連載 食品の物性そして水 ①

◇◇◇◇ 解説論文 ◇◇◇◇

食品工学における物性そして水

熊谷 仁^{1,†}, 熊谷日登美², 萩原知明³

¹ 共立女子大学家政学部食物栄養学科, ² 日本大学生物資源科学部農芸化学科,
³ 東京海洋大学海洋科学部食品生産科学科

Physical Properties of Foods and Effect of Water on Them

I Physical Properties and Water in Food Engineering

Hitoshi KUMAGAI^{1,†}, Hitomi KUMAGAI² and Tomoaki HAGIWARA³

¹Department of Food Science and Nutrition, Kyoritsu Women's University, 2-6-1 Hitotsubashi, chiyoda-ku 101-0003, Tokyo

²Department of Agricultural and Biological Chemistry, Nihon University, 1866 Kameino, Fujisawa-shi 252-8510, Kanagawa

³Department of Food Science and Technology, Tokyo University of Marine Science and Technology, 4-5-7 Konan, Minato-ku 108-8477, Tokyo

Differences in recognition of physical properties of food in food science and engineering and the influence of water on them were discussed. The physical properties, “Bussei” in Japanese, can be usually defined in food engineering and physics as “the physical quantities that characterize a substance and do not depend on the shape and size of the material.” There seem, however, to be other interpretations of the physical properties among food researchers and technologists. For example, some researchers such as food chemists and cooking scientists refer to the dynamic properties and the texture of foods as the “Bussei,” whereas others such as technologists in food companies refer to it as the physical characteristics of foods reflecting some physical phenomena in food manufacturing and preservation processes. Most of the latter two types of “Bussei” are influenced by the size and shape of materials and are not, therefore, the true physical properties. The type of “Bussei” useful for food researchers and engineers would, however, vary depending on the situation or problem to be solved. Physical properties of foods are used for several purposes: first, they are indispensable parameters in the engineering models for predicting the optimal conditions for food manufacturing; second, the inner structure or state of food materials can be estimated from the behaviors of some of their physical properties. For example, water interacts with many food components; and thus the amount and/or state of water considerably influences the physical properties of foods, for example, by causing a change in the dynamic properties during sol-gel transition and the glass-rubber transition by the plasticizing effect of water.

Keywords: physical properties, texture, water, food engineering,

1. 緒 言

今回、本学会から、テーマを決めて解説記事を書いてみるように依頼を受けた。筆者らが研究や教育、実務で関わってきた領域から選ぶのがよいのはもちろん

だが、あれこれ考えた結果、表題のように「食品の物性そして水」というタイトルで5、6回の記事を書いてみることにした。本学会の会員の方々ならばご存知だろうが、「食品物性」、「水」いずれにせよ、非常に深く、見識者から「5、6回程度での解説記事を書くならばもっと絞り込んだテーマにすべきである」という批判を受けるであろうことは十分に承知している。ただ、以下でも述べるが、食品科学・工学における物性の重要性については食品関連の誰もが認めても、筆者らの経験では、食品物性という場合、研究者や企業の技術者に

(受付 2008 年 5 月 17 日, 受理 2008 年 5 月 26 日)

1 〒 101-0003 東京都千代田区一ツ橋 2-6-1

2 〒 252-8510 神奈川県藤沢市亀井野 1866

3 〒 108-8477 東京都港区港南 4-5-7

† Fax: 03-3237-2787, E-mail: kumagai@s1.kyoritsu-wu.ac.jp

よって、物性についての認識が語句の定義の点から異なっていて、議論が全く咬み合っていないことがしばしば見受けられる。また、研究者や技術者による興味や価値観、立場の違いによって物性に関する取り組み方は相当異なる。さらに、食品の物性挙動を複雑にしている大きな原因の1つが水であり、これは、水と食品成分との相互作用が大きいためである。食品物性についての研究は水についての研究であり、食品中の水についての研究は、他の成分との相互作用に関する研究といえる。

以上の理由から、個々の食品物性について解説するのではなく、「食品物性」の全体像をおおまかに整理し、物性と水との関係について述べることは、食品工学の研究者、食品科学者（食品化学者を含む）、食品企業の技術者にとって、互いに意志の疎通を図るうえでも意義のあることと思う。とは言っても数人の著者で、食品の物性や水についての全てを語ることができないのはもちろんなので、題材は著者らが関わってきたものを中心としていく予定である。

第1回目である今回は、食品工学における物性と水に関して、筆者らの見解も含めて総論的に述べてみたい。

2. 食品工学とその課題

食品工学（food engineering）における物性と水について述べる前に、今回の解説記事の方向付けにおいて重要なので、著者らがどの範囲までを食品工学というかについて確認をしておく。以下の議論は、熊谷らの“食品工学入門”[1]に詳しく書かれている。

食品工学を、食品の製造プロセスの操作条件を決定する操作論を扱う工学と考えている方が大学や企業にも多い。しかし、工学（engineering）の定義を「自然科学（数学、物理、化学、*etc.*）の手法を用いて、現実（現場）の問題に定量的指針を与える学問体系」とすれば、食品工学を、「食品の生産、製造・加工、流通、貯蔵・保存過程における理論的基盤を与える工学」と考えることができるだろう。実際、食品工学会における一般講演においても製造のみでなく、保存過程や食物の咀嚼に関わるものが見られる。

食品工学の歴史を見ると、初期の食品工学の研究は、乳業における製造の機械化に代表されるように、食品製造における単位操作（unit operation）に関する化学工学（chemical engineering）的なものが多かった。単位操作とは、加熱、混合、抽出、乾燥、固液分離などの工業的な物理操作を体系的に整理して整理することによって、任意のプラントの設計に対応できるという思想から発展した概念で、石油化学工業で多大な貢献をした。そのような食品工学は、食品化学プロセス工学と言えるものである。その理論基盤となっているのが、移動現象論（transport phenomena）[2]で、運動

