熱現象の新たな切口を求めて

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

(1997 年 7 月 4 日受理)

Searching for New Viewpoints on Thermal Phenomena

Toshio AIHARA

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

(Received July 4, 1997)

Synopsis :

This article is an extract from a commemorative lecture by the author at the time of his retirement from Tohoku University, March 1997, focusing on his research in the field of cryogenic engineering. The motives, difficulties, and outlines of his studies on the following subjects are described: thermoelectric semiconductors, cooling technology for electronic equipment, natural convection, heat exchangers, air-water mist cooling, gas fluidized beds, heat-transfer control, trans-critical thermal phenomena, thermal stability of superconducting coils and visualization of quench, rapid transient boiling of liquid helium, cryoprobes, etc.

Keywords : commemorative lecture, cryogenic engineering, motives and difficulties of research

1. はじめに

本年 3 月末に東北大学を定年退官し、自身の研究を総括し終えたところへ、本誌の編集委員会から「最終講義を中心に、低温工学関連のテーマで執筆されたい」との依頼を頂戴した。学会誌上で自己の研究を回顧することに、少なからず逡巡を覚えたが、些か波乱に富んだ私の研究歴が若い方々の参考になればと、若干の私見を交え、筆を執った次第である。

2. 異なる学問体系との出会い

私は、1958 年に東北大学工学部機械学科を卒業後、大阪の弱電メーカーに就職し、8 年間、企業で基礎研究と開発研究の双方を体験した。最初の 2 年間は Westco pump と jet pump のキャビテーションによる揚水特性の劣化とその防止について流体工学の研究を行ったが、1960 年春からは中央研究所の電気部応用物理課で、高性能熱電半導体 (Peltier 素子) の開発とその応用研究などに従事した。

当時は Shockley による接合型トランジスタが発明 (1951 年) されて 10 年を経ておらず、トンネルダイオード (エザキダイオード) など新しい半導体素子の発明発見が相次ぎ、「自分達もひょっとしたら」の期待で、アメリカ帰りの気鋭のスタッフも交え、各研究室とも活気と熱気に満ち溢れていた。

その頃この分野の研究では、ソ連の A. Ф. Иоффе 率いる研究集団が世界のトップにいて、技術調査契約を結んでいたアメリカの AIET から、英訳されたソ連の研究報告が西側の論文と共に毎月 (2 週間ごとだったかもしれない) 空輸されてきた。これら最新情報を手分けして読破する一方で、基礎的な固体物理についてのゼミも行われていた。研究スタッフのほとんどは応用物理・電子工学の出身者で、私一人が機械工学出身であった。当時、私が学んだ機械工学は大半が巨視的な学理で構築されていたので、ゼミについていくのは並大抵の苦労ではなかった。研究所から帰宅後、夜半 3 時頃まで Kittel の Solid State Physics や量子力学の勉強に没頭し、数時間眠って朝 8 時には研究室に

出勤している、というハードな生活を1年ほど休日なしで送った。

私は、主として1) Bi_2Te_3 系素子の熱電特性や成績係数 (Figure of Merit) の測定, 2) 素子のゾーン精製における伝導・放射複合伝熱^{*1}, 3) フィン列や平行平板間の自然対流や放射伝熱^{*1}, 4) 素子とフィン列間の接触熱抵抗などの研究を行った。しかし便利な機械屋として、本業の合間に、5) Peltier 素子を用いた電子冷蔵庫の試作, 6) トランジスタ弛張発振を利用した超高速無整流子直流モーターの開発, 7) 燃料電池用ミニチュア循環ポンプの開発, 8) 電子機器の冷却など、あらゆることを手懸けざるを得なかった。

