

ゴマ種子中のセサミン・セサモリン含有量の変動要因解析と 高含有品種の育成および脂質代謝における機能性評価

安本知子*

抄 録

セサミンおよびセサモリンはゴマ種子中に含まれる脂溶性リグナン類の一種であり、生体内で様々な機能性を持つ微量成分であることが報告されている。そこで、機能性成分セサミンおよびセサモリン含有量の向上を目的として育種を進めるため、これらの成分の分析法を検討し、分析時間の短縮、抽出法の改良、試料調製法の改良を行い、選抜操作に適用可能な高速液体クロマトグラフィーを用いた迅速分析法を開発した。また、ゴマ種子中における両成分含有量の登熟に伴う変動特性を解析し、播種時期が異なっても登熟期間が揃った開花後30日目頃の蒴果の種子でセサミンおよびセサモリンの含有量の系統間における差異は最大となることから、その種子を用いて含有量を評価できることを明らかにした。さらにセサミンとセサモリンの含有量の遺伝様式をこれらの含有量に特徴のある系統間の雑種後代を用いて解析し、 F_2 世代での成分含有量に対する選抜が有効であることを明らかにした。これらの結果をもとにセサミンおよびセサモリン含有量が多い南中国原産の系統「H65」と収量性に優れたペルー原産の大粒系統「TOYAMA016」を交雑し、系統育種法により新品種「ごまぞう」を育成した。「ごまぞう」はセサミンおよびセサモリン含有量が関東地方で栽培されている金ごま在来品種の「真瀬金」に比べて栽培年次、栽培地、収穫時期に因らず安定して高く、収量性にも優れていた。また、生体内での脂肪酸代謝酵素活性の向上効果が在来品種「真瀬金」に優ることを動物実験により実証した。ゴマの高リグナン含有新品種は、健康機能性をアピールできる地域特産品などの素材として新たな需要の創出に繋がると考える。

キーワード：ゴマ、育種、「ごまぞう」、セサミン、セサモリン、機能性

平成19年9月10日受付 平成20年2月8日受理

*現 中央農業総合研究センター

Factors affecting variation in the sesamin and sesamolin contents of sesame (*Sesamum indicum* L.) seeds, breeding of a new lignan-rich sesame cultivar and evaluation of the functionality of the seeds in fatty acid metabolism

Satoko YASUMOTO*

Abstract

Sesamin and sesamolin, oil-soluble lignans in sesame seeds, exhibit antioxidative activity *in vivo* and show various metabolic functions. A high-lignan-content sesame cultivar could promote new demand as a local special crop and revive domestic production in Japan.

High Performance Liquid Chromatography analysis was used to detect the sesamin and sesamolin contents in seeds with some modifications to enable easy screening of hundreds of samples. The sesamin and sesamolin contents changed with seed maturity and were highest in the capsules at 30 days after flowering, clearly showing large genetic diversity among cultivars. The sesamin and sesamolin contents are proved to be inherited characters by genetic analysis. A new sesame cultivar "Gomazou" was bred from the progeny of a cross combination between "Toyama 016", a large seed line from Peru and "H65", a high-lignan-content line originated in southern China. "Gomazou" stably contains roughly twice as much lignan as "Masekin", a high yielding cultivar endemic to Kanto region. A physiological activity test on fatty acid oxidation in rat liver showed that "Gomazou" affected lipid metabolism more profoundly than the control cultivar, "Masekin".

Key Words: sesame, *Sesamum indicum* L., breeding, "Gomazou", sesamin, sesamolin, functional property

Accepted 8 February, 2008

* National Agricultural Research Center

目 次

I	緒言	30
II	ゴマ種子中に含まれるセサミンおよびセサモリンの迅速分析法の開発	31
1	分析時間の短縮	32
2	抽出法の改良	33
III	セサミンおよびセサモリン含有量の変動特性の解析と評価法の確立	36
1	個体内におけるセサミンおよびセサモリン含有量の変動	36
2	種子の登熟に伴うセサミンおよびセサモリン含有量の変動	38
3	成分特性の評価のためのサンプリング法の確立	39
IV	セサミンおよびセサモリン含有量の遺伝変異と遺伝	41
1	セサミンおよびセサモリン含有量の遺伝変異	42
2	セサミンおよびセサモリン含有量の遺伝解析	43
V	セサミンおよびセサモリン高含有品種「ごまぞう」の育成と成分含有量の変動	46
1	セサミンおよびセサモリン高含有量「ごまぞう」の育成とその成分の特性	46
2	「ごまぞう」における栽培年次による成分含有量の変動	47
3	「ごまぞう」における栽培地による成分含有量の変動	47
4	「ごまぞう」における収穫時期による成分含有量の変動	48
VI	セサミンおよびセサモリン高含有品種の機能性評価	50
VII	総合考察	53
1	ゴマ種子に含まれるリグナンの機能性	53
2	機能性成分に関する育種と機能性農産物の展望	55
	謝辞	56
	引用文献	57

I 緒 言

ゴマ (*Sesamum indicum* L.) はゴマ科ゴマ属の一年生草本で、天平時代にはすでに西日本の各地で栽培されていた記録が残されている古い作物である (小林 1986)。ゴマ属の種多様性はアフリカのサバンナに見出されているが (小林 1986)、栽培ゴマの地理的起源はインドが示唆されている (Dorothea 2003)。

現在、日本国内のゴマ栽培は自家用が中心で、農家あたりの平均栽培面積は10アールに満たない (農林水産省生産局特産振興課 2003)。高品質なゴマに対する国産志向の高まりからゴマ栽培が見直され、一部の地域ではゴマ食品業者との契約栽培が始まり、新規作物としてゴマを導入したいという農家からの要望も年々増加しているが、国産ゴマの価格は輸入ゴマの10倍以上となるため、実需者からの需要は限定されている (財務省貿易統計局 2003)。

近年、食品科学や生化学的な分野において食品としてのゴマに関する研究は急速に進展し、種子に含まれるリグナン類に関する機能性が報告されている。リグナン類には水溶性と脂溶性があり、水溶性リグナン類としてはリグナン配糖体、中でもセサミノール配糖体やピノレシノール配糖体が多く存在している。セサミノール配糖体はゴマを摂取した後に腸内細菌の働きで抗酸化性を有するセサミノールを生成し、肝臓や腎臓で過酸化脂質の生成を抑制する効果や (Kang *et al.* 1998)、動脈硬化抑制効果 (Kang *et al.* 1998) などの機能性が報告されている。また、ピノレシノール配糖体はそれ自身が抗酸化性を有しているものもあるが、腸内細菌の持つβグルコシダーゼの働きで抗酸化性を示すようになるものもあり、脂溶性リグナン類とともに機能性が期待されている。一方、脂溶性リグナン類、中でもセサモリンはゴマ油の酸化防止に関与するセサミノールの前駆物質であることが古くから報告されているが (Fukuda *et al.* 1986)、セサモリンから生成されるセサミノール

に DNA の酸化障害抑制効果 (Kang *et al.* 1998) も報告されている。また、セサミンについてはそれ自身の抗酸化性はないが、生体内で肝臓や血清でのコレステロール吸収および合成阻害効果 (Hirose *et al.* 1991) やエタノールにより上昇した血中のトランスアミナーゼ活性 (GOT や GPT) を改善する効果 (Akimoto *et al.* 1993)、コレステロールの吸収や合成を阻害する効果 (Hirata *et al.* 1996) などに機能していることが報告された。このような研究の進展に伴い、ゴマは種子の約50%と含油量の多い油料作物であると共に、その油は酸化安定性に優れた植物油脂であり、また種子は前述の機能性を有するリグナン類を含む食品として広く認識され、高い付加価値の期待できる作物として注目されるようになってきている。

本研究では高い機能性が期待できるゴマ品種を育成するため、種子中のリグナン類の中でも含有量の多いセサミンおよびセサモリンに着目し、まず育種における選抜に適用できる両成分の含有量の分析法及び評価法を確立した。この分析法、評価法により多数のゴマ遺伝資源のセサミンおよびセサモリン含有量を評価し、高含有量遺伝資源を特定した。そして、交雑育種法を用いて、日本での栽培条件に適し、かつこれらの成分含有量の多いゴマ新品種「ごまぞう」を育成した。さらに、「ごまぞう」を用いた栽培試験でセサミンおよびセサモリン含有量の安定性を評価するとともに、動物実験により同品種の健康機能性を実証したものである。

Ⅱでは、比較的毒性の低い溶媒を用いて育種素材の選抜に適用できるセサミンおよびセサモリンの簡便な抽出操作や分析法の改良を行った。

Ⅲでは、セサミンおよびセサモリン含有量が変動する要因を解明し、両成分含有量の品種・系統間変異の効率的かつ的確な評価法を確立した。

IVでは、セサミンおよびセサモリン含有量が多い品種を育成するため、ゴマ遺伝資源におけるこれらの含有量の遺伝変異を調査するとともにその遺伝解析を行い、世代間相関から成分特性についての選抜が可能かどうかを検討した。

Vでは、新たに育成したセサミンおよびセサモリン含有量が多く、収量性の高いゴマ品種「ごまぞう」を用いて、異なる栽培年次、栽培地、収穫時期の収穫物について成分特性の安定性を検討した。

VIでは、「ごまぞう」種子をラットに摂食さ

せ、脂質代謝に関する酵素活性などの変化を調査して生体内における機能性を評価した。

本研究は1991年から2005年にかけて作物研究所畑作物研究部資源作物育種研究室（旧農業研究センター作物開発部資源作物育種研究室 茨城県つくば市）において行ったもので、すでに公表したもの（Shirato-Yasumoto *et al.* 2001、安本ら 2003、Shirato-Yasumoto *et al.* 2003、安本ら 2005）も含め東北大学学位論文としたものである。

Ⅱ ゴマ種子に含まれるセサミンおよびセサモリンの迅速分析法の開発

リグナン類は、構造的に類似した2次代謝物質の総称で、ベンゼン環（C6）とこれに結合した3つの炭素鎖（C3）が一つの単位となっている構造を基本とし、このC6-C3単位が2または3単位結合した化合物のグループである（図1）。植物界に微量成分として広く存在しているが（MacRae *et al.* 1984）、ゴマ種子には比較的多量に存在し、特にセサミンとセサモリンが多いことが知られている（Budowski *et al.* 1951、Budowski 1964）。

リグナン類については、Tocher (1893) がゴマ油から氷酢酸とアルコールを用いて初めてセサミンを抽出した。その後、Budowski *et al.* (1951) がゴマ種子から抽出した油におけるセサミンとセサモリンの含有量を紫外光の吸光度によって測定する方法を報告し、近年では高速液体クロマトグラフィー（HPLC）による分析が一般的になっている（福田ら 1988、武田ら 1997）。

しかし、従来のHPLC分析では1試料あたりの分析に約30分を要し、多数の試料の分析は難しかった。また、試料の抽出にクロロホルムやメタノール、エーテルなどの有機溶媒を用いるため、抽出乾固後に再溶解を行うなどの操作が必要であり（福田ら 1988、武田ら 1997）、試料の調製が煩雑であった。

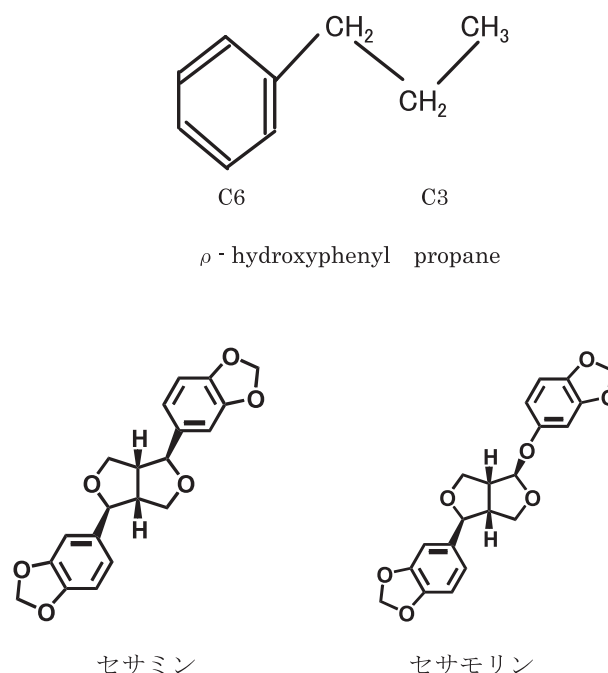


図1 リグナン類の基本的化学構造とセサミンおよびセサモリンの構造式

育種における選抜を目的として成分分析を行うためには、多数の試料を簡便に分析できる手法の開発が必要である。そこで、毒性の低い抽出溶媒を検討するとともに、抽出操作の簡便化および分析時間の短縮を行い、育種選抜に適用可能な迅速分析法を開発した。

1 分析時間の短縮

従来の方法では、カラムに Develosil ODS-10 4.6mm i.d. ×150mm (野村化学、愛知) を用い、メタノール：水 (70：30 (v/v)) を移動相とした HPLC 分析によってセサミンとセサモリンの検出が行われてきた (福田ら 1988)。しかし、この方法では1試料の分析に約30分を要し、多数の試料を分析するのは困難であった。そこで、1試料あたりの分析時間を短縮するため、分析条件を検討した。

1) 材料および方法

セサミン (サントリー(株)より分譲) およびセサモリンの精製物 (東北大学農学部農薬化学研究室杉山長美教授より分譲) を100%メタノールに溶解して、標準液 (各4 mg/ml) を調製した。

Nova-Pack C₁₈ 8mm i.d. ×100mm カラム (Waters 社、東京) を装着した HPLC システムに20μl の試料を注入し、Waters470走査蛍光検出器 (Waters 社、東京) を用いて両成分を検出した。メタノール：水 (70：30 (v/v))、80：20 (v/v) および90：10 (v/v)) を移動相として流速2 ml/min. でクロマトグラムにおけるセサミンおよびセサモリンの分離と分析時

間を検討した。

2) 結果および考察

メタノール：水 (90：10 (v/v)) を移動相に用いた場合、セサミンのピークは2.5分、セサモリンは2.8分に検出された。しかし、両成分のピークは分離が不十分で、正確な定量ができなかった。メタノール：水 (80：20 (v/v)) を移動相に用いた場合には、2つの成分は十分に分離して測定が可能であり、ピークの検出時間は、セサミンが約4分、セサモリンは約5分であり、約6分で分析を完了することができた (図2)。メタノール：水 (70：30 (v/v)) ではメタノール：水 (80：20 (v/v)) よりも2つの成分は明瞭に分離できたが、ピークの検出時間がセサミンが約8分、セサモリンで約12分と長くなった。

以上の結果から、2つの成分の正確な定量ができ、しかも検出時間が比較的短い移動相はメタノール：水 (80：20 (v/v)) であった。

これまで用いられてきたセサミンおよびセサモリンの HPLC 分析 (福田ら 1988) では、1試料の分析に30分近い時間を要していた。本実験では、メタノール：水 (80：20 (v/v))、流速2 ml/min. を移動相にすることで、2成分を正確に定量し、分析時間を約6分に短縮することができた。

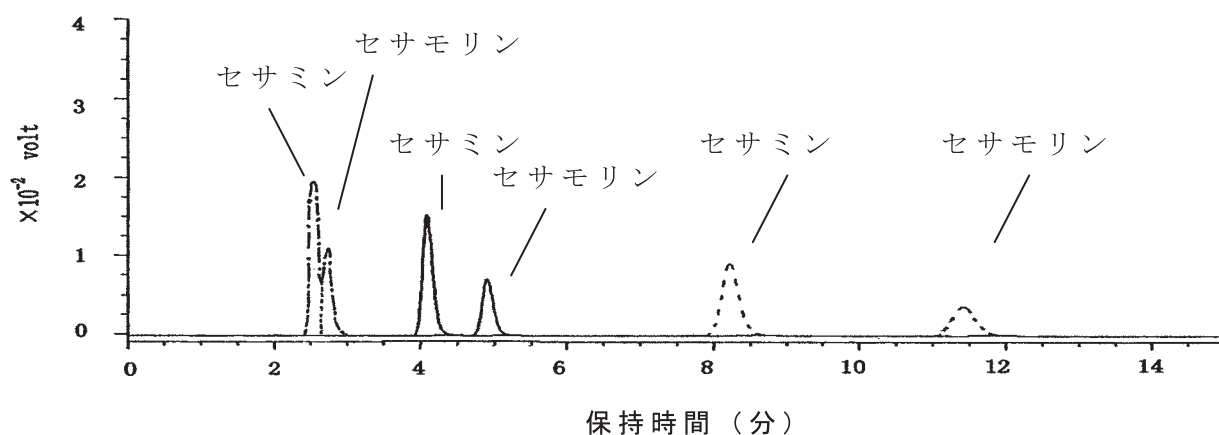


図2 濃度の異なる移動相における標準試料のクロマトグラム

カラムは Nova-Pack C₁₈ 8mm i.d. ×100mm を用いた。走査蛍光検出器 (Waters 470) を用い、Ex. 280nm, Em. 340nm で測定した。流速は2 ml/min. とした。--- 水：メタノール (10：90 v/v) 混液、—— 水：メタノール (20：80 v/v) 混液、- - - 水：メタノール (30：70 v/v) 混液を示す。

