

鉱油及び熔融無機塩の熱伝達率と温度及び動粘性係数に関する実験的研究

荒谷眞一・佐藤恭三*

セントラル硝子(株), 101 東京都千代田区神田錦町 3-7-1

*東北学院大学工学部, 985 宮城県多賀城市中央 1-13-1

Experimental Study of Heat Transfer Coefficient with Temperature and Kinematic Viscosity on Mineral Oil and Molten Salt

Shin'ichi ARATANI and Kyoza SATO*

Central Glass Co., Ltd., 3-7-1, Kanda Nishiki-cho, Chiyoda-ku, Tokyo 101

*Tohoku Gakuin University, 1-13-1, Chuo, Tagajo-shi, Miyagi 985

[Received September 29, 1994; Accepted January 19, 1995]

To develop a tempered glass under 3 mm in thickness, boiling heat transfer characteristics of mineral oil and molten salt were studied experimentally. Heat flux and heat transfer coefficient with temperature and kinematic viscosity were measured using a copper disk of 40 mm in diameter and 3 mm in thickness. As a result, silicone oil showed no burn out point in this experimental condition and this tendency is different from another type of oils.

Key-words: Heat transfer coefficient, Heat flux, Mineral oil, Molten salt, Glass quenching, Kinematic viscosity, Boiling heat transfer

1. 緒 言

熱強化ガラスはその破壊強度が増加すること、及び破壊時に角のない丸い断片となることから安全ガラスとして広く世の中で使われている。熱強化ガラスの安全性を高める研究については数多くの報告があり、著者ら^{1),2)}も熱強化ガラス板におけるクラックの伝ば現象に関して報告している。一方、省資源・省エネルギーの観点から熱強化ガラスの薄板化が望まれている。従来の熱強化ガラスとほとんど同様の特性をもって薄板化ができれば、ガラス材そのものの削減やビル用窓ガラスの重量削減、自動車では窓ガラスの軽量化に伴う燃料の節約を始めとする多くの社会的メリットが期待できる。

一般に、熱強化ガラスは軟化点温度近くまで加熱された後、エア（衝突空気噴流）によって表面から急冷することにより作られる。したがって、熱強化ガラスを薄板化していくうえで冷却媒体からの熱伝達は極めて重要な因子となっている。同時にガラスは代表的な脆性材料であり、急冷に対しては割れやクラックの発生防止などの厳密な管理が必要である。急冷時に発生する過渡熱応力については例えば高津³⁾が Maxwell model の概念を応用した計算手法を提案している。この過渡熱応力がガラスが持っている本来の強度よりも大きければ割れやクラックの発生につながることになる。

冷却媒体としては大半の生産に使われているエアのほか

にも鉱油、シリコン油、熔融無機塩、熔融金属、水の噴霧流など、多くのものが提案されている^{4)~8)}。ガラス以外の物質を対象にした研究は数多くなされており、参考にできる報告も多い。例えば、鉱油における沸騰熱伝達の現象については、橋と塩治⁹⁾がスピンドル油や焼入油における熱流束の実験値を報告しており、更に鉱油や水に乳化剤を添加することにより任意の熱流束を得ることができると述べている。佐藤¹⁰⁾もスピンドル油やタービン油と水を混合させることにより、任意の熱伝達率を得ることができると報告している。しかし、これらの冷却媒体を使ってもすぐに熱強化ガラスの製造にそのまま利用できるとはいえない。この実験は再現性に乏しく、熱流束曲線についても測定者により実験値のばらつきがあり、その値が十分に把握されているとは言えない面がある。ガラスのように熱伝導率が小さな物質に対して従来の知見をそのまま応用できるかどうかについても疑問の余地がある^{11),12)}。ガラス板の熱強化を考慮した急冷については、冷却媒体の熱流束測定から見直す必要があるのが現状である。

そこで、薄板強化ガラスの製造方法の一つとして考えられている浸漬強化法に着目し、その冷却媒体として考えられている物質の熱伝達について一連の測定を行ってみた。本報では、市販されている鉱油、熔融無機塩、鉱油の混合系における影響について熱流束、熱伝達率、液体温度（動粘性係数）などを実験的に検討した結果を報告する。

