

IHおよびガス加熱における鍋内対流の可視化と定量化

誌名	日本食品工学会誌 = Japan journal of food engineering
ISSN	13457942
著者	川上, 春菜 鄧, 傅宗 福岡, 美香 酒井, 昇
巻/号	11巻1号
掲載ページ	p. 51-58
発行年月	2010年3月

◇◇◇◇ 原著論文 ◇◇◇◇

IH およびガス加熱における鍋内対流の可視化と定量化

川上春菜, 鄧 傅宗, 福岡美香, 酒井 昇[†]

東京海洋大学

The Visualization and Quantification of the Flow in the Pan During Induction Heating and Gas Heating

Haruna KAWAKAMI, Zensyu TOU, Mika FUKUOKA, and Noboru SAKAI[†]

*Tokyo University of Marine Science and Technology,
4-5-7 Konan, Minato-ku, Tokyo 108-8477, Japan*

In cooking that there are solid foods in soup, natural convection flow in a pan may affect food quality. This study shows the visualization and quantification of the flow in the pan using developed new tracer particle during the induction heating (IH) and the gas heating. Development of the tracer particle imitated the method of making an artificial salmon roe. The density of the tracer particle could be adjusted to be the same as water. The average diameter of the tracer particle was 2.5 mm when the tracer particle was made by the diameter of the tip apex was 1 mm. Water flow in the pan was able to be visualized by using the tracer particle. In addition, at the IH and the gas heating, the position and flow velocity of the tracer particle in three dimensions were able to be measured by taking a picture using two video cameras set above and inside the pan. When the amount of energy entering into the pan is the same during the both heating, the flow velocity at initial stage of the IH was faster than that of the gas heating.

Keywords: Convection, IH, gas heating, visualization, tracer

1. 緒 言

流れ場における対流の可視化技術は30年ほど前からとくに活発になってきており、最近ではコンピュータ利用可視化法の発展に伴い、工学、理学から医学、農学、海洋気象など広い範囲に及んできている [1]。近年は、2次元面内の流速分布を容易かつ高精度で計測できる手法として、PIV法 (Particle Image Velocity: 粒子画像流速測定法) が主流となっている。PIV法はすでに1つの分野として確立しているものの、食品産業、とくに調理への応用例はみられない。

一方、近年急速に普及しているIH調理器において、その調理特性はガス加熱と異なるといわれているが、その定量化は行われておらず、経験に頼っているのが現状である。しかし炊飯や煮熱といった、対流が影響を及ぼすと考えられる調理においては流れ場の理解が

必要であり、これを定量化することによって調理工程における品質設計、最適化を図ることができる。炊飯時の対流の観察に関しては、大西ら [2] が沸騰状態での鍋内の様子を、ソーメンを用いて観察をしているが、目視による観察のみであり、定量化にはいたっていない。

そこで本研究では、流体の挙動を定量的に把握するために粒子状のトレーサを検討し、また、トレーサ粒子による対流の可視化映像を用いて、粒子の挙動を追跡することにより対流の定量化を行った。

2. 実験方法

2.1 新規トレーサの開発

2.1.1 トレーサ粒子の選択

流体の入った鍋の加熱において、鍋内対流の様式を観察し、同時に可視化映像を計測するためには、それに適したトレーサ粒子の開発が必要である。球状のトレーサ粒子としては、ガラスビーズや、マイクロカプセル、また、液体では油滴などが用いられる [3-5]。し

(受付2009年11月18日, 受理2010年1月21日)

〒108-8477 東京都港区港南4-5-7

† Fax: 03-5463-0622, E-mail: sakai@kaiyodai.ac.jp

かしガラスビーズでは密度の調節が困難であり、マイクロカプセルは直径約 $1\mu\text{m}\sim 1000\mu\text{m}$ の微小なカプセルであると同時に、マクロな対流の可視化には不向きである。そこで、粒子径を任意に変えることができ、ほぼ目的流体と等しい密度をもたせることができ、方向性をもたない、球状のトレーサを作製することとした。これらの要件を満たす可能性のある物質について調査した結果、人工イクラの作製法を模倣することとした [6]。

2.1.2 着色物質の選択

トレーサ粒子の識別を可能にするため、食用色素 (赤, 青), インク (赤, 黒), 色素メチレンブルーおよびローズベンガル (0.3%, $\text{C}_{20}\text{H}_2\text{Cl}_{14}\text{Na}_2\text{O}_5$, 分子量 1017.64) を用いてトレーサ粒子を作製し、着色度合いの比較を行った。作製した粒子は、作製直後は色の退色が生じ、周囲の流体が染まる。よって、対流の観察に用いるために、周囲の流体への色素の移動が少なくなるまで水道水中で放置して観察を行った。その結果、約 20°C 水道水に 1 時間放置すると、黒インクとローズベンガルを用いたトレーサ粒子の退色が少なく、観察が容易であった。色素の退色は分子拡散により、粒子外へ色素が移動するためと考えられる。分子拡散速度を抑えるため、用いる色素は分子量の大きいローズベンガルとした。

2.1.3 トレーサ粒子の作製

トレーサ粒子は人工イクラの製法を模倣し、アルギン酸ナトリウム溶液 (和光純薬) と塩化カルシウム水溶液 (和光純薬) で作製した [6]。Fig. 1 に、作製に用いた器具の概要を示す。塩化カルシウムの溶液中にアルギン酸ナトリウムを滴下することで、液滴表面に不溶性のゲルが生成し、球体のカプセル状となる。粒子径の大きさは、チップの先端口の大きさを変えることで調整した。また、粒子の密度はオリーブ油、界面活性剤 tritonX-100 の混合割合によって調整した。