2 抽出法の改良

セサミンやセサモリンは脂溶性であり、その抽出には有機溶媒が用いられる。これまでクロロホルムとメタノールの2：1混合液で3回抽出し、溶媒を除去した後にメタノールに再溶解し、HPLCで分析する手法（福田ら1988）や、エーテルで抽出した後溶媒を除去し、酢酸エチルに再溶解した試料をフィルター濾過してHPLCにより分析する方法（武田ら1997）などが報告されている。しかし、いずれの手法もクロロホルムやエーテルなどの毒性のある溶媒を用いることや、濾過などの操作の煩雑さに問題があった。

そこで、本節では、多数の試料を処理する抽出溶媒として比較的毒性の低いエタノールを検討するとともに、セサミンやセサモリンの簡易抽出に適した抽出回数や必要種子量、試料調製法を検討した。

1) 材料および方法

(1) 供試材料

茨城県つくば市の中央農業総合研究センター観音台圃場で採種し自然乾燥した「真瀬金」または「関東1号」の種子を用いた。

(2) 抽出溶媒

70%、80%、90% (v/v) エタノールおよびクロロホルム：メタノール（2：1 (v/v)）混液の4種類の抽出溶媒を用いた。

「真瀬金」の種子100mgを10mlの抽出溶媒とともに30秒間ホモジナイザー（ヒスコトロンNS-51、マイクロテック・ニチオン、千葉）により摩砕し、31,000×gで遠心後、上清を回収した。残渣に10mlの溶媒を加え、摩砕と遠心、上清の回収をさらに2回繰り返し、3回の抽出液を混合した液をHPLC分析に供試し、セサミンおよびセサモリンを測定した。実験は3反復で行い、分散分析により溶媒間における分析値の差の有意性を検定した。

(3) 抽出回数

80% (v/v) エタノールとクロロホルム：メ

タノール（2：1 (v/v)）混液の2種類の溶媒を用いて、「真瀬金」の種子100mgの抽出を行った。抽出回数を1回、2回、3回とし、それぞれの抽出回数毎に2成分の含有量を測定した。3回抽出の含有量を100とし、1回抽出、2回抽出の抽出率を百分率で表した。*t* 検定により抽出率を比較した。

(4) 試料種子量

「関東1号」を用いて、種子量を10mg、50mg、100mg、200mgとし、80% (v/v) エタノール（10ml）による抽出操作を3回繰り返した。3回の抽出液を混合した試料でHPLC分析を行い、種子重あたりのセサミンおよびセサモリンの含有量を測定した。各種子量につき10反復で実験し、種子量間で分析値を分散分析した。

(5) 試料調製法

「関東1号」の種子50mgを用いて、80% (v/v) エタノール（10ml）で抽出操作を2回行い、抽出溶媒を回収後乾固し、メタノールに再溶解してメンブレンフィルターを通し、HPLC分析用試料とした。また、同種子50mgに80% (v/v) エタノール（10ml）による抽出操作を2回行い、抽出回数毎に抽出液に遠心分離を行い回収した上清を合わせてHPLC分析用試料とした。

2) 結果および考察

抽出溶媒と抽出回数を検討した結果、70% (v/v)、80% (v/v)、90% (v/v) のエタノール、およびクロロホルム：メタノール（2：1 (v/v)）混液で抽出したセサミンおよびセサモリン含有量の間に有意な差は認められなかった（表1）。

80% (v/v) エタノールによる抽出では、クロロホルム：メタノール（2：1 (v/v)）混液に比べて1回目の抽出率が有意に低かったが、2回目以降には、どちらの溶媒でもほぼ同程度のセサミンおよびセサモリンが抽出されており、溶媒間で抽出率に有意な差は認められなかった（図3）。

以上の結果から、80% (v/v) エタノールの場合は2回の抽出操作によって、既報で使用さ

表1 抽出溶媒によるセサミンおよびセサモリン分析値の変動

溶媒 (%)	セサミン (mg/g)	セサモリン (mg/g)
70% (v/v) エタノール	3.5±0.0	2.5±0.1
80% (v/v) エタノール	3.6±0.1	2.5±0.1
90% (v/v) エタノール	3.6±0.1	2.4±0.1
C+M 2:1*	3.4±0.1	2.4±0.2
	n. s.	n. s.

試料種子 (真瀬金100mg) を溶媒10ml とともに30秒間磨砕し、遠心後上澄を回収する操作を3回繰り返した。表中の値は平均値±標準偏差を示す。n=3。

* C+M 2:1*はクロロホルム:メタノール (2:1 (v/v)) 混液を示す。n. s. は分散分析の結果、分析値に有意差が無いことを示す。

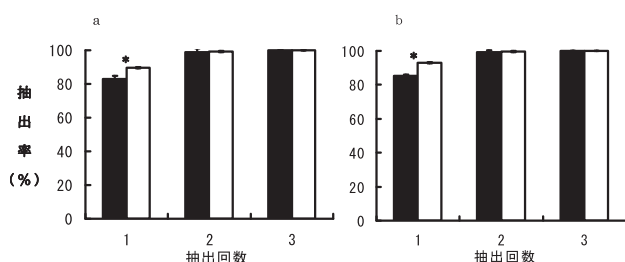


図3 抽出回数による抽出率の変動

a: セサミン b: セサモリン

■: 80% v/v エタノール □: クロロホルム:メタノール (2:1 v/v) 混液。n=10。抽出率 (%) は、抽出回数3回の分析値を100とした相対値で表す。*: 分散分析の結果、5%水準で有意な差があることを示す。

れたクロロホルム:メタノール (2:1 (v/v)) 混液による抽出とほぼ同等の効率でセサミンおよびセサモリンを抽出できることが明らかになった。

つぎに試料種子量について、セサミン含有量は試料に用いた種子量間で有意な差は認められなかったが、セサモリン含有量は種子量10mg および50mg で約3 mg/g と高く、種子量100mg および200mg では約2.6mg/g であり、前者より有意に低かった。一方、標準偏差は種子量10 mg で最も大きく、次に種子量50mg が大きかった (図4)。

ゴマの平均的な1粒重は2 mg 程度であることから、試料種子10mg では5粒前後で分析することになる。5粒程度の少数では種子間の含有量のばらつきが大きいため測定値の標準偏差が大きくなったと考えられる。一方、種子量100 mg や200mg では含有量の標準偏差は小さかったが、種子量50mg を用いたときよりセサモリンの抽出率が有意に低かった。したがって育種

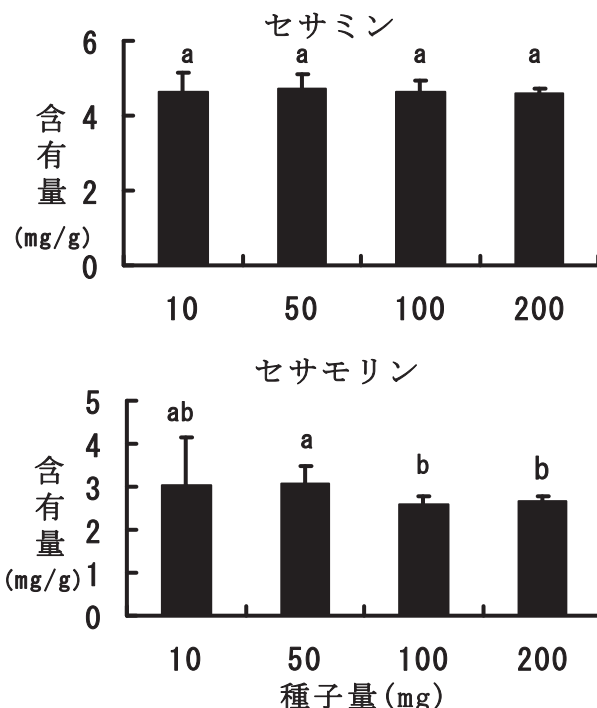


図4 セサミンおよびセサモリン含有量の測定値と試料種子量の関係

試料種子は関東1号。抽出は80%エタノールで3回繰り返した。異なる文字は5%水準で有意な差があることを示す。n=10。

表2 異なる抽出試料調製法によるセサミンおよびセサモリン分析値

調整法	セサミン (mg/g)	セサモリン (mg/g)
メンブレンフィルター	4.5±0.3	2.5±0.1
遠心分離	4.7±0.1	2.7±0.2
	n. s.	n. s.

表中の値は平均値±標準偏差を示す。n=3。

における選抜を考慮すると、測定に用いる種子量としては、高い分析値が得られた50mg を用いることが妥当であると結論した。

試料調製法について、従来法では抽出液を乾固後再溶解して HPLC 分析の試料としていたが、本法では50mg の種子を80% (v/v) エタノール (10ml) とともにホモジナイザーで摩砕後、遠心によって上清を回収する操作を2回繰り返す、これを混合した20ml の抽出液をそのまま HPLC 分析の試料として用いることで抽出操作を簡略化した。以上のように操作を簡略化した方法で HPLC 分析を行った結果を表2に示す。その結果、各々の調整法による試料

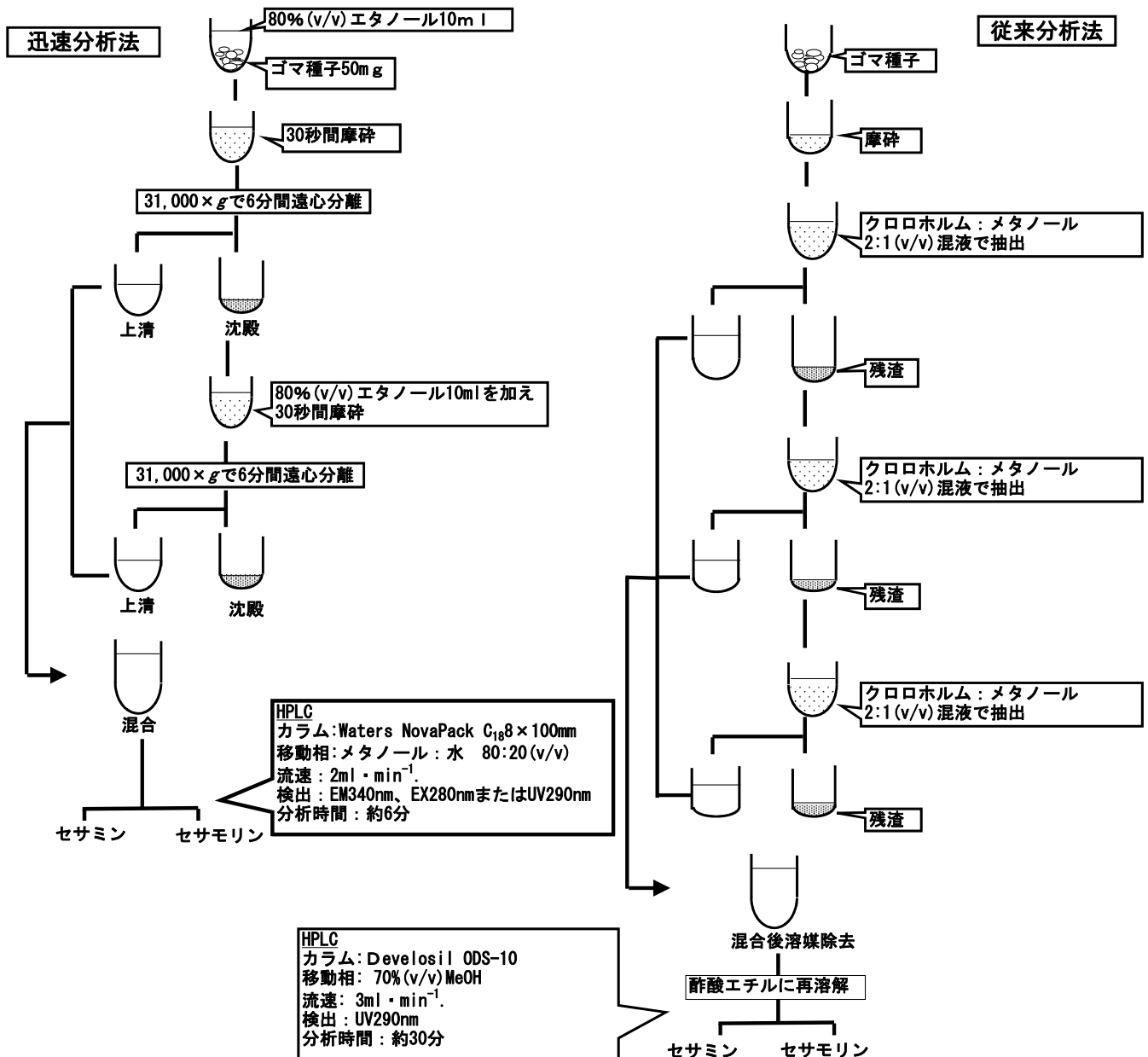


図5 ゴマ種子におけるセサミンとセサモリン含有量の迅速分析法と従来法の比較

の分析結果に有意な差は認められなかった。従って、本分析法により HPLC 分析時間の短縮とともに、分析に要する手間と時間を大幅に簡略化できると結論した。

以上の検討結果に基づいて新しく開発したセサミンおよびセサモリンの迅速分析法を図5に示す (Shirato-Yasumoto *et al.* 2003)。

セサミンやセサモリンを対象とした成分育種を実施するためには、大量の育種素材や系統の

成分含有量の測定が必須である。本法によれば、一日に100点の検体から試料を抽出することが可能である。また、HPLC 分析に要する時間を短縮したことによって、オートサンプラーを使えば1日に100点以上の試料を分析することができる。以上から、ゴマの育種に十分適用できるセサミンおよびセサモリンの迅速分析法を確立できた。

Ⅲ セサミンおよびセサモリン含有量の変動特性の解析と評価法の確立

ゴマ種子のセサミンおよびセサモリンの含有量や油含有量、脂肪酸組成は、同一個体内でも蒴果の着生する節位や節内の着生位置により異なることが知られており (Tashiro *et al.* 1991、Mosjidis *et al.* 1985)、また、一つの蒴果の中でも種子の粒大等に違いがある。これらのことが、種子中のリグナンをはじめとする種子成分の含有量における品種・系統間変異の把握を困難にし、成分の遺伝的改良の効率化を阻む大きな要因となっている。

そこで、Ⅲでは種子中のセサミンおよびセサモリン含有量の品種・系統間変異を効率的かつ的確に把握するための基礎的知見を得ることを目的として、登熟に伴う種子中のセサミンおよびセサモリン含有量の変動を調査するとともに、播種期や開花期の異なる個体から採取した蒴果による成分特性の評価法を検討した。

1 個体内におけるセサミンおよびセサモリン含有量の変動

1) 材料および方法

同一節内での登熟の揃った1節1蒴果型で、早晩性が中生からやや晩生で実用的な栽培が可

能なゴマ5品種を、農業生物資源研究所ジーンバンクに保存されている遺伝資源から選定した。供試したのは、セサミンとセサモリンの含有量が多い愛知県で収集された白ゴマ在来品種 (JP33956およびJP71503、以下農業生物資源研究所ジーンバンク JP 番号で表記)、セサミンとセサモリンの含有量が少ない埼玉県収集の黒ゴマ品種 (JP91486) と茨城県で収集された黒ゴマ品種 (JP71509)、およびセサミンの含有量が多いがセサモリンの含有量は非常に少ないペルー産の白ゴマ品種 (JP80768) である。

これらを農業研究センター (現中央農業総合研究センター) 谷和原畑圃場 (茨城県つくばみらい市) で栽培した。2000年6月14日 (標準播)、6月29日 (晩播) および7月10日 (極晩播) に播種した (図6)。

黒マルチで被覆した畦間140cmの平畦の中央に45cm間隔で2列に4粒から5粒播種した。株間は15cmとし、苗立ち後間引きして1株1本とした。1試験区は3畦6列で1列20株の計120株で構成した。反復は設けず、播種期ごとに供試品種を無作為に配置した。施肥量は $N-P_2O_5-K_2O$ をそれぞれ7-10.5-7 kg/10aとし、全量を基肥として施用した。

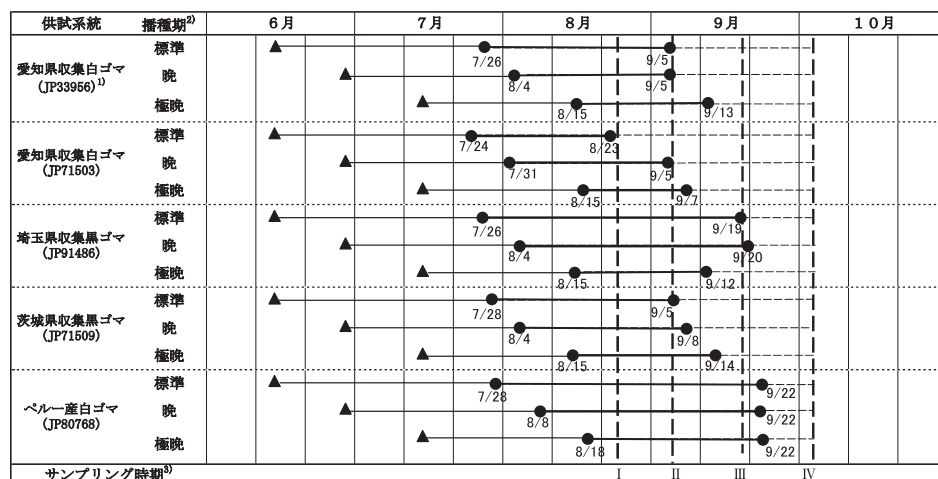


図6 供試系統における播種期ごとの開花期間とサンプリング時期

1) 農業生物資源研究所ジーンバンク保存番号 (JP 番号)。

2) 標準: 6月14日, 晩: 6月29日, 極晩: 7月14日にそれぞれ播種した。▲: 播種, ●: 開花期間。

3) I: 8月24日, II: 9月5日, III: 9月19日, IV: 10月4日に各区から無作為に5個体から採種した。

収穫した蒴果は80℃で24時間熱風乾燥した後脱粒し、蒴果毎に1粒重と成分含有量の分析に供試した。Ⅱで確立した迅速分析法(Shirato-Yasumoto *et al.* 2003)によりセサミンおよびセサモリン含有量を測定した。また、蒴果毎に測定は2反復し、SPSS 11.0J (SPSS 社)を用いて統計処理を行った。

