ISSN 2433-5851

生物由来の油に関する
文理融合型研究の推進

甲南大学総合研究所
叢書　141

目　次

六甲山地における植生景観の変遷

鳴海 邦匡　（1）

ラオス農村におけるブタの生産・流通・消費の変化

中辻　享　（17）

食事あるいは腸内細菌に由来する非動物型脂肪酸の代謝

田中　保、森戸　克弥（31）

生態系における DHA の生成と蓄積経路の解明に向けた，ラビリンチュラ類を中心とした食物連鎖における脂肪酸プロファイル解析

本多　大輔（47）

植物脂質を用いた実験・実習教育の実践を通して見る食用植物油の脂肪酸組成の潮流

今井　博之（53）

六甲山地における植生景観の変遷

鳴海　邦匡

はじめに

六甲山地は、瀬戸内海沿岸の須磨辺りを西端として、東部に進むほど高く、最高峰の六甲山を経て武庫川西岸へと至っており、その山塊は東西の長さ約 30 キロ、南北の幅約 8 キロとなっている。さらに、その地形は、比較的平坦な山頂に対し、南東の平地に向かって急峻な地形となっていることが分かり、それは複数の断層により形成された断層崖となるからである。

この六甲山地について、現在の植生をみると、ほとんどは二次林であるアカマツ林やコナラ林が広く分布しており、それにスギやヒノキなどの植林も混じっている。こうした二次林は、極相植生が何らかの要因で失われた後に再生した植生に相当し、多くの場合は人為的に遷移の進行が抑えられた植生の状態となっている。これを示すように、かつての六甲山の植生景観は現在と大きく異なり、植生被覆の乏しい状態であった。以下では、まず、近代における六甲山の植生景観をみていくこととする。

1　19 世紀末頃における六甲山の植生景観

図 1 の写真は、明治中期に海上から神戸港に向かって撮影されたもので、まちなみの背後に六甲山地が写されている。その山並みをみると、色の濃い部分と薄い部分の二色に大きく分かれるのが確認され、その景観は現在と異なっている。さらに、この写真の色の濃い部分をよくみると、樹木が密生している様子を確認でき、色の濃い部分が山腹に形成された林地、上部の山頂にかけて色の薄い部分が植生被覆の乏しい状態の部分となっていることが分かる。

この頃の六甲山の景観について、植物学者の牧野富太郎は次のような文章を残している。彼は、1881（明治 14）年 4 月、郷里の高知より初めて東京に向かう折に神戸港へ入港した際、船上より六甲山を眺めた印象を「私は瀬戸内海の

海上から六甲山の禿山を見てびっくりした。はじめは雪が積もっているのかと思った。土佐の山に禿山など一つもないからであった」と記している。植物学者であった牧野は、このエッセイ中、ほかにも多くの植物に関する話題を記しており、そうした関心から六甲山地の植生景観についても気付いたことを記したのであった。この六甲山の植生に関するコメントは、先の写真の内容に通じており、六甲山地において、当時、こうした景観が恒常的にみられたことをうかがわせる。

近代地形図にみる六甲山地の植生景観

それでは、次に明治の地形図から、六甲山地の植生をみていきたい。関西における明治期の地形図としては、仮製地形図（仮製図）の存在がよく知られる。それは、参謀本部陸地測量部によって、1884（明治 17）年より作成された縮尺 2 万分の 1 準正式地形図のことである。この図を仮製や準正式とするのは、都市部における地図利用の必要性から、正規の三角・水準測量網が整う前に、平板測量に基づいて応急的に作成したためである。この仮製図は、西南戦争後間もない時期に作成されたということもあり、国内の軍用地図的な性格が付されたことで、行軍などの軍事行動に影響するような土地の状況や植生の状態について凡例を細かく定めて示すという特徴がある。

ここで紹介する図 2 は、1885（明治 18）年頃測量の仮製図をベースとして、六甲山地の植生景観の概要を表すために作成されたものである。この図では、六甲山地の山頂付近を東西に広がるエリアに「荒廃地（はげ山）」を記すが、その部分を実際の仮製図で確認すると、それとは異なり「尋常荒地」の記号で示されることが分かる。この「尋常荒地」で表す土地は、樹木の乏しい雑草の慢生する状況に対応するとされ、単に荒廃しているということではない。こうした土地の状態は、前項で紹介した六甲山地の写真や牧野のコメントに一致する内容といえる。また、山腹の林地についても、同様に仮製図で確認すると、小型もしくは中型の「松林」の記号で主に占められた地域であることが分かる。この「松林」の種類は、その自然条件や写真の樹形などからアカマツ林と判断される。

その後、六甲山地周辺では、正規の基準点（三角・水準点）に基づいた初めての地図として、1910（明治 43）年の測量データに基づいた正式 2 万分の 1 地形図が陸地測量部により作成された。そのうち「神戸」図幅（図 3）をみると、六甲山地の山頂付近に「荒地」の記号で示す土地が広がっており、仮製図において「尋常荒地」で示されたエリアと重なることが分かる。ところで、仮製図と比べて正式 2 万分の 1 地形図の地図記号は、内容のぶれを防ぐ目的もあって大幅に統合されて減少しているが、この「荒地」は「尋常荒地」の内容と重なっている。双方の図を比べると、正式 2 万分の 1 地形図のほうが「荒地」のエリアが減少し、それが林地（針葉・広葉樹）に変化していることが分かる。

以上のように、明治期における六甲山地の植生景観は、山頂付近において樹木の乏しい植生被覆の後退した景観が徐々に減少しつつも維持される一方、山腹においては主として小・中型のアカマツ林が形成されていたことを確認できた。それでは、次に近世の六甲山の状況について確認する。

2　近世における六甲山の植生景観

近世の六甲山地の植生景観について、主に古地図資料を使ってみていきたい。近世においては、近代地形図のように、広範囲にわたり統一的な基準で作成され、定まった図式を用いて土地利用や景観を表した地図は作成されていない。近世の絵図は肉筆と印刷（木版刷）のものがあり、その多くが何らかの目的をもって作成された主題図となっている。土地利用や植生景観を知るために古地図を素材とする場合、主題との関係から、それを描く必要のある肉筆の地図を利用するのが適切と考える。そうした視点から、以下では、参勤交代時における行程の参考とした道中図と、六甲山地での争論の過程で作成された論所絵図を選んだ。

「行程記」に描かれた六甲山地

「中国行程記」は、藩命により萩藩絵図方の担当のもと、郡方地理図師である有馬喜惣太が中心となって、1764（明和元）年に作成された道中図である。この折本仕立ての 8 帖からなる道中図は、周防・安芸国境の小瀬川から京都伏

見までの山陽道と畿内の別路線を範囲とし、六甲山地の南側を通る西国街道筋の全行程も含む。この行程記は、取り挙げた萩博物館所蔵分のほかに山口県文書館所蔵分もあり、前者が有馬家から寄贈されたもの、後者が正本としてまとめられたものとされるが、比べると前者のほうが細かい描き分けがなされているため、萩本を用いることとした。

この道中図の表現は、中心の街道筋に沿った左右の地域を上下に展開させたうえで連続するように描いて画面が構成されており、街道筋から、隣接する平地、さらに奥の山や海という順に両端に向かって配置するパターンとなっている。街道からの仰見図として描かれる山々は、単なる記号としてでなく写実的に描かれ、ある程度、実際の景観を反映したと判断できる。それは、街道筋からの眺めを行程時の参考とするために描いたからと考えられ、それゆえ、描かれた内容は恒常的な景観として認識されたものと思われる。例えば、そうした現地で実際に観察したことを表すものとして、同一の山を視座毎に繰り返して配置した場合があり、六甲山地界隈では、摩耶山、再度山、鷹取山（高取山）、甲山がその例となる。

また、山地や植物に関する表現についても多様に描き分けられることが分かる。山は緑色か茶色で彩色されたうえに、山肌に斑状の模様を付す場合もあり、また、樹木が、様々な粗密の程度で多様な状態として表現され、独立樹が描かれることもある。そうした植生描写に対応するような注記を付す場合もあり、その描写内容をうかがえる。例えば、独立樹のなかには、名所や山頂の目印となる樹木として、松、桜、榎などを、その由来や「大松」といった注記と共に描く場合がある。また、山々の植生景観の描写内容に対応するように、マツ型の樹木を描く山には「松山」「松原」「松林」、緑色の山は「原」、茶色の山には「白ハゲ山」と注記されることもあり、街道筋から見える範囲に限定されるが、山々の植生景観に関する描写は参考になると評価できる。

では、この「行程記」の描写内容から、六甲山地の植生景観の概要をみていくこととする（図 4①～③）。六甲山地のうち、西側の西須磨村辺り①は街道沿いの山から奥の山まで樹木（松）の描写を認めることができるが、板宿村辺り②から東は街道沿いの山々に樹木を、その奥の山は樹木がないものが一般的な

表現となっており、それらは緑色と茶色で彩色された山々が混在して描かれ、斑状の模様を付す場合も多く認められる。また、例えば生田川筋周辺③に位置する摩耶山のような寺社周辺の山には樹木を密に描くほか、独立樹（月見松などの名称を付す場合も）を山頂に描く場所も認められ、こうした独立樹を麓から確認できるのは、周囲の植生被覆の乏しい状況であるためとみなせる。

これら六甲山地に関する表現は、前項で紹介した明治期の地形図や写真などから明らかとなった六甲山地の植生景観に共通する内容となっており、こうした景観が近世から継続するものであったことが分かる。そこで、次は、これらの描写内容を確認するため、同じ近世の資料と比較するとともに、その植生景観がどのような状況で成立したのかを考えるため、論所絵図を素材にみていくこととしたい。

論所絵図に描かれた六甲山地

近世では、土地をめぐる訴訟過程において論所絵図が作成されることがあり、多くの場合、論所は土地の境界や資源の利用をめぐり争われるものであった。ここでは、六甲山地における争いを通じて作成された論所絵図を手掛かりに、その植生景観と争論の理由について探ることとしたい。以下では、行程記の内容と比較するため、六甲山地のうち、板宿村以東と西須磨村界隈の二つの地域に分けてみていく。

最初に板宿村以東の事例として 2 件の山論絵図を紹介する。最初の事例は、1669（寛文 9）年 9 月 4 日付の「板宿村禅昌寺・西代村妙法寺村山論裁許絵図」（写、図 5）であり、これは鷹取山（高取山）の南側を描いた図となっている。この争論の訴訟方である禅昌寺は、14 世紀中頃に月庵宗光が開山したとする臨済宗南禅寺派の寺院で、室町時代以降、幕府等により寺領の安堵や諸役の免除が行われ、近世においても境内山林竹木などの諸役が免除された。神撫山と号する鷹取山の西麓部に位置する禅昌寺側が、その地を入会利用する幕府領の西代・妙法寺村に対して、全山を寺領と主張したことから争論となった。争論の裁許は、京都町奉行が管轄し、現地に派遣された検使の検証などを経て、両村による入会利用を確保し、禅昌寺領を背後の山に限るとする裁許が下された。

図 5 はその時に京都町奉行と京都所司代から下された裁許絵図の写しで、この図によると、鷹取山南麓に松林で占められた禅昌寺境内を位置付け、その西側を妙法寺村分の山、東側から山頂にかけてを西代村分の山としたことが分かり、確定した境界筋のポイントに裁定者が捺印している。この図における鷹取山の描写は、禅昌寺境内を松林、周囲の両村の山を樹木の無い山として描き、鷹取山の山頂付近には目印となる樹木（松型）を 2 本描いている。この裁許の後、再び鷹取山周辺の利用をめぐって、主に西代村と池田村との間で争論となり、1674（延宝 2）年付で境界筋を確定するための論所絵図が作成されたが、それは図 5 の裁許絵図を参照したうえで、集落までの麓の山を描き加えた構図となっている。それらの山の植生に関する描写をみると、樹木の乏しい鷹取山周辺に対し、麓の山にまばらではあるが全体的に樹木を描く内容となっており、作成時期は異なるものの「行程記」（図 4②）の描写と共通している。

次に紹介するのは、1719（享保 4）年 9 月付の「福原庄六ヶ村・生田村山論絵図」（図 7）であり、生田川筋を挟んで西側の旧福原庄と東側の旧葺屋庄の村々の領域とその山を描いている。この争論は、1717（享保 2）年に両庄の村々の間で生田川筋や入会山の境界をめぐり起こったもので、それが八部・兎原郡境に位置することから郡境争論として争われた。生田川筋を郡境としたのは、片桐且元らによる 1594（文禄 3）年の検地時であったが、山裾から河口までは平地ゆえに明瞭であるのに対し、山間部は不明瞭となっていた。また、山の北側の境についても、この時、争点となっており、両庄は「口一里山」の北に位置する「中一里山」と呼ぶ地域の草山も自領と主張した。この中一里山は、17 世紀の初め、福原庄と六甲山地の北向こうに位置する丹生山田庄の村々との間で柴草などの山の資源をめぐり争われ、1605（慶長 10）年における片桐且元の裁許により、南側から順に福原庄分の口一里山、山田庄分で福原庄の入会利用も認める中一里山、山田庄分の奥一里山と確定されていた。

当初、この訴訟は京都町奉行が管轄し、訴訟過程で双方より提出された立会絵図が図 7 の絵図であった。しかし、1722（享保 7）年の上方八ヶ国「国分け」令によって、摂津・河内・和泉・播磨国にある幕府領の公事訴訟は大坂町奉行が管掌することとなったため、1726（享保 11）年、引き継いだ大坂町奉行から

次のような裁許が下された。まず、両郡境については、生田川筋の河口より大井手までは先例に従い川の中央を境とし、大井手から上流の山間部は、検使の見分結果に従い、川筋を西方に離れて城山の峰を通って境松を経て川筋の西縁に至るラインを境界筋とすると定めた。また、中一里山については、入会利用するために山元の山田庄に山年貢を納めている事実があることから、先例通り山田庄の山とし、それらの境界筋を絵図に墨線を引いて捺印し、双方に下した。

この図 7 から六甲山地の植生景観の描写をみると、山腹部分に松林が描かれるのに対し、その上部の山地については樹木が描かれないことが分かる。絵図に貼られた付箋によると、例えば、福原庄側の北野村北部に位置する山腹の松林については、幕府方の京都代官（小堀仁右衛門）支配による御林山（近世において、幕府や諸藩が支配・管理した林地のことで、周辺の農民による用益が厳しく制限された。）を主に、旗本片桐氏（帯刀）支配の御林山を加えたものとなるのに対し、その北部の樹木のない地を「福原庄六ヶ村立会草刈場」と記す。後年の 1776（安永 5）年に幕府代官に提出された「北野村絵図」を見ても、山腹の松林を御林と記す一方、その北側の樹木のない地を小物成山の立会草山としており、北野村を相給支配する幕府と旗本片桐氏の管理する林地が山腹に位置していたことが分かる。また、このような対称的な植生景観は「行程記」（図 4③）における描写内容と共通する。

次に西側の西須磨村界隈の事例を紹介する。それは、1670（寛文 10）年 6 月 27 日付の「播州明石郡垂水村・摂州矢田部郡西須摩村国境并漁場相論絵図」（図 8）であり、摂津国の西須摩村から播磨国の垂水村辺りまでの平地とその北部に位置する山を描いている。この争論は、播磨国側の塩屋・垂水村が、摂津国西須磨村漁民による国境越えの出漁行為を問題として前年に訴えたことに始まるもので、双方の漁場を分ける国境が海岸のどこにあるかが争点となった。それは、かつての庄域が漁場の範囲を決める基準となっていたからである。その後、現地での検使の検分などを経たうえで、京都町奉行における審議の結果、両国の境界は、塩屋側が境とした左岸の「境松」ではなく、川筋（境川）の中央に位置するとした裁許が下された。そして、境界を示すものとして、川中へ印木を設置し、また、漁場境を見通すライン上に目印の石舟を沈め置くとともに、

その国境ラインを裁許絵図に墨引きで明解に示した。この境杭から淡路由良の高山を見通したラインを漁場の境と設定したという。

この争論は山の資源利用をめぐるものではないが、漁場を確定するうえで山の景観や境木などが重要な意味を持っており、それを反映してこの裁許絵図においても山の植生景観を丁寧に描いたと考える。図をみると、播磨国側の山は全体的に松木が描かれるのに対し、摂津国側は山腹までに松林が描かれ、それらは東にいくに従い減少する傾向が認められる。西須摩村の明細帳によると、青谷山・高倉山・鉄拐山に松林である御林が、一の谷筋の東側上流の立原谷山に百姓山が設けられたと記されており、後者では柴草などが採取された。この地域の六甲山地について「行程記」(図 4①) の描写をみると、全面的に松木が描かれるものの、奥側になるに従って樹数が減るとともに、一の谷筋の上流の山々が茶色で彩色されるほか、山頂部の目印木を多く描くのが特徴となっており、この論所絵図に通じる内容であることが確認できる。また、福祥寺周辺については寺山として樹木を密に描いている。

ここでは 3 点の論所絵図から六甲山地の植生景観をみるとともに、それらと行程記を比べてきたが、いずれも共通した内容であり、行程記（図 4①～③）に描かれた六甲山地の景観は現地の状況を反映すると判断できる。つまり、山腹に松林が成立し、その上部に植生被覆の乏しいという景観は、行程記に描かれたように、近世においても広く六甲山地にみられたものであった。また、それらの山は、論所絵図などの個別資料の検討から、麓の松林の多くが領主の御林として管理される一方、その奥の山は百姓らが柴草などの資源を利用する入会山（近世においては、一村または複数村の住民（多くは本百姓）が慣習法に基づき共同で林野資源を利用した山のことで､その利用税として領主に年貢(小物成、山手米、山年貢など）を納めるのが通例であった）であったことが分かり、それらは近世を通じて長く維持された景観であったとみなせる。