まず、0.3%ローズベンガル水溶液を調製し、これに 1%重量のアルギン酸ナトリウムを溶解した。次にこの溶解液に、ローズベンガル水溶液 0.3%容量の tritonX-100 と適当量のオリーブ油を加えた。これを A 液とした。

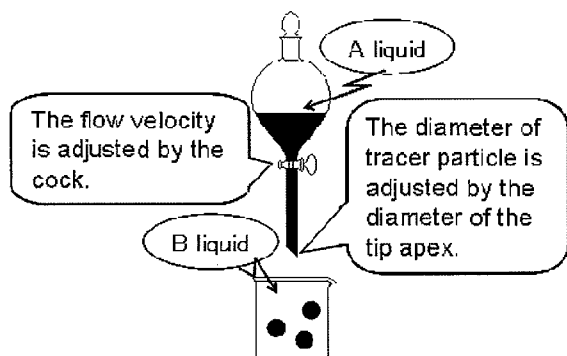


Fig. 1 The apparatus for making of tracer particle.

10%の塩化カルシウム溶液を B 液とし、Fig. 1 のトレーサ粒子製作器具を用い、B 液に A 液を少量ずつ滴下することで作製した。なお、A 液、B 液ともに液温は約 25°C とした。その後、トレーサ粒子を取り出し、約 20°C 水道水中で 1 時間放置し、使用した。

2.2 トレーサ粒子の性質

2.2.1 トレーサ粒子の密度の調整

流体の密度とトレーサ粒子の密度が異なる場合、重力の影響で対流の可視化に影響を与え、正確な流れを観察することができない。そこで、トレーサ粒子の密度を水と同じ 1 g/cm^3 とするため、ローズベンガル水溶液 100 cm^3 に対するオリーブ油の量を 3, 4, 5, 5.5, 6 cm^3 に調製して密度の異なる粒子を作製した。その際、Fig. 1 のトレーサ粒子製作器具において、先端口の直径がそれぞれ 1 mm, 1.5 mm, 2 mm と、チップの滴下穴の大きさを変えてトレーサ粒子を作製した。トレーサ粒子製作後、トレーサ粒子表面の水を軽く拭き、比重瓶を用いて密度を測定した。なお、測定はトレーサ粒子を取り出し、約 20°C 水道水中で約 1 時間放置した後に行った。

2.2.2 トレーサ粒子の粒子径の調整

Fig. 1 のトレーサ粒子製作器具に示したチップの先端口を直径 1 mm, 1.5 mm, 2 mm に切り、コックの調節により、混合液の流速を $0.17\text{ cm}^3/\text{s}$ 、滴下の高さを 28 mm とした時の粒子径分布を測定した。測定方法はトレーサ粒子を並べて撮影し、PC デジタイザソフトを用いて 100 粒の粒子直径を計測した。

2.2.3 加熱に伴う変化

加熱に伴う対流の可視化に用いるトレーサであるため、加熱による状態変化は少なく、対流の可視化に影響を与えない必要がある。そこで、作製したトレーサ粒子を沸騰水中で加熱し、加熱前後の様子を観察した。その結果、加熱前後で若干の退色があったが、対流観察に問題はなかった。加熱約 20 分後、トレーサ粒子が水面上に浮き、水の密度よりも軽くなったことが観察された。トレーサ粒子の加熱前後の密度はそれぞれ 1.052 g/cm^3 , 0.980 g/cm^3 であった。加熱による退色は、分子拡散により、ローズベンガル色素が粒子外へ移動したためであり、これにより密度も変化したと考えられる。そこで、加熱に伴うトレーサ粒子の密度の変動を確かめた。2.3 対流の観察では加熱約 6 分までの対流観察を行う。そのため密度の測定では、直径 240 mm 寸銅鍋に 6 L の水および、作製後約 20°C の水道水に浸漬させたトレーサ粒子を約 25g 入れ、IH 加熱で 10 分間加熱を行い、2 分ごとに粒子を採取した。採取した粒子を比重瓶で 25°C における密度測定を行うことで、対流観察時間中の粒子の密度変化を追うこととした。なお、水の密度は 1 g/cm^3 として、粒子の密度を決定した。

また、加熱の強さは対流観察時と等しくなるよう、直径 390 mm、高さ 250 mm の鍋に 20 L の水を入れ、ガス全火力で加熱したときの温度上昇速度と等しくなる火力を設定した。また、水量と粒子量の割合は対流観察時とは異なるが、水量と粒子量の割合の差は加熱温度に伴う密度変化には影響を与えないと仮定した。

2.3 対流の観察

作製したトレーサ粒子を用いて、鍋内対流の挙動の可視化を行った。実験条件を Table 1 に示す。加熱に用いたガスコンロは内輪と外輪で構成されており、内輪の直径は 90 mm、外輪の直径は 165 mm である。IH ヒーターはコイル直径が 290 mm であり、実験で用いた 390 mm 鍋の方が大きい。ガス、IH いずれも鍋中心を加熱源の中心に置くように設置した。また、加熱時の鍋内流体温度の測定を行った。Table 1 と同じ直径 390 mm、高さ 250 mm の鍋に 20 L の水を入れ、6 分まで加熱を行い、鍋内の水の温度計測を直径 1 mm の K 型シー型熱電対で行った。直径 1 mm の太さは対流に影響を与えないと考える。温度測定部位を Fig. 2 に示す。温度測定部位は鍋の中心上部、中心底部、外側上部、外側底部の計 4 点でそれぞれ Fig. 2 中の①～④で表した。いずれも鍋壁から 3 cm、水面から 3 cm の位置に設置し、加熱を行った。投入熱量は等しいため、鍋内流体の平

Table 1 Experimental conditions in convection observation.