2) 結果および考察

すべての供試品種は標準播区(6月14日播種)で、7月24日から28日までの間に第1花が開花

した(図6)。終花期が早かったJP71503はⅡ(9月5日)に、その他の品種はⅢ(9月19日)に標準播区から調査株を刈取った。各品種で分析に供試した蒴果の開花後日数には、開花の早い下位の蒴果から開花の遅い上位の蒴果の間で25日から31日の違いがあった。

いずれの品種でも開花が遅い上位節の蒴果の種子ほど1粒重が少なく、開花後30~40日を経過した節位で1粒重は最大に達した。これより早く開花した蒴果では1粒重の大幅な変化は認められなかった(図7)。

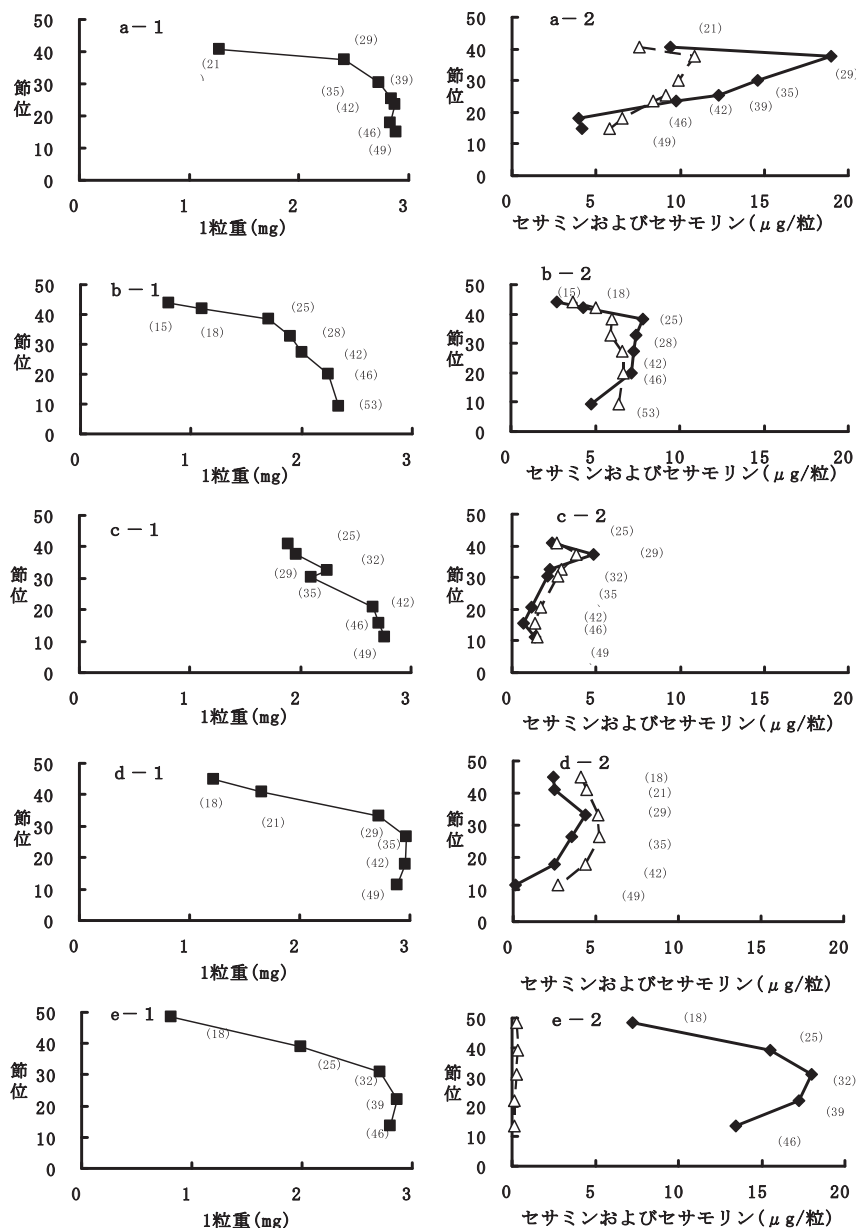


図7 ゴマ1個体内における粒重、セサミンおよびセサモリン含有量の変動

() 内は開花後日数を示す。a: JP33956 (愛知県収集白ゴマ), b: JP71503 (愛知県収集白ゴマ), c: JP91486 (埼玉県収集黒ゴマ), d: JP71509 (茨城県収集黒ゴマ), e: JP80768 (ペルー産白ゴマ)
■: 1粒重 ◆: セサミン △: セサモリン、節位: 地際から子葉節を含めて数えた主茎の節数を示す(植物遺伝資源特性評価マニュアル)。

表3 種子重、セサミンおよびセサモリン含有量の開花後の推移

サンプル名	サンプリング時期				LSD _{0.05}
	I (16)*	II (28)	III (42)	IV (57)	
－1粒重 (mg)－					
JP33956	0.8	2.5	2.9	2.7	0.4
JP71503	0.7	2.1	2.0	2.0	0.4
JP91486	1.0	2.9	2.8	2.8	0.2
JP71509	1.0	1.4	2.9	2.7	0.2
JP80768	0.5	2.4	2.9	2.8	0.1
LSD _{0.05}	0.2	0.3	0.2	0.4	
－セサミン (μg/粒)－					
JP33956	2.2	17.0	10.7	11.4	4.2
JP71503	2.4	8.7	7.4	5.8	1.4
JP91486	2.1	5.4	1.3	0.6	1.2
JP71509	1.3	3.9	1.2	0.7	1.0
JP80768	2.1	19.9	17.0	15.8	1.4
LSD _{0.05}	0.8	2.7	3.0	1.1	
－セサモリン (μg/粒)－					
JP33956	3.8	10.1	8.4	6.8	2.5
JP71503	3.9	7.3	6.7	5.0	1.6
JP91486	1.9	4.4	1.6	1.3	0.6
JP71509	2.3	4.9	4.0	2.6	0.8
JP80768	0.4	0.4	0.3	0.3	0.1
LSD _{0.05}	0.8	2.0	1.1	1.2	

各時期に収穫した株より2000年8月8日に開花、結実した蒴果の種子を測定した。

* () 内の数字は開花後日数を示す。LSD_{0.05}は有意水準5%の品種間の最小有意差を示す。

種子1粒当たりのセサミン含有量は、開花後急速に増加し、開花後25～29日に最大となった後に減少に転じた。特にセサミン含有量の多いJP33956やJP80768では増加が顕著で、同一株内における変動が大きかった。JP33956、JP91486、JP71509のセサモリン含有量とセサミン含有量は同様に变化したが、セサモリン含有量が著しく低いJP80768ではほとんど変動がなかった。また、JP71503のセサミンやセサモリン含有量の減少は緩やかであった(図7)。

ゴマの1個体内には1粒重やセサミンおよびセサモリン含有量の異なる種子が混在している。個体内の成分含有量が均一でないことは、Tashiro *et al.* (1991) や佐藤ら(1999)が報告しており、下位節から上位の節に向かって開花するため、個体内における種子の熟度が不均一であることがその原因と考察されている。ゴマは一日花で、直立した茎の伸長に伴って葉腋に着いた花が下位節から上位節へと順次開花する特性を有している。したがって、着生節が上位の蒴果ほど収穫までの開花後日数は短くなる。

個体内の種子における1粒重やセサミンおよびセサモリン含有量のばらつきを蒴果の開花後日数と対応させて調査したところ、蒴果の開花後日数に対応して大きな差が認められた(図7)。

今回調査した品種は開花後30日頃までは1粒重が増加し、それ以降はほとんど変化がなかった。この結果は、ゴマ種子の成熟過程における乾物重の変化に関する既往の報告と一致しており(菅井ら1989、佐藤ら1999)、ゴマ種子の成熟期は開花後30日から40日頃と考えられる。一方、セサミンとセサモリンの含有量は開花後増加し、種子の肥大が停止する時期より前に最大となり、それ以後は減少するパターンを示した。さらに、開花日とサンプリング日を揃えた試料でセサミンとセサモリンの含有量に品種間差があることが明らかになった(表3)。

2 種子の登熟に伴うセサミンおよびセサモリン含有量の変動

1) 材料および方法

供試材料は1.と同じ品種を用いた。栽培法およびセサミン・セサモリン含有量の測定は1.と同じとした。開花中に、各試験区の中央4列の個体の主茎に開花した花柄に開花日を記したラベルを付した。8月24日から約2週間の間隔で4回のサンプリングを行い、各区より無作為に5個体を刈り取った(図6)。各個体について、開花日のラベルを付けた蒴果の上下各1節の蒴果を合わせて、同じ開花日の試料として取り扱った。

2) 結果および考察

標準播区からサンプリングした4時期(I～IV)の試料で、同一日(8月8日)に開花した蒴果の開花後日数は、それぞれ16日(I)、28日(II)、42日(III)、57日(IV)であった。1粒重は、JP71503とJP91486はIIで、これ以外の3品種ではIIIが最大で、それより後に収穫した蒴果の1粒重に有意な差はなかった。セサミン含有量は、いずれの系統でもIIが最も高く、III以降のセサミン含有量はIIの含有量より有意

に低かった。セサモリン含有量は含有量の極めて少ない JP80768 ではサンプリング時期による有意な差は認められなかった。その他の品種はⅡにおける含有量が最も高く、それ以降は低くなり、サンプリング時期の異なる蒴果の種子における含有量には有意な差が認められた。セサミンおよびセサモリン含有量の品種間変異はⅡ以降の開花後日数が同じ蒴果を比較することで認められた（表3）。

セサミンとセサモリンおよびリグナン類の代謝について、Massuo *et al.* (1998) は放射性同位体を用いた報告をしているが、種子の肥大やセサミンおよびセサモリン含有量の変動と、種子の熟度との関係を検証した報告はなされていない。本節では同じ日に開花した蒴果の種子を開花後16日、28日、42日、57日に採取してセサミンおよびセサモリン含有量を測定した（表3）。1粒重は開花後28日目または42日目の蒴果で最大となり、その後はほとんど変化しなかった。セサミンとセサモリン含有量は開花後日数の経過に伴って増加した後減少した。これらの結果は個体内における1粒重およびセサミンとセサモリン含有量の変動と一致しており、個体内における種子の成分含有量の変化は蒴果の登熟ステージを反映していると結論できる。

このように、種子中の成分含有量は開花後日数に伴って大きく変動するため、供試品種の成分特性を評価する際には、個体内における種子の熟度の違いを考慮する必要があると考えられる。

3 成分特性の評価のためのサンプリング法の確立

1) 材料および方法

供試材料は1.と同じ品種を用いた。栽培法およびセサミン・セサモリン含有量の測定は1.と同じとした。

2) 結果および考察

播種期の異なる3区から9月19日（Ⅲ）に刈り取った株から採取した蒴果の開花後日数と種子あたりセサミンとセサモリン含有量には表4

表4 播種期の異なる区から同一日に刈り取った株における蒴果の開花後日数とセサミンおよびセサモリン含有量の変動

サンプル名	サンプリング時期									
	標準播				晩播		極晩播			
	－開花後日数（日）－									
	最小		最大	最小	最大	最小		最大		
JP33956	21	－	49	16	－	42	14	－	35	
JP71503	20	－	53	20	－	42	25	－	35	
JP91486	23	－	53	21	－	42	25	－	35	
JP71509	18	－	49	14	－	39	14	－	32	
JP80768	18	－	46	18	－	39	21	－	32	
	－セサミン（μg/粒）－									
JP33956	4.56	－	20.31	7.89	－	14.61	0.68	－	22.75	
JP71503	5.70	－	7.72	5.79	－	13.75	5.97	－	9.61	
JP91486	0.24	－	2.47	0.82	－	4.74	0.35	－	5.05	
JP71509	0.01	－	5.50	0.08	－	3.40	0.35	－	4.96	
JP80768	4.76	－	23.37	4.73	－	18.16	11.10	－	20.08	
	－セサモリン（μg/粒）－									
JP33956	5.46	－	11.47	6.20	－	9.57	1.42	－	12.03	
JP71503	5.72	－	8.69	4.96	－	14.77	5.02	－	8.44	
JP91486	1.02	－	3.10	1.94	－	4.33	0.90	－	6.12	
JP71509	2.58	－	5.81	0.43	－	4.83	1.45	－	5.21	
JP80768	0.10	－	0.43	0.34	－	0.74	0.38	－	0.56	

各播種区から2000年9月19日に刈り取った。

に示す範囲でばらつきがあった。図8に播種期が異なる区から採取した蒴果の開花後日数と、種子当たりのセサミンおよびセサモリン含有量の関係を供試品種毎に示す。JP71503とJP91486では両成分含有量の変動が小さく、開花後日数による増減は明らかではなかった。JP33956、JP71509、JP80768では開花後日数が経過するにつれてセサミン含有量が約30日後まで増加し、その後減少した。セサモリン含有量については、JP33956とJP71509で開花後日数が経過するにつれて減少したが、セサモリン含有量の著しく低いJP80768においてはほとんど変化がなかった。両成分含有量の変動幅は成分含有量が多い品種ほど大きい。播種期が異なっても変動パターンに違いは認められなかった。また、成分含有量の変動が小さい品種においても、播種期の違いによってセサミンとセサモリンの含有量が大きく異なることはなかった。

熟期の異なる系統間でセサミンおよびセサモリン含有量を比較するためには、播種期を変えて開花期間を揃える必要がある。そこで、播種期が異なる区から刈り取った個体の蒴果で開花後日数と種子当たりのセサミンとセサモリン含有

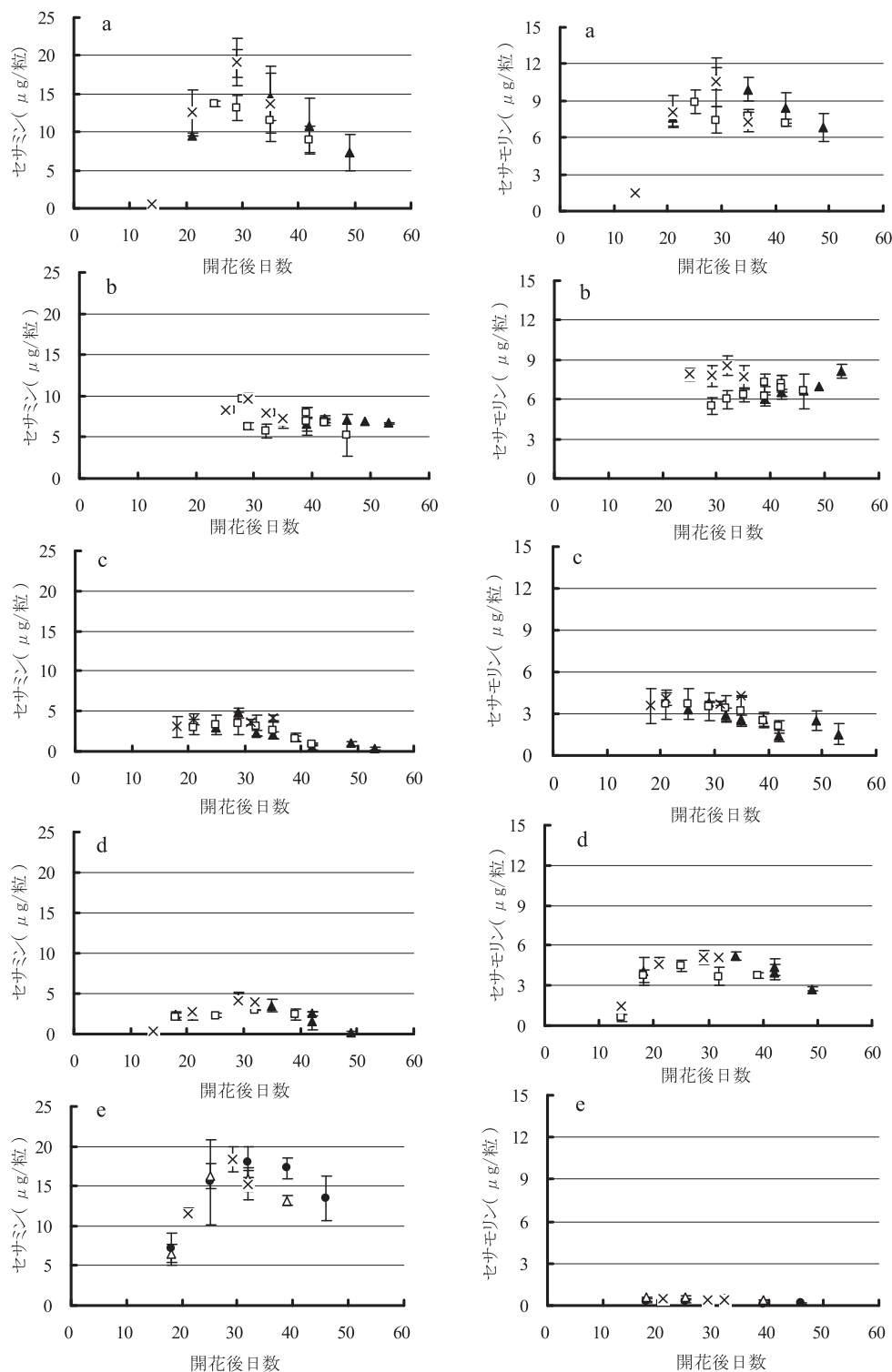


図8 播種期の異なる個体における蒴果の開花後日数とセサミンおよびセサモリン含有量の関係

a : 33956 (愛知県収集白ゴマ), b : 71503 (愛知県収集白ゴマ),
 c : 91486 (埼玉県収集黒ゴマ), d : 71509 (茨城県収集黒ゴマ),
 e : 80768 (ペルー産白ゴマ) 開花後日数が同じ蒴果での平均値。
 縦棒は標準偏差を示す。▲：標準播, □：晩播, ×：極晩播
 各区から9月19日に採取した各品種5株について蒴果毎に種子を分析した。

