



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	下向き水平冷却面上に形成される水溶液凍結層の熱伝導率
Author(s)	福迫, 尚一郎; 山田, 雅彦
Citation	北海道大学工学部研究報告, 148, 53-60
Issue Date	1989-10-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/42209
Type	departmental bulletin paper
File Information	148_53-60.pdf



下向き水平冷却面上に形成される水溶液凍結層の熱伝導率

福迫尚一郎 山田雅彦

(平成元年 7 月 25 日受理)

Thermal Conductivity of a Frozen Layer of Aqueous Binary Solution Formed on Downward Facing Cooled Plate

Shoichiro FUKUSAKO and Masahiko YAMADA

(Received July 25, 1989)

Abstract

Measurements of the thermal conductivity of the frozen layer of aqueous binary solution were conducted using the transient hot-wire method. Solution of propylene glycol, which is used for the secondary coolant and food additive, was utilized as the testing fluid. The frozen layer was formed on the downward facing cooled plate within the test section where platinum wires of $40\mu\text{m}$ in diameter of 170 mm in length were strung. Measurements were carried out under an equilibrium state at various initial concentration of the solution and the temperature of the cooled plate. It was found that the thermal conductivity of the frozen layer formed on the downward facing cooled plate became greater than that formed on the upward facing one due to the effect of the convection.

1. 緒 言

エチレングリコールやプロピレングリコールなどの水溶液は、それぞれ二次冷媒や食品添加物などに利用されているが、その凍結層は凍結時における界面の不安定性などのために、固液共存の不均質層になることが知られている。そのため、純水の場合と異なり凍結層の熱伝導率は温度などの状態変数のみならず、溶液の初期濃度、初期温度、および冷却温度などによって規定される冷却条件によっても種々に異なる。

凍結層が形成される際に対流が存在しない場合、すなわち伝導問題の場合、凍結層は概ね冷却面に垂直な針状の氷結晶の間に高濃度の溶液を含んだ構造となる¹⁾。著者らは、これまでに上向き水平冷却面上に形成される水溶液凍結層の熱伝導率について非定常細線法を用いて測定を行い、凍結層が伝導のみによって形成される場合には、熱力学的平衡を仮定すると Lichiteneker モデルを採用することによって固相率による整理が可能なることを示した^{2), 3)}。

しかし、実際の凍結問題、特に工学的な問題では、対流を伴う場合がほとんどであり、凍結層形成時に対流があることによってその性状が異なり^{4), 5)}、熱伝導率もその影響を受けることが予想される。しかし、対流を伴って形成される水溶液凍結層の熱伝導率を実際に測定した例は無いように思われる。

本研究では、下向き水平冷却面上に形成されるプロピレングリコール水溶液凍結層の熱伝導率
機械工学第二学科 伝熱工学講座

を非定常細線法を用いて測定し、凍結層形成時における対流が熱伝導率におよぼす影響に関して検討を行なったので報告する。

2. 測定原理

無限体の試料中に、半径 r 、長さ無限大の線熱源がある場合、発熱線の温度変化 $\Delta\theta$ は、下記の仮定が成立するとき、(1)式で与えられる⁹⁾。

- ① 線熱源の発熱量は一定である。
- ② 加熱による温度変化は充分に小さく、これによる物性値の変化は無視し得る。
- ③ 発熱線内部の温度分布は一樣である。
- ④ 対流は発生しない。

$$\Delta\theta = \frac{q}{4\pi\lambda} \left\{ \ln \frac{4at}{r^2} - \gamma + \frac{r^2}{2at} \frac{w-1}{w} \frac{r^2}{2at} \left\{ \ln \frac{4at}{r^2} - \gamma \right\} + \dots \right\} \quad (1)$$

ここで、 $w = \rho C_p / \rho_w C_{pw}$ 、 γ ：オイラー数、 q ：線熱源発熱量、 λ ：試料の熱伝導、 t ：時間、 a ：試料の温度伝導率である。

$r^2/4at$ が充分に小さい場合、(1)式は下記の形で表わされる。

$$\Delta\theta = (q/4\pi\lambda) \{ \ln(4at/r^2) - \gamma \} \quad (2)$$

両辺を $\ln t$ で微分して整理すると、

$$\lambda = (q/4\pi) / (d\theta/d\ln t)$$

上式が、非定常細線法の基礎式である。実際の測定では、発熱線の温度変化 $d\theta$ を、その抵抗値の変化に伴う、ブリッジ回路の非平衡電位差の変化としてとらえ、(3)式より λ を算出する。

