◇◇◇◇ 解説 (2003 年度日本食品工学会賞) ◇◇◇◇

デンプン食品中の水の移動を支配する要因

渡 辺 尚 彦

国立大学法人東京海洋大学海洋科学部海洋食品科学科

The Factor Which Governs Water Migration in Starchy Foods

Hisahiko WATANABE

*Department of Food Science and Technology, Tokyo University of Marine Science and Technology
National University Corporation, Konan 4, Minato, Tokyo 108-8477*

By the use of MRI, we clearly showed that starchy food has a complicated water content profile during cooking, a profile which is hard to be described by Fickian diffusion equation. In the search for the missing factor which governs the behavior of water absorption characteristic of starch, we come to the conclusion as follows: (1) There exists some confusion in the discussions of the published papers in terms of the usage of the word “gelatinization”. (2) The gelatinization reaction of starch should be understood in terms of “terminal extent of gelatinization”. (3) The information on the terminal extent of gelatinization as a function of temperature and water content at heat-treatment is of most importance. (4) The factor which governs the water migration in starchy food is “ceiling water content” which is the potential maximum of water holding capacity that a starchy food has. Fickian diffusion equation is applicable on a system that is homogeneous in terms of ceiling water content. We proposed Water Demand Model which has a potential to be applicable on a system that is inhomogeneous in terms of ceiling water content.

Key words: starch, water, diffusion, gelatinization, cooking, non-Fickian, MRI, ceiling water content, terminal extent of gelatinization, water demand

1. はじめに

魚や肉のように生でも食べられるものを加熱して食べる場合もありますが、デンプン食品の場合は、ヒトは生のデンプンを消化できませんので水と熱を加えてデンプンを糊化させて消化できる形にしないとけません。この過程がデンプン食品の加熱加工・調理の第一義です。加熱加工・調理はデンプンを消化できるようにするだけでなく食品をおいしくする過程でもあります。とくに米飯や麺の場合はおいしさが食感（テクスチャ）に大きく依存していますからおいしさと調理法が密接に結びつきます。この重要な過程に取り扱いの難しいものを含んでいます。科学的に未解明であり、そのためか炊飯や麺の取り扱いには名人技がまだいろいろあります[註1]。

取り扱いが難しいと申しましたが、デンプン食品をあまり知らない人は難しいとは思っておりません。「ご飯なんて誰でも上手に炊けるよ。何が難しいものか。」と

いう訳です。

実は私もそう思っていた一人です。デンプン食品中の水の移動の難しさが分かる前は、デンプン食品中の水分移動も分子拡散係数が分からないのであり、それが分かればそれなりにシミュレーションができるようになるだろうと思っておりました。

2. 拡散係数

食品工学では熱や物質（水）の移動を取り扱います。基本的な法則に基づいて温度分布や濃度分布を計算しようとするとう物性値が必要になります。このとき熱に関する物性値はハンドブックでどうにか見つかるのですが水分分布を計算するのに必要な拡散係数や分配係数になると何も見つからないので途方にくれると言う経験をされた方が多いのではないのでしょうか。拡散係数に関する情報が少ないのは、拡散係数の測定が難しいことと、たとえ測定しても試料の状態（拡散する媒体の構造）に依存するので一般性をもった値として発表しにくいという事情があります。

食品中の水の拡散係数の実測例として報告されるものは乾燥実験における重量変化から得られるものが多いです。この場合、水分分布と重量変化を結び付けている数学モデルの適不適が問題になるとともに、拡散係数の含水率依存性が求め難く、できた場合も試料表面と内部との含水率の差異を考慮することはできません。

磁場勾配 NMR 法による拡散係数測定はこれらの問題をクリアする便利な測定法です。我々は磁場勾配 NMR 法によりデンプン・水系における水の拡散係数を系統的に測定しました。デンプンは糊化しないと水を保持する能力に限界があり (33 %程度)、糊化するとさらに水を吸えるようになります。糊化すると同じ含水率では拡散係数が低下しますが、含水率が高くなると拡散係数は上昇します。そうなると糊化度の程度によって拡散係数の温度、含水率依存性が変化することになり複雑になります。そこで、未糊化の場合と十分糊化した場合との2つの場合に分けてデンプン・水系の拡散係数の温度、含水率依存性を定式化しました[1a, 1b]。[註2, 3]

$$D_{non} = D_{free} 0.127 (w - 0.33) \exp (778/T)$$

$$D_{full} = D_{free} (1.31w - 0.486)$$

$$D_{free} = 0.0232 \exp (-2070/T)$$

T; 温度[K], w; 含水率 [g water/g sample]