量を調査した。その結果、それぞれの品種における開花後日数の経過に伴う蒴果毎の成分含有量やその変動パターンに、播種期による違いは認められず、播種期の異なる個体であっても登熟期間が同じ蒴果を採取して種子中のセサミンおよびセサモリン含有量を分析することによって、品種間での含有量の比較が可能であることが明らかになった（図8）。さらに、これらの含有量が最も多くなる時期に品種間の差がより明瞭になることから、開花後30日目前後の蒴果

を採取し、その種子で含有量を評価することが適当であると結論した。

以上、Ⅲでは、ゴマ種子に含まれるセサミンおよびセサモリンについて種子の登熟に伴う成分蓄積パターンと個体内での含有量の変動を明らかにし、熟度の揃った種子で成分含有量の的確な評価が行えることを示した（安本ら 2005）。本知見は、セサミンおよびセサモリン含有量の多い品種育成の効率化に活用できるものと考え

Ⅳ セサミンおよびセサモリン含有量の遺伝変異と遺伝

ゴマ油中のセサミンやセサモリンの含有量については、品種間差（福田ら 1988）があることがすでに報告されているが、Ⅲで明らかになったように種子の登熟過程において含有量が変化すること（安本ら 2005）、また、栽培地が違っていると含有量が異なることが報告されている（Beroza *et al.* 1955）。さらに霜害などによってもこれらの含有量は変化すること（Beroza *et al.* 1955）など、様々な変動要因が報告されている。しかし、このように変動する特性のあるセサミンやセサモリン含有量の遺伝変異や遺伝様式に関する報告はない。

ゴマの特性に関する遺伝研究では、主に収量関連形質が多く検討されてきた。Mansouri *et al.* (1998) はダイアレル分析を行い、草丈、株当り蒴果数、株当り収量、含油率が相加的な遺伝形質であることを報告した。また、Nimbal-kar *et al.* (1999)、Karuppaiyan and Ramasamy (2000) は収量関連形質を研究し、特に株当りの蒴果数の重要性を報告している。Langham (1945a, 1945b) は収量を左右する形質の一つである節あたりの蒴果数や成熟期を判定する指標となる蒴果の着色の難易の遺伝様式に関する報告を行っている。小林 (1977) は蒴果数や早晩性などの収量に関連する形質の遺伝について報告した。Balan *et al.* (1996) は収量と蒴果重、根重、全乾物重との間に強い正の相関を認

め、これらの改善が増収に有効であると報告した。Kamala (1999) は収量に関する形質の遺伝性を調査し、成熟までの日数が遺伝率の高い形質であることを報告した。一方、草丈や分枝性、株当り蒴果数、蒴果当り種子数、千粒重、株当り子実重などの形質の遺伝率は高くないことを報告し、収量や収量構成要素に関する交雑親の組合せ能力の評価を行った。

Baydar *et al.* (1999) は在来品種と実験系統の集団において含油量や収量の増加、油の脂肪酸組成の改良に対する純系分離法の効果を検討し、脂肪酸組成の改変には選抜効果がないが、含油量や収量の増加は純系分離法により向上することが可能であると報告している。Mishra *et al.* (1997) は、株当りの蒴果数や分枝数、草丈、粒重などに収量と有意な相関があることを報告し、これらを指標にした選抜が効果的であると述べた。Dikshit and Swain (2000) は収量に対する雑種強勢は株当りの蒴果数や株当りの分枝数に表れることを報告し、Durga and Raghunadham (2001) は18組合せの交雑を行い、収量関連形質である蒴果数や株当り収量、油収量に対して雑種強勢が示されることを報告した。

Ⅳではセサミンやセサモリンの含有量が多い品種の育成を行うため、含有量の遺伝変異を把握し、選抜可能な形質であるか検討した。そこ

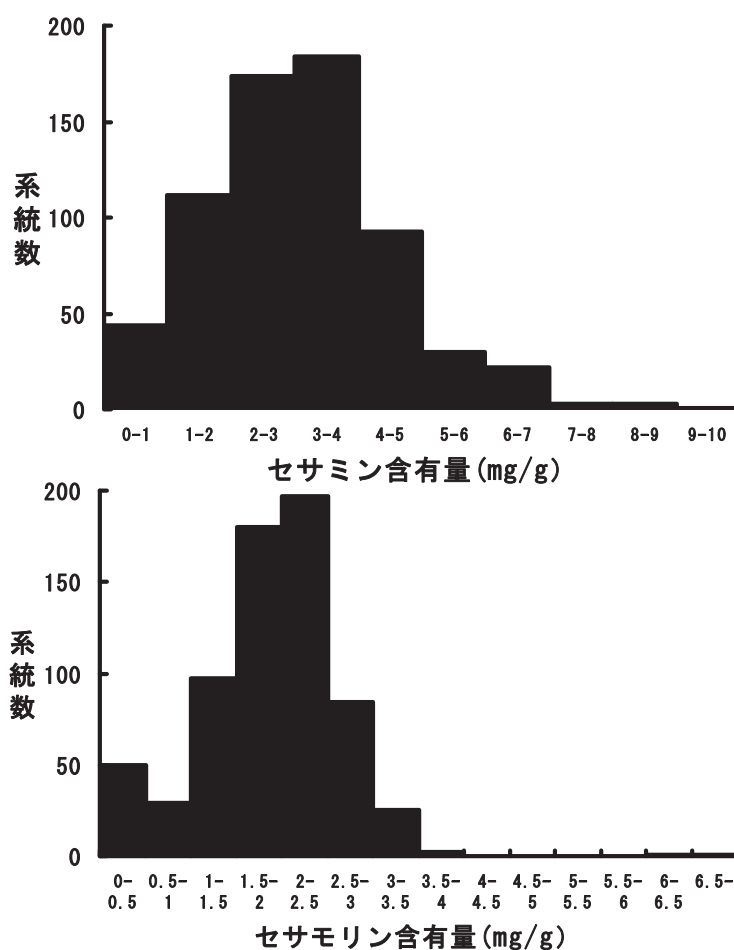


図9 ゴマ遺伝資源におけるセサミンおよびセサモリン含有量の変異

で、まずゴマ遺伝資源におけるセサミンおよびセサモリン含有量の変異を調査し、含有量の多い素材を探索した。次に、両成分の含有量について遺伝解析を行い、世代間相関を求めて含有量に対する選抜が有効であるかを検討した。

1 セサミンおよびセサモリン含有量の遺伝変異

ゴマ遺伝資源におけるセサミンおよびセサモリン含有量の遺伝的変異を明らかにするため、世界各地から導入した遺伝資源を用いて両成分の含有量を調査した。

1) 材料および方法

材料は、農業生物資源研究所ジーンバンクに保有されているゴマ遺伝資源および作物研究所資源作物育種研究室で導入したゴマ遺伝資源の

うち観音台圃場(茨城県つくば市)で採種した、異なるゴマ系統(666系統)を用いた。栽培法はⅢの1と同じとした。1試験区は1畦(2列×20株)で、反復は設けず栽植した。成熟期にすべての系統について裂開した蒴果の直上部分の蒴果を採取し、この種子を用いて、Ⅱで確立したセサミンおよびセサモリンの迅速分析法(Shirato-Yasumoto *et al.* 2003)により測定した。1系統について2反復し、平均値を系統の値とした。

2) 結果および考察

666系統の種子におけるセサミン含有量の変異は0.1mg/gから10.0mg/gで平均は3.1mg/gであった(図9)。3~4mg/gの系統が最も多く、中央値は3.0mg/gであった。含有量の分布は連続的であり、平均値と中央値がほぼ一致した。一方、セサモリン含有量は0.1mg/g

から6.8mg/g の範囲の変異があり、平均は1.9 mg/g、中央値も1.9mg/g であったが、その分布はセサミンとは異なり、0.5mg/g 以下の著しく含有量が少ない系統と1.5~2.5mg/g に分布する系統に分けられた (図9)。

Beroza *et al.* (1955) は33系統の油中におけるセサミンおよびセサモリン含有率の変異を調査した。その結果、セサミン含有率は0.34%の系統から1.13%まであり、平均は0.70%、セサモリン含有率については0.13%から0.59%までで、平均は0.41%と報告している。福田ら(1988)は国産のゴマ14品種を用いて調査し、油中の含有率はセサミンが0.15%から0.89%で、平均は0.49%であること、また、セサモリンは0.12%から0.48%で、平均は0.30%と報告している。本研究で供試した遺伝資源においては、種子中のセサミン含有量が0.1mg/g から10.0mg/g まで認められ、またセサモリンは0.1mg/g から6.8mg/g まで認められた。ゴマ種子の含油率を約50%として換算すると、油当たりのセサミン含有率は約0.02%から約2%、セサモリン含有率は約0.02%から約1.4%となる。両成分ともに既報 (福田ら 1988) より広い変異を有していた。

次に本研究で分析した遺伝資源のセサミン含有量とセサモリン含有量との関係を調べた (図10)。セサミン含有量が多いがセサモリンは0.5 mg/g 以下で極端に含有量が少ない遺伝資源が少数認められたが、ほとんどの系統でセサミン含有量とセサモリン含有量に正の相関が見られた。逆に、セサミン含有量は少ないが、セサモリン含有量が多い遺伝資源はまったく認められなかった。

次に、種皮色と両成分の含有量との関係を検討した。白ゴマ系統にはセサミン含有量の高い系統が多く、一方、黒ゴマ系統には含有量の高い系統は少なかった (図10)。種皮色と含油率については、白ゴマで含油量の高いものが多く、黒ゴマで低いものが多いことが報告されている (河西ら 1953、Tashiro *et al.* 1991)。

本研究で調査した遺伝資源の中で、セサミン含有量の多い系統は、中国西双版纳原産の灰白

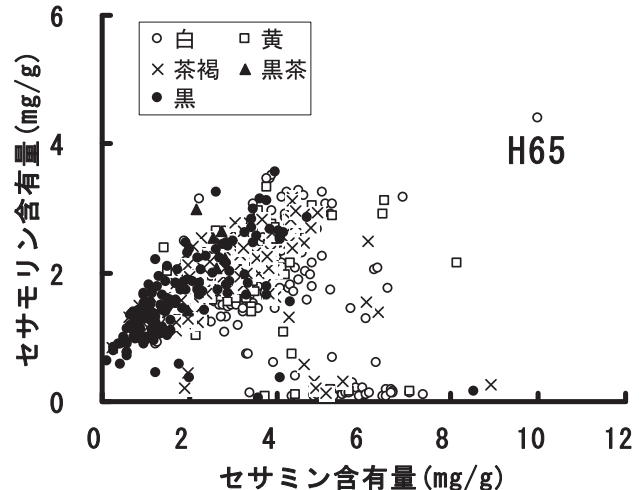


図10 種皮色およびセサミンおよびセサモリン含有量の関係

色のゴマ「H65」(10.0mg/g)、インドで収集された「COL/INDIA/1992/MAFF/0095」(8.9mg/g)、富山大学保存の「TOYAMA4294」(8.5 mg/g)であった。後者2系統のセサモリン含有量はそれぞれ0.3mg/g、0.2mg/g と低い含有量であった。一方、セサモリン含有量の多い系統は「H65」(4.4mg/g) 中国河南省原産の白ごま「CHINAKANAN」(3.6mg/g)、「TOYAMA 0121」(3.5mg/g) であった。後者2系統のセサミン含有量は4.0mg/g、3.8mg/g であった。

また、セサミンおよびセサモリン共に含有量が少ない系統はいずれも黒ゴマで、富山大学保存の「TOYAMA9662」はセサミンおよびセサモリンの含有量が0.4mg/g および0.6mg/g、「TOYAMA800」や「TOYAMA3012」のセサミンおよびセサモリン含有量は、共に0.3mg/g および0.8mg/g で、両成分とも1 mg/g に満たない低い系統であった。

以上をまとめると、セサミンおよびセサモリン含有量がともに高い遺伝資源は「H65」であった。「H65」は、セサミンおよびセサモリン含有量を高める育種素材として有望であると結論した。

2 セサミンおよびセサモリン含有量の遺伝解析

1. においてセサミンおよびセサモリンがと

もに多く含まれている遺伝資源を特定することができた。このセサミンおよびセサモリン含有量が高い遺伝資源を育種素材とし、両成分の含有量の多い品種を育成するためには、まず両成分の遺伝様式を明らかにする必要がある。

ゴマの種子成分に関する遺伝様式は、含油量や蛋白質含量、種皮の芳香油などについて報告されており、小林 (1977) は、含油量や蛋白質含量については少ない特性が優性であり、また、種皮の芳香油は多い特性が優性であると報告している。しかし、本研究で着目しているセサミンおよびセサモリン含有量の遺伝様式に関する報告はまったくなされていない。

そこで、セサミンとセサモリンの含有量の遺伝様式を明らかにして選抜が可能であるか確認するため、交雑実験による遺伝解析を行った。

1) 材料および方法

材料は、「H65」(セサミン含有量が10.0mg/g、セサモリン含有量が4.4mg/g)、愛知県より収集された白ゴマの「愛知白」(4.7mg/g、3.8mg/g)、富山大学保存の「TOYAMA058」(4.0mg/g、2.8mg/g)を用いた。1993年に温室内で「H65」と「愛知白」および「H65」と「TOYAMA058」のそれぞれについて正、逆で4組合せの交雑を行い、各々3～6粒のF₁種子を得た。1993年にF₁個体を栽培し、1994年に圃場で「H65」×「愛知白」のF₂を87個体、「愛知白」×「H65」のF₂を94個体、また「H65」×「TOYAMA058」のF₂を105個体、「TOYAMA058」×「H65」のF₂を93個体栽培した。成熟期にすべての系統について裂開した蒴果の直上部分の蒴果を採取した。個体ごとのセサミンおよびセサモリン含有量は、Ⅱで述べた迅速分析法 (Shirato-Yasumoto *et al.* 2003) により分析した。それぞれのF₂個体からF₃種子を採取し、1995年にF₃系統を栽培した。栽培法はⅢの1と同じとした。1系統は1畦 (2列×40株) 80個体とした。両親、F₁、F₂については1個体につき2反復で測定した。1つのF₃系統につきF₂個体と同様に裂開した蒴果の直上部分の蒴果を20個体から採取し2反復で分析し、平均値を

求め各F₃系統の平均値とした。F₂個体の含有量とF₃系統の平均含有量から世代間での遺伝相関を求めた。

2) 結果および考察

「H65」×「愛知白」の交雑組合せにおいて、高セサミン含有親の「H65」のセサミン含有量は10.0mg/g、低セサミン含有親の「愛知白」のセサミン含有量は4.7mg/gであった。F₁個体の含有量は8.8mg/gであり、高セサミン含有親の値にやや近かった。F₂集団のセサミン含有量は平均値5.4mg/gの正規分布に似た分布であった (図11)。

一方、「愛知白」×「H65」の交雑組合せにおいてF₁個体のセサミン含有量は4.0mg/gであり、低セサミン親の「愛知白」の値に近かった。F₂集団のセサミン含有量は平均値5.5mg/gとする低含有量側にゆがんだ正規分布に類似する分布であった (図11)。

「H65」と「愛知白」の間の正、逆の交雑組合せでは、F₁個体の含有量が異なったが、F₂集団のセサミン含有量の分布は正、逆組合せともに正規分布に似ており、セサミン含有量は単一の遺伝子によって支配されているのではなく、複数の遺伝子に支配されていると考えられた。

次に「H65」×「TOYAMA058」の交雑組合せでは、高セサミン含有親の含有量は10.0mg/g、低セサミン含有親の含有量は4.0mg/gであった。F₁個体の含有量は4.6mg/gで低セサミン含有親の値と近かった。F₂集団のセサミン含有量は正規分布に類似した (図11)。

逆交雑組合せの「TOYAMA058」×「H65」では、F₁個体のセサミン含有量は0.9mg/gと低く、交雑親では低セサミン含有親の「TOYAMA058」に近かった。F₂集団のセサミン含有量は正規分布に類似した (図11)。

「H65」と「TOYAMA058」の正、逆組合せでは、F₁個体の含有量は正、逆組合せとも低セサミン含有親の値に近かった。しかし、F₂集団は正、逆組合せともに正規分布に近く、セサミン含有量は複数の遺伝子で支配されていると考えられた。

