

# A1. 功績賞受賞講演

## 食品レオロジー分野の発展と普及

(岩手大共同研究講座) ○三浦 靖

### Progress and Application of Food Rheology

M. Miura

**ABSTRACT:** In this lecture, the speaker will outline the development of food rheology, exemplified by our research using rheological methods conducted during my time as a graduate student (from 1981), as an industrial researcher (from 1986), and as a university faculty member (from 1994). Finally, I will discuss the future prospects for food rheology.

#### 1. はじめに

この度は2025年度日本レオロジー学会 功績賞を頂戴して身に余る光栄である。本講演では、演者がレオロジーに出会った経緯、大学院学生の期間（1981年～）、企業研究者（1986年～）および大学教員期間（1994年～）におけるレオロジー手法を用いた研究を例にして食品レオロジー分野の発展を概説する。最後に、これからの食品レオロジーを展望する。

#### 2. レオロジーとの出会い

自他共に社会科学系の人間であると思っていた演者が自然科学に興味を持つようになった契機は、SF作家である小松左京氏（2011年没、80歳）が執筆した小説「日本沈没」（1973年）および映画「日本沈没」（1973年）である。高校受験を控えた時期に封切られた映画の中で、田所雄介博士が政界のフィクサーである渡老人に、今でこそ常識になっている気象学・地球物理学 Alfred Lothar Wegener（ドイツ、1880-1930年）が1912年に提唱した大陸移動説を説明する場面があった。当時は研究手法が未熟であったために大陸移動の原動力をうまく説明できず完全に否定され、1930年11月にグリーンランド探査中に遭難して絶命したと説明した。ある時点では根本がうまく説明ができなくても、科学の進歩によって後世で受け入れられることがあることを学んだ。さらに、竹内 均・東京大学教授（本名で出演）が内閣総理

大臣・山本 勇にプレートテクトニクスを解説する場面から、大地という固体が移動（流れる）すること学んだ。まさに「万物は流転する」である。

#### 3. 食品の製造、品質評価および消費での食品レオロジーの役割

##### ➤食品の製造段階

①現象論的な取り扱いで、食品加工・製造における工程管理と品質管理での客観的な評価を可能にする。すなわち、加工処理の前後での食品素材の物性変化を把握して工程を制御、最終製品の品質の1項目として力学的物性を客観評価する際にレオロジーが利用されている。

②現象論的な取り扱いで、調理食品の品質評価や調理過程での材料の変化に関する情報を与える。

③構造論的な取り扱いで、製品設計の際に有益な情報を与える。

##### ➤食品の保蔵・流通段階

食品の品質変化を客観的に評価したり、その機構解明に有用な情報を与える。例えば、多孔性食品では水の揮散／拡散／収着により連続相の粘弾性変化（パンのクラスト、クッキー、米菓、スナック菓子などのクリスピーネスの低下・消失）する。糖含量が多い食品では、①糖の結晶化（羊羹での「シャリ」の発生、砂糖漬やキャンディ、アイスクリーム、クッキーでのざらつきの発生）、②糖の可溶化（フォンダンの「泣き」の発生）が起きる。冷凍食品では、①氷結晶の成長、氷結晶の昇華による食品構造の物理学的変化（乾燥や多孔質化、アイスクリームでの収縮やざらつきの発生）、②成分の化学的変化（冷凍すり身中の筋原線維タンパク質の凍結変性による練り製品の「足」の低下など）、③生物学的変化（冷凍パン生地中の酵母の凍結障害による発酵時間の遅延、食品テクスチャー\*と風味の劣化）が起きる。