3. MRI (磁気共鳴画像法)

最近は大きな病院には MRI という検査装置がありますが、これはヒトの全身を磁石の中心にある穴 (ボア) に挿入して測定するものです。このボア径を小さくして照射する電磁波強度を大きくしたものが NMR Microscope として 1980 年代に市販されました。NMR で画像を取るにはシグナルの元であるプロトンの位置情報を知る必要があります。磁場勾配をかけることにより位置情報を周波数情報に変換 (encode) できると言うのが MRI の基礎原理ですが、拡散係数を測定するのも位置情報と同じ手法で検出するので、磁場勾配 NMR と MRI とは共通部分が多いのです[註4]。

MRI によって画像を撮ってみると、魚肉はきれいな画像が撮れ、大豆[15]だと水を吸っていく様子がよく撮れましたが、生のスパゲッティですと水をたっぷり吸わせたものの画像すら全く撮れないことがわかり驚きました。それでデンプン食品の画像をとるのは諦めていたのですが、デンプンは加熱すると画像が取れることが後で分かってきました。未糊化デンプンの NMR 緩和時間がとても短くて、我々の使う装置の標準のデータ採取プログラムでは画像にならないのが原因で、デンプンを加熱すると緩和時間が延びて測定できるようになるのです。

加熱すればなんとか測れそうだとわかった頃に「NMR 装置の中で米を炊いてリアルタイムで炊飯途中の含水率分布を測定したい」という強い希望が寄せられ (竹内繁

Fig. 1 Water content profile plotted against the distance from the center in a rice grain during cooking. The profile was obtained through real time observation via MRI T_2 measurement.

樹: 当時三菱電機 (株) 中央研究所), 共同研究することになりました。いろいろ苦労はありましたが、プローブヘッドに組み込んだセラミックヒータで加熱した窒素ガスを米と水の入ったガラスの試験管に吹き付けて加熱する方式で炊飯し、米1粒をy軸およびz軸について仮想的にスライスした角柱状の試料についてのx軸1次元画像をエコータイムを変えて測定し、x軸の各位置での緩和時間を測定することで、炊飯途中の米1粒中の水分分布を測定する研究ができました[4, 5]。

測って見ますと、Fickの拡散方程式からは考えられない凄く不思議な水分分布 (Fig.1) をすることが分かりました。水分分布の形はCase II diffusion[6, 7]と呼ばれるものに似ているように見えました。同じ頃、英国 Cambridge 大の Fryer・Stapley らは小麦1粒の内部の水分分布がボイル途中でどう変化するかをMRIで測定する研究[8]をしており、やはりCase IIだということを言っています。しかし、私たちの研究も彼らの研究も「無理やりやっとならぬ」という状態でした。これは穀物の粒が複雑な形をしていることとサイズが小さいということが原因でした。これでは、水分分布が異常らしいということは確かでも、正確にどのようにおかしいかを主張し難く、正確な測定無しでは先に進めないと思いました。

そこで、起きている現象をしっかりと把握するためには本物の食品にこだわるのではなく、測定に有利なモデル食品を使用しようと考え、小麦粉ドウを平板状にしたものを熱水で煮るときにドウ内部の水分分布がどう変わるかをMRIで測定しました[9]。MRI画像から換算した水分分布をFig. 2に示します。

ボイルを60分間続けた後の水分分布はこの太い線で示したように3つのフラットな部分をもつ不思議な形をしていました。この分布は水の拡散係数の濃度依存性を考慮したところでも従来Fickの拡散方程式では記述できない。デンプン食品中の水の移動に関しては何か重要な要因が分かっているのではないのか? それを探そうということになりました。

Fig. 2 Water content profile plotted against the distance from the center in a slab of wheat flour dough during cooking.