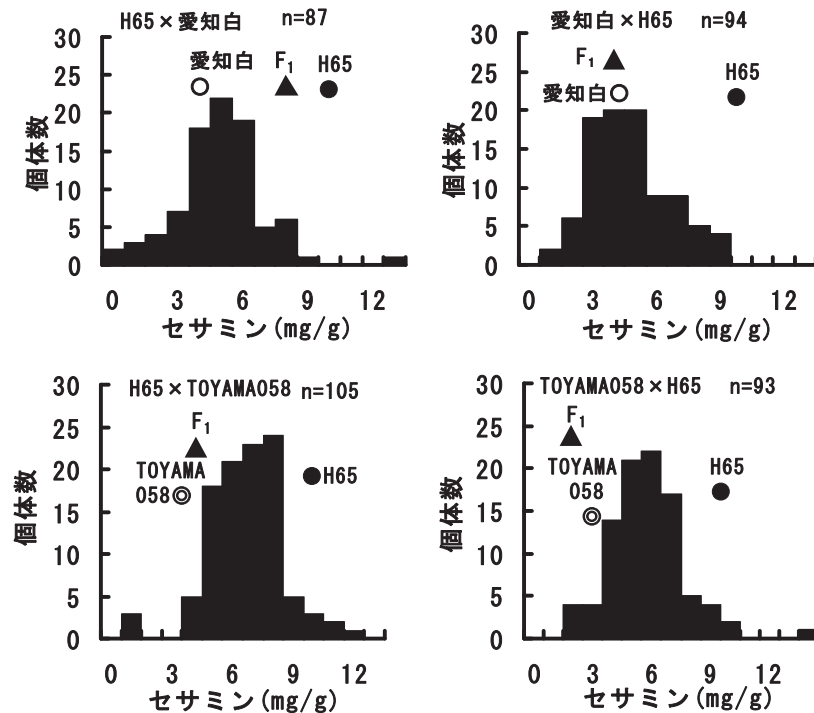


図11 F₂雑種集団におけるセサミン含有量の分布

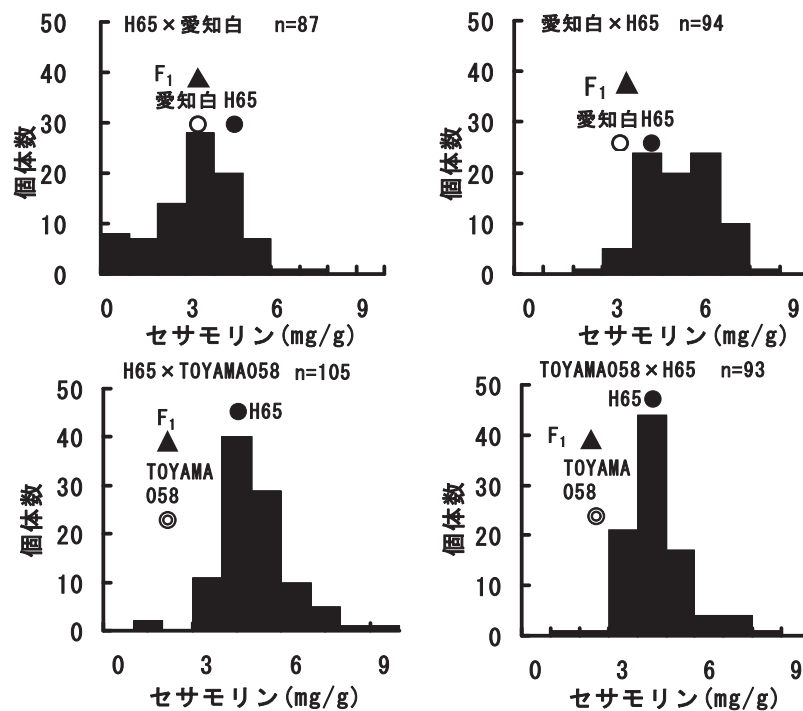


図12 F₂雑種集団におけるセサモリン含有量の分布

セサモリン含有量についてもセサミン含有量と同じように、複数の遺伝子で支配されていると考えられた (図12)。

一方、これら2成分についてF₂個体とそのF₂個体から由来するF₃系統における個体別含

有量の平均値から世代間相関を検討した結果、すべての組合せにおいてそれぞれ高い世代間相関が認められた (図13、図14)。

以上の結果から、セサミン含有量およびセサモリン含有量は複数の遺伝子に支配されるが、

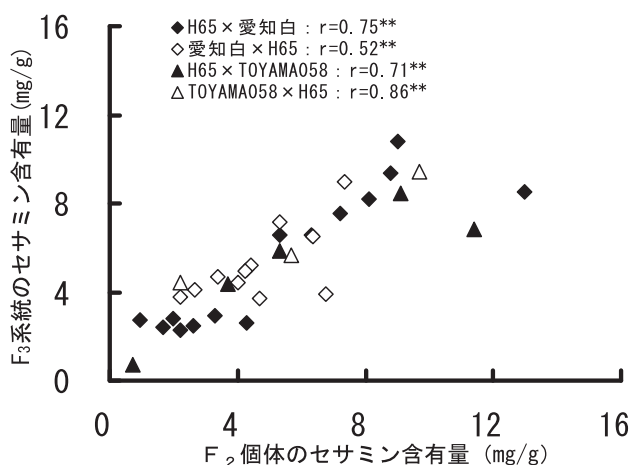


図13 F₂個体とF₃系統のセサミン含有量の関係

rはそれぞれの交雑組合せにおけるセサミン含有量に関するF₂個体とF₃系統の間の相関係数を示す。

**は1%水準で有意であることを示す。

F₂とF₃の世代間に高い正の相関があり、F₂集団における高含有量個体の選抜が有効であると

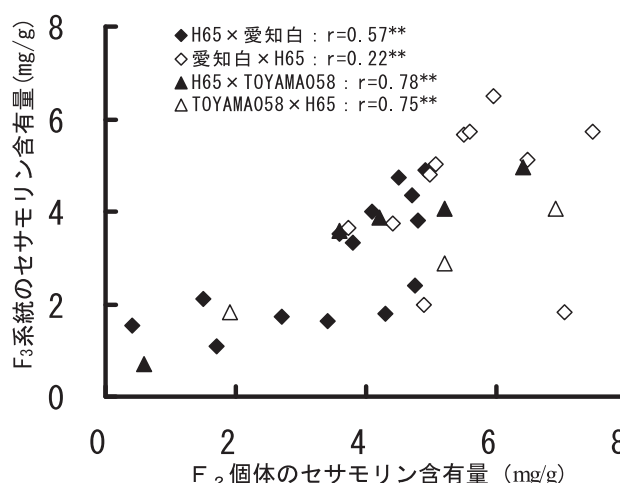


図14 F₂個体とF₃系統のセサモリン含有量の関係

rはそれぞれの交雑組合せにおけるセサモリン含有量に関するF₂個体とF₃系統の間の相関係数を示す。

**は1%水準で有意であることを示す。

結論した。

V セサミンおよびセサモリン高含有品種「ごまぞう」の育成と成分含有量の変動

IVにおいて、多数のゴマ遺伝資源を用いた機能性成分のセサミンおよびセサモリン含有量のスクリーニングの結果、両成分の含有量が多い中国の西双版纳原産の系統「H65」が見出された。

そこで、Vではセサミンおよびセサモリン含有量が高くしかも収量の高い品種を育成することを目的に以下の実験を行った。さらに育成された新品種のセサミンおよびセサモリン含有量の安定性を検討することとした。

1 セサミンおよびセサモリン高含有量「ごまぞう」の育成とその成分の特性

IVにおいて、666点のゴマ遺伝資源についてセサミンおよびセサモリン含有量をスクリーニングした結果、両成分含有量が高い数系統が見出された。それらの中で中国西双版纳原産の系統「H65」は極小粒で極低収であり、一般栽培には適さなかったが、含有量が最も高かったの

で、この品種を育種素材としてセサミンおよびセサモリン含有量が高く収量の高い品種を育成しようとした。「H65」を母本に、遺伝資源のスクリーニングの結果見出した大粒のペルー原産の白ごま系統「Toyama016」を父本として人工交雑を行った。その後は通常の系統育種法により選抜を行った。セサミンおよびセサモリン含有量はIIで確立した迅速測定法と評価法を用いた。

その結果、2000年度にセサミンおよびセサモリンの含有量が多く、収量性の高いゴマ系統「関東12号」が育成され、2001年度から地域適応性試験に供試した。セサミンおよびセサモリンの含有量が安定して高いことを確認し、2002年度に「ごまぞう」と命名した。同品種はゴマで初めて「ごま農林1号」として登録され、種苗登録に出願した。「ごまぞう」の育成経過および特性の概要については、すでに作物研究所報告4号（安本ら2003）に報告した。

2 「ごまぞう」における栽培年次による成分含有量の変動

本研究で着目したセサミンやセサモリン含有量は、栽培地や霜害などによって変動することが報告されている(Beroza *et al.* 1955)。また、これらの成分の含有量は同一個体内でも種子の登熟時期や登熟期間の環境条件によって変動することが明らかになっている(安本ら 2005)。

そこで、本節においてはセサミンおよびセサモリン高含有品種「ごまぞう」の栽培年次による成分特性の変動を明らかにしようとした。

1) 材料および方法

「ごまぞう」(旧系統名ゴマ「関東12号」)および対照品種として茨城県南部で多く栽培されている金ごま在来系統の「真瀬金」を用いた。両品種を1999年から2001年の3ヵ年、農業研究センター(現中央農業総合研究センター)谷和原畑圃場(茨城県つくばみらい市)で栽培した。栽培法はⅢ-1と同じとした。両系統とも成熟期(下位蒴果が裂開した時期)に収穫した。収穫した種子のセサミンおよびセサモリンはⅡで確立した手法(Shirato-Yasumoto *et al.* 2003)で定量した。また、各年次で対照品種「真瀬金」との収量やセサミンおよびセサモリン含有量との比を求め、その平均値を表5に示した。

2) 結果および考察

3ヵ年の実験の結果、「ごまぞう」のセサミン含有量は「真瀬金」の2.3倍、セサモリン含有量は1.6倍で、高リグナン系統の「H65」とほぼ同等の含有量で、セサミンおよびセサモリン含有量は安定して高かった。子実収量は対照品種「真瀬金」対比で115であり、3ヵ年を通じて多収性を示し、千粒量は「真瀬金」とほぼ同じであった(表5)。これらの結果から、「ごまぞう」は栽培年次に関わらず「真瀬金」より安定して高いリグナン含有量であることが明らかになった。

3 「ごまぞう」における栽培地による成分含有量の変動

種子成分が栽培地域により異なることはヒマワリの脂肪酸組成(Jose *et al.* 1990)やダイズのイソフラボン含有量(Tsukamoto *et al.* 1995)など、他の油料作物でも調査されており、特に栽培地の登熟期間の平均気温や気象条件の影響が大きいことが報告されている。またゴマではYermanos *et al.* (1972)が10カ国から収集した721点の遺伝資源を用いて栽培地域と含油量、脂肪酸組成、種皮色を調査し、早生品種では含油量が高い傾向があること、早生品種または種皮色が黄色の種子、大粒種子では不飽和脂肪酸

表5 「ごまぞう」の収量および収穫物の品質

品種名 または系統名	試験 年次	子実重量 (kg/a)	比*	千粒重 (g)	セサミン 含有量(mg/g)	比*	セサモリン 含有量(mg/g)	比*
ごまぞう	1999	14.2	125	—	10.1	246	4.4	200
	2000	7.3	95	2.4	8.7	235	3.9	144
	2001	15.4	124	2.4	8.2	210	4.0	143
	平均	12.3	115	2.4	9.0	231	4.1	162
標) 真瀬金	1999	11.4	100	—	4.1	100	2.2	100
	2000	7.7	100	2.3	3.7	100	2.7	100
	2001	12.4	100	2.5	3.9	100	2.8	100
	平均	10.5	100	2.4	3.9	100	2.6	100
比) TOYAMA016	1999	—	—	—	—	—	—	—
	2000	5.9	77	2.5	5.2	141	0.4	15
	2001	11.0	89	2.5	5.9	151	0.2	7
	平均	8.5	83	2.5	5.6	146	0.3	11
比) H65	1999	—	—	—	—	—	—	—
	2000	0.2	3	0.9	10.1	273	4.2	156
	2001	0.3	2	0.9	8.8	226	4.6	164
	平均	0.3	3	0.9	9.5	249	4.4	160

*比は年次毎の「真瀬金」の子実重量、セサミン含有量およびセサモリン含有量を100とした時の相対値を示す。

含量を示すヨウ素価が低い傾向があることなどを報告している。リグナン類についてもセサミンやセサモリンにおいて、霜害などの環境要因により変動することが報告され (Beroza *et al.* 1955)、Kang *et al.* (2000) は韓国のゴマ遺伝資源におけるセサミンおよびセサモリン含有量と総リグナン含有量、脂肪酸組成について報告している。「ごまぞう」においてもセサミンとセサモリン含有量についてその安定性を確認することは重要と考えられる。

そこで、2001年度に関東以南の7箇所で地域適応性試験を実施し、「ごまぞう」のセサミンおよびセサモリン含有量の安定性を評価した。

1) 材料および方法

「ごまぞう」(旧系統名ゴマ「関東12号」)と対照品種として各試験地で栽培されている在来系統または「真瀬金」を用いた。試験は茨城県、静岡県、三重県、福岡県、高知県、鹿児島県の6県7カ所で行った。各地域における慣行法により栽培し、開花期などの生態特性と収穫物におけるセサミンおよびセサモリン含有量を比較した。両成分の含有量は2反復で測定した。

2) 結果および考察

「ごまぞう」はどの地域においても対照品種よりやや晩生の開花期、収穫期も対照品種よりやや晩生となる地域もあるがいずれの地域でも栽培可能であった。各試験地の収穫物のセサミンおよびセサモリン含有量はいずれの試験地域においても対照品種より高かった(表6)。したがって、「ごまぞう」は栽培地によらず既存のゴマ品種よりもセサミンおよびセサモリンの含有量が高い特性を安定して有すると結論した。

4 「ごまぞう」における収穫時期による成分含有量の変動

V.2、V.3において、「ごまぞう」のセサミンおよびセサモリン含有量は栽培年次や栽培地域によらず安定して高いことが明らかになっ

表6 「ごまぞう」のセサミンおよびセサモリン含有量の栽培地による変動

栽培地	品種名	開花期 (月日)	収穫期 (月日)	セサミン 含有量 (mg/g)	セサモリン 含有量 (mg/g)
茨城県 つくば市	ごまぞう (対照:真瀬金)	7.18 (7.15)	9.18 (8.30)	8.2 (3.9)	4.0 (2.8)
静岡県	ごまぞう (対照:真瀬金)	7.25 (7.26)	9.11 (9.11)	9.1 (4.3)	3.8 (2.8)
三重県	ごまぞう (対照:金ゴマ)	7.2 (7.2)	8.20 (8.24)	10.9 (3.3)	4.3 (2.3)
福岡県	ごまぞう (対照:加賀白)	7.15 (7.15)	8.13 (8.20)	8.0 (3.3)	3.9 (2.0)
高知県	ごまぞう (対照:真瀬金)	7.13 (7.10)	8.19 (8.11)	9.2 (3.5)	3.4 (2.2)
鹿児島県 鹿屋市	ごまぞう (対照:喜界在来)	8.18 (8.16)	10.6 (10.4)	9.3 (2.4)	4.1 (3.2)
鹿児島県 大島郡	ごまぞう (対照:喜界在来)	7.25 (7.20)	8.31 (8.21)	10.4 (4.0)	3.4 (2.9)

た。一方、ゴマ種子中のセサミンおよびセサモリンの含有量は登熟時期により変動することが明らかになっている (Tashiro *et al.* 1991、安本ら 2005)。また、現在のゴマの栽培体系では収穫時期がイネなどの主要作物の収穫時期と重なっているため適期収穫が行われず、刈り取り適期を逸して収穫されることが予想される。このような試料では適期収穫された試料と種子中のセサミンやセサモリンの含有量に違いが生じることが予測される。

そこで本節では、収穫時期の異なる収穫物におけるセサミンおよびセサモリン含有量の変動について検討した。

1) 材料および方法

「ごまぞう」(旧系統名ゴマ「関東12号」)と対照品種「真瀬金」を用いた。これらの品種を農業研究センター(現中央農業総合研究センター)谷和原畑圃場(現茨城県つくばみらい市)で栽培した。播種は2001年5月29日に行った。栽培法はⅢ.1と同じとし、1区面積は33.6m²とした。最下着蒴果が裂開した日を成熟日として、その1週間前から6週間後まで1週間ごとに5株ずつ収穫を行った。収穫した株は風乾後脱粒し、株あたり子実収量を求め、セサミンおよびセサモリン含有量を簡便法 (Shirato-Yasumoto *et al.* 2003) により測定した。両成

分の測定は2反復で行った。

2) 結果と考察

最下着蒴果の裂開時期は「真瀬金」が9月3日で、「ごまぞう」はそれより2週間後の9月17日であった(図15)。子実重は最下着蒴果が裂開した時期(成熟日)に最大になり、「ごまぞう」が「真瀬金」よりやや多収であった(図16)。セサミン含有量は最下着蒴果が裂開する前の収穫物で高い傾向があるが、それ以降には大きな変動はなかった(図17)。またセサモリン含有量には大きな変動は認められなかった。

