

# 冷却工学の現状と将来

解説

西尾 茂 文\*

## Present and Future of Cooling Technology

Shigefumi NISHIO

### 1. はじめに

物質を冷却する手段には、冷却対象物自身の状態変化による熱力学的冷却方法と、冷却媒体等を利用する伝熱学的冷却方法とがある。1908年に最後に残った「永久気体」ヘリウムが Kamerlingh Onnes により液化されたように、低温への挑戦は主に前者を手段としてなされてきた。一方、後者の伝熱学的冷却方法は、低温自体は生成できないが、高冷却速度あるいはさまざまな冷却効果等が要求・期待される事象において幅広く利用されている。本稿で言う冷却工学とは、こうした冷却手段及び冷却効果に関する工学体系を指している。ここでは、紙面の都合により対象を伝熱学的冷却方法に限定し、冷却工学がかかわる技術領域、現状及び問題の所在についていくつか例を挙げながら簡単に述べてみたい（なお、本稿の性格上、文献としてはできるだけ総説的なものを挙げた）。

### 2. 冷却工学がかかわる技術領域

表1に、伝熱学的冷却方法を用いた冷却技術がかかわる技術領域を、いくつか例として挙げてみた。表に示した廃棄冷却とは、装置等において付随的に発生する熱の廃棄を目的とする冷却、保護冷却とは、燃焼ガス等の高温熱源から対象物を遮断し過度の温度上昇から保護するための冷却、緊急冷却とは、熱機器の異常動作時等に発熱量と除熱量との不整合から生じる対象物の過度の温度上昇を回避するための補助冷却、凍結冷却とは、対象物の組織等を凍結・維持するための冷却、生成冷却とは、対象物のもつ潜在的性質等を顕在化させるためや対象物に新たな性質を付与するための冷却である。表に示したように、廃棄・保護冷却の多くは冷却対象物の動作温度制御を目的とする定常冷却であり、緊急・凍結及び生成冷却は対象物を非定常的に冷却する過渡冷却である。

いずれにしても、冷却工学は、その対象領域は極めて幅広く境界領域的色彩が強いといえる。

表1 伝熱学的冷却方法がかかわる技術領域<sup>1)~28)</sup>

冷却目的	具体的目的	代表例
廃棄冷却	1. 単純廃棄・媒体冷却 <sup>1)2)</sup>	熱交換器、凝縮器、自動車・宇宙機器のラジエター
	2. 散逸・摩擦熱除去 <sup>3)~10)</sup>	電動機、発電機、変圧器、超精密加工、電子デバイス、超電導磁石
保護冷却	1. 翼・ノズル保護 <sup>11)12)</sup>	ガスタービン、ロケット
	2. 壁保護 <sup>13)</sup>	燃焼室、核融合炉第一壁、アブレーション
緊急冷却	1. 炉心健全性確保 <sup>14)15)</sup>	軽水炉緊急炉心冷却
凍結冷却	1. 材料熱処理 <sup>16)</sup>	焼入れ
	2. 組織微細化、溶質分布均一化 <sup>17)18)</sup>	急速凝固
	3. 固溶限拡大、非晶質相化 <sup>18)19)</sup>	急速凝固
	4. 応力分布凍結 <sup>20)</sup>	ガラス強化
	5. 化学反応凍結 <sup>21)</sup>	ガスクエンチ
	6. 冷凍保存 <sup>22)23)</sup>	食品冷凍、生体組織保存
生成冷却	1. 金属材料熱処理 <sup>24)</sup>	制御冷却
	2. 準安定相生成 <sup>25)</sup>	急速凝固
	3. 凍結加工 <sup>22)23)</sup>	凍結手術、食品粉碎、凍結工法、凍結濃縮
	4. 粉末製造 <sup>26)27)</sup>	P/M 技術
	5. 熱応力生成 <sup>28)</sup>	高温岩体熱破碎

### 3. 冷却方法に関する問題と課題

周知のように、伝熱学的冷却方法には、低温固体に接触させる伝導冷却、冷却媒体による対流冷却及び沸騰冷却、さらに放射冷却がある。紙面の都合で、個々の冷却方法の詳細については、全般的資料<sup>29)30)</sup>、数値解析法に関する資料<sup>31)</sup>、特に重要な沸騰冷却に関する資料<sup>32)33)</sup>に譲るとして、以下では、冷却方法に関する問題の所在（本章）と、冷却対象物に生ずる冷却効果に関する問題の所在（次章）に注目して述べてみたい。

#### 3-1 直接冷却と接触熱抵抗

冷却対象物内部を表面から冷却する方法では、対象物内部の熱伝導は冷却に対する熱抵抗を形成するととも

昭和 63 年 3 月 30 日受付 (Received Mar. 30, 1988) (依頼解説)

\* 東京大学生産技術研究所助教授 工博 (Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, 7-22-1 Roppongi Minato-ku Tokyo 106)

Key words : thermal engineering ; heat transfer ; freezing ; solidification ; heat exchange ; cooling ; quenching.

