

103 交流器をもつ開放型二重管サーモサイフォンによる蓄冷熱に関する基礎研究 —実験とシミュレーション—

The Basic Study on the Store of Cold Thermal Energy using the Open type Thermo-siphon with an Inner Pipe and a Flow Intersection -Experiment and Simulation-

○ 藤本 健佑 (室蘭工大院) 正 媚山 政良 (室蘭工大)
山森 英明 (室蘭工大) 榎 清 (元室蘭工大)
河村 純平 (室蘭工大)

Kensuke FUJIMOTO, Muroran institute of technology, Mizumoto-cho27-1, Muroran-shi, Hokkaido
Masayoshi KOBIYAMA, Muroran institute of technology
Hideaki YAMAMORI, Muroran institute of technology
Kiyoshi ENOKI, Muroran institute of technology
Junpei KAWAMURA, Muroran institute of technology

Key Words : Open type thermo-siphon, Cold thermal energy, Frozen soil, Ice manufacture, Heat transfer

1. 緒言

サーモサイフォンとは、細長いパイプ内を流体で満たし両端に温度差を与えることによって流体に密度差を作り出し、これによる対流を利用して熱を伝達する装置である¹⁾。本研究は、寒冷地における冬の寒さを自然冷熱エネルギーと認識し、サーモサイフォンにより土壌へ輸送し、凍土の形で蓄え夏に利用することを目的とする。凍土の造成には多数本のサーモサイフォンが必要となるため、構造が簡単で製作、保守の費用の低い開放型サーモサイフォンがより適していると考えられる。本実験で使用する装置は交流器と内部管を有した二重管サーモサイフォンで、これらにより作動流体を整流し性能の向上を図った。本実験では凍土造成の予備実験として製氷実験を行い、その性能について検討する。また、水の円筒座標系凍結プログラムのシミュレーション結果と製氷実験結果との比較検討を行う。

2. 実験方法

2-1. 実験装置

Fig.1 に実験装置概略図を示す。サーモサイフォンはSGP-50Aを使用し、吸熱部0.9m、断熱部2.2m、放熱部1.5mとした。吸熱部は水で満たされた水槽(内側寸法395×435×900[mm³])に入っており、下端から100mm毎に氷の外径を測る定規が取り付けられている。断熱部は交流器と冷熱輸送管からなる。吸熱部外側と放熱部内側、吸熱部内側と放熱部外側は交流器を介して連結しており、これにより作動流体が整流される。放熱部にはフィン(109×109[mm²], 120枚, ピッチ10mm)が取り付けられている。内部管はVP30を使用し、交流器の上側を1.4m、下側を2.9mとした。作動流体はエチレングリコール40%水溶液を使用した。

2-2. 実験手順

実験は以下の手順で行った。

- (1) 水槽に水を、サーモサイフォン内に作動流体を満たす。
- (2) ブラインクーラーで冷却された不凍液をギヤポンプで熱交換器に通し、送風機で空気を送り放熱部を冷却する。放熱部周囲温度は不凍液温度と流量により調節する。
- (3) 1時間毎に吸熱部を観察し、氷の生成が確認された時間の30分前を実験開始時間とする。
- (4) 8時間毎に半径方向の氷の厚さと各部の温度を測定する。測定点は以下の通りである。
厚さ：サーモサイフォン下端から100mmごとに10点。
温度：サーモサイフォン表面(放熱部5点, 断熱部7点, 吸熱部4点), 吸熱部管内3点, 放熱部周囲1点, 吸熱部周囲2点。
- (5) 48時間後に実験を終了する。

2-3. 実験条件

放熱部周囲平均温度-7℃の下、冷風平均風速を以下のように変えて氷の生成量、熱伝達率から性能を評価する。
・冷風平均風速：0.3m/s, 0.5m/s, 0.8m/s, 1.0m/s, 1.2m/s, 1.4m/s.