課題3) を取り上げたのは、熱電素子を利用すれば、可動部の全くない冷却装置や発電装置が作れるため、装置の吸・放熱には自然対流が好まれたからである。研究は、まずフィン列の基本をなす平行平板間の自然対流熱伝達を Schlieren 法で実験的に求めることから始めた^{*2}。この仕事をまとめた論文¹⁾は、翌年出版された甲藤好郎先生の名著「伝熱概論」で引用して頂いた²⁾。ほとんど独学、かつ無名の若者にとって、これは大変な栄誉であり、どれほど励まされたか筆舌に尽くし難い。さらに、この論文がご縁で、後年、坪内為雄先生に招かれて東北大学に赴任することになる。こうして私は伝熱学の研究に入ってしまったが、それは日本伝熱研究会(現日本伝熱学会)の発足(1962年)とほぼ同じ時期である。

ところで、熱電素子には大電流が流れているため、冷却フィンと素子対の間は電気絶縁を保つ必要があるが、装置全体の COP を上げるためには両者間の熱抵抗を極力低減したい。課題4) はそのために研究された。従来は、薄く剥いだ天然マイカに真空グリースを塗布して両者間に介在させていたが、強度的にマイカの薄さに限界があり、熱抵抗を格段に下げることができなかった。私は、熱電素子の回路が低電圧であることに着目し、絶縁層の薄膜化による冷却増進が、漏電流による膜中ジュール発熱を凌ぐ臨界膜厚を計算で求

め、接触面の化学処理で極めて薄い金属化合物被膜を形成し、接触面間の熱抵抗を格段に下げること成功した。この方法では、絶縁膜の厚さも自在に制御することができ、実証のため、絶対法による熱伝導率測定装置も自作した。

この期間、応用物理・電子工学専攻のスタッフと共に研究したことは、私にとって極めて貴重な体験であった。自然現象を電子・原子・分子のレベルから解明しようとする気鋭の研究者達との出会いは、機械工学とは全く異なった学問体系のあることを私に実感させ、その後の研究に多大の影響を与えた。後年、東北大学に移ってから、巨視的手法で研究に行き詰まると、微視的手法で解決を試みてきた。また機械工学専攻の院生諸君には、理学・医学など異なる学問体系の講義を少なくとも一つは聴講するよう、勧めてきた。

3. 熱交換器

熱電半導体の研究が一区切りついた頃、新設の冷機事業本部研究部で空気調和装置の研究を命ぜられた。当初、空調機の最適設計と負荷変動に対する冷・暖房特性の推移を計算機で予測しようと挑んだが、空調機は圧縮機、凝縮器、蒸発器、送風機、膨張弁ないし膨張用毛管などから構成されており、当時はデータ不足でとても計算機にのらないことがわかった。そこで、諸々の熱交換器特性を計測し、熱交換特性と諸因子の寄与を計算機用に数式化することから始めた。当時は、タイプの異なる熱交換器の特性を統一的に一つの式で表わすのが研究の主流であったが、私は敢えて熱交換器のタイプ別に精密な数式化を目指した。それは、近い将来、計算機性能が数桁向上し、あらゆる伝熱・流動特性がデータベース化されるであろうことを、熱電半導体開発の過程で直感していたからである。

1964年、中央研究所に再び戻り、新設の熱工學研究室でこの研究は続けられた。さらにこの研究は、後年、私が東北大学赴任後も続けられ、熱交換器と流体駆動装置との組合せ特性の解析、従来より性能が一桁高い超コンパクトヒートシンクの開発(SK社との産学協同研究)などに発展していく。

4. ヒートパイプ、転職

発時、機械工学者による電子機器冷却の本格的な研究は、本邦ではほとんどなかった。その意味で、私は特殊なケースであったといえる。伝熱の新分野を開拓したと認めて頂けたのか、機械学会から「電子機器に

^{*1} 当時は、まだタイガー計算機やリレー計算機が常用されていた時代で、電子計算機も FORTRAN 対応ができておらず、machine language で書いたプログラムを punched tape で入力していたので、大規模プログラムを書くのは大変であった。

^{*2} その頃、休日も出勤して私の仕事を手伝ってくれた方が、後年、転写ポンプ TAB 技術³⁾やマイクロ・バンブ・ボンディング技術を発明し、恩賜發明賞など数々の賞に輝いた畑田賢造氏である。

