パスタ内での水の移動機構

小川剛伸, 安達修二

京都大学大学院農学研究科

はじめに

スパゲッティなどのパスタは、常温で流通や保存できるように、乾燥したものが多く、これらの乾燥パスタは食べる前に茹でるが、中心にわずかに芯が残り歯応えを感じる状態が最も美味しいと言われる。そのような状態はアルデンテと呼ばれる。乾燥スパゲッティには、いろいろな太さのものがある。それらをアルデンテの状態に茹でるのに要する時間はいくらか。またそのとき、それぞれの太さのスパゲッティの中で、水はどのように分布し、それが食感とどのように関係するか。これらの疑問に的確に答えるには、乾燥食品中での水の移動機構を知ることが必要である。小麦粉（デュラムセモリナ）と水のみからなるパスタは組成が単純であり、このような研究を行う材料としては好適である。そのような観点から、まずパスタの吸水速度過程を測定し、それを経験式ではあるが、数式で表した。次に、パスタを茹でると色が薄くなる現象に着目して、スパゲッティ内の水分分布を精度よく測定する安価な方法を開発した。その方法により得られた極めて特異な水分分布について考察した。

さらに、パスタを茹でる過程で起こるデンプンの糊化温度を簡単に推測する方法を工夫した。また、乾燥パスタのように含水率が低いところでの水の体積的な挙動を測定したところ、興味深い知見が得られた。これらについて、その概要を紹介する。

吸水過程を記述する速度式

直径が1.6 mmの乾燥スパゲッティを種々の温度で茹でたときの含水率の変化を図1に示す⁽¹⁾。吸水したスパゲッティの重量 m_w と、それを十分に乾燥したときの重量 m_d から求められる含水率には二つの定義がある。一つは $(m_w - m_d)/m_w$ で与えられる湿量基準含水率 w で

図1 ■茹で温度がスパゲッティの吸水挙動に及ぼす影響
40℃ (○), 50℃ (△), 60℃ (□), 70℃ (◇), 80℃ (◁), および 90℃ (▷)。

あり、もう一つは $(m_w - m_d)/m_d$ で定義される乾量基準含水率 X である。食品工学の分野では、前者は水分と言われることが多く、0から1までの値で1を超えることはない。一方、単に含水率といえば後者を指し、図1のように、1を超えることも珍しくない。吸水が進んでも乾燥材料（スパゲッティ）の重量、すなわち含水率を定義する分母、は変化しないので、工学的な計算には乾量基準含水率 X を用いるのが一般的である。一方、日常生活では湿量基準含水率 w を含水率または水分と呼ぶことが多いので注意を要する。

図1の横軸は、吸水時間をスパゲッティの初期直径の2乗で除した値で表した。後述するように、吸水は単純な現象ではないが、その過程で水の拡散が関与することは間違いない。そこで、このように直径の2乗で規格化した時間を用いると、種々の太さのスパゲッティの吸水過程は、その太さにかかわらず1本の曲線で表現できる。

図1に示すスパゲッティの吸水過程は、温度にかかわらず次式の双曲線型の経験式で表現できる⁽¹⁾。

$$X = \frac{a(t/d^2)}{b + (t/d^2)} + X_0 \quad (1)$$

ここで、 t は吸水時間、 d はスパゲッティの初期直径、 X_0 は初期含水率であり、 a と b は温度に依存するパラメータである。図1の実線は、実測値に最も適合するように決定した a と b による計算線である。40℃と50℃では含水率は低いが、60℃では含水率が著しく大きくなり、それ以上の温度では温度に依存してさらに含水率が大きくなった。

