

平成 30 年 6 月 21 日現在

機関番号：13601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17986

研究課題名(和文)蓄熱型蒸発器を備えた吸収式冷凍機による低質未利用熱の有効活用

研究課題名(英文)Development of ice thermal storage system combined with absorption refrigerator for utilization of low grade unutilized heat

研究代表者

浅岡 龍徳 (ASAOKA, Tatsunori)

信州大学・学術研究院工学系・准教授

研究者番号：30508247

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：蓄熱型の吸収式冷凍システムを開発し、現状では利用が困難な条件にある低質の未利用熱を有効に活用することを目指す研究である。蒸発器内で氷スラリーを生成するという、独自の手法を用いた製氷システムを実用化するための基礎的検討を行った。吸収・吸着冷凍サイクルの評価と氷スラリーの安定輸送の方法について検討した。検討の結果、本システムの有用性を確認し、システムの性能を最大化する運転条件について明らかにした。また、氷スラリーを安定的に輸送・貯蔵するため、氷スラリーの流動観察実験を行い、管閉塞の発生要因を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We will develop the ice thermal storage system combined with sorption refrigerator to convert the unutilized heat into useful cooling energy for refrigeration. In the present system, ice slurry is produced in the evaporator of the sorption refrigerator. As the advantage of this system, we can transport ice slurry over a long distance by the pipe transportation. As the results the investigations, we showed the usefulness of the system because the efficiency of the system is high. We showed the operation condition to maximize the efficiency. Moreover, we clarified the technique to avoid the pipe blockage in the ice slurry flow. We can realize the continuous operation of the system by using the technique.

研究分野：熱工学

キーワード：未利用エネルギー 吸収式冷凍機 吸着式冷凍機 スラリー 固液二相流 蓄熱 固液相変化

## 1. 研究開始当初の背景

熱源の発熱量の規模が小さい、または、発熱量の時間変動が大きいような未利用熱は利用が難しいとされる。また、山間部の地熱・太陽熱などの未利用熱は、近くに冷熱の需要がないため有効活用が難しい。

本研究は、蓄熱型の吸収式冷凍システムを開発し、現状では利用が困難な条件にある低質の未利用熱を有効に活用することを目指す研究である。本研究のシステムでは、冷熱が熱密度の高い氷スラリーとして蓄えられるため、瞬間的な大きな負荷に対しても安定して冷熱を供給することが可能となる。また、氷スラリーをつくることで、トラックやパイプラインでの長距離の輸送が可能となり、需要と供給の不整合を解消できる。

## 2. 研究の目的

本研究のシステムを図1に示す。冷凍サイクルは蒸発器、吸収器、再生器、凝縮器からなる吸収式冷凍機であるが、蒸発器内で氷スラリーをつくるために、冷媒としてエタノール水溶液を用いる点が本研究の特徴である。吸収剤にはLiBr水溶液を用いる。

低圧の蒸発器内で、減圧の作用により冷媒が蒸発し、蒸発潜熱が除去されることで冷却され、冷媒液中に流動性のある氷スラリーが生成する。

蒸発器内の圧力は、吸収器で吸収剤が冷媒蒸気を吸収することで低圧に保たれる。吸収の結果として希釈された吸収剤は、再生器で加熱されることで、濃縮され再利用可能となる。同時に、ここで吸収剤から分離された冷媒蒸気は凝縮器で液化され、蒸発器に戻って再利用される。

また、蒸発器内に氷が堆積するのを防ぐため冷凍サイクルとは別の配管系統で氷スラリーを取り出し、氷を貯氷部に貯蔵する。氷を分離した後の水溶液は再び蒸発器に戻り冷媒として利用する。

本研究では、このシステムの開発のため、以下の課題について取り組む。

●課題 A エネルギー供給の変動に対応した吸収剤の再生速度の制御手法の開発：吸収器内の吸収剤の濃度が低すぎると十分な吸収能力が得られず、高すぎると吸収剤の結晶化によりシステムの運転が妨げられるため、吸収剤を適切な速度で再生（濃縮）することが必要である。さらに、実用においては、再生器に供給される熱量が不安定な状況においても、安定した運転が求められるため、吸収剤の濃度を管理する制御手法を開発する。