Fig.1 Condor cooler.⁴⁾

おける伝熱」について解説論文の執筆を依頼された^{*3}。この論文⁴⁾の中で、米海軍船舶局出版の NAVSHIPS 900 (1955) に載っていた Condor cooler (Fig.1) を紹介した。これが Heat Pipe の前身である。

私がヒートパイプに関する最初の学術論文に接したのは、1964年のことである。J. Appl. Phys. 誌に目を通して、G. M. Grover の “Structures of Very High Thermal Conductance” と題する論文⁵⁾を見つけた。Grover はその前年にヒートパイプのアメリカ特許を取得しているが、本邦で機械工学者によるヒートパイプの研究報告が現われるのは、それからずっと後のことである。

1966年、当時、所長をしておられた坪内為雄先生から東北大学高速力学研究所（現流体科学研究所）に助教授として招かれ、大阪を離れることになった。在社中、公表論文8編、社内報告51編を提出し、1961年から退社までに工業所有権67件を出願、特許15件・新案33件の登録を達成することができた。

5. 自然対流の研究、その後

東北大学に着任後、しばらくは金がかからない自然対流の研究を続けた。私の中で、会社時代の仕事が完結していなかったからである。その一つは、平行平板の熱伝達率を注意深く測定したにもかかわらず、平板間隔が大きくなると、私の実験値¹⁾が著名な Bodoia & Osterle の数値解⁶⁾より小さくなっていく問題である。実験値は、間隔の増大につれて単独平板の相似解に漸

近するので、かねてから理論に欠陥があると考えていた。この件は、静止流体が流路の入口速度まで加速されて生じる静圧降下（彼らはこれを無視した）を入口境界条件に考慮することで解決した⁷⁾。

他の一つは、実用に供し得る精度のフィン列の熱伝達式を提出し、最適設計法を確立することであった。これも広範な実験を行い、プレートフィン型とピンフィン型について計11編の論文にまとめることができた。それらの概略は、日本機械学会から刊行された伝熱ハンドブック⁸⁾に収録されている。このうち、ピンフィン型ヒートシンクは NS 社との産学協同研究である。

この間、必要に迫られて、微粒子による自然対流の可視化と流体物性値の温度依存性の影響についても研究を行った。後年、前者は固気混相流の研究に、後者は超臨界圧流体の研究に発展する。

6. 噴霧気流熱伝達

この頃、エネルギーの有効利用に関連して、伝熱促進の研究が求められていた。自然対流では飛躍的な促進効果が期待できないので、微小水滴群を気流中に懸濁し、それらが加熱物体面上に衝突して形成する液膜の蒸発を利用して、熱伝達の一桁増進を狙った。

まず基本的な楔面を取り上げ、現象の把握と問題点の抽出を行った。次いで熱交換器を想定し、管群ないし管路中の単管について、水滴の粒度分布と飛跡、ブロックージ比、流れの剥離など、十数の関連因子を考慮した数値解析を行い、その結果を実験で検証した。

さらに RD 社との産学協同研究として、水噴霧と送風とを同時に行う噴霧送風機を考案し、噴霧気流伝熱面と一体に組み込んだ半導体冷却ユニットを開発、その性能が単相冷却時の20倍に達することを実証した。これらをまとめた論文16編の大半は、文献9)に概説されている。

7. 固気混相媒体の熱伝達

固気混相媒体の熱伝達については、まずガラス粒子を気流に懸濁する混相流タンネルを建設し、広範な実験的研究を行った。しかし、粒子衝突による管壁損傷と大圧力損失の割には、伝熱促進の効果が低いので、研究の焦点を流動層熱交換器に切り替えて研究を進めた。

