粉末化脂質の高機能性食品への適用

Encapsulated Lipid and Its Application to Functional Foods

安達 修二, 松野 隆一

Shuji Adachi, Ryuichi Matsuno

Keywords : Encapsulated lipid, Microencapsulation, Functional food, Lipid oxidation

1. はじめに

脂質は、炭水化物、タンパク質とともに食品中にもっとも多く含まれる成分の一つである。脂質の過剰摂取は肥満などの生活習慣病の原因となるが、痩身などを目的としてその摂取を極端に制限すると健康を害することになる。また、魚油などに豊富に含まれるエイコサペンタエン酸 (EPA) やドコサヘキサエン酸 (DHA) などの多価不飽和脂肪酸は、心臓疾患の予防などの機能を有するが、食生活の変化に伴いその摂取が減少する傾向にある点も問題となっている。このように、脂質は現在の食生活において鍵となる成分の一つである。著者らは、生物系特定産業技術研究推進機構 (生研機構) の助成を得て、脂質のもつ機能を活用してバランスのよい脂質食品素材を提供することにより、健康で豊かな食生活の実現を指向した研究課題「高機能性脂質食品素材の開発に関する基盤的研究」

(平成10年度~14年度)を実施している。本研究課題は、機能性食品素材の酸素合成 (代表者: 中西一弘・岡山大工), 脂質粉末化技術の高機能性食品への適用 (松野隆一) および各種含水率での脂質と食用高分子との相互作用の解析 (森 友彦・京大院農) の3テーマから構成されている。

脂質の粉末化は、魚油や植物油脂などの液状の脂質を、多糖やタンパク質などの食用高分子 (包括剤) の濃厚水溶液とともにエマルション化し、それを急速に乾燥することにより、微小な油滴を包括剤の乾燥層で被覆して粉体とする技術である。この粉末化技術を利用して、多価不飽和脂肪酸の酸化を大幅に抑制する手法の開発、および生理機能物質を経口摂取した場合にその機能を損なうことなく腸管吸収部位まで輸送する食品素材の開発を目指している。本稿では、粉末化による脂質の酸化抑制を中心に、著者らの取り組みを概説する。

2. 脂質の粉末化と付与される機能

2.1 脂質の粉末化

脂質の粉末化は、乳化和乾燥の二つの段階を含んでいる (図1)。まず、液状脂質と包括剤の濃厚水溶液をホモジナイザーなどにより乳化する。つぎに、得られたO/W型エマルションを急速に乾燥することにより、相分離を起こすことなく、微小な油滴を包括剤の乾燥層で被覆する。乾燥方法としては噴霧乾燥法を用いるのが一般的であるが、凍結乾燥法によっても粉末化脂質を調製することができる。工業的に生産される粉末化脂質に比べてかなり大きな粒子になるが、少量の試料で種々の条件で粉末化物が容易に得られる単一液滴法¹⁾を採用して、熱風および凍結乾燥法によりアラビアゴムで粉末化したリノール酸メチルの走査型電子顕微鏡写真を図2に示す²⁾。熱風乾燥法では初期に

2001年11月29日受付

京都大学大学院農学研究科食品生物科学専攻

(〒606-8502 京都市左京区北白川追分町) TEL 075-753-6287

< 著者紹介 >

安達修二

昭和49年京大農学部卒、京大助手、新居浜高専助教授、静岡県立大助教授を経て平成2年から京大農助教授、京都大学農学博士。専門：粉末化脂質に関する食品化学工学、酵素および微生物を用いた物質生産に関する生体触媒工学、液体クロマトグラフ分離工学に関する研究を行っている。

松野隆一

昭和37年京大工学部卒、京大助手、岡山大学助教授を経て昭和59年から京大農教授、平成9年京大農教授、京都大学工学博士。専門：ガス系流動層に関する研究後、食品工学、酵素工学、生体成分分離に関する研究を行っている。

図1 脂質の粉末化の概念図

図2 O/W型エマルジョンの単一液滴を熱風 (A, C) および凍結乾燥 (B, D) して調製した粉末化リノール酸メチルの走査型電子顕微鏡写真²⁾
包括剤はアラビアゴム。AとBは全体像、CとDは表面

表面に皮膜が形成され、乾燥に伴ってそれが収縮するため、いびつな形状の粒子となる。また、表面も粗い。一方凍結乾燥法では、エマルジョン滴を凍結したのち氷を昇華させるので、真球に近い粉末化物が得られ、表面もスムーズである。

