不凍化蛋白質を利用する氷のスラリー化と低温蓄熱への応用の研究*

Svein GRANDUM^{*1}, 矢部 彰^{*2}, 中込和哉^{*3}
田中 誠^{*4}, 竹村文男^{*4}, 小林康德^{*5}
池本光志^{*6}, Per-Erling FRIVIK^{*7}

Investigation of the Characteristics of Ice Slurry Containing Antifreeze Protein for Ice Storage Applications

Svein GRANDUM, Akira YABE, Kazuya NAKAGOMI,
Makoto TANAKA, Fumio TAKEMURA, Yasunori KOBAYASHI,
Mitsushi IKEMOTO and Per-Erling FRIVIK

Ice slurry systems have recently attracted much attention in Japan for their ability to reduce electricity peaks caused by high energy-consumption by air-conditioners in the daytime. While conventional storage systems involve compact ice generation, these days ice slurry systems are introduced for transporting flowable ice in pipelines. Even though several methods for dynamic ice formation have been researched and developed, there are still problems related to the recrystallization of ice crystals for realizing long-term storage and long-distance transportation. Antifreeze proteins (AFPs) strongly influence ice crystal growth by adsorption to the ice crystal surface. In this paper, we present results from investigations of ice slurry made from an AFP solution, and of its thermophysical properties such as thermal storage and flowability characteristics, as well as the results from observation of crystal growth and ice slurry flow. For ice storage applications, the benefits of this additive are the ability to create well-defined crystal structures and the inhibition of recrystallization.

Key Words: Antifreeze Protein, Ice Slurry, Ice Storage

1. 緒 言

氷スラリーは、潜熱分を蓄えられることからエネルギー密度が大きく、冷熱供給システムおよび冷熱蓄熱のための有望な熱媒体であり、従来の顕熱を利用したシステムに比較して、装置、配管等の大幅なコンパクト化が期待される。これまで、さまざまな氷スラリーを作る手法が開発されてきたが^{(1)~(4)}、純水から氷を作る方法は基本的に、(1)冷やされた金属表面での薄膜製氷、(2)減圧タンク内での製氷、(3)過冷却水を用いた製氷、(4)冷媒相互の直接接触による製氷、(5)微小気泡を用いた製氷の五つの方法に分類される。またそのほかにも、クラスレートや重合体および有機物液体を利用した氷スラリーシステムが検討されている。しかし、長期蓄熱と遠距離輸送を行うための大き

な課題として、氷の再結晶や過冷却解除による管路の閉そくを防止する技術の確立が挙げられる。本研究はこの再結晶の問題に対する解決法の確立を目的としており、再結晶しにくい氷を作る技術として不凍化蛋白質(Antifreeze Protein, 以下 AFP)の機能を活用する方法を提案するものである。

南極や北極に住む魚や昆虫は、不凍化蛋白質が血液中に存在し、血液の凍結点温度を低下させることによって零度以下の環境でも生活している⁽⁵⁾⁽⁶⁾。このような蛋白質はおもに Antifreeze protein (AFP) や Antifreeze Glycoprotein (APGP) として知られており、凍結点温度を凝固点降下により低くする塩、糖またはグリセロールなどの溶存物質と異なり、凝固点降下の作用でなく少量で凍結点温度を低下させることができる⁽⁵⁾。AFP と APGP の分子構造は異なるが、不凍化挙動および氷結晶の成長は類似しており、氷結晶開始時には、二次元的な結晶成長を抑制し、c 軸方向の縦に長い結晶となる。これらの蛋白質は氷の結晶表面と結び付き、結晶の成長を妨げる。らせん状の AFP の水分子に対する結合メカニズムはいまだ明らかではないが、氷の水素結合のもつ静電的電気双極子モーメントが、ミクロな領域において AFP のもつ電気モーメントと相互作用し、AFP が氷の結晶に付着する

