ISSN 2185-372X

日本機械学会熱工学部門　JSME Thermal Engineering Division

THERMAL ENGINEERING

TED Newsletter on the WEB

日本機械学会熱工学部門ニュースレター
TED Newsletter No.82 September 2017

目　次

1. TED Plaza

- 相変化エマルションの基礎物性および熱輸送特性
  川南　剛（明治大学）
- TBAB 水和物スラリーの流動と伝熱特性
  熊野　寛之（青山学院大学）
- 水中に置かれた水平な楕円形状伝熱管周りの凍結現象に関する研究
  廣瀬　宏一（岩手大学）王　強勝（岩手大学大学院）

2. 行事案内

- 部門企画行事案内
- 部門関連行事案内
- 国際会議案内

3. 第 95 期部門組織

4. その他

- 編集後記

TED Plaza

相変化エマルションの基礎物性および熱輸送特性

川南　剛

明治大学　准教授
理工学部機械情報工学科
kawanami@meiji.ac.jp

１．はじめに

エマルションとは，分散系の一種で互いに混ざり合わない 2 つの液体のどちらか一方が，分散相である微細粒子としてもう片方の連続相である液体中に分散した形態を有する流体の総称である．牛乳やマヨネーズ，化粧品の乳液など，エマルションは私達の身近なところで広く見受けられる系である．一方，工業分野においては，エマルションは燃料や加工油としては用いられてはいるものの，熱媒体としての用途はほとんど見られず，関連する研究（Inaba，2000，Schalbart, et al.，2010，Fumoto, et al.，2014）も多くはない．我々の研究グループでは，潜熱蓄熱技術の高度化および新たな熱機能性流体の提案を目指し，エマルション内の分散相をアルカン系相変化物質に置き換え，さらにその大きさをナノサイズまで微細化した相変化ナノエマルションを開発し，その熱物性および安定性に関して検討を加えてきた．一方で，相変化エマルションを熱媒体として利用する場合，分散する相変化物質の種類やエマルションの生成過程によって，熱媒体としてのエマルションの諸物性や熱的諸特性が異なることや，エマルション内でのミセルの形成など，内部の複雑な構造に加え相変化物質粒子の分散状態や相変化状態などの予測が困難であるなどの明らかにしなければならない点がいまだ残されている．さらに，エマルション状態では，分散する相変化物質の過冷却度が大きくなるというシステム効率を左右する問題も挙げられる．

本稿では，相変化エマルションが蓄熱および熱輸送技術の熱媒体として展開されることを念頭におき，その生成方法の確立，熱物性，および熱輸送特性についてまとめる．

２．相変化エマルションの生成方法

水と油などの互いに溶け合わない二種の液体を強く撹拌し混合すると，一方の液体（分散相）が他方の液体（連続相）の中に細かい粒状で分散する系としてエマルションが生成される．また，このときの操作を乳化という．一方の液体は水または水溶液であり，他方は油に代表される非水溶性の有機液体であることが一般的である．エマルションには大きく分けて二つの型があり，一つは水が連続相で非水溶性物質が分散相となる O/W（Oil-in-Water）型エマルション，もう一つは非水溶性物質が連続相で水が分散相となる W/O（Water-in-Oil）型エマルションである．

エマルションの生成方法は，大別すると機械的手法と界面化学的手法に分けることができる．機械的手法は，高剪断力型もしくは高圧型の乳化機（ホモジナイザー）により，分散粒子を微粒化するものであり，大規模大量生産に適した手法である．一方，界面化学的手法は，乳化剤（界面活性剤）の親水性・親油性バランス（HLB 値）を調整し，温度あるいは添加物により界面活性剤の会合体相を得て乳化するものであり，大規模な装置を必要とせず，生成にかかるエネルギー消量を小さく抑えることができる．以下にそれぞれの手法について簡単に述べる．なお，本研究で対象とするエマルションは，連続相が水である O/W 型のエマルションである．

2・1　転相温度乳化法（PIT emulsification method）

Shinoda ら（Shinoda and Saito，1969）により考案された手法であり，PIT 法とも呼ばれる．非イオン界面活性剤−油−水 からなる系では, 温度上昇に伴い界面活性剤の疎水性が増すことによって HLB 値が釣り合い，界面張力が極小となる温度が存在する．その温度を転相温度（Phase Inversion Temperature; PIT）と呼び，この温度付近で機械力により攪拌した後，合一に対して安定となる温度まで冷却することにより，微細なエマルションを得ることができる．

2・2　D 相乳化法（D-phase emulsification method）

Sagitani（Sagitani，1988）により提案された手法であり，非イオン界面活性剤−油−水系に，水溶性の多価アルコールを添加して HLB 値を調整し，D 相および O/D ゲルを得てエマルションを生成する手法である．D 相乳化法の乳化プロセスを図 1 に示す．図 1 は，O/W エマルションの構成成分をそれぞれ四面体の頂点に置き，それぞれの配合比率はそれぞれの頂点を 100%とし，その対辺を 0%としたものである．例えば図中の（a）点における溶液は，水と多価アルコールの混合液体が 50%，界面活性剤が 50%配合されていることを表している．そして（a）点から矢印に従って（b）点に至ることが意味することは，混合溶液の約 80%を油相が占めるまで油を加えていくということである．

D 相乳化法ではまず，水と多価アルコールと界面活性剤を含んだ溶液（a）に，油相を分散させることによって O/D ゲルエマルション（b）を形成させる．そしてこのゲルエマルションを水で希釈することにより O/W エマルション（c）とする方法である．図 1 の（a），（b），（c）点の各状態の写真を併せて示す．D 相乳化法では，PIT 法で重要となる生成時の厳密な温度管理が必要ないこと，攪拌に大きな機械力を必要とせず，生成にかかるエネルギー消費を小さく抑えることができることから，本研究で対象とする用途に適した方法と思われる．さらに，比較的広い HLB 値範囲の水溶性界面活性剤を使えることから，環境負荷も小さく一度に生成できる量も PIT 法より多い．

本研究グループでは，D 相乳化法によるエマルション生成を行っており，以後の検討結果もすべてこれにより生成されたものである．なお，本研究で生成されるエマルションを構成する物質には，連続相として精製水，相変化物質である分散相として n-ヘキサデカン，界面活性剤としてポリオキシエチレンソルビタンモノオレエート（$C_{64}H_{124}O_{26}$），多価アルコールとして 1,3-ブタンジオール（$C_4H_{10}O_2$）を使用している．本研究で界面活性剤として選定した非イオン界面活性剤であるポリオキシエチレンソルビタンモノオレエート（HLB 値 15.0）は，親水性が高い上，温度上昇に伴い疎水性を示す曇り点が常用温度付近になく，繰り返しの加熱および冷却によっても安定的にエマルション状態を保持できるものと思われる．

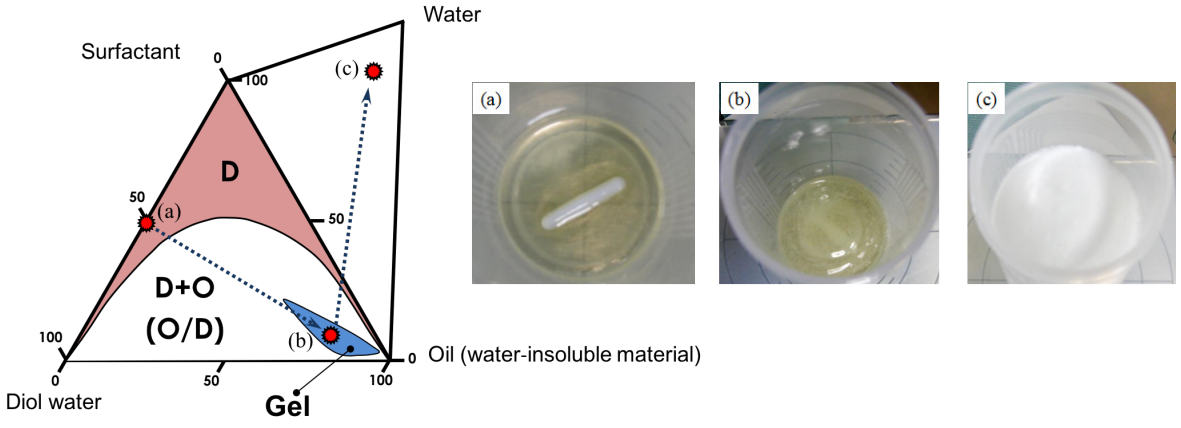


Fig. 1　Phase diagram for production of emulsion by D-phase emulsification method

3．相変化エマルションの基礎物性

3・1　エマルションの分散安定性

エマルションの粒径とその分散安定性は相関関係にあり，一般に粒径が小さくなればなるほどより分散安定性の高いエマルションとなる．そのため，生成したエマルションの粒径を把握して

おくことは重要である．本研究では，エマルション中に分散する n-ヘキサデカン粒子の大きさおよびその経時変化を知るため，n-ヘキサデカンの質量濃度 10mass%で生成したエマルションの粒径および粒径分布を完成直後から 65 日後まで計測した．粒径測定にはレーザー回折式粒子径分布測定装置（島津製作所製，SALD-2300）を用いた．図 2 に，生成直後のエマルション中に存在する分散相の粒径分布を示す．図の横軸は粒径を，縦軸は全体の粒子数に占める粒子数の割合をそれぞれ表す．エマルション生成直後では，最小粒径 0.333 μm，最大粒径 0.604 μm，最頻粒径 0.422 μmであった．一方，図 3 に，65 日経過するまでの最頻粒子径の推移を示す．図より，65 日経過後も粒子径の変化はほとんど見られず，安定性の高いエマルションが生成されていることが確認された．

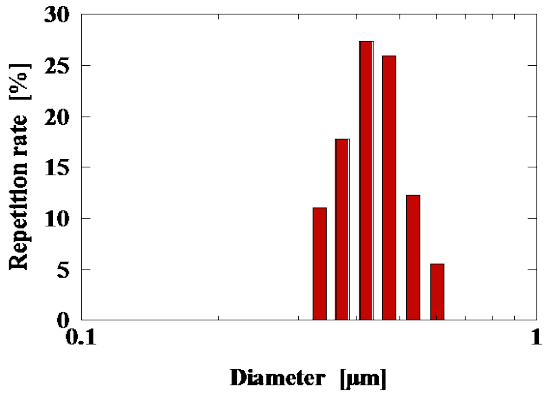


Fig.2　Reprtition rate of diameter of dispersed phase in emulsion

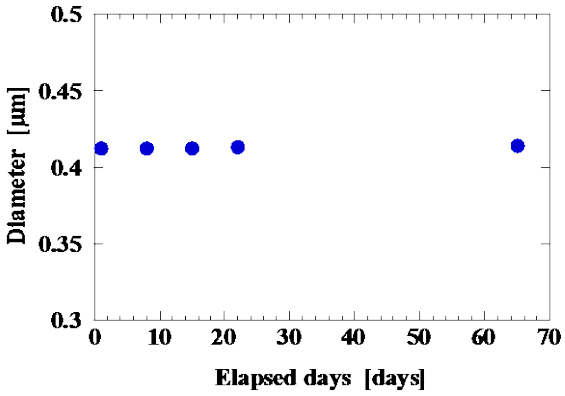


Fig.3　Stability of emulsion

3・2　粘度特性

本研究では，回転式粘度計（BROOKFIELD 製，DIGITAL VISCOMETER MODEL DV-Ⅱ Pro）を恒温槽と接続して温度制御を行い，25℃から 0℃に温度コントロールした環境下においてエマルションの粘性係数を測定した．粘度計の回転数は 200 rpm に設定した．図 4 に，n-ヘキサデカンの質量濃度 10mass%で生成したエマルションにおける粘性係数の測定結果を示す．比較対象として水の値も併せて記載した．図より，生成したエマルションの粘性係数は，10℃において水の 2.2 倍，20℃において水の 2.1 倍であることがわかった．