Pan	ϕ 390 mm × H250 mm, 30 L
Power	Gas: Full heating power, 14.0 kW) IH: 84% of 5 kW (Same amount of energy as gas)
Tracer particle	The average diameter is 2.5 mm (Particle number 15~20)
Fluid	Water (20 L)

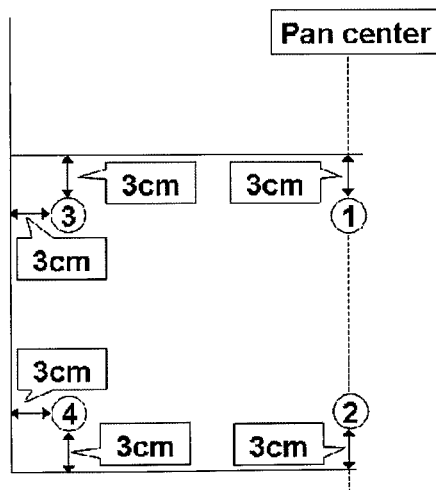


Fig. 2 Temperature measurement part.

均温度上昇速度はガス加熱と IH 加熱でほぼ等しい。

対流の観察は、加熱初期から約 6 分間、流れの様子を目視と同時にデジタルカメラおよびビデオカメラを用いて録画を行った。ビデオカメラを鍋真上に、防水デジタルカメラ (5.9 cm × 9.5 cm × 1.6 cm) を鍋水中に設置し、加熱後、粒子が動き始めてから 20 秒間の可視化画像を撮影した。なお、鍋の大きさに対してデジタルカメラの大きさが小さく、観察領域の反対側片隅によせているので、対流への影響は少ないものと考えた。また、全体でのトレーサ粒子の挙動を観察するため、鍋上部からビデオカメラのみでの撮影も行った。鍋水中のデジタルカメラは 0.04 秒/フレーム、鍋上部からのビデオカメラは 0.033 秒/フレームで画像を取得する。動画の取得では、デジタルカメラを先にスタートさせて水中に投入してから、30 秒後に鍋上部のビデオカメラをスタートさせ、座標取得時にはデジタルカメラ 30 秒時からと、ビデオカメラ 0 秒時をスタートとして動画を取得した。動画取得の後、2 つの映像から任意の時間での画像を取得した。動画からの画像の取得は、時間間隔が短いと粒子が重なり見づらく、時間間隔が長いと、粒子の確認を行うことができない。そこで、画像の取得は粒子の確認が容易であった 1.2 秒ごととした。

3. 実験結果および考察

3.1 トレーサ粒子の性質

3.1.1 トレーサ粒子の密度

Fig. 3 に、ローズベンガル水溶液 100 cm³ に対して加えたオリーブ油の量と作製したトレーサ粒子の密度の関係を示す。その結果、オリーブ油の割合を増加すると、ほぼ直線的に密度が減少した。また、先端口の直径 1 mm、1.5 mm、2 mm のとき、オリーブ油の量を、ローズベンガル水溶液 100 cm³ に対してそれぞれ 5.8、5.4、5.1

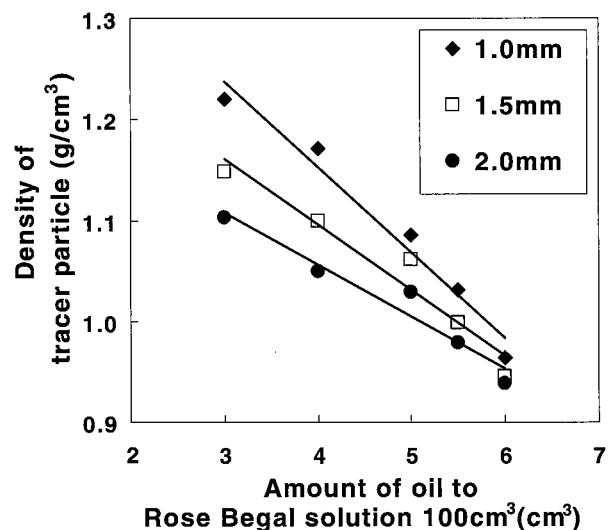


Fig. 3 Relationship between amount of oil and particle density.

cm³に調製すれば, トレーサ粒子の密度が水とほぼ同じ1 g/cm³になることがわかった。

3.1.2 トレーサ粒子の粒子径分布

トレーサ粒子径分布を Fig. 4 に, チップ先端口の大きさに対する粒子径の平均と標準偏差を Table 2 に示す。粒子径の大きなトレーサ粒子は流れに対する追従性が悪くなり, 粒子径が小さいほど対流に及ぼす影響は少ないと考えられる。その反面, トレーサ粒子が小さすぎると, 対流の観察に支障を生じてしまう恐れがあるが, チップ先端口1 mm, 粒径平均2.5 mmの粒子は充分視認性もあることから, この粒子を使用することとした。

3.1.3 加熱に伴う変化

加熱に伴う密度の変化を Fig. 5 に示す。加熱10分まで, 密度はほぼ変わらず, 加熱10分後も水に浮くようなことはなかった。そのため, 加熱10分程度であれば, 粒子からの密度の変化が少ないので, 流れの可視化に十分耐えることができると考える。