おわりに:大豆粕肥料の増加と草山の消失

これまで、六甲山地の植生景観について、主に近世の絵図と近代の地形図や写真を素材にみてきた。その結果、かつての六甲山地は、現在とは異なり、麓

の山腹にアカマツを中心とした林地が位置し、その上部に植生被覆の後退した灌木や草地を中心とする景観が広がっていたことが分かった。特に近世の場合、麓の山林は御林山として管理され、その上部は麓の百姓らが柴草などを得るための入会山であったことが、論所絵図などの内容から明らかとなった。百姓らは草肥・飼料・燃料用の柴草を継続して得るために、入会山の植生を管理し、維持してきたのである。こうした里山の景観は、近世の日本において広く認められたものであり、麓の林地を内山、奥の草地を野山と称したり、その景観的な特徴から麓の林地を腰林と称した地域もあった。

入会山で採取される草肥は百姓らによって集められた自給肥料であり、魚粕（鰯・鰊）や油粕（菜種・綿）などの金肥に比べ、基本的な肥料と位置付けられていた。草肥は、水田などの地力を維持するために刈敷などを直接田地に鋤込むほか、草木灰や堆肥などのように予備的処理を施して利用される場合もあった。それゆえ、近世においては、農業を進めるうえで大量に草肥を採取する必要があり、草や灌木の生じる場所を確保するため、六甲山にみられるような植生被覆の後退した入会山が広い範囲わたって形成されたといえる。

しかし、このように入会利用された野山の多くは、近代以降、様々な状況の変化に伴い森林化していくこととなった。それには様々な要因が挙げられるが、最も大きなものの一つが、安価な購入肥料である大豆粕の広がりによって、草肥などの林野資源を入会山において採集する必要性が減少していったことが挙げられる。さらに、それに遅れて家庭用燃料として柴や薪（炭）に依存しない状況も訪れ、その結果、不要となった草地に林業的な植林が進められるとともに、明治中頃からは植生被覆の後退した景観を荒廃と認識し、砂防工事を実施することにもなり、現在の森林化につながることとなったとみなせる。

それでは、ここで大豆粕の普及する過程を簡単にみておきたい。近代の購入肥料については、明治初期になると、近世以来の鰯粕肥料（干鰯）に代わり、北海道からもたらされる鯡(鰊)粕肥料が市場取引の中心を占めるようになった。それに次いで登場したのが満州から輸入された大豆粕であった。当初、大豆粕の肥料への利用は疑問視されていたものの、遅効性のある窒素肥料として水稲作に適することが明らかとなり、徐々に受け入れられるようになった。特に普

及したのは日清戦争（1895 年）以降のことで、肥料としての適正さに加え、大豆油の生産増加に伴う大豆粕の増産、輸入ルートへの日本資本商社の本格的参入などを背景に、満州より安価な大豆粕が大量に輸入されるようになった。また、輸入された大豆からも大豆粕が生産された。さらに、鰊漁獲量の減少や北海道漁民の労働賃金の上昇によって鯡粕肥料の価格が高騰したこと、農業政策として多肥による増産を求めたことも大きく影響し、鰊粕肥料より安価（半額程度）な大豆粕肥料の購入が求められるようになった。その輸入量は、1905 年の約 18 万トンから、26 万トン、32 万トン、46 万トン、60 万トンと毎年増加し、1918 年には約 122 万トンと 100 万トンを突破したように、大量の大豆粕肥料が流通することとなった。ちなみに、1918 年における鰊粕肥料の消費量は 7.2 万トンであった。

この大豆粕の輸入において、神戸は日本における主要な輸入港のひとつであり、他に、横浜、四日市、門司、長崎などあったが、多くは西日本に偏っていた。輸入された大豆粕は、東京・神戸・九州の市場を通じて出荷されたが、その販売エリアも関東以西に偏っていたという。その偏りの理由は、東日本に比べて西日本における土壌の窒素分が乏しかったからであるとされる。神戸における大豆粕の輸入は明治 20(1887)年頃から本格的に始まったとされ、その後、大豆粕の輸入の増加に対応するため、神戸輸入肥料商組合は和田岬に荷揚場所としての倉庫を建築し、鉄道による肥料の専用輸送を実施することとなった。

ところが 1920 年から 30 年代になると、窒素肥料である硫安のほか、過燐酸石灰（リン酸肥料）、硝酸曹達（窒素肥料）など無機肥料が、以前より安価となったこともあり、日本における購入肥料の割合を徐々に占めるようになっていった。ただし、日中戦争が始まると、火薬燃料として求められた硫安に代わって、大豆粕の満州からの輸入が増加することとなったが、それも一時的な現象であり、無機肥料への流れは変わらなかった。

人と環境の関わりの歴史をみる枠組みとして景観への注目は有効であり、素材とした植生景観は基本的指標のひとつといえる。日本の自然環境において植物はすぐに成長することから、社会と植物との関わり方が変わると短期間に植生景観が大きく変化するからである。六甲山の例のように、近代中頃までの日

本の里山には草地や灌木からなる入会山が広がっていたが、その森林化という変化をもたらした要因のひとつが満州から輸入された大豆粕肥料の登場であり、その普及によって草肥依存型農業からの転換が促されることとなった。つまり、海外から持ち込まれた肥料により日本の森林景観が変容したといえ、そのことは極めて近代的な現象であったとみなせる。

※本稿は、『大学的神戸ガイド』（昭和堂、2021 年 3 月出版予定）に掲載予定の「六甲山の歴史:植生景観の変遷」をベースとして加筆修正したものである。また、本稿作成の資料調査においては、神戸市立博物館、神戸市立中央図書館、神戸市文化スポーツ局文化財課の協力を得た。なお、掲載資料の中には、当時の身分的差別に関する表現を含むものもあるが、その歴史的経緯を正しく理解するために不可欠と考え、そのまま掲載することとした。

〔参考文献〕　※利用順

・田中眞吾編著『六甲山の地理 その自然とくらし』神戸新聞総合出版センター、1988 年
・田中隆文「近代の六甲山はどのようなはげ山だったのか」『水利科学』58（4）、2014 年
・牧野富太郎『牧野富太郎選集　第 1 巻』東京美術、1970 年
・兵庫県治山林道協会編『六甲山災害史』兵庫県治山林道協会、1998 年
・松下まり子「六甲山の緑の変遷」『地図中心』418、2007 年
・小椋純一『絵図から読み解く 人と景観の歴史』雄山閣、1992 年
・大国正美『古地図で見る神戸 昔の風景と地名散歩』神戸新聞総合出版センター、2013 年
・大国正美『古地図で楽しむ神戸』風媒社、2019 年
・新修神戸市史編集委員会編『新修神戸市史 歴史編Ⅲ 近世』神戸市、1992 年
・財団法人武井報效会百耕資料館編『山と川の江戸時代～板宿とその周辺/武井

家の粉本』財団法人武井報效会百耕資料館編、2011 年
・財団法人武井報效会百耕資料館編『江戸時代の山争い・水争い/応挙とその一族の粉本』財団法人武井報效会百耕資料館編、2015 年
・財団法人武井報效会百耕資料館編『江戸時代の須磨の村々～西須摩村/京派の粉本Ⅲ　山水・名所』財団法人武井報效会百耕資料館編、2016 年
・神戸大学大学院人文学研究科地域連携センター編『水道筋周辺地域のむかし』神戸大学大学院人文学研究科地域連携センター、2007 年
・新修神戸市史編集委員会編『新修神戸市史 産業経済編Ⅰ 第一次産業』神戸市、1990 年
・太田猛彦『森林飽和』NHK 出版、2012 年
・安富歩「国際商品としての満州大豆」（安富歩・深尾洋子『「満州」の成立』）名古屋大学出版会、2009 年
・岡部牧夫「「大豆経済」の形成と衰退」（同編『南満州鉄道会社の研究』日本経済評論社）2008 年
・井川克彦「肥料流通費用の縮小」（高村直助編『明治の産業発展と社会資本』ミネルヴァ書房）1997 年
・黒川計『日本における明治以降の土壌肥料考（下巻）』「日本における明治以降の土壌肥料考」刊行会、1982 年

図１　神戸港沖から見た六甲山（『神戸市写真帳』仮題）、明治中期、神戸市立博物館蔵

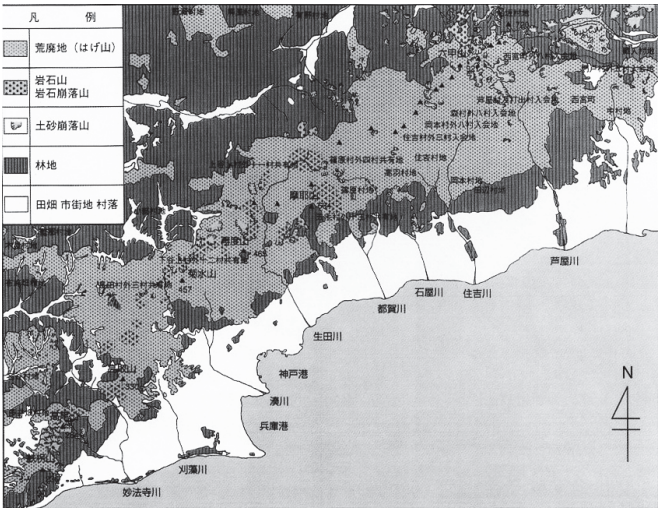


図２
仮製地形図より作成した六甲山地の植生（出典：松下まり子「六甲山の緑の変遷」『地図中心』418 号、2007 年）

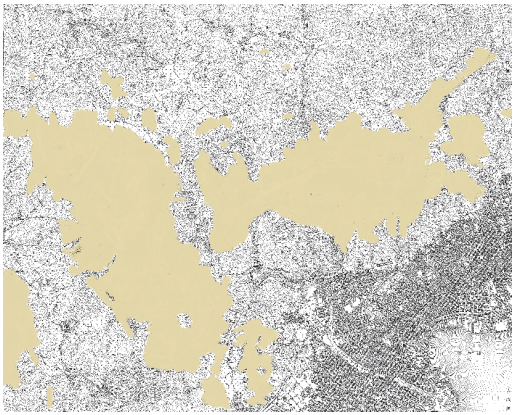


図３
正式 2 万分 1 地形図「神戸」より「荒地」部分（ベタ塗り）、1910 年測図

図 4
「中国行程記」五巻より①西須磨村周辺（上）・②板宿村周辺（鷹取山付近）（中）・③生田川筋周辺（下）、表紙 13.8×28.5cm；横幅の総計 1269.6cm、萩博物館蔵（旧明倫小学校蔵資料）

図 5
「板宿村禅昌寺・西代村妙法寺村山論裁許絵図」（写）、1669 年、105.5×155.0cm、神戸市立博物館蔵

図 6
仮製地形図「兵庫」図幅（明治 18 年測量）より高取山周辺
※「松林」とする禅昌寺境内の背後に位置する高取山一帯は「尋常荒地」の記号で占められており、図 5 の裁許絵図の描写に通じる内容となっている。

図 7
「福原庄六ヶ村・生田村山論絵図」、1719 年、192.5×294.0cm、神戸市立博物館蔵

図 8
「播州明石郡垂水村・摂州矢田部郡西須摩村国境并漁場相論絵図」、1670 年、165.0×184.0cm、神戸市立博物館蔵

ラオス農村におけるブタの生産・流通・消費の変化

中辻　享

1．はじめに

東南アジアの各地で農学的調査に従事してきた田中耕司は、タイ北部やラオスの油利用の特異性について次のように指摘している（田中 2001）。タイやラオスでは、近年まで植物性油脂を食用にほとんど利用してこなかった。同じ東南アジアでも、島嶼部では、ココヤシなどの植物から油を採り、料理に利用する文化がある。また、ミャンマーや北部ベトナムでは、中国文化やインド文化の影響を受ける中で、植物油脂をふんだんに使った料理が発達した。一方、タイ北部やラオスには伝統的にはそのような料理は発達しなかった。この地域で重要であり続けてきた油脂はもっぱら、豚脂に代表される動物性油脂である。こうした独自性が生まれたのはなぜか。これを考えることは、東南アジアの食文化を考える上で一つの重要な視点である。

筆者が調査を実施しているラオス北部の山地民、カム族の村でも豚脂を料理に用いている。彼らの主生業は山地斜面の森林を伐採して焼却し、主食の陸稲などを生産する焼畑であるが、ウシ、ブタ、家禽などの家畜も飼養している。彼らの飼養するブタはラオ語で「ムーラート」と呼ばれる在来の黒豚である（写真１）。このブタは厚い背脂を持つという特徴がある。彼らはブタを畜殺した際に、この豊富な油脂を竹筒などに入れて保存しておくのである。

ところが、ラオスでは現在、ブタの生産・流通・消費のあり方が大きく変わろうとしている。外国からブタの改良品種が導入され、都市部ではすでに改良種の豚肉が流通の主体となっているのである。改良種は白豚であり、ラオ語では「ムーパン」と呼ばれる（写真２）。本稿では、ラオスの農村部で、こうした白豚の流通にともない、人々のブタの生産や消費のあり方がどのように変わったか、その中で黒豚の生産・流通・消費はどのように維持され、どのような意義を持っているかを明らかにしたい。将来的には、こうしたブタの流通の大きな変化が人々の豚脂を主体とした油脂利用にどう影響したかをも考察したいと

考えている。

2．対象地域と調査手法

対象地域は、ラオス北部のルアンパバーン県シェンヌン郡のカーン川沿いの諸村と、南西からカーン川に流れ込むカン川沿いの諸村である（第1図、第2図）。カーン川沿いには比較的広い平野がひらけており、主にラオ族を中心とするタイ系の低地民族が居住する[1)]（第3図）。彼らは水田稲作のほか、シェンヌン郡の中心地であるシェンヌン村などで、商業・サービス業、役所での公務に従事している。ただし、サマキーサイ村は人口3406人（2015年）の大きな村であり、そのほとんどをモン=クメール系の山地民であるカム族が占める。当村は2014年に成立したばかりの新村であり、カーン川上流でのダム建設にともない、上流にあったカム族やラオ族の村が移転し成立した。一方、カン川は1000mを超える山地に挟まれ、この川に沿って敷かれた国道4号線沿いには、カム族やモン族（ミャオ=ヤオ系）の住民が多い。彼らは山地での焼畑稲作により生計を立ててきた。

現地調査は2018年3月に実施した。まず、シェンヌン村周辺の3つの畜殺業者（いずれもタイ系低地民で、世帯経営）に家畜の流通に関する聞き取り調査を実施した。さらに、カーン川沿いのドンモー村とカン川沿いのブーシップ村でブタの生産と消費に関する聞き取り調査を実施した。

3．結果

（1）豚肉供給の黒豚から白豚への転換

---

1) ラオスの民族は、語派レベルでは、タイ=カダイ語派の諸民族（1995年の人口調査によると全人口の66.2%）、モン=クメール語派の諸民族（22.7%）、モン=ユーミエン語派の諸民族（7.4%）、チベット=ビルマ語派の諸民族（2.7%）に分けることができる。このうち、ラオ族やユアン族が含まれるタイ=カダイ語派の諸民族は、タイ語系統の言葉を話し、伝統的に低地を拠点に水田稲作や商工業に従事してきた。そのため、本稿では彼らを「タイ系低地民」と呼ぶ。一方、残る三系統の語派の民族は山地で焼畑稲作を行い、生計を維持してきた。本研究では、彼らを「山地民」と呼ぶ。

ルアンパバーン市街など、ラオス北部の都市部において、すでに白豚肉の供給が黒豚肉を上回っていることは高井（2019）による広域的調査により明らかにされている。本研究では、農村部であるシェンヌン村周辺でも同じことが言えることが明らかになった。3人の畜殺業者への聞き取り調査結果をまとめた第1表から、各業者とも1日2頭のブタを畜殺しているが、そのほとんどは白豚であることがわかる。彼らの主な出荷先は、パッカン村の朝市と、パクウェート村の昼市であるが、いずれの市場でも白豚肉の販売が主体であるという。白豚はタイの品種であり、2011－2012 年ごろから当地域で販売されるようになり、現在は黒豚をおさえ、流通の主体となっている。

畜殺業者によると、白豚は生産および流通上の以下の点で黒豚よりも優れている。まず、白豚は黒豚よりもずっと成長が早く、しかも倍の量の肉を供給する。白豚は専門の肥育業者により、養豚場（ラオ語では「ファーム」と呼ばれる。英語の farm に由来する）で配合飼料を給餌され育てられるが、その場合、3-4 ヶ月で 100 キログラム以上にまで成長する。一方、黒豚を伝統的な飼養方法で育てても、1 年でやっと 50 キログラムに達するのみである。ここでいう伝統的な飼養方法というのは、農家が焼畑や水田などを営なむかたわら、副業としてブタを育てる方法である。この場合、飼料としては、米糠・トウモロコシ・キャッサバ・バナナの茎など、農作物や自然資源が与えられる。各農家が少数の黒豚を粗放的に飼養してきたのである。

また、黒豚は価格が高い割に、肉質が良くない。畜殺業者によると、ブタの仕入れ値は 1 キログラムあたり、白豚が 16,500kip、黒豚が 18,000kip であり、黒豚の方が単価が高い。にもかかわらず、黒豚は脂身ばかりで赤身がほとんどなく、固い肉質であるという。一方、白豚は脂身が少なく、柔らかく食べやすい。そのため、畜殺業者への聞き取り時には、ラオ族などのタイ系の低地民族は白豚の方を好むし、レストランでも白豚肉が使われるという回答が得られた。