●課題 B 氷の分離貯蔵のための氷スラリーの安定輸送・貯蔵手法の開発：氷スラリーは流動性を有するため、蒸発部内の氷は配管を流して貯氷部に輸送し貯蔵することができる。

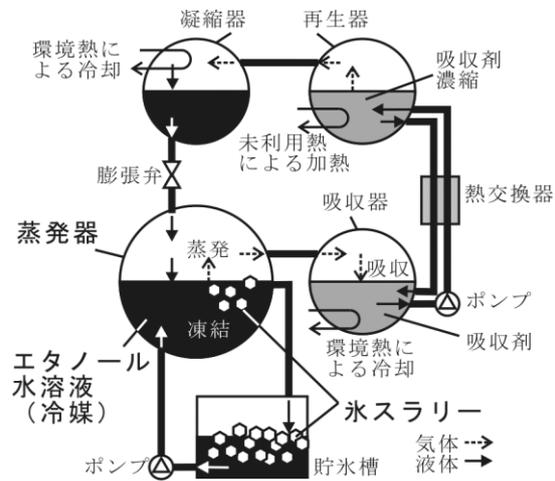


図1 本研究の蓄熱型吸収式冷凍システム(氷スラリー生成システム)。この製氷システムの駆動エネルギーは再生器に使用される熱エネルギーである。電気ではなく、100°C程度の低温の未利用熱を利用して運転できることが利点である。

しかしながら、固液二相流の流動挙動は単相流に比べ著しく複雑である。氷スラリーの安定輸送のため、基礎的な流動挙動について明らかにする。

●課題 C シリカゲルの利用による連続運転手法の検討：吸収式冷凍機のLiBr水溶液は、液体であるため取り扱いが容易であり、システムの簡素化や運転の自由度を向上させる点で優れる。しかし液体であるための欠点として、再生過程において、冷媒(水・エタノール)を完全に分離することができない点が挙げられる。LiBr水溶液以外の候補としてシリカゲルを用いた吸着式冷凍機について検討する。シリカゲルは固体であるため、液体よりも取り扱いが不自由であるが、冷媒の分離は容易となる

## 3. 研究の方法

### 3.1 エネルギー供給の変動に対応した吸収剤の再生速度の制御手法の開発 (課題 A)

吸収剤の濃度を管理する制御手法を開発するため、基礎的物性値として吸収剤の蒸気圧を測定する。

図2に実験装置の概略を示す。真空容器内はステンレス製であり、真空計を備えている。試料には水、エタノール水溶液、混合吸収剤を用いる。ここで、混合吸収剤とは本システムの吸収剤となる水・LiBr・エタノールの混合物を表す。

はじめに、真空容器内に試料を設置し、真空ポンプで真空容器内の不凝縮ガス(空気)を排出する。試料の飽和蒸気圧まで圧力が低下したら、排気を停止しバルブを閉じる。試

料の温度を任意に保つため、真空容器を一定温度のブライン中に設置する。ブラインの温度が一定になった後、試料とブラインを攪拌しながら、試料の温度がブラインの温度と同じになるまで30分以上保持する。試料の温度が定まった後、バルブを開き、真空ポンプにより再度不凝縮ガスの排出を2分程度行う。この排気作業に伴う試料の蒸発により、試料の温度がわずかに低下する。したがって、温度を再度安定させるため、排気終了後、5分程度保持し、圧力の変化がなくなった後の真空計の指示値を読み、測定値とした。真空計の分解能は指示値の±5%である。

