の機能性脂質の探索及びその栄養学的意義の解明が求められていると考えられます。

【研究手法】

本研究では、インド・ハイデラバードに所在する Indian Council of Agricultural Research (ICAR) 傘下の Indian Institute of Millets Research (IIMR) よりミレット穀粒試料を入手しました。解析対象としたミレットは、Barnyard、Browntop、Kodo、Finger、Little、Foxtail の 6 種、計 59 品種としました。

脂質抽出は修正版 Bligh-Dyer 法を用いて行い、内部標準としてオレイン酸-d9 及び EquiSPLASH Lipidomix を添加しました。さらに、非標的型脂質プロファイリングは、高性能液体クロマトグラフィー（HPLC）と線形トラップ四重極 Orbitrap 高分解能質量分析計（LTQ-Orbitrap HRMS）を組み合わせ、正イオンモード及び負イオンモードの両条件で測定しました。クロマトグラフィー分離には Atlantis T3 C18 カラムを使用しました（図 1）。

こうして得られた質量分析データに対し、MS-DIAL ソフトウェアを用いてデータ処理及び脂質アノテーションを行い、さらに Xcalibur ソフトウェアを用いてデータ統合及び高分解能スペクトル解析を実施しました。脂質濃度は、抽出時に添加した内部標準を基準として半定量化し、試料量により正規化しました。

さらに、潜在的な脂質バイオマーカーを特定するため、統計解析を包括的に実施しました。具体的には、疎化部分最小二乗判別分析（sPLS-DA）、ヒートマップ解析、t 検定、分散分析（ANOVA）、受信者動作特性（ROC）解析を組み合わせ、種ごとの脂質プロファイルの差異及び特徴的脂質の特定を行いました。

【研究成果】

本研究の脂質オミクス解析により、6 種類のインド産ミレットから合計 219 種類の脂質分子を同定しました。疎化部分最小二乗判別分析（sPLS-DA）を用いて脂質プロファイルを解析したところ、各ミレット種は明確にクラスターリングされ、種特異的な特徴が示されました。その結果、ホスファチジルセリン（PS）、ホスファチジルエタノールアミン（PE）、セラミド（Cer）が種間差の主要因として寄与していることが明らかとなりました。特に、Finger millet 及び Foxtail millet では PS (18:0/24:6) 及び PE (18:2/18:3) が豊富であった一方、Barnyard millet 及び Kodo millet ではこれらの脂質量が

低く、脂質生合成パターンの違いを反映していると考えられます。

総脂質含量について検討したところ、ミレット種によって差異が認められ、Foxtail millet が最も高く 8.41%、Finger millet が最も低く 3.22% でありました。脂質クラス別に解析した結果、Glycerolipids は Barnyard、Browntop、Kodo、Foxtail millet で優勢であった一方、遊離脂肪酸 (Free Fatty Acids) は Finger millet 及び Little millet で相対的に多く検出されました。さらに、56 種類の脂肪酸 (飽和脂肪酸: SFA、一価不飽和脂肪酸: MUFA、多価不飽和脂肪酸: PUFA) を検出し、特に Little millet では ω -3 及び ω -6 脂肪酸が最も豊富であることが確認されました。これらの結果から、栄養学的指標 (P/S 比、IA、HPI、HH 比) において、Foxtail millet 及び Little millet が健康的な脂質組成を有していると考えられます。

次に、ミレット中における生理活性脂質の存在について検討しました。その結果、5 種類の FAHFA 分子 (12-OAHOA、LAHPA、LAHLA、PAHOA、LAHOA) をミレット中で初めて仮同定しました (図 2)。これらの分子は、MS/MS フラグメンテーション解析及び DMED 誘導体化により検証されました。したがって、ミレットは生理活性を有する FAHFA の潜在的な食品供給源であることが示されました。

【今後への期待】

今後は、本研究で同定された FAHFAs 及びその他の機能性脂質について、その生理活性及び作用機序を明らかにするため、細胞レベル及び動物モデルを用いた in vitro・in vivo 研究を進める必要があります。特に、抗炎症作用やインスリン感受性改善効果に関する詳細な検証が重要であると考えられます。

また、日本においては健康志向の高まりとともに、機能性表示食品やスーパーフード市場が拡大していることから、ミレット由来脂質を活用した新規食品素材やサプリメントの開発が有望であると期待されます。さらに、食品加工プロセス (発酵、加熱、粉碎など) が脂質組成に与える影響について検討することにより、機能性成分を保持・強化した製品設計が可能になると考えられます。

加えて、農業分野においては、機能性脂質を高含有するミレット品種の選抜や育種、並びに栽培条件の最適化を通じて、栄養価の高い作物の開発が期待されます。本研究成果は、ミレットの新たな価値創出に寄与し、持続可能な食料システム及び健康増進に貢献する基盤的知見を提供するものと考えられます。

【謝辞】

本研究は文部科学省 (MEXT) 奨学金、並びに JSPS 科研費 JP25K00258 の助成を受けたものです。

論文情報

論文名 Comprehensive lipidomic profiling of dietary Indian millets and identification of fatty acid esters of hydroxy fatty acids by untargeted LC/ MS (非標的型 LC/MS によるインド産食用ミレットの包括的脂質オミクス解析及び脂肪酸エステル型ヒドロキシ脂肪酸 (FAHFAs) の同定)

著者名 Kumari Suraksha¹、Divyavani Gowda²、Chandra Nayaka Siddaiah³、Tara Satyavathi Chellapilla⁴、Shu-Ping Hui²、Siddabasave Gowda B. Gowda^{1,2} (¹北海道大学大学院国際食資源学院、²北海道大学大学院保健科学研究院、³Department of Studies in Applied Botany and Biotechnology, University of Mysore、⁴Indian Council of Agriculture Research- All India Coordinated Research Project on Pearl Millet)