本研究では、発熱線としてポリエステル被覆線を用いているが、被覆による影響については長坂ら⁷⁾が検討を行い、無視し得るほど充分小さいことが明らかにされている。従って、本研究においても(3)式より熱伝導率を算出することにする。

3. 実験装置および実験方法

3.1 実験装置

本実験装置の構成を図1に示す。本実験装置は、白金線を含む試験部、ブリッジ回路、直流電源装置、ならびにデータレコーダ、コントローラ、およびデータ処理システムより構成されている。ブリッジ回路の一部である白金線は、試験部内に冷却面と平行に張られており、測定時にはそれぞれが異なる温度の等温面に対応している。固定抵抗は、今回の実験では、1 k Ω に設定し、また、可変抵抗は 0.001 Ω 単位で設定できるようになっている。データレコーダーの制御は、GP-IB インターフェイスを介して、16 ビットマイクロコンピュータを使用して行なった。

試験部の詳細を図2に示す。試験部は、幅 270 mm、深さ 80 mm、奥行き 50 mm の透明アクリル製容器で、上部には厚さ 3 mm の銅板を冷却面として用いた冷却ブロックが取り付けられている。冷却ブロック内部では、冷却面に対して上方より冷却ブラインを吹き付ける構造となっており、また、冷却面背面には冷却温度測定のため、 ϕ 0.32 mm のクロメルアルメル熱電対を取り付けてある。

白金線は、直径 40 μ m のポリエステル被覆線を使用し、長さ約 170 mm で、冷却面より下方に 5 mm 間隔で 11 本水平に張ってある。容器内には、凍結層温度測定のため、各白金線近傍に位置するように熱電対を設置した。白金線端部は、図2に示すようにポリエステル被覆部を焼いて約 5 mm 程除去した後、ビニール被覆のリード線を半田付けし、半田付け部分にスチロール樹脂のパ