* 原稿受付 1996 年 6 月 25 日。

^{*1} 筑波大学大学院(☎305 つくば市天王台)。^{*2} 正員、通商産業省工業技術院機械技術研究所(☎305 つくば市並木1-2)、筑波大学構造工学系。^{*3} 富山医科薬科大学(☎930-01 富山市杉谷2630)。^{*4} 正員、通商産業省工業技術院機械技術研究所。^{*5} 正員、筑波大学構造工学系。^{*6} 通商産業省工業技術院生命工学技術研究所(☎305 つくば市東1-1)。^{*7} ノルウェー国立工科大学(7034, Trondheim, Norway)。

Fig. 1 Amino acid and DNA sequences of molecular biologically synthesized AFP (42 amino acids and molecular weight of 3700 Dalton) based on the amino acid sequence of AFP found in Winter Flounder (37 amino acids and molecular weight of 3200 Dalton). The periodic Threonine (T) residues that are aligned on one side of the helix axis are marked with arrows. The hydrophobic residues Alanine (A) are dominating in between. The underlined nucleotides, GGATCC and GAATTC, are restriction enzyme BamHI and EcoRI sites respectively. *** shows the termination codon. Extra amino acids at both ends, GS and NSS, are due to the connective nucleotide sequences between the AFP-DNA and the pGEX vector

という機構が有力視されている⁽⁷⁾。その結果、氷の結晶を覆った AFP の外側は疎水性であるため、氷は二次元的には成長できず、らせんの軸方向に針状の結晶となる。このようにしてできる互いに付着しない針状の氷結晶は、あたかも氷スラリーのように振る舞う可能性がある⁽⁷⁾。著者らはこのスラリー状氷を搬送可能な蓄冷媒体として使用することを提案し、可能性を基礎的に検討している。特に静電場の熱・物質伝達促進現象についての数々の研究成果を活かせば⁽⁸⁾、分子スケールでの静電場の電気熱流体力学的影響も期待できる。例えば、10 mm あたり 100 kV の電圧をかけた場合の電界強さは 10 Å では 10 mV の電圧に相当し、mV オーダの電圧を発生させることは比較的容易である。このことから、AFP による氷の成長抑制も分子スケールというミクロな電気流体力学 (EHD, Electrohydrodynamics) 現象の一つとしてメカニズムを解明し、今後、AFP のメカニズムを活用する応用研究へ発展させる第一歩として EHD 的観点から基礎的に研究している。

AFP は低い濃度においても再結晶を抑制でき、しかも生物中の蛋白質であるため食糧の保存に使用でき、また、低温の外科手術や低温地域で石油をパイプライン輸送するときに発生する石油中の水分の凝固による閉そく事故の回避への応用なども期待でき、今後の発展が期待されている。

本論文では、不凍化蛋白質水溶液を用いる氷スラリーの蓄冷技術への適用可能性を検討するため、重要となる熱工学的特性である蓄冷、流動特性を実験的に検討した。特に温度と蓄冷エンタルピーの関係を示す蓄冷特性を明らかにし、また粘度計および循環ループによる流動抵抗を測定して、流動特性を明らかにした。

2. AFP の製造および実験方法

2.1 AFP の製造 本研究では、北極に住むひらめ的一种である Winter Flounder (*Pleuronectes americanus*) から最も分子量の小さい AFP [分子量: 3200⁽¹¹⁾] を選び使用した。AFP は単一らせんで、長さは約 50 Å、らせんの直径は約 10 Å である⁽⁷⁾⁽⁹⁾。AFP の反復した極アミノ酸 (親水性) はらせんの同じ側に集まり、らせん軸に対し、多少斜めに並んでいる。この分子は疎水性の Alanine (A) の含有量が比較的多く (~60%)、おもにらせんの反対側に集まる⁽⁹⁾。アミノ酸の構造を図 1 に示す。本研究では、氷スラリーを形成するため以下の三つの方法により、AFP を製造した。