4. デンプン食品中の水分移動を支配する因子

そこで我々もデンプンの研究を始めました。国内外の諸先輩が永年研究されている分野へすぐ遅れての参入でしたが、幸い、目指すものがはっきりしていたため従来と異なる視点をもって研究できたことおよび MRI という道具のおかげで、従来見過ごされていたものの中に重要因子を見つけることができました[10a]。その結果は次の4つに纏めることができます。

A) 糊化という用語に混乱あり：水の移動はデンプンの糊化が決定的に大きな役割を果たすのですが、まず、糊化という言葉そのものが問題です。糊化に関する研究はそれまでに数多くなされていました。しかし用語の混乱があって、研究結果の discussion に色々と誤りがありそうだということがわかりました[2]。吸水に関して重要なのは糊化と呼ばれる一連の event (事象) の中の初期の event のみであり、中期以降の event であるレオロジカルな糊化現象と区別して考える必要があります。

B) 終末糊化度：終末糊化度という概念を導入しました。Fig. 3 で縦軸は糊化度、横軸は加熱処理時間を表しますが、糊化はどの温度でも 1 分以内に終了するのですが、糊化度は必ずしも 100 % に達せず、ある一定の糊化度で止まる。これを終末糊化度と呼びます。つまり、糊化は速くて遅いのであって、平均化した糊化速度を用いた (糊化) 反応モデルは終末糊化度が小さい状況では意味をなさなくなります。

C) 水が無いと糊化しない：Fig. 4 は、終末糊化度がデンプン食品を熱処理するときの含水率と温度に依存する様子を示したものです[10b]。縦軸は終末糊化度、横軸は熱処理温度です。パラメータは熱処理するときの含水率です。この太い線の部分は十分に水がある条件で

Fig. 3 Progress of the extent of gelatinization as observed via birefringence in starch granule/water systems during heat-treatment. Each of the system reaches a terminal extent of gelatinization that is governed by temperature (in excess water condition).

Fig. 4 Terminal extent of gelatinization (TEG) plotted as a function of temperature and water content (wet basis) at its heat-treatment.

の熱処理を意味しますが、従来の糊化の研究はほとんどがこの太線部分、excess water の条件での研究で、水が少ない条件の研究が少なくて困りました。

D) 天井含水率：デンプン食品のもつ水保持能力を天井含水率 (m_{clg}) と名付け、天井含水率が水の移動を支配していると考えました。 m_{clg} はデンプンの (終末) 糊化度の関数です。

5. Water Demand Model

デンプン食品中の水分移動を支配するのは天井含水率であると考えました。食品中の天井含水率 (終末糊化度の関数) が均一であればその食品は均一相と考えてよく Fick の拡散方程式は適用可能です。しかし、食品中で天井含水率が違っている (分布している) 場合は異相系 (多重異相系) であり Fick の拡散方程式は適用できま

せん、異相系としての取り扱い方として Water Demand (WD) モデルを提唱しました[11].

$$WD = m_{clg}(x) - m(x)$$

まず、天井含水率と実際の含水率の差を Water Demand と定義します。通常、水の移動の速さは含水率の勾配に比例すると考える (Fick の法則) のですが、これに代わって水の移動の速さは WD の勾配に比例すると仮定しました。

$$j = D\rho_{solid} \frac{\partial WD}{\partial x}$$

この方程式を使うと色々変わった水分分布の変化を表現できます。例えば、Fig. 5 で、縦軸が含水率、横軸が場所ですが、左端が中心で右端がボイルしている表面側です。表面の含水率が高くて、その高い部分が内部に進行していく。ここに含水率一定の部分ができる。内部では含水率が急に落ちるところがあって中心は未糊化である。この糊化した部分のフロントが進行するタイプの水

(a)

(b)

(c)

Fig. 5 Water content profile in a slab of wheat flour dough calculated by Water Demand Model. The slab is supposed to be boiled at 100°C. The profiles a, b, c correspond to the use of Water Demand curves WD-A, WD-B, WD-C in Fig. 6, respectively.

分分布は WD として Fig. 6 の WD-A 形のものを選ぶと計算で表現できます。

これに対して、Fick の法則に近い含水率分布を表現するには、直線型の WD (Fig. 6, WD-8) を選ばいいのです。WD モデルはそこに Fick の拡散方程式を内蔵しているので、Fick の拡散方程式の拡張版とみな

Fig. 6 Three typical shape of Water Demand curves as a function of water content at its heat-treatment. The temperature of heat-treatment is supposed to be constant.