このような脂質の粉末化技術は以前から知られた技術である^{3~7)}が、後述する機能を適正に発現する粉末化物を合理的に調製する技術的基盤は必ずしも十分ではない。

2.2 粉末化により付与される機能性

脂質の粉末化により付与される機能⁸⁾は、脂質自体の機能性を高める場合と、脂質のもつ特性を活用して他の成分の機能を高める場合に大別できる。前者の例が粉末化による①脂質の酸化抑制と②脂質の取り扱い性の改善である。前述したように、EPAやDHAなどの多価不飽和脂肪酸(PUFA)の生理機能が注目されている。しかし、これらのPUFAはきわめて酸化されやすく、酸化されると異臭を生ずるのみならず、酸化生成物が有害な場合もあり、食品素材としての価値を失う。PUFAを粉末化するとその酸化を抑制することができる^{2, 6, 7, 9)}が、粉末化するとなぜPUFAの酸化が抑制できるのかについては十分に分かっていないのが現状と思われる。この点を明らかにすれば、

図3 生理機能物質に対する粉末化脂質のキャリア機能の概念図

生理機能物質(▲で示す)が(a)疎水性または(b)親水性の場合には、それぞれO/W型エマルジョンの油相およびW/O/W型エマルジョンの内水相に保持される

酸化抑制効果に優れた粉末化脂質を合理的に調製する方法が確立できると考え、粉末化脂質の酸化過程で生起している現象の解明に取り組んでいる。また、②は粘稠な液状脂質を粉体とすることにより、取り扱いが容易となる機能である。

一方、脂質の特性を活用した機能性の付与としては、③疎水性の芳香成分を油相に溶解して粉末化することによりその放出を制御するコントロールド・リリース、④苦味成分を油相に溶解して粉末化することにより苦味を軽減するマスキング効果、および⑤生理機能物質を経口摂取したのち腸管吸収部位まで輸送するキャリア機能が挙げられる。

2.3 生理機能物質に対するキャリア機能

近年、食品中には生体機能を調節する物質(生理機能物質)が顕在的または潜在的に含まれていることが明らかにされ、いわゆる機能性食品という概念が確立されてきた。これらの物質が機能を発現するには、経口摂取したのち機能を保持したまま腸管まで輸送されて、そこで吸収されねばならない。しかし、腸管吸収部位に到達するまでに、胃酸や消化管に存在する各種の酵素による分解などを受け、機能を喪失することが考えられる。そこで著者らは、生理機能物質の機能を保持したまま腸管吸収部位まで輸送する手段として脂質の粉末化技術を活用できると考え、その具現化に向けた検討を行っている。その概要を図3に示す。

生理機能物質が疎水性物質の場合には、それをO/W型エマルジョンの油相に溶解して粉末化する。このようにすると、生理機能物質は油相で保護されているので、消化管中の酵素による分解などを受けることなく、機能を保持したまま腸管吸収部位まで輸送することができる。細胞膜は脂質二重膜で構成されているた

め、疎水性物質を透過しやすく、体内（血液またはリンパ液系）に吸収される。一方、生理機能物質が親水性物質の場合には、それをW/O/W型エマルジョンの内水相に溶解して粉末化することにより、消化管内での分解などを抑制できる。しかし、親水性物質の場合には、グルコースなどのように細胞膜に輸送担体（タンパク質）が存在する場合を除いて、一般的には吸収され難い。そこで、親水性物質の経皮吸収を促進することが知られている中鎖脂肪酸を油相に用いることにより吸収効率を高めることを意図して、ヒト大腸がん由来で小腸上皮様に分化する Caco-2 培養細胞を用いて基礎的な検討を行っている^{10~14)}。

