

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19560189

研究課題名（和文） 積層銅箔による凍結・融解促進に関する研究

研究課題名（英文） Study of Freezing and Melting Enhancement by Using Laminated Copper Foils

研究代表者

菅原 征洋（SUGAWARA MASAHIRO）

秋田大学・工学資源学部・教授

研究者番号：10042011

研究成果の概要：凍結・融解層に僅か銅箔を2.5～5%充填するだけで、銅箔を充填しない場合と比較して凍結の場合は5～10倍の凍結促進，融解の場合は10倍～18倍の融解促進が達成されることが、実験で信頼性を確認された数値解析によって証明された。この銅箔は低温（凍結）または高温（融解）の流体が循環する円管周りに垂直に配置するだけで良いので、銅箔と円管との接触熱抵抗を心配する必要がないので、簡単に凍結・融解促進が得られる。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：機械工学，熱工学，省エネルギー，蓄熱，凍結，融解

1. 研究開始当初の背景

貴重なエネルギーを節約して大事に使ういわゆる省エネルギーは資源の乏しい我が国にとって重要な課題である。凍結・融解を利用した潜熱蓄熱は有効な一つの手段である。熱伝導率の大きな金属粒子層の多孔層は充填量の割にはあまり凍結融解促進が得られないという短所のため、これまであまり普及していない。

2. 研究の目的

アルミニウム層は僅かな充填量で凍結・融解促進を図ることができるため有効な蓄熱方法であるが⁽¹⁾，一般に使われている銅製

の伝熱管との電蝕問題が浮上して実用に課題が生じた。この問題を克服するために、銅箔を用いることを思い立った。銅箔を伝熱管に垂直に配置するので、水または氷と銅の有効熱伝導率を最大に引き出すことができるので、僅かな銅箔の充填率で凍結・融解促進を図ることを目的とする。

3. 研究の方法

実験：図1は円管周りに銅箔ディスクを配置する手順を示す。厚さ0.03mmの銅箔板から外径94mm、内径19.1mmのディスク状に切抜いて外径19.05mmの銅円管に配置する。銅箔ディスクと円管の間隙は0.025mmで大

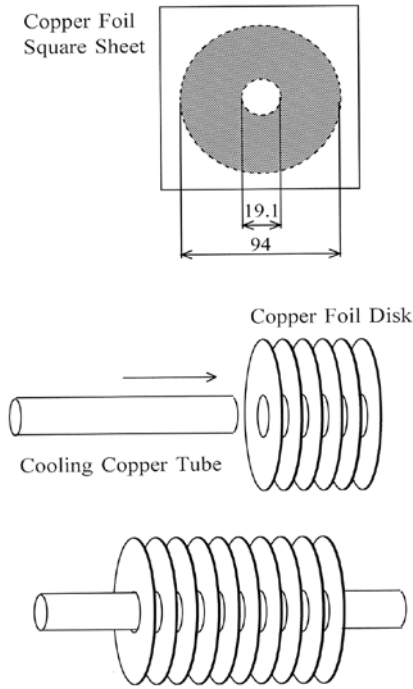


図1 円管周りの銅箔の配置

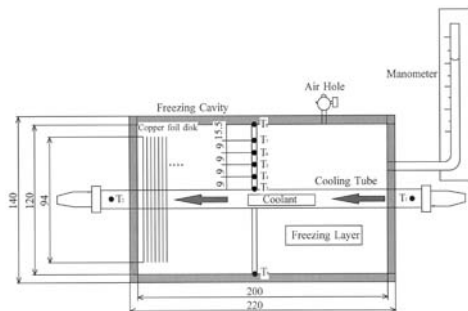


図2 凍結容器

変薄いので接触熱抵抗は小さい。この銅箔ディスクを図2に示す矩形容器内に設置して水を満たす。凍結実験は低恒温室内で行う。氷点下の一定温度のブラインを循環させて凍結実験を開始する。凍結時の体積膨張をマンメーターで測定して凍結量を求める。凍結層内の温度とブラインの入口と出口温度はアルメル・クロメル熱電対で測定する。

数値解析：図3は2次元の解析モデルと座標系を示す。容器の寸法は高さと同幅は同じ H である。容器側壁は断熱とする。実験条件と同じくするため、外径 D 、内径 d の銅箔ディスクを計算領域に貼り付けた。銅箔の外側は