「ごまぞう」のセサミンとセサモリン含有量はいずれの時期の収穫物においても「真瀬金」より安定して高かった(図16)。

本研究ではⅢにおいて種子の登熟過程でセサミンおよびセサモリン含有量が増減し、成熟とともに一旦増加した後、さらに成熟が進むと減少することを明らかにした。本節では収穫時期の異なる試料のセサミンおよびセサモリン含有量の変化を調査した。前述の結果から考えると収穫時期が遅い株の種子では蒴果毎の種子の熟度は進んでいるためこれらの成分の含有量は減少すると予想されるが、バルク収穫を行った生産物での種子の含有量には減少は認められなかった(図17)。

この要因の一つとして、ゴマの脱粒という生態的特性が考えられる。ゴマは成熟に伴い蒴果が裂開し脱粒する。従って圃場の自然状態でバ

ルク収穫を行うと、熟度が進みセサミンおよびセサモリン含有量が減少した種子は脱粒により失われているため、その収穫物における種子の含有量には減少が認められなかったと考察した。

以上の結果から、遺伝資源の中に見出した育種素材を用いて育成されたゴマ新品種「ごまぞ

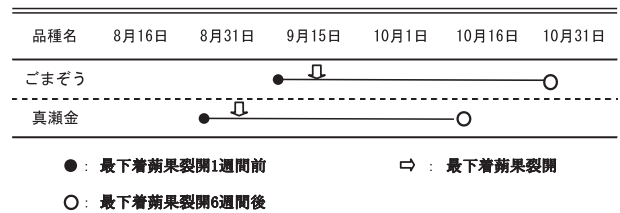


図15 各品種の収穫時期

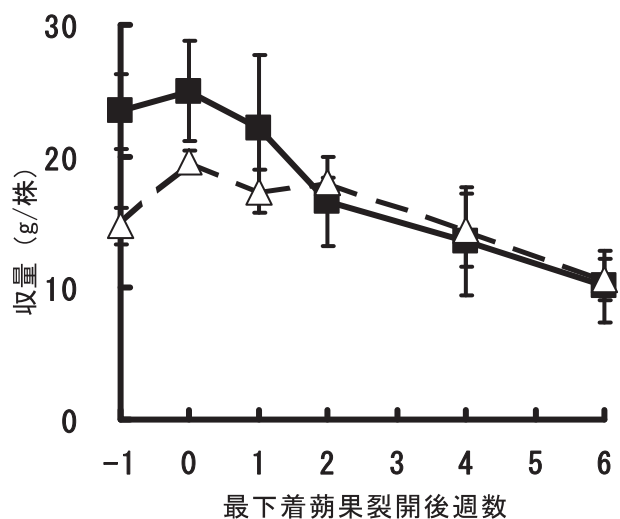


図16 収穫時期による収量の変動

■ : ごまぞう、△ : 真瀬金 縦棒は標準偏差を示す。

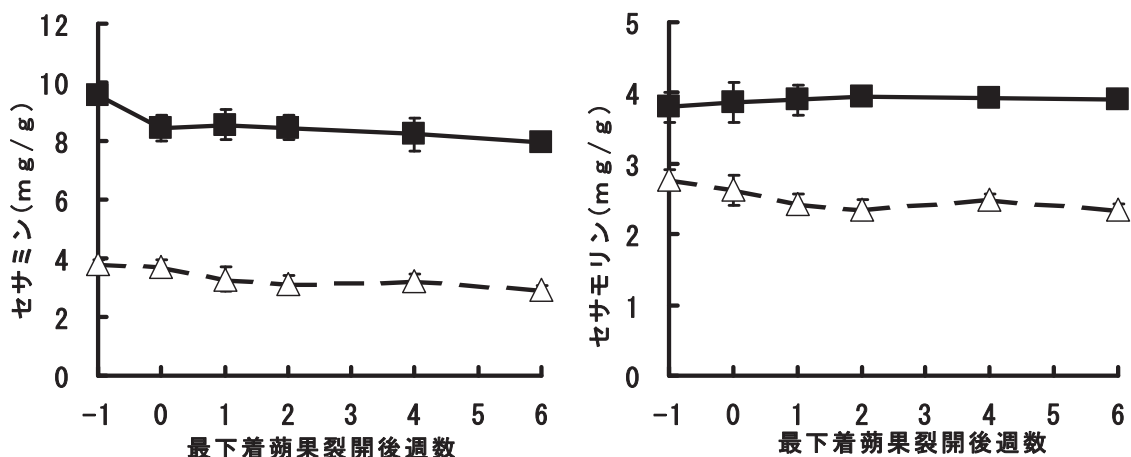


図17 収穫時期によるセサミンおよびセサモリン含有量の変動

■ : ごまぞう、△ : 真瀬金 縦棒は標準偏差を示す。

う」は栽培年次、栽培地、収穫時期によらずセサミンおよびセサモリン含有量が既存品種より安定して増加しており、また、その収量性は既存品種と同等かそれ以上が期待できた（安本ら 2005）。このように新たな特性を有し収量性に

も優れた品種は、機能性に着目した食品素材として実際に栽培することが可能であり、様々な新しい需要を創出する素材として有用であると結論した。

Ⅵ セサミンおよびセサモリン高含有品種の機能性評価

ゴマ種子に含まれるリグナン類における機能性については特にセサミンやセサモリンに関して多くの研究報告がなされている。セサミンについてはマウスで12ppmのエタノール連続吸引による血中のトランスアミナーゼ活性（GOT、GPT）やトリグリセライド濃度の上昇を抑制する効果が報告されている（Akimoto *et al.* 1993）。またセサミンを0.2%食餌に混入してラットを1週間飼育した後、化学発ガン剤のDMBA (7,12-dimethylbenz [a] anthracene) を10mg 与えると発ガン剤投与12週目における乳ガンの発生数が36%減少することが報告されている（Hirose *et al.* 1992）。その他、デオキシコルチコステロン-食塩高血圧モデルラットにセサミンを1%配合した飼料を与えることによる血圧降下作用（Matsumura *et al.* 1995）や、ラットでの血清脂質を低下させる作用（Hirose *et al.* 1991、Hirata *et al.* 1996、Ashakumary *et al.* 1999）、糸状菌の *Mortierella alpina* における高度不飽和脂肪酸生合成系でのステアリン酸からアラキドン酸への生合成に関与する $\Delta 5$ 不飽和化酵素を特異的に阻害する作用（Shimizu *et al.* 1991）なども報告されている。

セサモリンについてはゴマ油の抗酸化性に寄与するセサモールやセサミノールの前駆物質として生体外での抗酸化性に関与する（Budowski *et al.* 1950a、1950b）だけでなく、ラットを用いた動物実験により、肝臓や腎臓で過酸化脂質の生成を抑制するなどの機能性を示すこと（Kang *et al.* 1998）が報告されている。また水溶性の成分であるセサミノール配糖体についても動脈硬化抑制効果（Kang *et al.* 1998）な

どの機能性が報告されている。Ashakumary *et al.* (1999) はセサミン標品をラットの飼料に添加すると、肝臓ミトコンドリアとペルオキシソームでの脂肪酸代謝酵素活性が量依存的に増加し、ミトコンドリアでは0.5%添加レベルで約2倍、ペルオキシソームでは10倍以上となることを報告した。また0.1~0.4%添加では肝臓脂肪酸合成酵素の活性が低下し、その低下は0.2%までの範囲で添加量に応じて大きくなり、このような代謝酵素の活性変化が血清脂質の低下にもつながると考えられることを報告した。

Yamashita *et al.* (1995)、池田ら (2000) はこのような機能性を有するリグナンの含有量が多いゴマ種子を給餌することで、ラットにおけるビタミンE活性が向上することを報告している。Ⅵでは、セサミンおよびセサモリン含有量を一般の栽培品種より高めた新品種「ごまぞう」の生体内における機能性の評価を行うため、同品種の種子をラットに摂食させ、生体内での脂質代謝の変化を調査し、機能性の評価を行った。

1) 材料および方法

Sprague-Dawley 雄ラットを6~8日間市販飼料のNMF（オリエンタル社、東京）で予備飼育した後、平均体重がほぼ均等となるように4集団（各集団は7から8頭）に分けた。「ごまぞう」と「真瀬金」をそれぞれNMFに20%添加した飼料と、対照としてセサミンおよびセサモリンを含まないトウモロコシ油をNMFに20%添加した飼料を調製した。供試するゴマ種子の粗蛋白質量と粗脂肪量を測定し、各試験区の飼料間でそれらが同じ量となるように、脂質

量についてはゴマと脂肪酸組成の近いトウモロコシ油を用いて調整し、また蛋白質量はカゼインを加えて調整し（表7）、乳鉢で十分磨碎して、均一にした。調整した飼料中のセサミンおよびセサモリンの含有量は「真瀬金」ではそれぞれ0.82mg/g、0.42mg/g、「ごまぞう」では2.02mg/g、0.88mg/gであった。ラットは室温20～22℃、湿度55～65%、日長12時間に制御した条件で飼育した。

それぞれの調整飼料で16日間の飼育後、ラットの肝組織における脂肪酸代謝酵素活性と脂肪酸合成酵素の活性を測定した。また、血清および肝組織中の脂質含有量を測定した。

脂肪酸代謝酵素活性；肝臓の一部(2g)を切り出し、15mlの0.25M ショ糖液-1 mM EDTA-3 mM トリス塩酸 (pH7.0) で磨碎した。懸濁液を用いてミトコンドリア系酵素のカルニチンパルミトイル転移酵素と3-ヒドロキシアシル Co-A 脱水素酵素の活性 (Ide *et al.* 1996)、ペルオキシソーム酵素であるアシル Co-A 酸化酵素と3-ケトアシル Co-A 開裂酵素の活性 (Kabir *et al.* 1996) を既報に基づき測定した。

脂肪酸合成酵素活性；肝臓の一部 (2 g) を切り出し、15mlの0.25M のショ糖液-1 mM EDTA-3 mM トリス塩酸 (pH7.0) で磨碎した後、×9,000g で10分間遠心分離した。その上清を×200,000g で30分間遠心分離し、その上清を用いて脂肪酸合成酵素、グルコース6-リン酸脱水素酵素およびリンゴ酸酵素 (Ide *et al.* 1992)、ATP-クエン酸リアーゼ (Takeda *et al.* 1969)、ピルビン酸キナーゼ (Kabir *et al.* 1996) の活性を既報に基づき測定した。

脂質量；血清や肝臓の中性脂肪およびリン脂質濃度 (Ide *et al.* 1978)、コレステロール濃度 (Ide *et al.* 1982) を測定した。血清の中性脂質、コレステロールはトリグリセライドテストワコー、コレステロール E-テストワコー臨床検査薬キット (和光純薬工業(株)) を用いて測定した。また、リン脂質濃度は既報 (Feldman *et al.* 1966) に基づき測定した。

測定値については各群間における有意差の有無を分散分析により検定した (Snedecor *et al.*

表7 ゴマ種子混合飼料の成分組成比

成分量(g/kg)	ごまぞう 20%添加	真瀬金 20%添加	対照 (トウモロコシ油添加)
摩砕ゴマ種子	200	200	0
カゼイン	156	149	200
コーン油	0	6	83
セルロース	24	24	50
ショ糖	571	571	617
AIN-76塩混合物	35	35	35
AIN-76ビタミン混合物	10	10	10
重酒石酸コリン	2	2	2
DL-メチオニン	3	3	3
脂肪酸組成(g/100g 脂肪酸)			
14:0	0	0	0.1
16:0	8.4	9.7	11
16:1	0.1	0.1	0
18:0	4.9	4.8	2
18:1	37.3	39.9	29.9
18:2	48.3	44.3	55.2
18:3	0.9	1.2	1.8

AIN-76：米国国立栄養研究所 (American Institute of Nutrition) から発表された標準的飼料組成。

表8 摂食量、体重増加量と最終体重および肝臓重

食餌グループ	摂食量 (g/day)	体重増加量 (g)	最終体重 (g)	肝臓重 (g/体重100g)
ごまぞう20%添加	19.2 (0.6)	141 (8)	275 (10)	5.62c (0.23)
真瀬金20%添加	18.5 (0.3)	134 (4)	267 (5)	4.88b (0.11)
対照 (トウモロコシ油添加)	18.8 (0.4)	128 (3)	262 (4)	5.18bc (0.12)
食餌間有意差(5%)	n. s.	n. s.	n. s.	*

n. s. は分散分析の結果 $p < 0.05$ で有意な差がないことを示す。*は $p < 0.05$ で有意な差があることを示す。肝臓重は体重100g 当りの重量に換算した値を示す。() 内の数字は標準誤差。異なる文字は Snedecor and Cochran (1989) により検定し、有意水準 5% で食餌間に有意差があることを示す。

1989)。

2) 結果および考察

ラットの実験開始時における体重は平均134 gであった。室温20～22℃、湿度55～65%、日長12時間に制御した条件で16日間飼育したラットの飼料摂食量、体重増加量、最終体重を調査した結果、「ごまぞう」を20%添加して調製した飼料を与えた区、「真瀬金」やトウモロコシ油を同様に添加した飼料を与えた対照区の間で有意差は認められなかった(表8)。一方各飼料区間の肝臓の重量を比較すると、「ごまぞう」を飼料に20%添加した区は「真瀬金」を添加した区より有意に重かった(表8)。

脂肪酸代謝酵素活性のうち、「ごまぞう」を20%添加した区のミトコンドリア系酵素のカルニチンパルミトイル転移酵素や3-ヒドロキシアシル Co-A 脱水素酵素の活性は、対照区に比べてそれぞれ3.6倍、5.9倍の上昇が認められ、更に「真瀬金」添加区に比べてもそれぞれ1.6倍、1.8倍の上昇が認められた。ゴマを添加しなかった対照区に比べて「ごまぞう」を20%添加した区は、ペルオキシソーム系酵素のアシル Co-A 酸化酵素や3-ケトアシル Co-A 開裂酵素の活性はそれぞれ5.4倍、2.8倍増加し、「真瀬金」添加区に比べてもそれぞれ3.4倍、1.6倍増加していた（表9）。ゴマを食餌に添加した区の脂肪酸合成酵素、グルコース6リン酸脱水素酵素、ATP-クエン酸リアーゼの活性はいずれも対照区に比べて有意に低下したが、「ごまぞう」と「真瀬金」の間に活性に有意な差は認められなかった。しかし、「ごまぞう」20%添加区のリンゴ酸合成酵素活性のみが対照区より有意に上昇した（表10）。

「ごまぞう」を食餌に添加したラットの血清中の中性脂肪濃度は、「真瀬金」を食餌に添加したラットの濃度より有意に低下した。また、コレステロールについても「ごまぞう」を添加したラットと「真瀬金」を添加したラットとの差は認められなかったが、対照区に比較して有意に低下した。一方、「ごまぞう」を添加した

ラットの肝組織のリン脂質濃度は対照区や「真瀬金」添加区より有意に増加した（表11）。

本研究で調査した酵素は、いずれも肝臓での脂質のβ酸化に関与する酵素であり、このβ酸化によって脂肪酸は代謝されトリグリセリドの合成が制御される（内山・水柿 1975）。これらの酵素について、「ごまぞう」を添加した飼料で飼育したラットは、対照区や「真瀬金」添加区より代謝酵素の活性が上昇しており、血清中における中性脂肪の濃度も対照区や「真瀬金」添加区に比べて有意に低下した。したがって、セサミンおよびセサモリン高含有品種である「ごまぞう」は、既存のゴマ品種より肝臓における脂肪酸代謝促進機能と血清中の中性脂肪を低下させる機能に優れることが実証された（Shirato-Yasumoto *et al.* 2001）。

Ashakumary *et al.* (1999) は、ラットにセサミンを与えることによって肝臓ミトコンドリアとペルオキシソームにおいて脂肪酸酸化酵素のパルミトイル Co-A 酸化酵素活性が量依存的に増加することを報告した。すなわち、セサミンを0.2%添加するとミトコンドリアでの活性は無添加に比べて約50%増加し、ペルオキシゾームでは約400%増加した。本研究で「ごまぞう」を20%添加した飼料区では脂肪酸酸化酵素活性はミトコンドリアで60%、ペルオキシソームでは500%増加しており、その食餌中に含ま

表9 肝臓における脂肪酸代謝酵素活性に及ぼす「ごまぞう」の影響

食餌グループ	酵素活性(μmol/min/体重100gあたり肝組織)			
	ミトコンドリア系		ペルオキシソーム系	
	カルニチン パルミトイル転移酵素	3-ヒドロキシアシル-CoA 脱水素酵素	アシル Co-A 酸化酵素	3-ケトアシル-CoA 開裂酵素
ごまぞう20%添加	14.7±1.4a	1729±96a	7.3±0.5a	538±23a
真瀬金20%添加	9.1±0.8b	981±38b	2.2±0.2b	329±28b
対照(トウモロコシ油添加)	4.1±0.6c	293±25c	1.4±0.1b	195±13c

7～8匹のラットの平均値±標準誤差。異なる文字の間には $p < 0.05$ で食餌間に有意な差があることを示す。

表10 肝臓における脂肪酸合成酵素活性に及ぼす「ごまぞう」の影響

食餌グループ	酵素活性 (μmol/min/体重100gあたり肝組織)				
	脂肪酸 合成酵素	グルコース-6-P 脱水素酵素	リンゴ酸 酵素	ATP-クエン酸 リアーゼ	ビルビン酸 キナーゼ
ごまぞう20%添加	3.4±0.5a	11.5±0.7a	78.7±8.5b	11.5±0.7a	100±10a
真瀬金20%添加	3.5±0.8a	8.6±1.0a	34.7±5.0a	8.6±1.0a	118±6a
対照(トウモロコシ油添加)	11.7±1.6b	36.3±5.5b	51.4±5.3a	36.3±5.5b	268±17b