式(1)より初期吸水速度 $X_{t/d^2 \rightarrow 0}$ および最大（平衡）含水率 $X_{\max}$ はそれぞれ式(2)と式(3)で与えられる。

$$X_{t/d^2 \rightarrow 0} = a/b \quad (2)$$

$$X_{\max} = a + X_0 \quad (3)$$

パラメータ a の値は初期含水率 X_0 に比べて十分大きいので、式(3)は $X_{\max} \approx a$ と近似できる。

初期吸水速度 a/b と最大含水率と近似できるパラメータ a の温度依存性を図2に示す⁽¹⁾。初期吸水速度はアレニウス型の温度依存性を示し、活性化エネルギーは30.5 kJ/molであった。一方、パラメータ a は50℃前後を境として低温側と高温側で異なる温度依存性を示し、それぞれの温度域における直線の傾きから求められる吸水エンタルピーは1.44と25.1 kJ/molであった。パラメータ a の温度依存性が変化した50℃付近はデュラムセ

図2 ■ 初期吸水速度 (○) と最大 (平衡) 含水率 (□) の温度依存性

図3 ■ 表面粗さ R_a が初期吸水量 (○) と最大 (平衡) 含水率 (□) に及ぼす影響

内図：テフロン製のダイスで作製したスパゲッティの表面の3次元画像。

モリナに含まれるデンプンの糊化温度に相当し、糊化温度より高温では温度に依存して最大含水率が著しく増大した。

スパゲッティの表面は滑らかに見えるが、拡大すると、図3の内図のように凹凸がある。その程度はデュラムセモリナと水のドウを押し出して成型するときのダイスの素材によって大きく異なる。伝統的な製法では真鍮製のダイスが使われ、表面は粗い。一方、今日の工業的な生産ではテフロン製のダイスが使われることが多く、表面は滑らかである。種々の材質のダイスを用いて調製

したスパゲッティについて、スパゲッティを円柱と近似して算出した単位表面積あたりの初期吸水量を測定すると、図3に示すように、表面が粗いほど大きいですが、最大（平衡）含水率は表面の粗さに依存しない^(2,3)。また、表面の凹凸を考慮した真の表面積を基準とすると、単位面積あたりの初期吸水量は表面の粗さに依存しない⁽³⁾。

1本のパスタ内の水分分布を測る

スパゲッティなどのパスタ内での水の移動機構を知るには、茹でる過程で1本のパスタ内の水分分布がどのように変化するかを知ることが大切である。水の分布を測定する方法としては、核磁気共鳴画像法（MRI）⁽⁴⁾や中性子ラジオグラフィー⁽⁵⁾が知られているが、いずれも高価な機器であり、誰でもが簡単に使用できるわけではない。また、原理的に含水率の低い領域は測定できない。

そこで、パスタを茹でると色が薄くなる現象に着目し、茹でたパスタを鋭利な刃で切断し、その断面をデジタルカメラで撮影して得られる画像から1本のスパゲッティ内の水分分布を求める方法を考案した⁽⁶⁾。図4のA-aとB-aはそれぞれアルデンテに茹でたスパゲッティとラザニアの断面をデジタルカメラで撮影した画像である。これらを画像解析ソフトを用いて3原色である赤（R）、緑（G）、青（B）に分解し、青の画像のみを取り出したものが図のA-bとB-bである。図4（A-b）の画像の濃淡分布をスパゲッティの中心からの距離に対してプロットすると図5が得られる。

次に、一定の含水率まで茹でたパスタを水が蒸発しないようにポリエチレンフィルムで包んで十分に長い時間

保持して分布を均一にしたのちに、同様の処理を施して、含水率と画像の濃淡（輝度）を関係づける検量線を作成した。茹で時間の異なるスパゲッティとラザニアの断面をデジタルカメラで撮影し、その濃淡分布を検量線を用いて含水率の分布に変換したものを図6（A）と（B）に示す。得られた水分分布は当初予想もしなかったユニークな形状であり、次のような特徴がある。①表面の含水率がすぐにはその温度における最大（平衡）含水率にはならず、茹で時間とともに徐々に増加する。②表面近傍に平坦な含水率分布があり、そのレベルが徐々に上昇するとともに幅が広がる。③分布に幅が20 μm前後の細かい凹凸がある。④含水率が低い（0.2～0.3 kg-H₂O/kg-d.m.程度）領域で、著しく急峻な含水率分布が存在する。