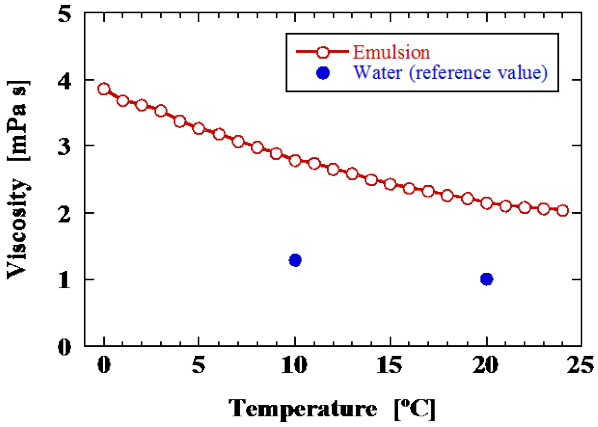


Fig.4　Viscosity of emulsion

3・3　相変化点および過冷却特性

相変化エマルションの相変化温度および過冷却度の大きさを把握するため，示差走査熱量計 DSC を使用して生成したエマルション中の n-ヘキサデカンの融解点および凝固点を測定した．なお，エマルション中に分散する n-ヘキサデカンの融点は 18.2℃であり，n-ヘキサデカンの質量濃度はこれまでの結果同様 10mass%である．エマルション中に分散した液体の相変化物質は，その粒径が小さくなるほど結晶化温度が低くなる（Coupland，2002）ことが知られており，本 DSC 測定の結果から，過冷却度の大きさについての検討も加えた．

図 5 に，DSC 測定結果を熱流と温度の関係で示す．図の縦軸は，DSC で測定される熱流量であり横軸は温度である．図中の上側の線は冷却時の，下側の線は加熱時の DSC 曲線であり，昇温速度 2 K/min と設定した．図より，冷却過程では，2℃近傍において潜熱吸収に伴うピークが観測されている．このピークは試料物質の凝固に伴う潜熱放出であるので，これはエマルションに含まれている n-ヘキサデカンの凝固熱であると考えられる．また，加熱過程の測定では，約 18℃の点にピークが表れており，ここで潜熱の放出が起こったと推察される．以上の結果より，本研究で生成したエマルション中に分散している n-ヘキサデカンの過冷却度は約 16K であることがわかった． この値は，E. Dickinson らの結果（Dickinson, et al.， 1991）とほぼ同様の結果となっている．

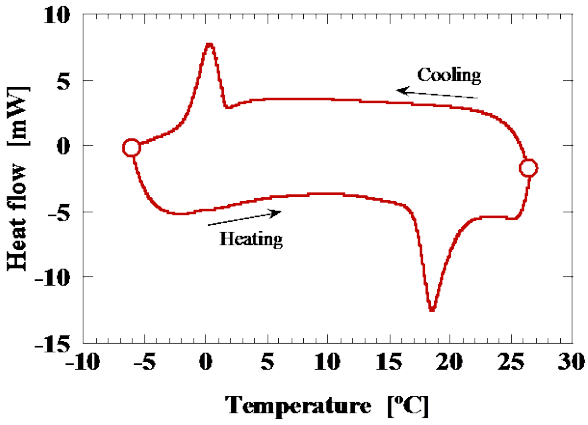


Fig.5　Heat flow measurement of emulsion with DSC

3・4　熱交換特性

n-ヘキサデカンを相変化物質として相変化エマルションの熱交換特性を把握するため，並流型二重管式熱交換器を用いて対流放熱実験を行った．試験部は，並流型の二重管式熱交換器で，外側を冷却水が，内側をエマルションが流れる構造となっている．また，それぞれの入口および出口には熱電対が設置されており，それぞれの流路の出入口温度を測定できるようになっている．

表 1 に，実験条件を示す．本実験では，冷却液として濃度調整されたプロピレングリコール水溶液（約 33mass%）を用いた．冷却液は試験部の外側の環状部の流路を流れる．

Table 1　Experimental condition

Condition No.	Inlet temperature of emulsion, T_{in} [ºC]	Inlet temperature of coolant [ºC]
1	30	5
2	20	−5
3	15	−10

本実験では, 全実験条件において供試流体と冷却液の試験部入口における温度差を 25℃とした．これは，各供試流体の試験部出入り口間の温度差を約 10℃にし，入口出口間における十分な温度差を確保するためである．例えば実験条件 1 はエマルションの入口温度が 30℃で，出口温度が約 20℃である．

エマルション中に分散する n-ヘキサデカンの相変化による交換熱量への影響を把握するため，n-ヘキサデカンの相変化温度である 18.2℃をまたがない条件（条件 1）と n-ヘキサデカンの相変化温度をまたぎ, n-ヘキサデカンが相変化する可能性のある条件（条件 2 および 3）で実験を行った．

なお, 予備実験により冷却液入り口温度が 5℃の時の損失熱量は, 冷却液が得た熱量の 5%以下，-5℃の時損失熱量は，8%以下，-10℃の時損失熱量は 10%以下と見積もられる．

図 6 に，エマルションの試験部出口温度 T_{out} を示す．図の横軸は表 1 に示す実験条件の番号であり，縦軸は水の試験部出口温度である．各条件につき 3 回ずつ実験を行い，その平均値をプロットしている．図より，条件 1 の出口温度は約 18℃，条件 2 の出口温度は約 10℃，条件 3 の出口温度は約 5℃であることがみてとれる．

一方, エマルションの試験部出入口間の温度差を図 7 に示す. 図の横軸は実験条件番号であり，

縦軸はエマルションの試験部出入口間の温度差 T_{in}-T_{out} である．図より，条件 1 の温度差は約 11K，条件 2 の温度差は約 10K，条件 3 の温度差は約 8 K であることがわかる．これらのことより，設定温度が低温側の条件ほど，温度差が小さくなっていることがわかる．これは，図 6 に示す凝固温度低下の値からわかるように，実際の n-ヘキサデカンの凝固点が 2℃前後と考えられるため，その温度を通過する条件である条件 3 の実験において，潜熱の吸収の影響が見られたためと考えられる．

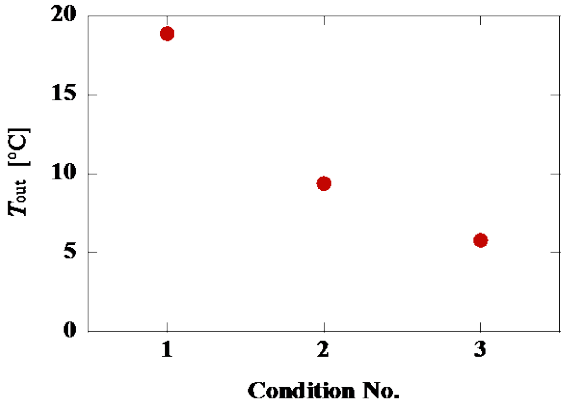


Fig.6　Outlet temperature of emulsion

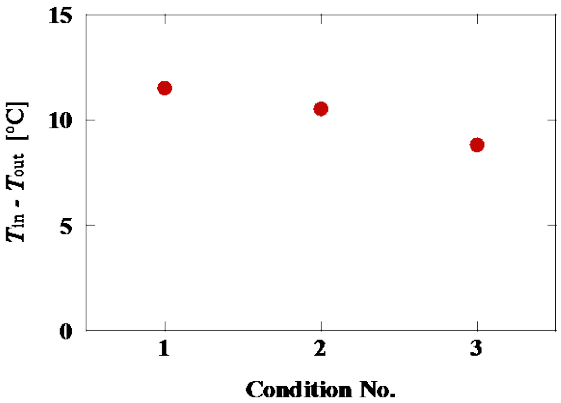


Fig.7　Temperature difference between T_{in} and T_{out}

４．おわりに

相変化エマルションは，分散相である相変化物質を選択することにより，アプリケーションの要求温度に対応した機能を持たせることが可能な機能性流体である．また，流動挙動としては単相流体と同様の挙動を示すため，見かけの比熱が大きい流体として熱輸送特性に優れる点も見逃せない．今後は，相変化物質を変えることにより，より相変化温度の高い相変化エマルションを生成し，廃熱回収用の熱媒体や高温蓄熱媒体としての展開を考えている．

文献

(1) Coupland, J.N., Crystallization in emulsions, Current Opinion in Colloid and Interface Science, Vol.7 (2002), pp.445-450.

(2) Dickinson, E., McClements, D.J. and Povey, M.J.W., Ultrasonic investigation of the particle size dependence of crystallization in n-hexadecane-in-water emulsions, Journal of Colloid and Interface Science, Vol.142 (1991), pp.103-110.

(3) Fumoto, K., Sato, N., Kawaji, M., Kawanami, T. and Inamura, T., Phase change characteristics of a nanoemulsion as a latent heat storage material, International Journal of Themophysics, Vol.35 (2014), pp.1922-1932.

(4) Inaba, H., New challenge in advanced thermal energy transportation using functionally thermal fluids, International Journal of Thermal Science, Vol.33 (2000), pp.991-1003.

(5) Sagitani, H., Formation of O/W emulsions by surfactant phase emulsification and the solution behavior of nonionic surfactant system in the emulsification process, Journal of Dispersion Science and Technology, Vol.9 (1988), pp.115-129.

(6) Schalbart, P., Kawaji, M. and Fumoto, K., Formation of tetradecane nanoemulsion by low-energy emulsification methods, International Journal of Refregeration, Vol.33 (2010), pp.1612-1624.

(7) Shioda, K. and Saito, H., The stability of O/W type emulsions as functions of temperature and the HLB of emulsifiers: The emulsification by PIT-method, Journal of Colloid and Interface Science, Vol.30 (1969), pp.258-263.