通常のパブリック型流動層熱交換器は、伝熱特性は優れているが、圧力損失の大きいのが難点である。そこでまず、層中に設置した管群に対し、固気衝突噴流

^{*3} 1967年執筆のこの論文⁴⁾中で触れた将来予測が、その後30年を経た今日、ほぼ的中していることに深い感慨を覚える。ご一読願えれば幸いである。

を生じる新しいタイプの流動層を開発した。この流動層は、静止層高が5 mm 程度でも安定した流動化状態が得られ、伝熱特性は従来と同等で、圧損が従来の1/10 から1/100 と極めて低い優れた特性を有している。さらに、管群への固気衝突噴流によって、 -20°C の低温でも蒸発管の着霜を完全に除去でき、連続無着霜運転が可能である。空調用蒸発器(M 製作所との産学協同研究)や太陽光ガス加熱装置への応用も含め、この極浅層流動層の特性を -20°C から $1,250^{\circ}\text{C}$ の広範囲にわたって測定した研究結果は、16 編の論文にまとめられ、その大半は文献10)に概説されている。

8. 伝熱制御

東北大学において、高速力学研究所から流体科学研究所への改組転換が求められていた1986年、サンフランシスコの国際伝熱会議からの帰途、「近い将来、工学的ニーズが従来の緩慢で受動的な温度制御から急速な熱現象の能動制御に向かうであろう」と考えているうち、突然、**伝熱制御**の概念が頭に閃いた。この伝熱制御は、流体温度や流量の調節に依存する既存の温度制御と異なり、伝熱機構そのものを直接能動制御しようとする新しい概念である¹¹⁾。

以後、今日に至るまで、流体の亜臨界から超臨界に至る遷臨界現象、感温磁性流体などを利用した伝熱制御や急速非定常熱伝達、射出成形金型内の溶融ポリマー樹脂の凝固過程と結晶化などの研究を続けてきた。特に、擬臨界点近傍では、流体のエンタルピーが微小温度変化によって劇的に変わる現象を利用し、パルス加熱中の物体温度をその周波数によって制御できることを実証した¹²⁾。それら35編余の研究結果と伝熱制御に関する解説は、大半が文献13~15)で紹介され、文献16)に収録されている。

急峻な遷臨界現象については、流体物性の本質に関する理解が不可欠である。ここでも、ミクロな視点でものを見る37年前の習慣が働いて、躊躇なく分子動力学による解析を開始し、10編余の論文を提出してきた。それらの大半は論文目録16)に収録されている。

9. 低温工学関連研究

1986年頃からは、極低温関係の4つの課題について研究を開始した。以下、本誌との関連上、興味ある結果について、少し詳しく記述する。

9.1 超電導コイルの安定性とクエンチ伝播

1986年頃、急速非定常伝熱の好具体例として、熱

的・電磁氣的複合問題である超電導コイルの熱的安定性に興味を抱いた。既に2章で記述のように、電磁氣的問題にアレルギーは全くない。そこでまず、強制冷却超電導導体について数値解析を行った。その際、物理モデルの構築に先立ち、下記の検討を行っている。

1) 超電導導体の熱的安定性に寄与する因子の数は優に50を超える。従って、自分が知見を有する因子だけを取り上げて精密な解析を行っても、現実に使え結果は導出し難い。私の経験によれば、このように複雑な問題では、まず重要因子だけを取り上げ、若干誤差があってもバランスのとれた解析を行い、全体の特性を把握する方が現実的である。精密な解析はその次でよい。

2) 液体ヘリウム温度の極低温域では、物性値の温度依存性が無視できず、物性値データの精密さは解析結果の信頼性を左右する。そこで、関連物性値について温度依存性を考慮した精密な実験式を導出し、これを使用した。

3) 当時、超臨界圧ヘリウムの急速非定常乱流熱伝達のデータは決定的に不足していたので、上記1)の視点に立ち、次の近似を行った。a) 発達した定常熱伝達率には、代表寸法に伝熱等価直径を選んで既存の管内乱流熱伝達の実験式を適用。この場合、許容し得る誤差内で、熱伝達率が管路の断面形状によらないことがわかっている。b) 過渡熱伝達率には純熱伝導から導出した式を適用。これは、擾乱の持続時間が短く、ヘリウムの伝熱が熱伝導支配域にあるからである(流体中の熱拡散が乱れによる拡散よりも格段に速い)。