3.2 対流観察結果

3.2.1 観察結果

鍋内部における水の温度変化をガス加熱について Fig. 6 に, IH 加熱について Fig. 7 に示す。Fig. 6 および Fig. 7 は縦軸を初期温度からの温度差で表しており, 初期温度は約20℃である。Fig. 6 および Fig. 7 より, ガス加熱では部位により温度上昇に大きく差はないが,

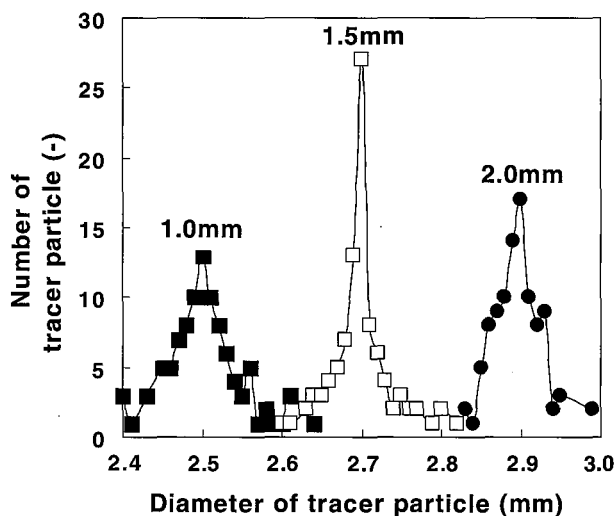


Fig. 4 Distribution of tracer particle size.

Table 2 Tracer particle diameter.

Diameter of tip apex	Average diameter of tracer particle	standard variation
1.0 mm	2.50 mm	0.05
1.5 mm	2.69 mm	0.04
2.0 mm	2.89 mm	0.03

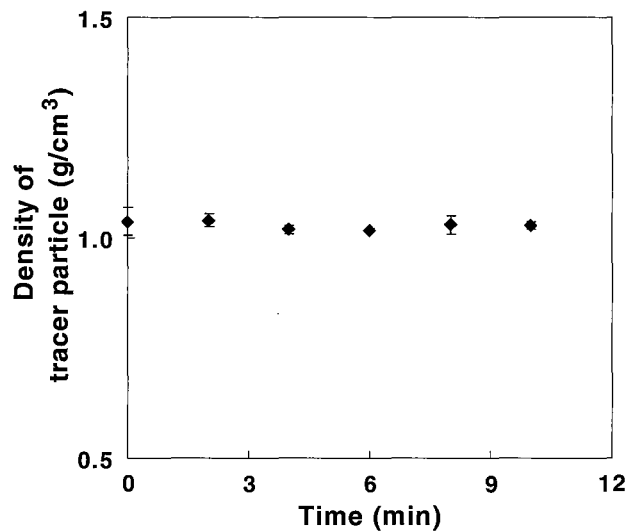


Fig. 5 Change of density of tracer particle by heating in pan.

IH 加熱では鍋内部位による差が大きい。とくに①中心上部および②中心底部は温度上昇が速いが, ③外側上部および④外側底部の温度上昇は遅い。これは加熱源となる IH コイルが鍋中心部にあるためである。

ガス全火力において鍋上部からビデオカメラで撮影したガス加熱初期の挙動を Fig. 8 に示す。Fig. 8 は, ガス加熱開始20秒から40秒までの動画を撮影し, 1.2秒ずつの静止画を取得し, 重ねて表示した図である。白丸で記されているトレーサ粒子が加熱20秒時点のトレーサ粒子の位置, 黒丸で記されているトレーサ粒子が加熱40秒時点での粒子の位置であり, 1つのトレーサ粒子は白丸位置から黒丸位置へ移動したことを示している。また, 右下の黒線で囲った領域は, トレーサが存在する領域を拡大したものである。図中の円はガスコンロの内輪および外輪の大きさを表している。ガス全火力で加熱すると, 底面にほぼ均一に分布したトレーサ粒子が寸胴外壁に移動し, 上昇するような形の

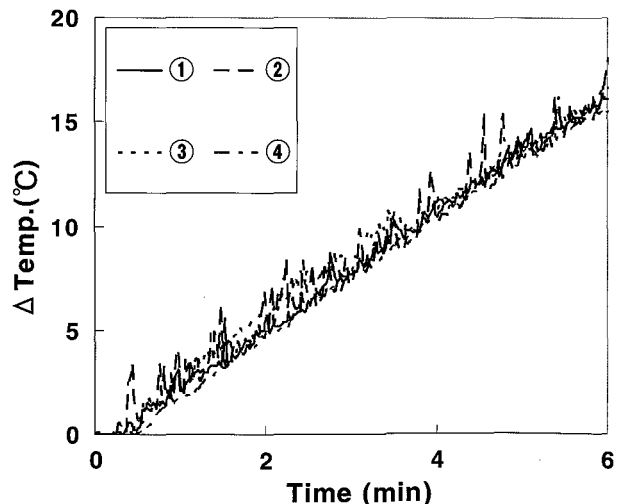


Fig. 6 Result of temperature of water in gas heating.

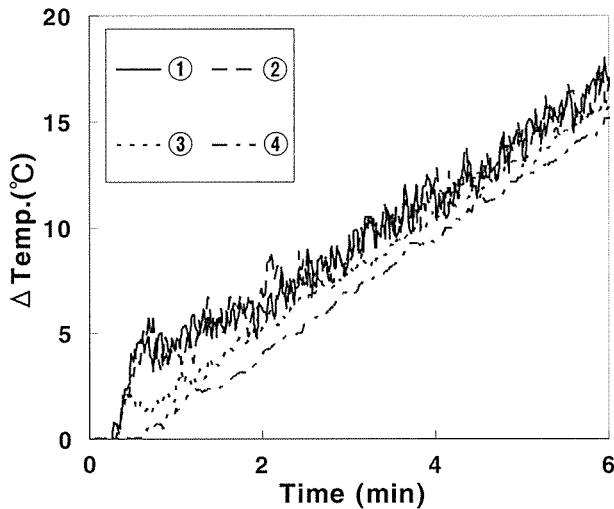


Fig. 7 Result of temperature of water in IH.