量移動、熱移動、物質移動の3つの領域から成る。また、化学工学の中には、反応速度論を含む反応工学があり、食品工学においてはバイオリアクタの操作条件決定などに応用されている。この移動現象論をベースとした食品工学は現在でも決して重要性を失ってはならず、プロセスの設計や最適化、スケールアップを行う際には不可欠である。

しかし、食品工学では、化学工学的アプローチのみでは解決できない問題にも踏み込むことがある。食品は多成分の複合系であるため、製造あるいは保存過程における変化・反応は極めて複雑である。そうした系を取り扱う場合（保存中の劣化反応を含む）、化学工学の方法論に従って、「反応速度式をすべて列挙し、運動量、エネルギー、物質のバランスから微分方程式を立てて解く」ことによって最適化するのは事実上不可能である。そうした材料の変化の取り扱いにおいては、物理化学的な手法がよく用いられる。水分活性および水分収着等温線、ガラス転移などは代表的で、かつ有用な概念である。また、最近の食品工学では、パーコレーション、フラクタルといった微積分を直接には用いない高分子科学的な概念もあり、これらは従来の化学工学や物理化学の方法論で解析困難な複雑な系を取り扱う上で極めて有力である。

食品工学においては、工程管理、品質管理のための計測機器・センサーなども食品工学における重要な研究テーマである。また近年、咀嚼や嚥下に関する研究なども見られるようになってきた。

このように考えると、食品工学は非常に広い範囲を研究対象とすることが再確認できるが、この度の本論である「物性」は、すべての領域に関わっており、かつ、そこに水が関与しないことはまずない。また、食品工学者でなくても、食品に関わる者であれば誰でも物性という言葉の口にする。ところが、この「物性」という用語が、研究者や技術者の専門によってかなり異なっているのである。その点について以下で述べる。

3. 食品工学と物性

3.1 物性とは何か

物性は、英語では physical properties であり、本来の概念としては1つのはずだが、筆者らの経験では、研究者でも食品工学、食品化学、調理学などの専門の違い、食品企業の技術者などで、同じ「物性」という語句を使っても意味が通じないことがよくある。これは、物性の概念についての誤解も大きな原因の1つだが、「解決すべき問題」の差異によることも否定できないような気がする。以下、物理的に正確な物性に加えて、筆者らが食品分野（産官学すべてを含む）で耳にする「物性」という語句について考えてみる。

3.1.1 “本来の”物性

物性とは、英語の意味からも本来、「物質のサイズや形状には依存せず物質固有の性質を反映する物理量（実測可能で物理的な意味が明確な量）」である [1, 3]. 通常、食品工学に精通した研究者の多くが物性というのはこれであり、先の食品化学プロセス工学的研究が専門の人間にとって物性とはこれしかないといつてよいと思う。食品工学ハンドブックの「Ⅲ食品物性」にある物性の主要なものを Table 1 に示す [4] が、ここにある物性はこの“本来の”物性である。筆者らも大学で教育を受けていた当時は、これぞ物性と信じていた。ただ、工学・物理学に精通していない食品研究者（学生を含む）に、この本来の物性は何かを教えるには結構、骨が折れる。本学会誌の読者には不要かもしれないが、念のため、ゼリーおよびスープを例に挙げて本来の物性とは何か説明してみよう（筆者らはこうした説明をしなければならない状況によく直面する）。ゼリーの場合、質量・重さ、体積、長さ、形、温度などは物性ではない。なぜなら、これらの量や特性は物質のサイズや形状に依存し、物質のもつ本来の物理的特性のみを反映するものではないためである。一方、ゼリーの弾力の程度の指標である弾性率や密度は、大きさや形状には依らず、物質固有の性質を反映するので物性である。スープについて考えると、体積、温度などは物性ではないが、比熱やトロミの程度を表す粘度などは物性である。物体の加熱速度や温度変化に関わる熱物性、物質移動に関わる拡散係数、電気物性、力学物性などもある。屈折率も糖度の工程管理などに用いられる重要な物性である。食品の製造や保存過程について食品工学的に考える場合、これらすべての物性が重要である。

Table 1 食品工学ハンドブックにある主な物性

分 類	例
基本物性	密度、屈折率、水の物性
相転移関連物性	相転移物性、臨界定数
力学物性	動的粘弾性、粘性
電気物性	誘電率、電気伝導度
熱操作関連物性	比熱、熱伝導度、熱拡散係数
分離・乾燥操作関連物性	水分活性、拡散係数
粉粒体物性	安息角
界面化学物性	界面(表面)張力、臨界ミセル濃度
その他	引火点、発火点

3.1.2 食品学・調理学や食品物性論における“物性”

食品学（あるいは食品化学）・調理学や食品物性論という分野（本）で食品物性という場合、物体にかかる力と変形の程度との関係を示す力学物性を意味することが多い（食品物性論という本もある）[5]。それは、化学系や調理系の研究者にとって、興味のある物理特