4) 擾乱の実態も当時はまだ明快でなかった。そこで、擾乱の空間波形について2種、また時間波形について6種を想定して解析した。

次いで、H社との産学協同研究として、浸漬冷却形パンケーキ巻きコイルを取り上げ、熱的安定性とクエンチ伝播に関する数値解析を行った。この場合には、液体ヘリウムの非定常沸騰熱伝達について信頼に足るデータを特定し、closed form に数式化することと、物理モデルを単純化することに工夫を凝らした。得られた数値結果は、実験値と極めて良く一致している。

以上の研究をまとめた論文の大半^{17~21)}は、本誌に収録されている。

9.2 液体ヘリウムの急速過渡沸騰熱伝達

前節の解析精度を上げるためには、絶縁被覆超電導線の急速過渡沸騰熱伝達に関する情報が必要である。当時は、定常沸騰の研究しか知見されなかったの

Fig. 2 Coated strip for rapid transient boiling tests. (a) Arrangement of the test piece. (b) Cross-sectional details of the test piece.

1992年から研究を開始した。

この場合、液体ヘリウムに接する被覆層表面の温度と熱流束の過渡データが不可欠である。しかし、被覆層表面に熱電対や測温体を取り付ければ、熱伝導率や熱容量が被覆層と異なるため、過渡現象の温度場を時空間的に乱し、現象の正確な計測を阻害する。そこで実用被覆超電導線を模擬して、Fig. 2 のようにステンレス箔ヒータの両面に PVF を塗布し、その上にほぼ同じ熱特性をもつ温度計測用カーボンペイストを薄く塗布して試片を作った。これを液体ヘリウム中でステップ加熱し、得られた過渡データをスーパーコンピュータで大規模数値解析して、急速過渡沸騰特性を求める方法を開発した。

この計測法の開発と、誤差およびデータの解析は東北大学で、また試片の製作と鉛直および水平被覆ストリップを用いた実験は、産学協同研究として H 社の実験室で行った。得られた研究成果^{22~24)}は、すべて本誌に収録されている。

9.3 超電導コイルの常伝導転移域を可視化撮影

上記 9.1 節後半の産学協同研究に際し、東北大学から高速ビデオを H 社の実験室に持ち込み、パンケーキ巻きコイルのクエンチによるヘリウム蒸気のバーストを撮影中、クエンチ挙動を可視化撮影できることを発見した²⁵⁾。Fig. 3 は、コイルに 1,600 A を通電中、

Fig. 3 Optical observation of rapid-quench propagation, reproduced from a high-speed videotape.

Fig. 4 Optical apparatus for quench observation.

エネルギー密度 $1.5 \times 10^5 \text{ J/m}^3$ 、持続時間 10 ms の熱擾乱を与えてクエンチを誘起させ、0.1 s 後の画像を例示したものである。常伝導転移域は、画面上に暗影部として現われている。

可視化撮影の原理²⁵⁾は Fig. 4 に示す。供試コイルに照射された光は、超電導状態ではコイル表面で反射されてビデオカメラに向かうが、常伝導転移が起きると、その領域からの反射光は瞬間的に減衰する。この光学現象は、固体表面に接する液体ヘリウム中の極め

Fig. 5 Cross-sectional details of the tip of a cryoprobe. ① Inner tube of OD 1 mm. ② Outer tube of OD 2.2 mm. ③ Shield tube of OD 3.1 mm. The thickness of every tube was 0.1 mm. ④ Probe tip.