TED Plaza

TBAB 水和物スラリーの流動と伝熱特性

熊野　寛之

青山学院大学　教授
理工学部機械創造工学科
kumano@me.aoyama.ac.jp

１．はじめに

水和物は，古くから潜熱蓄熱システムにおける蓄熱材として利用されてきた（甲斐, 1983）．蓄熱材としては，塩化カルシウム 6 水和物，硫酸ナトリウム 10 水和物，酢酸ナトリウム 3 水和物などが代表的な水和物であり，これらの融点が 30～60℃程度であることから，主に暖房用の蓄熱材として利用されている．一方，冷房用途に最適な 5～12℃程度で相変化する蓄熱材として，近年注目を集めているのが，4 級アンモニウム塩の水和物である．その一つが，臭化テトラブチルアンモニウム(TBAB)から形成される包接水和物である(McMullan and Jeffrey, 1959, 福嶋他, 1999)．

水和物は，通常，結晶として生成されることになるが，その生成条件によっては，微細な水和物結晶が生成され，水または水溶液を連続相としてスラリーを形成する物質がある．スラリーとは，微細な固体と液体の 2 相混合物をいい，固体が水和物結晶であることから，このスラリーをここでは水和物スラリーと呼ぶこととする．水和物スラリーは，高い流動性を有しているため，配管内などを流入させることにより，冷熱を直接搬送することが可能となり，潜熱を利用できることから高い蓄熱密度を持つために, 搬送動力の低減やシステムの小型化が可能となる. さらに，空調に適した温度で相変化する水和物スラリーを蓄熱材として利用することにより，より効率的な空調が可能となる．そのため，水和物スラリーに関して空調利用の観点から多くの研究がなされ，すでに報告されている物質としては，臭化テトラブチルアンモニウム（TBAB）の他，フッ化テトラブチルアンモニウム（TBAF）（水島他, 2007），トリメチロールエタン（TME）（Suzuki, et al., 2006），シクロペンタン（Nakajima, et al., 2008）などの水和物がある．これらの水和物では，一般に，静止水中で生成した場合には大きな水和物結晶を生成し，スラリーとならない．しかしながら，水とゲスト分子となる物質の混合物を攪拌しながら冷却して水和物を生成することにより，水和物スラリーとなる．例えば，TBAB，TBAF，TME などは，ゲスト分子となる固体を水に溶解させた後，水溶液を攪拌しながら冷却することによりスラリーを生成する．また，シクロペンタンの場合には，シクロペンタンが水に難溶であるために，エマルションを形成した後に冷却することにより，水和物スラリーを生成することが可能である．

この度，本誌 TED plaza への研究紹介の機会を戴いた．本稿では，TBAB 水和物の研究動向や蓄熱システムなどで利用するにあたっての課題とともに，著者らのグループで得られた TBAB 水和物の生成特性，TBAB 水和物スラリーの流動および伝熱特性に関する研究を紹介する．

２．TBAB 水和物スラリー

TBAB 水和物は，ゲスト分子となる臭化テトラブチルアンモニウム（TBAB）と，ホスト分子となる溶媒の水から形成される．TBAB は水に可溶であり，TBAB 水和物は TBAB 水溶液を冷却することにより生成される．ここで用いる TBAB は，常温常圧下において安定な，白色粉末状の物質であり，適用される法令もない比較的安全な物質である．TBAB を水に溶解させ，冷却することにより，TBAB 水和物を形成する．TBAB 水和物の特徴の一つが，水溶液の濃度によって水和

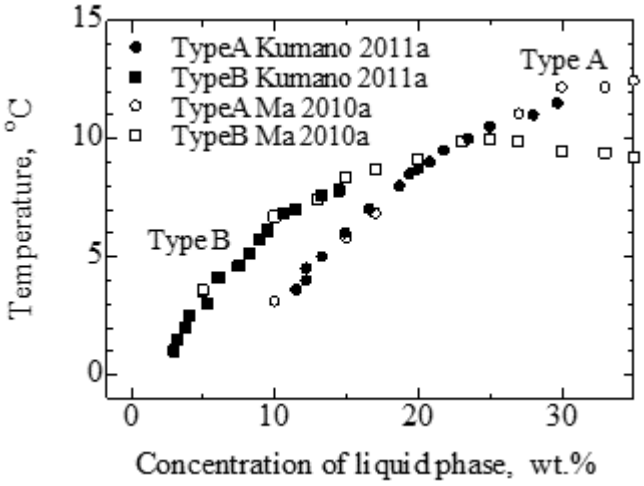


Fig. 1　Phase diagram of TBAB hydrate

Table 1　Hydration number and latent heat of TBAB hydrate

		Ogoshi et al., 2004	Oyama et al., 2005	Kumano et al., 2006	Asaoka et al., 2013
Type A	Hydration number	26	26	29	35
	Latent heat, kJ/kg	193	193.2	215	210±10
Type B	Hydration number	36	38	44	47
	Latent heat, kJ/kg	205	199.6	215	224±15

物の存在する温度が変化すること，また，水和数の異なる 2 種類の水和物が存在することである．水和物が形成する際の，水溶液濃度と温度の関係を図 1 に示す．これより，濃度と温度変化に 2 系列の平衡状態が存在することから，2 種類の水和物が存在することが確認できる．ここでは，高濃度で生成されるものを Type A，低濃度で生成されるものを Type B と定義することとする．

これらの水和物の特性を把握することを目的として，水和数の測定や，蓄熱材として重要な要素となる潜熱の測定も行われている．各研究者によって測定された結果を表 1 に示す．研究者によって，その測定方法は異なるものの，水和数としては，Type A が 30 程度，Type B が 40 程度である．また，潜熱に関しては，水和物の種類によらず約 200kJ/kg であることがわかる．

先にも述べたとおり，TBAB 水和物の大きな特徴の一つが，生成条件によって，スラリーを形成することである．そのため，冷熱を直接搬送が可能となる他，高い蓄熱密度が得られるために，代替フロンなど既存の冷媒の削減を目的とした 2 次冷媒としての利用が期待されている．TBAB 水和物スラリーの概観を図 2 に示す．微細な水和物結晶のため，白濁していることがわかる．また，高い流動性を保持していることもわかる．得られた水和物スラリーの顕微鏡写真を図 3 に示す（Kumano et al., 2011）．それぞれの写真より，平均的な大きさが，0.1mm 程度の微細な水和物結晶が生じていることがわかる．また，Type A の結晶は針状をしているのに対し，Type B の結晶は，複雑な形状をしていることがわかる．

TBAB 水和物を生成する際の特徴の一つとして，大きな過冷却を生じることが挙げられる．一般に水などでも条件によっては大きな過冷却を生じることが知られており，また，TBAB 水和物に限らず，他の水和物でも生成時に過冷却現象を生じることが報告されている（木村, 1980）．特に TBAB 水和物では，異なる組成の 2 種類の水和物が存在し，これらの存在する温度と水溶液濃度の関係が異なるために，特異な生成過程となる．水和物スラリー生成時の過冷却状態と水和物が生成した時の温度変化を図 4 に示す．これは，20wt.%の TBAB 水溶液を 5℃に保持した場合の温度変化である．20wt.%の TBAB 水溶液の相平衡温度は，図 1 から約 8℃であり，時刻 0 秒において試料は水和物を生成する前の水溶液の状態であり，水和物の生成温度より低い温度に保持さ

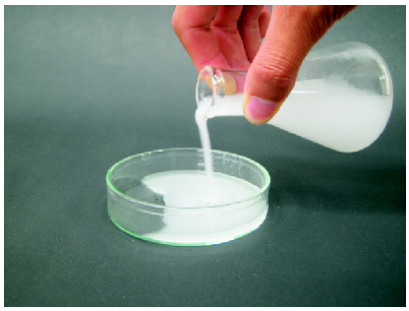
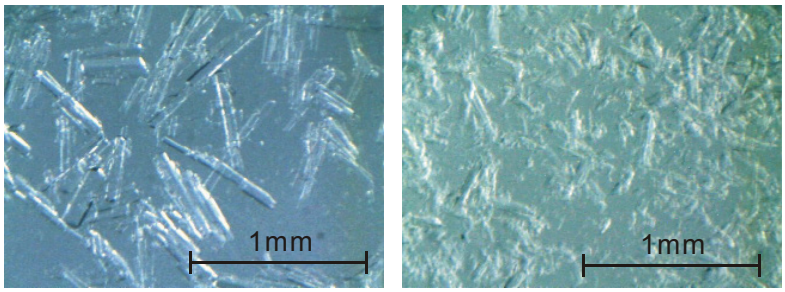


Fig. 2　TBAB hydrate slurry



(a) Type A　　(b) Type B

Fig. 3　Microphotographies of TBAB hydrate slurry

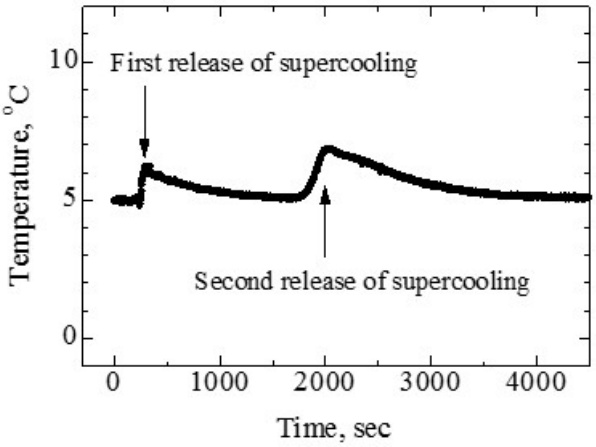


Fig. 4　Temperature variation during relase of supercooling

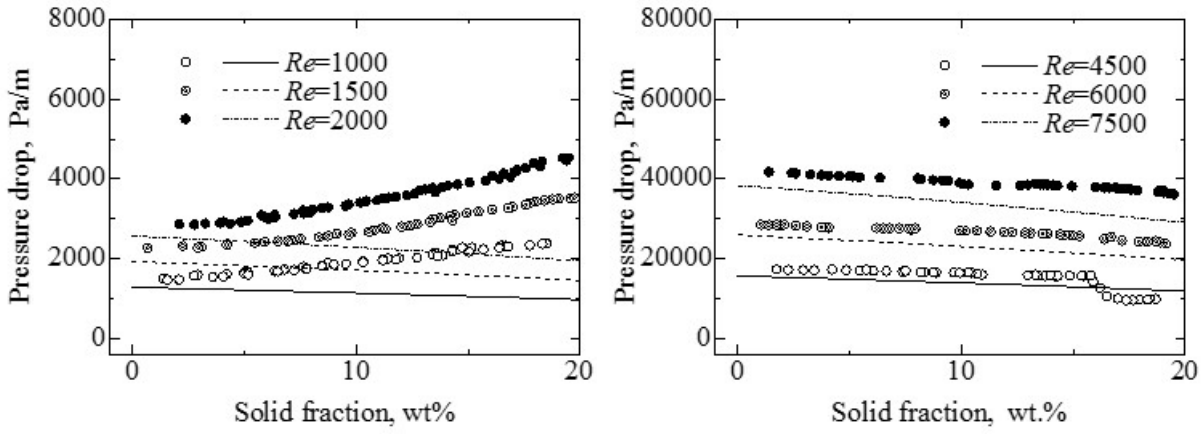
れているために，3K 程度の過冷却状態となっている．その後，約 300 秒において，1 回目の過冷却状態が解消し，水和物が生成される．ここでは，Type A の水和物が生成されることがわかっている．その後，徐々に温度が低下しながら，水和物の量が増加する．さらに，およそ 2000 秒において 2 回目の過冷却解消が起こる．これは，Type A の水和物の生成により，同時に濃度が低下して水溶液濃度が 12wt.%程度となり，Type B の水和物に対して過冷却状態となるために，Type B の水和物が生成することとなる．この際，Type A の水和物は速やかに消滅する．このように，TBAB 水和物は，生成条件の異なる 2 種類の水和物が存在するために，特異な過冷却状態を推移しながら，水和物が生成する特徴がある．そのため，蓄熱材として利用する場合にも，TBAB 水溶液の初期濃度や温度などを適切に管理する必要がある．

この過冷却状態を回避し，相変化温度付近で水溶液中に速やかに結晶を生成させるための研究もなされている（生越他, 2001）．また，著者らによって，水溶液中に電極を挿入し，電極間に電場を付与することにより，TBAB 水溶液の過冷却を解消させる方法が提案されており，電圧付与時に生成される生成物の影響によるものと考えられるが，その物質の同定や過冷却解消因子の検討などが，今後の課題となっている（熊野，後藤, 2016）．

３．　TBAB 水和物スラリーの流動および伝熱特性

TBAB 水和物スラリーは，微細な水和物結晶と水溶液の混合物であるために，高い流動性を有しており，配管によって直接搬送できるだけでなく，熱交換器に流入させることも可能となる．蓄熱システムの設計のためには, 水和物スラリーの流動特性や熱伝達特性の把握が不可欠である．これまで，流動および熱伝達挙動について，Darbouret ら（Darbouret, et al., 2005），Ma ら（Ma, et al., 2010, Ma and Zhang, 2011）により，円管およびプレート式熱交換器における流動および熱伝達挙動について検討がなされている．ここでは，著者らによって得られた流動および熱伝達挙動の測定例を示すことにより, TBAB 水和物スラリーの流動および熱伝達特性について概説する（Kumano, et al., 2011a, Kumano, et al., 2011b）．