(a)

(b)

Fig. 7 Applying the curve Fig. 7a as a water demand results in the complicated water content profile (Fig. 7b) in a flour dough slab during boiling at 100°C, when the water content is calculated using Water Demand Model.

せませす。さらに、WD として Fig. 7 (a) のような 2 段構造のものを使うと Fig. 2 に示したフラットな部分が 3 つある不思議な水分分布 (Fig. 7 (b)) も表現できることが分かりました[11]。

6. 小麦粉ドウ中の水の含水率勾配に逆行する移動[註 5]

Water Demand モデル がデンプン食品中での特色ある水分分布を記述できる可能性を有するものであることを示しましたが、Water Demand モデルは考え方が易しいモデルなので新たな発想によって実験の設計しようとするうえでも有用です。我々は、デンプン食品中で水を水分勾配に逆らって水の少ない方から多いほうへ移動させる実験が可能であることを思いつきました[12a]。

小麦粉のドウを作ってベークライトの枠に押し込んで平板状にします。これを熱に強いプラスチックフィルムで包んでシールし、水分が逃げないようにします。この平板の右側の面を氷水で 0℃ に冷やし同時に左側の面を 95℃ 加熱します。すると、数分で定常状態になり直線の温度分布になります。小麦デンプンの糊化温度は 55℃ 前後なので右側半分は糊化が起きず未糊化のままですが、左半分は 55℃ より高温になり糊化が進みます。

糊化の程度は温度に依存し左に行くほど終末糊化度は高くなるでしょう。この熱処理を温度勾配熱処理と呼びます。10 分程度の熱処理後に、試料全体を室温に下げて乾燥を防ぎながら放置しておきます。すると最初均一だった平板内の水はどう動くでしょうか？

どんなことが起きるのか簡単なモデルで考えて見ます。未糊化の 2 つのドウ平板 A と B があるとします (Fig. 8)。 m_{clg} は天井含水率です。 m は実際の含水率です。ここで、A だけ例えば 100℃ に加熱します。すると、糊化が進んで A の天井含水率が上昇します。A を氷水で冷やして室温に戻した後で、A と B とを接触させます。水は動くでしょうか？

WD model では水は WD の小さい右から大きい左へ水が動くと思えます。温度勾配熱処理した小麦ドウ内部では Fig. 9 のように天井含水率が左が高くなってい

Fig. 8 What may happen when a couple of flour dough layers is made in contact after one of which is heat-treated to raise its ceiling water content.

Ceiling water content

Position

Fig. 9 Expected arrangement of ceiling water content in a wheat flour dough slab which is temperature-gradient heat treated.

Before

1 day after

3 days after

Fig. 10 MRI intensity profile against the position in a wheat flour dough slab, before and after the temperature-gradient heat treatment.

るので、水は右から左へ動くでしょう。

Fig. 10 は実験結果です。温度勾配熱処理した小麦粉ドウ平板の厚さ方向についての MRI のシグナル強度を縦軸に、横軸は小麦粉ドウ平板の加熱表面からの距離を示します。左側が加熱した面、右側が氷水で冷やした面です。加熱処理前は A の通り大体フラットですが、1 日後には B のような分布になり、明らかに水が右から左に動いています。3 日たつと、さらに水は左に動きます。これは水が含水率の勾配に逆らって動いていることを示します[12b]。

MRI シグナル分布は緩和時間の影響を受けて水分分布が誇張されて差が大きくなりますが、水の移動方向ははっきり見られます。MRI シグナルを緩和時間の影響を考慮してキャリブレーションして含水率分布（省略）が得られます。

7. 多重異相系での分配平衡モデル[註 5]

次にこのような水分分布の変化をシミュレーションすることを考えましょう。話を簡単にするために 2 つの小麦粉ドウ平板で考えます (Fig. 8)。左のドウが加熱されて天井含水率が上昇すると水が右から左に動くだろうことは先に示しました。では、水分移動はどこで停止するのでしょうか？

WD モデルでは WD が等しくなるところで止まると考えます。しかし、この考え方は 2 つの平板中の含水率が小さいときには明らかに矛盾をきたすことがわかります。そこで、いったん WD モデルから離れて別の考えをとります。