て薄い層で発生するため、固液界面の側方からでは検出し難く、上記のように、反射光の減衰を利用する必要がある。本方法の価値は、高速伝播するクエンチ現象を空間的かつ時間的に定量計測できる点にある。

上記の反射光減衰は、コイル表面の熱流束が 140 W/m^2 位 (表面過熱度が 0.3 K 以上) から始まり、 $1,200 \text{ W/m}^2$ を超えた辺りで飽和する²⁵⁾。従って本方法を用いれば、熱擾乱の発生をその初期段階で検出し、クエンチを早期予知することが可能である。

H 社との産学協同行ったこれら研究の大半^{25,27)}は、本誌に収録されているので参照されたい。

9.4 液体窒素の微細噴流沸騰伝熱とクライオプローブへの応用

1986 年、伝熱促進を目的として、直径 0.8 mm の微細噴流による液体窒素の沸騰伝熱に関する基礎研究を開始した。この研究は、やがて M 製作所との産学協同研究に発展し、和・英 2 編の論文^{28,29)}にまとめた研究結果は、23 年の歴史をもつ年刊書 *Advances in Heat Transfer*³⁰⁾ に詳しく紹介されている。さらに、これら基礎研究の成果を応用し、冷凍外科用クライオプローブも開発した。

クライオプローブは細長い管の先端に Fig. 5 のような冷却端子を有し、これを極低温に冷却して癌や腫瘍などの患部に密着させ、局所的に凍結壊死させる装置である。従って治療を安全に行うため、冷却端子以外のプローブ外表面は、人体に支障ないよう、十分断熱しなければならない。このため既存のクライオプローブでは、いずれも冷却端直径が 10 mm 前後で長さが 30 cm 以下になっている。

我々が開発したクライオプローブは、消化管ファイバースコープの鉗子用チャンネルに挿入し、臓器内を観察しつつ治療ができるよう、断熱層を含む最外径が 3.1 mm 、長さ 1 m 、しかも耐酸性と可撓性を有する

画期的なものであった。その断熱特性と過渡冷却特性に関する研究結果³¹⁾も本誌に収録されている。

10. あとがき

大学卒業後 39 年の間、先入観と固定観念^{**}からの脱却を心がけ、熱現象の新しい切口を求め続けてきた。自然現象を解き明かすことは、私にとって喜びであったが、その一方、人類の生まれる遥か以前から続いている自然の営みをチラと垣間見ただけではないか、との真もある。

人は畏れるものと感謝するものとを 持たなければいけない

それらを同時に満たすものが、かつては神であり、仏であつたろう。現在もそう信じられれば幸いである。今の私にとって、畏れと感謝の対象は大自然である。

大分以前に、ピサからローマに向かう海沿いの鉄道を旅したとき、巨大な夕陽が海の彼方に沈む光景に出会ったことがある。そのときの夕陽は、恐ろしいほどの早さで沈み、視界から消えて行った。それはまさに大自然が、時の過ぎ行く早さを、壮大な可視化実験で私に見せてくれたように思われ、深い感動を覚えたことがある。これとても、単に奇麗な夕陽と眺めれば、それだけのことに過ぎない。大自然が我々に語りかけてくる言葉に謙虚に耳を傾けると、新たな切口は見えてくるであろう。

補遺、研究の評価

科学が認識のための学問から、糧を得るための手段になって以来、墮落したと言われている。学問や研究の評価が、目先の時流に迎合したり、裁定者の野心に基づいてなされることは極力避くべきであり、いわんや個人に対する好悪や利害に基づいてなされるなど、あってはならないことである。研究者の評価も、論文数やテレビ・新聞報道の多寡、予算の規模で行えば、容易ではあるが、真に優れた研究者を見落とす虞がある。

まだ無名の Joule が行った研究の重要性を見抜き、高く評価して彼を世に出したのは、グラスゴー大学の少壮教授だった W. Thomson (後の Kelvin 卿) である³²⁾。また東北大学の抜山四郎先生は、1934 年に初めてほぼ完全な沸騰曲線を見出されたが、世界の学界に先立つこと十数年のこの研究も、発表当時は国内で注

^{**} 先入観や固定観念をもったための失敗談は、科学史をひもとけば、多々みられる。

目されず、この発見の重要性を世界に紹介したのは米国の W. H. McAdams や M. Jakob であった。これらの逸話に思いを馳せる時、研究や研究者の評価は、広い心と深い洞察力をもってなされなければならない。今こそ、高度の研究評価学を確立すべき時である。

