

***** 解 説 *****

新食品シリーズ 9

エクストルーダー利用食品

野 口 明 徳

「エクストルーダー」という言葉をあえて訳せば「押し出し機」となるが、言葉のイメージは全機能を包括するにはあまりに狭く、そのためエクストルーダーを利用する食品加工は、そのまま「エクストルージョン・クッキング」と呼ばれている。エクストルーダーおよびその応用概略については、総説¹⁾あるいは成書²⁾³⁾を参照されたい。栄養価については Asp ら⁴⁾の総説を参考にした。

エクストルーダーの起源は、アルキメデスが考案した水汲み上げポンプに端を発するとされているが、それが事実ならば非常に長い歴史を持つわけである。しかし、装置とその利用の開発が始まったのはここ数年のことで、必然的に関連する情報も限られていることをあらかじめ断っておきたい。この技術に関連する食品を分類するに当たっては、原料成分に基づくことが最も無難と考えられる。栄養学的に分類した例は表 1⁵⁾に示した。

澱粉主体食品または食品素材

澱粉加工品は何千年の歴史を持つが、工場生産のインスタント澱粉食品 (ready-to-eat) の出現は、今世紀初頭の米国とされている⁶⁾。ビスケット状食品は消化不良に悩まされていたコロラド州デンバー出身のパーキー弁護士が、ゆでた小麦を牛乳と混ぜてマッシュにした物に治療効果があることを見だし、彼はゆでた小麦から緻密な薄片を作製する装置を考案して、その薄片をオーブンで焼いてビスケット状にしたとされている。またコーンフレークのパイオニアは、Dr. J. Kellog と W. Kellog

の兄弟で、Dr. J. Kellog は現在のコーンフレークの先駆けとなるトースト済み味付けトウモロコシを考案し、W. Kellog はそれをさらに改良したとされている。

膨化して商品にする場合と、密な素材をエクストルーダーで調整し続いてオープン等で膨化させる場合があり、後者を第3世代のスナックと呼ぶことがある。図 1a に両者の代表例を示し、図 1b⁷⁾には製造ラインの一例を示した。

澱粉は他の加工方法と比べて、非常に低い水分条件で α 化しており、エクストルーダー内での高剪断と高温が寄与していると思われる。したがって、当然、澱粉分子は一部損傷しデキストリン化して、「湯溶けが早い」あるいは「歯付きが強い」という欠点を製品に与えてしまう。後者の場合は唾液アミラーゼによってマルトースや他のオリゴ糖に分解されると、口腔内の細菌により有機酸が作られ、虫歯の原因となる場合もありうる。

① 穀類食品は概してビタミン、灰分が豊富、② 澱粉は、低分子炭水化物と比べて消化吸収速度が遅い。したがって摂取後、血中グルコース濃度は急激に上昇せず、食後の飽食感を持続しながらインシュリンを低レベルに保ち、結果的に肥満を抑制するなどの点から他の炭水化物に比べて重要である。興味深い点は、ジャガイモ澱粉、高アミロース含量のトウモロコシ澱粉、バナナ澱粉は生の状態ではほとんど消化性を示さず、生物学的にはダイエタリーファイバーと同等の効果がある。

(1) 澱粉の消化吸収速度に及ぼすエクストルーダー処理の影響

小麦澱粉、小麦粉、全粒小麦粉をエクストルーダー処理 (Clextral BC45, $T_p=161\sim 171^\circ\text{C}$, $\text{H}_2\text{O}=15$ あるいは 20 %, 200 あるいは 350 g/min, 100~200 rpm) した物は、これらを煮沸処理 (20 分間) した場合と比較し、アミラーゼ感受性が非常に高くなる。なお、 T_p はエクストルーダー最終バレルでの材料温度を意味する。この

Akinori NOGUCHI 農林水産省食品総合研究所

著者紹介 [略歴] 昭和 50 年東京工業大学大学院修了、理学博士。昭和 50 年より食品総合研究所勤務、現在に至る。[専門分野] 食品工学、農芸化学 (高温あるいは高圧による食品加工、固液分離、食品加工のフエジー制御)。[趣味] 登山、オートキャンピング、アマチュア無線。[連絡先] 〒305 つくば市観音台 2-1-2 (勤務先)。