さらに、黒豚肉には旋毛虫という寄生虫が多く存在する場合がある。これに対し、養豚場では寄生虫対策がしっかりなされているため、白豚肉には寄生虫は存在しないという。

また、畜殺業者にとっては、白豚が流通するようになって以降、ブタの入手

がかなり楽になった。例えば、畜殺業者 C は 2003 年からブタの畜殺業を始めたが、以前はカーン川上流の諸村まで船で出かけ、黒豚を購入していた。当時はダムの造成がはじまっておらず、カーン川上流に多くの村があったのである。白豚が出回るようになって以降は、シアンローム村（第 2 図）に中国人の経営する養豚場ができたため、そこへ車で買い出しに行くことができるようになった。さらに、現在は買い出しの必要さえなくなった。ヴィエンチャンのアグリビジネス企業[2)]の経営する養豚場から、トラックで業者 C の家の前まで、白豚を運んでくれる業者が存在するためである。つまり、黒豚は各農家で少数が飼養されるため、畜殺業者はかつて、販売可能な成獣を求めて多くの村をまわらなければならなかった。一方、白豚は養豚場で集中的に飼養されているため、そこに行けば購入ができるし、現在は養豚場から畜殺業者までブタを運搬する業者も存在するため、購入に行く労力がさらに軽減されている。

（2）黒豚に対する根強い支持

前節で述べたとおり、現在では農村部であるシェンヌン郡でも白豚が流通の主体となっている。また、畜殺業者への聞き取り調査からは、その理由として、白豚肉が質と量の両面で黒豚肉を上回っていることが挙げられた。一方で、本調査では、黒豚肉に対する支持も根強いことがわかった。山地民や年配者を中心に黒豚肉の味覚を支持する人が多いし、山地民にとっては、彼らの信仰の上でも黒豚が必要である。以下、順に説明したい。

まず、黒豚肉の味覚を好む人は今も多い。畜殺業者からの聞き取りによると、カム族やモン族は黒豚ばかりを好んで食べるという。しかし、ラオ族など、タイ系低地民の人からも黒豚の味覚を支持する声が得られた。例えば、パッカン村在住のラオ族の男性（推定年齢 60 歳代）によると、「白豚は匂いがよくないため、現在も皆が黒豚を買い求める」という。先述のように、黒豚肉の方が価格は高いため、確かにこれは言えるのかもしれない。また、シェンヌン村在住のラオ族の男性（39 歳）によると、「白豚よりも黒豚の方がおいしい。市場で

---

2) アグリビジネス企業としては CP 社とベーターグロー社が挙げられた。

も皆、黒豚肉を求める。しかし、市場で売られているのは白豚肉ばかりなので、仕方なく白豚肉を購入する」のだという。この二人はいずれも中年以上の年代のため、タイ系の低地民でも中年以上の人は黒豚を好むということが言えるのかもしれない。畜殺業者の一人からも、「老人や特定の病気になった人、出産直後の女性は白豚肉よりも黒豚肉を好む」という話が聞かれた。

このように、ラオ族の一部にさえ、白豚肉を忌避する人がいる一因として、養豚場で白豚に給餌される配合飼料の問題が挙げられる。配合資料には化学物質が使われており、それで育てたブタは匂いがよくなく、その肉は人間の健康にとってもよくないと考えられているようである。上にあげたパッカン村在住のラオ族の男性は「白豚の匂いがよくないのは配合飼料を与えているためだ」と説明した。また、ドンモー村（第２図）の主生業の一つは酒造である。それゆえ、当村では、大量に産出される酒粕を飼料としたブタの飼養が盛んである[3)]。この村でも現在は飼養ブタの半分が白豚というが、白豚には配合飼料を与えない。黒豚と同じく、バナナの茎など様々な自然資源を茹でたものに、酒粕と米糠を混ぜ合わせたものを与えている。その理由として、ある男性は「配合飼料には化学物質が含まれているため」と説明した。

以上の事例からわかるとおり、タイ系低地民の多いシェンヌン村周辺でも、黒豚に対する根強い需要が存在する。畜殺業者Ｂのように、いまだ黒豚を畜殺し、その肉を市場に出荷する業者がいるのは、こうした需要に応えるためと考えられよう（第１表）。この業者の黒豚の仕入れ先は上にあげたドンモー村である。ドンモー村はこの業者の居住地であるシェンヌン村の近隣であり、酒粕を利用して、白豚のみならず、黒豚をも多く飼養するためである。

一方、山地民にとっては、黒豚は彼らの精霊信仰に関わる儀礼や儀式に用いるためにも必要である。モン族にしろ、カム族にしろ、精霊信仰の儀礼においてブタは生贄として精霊に捧げられるし、結婚式では客人をもてなすために豚肉が供される。この際に用いられるのは黒豚であり、白豚で代用されることは

---

3) ブタの全飼養頭数を全世帯数で除した「１世帯あたりブタ飼養頭数」は、当村の場合、2.5 頭であり、近隣村に比べて高い（第４図）。

ない。こうした需要が根強いため、畜殺業者Cは近隣で黒豚の買取を続けている。黒豚は畜殺しない。ルアンパバーン市街周辺に居住するモン族やヤオ族（モン=ユーミエン系の山地民）が買いに来て、彼らの精霊信仰の儀礼の際に畜殺するという。また、カン川沿いのブーシップ村での聞き取りによると、カム族は主に、ラオ語で「ヘットクワン」と呼ばれる儀礼のために黒豚が必要であり、この儀礼に供するために多くの世帯が黒豚を飼養するのだという。ヘットクワンは世帯単位で行われる儀礼であり、世帯員の体調不良や病気の治癒のために、シャーマンを呼んで行われる。儀礼の中でシャーマンは精霊からその世帯員の体調不良の原因を聞き取り、それを治癒する方法を世帯の者に伝授する。その際、精霊に捧げるために、ある程度の大きさの去勢ブタか雌ブタ一頭が必要である[4)]。一世帯が2～3年ごとに一頭のブタをこの儀礼に使用するという。

ブーシップ村ではブタが販売されることも多いが、その多くはヘットクワンや結婚式で使用するために、同村や近隣村の住民が購入するものである。つまり、ブーシップ村、ティンゲーウ村、タートガジャム村といった近隣の住民の購入がほとんどである。彼らのブタがシェンヌン方面に運ばれることはあまりない。つまり、彼らの儀礼・儀式にまつわる生産・流通・消費は彼らの居住圏でほぼ完結しているのである。

4．おわりに

以上から対象地域では4パターンのブタの流通形態がみられることがわかった。一つは2011－12年ごろからはじまり、現在、主要な流通形態となった、郡外（主にヴィエンチャン周辺の養豚場）から出荷された白豚が郡内の畜殺業者により畜殺・解体され、朝夕の市場に出荷されるパターンである。これが流通の主体となった理由としては、白豚の高い生産性、その結果としての低価格性、脂身が少なく柔らかいという肉質が挙げられる。もう一つは、畜殺業者Bの事例に見られるように、郡内で生産された黒豚を購入・畜殺し、市場に出荷するパターンである。これは白豚が流通する以前の流通形態が残存したもので

---

4) 雄ブタは匂いがよくないため、使用しないということであった。

ある。それを支えているのは、山地民のみならず、タイ系低地民の間にさえ根強い、黒豚肉への嗜好性である。

残る二つのパターンも黒豚の流通であり、山地民の儀礼・儀式に関わるものである。そのうちの一つは、畜殺業者Cの事例にみられるように、郡内で生産された黒豚が、畜殺業者の仲買により、郡内外の山地民に販売されるパターンである。山地民の需要をよく知るタイ系低地民の畜殺業者が黒豚の仲買を行うケースである。もう一つは、ブーシップ村の事例で見られたように、山地民自身が彼らの儀礼・儀式のために黒豚を飼養し、その一部を近隣の山地民のために販売するパターンである。これは山地民の居住域では普通にみられるものであり、以前より続けられてきたものであろう。

本研究はいまだ途中段階であり、ブタの流通経路についてはより詳細な調査が必要である。また、黒豚を味覚上支持する人が、どれほど、なぜ存在するのかについてもより明確にする必要がある。さらに、山地民が黒豚の生産と流通にこだわる理由については、「ヘットクワン」という儀礼の詳細も含め、より深く理解する必要がある。その上で、豚脂を中心とするラオス農村部の油脂利用がどのように変化しつつあるのかをも明らかにしていきたい。

引用文献

高井康之（2019）「ラオス北部地方都市における食肉流通の展開と移住者」大谷学報 98-2、1-23 頁。

田中耕司（2001）「ラオスではなぜ植物油が利用されないのか」東南アジア研究 34-4、603-605 頁。

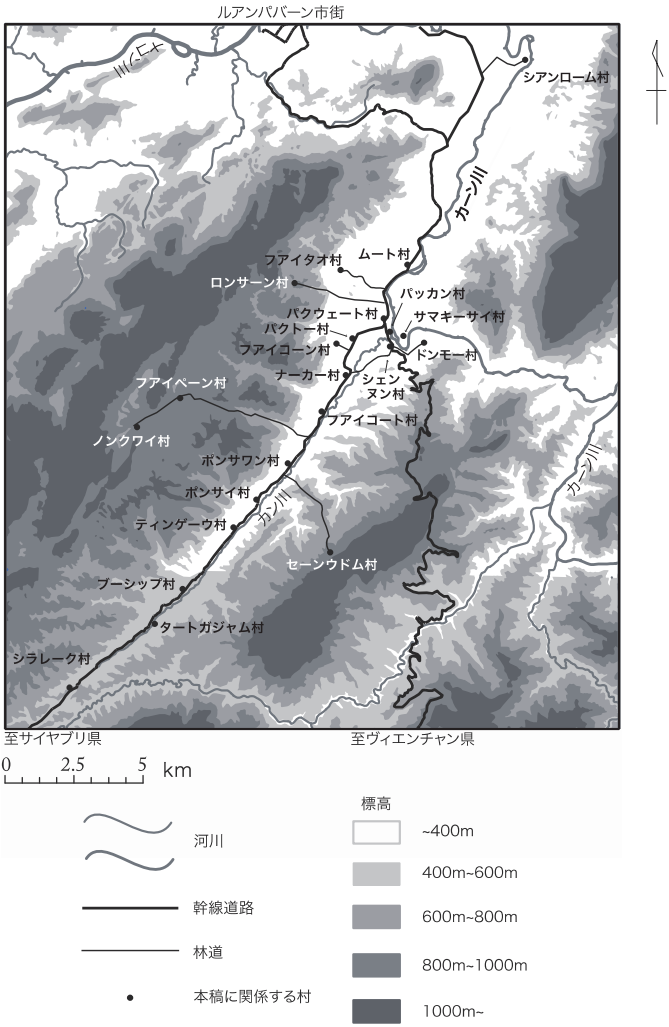
写真１　黒豚（2015 年 2 月、フアイペーン村にて撮影）

写真 2　白豚（2018 年 3 月、ムート村にて撮影）

国境　　第２図～第４図の範囲

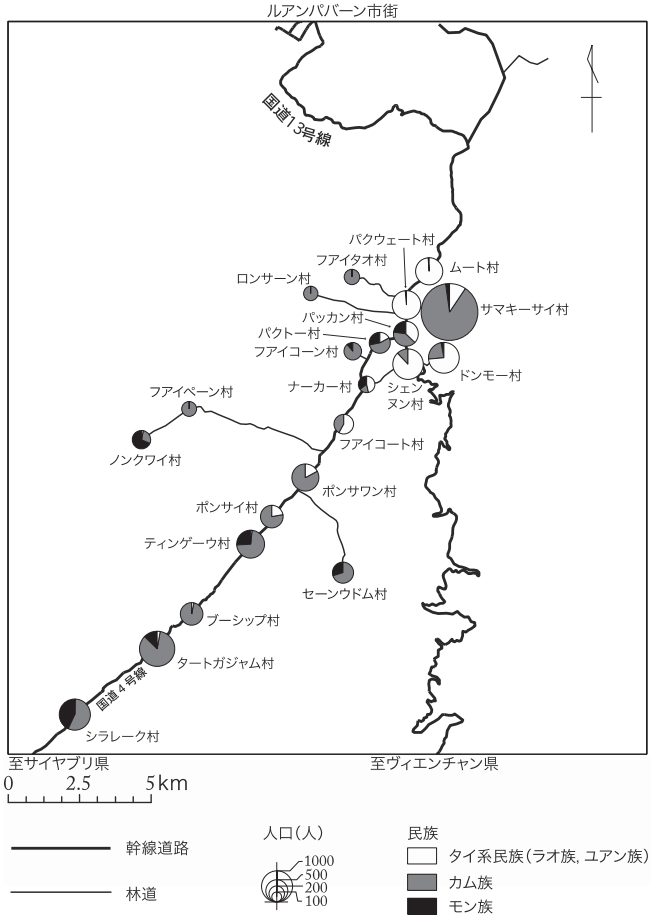
県境

第１図　ラオス北部における対象地域の位置



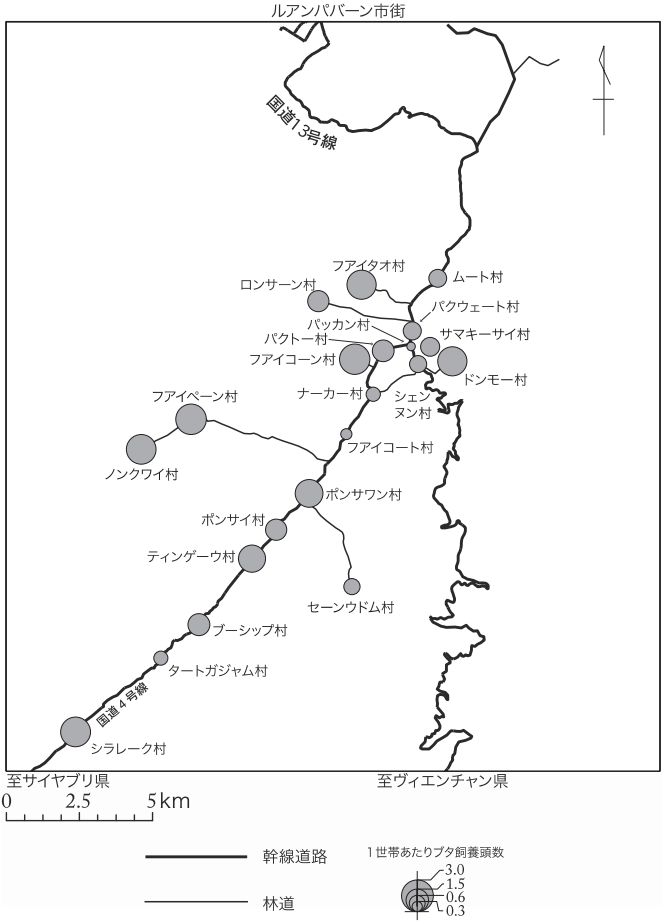
第２図　対象地域

（10万分の1数値地図, シェンヌン郡行政局資料により作成。）



第3図　対象地域の各行政村の民族別人口(2015年)

注:ドンモー村にはプーノイ族(チベット=ビルマ語派)、タートガジャム村にはユーミエン族(モン=ユーミエン語派)の住民がそれぞれ若干名存在するが、ここでは便宜上、いずれもモン族に含めた。
(10万分の1数値地図, シェンヌン郡行政局資料により作成。)



第4図　対象地域の各行政村の1世帯あたりブタ飼養頭数（2016年）

「1世帯あたりブタ飼養頭数」は村の全飼養頭数を全世帯数で除した値。
（10万分の1数値地図, シェンヌン郡行政局および農林局の資料により作成。）

第１表　シェンヌン郡の３人の畜殺業者について			
畜殺業者	A	B	C
住所	シェンヌン村	シェンヌン村	ムート村
1日の畜殺頭数	朝1頭、昼1頭	朝1頭、昼1頭	朝1頭、昼1頭
ブタの種類	主に白豚	白豚と黒豚を半々	白豚、黒豚は転売
豚肉の出荷先	朝はパッカン市場、昼はパクウェート市場	朝はシェンヌン村のレストラン、昼はパクウェート市場	朝はパッカン市場、昼はパクウェート市場
豚の仕入れ元	シアンローム村の養豚場	黒豚はドンモー村	白豚はヴィエンチャンの仲買人、黒豚は近隣村
豚の畜殺を始めた年	2004年	2015年	2003年
専兼別	専業	専業	専業？
（2018年3月実施の聞き取り調査により作成。）			

食事あるいは腸内細菌に由来する非動物型脂肪酸の代謝

田中　保

森戸　克弥

1. はじめに

榧（カヤ）はイチイ科カヤ属の常緑針葉樹で日本特有の裸子植物である。カヤの実は食用とされ、江戸時代にその油は高級天ぷら油に利用されたとの言い伝えがある。また、カヤは縄文時代前期（6800 年前）から弥生時代中期とされる宮城県里浜貝塚からクリなどと一緒に出土する(1)。現代ではあまり食されることはないが、長い食経験を持つ日本固有の食用種子の 1 つである。

カヤの実油にはシアドン酸とよばれる脂肪酸が含まれている。通常、哺乳動物やダイズおよびナタネなど被子植物に含まれる脂肪酸は二重結合と二重結合との間にメチレンを 1 個挟むメチレン中断型脂肪酸であるが、裸子植物の油脂には二重結合間にメチレンを 2～4 個挟むタイプの脂肪酸が存在し、これらはポリメチレン中断型脂肪酸と呼ばれる。裸子植物のカヤに含まれるシアドン酸は代表的ポリメチレン中断型脂肪酸であり、その構造は 20:3 (Δ-5,11,14)である(2)。筆者らは、動物細胞を構成するメチレン中断型不飽和脂肪酸とは異なる構造をもつシアドン酸の動物細胞における代謝を調べてきた(3-8)。その結果、シアドン酸は動物細胞の膜リン脂質やトリグリセリドの構成脂肪酸になるものの、やがてペルオキシソームと小胞体で連続的に代謝され、必須脂肪酸であるリノール酸に変換されることを見出した（**図 1**）。この代謝変換は、非動物型のポリメチレン中断型脂肪酸を部分的改変により動物型多価不飽和脂肪酸に変換するという食の有効利用という意義がある(7)。完全に代謝消去するのではなく、Δ5 位の二重結合を含むメチレン数個分の部分変換で済ませているところが興味深い。この代謝反応はげっ歯類だけでなく、ヒトの細胞においても活発に機能し