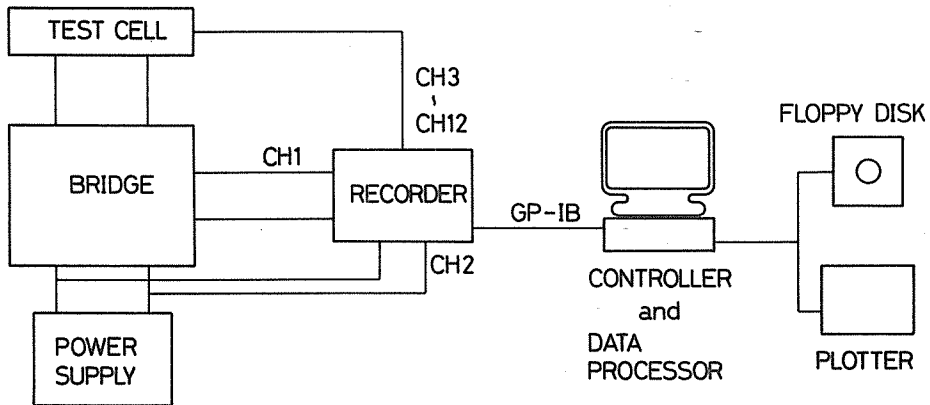


図1 実験装置系統図

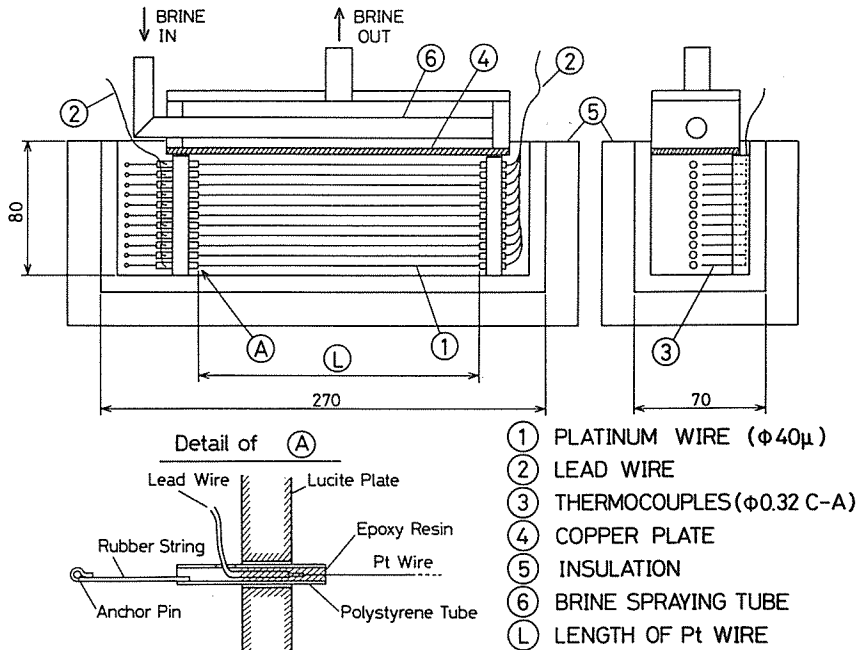


図2 試験部詳細図

イブ (外径 3 mm, 内径 2 mm) を通し, エポキシ樹脂を充填して, 導電部が試料溶液に接触しないように絶縁した。また, スチロール樹脂パイプを取り付けた端部の一方を固定し, 他の端はゴムひもを用いて適当な張力を与え, 温度変化による白金線のたるみを防いだ。試験部周囲および上部冷却ブロックは, 熱損失を防ぐために断熱材にて覆った。

3.2 実験方法

本実験では, 試料溶液として濃度 5, 10, および 20 wt% のプロピレングリコール水溶液を用いた。始めに, 試験部容器内に所定の濃度および温度の試料溶液を満たし, 冷却面と液面の界面に

気泡を取り込まないように注意して冷却ブロックを取り付ける。つぎに冷却ラインを循環させ、冷却面温度を設定し、試験部内に凍結層を形成させる。凍結層の成長速度が十分に小さくなり、凍結層内の温度分布が準定常的になった後に下記の手順で測定を行なった。

まず、検流計を用いてブリッジ回路のバランスをとり、可変抵抗の値から白金線の抵抗値を読みとる。次にレコーダーを接続し、電圧を加えて白金線の抵抗値の変化によって生じる非平衡電圧の変化を測定する。このとき、電源電圧および試料内温度分布を同時に測定する。上記の一連の操作を、白金線を切り換えて行なう。各測定データは、0.5 秒間隔で 10 秒間サンプリングを行ない、一時フロッピーディスクに記録し、測定終了後処理を行なった。

4. 結果および考察

4.1 測定精度の検討

熱伝導率の測定値 λ の相対誤差は、(3)式から導出される次式を用いて推定することができる。

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{\Delta q}{q} + \frac{\Delta(dV/d\theta)}{dV/d\theta} + \frac{\Delta(dV/d\ln t)}{dV/d\ln t} \quad (4)$$

右辺第一項は、発熱量に関する誤差、また、右辺第二項は白金線抵抗値の温度係数に大きく影響を受け、第三項は電圧の時間変化に関する誤差である。本研究では、この他に白金線ポリエステル被覆の物性値や寸法などが与える影響を見込んで、熱伝導率の測定精度を約 $\pm 1.6\%$ と推定した。

4.2 測定結果

凍結層の熱伝導率の測定結果を温度について整理し、各濃度ごとに図 3 から図 5 に示す。これらの測定結果は、それぞれ下記の式で、ほぼ $\pm 15\%$ の範囲で整理することができる。

$$\lambda_e = 1.460 + 0.154 \ln(-\theta) \quad (\pm 15.3\%, -25 < \theta < -2^\circ\text{C}) \quad (5)$$

$$\lambda_e = 1.219 + 0.146 \ln(-\theta) \quad (\pm 16.9\%, -25 < \theta < -4^\circ\text{C}) \quad (6)$$

$$\lambda_e = 0.823 + 0.146 \ln(-\theta) \quad (\pm 15.1\%, -26 < \theta < -9^\circ\text{C}) \quad (7)$$