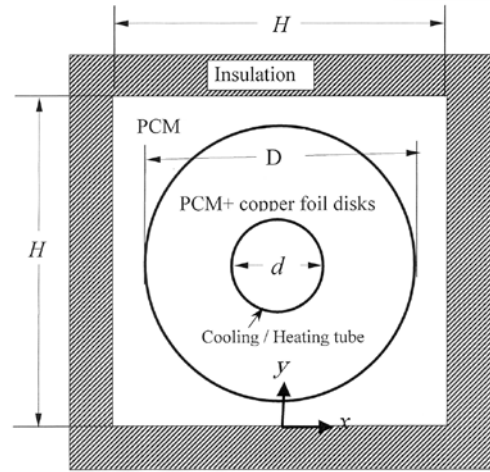


図3 解析モデルと座標系

銅箔なしで水のみである。冷却管の温度は実験で得られた測定値を最小2乗法で近似して境界条件として設定する。凍結系は銅箔、氷および水の3相となり、しかも凍結面は時間と共に移動するので、一般に解析は難しいものとなる。これを克服するため Bennonら⁽²⁾によって提案された連続体モデルを適用する。しかしながら、彼らのエネルギー式はエンタルピー表示であるので、計算を容易にするため、これを温度で表示した笹口らの式⁽³⁾を用いた。

氷または水と銅が共存する場合の有効熱伝導率 k は次に示す並列モデルで推定する。

$$k = \gamma_c k_c + \gamma_s k_s + \lambda_l k_l \quad (1)$$

ここに、 γ は体積割合であり、添え字 c は銅箔、 s は氷、 l は水を示す。この並列モデルは多孔層の有効熱伝導率を最大にする式である。幸いなことに、銅箔は伝熱方向に延びているように配置されている、すなわち並列に配置されているので、並列モデルの適用は合理的であると考えられる。

未凍結層に銅箔が含まれているので、運動量の式に流れによる抵抗 R を与える必要がある。本解析では一般に使われているダルシーの関係を次のように式の生成項に組み込む。

$$\begin{aligned} x\text{-component: } R_x &= -\rho \frac{v_l}{K} u, \\ y\text{-component: } R_y &= -\rho \frac{v_l}{K} v \end{aligned} \quad (2)$$

ここに ρ は $\rho = \gamma_c \rho_c + \gamma_s \rho_s + \gamma_l \rho_l$ のよ

うに定義された密度である。 ν は水の動粘性係数、 u, v は x および y 方向の速度成分であり、 K は透過率であり次に示す

Carman-Kozeny の関係式から計算する。

$$K = \frac{d_p^2 \gamma_l^3}{180(1-\gamma_l)^3} \quad (3)$$

ここに、 d_p は多孔層を形成している球状粒子の直径である。しかしながら、本研究は薄い銅箔の集まりであるので、次式のような水力直径 $d_h (=2w, w$ は銅箔間の距離) を近似的に表して d_p の代わりに用いた。

未凍結層は水の最大密度の影響を考慮した自然対流熱伝達を適用した。

冷却管表面温度の時間変化：図4は冷却管表面温度の時間変化を示す。ブラインの管入り口温度は -12°C であるので、管表面温度はこれよりも高い温度になる。凍結実験開始後約40分程度で一樣温度に落ち着く。銅箔を含まない $\epsilon = 1$ の場合は -10°C 、銅箔の充填率が2.5%すなわち空隙率が0.975の場合は少し温度が高くなって約 6°C である。しかしながら管表面温度水の初期温度にあまり影響されていない。実測された冷却管表面温度を境界条件として数値解析に組み込んだ。

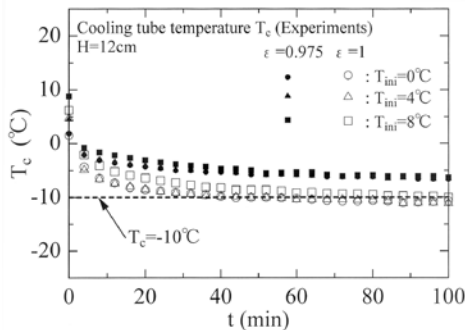


図4 冷却管表面温度の時間変化

4. 研究成果

図5は凍結層の空隙率 $\epsilon (= 1 - \phi)$ が0.0.975 のとき、すなわち銅箔の充填率 ϕ が0.025 (2.5%) のときの時間 t と円管表面積で割った単位面積当たりの凍結量 M_f の実験結果と数値解析結果を示した。比較のため銅箔のない水のみを凍結を示した。僅かな銅箔の充填率で大きな凍結促進が得られていることが認められる。空隙率 ϵ が1、すなわ

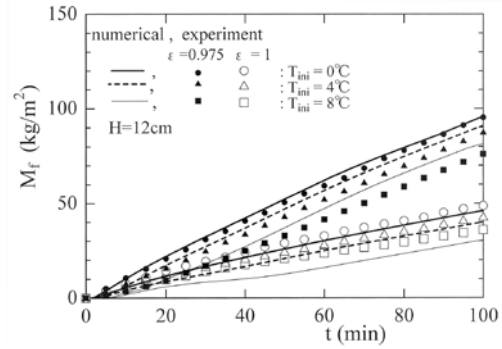


図5 実験と数値解析の比較

ち銅箔がない場合と比較して、 $t = 100\text{min}$ で約2倍の凍結促進が達成されている。水の初期温度 T_{ini} が高くなると未凍結層から凍結面に多くの熱量が伝達するので凍結が遅くなる。銅箔がない $\epsilon = 1$ のとき数値解析と実験は比較的に良く合っているが、銅箔がある場合の数値解析は実験よりも大きな凍結量を示している。これは、式(3)で計算した有効熱伝導率 k が実際の値よりも大きめに見積もられたことによるものと思われる。銅箔、水、氷が共存したときの有効熱伝導率がより正しく推定できれば、さらに定量的な数値解析予測が可能と思われる。