図 5 に，直径が 7.5mm の配管に，TBAB 水和物スラリーを流入させて圧力損失の測定を行った際の，固相含有率と圧力損失の関係を示す．試料は Type A の水和物を用いている．



(a) Laminar (b) Turbulent

Fig. 5 Relationship between pressure drop and solid fraction of hydrate slurry

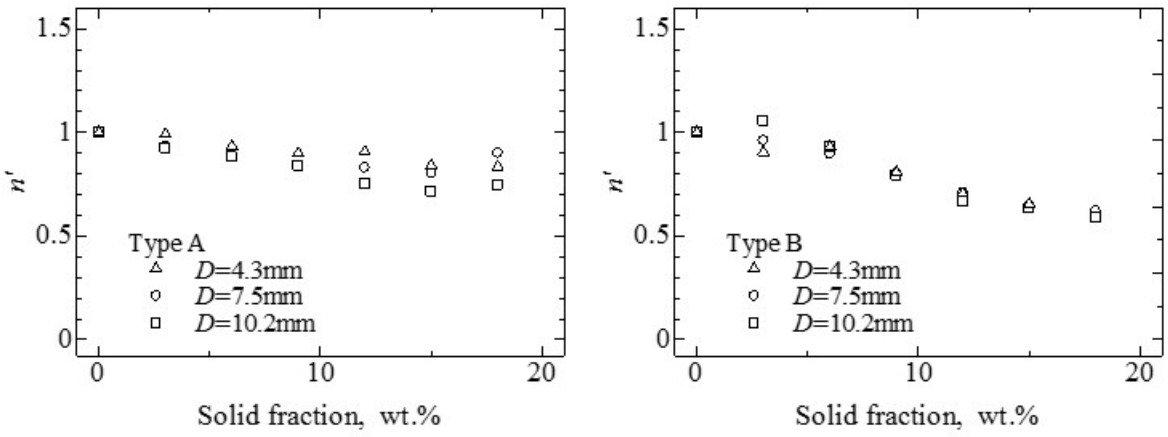
ここで，*Re* 数は，スラリー中の液相の動粘度に基づいて算出されたものであり，図 5（a）は，層流の条件における圧力損失，図 5（b）は，乱流条件下における圧力損失を示している．また，図中に線で示しているものは，TBAB 水溶液のみの圧力損失である．図より，層流条件下では，固相含有率が増加するに従い，圧力損失が大きくなっていることがわかる．これは，スラリー中の固相の割合が増加することにより，見かけの粘度が増加することに起因する．一方，乱流条件下では，固相含有率が増加しても，圧力損失はほとんど変化せず，TBAB 水溶液の場合とほとんど同じであることがわかる．また，Type B の水和物でも同様の傾向が得られた．

また，配管の直径や流速を変化させた場合の結果から，層流域における TBAB 水和物スラリーは，単純に固相含有率のみで見かけの粘度が決定されないこと，またニュートン流体として取り扱えないことが明らかとなった．そこで，べき乗則モデルとして，見かけのせん断速度と壁面のせん断応力 τ_R が式（1）で表現できるものとして，TBAB 水和物スラリーの流動特性について評価を行った．

$$\tau_R = \frac{D\Delta p}{4L} = K'\left(\frac{8u_m}{D}\right)^{n'} \qquad (1)$$

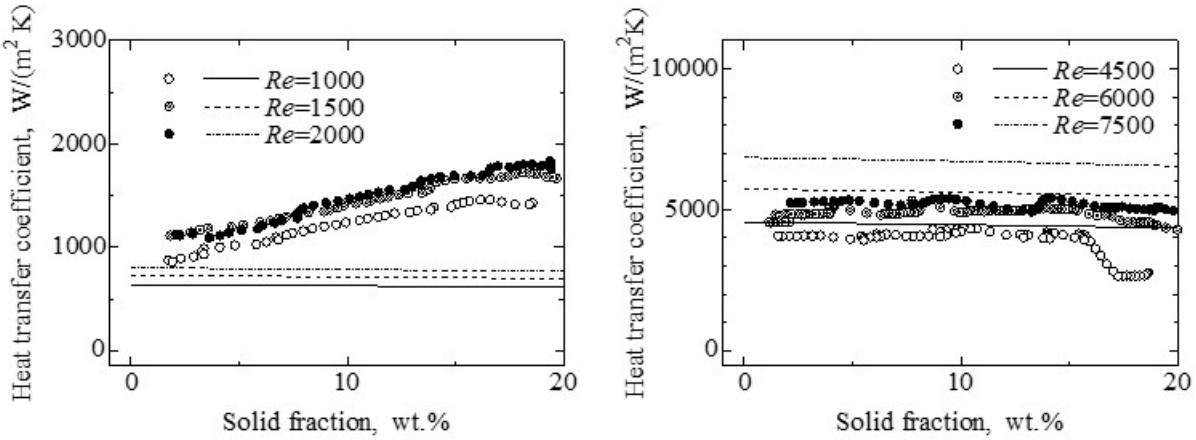
ここで，D は配管直径，$\Delta p/L$ は配管単位長さ当たりの圧力損失，u_m は流体の平均流速を表す．また，n'および K'は，流体の特性によって決定される係数である．ここで，n'が 1 であればニュートン流体, n'が 1 より大きければダイラタント流体, n'が 1 より小さければ擬塑性流体として扱える．図 6 のように，圧力損失の測定結果を用いて固相含有率ごとに n'の値を求めると，固相含有率の増加と共に n'は減少し，Type A の水和物の含有率が 15%の時に 0.7 程度，Type B の含有率が 15%の時に 0.6 程度となり，TBAB 水和物スラリーが擬塑性流体としての挙動を示すことがわかった．これらの特性は，配管の直径などに依存せず，流体の特性として決定されるものとなる．

また，図 7 に，水和物スラリーを流入させた直径 7.5mm の円管を 80cm にわたって加熱した場合の，層流条件および乱流条件における TBAB 水和物スラリーの固相含有率と熱伝達係数の関係を示す．試料は，Type A の水和物であり，加熱開始位置から下流へ 70cm の位置における，熱伝達係数を示している．また，線で示してあるものが，経験式より求めた TBAB 水溶液の単相の場合の熱伝達係数である．図より，層流の場合には，熱伝達係数が単相の場合と比較して，大きくなっていることがわかる．また，固相含有率が高くなるほど，その傾向が顕著になることがわかる．これは，層流の場合には，周囲からの加熱によりスラリー中を温度変化している領域が大きく, その領域内に水和物結晶が入り込み, 水和物の融解潜熱のために温度が低下することにより，熱伝達係数が増加したものと考えられる．一方，乱流条件の場合には，単相の場合と比較して，それほど大きな違いはなく，単相流体と同様な傾向を示していることがわかる．これは，乱流条件では，スラリー中で温度変化する温度境界層が薄く，この領域が水和物結晶の影響を大きく受けないためであると考えられる．



(a) Type A (b) Type B

Fig. 6 Relationship between *n'* and solid fraction of hydrate slurry



(a) Laminar (b) Turbulent

Fig. 7 Relationship between heat transfer coefficients and solid fraction of hydrate slurry

層流および乱流条件におけるこれらの特性は，水溶液中に微細な氷結晶が懸濁したアイススラリーについても，同様の傾向を示しており，スラリー全般に固有の特性であると考えられる．一方，層流時における TBAB 水和物スラリーとアイススラリーの熱伝達挙動を比較すると，TBAB 水和物スラリーでは温度境界層の発達が遅いことや，熱伝達係数が顕著に小さくなるなどの特性がある．これは，単に TBAB 水和物の融解潜熱が小さいだけでは説明ができず，水和物結晶が融解する際の結晶近傍に形成される濃度分布などが関与しているものと考えられる．これらについては，そのメカニズムが十分に理解できておらず，今後，数値計算などにより詳細な検討が必要であると考えている．

４．おわりに

TBAB 水和物スラリーの生成特性や，流動および伝熱特性について，著者らの研究を中心に紹介した．熱エネルギーを空間的，時間的にシフトすることを実現するための潜熱蓄熱システムにおいて，TBAB 水和物スラリーをはじめとした相変化スラリーは，蓄熱密度，搬送性，伝熱特性の点で優れていることから，これらの蓄熱および熱輸送媒体として，その利用が期待されている．特に，TBAB 水和物スラリーを利用した潜熱蓄熱システムの最大の利点は，その相変化温度が，空調用途に適している点であり，その融解潜熱や流動特性，伝熱特性は，多くの研究者によって明らかとされてきた．しかしながら，本稿中にも示したように，過冷却の能動制御や融解特性の詳細な理解など，克服すべき課題や不明な点も多く残されているのが現状である．引き続き，これらの課題について検討していきたいと考えている．

文献

(1) Asaoka, T., Kumano, H. and Serita, M., Measurement of latent heat of tetra-n-butylammonium bromide (TBAB) hydrate, International Journal of Refrigeration, Vol.36, No.3 (2013), pp.992-997.

(2) Darbouret, M., Cournil, M. and Herri, J. M., Rheological study of TBAB hydrate slurries as secondary two-phase refrigerants, International Journal of Refrigeration, Vol.28 (2005), pp.663-671.

(3) 福嶋信一郎, 高雄信吾, 生越英雅, 井田博之, 松本繁則, 秋山俊一, 大塚俊明, 液系水和物を用いた高密度冷熱媒体, NKK 技報, Vol.166 (1999), pp.65-70.

(4) 甲斐潤二郎, 潜熱蓄熱材を用いた熱エネルギー貯蔵, エネルギー・資源, Vol.4, No.4 (1983), pp.334-341.

(5) 木村寛, 水化物の過冷却と核生成, 日本結晶成長学会誌, Vol.7, No.3 (1980), pp.215-223.

(6) Kumano, H., Hirata, T. and Kudoh, T., Experimental study on the flow and heat transfer characteristics of a tetra-n-butyl ammonium bromide hydrate slurry (First report: Flow characteristics), International Journal of Refrigeration, Vol.34, No.8 (2011a), pp.1953-1962.

(7) Kumano, H., Hirata, T. and Kudoh, T., Experimental study on the flow and heat transfer characteristics of a tetra-n-butyl ammonium bromide hydrate slurry (Second report: Heat transfer characteristics), International Journal of Refrigeration, Vol.34, No.8 (2011b), pp.1963-1971.

(8) 熊野寛之, 斎藤彬夫, 大河誠司, 後藤祐介, TBAB水和物スラリーの基礎特性に関する研究, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.72, No.724 (2006), pp.3089-3095.

(9) 熊野寛之, 後藤陽紀, TBAB 水溶液への電圧印加による過冷却解消効果に関する研究, 日本冷凍空調学会論文集, Vol.33, No.4 (2016), pp.333-341.

(10) Ma, Z. W., Zhang, P., Wang, R. Z., Furui, S. and Xi, G.N., Forced flow and convective melting heat transfer of clathrate hydrate slurry in tubes, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.53 (2010), pp.3745-3757.

(11) Ma, Z. W. and Zhang, P., Pressure drop and heat transfer characteristics of clathrate hydrate slurry in a plate heat exchanger, International Journal of Refrigeration, Vol.34 (2011), pp.796-806.