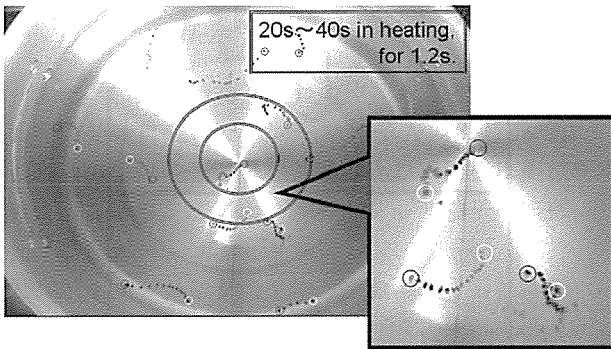


Fig. 8 Convection flow of tracer particle in the initial stage of gas heating. White circle are start position, and black circle are end position. (Circle is size of inner ring and outer ring.)

対流が観察された。ガスでは底面どの位置のトレーサ粒子も動き出した。ガスでは2輪の加熱源の炎が鍋底面を均一に加熱するため、Fig. 6で示したように、鍋内部の温度差が小さく、底面全体の粒子が動き出したと考えられる。その後上昇したトレーサ粒子が中心付近に集まったり外壁に動いたりするような不規則な移動の後、すべてのトレーサ粒子が一箇所に徐々に集中した。ガス加熱では底面と同時に側面も加熱されるため、底面で加熱された流体が側面へ移動し、上昇していると考えられる。

IHとガス加熱を比較する場合、加熱方式が異なるため条件を全く等しくすることはできないが、基準となる条件を設定する必要がある。ここでは投入熱量が等しくなるようにIHの出力を調節した。Table 1と同様に、直径390 mm、高さ250 mmの鍋に20 Lの水を入れ、中心付近にK型シース型熱電対を設置し、攪拌しながら30°Cから40°Cまでの昇温時間を測定し、鍋内に投入された熱量を求めた。その結果、ガス全火力に対してIH84%の出力において、ガスと同量の投入熱量となっ

たため、IH84%の出力で実験を行った。鍋上部からビデオカメラで撮影したIH加熱初期の挙動をFig. 9に示す。Fig. 9は、IH加熱開始10秒から30秒までの動画を撮影し、1.2秒ずつの静止画を取得して、重ねて表示した図である。図中の円は、IHのコイルの大きさを表している。Fig. 8と同様に、1つのトレーサ粒子は白丸位置から黒丸位置へ移動したことを示している。84% IH出力で加熱した直後、底面にあるトレーサ粒子が鍋中心に輪のように集まり、上方に舞い上がってから寸胴外壁方向へ広がって沈んだ。コイル上から外れた位置にあるトレーサ粒子は移動し始めるまでに時間がかかった。外側底面に下がったトレーサ粒子は中心付近に移動した後、再度上昇し、外壁へ移動した。このような回転を何回か繰り返したうちにガス加熱の結果と同じく鍋の一箇所に集まったが、その範囲はガスより広がった。IH加熱ではコイル上の部分が極端に加熱されるため、このコイル上の部分から流体が上昇した。また、IH加熱では底面のみでの加熱となり、側面は冷却面となるため、コイル上で熱せられた流体が上昇し、側面へ移動したものと考えられる。ガスではIHに比べて底面と側面の温度差が小さく、炎の加熱具合によりばらつきが生じるため、不規則な対流となったと考えられる。本実験ではIHヒーターのコイルの大きさよりも鍋の底面直径の方が大きいため、Fig. 9のようにコイル上部位のみの粒子が動きだしたと考えられる。すなわち、IH加熱においてはコイル上部位の流体が先行して動く。Fig. 7で示したように、IH加熱ではコイル上部位の温度上昇速度が大きいため、この部位の流体の運動がコイル外部位の流体に比べて大きいといえる。そのため、加熱源と鍋の大きさの関係は鍋内対流の挙動に影響を及ぼしていると考えられる。

3.2.2 トレーサ粒子の座標の取得

近年、PIV (Particle Image Velocity: 粒子画像流速測定法) による流れの定量化が一般的となっている。PIV手法では、流れにトレーサ粒子を混入させ、瞬間的にレーザーなどの光源でシート状に照射することで、

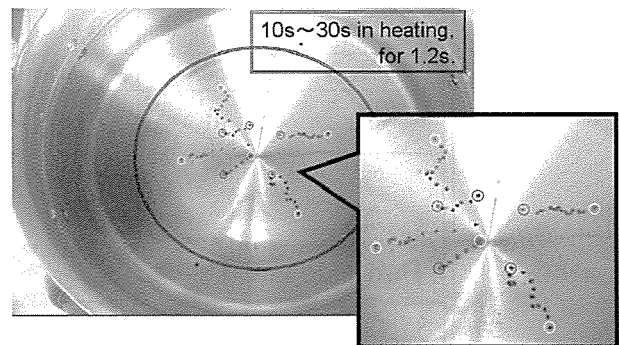


Fig. 9 Convection flow of tracer particle in the initial stage of IH. White circle are start position, and black circle are end position. (Circle is size of IH coil.)