表 1. エクストルージョン・クッキング応用例の栄養学的分類

Status	Little nutritional concern	Avoid nutrient destruction; increase starch digestibility	Destroy antinutritional and/or toxic factors	Prepare nutritionally enriched or balanced foods
Industrial	Bread crumbs	Corn and potato snacks	Oilseed meals	Animal feeds (cattle, pet foods, fish food)
	Precooked starches	Co-extruded snacks with internal filling	Precooked soy flours (including full-fat soy flour) (for enhancement of bread, paste, etc.)	Precooked instant weaning foods or gruels (cereal/legume blends such as CSM-WSB)
	Anhydrous decrystallization of sugars to make confectioneries (hard candies)	Flat crispbread (bread substitute, toasted bread)		Texturized vegetable proteins (meat replacers)
	Chocolate conching	Biscuits, crackers, cookies		Dietetic foods (gluten-free, band-enriched, etc.)
	Pretreated malt and starch for brewing	Breakfast cereals and flakes		
Develop-ment	Stabilization of rice bran	Precooked flours, instant tortilla flour, instant rice pudding		
	Gelatin gel confectioneries	Cereal-based instant dry soup mixes or drink bases		
	Caramel, liquorice, chewing gum	Transformation of casein into caseinate		
	Degermination of spices	Quick-cooking pasta products	Destruction of aflatoxins or gossypol in peanut or cottonseed meal	Gelation of vegetable proteins (high moisture)
	Encapsulation or generation of flavouring agents	Oilseed treatment for subsequent oil extraction	Sterilization of blood meal	Restructuring of minced meat or MDM (high moisture)
	Enzymatic liquefaction of starch for fermentation into ethanol	Preparation of specific doughs (no retrogradation during cold or frozen storage)		Prepare new sterile process cheese (high moisture, high fat)
				Prepare sterile baby foods (high moisture)

煮沸処理した物は続くオートクレーブ処理によってやっ
とエクストルーダー処理と同等のアミラーゼ感受性を示
す。一方、血中グルコース値の上昇はラットの試験によ
ると、エクストルーダー処理の方が煮沸処理物より高
い。また全粒小麦のフラットブレッド（エクストルーダ
ーによる作製）は同一材料での薄片状（通常法）の物よ
り、血中グルコース値の上昇は早い。

こうした分解感受性に影響する因子としては、1) 食
品全体の構造、2) 微細構造、3) 澱粉粒子構造（ α 化度
合等）、4) 粒度、溶解性、その他の生物学的特性、5) ア
ミロース・アミロペクチン量比、6) 澱粉・リピッド複
合体、7) 澱粉・蛋白複合体、8) フィチン酸、レクチン、
タンニン、9) アミラーゼ阻害因子、などが考えられる。

一般に澱粉の α 化には最低 30～40 % の水分を必要と
するが、それ以下の水分でエクストルーダーは 110～
135℃ 以上の温度条件であれば、ほぼ完全に α 化が可能
である。現在、澱粉 α 化の機構については、最も妥当と
されている Donovan と Mapes の説⁹⁾ が有力である。
すなわち、澱粉の結晶領域はそのアモルファス領域とリ
ンクしており、最初にアモルファス領域が膨潤して、そ
の際に結晶領域にも大きな影響を与えるため、比較的
低水分条件でも高温で澱粉は容易に α 化するというもの
である。したがって、単なる熱処理と比べて、エクスト
ルーダーでは比較的高温処理とエクストルーダー内部で
発生する強力な剪断応力との相乗効果が、低水分での澱
粉の α 化に大きく寄与していると思われる。

(2) 微細構造と生物学的特性

溶解性の変化、粒度の低下などは、アミラーゼ感受
性に影響すると思われるが、低分子化によって、それ
自体がアミラーゼ分解を促進することはない。

(3) 澱粉・リピッド複合体

リピッドを添加して澱粉をエクストルーダー処理す
ると、結晶状の物質生成が認められ、それがアミロ
ース・リピッドの複合体であることが報告されている。
この複合体はアミラーゼ感受性が非常に低いが、す
い液アミラーゼの長時間処理によって完全に分解さ
れる。しかし、クリスプブレッドが示す良好な消化性
は、その含油分と製造方法（エクストルーダー処理）
を考えると、複合体形成の影響よりも細胞破壊・粒
状構造の変化がより大きく現れているものと考えて
よい。

極性脂質が共存する場合、短鎖トリグリセリドは
 α 化を促進するが、長鎖トリグリセリドはアミロ
ースと複合体を形成して水和・膨潤を抑制する。
ステアリン酸、オレイン酸のような C_{18} の脂
肪酸とそのモノグリセリドは、