雑誌名 Food Chemistry, Elsevier (食品化学の専門誌)

D O I 10.1016/j.foodchem.2026.148792

公表日 2026年3月7日(土)(オンライン公開)

お問い合わせ先

北海道大学大学院保健科学研究院 准教授 Bomme Gowda Siddabasave Gowda (ぼめ ごうだ しっだばさーぶ ごうだ)

T E L 011-706-3687 メール gowda@gfr.hokudai.ac.jp

U R L <https://gowdalab.com/>

配信元

北海道大学社会共創部広報課 (〒060-0808 札幌市北区北8条西5丁目)

T E L 011-706-2610 F A X 011-706-2092 メール jp-press@general.hokudai.ac.jp

【参考図】

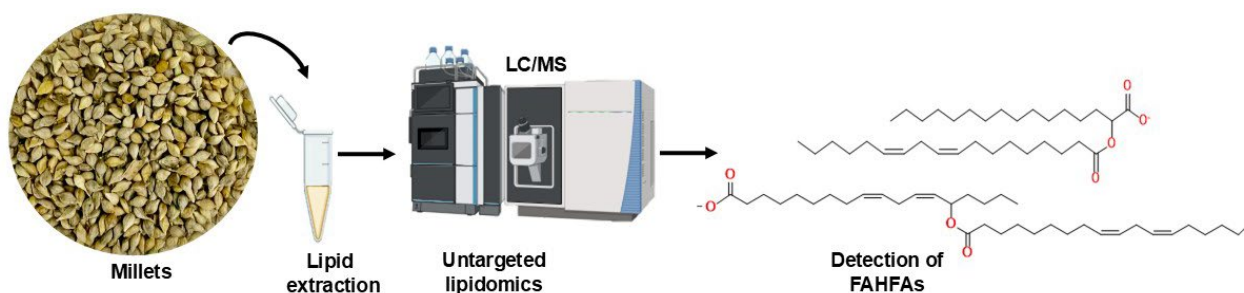
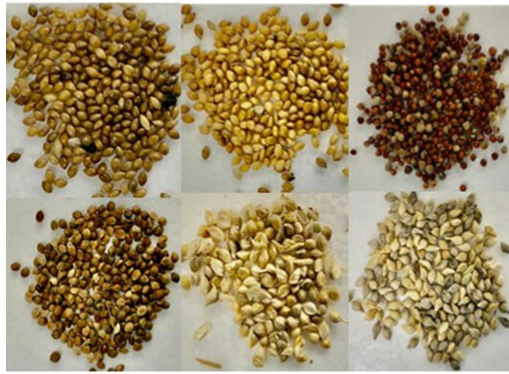


Figure 1: Identification of FAHFAs using untargeted liquid chromatography/mass spectrometry

図 1. 6 種類のキビのサンプルにおける包括的な脂質プロファイリング。



Millet species

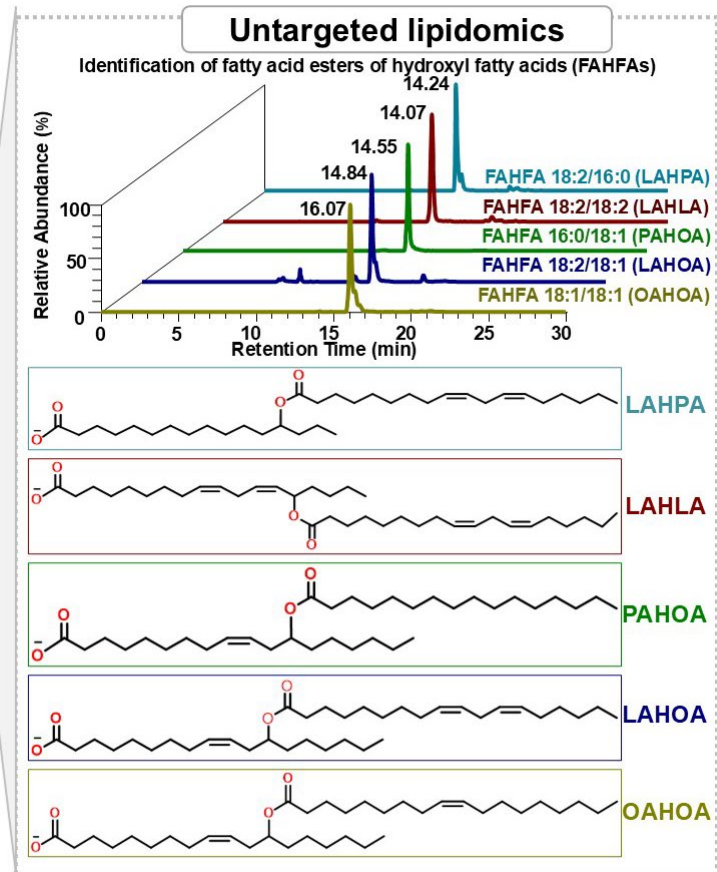


図 2. 6 種類のインド産ミレット種における非標的型脂質オミクス解析により、脂肪酸エステル型ヒドロキシ脂肪酸(FAHFAs)の同定を強調した。LC/MS クロマトグラムは、5 種類の推定 FAHFA(LAHQA、LAHLA、PAHOA、LAHOA、OAHQA) の保持時間における相対的豊富さを示している。それぞれの FAHFA の化学構造も示されており、エステル結合は赤で表示されている。これらの結果は、ミレット粒中に生理活性を有する FAHFAs が存在することを示しており、機能性脂質を含む食品源としての可能性を示唆している。