(12) McMullan, R. and Jeffrey, G. A., Hydrates of the tetra n-butil and tetra i-amyl quaternary ammonium salts, Journal of Chemical Physics, Vol.31, No.5 (1959), pp.1231-1234.

(13) 水島隆成, 河村洋, 高雄信吾, 矢部彰, 常温近傍に融点を持つTBAF クラスレートの潜熱蓄熱剤としての基礎的特性, 日本冷凍空調学会論文集, Vol.24, No.2 (2007), pp.149-157.

(14) Nakajima, M., Ohmura, R. and Mori, Y. H., Clathrate Hydrate Formation from Cyclopentane-in-Water Emulsions, Industrial Engineering Chemistry Research, Vol.47, No.22 (2008), pp.8933-8939.

(15) 生越英雅, 高雄信吾, 水和物スラリを用いた省エネルギー空調システム, JFE 技報, Vol.3 (2004), pp.1-5.

(16) 生越英雅, 高雄信吾, 松本繁則, 水和物スラリの製造方法, 特開 2002-349909 (2001).

(17) Oyama, H., Shimada, W., Ebinuma, T., Kamata, Y., Takeya, S., Uchida, T., Nagao, J. and Narita, H., Phase diagram, latent heat, and specific heat of TBAB semiclathrate hydrate crystals, Fluid Phase Equilibria, Vol.234 (2005), pp.131-135.

(18) Suzuki, H., Itotagawa, T., Indartono, Y. S., Usui, H. and Wada, N., Rheological characteristics of trimethylolethane hydrate slurry treated with drag-reducing surfactants, Rheol Acta, Vol.46 (2006), pp.287-295.

TED Plaza

水中に置かれた水平な楕円形状伝熱管周りの凍結現象に関する研究

廣瀬　宏一

岩手大学　教授
理工学部　システム創成工学科　機械科学コース
k.hirose@iwate-u.ac.jp

王　強勝

岩手大学大学院　工学研究科博士後期課程
機械・社会環境システム工学専攻
wqs0403@gmail.com

１．はじめに

水を相変化物質（Phase Change Material : PCM）として蓄熱槽内に充填し，凍結および融解する際の潜熱を利用し蓄冷する氷蓄熱装置には，大きく分けて生成した氷を移動させるダイナミック型と，移動させないスタティック型がある．スタティック型は水を強制的に流動させない分，熱伝達率が低くなり蓄冷速度はダイナミック型に劣るが，その分省エネルギーであり，蓄冷速度を必要としない夜間電力を用いた蓄冷などではメリットが大きい．

一般的なスタティック型氷蓄熱装置の蓄冷性能を向上させるために重要なのは，冷媒を循環させる伝熱管群周りに水を凍結させる際の伝熱現象の最適化である．水は伝熱管表面から凍結を開始し成長していくが，この時に成長した氷自体が熱抵抗になる．さらに時間経過すると，管群から成長した氷は，お互いに結合（ブリッジング）し，周囲の水の自然対流を妨げる．これらの原因により，氷の生成と成長とともに蓄冷効率が低下していく問題がある．また，凍結の際の体積膨張による高い応力の発生や，氷によって閉じ込められた水が高圧になることで，伝熱管の塑性変形が発生し，管群の損傷を招くことが知られている．従って，ブリッジングが発生しないように氷蓄熱槽の構造を設計することが多く，結果的に氷の充填率が小さい値に留まってしまうことで，蓄冷量の増加や氷蓄熱槽の小型化などの，装置の高性能化を妨げる要因となっている．したがって，工学的な背景からは，氷蓄熱槽の高度設計に向けた伝熱管群周りにおける水の凍結現象，およびそれを司る自然対流現象を体系的に評価することは，特に昨今の電力問題やエネルギー問題への寄与も期待できる有益な課題である．かつ，公知のように水は 4℃で密度が最大になるなど，他の物質と異なる特異な性質を持つことから，特に凍結に関与する自然対流の影響の探求は学術的にも興味深い課題である．

以上の背景から，スタティック型氷蓄熱装置を想定した水の固液相変化についての研究が広く行われている．水を PCM として検証した事例として，舟渡らは水平環状空間内に封入した水の密度逆転を伴う 3 次元自然対流熱伝達の数値計算を実施している（舟渡，鈴木，2003）．笹口らは多

孔質層内の氷の融解過程に関する水の密度反転の影響の数値解析（笹口, 1994）や，矩形容器内に伝熱管を配置した場合の固液相変化実験（笹口他，1995）などを報告している．平澤らは，氷蓄熱槽に用いる伝熱管に樹脂製細管マットを用いた応用事例について, 凝固･融解実験（平澤他, 2008a）および熱流動解析（平澤他，2008b）を実施している．以上から，水－氷の固液相変化の基礎的な現象から，応用システムレベルでの評価まで，多岐にわたる研究が行われている．一方で，初期水温，管形状や配置角度，管の相互配置，水槽の大きさなどの氷蓄熱槽の設計値に関するパラメタスタディについてはまだ検討の余地があり，体系的な検証による設計最適化に寄与することによる工学的価値も期待できる．

これらから，著者らにおいては，スタティック型氷蓄熱槽内でみられる固液相変化現象について，特に氷蓄熱槽の構造や設計，固液相変化，伝熱管周囲の自然対流，それぞれの関係を体系的に評価する研究を進めている（佐々木他，2011）．特に近年は，自然対流の促進を狙って，断面を楕円形にした伝熱管を氷蓄熱槽に実装した場合, 氷蓄熱槽における初期水温, 管形状や配置角度, 管の相互配置，水槽の大きさの変化が伝熱管周囲で発生する水の凍結およびブリッジングに対し与える影響を調査している．研究の特徴として，実験による評価も行うとともに，相変化を考慮した数値シミュレーションコードを開発し活用することにより研究を推進してきている．特に相変化現象の数値解析を行う際には, 相変化界面が時間とともに移動する移動境界問題となるため, 界面位置の取り扱いが困難となる．この問題に対する解析方法を大別すると，固相と液相を区別して解く Multi-domain model と，固相と液相を区別せず一組の式で解く Single-domain model がある．特に氷蓄熱槽の研究においては Single-domain model を用い，潜熱を比熱に組み込むことにより氷と水の伝熱現象を 1 組の式でシミュレーションして，氷蓄熱槽内の水の凍結現象を評価している．以上により，凍結現象そのものの現象調査に加え，氷蓄熱槽における製氷時間の短縮化およびブリッジング時間の数値予測技術の構築などを目指している．そこで本稿ではこれらの取り組みの概要について紹介したい.

２．数値解析

２・１　物理モデルおよび座標系

図 1 に, 2 本の楕円管を用いた蓄冷水槽の物理モデルおよび座標系を示す. 物理モデルでは PCM（水）で満たされた領域に，伝熱管を模擬した 2 本の楕円管を水平に配置して冷却し，管の周りに凍結層が出来ることを想定した．また，伝熱管の配置については，水平方向軸間距離を D_x，鉛直方向軸間距離を D_y とし，伝熱管の相互配置を決めた．図中の一点鎖線は計算領域を表す周囲境界面を示しており，破線は計算領域の接合境界面を示している．座標系は計算領域左下を原点 O とするデカルト座標系を用いた．境界条件については，まず速度場の境界条件は，楕円管表面と筐体壁において滑り無し壁境界条件を与えた．また，温度場の境界条件は，楕円管表面に等温境界条件，筐体壁において断熱境界条件を与えた．

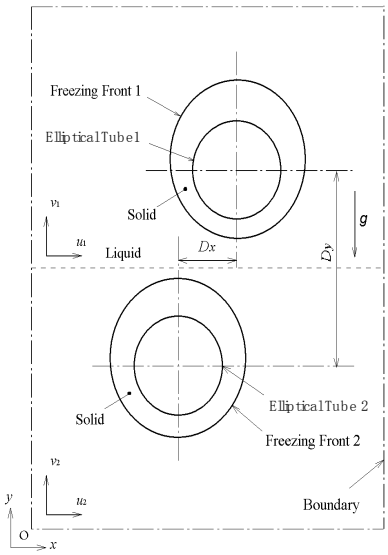


Fig. 1　Physical model and coordinate systems for elliptical two tubes

2・2　基礎方程式

楕円管周囲の流れを解析する場合，デカルト座標系の基礎方程式を用いて，任意の管形状に沿った境界条件を設定し，境界適合座標法を用いて一般座標系（ξ, η）に写像して上下計算領域にそれぞれ適用し，接合境界面においてそれぞれの計算領域の計算データを順次接合することで解析を行った．

$$J\frac{\partial f}{\partial t_o}+\frac{\partial}{\partial \xi}(Uf)+\frac{\partial}{\partial \eta}(Vf)-\frac{\partial}{\partial \xi}\left\{\Gamma J\left(q_{11}f_\xi+q_{12}f_\eta\right)\right\}-\frac{\partial}{\partial \eta}\left\{\Gamma J\left(q_{21}f_\xi+q_{22}f_\eta\right)\right\}=J\cdot S(\xi,\eta) \qquad (1)$$

$$q_{11}=\xi_x^2+\xi_y^2,\quad q_{12}=\xi_x\eta_x+\xi_y\eta_y,\quad q_{21}=q_{12},\quad q_{22}=\eta_x^2+\eta_y^2,\quad J=x_\xi y_\eta-x_\eta y_\xi$$

U は一般座標系における ξ 方向速度, V [m/s] は一般座標系における η 方向速度である．式 (1) 中の浮力項を含む生成項において，本解析では管周囲の PCM として密度反転を有する水を想定しているため，藤井の式（藤井他, 1974）を用いることで，水の密度変化を考慮した．上式を，集中格子を使用した有限体積法により離散化し，SIMPLE 法を適用して解析を行った．なお各保存式に関する変数 f および生成項の詳細については以下の表 1 に示すとおりである．なお，ν [m^2/s] は動粘度である．

Table 1　Relationship between f and each parameter

Equation of continuity	$f = 1$	$\Gamma = 0$	$S = 0$
Equation of motion (x-direction)	$f = u$	$\Gamma = \nu$	$S = -(\xi_x p_\xi + \eta_x p_\eta)$
Equation of motion (y-direction)	$f = v$	$\Gamma = \nu$	$S = -(\xi_y p_\xi + \eta_y p_\eta) + g\beta(T - T_0)f(T)$
Energy equation	$f = T$	$\Gamma = a$	$S = 0$

2・3　ブリッジング時間の推定

本解析は，一般座標系による計算で物理平面（x, y）を計算平面（ξ, η）に写像して計算を行うことになる．図 2 に示すように物理平面上の各格子点は，管毎に管の周方向を η 軸，管の中心から半径方向をξ 軸とした．相変化の取り扱いは，格子点毎に温度が凍結温度 T_s より大きければ液相，T_s 以下であれば固相とした．ブリッジングは一方の管壁から他方の管壁へ達する各々の η 格子線に着目し，この η 線上の各格子点（図 2 中のプロット点）の状態が全て固相に変化したと判断された時の η 格子線が 1 本でも現れた場合の時刻を監視しておき，これをブリッジング時間とした．

