

食パン断面内の粘弾性分布

前田 敏輝¹・渡邊 真優子²

Viscoelasticity distribution in a slice of white bread

Toshiteru MAEDA¹ and Mayuko WATANABE²

¹ *Department of Food and Environmental Sciences, Faculty of Science and Engineering, Ishinomaki Senshu University, Miyagi 986-8580, Japan*

² *Fuji Shoji Co., Ltd. (Bakery shop "Birthday")*

Abstract

We measured the viscoelasticity of commercially available slices of bread in order to determine the viscoelastic distribution in the sample plane. In the compression method, the bread slices were cut into a 5 × 5 grid, and 25 dice-shaped samples (20 × 20 mm) were taken per slice. The samples were compressed between two plates and the stress-strain characteristics were measured. In the indentation method, 25 marks were made on the bread slices at intervals of 20 mm in a grid pattern, and the indentation and force were measured by pressing the end face of a cylindrical plunger ($\phi=8.0$ mm) against the marked positions. The values of apparent stress, apparent elastic modulus, and apparent viscous modulus of the indentation method were three to five times larger than those of the conventional method. This is thought to be due to the spread of strain around the plunger and the concentration of stress near the end face. The indentation method proved to be a useful method for measuring the spatial distribution of viscoelasticity.

1. はじめに

食パンは国内で最も多く製造されているパンである。消費者にとって最もなじみ深いパンの一つであろう。パンのもつ風味、香り、食感などの基本的な特性を評価し議論する上で、角形食パンは適切なモデル系となりうる。

食パンには角型食パンや山型食パンなどの種類があり、ストレート法や中種法などの製法がある。中種法とは、生地を材料を一気に混ぜず、一部の材料を混ぜた生地を4時間程度発酵させ、さらに残りの材料を加える方法であり、生地の安定性に優れた方法である。一般的にスーパーやコンビニで売られるパンには中種法が用いられる¹⁾。

パンの食感はパンのおいしさを決定づける主たる要因である。パンは気泡構造を持った食品であり、気泡膜の厚さや形状、数などにより食感が変化する。また、パンは焼成時の温度分布の違いから、クラストと呼ばれる外側の硬い部分（食パン

では耳にあたる部分）とクラムと呼ばれる中身の柔らかい部分に分けられる。また、製造工程では、ミキシング、パンチ、丸め、成形、パン型内での焼成と膨張など、機械的にも熱的にも積極的に不均一さや異方性が導入されている。これら、製パン条件（成形方法、ローフの比容積、焼成温度および焼減率）や保存条件と食パンクラムの力学的性質の関係について相良らの詳細な報告がある²⁻³⁾。相良らは、食パンローフ内の異方性、不均一性に留意し、サンプルの採取部位や圧縮方向を詳細に定めた上で測定を行っている。しかし、パンの部位と力学的特性の相関を系統的にしらべた実験の報告はまだ少ない。

本稿では、パンの粘弾性の部位依存性を検討するため、その手始めとして市販の角形食パンをモデル系試料として採用し、気泡構造の不均一性とレオロジー特性の空間分布の簡便な評価方法を提案する。

¹石巻専修大学理工学部食環境学科

² (株) 藤商事、石窯パン工房 ばーすでい

石巻専修大学理工学部食環境学科平成30年度卒業生

2. 実験方法

2.1 破断特性および粘弾性の測定方法

破断特性および粘弾性の測定には、クリープメータ RE2-33005B（山電）を用いた。測定は以下の2種類の測定モードで行った。

一つは、適当な大きさに切り出した試料を2枚の平板間（試料台とプランジャ）で挟んで一軸圧縮を加える方法である（図1(a)。ここでは圧縮法と呼ぶ）。もう一つは、試料のパン（6枚切スライス）をカットせずにそのまま使用し、スライス面に円柱あるいは球形のプランジャを押し込む方法である（図1(b)。ここでは押込み法と呼ぶ）。