エクストルーダー利用食品

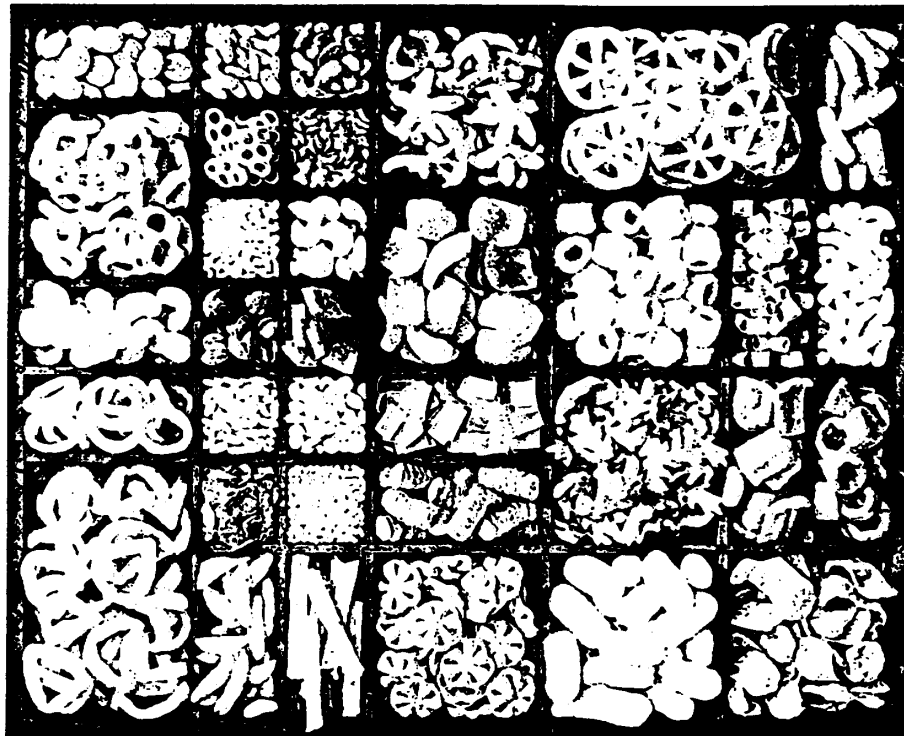


図 1a. 澱粉主体素材の例

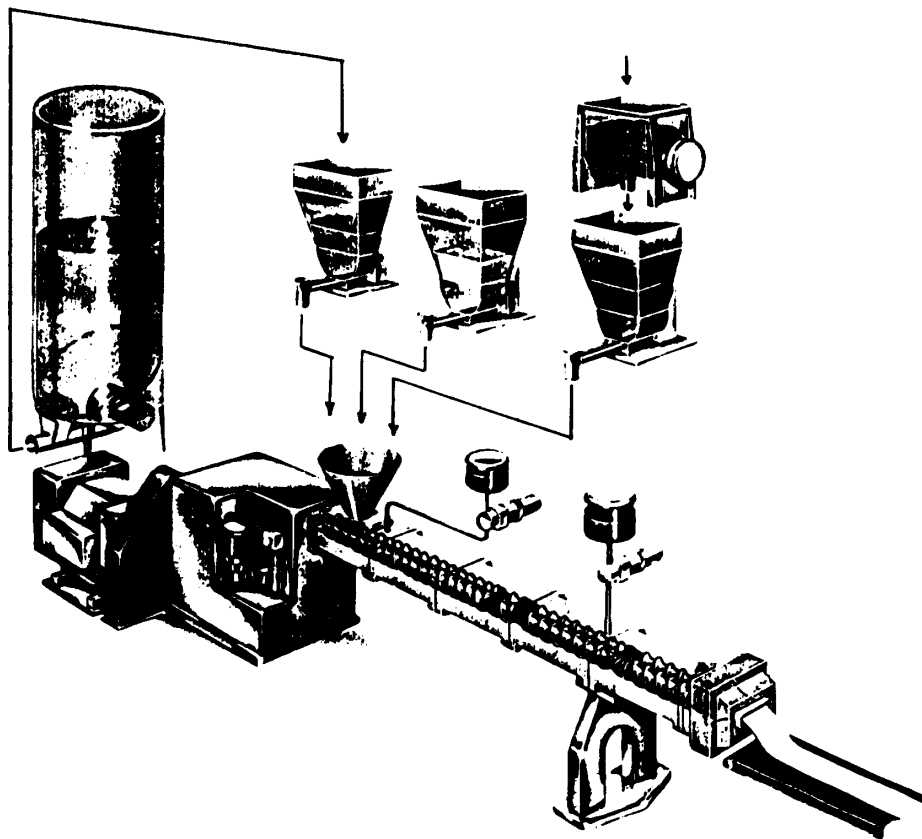


図 1b. 製造ラインの例

アミロースと強く結びついて複合体を作り、少なくとも 95℃ までは α 化が抑制される。この複合体は、アミロペクチンでは作られない。したがって、エクストルージョン・クッキングでこうした極性脂質を用いれば、かなり効果があることになる。事実、2%のオレイン酸と処理した澱粉では水溶性が90%から25%に低下し、 C_{16} や C_{18} のモノグリセリドでも同様の結果が報告されている⁹⁾。

(4) 澱粉含量

エクストルーダー処理後の澱粉量変化（すなわちエクストルーダー処理により澱粉として検出されず、澱粉以外の物質に変換する可能性）は、アミラーゼ・グルコアミラーゼ分解・定量の検討の結果、ないことが認められている。

(5) 製品構造・細胞構造

これらは消化性に大きな影響を与える。たとえば、破碎米は通常米より高い血中グルコース応答を示し、インシュリン応答も高い。エクストルーダーの剪断はこれに寄与していると考えられる。

(6) 澱粉粒の構造

大半の穀類澱粉は、ゆっくりとしかし完全に消化されるが、ジャガイモ澱粉、高アミローストウモロコシ澱粉は消化に抵抗性を示し、吸収も不完全である。この原因の一つとして、体積・表面積比および粒の表面構造が挙げられる。酵素加水分解のためには澱粉の熱 α 化が必要であり、小麦澱粉の α 化度（示差熱分析で測定）とその