単位面積、単位時間あたりに移動する物質量を物質流束 N_w と言い、その値は濃度の勾配に比例する。ここでは、移動する物質は水であり、濃度は含水率 X で表される。すなわち、水の移動流束は次式で表され、この式をFickの第1法則と言う。

$$N_w = -DdX/dr \quad (4)$$

ここで、 r は半径方向の距離である。また、 D は拡散係数といわれる比例定数であるが、パスタ内での水の移動のような場合には、この値は含水率（すなわち、移動する物質の濃度）に依存する。さらに、右辺の負号は水が移動する方向と濃度勾配の向きが逆であることを表す。円柱状のスパゲッティ内での水の移動が拡散のみによっ

図4 ■ アルデンテまで吸水させたスパゲッティ（A）とラザニア（B）の断面画像

デジタルカメラで撮影した画像（a）とそれをデジタル処理した画像（b）。

図5 ■ アルデンテまで吸水させたスパゲッティの断面の濃淡分布

図6 ■ スパゲッティ (A) とラザニア (B) の水分分布の経時変化
10.2と14.7 minがそれぞれのアルデンテの状態。

て起こる場合には、その過程は次の偏微分方程式で表される。

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 X}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial X}{\partial r} \right) \quad (5)$$

ここで、 t は吸水時間を表す。式(5)は時間について1階、距離について2階の微分方程式であるので、その特殊解を求めるには、時間について一つ、距離について二つの条件が必要である。時間については、吸水を始めるとき ($t=0$) のパスタ内の水分分布で与えられる (初期条件)。通常はパスタ内の含水率は分布がなく一定と考える。一方、距離に関しては、表面 ($r=R$; R はスパゲッティの半径) では常に平衡 (最大) 含水率であり、パスタ内の水分分布は左右対称であるので、中心 ($r=0$) では濃度勾配がゼロである ($\partial X / \partial r = 0$) と取り扱う (境界条件) のが一般的である。

表面の含水率が徐々に上昇する①の現象は、不思議に思われない方がいるかもしれないが、パスタ表面の境界膜 (濃度境界層) での物質移動が著しく遅い場合を除いては、上述のように、すぐに平衡値になると考えるのが普通である。さらに、パスタ内の水の移動を単純な拡散現象として捉え、円柱に対する水の物質収支式 (式(5)) を解いて水分分布を求めるときには、境界条件として、表面はその温度における最大含水率 (平衡値) とおくのが通例であるが、①はこの条件が成立しないことを示しており、単純な拡散方程式に基づく考え方では決して正しい分布は求められないことを意味する。②の表面近傍の含水率分布が平坦な部分では濃度勾配がない、または極めて小さい。したがって、拡散により水が内部に移動するためには、拡散係数が著しく大きくなければならないが、そのようなことは考えにくい。別の推進力を考える必要がある。デュラムセモリナ中のデンプン粒は $2 \sim 40 \mu\text{m}$ であり、③の細かい凹凸の幅 (周期) は吸水したデンプン粒の大きさと同程度である。本法の解像度は約 $3.2 \mu\text{m}$ であり、MRI法のその約24倍である。したがって、凹凸は測定精度が悪いからではなく、むしろ精度が高くデンプン粒の存在とその吸水を反映しているからである。さらに、④の急峻な分布は、デュラムセモリナに対するガラス転移曲線⁽⁷⁾より、この付近でガラス転移が起こり、この分布より内側はガラス状態に、また外側はラバー状態にあることを示唆する。

