急速非定常熱伝達と伝熱制御

相 原 利 雄

東北大学流体科学研究所 仙台市青葉区片平 2-1-1

(1995年3月16日受理)

Rapid Transient Heat Transfer and Heat-Transfer Control

Toshio AIHARA

Institute of Fluid Science, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-77

(Received March 16, 1995)

Synopsis :

Rapid transient heat transfer of milli- or micro-second order has come to play an important role in advanced engineering, and the demand for active and direct control technology of heat transfer is growing. In this article, the recent needs for rapid transient heat transfer and its control are considered, and the conceptual differences between heat-transfer control and conventional temperature or thermal control is discussed. Then, the methods of heat-transfer control are divided into passive and active methods. Active methods such as the variable physical property method, external-force method, boundary-layer control method, and phase change method are reviewed.

Keywords : heat-transfer control, rapid transient, heat transfer, active control, passive control

1. はじめに

伝熱工学は、今世紀中頃から定常伝熱と伝熱促進の研究を軸に、目覚ましい発展を遂げて来た。非定常伝熱や過渡伝熱に関する研究も多数行われてはいるが、その多くは $10^{-3} \sim 1$ K/s 級の比較的緩やかなものが対象であった。そして、たとえ伝熱の制御特性が良好と思われる現象でも、伝熱の促進効果が弱いものは、工学的価値が低いものとして、見捨てられて来たおそれがある。

しかし、近年の著しい科学技術の進展にともない、かつては対象とされなかった様な極限条件下での超急速 ($10^3 \sim 10^7$ K/s 級) ないし超精密な熱的制御技術が求められるようになった。このような高度の熱的制御は、準定常ないし平均的な温度制御技術ではもはや対応しきれない。特に半導体や新素材の開発加工では、分子レベルでの熱的制御も必要となろう。

このため、主として作動流体の温度や流量の調節に依存する従来の間接的制御法から脱却し、伝熱機構そ

のものを直接能動的に制御しようとする研究が始まっている。筆者は、このような伝熱現象の能動制御の概念を新たに**伝熱制御** (heat-transfer control) と呼称した^{1,2)}。本稿では、工学的ニーズを背景に、急速な非定常伝熱と伝熱制御について、研究の現況と将来を展望する。

2. 工学的ニーズ

2.1 急速非定常伝熱

超急速冷却の代表例は、アモルファス (非晶質) 金属の生成である。融液を臨界冷却速度以上で超急速すると、通常の結晶組織とならず、優れた特質を持つアモルファス金属が得られる³⁾。現在、 $10^4 \sim 10^6$ K/s 程度の冷却速度を得る方法が工夫されているが³⁾、将来、 10^7 K/s 以上の超々急速冷却が可能となれば、高度の結晶化制御、相変態制御、偏析制御など、新材料開発の面で大きな波及効果が期待できよう。

もう一つの代表例は、超電導コイルにおけるクエンチの早期予測とその抑制である。通常、超電導マグネ

Fig. 1 Transient variations of the disturbance energy rate per unit volume ϕ_d , convective helium cooling rate ϕ_h , Joule heating rate ϕ_J , conductor temperature T_w , and helium temperature T_h at the center of the disturbance zone in a CIC conductor with a length of 50 m for a disturbance duration of 3×10^4 s and a transport current of 10^5 A (from Aihara and Gakumasawa⁴⁾).

ットに生ずる熱擾乱は、持続時間が数 ms 以下の極めて短いものであるが、Fig. 1 と Fig. 2 に例示⁴⁾したように、擾乱印可終了後にクエンチするか、超伝導復帰するかは、 $10^4 \sim 10^6$ K/s 級の超急速非定常伝熱が支配する現象である。このような過渡特性は、超臨界圧ヘリウムによる強制冷却⁴⁾に限らず、液体ヘリウムによる浸漬冷却⁵⁾の場合にも見られ、後者についてはクエンチの光学的早期予測法が著者ら⁶⁾によって開発されている。勿論、超伝導コイルを過剰に冷却すれば、十分な安定性は得られるが、装置が大型化し、運転経費もかさむことになる。緊急時のみを超急速に強力冷却できる伝熱制御技術が求められるところである。

またジョセフソン素子の動作周期や超電導ボロメーターの応答時間は 10^{-9} s 程度、ボロメーターの熱パルス幅は 10^{-10} s 程度であるから、これらの超電導薄膜では 10^{12} K/s 級の超々急速非定常熱伝導がその性能に深く関与することになる。