トレーサ粒子からの散乱光を CCD 素子などの撮影装置を介して記録させる。記録した 2 時刻間での瞬間的なトレーサ粒子画像の移動量と 2 時刻間隔から、流れの速度を求める [7]。一般的な PIV 手法において用いられるトレーサは数 μm の微細な粒子である [5]。本研究では鍋内の流れを巨視的に観察し、実際の食品調理における流れに近い挙動の取得を目的としているため、mm 単位のトレーサ粒子を選択した。PIV 法の中でも、流体中の個々のトレーサ粒子をある時間間隔で追跡し、流れ場を計測する方法を PTV (Particle Tracking Velocimetry: 粒子追跡法) という。本研究では、実際の調理機器における流れの定量化および、調理機器同士の比較においては、簡便な方法による定量化が望ましいと考え、2 方向から撮影した画像を用い、簡易的に PTV 法の原理を用い、トレーサ粒子の追跡、座標の取得を行うことにした。

本実験では、鍋上部より水面に平行に設置したビデオカメラと、鍋底面に垂直になるように水中内に設置したデジタルカメラの 2 箇所から、トレーサ粒子の動画を取得した。撮影の模式図を Fig. 10 に示す。得られた動画は、PC デジタイザソフトを用いて、鍋上ビデオカメラの動画から、XY 方向の座標と移動距離を求めた。なお、ここでの座標とは、鍋を上から見たときに鍋中心部を座標 (0,0,0) とし、横方向を X 方向、縦方向を Y 方向、鍋の高さ方向を Z 方向とした。しかし、水中の画像では、カメラとトレーサ粒子の距離によって実際の移動距離と映像上での移動距離が異なる。そこで、鍋上からの動画により、各トレーサ粒子の水中カメラからの距離を求めておき、この距離に応じた映像上の距離を実距離に直した。

実距離を求める方法の概略図を Fig. 11 に示す。まず、加熱開始時におけるトレーサ粒子の移動では、底面に存在する、観察目的となるトレーサ粒子 A を定めた。もしトレーサ粒子の移動が XY 方向のみであり、高さ方向には移動していないとしても、見かけ上は高さ方向への移動のように観察される。そのため、初期トレーサ粒子 A の位置を見かけ上 A' とし、高さを 0 とした。見かけの初期トレーサ粒子 A' と鍋底面の距離 H_A は (1) 式のように求められる。

$$H_A = \frac{H_{\text{Camera}}}{L_A} (L_{\text{Pan}} - L_A) \quad (1)$$

もし移動した粒子が B の位置にあるとすると、鍋底面からの高さ H_B は (2) 式で求めることができる。

$$H_B = \frac{H_{\text{Camera}}}{L_A} (L_A - L_B) \quad (2)$$

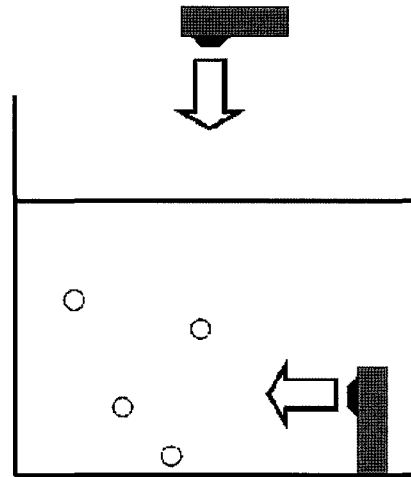


Fig. 10 Schematic view of taking pictures.

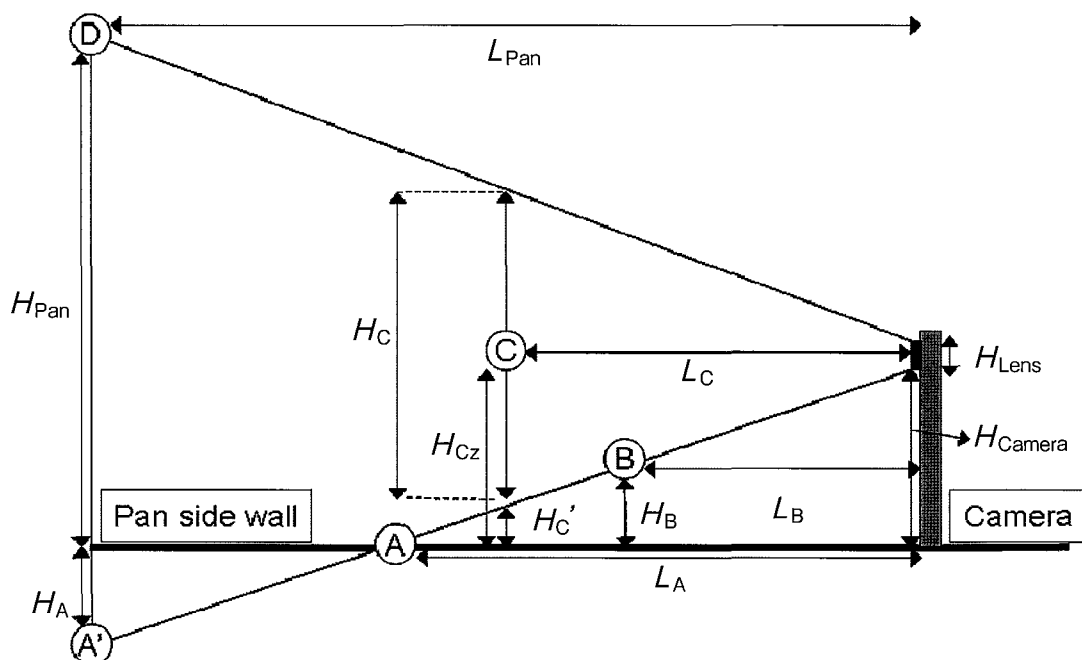


Fig. 11 Schematic view of method of acquiring particle position.

