MRIによる氷蓄熱用カプセル充てん層内の局所熱流束分布計測*

小川 邦康¹, 別宮 光洋², 長谷川 浩巳³, 橋本 克巳³, 平井 秀一郎⁴

MRI Measurement of Local Heat Flux Distributions in Packed Bed of Ice Thermal Storage Capsules

Kuniyasu OGAWA, Mitsuhiro BECK, Hiromi HASEGAWA, Katsumi HASHIMOTO and Shuichiro HIRAI

ABSTRACT

A new method to measure local heat flux distribution from capsule surface in packed bed of ice thermal storage capsule using magnetic resonance imaging (MRI) was developed to investigate nonuniform heat transfer phenomena in porous media. In this method, local heat flux distribution from a capsule was calculated from freezing rate of water in the capsule cooled by brine below 0 °C in a time interval. The mean heat flux of single capsule surface under uniform flow obtained by this method agrees with one by the conventional method. By applying this method to packed bed, heat flux distributions on capsule surfaces in packed bed were measured, and axial velocity distributions of brine through packed bed were obtained by the phase method in MRI techniques. Based on these results, it was found that heat exchange effectiveness of brine through channel was lower than that through the region where channel flow was not induced. In addition, time-variations of overall heat transfer coefficient of packed bed at different flow rates were obtained.

Keywords: Ice thermal storage, Magnetic resonance imaging, Local heat flux measurement, Freezing

1. 緒 論

氷蓄熱用球状カプセル充てん層の蓄・放熱特性を向上させるには、入口・出口温度差による蓄熱槽全体での伝熱特性を把握するだけではなく、充てん層内の不均一流動による局所熱伝達分布をも考慮して、流路構造やカプセル充てん構造などを設計する必要がある。球状カプセルをランダムに充てんさせた層内では不均質な空隙構造となり「吹き抜け」と呼ばれる局所的に高流速領域が形成され^{1), 2)}、これまでの均一流動を前提とした充てん層内の粒子・流体間熱伝達の実験的研究では不均一流動場での局所伝熱特性を適切に評価できない。このため、不均質な多孔質内の局所流動場及び伝熱特性を計測する必要性が指摘されていた^{3)~6)}。

これまでに充てん層内及び蓄熱材内の流動や伝熱特性の計測が数多く試みられてきた^{3)~14)}。これら従来の計測法に対して、充てん層内部の空隙構造と共に内部流動場を三次元的に計測できる新たな手法として磁気共鳴イメージング (MRI) 装置がある^{15), 16)}。この MRI を氷蓄熱用球状カプセル充てん層の凍結観測に用いれば、内部空隙構造や流動場の把握のみならず、カプセル内の水の凍結速度の計測からカプセル表面での熱流束分布を算出することが可能となる。すなわち、MRI 計測によって充てん層内の空隙構造・流動

場および局所熱流束分布の把握が初めて可能となる。

本研究では、熱流束計測の定量性を確認するために、一様流中でのカプセル内の凍結挙動を計測し、カプセル内側壁面から半径方向に進行する氷の凍結速度からカプセル表面での局所熱流束分布を算出した。その結果と従来の通電加熱による測定結果¹⁷⁾との比較を行なった。また、本計測法では生成した氷内部での周方向の熱拡散を無視しているため、これによる熱流束計測精度の低下を数値解析を行なうことによって評価した。さらに、この熱流束計測法をカプセル充てん層内の伝熱計測に適用し、充てん層内での不均一流動と局所熱流束分布の計測を行ない、この結果を基にして充てん層の熱通過率の算出と、充てん層内の吹き抜け領域での熱通過有効度の評価を行なった。

2. 単一カプセルでの熱流束計測

カプセル内部に充てんされた水は周囲からの冷却によって凍結し始め、氷はカプセル内側壁面から中心に向かって成長する。球状カプセルにその中心を原点とする Fig. 1(a) に示す球座標系 (r, θ, ϕ) を適用することによって半径方向 r の凍結速度からカプセル表面での局所熱流束分布 $q_r(r, \theta, \phi)$ を算出することが可能となる。ここでは、この新しい熱流束計測法の実験的な定量評価と、カプセル及び氷の内部での (θ, ϕ) 方向への熱拡散を無視したことによる局所熱流束計測時の空間分解能および計測精度の低下を数値解析によって評価した。