前述のように、混合吸収剤は水・ET・LiBrの3成分の混合物である。3成分混合物のそれぞれの成分の混合比率を表すために、本研究では、特定の成分と水のみを考慮した(第3の成分を無視した)質量分率を用い、それぞれ、エタノール濃度  $x$ [wt%],  $y$ [wt%], LiBr濃度  $z$ [wt%]と表す。エタノール濃度については液相の濃度を  $x$ , 気相の濃度を  $y$ と表す。すなわち、水, エタノール, LiBrの質量を  $m_w, m_{ET}, m_{LB}$ とすると,  $x, z$ はそれぞれ式(1), (2)となる。 $y$ の定義式は  $x$ と同じである。

$$x = m_{ET} / (m_{ET} + m_w) \times 100 \quad (1)$$

$$z = m_{LB} / (m_{LB} + m_w) \times 100 \quad (2)$$

ただし、今回の測定では、LiBrの全体質量分率  $z$ は0.6で一定とした。

### 3.2 氷の分離貯蔵のための氷スラリーの安定輸送・貯蔵手法の開発 (課題B)

本実験に用いた圧力損失測定装置の概要を図3に示す。貯蔵タンクに貯められた氷スラリーを、ギアポンプを使って直径7.5mmの円管(助走区間と試験区間)に流す。流量をコリオリ流量計で測定し、試験区間前後の圧力損失を差圧計で測定する。試験区間から流出した氷スラリーは再び貯蔵タンクへと戻る。氷スラリーは5wt%エタノール水溶液から過冷却方式で生成する。この方法で生成した氷スラリーに含まれる氷の平均直径はおよそ0.2mmである。

はじめ、貯蔵タンク出口に金網を設置し、円管内に氷スラリー中の水溶液のみを流し、循環させておく。十分に時間が経過した後、金網を外し、氷粒子が管内に流れるようにする。氷が流れ始めた直後について、流量測定と圧力損失測定を行う。1回の測定はおよそ2分間である。この実験により、流動開始直後について調べる。

次に、IPF(氷充填率)がおよそ25wt%の初期状態から0wt%になるまで氷スラリーを循環させ続け、流量測定と圧力損失測定を行う。本実験装置において、長時間氷スラリーを流動させ続けると、ギアポンプのモーターによ

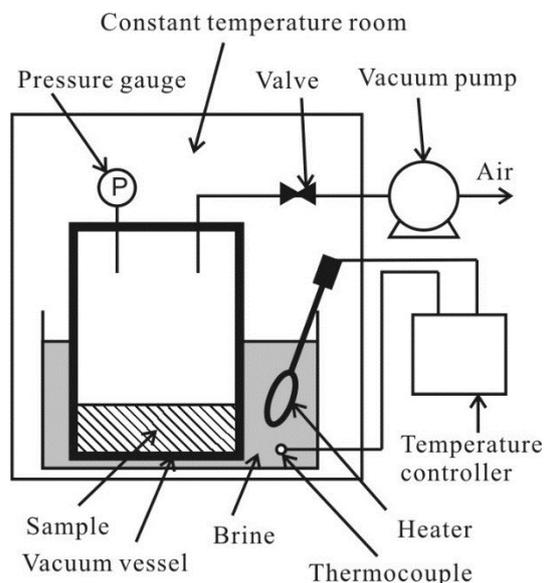


図2 混合吸収剤の蒸気圧測定

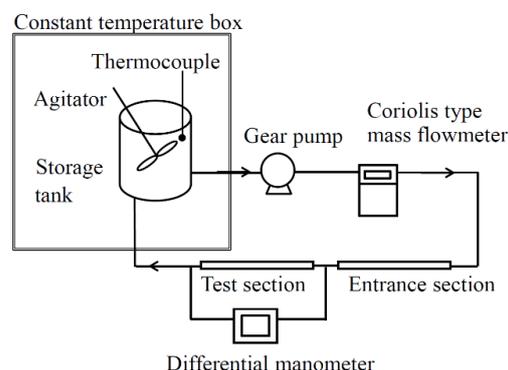


図3 氷スラリーの流動実験

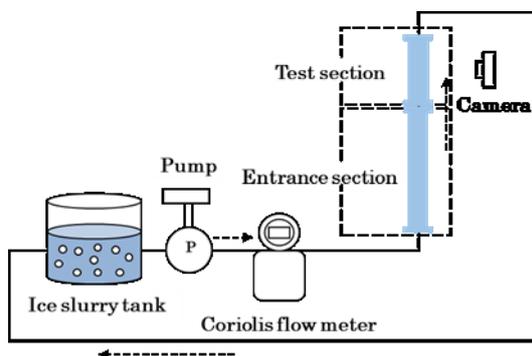


図4 氷スラリーの流動の観察実験

る発熱などにより氷スラリー中の氷粒子が融解し、徐々にIPFが減少する。IPFの低下に合わせて1回の実験あたり10回程度測定を行う。1回の測定時間はおよそ2分間である。この実験により、長時間流動した後について調べる。