3. 粉末化による脂質の酸化抑制

3.1 粉末化脂質の酸化過程に影響を及ぼす因子

脂質の粉末化過程には多くの操作因子が含まれており、それらのすべてが粉末化した脂質の酸化過程に影響を及ぼす。また、粉末化物の保存条件も酸化過程に影響する。粉末化の第一段階は乳化であり、調製されたエマルジョン滴の大きさ、乳化剤の添加の有無やその種類と量などが粉末化脂質の酸化過程に影響を及ぼすと思われる。エマルジョン滴径の影響について検討したところ、滴径が小さいほど脂質の比表面積が増えるので脂質は酸化されやすいように思われるが、実際には酸化され難かった¹⁵⁾。また、包括剤の種類および包括剤と脂質の量比も粉末化脂質の酸化過程に大きな影響を及ぼす。一例として、種々の多糖で包括剤との量比を変えて粉末化したリノール酸の酸化過程を図4に示す¹⁶⁾。なお、粉末化物はO/W型エマルジョンの単一液滴を熱風乾燥することにより調製した。工業的には粉末化物中の脂質含有率を高めたい場合が多いが、リノール酸と包括剤の重量比が大きくなるほどリノール酸は酸化されやすかった。また、包括剤の種類によってもリノール酸の酸化過程は大きく異なった。他のPUFAを粉末化した場合にも、包括剤によって酸化過程は大きく異なった⁹⁾。どのような包括剤を用いれば脂質の酸化が抑制できるかは、もっとも関心がもたれる点であるが、明確な選定規準はない。しかし、包括剤乾燥膜の臨界表面張力が粉末化される脂質の表面張力とほぼ同じか、または大きいとき、粉末化物の表面に露出している脂質の割合（表面油率）が低くなる傾向が認められる¹⁷⁾。脂質と包括剤の量比が大きくなると脂質が酸化されやすくなる。この点に関する考察は後述する。

さらに、乾燥方法や粉末化物を保存するときの湿度

図4 (a) プルラン、(b) マルトデキストリンおよび(c) アラビアゴムで粉末化したリノール酸の酸化過程（37℃、相対湿度75%）¹⁶⁾。リノール酸と包括剤の質量比：(□) 0.2, (○) 0.5, (▽) 0.75, (△) 1.0, (◇) 2.0

や温度によっても粉末化された脂質の酸化過程は異なり、アラビアゴムで粉末化したリノール酸メチルは、相対湿度が低い場合には熱風および凍結乾燥のいずれの方法で調製した場合にもほとんど酸化されなかったが、湿度が高くなると熱風乾燥法で粉末化した場合の方が酸化されやすかった²¹⁾。一方、リノール酸をアラビアゴム、マルトデキストリンまたはプルランで粉末化した場合、熱風乾燥法で調製した粉末化物では相対湿度が高くなると酸化されやすく、凍結乾燥法では中間的な相対湿度できわめて酸化されにくくなる傾向が認められた¹⁸⁾。また、包括剤としてシクロデキストリンを用いた場合には包接化合物を作ることが示唆され、量比に応じてPUFAの酸化過程が異なった^{19, 20)}。また、脂質の酸化抑制ではないが、シクロデキストリンとの包接とマルトデキストリンによる被覆を併用して粉末化した芳香成分の放出を制御できることも報告されている²¹⁾。

図4に示したように、粉末化脂質の酸化過程は保存初期に急激に酸化が進行し、あるレベルに達するとそれ以上はほとんど酸化が進行しないという特徴がある。この特徴は、程度の差はあるが、包括剤の種類、脂質と包括剤の量比などを問わず、ほとんどの粉末化脂質の酸化過程で認められる。なお、以下では、酸化がほとんど進行しないレベルを平衡未酸化率 Y_e と表記する。

粉末化物中の脂質の存在状態は、その酸化過程に大きく影響すると考えられる。そこで、間接的ではあるが、粉末化物中の脂質の存在状態を知る手段として、粉末化物中の脂質の有機溶媒による抽出過程を測定した²²⁾。粉末化物の表面近傍にある脂質は容易に抽出されるが、内部に包埋された脂質は抽出され難く、抽出

図5 2次元(実線)および3次元(破線)浸透モデルによる平衡未酸化率 Y_e と粉末化物中のリノール酸の体積分率の関係と実測値との比較¹⁶⁾
 図中の N は正方形または立方体の一辺の分割数。包括剤：(□) プルラン、(○) マルトデキストリン、(△) アラビアゴム、(◇) β -シクロデキストリン

時間を延長してもすべての脂質を抽出できなかった。有機溶媒で抽出できる脂質の割合と上述した平衡未酸化率 Y_e との間には相関が認められた²³⁾。このことは、酸化過程の測定には数週間を要するが、簡便に測定できる抽出過程の測定から、粉末化された脂質がどの程度酸化されるかを予測できることを意味する。

3.2 浸透理論の適用

粉末化した脂質の酸化過程の特徴の一つは、平衡未酸化率 Y_e が存在し、この値は脂質と包括剤の量比に大きく依存することである。この Y_e と脂質と包括剤の量比の関係を浸透理論に基づいて考察した¹⁶⁾。