本研究では、MRI 装置として Varian 社製 Unity INOVA 300 (7.05T, 内径150mm縦型超伝導磁石, Doty社製傾斜磁場コイルと内径60mmのRFプローブ) を使用した。

* 原稿受付 2000年5月19日

¹ 慶應義塾大学 理工学部

² 東京工業大学大学院 総合理工学研究科

³ 正会員 電力中央研究所 横須賀研究所

⁴ 東京工業大学 炭素循環素材研究センター

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus to measure local heat flux distribution from the surface of single capsule under uniform flow.

2.1 一様流中に置かれた球カプセルの局所熱流束計測

2.1.1 実験装置およびMRI計測条件

直径20mmの球状ポリプロピレンカプセルを内径44mmの円管内に配置し、その周囲に温度 T_f の流体を一様に流すことによってカプセルを冷却する。この状態でカプセル内部の水が時間と共に凍結していく様子をMRIにより計測した。用いた実験装置をFig. 1 (b)に、カプセルの形状と内部充てん物をTable 1に示す。

Table 1 Capsule conditions (20 mm).

Material	Polypropylene
Outside diameter	19.8 mm
Thickness	1 mm
Inside packing material	Distilled water + AgI + N ₂
Total mass	gas 3.6 g

冷却用流体として水素原子Hを含まないフッリナート(3M製FC-40)を使用し、流動による画像のひずみを最小限に留めた。凍結を開始させるために冷却用流体の温度 T_f を -3.6 に保ち、過冷却状態のカプセル内部の様子を高速画像法(gems)によって15秒毎に観測し続けた。この条件下では、およそ10分程度で過冷却状態が解除され、樹枝状結晶がMR画像に現れる。この樹枝状結晶が確認されたら、直ちに流体の温度を $T_f = -1.3$ にまで上昇させ、実験が終了するまで保持した。この際の流体温度の上昇には約2分程度を要した。

単一カプセル内の凍結挙動を最も高画質で、しかも多断面画像での計測が可能な Spin Echo Multi-Slice シーケンスを用いて計測した。主なMRI計測パラメータをTable 2に、MR画像の断面方向をFig. 1 (c)に示す。

2.1.2 球全体での平均熱流束 q_m

凍結開始時刻を $t = 0$ sとし、球の中心を通る水平断面で取得されたMR画像の一例を時系列でFig. 2に示した。各MR画像は計測開始から終了までの時刻の中間値を代表時刻 t として表した。白色の円形領域が水であり、氷及びカプセルは映らないために黒色で表されている。白色の領域が時間の経過と共に徐々に小さくなっていく様子から、カプセル内壁から徐々に中心に向けて凍結が進行して行き、水がなくなる $t = 6340$ s で凍結が完了したことが分かる。また、白色の水領域中に見える線状の黒色部分は過冷却解除時に生成した樹枝状結晶であり、凍結中にその形状が変化

Table 2 Acquisition parameters of MRI to measure local heat flux distribution from single capsule in uniform flow.

Measured volume (x, y, z)	23.0mm × 23.0mm × 7.5mm
Pixel number (x, y)	128 × 128
Slice thickness (z)	0.5mm
Number of slice	35 slice images
Spatial resolution	0.18 × 0.18 × 0.5mm ³
Acquisition time	7.5 min
Sequence	Spin Echo Multi-Slice

Fig. 2 Obtained images of remaining water in the single capsule at the time t .