もし移動した粒子がCの位置にあるとすると、カメラの視野範囲 H_C は(3)式で求めることができる。

$$H_C = \frac{L_C \times (H_{Pan} + H_A - H_{Lens})}{L_{Pan}} + H_{Lens} \quad (3)$$

鍋の側面には底面から任意の高さDに印をつけてある。見かけの初期トレーサ粒子A'から印DまでのZ方向距離のPCデジタイザポイント数を P_{Full} とし、カメラの視野範囲 H_C をポイント数 P_{Full} で割ることにより、カメラからの距離 L_C におけるデジタイザ上1ポイント当たりの距離が出る。また、トレーサ粒子CのXY面での位置が、初期トレーサ粒子Aよりもカメラに近い場合、 H_C' を求め、トレーサ粒子CのZ座標における移動距離 H_{Cz} に含む必要がある。よって、初期トレーサ粒子Aからトレーサ粒子CまでのZ方向ポイント数を P_C とすると、(4)式で粒子Cの実際のZ座標における移動距離 H_{Cz} を求めることができる。

$$H_{Cz} = \frac{H_C}{P_{Full}} \times P_C + H_C' \quad (4)$$

また、加熱開始約6分後の座標の取得においては、加熱開始時に定めたトレーサ粒子Aの代わりとして、鍋底面の任意の一部分を基準点とし、同様に座標を求めた。以上の方法により、各トレーサ粒子の座標、移動距離を算出した。

3.2.3 トレーサ粒子の平均流速および運動軌跡

撮影した画像からトレーサ粒子1.2秒の座標を記録し、毎秒移動距離(ΔX , ΔY , ΔZ)を計算し、鍋のサイズから平均速度 \bar{v}_{xyz} (5式)を得た。3.2.2で求めた H_{Pan} , H_A , L_{Pan} , L_C および、(5)式により求めた流速をTable 3に示す。なお、No.1, No.2の2つの粒子についての測定結果を示した。 H_{Pan} は鍋側面の任意の高さであり、本実験では150 mmに印をつけたため、全て150 mmの同じ値である。 H_A は、運動を始める前の粒子部位あるいは鍋底面の任意の一部分に依存する値であるため、それぞれの粒子で値が異なる。 L_{Pan} は鍋とカメラの距離であるため、1回の実験ごとの値となっている。 L_C は粒子とカメラの距離を表す。鍋上部からピ

デオカメラで撮影すると、粒子は加熱に伴いXY方向にも運動を行うため、 L_C は範囲で表している。カメラからの距離が異なることによって、カメラの視野範囲 H_C は変化するので、各時間で L_C を取る必要がある。

$$\text{平均速度 } \bar{v}_{xyz} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (5)$$

また、3.2.2で求めた三次元座標より、加熱初期の運動軌跡を求めた例をFig. 12に示す。鍋中心部を座標(0,0,0)としており、図中のXY平面上の円は鍋底面を示している。Fig. 12は、加熱初期のIH加熱の12秒間、ガス加熱の18秒間の座標を1.2秒ずつ取得した結果を表している。IH加熱とガス加熱で座標取得時間が異なるのは、座標取得の上で、カメラの視野外にトレーサ粒子が出て行ってしまったためである。また、加熱6分後の運動軌跡の例をFig. 13に示す。Fig. 13は、加熱約6分後のIH加熱の10.8秒間、ガス加熱の13.2秒間の座標を1.2秒ずつ取得した結果を表している。また、図中のXY平面上の円は鍋底面を表している。Fig. 12と同様に、IH加熱とガス加熱で座標取得時間が異なる

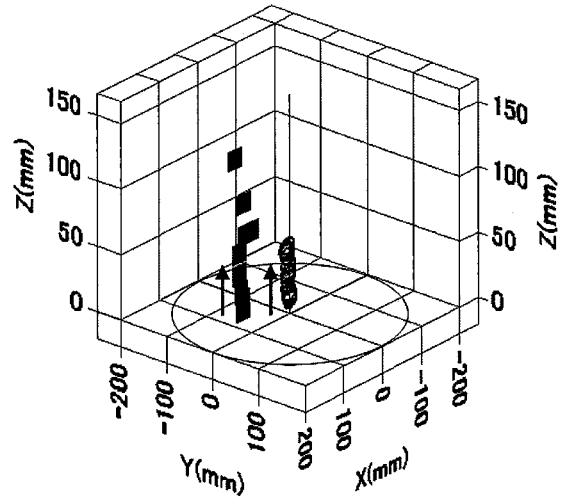


Fig. 12 Trajectory of motion of tracer particle in initial stage of heating. ■ :12 seconds in IH, ○ :18 seconds in gas heating.

Table 3 Result of flow velocity at initial stage and about 6min in heating.