乾燥スパゲッティは温度と湿度を複雑に制御して製造されるが、その過程の最高温度により低温乾燥、高温乾燥および超高温乾燥スパゲッティに大別される。それぞれの最高温度はおおよそ 50°C 、 70°C と 85°C である。これらのスパゲッティを平均の含水率が $1.7 \text{ kg-H}_2\text{O/kg-d.m.}$ になるように茹でたとき (アルデンテ) の水分分布を図7に示す⁽⁸⁾。高温乾燥および超高温乾燥スパゲッティの水分分布は類似しており、表面付近の含水率が高く、中心部のそれが低い。一方、低温乾燥スパゲッティの水分分布は表面付近と中心部の含水率の差が小さい。したがって、高温乾燥および超高温乾燥スパゲッティは低温乾燥スパゲッティより歯応えのある食感になる。このことは茹でたスパゲッティの応力-歪曲線によっても確かめられる。

無限に細いパスタの吸水過程

前述したパスタ表面の含水率が徐々に増加する現象が、拡散による水の移動が律速であるためでないことを検証するには、無限に細いパスタの吸水過程を測定すべ

図7 ■ アルデンテまで吸水させた低温乾燥 (---)、高温乾燥 (···) および超高温乾燥 (—) スパゲッティの水分分布

ばよい。しかし、そのようなパスタは存在しないので、太さの異なるパスタの吸水過程を測定し、ある吸水時間での吸水量をパスタの太さに対してプロットして、そのプロットを太さ0に外挿することにより、その吸水時間における無限に細いパスタの吸水量を求めた⁽⁹⁾ (図8の内図)。このようにして求めた吸水量 $X_{d \rightarrow 0}(t)$ を、それらの初期値 $X_{d \rightarrow 0}(0)$ と平衡値 $X_{d \rightarrow 0}(\infty)$ (十分長い時間吸水させたときの最大吸水量) の差を用いて、 $(X_{d \rightarrow 0}(\infty) - X_{d \rightarrow 0}(t)) / (X_{d \rightarrow 0}(\infty) - X_{d \rightarrow 0}(0))$ と規格化した。この規格化した吸水量の変化を図8に示す。この過程は次式でよく表現できる。

$$\frac{X_{d \rightarrow 0}(\infty) - X_{d \rightarrow 0}(t)}{X_{d \rightarrow 0}(\infty) - X_{d \rightarrow 0}(0)} = \exp(-kt) \quad (6)$$

ここで、 k は速度定数であり、無限に細いパスタに対しては $k = 7.53 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ であった。

また、デュラムセモリナからグルテンを取り出して、それをスパゲッティ状に加工して乾燥した。これを茹でたときの含水率についても同様に規格化すると、図8に示すように、無限に細いパスタに対するプロットとほぼ同様に变化し、速度定数は $k = 7.42 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ であった。スパゲッティの吸水過程は、温水がスパゲッティの内部に移動する拡散過程と、その水がデンプン粒やグルテンに吸収される過程の二つからなる。無限に細いスパゲッティでは、前者の温水がスパゲッティの内部に移動する拡散過程が存在しない。したがって、無限に細いスパゲッティの吸水速度は、後者の過程、すなわちデンプン粒やグルテンが水を取り込む過程、の速度である。この

図8 ■ 無限に細いパスタ (○) とグルテンパスタ (△) の吸水挙動

内図：外挿による無限に細い (直径0 mm) パスタの含水率の推定の例。

速度定数が、グルテンのみからなるスパゲッティの吸水速度定数と同じであったことは、パスタ表面での含水率の変化はグルテンが水を取り込む過程が律速となっていることを示唆する。

茹で過程における水の移動機構に対する仮説

上述したように、1本のパスタ内の水分分布はユニークな形状を示した。このような水分分布になる理由は次のように推測される。滑らかに見えるパスタの表面には、図3内図に示したように、乾燥過程で水の通り道になったと思われる細孔がある。乾燥パスタを温水に浸けると、この細孔に水が入り込み、表面近傍の含水率が上昇する。水の移動 (物質移動) に比べて熱の移動は速いので、パスタの温度は比較的短時間で温水のそれに近い値になる。表面付近の含水率では、茹で温度はガラス転移温度より高い。したがって、パスタの表面付近はラバー状態になり、比較的速やかに水が移動するが、中心部はガラス状態のままである。これが茹で過程の初期に表面より少し内側に急峻な水分分布が形成される理由と思われる。この領域では、含水率が低いため、水の拡散係数は小さいが、濃度勾配が大きいので、徐々に水が内側に移動して、ガラス状態からラバー状態に変化し、水の拡散係数も徐々に大きくなる。