性は食品の二次機能（嗜好性、官能評価）に重要な意味をもつ食品の“堅さ”や“流動性”のためと考えられる。この場合、上述の“本来の”物性として、力学物性である粘度や弾性率などはもちろん挙げられる。しかし、食品物性論においては、歯ごたえや舌触りなど、テクスチャ（食感）について議論することが多い。例えば、煎餅が“パリパリ”しているとか、つきたての餅が歯につきやすいなどの食感がテクスチャであり、食品学や食品物性論などでは、そうしたテクスチャも含めて“食品物性”とよび、食品の技術者の中にも、テクスチャも含めて物性という人が多くいる。テクスチャを数値化する機器としてよく知られているのが、テクスチュロメータで、Fig. 1 に示すような硬さ、もろさ、粘り、付着性、凝集性、弾力性、そしゃく性、糊状性などのパラメータが得られる。こうしたパラメータは試料のサイズや試料と装置間の接触の仕方にも依存するので、上述の“本来の”物性ではない。しかし、ヒトの咀嚼（歯や口蓋で嚙んだり押しつぶしたりする）は「大変形」であり、通常のレオロジーで扱われる微小変形測定で得られる粘弾性値と食感はかならずしも対応しないため、試料間の相対的な比較のための手段としてこのような“テクスチャ測定”によって得られるパラメータを用いざるを得ない事情もある。

3.1.3 食品現場で耳にするその他の“物性”

食品会社など現場の問題を扱う場合、上述の2つと異なる物性という語句を耳にすることがよくある。例えば、ケーキ用のホイップクリームが“ピン”と立つかどうか（保形性）、表面のなめらかさなどを物性と言ったりする。また、粉体食品（粉乳など）を水の表面上からまいて溶解するときに粉体表面が濡れ、沈降し、水中に分散し、溶解するという過程を経るが、このときの“湿潤性”、“沈降性”、“分散性”、“溶解性”[6]などを物性という技術者もいる。粉体については、製造装置壁面や粉体同士の付着性なども物性ということがある。食品の手触りや色調などを物性ということさえある（これはさすがに誤りと思うが）。つまり、食品の物理的現象に関する材料の“特性”を物性と言っているのである。これは、上述の長さや温度などを物性という誤りとは異なるように思う。

“本来の”物性の意味から考えて、このような“物性”が物性でないとされる（食品工学、特に食品化学プロセス工学の専門家にはこう考える方が多いと思う）のは、材料の大きさや形状に依存することもちろんだが、複数の物理現象あるいは物性が関与していることが明らかで、より基本的現象に分離すべきであると考えられるからである。科学的方法というのが、本来、複数の要因を分けて考えることによって問題を解決するものであることを考えると当然のことである。例え

Fig. 1 テクスチュロメータによる測定における典型的な咀嚼曲線と得られるパラメータ
文献 [3] より引用

ば、上述のホイップクリームの場合、試料の変形の程度や流動性が問題だから、粘弾性値（特に粘性）を用いて議論すべきであると考え、粉体の湿潤性の場合、界面科学的な接触角（contact angle）を知りたくなる。粉体沈降性については、後述のように、粒子の密度、粒径、液体の粘度がわかれば沈降速度は計算できるはずである。粉体の分散性の場合、物質移動論（移動現象論）によれば、成分の水中の拡散係数がわかれば、液体の物性（粘度、密度）、攪拌速度から物質移動係数が求められ、溶解速度は原理的に計算可能である。溶解性は化学における溶解度ではないかと考える（実際、技術的に“溶解度”という場合、不要物の量が問題になるので、化学の溶解度とは異なる）。

このように“現場における”物性を基本物性で考えることは、原理的には可能である。しかし、食品は多成分系で、形状や物性（本来の物性）挙動が複雑なので、現実的に基本物性に分けて考えることは極めて困難であり、未だにこのような“物性という語句が用いられ

ているのが現状である。

以上、食品分野で扱われる物性には、3通りあると述べてきた。物理学的に厳密なのは第1の“本来の”物性のみで、後の2つは試料の形状やサイズに依存したり、複数の物理現象が関与する相対的なものである。しかし、食品現場の問題を解決しなければならないという立場からは、後の2つの物性を「科学的に意味がない」と言って切り捨てることはできないと思われる。それぞれの“物性”の意味するところを理解したうえで、科学的理解を深めつつ歩み寄っていくことが重要だろう。近年着目されているガラス転移は、広義の物性（上述の粉体の付着性など）を考えるうえでも非常に有効な概念と思われるが、それについては、この連載の後半で解説する予定である。こうした3通りの物性全てについて、研究者や技術者が集まってそれぞれの立場から議論が繰り広げられている研究会としては、京都大学の松村先生康生先生と香川大学の合谷祥一先生が世話人である食品物性シンポジウム、西成勝好先生が世

話人のハイドロコロイドシンポジウムが代表的である。

3.2 物性の有用性と物性研究の方向

3.2.1 物性の「使い方」

物理や数学に慣れておらず食品成分の化学構造にしか興味のない方にとっては、物性がただの“数字”に見えるようで、「数字のお遊びをしてもしょうがない」とまで言われるが、食品の物性値の挙動からいろいろなことを知り、考えることができる。ここでは、物性から“知る”あるいは“考える”ことができることをいくつかの例を挙げて説明してみたい。ただ、物性挙動から“何かを知る（予測する）”と言った場合、上述の物性のうち、試料の大きさや形状によらない“本来の”物性が主流になるので、ここではそれに限って述べることにする。

(1) 工学的な理論式やモデル中のパラメータとしての物性

食品工学において最もポピュラーな物性の使われ方としては、理論式や工学的モデル中に物性が組み込まれている場合がある。この場合、物性値を知ることによって、ある予測が可能になる。以下に、流体（液体および気体のこと）の流動および伝熱現象から例を挙げて説明する。