		Initial stage of heating		About 6min in heating	
Particle number		IH	Gas	IH	Gas
H_{Pan} (mm)	No.1, No.2	150	150	150	150
H_A (mm)	No.1	27.1	29.8	15.4	18
	No.2	29.8	87.5	15.4	25
L_{Pan} (mm)	No.1, No.2	341.7	319.2	336.3	317.9
L_C (mm)	No.1	213.1~235.5	167.5~215.1	258.7~306.6	224.6~276.8
	No.2	228.2~319.5	124.2~130.3	269.9~314.2	225.8~278.8
Flow velocity (mm/s)	No.1	13.3	8.7	16.7	16.6
	No.2	19.6	2.9	18.6	14.1

のは、座標取得の上で、カメラの視野外にトレーサ粒子が出て行ってしまったためである。IH加熱においては、鍋底面コイル上の粒子の計測を行なった。その結果、加熱初期においてはIH加熱の方がガス加熱よりも流速が大きいことがわかった。加熱約6分後の安定した対流ではガス加熱とIH加熱の流速はほぼ等しかった。同量の熱量をIHとガスで投入した場合でも、IHは底面のみが発熱するため、底面付近の流体の受ける熱量はIHの方が多いため、平均速度はIHの方が早かったと考えられる。加熱しばらくすると、鍋内の温度分布が少なくなることから、IH加熱とガス加熱の流速は加熱初期ほどの差が生じなかったと考えられる。以上のことから、同量の熱量を加えた場合、加熱初期はIH加熱の方がガス加熱よりも流速は大きいことがわかった。

鍋内対流の流れの可視化ができたことで、鍋内の流れの差による調理への影響を検討することができる。とくに煮物、茹で調理など、流体の状態が食材表面に作用すると考えられる系については、このような流れの可視化は有効である。同時に、流れ場を、シミュレーションソフトを用いて予測解析することができれば、加熱条件に対応した流れの制御を行うことができると考える。

4. 結 論

人工イクラ作製法を模擬することで、大きさ、密度を任意に変えることのできるトレーサ粒子を作製することができた。トレーサ粒子を用いることで、水を対象としたときの鍋内対流の可視化を行うことができた。また、粒子作製時のチップ先端口1mmで作製したとき、平均粒径2.5mmのトレーサ粒子が水流の可視化において良好であった。

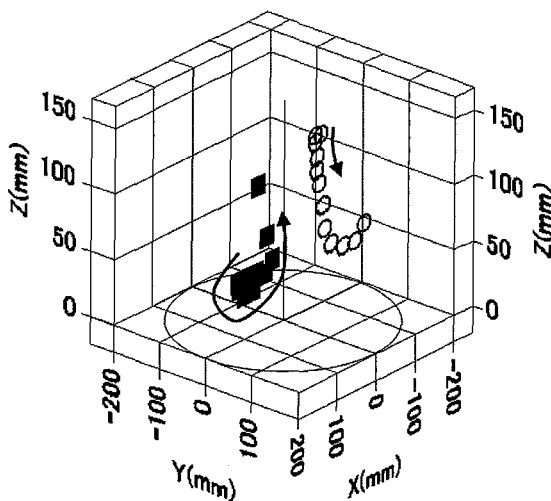


Fig. 13 Trajectory of motion of tracer particle in 6 minutes of heating. ■ :10.8 seconds in IH, ○ :13.2 seconds in gas heating.

鍋上部と鍋内の2方向からの撮影により、3次元でのトレーサ粒子の運動を定量化することができた。また、IH加熱とガス加熱での流速の比較を行った結果、同量の熱量を加えた場合、加熱初期ではIH加熱の方がガス加熱よりも速かった。加熱約6分ではガス加熱とIH加熱の流速はほぼ等しくなった。

引用文献

- 1) "Introduction to informatics of visualization (Kashikajohog akunyumon)", Kashika-johogaku-nyumon henshu-iinkai, Tokyo Denki University Press, 1994, p.2.
- 2) M. Ohnishi, M.Yamagichi, O. Ohashi; "Study of Suitable Pot Shape of Induction Heater Type Rice Cookers" (in Japanese). J. High Temperature Society, **29**(2), 63-67 (2003).
- 3) K. Oda, T. Shigematsu; "Visibilized experiment on fluid motion by adding particles and numerical simulation on the spreading behavior of muddiness"(in Japanese). Annu. J. Coastal Eng., **41**, 1006-1010 (1994).
- 4) T. Etoh, K Takehara; "Development of a method to make microcapsules as tracer particles"(in Japanese). J. Visualization Society of Japan, **11** (Suppl 1), 71-74 (1991).
- 5) T. Kobayashi, K. Okamoto, M. Kawahashi, S. Nishio; "Particle Image Velocimetry (PIV no kiso to ouyou)", Springer-Verlag Tokyo, 2000, p.19.
- 6) K. Kamio; "Man-made Salmon Roe"(in Japanese). The Chem. Education, **35**, 309-311 (1987).
- 7) "PIV handbook (PIV handobukku)", The Visualization Society of Japan, Morikita Publishing Co., Ltd., 2002, p.4.

要 旨

調理において、流体の挙動は食品の品質に影響する。本研究では新しく開発したトレーサ粒子を用いて、IH加熱とガス加熱において、鍋内対流の可視化および定量化を行った。粒子径の大きなトレーサ粒子は流れに対する追従性が悪くなり、粒子径が小さいほど対流に及ぼす影響は少ないと考えられる。その反面、トレーサ粒子が小さすぎると、対流の観察に支障を生じてしまう恐れがあるが、チップ先端口1mm、粒径平均2.5mmの粒子は充分視認性もあることから、この粒子を使用した。トレーサ粒子を用いることで、水を対象としたときの鍋内対流の可視化を行うことができた。また、IH加熱とガス加熱において、鍋上部と鍋内の2方向からの撮影により、3次元でのトレーサ粒子の運動を定量化することができた。IH加熱とガス加熱で同量の熱量で加熱を行った場合、加熱初期ではガス加熱よりもIH加熱の方が、流速が大きかった。