ていることも確認された(8)。

これまで、ペルオキシソームはミトコンドリアにおける脂肪酸酸化の補助器官に位置づけられていたが、このようにペルオキシソームがミクロソームとの連携によって脂肪酸を再合成していること、ペルオキシソームはミトコンドリアのように ATP 産生系を持たないことを考えるとペルオキシソームにおける脂肪酸酸化はエネルギー産生を補助するだけでなく、脂肪酸の作り替えのための原料供給の役割があるのかもしれない(9)。

我々が摂取している非動物型脂肪酸はポリメチレン中断型脂肪酸の他にもある。腸内細菌の 1 つの乳酸菌はリノール酸をオレイン酸へ還元する過程で 10-hydroxy-*cis*-12-octadecenoic acid(HYA)や 10-hydroxy-octadecanoic acid(HYB)などのヒドロキシ脂肪酸や、カルボニル基が導入された 10-oxo-*cis*-12-octadecenoic acid や 10-oxo-octadecanoic acid などのオキソ脂肪酸を相当量産生する(10)。腸内細菌で産生されたこれらの脂肪酸は小腸粘膜を介して動物体内に侵入し、ヒトの体内で検出される(10)。このような腸内細菌が産生する非動物型脂肪酸（**図 2**）はホストの動物細胞に作用して、脂肪細胞の分化を誘導することなどが報告されているが(11)、ホストがこれらをどのように代謝するのかは未解明のままであった。そこで、本研究では腸内細菌が産生する非動物型脂肪酸であるヒドロキシ脂肪酸の代謝について調べた。

2. 実験方法

2-1 培養細胞を用いた脂肪酸の取り込み実験

チャイニーズハムスター卵巣（Chinese Hamster Ovary; CHO）細胞（CHO-K1）は RIKEN セルバンク（つくば）より入手した。ペルオキシソーム欠損型チャイニーズハムスター卵巣細胞（CHO-zp102）は以前報告したように(7)、*Pex5* 遺伝子を欠失させることにより作出した。CHO 細胞の培地には 10% ウシ胎仔血清（fetal bovine serum; FBS）及び 1%ペニシリン-スト

レプトマイシンを含む Ham's F-12 培地を用いた。この培地に懸濁した細胞を 5×10^5 cells/60 mm dish で播種し、37℃、5% CO_2 下で培養、実験に使用した。細胞の接着を確認後、種々濃度の HFAs またはリノール酸を BSA 複合体として培地に添加した。添加する脂肪酸と BSA のモル比が 3:1 となるように調製した。

2－2　脂質分析

培養上清または培養細胞中の脂質は Bligh & Dyer 法により抽出した。抽出時、一定量の 1,2-Diarachidoyl-*sn*-glycero-3-phosphocholine（DAPC）を内部標準物質として加えた。抽出した脂質を 1 mL の 5%塩酸-メタノール試薬に溶解して 100℃で 1 時間加熱し、脂肪酸メチルエステル（FAME）を調製した。得られた FAME は既報に従い、ガスクロマトグラフィー（Shimadzu GC-15A（島津製作所、京都））で分析した。

2-3　非動物型脂肪酸のペルオキシソーム増殖効果

細胞を 35 mm のガラスボトムディッシュに 2×10^5 cells で播種し、37℃、5% CO_2 下で接着するまで維持した。溶媒、50 μM HYA、または 50μM リノール酸で 3、6、または 24 時間処理した細胞は、4%パラホルムアルデヒド溶液を用いて 37℃で 20 分処理して固定した。1% BSA 含有 PBS で 3 回洗浄した後、固定した細胞を透過処理するために 1% BSA-0.1% Triton X-100 含有 PBS を加え、37℃で 20 分インキュベートした。1% BSA 含有 PBS で洗浄後、抗 PMP70 抗体（1:600、1% BSA 含有 PBS で希釈）で 37℃で 1 時間処理した。1% BSA 含有 PBS で 3 回洗浄した後、Alexa Fluor® 488 標識化ヤギ抗ウサギ抗体（1:500、1% BSA 含有 PBS で希釈）でさらに 37℃で 1 時間処理した。再度 1% BSA 含有 PBS で 3 回洗浄した後、DAPI（1 μg/mL in PBS）で 37℃、15 分処理して核を染色し、PBS で洗浄したものをサンプルとして観察した。観察は 63 倍の油浸対物レンズを搭載した共焦点レーザー顕微鏡（Zeiss LSM 700）により実施した。

2-4 統計解析

2 群間の比較は Student の *t* 検定で行った。3 群間以上の場合は、一元配置分散分析（one-way ANOVA）後に Tukey の方法で多重比較を行った。

3 実験結果

3-1 HFAs 処理した CHO 細胞の細胞内 HFA レベル

CHO 細胞を 50 μM リノール酸（250 nmol/dish）と共に 24 時間インキュベートすると、野生型細胞（CHO-K1）、ペルオキシソーム欠損型細胞（CHO-zp102）ともに顕著にリノール酸を蓄積した。このとき、両細胞間で蓄積したリノール酸量に差はみられなかった(図 3A, D)。一方、HYA や HYB のようなヒドロキシ脂肪酸の場合、野生型細胞でもペルオキシソーム欠損細胞でもリノール酸ほどの細胞内蓄積は見られなかった（図 3B, C)。両細胞間で比較すると、野生型細胞よりも、ペルオキシソーム欠損細胞の方が、HYA、HYB 共に細胞脂質への蓄積量が多かった（図 3 E, F)。また、リノール酸は TG に多く分布していたが、HYA や HYB は TG には分布せず、リン脂質画分に取り込まれていた。(図 3G, H, I)。

3-2 CHO 細胞におけるペルオキシソーム依存的なヒドロキシ脂肪酸の消失

野生型及びペルオキシソーム欠損型細胞にヒドロキシ脂肪酸を取り込ませ、脂肪酸を含まない培地に置き換えた後、細胞からの消失を追跡した（図 4)。野生型細胞を 50 μM のリノール酸（250 nmol/dish）で 3 時間処理した時の細胞内に蓄積したリノール酸は、約 15 nmol/dish であった。この細胞をリノール酸不含培地でさらに 24 時間まで培養した時、細胞内のリノール酸レベルはほとんど変化しなかった。同様の結果がペルオキシソーム欠損細胞を用いた実験でも得られた。これに対し、3 時間の 50 μM HYA 処理によって野生型細胞に蓄積した HYA（約 2.2 nmol/dish）は、その後 18 時間のインキュベートで約 80%が消失した。しかし、ペルオキシソーム欠損細胞で同様の実験を行った場合、細胞中に取り込んだ HYA（2.5

nmol/dish）は、その後 24 時間まで変わらず残存していた（図 4B）。このペルオキシソームの有無による脂肪酸消失の差は HYB を用いた実験でも得られた（図 4C）。以上より、リノール酸とは異なり、HYA や HYB のようなヒドロキシ脂肪酸はペルオキシソーム依存的に代謝消去されることが示唆された。

3-3　CHO 細胞からのペルオキシソーム依存的なヒドロキシ脂肪酸の消失

脂肪酸を添加した培地で CHO 細胞をインキュベートし、一定時間後に残存する添加脂肪酸を定量した。野生型 CHO-K1 細胞にリノール酸を添加した時、インキュベート時間依存的に培地からリノール酸が消失した。この減少量は細胞内で増加したリノール酸量とほぼ一致しており、24 時間のインキュベーションでこの培養系中から消失したリノール酸量は添加量（250 nmol）の約 5%程度であった（図 5A, ○）。同様の結果がペルオキシソーム欠損型 CHO-zp102 細胞を用いた実験でも得られた（図 5A, ■）。このことより、図 3 で観察されたように、細胞内に取り込まれたリノール酸の代謝にペルオキシソームはあまり関与しておらず、そのほとんどが細胞脂質へアシル化され、維持されていると思われた。一方、培養上清からのヒドロキシ脂肪酸の減少の推移は、野生型とペルオキシソーム欠損型間で大きく異なっていた。HYA を添加したペルオキシソーム欠損細胞において、24 時間後の培地からの減少量と細胞内の増加量はそれぞれ、40 nmol と 15 nmol で、消失量（25 nmol）は添加した HYA（250 nmol）の 10%程度であった（図 5B, ■）。これに対し、野生型細胞の培養系からの消失量は 110 nmol で添加した HYA の約 44%に相当する値であった。これは、培地からの減少量（120 nmol）がリノール酸のそれよりも多いにもかかわらず、細胞内の蓄積量が 10 nmol 以下と、ほとんど蓄積していないことに起因する。(図 5B, ○)。HYB を用いた実験からも同様の結果が得られた（図 5C）。これらの結果から、腸内細菌が産生するヒドロキシ脂肪酸の動物細胞への取り込みはリノール酸と同等か、それ以上の効率だが、ペルオキシソーム依存的に消去されるために、細胞脂質にほとんど蓄積していないこ

とが示唆された。驚くべきことに、培地から消失した HYA 量（120 nmol）は細胞脂質を構成する脂肪酸の総量（118 nmol, 図 5B）と同等であった。すなわち、この実験条件下ではペルオキシソームは自身の細胞総脂肪酸量に相当する量のヒドロキシ脂肪酸を消去していることになる。

3-4　HFA 処理が CHO 細胞のペルオキシソームの数に及ぼす作用の解析

図 5 において、HFAs の消失速度は前半（0～6 時間）よりも後半（6～24 時間）においてその消失が加速しているように思われた。この観察から HFAs 処理によってペルオキシソーム数が増加するのではないかと考え、その可能性を検討した。ペルオキシソーム膜に局在するトランスポータータンパク質の PMP70 に特異的な抗体を用いて蛍光免疫染色を実施したところ、HYA 処理した野生型細胞においてペルオキシソーム数（緑のドット）が増加したように思われた。この増加は特に、細胞核近傍で顕著であった（図 6A-D）。本研究で使用したペルオキシソーム欠損型細胞（CHO-zp102）は PMP70 を含有するがペルオキシソーム機能を有さない膜構造物、いわゆるペルオキシソームゴーストを有することが報告されている。本研究においても CHO-zp102 細胞は PMP70 陽性の構造体を有していたが、これらの数は HYA 処理によって変化しなかった（図 6F-I）。野生型 CHO-K1 細胞のペルオキシソーム数に対するリノール酸の作用は、HYA の作用と比較して弱かった（図 6E）。また、ペルオキシソーム欠損 CHO-zp102 細胞におけるペルオキシソームゴーストの数は、リノール酸処理においても変化しなかった（図 6J）。これらの結果から、ヒドロキシ脂肪酸はペルオキシソームの生合成を増強することが示唆された。

3-5　ヒト消化管細胞の培養系中からのペルオキシソーム依存的な HFAs の消失

腸内細菌が放出するヒドロキシ脂肪酸が最初に接触するのは消化管上皮細胞である。ヒト消化管細胞におけるヒドロキシ脂肪酸の代謝を調べるため、ヒト消化管由来の培養細胞のうち、中分化型管状胃腺がん由来

MKN74細胞及び結腸がん由来Caco-2細胞を用いて実験を行った。MKN74細胞の培地にリノール酸を添加した時、リノール酸の培地からの減少量と細胞内の増加量はほぼ一致しており、添加後 24 時間で培養系中から完全に消失したリノール酸量は添加量の 8%程度であった（図 7A, ○）。一方、HYA はリノール酸と同様に培地から消失していったが、細胞内にはほとんど蓄積せず、24 時間のインキュベート時間中に培養系から完全に消失した HYA は添加量の 41%になった。これはリノール酸消失量の 5 倍である（図 7A, ●）。同様の結果が Caco-2 細胞を用いた実験からも得られた（図 7B）。これらの結果より、げっ歯類細胞（CHO-K1）だけでなくヒト消化管細胞においても、ヒドロキシ脂肪酸は細胞に効率よく取り込まれるが、蓄積することなく、素早くペルオキシソームで代謝消去されることが明らかとなった。

4．考察

現代に生きる我々はダイズやナタネなど被子植物を主な油として摂取している。これは食品加工技術の発達や流通機構の発展に負うところが大きい。例えば、縄文時代の遺跡からカヤの実が出土することなどからもわかるように、古代の日本人にとって裸子植物の種子油は重要な脂質源の 1 つになっていた可能性がある(1)。我々は、以前、カヤの実に含まれるポリメチレン中断型不飽和脂肪酸のシアドン酸が高等動物にとって必須脂肪酸のリノール酸に変換されることを見出した(7,8)。この代謝はペルオキシソームが関与していることから、ペルオキシソームは脂肪酸の消去装置ではなく、脂肪酸再生装置としての役割があるのではないかと考えている。

本研究では腸内細菌由来の脂肪酸であるヒドロキシ脂肪酸の代謝とペルオキシソームの関連について研究を行った(12)。その結果、非動物型脂肪酸である HYA および HYB は共にペルオキシソームで代謝されることがわかった。実験当初、HYA や HYB は細胞内にほとんど蓄積しないことから、細胞が取り込まないのではないかと考えたが、細胞上清からは HYA や HYB がリノール酸と同等に減少していることがわかり、取り込んで素早く代謝していることが考えら

れた。驚くことに、細胞のヒドロキシ脂肪酸の代謝量は細胞総脂質と同等であった。すなわち、ペルオキシソームは 24 時間で自身の細胞脂質をすべて酸化消去するほどの代謝能力があり、その酸化的代謝能力をもって HYA や HYB を消去しているのである。この代謝はヒト消化管の胃由来 MKN74 細胞、腸由来 Caco2 細胞でも観察された。腸内細菌の乳酸菌由来のヒドロキシ脂肪酸は最初に接触する消化管上皮細胞のペルオキシソームが素早く代謝している可能性が考えられる。

前述したポリメチレン中断型脂肪酸のペルオキシソームにおける代謝は非動物型脂肪酸の動物型脂肪酸への作り替えという意義があった(7)。今回のヒドロキシ脂肪酸のペルオキシソーム代謝の意義の解明には最終代謝産物の構造の特定が必要である。残念ながら、本研究では最終産物を見出すことはできなかったが、鎖長が 2 あるいは 4 メチレン短縮された脂肪酸が培養上清から有意な量で検出されている(12)。これらの代謝物は培養上清から減少したヒドロキシ脂肪酸の一部を説明する量に過ぎないが、鎖長短縮物を細胞外に放出するという代謝動態は興味深い。これは、アシル鎖を短くすることによる水溶性の増加と、それによる尿中排泄の促進の意味があるのではないかと考えられる。

HYA で処理した細胞ではペルオキシソームの増加も観察された。このことはペルオキシソーム代謝産物がこの小器官の増殖を誘導していることを意味している。肥満は腸内細菌叢と関連していると言われる。乳酸菌由来の脂肪酸がペルオキシソームを増殖させることは、脂肪酸の酸化的代謝能力、すなわち太りやすさと腸内細菌叢との関連を示すものかもしれない。これについては今後の検討が必要であり、裸子植物由来のポリメチレン中断型脂肪酸にもそのような作用があるのか、興味深い。

今回調べた非動物型脂肪酸である乳酸菌由来ヒドロキシ脂肪酸は動物細胞の構成成分としては利用されずペルオキシソーム依存的に消去されることがわかた。この過程でこれらの脂肪酸が脂肪酸 β 酸化の活性化をもたらしている可能性も示唆された。この結果は古来より日本人が食してきた油や腸内細菌由来の油が我々の脂質代謝活性を活発にしていることを示唆する。移動手段が発達し、食物の欧米化を伴った高度消費社会に生きる現代人は運動不足やエネルギーの

過剰摂取の状態に陥りやすい。この状況が直接的あるいは間接的に脂質代謝異常症や肥満症を引き起こしている。今では顧みられなくなった裸子植物由来の油や善玉菌が産生する油の脂質代謝に及ぼす効果はさらに調べる価値がある。

謝辞

本研究の遂行にあたり、研究助成をいただいた甲南大学総合研究所並びにプロジェクトリーダーの甲南大学今井博之教授にお礼申し上げます。また、乳酸菌由来の脂肪酸をご提供いただきました京都大学岸野重信准教授、小川順教授にお礼申し上げます。本研究の成果の多くは、徳島大学大学院薬科学教育部博士後期課程の大学院生である森戸克弥さんによって得られたものであり、森戸さんとの共著としてまとめております。

参考文献

1. 中野益男. 脂質分析を通して縄文人の食生活を探る. 脂質栄養学, 7(1), 23-30 (1998)
2. Tamotsu Tanaka, Kayo Shibata, Hidehiko Hino, Tomoko Murashita, Mitsu Kayama and Kiyoshi Satouchi, Purification and gas chromatographic-mass spectrometric characterization of non-methylene interrupted fatty acid incorporated in rat liver
   J. Chromatogr. B, **700**, 1-8 (1997)
3. Tamotsu Tanaka, Toshinori Hattori, Maki Kouchi, Kaoru Hirano and Kiyoshi Satouchi
   Methylene-interrupted double bond in polyunsaturated fatty acid is essential structure for metabolism by fatty acid chain elongation system of rat liver
   Biochim. Biophys. Acta, **1393**, 299-306 (1998)
4. Tamotsu Tanaka, Tatsunori Takimoto, Jun-ichi Morishige, Yasushi Kikuta, Takayuki Sugiura and Kiyoshi Satouchi, Non-methylene-interrupted

polyunsaturated fatty acids: Effective substitute for arachidonate of phosphatidylinositol
Biochem. Biophys. Res. Commn., **264**, 683-688 (1999)