これらの測定モードにおいてそれぞれ、力-変形量 ($F-\delta$) 特性およびクリープ特性の測定を行い、試料の破断特性と粘弾性を評価した。

2.2 食パン試料

試料となる食パンには市販のヤマザキロイヤルブレッド6枚切（山崎製パン）を使用した。山崎

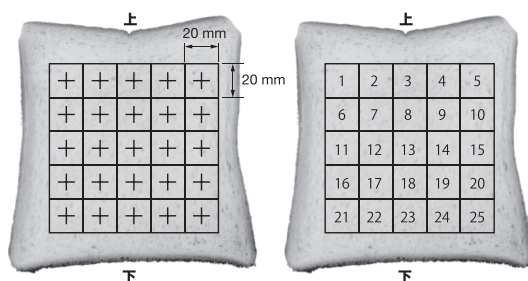


図1 食パンスライスの測定部位

圧縮法では、食パンのクラムを実線に沿って5×5の25個に切り分け、20 mm 角の試料とした。また、押込み法では、直径 8.0 mm の円柱プランジャを+印の各点に押し当てて測定する。

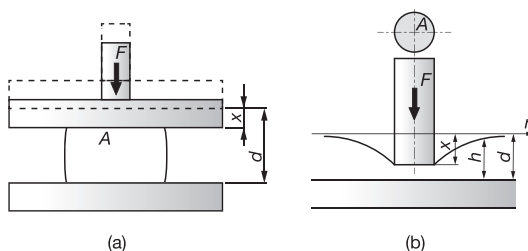


図2 試料に加える変形

(a) 1 軸圧縮法。(b) 押込み法。

圧縮法では試料台とプランジャの間で 20 mm 角の試料を圧縮する。押込み法では直径 8.0 mm の円柱プランジャを食パンスライスの表面に押し込む。

製パンの主力商品である同製品は、厳格な品質管理の下で製造されているため、製品ごとの力学的性質のバラつきが少なく、データ再現性の高い試料であると期待される。製パン法は大規模生産プラントで標準的に用いられる中種法である。製造工程が山崎製パンウェブサイト公開されている⁴⁾。

クラムの力学的性質の位置依存性を調べるため、スライスパン1枚あたり25ヶ所で測定を行う。圧縮法の測定では、食パンの6枚切りスライスを図1に示すように5×5の格子状に切り分け、20 mm 角のサイコロ状試料をスライス1枚あたり25個採取した。試料の切り分けにはパン切専用ナイフ（サンクラフト製、HE-2101）を用いた。切り分け後は乾燥防止のため、測定直前までジップロックに保管した。

押込み法による測定では、6枚切りスライスをそのまま使用した。図1の“+”印の位置に円柱プランジャを押し当て、プランジャにかかる力 F と押込みの変位 δ を測定した。乾燥防止のため測定中もラップフィルムで食パンスライスを包みこみ、プランジャ挿入用の穴を測定点に移動させながら測定した。

食パンは一般に、乾燥やデンプンの老化によって製造後時間とともに硬くなる。相良らによれば、クラムの等価ヤング率は製造後の経過時間にほぼ比例して増大する³⁾。製造直後は相対的な増大率が特に大きくなるため注意が必要である。本実験では、製造直後を避けて、製造日から2~3日の範囲で測定を行った。スライス1枚あたり測定に要する時間は、 $F-x$ 特性で約2時間、クリープ特性で約3時間であった。

2.3 圧縮法による測定

圧縮法による粘弾性の測定には、クリープメータ RE2-33005B（山電）を用いた。試料台に置いた試料に、試料台と平行な面を持つ円形プランジャ（直径 30 mm）を押し当て、一定速度で一軸性の圧縮ひずみを加える（図2(a)）。すべての測定において圧縮速度は 0.10 mm/s とし、印加する最大ひずみは 60% とした。測定時の試料温度は $24.5 \pm 0.7^\circ\text{C}$ であった。

圧縮に伴う試料高さの変化を x [m]、試料上下

面に加わる力を F [N] とすると、応力とひずみはそれぞれ、 $\sigma = \frac{F}{A}$ [Pa]、 $\varepsilon = \frac{x}{h}$ で定義される。ここで、 A [m²] は試料端面の面積、 h [m] は試料の厚さである。プランジャの荷重面は試料端面よりも大きいため、荷重は試料にほぼ均一に印加される。また、圧縮過程における荷重面積の変化は 2% 程度と見込まれるため、その影響は無視できると考えて圧縮過程の応力も初期の面積 A を用いて算出した。