することはない。

これら時系列のMR画像を基に各時間 t ごとのカプセル内全域での残存水分量 m_{water} の変化を算出し、相変化に要する潜熱量をカプセル表面積で割ってカプセル全体での平均熱流束 q_m を求めた。その結果をFig. 3に示す。この図から平均熱流束 q_m は、カプセル内の氷の成長に伴う熱抵抗の増加によって時間と共に初め緩やかに減少して行き、凍結完了直前でカプセル形状が球形のために熱流束は急激に減少する。この傾向は神谷ら⁹⁾の実験結果とほぼ同じであった。また、氷による熱抵抗の影響が小さい凍結初期の平均熱流束 q_m は従来の実験値¹⁷⁾とほぼ等しいことから、この手法が定量的な熱流束の計測法として有効であると言える。

Fig. 3 Time-variation of averaged heat flux (q_m) over the whole surface of the single capsule.

Fig. 4 (a) Local heat flux map $q(\theta)$ of the single capsule at $t=475$ s, (b) Time-variation of heat flux distributions $q(q)$ averaged over the θ direction.

2.1.3 局所熱流束分布の計測

及び θ 方向をそれぞれ8, 16分割して算出された, 時刻 $t=475$ sでの局所熱流束分布 $q(\theta, r)$ の三次元表示を Fig. 4 (a)に示す. また, θ に対して平均化した熱流束分布 $q(r)$ の時間変化をFig. 4 (b)に示す. これらの図より, 時刻 $t=475$ sにおけるよどみ点領域 ($\theta = 0 \sim \pi/4$) での局所熱流束 q_{stag} は 260 W/m^2 に達し, 計測誤差が大きくなるカプセル上部の気泡領域 ($\theta = 0 \sim \pi/4$) を除いた領域 ($\theta = \pi/4 \sim \pi$) に注目しても, 下流に行くに従って熱流束が減少していく傾向を示している. また, 熱流束分布 $q(r)$ は, 氷の熱抵抗が増加するために, 時間と共に低下していく様子が見られる. これらの結果から, 本計測法によってカプセル表面での局所熱流束分布の傾向が適切に計測されていることが分かった.

2.2 半径方向凍結速度を基にした局所熱流束算出法の誤差評価

上記の局所熱流束算出法では, (r, θ) 方向の熱拡散を無視して, 半径 r 方向の凍結速度から球カプセル表面での熱流束分布を算出した. この算出法ではカプセル内壁からの氷が成長し, 厚くなった場合には (r, θ) 方向の熱移動が無視できなくなるために局所熱流束計測の空間分解能および計測精度を低下させる. また, 上記の熱流束算出法では, 氷内及びポリプロピレン球殻内の顕熱は凍結潜熱に比べて1/100程度であるために熱移動量からは無視している. ここでは, これらの熱拡散と顕熱の効果が熱流束計測の空間分解能や測定精度に及ぼす影響を調べるために, Fig. 5

Fig. 5 Heat flux distribution at capsule surface used for error analysis to evaluate the effect of ice thickness due to thermal diffusion in the ice for q direction on the local heat flux measurement.

に模式的に示したように, 球カプセル表面に熱流束分布 q_{given} を与えて相変化挙動を含めた非定常二次元熱伝導方程式を解き, これを基に半径 r 方向のみの凍結速度から得られる熱流束分布 q_{cal} と与えた熱流束分布 q_{given} とを比較することによって誤差 dq_{error} の評価を行なった.

2.2.1 解析法と誤差の評価法

この節で行なう解析では, カプセル内部は水で満たされており, カプセルはその中心を原点とした球座標系で取り扱え, 過冷却が生ずることなく融点 (0°C) で速やかに凍結を開始するとした. また, カプセル外表面では流体によって Fig. 5に示されている熱流束分布 q_{given} で冷却されるとした. この分布 q_{given} は一様なヌセルト数 Nu_b に加えて, よどみ点 ($\theta = 0$) を対称軸とした θ 方向へのガウス分布で表される Nu 数分布によって与えられ, 最大値 Nu_g と分散 σ_{Nu} によって表されるガウス分布は, 球周りの物質伝達率⁽⁸⁾との比較から本解析での Nu 数分布として近似的に適用ができるとした. これらの仮定を基に, 氷・水及びポリプロピレン球殻内部での球座標系二次元非定常熱伝導方程式は以下のように表される.

$$\frac{\partial(\rho_i c_{pi} T)}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_i r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\lambda_i \sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + S \quad (1)$$