2.2 超高熱流束

ガスジェットを放電によってプラズマ化し、ローレンツ力を利用する電磁推進器 (Magnetoplasma dynamic thruster) では、ピーク時に 10^8 MW/m² 級の超高熱負荷が、パルス幅 1 ms、間隔 1 Hz で脈動的に電極に加わる。現在、1 kW 級のモデルでは 5×10^6 回の放電が実証されているが⁷⁾、より大型の推

Fig. 2 Transient variations of conductor temperature T_w and helium temperature T_h under the same conditions as for Fig. 1, excluding that of ϕ_d (from Aihara and Gakumasawa⁴⁾).

Fig. 3 Relationship between recovery ratio and cooling rate (from Tanasawa⁸⁾).

進器開発には、高度の伝熱制御技術の確立が望まれるところである。

2.3 生体の凍結保存と冷凍技術

精子や卵細胞、赤血球などを長期間凍結保存する技術は、かなり確立されている。しかし臓器のように高級な生体の長期凍結保存については、まだ研究の緒についたばかりである。

Fig. 3 は生存率と冷却速度の関係を定性的に示したものである。D点に対応する冷却速度で生体組織を急冷すると、細胞内外の水は瞬時に凍結してアモルファス状態となり、凍結時の細胞損傷が少ないので、生存率は高い⁸⁾。また、B点付近の低速度で徐冷すると、まず細胞外の水溶液が氷結し、次いで浸透圧の差で細胞内の水分が細胞膜を通り抜け、外部の氷面で凍結する。したがって、細胞は脱水されて収縮し、細胞内の電解質が濃縮されると共に、細胞外の氷片成長によって細胞壁も損傷されやすい。一方、C点付近の速度で

Fig. 4 Ultra-rapid transient heat-conduction in a superconducting film; one side step-heated and the other kept at a temperature T_0 .

冷却すると、細胞膜を通して十分脱水される前に細胞内で水が凍結し、その氷片によって細胞膜が損傷を受けて、生存率が低下する。Fig. 3 の様な生存率曲線は、いろいろ測定されているが⁹⁾、統一的なものはまだ提出されていない。一方、凍結保存後の解凍時にも、再結晶による氷片の成長や細胞内への急激な水の浸透などによって、細胞が損傷を受ける可能性がある⁸⁾。貴重な提供臓器を有効に生かすためにも、精密な伝熱制御技術が必要である。

近年、癌や腫瘍に対する冷凍外科療法が注目されている。これはクライオプローブと呼ぶ極低温桿を用いて患部を急速深冷し、組織を局所的に凍結壊死させて除去する方法である。著者ら^{10,11)}は、真空断熱層を含めた最大径が 3.1 mm、長さ 1 m、冷却性能 1.5 MW/m² の可撓性と耐酸性を有する液体窒素型クライオプローブを開発した。しかし生体内の患部を局所的に壊死させるためには、単に深冷するだけでは不十分であって、生体反応や温度免疫などに対抗して、動的に伝熱を制御する必要がある。

3. 急速非定常伝熱は定常伝熱とどこが違うか

3.1 超急速非定常熱伝導

物性値一定で、単位体積当りの発熱量 $\hat{q}$ の非定常伝熱に係わるエネルギー保存は次式で表され、

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{q} = \hat{q} \quad (1)$$

熱流束 $\vec{q}$ はフーリエ則によって次式で与えられる。

$$\vec{q} = -k \nabla T \quad (2)$$

ここで、 T は絶対温度、 ρ は密度、 c_p は比熱、 k は熱伝導率、 t は時間である。通常、熱伝播速度は極めて速いので、式 (2) には現われて来ない。しかし、極低温域では熱伝播速度 C は低下し、特に超伝導状態で

Fig. 5 Transient variations of the local temperature at representative points in a film with no internal heat generation $\hat{q}=0$ (from Bai and Lavine¹²⁾).