一方、パスタ内では、網目状のグルテンにデンプン粒が包埋されていると模式的に表現できる。前述したよう

に、熱の移動は速やかであるので、パスタの温度はデンプンの糊化温度より高い。糊化温度以上の温度ではデンプン粒は高い吸水能を有するが、グルテンの網目がその能力を抑えている。デンプンの糊化は速やかな過程である⁽¹⁰⁾ので、グルテンの網目が弛緩すると速やかに水を吸収してパスタの含水率が上昇する。すなわち、パスタの表面付近では吸水に伴うグルテンの網目構造の弛緩が律速段階であり、それが緩むとデンプン粒が直ちに水を吸い込むので、表面付近では平坦な水分分布が徐々に高くなっていく。さらに、吸水に伴いパスタは膨張するので、平坦な領域の幅が広がっていく。

初期にはガラス状態にある中心部も、表面近傍の急峻な水の濃度勾配により含水率が上昇すると、比較的早い段階でラバー状態に転移する。その後は、拡散係数は含水率に依存するが、通常のFickの法則に従った拡散現象により水が内部に移動するため、内部には放物線に近い含水率の分布が形成されると考えられる。

定速昇温法による糊化温度の測定

デンプンの糊化はパスタの含水率が高くなる際の大きな推進力であり、糊化温度を知ることは大切である。デンプンの糊化温度を測定する最も一般的な方法は示差走査熱量分析 (DSC) である。筆者らは、糊化温度を境にして吸水速度過程に対する推進力が大きく異なることに着目して、各種の麺類に含まれるデンプンの糊化温度を求める新たな方法を考案した⁽¹¹⁾。

茹で水の温度を時間に対して直線的に上昇させて、スパゲッティの吸水量を測定すると、図9に示すように⁽¹¹⁾、茹で水の温度の低い初期には含水率は徐々に増加するが、ある時間(温度)を境として含水率が著しく大きくなる。吸水初期と後期の含水率の変化をそれぞれ直線で結ぶと、交点の時間における茹で水の温度から糊化温度が求められる。図9の内図に示すように、横軸に温度、縦軸に含水率をとり、プロットしても同様に2本の直線が得られ、その交点における温度から糊化温度が求められる。このようにして、8種の麺類の糊化温度を求めたところ、それらはDSCによる糊化開始温度と糊化ピーク温度の中間に位置した。なお、糊化温度は測定法によって多少異なるので、提案法により推定した糊化温度は妥当と考えられる。

温度を時間に対して直線的に上昇させる方法は定速昇温法と呼ばれ、反応速度の温度依存性を解析するのに適用すると、原理的には1回の実験で活性化エネルギーと頻度因子(前指数因子)が求められる⁽¹²⁾。

図9 ■ 定速昇温法による吸水時のパスタの吸水挙動

昇温速度0.50 (◇), 0.77 (□), 1.00 (△) および1.38 °C/min (○).
内図: 吸水温度の上昇に伴う含水率の変化. うどん (●), きし麺 (▲) および十割そば (■).

パスタへの水の収着と収着した水の体積

水分収着等温線は食品素材に対する水の相互作用の様子を反映する。デュラムセモリナに対する水分収着等温線 (25 °C) を図10に示す⁽¹³⁾。多くの食品と同様に、デュラムセモリナの水分収着等温線も、低い水分活性では表面が水の単分子層で覆われ、水分活性が高くなると順次多分子層吸着が起こり、さらに高い水分活性では食品素材との相互作用は弱く、細孔を水が埋めると考えるGuggenheim-Anderson-de Boer式 (GAB式と略称されることが多い) でよく表現できる (図10の実線)。