流体の流動性を評価する物性値が粘度（粘性、viscosity）である。Fig. 2(a)に示すように、断面積 S [m²] の2枚の水平の板間に厚みが L [m] の流体が満たされていて、上の板に対して右方向に F [N] の力を加えたところ、速度 V [m/s] で動き、板間の流体内で図に示すような速度分布ができあがったとする。この時、粘度 η [Pa · s] は以下のように定義される。

$$F/S = \eta (V/L) \quad (1)$$

(1)式から、同じ力を加えた際に流動しにくい流体ほど、粘度 η は大となる。

粘度を含む理論の第1の例は、円管内における層流（流線が乱れない流れ）に関するハーゲン－ポアゼイユの法則（Hagen-Poiseuille law）である。Fig. 2(b)に示すように、長さ L [m]、内半径 R [m] の円管の出入り口の圧力差を ΔP [Pa] として定常的な層流を起こした場合、 ΔP と体積流量 F [m³s⁻¹] の間には

$$F = \frac{\pi \Delta P R^4}{8 \eta L} \quad (2)$$

の関係があり、これがハーゲン－ポアゼイユの法則である。(2)式から、流体粘度 η の値を知ることによって、形状の決まった円管に体積流量 F で流体を流すときに必要な圧力差 ΔP を計算できる。ハーゲン－ポアゼイユの法則は、毛管粘度計の測定原理として知られている。詳細は文献 [1] および [2] を参照されたい。

流体の粘度 η が関与する理論の2つ目として、静止流体内での球状粒子の浮上あるいは沈降速度 v_∞ を記述

する以下の式について考えてみよう (Fig. 2(c))。

$$V_\infty = \frac{2a^2(\rho_s - \rho)g}{9\eta} \quad (3)$$

ここで、 a [m] は粒子の半径、 g [ms⁻²] は重力加速度、 ρ [kgm⁻³] は流体の密度、 ρ_s [kgm⁻³] は粒子の密度、 η [Pa · s] は流体の粘度である。なお、(3)式の右辺のパラメータのうち、 ρ 、 ρ_s 、 η は物性で、 a および g は物性ではない。(3)式で、 $\rho_s > \rho$ の時には $v_\infty > 0$ で粒子は沈降、 $\rho_s < \rho$ の時には $v_\infty < 0$ で粒子は浮上する。(3)式から、物性値 ρ 、 ρ_s 、 η がわかれば半径 a の粒子の浮上速度あるいは沈降速度が計算できる。この理論式は、O/W（水中油滴型）エマルションの均質化（homogenize）操作において、粒子半径をどの程度にすればクリーミング（油層が浮く）を防止可能か考える際の基礎となる [1]。また、液状食品中のゴミなどを遠心力によって除去するセパレータにおいても、重力加速度 g を遠心力の加速度に置き換えれば(3)式を用いて装置設計や運転条件に指針を与えることができる。

次に伝熱問題を考えてみよう。物体の熱の流れやすさを表す物性値が熱伝導度（thermal conductivity）である。熱伝導度 λ [W m⁻¹ K⁻¹] は、Fig. 3(a)に示すように、厚さ X_s [m] の平板の両端の温度を T_1 [K] および

(a) 粘度の概念

(b) 円管内層流

(c) 流体中の球状粒子の沈降（または浮上）

Fig. 2 粘度とそれの関係する現象

T_2 [K] に保った際に, 定常状態 (steady state, 時間に依存しなくなった状態) での熱流束 (heat flux, 単位面積, 単位時間あたりの熱の流量) q [$\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$] として以下の式で定義される.

$$q = \lambda \frac{T_1 - T_2}{X_s} \quad (4)$$

ここで, 伝熱問題の場合, 温度の単位としては絶対温度 [K] の代わりに温度差を考えるので [$^{\circ}\text{C}$] でもよいことを注意しておく. (4) 式から熱伝導度の大きい物体ほど, 同じ温度勾配 $(T_1 - T_2)/X_s$ がかったときの熱の流量が大きい, つまり熱の良導体であることを意味する. Fig. 3(a) には, 参考に, 一次元 (x 軸方向) 非定常の伝導伝熱に関する Fourier の第一法則と第二法則を示した. Fourier の第一法則は熱流束, 第二法則は固体内部の温度分布を記述する微分方程式である. 詳細については文献 [1], [2] を参照されたい.

次に, 攪拌された流体内部での平板の温度分布について考えてみる. 今, 初期温度 T_0 [K] に保たれている厚

み $2R$ [m] の平板を時間 $t=0$ [s] の瞬間から温度 T_{∞} [K] の攪拌された流体に入れた場合を考える. 時間 t [s] 経過後の平板内部の温度 T [K] は, 座標 x [m] ($-R \leq x \leq R$) と時間 t の関数, すなわち $T = T(x, t)$ である. 1次元の伝導伝熱を記述する偏微分方程式は, Fourier の第二法則から

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (5)$$

である. ここで, α [m^2/s] は熱拡散率 (平板の) と言われる物性値で, 平板の熱物性である熱伝導度 λ [$\text{W m}^{-1} \text{s}^{-1}$], 平板の密度 ρ [kg m^{-3}], 比熱 (比熱容量) C_p [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$] と以下のように関係づけられる.

$$\alpha = \lambda / (\rho C_p) \quad (6)$$

もし, 平板表面が時刻 $t=0$ から T_{∞} に維持されている場合 (流体が十分攪拌されていて境膜伝熱係数 h が ∞ のとき) には,

初期条件: $t=0$ で $T=T_0$ ($-R \leq x \leq R$ で)

(a) 熱伝導度の定義

[参考] x 軸方向の非定常伝導伝熱

Fourier の第一法則

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}$$

Fourier の第二法則

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (\alpha \equiv \frac{\lambda}{\rho C_p})$$

α : 熱拡散率 [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]

ρ : 密度 [kg m^{-3}]

C_p : 比熱 [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$]

(b) 温度 T_{∞} [K] の流体に温度 T_0 [K] の平板を入れた場合の温度分布 $T(x, t)$ と関与する物性

注意)

流体の攪拌速度が十分大なら,
固体表面温度は T_{∞} [K] で,
流体の物性は内部の温度分布に影響を与えない.