2. 実験方法及び装置

2.1 実験装置

実験装置の概略を図1に示す。測定に使用した銅円板の大きさは40 mmφ×3 mmで、その中心部には外径1 mmのシース型クロメル-アルメル熱電対温度計（露出タイプ）が固定されている。この銅円板を電気炉で約5 min 加熱した後、ただちに供試液の中に浸漬した。データの記録は冷接点を介在させた x-y-t レコーダーにより行った。応答が早い場合にはウェーブメモリーもあわせて用いた。なお、銅円板の表面状態を一定にするために、180番のサンドペーパーで1回ごとに研磨した。

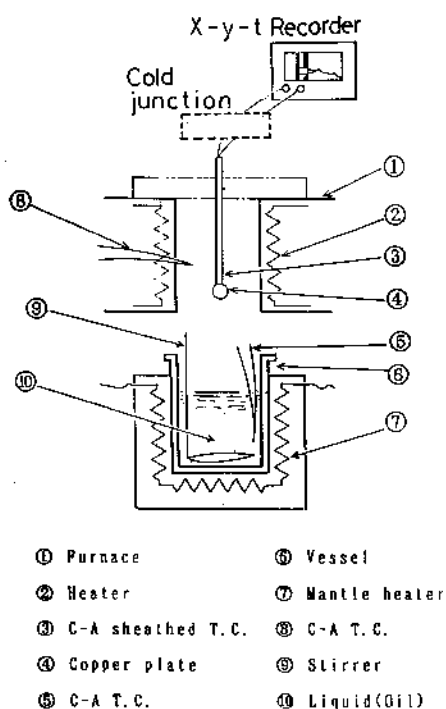


Fig. 1. Experimental set-up.

2.2 冷却媒体

供試液としては表1に示す5種の鉱油（コンプレッサ油、マシン油、シリコン油）と無機硝酸塩（ $70\text{KNO}_3 + 15\text{NaNO}_3 + 15\text{NaNO}_2$ ）を用いた。鉱油の混合系についても測定を実施した。

2.3 解析方法及び補正

熱流束あるいは熱伝達率はまず銅円板における中心温度の経時変化、すなわち冷却曲線を求め、その値から熱伝導の逆問題として解析した。マシン油の場合における冷却曲

線の一例を図2に示す。本実験ではガラス板の冷却を対象としているので、厚さの薄い無限平板とみなすことができ、一次元の熱伝導問題として取り扱って差しつかえない。

Biot 数が $Bi \ll 0.1$ の場合には以下の基礎方程式

$$\frac{dQ}{dt} = hA(T - T_L) = Cw \frac{dT}{dt} \quad (1)$$

から熱伝達率を近似的に求めた。ここで、 Q は伝熱量、 t は時間、 h は熱伝達率、 A は伝熱面積、 T は温度、 T_L は供試液温度、 C は銅円板の比熱、 w は銅円板の質量である。また、 $Bi > 0.1$ の場合にはフーリエの一次元熱伝導方程式

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

を、以下の初期条件及び境界条件

$$T - T_L = T_i - T_L \quad \text{at } t = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial(T - T_L)}{\partial x} = 0 \quad \text{at } x = 0 \quad (4)$$

$$-k \frac{\partial(T - T_L)}{\partial x} = h(T - T_L) \quad \text{at } x = 1 \quad (5)$$

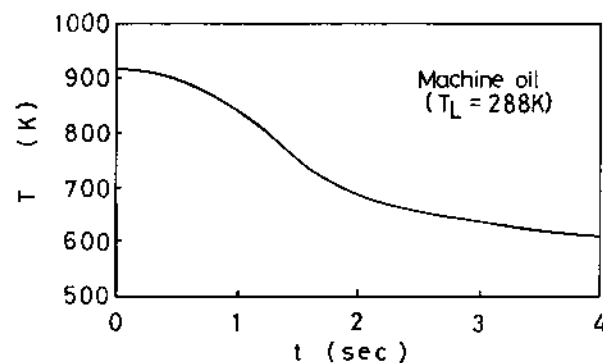


Fig. 2. Cooling curve of 68-machine oil.

Table 1. Physical Properties of Oil

Oil	Density (kg/m^3)	Specific heat (kJ/kgK)	Thermal conductivity (W/mK)	Kinematic viscosity ($10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)
Compressor oil RP-56*	874	1.14	0.130	5.58
Compressor oil RP-100*	882	1.12	0.130	10.1
Compressor oil RP-180*	890	1.12	0.126	18.5
68-Machine oil*	933	1.09	0.125	6.82
Silicone oil YF-33-100**	968	0.86	0.149	7.50

* Maruzen oil co. ltd.