5. Tamotsu Tanaka, Jun-ichi Morishige, Tatsunori Takimoto, Yoshimichi Takai and Kiyoshi Satouchi
Metabolic characterization of sciadonic acid (5c,11c,14c-eicosatrienoic acid) as an effective substitute for arachidonate of phosphatidylinositol
Eur. J. Biochem., **268**, 4928-4939 (2001)

6. Jun-ichi Morishige, Yoshimichi Takai, Kaoru Hirano, Tamotsu Tanaka and Kiyoshi Satouchi
Production and protein kinase C activation of diacylglycerols with polymethylene-interrupted PUFA residues
Lipids, **40**, 155-162 (2005)

7. Tamotsu Tanaka, Jun-ichi Morishige, Dai Iwawaki, Terumi Fukuhara, Naomi Hamamura, Kaoru Hirano, Takashi Osumi and Kiyoshi Satouchi
Metabolic pathway that produces essential fatty acids from polymethylene-interrupted polyunsaturated fatty acids in animal cells
FEBS J., **274**, 2728-2737 (2007)

8. Tamotsu Tanaka, Sachika Uozumi, Katsuya Morito, Takashi Osumi and Akira Tokumura
Metabolic conversion of C20 polymethylene-interrupted polyunsaturated fatty acids to essential fatty acids
Lipids, **49**, 423-429 (2014)

9. 田中保，下澤伸行，ペルオキシソームにおける脂肪酸代謝と疾患
生化学，**90**(1)，14-20，(2018)

10. Shigenobu Kishino, Michiki Takeuchi, Si-Bum Park, Akiko Hirata, Nahoko Kitamura, Jun Kunisawa, Hiroshi Kiyono, Ryo Iwamoto, Yosuke Isobe, Makoto Arita, Hiroyuki Arai, Kazumitsu Ueda, Jun Shimada, Satomi Takahashi, Kenzo Yokozeki, Sakayu Shimizu,Jun Ogawa

Polyunsaturated fatty acid saturation by gut lactic acid bacteria affecting host lipid composition. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **110**, 17808-17813 (2013)

11. Tsuyoshi Goto, Young Il Kim, Tomoya Furuzono, Nobuyuki Takahashi, Kanae Yamakuni, Ha-Eun Yang, Yongjia Li, Ryuji Ohue, Wataru Nomura, Tatsuya Sugawara, Rina Yu, Nahoko Kitamura, Si-Bun Park, Shigenobu Kishino, Jun Ogawa and Teruo Kawada. 10-Oxo-12(*Z*)-octadecenoic acid, a linoleic acid metabolite produced by gut lactic acid bacteria, potently activates PPARγ and stimulates adipogenesis. *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, **459**, 597-603 (2015)
12. Katsuya Morito, Ryota Shimizu, Nahoko Kitamura, Si-Bum Park, Shigenobu Kishino, Jun Ogawa, Tatsuya Fukuta, Kentaro Kogure, and Tamotsu Tanaka Gut microbial metabolites of linoleic acid are metabolized by accelerated peroxisomalb-oxidation in mammalian cells.
Biochim. Biocphys. Acta, **1864**, 1619-1628 (2019)

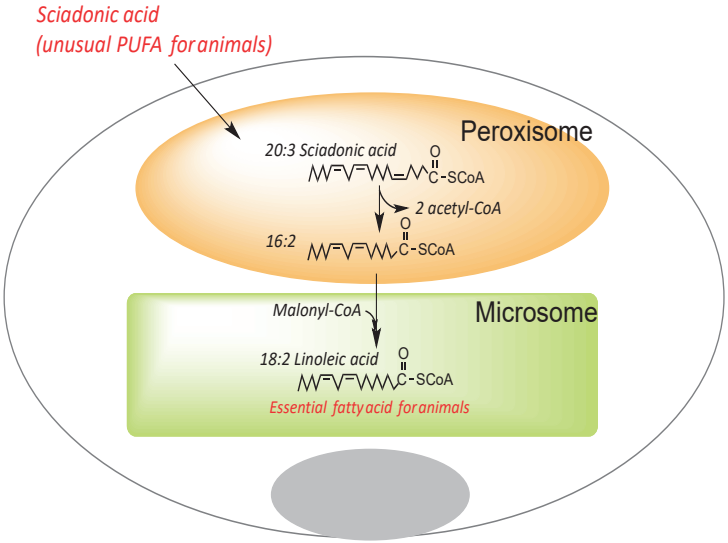
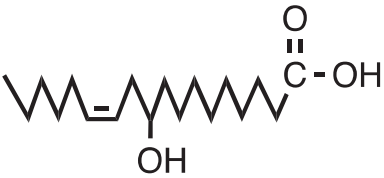
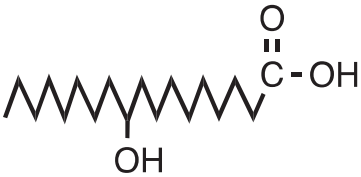


図１．　カヤの実に含まれるシアドン酸のリノール酸への変換経路



10-hydroxy-*cis*-12-octadecenoic acid
(HYA)



10-hydroxy-octadecanoic acid
(HYB)

図２．　本研究に用いた腸内細菌が産生するヒドロキシ脂肪酸

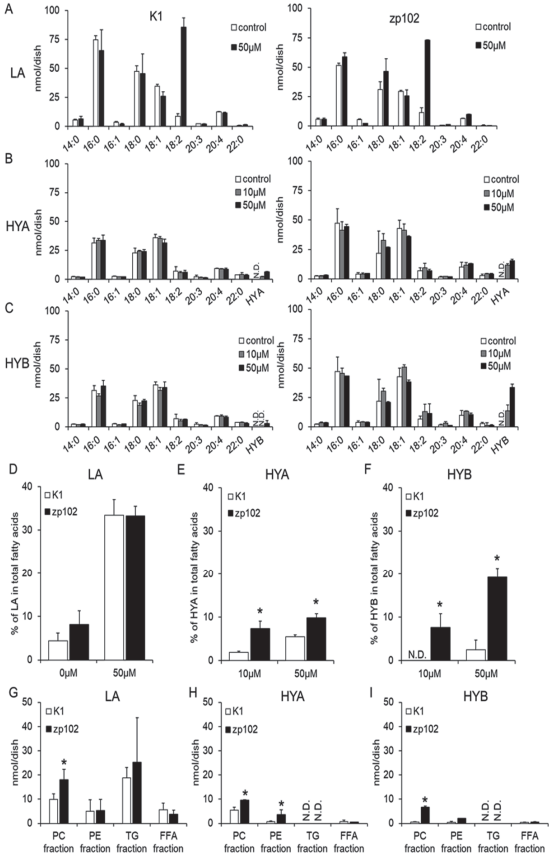


図３．リノール酸、HYA、または HYB の CHO 細胞野生型（K1）あるいはペルオキシソーム欠損型細胞への取り込み

野生型（CHO-K1）及びペルオキシソーム欠損型（CHO-zp102）細胞を種々の濃度のリノール酸（A)、HYA（B)、または HYB（C）とともに 24 時間インキュベートした。細胞脂質の脂肪酸組成を GC によって定量した。

LA (D, G)、HYA(E, H)、HYB(F, I)を取り込んだ細胞脂質における HYA の取り込み量とホスファチジルコリン(PC)、ホスファチジルエタノールアミン（PE)、トリグリセリド(TG)および遊離脂肪酸画分における分布

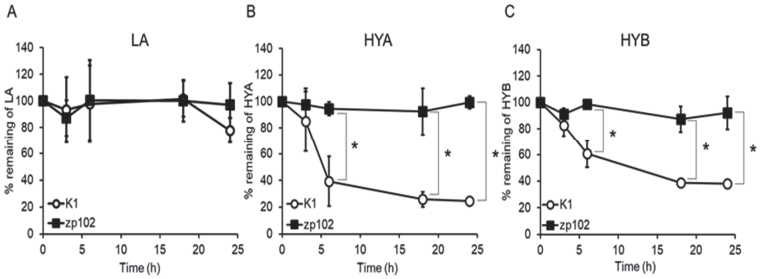


図 4 . CHO 細胞が取り込んだ脂肪酸の時間依存的な変動

野生型（CHO-K1）及びペルオキシソーム欠損型（CHO-zp102）細胞を 50 μM のリノール酸（A）、HYA（B）、もしくは HYB（C）含有培地で 3 時間インキュベートし、これらの脂肪酸を取り込ませた。その後、脂肪酸不含培地に交換してさらに 24 時間までインキュベートした。グラフの横軸と縦軸の起点はそれぞれ、FA 不含培地に交換した時間、3 時間のインキュベートで蓄積した脂肪酸量に対する相対値とした。各点は平均値±標準偏差（$n = 3$）で示す。P 値は Student の t 検定で算出した（$^*P<0.05$）。

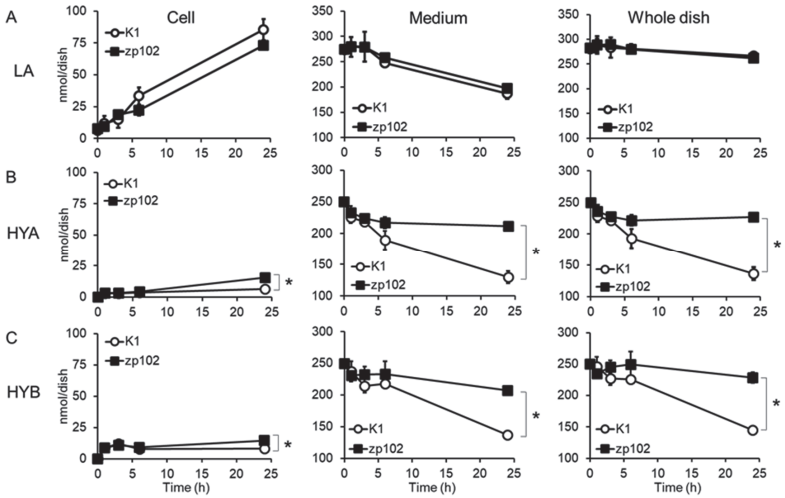


図 5　CHO 細胞内及び培養上清中 HFAs 量の時間依存的な変動

野生型（CHO-K1）及びペルオキシソーム欠損型（CHJO-zp102）細胞を 50 μM のリノール酸（A）、HYA（B）、もしくは HYB（C）含有培地でインキュベートした。細胞と培養上清を別々に回収して脂質を抽出し、脂肪酸分析に供した。右の列（Whole dish）は、各点における細胞内外の FA 量の和である。各点は平均値±標準偏差（$n = 3$）で示し、P 値は Student の t 検定で算出した（*$P<0.05$）。

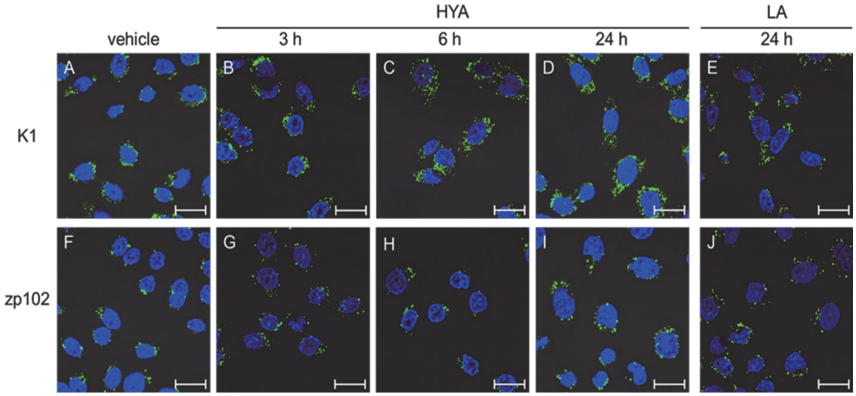


図 6 . CHO 細胞のペルオキシソーム数に対する FA の作用

野生型（CHO-K1）及びペルオキシソーム欠損型（CHO-zp102）細胞を溶媒（A, F）、50 μM HYA（B-D, G-I）、または 50 μM リノール酸（E, J）で示した時間処理した。ペルオキシソームマーカーとして PMP70 を抗 PMP70 抗体を用いて染色した（緑）。核は DAPI で染色した（青）。スケールバー：20 μm

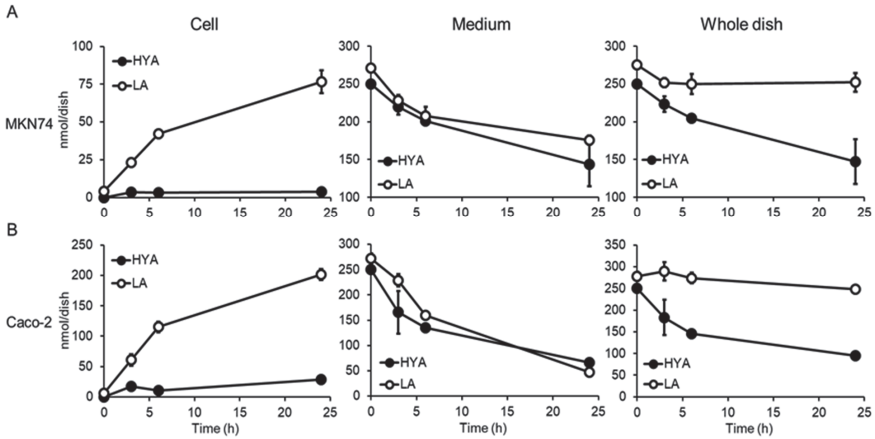


図 7 . ヒト消化管由来細胞の細胞内及び培養上清中 HFAs 量の時間依存的な変動

MKN74（A）及び Caco-2（B）細胞を 50 μM HYA またはリノール酸で処理し、一定時間後に細胞と培養上清を別個に回収した。それらから脂質を抽出し、メチルエステルへと変換後、GC に供した。右の列（Whole dish）は、各点における細胞内外の FA 量の和である。各点は平均値±標準偏差（$n = 3$）で示した。

生態系におけるDHAの生成と蓄積経路の解明に向けた，ラビリンチュラ類を中心とした食物連鎖における脂肪酸プロファイル解析

本多　大輔

ドコサヘキサエン酸（DHA）は，炭素数22で6つの二重結合をもつ直鎖の脂肪酸で，網膜や大脳皮質などに豊富に含まれ，記憶力や集中力の維持，学習能力，乳児の行動や視覚発達に関係することが知られている（「食品の機能性評価モデル事業」の結果報告，消費者庁，https://www.jhnfa.org/topic133c.pdf）。このように非常に重要な機能性物質であるにも関わらず，ヒトは十分な量を供給できる生合成を行う代謝系を持たないため，必須脂肪酸として食物から獲得して体内で利用している。食物の中では特に魚介類が豊富にDHAを含んでおり，特にいわゆる青背の魚であるイワシ，サンマ，サバ，マグロなどに豊富である（図1）。しかしながら，魚類も我々と同様にDHAを十分に生合成できないため，生態系における下位の被捕食者である微細藻類や原生生物が生合成するDHAが，食物網の中で生物濃縮されることで蓄積されていると考えるのが妥当である。ただし，どのような生物が供給するDHAが，魚類全体に対してどれくらい寄与しているのかについては，具体的な生態学的な知見がないのが現状である。すなわち，我々は大本を知らないまま，日常的に魚類などを通してDHAを摂取しているのである。

ラビリンチュラ類は，珪藻類や褐藻類を含む大系統群であるストラメノパイル類に位置するが，葉緑体を欠いているため光合成能力はない生物群である（図2）。特にその中でもオーランチオキトリウムは，PUFAシンターゼとよばれるポリケチド様合成酵素複合体によって，中間産物が少なく高濃度にDHAを合成していることが特徴であり，安価な培地で増殖速度も大きいため工業的生産が行われている［伊東信（2016）海洋と生物 38, pp. 59-65］。また，世界的な海洋調査プロジェクトであるTARA Oceansにおいて，環境中の

リボソーム RNA 遺伝子の網羅的部解析データでは，ラビリンチュラ類として次世代シーケンサーで読まれた配列数は珪藻類の約 10%と比較的大きい割合であり，環境中での DHA 生産への寄与が大きいことが示唆されている［Hamamoto & Honda (2019) in PLoS ONE 14(1): e0208941］。さらに，ラビリンチュラ類のアプラノキトリウムは，地球上の一次生産の 20%を担っているとも言われる微細藻類である珪藻類を積極的に捕食することが明らかになり，この生物が海洋生態系で大きな影響力をもっている可能性が指摘されている［Hamamoto & Honda (2019) in PLoS ONE 14(1): e0208941］（図３）。

そこで，本研究ではラビリンチュラ類に注目し，特にアプラノキトリウムが珪藻から栄養摂取する経路，およびラビリンチュラ類が動物プランクトンに捕食される経路において，脂質の組成がどのように変化し蓄積されるのかについて調査した。

まず，アプラノキトリウムとスケルトネマ（珪藻類）の脂肪酸組成をガスクロマトグラフィーによって分析した。その結果，特に DHA と EPA の組成において大きな違いがあることが示された。アプラノキトリウムは DHA 90%，EPA 10%の割合で蓄積するが，スケルトネマの組成はほぼ逆転しており，DHA 9%，EPA 91%で蓄積していた（図４）。