2.4 押込み法による測定

圧縮法の場合と同様、クリープメータ RE2-33005B (山電) を使用し、直径 8.0 mm の平端面円柱プランジャを測定圧子として、食パンスライスの各部の $F-x$ 特性を測定した (図 2(b))。圧縮速度は 0.10 mm/s、最大ひずみは 60% とした。これらの条件は圧縮法の測定と同じである。押込み法においても、応力とひずみを $\sigma = \frac{F}{A}$ [Pa]、

$\varepsilon = \frac{x}{h}$ とした。ただし、試料の変形はプランジャの周囲に拡がり、実際の応力分布は複雑である。したがって、押込み法における σ と ε はあくまでも見かけの値である。

押込み法では、食パンスライスをカットせずにそのまま用いる。このため、カット時に生じる不可逆な変形や、試料形状の不具合に起因する測定誤差を避けることができる。今回は圧縮法と同じく食パンスライスの 25ヶ所で測定したが、より多くの測定点を設定することも可能である。空間分解能を高めるにはプローブとなるプランジャを小さくする必要がある。パンは気泡構造を有しているため数 mm 程度の凹凸が試料表面に多数存在する。測定の再現性の観点からは、気泡よりも十分に大きな荷重面を持ったプランジャーで、空間的に平均化するのが望ましい。本実験では、パン表面の写真撮影と画像処理による気泡サイズの分布測定の結果から、最大気泡サイズと同程度の直径 8.0 mm のプランジャを採用した。

押込みによる応力場の分布と空間分解能の関係も興味深い問題である。押込み試験 (indentation test) は、材料の硬さ測定等に古くから用い

られている手法である⁵⁾。圧子 (indenter) を測定対象に押し当て、力と押込み変位を測ることで、対象物の硬さの指標を得る。近年では微小圧子によるマイクロ・ナノ領域の力学物性計測の研究が進展している。生体材料の細胞レベルでのレオロジーを測定する手法としても注目されている⁶⁾。

弾性率や粘性率などの定量的な評価のためには、圧子による変形とそれに伴う試料内応力分布に関する詳細な情報が必要である。半無限空間に拡がる等方的な弾性体の微小変形に対しては、弾性理論の手法により多くの場合で解析的な解が得られている⁵⁾。パンなどのセル構造において、破断にいたる大変形や粘性を伴う動力学的な解析については、有限要素法を初めとする計算機力学を用いた研究が行われている⁸⁻⁹⁾。

3. 実験結果と考察

3.1 応力-ひずみ特性

圧縮法により測定した食パンクラムの応力-ひずみ ($\sigma-\varepsilon$) 特性の一例を図 3(a) に示す。この曲線の初期部分 I は、試料とプランジャの接触状態等によって影響を受ける再現性に乏しい領域である。圧縮を進めると曲線の勾配は徐々に緩やかになり、 $\varepsilon=0.2$ 前後で再び勾配が大きくなり始める。一般に弾塑性体では、曲線が直線的に立ち上がる領域 II を弾性領域と見なすが、食パンではこの領域はきわめて狭い。クラムの気泡構造を支える網目が不可逆に変形する III の領域はコラプス段階と呼ばれる³⁾。さらに圧縮すると、ひずみが約 0.4 以上で再び曲線の勾配が大きくなる。クラム内の空隙が潰されて空気が排出された状態に近づくため、この領域を圧密領域と呼ぶ。

この曲線には明確な降伏点は現れず弾性変形と塑性変形の境界は曖昧である。そのため領域 II で勾配が最大となる点での接線と、III 領域の変曲点での接線が交わる点のひずみ値を II と III の境界と定義した。

図 3(b) に押込み法で測定した食パンクラムの $\sigma-\varepsilon$ 特性の一例を示す。 σ はプランジャの荷重 F を円柱端面の面積 A で割った見かけの応力である。 $\sigma-\varepsilon$ 特性の縦軸の応力値は図 3(a) の圧縮法に比べて約 10 倍大きい。また、領域 II (弾性領域) と領域 III (コラプス領域) の区別はほとんどない