さらに、氷スラリーの流動条件の変化について検討するため流動の様子を観察実験を実施した。図4に実験装置の概略を示す。あら

かじめ準備してタンクに貯めておいた氷スラリーを循環させる。観察部は内径 30mm 長さ 200mm の流路の中央に内径 4mm の絞り部をもつアクリル製流路である。この流路の下方から上方に向かって鉛直上向きに氷スラリーを流し、絞り部での氷の付着・堆積挙動を観察する。観察部の上流には内径 30mm 長さ 1m の整流区間を設けている。レイノルズ数  $Re$  は、代表長さに観察部の流路直径 30mm、動粘度に母液の水溶液の値を用いて算出する。観察部より上流にポンプと流量計を設置する。ポンプは流量調整に適するギアポンプを用いる。流量計はコリオリ式であり、流れる氷スラリーのバルクの流量と密度を同時に測定する。測定された密度から IPF を推定する。

氷スラリーは初期濃度 5wt% のエタノール水溶液から生成し、実験開始時の IPF は約 20% である。 $Re$  一定条件の実験においては周囲との熱の授受により氷粒子が融解するため IPF が徐々に減少し、最終的には IPF 5% 程度となるまで氷スラリーを流し続ける。 $Re$  を上昇させていく実験においては、融解の影響を最小限にするため各レイノルズ数  $Re$  で 3 分ずつ流動させる。カメラを用いて流動中の絞り部での氷粒子の挙動を観察する。各条件で同じ実験を 3 回以上行い、いずれも流動様相、付着・堆積過程が同じ結果となることを確認している。

### 3.3 シリカゲルの利用による連続運転手法の検討 (課題 C)

図 5 に実験装置の概略を示す。シリカゲルは、東海化学工業所のトーカイゲル A 型、白、7-12 を使用した。サンプルは、水 (蒸留水)、エタノール、および、10wt%、30wt%、50wt% のエタノール水溶液を用いた。

実験開始前に、シリカゲルを真空中で加熱し、水分を十分に脱着させる。真空容器内を真空ポンプで空引きして乾燥させた後、開封して、シリカゲル 40g を冷却版の上に 1 段に並べる。シリカゲルの温度は K 型熱電対で測定する。冷却板に冷水を流し、シリカゲルを冷却する。シリカゲル温度が 20°C になるように冷水の温度を調節する。また、ヒーターにより蒸発容器を加熱・昇温する。真空容器を密封して真空ポンプで 50Pa まで減圧した後、バルブ V1 を閉じ、真空ポンプを止める。バルブ V2 を開き、サンプルを一定量注入する。シリカゲルがサンプルをすべて吸着するまでしばらく時間を置いた後、真空容器内の圧力を測定する。また、十分時間が経過した後の圧力変化を測定し、真空容器内の水分吸着と空気の流入による誤差の補正に用いる。同様の手順で、冷媒の注入量と冷媒の種類を変えて実験を行う。

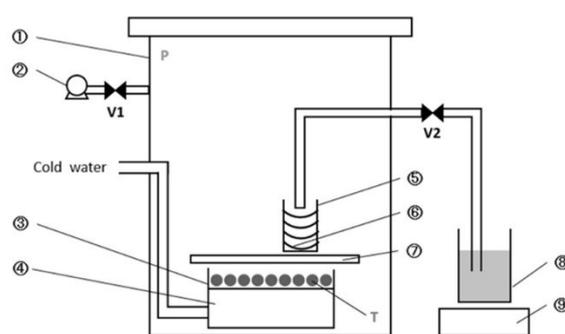


図 5 シリカゲルのエタノール水溶液吸着特性の測定。1.真空容器、2.真空ポンプ、3.シリカゲル、4.冷却板、5.蒸発容器、6.ヒーター、7.金網、8.サンプル容器、9.質量計、V.バルブ、T.温度計、P.圧力計