通常、熱力学で物質の濃度平衡を扱うときは A, B 2 つの相でのケミカルポテンシャルが等しくなったところで停止すると考えます。

$$\mu_A = \mu_A^0 + RT \ln m_A = \mu_B = \mu_B^0 + RT \ln m_B$$

$$K = m_A/m_B = \exp [\{ \mu_B^0 - \mu_A^0 \} / RT]$$

このときの A, B 両相での含水率の比、つまり分配係数 K は温度の関数になりますが、含水率 m には無関係なことがわかります。そこで、分配係数を天井含水率の比で決めてよいことがわかります。

さて、天井含水率の異なる A, B 2 つの相が接触したときの水分分布の経時変化を計算する仕方ですが、2 相の界面では瞬間的に分配平衡が成立すると考え、他方、各々の相の内部では Fick の拡散方程式に従って水が移動すると考えます (Fig. 11)。

この考え方によって計算するために、まず小麦粉ドウの天井含水率を測定しました[16]。そして、温度勾配熱処理をした小麦粉ドウの平板内部を厚さ方向に 10 枚の仮想的な薄い層に分割したと考えたときの各境界面での天井含水率の比を計算し分配係数としました。この分配係数を用いてシミュレーションした結果が、Fig. 12 の通りです。水の拡散係数としては $1.0 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ を用

Fig.11 At the boundary between the two layers made in contact, instantaneous equilibrium in water content is assumed. Inside the layer, Fickian diffusion rules.

いました。2 時間後にドウ平板の中央部に隆起するところと陥没するところが波のように現れ、24 時間後にはしっかり右から左へと水が移動した分布になります。

3 日後の水分分布をこのシミュレーションによる計算結果と実験結果とを重ねて書く (Fig. 13) とよく一致していることが分かります[13]。これらの結果から、糊化度が増加する系における水分移動は天井含水率に基づく分配係数を導入した多重異相系モデルで説明できることが分かります。

Fig.12 Simulated water content profile across the slab 2hr, 24hr and 3days after heat-treatment. The dash line shows the initial water content.

Fig. 13 Water content profile comparison between measured and calculated for the dough slab 3 days after the gradient-temperature heat treatment.

8. 実用的な開発研究への展開

以上、学術面において、デンプン食品中の水分移動の不思議の解明に些かなりとも貢献できたのではないかと考えておりますが、これを産業界への貢献とするには Water Demand モデルをもとに発明をして特許をとらなくてはなりません。幸い、麺や米の中心部だけを糊化して表面部分は未糊化のままに保つことによる、高品質

Fig. 14 Polarizing microscope images of cross section of udon. Non-treated dry udon (A) is bright (meaning un-gelatinized) all over the region, while the processed udon (B) is bright only at the periphery and dark (partly gelatinized) in the core. The calculated TEG is also compared with the cross-section picture of the udon.

早茹で麺[17]あるいは高品質早炊き米の製造につながる発明をすることができ (Fig. 14)、科学技術振興事業団 (JST) から特許出願[18]しました。

さらに炊飯時に必ず生じるクラックが米粒内の水分移動に大きな役割を演じていること[19]は明白でして、実用上は重要なポイントです。クラックや割れ米の効果まで取り込んだ実用モデルを考える段階にやっとたどり着いたところと言えます。

注 釈

注 1) 本稿は「デンプン食品中の水の移動を支配する要因」と題していますが、水分移動がとくに重要問題になるのは、デンプン食品素材を加熱加工・調理する際に水と熱の両方を同時に加える必要がある場合、具体的には米を炊くあるいは麺を茹でるという場合に限られるかもしれません。

デンプン食品は人類の主要食品であり長い歴史に培われた多彩な食文化の主役を担ってきました。デンプン食品は穀類 (コメ、ムギ、トウモロコシ) とイモ類でありこれをそのまま食する場合と粉にして食する場合に分けられますが、加工・調理の技術から見ると食品 (物体) の外からの水の移動を必要とするか否かで大きく異なります。小麦・米・トウモロコシの粉に水を加えてそれを焼く場合は加える水が少ない場合 (パン・クッキー・クラッカー・せんべい) も多い場合 (パンケーキ・お好み焼き類) も、水はデンプンのすぐ近くに配置されているので加熱だけが問題になります。また、イモ類 (生) は糊化に必要な水を含んでいますので焼く場合も煮る場合も加熱による糊化だけが問題で水分移動は問題にならないのです。これに対して米や麦の穀粒を煮る (蒸す) 場合や粉食であっても麺を茹でるあるいは食品 (物体) の外部から内部へ水を移動させないと十分に糊化が進行しない、この過程が実は大変難しいものを含んでいるのです。