Fig. 3 熱伝導度の定義と平板の流体内での加熱

境界条件： $x=\pm R$ で $T=T_\infty$ ($t>0$ で)
 の下で、(5)式の解析解(微分方程式の境界条件省略)は、

$$T=T_\infty+2(T_0-T_\infty)\sum_{n=0}^{\infty}\frac{(-1)^n}{(n+\frac{1}{2})\pi}\times\exp\left\{-\frac{(n+\frac{1}{2})^2\pi^2\alpha t}{R^2}\right\}\cos(n+\frac{1}{2})\frac{\pi x}{R}\quad(7)$$

となる。この式から、平板の熱物性値である熱拡散率 α (あるいは、(6)式から λ , ρ , C_p でもよい) がわかれば、任意の時間における平板内の温度分布を知ることができる。この平板の伝熱問題において、もし、流体の攪拌が不十分な場合(流体の粘度が高いときなど)には、伝熱遅れのため板表面温度は T_∞ [K] にならない。その場合、平板の温度分布 $T(x, t)$ には、平板の物性 (α , λ , ρ , C_p) に加え、流体の物性として流体密度 ρ_f [kgm^{-3}], 流体の粘度 η [Pa s], 流体の比熱 C_{pf} [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$] が関与するようになる。その際の温度分布の計算手順は、流体の物性、攪拌速度、装置サイズの関数である境膜伝熱係数 h [$\text{Wm}^{-2} \text{K}^{-1}$] (物体表面の対流伝熱速度を決定するパラメータ) を計算し、 h を含む境界条件を用いることになる。 h の値がわかれば、このような平板の伝熱問題における温度分布は、Gurney-Lurie 線図(球や円筒の解も整理されている)にまとめられている。この詳細は、熊谷らの食品工学入門 [1] に詳しく書かれているので、参照されたい。

以上、工学的な理論式やモデルに組み込まれた物性について3つの例を挙げて説明した。理論式やモデルに含まれる物性値を知ることによって、現象について定量的な予測が可能となる。要は、自分が知りたい現象において、関与する物性が何かを把握することが重要である。また、ここに挙げた例ほど具体的な数式で表現されていないまでも、物性の知識を「温度を上げれば粘度が低くなるので(注意：液体の粘度は温度上昇に伴って低下する)管内の液体は流れやすくなるだろう」などと「作業仮説」に用いることも可能である。

(2) 材料の内部の構造や“状態”と物性挙動

食品の物性挙動は複雑で、組成のみでなく構成成分の“空間配置”にも依存する [7]。著者らの恩師である矢野俊正先生は、

食品の物性は成分組成と内部の構造の反映である。とよく口にされていた。この言葉は非常に含蓄のあるもので、食品物性に関わっている研究者ならよく考えてみれば納得できるはずだが、化学系の人や企業の技術者などに理解されにくい。その大きな理由はこの「構造(structure)」という語句にある。ここでの構造とは、有機化学的な分子構造も多少は関係するが、高分子の絡み合い構造、微粒子の分散構造など様々あり、どのレベルの「構造」をとらえるかはケース・バイ・ケースなのである。研究者や技術者間でも「構造」という

語句を異なるレベルで使うと先の「物性」という語句と同様に意味が通じない。以下に、「構造」と物性の関係について例を挙げて説明する。

最初に(1)と同様に粘度について2つの例を挙げてみよう。コロイド分散系の粘度を記述する最も基本的な理論式が、剛体球分散系の粘度に関する以下のアインシュタインの粘度式である [8]。

$$\eta=\eta_0(1+2.5\phi)\quad(8)$$

ここで、 η [Pa s] はコロイド溶液の粘度、 η_0 は溶媒粘度、 ϕ は分散粒子の体積分率(=分散粒子の体積/コロイド溶液の体積)である。もし、 $\eta_s \equiv (\eta - \eta_0) / \eta_0$ で定義される比粘度 η_s を用いると(8)式は、

$$\eta_s=2.5\phi\quad(9)$$

となる。つまり、コロイド溶液の比粘度 η_s は分散粒子の体積分率 ϕ に比例する。体積分率 ϕ は分散粒子の濃度にもほぼ比例すると考えられるので、比粘度 η_s は濃度にも比例することになる。アインシュタインの粘度式は、粒子間の相互作用がないことが前提になっているので、希薄な溶液にのみ適用され、かつエマルションのように粒子間相互作用の大きい場合には合わない。しかし、高分子電解質溶液などでも、塩化ナトリウムなどの塩を加えると静電的な遮蔽効果によって、比粘度と高分子濃度が比例する(9)式のような挙動が観察される。このように、コロイド溶液の粘度がアインシュタインの粘度式型の挙動をとっているなら、分散粒子(あるいは高分子)が、相互作用が大きい状態で、ある体積分率(溶媒和した高分子ならその体積も含む)で分散している内部構造を“イメージ(あくまでモデルに基づくものだが)”できるのである。