次に，図３のように，アプラノキトリウムとスケルトネマを同じ容器に入れた二員培養をして，培養開始直後（０日目），１日後，３日後，６日後に生物試料を採取して，２つの生物が混合した状態での脂肪酸組成をガスクロマトグラフィーによって分析した（図５）。

その結果，スケルトネマが豊富に蓄積している EPA は，アプラノキトリウムによって捕食されて減少している様子が示された。また，アプラノキトリウムが増殖することによって，DHA の量が増加していることも示された。また，これらの脂肪酸の総量は，６日後には，最大値を示した１日後のほぼ半分となっていた。一般的に食物連鎖において，捕食によって栄養段階が１つ移行するごとに，被捕食者が持っていたエネルギーは，代謝や排泄などによって捕食者では１０～20%に減じることが知られている。アプラノキトリウムとスケルトネマの二員培養では，DHA と EPA の量に限ったことではあるが，50%程

度の減少にとどまっており，エネルギーの転送効率が極めて高いことが示唆された。すなわち，光合成によって生産された生体物質であるEPAが，ラビリンチュラ類によってエネルギー損失が抑えられながらDHAへと効率よく変換されている可能性が示された。

さらに，ラビリンチュラ類を上位の捕食者として想定される動物プランクトンの甲殻類に捕食させ，脂肪酸組成をガスクロマトグラフィーによって分析した（図6）。なお，ラビリンチュラ類には，EPAをほとんど含まずDHAの割合が高いオーランチオキトリウムを選択した。また，ラビリンチュラ類を捕食する海洋の動物プランクトンとしては，カイアシ類が候補となるが，カイアシ類の培養は困難であるため，同じ甲殻類のアルテミアを用いた。

アルテミア（甲殻類）は，炭素数20個のEPAを蓄積するが，炭素数22個のDHAは含んでいない。脂肪酸の生合成経路として，脂肪酸鎖長伸長酵素と脂肪酸不飽和化酵素があれば，EPAからDHAの生合成が可能であるが，アルテミアはいずれか，あるいはどちらも持っていないことが示された。一方，DHAを豊富に蓄積するオーランチオキトリウムを捕食した場合，アルテミアはDHAを蓄積することが示された。生態系においても，ラビリンチュラ類が動物プランクトンに捕食されれば，上位の捕食者にDHAが供給されることが示された。

珪藻類からラビリンチュラ類への物質転送として，EPAがDHAに効率よく変換される結果が得られたこと，甲殻類がラビリンチュラ類を捕食することでDHAが強化されることが示されたことは，海洋生態系におけるラビリンチュラ類の役割を考える上での基礎情報を提供できたものと考えている。ただし，珪藻類からラビリンチュラ類の食物連鎖における高い生態効率が，EPAとDHAだけのものではなく，生物間のエネルギー転送としても高い効率があるものなのかについては，今後の課題である。また，ラビリンチュラ類が珪藻類のEPAを分解せずに，そのまま吸収しているかも代謝生理学的にも課題として残っている。環境におけるラビリンチュラ類の存在量と合わせて知見を蓄積することで，我々の食卓に並ぶ魚介類を支えているにも関わらず，ブラックボックスとなっている海洋の生態系に光を当てることができると思われる。

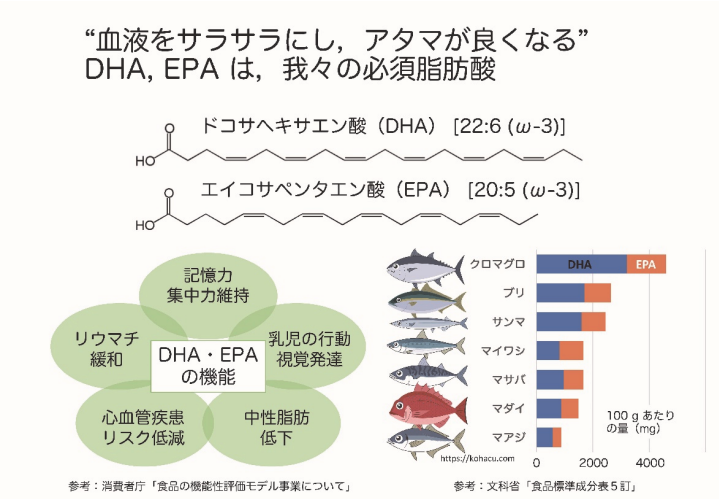


図１　DHA と EPA の化学構造と機能，および魚類における含有

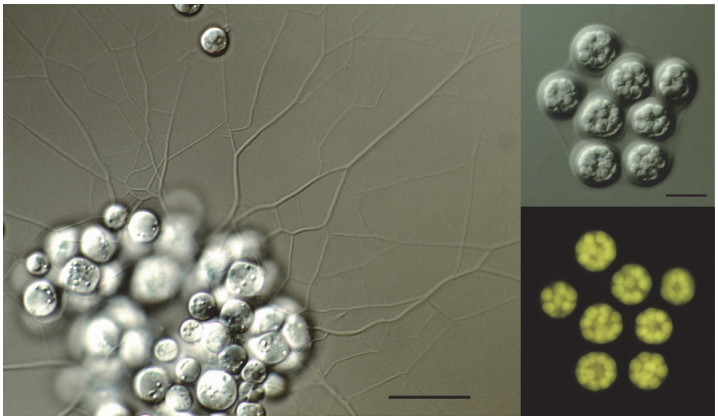


図２　ラビリンチュラ類オーランチオキトリウムの光学顕微鏡像。左はコロニーから放射状に仮足状の外質ネットを展開している様子。右上と右下は同視野像で，上は透過像，下はナイルレッドで脂質を蛍光浅色した蛍光像。スケールバーは左：20 μm，右：10 μm。

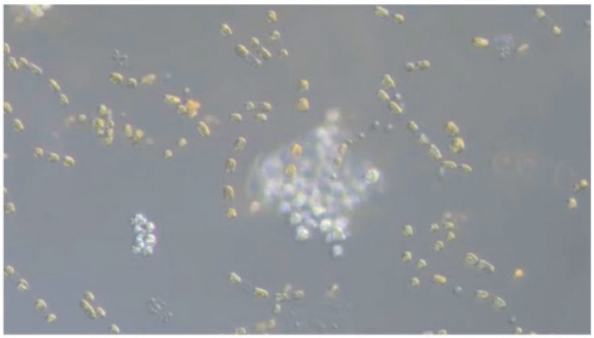


図３　珪藻類スケルトネマ（黄色）がラビリンチュラ類アプラノキトリウム（白色）に捕食される様子。下の約 12 時間後の様子では，珪藻が捕食されたことで黄色の色素が観察されず，アプラノキトリウムの細胞数も増加している。Hamamoto & Honda (2019) in PLoS ONE 14(1): e0208941. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208941

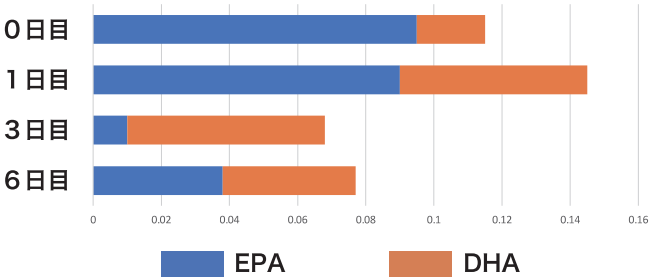


図４　アプラノキトリウム（ラビリンチュラ類）とスケルトネマ（珪藻類）の DHA と EPA の組成比。

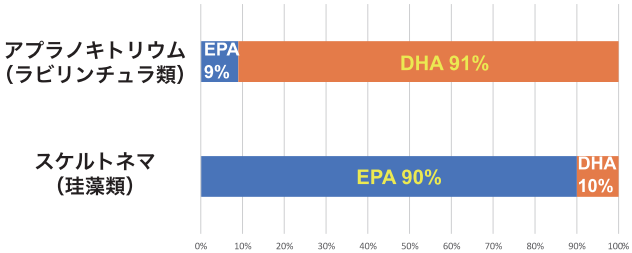


図５　アプラノキトリウム（ラビリンチュラ類）とスケルトネマ（珪藻類）の二員培養における経時的な脂肪酸組成の変化。横軸は内部標準物質を１とした時の脂肪酸の絶対量を示す。

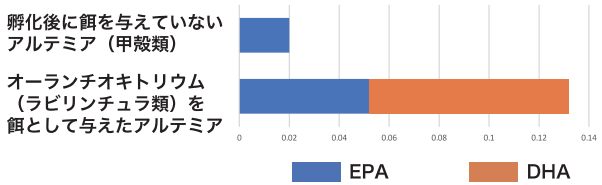


図６　ラビリンチュラ類（オーランチオキトリウム）を捕食させた時のアルテミア（甲殻類）の脂肪酸組成の変化。横軸は内部標準物質を１とした時の脂肪酸の絶対量を示す。

植物脂質を用いた実験・実習教育の実践を通して見る食用植物油の脂肪酸組成の潮流

今井　博之

はじめに

スーパーの食品売り場の一角には食用油のコーナーがあり、原材料の異なるいろいろな商品が並んでいる。足元には定番のナタネ（キャノーラ）油の大きな容器、一方、視線が止まりやすいところには、大小さまざまな容器に入ったオリーブ油、それから、エゴマ油やアマニ油などの小さな容器がたくさん並んでいる。また近年では、オリーブ油のコーナーを設けているお店も少なくないと気づく。この食用油のコーナーに並んでいる商品は、「食用○○油」とよばれるもので、○○には、「なたね」や「大豆」などの原材料名がはいる。

私たちは、中学校理科の「消化と吸収」のところで、「脂肪はリパーゼとよばれる消化酵素の働きによって、脂肪酸とグリセロールに分解される」と学んだ*。ここでいう「脂肪」とは、一般的に、その主成分であるトリグリセリドを示す場合が多い。トリグリセリドは、グリセロール1個に3個の脂肪酸が結合した構造をしている。著者が担当する学生実験・実習では、植物に存在する脂肪酸を分析しており、家庭用消費向けの食用植物油を実験・実習の分析に使用することが多い。本稿では、著者が担当している生物学科の学生実験・実習を通して最近気づいた「暮らしの中での植物油（トリグリセリド）」について述べたい。特に、その脂肪酸組成に関する時代の色合いなどを文系学生や一般市民の方々にも理解していただけるようにまとめた。なお、「材料と方法」は、脂肪酸分析に関わる従事者向けの内容が含まれるので、読み飛ばしていただいて構わない。

---

*平成 24 年度以降の中学・高校の教科書では、「脂肪は、消化管内で脂肪酸とモノグリセリドに分解される」などと、記述が変更されている。

いろいろな意見はあるが、トリグリセリドのように、物質中に脂肪酸を持ち、水には溶けないが有機溶媒に溶ける生体物質の総称を「脂質（lipid)」とよぶ。図1は、「日本人の食事摂取基準（2020年版)」に掲載されている「脂質とその構成」を示している（１)。この図では、脂肪酸を栄養学的な観点から飽和脂肪酸、一価不飽和脂肪酸、多価不飽和脂肪酸の三つのグループに大別し、さらに、多価不飽和脂肪酸については、n-6系脂肪酸とn-3系脂肪酸（α－リノレン酸とEPA・DHA）に、また、不飽和脂肪酸全体で、シス型脂肪酸とトランス型に分類している。本稿では、最近スーパーなどで一際目立って陳列されている食用植物油の中から、その主要な脂肪酸であるオレイン酸とα－リノレン酸に注目して述べていきたい。

実験材料と方法

実験材料

今回分析に用いた食用植物油（21 種類）は、本学近郊のスーパーから購入した。また、種子（14 種類）は、ホームセンターで販売されている園芸用種子やスーパーから購入した青果物から採取した。

実験方法

著者が担当している学生実験・実習では、植物のトリグリセリドに存在する脂肪酸を分析するために、ガスクロマトグラフ（GC）という機器を使用している。市原（2012）は、「脂肪酸分析は意外と簡単」の中で「サラダ油の脂肪酸組成を分析する場合であれば、油を試薬と混合するだけでグリセリド脂肪酸を脂肪酸メチルに誘導し、GCにかけて組成を調べることができる」と述べている（２)。そこで、著者は脂肪酸の誘導体化を実験・実習向けに標準化し、試料の調製から GC での分析までの時間を約 2 時間程度にする実験・実習メニューを工夫した。GC 法による植物脂質の脂肪酸分析では、植物試料からの脂質の抽出→脂肪酸の誘導体化→GC による分析の三つのパートに分かれる。このうち、植物試料からの脂質の抽出については、市販の食用植物油を使用するれば省略することができるため、本稿では、脂肪酸の誘

導体化と、GCによる分析について説明する。なお、種子を分析試料とする場合は、ノルマルヘキサンという有機溶媒とともに種子を乳鉢と乳棒を用いて磨り潰し、これをろ過した液体を分析の試料とした。

GC分析の概要を理解するには、島津製作所のホームページ「GC分析の基礎」を参照すると分かりやすい（3）。なお、脂肪酸のGC分析に関する近年の状況については、塩田（2015）の総説「キャピラリーガスクロマトグラフ法によるトランス脂肪酸定量技術」が参考なる（4）。特に、日本油化学会や米国油化学会（AOCS）が公認（公定）している分析法についても詳しく述べられおり、食品成分表などの行政の文書に掲載されている植物油の脂肪酸組成のデータがどのように分析されて得られたのかを知りたい場合は、この総説を参照されたい。

1．脂肪酸の誘導体化

和田と白石（1998）は、優れた総説「脂肪酸分析の実際」の中で、「脂肪酸のGC分析では、難揮発性の脂肪酸をそのままでGCに付すと、脂肪酸のカルボキシル基がテーリングを引き起こし、正確な組成は得られない。そのため脂肪酸はメチルエステルあるいはエチルエステル等に誘導体化し、脂肪酸の揮発性を向上させる必要がある」と述べており、脂肪酸の誘導体化には、①酸による誘導体化、②アルカリによる誘導体化、③ジアゾメタンによる誘導体化、④試料からの直接メチル化法の4つに分けて説明している（5）。著者は長年、脂肪酸をメチルエステル化して、GC分析を行っているが、著者の研究室の研究対象であるスフィンゴ脂質において、この脂質の脂肪酸を分析する場合、酸による誘導体化を採用しているため、植物油の脂肪酸分析についてもこの方法を使用した。具体的には、植物油の試料を少量の有機溶媒に溶かした後、0.5 mol/L メタノール性塩酸を加えて、100℃で数時間加熱して誘導体化している。これは優れた方法ではあるが、3年次の学生実験・実習に採用する方法としては、有害な有機溶媒を使用することと、反応時間が長いために不向きである。そこで、アルカリによる誘導体化のひとつ水酸化カリウム（KOH）-メタノール法を検討した。この方法は、もともと大阪

府立大学総合リハビリテーション学部の山本公平先生から紹介されたものである。具体的には、植物油の試料に0.2 mol/L KOHのメタノール溶液を加えて3分間激しく攪拌して誘導体化する方法で、非常に短時間のうちにGC分析のための試料を調製することができる。この方法より、容器を開封して間もないオリーブ油、ダイズ油、綿実油の脂肪酸組成を分析し、食品成分表に記載のデータと比較した。その他の18種類の食用植物油については、容器の開封から半年程度冷凍保存したものであり、0.5 mol/L メタノール性塩酸を使用した方法によって、脂肪酸のメチルエステルを調製した。

上記の水酸化カリウム（KOH）-メタノール法は簡便であり、植物油に含まれるトリグリセリドから脂肪酸メチルエステルを調製することができる。一方、この方法は植物油にも含まれるトリグリセリドが分解して生じる遊離脂肪酸をメチル化することができないという難点がある。また、0.5 mol/L メタノール性塩酸は比較的高価な試薬であり、著者の研究室でこの試薬を調製することはできるが厄介である。そこで、市原ら（2010）が報告したトルエン/メタノール/８％塩酸を採用し（６）、14種類の種子から調製した脂質試料（ノルマルヘキサン抽出物）については、この混合溶液で脂肪酸メチルエステルを調製した。

２．ガスクロマトグラフ（GC）による分析

食用植物油から調製した試料（脂肪酸メチルエステル）を少量のノルマルヘキサンに溶かし GC 分析を行った。ガスクロマトグラフは GC-18A GAS CHROMATOGRAPH（SHIMADZU）を使用した。カラムは TC-70（ジーエルサイエンス、0.25 mm ID ×60 m、0.25 μm df)、インジェクター(気化室)及び水素炎イオン化（FID）検出器の温度はともに 250℃、カラムオーブンは 120℃から 240℃（4℃/min）まで昇温した後、240℃で 10 分間保持した。サンプルの注入量は 1 μL でスプリット比は 1/50、キャリアガスの線速度は 30cm/秒に設定した。なお、カラムオーブンの温度条件は、ドコサヘキサエン酸（DHA）やエイコサペンタエン酸（EPA）などの高度不飽和脂肪酸も分析できる条件に設定しているので、植物油に含まれる主要な脂肪酸だけを調

べるのであれば、240℃で 10 分間の保持は省略できる。

脂肪酸メチルエステルの同定に際し、ガスクロマトグラフは GC-17A GAS CHROMATOGRAPH（SHIMADZU）、質量分析計は GCMS-QP5050（SHIMADZU）を使用した。カラムは SH-Stabilwax（0.25mm ID×60m、0.25μm df)、インジェクター(気化室）の温度は 250℃、カラムオーブンは 120℃から 240℃（4℃/min）まで昇温した後、240℃で 20 分間保持した。サンプルの注入量は 1μL でスプリット比は 1/50、キャリアガスの線速度は 30cm/秒に設定した。質量分析は、GCMS-QP5050 の電子イオン化（EI）法で行った。インターフェース及びイオン源の温度はともに 250℃に設定した。溶媒待ち時間は 3 分、スキャン範囲は、m/z 40～400 とした。