アミラーゼ分解速度、ラットによる血中グルコース応答との間には密接な関係が認められている。

(7) 澱粉・蛋白複合体

蛋白は澱粉を皮膜する形で、アミラーゼ処理を妨害するとも考えられるが、胃液ペプシンがあるため、仮にそうであっても蛋白は分解され澱粉が露出されるので、すい液アミラーゼの妨害にはならないと予想される。事実、小麦粉または全粒小麦のエクストルーダースナックをまずペプシン処理し、続いてアミラーゼ処理を施した例では、分解性に何の変化も認められていない。

(8) グルコシド結合の形成

澱粉を低水分で長時間高温加熱（130～220℃、2～20 hr）すると、グルコシド結合が部分的に切断され、1,6-anhydroglucopyranose (levoglucosan) が生じる。エクストルーダー処理でこの levoglucosan が生成することは、小麦粉のエクストルーダー処理（Clextral BC45, $T_b=200^\circ\text{C}$ ）で検出されている。なお、 T_b はエクストルーダー最終バレルの温度を意味しており、その部位での材料温度（ T_p ）を意味しない。一般に T_b は T_p より温度が数度高い。この1,6-無水化合物は反応性が高く、新たに分岐 glucan を形成するため、アミラーゼ消化性に影響することになるが、エクストルーダー生成物でのテストでは、ほとんど影響なく、したがって、存在するとしても無視できる。