ここで, ρ は密度, c_p は比熱, λ は熱伝導率, T は温度, S は相変化の際に発生する潜熱 L を表す発熱項であり, 添え字 i は対象とする範囲によって氷, 水およびポリプロピレンを表す. また, 境界条件は対称条件とカプセル外表面での熱流束値として以下の式を用いた.

$$\begin{aligned} r=0; \partial T / \partial r &= 0 \\ r=r_{\text{out}}; q_{\text{out}} &= \frac{\lambda_f Nu (T_f - T_{\text{out}})}{2r_{\text{out}}} \\ \theta=0, \pi; \partial T / \partial \theta &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

ここで, 添え字のoutはポリプロピレン球殻の外表面を, f は冷却用流体を示す. 初期条件は, カプセル内部の水の温度を 0°C とし, ポリプロピレン球殻内部の温度分布をカプセル外表面から一様な Nu_b により放熱すると仮定して近似的に得られる温度分布により与えた.

これらの基礎方程式および境界・初期条件を用いて数値解析を行なう手法として, 氷・水界面にはVOF法 (Volume of Fluid Method)⁽⁹⁾を, 熱移動量にはコントロールボリューム法⁽²⁰⁾を用いて差分化を行い, カプセルおよびその内部の温度分布と凍結速度分布を解いた. また, 得られたポリプロピレン球殻の温度分布から熱流束分布 $q_{\text{given}} (= q_{\text{out}})$ が算出できる.

氷の成長と共に θ 方向の熱拡散が現れ始め, 半径 r 方向の凍結速度から算出される熱流束分布 q_{cal} は, Fig. 5の破線で示したように, 与えた熱流束分布 q_{given} に比べて θ 方向に広がり, よどみ点近傍 ($\theta = 0$) での熱流束値が小さくなる. ここでの誤差評価法としてはよどみ点の熱流束に注目し, 半径 r 方向のみの凍結速度から得られる熱流束分布 $dq_{\text{cal}} = q_{\text{cal}} - q_{\text{given}}$ と与えた熱流束分布 $dq_{\text{given}} = q_{\text{given}} - q_{\text{cal}}$ との差 dq_{error} を

$dq_{given}|_{\theta=\pi}$ = で割った誤差の割合によって評価を行なった．

$$\frac{dq_{error}}{dq_{given}|_{\theta=\pi}} = \frac{dq_{given}|_{\theta=\pi} - dq_{cal}|_{\theta=\pi}}{dq_{given}|_{\theta=\pi}} \quad (3)$$

また、氷成長速度を実験と等しくするために、一様ヌセルト数 Nu_b を50、ガウス分布の頂点でのヌセルト数 Nu_g を100、ガウス分布の分散 σ_{Nu} を0.1 から0.3 と仮定して解析を行なった．

2.2.2 解析結果

よどみ点での熱流束の差 dq_{error} は、氷厚さの薄い凍結初期には小さいが、時間の経過と共に氷厚さ w_{ice} が増加して方向の熱拡散の効果が現れてくるために、大きくなる．ここでは、凍結量の基準として氷厚さ w_{ice} をポリプロピレン球殻の内径 r_{in} で規格化した値 w_{ice}/r_{in} をとり、この凍結率 w_{ice}/r_{in} と熱流束の誤差の割合 $dq_{error}/dq_{given}|_{\theta=\pi}$ = との関係を図6に示した．この図から、 σ_{Nu} が小さく、熱流束分布が急峻であるほど、その誤差は大きくなることが分かる．球周りの熱伝達と同程度の Nu 数分布の分散 σ_{Nu} は0.3 程度であり、本計測手法での計測誤差を20%まで許容できるとすれば、この図から凍結率 w_{ice}/r_{in} が約0.2程度まで本計測手法が適用可能であると言える．この値は前述の熱流束計測において時刻 $t = 2500$ s に対応しており、この時刻が本熱流束計法において熱拡散の影響を無視できなくなる制限値となる．