3．シリカゲル薄層クロマトグラフィー（TLC）

スイカ、トウガラシ（パプリカ)、キンカン、ネギ、トウモロコシのそれぞれ種子から調製したノルマルヘキサン抽出液を試料として、シリカゲル薄層クロマトグラフィー（TLC）によって脂質成分を分析した。10 cm×10 cm のシリカゲル TLC プレート（HPTLC Silica gel 60、Sigma-Aldrich）に約 1 mg 試料を塗布し、移動相溶媒（ノルマルヘキサン 10 mL、ジエチルエーテル 2.5 mL、酢酸 125 μL）の入った展開槽中にプレート置いた。約 20 分後、展開槽からプレートを取り出し数分間放置後、50％硫酸をプレートに噴霧した。すぐにそのプレートを 120℃に設定したオーブンで加熱して、脂質を検出させた。

結果と考察

1．食用植物油の脂肪酸

1－1．ハイオレイック（高オレイン酸）化の動向

オレイン酸（oleic acid）という名前は、オイル（油）を意味するラテン語の *oleum* に由来するといわれている。オレイン酸は、オリーブ油の主要な構成脂肪酸であるが、近年では、ヒマワリ、ベニバナ、ナタネを原料とする食用植物油において、いわゆるハイオレイック油とよばれるオレイン

酸を主成分とするものが市販されている。日本人の食事摂取基準（2020 年版)」策定検討会報告書によると、平成 28 年国民健康・栄養調査における日本人成人（18 歳以上）において、オレイン酸をはじめとする一価不飽和脂肪酸の摂取量の中央値は、20.0 g/日（男性）、17.0 g/日（女性）とされる。また、この報告書によると一価不飽和脂肪酸は「必須脂肪酸ではなく、同時に、主な生活習慣病への量的影響も明らかではないため、目標量は策定しなかった」とある。

オレイン酸、リノール酸、α－リノレン酸の構造を図2に示す。ギザギザ線は炭化水素（-CH_2-）の骨格を示している（図の左端はCH_3-)。オレイン酸にはシス2重結合が1個あり、リノール酸には 2 個存在する。α－リノレン酸の場合はシス二重結合が3個あり、図の左端から数えて3番目の炭素に最初のシス2重結合があるので、n-3系不飽和脂肪酸とよばれる。不飽和脂肪酸の物性については、オレイン酸→リノール酸→α－リノレン酸の順に融点が低くなり、例えば、リノール酸やα－リノレン酸を主成分とする多くの食用植物油を冷蔵庫に保存しても何も変化が見られない。一方、オレイン酸を主成分とするオリーブオイルを冷蔵庫に保存すると、飽和脂肪酸を主成分とするラードやバターなどの動物性油脂と同様に固まってしまう（品質には問題ない)。

色々なタイプのオリーブ油を店頭で見かけるが、これは、近年のオリーブオイルの香りや味を楽しむ食のスタイルを反映しているのかもしれない。また、悪玉コレステロールの低減という観点から、動物脂肪の主要な脂肪酸である飽和脂肪酸の摂取量を少なくして、オレイン酸に置き換えるという健康志向を反映しているのかもしれない。図 3 は、家庭用消費向けとして市販されている食用植物油を試料として、その脂肪酸組成を分析した結果を示している。まず、オリーブ油の脂肪酸組成の分析結果について述べる。今回は、エクストラバージンオリーブオイルと（ピュア）オリーブオイルが混合されたと思われるものを試料とした。図 3 に示すように、オリーブ油には飽和脂肪酸のパルミチン酸が 11.5%(モル％)、一価不飽和脂肪酸のオレイン酸が 76.2%(モル％）含まれていた。つまり、全脂肪酸

100 個あたりに換算して、パルミチン酸は 11.5 個、オレイン酸 76.2 個含まれていた。この値は「日本食品標準成分表 2015 年版（七訂）」（７）に掲載のデータとほぼ同じであった。なお食品成分表では、脂肪酸総量 100 g 当たりのグラム数で示しており、エクストラバージンオイルに含まれるパルミチン酸は 10.4 g、オレイン酸は 77.3 g と記載されいる。

ハイオレイック（高オレイン酸）品種の種子から採油されたヒマワリ油及びベニバナ油に含まれるオレイン酸の割合については、オリーブ油に含まれるオレイン酸のそれ（76%）よりも多かった。これらの値についても、「日本食品標準成分表 2015 年版（七訂）」（７）に掲載のデータとほぼ同じであった。

ナタネ（キャノーラ）油は日本国内の需要量、生産量ともに最も多い植物油で、世界で 3 番目に生産量の多い植物油である。ナタネの種子は、もともと心臓病の原因となるエルカ酸という脂肪酸や、グルコシノレートとよばれるワサビの辛み成分を含んでいたが、グルコシノレートを低減させる品種改良の途上でエルカ酸の量が低いナタネが発見され、栽培品種が作られた。これをキャノーラ（Canola）種といい、食用ナタネ油の供給品種として使用されてきた。図 3 に示したナタネ（キャノーラ）油 B については、オレイン酸の割合が 73.3%とオリーブ油並みに高かった。興味深いことに、このナタネ（キャノーラ）油 B は、α－リノレン酸の割合（3.6%）についても、ナタネ（キャノーラ）油 A のα－リノレン酸のそれ（10.0%）と比較して低かった。ナタネ（キャノーラ）油 A のデータは「日本食品標準成分表 2015 年版（七訂）」（７）に掲載のデータとほぼ同じであったが、ナタネ（キャノーラ）油 B のデータは、アメリカ油化学会（AOCS）のホームページで 2012 年 9 月に掲載された「High-oleic canola oils and their food applications」における Clear V alley® 75 (CV75)オイルの脂肪酸組成とよく似ていた（８）。なお、脂肪酸組成に関するナタネの品種改良については、山守（2006）の論文を参照されたい（９）。

ダイズ油は、世界で 2 番目に生産量の多い植物油である（ちなみに、世界で最も生産量の多い植物油はパーム油である）。本学近郊のスーパーの食

用油売り場で、原材料「食用大豆油」のみの商品を見かけることは稀であるが、ナタネ（キャノーラ）油とブレンドした商品は普通に売っている。また、油を採取した搾り粕である大豆粕（ダイズミール）は、この叢書で鳴海先生が述べている通り、1900 年代初めに水稲作の肥料として重用された時期もあったが、現在では、家畜飼料、醸造食品、植物性タンパク質食品として利用されている。図 3 に示すように、ダイズ油のオレイン酸の割合は 22.5%、リノール酸の割合は 55.0%、α－リノレン酸の割合は 5.7%であり、「日本食品標準成分表 2015 年版（七訂）」（7）のデータとほぼ同じである。

高木と穴井（2006）よると、「ダイズの脂肪酸組成は、低いオレイン酸含量(高リノール酸含量)と高いリノレン酸含量を特徴としており、他の植物油脂とくらべると市場価格が低くなっている。この理由の一つとして、ダイズ油中に大量に含まれる多価不飽和脂肪酸(リノール酸とリノレン酸)は、油の自動酸化による品質の劣化と過酸化物発生の原因となることがあげられる」とし、「不飽和脂肪酸の自動酸化による過酸化脂質の増加は家畜の餌となるダイズミールでも問題となっており、ダイズ油脂の酸化安定を増すために、オレイン酸含量を増加させ、多価不飽和脂肪酸を減少させる脂肪酸組成の改良が極めて重要な課題となっている」と述べている（10)。このような中、近年、米国を中心にハイオレイック（高オレイン酸）のダイズの品種が開発されている。米国のメーカーが開発したプレニッシュ（Plenish）というダイズ油は、我が国においても 2013 年ごろから食用としての利用が検討されていると聞く。Napolitano ら（2018）は、プレニッシュ油の脂肪酸組成について、オレイン酸の割合は 76.0%、リノール酸の割合は 6.7%であると報告している（11)。

図 2 に示す通り、オレイン酸は 2 重結合を 1 個持ち、リノール酸は 2 重結合を 2 個持つ。リノール酸は、オレイン酸を原料にして、新たに図 2 の左端から数えて 6 番目と 7 番目に二重結合を導入する酵素（不飽和化酵素、FAD2 という)の働きによってつくられる。つまり、植物種子において、FAD2 という酵素が働かないとリノール酸が生じないので、リノール酸の生合成の

原料であるオレイン酸が蓄積してしまうことになる。プレニッシュ油の原材料になっているダイズは、遺伝子組換えの技術によって、このFAD2という酵素が種子中で少なくなるようにデザインされた品種である。また、2018年に米国のメーカーが開発したカリョノ（Calyno）ダイズ油の原材料になっているダイズは、ゲノム編集技術によって、FAD2という酵素が種子中で少なくなるようにデザインされた品種である。

コメ油の原料は玄米ではなく、精米して生じる米ぬかである。実際に、「日本食品標準成分表2015年版（七訂）」（７）においても「米ぬか油」と標記されている。図３に示すように、飽和脂肪酸の一つパルミチン酸の割合は17.1～18.2%、オレイン酸の割合は42.5～43.5%、リノール酸の割合は35.7～36.0%と「日本食品標準成分表2015年版（七訂）」のデータとほぼ同じであり、この脂肪酸組成は昔から変わっていないと思われる。この変わらない理由をイネの種子に関する品種改良の歴史から考えると、品種改良は専ら精米部分（加食部）の味や香り、食感に関することで、米ぬか油に注目し、米ぬかの原料となる種皮や果皮の成分に関わる品種改良を行ったとは考えられないからである。一方で、2012年に開発されたゲノム編集技術のひとつクリスパー・キャス９（CRISPR-Cas9）をイネの品種改良に応用することはそれ程難しいことではなく、米ぬか油のハイオレイック（高オレイン酸）化の観点から、クリスパー・キャス９を使った種皮や果皮の成分改良に関わる品種改良が進むかもしれない。

コーン油は、トウモロコシ種子からデンプン（コーンスターチ）を製造する際に生じる残渣の「胚芽」を原料として採油される。図３に示すように、オレイン酸の割合は28.7%、リノール酸の割合は56.5%であり、これらの値は「日本食品標準成分表2015年版（七訂）」（７）のデータとほぼ同じである。また、後に述べるが、図６で示したトウモロコシのデータは、家庭菜園用の種子から抽出した脂質の脂肪酸データである。この図６データと図３のデータが似ていることは、今回分析したコーン油は、脂肪酸組成に注目した改良品種の種子を原材料にしていないとことがうかがえる。なお、コーン油、ナタネ（キャノーラ）油、ダイズ油、綿実油の製造

原料となるそれぞれの輸入種子は、除草剤耐性遺伝子あるいは害虫抵抗性遺伝子に関わる遺伝子組換え技術が使用されていると思われるが、食用植物油の製造の過程で、これらの遺伝子産物（タンパク質）を取り除くので、食用植物油を試料として遺伝子組換えの有無を調べることは技術的にできない。

ゴマ油は胡麻の種子から採油される。図 3 に示すように、オレイン酸の割合は 39.2～39.4%、リノール酸の割合は 44.4～45.0%であり、両脂肪酸の割合はほぼ同レベルである。これらの値は「日本食品標準成分表 2015 年版（七訂）」（7）のデータとほぼ同じである。

綿実油は、ワタの種子から搾油される。図 3 に示すように、飽和脂肪酸の一つパルミチン酸の割合は 22.3%、オレイン酸の割合は 18.3%、リノール酸の割合は 56.3%であり、リノール酸の割合はコーン油やダイズ油とほぼ同じレベルで含まれている。これらの脂肪酸組成のデータは、「日本食品標準成分表 2015 年版（七訂）」（7）のデータとほぼ同じである。最近 Dowd ら（2019）は、ワタに寄生する線虫に耐性を示す GB713 という系統（遺伝的に同質な個体群のこと。微生物の場合は菌株という）のうち、いくつかの種子から、オレイン酸の割合が約 30%含むものを報告している（12）。また現在、米国農務省（USDA）の研究機関では、綿実油のオレイン酸の割合を 40%程度まで高める研究が進んでいるようである。

ここまで、ハイオレイック（高オレイン酸）油をつくる植物（種子）について述べてきた。すでに食用植物油として市販されているものとしては、ヒマワリ、ベニバナ、ナタネ由来のものがあり、ダイズについても、今後、家庭用消費向けとして市販される方向に進むものと思われる。ダイズやワタ以外にも、近年はパーム（アブラヤシ）や藻類において、ハイオレイック（高オレイン酸）油の原材料としての開発が進んでいる。

1－2．必須脂肪酸 α－リノレン酸を主成分とする植物油

α－リノレン酸は、紫蘇（しそ）、亜麻（あま）、荏胡麻（えごま）の種子からとれる油の主要な構成脂肪酸であるが、一般的にこの脂肪酸は、図3に示すように、植物の種子

に含まれる脂肪酸としては少量または微量成分である。一方、植物の緑葉から脂質を抽出し、脂肪酸組成を分析すると、α－リノレン酸が最も多量に検出されるので、植物生理学的にα－リノレン酸は、緑葉での低温耐性や光合成機能との関連が指摘されている。シソ油については今回調べていないが、図４に示すように、エゴマ油中に含まれるα－リノレン酸の割合は60.8～70.6%、アマニ油中に含まれるα－リノレン酸の割合は50.8～59.9%であり、「日本食品標準成分表2015年版（七訂)」（７）におけるα－リノレン酸の割合（エゴマ油61.3%、アマニ油59.5%）と比べてもよく似ている。なぜ、紫蘇、亜麻、荏胡麻の種子にα－リノレン酸が多いのかについてはよく分かっていないが、植物生理学的に種子が凍結に対する耐性を高めるためではないかとの指摘もある。

「日本人の食事摂取基準（2020年版)」策定検討会報告書によると、「n-3系脂肪酸は、生体内で合成できず（他の脂肪酸からも合成できない）、欠乏すれば皮膚炎などが発症する。したがって、必須脂肪酸である。また、n-3系脂肪酸の生理作用は、n-6系脂肪酸の生理作用と競合して生じるものもある。さらに、n-3系脂肪酸はα－リノレン酸（18：３n-3）、EPA（20：５ n-3）及びdocosapentaenoic acid（DPA、22：５ n-3）、DHA（22：６n-3）に大別されることから、それぞれの健康効果についても研究が進められている」とある。また、生活習慣病との関連については、「α－リノレン酸と循環器疾患の発症率及び死亡率との関連を調べたコホート研究をまとめたメタ・アナリシスでは、弱いものの有意な負の関連を報告している」とある。n-3脂肪酸に関する健康の保持・増進（欠乏の回避）について、この報告書によると「日常生活を自由に営んでいる健康な日本人にはn-3系脂肪酸の欠乏が原因と考えられる症状の報告はない」として、現在の日本人のn-3系脂肪酸摂取量の中央値を用いて、摂取の目安量を算定している。具体的には、12歳以上の男性及び65～74歳の女性で1日当たり２g前後、10歳から49歳までの女性で1日当たり1.6 g前後、50歳以上の女性で1日当たり1.8 g前後（65～74歳の女性を除く)となっている。

食用植物油に含まれる不飽和脂肪酸の酸化安定性について、オレイン酸

は比較的高く、オレイン酸→リノール酸→α－リノレン酸の順に低下する。α－リノレン酸を多く含む植物油を揚げ物に使用した場合の加熱による油の劣化の程度は、食の安全性という点では、一般的に問題にならないレベルにあるものの、においや味に好ましくない影響があるとされる（13）。

２．園芸用種子や青果物中の種子の脂質について

食用油を原材料から抽出する方法の一つとして、ノルマルヘキサンによる溶剤抽出法がある。そこで本研究では、ノルマルヘキサンを用いて、食用植物油の原料種子ではないもの（園芸用種子や青果物の中の種子）を試料として分析した。図５は、ノルマルヘキサンで抽出された物質（いわゆる油脂）について、シリカゲル TLC という方法によって、どのようなものがあるかを調べたもので、左から、スイカ、トウガラシ（パプリカ）、キンカン、ネギ、トウモロコシの結果を示している。なお、図５の一番左は、キャノーラ油（室温で半年以上放置したので、新鮮な油ではない）を対照試料として使用した結果を示している。図５を上下に眺めた時、中央より少し上の茶色い大きなスポット（黒の矢尻で示しているところ）は、トリグリセリドである。また、中央より下側には様々なスポットが検出されている。緑の矢尻で示しているところは、脂肪酸のスポットである。このトウモロコシで顕著に検出されたスポットは、何らかの理由でトリグリセリドが分解して遊離した脂肪酸と思われる。以上の結果から、種子に含まれるノルマルヘキサンの抽出物のほとんどはトリグリセリドで、その他に少量の脂溶性成分が含まれていることが分かった。

図６は、園芸用種子や青果物中の種子から調製したノルマルヘキサン抽出物を試料として、その脂肪酸組成を分析した結果を示している。なお、この実験結果は、当研究室４年生の高寺忠俊さんによって得られたものである。上からリノール酸の割合が多い順に並べている。エンドウ以外は、リノール酸が最も多かった。エンドウでは、パルミチン酸の割合は 13.4%、オレイン酸の割合は 41.9%、リノール酸の割合は 33.2%であり、

図３で示したコメ油（米糠油）とよく似ていた。なお、ヒトの体に有害な脂肪酸成分を含む種子は、今回した調べた試料の中には見つからなかった。つまり、ブドウやスイカの種をよく噛んで飲み込んでも（そんな人はあまりいないと思うが‥)、脂肪酸に関する限り、健康に悪い影響は与えないと思われる。