但し、適用温度範囲および最大偏差は、各式とともに括弧内に示してある。また、各図中には、上向き水平冷却面の場合の整理式²⁾を、一点鎖線で示してある。

図より明かなように、下向きの場合の結果は、全体的に上向きの場合よりも大きな値を示している。これは、下向き水平冷却面の場合、針状凍結層の間に保持されている濃度 C_e の溶液 ($C_e > C_0$) が、密度差によって下方に流下し、この部分の濃度が C_e から C'_e ($C'_e < C_e$) と変化し、一時的に平衡がくずれ、再び温度 θ に対応する平衡濃度 C_e になるまで凍結が進行し、その結果として、固相率が C_0 を一定と仮定して算定した値よりも大きくなるためではないかと推定される。

また、図 3 から図 5 における本測定結果と上向き冷却面の場合の差は、特に凍結層の温度が高くなるほど大きくなっている。これは、温度の高い領域は凍結層の前方、すなわち時間的に後から形成された部分に対応している。上向き冷却面の場合には、溶質が析出し凍結が進行するに伴い凍結層界面前方の濃度が高くなるため、初期濃度 C_0 が一定と仮定して算出した値よりも固相率は小さくなる。このため凍結層の熱伝導率 λ_e は小さくなり、その結果下向きの場合との差が大きくなっているものと考えられる。

これらの測定結果を、上向き冷却面の場合と同様に次式で定義される固相率を用い整理を行なうと、図 6 が得られる。

$$f_s = (C_e - C_0) / (C_e - C_s) \quad (8)$$

但し、氷結晶中に溶質は取り込まれず ($C_s = 0$)、 C_0 は初期濃度で一定と仮定し、 C_e は凍結層

温度に対応する平衡濃度である。図に見られるように、固相率に対して整理すると、初期濃度が大きくなるほど測定値のばらつきが大きくなっていることがわかる。このことは、初期濃度が高くなると相対的に冷却条件が徐冷となり、対流の影響を受け易くなる⁸⁾ ことに関連していると思われる。

図7に、水溶液初期濃度 20 wt%，初期温度 0.3℃、および冷却温度 -23.0℃の場合の凍結層の成長過程を示す。図に見られるように、凍結層形成初期においては自然対流の影響のため凍結層界面の二次元性が悪くなっており、その結果、形成された凍結層の等温面内における組成（固相及び液相の比率など）が面内で一様でなくなっていると推定される。このため、測定値のばらつきが大きくなるものと思われる。