粉末化物の形状は球形に近いが、簡単な計算で特徴のみを知るため、正方形(2次元)または立方体(3次元)モデルを考えた。これらを小さな格子に分割し、乱数により脂質が存在する格子と存在しない格子を脂質と包括剤の量比に対応するように決定した。脂質の酸化は表面から進行し、脂質が存在する格子が2次元の場合には辺で、3次元モデルでは面で接する場合に酸化が内部に進行すると考えた。辺または面で接しておらず、孤立した格子中の脂質は酸化されないと仮定して、脂質と包括剤の量比と酸化されない格子中の脂質の割合(平衡未酸化率 Y_e) の関係をシミュレートした。その結果を図5に示す。実験的には、脂質の体積分率が0.5付近で平衡未酸化率 Y_e が急激に低下した。この傾向は2次元モデルによりよく表現された。

粉末化物は球形で3次元の物体であるが、2次元モ

デルが実験結果をよく表現したのは次のように考えられる。乾燥過程で水が除去されると、粉末化物中には水が移動した細孔が形成される。包括剤乾燥層の臨界表面張力は脂質の表面張力とほぼ同じ値である¹⁷⁾。したがって、乾燥の進行とともに現れる細孔面(包括剤乾燥層)に沿って脂質が広がり、粉末化物中で脂質は中心から表面に向かって平面的に存在している可能性を示唆する。

3.3 拡散-反応モデル

つぎに、粉末化脂質の酸化過程を表現するモデルについて検討した。もっとも単純なモデルは、粉末化物表面から内部に酸素が拡散し、脂質の酸化が進行すると考える拡散-反応モデルであろう。そこで、このような考え方で粉末化脂質の酸化過程が表現できるかを検討した^{9, 24)}。

粉末化物は半径 R_p の球形粒子であると考え。脂質の酸化反応速度は、未酸化脂質の濃度(未酸化率)と酸化された脂質濃度(酸化率)の積に比例する自触媒型の式で表され²⁵⁻²⁷⁾、酸素濃度(分圧)についてはLangmuir-Hinshelwood型で表される^{26, 28)}。このような速度式を用いると、粉末化脂質中の微小球殻における酸素および脂質の物質収支は次式で与えられる。

$$\frac{\partial X}{\partial \theta} = \left(\frac{\partial^2 X}{\partial \xi^2} + \frac{2}{\xi} \frac{\partial X}{\partial \xi} \right) - f_v \alpha \phi^2 \frac{X}{\kappa + X} Y(1 - Y) \quad (1)$$

$$\frac{dY}{dt} = -\phi^2 \frac{X}{\kappa + X} Y(1 - Y) \quad (2)$$

ここで、 X は表面の酸素分圧 p_{x0} で無次元化した粉末化物中の酸素濃度、 Y は未酸化率である。また、 θ は無次元時間で $\theta = D_X t / R_p^2$ 、 ξ は粒子半径 R_p で無次元化した粒子内の距離である。なお、 D_X は粉末化物中の酸素の拡散係数、 t は時間、 f_v は粉末化物中の脂質の体積分率である。さらに、無次元パラメーター α 、 ϕ および κ は、 $\alpha = C_{LH,t} RT / p_{x0}$ 、 $\phi = R_p (k' C_{LH,t} / D_X)^{1/2}$ 、 $\kappa = K / p_{x0}$ と定義した。ここで、 $C_{LH,t}$ は油滴中の全脂質濃度、 R は気体定数、 T は温度、 k' は速度定数、 K は飽和定数である。式(1)と(2)を適当な初期および境界条件のもとに解いて、粉末化物中の未酸化の脂質および酸素の濃度分布を求めた。なお、油滴が分散した包括剤乾燥層での酸素の拡散係数 D_X を実測したこともあるが²⁹⁾、ここではパラメータとして扱い、粉末化脂質の酸化過程にもっとも適合する値を検索した。

図6 プルランで粉末化したリノール酸（質量比は1.0）の酸化過程（○）に対する拡散-反応モデルによるシミュレーション²⁴⁾
実線および破線は粉末化物中のリノール酸の平均未酸化率 $\bar{Y}$ と平均無次元酸素濃度 $\bar{X}$

本モデルに基づいて粉末化脂質の酸化過程を計算した例を図6に示す。本モデルは粉末化脂質の酸化過程をある程度は表現できるが、保存初期の急激な酸化の進行や、長時間の保存で平衡未酸化率が現れる粉末化脂質の酸化過程の特徴を十分には表すことができなかった。