** Toshiba silicone co. ltd.

の下で、変数分離の方法により求められている解¹³⁾

$$\frac{T-T_L}{T_i-T_L}=2 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\sin \lambda_n l}{\lambda_n l + \sin \lambda_n l \cos \lambda_n l} \right) \times e^{-\lambda_n^2 a t} \cos \lambda_n x \quad (6)$$

から任意の時間、位置での試験銅平板の温度を求めた。なお、 a は銅の温度伝導率、 T_i は銅板の中心温度である。また、 λ は

$$\cot \lambda l = \frac{k}{h} \lambda \quad (7)$$

を満足し、 k は銅の熱伝導率である。すなわち、中心部温度から表層温度を推察し、その値と中心部の温度差からコンピュータを用いて精度を上げながら数値化していった。今回は表層温度と中心部温度との差が0.1%以下になったときに収束させた。

3. 結果及び考察

3.1 各種鉱油における熱流束曲線

液体温度が288 Kのときにおけるコンプレッサー油(RP-100)、マシン油、シリコン油の熱流束と伝熱面温度及び液温との差 ΔT を図3に、熱伝達率と ΔT との関係を図4に示す。PeyayopanakuilとWestwaterら¹⁴⁾が述べているように、非定常の程度により熱流束は大きく異なる。また、測定系によりその値も異なって示されることがある。そこで、従来のデータと比較するために沸騰水における値も測定し、橋と塩治の結果⁹⁾と比較した。図中の破線が橋らのデータである。熱流束値はほぼ一致していることを確認した。図3、図4から明らかなように、熱流束及び熱伝達率ともマシン油、コンプレッサー油、シリコン

油の順に小さな値を示した。シリコン油については明確なバーンアウト点を見いだすことはできず、他の油と異なった傾向を示した。この点からは、シリコン油はガラス板の熱強化に対して優位である。すなわち、ガラス板の冷却中における熱伝達率又は熱流束の変化が少ないほど、熱強化ガラスを製作する上での管理がしやすくなるからである。強制対流系と組み合わせる方法も考えられている¹⁵⁾が、実際には冷却時の破壊、ガラスの表面形状やシリコン油の安定性など問題があり、すぐには応用できるとは言えない。なお、沸騰水についてはコンプレッサー油とはほぼ同じ最大熱流束の値であったが、熱伝達率という観点からみると大きく異なった値となっていることが分かる。

図5に動粘性係数の異なるコンプレッサー油における熱流束の変化を示す。動粘性係数の値が高くなると、わずかながら熱流束の値が小さくなり、バーンアウト点も高温側に移動することが分かる。表1から明らかなように動粘性係数のほかの因子すなわち、密度、比熱、熱伝導率も異なっているので、動粘性係数の影響と一概に言うことはできないが、動粘性係数も熱流束の値に影響を及ぼす重要な因子であると推察できる。

マシン油とシリコン油の場合における熱流束に及ぼす液温の影響を図6に示す。マシン油では液油を288 Kから413 Kまで上げていくとわずかながら熱流束の値が大きくなり、バーンアウト点も低温側に移動することが分かる。シリコン油の場合も液温を上げると似たような傾向が認められたが、液温を変えた場合でも本実験の温度範囲では明確なバーンアウト点を見いだすことはできなかった。