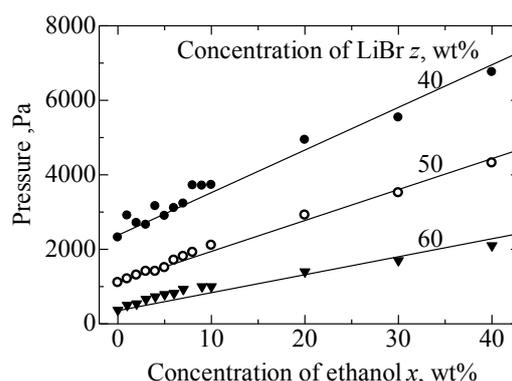


図 6 30°Cにおける混合吸収剤の蒸気圧。LiBr 濃度  $z = 60\text{wt}\%$

## 4. 研究成果

### 4.1 エネルギー供給の変動に対応した吸収剤の再生速度の制御手法の開発 (課題 A)

混合吸収剤の飽和蒸気圧の測定結果を図 6 に示す。LiBr 濃度が一定の条件では、エタノール濃度が高くなるほど、混合吸収剤の蒸気圧が線形的に高くなることがわかった。この関係を近似的に表す関係式を導出し、それを用いて本研究の蓄熱型吸収式冷凍システム (氷スラリー生成システム) の理論 COP を算出し、図 7 に示す。図の横軸は冷媒のエタノール濃度を表しており、濃度 0 のとき既存の吸収式冷凍機と同じになる。図より、エタノール濃度が高くなるほど COP は低下するものの、低濃度であれば既存の吸収式冷凍機と同等の COP を示すことがわかった。

図は安定運転 (定常運転) の条件における結果である。入力条件を変化させれば、変動を考慮した条件における試算も可能であるが、現段階では実際の運転条件を明確化するに至らなかったため、変動を考慮した検討には至らなかった。

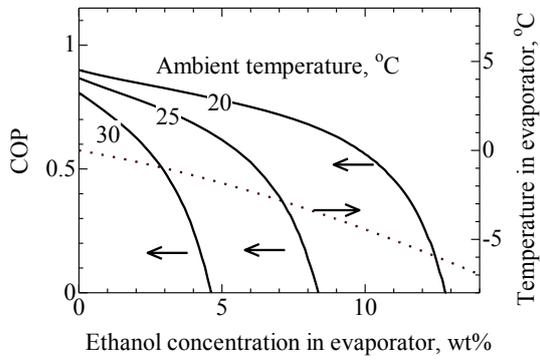


図 7 安定運転条件における吸収式冷凍システム（氷スラリー生成システム）の理論 COP

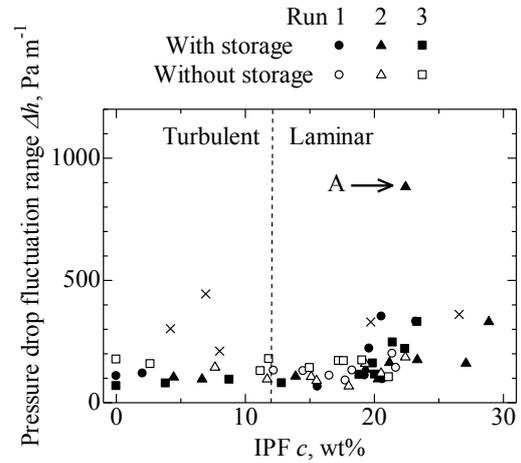
#### 4.2 氷の分離貯蔵のための氷スラリーの安定輸送・貯蔵手法の開発（課題 B）

図 8(a)流動開始直後の実験における、それぞれの測定時間についての圧力損失変動を示している。圧力損失変動は、測定時間中の圧力損失の平均値（平均圧力損失）と時間変化する圧力損失の差の最大値として定義している。図において、圧力損失変動は IPF（氷充填率）に依存せず、その値は 100~300Pa 程度となることわかる。この圧力損失変動は実験中の流量の変動によるものである。