図6は空隙率 ϵ が0.95, 0.975, 1 (銅箔なし) の場合の凍結量 M_f と時間の t の関係の数値解析結果である。水が全部凍結完了するまで計算した。このときの時間を全凍結時間と呼ぶ。水の初期温度 T_{ini} は 0°C と 16°C の二通りの場合について計算した。空隙率が0.975と0.95のとき全凍結時間は銅箔なしの場合と比較してそれぞれ1/5と1/10まで短縮されている。凍結途中では、水の初期温度が高いほど凍結が遅れるが、全凍結時間は水の初期温度に影響されないようである。このように、僅かな銅箔を充填することで、凍結はかなり促進していることが認められる。

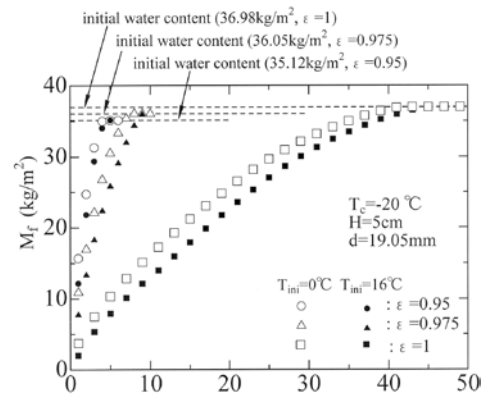


図6 銅箔の充填率による凍結促進

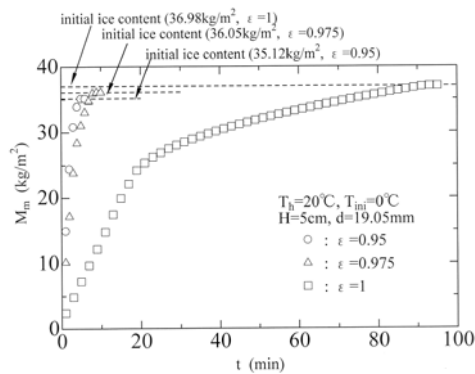


図7 銅箔充填による融解促進

図7は空隙率 ε が0.95, 0.975, 1(銅箔なし)の場合の融解量 M_m と時間 t の関係の数値解析結果である。氷が全部融解完了するまで計算した。このときの時間を全融解時間と呼ぶ。氷の初期温度 T_{ini} は 0°C の場合について計算した。空隙率が0.975と0.95のとき全融解時間は銅箔なしの場合と比較してそれぞれ1/10と1/18まで短縮されている。このように、僅かな銅箔を充填することで、融解はかなり促進していることが認められる。

特に銅箔がない場合($\varepsilon = 1$)の得は融解時間が20分まではほぼ直線的に融解が促進しているが、この時間を過ぎると急に融解が遅くなっている。これの主な原因として次のようなことが考えられる。加熱円管周りの融解水の温度は比較的に高いので浮力のため融解水は上昇する。このため、加熱円管の上方にある氷は対流熱伝達のため融解が促進される。しかしながら、やがて円管上部の氷が融解してしまうと対流伝熱による融解促進効果が急に低下してしまう。円管下部に残っている氷は伝熱量の小さい伝導伝熱によって緩慢に融解していくのである。これに反して、銅箔が充填されると有効熱伝導率が大きくなって円管下部の氷も融解が促進され図7に示されているように融解速度が衰えることなく全融解時間が大きく短縮されるのである。

参考文献

- (1) Sugawara M, Onodera T, Komatsu Y, Tago M, Beer H (2007) Freezing of water saturated in aluminum wool mats, Heat Mass Transf 44:835-843
- (2) Bennon W D, Incropera F P (1987) A continuum model for momentum, heat and species transport

in binary solid-liquid phase change systems—I. Model formation, Int J Heat Mass Transfer 30: 2161-2170

- (3) Sasaguti K, Takeo H (1994) Effect of the orientation of a finned surface on the melting of frozen porous media, Int J Heat Mass Transfer 37: 13-26

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 1 件)

- ①眞壁卓也, 菅原征洋, 小松喜美, ブラインが循環する円管周りの水の相変化実験, 第45回日本伝熱シンポジウム講演論文集, Vol. I. pp.415-416, つくば, 2008年

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菅原 征洋 (SUGAWARA MASAHIRO)

秋田大学・工学資源学部・教授

研究者番号: 10042011