今回測定した鉱油の熱流束はエアのみの冷却と比べると

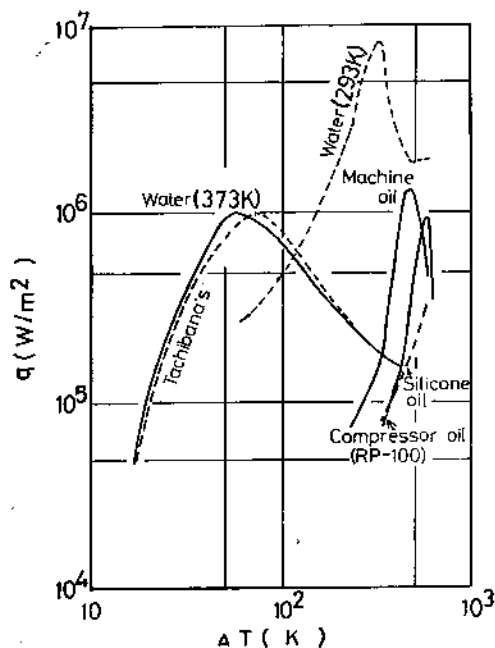


Fig. 3

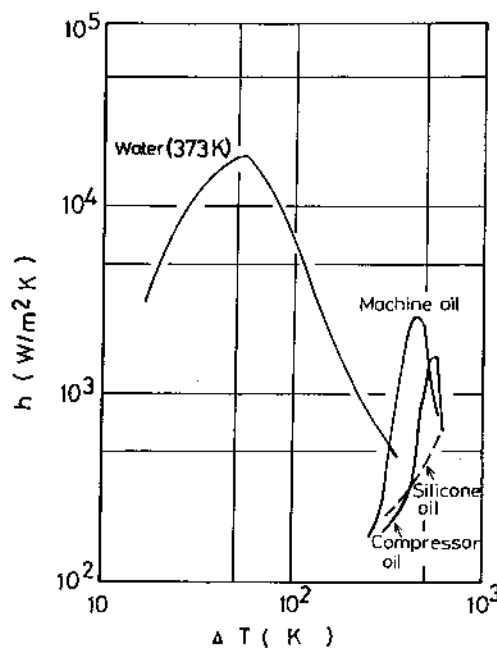


Fig. 4

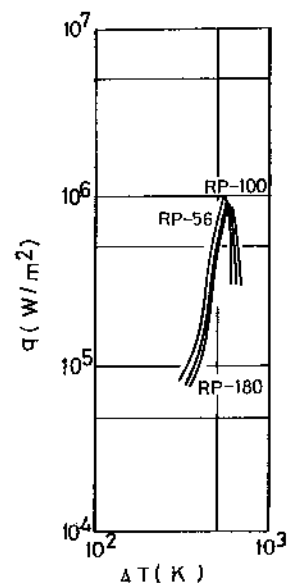


Fig. 5

Fig. 3. Heat flux vs. temperature difference.

Fig. 4. Heat transfer coefficient vs. temperature difference.

Fig. 5. Variation of heat flux with kinematic viscosity of compressor oil.

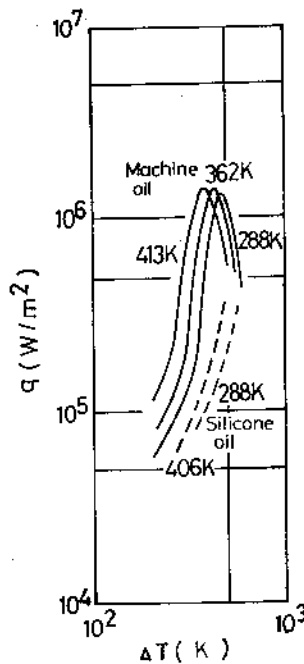


Fig. 6. Variation of heat flux with temperature of machine oil and silicone oil.

かなりその値は大きく、薄い板厚の熱強化ガラスを製作する上で有効な範囲にある。しかし、その値は冷却時の温度により非定常に変化し、管理は難しいレベルにあると推察される。シリコン油については、比較的その変化が少ないことから今回調べた他の鉱油よりも優位ではあるが、すぐに熱強化ガラスの製造に應用できるとは言い切れない面がある。

3.2 熔融無機塩の熱流束曲線

熔融無機塩の熱流束曲線を図7に示す。熔融無機塩の場合、水及び油と同じような型の熱流束曲線を示した。それぞれの熱流束の値についてもコンプレッサ油、マシン油などの鉱油よりも小さな値を示した。熱強化ガラスの製造に應用する場合、熱流束の値の温度依存性がコンプレッサ油、マシン油などの鉱油よりも小さいことは好都合である。しかし、前述したシリコン油と比較すると、その

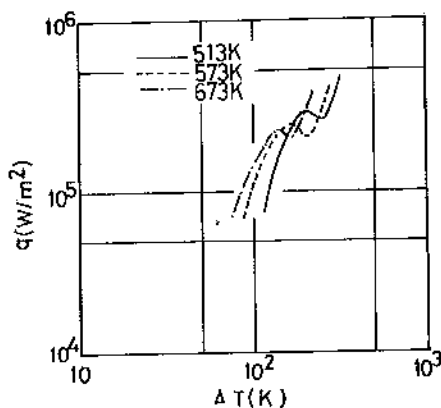


Fig. 7. Variation of heat flux with temperature of molten salt ($70\text{KNO}_3 + 15\text{NaNO}_3 + 15\text{NaNO}_2$).