(1) 化学的な合成 Whinter Flounder から得られた 37 アミノ酸 AFP (図 1) の構造情報⁽¹¹⁾ を基に他の二つの方法で製造した AFP の参考とするために AFP の化学的合成を依頼した。このような化学合成はアミノ酸残基が長くなるほど工程数が増えてコストが飛躍的に増大する。試料は高速液体クロマトグラフィー (HPLC) を用いて分析し、その結果 96% 純度を示した。

(2) 大腸菌による分子生物学的な合成 アミノ酸をコードする DNA 情報を利用して分子生物学的に大腸菌を利用して蛋白質を製造する方法は、上記の化学合成では不可能な分子量の大きな蛋白質でも製造できる点と、大腸菌の培養量を増やすだけで生産規模を大きくできる点に大きな利点がある。この方法で図 1 に示す 42 アミノ酸 AFP を以下のような手順で製造した。まず AFP をコードする nucleotides の両端に Vector と結合できるように制限酵素部位 (bamHI ; GGATCC, EcoR I ; GAATTC) を導入した二本鎖

nucleotides を化学的に合成した。制限酵素部位を導入したため N 端 2 残基、C 端 3 残基のアミノ酸がつけ加えられた AFP が製造されることになったが、構造との関連から活性にはほとんど影響がないと考えた。蛋白質発現用ベクター pGEX 2 T の BamH 1-EcoR 1 部位に上記の nucleotides を導入し、pGEX (AFP) を構築した。大腸菌 (DH 5 α 株) に pGEX (AFP) を形質転換した後培養し、常法に従って IPTG (Isopropyl-1-thio- β -D-galactoside) を加えて蛋白質を発現誘導し、Glutathione-S-Transferase (GST) との融合蛋白質として AFP を製造した。細胞 lysate から採った crude extract を Glutathione-Sepharose 4 B Affinity column にかけて GST が結合した融合蛋白質から Thrombin を用いて GST と AFP の結合部を切断して AFP のみを溶出させた。溶出液を Sep-pak C 18 カートリッジで精製して HPLC にて定量したところ、化学合成品と同様の純度であることを確認した。なお、1 l の大腸菌培養液から 1.5 mg の AFP が得られた。本方法は化学的な合成法よりも安価であることから、以後高純度 AFP として実験に使用した。

(3) 魚の血液からの精製⁽¹²⁾ 魚の血液から分離精製して得られる AFP は、一般にその長さは異なるが形状および特性は類似している⁽¹⁰⁾。Winter Flounder の AFP (type I) を分析した結果を図 2 に示す。化学的に合成した AFP のピークの近傍に数個のピークが見られ、これは構造類似物質の混在の可能性を示していると推定された。この方法により作られた AFP は相対的に安価であり、多量を必要とするループ的な実験に使用した。

化学的に合成した AFP と魚の血液から精製された

Fig. 2 Comparison of the chemically synthesized AFP (continuous line) with the purified AFP from fish (discontinuous line) by High Performance Liquid Chromatography (HPLC). The several peaks are indicating the various AFP analogs that are included in AFP from purified fish blood

AFP は乾燥状態で保存した。溶解時にはいったん NaOH 溶液に溶解した後に HCl にて中和した。実験には 50 mM NaCl 溶液として使用した。これら三つの方法から得られた AFP は、同一条件とするため同一の NaCl 濃度とした。

2・2 氷核蛋白質 水溶液の過冷却度を小さくして、氷生成用冷熱発生に必要な動力を低減するため、氷核細胞から採れる氷核蛋白質を AFP 溶液に入れた。氷核蛋白質の濃度は 3×10^7 細菌細胞/ml AFP 溶液であり、これにより種結晶のない状態での氷核形成温度を約 -4.8°C まで上昇させることができた。なお、結晶成長の実験では、氷結晶がシードとなり容易に結晶成長が生じたので、氷核蛋白質を使用しなかった。