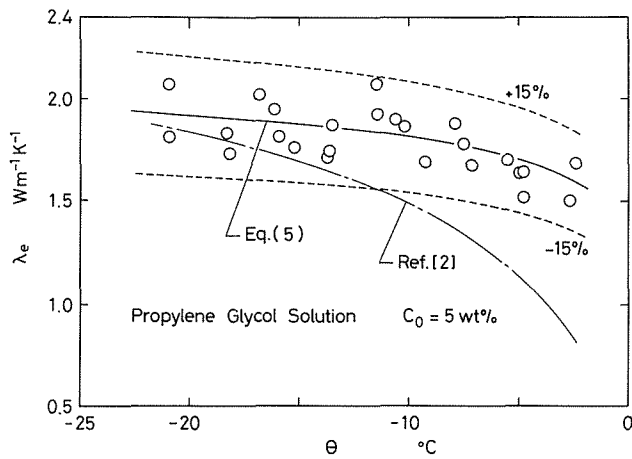


図3 凍結層熱伝導率

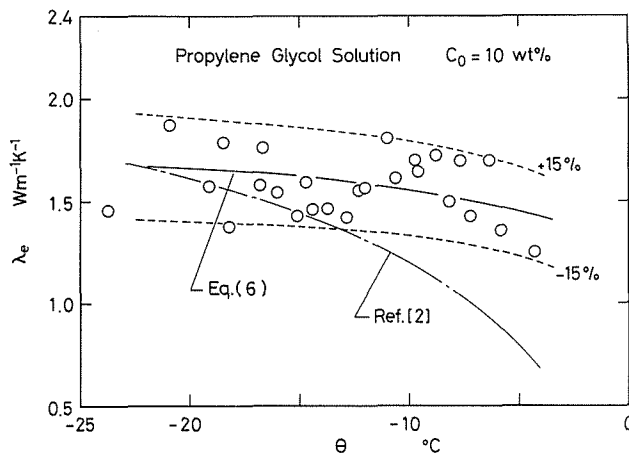


図4 凍結層熱伝導率

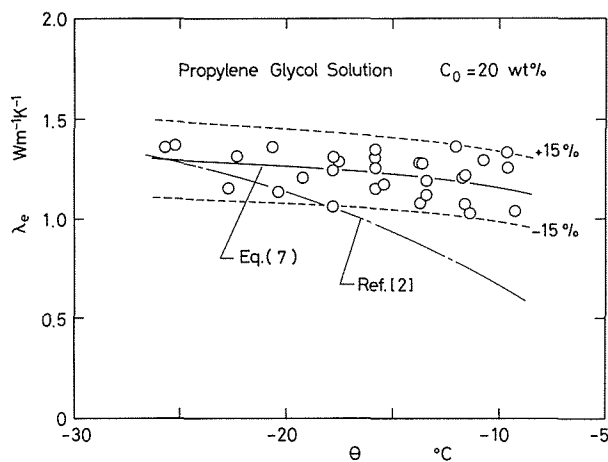


図5 凍結層熱伝導率

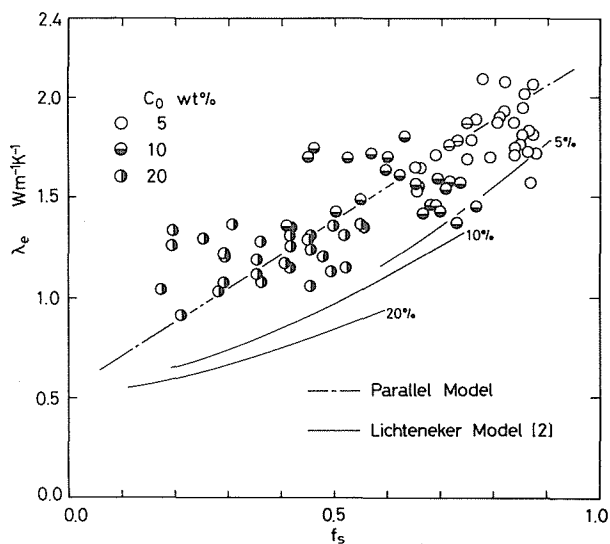
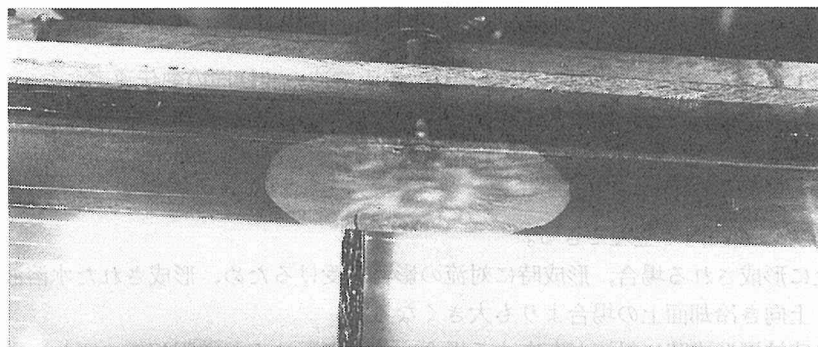


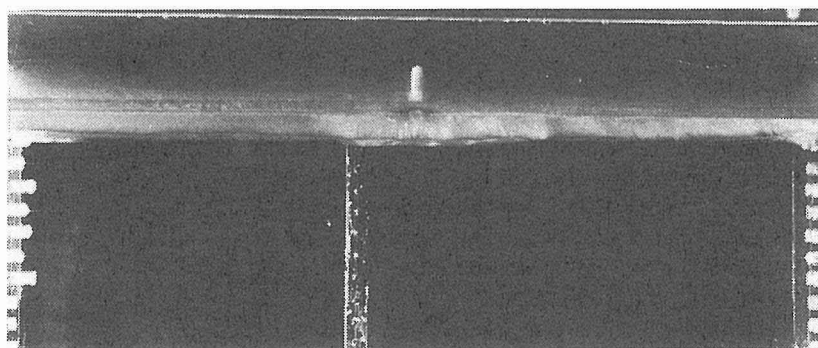
図6 凍結層熱伝導率

図6には、測定結果とともに並列モデルを仮定して算定した結果を一点鎖線で示してある。並列モデルは、与えられた固相率に対して最も大きな熱伝導率を与えるモデルである。一方、図に見られるように、本測定結果は並列モデルを仮定した場合よりも大きな値を示しているものが多く見られる。これらのことは、先の推定の通り、凍結層の固相率が本研究において評価した値よりも大きくなっていることを示していると考えられる。