\*口腔に入れたときの食品の組織、構造、形態やレオロジー的性質などの物性に起因する総合的な物理的食感を指す。

➤食品の消費段階

食味特性である視覚特性（形状、均一性、光沢、粗密、平滑、色相、彩度、明度）、味覚特性（甘味、酸味、塩味、苦味、辛味、渋味、旨味）、嗅覚特性〔匂い、鼻先香（オルソネーザルアロマ）、口中香（レトロネーザルアロマ）〕、聴覚特性（咀嚼音）、皮膚感覚特性（食品テクスチャー、温度）を総合して「おいしさ」が判定される（図1）。このうち、皮膚感覚特性の客観評価にレオロジーが利用されている。

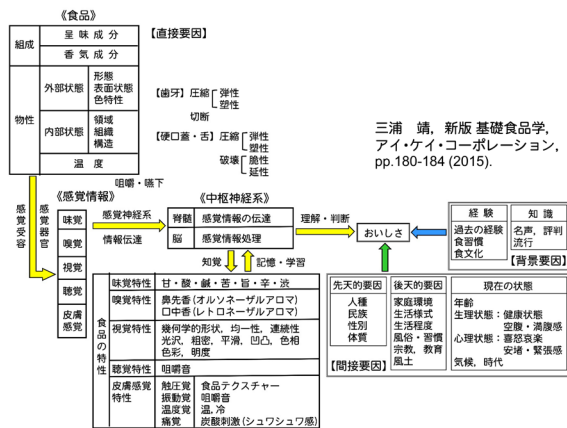


図1 食品の「おいしさ」の判定過程

➤ヒトの摂食嚥下

ヒトの摂食嚥下は、認知期（先行期）、準備期（咀嚼期）、口腔期、咽頭期、食道期という摂食5期に分けられる。感覚のフィードバックが嚥下にとって不可欠な調節因子である。感覚喪失に起因する嚥下困難は感覚性嚥下障害と称され、機能的あるいは突発性嚥下障害を除外した診断がなされている。1984年に概念提唱された食品の機能は、一次機能（食品の土台となる基本的な機能である栄養機能）、二次機能（食品の受容性に関わる感覚・嗜好機能）、三次機能（健康の維持に関わる生体調節機能）から構成されている。その後、喫食による満足感や喜び、意欲などの精神機能も考慮されるようになった。そこで、従来の生体調節機能が成分に注目したモノ由来型であるのに対して、咀嚼・嚥下や唾液の分泌に注目したコト由来型の重要性が指摘されている。食品テクスチャーを知覚している時期は、準備期～口腔期であると考えられる（図2）。準備期の開始時には、「堅硬性」（柔らかい、歯応えがある、硬い）や

「破砕性」（モソモソした、カリカリした、バリバリした）、「粘性」（サラサラした、トロトロした、ドロドロした）を知覚すると言われている。そして、初期には「ガム性」（パサパサした、粉っぽい、糊っぽい、ゴムっぽい）、咀嚼性（シナシナした、シコシコした、ゴワゴワした）、付着性（ネバネバした、ペタペタした、ベタベタした）などが知覚される。中期～後期には「潤滑性」（滑らか、ザラザラした）、「湿潤性」（乾いた、湿った、濡れた、汁っぽい）、「油脂性」（油状の、軟脂状の、硬脂状の）などが知覚される。「滑らかさ」の因子として、①食品中の粒子の大きさ、②食品中の粒子が舌表面に滞留する時間、③食品が硬口蓋と舌との間でせん断された際の抵抗が想定される。①は粒子の粒子径分布、②は低せん断速度での流動特性、および動的接触角ヒステリシス、③は食品の粘性、ならびに舌や口腔粘膜に対する摩擦力に相当する。「とろみ」の知覚因子として、①食品が口腔および上咽頭を流動する際の抵抗、②食品が口腔および上咽頭での濡れ拡がりやすさ、③口腔での食品と唾液との混合しやすさが想定される。①は液体食品の場合には粘性、固体食品の場合には塑性、舌や口腔粘膜に対する摩擦力、②は口腔や上咽頭の粘膜に対する食品の濡れ性、③は唾液に対する食品の濡れや溶解に相当する。これらの食品テクスチャーの因子の計測・解析に、レオロジー、トライボロジーおよび界面コロイド科学の知識が必要である。