変化量は大きく、簡単に應用できるレベルにはない。

熔融無機塩の温度を変化させた場合には、図6に示したマシン油及びシリコン油とよく似た傾向を示したが、その差異はマシン油やシリコン油の場合に比べて顕著であった。これは、熔融無機塩の温度を変化させることにより熱流束値の制御がしやすくなることを意味している。なお、熔融無機塩の場合においても、いわゆる沸騰曲線の様式を示しているが、この現象が膜沸騰や核沸騰の場合における気泡発生状況の差異に起因するのか、化学変化により生じたものかについては今後の研究課題である。しかし、前者の場合においては熱流束値の温度依存性から、後者においては熔融無機塩の経時劣化から製造管理が難しくなることは明らかである。

3.3 混合油の熱流束曲線

図8に2種のコンプレッサ混合油の熱流束曲線を示す。なお、混合油はRP-56とRP-180からなり、それぞれの体積混合比を2:1及び1:2にした。混合比を2:1にした場合には、混合比を1:2にした場合と比較して、バーンアウト点はやや低温側に移動した。しかし、各バーンアウト点における熱流束の値については、ほとんど差異が見られなかった。更に、RP-56あるいはRP-180のコンプレッサ油単独の場合には熱流束曲線のピークがするどい形状を示したのに対し、混合油の場合にはなだらかな形状となっている。動粘性係数が異なる同タイプのコンプレッサ油を混合すると、その混合度によってバーンアウト点に変化したり、熱流束曲線の形状が変化したりすることは興味深い結果である。また、2種のコンプレッサ油を混合した場合におけるこれらの知見は、熱強化ガラスの製造に浸漬法を使うときに有用であろう。混合条件を選択することにより、熱流束を適切な値にしたり熱流束値の温度依存性を小さくできる可能性があるからである。

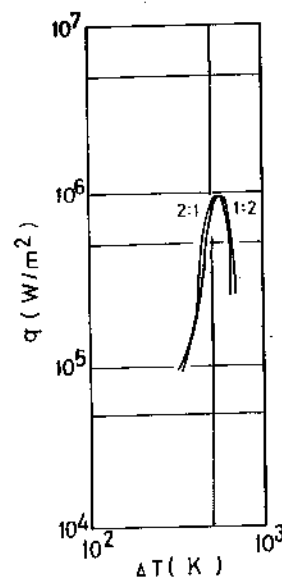


Fig. 8. Effect of volume mixing ratio on heat flux (compressor oil RP-56/RP-180=1/2, 2/1).

2種のコンプレッサー混合油の熱流束曲線において前述の結果が得られた主因として、粘性そのものの影響が考えられるが、粘性を調節するために入れている少量の添加剤の影響も無視できず、この添加剤を加えた検討も必要であろう。一般には、沸騰過程においては低沸点成分の物質移動と気液界面温度の上昇が避けられないとされ、混合媒体の伝熱特性は必ず低下するとされている¹⁶⁾。この添加剤が低沸点側にあるのか、高沸点側にあるのかではその効果は自ら異なるが、いずれにしても気液両相間の組成差から伝熱特性は変化することになる。この添加剤については、組成分析からその効果を推定することも可能であるが、今後の研究課題とし、今回の検討においては実験結果の提示までに留めたい。

3.4 ガラス板に対する熱伝達率又は熱流束値の妥当性について

今回の熱伝達率又は熱流束測定は、熱電対温度計が中心部に固定された銅板を使って行ったが、この方法は従来からよく使われている。本方法の特徴は、熱電対温度計が検知する温度（中心温度）と推察される表面温度の差が極めて小さいことにある。著者の一人¹⁷⁾の計算によれば、熱伝達率が約5000 W/m²・Kの場合で表面温度と中心温度との比は0.98である。今回の測定値はそれよりも小さくかつコンピューターによる補正で表面温度と中心温度との差を0.1%以下となるようにしたので、今回得られた熱伝達率及び熱流束の値は信頼性が高い。

しかし、ガラス板に対する熱伝達率又は熱流束を測定するには必ずしも満足できる方法ではない。ガラスのように熱伝導率が小さな物質に対しては、十分な信頼性を得ることができない場合も多いからである。西尾¹⁸⁾は銅板の表面に適当な厚さのテフロン膜を設けることにより沸騰曲線を大幅に変化させることを実験的に確認しているし、奈良崎¹⁹⁾は水滴の連続衝突においてガラス質の被覆層があると高温領域での熱伝達効率が著しく大きくなることを報告している。また、高ら²⁰⁾は種々の材料における物性値の温度依存性が熱伝達率の計算値に著しい影響を与えると述べている。