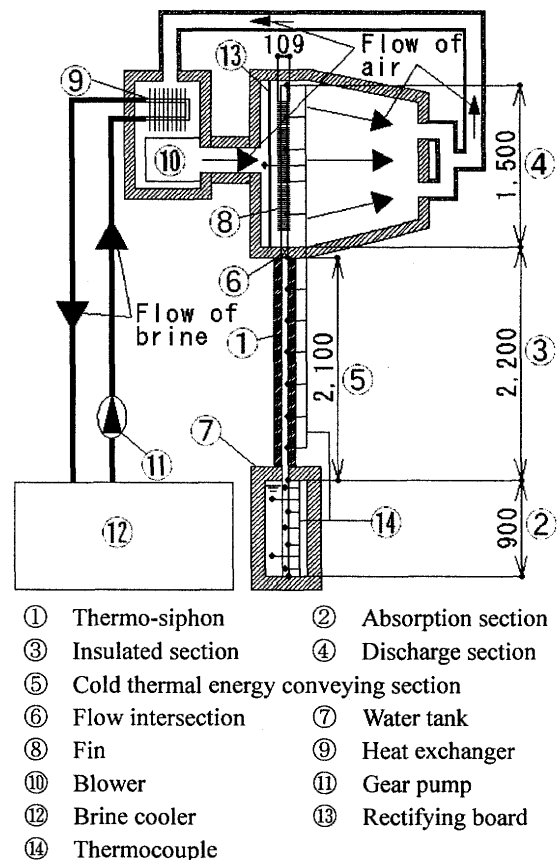


Fig.1 Experimental apparatus (unit:mm)

3. 計算式

3-1. 熱輸送量

熱輸送量 Q は単位時間当たりの吸熱量で、生成した氷の体積から算出する。氷の体積は、管中心軸を通る垂直断面を測定値から直線の組み合わせによって近似し、これを管中心軸の周りを回転させた立体であるとみなし算出した。熱輸送量の算出式を式(1)に示す。

$$Q = \rho V_{ice} L / t \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 Q : 熱輸送量[W], ρ : 氷の密度(=917kg/m³), V_{ice} : 氷の体積[m³], L : 水の凝固熱(=334kJ/kg), t : 実験時間(=48×3600[s]).

3-2.熱伝達率

吸熱部熱伝達率 h_a , 放熱部熱伝達率 h_d を算出し, サーマサイフオンの性能を評価する. h_a, h_d の算出式をそれぞれ式(2), (3)に示す.

$$h_a = Q / \{ (T_a - T_d) A_a \} \dots \dots \dots (2)$$

$$h_d = Q / \{ (T_a - T_d) A_d \} \dots \dots \dots (3)$$

ここで, h_a, h_d : それぞれ吸熱部, 放熱部熱伝達率 [W/m^2K], Q : 熱輸送量 [W], T_a, T_d : それぞれ吸熱部, 放熱部表面平均温度 [K], A_a, A_d : それぞれ吸熱部, 放熱部 (フィンも含む) 表面積 ($=0.17, 1.37[m^2]$).

4.シミュレーション方法・条件

多層円管の熱伝導の理論および非定常熱伝導方程式²⁾を用いて, 半径方向中心から水が凍結する半径方向のみのBASICプログラムを作成し, 製氷された氷の半径方向の厚さのシミュレーションを行った³⁾.

冷風平均風速 $v_f=1.4m/s$ におけるシミュレーションの初期値として, 吸熱部の表面温度 $\theta_a(=-1.089^\circ C)$ は実験中の実測値の平均値, 水槽内の水温 $\theta_w(=0.95^\circ C)$ は実験開始時の実測値の平均値を用いた. 伝熱物性値として, 水の凝固熱 $L=334kJ/kg$, 凝固点温度 $\theta_s=0^\circ C$, 氷, 水の密度 $\rho_i=920kg/m^3$, $\rho_w=1000kg/m^3$, 比熱 $c_i=2.04kJ/kgK$, $c_w=4.18kJ/kgK$, 熱伝導率 $\lambda_i=2.21W/mK$, $\lambda_w=0.568W/mK$ を用いた.

シミュレーションでは, 直径 $D=1.06m$ (直径 $0.06m$ のサーモサイフオンを含む)の円管を仮想水槽と設定し, 半径方向中心から半径方向へ微小半径 $dR=0.05m$ で等分割する. ただし, 凍結度 IPF により計算された凍結面を計算途中で移動させるので, 凍結面を挟んで dR を変化させる. 刻み時間 $dt=0.05h$ で計算し, 凍結厚さを凍結度 IPF によって計算する. 凍結度 IPF とは任意の要素が蓄積した熱量をその要素が凍結するのに必要な熱量で除した値のことで, $IPF=1$ であればその要素は完全に凍結していることを意味する.

シミュレーションで用いる初期値として平均値を用いているので, 実測した氷の厚さを平均した値をシミュレーション結果との比較対象とした.