は主としてフォノンによって熱が輸送されるので、その影響が無視できない。その場合、式 (2) の右辺に修正項が加わり、式 (1) と組み合わせることによって、最終的に下記の双曲形熱伝導方程式が導かれる。

$$\frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} + \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 T + \frac{q}{k} + \frac{1}{C^2 \rho c_p} \frac{\partial \hat{q}}{\partial t} \quad (3)$$

ここで α は熱拡散率で、熱緩和時間を τ と表せば、 $C = \sqrt{\alpha/\tau}$ の関係にある。なお式 (3) で $C \rightarrow \infty$ とすれば、周知の放物形熱伝導方程式が得られる。

いま、ジョセフソン素子や超伝導ボロメーターを想定し、Fig. 4 のように、基板温度 T_0 、厚さ $l (=0.04 \sim 0.4 \mu\text{m})$ の超伝導薄膜の表面に、 $t \geq 0$ で $q_0 (=10^3 \text{ W/m}^2)$ の熱流束が印可され、かつ内部発熱 $\hat{q}=0$ とする。この物理モデルについて、双曲形微分方程式 (3) の数値解と在来の放物形熱伝導方程式 ($C \rightarrow \infty$ 相当) の数値解とを対比したものが、Fig. 5 である¹²⁾。ただし高温超伝導薄膜について、 $\alpha = 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 、 $C = 10^3 \text{ m/s}$ 、したがって $\tau = 10^{-11} \text{ s}$ としてある。

Fig. 5 を見れば、有限熱伝播速度の影響は明らかである。すなわち、双曲形方程式による解では、無次元

時間 $t^*=0$ において無次元表面温度 θ_s は 1 に飛躍上昇し、無次元距離 $X=0.2$ と 0.6 の位置では、それぞれ $t^*=0.2$ と 0.6 に至るまで温度上昇が生じない。表面を発生した温度波が基板に到達し、反射して再び表面に戻って来るため、表面温度は $t^*\approx 2$ 付近で最大となる。

これに対し、通常の放物形方程式の解では、どの位置でも、 $t^*=0$ で $\theta=0$ から立ち上がり、時間経過と共に定常値に漸近し、 $t^*>4$ ではほぼ両者は一致するようになる。すなわち、時間スケールが $t^*<4$ の高速現象では、熱伝播速度の有限性は無視できない。

一方、Yang¹⁸⁾ は、多孔質体のレーザービームないしエレクトロンビーム溶接に関連して類似の解析を行い、式(4)で定義の熱マッハ数 M が 1 に近づくと双曲形熱伝導の効果が顕著になることを指摘している。

$$M=u/C \quad (4)$$

ここで u はビームの進行速度である。

3.2 超急速非定常沸騰熱伝達

伝熱面の温度上昇率が 10^3 K/s オーダーまでの非定常沸騰〔たとえば文献14,15)〕では、Fig.6 に示すように、沸騰開始点の過熱度が增大すると共に壁温にオーバーシュートが現れ、核沸騰の期間は短くなる。水を $1\sim 100$ MW/m² の高熱流束でステップ加熱 ($10^3\sim 10^5$ K/s 相当) した実験¹⁶⁾では、沸騰開始過熱度は初期水温に依存せず、印加熱流束で決まる。

10^7 K/s 以上の水¹⁷⁾やエタノール¹⁸⁾の超急速非定常沸騰では、自発核生成、特に均質核生成が沸騰開始を支配することが確かめられている。これは、液体の温度上昇があまりにも急峻なため、伝熱面に捕捉されているガスや蒸気が十分成長できないうちに、液体分子の熱運動による核生成が始まってしまうからである。したがって、現象は伝熱面の性状によらず、主として液体の性質によって支配され、過熱度が均質核生成温度に達した時点で、伝熱面は瞬間的に多数の微細気泡で覆われ、その直後、膜沸騰遷移が生じて熱伝達は劇的に劣化する^{18,19)}。以上の特徴をくり込んだ浅井の理論解析¹⁹⁾や西尾ら²⁰⁾の温度テイクオフ条件の解析は、実験結果とよい一致を見ている。

なお、ヘリウムの急速過渡沸騰については塩津の解説²¹⁾があり、また被覆面については著者らの実験的研究²²⁾があるので、参照されたい。

3.3 その他の急速非定常熱伝達

強制冷却超電導コイルの熱的安定性の解析では、超臨界ヘリウムの乱流熱伝達について、 $10^4\sim 10^6$ K/s 級

Fig.6 Transient boiling curve in the case of exponential heating with a medium heat flux.