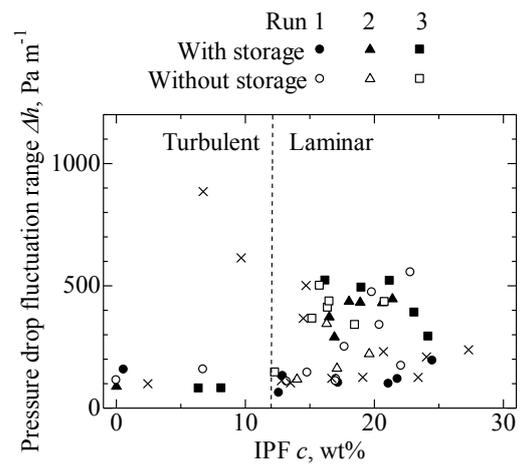
図 8(b)は長時間氷スラリーを流動した実験における圧力損失変動を示している。図より、流動開始直後の実験と流量変動が同等であるにも関わらず、層流域において圧力損失変動が 100~900Pa と大きくなることわかる。この大きな乱れは、流量変動によるものではなく、流動する氷スラリー中の IPF 変動によるものである。

次に、このような圧力損失変動が生じる理由を調べるため、絞り部における氷スラリーの流動の様子を観察した。観察結果を図 9 に示す。レイノルズ数  $Re$  が 300 の条件で、図 9(b)のように管内壁の半分ほどに氷粒子が堆積し、しだいに成長する様子が観察された。 $Re$  を 500 に上昇させると成長速度が遅くなり、堆積した氷粒子が流路円周方向に成長していく様子が確認された。 $Re$  を 1000 に上昇させると、成長速度は  $Re$  が 500 のときよりもさらに遅くなった。そして  $Re$  を 1500 に上昇させた直後、氷粒子は管壁から剥離し下流へと流された。

レイノルズ数  $Re$  を 500, 1000, 1500, 2000 で一定時間流動させ続けた場合の結果を表 1 に示す。○は発生確率 100%, △は 50%程度, ×は 0%を表す。付着 (Adhesion) とは管内壁に氷粒子の堆積が無い状態から氷スラリーを流動させた際に新たに氷粒子の堆積が生じる場合、成長 (Growth) とはすでに堆積が生じている状態から堆積した氷粒子が管壁面に沿って成長する場合、剥離 (Separation) とはす

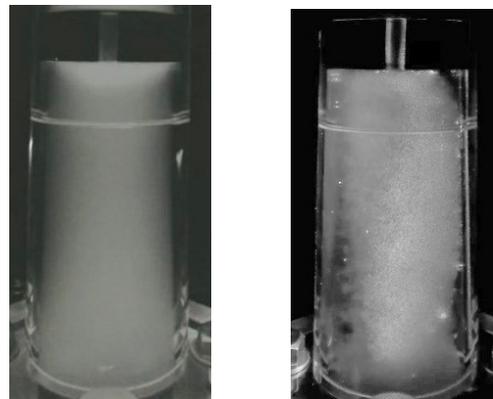


(a) 流動開始直後



(b) 長時間流動した後

図 8 氷スラリー流動中の圧力損失変動.  $Re$  は 4000. 5 wt%エタノール水溶液を利用. 点線は層流・乱流の境界を示す.



(a)氷の堆積なし (b)絞り部への堆積あり

図 9 透明管による氷スラリーの閉塞の可視化実験. 適切な流速と氷充填率の条件では(a)のように安定した流動を維持するが、条件が悪いと(b)のように絞り部に氷の付着・堆積が生じる。

で堆積が生じている状態から堆積した氷粒子が管壁面から剥がれ流路下流に流される場合を表す。

付着の原因としては、絞り入口部の循環渦領域内で氷粒子が滞留することにより、氷粒子同士の凝集が生じて大きな塊となり、それが絞り部に堆積することが考えられる。成長の原因としては、壁面付近を流れる氷粒子が、循環渦領域内で付着した氷粒子にぶつかり凝集して取り込まれることが考えられる。また、剥離の原因としては、堆積した氷粒子の塊が流れのせん断力により破壊され下流へ流されることが考えられる。また、絞り部への流入まえの流速分布によって表1の傾向が変化することが明らかになっており、その点についてはさらなる検討を要する。