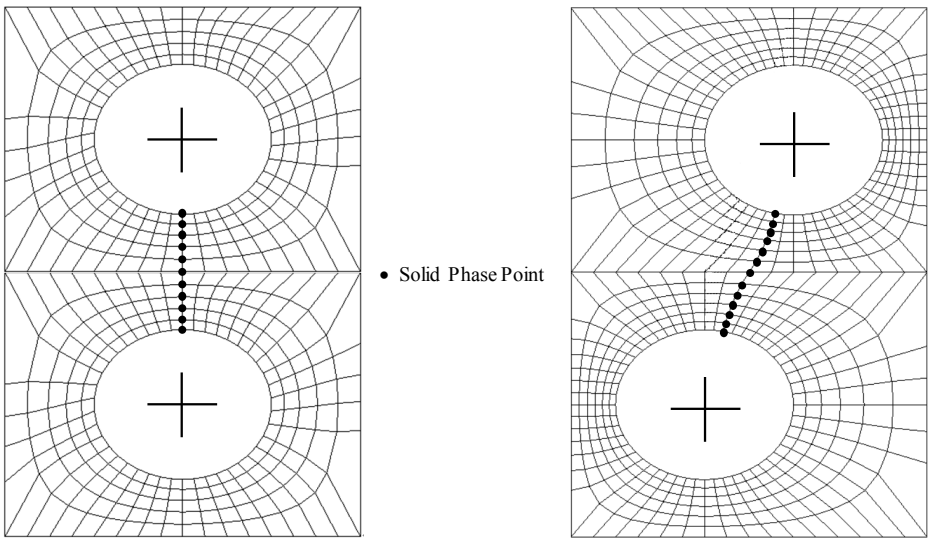
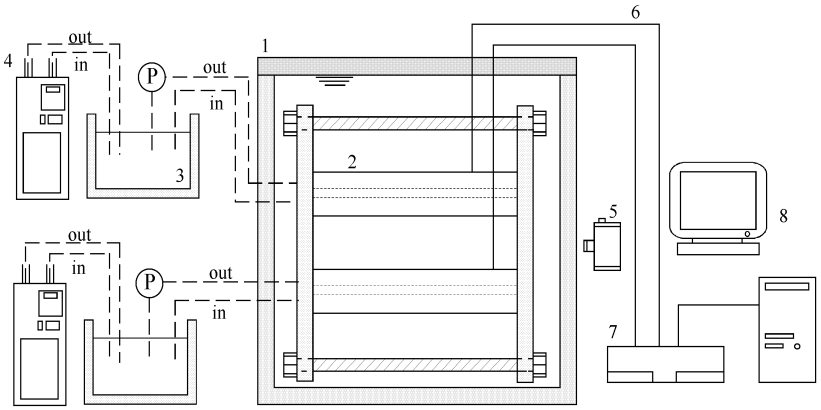


Fig. 2　Judgment of bridging time

３．実験装置および方法

図 3 に実験装置の概略図を示す．大別して試験部，冷媒循環装置，実験水槽，恒温水循環装置，温度測定機器，写真撮影装置からなる．供試体には，ϕ40 mm，肉厚 2.0 mm の銅管を用いて楕円率 0.85 の楕円管を製作した．また，楕円管の配置角度を φ_g とし，φ_g = 0°で縦型，φ_g = 90°で横型とした．

図 4 には供試体の管形状及び配置角度の詳細図を示す．実験の場合は一定温度に保った 35%プロピレングリコール水溶液を銅管内に循環させ管壁面温度を調節した．試験領域は，内寸：高さ 270 mm × 幅 180 mm × 奥行き 170 mm とし，周囲を断熱材で覆うことで熱の出入りを防いだ．温度測定には素線径 0.2 mm の銅－コンスタンタン（T 型）熱電対を用いた．写真撮影は銅管正面から凝固界面形状の変化を一定時間間隔で撮影し記録した．写真で得られた水と氷の界面形状から，氷の生成量を画像処理にて定量的に算出している．



1 Test section
2 Horizontal circular tube
3 Coolant
4 Temperature control unit
5 Digital camera
6 Thermocouples
7 Data logger
8 Personal

Fig. 3　Schematic diagram of experimental apparatus

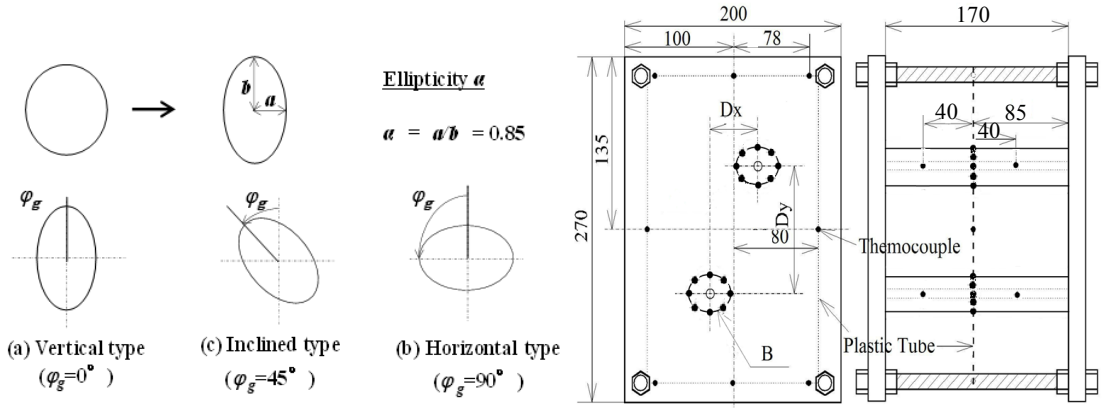


Fig. 4　Inclined angle and detail of test section

４．解析結果および実験結果

代表的な場合として，初期水温 T_{ini} が 4℃と 7℃の場合の高さ 270 mm × 幅 180 mm × 奥行き 170 mm における，水平方向軸間距離 D_x = 0 mm，鉛直方向軸管距離 D_y = 2.0 D (80 mm) とした時の結果を示す．

図 5 には解析および実験により凝固率の時間変化を示す．図中の実線が解析結果であり，プロットが実験結果である．この図から，解析も実験も凝固率の伸びが時間の経過と共に緩やかになっていくことがわかる．また，図からわかるように凝固率について実験と解析で良好な一致が見られ，本解析手法は十分妥当であると考える．

図 6 には代表的な時間での温度場及び流れ場を示す． T_{ini} = 4℃の条件では，管付近の水は冷却されることで密度が小さくなり，周囲流体よりも軽くなるため，上昇流が支配的となる．この様子は図 6 (a)から良くわかる．さらに時間が経過すると，冷却された水が容器上部側に集まり，相変化温度近くまで下がることで，管周囲の流体との密度差がなくなるために上昇流はしだいに弱くなっていく．容器下部側では，4℃付近の水が成層化しており，その影響で対流がほとんど起こっていないため，この領域では熱伝導が支配的となる．この様子は，図 6 (b)～(d)からわかる．また，ブリッジングした後は，氷層の結合により流れは管の左右に完全に分離される．他の箇所と比較して流れの弱い管壁間において水温の低下している領域では，ブリッジングした後，氷の成長速度が一時的に高まると考えられる．

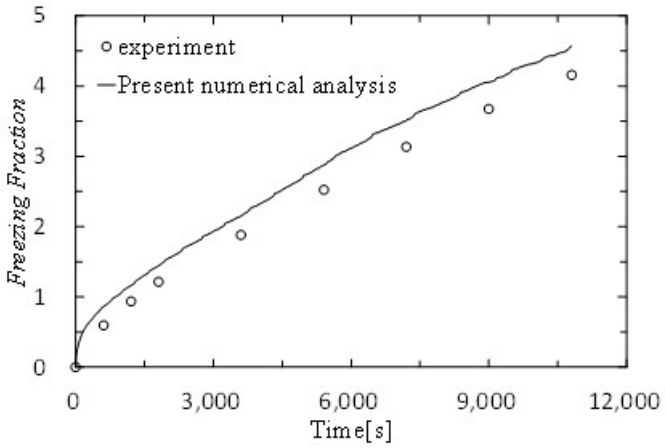


Fig. 5　Comparison of freezing fraction by analysis and experiment for two elliptical tubes
(D_x = 0 mm, D_y = 80 mm, $\varphi_{g1} = \varphi_{g2}$ = 90°, T_{ini} = 4.0 °C, $T_{w,1} = T_{w,2}$ = -10 °C)

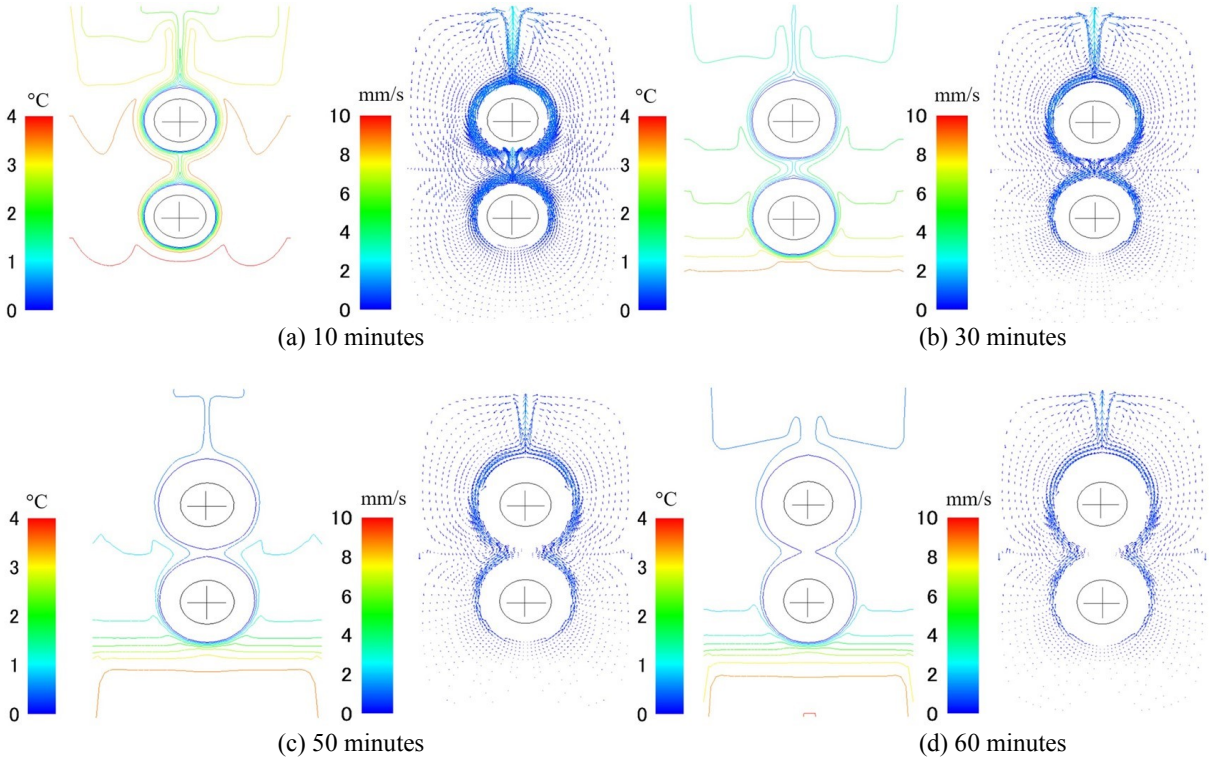


Fig. 6　Isotherms and velocity fields (D_x = 0 mm, D_y = 80 mm, $\varphi_{g1} = \varphi_{g2}$ = 90°, T_{ini} = 4.0 °C, $T_{w,1} = T_{w,2}$ = -10 °C)

図 7 には代表的な解析と実験における凝固界面の時間変化を示す．氷の成長を見ると，管上部側で若干厚く成長していることがわかる．これは，管上部側では上昇流により冷たい水が流れ込むため，凝固点まで温度降下しやすいが，管下部側には初期水温に近い 4℃付近の水が停滞し凍結温度まで降下しにくいためと考えられる．特に，氷がブリッジングした後に，結合部分で氷の