3.4 活性化自由エネルギー分布モデル

前記の拡散-反応モデルで粉末化脂質の酸化過程を十分には表現できなかった理由として、粉末化物中で脂質は包括剤と何らかの相互作用（結合）しており、その強さには分布があり、それによって酸化のされやすさが異なることが考えられる。そこで、包括剤と強く結合している脂質は酸化されにくく、相互作用の弱い脂質は容易に酸化されると考えた。相互作用の強弱による酸化の難易は酸化速度定数 k に対する活性化自由エネルギー ΔG^* に反映され、 ΔG^* は正規分布すると仮定した。また、図6の計算結果より、酸化過程の初期を除いて粉末化物中の酸素分圧は比較的高い ($X > \kappa$) ので、酸素分圧の影響はないと仮定した。このような考え方に基づくと、粉末化物中の脂質の平均未酸化率 $\bar{Y}(t)$ は次式で与えられる^{24, 30)}。

$$\bar{Y}(t) = \frac{RT}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{(RT/\sigma)^2(\ln k - \ln \bar{k})^2}{2}\right] \times \frac{e^{-kt}}{(1 - Y_0)/Y_0 + e^{-kt}} d(\ln k) \quad (3)$$

ここで、 $\bar{k}$ は ΔG^* の平均値 ($\Delta \bar{G}^*$) に対応する速度定数、 σ は ΔG^* に対する標準偏差である。これらはと

図7 プルランで粉末化したリノール酸（質量比は1.0）の酸化過程（○）について酸化反応速度定数に対する活性化自由エネルギーの正規分布を仮定したモデルによるシミュレーション²⁴⁾
実線は粉末化物中のリノール酸の平均未酸化率 $\bar{Y}$ 、活性化自由エネルギーの平均値 $\Delta \bar{G}^*$ に対応する速度定数 $\bar{k}$ を一定 ($1.1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) とし、いくつかの標準偏差 σ で計算した結果を示す。破線は速度定数 k 自体が正規分布していると仮定して計算した場合を示す

もに未知であるので、実測値に適合するように試行錯誤法により決定した。

本モデルによる粉末化脂質の酸化過程の計算値と実測値の比較を図7に示す。本モデルは、前述した粉末化脂質の酸化過程の特徴をよく表現した。このように、粉末化脂質の酸化過程は単純な現象ではなく、粉末化物中で脂質と包括剤とが何らかの相互作用をしており、それが粉末化された脂質の酸化のされにくさに関係していると示唆されるが、相互作用の本態については不明である。また、本モデルの結果と前述の浸透理論に基づく知見をどのように結びつけるかも課題である。これらの点が解明できれば、脂質が酸化されにくい粉末化物を合理的に調製する方法を確立することができると思われる。

なお、図7中の破線は速度定数 k 自体が正規分布していると仮定した場合の計算値であり、実測値の特徴を表現することはできない。

3.5 アスコルビン酸脂肪酸エステルの添加

脂質の酸化を抑制するために汎用されている方法は抗酸化剤の添加であり、天然物由来の抗酸化剤を検索しようとする研究はきわめて多い。著者らは有機溶媒中でのリパーゼ触媒反応により、強い還元能を有する水溶性ビタミンであるアスコルビン酸（ビタミンC）と飽和または不飽和脂肪酸を縮合してエステルを合成する研究を行っている^{31~33)}。PUFAにアスコルビン酸を結合するとPUFAの酸化を大幅に抑制すること

図8 アスコルビン酸パルミチン酸エステルを添加してマルトデキストリンで粉末化したリノール酸の酸化過程 (37℃, 相対湿度12%)³⁴⁾ リノール酸 (アスコルビン酸パルミチン酸エステルを含む) と包括剤の質量比は0.2. アスコルビン酸パルミチン酸エステルとリノール酸のモル比: (●) 無添加, (△) 0.01, (□) 0.05, (▽) 0.1

ができた^{32, 33)}。また、飽和脂肪酸とアスコルビン酸を結合したエステルをPUFAに添加してもその酸化を抑えることができた³³⁾。

したがって、アスコルビン酸を結合したPUFAまたは飽和脂肪酸とアスコルビン酸とのエステルを脂質に添加して粉末化すれば、脂質の酸化をさらに効果的に抑制できると思われる。そこで、リノール酸にアスコルビン酸パルミチン酸エステルを添加して粉末化物を調製し、その酸化過程を測定した (図8)³⁴⁾。リノール酸に対するアスコルビン酸パルミチン酸エステルのモル比が高いほど酸化抑制効果が高かった。他のアスコルビン酸飽和脂肪酸エステルを用いた場合にも同様の効果が得られた。しかし、効果に対する定量的な解析は今後の課題である。さらに、脂溶性の抗酸化