今回目的としたのは薄いガラス板の熱強化を進めるうえで、その製造条件を満足する冷却媒体の熱伝達率あるいは熱流束の値を知ることにある。この点からいえば、今回の測定方法はまだ不十分かもしれない。しかし、従来から測定されてきたデータとの比較のほか、これまで測定されていなかった種々の液体における熱流束曲線の傾向を把握することも重要なテーマであることを考えれば、それなりの意義はあると思われる。今回得られた数値は、従来から測定されてきたデータとの比較においては特に問題はないと思われるが、ガラス板にそのまま応用できるとは断言できない。このような意味から、ガラス板に対しては、今回得られた数値は参考値として判断すべきであろう。

4. 結 言

薄板強化ガラスの製造方法の冷却媒体として考えられて

いる物質の熱伝達について一連の測定を行った。市販されている鉱油、熔融無機塩、鉱油の混合系について熱流束、熱伝達率、液体温度（又は動粘性係数）などの影響を実験的に検討したところ、今回の測定条件下において以下の知見が得られた。

(1) シリコン油では明確なバーンアウト点を見出すことはできなかった。熱強化ガラスの製作上、この点では、今回測定したほかの鉱油よりは制御しやすいと思われるが、更に高温域での検討が必要である。

(2) 動粘性係数（又は密度、熱伝導率、比熱）の異なるコンプレッサー油の熱流束を測定したところ、動粘性係数の値が大きくなる（密度：大、熱伝導率、比熱：小）につれて、バーンアウト点における熱流束の値は小さくなり、バーンアウト点の温度は高かった。

(3) 熔融無機塩（70KNO₃+15NaNO₃+15NaNO₂）においても熱流束曲線らしき傾向がみられた。

(4) コンプレッサー油で動粘性係数の異なる2種の油を混合したところ、熱流束曲線におけるピークの形状はならかなものとなった。

(5) 今回測定した冷却媒体は、従来から用いられているエアと比較して大きな熱伝達率が得られたが、熱伝達率に対する温度依存性も認められた。これは、冷却時の熱流束の制御はエアの場合よりも厳密に行う必要性を示している。

文 献

- 1) 荒谷眞一, 小島英則, 高山和喜, *J. Ceram. Soc. Japan*, **100**, 1440-43 (1992).
- 2) 荒谷眞一, 山内 豊, 楠元淳一, 高橋 清, *J. Ceram. Soc. Japan*, **101**, 804-08 (1993).
- 3) 高津 学, 池田周嗣, 窯協, **84**, 19-23 (1976).
- 4) R. Gardon and J. Cobonpue, *Int. Develop. Heat Transfer, ASME*, 454-60 (1962).
- 5) 荒谷眞一, 村本 正, US Patent 4735646.
- 6) 佐藤恭三, 千田好彦, 東北学院大学工学部研究報告, **23**, 1-3 (1988).
- 7) K. Akeyoshi, E. Kanai, K. Yamamoto and S. Shima, *Rept. Res. Lab., Asahi Glass Co., Ltd.*, **17**, 23-36 (1967).
- 8) 佐藤恭三, 日本機械学会・精機学会講演会講演論文集, **64**-66 (1980).
- 9) 橋 藤雄, 塩治震太郎, 日本機械学会論文集, **38**, 1056-64 (1972).
- 10) 佐藤恭三, 東北学院大学工学部研究報告, **20**, 129-36 (1986).
- 11) 西尾茂文, 生産研究, **32**, 247-50 (1980).
- 12) 西川直宏, 高 鉄, 高津 学, 材料, **42**, 507-11 (1993).
- 13) W. H. ギート, “基礎伝熱工学”, 丸善 (1975) pp. 260-70.
- 14) W. Peyayopanakul and J. W. Westwater, *Int. J. Heat & Mass Trans.*, **21**, 1437-45 (1978).
- 15) 佐藤恭三, 日本伝熱シンポジウム講演論文集 (1981) pp. 225-27.
- 16) 藤田恭伸, 曾里田幸典, 日本伝熱シンポジウム講演論文集 (1991) pp. 94-96.
- 17) 佐藤恭三, 工学博士論文 (東北学院大学, 1982).
- 18) 西尾茂文, 日本伝熱シンポジウム講演論文集 (1980) pp. 223-25.
- 19) 奈良崎道治, 日本伝熱シンポジウム講演論文集 (1980) pp. 547-49.
- 20) 高 鉄, 西川直宏, 日比雅義, 高津 学, 材料, **43**, 89-94 (1994).