2・3 蓄冷特性 AFP のエンタルピーは示差走査熱量計 (DSC) により測定した。AFP 水溶液はアルミニウム製のサンプルカプセルに入れられ、比較物質である酸化アルミニウムと同一温度条件に置かれる。氷の融解時のエンタルピー変化を測定するときは、同一温度上昇速度で二つの容器への熱入力の変化が記録される。図 3 に、氷の融解時の記録例を示すが、図 3 中の点 (a) で融解が開始し、点 (b) で融解は完了し、点 (c) でサンプルの温度上昇は元の傾きに戻る。凝固プロセスにおける蓄冷量は、点 (a) からある温度までの比較参照物質との熱の出入りの差を積分して求める。また、示差走査熱量計の測定誤差は、熱出入りの測定誤差がノイズ $5 \mu\text{W}$ で入力の最大値の 2% に相当する。また、熱電対の誤差が $\pm 0.05^\circ\text{C}$ で、温度精度は $\pm 0.05^\circ\text{C}$ となる。

2・4 砂時計式粘度計による流動性の測定 流動性の指標として、後述するループ配管による粘性係数

Fig. 3 Measurement characteristics using the Differential Scanning Calorimeter (DSC) when melting

Fig. 4 Capillary tube viscometer used for experiments

の測定とともに、第1段階として、AFPの必要量を最小限に抑えられるように、砂時計式の細管粘度計を考案し、駆動方向を交互に変化させて実験した。また、粘度計全体は恒温棟に入れられ、 0.1°C 以下の精度で長時間維持されているので、温度条件は管径方向に一定で、また、氷の潜熱が大きいと粘性による発熱などの氷の融解への影響も小さいと考えられる。すなわち、既知のせん断歩度および細管内層流流体の圧力損失の測定により粘性係数を得ることができる。なお、細管の端面の影響が生じないように⁽¹³⁾に、細管長さと内径の比率を、100以上とした。せん断応力は垂直管に試料を流し、次式より得た。

$$\tau_w = \frac{D\Delta P_f}{4L} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

D : 細管の内径、

L : 細管の長さ

ΔP_f : 摩擦による圧力損失

である。

有効粘性係数 μ_e の算出には、層流の定常流体に対しポアズイユの式を適用する。

$$\mu_e = \frac{D\Delta P_f/4L}{8V/D} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、

V : チューブ長方向の平均線速度

である。式中、分子がせん断応力であり分母がせん断歩度 ($8V/D$) である。本式は Non-Newtonian 流体にも使用することができる。

なお、流体速度は、体積流量との関係で次式による得ることができる。

$$dQ = u 2\pi r dr \dots\dots\dots (3)$$

ここで

Q : 体積流量

u : 半径 r における線速度

Fig. 5 Ice slurry loop used for experiments

である。

粘性係数の算出に用いた装置を図4に示す。細管内径 2.5 mm 、長さ 220 mm である。砂時計の形状をした本装置は、温度制御された管内に挿入されている。氷スラリーは、細管内で AFP を凍結することで得られる。一様なスラリーを得るため、温度の時間変化を微小にして実験を行った。本研究では、有効粘性係数の見積もりを、式(2)を修正した次式により得た。

$$\mu_e(x) = \frac{D\Delta P_f(x)/4(L-x)}{8V(x)/D} \dots\dots\dots (4)$$

実験は、図4に示す細管中で AFP 溶液を凝固し氷スラリーを作り、その後徐々に冷却槽の温度を上げて、予定の温度条件を整える。次に、管の上下の圧力差を、氷スラリーが運動を開始するまで徐々に増大させ、せん断応力と速度こう配の比より、有効粘性係数 μ_e を求めた。おのおのの位置におけるスラリー速度 V は高速ビデオカメラにより、また圧力損失はマノメータにより測定した。