また、一様熱流束分布を与えた場合 ($Nu_b = Nu_g$) に計算される誤差の割合 $dq_{error}/dq_{given}|_{\theta=\pi}$ = は上記の誤差に比べて非常に小さいことから顕熱を無視して熱流束分布を算出しても良いことが分かった．また、ここで行なった解析結果はカプセル直径が異なる場合にも適用することができ、後述する直径10mmのカプセルであっても20mmのカプセルと形状が相似であるために熱拡散による測定誤差は同じ程度となる．

3. カプセル充てん層内の熱伝達計測

前章の熱流束計測法を球状カプセル充てん層に適用して充てん層内の局所熱流束分布を計測し、さらに位相法^{2), 15)}による充てん層内の軸方向流速分布の計測を行った．これら

Fig. 6 The relationship between ice thickness and evaluated error of heat flux measurement due to thermal diffusion in the ice for q direction.

Fig. 7 Schematic of experimental apparatus to measure heat flux map in packed bed of spherical capsules.

の結果を基に充てん層の伝熱特性を表す熱通過率と、不均一流動を示す吹き抜け領域での熱通過有効度の算出を行なった．

3.1 実験装置およびMRI計測条件

直径が10mmの球状カプセルを内径44mmの円管内に充てんし、氷蓄熱充てん層とした．用いた実験装置の概略図を図7(a)に示す．この充てん層では、熱流束計測を行なう領域のカプセルのみに蒸留水とヨウ化銀を充てんし、それ以外のカプセルには冷却用流体と同じFC-40を充てんして凍結潜熱の影響をなくした．水を充てんしたカプセルの総数は118個であり、そのカプセル充てん状態が図7(b)に三次元的に示されている．この上部から見た図から、充てん層の中心軸付近に軸方向に貫通した大きな空隙があることが分かる．以後の計測によりこの領域に「吹き抜け」と呼ばれる高流速領域が形成され、この「吹き抜け領域」とその他の領域での熱流束を比較することにより蓄熱充てん層としての熱通過有効度の評価を行なった．

ここで行なう蓄熱充てん層内の凍結実験では、計測領域内の全てのカプセルを同時に凍結させ、個々のカプセル内の凍結挙動から局所熱流束分布を算出する必要がある．そこで、冷却用流体の入口温度 T_{in} を徐々に -2 °C まで下げ、過冷却状態を保持したままカプセル内の水を予備冷却する．その後、流体温度を急速に $-5 \sim -6$ °C に低下させて過冷却状態を解除し、凍結実験を開始した．ここでは流体温度を低下させ始めた時刻を $t = 0$ s とした．また、この際の流体温度の低下には約1分程度を要した．

また、計測領域の近くには熱電対を配置できないため熱流束計測を行う領域（テストセクション）入口での冷却用流体の代表温度 T_{pack} を、実験装置の周囲から流入する熱量とダミーカプセルの顕熱量を考慮して推定する必要がある．その方法として、予め相変化が生じない温度範囲内の流体の入口温度 T_{in} と出口温度 T_{out} を計測し、それらの計測位置のほぼ真中にある T_{pack} 位置では温度差の半分、すなわち $(T_{out} - T_{in})_{Un-freezing}/2$ だけ温度が上昇すると仮定した．これより、 T_{pack} は T_{in} を用いて以下の式により推算される．

$$T_{pack} = T_{in} + \frac{(T_{out} - T_{in})_{Un-freezing}}{2} \quad (4)$$

Table 3 Acquisition parameters of MRI to measure heat flux map of packed bed.

Measured volume (x,y,z)	50.0mm × 50.0mm × 43.0mm
Pixel number (x,y)	256 × 64
Slice thickness (z)	1.05mm
Number of slice	41 slice images
Spatial resolution	0.20 × 0.78 × 1.05mm ³
Acquisition time	2.6 min
Sequence	Spin Echo Multi-Slice

Table 4 Acquisition parameters of MRI to measure axial velocity map (v_z) of fluid through packed bed.