次に高分子電解質(polyelectrolyte)溶液の絡み合い構造と粘度の関係について述べる [9]。Fig.4 に示すように、高分子電解質溶液は、濃度 C が低いときは希薄溶液(dilute solution)といわれ高分子鎖がバラバラで存在する。濃度 C が上昇して、 C^* (重なり合いの閾値濃度) 以上になると高分子鎖が重なり合った準希薄溶液(semi-dilute solution)と言われる状態になる。溶液粘度は、濃度が C^* 以下の希薄溶液では、比粘度 η_s が濃度 C に比例する以下のようなアインシュタインの式に類似した挙動をとる。

$$\eta_s \equiv \frac{\eta - \eta_0}{\eta_0} \propto C\quad(10)$$

しかし濃度が C^* を越えると溶液粘度は急激に増加し、 η_s は C に比例せず、以下のように相対粘度 $\eta_{rel} (\equiv \eta / \eta_s)$ が濃度 $C^{1/2}$ に比例するようになる。

$$\eta_{rel} \equiv \frac{\eta}{\eta_0} \propto C^{1/2}\quad(11)$$

このような高分子の希薄および準希薄溶液の粘度の濃

希薄 (Dilute) 溶液

準希薄 (Semi-dilute) 溶液

スケーリング則

$$\eta_s \equiv \frac{\eta - \eta_0}{\eta_0} \propto C$$

(希薄溶液)

$$\eta_{rel} \equiv \frac{\eta}{\eta_0} \propto C^{1/2}$$

(準希薄溶液)

C: 高分子電解質の濃度
 η : 溶液粘度
 η_{rel} : 相対粘度
 η_s : 溶媒粘度
 η_{sp} : 比粘度

Fig. 4 高分子電解質溶液の希薄溶液および準希薄溶液と粘度に関するスケーリング則

度依存性は、高分子物理学においてスケーリング則として知られている。以上のように、高分子溶液の粘度は高分子の分散構造もしくは絡み合い構造の反映である。逆に、粘度の濃度依存性を正確に測定すれば高分子の絡み合いの閾値濃度 C^* を求めることができる。

次に、伝熱問題を1つ考えてみよう。これは、どちらかという、物性挙動から何かを知るといより、「物性を理解するためには構造をとらえなければならない」例といえるかもしれない。今、熱伝導度が λ_1 , λ_2 の互いに反応しない2種類の固体が、それぞれ体積分率 X_1 , X_2 ($X_1 + X_2 = 1$) で存在する“二成分系”を考える。こうした二成分系の有効熱伝導度 λ_e (構造に依存するので、“平均”でなく“有効”という) は、個々の成分固体の熱伝導度 λ_1 , λ_2 と体積分率 X_1 , X_2 のみでは決まらず、系の構造に依存する。Fig. 5には二成分固体が直列構造と並列構造をとる場合の有効熱伝導度の式を示す。直列構造および並列構造をとるときの有効熱伝導度 λ_e はそれぞれ、

$$\lambda_e = \frac{1}{\frac{X_1}{\lambda_1} + \frac{X_2}{\lambda_2}} \quad (12)$$

$$\lambda_e = \lambda_1 X_1 + \lambda_2 X_2 \quad (13)$$

となる [7]。今、仮に λ_2 が非常に小さいとすると、直列構造の有効熱伝導度 λ_e は小さく、熱がほとんど流れないことがわかる ($\lambda_2 \rightarrow 0$ のときに $\lambda_e \rightarrow 0$)。並列構造の λ_e は明らかにそれより大きい。一般に、二成分系の有効熱伝導度は、直列構造の λ_e と並列構造の λ_e の中間の値をとる。矢野らは、タンパク質やデンプンを含

(a) 直列構造

(b) 並列構造

T_1, T_2 : 温度 [K]
 X_1, X_2 : 固体1および固体2の体積分率
 λ_e : 有効熱伝導度 [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]
 λ_1, λ_2 : 固体1および固体2の固有熱伝導度 [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]

Fig. 5 (a) 直列構造と (b) 並列構造をとる固体二成分系の有効熱伝導度

む食品に関して、成分がすべて直列に並んでいると仮定した「直列モデル」によって、デンプンやタンパク質（粒状なので熱伝導度の直接測定が困難）の固有熱伝導度を求め、均一な食品の有効熱伝導度の推定を可能にした。また、一方の連続相に固体が粒子状に分散している系に関しては、以下に示す Maxwell-Eucken の式がある。

$$\lambda_e = \frac{\lambda_c \{ \lambda_d + 2\lambda_c - 2\phi(\lambda_c - \lambda_d) \}}{\lambda_d + 2\lambda_c + \phi(\lambda_c - \lambda_d)} \quad (14)$$

ここで、添字 c は連続相、添字 d は分散相であることを示している。また、 ϕ は分散相の体積分率である。以上の詳細は文献 [7] にあるので参照されたい。要は、食品の有効熱伝導度の推定をする場合、個々の成分の固有熱伝導度と体積分率の他に、それらの空間配置を把握する必要がある。

以上のように、物性は内部の「構造」の反映なので、物性挙動を理解するには内部の「構造」をその状況に合ったレベルでとらえる必要があり、また逆に物性挙動を測定することで内部の「構造」を知ることができる。今回は、限られたページ数で物性と水に関して総論的に説明するために、例は簡単に書けるものを挙げた。そのため、特に最後の熱伝導の話などは、説明の例として不適切だったかもしれない。この他にも、タンパク質凝集体ゲルの弾性率は内部の凝集体のフラクタル（自己相似性の物体）構造を反映し [10, 11]、凍結乾燥における水蒸気透過係数（多孔体の水蒸気の透過し易さを表す物性値）は内部の水結晶の分布に大きく左右される [1]。このように、「構造」と言っても状況によ

てその“レベル”は全く異なることは再度、強調しておきたい。また、構造や状態と物性との関係としては、電気物性がよりわかりやすいと思うが、それについては説明にページ数が必要なので、次回以降に述べる予定である。