2.5 氷スラリーの管路の圧力損失測定実験

流動特性をより流速の速い範囲で精度よく求めるため、図5に示すループ状の実験装置を製作し、圧力損失を測定した。本循環ループ実験装置は、 -1°C に保持された低温恒温室内に設置し、外部との熱の出入りのない断熱条件を満足させている。また、ループ温度は外周のエチルアルコールクーラで制御し、平行に流れるエチルアルコールがループのガラスチューブを覆っている。スラリー温度は 0.01°C の精度を有するサーミスタを流れに挿入して測定した。圧力損失は 1 m の直線部の両端で圧力変換器で測定した。流量はポンプにより制御し、速度を 1.0 m/s まで変化させた。

氷のスラリー状態を確保できるように、実験は次の方法により行った。(1)核生成の温度において、3-4番の熱交換器で種結晶を作る。この温度は氷核蛋白質で決定した。(2)ポンプで種結晶を全体のループに分

配する。(3)1-2番および4-5番の熱交換器で種結晶から針状結晶を成長させる。(4)すべての熱交換器で温度制御を行い、氷スラリーの流れを開始する。(5)定常状態を得て、流体温度および圧力差を測定する。

3. 実験結果

3・1 氷結晶構造の観測 AFPの吸着で影響を受けた氷結晶成長はCoger⁽¹⁰⁾が検討している。1 mg/ml濃度の水溶液で氷結晶の抑制効果は十分であり、1 mg/mlから10 mg/mlの濃度間で種々の結晶構造を得ることができる。この場合、針状結晶が生成し、c軸方向と平行に成長することが多い。

氷結晶成長の観察により、氷スラリーへの外乱の影響を検討することができる。本実験は低温室(−5℃)で行い、偏光プレートと光学顕微鏡により結晶を観察した。氷結晶は定温環境状態でAFP水溶液に入れた氷の種結晶から成長した。

本研究では、AFPの場合に以下の現象を定性的に観察した。融点以上の温度から冷却し、AFPの溶液に種結晶が生成しない場合、核生成が欠乏するため、過冷は樹枝成長の臨界温度より大きい。したがって、結晶の成長は種結晶の挿入により急速となり、AFPは氷結晶の表面に吸着することのできないことが判明

Fig. 6 Characteristic needle-type ice crystals growing in parallel along the c-axis

Fig. 7 Needle type crystals after some mechanical disturbance. They exist as individual crystals, not connected to each other

した。

図6は、水溶液濃度5 mg/mlの特徴的な結晶、すなわち、AFPが氷結晶の表面に吸着された結果を示す。針状結晶はプリズムすくい面に沿って成長し、結晶に隣接した周囲で熱力学的なポテンシャルがあれば、ポテンシャルは局所的な凍結点以下の過冷に相当し成長を続ける。水溶液に多くの種結晶があれば、多くの針状結晶が生成される。機械的な外乱は針状部分を微小に分断するため、種結晶としての役目をするようになる。

図7は微小な外乱を受けた後の結果を示す。二つの結晶プリズムすくい面の間に結合状態は観察されない。また、温度が融点より低い場合、長い針状結晶の成長は止まり、融解も生じない。再結晶が生じないため機械的外乱の必要性も要らず、また氷スラリーがこの温度範囲内でそのままの状態を保つことから、これが氷蓄熱システムとしての応用を考えるとき重要である。

AFP水溶液による氷スラリー利用の熱交換器設計のために、過冷度が樹枝成長の臨界温度を超過することを避けるように、熱流束を制御することは大切である。

3・2 エンタルピーと温度の関係 図8は、溶解時におけるエンタルピーと温度との関係の水溶液濃度をパラメータとして示す。純水の結果も比較のため示した。水溶液中でAFPは、重量%で1%以下しか含まれていないので、熱容量への寄与は無視できると考えられる。また、DSCでの実験時に、水溶液の全潜熱量を、純水の潜熱量と比較して1%以内の精度で両者は一致したので、蓄えられたエンタルピー量が氷充てん率に等しいと解釈できる。AFPはNaClと同じ凝固点降下に対して、分子ベースで300倍から500倍、より効果的である⁽⁹⁾。凝固および融解エンタルピーが等しいとし、凝固点降下より濃度が6 mg/mlの場合