以上述べてきたように、植物の種子に含まれる不飽和脂肪酸はオレイン酸やリノール酸が主なもので、紫蘇、亜麻、荏胡麻などの種子は例外として、α－リノレン酸は少ないことが分かる。α－リノレン酸は、リノール酸を原料にして、新たに図２のリノール酸の左端から数えて３番目と４番目に二重結合を導入する酵素の働きによってつくられる。この酵素は、植物の緑葉では普通に存在し活発に働いているが、なぜか種子において、（紫蘇、亜麻、荏胡麻の種子などの例外を除いて）ないかその働きが非常に弱い。今後、種子において、α－リノレン酸の含量を増加させる学術的研究はあると思うが、ハイオレイック（高オレイン酸）化の研究開発のような潮流、すなわち「ハイリノレック（高α－リノレン酸）」化の研究開発についてはないと思っている。「私たちは毎日、緑黄色野菜からα－リノレン酸を摂取し、さらに魚からも n-3 系脂肪酸をとっているので、十分である」と著者は考えるからである。

参考文献

１.「日本人の食事摂取基準（2020 年版)」策定検討会報告書　脂質
https://www.mhlw.go.jp/content/10904750/000586558.pdf

２. 市原謙一「脂肪酸分析は意外と簡単」生物工学 90, 89-92 (2012)

３. GC（ガスクロマトグラフ）とは？
GC 分析の基礎 ：株式会社島津製作所
https://www.an.shimadzu.co.jp/gc/support/faq/fundamentals/gas_chromatography.htm#gc_1_1

4．塩田誠「キャピラリーガスクロマトグラフ法によるトランス脂肪酸定量技術」日本調理科学会誌 48, 229-238 (2015)

5．和田俊、白井展也　「脂肪酸分析の実際」日本油化学会誌 47, 937-225(1998)

6．Ichihara, K., Fukubayashi, Y., Preparation of fatty acid methyl esters for gas-liquid chromatography. J. Lipid Res., 51, 635-640(2010)

7．日本食品標準成分表 2015 年版（七訂）　脂肪酸成分表編
第 2 章 第 2 表 14 油脂類
https://www.mext.go.jp/component/a_menu/science/detail/__icsFiles/afieldfile/2015/12/24/1365494_3-0214-2.pdf

8．Liu, L, Lassonova, D., High-oleic canola oils and their food applications (aocs.org, 2012)
https://www.aocs.org/stay-informed/inform-magazine/featured-articles/high-oleic-canola-oils-and-their-food-applications-september-2012?SSO=True

9．山守誠　「国内外のナタネ育種の現状　－脂肪酸組成の改良を中心として－」オレオサイエンス 6, 189-194 (2006)

10. 高井胖、穴井豊昭　「新規の脂肪酸組成を持つダイズ油の突然変異による改良」6, 195-203 (2006)

11. Napolitano, E.G., Ye, Y., Cruz-Hernandez, C., Chemical Characterization of a High-Oleic Soybean Oil. J. Am. Oil Chem. Soc. 95,

583-589 (2018).

12. Dowd, K.M., McCarty Jr., C.J., Shockey, J., Jekins, N.J., Registration of four upland cotton germplasm lines with elevated levels of seed oil oleic acid. J. Plant Regist 14, 64-71 (2020)

13. 笹田怜子、松本絵美、小泉千嘉、吉岡美子、長坂慶子「エゴマ油を揚げ油として利用するための検討」岩手県立大学盛岡短期大学部研究論文集 14, 1-9 (2012)

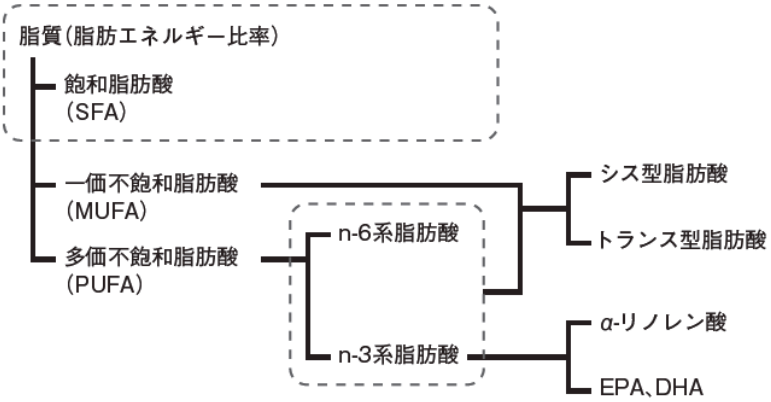


図１　脂質とその構成

点線で囲んだ４項目について基準を策定した。

出典：厚生労働省ホームページ

（https://www.mhlw.go.jp/content/10904750/000586558.pdf）

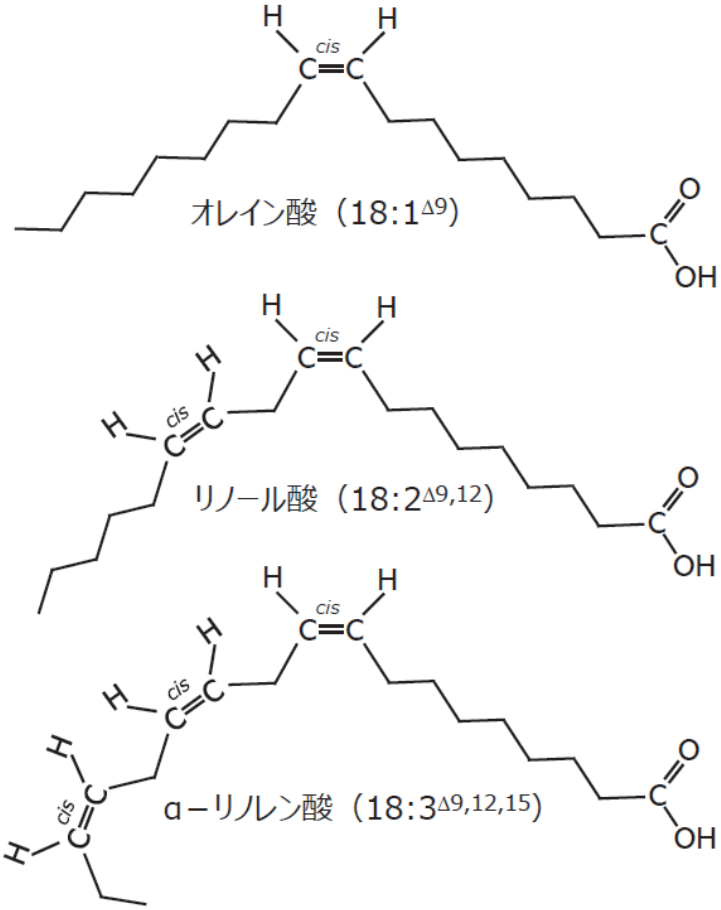


図２　食用植物油に含まれる不飽和脂肪酸の構造

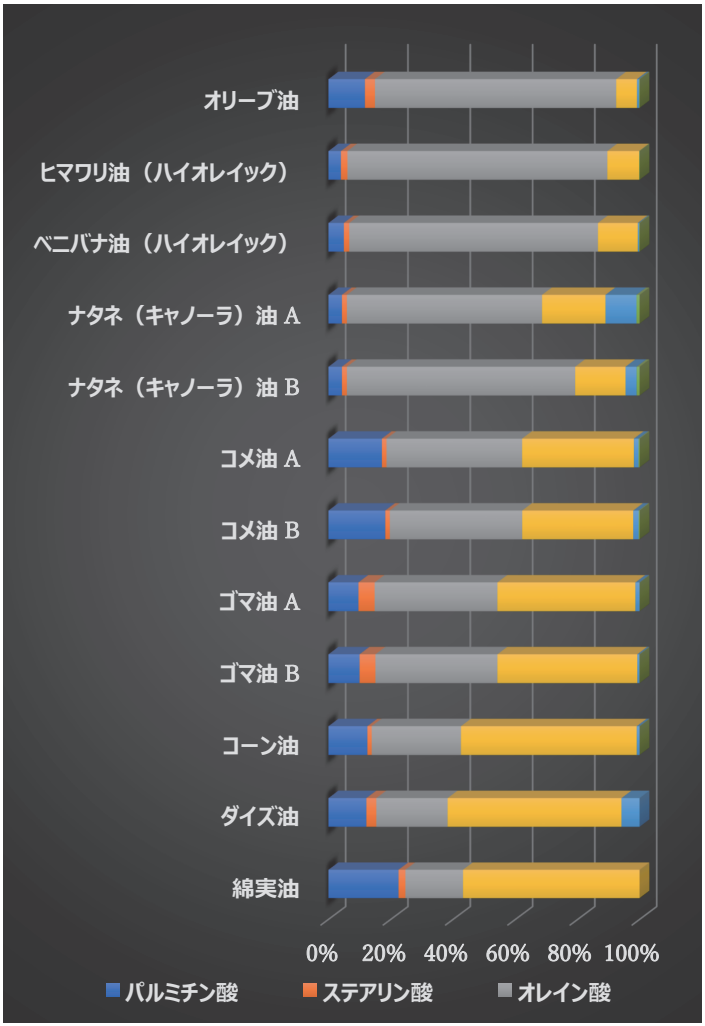


図 3 市販の食用植物油に含まれる脂肪酸の組成

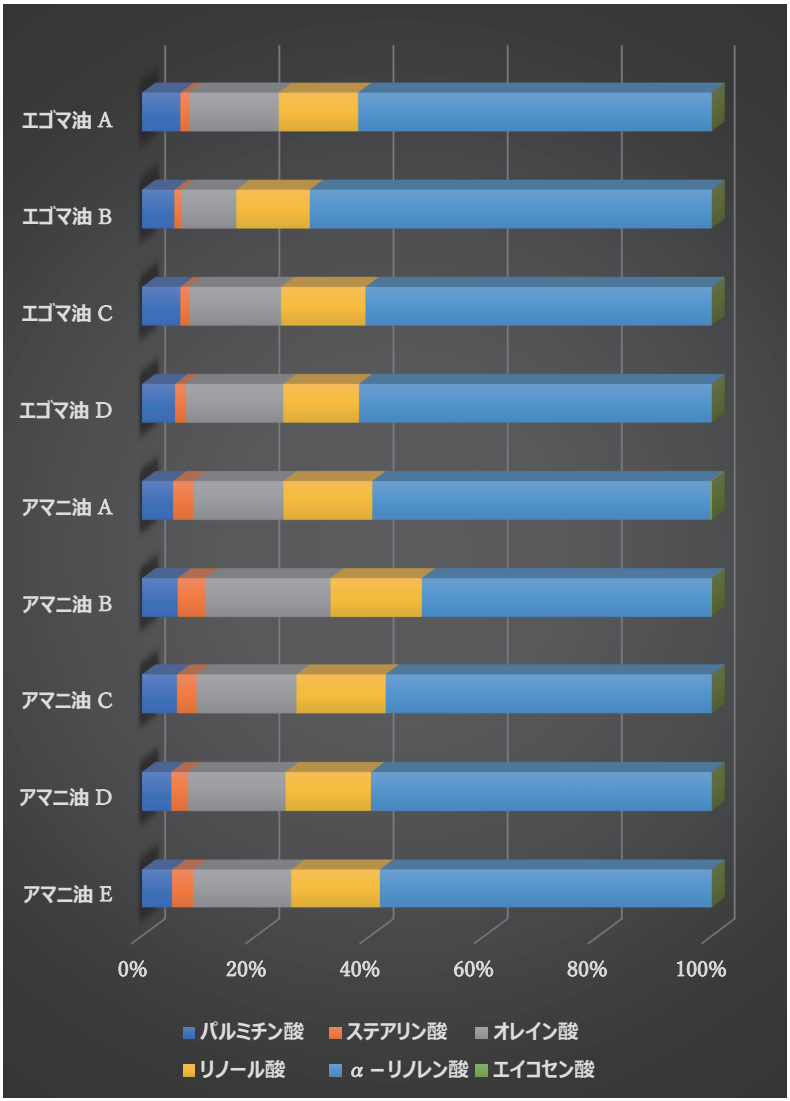


図４市販の食用エゴマ油及び食用アマニ油に含まれる脂肪酸の組成

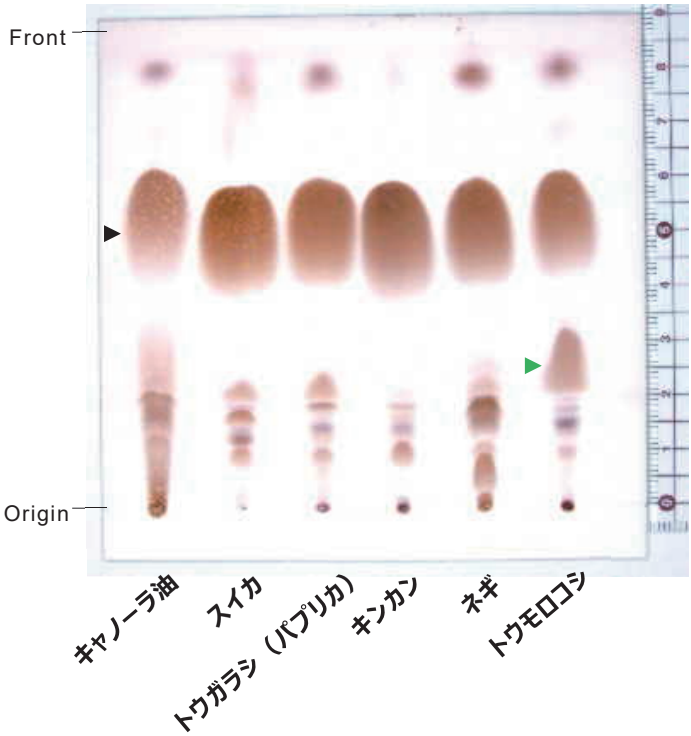


図５　園芸用種子や青果物中の種子におけるノルマルヘキサン抽出物の脂質組成

シリカゲル TLC（ノルマルヘキサン/ジエチルエーテル/酢酸＝80:20:1 で展開）

左から、キャノーラ油（対照試料）、スイカ、トウガラシ（パプリカ）、キンカン、ネギ、トウモロコシ。

黒の矢尻は、トリグリセリドのスポット、 緑の矢尻は、脂肪酸のスポットを示している。

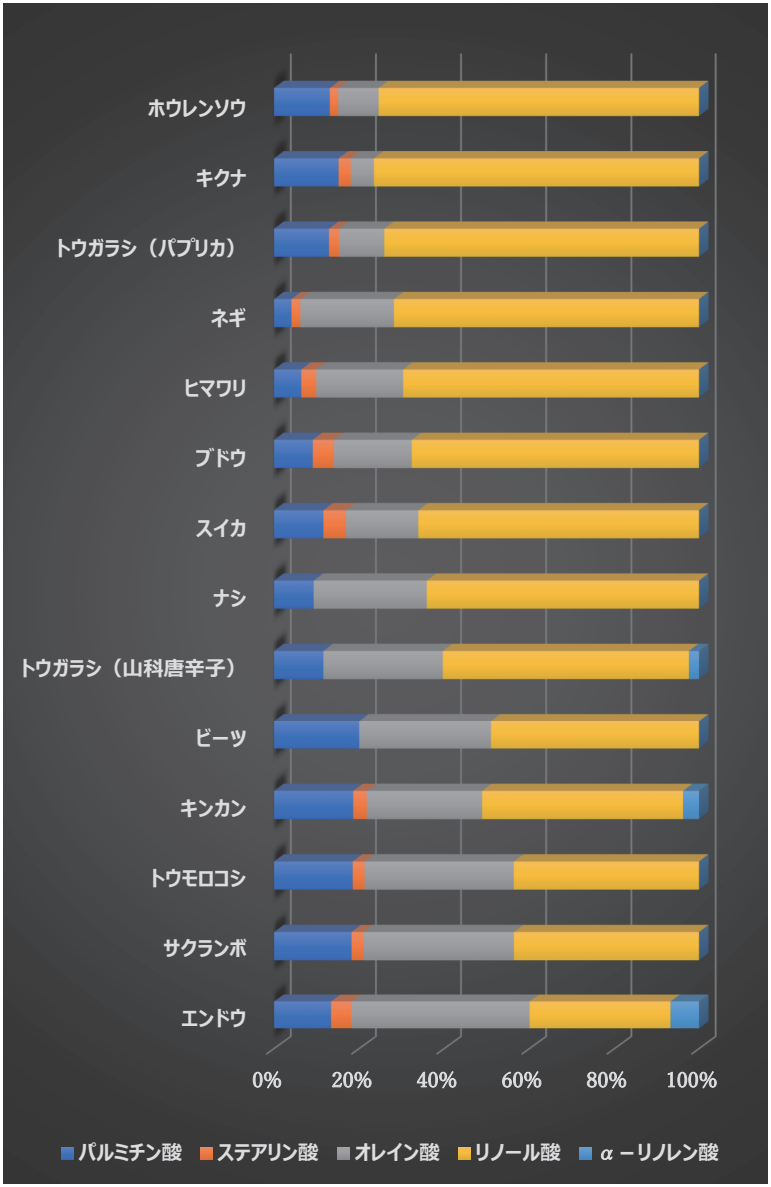


図６　園芸用種子や青果物中の種子におけるノルマルヘキサン抽出物の脂肪酸組成

研究者紹介（執筆順）

鳴　海　邦　匡　（甲南大学文学部教授）

中　辻　　亨　（甲南大学文学部教授）

田　中　　保　（徳島大学大学院社会産業理工学研究部教授）

本　多　大　輔　（甲南大学理工学部教授）

今　井　博　之　（甲南大学理工学部教授）

2021年（令和3年）3月31日　発行

甲南大学総合研究所

神戸市東灘区岡本8丁目9番1号　（〒658-8501）

（非売品）