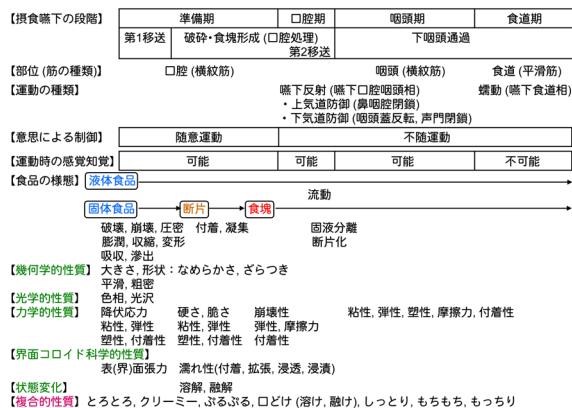


図2 摂食嚥下と食品物性との関係

4. 粒子／気泡分散系食品の製造・品質制御の着眼点

分散質が粒子（固体、ゲル）または気泡である分散系のレオロジー特性は、分散質および分散媒の力学的物性、粒子や気泡の凝集状態（凝集度合

い、凝集形態など）、粒子間や気泡間または粒子－気泡間の相互作用、粒子や気泡と分散媒との界面物性の影響を受ける（図3）。

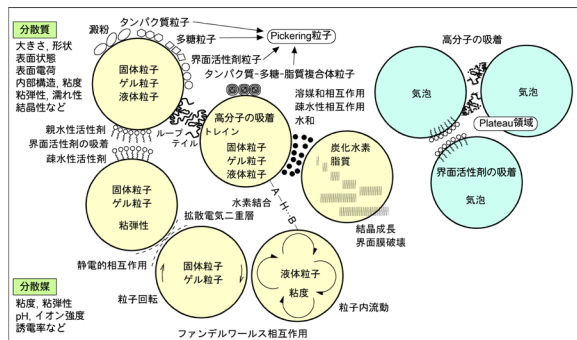


図3 粒子／気泡分散系食品の製造・品質制御のポイント

粒子界面に高分子が吸着したり、乳化剤分子が物理吸着すれば粒子の分散構造ならびに粒子の界面物性が変化する。分散剤あるいは凝集剤として高分子を用いれば、多様な分散性の制御ができる。その機構として、①低濃度で高分子を用いた場合に、高分子が隣接した粒子にも吸着して粒子同士を連結させるといった架橋凝集効果による凝集作用、②高濃度で高分子を用いた場合に、高分子が粒子界面に吸着して被覆し、粒子の凝集を抑制するという立体斥力効果による分散作用、③粒子には吸着しない高分子溶液で、本来は凝集しない粒子が集合して弱く疎な凝集体を形成し、3成分が媒体－高分子、媒体－粒子の2相に相分離して粒子間に媒体が存在するという空乏 (depletion) 凝集作用が考えられている。一方、乳化剤を用いる場合には、低濃度であれば粒子の親水表面を疎水的に修飾したり、高濃度であれば二分子層を形成して親水表面を形成させている。

## 5. 食品レオロジー分野の発展

ここでは、演者の経験から見た食品レオロジーの発展に触れる。

### (1) 1980～1990年頃

➤食品の力学的物性：単軸等速圧縮試験による力－変形曲線（見掛けの弾性率、破壊点での力と変形）、回転粘度計を使用した流動曲線（流動挙動の判別、流動方程式のパラメータ）、静的粘弾性試験による応力緩和曲線やクリープ曲線（緩和時間、遅延時間、力学モデルでの粘性率と弾性率、協同流動理論解析）を計測・解析した。