表1 絞り部への氷の堆積条件と流速の関係

Reynolds number	Adhesion (付着)	growth (成長)	Separation (剥離)
300	○	○	×
500	△	○	×
1000	×	△	×
1500	×	×	△
2000	×		

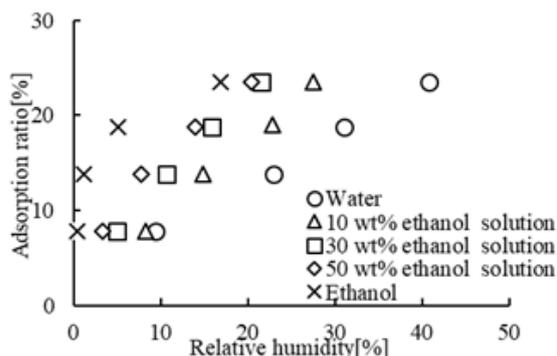


図10 シリカゲルのエタノール水溶液吸収特性

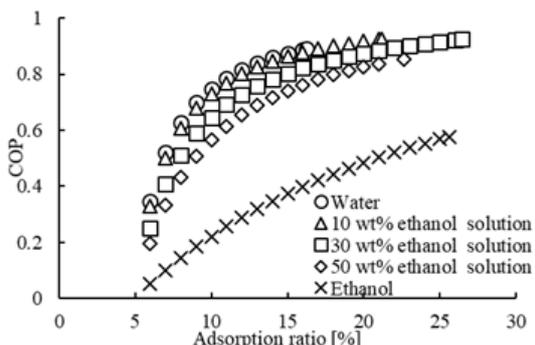


図11 シリカゲルを用いた場合の吸着式冷凍システム（氷スラリー生成システム）の理論COP

#### 4.3 シリカゲルの利用による連続運転手法の検討（課題C）

シリカゲルのエタノール水溶液吸収特性の測定結果を図10に示す。この関係を用いてシリカゲルを用いた場合の本研究の冷凍システム（氷スラリー生成システム）の理論COPを算出し、図11に示す。図より適切な条件で用いると、LiBr水溶液を用いた場合よりもCOPが高くなることがわかる。このことより、効率の面でも、本システムにシリカゲルを用いることが有効であることがわかった。

#### 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計1件）

- ① Tatsunori Asaoka, Atsushi Tajima, Hiroyuki Kumano, Experimental investigation on inhomogeneity of ice packing factor in ice slurry flow. International Journal of Refrigeration, 70, 33-41, 2016. 査読あり

DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2016.07.006

〔学会発表〕（計6件）

- ① 保科大樹, 堀江泰規, 浅岡龍徳, 円管内を流動するアイススラリーの閉塞現象の可視化実験, 第55回日本伝熱シンポジウム CD-Rom, B322, 2018.
- ② 浅岡龍徳, 氷スラリーの安定的な配管搬送技術に関する基礎的検討, 第52回空気調和・冷凍連合講演会 CD-Rom, 2018.
- ③ 横水郁哉, 浅岡龍徳, 吸着式アイススラリー生成機に関する研究: シリカゲルのエタノール水溶液吸着特性, 2017年度日本冷凍空調学会年次大会 CD-Rom, C132, 2017.
- ④ 星野洋志, 堀江泰規, 浅岡龍徳, 管内閉塞に着目したアイススラリーの流動状態の観察. 第54回日本伝熱シンポジウム USB F315, 2017.
- ⑤ Tatsunori Asaoka, Atsushi Tajima, Hiroyuki Kumano, Effect of variation of IPF on flow characteristic of ice slurry. Abstract of The First Pacific Rim Thermal Engineering Conference (USB), PRTEC-14227, 2016.
- ⑥ 遠藤雄介, 黄橙程, 浅岡龍徳, アイススラリー生成のための吸着式冷凍機の運転方法に関する検討. 2015年度日本冷凍空調学会年次大会 CD-ROM, E344, 2015.

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

浅岡 龍徳 (ASAOKA, Tatsunori)

信州大学・学術研究院工学系・准教授

研究者番号: 30508247