注 2) 後に、この磁場勾配 NMR によるデンプン・水系での水の拡散係数の含水率依存性を利用して終末糊化度を測定しました[2]。また、普通はデンプン・水系をマクロに捉えて「含水率」を一つ当て嵌めています。デンプンは糊化しやすい顆粒と糊化しにくい顆粒との混合物であって糊化しやすい顆粒が先に糊化すると未糊化にとどまっている顆粒の周りから水を奪い取るために局所的に含水率に差異が生じます。そこで、磁場勾配 NMR 法で得られる実験結果の曲線を 2 本の線に分解して、局所的に糊化した部分と未糊化の部分とに別の拡散係数を割り当て、局所含水率をある程度まで推定できることを示しました[3]。

注 3) 磁場勾配 NMR 法で得られる水の分子拡散係数が水分分布の変化から得られる拡散係数よりずっと大きな値になることがしばしばあります。それぞれの方法に原

因がありそうですが未解明のまま残されています。

註 4) 私は大学院の学生のときに磁場勾配 NMR で拡散係数を測定した論文を読んでとても興味をもちました。そのころは日本に磁場勾配 NMR は 1 台もないといわれ、将来自分で使えるようになるとは思っていませんでしたが、論文が読めるようにと Farrar & Becker の教科書[14]で磁場勾配 NMR の勉強だけはしておきました。ところが、幸運なことに、就職した東京水産大学で NMR を新たに購入する機会に恵まれ、磁場勾配を 3 方向に架け画像を取る装置が使えるようになりました。西ドイツの Bruker 社が開発したばかりの取扱説明書も無い最新のものでした。拡散係数を測定するプログラムは付いておらず自分で開発しなくてはなりませんでしたが、

註 5) 6 節および 7 節については引用文献に示した発表より後に得られた実験結果に基づいて記述しました。現在、投稿中のため詳細な根拠はお示しできません。

謝 辞

名誉ある日本食品工学会賞の受賞者に選考いただきました幸運に恵まれ深く感謝いたします。授賞のみならず、本研究を遂行できたこと自体が、多くの幸運にタイミングよく出会えた結果であり、東京水産大学食品生産学科食品プロセス工学研究室をはじめ関係の皆様のご支援ご協力に深く感謝いたします。