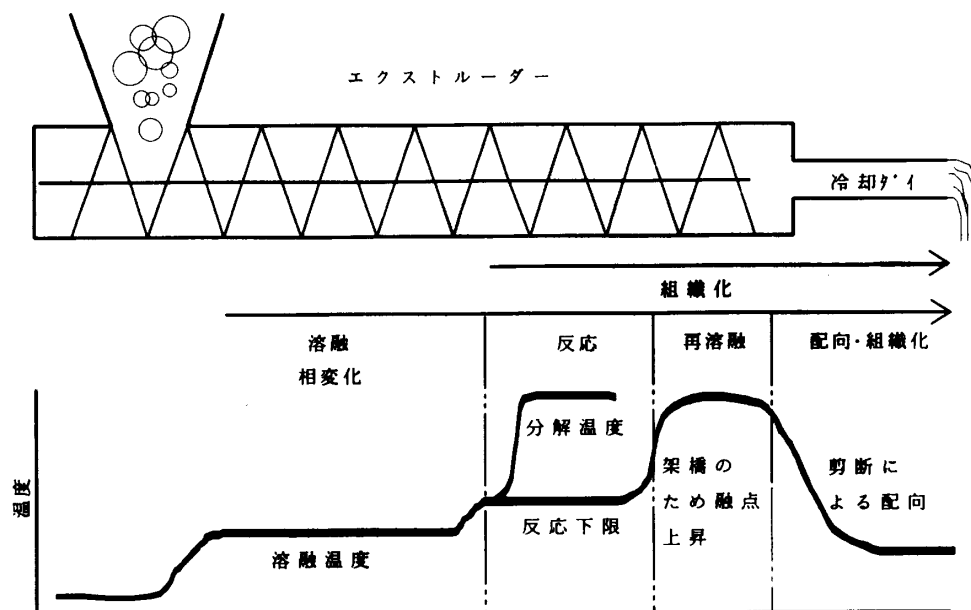


図 2. エクストルーダー内での蛋白組織化モデル

エクストルーダー利用食品



図 3. 蛋白素材の例（上：植物蛋白主体，
下：魚肉蛋白主体）

蛋白主体食品または素材

蛋白はエクストルーダー内で図2に示す変化を経て組織化されると思われる。このメカニズムからすれば、基本的には蛋白の由来を問わず、組織化が可能となるはずであり、図3に示すように植物蛋白、魚肉蛋白からさまざまな素材が開発され市販されるようになった。組織化に際して脂質は阻害因子になるためか、残念ながら畜肉を主体成分とする材料の組織化に成功した例はまだない。しかし、魚肉のような高水分材料の処理が、当初ほとんど不可能と考えられていたことを考えれば、畜肉での成功は時間の問題と思われる。高水分系あるいは複合蛋白または複数成分から成る材料の場合、処理方法によっては蛋白の配向微細構造も作製可能で、テクスチャーも人為的に変化させることができる。

先に挙げた市販各素材について研究されたわけではないことをあらかじめ断っておくが、蛋白組織化素材の栄

養価については、関心の高まりと共に研究が種々行われており、その一部を紹介したい。

(1) ミートアナログ

蛋白紡糸法で分離大豆蛋白を処理した物は肉代替品として、エクストルージョン・クッキングの物は肉増量材として用いられてきた。しかし、最近ではエクストルーダー処理物が肉代替品になろうとしている。欧米では約95%のTPP (Textured Plant Protein) はエクストルーダーで製造されている。エクストルーダーの利点は、材料全体を使用できるという意味で生産効率が良いためと言える。大豆分離蛋白だけでなく、菜種、ピーナッツ、脱脂綿実の蛋白もエクストルーダーにより組織化が可能である。学校や病院で用いられており、一般スーパーマーケットでも市販されているので、これら製品の栄養価については慎重に検討しなければならないだろう。この場合、検討すべき項目は1) 蛋白栄養価に及ぼす組織化の影響、2) 灰分の含量ならびにその生物学的有効性から見て、肉を組織化蛋白で置換する一般的意義は何かということである。

(2) 蛋白栄養価

組織化の機構およびそれに関与する反応が明確にされていないため、十分な議論ができないきらいはある。ただし、非共有結合が関与しているとしても、その消化性にはあまり影響しないと考えてよい。

-S-S-結合が組織化に関与して独特の構造を生成物にもたらすと報告¹⁰⁾¹¹⁾されているが、一般に消化酵素によって消化・分解されるので問題はない。高温加熱処理により、リジンの ϵ -NH₂基と酸性アミノ酸のCOOH基との間には、イソペプチド結合が生じると報告されている。組織化蛋白は胃腸内プロテアーゼによって分解されるものの、分解して生じた各種アミノ酸は限られた時間内に組織内に吸収されなければ意味がなく、したがって、分解速度が重要な意味を持つ。残念ながらこのイソペプチド結合は分解速度を減少させるので、結果的に蛋白の生物学的栄養価を低下させることになる。

市販の組織化大豆蛋白をそのままあるいはそれにメチオニンを添加して、肉との栄養比較（人間）を行った研究では、窒素保持率は肉の方がはるかに高いが、組織化大豆蛋白はメチオニン添加で肉と同等になった。しかし、見かけの消化率は三者（組織化大豆蛋白、それにメチオニンを添加した物、肉）いずれも高い値を示したと報告されている¹²⁾。類似の研究¹³⁾が健康成人について行われており、78%の大豆紡糸製品置換率でもほぼ窒素バランスは得られており、さらに30%の肉添加で窒素バラ