3.2.2 物性研究の方向性

上述のように、食品の研究者や技術者によって物性に対する認識はかなり異なっている。3.1.で述べた3つの物性のうち、1つくらいしか理解しない人もいるし、自分が興味をもつ物性以外には価値を見出さない人も多い。そうした食品物性の宿命のためか、これまでの食品分野研究者が物性を測定、あるいは物性挙動の研究をする場合の方向性は以下のようなものがあるように思える（個々の項目は完全に独立ではなく、重複することもある）。

(1) 工学的なモデルや理論中のパラメータとしての物性測定

工学的なモデルや理論を用いて製造装置の設計、製造プロセスの最適化を行う場合、物性値が必要なので、文献値がない（食品は組成が変動するので文献では参考程度の値しかわからないことが多い）ときには測定しなければならない。これは、食品化学プロセス工学的な立場である。

(2) 構造と物性との相関に関する研究

食品の物性は、組成が季節や産地によって変動するので、正確な値を知るにはその都度、測定する必要があるが、組成や内部構造（前述のようにいろいろの“レベル”がある）から物性の概略値を推定できるようにしようという立場。ここでの物性は、3.1.における“本来の”物性であり、こうした物性研究は最も学術的と言えるだろう。

(3) 物性が変化する要因の探求

物性変化する要因を考える立場。(2)と重複するが、この場合褐変のしやすさ、腐敗しやすさなど、“本来の”物性以外の「物性」も対象とする。後述するが、乾燥において、単分子吸着層の水まで除去すると、油脂の酸化速度が上昇することは水分活性（water activity）の理論でよく知られている。また、非晶質の試料がガラス状態、ラバー状態にあるかによって試料の物性や保存性が異なることなどは、この立場の研究の成果である。

(4) 内部構造や材料の構造や状態を知ろうとする研究

(2)とは逆に、物性挙動から材料の構造や状態を知ろうとする立場。品質管理やセンサーの研究などが代表的である。もちろん、これを行うためには(2)の研究の知見や現場での経験則が必要である。

(5) 品質の評価、比較のための数値としての物性測定

試料や製品を作った場合の品質を評価、比較するために物性値を記しておく立場。例えば、高分子溶液では、

その極限粘度が分子量の指標になり、ゲル化剤では一定濃度におけるゲルの強度などを数値化しておくことがある。この場合の物性も“真の”物性とは限らない。

(6) 物性との現象との相関を見る研究

例えば、おいしさに関する研究で、力学物性と官能評価との対応をみる研究などが挙げられる。ヒトの感覚器官の応答と物性値との関係を定量的に説明できる物理理論はない。しかし、研究者の興味は、官能的な評価をどう解釈するかということなので、指標として物性値を用いようとする。喉ごし感と粘度との関係、固体の堅さと飲み込みやすさとの関係など、前述の“本来の”物性以外のテクスチャも重要となる。近年、社会の高齢化によって問題となっている咀嚼・嚥下障害者用の介護食に関する物性研究もこの方向である。

以上の項目は、著者らが思いつくまま列挙したので、他にもあるかもしれない。こうした分類自体必ずしも妥当でないかもしれない。しかし、物性研究の討論会などを聴いていると、物性の認識の違いに加え対象とする素材や目的によって方向性が違っていて、議論が噛み合わないこともあるように思うので、今回、1つの見方を提示してみた。

4. 食品物性と水

水は幼少の頃から誰もが知っている物質で、小中学校の理科の教科書でもまっさきに取り扱われる。しかし、水は、内部の水素結合ネットワークの影響によって分子量の割には蒸発熱が大きく、密度が4℃で最大、固体（氷）の融点が圧力増加と共に低下する（そのため、アイススケートは滑る）など、通常物質に比べてむしろ異常な挙動を示す“変わり者”である。しかし、後述のように食品工業での操作には、乾燥や濃縮、粉体の溶解など、水を対象とする、あるいは水の物性値を用いて単位操作の操作条件を検討できることも多く、食品の製造は“水との戦い”ではないかとすら思えることがある。筆者らの経験でも食品の物性の研究をしていると、物性挙動が水の影響を強く受け（理論の不一致を含めて）、水が“主役”になっていることがよくあった。逆に、水に関する研究をしていると、とくに低含水率の領域では固体との相互作用が無視できないことが多くみられる。

今回は、水が物性に影響する例を2, 3挙げる。

最初にゾルーゲル転移と物性について考えてみよう。高分子を含む系で、水分含量の変化は高分子濃度の変化を意味する。高分子濃度が上昇（水分含量が低下）すると、Fig.4でも述べたように、希薄溶液から準希薄溶液へと移行する。そして粘度は急激に増大し、架橋点で高分子鎖が連結した高分子網目構造が系全体に形成されたものがゲルである（Fig.6）。ゾルーゲル転移点

(ゲル化点)においては、ゾルの粘度は発散し、ゲルの弾性率（厳密には測定周波数を0に外挿した値）が発現する。このように、含水率が高分子の分散構造に影響を与え、その結果、物性が大きく変化する [12]。

次に、食品水分収着等温線（水分活性 a_w を横軸、縦軸に水分活性をとったもの）について述べる。多くの食品の水分収着等温線は、Fig.7 に示すような逆S字型の形状をとる。領域Aの水は、図に示すように単分子吸着水として強く吸着されている。こうした強く結合した水は、 -80°C 程度でも凍らないと言われている。単分子吸着水は、微生物に利用できないのみでなく、酵素反応や褐変反応などの媒体にもなりにくい。よって、単分子吸着水レベルまで乾燥すれば、微生物による腐敗の他、食品の劣化反応の多くは抑制できる。しかし、それ以下となると食品が酸化反応を受けやすくなる。実際、粉乳などの粉状の食品には単分子吸着水レベルまで乾燥としているものがいくつか見られる。領域Bの水は固体と弱く結合しており、領域Cでは固体と水との相互作用がほとんどない。また、非酵素的褐変反応（アミノ・カルボニル反応）は水分活性が高い程、速く進む。ただ、水が多すぎると、反応物質が希釈されることによって反応速度は低下する [1, 13]。