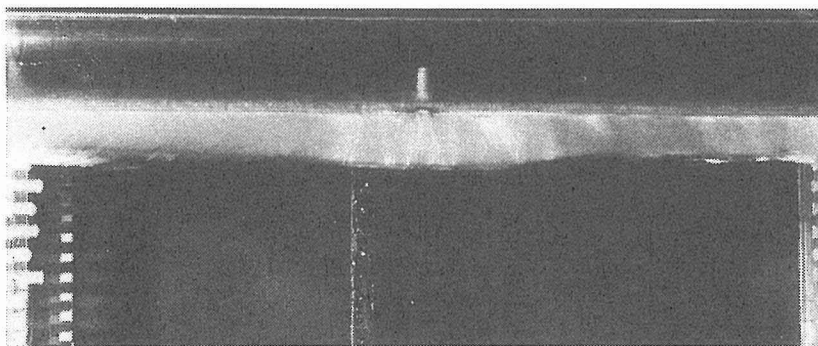
従って、本研究におけるように、形成時に対流を伴う凍結層の熱伝導率の測定結果に対しては、上向き冷却面の場合に適用した凍結層モデル、および固相率による整理をそのまま適用することはできないのではないかと考えられる。



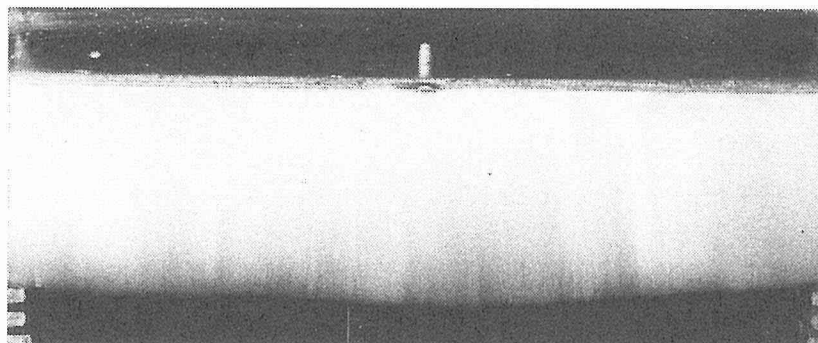
45 秒経過



10 分経過



30 分経過



6 時間経過

図7 凍結層成長挙動
($C_0=20\text{wt}\%$, $T_\infty=0.3^\circ\text{C}$, $T_w=-23^\circ\text{C}$)

6. 結 言

下向き水平冷却面上に形成される、プロピレングリコール水溶液の凍結層の熱伝導率について、非定常細線法を用いて測定を行なった結果、本実験範囲内で以下のことが明かとなった。

(1) 凍結層の熱伝導率 λ_e は、測定を行なった温度範囲において

$$\lambda_e = \alpha + \beta \ln(-\theta)$$

の形によりほぼ $\pm 15\%$ の範囲内で整理できる。

(2) 下向き冷却面上に形成される場合、形成時に対流の影響を受けるため、形成された水溶液凍結層の熱伝導率は、上向き冷却面上の場合よりも大きくなる。

(3) 本研究のように凍結層形成時に対流が存在する場合、その影響によって固相率の正しい評価が困難になるため、熱伝導率を固相率に基づいた適切なモデルで整理することができなくなる。

参 考 文 献

- 1) 福迫尚一郎ら：日本機械学会論文集 掲載予定
- 2) 福迫尚一郎ら：工学部研究報告第144号，(昭63)，p. 23
- 3) 福迫尚一郎ら：工学部研究報告第146号，(平成元年)，p. 33
- 4) Fukusako, S., et al.: Proc. 1st. KSME-JSME Joint Conf., (1988). p. 55
- 5) 福迫尚一郎ら：第26回日本伝熱シンポジウム講演論文集，(平成元年)，p. 5
- 6) Carslaw, H.S., et al.: Conduction of Heat in Solids 2nd. Ed., (1959), p. 345, Oxford
- 7) 長坂雄次ら：日本機械学会論文集，47(昭56)，p. 1323
- 8) 福迫尚一郎ら：日本機械学会北海道支部第30期総会講演概要集，(平成元年)，p. 78