剤であるトコフェロール (ビタミンE) との併用効果などについても今後の課題である。

4. おわりに

粉末化により脂質を機能的食品素材として利用しようとする試み、ことに粉末化による脂質の酸化抑制について述べさせていただいた。基礎的な検討を行う立場から、粉末化脂質の酸化過程は、ガスクロマトグラフィーで定量した未酸化の脂質の割合 (未酸化率) で表現した。しかし、実用的には過酸化価 (POV) などによる評価も必要であろう。また、未酸化率が90%といえはかなり酸化が抑制されているようにも見えるが、10%も酸化されており、このようなレベルでは実用には供し得ない。

また、脂質としてはリノール酸やそのメチルエステルなどを使用し、その単一成分を粉末化した場合の酸化挙動のみを検討してきた。しかし、実際の食用脂質は多くの脂肪酸から構成されたアシルグリセロールである。粉末化した食用油脂の酸化過程はPOVなどによって一括して評価されることが多く、各成分の変化は定量的に予測できない。これは粉末化されていないバルクの脂質でも同様であり、脂質酸化の解析は存外難しい。例えば、もっとも単純な混合脂質系であるPUFAと飽和脂肪酸が混合した系においても、PUFAの酸化は単一成分系とは異なる³⁵⁾。また、2種のPUFAを混合した系ではさらに複雑になる³⁶⁾。これらの脂質酸化に関する知見と粉末化物中での脂質の存在状態に関する知見を蓄積することにより、所期の機能を効率的に発現する粉末化物を調製する手法を確立したい。これらの検討を通じて、食品工学の立場から健康の維持・増進と豊かな食生活の実現にいささかなりとも貢献したいと考えている。

引用文献

- 1) Charlesworth, D. H. and W. R. Marshall, Jr.: "Evaporation from drops containing dissolved solids", *AIChE J.*, **6**, 9-23 (1960)
- 2) Minemoto, Y., S. Adachi and R. Matsuno: "Comparison of oxidation of methyl linoleate encapsulated with gum arabic by hot-air-drying and freeze-drying", *J. Agric. Food Chem.*, **45**, 4530-4534 (1997)
- 3) Gejl-Hansen, F. and J. M. Flink: "Freeze-dried carbohydrate containing oil-in-water emulsions: microstructure and fat distribution", *J. Agric. Food Chem.*, **42**, 1049-1055 (1977)
- 4) 小野文夫, 青山康雄: "糖と蛋白質による油性物質の被覆安定化", 日本食品工業学会誌, **26**, 13-17 (1979)
- 5) Rosenberg, M., I. J. Kopelman and Y. Talmon: "A scanning electron microscopy study of microencapsulation", *J. Food Sci.*, **50**, 139-144 (1985)
- 6) Iwami, K., M. Hattori and F. Ibuki: "Spray-dried gliadin powders inclusive of linoleic acid (microcapsules): their preservability, digestibility and application to bread making", *Agric. Biol. Chem.*, **51**, 3301-3307 (1987)
- 7) Iwami, K., M. Hattori, T. Yasui and F. Ibuki: "Stability of gliadin-encapsulated unsaturated fatty acids against autoxidation", *J. Agric. Food Chem.*, **36**, 160-