食パン断面内の粘弾性分布

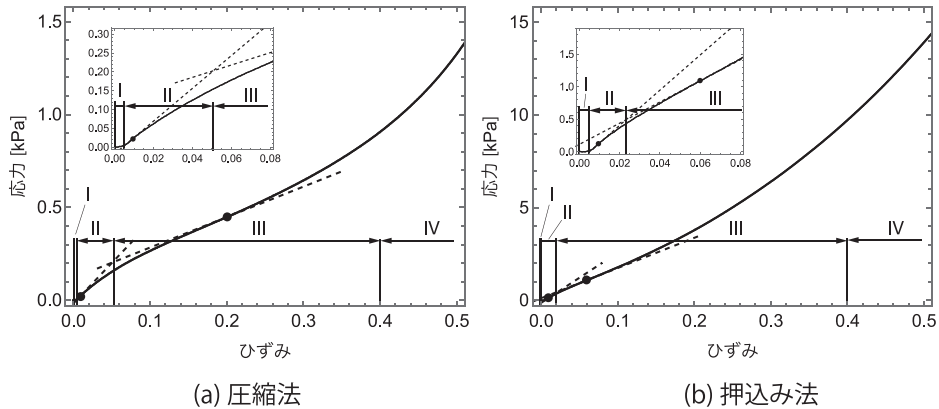


図3 食パンクラムの典型的な応力-ひずみ特性

(a) サイコロ形試料の圧縮法による測定。(b) スライス資料に対する押し込み法による測定。どちらも、スライス試料中央部の9点における特性曲線の平均。

が、図3(a)の場合と同様に曲線上の2点で接線を引きそれらの交点を弾性限界の目安とした。

我々はまた、前述した領域IIと領域IIIの2点における接線の傾きを、それぞれの点における弾性率と見なし、食パンスライスの各点における値を算出した。弾性率の値は、スライスの中央付近で小さく、周辺部のクラスト（パンの耳）に近い部位で大きくなる傾向が顕著に見られた。特に焼成時にパン型の底部に接する食パンの下側部分は、弾性率、破壊エネルギーともに大きい。スライス面内の弾性率、粘性率等各種の粘弾性パラメータについては、クリープ特性の節で述べる。

食パンクラムの σ - ε 曲線には降伏点などの目立った構造がないため、破断エネルギーの見積りは困難である。Bakerら¹⁰⁾はひずみ0.25までの圧縮に要した仕事を破壊エネルギーと定義している。しかし、試料の状態や力学特性の違いに配慮せず、破壊エネルギーの評価に一律のひずみ値を用いるのは根拠に乏しい。われわれはコラプス段階で特性曲線の変曲点（勾配が減少から増大に転ずる点）を破壊プロセスの進展の目印として、この点にいたる圧縮仕事を破壊エネルギーの指標とすることを試みた。その結果、圧縮法では食パンスライス内25点の破壊エネルギーは、最小値13.0 J/m³、最大値193 J/m³、平均値58.5 J/m³であった。これに対し押し込み法では、最小値20.5 J/m³、最大値532 J/m³、平均値152 J/m³と、圧縮法の約3倍を観測した。これは押し込み法が変形領

域の体積を過小評価しているためであろう。言い換えれば、プランジャ端面直下の体積の3倍程度の領域に応力が分布していると見なせる（応力の大きさを考慮した加重平均として）。

3.2 クリープ特性

図4に圧縮法および押し込み法で測定した食パンクラムのクリープ特性を示す。荷重はいずれも0.05 Nとした。一辺20 mmのサイコロ状試料を用いる圧縮法では応力が $\sigma_0=125$ Pa、直径8 mmの円筒プランジャを用いる押し込み法では端面の平均応力が $\sigma_0=995$ Paとなる。荷重印加直後にコラプス領域に到達することがないように荷重を選択した。

図4の(a)、(b)にスライス中央付近のやわらかい部位で測定したクリープ特性の一例を示す。実線が測定結果である。一定応力 σ_0 の下では、6要素粘弾性モデル（図4右）のひずみ $\varepsilon(t)$ は次式のように書ける。

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \left[\frac{1}{G_1} + \frac{1}{\eta_1} t + \frac{1}{G_2} \left(1 - e^{-\frac{G_2}{\eta_2} t} \right) + \frac{1}{G_3} \left(1 - e^{-\frac{G_3}{\eta_3} t} \right) \right]$$

図4の破線は、このモデルで最小二乗法によりフィッティングした結果の各要素からの寄与である。3つの寄与を加算したフィッティング結果も破線で描いているが、フィッティングを行った全域で3%以内のズレに収まっていて、実験結果の実線とほぼ完全に重なっている。 $t=0$ 付近の立ち上がり部を除けば、ズレは1%未満である。2

