氷スラリーのコイル内流動と熱伝達特性 Flow and Heat transfer Characteristic of Ice Slurries in a Coil

正 堀部 明彦 (岡山大院) 正 春木 直人 (岡山大院) 〇学 田中 邦明 (岡山大院)
Akihiko Horibe, Naoto Haruki and Kuniaki Tanaka
Okayama University, 3-1-1 Tsushima-naka, Kita-ku, Okayama

This paper presents the effect of some factors on the flow and heat transfer characteristic of ice slurry in a coil. The ice slurry is solid-liquid fluid which consists of ice particles and water. The experiments were carried out under various parameters of ice slurry velocity, ice packing factor of ice slurry, and heat flux. As a result, it was found that interaction between latent heat of ice and restraint of secondary flow has an effect on the flow and heat transfer characteristic of ice slurry in a coil.

Key Words: Ice slurry, Coil, Heat transfer, Forced convection

1. 緒言

近年、電力消費量が民生を中心に増加の一途をたどっており、さらに電力需要には季節や昼夜間で大きな差がある。そのため、空調機器の省エネルギー化や昼夜の電力負荷の平準化が求められている。そこで現在、安価な夜間電力を利用して製氷し、その氷を昼間の空調に利用する氷蓄熱システムが注目されている。その中でも氷と水の固液二相流である氷スラリーを利用したものは、氷の融解潜熱による高い熱輸送能力を持ち、更なる設備の小型化、省エネルギー化が可能となる⁽¹⁾。しかし、氷スラリーを用いた場合、氷粒子の凝集による管閉塞や氷粒子と管壁との摩擦による圧力損失の増大などの問題が生じる。本研究は、平均流速 u_s 、氷の体積分率 IPF (IPF : Ice Packing Factorの略)、熱流束 q を変化させた場合において、氷スラリーのコイル管内流動および熱伝達特性に及ぼす要因について実験的に検討するものである。

2. 実験装置および方法

2-1 実験装置

実験装置は Fig.1 のように氷スラリー混合槽、ボルトテックスポンプ、コイル状試験部、電磁流量計等からなり、さらに氷スラリーの流動状態を視認するためコイル状試験部の前後に可視化試験部を設置している。なおコイル状試験部の入口出口付近には直接通電用の電極を設けている。コイル状試験部は内径 14mm、外径 16mm、曲率半径比 $R/r = 20$ 、ステンレス製で 6 回巻きコイル状の円管である。可視化試験部は、軸方向長さ 300 mm、内径 14.2 mm のアクリル製円管である。温度測定のために、コイル状試験部に T 型熱電対を入口から、0, 10, 30, 50, 90, 120, 180, 360, 720, 1080, 1440, 1800, 2160° の位置のそれぞれ外壁の上下内外に取り付けた。同時に圧力を測定するためにコイル状試験部の前後に圧力タップを設置し差圧計に接続している。実験装置は周囲への熱損失を防ぐためグラスウールでの断熱し、さらに室温を 2℃ に設定した恒温恒湿室内にて実験を行った。

2-2 実験方法

本実験では、実験パラメーターとして、氷スラリーの流速 u_s 、試験部入口氷充填率である IPF_m 、熱流束 q を選定しており、その範囲を Table 1 に示す。なお、氷粒子の平均径 d_p は 0.8mm である。実験では恒温恒湿室内にて、混合槽内を所定の IPF にし、流速が所定の条件に安定したところで、温度変化、圧力損失などを計測し、氷スラリーの流動状態について検討した。試験部は直接通電により等熱流束加熱して、氷スラリーと管壁の温度を測定し熱伝達率を求めた。

Fig.1 Outline figure of experimental equipment

Table 1 Several parameter of the experiment

u_s (m/s)	IPF (%)	q (kW/m ²)
0.8~2.0	0~20	5.5・10.5・15.5

3. 実験結果

3-1 圧力損失

Fig.2 は試験部の圧力損失を示し、グラフの横軸は氷スラリーの平均流速 u_s を、縦軸は試験部全体での圧力損失を測定区間長さ L で除した値 ($\Delta P/L$) である。本実験における実験条件は曲率半径比 $R/r = 20$ 、熱流束 $q = 10.5 \text{ kW/m}^2$ であり、過去の実験⁽²⁾において使用した曲管の場合の結果も並記している。