- 8) Matsuno, R. and S. Adachi: "Lipid encapsulation technology-Techniques and applications to food", *Trends Food Sci. Technol.*, **4**, 256-261 (1993)
- 9) Imagi, J., K. Muraya, D. Yamashita, S. Adachi and R. Matsuno: "Retarded oxidation of liquid lipids entrapped in matrixes of saccharides or proteins", *Biosci. Biotech. Biochem.*, **56**, 1236-1240 (1992)
- 10) Shima, M., K. Yohdoh, M. Yamaguchi, Y. Kimura, S. Adachi and R. Matsuno: "Effects of medium-chain fatty acids and their acylglycerols on the transport of penicillin V across Caco-2 cell monolayers", *Biosci. Biotech. Biochem.*, **61**, 1150-1155 (1997)
- 11) Shima, M., Y. Kimura, S. Adachi and R. Matsuno: "The relationship between transport-enhancement effects and cell viability by capric acid sodium salt, monocaprin, and dicaprin", *Biosci. Biotech. Biochem.*, **62**, 83-86 (1998)
- 12) Shima, M., Y. Kimura, S. Adachi and R. Matsuno: "Recovery of Caco-2 cell monolayers to normal from the transport-enhanced state induced by capric acid sodium salt and its monoacylglycerol", *Biosci. Biotech. Biochem.*, **63**, 680-687 (1999)
- 13) Kimura, Y., Y. Hosoda, M. Shima, S. Adachi and R. Matsuno: "Physico-chemical properties of fatty acids for the assessing the threshold concentration to enhance the absorption of a hydrophilic substance", *Biosci. Biotech. Biochem.*, **62**, 443-447 (1998)
- 14) Kimura, Y., Y. Hosoda, M. Yamaguchi, H. Nagano, M. Shima, S. Adachi and R. Matsuno: "Effect of medium chain fatty acids on intracellular calcium level and cytoskeleton in human intestinal (Caco-2) cells monolayer", *Biosci. Biotech. Biochem.*, **65**, 743-751 (2001)
- 15) Minemoto, Y., K. Hakamata, S. Adachi and R. Matsuno: "Oxidation of linoleic acid encapsulated with gum arabic or maltodextrin by spray-drying", *J. Microencapsulation*, 印刷中
- 16) Minemoto, Y., S. Adachi and R. Matsuno: "Autoxidation of linoleic acid encapsulated with polysaccharides of differing weight ratio", *Biosci. Biotech. Biochem.*, **63**, 866-869 (1999)
- 17) Adachi, S., H. Iwase and R. Matsuno: "Relationship between the amount of lipid exposed at the surface of the lipid emulsions encapsulated by a polymer and the critical surface tension of the dehydrated polymer film", *Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi*, **42**, 137-139 (1995)
- 18) Minemoto, Y., S. Adachi and R. Matsuno: "Effect of relative humidity during storage on the autoxidation of linoleic acid encapsulated with a polysaccharide by hot-air-drying and freeze-drying", *Food Sci. Technol. Res.*, **7**, 91-93 (2001)
- 19) Ishiguro, T., S. Adachi and R. Matsuno: "Thermogravimetric analysis of cyclodextrin-fatty acid complex formation and its use for predicting suppressed autoxidation of fatty acids", *Biosci. Biotech. Biochem.*, **59**, 51-54 (1995)
- 20) Yoshii, H., T. Furuta, K. Kawasaki, H. Hirano, Y. Funatsu, A. Toyomi and S. Nakayama: "Oxidative stability of powdery tridocosahexaenoin included in cyclodextrin and its application to fish meal paste", *Biosci. Biotech. Biochem.*, **61**, 1376-1378 (1997)
- 21) Furuta, T., H. Yoshii, T. Kobayashi, T. Nishitarumi and A. Yasunishi: "Powdery encapsulation of *d*-limonene by kneading with mixed powders of β -cyclodextrin and maltodextrin at low water content", *Biosci. Biotech. Biochem.*, **58**, 847-850 (1994)
- 22) Minemoto, Y., S. Adachi and R. Matsuno: "Solvent-extraction processes of linoleic acid encapsulated with gum arabic, pullulan or maltodextrin at different weight ratios", *Food Sci. Technol. Res.*, **5**, 289-293 (1999)
- 23) Minemoto, Y., S. Adachi and R. Matsuno: "Autoxidation and solvent-extraction processes of linoleic acid encapsulated with a polysaccharide by freeze-drying", *Food Sci. Technol. Res.*, **6**, 221-224 (2000)
- 24) Ishido, E., Y. Minemoto, S. Adachi and R. Matsuno: "Heterogeneity during autoxidation of linoleic acid encapsulated with a polysaccharide", *J. Food Eng.* に投稿中
- 25) Özilgen, S. and M. Özilgen: "Kinetic model of lipid oxidation in foods", *J. Food Sci.*, **55**, 498-501, 536 (1990)
- 26) Adachi, S., T. Ishiguro and R. Matsuno: "Autoxidation kinetics for fatty acids and their esters", *J. Am. Oil Chem. Soc.*, **72**, 547-551 (1995)
- 27) Minemoto, M., E. Ishido, S. Adachi and R. Matsuno: "Autoxidation kinetics for polyunsaturated acylglycerols", *Food Sci. Technol. Res.*, **5**, 104-107 (1999)
- 28) Yoshii, H., T. Furuta, T. Itoh, K. Yoshimura, Y. Misawa, N. Hata, H. Kobayashi, Y.-Y. Linko and P. Link: "Kinetic analysis of the autoxidation of ethyl eicosapentaenoate at different oxygen levels", *Biosci. Biotech. Biochem.*, **63**, 662-665 (1999)
- 29) Adachi, S., K. Muraya, T. Ishiguro and R. Matsuno: "Apparent diffusion coefficient of oxygen through dehydrated protein or saccharide films", *J. Pack Sci. Technol.*, **3**, 93-101 (1994)
- 30) Ishido, E., K. Hakamata, Y. Minemoto, S. Adachi and R. Matsuno: "Oxidation process of linoleic acid encapsulated with a polysaccharide by spray-drying", *Food Sci. Technol. Res.* 印刷中
- 31) Watanabe, Y., S. Adachi and R. Matsuno: "Condensation of L-ascorbic acid and medium-chain fatty acids by immobilized lipase in acetonitrile with low water content", *Food Sci. Technol. Res.*, **5**, 188-192 (1999)
- 32) Watanabe, Y., Y. Minemoto, S. Adachi, K. Nakanishi, Y. Shimada and R. Matsuno: "Lipase-catalyzed synthesis of 6-O-eicosapentaenoyl L-ascorbic acid and its autoxidation", *Biotechnol. Lett.*, **22**, 637-640 (2000)