学問や研究の真の評価は、利害の消えた後世、歴史的になされている。ガリレオ ガリレイは卓越した洞察力で近代科学の道を開いたが、彼の唱えた地動説のために宗教裁判にかけられ、死後は公に葬儀も墓を作ることも許されなかったという。しかし後世、真理に対する彼の不屈の精神と偉業を称え、フィレンツェのサンタクロッチェ教会には立派な墓碑が建てられている。

我々は新しい提言に寛容でなければならない。真の国際化は、まず我々の持つ閉鎖性・保守性の打破から始められるべきである。

謝 辞

企業に8年間いたので、学者として遅い立ち上げではあったが、160編余の学術論文と22冊の共著書を世に出し、内外の学術組織や国際誌編集の要職を勤めさせて頂き、自分の生きた証しを遺すことができた。この幸運を心から感謝し、研究室教職員・院生・学生諸君の長年にわたるご協力に厚く謝意を表したい。

参考文献

- 相原利雄：機械学会論文集 **29** (1963) 903
- 畑田賢造：TAB 技術入門，工業調査会，東京 (1990)
- 甲藤好郎：伝熱概論，養賢堂，東京 (1964) 177
- 相原利雄：機械学会誌 **70** (1967) 1197
- G. M. Grover: J. Appl. Phys. **35** (1964) 1990
- J. R. Bodoia and J. F. Osterle: Trans. ASME Ser. C **84** (1962) 40
- T. Aihara: Rep. Inst. High Speed Mech., Tohoku Univ. **28** (1973) 1
- 日本機械学会編：伝熱ハンドブック，日本機械学会，東京 (1993) 114, 118, 122
- T. Aihara: Proc. 9th Int. Heat Transfer Conf., Jerusalem **1** (1990) 445
- T. Aihara: Proc. 1st World Conf. Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics, Dubrovnik (1988) 1291
- 相原利雄：低温工学 **30** (1995) 316
- T. Aihara, J. Tamba and T. Ohara: Proc. 4th ASME-JSME Thermal Engng. Joint Conf., Maui **1** (1995) 179
- 相原利雄：機械の研究 **6~9** (1991) 641, 771, 869, 979
- T. Aihara: Appl. Mech. Rev. **45** (1992) 129
- 相原利雄：機械学会誌 **96** (1993) 219
- 相原利雄著作目録，東北大学記念資料室，仙台 (1997)
- 相原利雄，嶽間沢秀孝：低温工学 **25** (1990) 250
- 嶽間沢秀孝，相原利雄：低温工学 **26** (1991) 272
- 岡田定五，相原利雄，金 柱均，黒田邦茂：低温工学 **25** (1990) 323
- 岡田定五，相原利雄，山本広衛，小村昭義：低温工学 **32** (1997) 47
- 岡田定五，相原利雄，山本広衛，小村昭義：低温工学 **32** (1997) 58
- 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
- 相原利雄，小村昭義，岡田定五，小原 拓，黒田邦茂，山本広衛：低温工学 **30** (1995) 420
- 小村昭義，岡田定五，相原利雄，小原 拓，山本広衛：低温工学 **32** (1997) 66
- T. Aihara and S. Okada: Cryogenics, ICEC Suppl. **34** (1994) 721
- 相原利雄，岡田定五，山本広衛，小村昭義：低温工学 **29** (1994) 304
- 岡田定五，相原利雄，山本広衛，小村昭義：低温工学 **30** (1995) 177
- 相原利雄，鈴木和弥，金 柱均，笠原敬介：機械学会論文集 **B 57** (1991) 2112
- T. Aihara, J.-K. Kim, K. Suzuki and K. Kasahara: Int. J. Heat Mass Transfer **36** (1993) 169
- D. H. Wolf, F. P. Incropera and R. Viskanta: *Advances in Heat Transfer* (J. P. Hartnett, T. F. Irvine, Jr. and Y. I. Cho, eds.) Academic Press, New York, Vol. 23 (1993) 1
- 鈴木和弥，相原利雄：低温工学 **28** (1993) 511
- 相原利雄：伝熱工学，裳華房，東京 (1994) 3