Fig. 8 Stored enthalpy as a function of melting temperature for 4 AFP concentrations. The freezing characteristics at 6 mg/ml is also indicated

Fig. 9 Effective viscosity as a function of derived shear rate $8V/D$. *) The -0.3°C case is measured by the slurry loop for an AFP concentration of 5 mg/ml. The liquid pure water value is shown for comparison

の推算結果も図8中に示した。融解の場合、 -0.3°C におけるエンタルピーは濃度にかかわらず一定であった。しかし、 -0.3°C 以下では濃度の影響が現れていることがわかる。すなわち、 -0.3°C では 100 kJ/kg 程度のエンタルピーを有し、これは純水潜熱の30%に相当する。一方、 -1.0°C では、エンタルピーの大部分は潜熱であり、6 mg/ml の場合 285 kJ/kg となり、純水潜熱の85%に相当する。

3・3 粘性係数および流路の圧力損失と温度の関係

図9は、水溶液濃度が6 mg/ml の場合、各温度における氷スラリーの有効粘性係数とせん断歩度 ($8V/D$) との関係を示す。初期せん断応力はビンガム流体の特徴を表している。温度の上昇に伴い、有効粘性係数は減少する。表1には、図8と図9を比較した結果を示した。表1中、 -0.6°C の場合、エンタルピーは 250 kJ/kg であり、純水潜熱の75%に相当する。

図10は、温度をパラメータとして圧力損失と速度の関係を示した。なお、純水の場合も示した。水溶液濃度は5 mg/ml である。スラリーの速度が増加することにより、スラリーおよび純水の圧力損失は増加する。 -0.30°C の場合、氷スラリーの圧力損失は 1 m/s の場合、水の2倍であって、 0.5 m/s の場合、水の約3倍である。これらの情報より、蓄冷システムとして設計するときの氷スラリーとしての適当な操作条件を見いだすことができる。

AFP の水溶液の氷スラリーシステムを検討するため、図5のループ形装置で得られた流動中氷結晶の写真を図11から図13に示した。静止状態で氷結晶が種結晶から成長した針状結晶(図11)では、チューブ中の流体は、ガラスの表面付近ばかりでなくすべての流体が過冷却状態である。図12は、ほぼ成長が完了した場合の結果を示した。スラリーが流れ、ポンプまたは

Table 1 Approximated correlations between ice slurry temperature (and ice content) and effective viscosity, compared to liquid pure water for 6 mg/ml AFP solution. The -0.3°C case is measured by the slurry loop. Shear rate value is 1000 s^{-1}

Slurry temperature	Content of ice	Effective viscosity ratio
-0.3°C	30%	2
-0.4°C	60%	100
-0.5°C	70%	250
-0.6°C	75%	500

Fig. 10 Pressure drop in the 1.0 m long horizontal glass tube as a function of slurry velocity for various temperatures. The pure water case is shown as the reference

Fig. 11 Photograph showing needle type crystals in the glass tube (inner diameter 6 mm) when growing from the distributed seed crystals

Fig. 12 Photograph showing needle type crystals in the glass tube (inner diameter 6 mm) after the growth from seeds is completed

Fig. 13 Photograph showing the typical situation of slurry flow in the loop (inner diameter 6 mm). The crystals are gathered at the center, while the liquid is lubricating the glass wall

結晶の干渉による外乱が長い針状結晶を短縮化している。図 13 は、典型的な定常スラリー流の結果を示した。氷結晶は管中心部に一様に流れ、液体が管壁を効果的に潤滑している。初期せん断応力が低いいため、30%の氷比率の場合はビンガム流体の特徴がほとんど見られない。しかし、圧力損失と粘性の結果からわかるように、大きなせん断歩度では流動しやすい傾向が現れている。図 13 に示すループ試験では、30%の氷充てん率が実現しているが、図 13 から判断できるように、針状結晶がさらにすきまなく多く集まることにより、氷充てん率はより増加することが期待できる。AFP が氷表面に吸着する際、結晶成長を抑制する機構について、ミクロ的に現象を把握できればさらに有利な結晶の構造を作成でき、流れの抵抗をさらに減少することが可能となると考えられる。