- 33) Watanabe, Y., S. Adachi, K. Nakanishi and R. Matsuno: "Lipase-catalyzed synthesis of unsaturated acyl L-ascorbate and its ability to suppress the autoxidation of polyunsaturated fatty acid", *J. Am. Oil Chem. Soc.*, **78**, 823-826 (2001)
- 34) Watanabe, Y., X. Fang, Y. Miyamoto, S. Adachi and R. Matsuno: "Suppressive effect of saturated acyl L-ascorbate on the oxidation of linoleic acid encapsulated with maltodextrin or gum arabic by spray-

- drying", *J. Agric. Food Chem.* に投稿中
- 35) Ishido, E., Y. Minemoto, S. Adachi and R. Matsuno: "Autoxidation process of linoleic acid and methyl linoleate mixed with saturated fatty acid or its methyl ester", *Lebensm. - Wissens. u. Technol.*, **34**, 234-238 (2001)
- 36) Ishido, E., S. Adachi, Y. Minemoto and R. Matsuno: "Oxidation of polyunsaturated fatty acids in a mixed system", *Biosci. Biotech. Biochem.*, **66**, 73-77 (2002)

〈書 評〉

図解 ナノテクノロジーのすべて

川合知二監修

(工業調査会, B 5 判 定価2,857円+税)

「ナノテクノロジーとは何か」を、エレクトロニクス、先端材料、バイオ、エネルギー、環境などの最近注目されている分野の専門家83名が、関連するテーマについて答えた解説書である。一つのテーマを4ページ以内で要領よくまとめた

いる。執筆者の中に本学会の会員や関係者も含まれており、良く知っているテーマから、こんなことが話題になっているのかと興味深く読むことのできるテーマまで幅広い。各テーマの冒頭には実用化されるまでの時期を、「すでに実用化」、「短期」、「中期」、「長期」に分けて示しているのは、面白い試みである。

内容は、1章「総論」、2章「先端材料・素材分野におけるナノテクノロジー」、3章「ナノテクノロジーのための加工・計測」、4章「産業別に見るナノテクノロ

ジー」、5章「ナノテクノロジーの将来展望」である。2章と3章はかなり専門的なことが記述されており、理解しようとする専門書の助けを借りなければならないこともあり、本の帯の宣伝ほど「面白いほどよくわかる」と言い難い所もある。また記載以上の情報を集めようとする人のために、手がかりとなる参考文献や引用文献等が記載されていないのが残念である。4章は全体の3分の2も占める章であり、ナノテクノロジーの範ちゅうにはいるのかと思うような内容も含まれ、実用化時期も「すでに実用化」や「短期」に該当するテーマも多く、ナノテクノロジーに関する産業界の技術動向を知る上には充分であろう。監修者の川合知二教授担当の1章と5章は、ナノテクノロジーの動向、立場を認識するために、関係者にも一読を勧めたい文章である。図解と銘打っているように図表が多いのが特徴で、一般の書評でも良い評価を受けており、ナノテクノロジーに関心のある理系学生や技術者には特に勧めることのできる本である。(同志社大学 森 康維)