Measured volume (x,y,z)	50.0mm × 50.0mm × 41.0mm
Pixel number (x,y)	256 × 256
Slice thickness (z)	1.0mm
Number of slice	41 slice images
Spatial resolution	0.20 × 0.20 × 1.0mm ³
Acquisition time	2.3 min
Sequence	angio

また,この流体の代表温度 T_{pack} と凍結温度 $T_{\text{freezing}} (= 0)$ との差 ΔT を以下のように定義した.

$$\Delta T = T_{\text{freezing}} - T_{\text{pack}} = -T_{\text{pack}} \quad (5)$$

充てん層内熱流束分布の MRI 計測条件を **Table 3** に示す. 本実験では, 単一カプセル時の実験と比較してカプセル直径が小さく, 流体温度が低いために全カプセルが凍結を完了するまでの時間が約30分と短い. このため, 本計測では空間分解能よりも計測時間の短縮を重視し, y 方向の空間分解能を4分の1に低下させて, MRI 計測時間を2分40秒に短縮した.

充てん層内の空隙を流れる冷却用流体の速度分布計測では, FC-40に代えて20mmol/l 硫酸銅水溶液を等しいレイノルズ数で流し, **Table 4** に示した計測条件により軸方向流速分布の測定を行なった.

3.2 局所熱流束 q 分布と軸方向流速 v_z の計測結果

単一カプセルでの熱流束分布の算出と同様に, 各カプセルの (x, y) 方向をそれぞれ (4, 8) 分割して, 半径 (r) 方向の凍結速度から球カプセル表面での熱流束分布 $q(r, \theta)$ を各時間毎に求めた. 代表時刻 $t = 356\text{s}$ (平均凍結率 $w_{\text{ice}}/r_m = 0.10$) での充てん層内の各カプセル毎に算出された局所熱流束分布を **Fig. 8** に示す. 熱流束分布は各カプセル毎に, さらにはカプセルの上流・下流部で異なっており, 充てん層内の熱流束分布は一樣ではないことが分かる. 特に, 充てん層内の流れによって各カプセル上流部での熱流束が他の領域に比べて高く示されていることが分かる.

「吹き抜け」が形成されている領域とそれ以外の領域での熱流束値の相違を見るために, **Fig. 8** の局所熱流束分布を中心軸上の xy 断面で切り, 矢印で示した軸方向流速分布と合わせて **Fig. 9** に示す. さらに, この熱流束・流速分布の測定結果を中心軸からの距離によって A, B, C の三つの領域に区分し, 各領域での平均熱流束と流速の関係を **Fig. 10** に示した. これらの結果から, 中心部の領域 C では流速が非常に早く, 「吹き抜け」と呼ばれる高流速領域が形成されており, その領域ではカプセル表面からの熱流束分布が他の領域に比べてやや高くなっていることが分かる. このこ

Fig. 8 Heat flux map (q) from each spherical capsule at $t = 356\text{s}$ in packed bed. **Fig. 9** Sectional heat flux map (q) from each spherical capsule in packed bed at $t = 356\text{s}$, and axial velocity vector (v_z) of fluid through packed bed. **Fig. 10** Averaged heat flux ($\bar{q}$) and heat exchange effectiveness ($\phi_{e,i}$) of brine through each area A, B and C in packed bed at $v_{\text{mean}} = 5.8, 11.1 \text{ mm/s}$.

とは, **Fig. 9** の局所熱流束分布においても中心付近の各カプセルの熱流束が他の領域に比べて高いことからも見ることができる.

3.3 冷却用流体の熱通過有効度 η による評価

Fig. 9 に示されている「吹き抜け領域」が蓄熱充てん層

内に形成されている場合に、この不均一流動が充てん層の伝熱特性に及ぼす影響を評価するために熱交換器の特性評価に用いられる熱通過有効度を導入し、各領域での熱通過有効度の評価を試みた。

各領域を通過する冷却用流体の熱通過有効度 ϕ_{ei} を以下の式によって定義する。

$$\phi_{ei} = (\sum qS)_i / m_i c_p \Delta T \quad (6)$$

ここで、 q は各カプセル表面位置(,)での局所熱流束、 S は各カプセル表面位置(,)での表面積、 m は質量流量、 c_p は流体の比熱、添え字 i は A, B, C を示す。この式によって、各領域を通過する冷却用流体の伝達可能な最大の熱量がカプセル充てん層にどの程度の割合で蓄熱されたかを示すことができる。