の急速過渡特性が問題となる。しかし、著者らの検討⁴⁾では、加熱開始直後の初期段階では過渡熱伝導として、またある程度の時間経過後は、通常の緩やかな過渡熱伝達として扱ってよさそうである。

4. 温度制御と伝熱制御はどこが違うか

伝熱工学の分野では、電気伝導と熱伝導のアナロジーに基づいて、電位差と温度差、電流と熱流、電気抵抗と熱抵抗をそれぞれ対応させて扱うことが多い²³⁾。このうち電位差の制御に対応する温度制御 (temperature control) については、既に技術が確立している。しかし電気抵抗や電流の制御に対応する伝熱制御や熱流制御の技術は、これまで確立していなかった*。

近年、システム全体の熱収支をとりつつ、多数の物体の温度制御を行う熱制御 (thermal control) の技法が宇宙基地や電子機器の冷却に取り入れられている。しかし、対象物の温度異常を検出し、作動流体の平均温度と流量を調節して、間接的にフィードバック制御を行う熱制御法では、その機能が対象物の空間的平均温度の制御に限定され、システム全体の大熱容量と相まって準定常的な制御に限られることになる。したが

* 流れの分野では、Prandtl が 1904 年に境界層理論を発表した時点で、速度境界層の制御 (boundary-layer control) の概念が提起されており、Schlichting²⁴⁾によって幾つかの方法がすでに紹介されている。

って、微細なホットスポットだけの精密な温度制御や $10^8\sim10^6$ K/s 級の急速制御には、伝熱現象自体を直接制御する伝熱制御技術の確立が不可欠である。

伝熱制御はその様式上、パッシブ制御(passive control)とアクティブ制御(active control)とに大別される。

伝熱のパッシブ制御は、主として伝熱面を特殊な構造や性状にして伝熱特性を受動的静的に制御するもので、伝熱系自体が自立しており、系外から強制的動的に伝熱を制御することはできない。パッシブ制御法は、従来、主として伝熱促進²⁵⁾の立場から研究開発がなされて来たものであるが、今後は、伝熱制御の立場から非定常特性も解明されて行かなければならない。なお関連文献については、著者の小稿²⁶⁾を参照されたい。

5. アクティブ伝熱制御

本稿では、著者が他誌^{2,26~29)}で詳細に展望・解説した伝熱制御法 (Table 1 参照) の中から、比較的急速

Fig.7 Influence of electric field on nucleate boiling heat transfer of a mixture of refrigerant R11 and ethanol at an atmospheric pressure (from Ogata et al.³⁰⁾).

制御が実施可能と思われる代表例を選び、その概略を紹介する。

Table 1 Typical techniques of active heat-transfer control (from Aihara²⁾).

Control method	Controlling factors	Controlled factors*								
		Heat conduction	Convection	Boiling, evapor.	Condensation	Fusion/melting	Solidification	Radiation	Combustion	Therm. property
Molecular control	Molecular configurations, clustering, and energy state; interaction with light, etc.	◎	○	◎	◎	◎	○	○	○	◎
Variable thermophysical properties	Pressure, temperature, intensity of magnetic field, etc.	◎	◎	◎	◎	○	○	○	◎	◎
External force	Electric/magnetic field, ultrasonic wave, oscillation, etc.	◎	◎	◎	◎		○	×	○	○
Boundary-layer control	Injection, suction, obstacle insertion, jet, separation, etc.	×	◎	◎	◎	○	×	○	○	×
Phase change	Coolant feeding, size and velocity of droplets, etc.	×	◎	×	×	×	×	○	○	×
Multiphase media/flow	Velocity, temperature, size, number density, material of particulates, etc.	○	◎	◎		◎		◎	○	○
Porous media	Gas flow rate, alternate feeding period, radiative heating, etc.	◎	◎		×		×	◎	◎	×

* Controllability expected : ◎ very good, ○ good, × unavailable.

Fig. 8 Heat-transfer enhancement by electrohydrodynamical pseudo-dropwise condensation (from Sunada et al³¹⁾).

5.1 外力による制御

電場や超音波などの外力の印加²⁸⁾は、伝熱現象を電氣的に制御できる点で、優れた伝熱制御法である。特に電場による伝熱制御は、気体、代替フロンや油、低電気伝導度の流体などにおける対流熱伝達、沸騰 (Fig. 7) や凝縮熱伝達 (Fig. 8) について、その有効性が確かめられており、ミリ秒オーダーの制御速度が得られる可能性が高い。一方、磁場による伝熱制御²⁸⁾は、既存の磁性流体は粘性が大きく、また熔融金属や半導体は流れの慣性力が大きいと、現在のところ、急速な制御には適していないと言える。

流れや物体を振動させて対流や沸騰熱伝達を制御する方法²⁸⁾は、投入エネルギーに対する制御効果の点で、あまり大きな期待はもてない。ただし、熱エネルギー輸送装置としてのドリームパイプ²⁸⁾は、その原理上、工夫をすればある程度までは急速な制御が可能かもしれない。