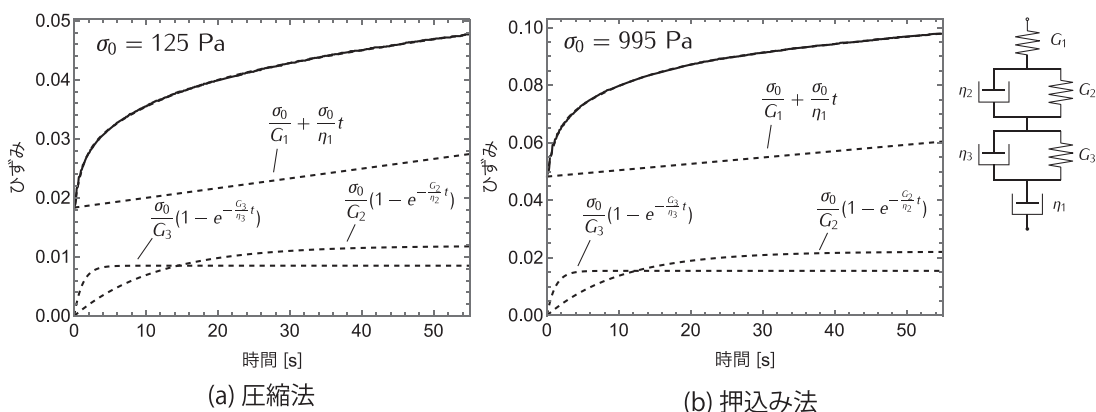


図4 食パンクラムの典型的なクリープ特性

実線で示した測定データと、破線で示したフィッティングの曲線がほぼ重なっている。

つの指数関数項の緩和時間は平均値で $\tau_2 = 11.1$ s と、 $\tau_3 = 1.38$ s であり、両要素は明確に分離される。したがって、この食パンの粘弾性を表現するには、4 要素では不十分であることが明らかになった。

上記の計算結果から 6 要素の粘弾性パラメータ $G_1, G_2, G_3, \eta_1, \eta_2, \eta_3$ が算出される。クリープ特性の測定と最小二乗フィットによる粘弾性パラメータ計算を、パンスライス上の各点で実行し、その値の場所依存性を示したのが図5である。測定領域と測定ポイントの対応は図1に示した通りである。ここでも圧縮法、押し込み法のそれぞれで測定した G_1, η_1 のスライス面内の分布を示してある。押し込み法では、 G_1, η_1 ともに平均値で圧縮法の 4 倍程度である。

いずれの結果においても、スライス面内の弾性率、粘性率の変動は大きく、変動率は 30~50% 程度であった。最小値と最大値の比は 3 倍~5 倍におよぶ。

スライス中央部では弾性率、粘性率ともに小さく、周辺部（クラストに近い部位）で大きくなる傾向がみられた。 σ - ε から算出した弾性率と同様の傾向である。他のパラメータでも同様の結果であった。

クラムの中心部で弾性率、粘性率が小さくなるのは容易に予想できる結果だったが、測定領域の周辺部は、クラストに近いといっても 10 mm 程度は離れており、指で押した感覚では中心部とさほど大きな違いは見られなかったため、粘弾性パ

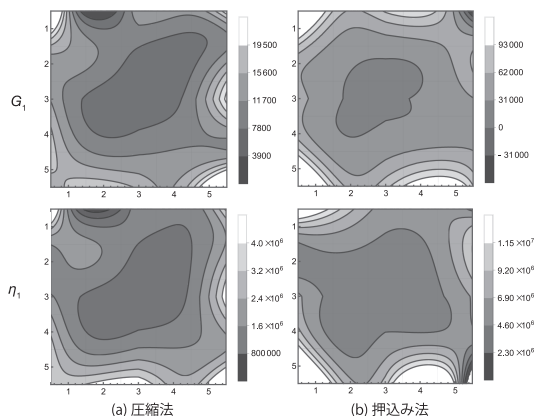


図5 粘弾性パラメータ G_1, η_1 の分布

(a) 圧縮法による値と (b) 押し込み法による値は、(b) の方が平均値で 4 倍程度大きい。

ラメータの大きな変動は予想以上であった。クラム内の粘弾性分布には、生地 の 混 捏、成 形 の 際 に 導 入 さ れ る 気 泡 構 造 の 異 方 性、パ ン 型 焼 成 時 の 温 度 分 布、焼 き 上 げ 後 の ク ラ ス ト 表 面 か ら の 乾 燥、ス ラ イ ス 時 の 不 可 逆 な 変 形 な ど 多 く の 要 因 が 考 え ら れ る。こ れ ら の 原 因 で 生 じ て い る ク ラ ム 内 の 粘 弾 性 の 変 化 を こ の 実 験 で 判 別 す る こ と が で き た。