ンスは平衡に達したと報告されている。他に市販8種の組織化大豆蛋白の栄養価検討¹⁴⁾では、PER (タンパク効率) は1.75~2.31であり、メチオニン添加では非常に高い値になる。肉の25%を組織化大豆蛋白で置換すると蛋白栄養価は低下するとされている。別の研究では、エクストルーダー組織化豆類蛋白を全蛋白の50~60%置換した食事での4日間の窒素バランス試験(人間)では、窒素バランスに問題はなく、胃腸に不快感もなく、さらに血中脂質に改善が見られたとの報告¹⁵⁾もある。

大豆蛋白以外での研究例もあり、たとえば、Wenger (米国) が開発した Uni-tex 方式によって、菜種蛋白を組織化すると、リジン、チロシン、含硫アミノ酸に損失が生じて、若干の蛋白栄養価低下が認められた報告¹⁶⁾もある。しかし、この菜種蛋白を大豆粉と一緒に組織化すると、NPU (タンパク正味利用率) と PER は、大豆粉単独またはカゼインのそれらより高くなるとしており、結論として、菜種蛋白は高い含硫アミノ酸量と組織化特性に優れることから、大豆ベースの肉増量材の蛋白品質を改善するのに役立つという結論に達している。

これらの情報を基にすると、組織化植物蛋白を少量摂取の段階で比較するならば、その栄養価は動物蛋白にわずかながら劣ると言わざるをえない。しかし、エクストルージョン・クッキングは複合材料の処理も可能であり、いわゆる組立素材を調製できることから、栄養価としてより良好な素材は十分に作製可能である。この意味からも組織化蛋白のよりいっそうの開発と利用が望まれる。

終わりに

エクストルーダーは、チューニングガム、チョコレートなどさまざまな製品製造に関わっているが、あくまでも中間処理機として位置づけられるため、紙面の制限からもこれらの製品については割愛した。こうした加工技

術は、原料の特性と変化ならびに機械装置の特性を十分に把握したうえで、現実のものとなる。したがって、開発に当たっては化学・物理・機械の三位一体の研究が必要となるが、当分野に限らず、研究のほとんどがそれぞれの分野で単独で行われており、思ったほどの進歩が見られない。食品加工技術の研究はさまざまな分野にまたがっており、その発展のために各分野の研究者のよりいっそうの協調を望むのは筆者だけではない。

参考文献

- 1) 野口明徳：調理科学，21，239 (1988)
- 2) Mercier, C., Linko, P. and Harper, J.M. eds.: *Extrusion Cooking*, AACC, U. S. A. (1989)
- 3) 食品産業エクストルージョン・クッキング技術研究組合編：エクストルージョン・クッキング—2軸型の開発と利用—，光琳，東京 (1987)
- 4) Asp, N.G. et al.: *Extrusion Cooking*, ed. by Mercier, C., Linko, P. and Harper, J.M., AACC, U. S. A., 157 (1989)
- 5) Cheftel, J.C.: *Food Chem.*, 20, 263 (1986)
- 6) Anon: *Extrusion Commun.*, 3(1), 13 (1990)
- 7) Werner & Pfeleiderer 技術資料
- 8) Donovan, J.W. et al.: *Stärke*, 32, 190 (1980)
- 9) Mercier, C. et al.: *Cereal Chem.*, 52, 283 (1975)
- 10) Jeunink, J. and Cheftel, J.C.: *J. Food Sci.*, 44, 1322 (1979)
- 11) Rhee, K.C. et al.: *Protein Functionality in Foods*, ed. by Cherry, J.P., Am. Chem. Soc., Washington, D.C., 51 (1981)
- 12) Korslund, M. et al.: *J. Food Sci.*, 38, 637 (1973)
- 13) Favre, et al.: *Ann. Nutr. Alim.*, 32, 365 (1978)
- 14) Elias, L.G. et al.: *Arch. Latinoam. Nutr.*, 34, 355 (1984)
- 15) Sautier, C. and Camus, M.-C.: *Rev. Fr. Corps Gras*, 23, 203 (1976)
- 16) Cichon, R. et al.: *Proc. 5th Int. Rapeseed Conf. and Summaries*, 147 (1979)