引 用 文 献

- 1a) Gomi, Y., Fukuoka, M., Takeuchi, S., Mihori, T., Watanabe, H.: Effect of temperature and moisture content on water diffusion coefficients in rice starch/water mixtures. *Food Science & Technology International*, **2**, 171-173 (1996).
- 1b) 福岡美香, 渡辺尚彦: 小麦デンプン・水系および小麦粉・水系における水の拡散係数, *日本食品工学会誌*, **2** (1), 23-26 (2001).
- 2) Gomi, Y., Fukuoka, M., Mihori, T., Watanabe, H.: The rate of starch gelatinization as observed by PFG-NMR measurement of water diffusivity in rice starch/water mixtures. *Journal of Food Engineering*, **36**, 359-369 (1998).
- 3) Watanabe, H., Fukuoka, M.: PFG-NMR applied to measure the difference in local moisture content between gelatinized and non-gelatinized region in a heated starch/water system. In "Starch, Advances in structure and function" (eds. Barsby, Donald, Frazier), pp.53-58, The Royal Society of Chemistry, UK. (2001).
- 4) Takeuchi, S., Fukuoka, M., Gomi, Y., Maeda, M., Watanabe, H.: An application of magnetic resonance imaging to the real time measurement of the change of moisture profile in a rice grain during boiling. *Journal of Food Engineering*, **33**, 181-192 (1997).
- 5) Takeuchi, S., Maeda, M., Gomi, Y., Fukuoka, M., Watanabe, H.: The change of moisture distribution in a rice grain during boiling as observed by NMR imaging. *Journal of Food Engineering*, **33**, 281-297 (1997).
- 6) Thomas, N.L., Windel, A.H.: A theory of case II diffusion, *Polymer*, **23**, 529-542, (1982).
- 7) Wu, J. C., Peppas, N. A.: Modeling of penetrant diffusion in glassy polymers with an integral sorption Deborah number, *Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics*, **31**, 1503-1518 (1993).
- 8) Stapley, A.G.F., Hyde, T. M., Gladden L. F., Fryer, P.J.: NMR imaging of the wheat grain cooking process, *Int. J. Food Sci. Tech*, **32**, 355-375 (1997).
- 9) Fukuoka, M., Mihori, T., Watanabe, H.: MRI observation and mathematical model simulation of water migration in wheat flour dough during boiling. *Journal of Food Science*, **65**, 1343-1348 (2000).
- 10a) 福岡美香, 渡辺尚彦: デンプン食品中の水分移動とその支配要因, *日本食品工学会第2回年次大会講演要旨集*, p. 115, 東京 (2001).
- 10b) Fukuoka, M., Ohta, K., Watanabe, H.: Determination of the terminal extent of starch gelatinization in a limited water system by DSC., *Journal of Food Engineering*, **53** (1): 39-42 (2002).
- 11) Watanabe, H., Fukuoka, M., Tomiya, A., Mihori, T.: A non-Fickian diffusion model for water migration in starchy food during cooking. *Journal of Food Engineering*, **49**, 1-6 (2001).
- 12a) 八幡淑子, 福岡美香, 渡辺尚彦: デンプン食品の調理(加熱)過程における水分移動に関する研究. *日本食品工学会第1回年次大会講演要旨集*, p.104, 東京 (2000).
- 12b) 八幡淑子, 福岡美香, 渡辺尚彦: デンプン食品中に起きるアゲンストな水分移動の解明. *日本食品工学会第2回年次大会講演要旨集*, p.116, 滋賀 (2001).
- 13) 八幡淑子・福岡美香・崎山高明・三堀友雄・渡辺尚彦: 天井含水率を用いた Water Demand Model によるデンプン食品中の水分移動の記述, *日本食品工学会5回年次大会講演要旨集*, p. 132, 東京, (2004).
- 14) Farrar, T.C., Becker, E.D.: Pulse and Fourier Transform NMR, Academic Press (1971).
- 15) Fukuoka, M., Watanabe, H., Mihori, T., Shimada, S.: Moisture diffusion in a dry soybean seed measured using pulsed-field-gradient NMR *Journal of Food Engineering*, **23**, 533-541 (1994).
- 16) 八幡淑子, 福岡美香, 渡辺尚彦: デンプン食品中の水分移動を支配する天井含水率の測定. *日本食品工学会第3回年次大会講演要旨集*, p.119, 東京, (2002).

- 17) Thammathongchat, S., Fukuoka, M., Watanabe, H.: An innovative noodle: gelatinized at the core, leaving the surface un-gelatinized, *Journal of Food Engineering*, submitted (2004).
- 18) 渡辺尚彦, 福岡美香: 機能性を付与したデンプン食品およびその製造方法, 特願 2003-332412, (2003).
- 19) 篠田千冬, 福岡美香, 渡辺尚彦: 米飯粒内の糊化進行過程の可視化, *日本調理学会誌*, **34** (4), 396-398 (2001).

要 旨

デンプン食品を加熱加工・調理する過程で水分分布が Fick の拡散方程式では記述し難い複雑な挙動を示すことを磁気共鳴画像法により明確に示した。この原因を解

明するためにデンプン食品の吸水特性を支配する因子について新しい視点から研究し次の結論を得た: (1) 糊化という用語の使われ方による混乱がある (2) 糊化反応を終末糊化度の視点で捉えるべき (3) 終末糊化度の含水率・温度依存性の把握が大切 (4) デンプン食品中の水分移動を支配するのは天井含水率 (デンプン食品の水保持能力) である。天井含水率 (終末糊化度の関数) が均一であれば均一相であり Fick の拡散方程式は適用可能である。しかし、食品中で天井含水率が分布している場合は多重異相系であり Fick の拡散方程式は適用できない。多重異相系に適用可能なモデルとして Water Demand (WD) モデルを提唱した。さらに WD モデルを発想の道具として使い麺・米に新規な特性をもたせる方法を発明した。