押し込み法による測定では、すべての測定において、同条件の圧縮法に比べて 3 倍から 5 倍の応力を観測し、見かけの弾性率、粘性率も同程度に大きくなった。定量的な議論のためには、円柱プランジャ周りの粘弾性体の挙動の理論的な扱いが不可欠である。円形プランジャは円形端面周辺の応力集中が、測定対象の降伏や破断を誘引する可能

性が高い。球形プランジャを用いた実験との比較が必要であろう。

4. まとめ

本研究ノートでは、市販の食パンを試料として、食パンスライス面内の力学的性質を調べることを目的に、粘弾性パラメータの空間分布を測定した。測定にあたっては、角形に切り出したパンを面間にはさんで圧縮する方法（圧縮法）と、スライスパンを切断せずスライス面に円柱のプランジャを押し当てて変形量と測定する方法（押込み法）の2種類を採用した。

押込み法では、プランジャ周囲の応力場の広がりのため、圧縮法と同量のひずみに対して3倍から5倍程度の大きな応力が観測された。弾性率が1000 Pa程度のソフトな材料に対しては、粘弾性を高感度で測定できるメリットとなる。また、試料を切断・成型する際に生じうる試料の破損や不可逆な変形による測定結果への影響の排除することができた。プランジャの大きさと形状を適切に選択すれば、面内分布の空間分解能を上げることが可能である。

有限要素法などの数値解析と組み合わせて定量性を持たせることであれば、粘弾性分布の簡便な測定法として、押込み法による粘弾性計測は有用である。

5. 謝辞

本研究は石巻専修大学研究助成を受けて行われました。ここに謝意を表します。

参考文献

- (1) 井上 好文, 「パン入門」 (日本食糧新聞社, 2010)
- (2) 王 益平, 森嶋 博, 瀬尾 康久, 相良 泰行, 芋生 憲司, 「食パンのレオロジに関する基礎的研究 (第1報) クラムの圧縮性と弾性係数: クラムの圧縮性と弾性係数」 農業機械学会誌, 54 巻, 1 号, 1992.
- (3) 相良 泰行, 「食パンの破断特性および粘弾性計測法」, 冷凍 Vol.80, No.981, 36~44, (2005).
- (4) 山崎製パン株式会社, 「山崎製パン オフィシャルサイト」 <https://www.yamazakipan.co.jp/entertainment/factory/index.html> (参照 2021-9-23)
- (5) 酒井 基次, 「圧子力学 -ミクロ・ナノ領域における材料物理学-」 <http://ion.ee.tut.ac.jp/pdf/圧子力学最終版.pdf> (参照 2021-9-23)
- (6) Ivan Argatov, Gennady Mishuris, *Indentation Testing of Biological Materials* (Springer International, 2018).
- (7) Liu and M. G. Scanlon, *Understanding and Modeling the Processing-Mechanical Property Relationship of Bread Crumb Assessed by Indentation*, Cereal Chem. **79**, 763 (2002).
- (8) S. Guessasma, P. Babin, G. D. Valle, and R. Dendievel, *Relating Cellular Structure of Open Solid Food Foams to Their Young's Modulus: Finite Element Calculation*, Int. J. Solids Struct. **45**, 2881 (2008).
- (9) P. Babin, G. D. Valle, R. Dendievel, N. Lassoued, and L. Salvo, *Mechanical Properties of Bread Crumbs from Tomography Based Finite Element Simulations*, J. Mater. Sci. **40**, 5867 (2005).
- (10) A. E. Baker, C. E. Walker, and K. Kemp, *An Optimum Compression Depth for Measuring Bread Crumb Firmness*, Cereal Chem. **65**, 302 (1988).