その結果、水のみを流動させた場合には、コイル管では曲管に比べ単位長さあたりの圧力損失が増大している。曲管を流動するときに生じる二次流れは曲管の入口からおおよそ 90° の地点で発達しきるため、180° の曲管では発達した二次流れの影響を受けているのは試験部の約半分の区間だけと考えられる。しかし、コイル管では試験部の約 95% の区間において発達した二次流れの影響を受けている⁽³⁾。そのため、二次流れによる管内の旋回流の影響によって管内流れが乱され、より大きな圧力損失になったと考えられる。

また、コイル管において $IPF_m=10\%$ では、いずれの流速においても、氷スラリーと水の単位長さあたりの圧力損失に大きな差は確認できなかった。曲管においては管壁と氷粒子の衝突・摺動による摩擦力の増加があり、一方で管内の氷粒子が曲管内での二次流れを抑制する作用が働くことが考えられる。そのため、コイル管においてもこの二つの作用により圧力損失の増加と抑制とが相互に作用すると考えられる。その結果、いずれの流速でも二つの作用の影響が互いに打ち消しあい、氷スラリーと水の単位長さあたりの圧力損失に大きな違いは確認できなかったと推察できる。

3-2 熱伝達率

Fig.3-1, 3-2 は横軸を試験部入口からの角度 θ とし、縦軸は局所熱伝達率 α_θ を示したものである。Fig.3-1 が試験部上(△)下(▽)を、Fig.3-2 が試験部内(○)外(□)における局所熱伝達率を示す。実験条件は曲率半径比 $R/r=20$ 、氷スラリー流速 $u_s=1.0, 2.0$ m/s、試験部入口氷充填率 $IPF_m=5, 10\%$ 、等熱流束 $q=15.5$ kW/m²である。

Fig.3-1, 3-2 より $u_s=1.0$ m/sにおいて試験部上部・外側では $IPF_m=5\%$ より $IPF_m=10\%$ の方が試験部後半にかけて若干高い熱伝達率を示していることがわかる。この時、 $IPF_m=5\%$ の場合には $\theta=1150^\circ$ 地点付近で氷スラリー中の氷が全て融解するが、 $IPF_m=10\%$ では試験部出口まで氷が存在する。そのため、氷粒子の浮力の影響と曲管流れにおける遠心力の影響により氷粒子が試験部上部・外側に偏在しその部位では氷の融解潜熱が影響したためだと推察できる。また、 $u_s=2.0$ m/sでは管外側において $IPF_m=5\%$ より $IPF_m=10\%$ の方が試験部後半にかけて若干高い熱伝達率を示していることがわかる。これは、試験部後半にかけて小さくなったクラスターは、管内流れの主流の慣性力が氷粒子の浮力の影響よりも大きいことと遠心力の影響によって氷粒子が管外側のみに偏在し流動するが、 $IPF_m=10\%$ の方が管外側における管壁と氷粒子の接触面積が大きいために $IPF_m=5\%$ よりも多くの氷の融解潜熱を得ているものと推察できる。しかし、管上部では熱伝達率の変化はほとんど見られなくなった。これは、試験部内の滞留時間が減少するため、この条件における氷粒子の融解は試験部全体で3~4%程度と $u_s=1.0$ m/sの場合に比べてあまりなく、融解潜熱による熱伝達率増加の効果が減少したことと、氷粒子が管外側へ偏在し流動するためと考えられる。

一方、試験部の下部および内側では、いずれの流速においても IPF を変化させた場合に熱伝達にはほとんど差がないことがわかる。先に記したように試験部上部・外側の熱伝達の結果から、試験部入口ではクラスターを形成し流路断面全体を流動していた氷スラリーが、加熱されることによってクラスターが小さくなり、氷粒子の浮力と曲管流れにおける遠心力の影響によって管上部および外側に偏在する。そのために管下部および内側では氷の融解潜熱を得ることが出来ず、下部および内側では差が生じなかったと推察できる。

4. 参考文献

- (1) 大平昭義, 冷空論, 21-4 (2004), 285
- (2) 堀部明彦ら, 第45回日本伝熱シンポジウム講演論文集, Vol. II+III, (2008), 617
- (3) Wael Ibrahim Ahmed Aly, 岡山大学大学院博士学位論文 (2007)

Fig.2 Relationship between Local pressure loss and Mean velocity

Fig.3-1 Relationship between α and θ (top & bottom)

Fig.3-2 Relationship between α and θ (in & out)