3・4 AFP 分子の安定性 氷蓄冷技術への AFP の利用において、蛋白質変質可能性の問題がある。蛋白質の分子は細菌により損害を受けることがある。しかし、AFP 水溶液を低温に保つことにより細菌の活動を少なくし損害から予防することができる。蛋白質変質を検討するため、ループ実験前後で液クロマトグラフィーにより測定した。新しいピークは現れず変質は生じていないと考えられる。また、数十回の実験の繰返し範囲内では針状結晶の成長を観察できた。さらに、液クロマトグラフィーによる測定により、分子量が変化しないことから、数十回の凝固・融解の繰返し実験、また、ローラポンプによる十数 h の循環試験により、AFP の切断等の劣化は生じていないことを確認した。

4. 結 論

不凍化蛋白質 (AFP) 水溶液を用いる氷スラリーの蓄冷技術への適用可能性を検討するため、分子生物学的に培養した蛋白質を用いて、蓄熱エンタルピーと温度の関係および有効粘性係数・圧力損失と温度の関係を実験的に求め、次の結論を得た。

(1) 不凍化蛋白質濃度 2 mg/ml から 8 mg/ml に対して、AFP 水溶液は比較的過冷却度が小さい場合、針状の水結晶を生成する。AFP が氷結晶表面に付着し、c 軸方向に成長することにより、お互い付着しない水結晶を生成しうる可能性が示された。

(2) 蓄えられる冷熱のエンタルピーは温度に大きく依存し、 -1.0°C (融解時) 潜熱分のほぼ全量を蓄えられる。それゆえ、 -1.0°C と融点 (約 -0.1°C) の間で運転する必要がある。

(3) 氷の 30% のエンタルピーをもつ氷スラリーの場合には、6 mm 内径で 1 m/s 流路の場合、水の場合の約 2 倍の圧力損失となる。また、ビンガム流体と同様な流動特性を示す。

(4) 蓄熱特性と流動特性を測定することにより、AFP 水溶液を用いる氷スラリーの蓄冷技術への適用可能性を明らかにした。

文 献

- (1) 守屋充・ほか 5 名, 日本冷凍協会論文集, **12-3** (1995), 253-384.
- (2) Osterkamp, T. E., *J. Hydraul. Div. ASCE*, (1978), 1239-1255.
- (3) Watanabe, Y., ほか 3 名, *Proc. 2nd Int. Conf. Multiphase Flow*, EN-25 (1995).
- (4) Paul, J., *Proc. Int. Insti. Refrig.*, (1992/93), 5, 1-10.
- (5) Feeney, R. E., ほか 1 名, *Ann. Rev. Biophys. Chem.*, **15** (1986), 59-78.
- (6) DeVries, A. L., ほか 1 名, *Biochim. Biophys. Acta*, **495** (1977), 388-392.
- (7) Knight, C. A., ほか 2 名, *Biophys. J.*, **59** (1991), 409-418.
- (8) Yabe, A., ほか 2 名, Active Heat Transfer Enhancement by Utilizing Electric Fields, *Ann. Rev. Heat Transf.*, (1996), chap. 4, 193-244.
- (9) Yang, D. S. C., ほか 3 名, *Nature*, **333** (1988), 232-237.
- (10) Cogger, R., ほか 2 名, *HTD-205, Heat Transfer in Phase Change ASME*, (1992), 37-46.
- (11) Chakrabartty, A., ほか 2 名, *J. Biolog. Chem.*, **264**-19 (1989), 11307-11312.
- (12) Entis, E. Z., *HTD-288, Adv. Heat Mass Transf. Biolog. Syst. ASME*, (1994), 55-56.
- (13) Skelland, A. H. P., *Non-Newtonian Flow and Heat Transfer*, (1967), 28-39, John Wiley & Sons Inc.