5.実験結果及び考察

5-1.氷の体積

冷風平均風速 v_f による氷の体積 V_{ice} の変化をFig.2に示す. 風速が大きいほど生成する氷の体積は大きくなる傾向が見られる. これは, 風速が大きいほど放熱部周囲と放熱部表面の熱伝達率が大きくなり, 熱輸送量が増大するためである. また, どの風速においても氷の体積はほぼ直線的に増加している. 時間の経過とともに氷の半径方向の厚さは増加し, 熱伝導に対する抵抗を増加する. 一方, 氷は成長により表面積が増加するため伝熱面積が増加する. これら2つの要素がお互いに打ち消しあうことによって, 一定の熱流が得られ氷の生成速度が一定になったと考えられる.

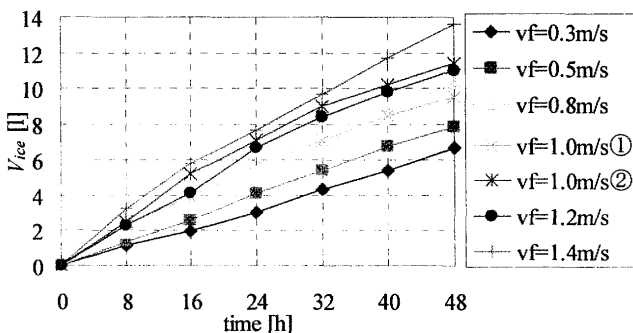


Fig.2 Change in time of V_{ice} by v_f

5-2.熱伝達率

冷風平均風速 v_f に対する各熱伝達率 h をFig.3に示す. 風速が大きいほど各熱伝達率は大きくなっている. 風速が大きいほど放熱部作動流体温度はより低くなる. これに対し, 吸熱部の周囲は水であり水から常に吸熱しているため放熱部と吸熱部の作動流体の温度差が大きくなり, 自然対流が強くなり各部での熱伝達率が大きくなったと考えられる.

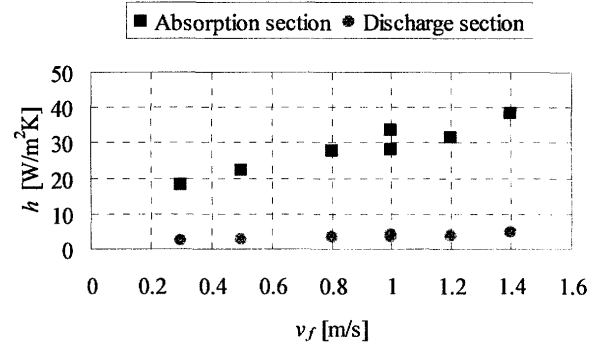


Fig.3 Relation between v_f and h

6.実験結果とシミュレーション結果との比較

冷風平均風速 $v_f=1.4m/s$ における氷の厚さの実験結果とシミュレーション結果との比較をFig.4に示す. シミュレーション結果は, ほぼ実験結果を再現できているといえる. 時間が経つにつれて多少見られる差異の原因としては, 実験時の氷の厚さの測定誤差や実験中の放熱部周囲の温度変動による吸熱部表面の温度変動等が考えられる. また, 各風速においても同等のシミュレーション結果を得ることができた.

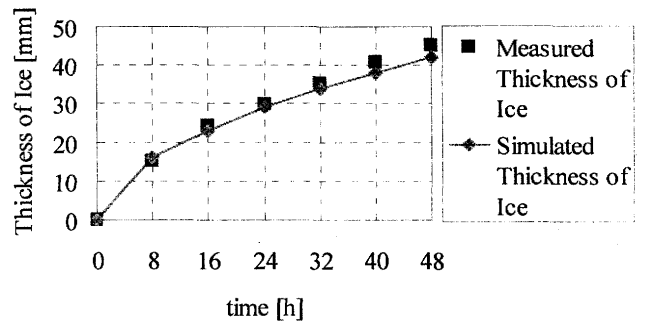


Fig.4 Comparison between Measured and Simulated Thickness of Ice

7.結言

本実験により以下のことが明らかになった.

- (1) 冷風平均風速が大きいほど生成する氷の体積, 熱伝達率はともに大きくなり, 本実験範囲ではどの風速においても, 氷の体積はほぼ直線的に増加する.
- (2) 本実験範囲では, 多層円管の熱伝導の理論と非定常熱伝導方程式を用いて初期値を実測値の平均値で設定すると, 氷の厚さの実験結果の平均値をほぼシミュレーションで再現することができる.

参考文献

- 1) ヒートパイプ, P.D.Dunn and D.A.Reay, 伊藤謹司訳, 学献社, 1978, pp1-2.
- 2) 伝熱工学, 一色尚次・北山直方, 森北出版, 1984, pp13-37.
- 3) パソコンによる熱流体工学基礎演習, 松永省吾, 現代工学社, 1988, pp126-144.