5.2 物性値の変化特性を利用する制御

一般に、流体の物性値は臨界点近傍で著しい圧力・温度依存性を示す。この特異な性質を利用し、圧力変化によって熱伝導や対流熱伝達などを比較的急速に制御しようとする試み²⁷⁾もなされている。Fig. 9 は、CO₂ 中に張った水平細線の自由対流熱伝達の圧力依存性³²⁾を、また Fig. 10 は臨界点近傍でパルス加熱さ

Fig. 9 Heat-transfer enhancement near the critical point, free convection of a horizontal fine wire in carbon dioxide (from Hall³²⁾). $\dot{q}$: wall heat flux, $\dot{q}_{STP}$: wall heat flux in a normal state ($p=0.1$ MPa and $T=298$ K), p_c : critical pressure, T_f : fluid temperature.

Fig. 10 Influence of the frequency, f , in pulse heating on the maximum surface temperature, $(T_w)_{max}$, of a wire immersed in the near-critical carbon dioxide (Experiment by Aihara et al³³⁾). The total heat generation of the wire per unit time was the same for every frequency. T_{pc} : pseudo-critical temperature.

れる細線の最大温度の周波数依存性を示したものである³³⁾。

熱伝導制御の例としては、超伝導熱スイッチがある。一般に、超伝導状態における熱伝導率 λ_s は T^3 に比例して減少し、常伝導状態における熱伝導率 λ_n は T に比例する。したがって、両者の比は低温になるほ

ど大きくなる。たとえば、高純度の錫や亜鉛では $\lambda_n/\lambda_s \simeq 100 T^{-2}$ 、鉛やインジウムでは $\lambda_n/\lambda_s \simeq 30 T^{-2}$ の関係にある。超電導状態から常電導状態への切換えは、熱スイッチの構成材に臨界磁界より高い磁界を印加すれば瞬時に行えるので、仮に $T=0.1\text{ K}$ とすれば、熱伝導率の比 λ_n/λ_s を $3 \times 10^3 \sim 10^4$ 倍に急速制御できることになる。

5.3 境界層制御法

対流熱物質伝達には、流動場が強いかわりを持っている。このため、吹出しや吸込み、流れの剝離や再付着、細線や微小物体の挿入、衝突噴流などによって、速度境界層や乱れを強制的に変化させ、対流伝熱を能動的に制御しようとする工夫がなされて来た²⁸⁾。この場合、伝熱の制御速度は、流動場の応答性や流れの速度を越えることはできない。

5.4 相変化を利用する制御

気流中に微小水滴群を数% (質量) 懸濁させるだけで、高温物体の冷却性能を数十倍に促進することができる^{29,34)}。この噴霧気流による伝熱促進は、主として、水滴の連続衝突によって物体面上に形成される薄い水膜の蒸発冷却と、衝突滴による顕熱冷却とによって、もたらされている。したがって、水滴の懸濁量やその直径、空間分布などを適宜変化させることによって、効果的に伝熱を制御することができる。ただし、その制御速度は境界層制御法と同程度と考えるとよい。

6. あとがき

従来、伝熱現象は過渡応答が遅いものとされて来た。たとえば、厚さ 4 mm のサファイア板の両面を突然ステップ加熱した場合、板中心の温度が表面温度の 90% にまで上昇するのに 0.26 s を要する。しかし板厚が 1 μm ならば、わずか 17 ns ($1.7 \times 10^{-9}\text{ s}$) で 90% に達することができる。薄膜技術が飛躍的な進歩を遂げた現在、在来の固定観念を捨て、伝熱要素の微細化によって、超急速制御を達成すべき時期にきている。

いずれの伝熱現象についても、非定常性が急峻になるにつれ、物質固有の性質が伝熱現象を支配する度合いが強まって来る。その意味で、超急速非定常伝熱とその制御には、現象を分子レベルで統御する分子伝熱制御が有力となろう [萌芽的研究としては、たとえば文献 35) がある]。伝熱制御の高速化・高度化のためには、伝熱現象の物理に対する深い理解と、高温超電導材を含む新素材の開発、並びにマイクロ技術との協