上式を基に算出された各領域での熱通過有効度 ϕ_{ei} を Fig. 10 に示す。この図より吹き抜け領域 C では平均熱流束は他の領域に比べて高いものの、熱通過有効度は非常に低く、「吹き抜け領域」の形成によって充てん層内の熱通過有効度が大きく低下することが分かる。さらに、冷却用流体の平均流速 v_{mean} を変化させても「吹き抜け領域」での熱通過有効度の上昇はほとんど見られず、この「吹き抜け」によって冷却用流体が蓄熱充てん層と効率的な熱交換をすることなく通過してしまうことが定量的に示された。

3.4 熱通過率 K による熱応答性の評価

充てん層内の各領域での熱通過有効度による評価だけでなく、充てん層の蓄・放熱特性の一つとして重要な熱応答性についても評価を行なった。ここでは、冷却用流体の流入温度による熱流束の差をなくすために流体温度と融点 (0) との温度差 T で平均熱流束を除し、充てん層全体での平均熱通過率 K を以下のように定義して、平均流速 v_{mean} の相違による K の変化を検討した。

$$K = \bar{q} / \Delta T \quad (7)$$

二つの平均流速 $v_{\text{mean}} = 5.8, 11.1 \text{ mm/s}$ での実験から算出された熱通過率 K の時間変化を Fig. 11 に示す。ここで得られた K の時間変化は Fig. 3 の分布とは異なり、時刻 $t=0 \text{ s}$ での値は小さく、上昇の後に最大値に達する。この相違は、本実験での冷却開始時刻 $t=0 \text{ s}$ において全てのカプセルが一斉に凍結を開始する訳ではなく、過冷却状態が解除されるまでの時間はカプセル毎に異なるため、過冷却状態を保持

しているカプセルでは熱流束 q が見かけ上 0 と算出されることが原因となって生ずる。

この図より、平均流速 v_{mean} が大きい場合には高い熱通過率が得られ、短時間の内に蓄熱充てん層に蓄・放熱することが可能となり、熱応答性が良いことが分かる。したがって、Fig. 10 及び Fig. 11 の結果から、熱通過有効度を高くするには熱媒体を低流速で流動させれば良いが、熱負荷の急速な変動に対応して迅速に大きな熱量を取り出すには高流速で流動させる必要があるということが分かる。これらの定量的な充てん層内部の計測結果を元に、不均一流動に伴う伝熱特性の評価を行なうことが氷蓄熱槽の流路構造、カプセル形状や充てん構造などの最適な熱設計を行なうための重要な指針となると考えている。

4. 結 論

カプセル内部の凍結挙動を MRI を用いて計測し、以下に示す結論を得た。

- (1) カプセル内の半径方向凍結速度の計測により、カプセル表面での局所熱流束分布を定量的に計測することが可能である。また、氷厚さが熱流束計測の測定誤差に与える影響についての評価を行なった。
- (2) 模擬的な氷蓄熱用球状カプセル充てん層を製作し、各カプセル表面での局所熱流束分布と、空隙内を流れる冷却用流体の軸方向流速分布を定量的に計測することができた。
- (3) 計測された局所熱流束及び流速分布より蓄熱充てん層の熱通過率の時間変化および熱通過有効度が算出され、高流速領域の「吹き抜け領域」の熱通過有効度が非常に低いことが定量的に示された。

最後に、ここで示したように MRI を用いて充てん層内部の局所熱流束計測及び流速計測を行なうことによって、これまで定量的な評価が困難であった内部の不均一性をも考慮した伝熱特性の評価が行なえる可能性があることを付記する。