成長が周囲よりも早くなる特徴が見られる．また，解析結果と実験結果は定性的によく一致している．

図 8 には初期水温が 4℃および 7℃の場合の水槽内部温度の時間変化を示す．初期水温 4℃の場合，水温を水槽のそれぞれ上部，中部，下部とわけて各領域を見ると，上部水温，中部水温は時間が経過するに従って温度が急激に減少するのに対し，下部水温は，4℃から緩やかに減少する．これは，4℃における密度が最大であり，温度降下と共に密度が減少し，冷却された流体が上昇していくためである．初期水温 7℃の場合では，3000 秒付近から 5000 秒付近の間で上部水温が急激に下がっているのがわかる．これは，下降流から上昇流に切り替わり，容器上部に停滞していた暖かい流体の冷却が完了したためである．また，実験の水槽上部の水の温度が初期水温より高いのは，実験装置が完全に断熱状態になっていないためである．

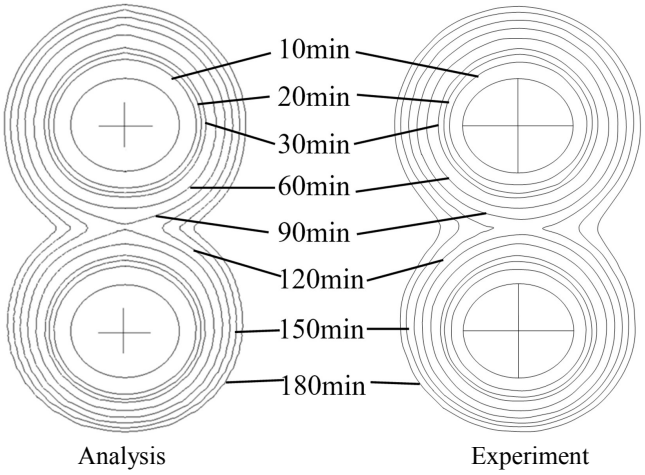


Fig. 7　Comparison of freezing front contour by analysis and experiment.
(D_x = 0 mm, D_y = 80 mm, $\varphi_{g1} = \varphi_{g2}$ = 90°, T_{ini} = 4.0 °C, $T_{w,1} = T_{w,2}$ = -10 °C)

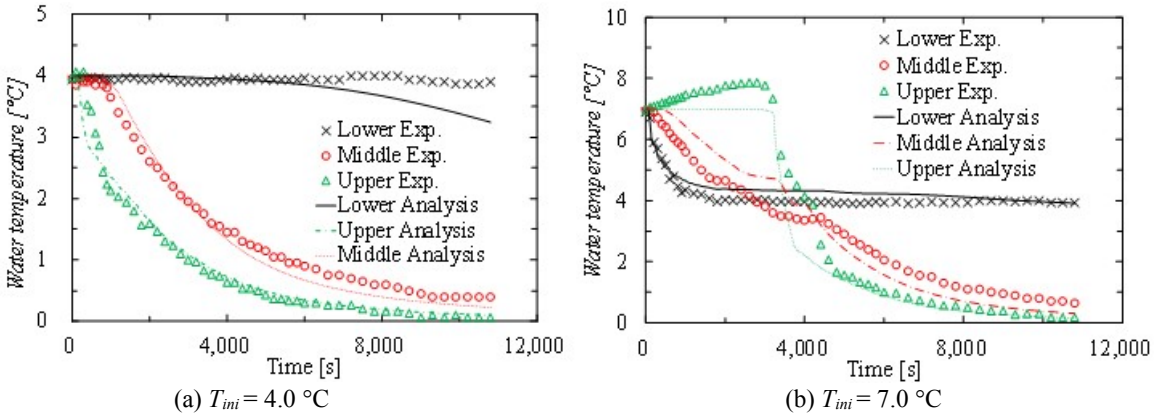


Fig. 8　Temperature distribution of water with time for freezing by analysis and experiment
(D_x = 0 mm, D_y = 80 mm, $\varphi_{g1} = \varphi_{g2}$ = 90°, $T_{w,1} = T_{w,2}$ = -10 °C)

図 9 には各条件における凝固率の時間変化を示す．横型楕円管を基準とし，それぞれの D_x において伝熱管表面距離が等しくなるように整理している．この図から初期水温が 4℃および 7℃とも凝固率の伸びが時間の経過と共に緩やかになっていくことがわかる．これは成長した氷自体が熱抵抗となるために凝固率の増加が鈍化すると考えられる．初期水温，水平方向軸間距離問わず，楕円管縦型（φ_g = 0°），楕円管横型（φ_g = 90°）を比較すると，楕円管横型（φ_g = 90°）の凝固率が大きく，楕円管縦型（φ_g = 0°）の凝固率が小さい．これは，横型にすることにより，容器下部の 4℃付近の水が成層化している領域の影響を受けにくいため，縦型に比べ，下部管の氷の成長が妨げられないと考えられる．また，初期水温が 7℃の場合と初期水温が 4℃の場合を比較すると，3000 秒付近から 5000 秒付近の間で凝固率の増加が一時的に鈍化することがわかる．これは，T_{ini} =7℃の条件では，密度反転の影響により冷却されるとともに密度が増加し，4℃付近まで周囲流体より

も重くなり，下降流となった水は，水槽下部側の領域に停滞し，伝熱管が氷生成時に用いるエネルギーが一時的に水の冷却に使用されるため，凝固率の増加率が鈍化してしまう．

図 10 には，D_x を 0 および 20mm として縦型と横型楕円間とした場合に伝熱管表面温度を-10℃と固定した時，初期水温の変化におけるブリッジング時間の変化を示す．図からわかるように，水平方向軸間距離に関わらず，初期水温が低くなるとブリッジング時間も早くなっている様子がしめされるが，ブリッジング時間は初期水温に単純比例していないことがわかる．これは伝熱管の温度を-10℃と一定にする場合，初期水温が高くなると伝熱管周りの水の冷却度合いが大きくなり，対流の影響が強く表れるためと考えられる．また，横型楕円管の方が縦型に比べて，同じ条件でのブリッジング時間が早いことがわかる．これは，横型にすることにより，水槽容器下部における 4℃付近の水が安定成層化している領域の影響を受けにくいため，縦型に比べ，下部管の氷の成長が妨げられないためではないかと考えられる．また，これらから異なる条件であっても管壁温と初期水温をパラメータとすれば，ブリッジング時間について，ある程度類型化ができる可能性があることがわかる．

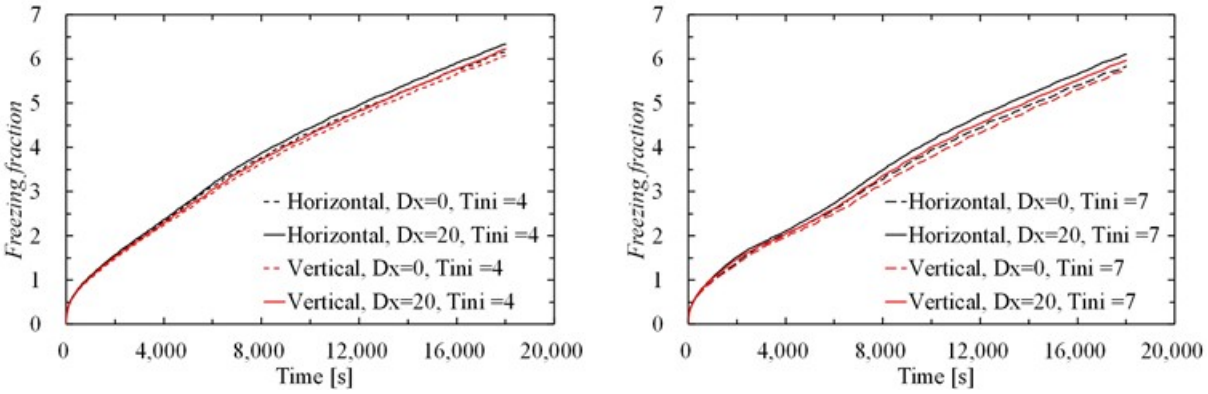


Fig. 9 Comparison of freezing fraction by analysis (D_x = 0 mm, D_y = 80 mm, $\varphi_{g1} = \varphi_{g2}$ = 90°, $T_{w,1} = T_{w,2}$ = -10 °C)

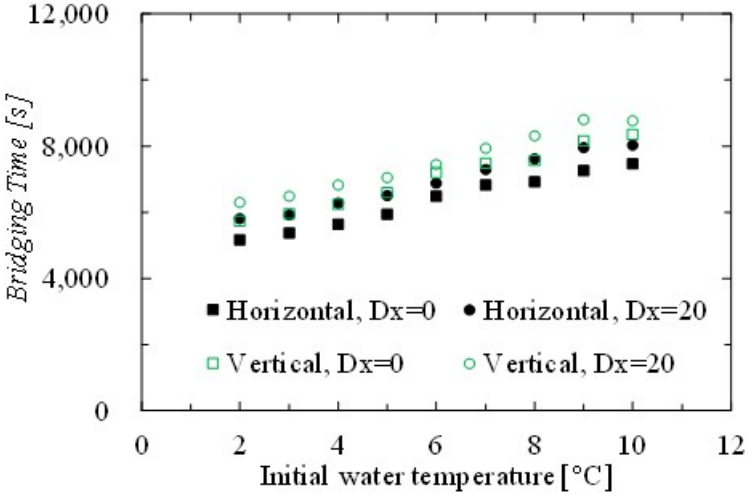


Fig. 10　The relationship between bridging time and the initial water temperature
(D_y = 80 mm, $\varphi_{g1} = \varphi_{g2}$ = 90°, $T_{w,1} = T_{w,2}$ = -10 °C)

５．おわりに

現段階では 2 本の水平な楕円形状伝熱管まわりの凍結現象に留まっているが，本研究で使用した解析は任意の管形状，任意の管本数，任意の配置，さらには任意の PCM に対して凝固過程のみならず融解過程に対しても解析することが可能な応用範囲の広い有用な手法であることから，伝熱管を多数の管群とした場合や管の配置を変化させた場合における固液相変化現象の研究にも対応可能だと考えられる．また，多数本の伝熱管群の場合，凝固過程に伴う周囲の流れ場，温度場といった現象に関しては，より複雑な対流が生じ，その干渉が凍結現象にどのような影響を与えるかなどへの応用展開が期待できる．また，より高い氷充填率を保つような伝熱管形状を考慮し

た氷蓄熱装置の設計・製作を通して信頼性を確認することともに，コンパクト・高性能な氷蓄熱装置の実現などを目指していきたい.

文献

(1) 佐々木治，廣瀬宏一，地代所昌幸，藤田尚毅，水中に置かれた 2 本円管周りの凍結現象とブリッジング時間，日本冷凍空調学会論文集, Vol. 28, No. 4 (2011), pp. 353-362.
(2) 笹口健吾，多孔質層内の固－液相変化(水の密度反転が矩形領域の融解過程に及ぼす影響)，日本機械学会論文集 B 編, Vol. 60, No. 580 (1994), pp. 4138-4144.
(3) 笹口健吾，草野剛嗣，北川秀昭，二円筒回りの固－液相変化（水の密度逆転の影響に関する実験的研究），日本機械学会論文集 B 編, Vol. 61, No. 581 (1995), pp. 208-214.
(4) 平澤良男，小坂暁夫，喜多野一幸，樹脂細管マットを用いた氷潜熱蓄熱槽の凝固・融解特性に関する実験的検討，日本冷凍空調学会論文集, Vol. 25, No. 2 (2008), pp. 193-199.
(5) 平澤良男，喜多野一幸，小坂暁夫，樹脂細管マットを用いた氷潜熱蓄熱槽の凝固・融解特性に関する数値解析による検討，日本冷凍空調学会論文集, Vol. 25, No. 2 (2008), pp. 201-206.
(6) 藤井哲，片山功蔵，斎藤彬夫，服部賢，戸田三朗，伝熱工学の進展 3 (1974)，養賢堂.
(7) 舟渡裕一，鈴木立之，水平環状空間内の水の密度逆転を伴う３次元自然対流熱伝達，日本機械学会論文集 B 編, Vol. 69, No. 680 (2003), pp. 881-887.