調が不可欠である。

なお、伝熱制御については、著者による詳細な展望解説^{2,26~29)}があり、日本機械学会では伝熱制御に関連した小特集号¹⁾を出版しているので、併せて参照されたい。また機械学会では、伝熱制御に関連したオーガナイズドセッションを 1988 年、1989 年、および 1990 年の学術講演会に設け、研究会 (P-TS07-9) や研究分科会 (P-SC185) も組織して活発な学術交流を行って来たことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 「伝熱制御で何ができるか」編集小委員会 (主査: 相原利雄): 機械学会誌 **93** (1990) 899
- 2) T. Aihara: Appl. Mech. Rev. **45** (1992) 129
- 3) 増本 健, 鈴木謙爾, 藤森啓安, 橋本功二: アモルファス金属の基礎, オーム社, 東京(1985)
- 4) 相原利雄, 嶽間沢秀孝: 低温工学 **25**(1990)250
- 5) 岡田定五, 相原利雄, 金 柱均, 黒田邦茂: 低温工学 **25** (1990) 323
- 6) 相原利雄, 岡田定五, 山本広衛, 小村昭義: 低温工学 **29** (1994) 304
- 7) K. Kuwahara, K. Uematsu, H. Suzuki and K. Kuriki: AIAA/DGLR/JSASS 18th Int. Electric Propulsion Conf., Alexandria, U.S.A., AIAA-85-2041 (1985)
- 8) 棚沢一郎: 機械学会誌 **93** (1990) 926
- 9) B. Rubinsky: Proc. 8th Int. Heat Transfer Conf. **1** (1986) 307
- 10) T. Aihara, J.K. Kim, K. Suzuki and K. Kasahara: Int. J. Heat Mass Transfer **36** (1993) 169
- 11) 鈴木和弥, 相原利雄: 低温工学 **28** (1993) 511
- 12) C. Bai and A. S. Lavine: Proc. ASME/JSME Thermal Eng. Joint Conf. **4** (1991) 87
- 13) H. Q. Yang: Int. J. Heat Mass Transfer **34** (1991) 2921
- 14) A. Sakurai and M. Shiotsu: J. Heat Transfer **99** (1977) 547
- 15) A. Sakurai and M. Shiotsu: J. Heat Transfer **99** (1977) 554
- 16) 小澤由行, 青木成文, 井上 晃, 奥山邦人: 機械学会論文集 **48B** (1982) 2547
- 17) K. Derewnicki and W. B. Hall: Proc. 7th Int. Heat Transfer Conf. Munchen **PB2** (1982) 9
- 18) Y. Iida and K. Okuyama: Int. J. Heat Mass Transfer **37** (1994) 2771
- 19) A. Asai: J. Heat Transfer **113** (1991) 973
- 20) 西尾茂文, 永井二郎: 低温工学 **27** (1992) 37
- 21) 塩津正博: 低温工学 **26** (1991) 456
- 22) 相原利雄, 小村昭義, 岡田定五, 黒田邦茂,

- 小原 拓, 山本広衛 : 低温工学 **29** (1994) 2
- 23) 相原利雄 : 伝熱工学, 裳華房, 東京 (1994)
- 24) H. Schlichting : *Boundary-Layer Theory* (J. Kestin 訳) 7th ed., McGraw-Hill, New York (1979)
- 25) 日本機械学会編 : 伝熱工学 資料 (改訂 4 版), 日本機械学会 (1986)
- 26) 相原利雄 : 機械の研究 **43** (1991) 641
- 27) 相原利雄 : 機械の研究 **43** (1991) 771
- 28) 相原利雄 : 機械の研究 **43** (1991) 869
- 29) 相原利雄 : 機械の研究 **43** (1991) 979
- 30) J. Ogata, A. Yabe and T. Taketani : Trans. JSME **56B** (1990) 2052
- 31) K. Sunada, A. Yabe, T. Taketani and Y. Yoshizawa : Proc. 3rd ASME/JSME Thermal Eng. Joint Conf. **3** (1991) 47
- 32) W. B. Hall : *Advances in Heat Transfer*, eds. T. F. Irvine, Jr. and J. P. Hartnett, Vol. 7, Academic Press, New York (1971) 1
- 33) T. Aihara, J. Tamba and T. Ohara : Proc. 4th ASME/JSME Thermal Eng. Joint Conf. Maui **1** (1995) 179
- 34) T. Aihara : Proc. 9th Int. Heat Transfer Conf. Jerusalem **1** (1990) 445
- 35) S. Kotake and I. Aoki : Proc. 2nd JSME/KSME Thermal Eng. Conf. **3** (1992) 141