➤食品テクスチャーの客観的評価：圧縮・反転を2回繰り返すテクスチャープロファイル分析 (T

PA)、単軸等速圧縮試験による力－変形曲線（見掛けの弾性率、破壊点での力と変形、周波数解析）、回転粘度計を使用した流動曲線（流動挙動の判別、流動方程式のパラメータ）を計測・解析した。

### (2) 1990～2020年頃

➤食品の力学的物性：上記に加えて動的粘弾性測定による振動ひずみ負荷応答（貯蔵弾性率、損失弾性率）や振動応力負荷応答（貯蔵コンプライアンス、損失コンプライアンス）、力学的損失正接、動的粘性率、複素弾性率などを計測・解析した。

➤食品テクスチャーの客観的評価：上記に加えて単軸等速圧縮試験による力－変形曲線（フラクタル次元解析、周波数解析、時間一周波数解析）、咀嚼模擬装置による力学的物性、生体計測（咀嚼筋、舌骨上・下筋群、頬筋の筋活動電位、咀嚼力、咀嚼圧、舌圧、嚥下音、舌運動や食塊移動を超音波撮像）を実施した。

### (3) 2020年頃以降

➤食品の力学的物性：上記に加えて機械学習の適用（物性、破壊現象の予測）を試みようとしている。

➤食品テクスチャーの客観的評価と制御：上記に加えて単軸等速圧縮試験によるアコースティック・エミッション (AE) 計測、米飯塊について粗視化動力学シミュレーション、3次元積層造形を実施した。

AE法を用いた多孔質食品のクリスピーネス評価法を紹介する。6種類の市販多孔質食品の水分含有量を25℃における貯蔵環境の湿度（乾燥、22～31 %RH）により6水準に調整した。そして、水分含量を調整した試料の理化学的、力学的および音響的特性を評価した。食品試料の水分含有量は、形状や多孔構造に影響を与えなかった。単軸等速圧縮試験により得られた力－ひずみ曲線における力のピーク数は、試料の水分活性 ( $a_w$ ) と関連しているようであった。 $a_w$  の変化に伴う食品試料の破断特性の変化は、澱粉の糊化度に基づいて分類された多孔質食品の種類に依存していた。AEイベント数およびAEカウントは、多孔質食品の  $a_w$  と良好な相関を示した（図4）。これは、AEイベント数およびAEカウントが  $a_w$  に対して高い感度を持ち、多孔質食品のクリスピーネスを客観的に評価する上で適切な指標となり得る。

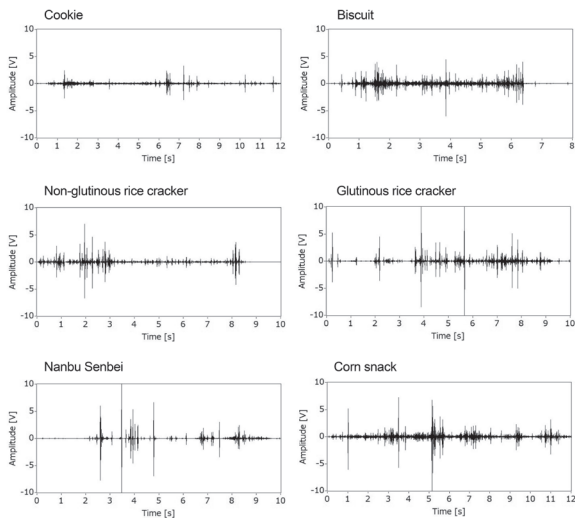


図4 無調湿のクッキー、ビスケット、粳米煎餅および糯米煎餅のAE信号

次に、米飯塊での粒子充填構造の粗視化力学シミュレーションを紹介する。食感が良い米飯塊を作るためには、個々の米飯粒に作用する相互作用力や充填構造を考慮し、力学的特性を測定する必要がある。しかし、米飯粒の充填構造は任意に調整できず、これが力学的特性や食感に及ぼす影響は不明である。米飯粒を125個の剛体粒子を用いてモデル化した。このシミュレーションにより、米飯塊の圧縮過程における米飯粒の挙動を再現できた(図5)。そして、シミュレーションによって明らかになった米飯塊の粒子充填構造と力学的特性との関係が解明された。シミュレーション結果と実測した理化学的特性を比較することで、米飯塊の食品テクスチャーを任意に変化させるための米飯塊の調理条件、米飯粒の充填構造、および力学的特性を予測することが可能となる。