行事案内

部門企画行事案内

－2019 年度－

●The Second Pacific Rim Thermal Engineering Conference (PRTEC2019)
開催日: 2019 年 12 月 13 日(金)～17 日(火)
場　所: Hawaii, USA

－2018 年度－

●熱工学コンファレンス 2018
開催日: 2018 年 10 月下旬
場　所: 富山

●計算力学技術者 2 級認定試験対策講習会
開催日: 2018 年 10 月 21 日(日)～22 日(月)
場　所: 東京工業大学
開催日: 2018 年 11 月 4 日(日)～5 日(月)
場　所: 関西大学

●日本機械学会 2018 年度年次大会
開催日: 2018 年 9 月 9 日(日)～12 日(水)
場　所: 関西大学, 大阪府吹田市

－2017 年度－

●The 9th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference (TFEC9)
開催日: 2017 年 10 月 27 日(金)～30 日(月)
場　所: Okinawa Convention Center, Okinawa, Japan

●『伝熱工学資料（改訂第 5 版）』の内容を教材にした熱設計の基礎と応用
開催日: 2017 年 9 月 28 日(木)～29 日(金)
場　所: 日本機械学会会議室

●日本機械学会 2017 年度年次大会
開催日: 2017 年 9 月 3 日(日)～6 日(水)
場　所: 埼玉大学, 埼玉県さいたま市

部門関連行事案内

－2017 年度－

●第 28 回内燃機関シンポジウム
開催日： 2017 年 12 月 6 日(水)～8 日(金)
場　所： 福岡リーセントホテル, 福岡県福岡市
主　催： 自動車技術会、日本機械学会エンジンシステム部門

●第 55 回燃焼シンポジウム
開催日： 2017 年 11 月 13 日(月)～15 日(水)
場　所： 富山国際会議場, 富山県富山市
主　催： 日本燃焼学会

●第 60 回自動制御連合講演会
開催日： 2017 年 11 月 10 日(金)～12 日(日)
場　所： 電気通信大学, 調布市
主　催： 計測自動制御学会

●第 38 回日本熱物性シンポジウム
開催日： 2017 年 11 月 7 日(火)～9 日(木)
場　所： 産業技術総合研究所 つくばセンター 共用講堂, 茨城県つくば市
主　催： 日本熱物性学会

●可視化情報全国講演会(室蘭 2017)
開催日： 2017 年 11 月 3 日(金)～4 日(土)
場　所： 室蘭工業大学, 北海道室蘭市
主　催： 可視化情報学会

●第 65 回レオロジー討論会

開催日：　2017 年 10 月 17 日(火)～19 日(木)
場　所：　朱鷺メッセ，新潟市
主　催：　日本レオロジー学会、日本バイオレオロジー学会

●日本冷凍空調学会 年次大会
開催日：　2017 年 9 月 26 日(火)～29 日(金)
場　所：　玉川大学，東京都町田市
主　催：　日本冷凍空調学会

●日本流体力学会　年会 2017
開催日：　2017 年 8 月 30 日(水)～9 月 1 日(金)
場　所：　東京理科大学　葛飾キャンパス，東京都
主　催：　日本流体力学会

国際会議案内

ー2018 年ー

●The 16th International Heat Transfer Conference (IHTC-16)
開催日：2018 年 8 月 10 日(金)～15 日(水)
開催地：Chinese National Convention Center, Beijing, China

●The 9th The definite conference on Turbulence, Heat and Mass Transfer (THMT-18)
開催日：2018 年 7 月 10 日(火)～13 日(金)
開催地：Rio de Janeiro, Brazil

●The 3rd Thermal and Fluids Engineering Conference
開催日：2018 年 3 月 4 日(日)～7 日(水)
開催地：Fort Lauderdale, FL, USA

ー2017 年ー

●The 11th Asia-Pacific Conference on Combustion（ASPACC2017）
開催日：2017 年 12 月 10 日(日)～14 日(木)
開催地：Sydney, Australia

●The 11th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (PSFVIP-11)
開催日：2017 年 12 月 1 日(金)～3 日(日)
開催地：Kumamoto University, Kumamoto, Japan

●The 14th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2017)
開催日：2017 年 11 月 1 日(水)～3 日(金)
開催地：Sendai, Japan

●The 7th Annual World Congress of Nano Science and Technology-2017 (Nano S&T-2017)
開催日：2017 年 10 月 24 日(水)～26 日(金)
開催地：Hilton Fukuoka Sea Hawk, Fukuoka, Japan

●The 14th International Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualization (FLUCOME 2017)
開催日：2017 年 10 月 8 日(日)～12 日(木)
開催地：University of Notre Dame, Indiana, USA

●The 28th International Symposium on Transport Phenomena (ISTP-28)
開催日：2017 年 9 月 22 日(金)～24 日(日)
開催地：Peradeniya University, Sri Lanka

●The 21st European Conference on Thermophysical Properties (ECTP21)
開催日：2017 年 9 月 3 日(日)～8 日(金)
開催地：Graz, Austria

第 95 期部門組織

熱工学部門運営委員会

●部門長
藤田 修　北海道大学

●副部門長
宗像 鉄雄　産業技術総合研究所

●幹事
林 潤　京都大学

●部門運営委員
北川 石英　京都工芸繊維大学
橋本 望　北海道大学
小宮 敦樹　東北大学
中村 寿　東北大学
一柳 満久　上智大学
出田 武臣　（株）ＩＨＩ
角田 直人　首都大学東京
熊野 寛之　青山学院大学
佐竹 信一　東京理科大学
佐藤 進　東京工業大学
塚本 雅裕　カルソニックカンセイ（株）
豊田 浩之　（株）日立製作所
服部 康男　（財）電力中央研究所
泰岡 顕治　慶應義塾大学
佐藤 英明　（株）デンソー
中山 浩　中部電力（株）
保浦 知也　名古屋工業大学
松田 淳　名城大学
小田 豊　関西大学
宋 明良　神戸大学
福谷 和久　（株）神戸製鋼所
横峯 健彦　京都大学
中原 真也　愛媛大学
松村 幸彦　広島大学
浅岡 龍徳　信州大学
仮屋 圭史　佐賀大学
洪 定杓　鹿児島大学
松田 昇一　琉球大学

熱工学部門各種委員会

●総務委員会
委員長　藤田 修　北海道大学
幹事　小宮 敦樹　東北大学
委員　花村 克悟　東京工業大学
宗像 鉄雄　産業技術総合研究所
林 潤　京都大学
黒坂 俊雄　神鋼リサーチ（株）
大曾根 靖夫　（株）日立製作所
染矢 聡　産業技術総合研究所
松本 聡　ＪＡＸＡ
堀木 幸代　東京海洋大学

●広報委員会
委員長　染矢 聡　産業技術総合研究所
幹事　片岡 秀文　大阪府立大学
委員　大徳 忠史　秋田県立大学
富樫 憲一　北海道立総合研究機構
福留 功二　立命館大学
福江 高志　岩手大学
早川 晃弘　東北大学
江目 宏樹　芝浦工業大学

●年次大会委員会
委員長　小田 豊　関西大学
幹事　網 健行　関西大学

●熱工学コンファレンス委員会
委員長　平澤 良男　富山大学
幹事　浅岡 龍徳　信州大学

●学会賞委員会
委員長　赤松 忠光　大阪大学
幹事　津島 将司　大阪大学

●講習会委員会
委員長　畠山 友行　富山県立大学
幹事　福江 高志　岩手大学

●日韓合同会議委員会
委員長　丸田 薫　東北大学
幹事　中村 寿　東北大学

●部門賞委員会
委員長　宗像 鉄雄　産業技術総合研究所
幹事　林 潤　京都大学

●年鑑委員会
委員長　白樫 了　東京大学
幹事　岡島 淳之介　東北大学

●出版委員会
委員長　藏田 耕作　九州大学
幹事　仮屋 圭史　佐賀大学

●環太平洋熱工学会議委員会
委員長　店橋 護　東京工業大学
幹事　深潟 康二　慶應義塾大学

●JTST 委員会
委員長　山田 昇　長岡技術科学大学
幹事　櫻井 篤　新潟大学

その他

編集後記

水などの大きな融解潜熱を有する物質（潜熱蓄熱材）は，固液相変化の過程において多量の熱を，大きな体積変化を伴わずに吸収・放出します．熱工学の分野においては，熱エネルギーの効率的な利用を目的として，このような潜熱蓄熱材の性質を高密度蓄熱に応用する技術（潜熱蓄熱技術）の研究が進められています．

本号の TED Plaza では，3 つの異なった物質を潜熱蓄熱材として用いた，それぞれ異なる方式の潜熱蓄熱技術をご紹介いただきました．

明治大学の川南剛先生には，パラフィン系潜熱蓄熱材が極めて微細な粒子の形態をとって液中に懸濁した構造をとることで，潜熱蓄熱材が凝固した状態でも流動性を失わないことから，高い機能性をもった潜熱蓄熱媒体としての利用が期待される相変化エマルションの諸特性についてご執筆いただきました．

青山学院大学の熊野寛之先生には，水の凝固点よりもやや高い温度で水和物を形成することから必要以上に低い温度域を避けて潜熱蓄冷熱を行うことができる TBAB 水溶液を用い，相変化エマルションと同様に，生成された水和物が液中に懸濁した構造をとる TBAB 水和物スラリーの諸特性についてご紹介いただきました．

岩手大学の廣瀬宏一先生，王強勝様には，最も身近で安価かつ安全な潜熱蓄熱材である水を用い，パイプ外面に氷を成長させることで蓄冷熱を行うスタティック型氷蓄熱槽を対象として，凍結と密度逆転を伴う自然対流が共存する非常に複雑な氷の成長過程を，数値計算と実験の両面から捉えたご研究をご紹介いただきました．

今回の TED Plaza は，僭越ながら広報委員が記事のテーマを設定し，ご執筆内容に注文を付けさせていただいたため，ご執筆いただいた皆様にはより一層のお手数をお掛けすることになってしまいました．しかしながら，ご執筆テーマの選択や内容の重複などについて暖かいお心遣いをいただいた結果，異なった方式の技術を一覧できる，よい記事が出来上がったと思います．

お忙しい中，ご執筆を快諾くださり，編集作業に根気強くご協力くださった皆様に，心より御礼申し上げます．

（編集担当委員：富樫・福江）

第 95 期広報委員会
委員長：　染矢 聡　（産業技術総合研究所）
幹 事：　片岡 秀文　（大阪府立大学）
委 員：　大徳 忠史　（秋田県立大学）
富樫 憲一　（北海道立総合研究機構）
福留 功二　（立命館大学）
福江 高志　（岩手大学）
早川 晃弘　（東北大学）
江目 宏樹　（芝浦工業大学）

©著作権：2017　一般社団法人　日本機械学会　熱工学部門