本研究は財団法人電力中央研究所と東京工業大学との共同研究として行なわれた。また、MRI は東京工業大学炭素循環素材研究センターの装置を使用した。関係各位に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 国井大蔵：熱的単位操作(上)、丸善(1976)、第 4 章。
- 2) 小川邦康、横内康夫、平井秀一郎：充てん層内流動と空隙構造の相関(第一報：MRI による軸方向流速分布の計測と軸方向チャンネル流の可視化)、日本機械学会論文集(B編)、Vol. 66, No. 642 (2000) pp. 445-452。
- 3) 増岡隆士：多孔質内の伝熱、伝熱研究、Vol. 28, No. 108 (1989) pp. 147-161。
- 4) Kunii, D., Suzuki, M.: Particle-to-fluid heat and mass transfer in packed beds of fine particles, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 10 (1967) pp. 845-852。
- 5) 関信弘、福田尚一郎、宇佐美優、平賀俊哉：水滴冷却を受けた加熱多孔質層内の伝熱挙動、日本機械学会論文集(B編)、Vol. 49, No. 448 (1983) pp. 2821-2829。
- 6) 稲葉英男・福田武幸：球状粒子充てん水平円筒形蓄熱槽の非定常放熱特性、日本機械学会論文集(B編)、Vol. 51, No. 470 (1985) pp. 3183-3190。

Fig. 11 Time-variations of overall heat transfer coefficient (K) over the whole packed bed at $v_{\text{mean}} = 5.8, 11.1 \text{ mm/s}$.

- 7) 総論として, Kaviany, K. : Principles of Heat Transfer in Porous Media, Second edition, Springer (1995).
- 8) 岩佐薫, 椎名保顕, 稲垣照美 : 蓄熱カプセル内相変化流体の対流による融解に関する研究, 可視化情報, Vol. 19, No.75 (1999) pp. 41-45.
- 9) 神谷是行, 栗原茂 : 球カプセル氷蓄熱材の蓄・放熱特性 (第1報: 凝固過程の可視化と凝固モデル), 空気調和・衛生工学会論文集, No.67 (1997) pp.67- 74.
- 10) Sederman, A. J., Johns, M. L., Alexander, P., Gladden, L. F. : Structure-flow correlations in packed beds, Chem. Eng. Sci., Vol. 53, No. 12 (1998) pp.2117-2128.
- 11) Shattuck, M. D., Behringer, R. P., Johnson, G. A., Georgiadis, J. G. : Convection and flow in porous media. Part 1. Visualization by magnetic resonance imaging, J. Fluid Mech., Vol.332 (1995) pp.215-245.
- 12) Kutsovsky, Y. E., Scriven, L. E., Davis, H. T. : NMR imaging of velocity profiles and velocity distributions in bead packs, Phys. Fluid, Vol.8, No.4 (1996) pp.863-871.
- 13) Rajanayagam, V., Yao, S., Pope, J. M. : Quantitative magnetic resonance flow and diffusion imaging in porous media, Magnetic Resonance Imaging, Vol.12, No.5 (1995) pp.729-738.
- 14) Feinauer, A., Altobelli, S. A., Fukushima, E. : NMR measurements of flow profiles in a coarse bed of packed spheres, Magnetic Resonance Imaging, Vol.15, No.4 (1997) pp.479-487.
- 15) 総論として, Callaghan, P. T. : Principles of nuclear magnetic resonance microscopy, Oxford University Press (1991)
- 16) Reviewとして, Caprihan, A., Fukushima, E. : Flow measurements by NMR, Phys. Repts., Vol.198, No.4 (1990) pp.195-235.
- 17) Yuge, T. : Experiments on Heat Transfer from Spheres Including Combined Natural and Forced Convection, Trans. ASME, J. Heat Trans., C, Vol.82, No.3 (1960) pp.214-220.
- 18) Clift, R. J.R. Grace, M.E. Weber : Bubbles, Drops and Particles, (1978) pp.117.
- 19) Hirt, C. W., Nichols, B. D. : Volume of fluid method for the dynamics of free boundaries, J. Comp. Phys., Vol.39 (1981) pp.201-225.
- 20) Suhas V. Patankar著, 水谷幸夫, 香月正司訳 : コンピュータによる熱移動と流れの数値解析, 森北出版, 1985.