7～8匹のラットの平均値±標準誤差。異なる文字の間には $p < 0.05$ で食餌間に有意な差があることを示す。

表11 血清および肝組織中の脂肪レベルに及ぼす「ごまぞう」の影響

食餌グループ	脂質成分		
	中性脂肪	コレステロール	リン脂質
	《血清脂肪(μmol/dL)》		
ごまぞう20%添加	177±11a	254±8a	272±16a
真瀬金20%添加	294±37b	246±15a	223±14b
対照 (コーン油添加)	339±46b	300±11b	250±10ab
	《肝脂肪(μmol/体重100g あたり肝組織)》		
ごまぞう20%添加	153±18	34.7±1.6	247±9a
真瀬金20%添加	151±8	30.7±0.8	177±5b
対照 (コーン油添加)	178±42	34.3±2.0	162±4b

7～8匹のラットの平均値±標準誤差。異なる文字の間には $p < 0.05$ で食餌間に有意な差があることを示す。

れるセサミンの量2.02g/kgから想定される活性の増加より大きな増加が認められた。この理由として食餌として与えたゴマ種子には、セサモリンなどの他のリグナン類も含まれており、これらの成分も活性の上昇に関与したことが推察される。

一方、脂肪酸合成酵素の活性についてはゴマを添加した食餌で飼育したラットで活性の低下が認められたが、「ごまぞう」添加区と「真瀬金」添加区の間に差は認められなかった。脂肪酸合成酵素やピルビン酸キナーゼの活性抑制に

ついては、セサミン摂取量が1 g/kg以上では活性の抑制効果はほぼ同じであることが報告されており (Ashakumary *et al.* 1999)、このため「ごまぞう」添加区と「真瀬金」添加区の間でこれらの活性に差がなかったと考えられた。

以上をまとめると、「ごまぞう」は「真瀬金」に比べて肝臓における脂肪酸代謝を促進し、血清中の中性脂肪を低下させる機能に優れていることが明らかになった (Shirato-Yasumoto *et al.* 2001)。

VII 総合考察

1 ゴマ種子に含まれるリグナンの機能性

リグナンとは C_6-C_3 のフェニルプロパン構造の化合物が酸化的に遊離基を生成し $\beta-\beta$ 位で結合した二量体天然物をいう。この物質は多くの植物に含まれており、リグナン産生植物として58科が報告されている (MacRae *et al.* 1984)。ゴマ種子中に含まれるセサミンおよびセサモリンはこのリグナン類と総称される構造的に類似した成分の一つで、ゴマ属に近縁な属の植物での産生が報告されている (Dorothea *et al.* 1985)。

Eagleson (1940) はゴマ油の殺虫に関する機能性を報告し、Haller *et al.* (1942) はセサミンのメチレンジオキシフェニル基がそれに関

与していることを報告した。Bhiravamurty *et al.* (1979) はセサミンやセサモリンの植物体に対する機能として種子の休眠への関与を報告した。この中でこれらの成分は、単子葉のイネよりラッカセイやキュウリなど双子葉植物に対してより強く発芽阻害作用を示し、その影響は炭水化物を貯蔵物質とする種子より脂質を貯蔵物質とする種子で強いことから、脂質の流動化の開始を制御する物質の生成に影響することを示した。

種子成分に関する育種は様々な作物で行われている。ダイズでは種子貯蔵蛋白質の組成に着目し、ほぼ等量ずつから構成されている7 S グロブリンと11 S グロブリンのうち7 S グロブリンを低下させ、制限アミノ酸である含硫アミノ酸の含有量が多い11 S グロブリンの割合を増や

す蛋白質組成に関する育種が行われた (Ogawa *et al.* 1989)。

また、種子成分における生理機能性が明らかにされるのに伴い、機能性に着目した育種も進められている。ソバではフラボノイドの一種で血圧上昇抑制効果を有するルチン (Matsubara *et al.* 1985) に着目し、その含有量の多い品種「サンルチン」が育成された (南ら 2000、Minami *et al.* 2001)。チャのポリフェノール画分のカテキン類は食品中の油脂の酸化防止、 α -トコフェロールとの相乗的抗酸化作用 (松崎ら 1985)、ボツリヌス菌やセレウス菌、腸炎ビブリオなどに対する抗菌作用 (原・渡辺 1989、原・石上 1989)、また抗ウィルス作用としてインフルエンザに対する感染阻止作用 (中山ら 1992) など多くの機能性を示すことが報告され、この含有量の多い品種が育成された (武田ら 1994)。

本研究で着目したゴマのセサミンとセサモリンについても、その生体内での生理作用に関して多くの報告が行われている。セサミンについてはこれを食餌に添加したラットやハムスターにおいて血清や肝臓でのコレステロールが低下すること (Hirose *et al.* 1991)、エタノールとともにセサミンを1%添加した飼料を与えるとセサミンを添加しなかった飼料を与えたラットより肝臓への脂肪沈着や血清の肝機能指標が改善される作用 (Akimoto *et al.* 1993)、脳卒中易発症性高血圧自然発症ラットを用いてこのラットに1%セサミンを添加した飼料を与えると血圧が低下する作用 (Matsumura *et al.* 1995) や脂質代謝酵素の活性向上作用 (Ashakumary *et al.* 1999) などが報告された。また、セサモリンは生体外での機能性として従来報告されていた油の抗酸化作用 (Budowski 1950、福田ら 1981) だけではなく、DNAの酸化障害抑制作用 (Kang *et al.* 1998) など生体内における抗酸化性も報告され、セサミンとともに機能性を有する種子成分として注目されている。

本研究では、これらの機能性成分の含有量が多いゴマの新品種を育成するとともに、その成分安定性や健康機能性を実証した。まず、Ⅱに

おいてセサミンおよびセサモリンの分析法、抽出法、試料調製法を改良し、約30分を要していた従来の分析時間を約6分に短縮した。また、抽出溶媒を毒性の低いエタノールに替えることが可能であること、さらに試料種子量は50mgで2回抽出を行うことで安定した分析値が得られることを明らかにし、育種の選抜過程に適用できる迅速分析法を開発した (図5)。Ⅲにおいて、ゴマ種子中のセサミンおよびセサモリン含有量は開花後日数に伴って増減しており、これらは蒴果の登熟ステージを反映している (表3) ことを明らかにした。また、生育ステージが異なる個体間でも登熟期間が同じ蒴果の種子を用いて、その種子中のセサミンおよびセサモリン含有量を分析することで含有量の品種・系統間差が検出できることを明らかにし、このようなサンプリング法によりセサミンおよびセサモリン含有量の品種・系統間差が評価できる (表4) という結論に達した。Ⅳではゴマ遺伝資源におけるセサミンおよびセサモリン含有量の遺伝変異を調査し、既報 (福田ら 1988) より広い変異を有する集団を得た。この集団の中にセサミンおよびセサモリン含有量がともに高い遺伝資源「H65」を見出し、「H65」を用いて、これらの含有量が低い遺伝資源との交雑実験を行った。F₂集団の熟度がほぼ揃った種子を用いてセサミンおよびセサモリン含有量を測定し、含有量の分布は正、逆の交雑組合せで母方や父方どちらかだけに偏った分布ではない正規分布に近いことを示し、これらの結果から、成分含有量が複数の遺伝子によって支配されていると推察した。一方、セサミンおよびセサモリン含有量ともに、F₂個体とそのF₃系統の間に高い世代間相関が認められた (図13、図14) ことから、セサミンおよびセサモリン含有量の高い品種の育成のためには初期世代であるF₂集団で高含有個体を選抜することが有効であるという結論に達した。Ⅴでは育成したゴマ新品種「ごまぞう」を3ヵ年栽培し、栽培年次によらずセサミンおよびセサモリン含有量が対照品種「真瀬金」より多く、また多収性であることを明らかにした (表5)。さらに、関東以南の7箇所

で地域適応性試験を実施し、「ごまぞう」はいずれの試験地域でも栽培が可能であり、各試験地の収穫物は対照品種よりセサミンおよびセサモリン含有量が安定して高い（表6）ことを明らかにした。また、収穫時期が異なる収穫物のセサミンおよびセサモリン含有量を測定し、いずれの収穫物においても「ごまぞう」は対照品種「真瀬金」よりこれらの含有量が多いことを明らかにした。これらの結果を踏まえて、「ごまぞう」は栽培年次、栽培地、収穫時期によらず安定してセサミンおよびセサモリン含有量が高い品種であると結論した。Ⅵでは、「ごまぞう」の種子を食餌に添加したラットで、対照品種「真瀬金」を食餌に添加したラットより肝臓における脂肪酸代謝酵素の活性が上昇する（表9）こと、また、血清中の中性脂肪が対照品種「真瀬金」を食餌に添加したラットに比べて有意に低下することをする（表11）ことを明らかにし、「ごまぞう」は対照品種「真瀬金」に比べて、肝臓における脂肪酸代謝を促進する機能や、血清中の中性脂肪を低下させる機能に優れた品種であることを実証した。

ゴマのリグナン類には、水溶性と脂溶性がありそれぞれに生理機能が報告されている。本報告ではそのうち脂溶性リグナン類であるセサミンとセサモリンに着目し研究を進めているが、今後、ゴマの生理機能性の向上を図るためには、利用形態の多様化を考慮して水溶性リグナン類も含めた生理機能性成分について特性を解明し、さらに優れた育種素材の開発を進めていくことが必要であると考ええる。

2 機能性成分に関する育種と機能性農産物の展望

日本人の食生活は戦後から高度経済成長期を経て現在に至るまでに大きく変貌し、米を中心とした従来の伝統的日本型食生活から欧米型の洋食風食生活への転換が進んだ。食生活の変化とそれに対するニーズの多様化によって、加工食品の利用が進み、食の外部化・簡便化傾向が強まる中で栄養バランスに偏りが生じ、脂肪の

過剰摂取、カルシウムの摂取不足、塩分の過剰摂取などの様々な問題が指摘されるようになった。このような食生活の変化は、がん、動脈硬化、心臓病、高脂血症などの「生活習慣病」を引き起こす要因の一つとなっており、これらの予防として食品がもつ生体調節機能が注目されている（篠原 2000、Shinohara *et al.* 1988、Morita *et al.* 1978）。本研究で着目したゴマの他にも前述のダイズ（Ogawa *et al.* 1989）、ソバ（伊藤ら 2002、2004）、チャ（武田ら 1994）やサツマイモ（山川ら 1997）などで機能性成分の含有量を高めた品種の育成が行われた。

ダイズでは抗ガン作用や抗コレステロール作用などを示すイソフラボンを子実によく含む品種「フクイブキ」が育成され（島田ら 2004）、奨励品種として栽培されている。

また、毛細血管を強化する作用や血圧降下作用、抗酸化性などの機能性を示し、ソバに唯一含まれる成分であるルチン（岩科 1994、Oh-sawa *et al.* 1995、鈴木ら 2000、森下ら 2002）が着目され、従来の品種「信濃1号」に比べて4割も含有量が多く栽培特性にも優れる「とよむすめ」が育成され、広島県で普及している（伊藤ら 2005）。

チャでカテキンが抗酸化作用や抗菌作用などを示すことが報告されているが（山本 1996）、この含有量が多く耐寒性や収量性に優れた「べにふうき」が育成され、本州中部以南を栽培適地とした香気や滋味に優れた半発酵茶用品種として命名登録が行われた（武田ら 1994）。さらにこの品種の茶葉中の成分メチルカテキンに抗アレルギー作用などがあることが明らかにされ（山本(前田) 2002、山本(前田)ら 2004)、飲料などに市販されている。

サツマイモでは抗変異原性（Shinohara *et al.* 1988）などの機能性をもつβ-カロテンを多く含む「ベニハヤト」（坂本ら 1987）、「ジェイレッド」（山川ら 1998）や抗酸化性や抗変異原性（Yoshimoto *et al.* 1999）などの機能性を示すアントシアニンを従来品種より多く含みかつデンプン含有量も多く多収性の「アヤムラサキ」が育成された（山川ら 1997）。これらの新品種

の育成に伴う商品開発も進み、色素やペースト、パウダーなどへの加工用カンショとして新たな利用の促進が図られている（山川ら 1998、1999）。

このように機能性成分を多く含む品種の育成やその利用が進められる一方で、機能性を有する食品成分について新たな成分の検索や報告されている機能性成分について作用機構の解明などの研究も進められている。

ゴマの種子成分についても前述のようにセサミンとセサモリンに生体調節機能があることが既に明らかにされている。セサミンを含有したサプリメントは既に販売されており、ゴマのリグナン類は機能性成分として広く一般に周知されている。本研究で育成したセサミンとセサモリンの含有量が多い「ごまぞう」については、

種子の販売が開始されており、機能性成分の含有量を増加して健康維持に役立つ新規な特性を付与した品種として、需要の開拓に繋がるものと考えられる。

現在、日本で消費されているゴマの多くは海外から輸入されており、安価なゴマが大量に輸入されることで、従来のゴマ栽培は大きく減少した（安本ら 2004）。しかし、一方ではゴマの健康機能性に着目した新たな需要に呼応して新規にゴマの栽培を始める農家も出てきている。本研究で着目したセサミンおよびセサモリンの健康機能性に着目して育成した品種「ごまぞう」は海外輸入品との差別化も可能であり、これらの動向にも対応するものとしてゴマの国内生産拡大に貢献できる有用な育種戦略素材の一つとなると考える。

謝 辞

本論文をまとめるにあたり、ご指導ならびに原稿校閲の労をとっていただきました東北大学大学院農学研究科國分牧衛博士ならびに同研究科教授西尾剛博士、南條正巳博士に対しまして深く感謝いたします。

この研究を行うにあたって、始終あらゆる面でご指導くださいました作物研究所・元資源作物育種研究室長勝田眞澄博士（現特命チーム員）に心から感謝いたします。本論文に関し、懇切なご指導とご鞭撻をいただきました作物研究所企画管理室長峰司博士に心から感謝いたします。また、研究の端緒を与えて下さいました元資源作物育種研究室古明地通孝室長に厚くお礼申し上げます。貴重なご助言をいただきました元資源作物育種研究室奥山善直室長、元作物研究所・畑作物研究部長小巻克巳博士（現農業・食品産業技術研究機構本部企画調整部長）ならびに元食品総合研究所穀類利用研究室長堀金彰博士（現食品分析研究領域）に心から感謝いたします。また、分析法の開発にご協力いただき

ました名古屋大学大澤俊彦博士ならびに名古屋女子大学福田靖子博士に厚くお礼申し上げます。「ごまぞう」の機能性評価試験に多大なご協力をいただきました食品総合研究所元栄養化学研究室長井手隆博士（現栄養機能ユニット長）に心から感謝の意を表します。研究の遂行にあたり貴重なご助言をいただきました作物研究所元甘しょ育種研究室長中谷誠博士（現農林水産省大臣官房）、北海道農業研究センター元遺伝資源利用研究室本田裕室長（現寒冷地域特産研究チーム）、元近畿中国四国農業研究センター資源作物研究室杉浦誠室長（現中山間耕畜連携・水田輪作研究チーム）、元作物研究所資源作物育種研究室 G. M. Ali 博士に厚くお礼申し上げます。また、中央農業総合研究センター業務1科、業務3科職員、非常勤職員および資源作物育種研究室非常勤職員の方々には実験の遂行にあたり多大な協力をいただきました。ここに記して深く感謝いたします。

引用文献

- Akimoto, K., Y. Kitagawa, T. Akamatsu, N. Hirose, M. Sugano, S. Shimizu and H. Yamada (1993) Protective effects of sesamin against liver damage caused by alcohol or carbon tetrachloride in rodents. *Annals of Nutrition & Metabolism* 37: 218–224.
- Ashakumary, L., I. Rouyer, Y. Takahashi, T. Ide, N. Fukuda, T. Aoyama, T. Hashimoto, M. Mizugaki and M. Sugano (1999) Sesamin, a sesame lignan, is a potent inducer of hepatic fatty acid oxidation in the rat. *Metabolism* 48(10): 1303–1313.
- Balan, A., M. S. Dorairaj and N. Anitha (1996) Association of dry matter components with seed yield in sesame. *Madras Agricultural Journal* 83(1): 70–71.
- Baydar, H., R. Marquard and I. Turgut (1999) Pure line selection for improved yield, oil content and different fatty acid composition of sesame, *Sesamum indicum*. *Plant Breeding Turkey* 118(5): 462–464.
- Beroza, M. and M. L. Kinman (1955) Sesamin, sesamol, and sesamol content of the oil of sesame seed as affected by strain, location grown, ageing, and frost damage. *The Journal of the American Oil Chemists' Society* 32: 348–350.
- Bhiravamurthy, P. V., R. D. Kanakala, E. V. Rao and K. V. Sastry (1979) Effect of some furanoid lignans on three species of seeds. *Current Science* 48 (21): 949–950.
- Budowsky, P. (1950a) Sesame oil. III. Antioxidant properties of sesamol. *The Journal of the American Oil Chemists' Society* 27: 264–267.
- Budowsky, P. (1950b) Sesame oil. V. The stability of sesame oil. *The Journal of the American Oil Chemists' Society* 27: 377–380.
- Budowsky, P. and K. S. Markley (1951) The chemical and physiological properties of sesame oil. *Chemical Review* 48:125–151.
- Budowsky, P. (1964) Recent research on sesamin, sesamol and related compounds. *The Journal of the American Oil Chemists' Society* 41: 280–285.
- Dikshit, U. N. and D. Swain (2000) Genetic divergence and heterosis in sesame. *Indian Journal of Genetics & Plant Breeding* 60(2): 213–219.
- Dorothea, B., D. S. Seigler and J. R. Harlan (1985) Sesamin, sesamol and the origin of sesame. *Biochemical Systematics and Ecology* 13 (2): 133–139.
- Dorothea, B. (2003) Evolution of sesame revisited: domestication, diversity and prospects. *Genetic Resources and Crop Evolution* 50: 779–787.
- Durga, K. K. and G. Raghunadham (2001) Heterosis for morphological, reproductive and yield attributes with selected genotypes of sesame (*Sesamum indicum* L.). *Journal of Research ANGRAU* 29 (1): 16–21.
- Eagleson, C., U. S. Patent (1942) Soap and Sanit. Chemicals 18 (12):125.
- 原征彦・渡辺真由美 (1989) 茶ポリフェノール類のボツリヌス菌に対する抗菌作用. *日本食品工業学会誌*36(12) : 951–955.
- 原征彦・石上正 (1989) 茶ポリフェノール類の食中毒細菌に対する抗菌活性. *日本食品工業学会誌*36(12) : 996–999.
- Haller, H. L., E. R. McGorvan, L. D. Goodhue and W. N. Sullivan (1942) The synergistic action of sesamin with pyrethrum insecticides. *The Journal of Organic chemistry* 7: 183–184.
- Feldman, G. L. and L. S. Feldman (1966) Quan-