一定温度のもとで少量の水を加えたときの系の体積変化から水の部分モル体積を求める方法をディラトメリーと言う。上部に細管をもつガラス容器に乾燥したデュラムセモリナを入れ、標線が細管の下部にくるようにドデカンで満たす。マイクロシリンジを用いてここに少量の水(物質質量 Δn)を加え、系の体積が一定となったときの体積増加量 ΔV を測定すると、水の部分モル体積 $\bar{V}$ は近似的に次式で求められる。

$$\bar{V} \approx \Delta V / \Delta n \quad (7)$$

なお、この系はデュラムセモリナが分散した不均一系であるので、ここで得られた水の部分モル体積は見かけの値である。デュラムセモリナの含水率と、そのときの見かけの水の部分モル体積の関係を図10の内図に示す⁽¹⁴⁾。バルクの水の部分モル体積はほぼ18 cm³/molである。一方、含水率が低いときには水の部分モル体積は

図10 ■デュラムセモリナの水分収着等温線 (25℃)
内図：ディラトメトリーによるパスタ中の水の部分モル体積。

9 cm³/mol程度と極めて小さい。これはデュラムセモリナと水が強く相互作用していることを示唆する。含水率の上昇に伴い $\bar{v}$ は上昇し、含水率が0.2 kg-H₂O/kg-d.m.以上ではほぼ一定の値になった。水分収着等温線に基づくと、0.2 kg-H₂O/kg-d.m.までの含水率はデュラムセモリナの表面に水の単分子層が形成され、さらにその上に多分子層が形成される領域である。したがって、水の体積的な挙動から見ても、デュラムセモリナの表面に水が吸着または収着する際の相互作用は強く、単分子層から2層、3層となるにつれて次第に弱くなることがうかがえる。含水率が0.2 kg-H₂O/kg-d.m.を超えた領域では、デュラムセモリナ内の細孔を埋めるように水が収着するので、この領域では水の体積的な挙動はバルク系のそれとほとんど変わらない。このように、ディラトメトリーという原理的には極めて単純な方法によっても食品素材と水との相互作用について興味深い知見が得られる。

おわりに

乾燥パスタを製造するときの条件により、茹で過程における吸水挙動は異なり⁽¹⁵⁾、上述したように水分分布も異なる。また、水に食塩を加えて茹でることもある。食塩以外の塩を加えて茹でると、添加する塩の種類によって吸水過程が異なり、塩の特性と興味深い関係がある⁽¹⁶⁾。パスタを茹でるという操作は、極めて日常的であり、もう研究することはなさそうに思えるが、まだ十分に理解できていない点が残されている。パスタ内での

水の移動機構もそのような例の一つである。本稿では、吸水過程について述べたが、乾燥過程に関する知見を蓄積することも大切である。熱重量分析により乾燥過程を詳細に検討したところ、乾燥工程の精確な予測には定率乾燥期間が無視できないことが示された⁽¹⁷⁾。また、上述した定速昇温法をパスタの乾燥過程に適用し、ガラス転移と乾燥速度の関係について考察した⁽¹⁸⁾。さらに、乾燥過程でのパスタの収縮挙動についても詳細に検討した⁽¹⁹⁾。パスタは組成が極めて単純な素材である。その中で水の移動機構が解明できれば、ほかの食品の乾燥または復水（吸水）過程での水の移動を考えるうえで有用な知見を与え、それらの過程をもっと合理的に設計できるはずである。また、その機構に基づいて、乾燥食品の特徴を合理的に制御する方法が見いだせるであろう。

本稿で紹介したデジタルカメラを用いた1本のパスタ内の水分分布を求める方法は、MRIが簡単に使える環境にないが、何とか分布を知りたいとの思いから着想した。また、無限に細い仮想的なパスタの吸水過程は、内部での物質移動の影響が無視できる条件を考えると必然的に出てくる着想である。さらに、ディラトメトリーは時間と繊細な注意を要するが、原理に忠実で単純な古典的方法であり、興味深い結果が得られた。本稿から工学的な解析の重要性和、工夫することの必要性和楽しさをくみ取っていただければ幸いである。