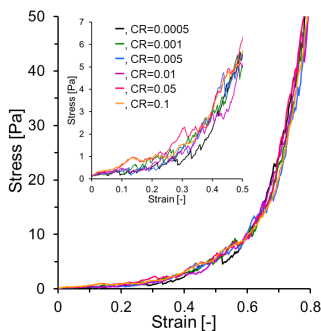


図5 圧縮速度(CR)が米飯塊の応力-ひずみ曲線に与える影響 空間率=0.3, LJポテンシャルによる力のパラメータ $\epsilon = 1.0$ , 結合角ポテンシャル  $K=100$

さらに、呈味/咀嚼・嚥下容易性の制御に向けた3次元造形法を紹介する(図6)。食品用3次元積層造形装置(DE-3を改造, ローランドディー.ジー.㈱)を用いてクッキー生地をテーパノズル先

端(内径0.84 mm)から所定の形状(細線並列, 細線交差, 同心円, 同心方形, ブロックチェック)になるように3次元積層造形生地を焼成してクッキーを調製して水分含量を測定した。食塊の唾液吸収率と2軸伸長粘度および最大摩擦係数を測定した。さらに、咬筋・舌骨上筋群および咬筋・側頭筋の表面筋電位を生体計測した。そして、咀嚼・嚥下容易性を官能評価した。

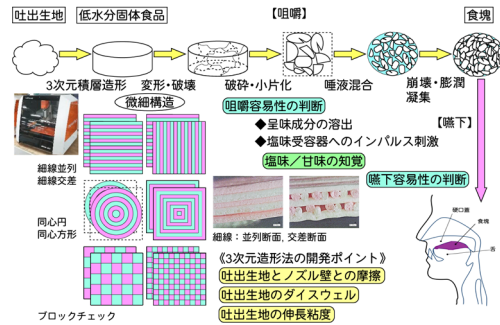


図6 呈味/咀嚼・嚥下容易性制御に向けた3次元造形の体系  
食品レオロジー分野では、約半世紀の期間に現象論的な取り扱いから構造論的な取り扱いに変遷してきた。最近では、理論物理学(シミュレーション, 計算物理学など)や理論化学(量子力学, 統計力学, 計算化学など)での理論や手法が取り入れられる動きがある。

## 6. 食品レオロジー分野の将来

食品レオロジー分野でこれから取り組まなければならない事項として、食品の力学的物性、マクロ/メゾスコピック構造(顕微鏡から取得した2次元画像, X線 $\mu$ CTから取得した3次元画像), 咀嚼模擬装置での計測値(力, モーメント, エネルギー, 力積など), 生体計測値(咀嚼関連筋や嚥下関連筋の筋活動電位, 口腔や咽頭領域の食塊移動の超音波画像), および主観的に評価した食品テクスチャーの因果関係の明確化が想定される。例えば、咀嚼模擬装置を用いた食品の破壊現象の*in situ*計測・解析により、食塊形成過程の性状変化(崩壊による断片の生成や断片の凝集などの画像解析に高次統計量(同時生起行列や高次自己相関関数)や構造的特徴要素による画像表現( $N$ 次元特徴ベクトルによる $N$ 次元特徴空間)を適用することが想定される。また、「モノ」としての食品の理化学的特性や「コト」としての摂食嚥下挙動の本質を理解するためには、理論化学や理論物理学, 第一原理電子状態計算, 機械学習での理論や手法を適用する必要性を痛感している。