- titative analysis of phospholipids by thin-layer chromatography and analysis of spots. Hirata, F., K. Fujita, Y. Ishikura, K. Hosoda, T. Ishikawa and H. Nakamura (1996) Hypocholesterolemic effect of sesame lignan in humans. *Atherosclerosis* 122: 135-136.
- Hirose, N., T. Inoue, K. Nishihara, M. Sugano, K. Akimoto, S. Shimizu and H. Yamada (1991) Inhibition of cholesterol absorption and synthesis in rats by sesamin. *Journal of Lipid Research* 32: 629-638.
- Hirose, N., F. Doi, T. Ueki, K. Akazawa, K. Chijiwa, M. Sugano, K. Akimoto, S. Shimizu and H. Yamada (1992) Suppressive effect of sesame against 7,12-dimethylbenz[a]anthracene induced rat mammary carcinogenesis. *Anticancer Research* 12: 1259-1266.
- 福田靖子・大澤俊彦・並木満夫 (1981) ゴマの抗酸化性について. *日本食品工業学会誌* 28 (8) : 461-464.
- Fukuda, Y., M. Nagata, T. Osawa and M. Namiki (1986) Contribution of lignan analogues to antioxidative activity of refined unroasted sesame seed oil. *Journal of the American Oil Chemists' Society* 63 (8): 1027-1031.
- 福田靖子・大澤俊彦・川岸舜朗・並木満夫 (1988) 国産ゴマ品種間のセサモリンおよびリグナン抗酸化性物質の比較. *日本食品工業学会誌* 35 (7) : 483-486.
- Ide, T., H. Okamatsu and M. Sugano (1978) Regulation by dietary fats of 3-hydroxy-3-methylglutaryl-coenzyme A reductase in rat liver. *Journal of Nutrition* 108: 601-612.
- Ide, T., H. Oku and M. Sugano (1982) Reciprocal response to clofibrate in ketogenesis and triglyceride and cholesterol secretion in isolated rat liver. *Metabolism* 31: 1065-1072.
- Ide, T., S. Hirabayashi, S. Kano and M. Sugano (1992) Soybean phospholipid dependent reductions in triacylglycerol concentration and synthesis in the liver of fasted-refed rats. *Biochemica et Biophysica Acta* 1124: 163-170.
- Ide, T., M. Murata and M. Sugano (1996) Stimulation of the activities of hepatic fatty acid oxidation enzymes by dietary fat rich α -linolenic acid in rats. *Journal of Lipid Research* 37: 448-463.
- 池田彩子・安本(白戸)知子・山下かなへ (2000) リグナン高含有ゴマのラット体内ビタミンE濃度上昇作用. *日本家政学会誌* 51(11) : 1017-1025.
- 伊藤誠治・大澤良・堤忠弘・馬場孝秀・荒川明・林敬子・中村恵美子 (2002) 多収でルチン含量が改善されたそば新品種候補系統「北陸2号」. *農業技術研究機構研究成果情報* IV : 32-33.
- 伊藤誠治・大澤良・堤忠弘・馬場孝秀・荒川明・林敬子・中村恵美子 (2004) 豊かな香りで美味しいそば新品種「とよむすめ」の選定. *農業技術研究機構研究成果情報*.
- 伊藤誠治・大澤良・堤忠弘・馬場孝秀・荒川明・林敬子・中村恵美子 (2005) 多収でルチン含量が改善されたそば新品種「とよむすめ」の育成. *中央農業総合研究センター研究報告* 6 : 1-13.
- 岩科司 (1994) 食品に含まれるフラボノイドとその機能 1. 果物のフラボノイド. *食品工業* 37 : 51-70.
- Jose R. L., D. Ursicino and R. D. Quidiello (1990) Difinite influence of location and climatic condition on fatty acid composition of sunflower seed oil. *Journal of the American Oil Chemists' Society* 67 (10): 618-623.
- Kabir, Y. and T. Ide (1996) Activity of hepatic fatty acid oxidation enzymes in rats fed α -linolenic acid. *Biochemica et Biophysica Acta* 1304: 105-119.
- Kamala, T. (1999) Gene action for seed yield and yield components in sesame (*Sesamum indicum*). *Indian Journal of Agricultural Sciences* 69(11) : 773-774.
- Kang, M-H., H. Katsuzaki and T. Osawa

- (1998) Inhibition of 2,2'-Azobis (2,4-dimethylvaleronitrile)-induced lipid peroxidation by sesaminols. *Lipids* 33 (10): 1031-1036.
- Kang, M-H., M. Naito, N. Tsujihara and T. Osawa (1998) Sesamol inhibits lipid peroxidation in rat liver and kidney. *Journal of Nutrition* 128 (6): 1018-1022.
- Kang, M-H., M. K. Oh, J. K. Bang, D. H. Kim, C. H. Kang and B. H. Lee (2000) Varietal difference of lignan contents and fatty acids composition in Korean sesame cultivars. *Korean Journal of Crop science* 45(3): 203-206.
- Karupaiyan, R. and P. Ramasamy (2000) Cause and effect relationship between seed yield and its components in sesame. *Madras Agricultural Journal* 87 (1/3): 74-76.
- 河西稟衛 (1953) 胡麻の品種に関する研究. 第2報 移植の影響及び含油量に就いて. *日作紀* 22: 129-130.
- 小林貞作 (1977) ゴマ. 特集・特用作物 遺伝 5月号: 54-64.
- 小林貞作 (1986) ゴマの来た道. 岩波書店, 東京.
- Langham, D. G. (1945a) Genetics of sesame I. *The Journal of Heredity* 36: 135-142.
- Langham, D. G. (1945b) Genetics of sesame II. Inheritance of seed pod number, aphid resistance, "yellow leaf", and wrinkled leaves. *The Journal of Heredity* 36: 245-253.
- MacRae, W. D. and G. H. N. Towers (1984) Biological activities of lignans. *Phytochemistry* 23 (6): 1207-1220.
- Mansouri, S. and M. R. Ahmadi (1998) Study of combining ability and gene effect on sesame lines by diallel cross method. *Indian Journal of Agricultural Sciences* 29 (1): 47-55.
- Massuo J. K., A. C. Laurence, B. Davin and N. G. Lewis (1998) Biosynthesis of antioxidant lignans in *Sesamum indicum* seeds. *Phytochemistry* 47(4): 583-591.
- Matsubara, Y., H. Kumamoto, Y. Iizuka, T. Murakami, K. Okamoto and H. Miyake (1985) Structure and hypotensive effect of flavonoid glycosides in *Citrus unshiu* peelings. *Agricultural and biological chemistry* 49 (4): 909-914.
- Matsumura, Y., S. Kita, S. Morimoto, K. Aki-moto, M. Furuya, N. Oka and T. Tanaka (1995) Antihypertensive effect of Sesamin. I. Protection against deoxycosterone Acetate-Salt-induced hypertension and cardiovascularhypertrophy. *Biological and Pharmaceutical Bulletin* 18 (7): 1016-1019.
- 松崎妙子・原征彦 (1985) 茶葉カテキン類の抗酸化作用について. *日本農芸化学会誌* 59 (2): 129-134.
- Minami, M., H. Kitabayashi, K. Nemoto and A. Ujihara (2001) Breeding of high rutin content common buckwheat, "SunRutin". *Advances in Buckwheat Research (Proc. 8th Intl. Symp. Buckwheat at Chunchon)*: 367-370.
- 南峰夫・北林広巳・堀井朝運・氏原暉男 (2000) 普通ソバ高ルチン含有品種「サンルチン」の開発. *食品工業* 43(6) 19-24.
- Mishra, A., B. Pradhan, K. C. Muduli and S. Mukhopadhyay (1997) Comparison of varietal performance and inter-relationship among yield attributing traits of sesamum (*Sesamum indicum* L.). *Environment and Ecology* 15(2): 478-481.
- 森下敏和・手塚隆久 (2002) 九州における普通ソバ子実のルチン、粗蛋白および粗脂肪含有量の品種間差異. *日作紀* 71(2): 192-197.
- Mosjidis, J. A. and D. M. Yermanos (1985) Plant position effect on seed weight, oil content, and oil composition in sesame. *Euphytica* 34: 193-199.
- Morita, K., M. Hara and T. Kada (1978) Studies on natural desmutagens: Screening for vegetable and fruit factors active in inactivation of mutagenic pyrolysis products from amino acids. *Agricultural and biological*

- cal chemistry 42(6): 1235-1238.
- 中山幹男・戸田眞佐子・大久保幸枝・原征彦・島村忠勝 (1992) 茶のインフルエンザウィルスに対する *in vivo* での感染阻止効果. 日本細菌学雑誌47(1) 98.
- Nimbalkar, C. A., P. A. Navale and D. D. Up-lap (1999) Relative contribution of component characters on yield of *Sesamum*. Journal of Maharashtra Agricultural Universities 24(3): 260-262.
- 農業生物資源研究所農業生物資源ジーンバンク. 植物遺伝資源特性評価マニュアル. 「ゴマ」一次必須項目.
- 農林水産省生産局特産振興課資料 (2003) 特殊農産物生産実績. pp 4.
- Ogawa, T., E. Tayama, K. Kitamura and N. Kaizuma (1989) Genetic improvement of seed storage proteins using three variant alleles of 7S globulin subunits in soybean (*Glycine max* L.) Japanese Journal of Breeding Science 39: 137-147.
- Ohsawa, R. and T. Tsutsumi (1995) Inter-variety of rutin content in common buckwheat flour (*Fagopyrum esculentum* Moench.) Euphytica 86: 183-189.
- 財務省貿易統計局 (2003) 財務省貿易統計概況品別表
- 佐藤新之助・福田靖子・大澤俊彦・田代亨 (1999) ゴマ種子の成育に伴うリグナン類の動態について. Sesame Newsletter 13: 6-7.
- 坂本敏・丸峯正吉・井手義人・山川理・久木村久・吉田智彦・田渕尚一 (1987) カンショ新品種「ベニハヤト」について. 九州農業試験場報告25(3): 225-250.
- Shimizu, S., K. Akimoto, Y. Shinmen, H. Kawashima, H. Sugano and H. Yamada (1991) Sesamin is a potent and specific inhibitor of $\Delta 5$ desaturase in polyunsaturated fatty acid biosynthesis. Lipids 26: 512-516.
- Shinohara, K., S. Kuroki, M. Miwa, Z-L. Kong and H. Hosoda (1988) Antimutagenicity of dailyzates of vegetables and fruits. Journal of Agricultural and Biological Chemistry 52 (6): 1369-1375.
- 篠原和毅 (2000) 動物細胞を用いた食品機能性検定. 日本食品科学工学会誌47(6): 399-405.
- 島田信二・高田吉丈・境哲文・河野雄飛・島田尚典・高橋浩二・足立大山・田渕公清・菊池彰夫・湯本節三・中村茂樹・伊藤美環子・番場宏治・岡部昭典・高橋信夫・渡辺巖・長沢次男 (2004) 耐病虫性・多収・高イソフラボン含有ダイズ新品種「ふくいぶき」の育成. 東北農業研究センター研究報告 102: 41-56.
- Shirato-Yasumoto, S., M. Katsuta, Y. Okuyama, Y. Takahashi and T. Ide (2001) Effect of sesame seeds rich in sesamin and sesamol on fatty acid oxidation in rat liver. Journal of Agricultural and Food Chemistry 49 (5): 2647-2651.
- Shirato-Yasumoto, S., M. Komeichi, Y. Okuyama and A. Horigane (2003) A simplified HPLC quantification of sesamin and sesamol in sesame seed. SABRAO Journal of Breeding and Genetics 35 (1): 27-34.
- 鈴木建夫・進藤久美子 (2000) 概説・そばの栄養成分. そばの栄養. 社団法人日本蕎麦協会: 1-4.
- Snedecor, G. W., and Cochran, W. G. (1989) Statistical methods 8th Ed., Iowa state University Press, Ames.
- 菅井道三 (1989) ゴマ種子の形成と発芽過程における油脂成分の消長. ゴマの科学. 並木満夫・小林貞作編. 朝倉書店, 東京. 53-59.
- 武田善行・和田光正・根角厚司 (1994) 紅茶及び半発酵茶用新品種「べにふうき」の育成. 野菜・茶業試験場研究報告65: 48.
- 武田珠美・福田靖子 (1997) ゴマ種子の調理性に関する研究 (第1報) ゴマ種子の炒り条件と成分の変化. 日本家政学会誌 48(2): 137-143.
- Takeda, Y., F. Suzuki and H. Inoue (1969) ATP citrate lyase (citrate-cleavage en-

- zyme). *Methods in Enzymology* 13: 153-160.
- Tashiro, T., Y. Fukuda, T. Osawa and M. Namiki (1991) Oil and minor components of Sesame (*Sesamun indicum* L.) strains. *The Journal of the American Oil Chemists' Society* 67(8): 508-511.
- Tashiro, T., Y. Fukuda and T. Osawa (1991) Oil contents of seeds and minor components in the oil of sesame, *Sesamun indicum* L., as affected by capsule position. *Japanese Journal of Crop Science* 60(1): 116-121.
- Tocher, J. F. (1893) A further note on sesamin. *The Pharmaceutical Journal and Transactions*: 700-702.
- Tsukamoto, C., S. Shimada, K. Igita, S. Kudou, M. Kokubun, K. Okubo and K. Kitamura (1995) Factors affecting isoflavone content in soybean seeds: changes in isoflavones, saponins, and composition of fatty acids at different temperatures during seed development. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 43:1184-1192.
- 内山充・水柿道直 (1975) 脂肪酸の β -酸化。脂質の代謝。日本化学会編。東京化学同人。東京。74-87.
- 山川理・須田郁夫・吉元誠 (1998) 高アントシアニンサツマイモの開発と利用。食品・食品添加物研究誌 178: 69-77.
- 山川理 (1999) 高色素サツマイモの育種と利用。農業及び園芸74(8): 9-14.
- 山川理・吉永優・日高操・熊谷亨・小巻克己 (1997) カンショ新品種「アヤマラサキ」の育成。九州農業試験場報告31: 1-22.
- 山本（前田）万理 (1996) 茶の体調調節機能。日本食品科学工学会誌43(6): 653-662.
- 山本（前田）万理 (2002) 緑茶の抗アレルギー作用とがん転移阻害効果。日本食品科学工学会誌49(10): 631-638.
- 山本（前田）万理・永井寛・鈴木優子・森脇佐和子・浅井和美 (2004) 抗アレルギー成分含量を保持した低カフェイン「べにふうき」、「べにほまれ」緑茶製造法。日本食品科学工学会誌51(8): 435-439.
- Yamashita, K., Y. Iizuka, T. Imai and M. Namiki (1995) Sesame seed and its lignans produce marked enhancement of vitamin E activity in rats fed a low α -tocopherol diet. *Lipids* 30 (11): 1019-1028.
- 安本知子・徳宿次男・横田一郎 (2004) 岐阜県及び愛知県北部におけるエゴマ (*Perilla frutescens*) 及びゴマ (*Sesamum indicum*) 在来種の探索収集。植物遺伝資源探索導入調査報告書 20: 19-25.
- 安本知子・勝田眞澄・杉浦誠・奥山善直・本田裕・古明地通孝 (2003) 高リグナン含有ごま新品種「ごまぞう」の育成。作物研究所報告 4: 45-58.
- 安本知子・杉浦誠・小巻克己・勝田眞澄 (2005) ゴマ (*Sesamum indicum* L.) の成熟に伴う種子中のセサミンとセサモリン含有量の変動と成分特性の評価。日作紀74(2): 165-171.
- Yermanos, D. M., S. Hemstreet, W. Saleeb and C. K. Huszar (1972) Oil content and composition of the seed in the world collection of sesame introductions. *Journal of the American Oil Chemists' Society* 49: 20-23.
- Yoshimoto, M., S. Okuno, M. Yoshinaga, O. Yamakawa, J. Yamada and M. Yamaguchi (1999) antimutagenicity of sweetpotato (*Ipomea batatas*) roots. *Bioscience Biotechnology and Biochemistry* 63(3): 537-541.