謝辞：本稿で紹介した研究に従事した教員、大学院生ならびに学部生（小林 敬、岩本憲久、伊藤佳奈子、中馬麻子、相本詩乃、小泉智史、水野奈穂、長谷川絢子、吉野将史の各氏）に感謝する。また、活発な議論と有益な助言をいただいたコンソーシアムのメンバー各位に厚く御礼申し上げます。

文献

- 1) T. Ogawa, T. Kobayashi & S. Adachi: *Food Bioprod. Process.*, **89**, 135 (2011).
- 2) M. Yoshino, T. Ogawa & S. Adachi: *J. Food Sci.*, **78**, E520 (2013).
- 3) T. Ogawa & S. Adachi: *Jpn. J. Food Eng.*, **15**, 101 (2014).
- 4) Y. Sekiyama, A. K. Horigane, H. Ono, K. Irie, T. Maeda & M. Yoshida: *Food Res. Int.*, **48**, 374 (2012).
- 5) K. Tanoi, Y. Hamada, S. Seyama, T. Saito, H. Iikura & T. M. Nakanishi: *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, **605**, 179 (2009).
- 6) T. Ogawa & S. Adachi: *Food Bioprocess. Technol.*, **7**, 1465 (2014).
- 7) B. Cuq & C. Icard-Vernière: *J. Cereal Sci.*, **33**, 213 (2001).
- 8) T. Ogawa & S. Adachi: *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, in press.
- 9) T. Ogawa, A. Hasegawa & S. Adachi: *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, in press.
- 10) H. Watanabe: *Jpn. J. Food Eng.*, **5**, 143 (2004).
- 11) A. Hasegawa, T. Ogawa & S. Adachi: *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, **76**, 2156 (2012).

- 12) T. Fujii, P. Khuwijitjaru, Y. Kimura & S. Adachi: *Food Chem.*, **94**, 341 (2006).
- 13) A. Chuma, T. Ogawa, T. Kobayashi & S. Adachi: *Food Sci. Technol. Res.*, **18**, 617 (2012).
- 14) A. Hasegawa, T. Ogawa & S. Adachi: *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, **77**, 1565 (2013).
- 15) U. Aimoto, T. Ogawa & S. Adachi: *Food Sci. Technol. Res.*, **19**, 17 (2013).
- 16) T. Ogawa & S. Adachi: *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, **77**, 249 (2013).
- 17) T. Ogawa, T. Kobayashi & S. Adachi: *J. Food Eng.*, **111**, 129 (2012).
- 18) T. Ogawa, S. Koizumi & S. Adachi: *Food Bioprod. Process.*, **92**, 9 (2014).
- 19) N. Mizuno, T. Ogawa & S. Adachi: *Food Biosci.*, **2**, 10 (2013).

プロフィール

小川 剛伸 (Takenobu OGAWA)

＜略歴＞2009年京都大学農学部食品生物科学科卒業／2011年同大学大学院農学研究科食品生物科学専攻修士課程修了／2014年同専攻博士後期課程修了，博士（農学）／日本学術振興会特別研究員DC1（2011年4月～2014年3月），同会特別研究員PD（京都大学大学院農学研究科農学専攻，2014年4月～）＜研究テーマ＞食品中での水分移動とそれに伴う諸現象の解明 ＜趣味＞テニス，スキー，ゴルフ，スキューバダイビング，食べ歩き

安達 修二 (Shuji ADACHI)

＜略歴＞1974年京都大学農学部食品工学科卒業／1978年同大学大学院農学研究科博士課程中退／同年同大学工学部助手／1982年同大学農学博士／1984年新居浜工業高等専門学校助教授／1988年静岡県立大学食品栄養科学部助教授／1990年京都大学農学部助教授／2003年同大学大学院農学研究科教授，現在に至る＜研究テーマと抱負＞食品工学の観点から食品製造プロセスで生起する現象の解析