近年、食品科学でガラス転移が着目されている。キャンディー、乾燥したパスタ、ビスケット、クッキーなどはガラスで、ガラスは温度が上昇すると、ガラス転移点 T_g とよばれる温度でラバーに変化する。ガラスと

ラバーでは物性や保存性が大きく変化する。ガラス転移において、水は最も重要な可塑剤 (plasticizer) であり、 T_g を下げる役割をする。ビスケットなどが、吸湿するとグニャッとなるが、あれは水の可塑化効果によって T_g が室温以下に低下してラバー化した結果である。このとき、保存性も低下する。これも、水が食品の「物性」（広義の物性）に影響を与える好例である [1]。

以上、例をいくつか挙げて簡単に説明したが、水はその量および存在状態の変化によって「物性」に大きな影響を与える。水分収着およびガラス転移に関しては、この連載の後半で詳しく述べる予定である。

5. ま と め

以上、食品工学における物性と水について筆者らの視点によって整理して概説してきた。本来、この程度のページ数で書ききれない内容ではなく、粘度や熱物性などの予備知識が全くない読者にはわかりにくかったかもしれないが、異分野の研究者や技術者によって物性についてのいくつかの異なる視点があることはご理解いただけたのではないと思う。すべての「物性」を認識されている方は別として、自分や同僚が普段使っている「物性」はいずれが多いか考えてみていただきたい。

次回以降は、本稿の内容を踏まえ、個別の物性について解説していく予定である。

Fig. 6 高分子濃度（水分含量）変化に伴うゾル-ゲル転移
(a) ゾルおよびゲル状態における高分子の分散構造
(b) ゾル-ゲル転移点近傍における弾性率 G と粘度 η の挙動

Fig. 7 典型的な食品の水分収着等温線

引用文献

要 旨

- [1] 熊谷仁, 熊谷日登美, 高田昌子; “食品工学入門—食品製造・保存の考え方”, アイ・ケイコーポレーション, 2005.
- [2] R. B. Bird, W. E. Stewart, E. N. Lightfoot; “Transport Phenomena”, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1960.
- [3] 熊谷仁, 熊谷日登美 著; 加藤保子, 中山勉編, “食品学 I—食品の化学・物性と機能性”, 4. 食品の物性, 南江堂, 2007, pp. 117-132.
- [4] 食品工学会編; “食品工学ハンドブック”, 朝倉書店, 2006, pp. 593-648.
- [5] 川端晶子; “食品物性学—レオロジーとテクスチャー”, 建帛社, 1989.
- [6] 林弘道; “粉乳製造工学”, 実業図書, 1979.
- [7] 矢野俊正; 矢野俊正, 桐栄良三 監修, 食品工学基礎講座, 第1巻食品工学の基礎, 光琳, 1992.
- [8] 中川鶴太郎; “レオロジー (第2版)”, 岩波全書, 1978.
- [9] S. Ikeda, H. Kumagai; Scaling Behavior of Physical Properties of Food Polysaccharide Solutions: Dielectric Properties and Viscosity of Sodium Alginate Aqueous Solutions, *J. Agric. Food Chem.*, **45**, 3452-3458 (1997).
- [10] T. Hagiwara, H. Kumagai, K. Nakamura; Fractal Analysis of Aggregates in Heat-Induced BSA Gels, *Food Hydrocolloids*, **12**, 29-36 (1998).
- [11] 熊谷仁; 牛血清アルブミンゲルのフラクタル解析, 日本バリオレオロジー学会誌, **13**, 1-8 (1999).
- [12] 熊谷仁; 食品のゾルーゲル転移点近傍における力学物性, *New Food Industry*, **38**, 19-26 (1996).
- [13] 野口駿; “食品と水の科学”, 幸書房, 1992.

「食品の物性そして水」というタイトルの解説記事の第1回目として, 食品工学における物性の位置づけ, 水の物性に与える影響について簡単な例を挙げつつ, 概説した.

物性とは本来, 「物質のサイズや形状には依存せず物質固有の性質を反映する物理量」のはずで, 食品工学で用いる物性の多くはこれである. しかし, 産官学を含む食品科学・工学の研究者や技術者が口にする「物性」には, 本来の物性の他に, 食感・テクスチャーなどや, 複数の物理現象が絡んでいる材料の特性などが含まれることがよくある. こうした物性は試料の形状・大きさや測定装置に依存するので, 試料間の相対的な比較にしか使えないものも多いが, 「現場の問題を解決する」という工学の立場として完全に否定することはできないと思われる.

また, 食品の物性は, 食品科学・工学の研究者や技術者によって, 異なるとらえられ方, 用いられ方をする. 工学的な理論やモデルに含まれるパラメータとしての物性値を知ろうとする食品化学プロセス工学的立場, 物性挙動から食品の内部構造 (様々な“レベル”がある) を把握しようとする物性論的立場, 物性値 (広義の物性を含む) を材料の評価に用いる立場など様々である.

水は, 食品中の多くの成分と相互作用をし, 「物性」に大きな影響を与える. ゼルーゲル転移やガラス転移において, 水の影響で物性が劇的に変化すること, 単分子吸着水のみの状態から自由水が存在する領域に至る間に食品の保存性が大きく変化することは好例である. 物性は, 水と他成分との相互作用を考慮したうえで理解する必要がある.