に、内部に温度分布を引き起こす。そこでまず、熱を対象物内部から直接取り出す方法すなわち直接冷却法の可能性について考えてみる。直接冷却としては、現在のところ熱放射とペルチェ効果が考えられる（ペルチェ効果とは、熱電対のように2種の導体で構成される回路に電流を通ずると高温側界面で吸熱  $[-Q]$ 、低温側界面で発熱  $[Q]$  が起こる現象で、通電量 1A あたりの  $Q$  がペルチェ係数）。しかし、熱放射では対象物の透過率に、ペルチェ効果ではペルチェ係数に限定があり、双方とも一般的には有効な方法でない。すなわち、直接冷却として優れた方法が出現すれば冷却工学の世界が一変することは間違いないが、現在のところ、冷却物体表面からの冷却に頼らざるを得ず、熱伝導抵抗や温度分布の発生は避けられない（熱伝導解析の有力な武器である差分法、有限要素法あるいはモンテカルロ法等の数値解析法の詳細については文献 31) 等を参照されたい）。ただし、ヒートパイプは、その使用が可能であれば熱伝導抵抗の低減に有効である<sup>34)</sup>。

ところで、こうした熱伝導抵抗は、伝導冷却でも当然問題となる。伝導冷却の場合は特に、解明の遅れている接触熱抵抗の問題が技術的にも重大な問題となる<sup>35)</sup>。例えば、双ロール法<sup>36)</sup>による急速凝固で焼付き等のためにロール圧下力を増大できない場合には、ロール・凝固殻間に空隙（相当厚さ  $\delta$ ）が形成され接触熱抵抗が発生する。この接触熱抵抗は、熱伝達率  $h$  に換算すると、近似的に  $k/\delta$  となる（熱伝達率とは冷却対象物表面と冷却媒体との単位温度差あたりの熱流束、熱流束とは単位冷却面積・単位時間あたりの冷却熱量、また  $k$  は空隙内流体の熱伝導率）。例えば  $h$  の値は、空隙の空隙が平均して  $\delta=5\mu\text{m}$  とすると  $10\text{ kW/m}^2\text{K}$  程度となり、この場合、接触熱抵抗は冷却速度を支配しその結果凝固殻プロファイルの発達等に大きな影響を及ぼす<sup>37)</sup>。したがって、接触熱抵抗の介在が避けられない場合には空隙内を（気体ではヘリウム等）熱伝導率のよい流体で充填する方がよい。

3.2 高熱流束・高熱伝達率冷却技術

冷却技術には、宿命的に高熱流束・高熱伝達率化の課題が課されている。薄肉ガラス板を強化するガラス強化システム、炉心プラズマと対抗して過酷な環境下にさらされる核融合炉第一壁を保護する冷却システム、 $10^3\text{K/s}$  程度以上で溶融金属を凝固させる急速凝固システム等、高熱流束・高熱伝達率冷却が要求される例は数多いが、ここでは半導体論理デバイスの冷却を例としてこの問題を考えてみる<sup>5)~8)</sup>。LSI における演算速度向上の基本は、ゲート遅延（ゲートスイッチング時間）と配線遅延（素子間信号伝播時間）の短縮である。前者はスイッチングエネルギー  $U$ （スイッチングに要する電力と時間との積）の低減により達成され、現在は ns の領域へと進んできている。一方、後者の配線遅延低減は集

積度の増大により達成され、1万ゲート/チップ以上のVLSIの領域へと進んできている。さて、例えば、 $U=10\text{ pJ}$  の素子を使用して  $N=1000$  個/チップの集積回路（大きさ  $5\text{ mm}$  四方）で、 $\tau=1\text{ ns}$  の演算速度を実現するとすると、発熱密度は  $q=U\cdot N/\tau\cdot A=400\text{ kW/m}^2$  にも達する。現実には、素子技術の進歩にもかかわらず発熱密度は、1960年代の  $1\text{ kW/m}^2$  程度から近年の数  $10\text{ kW/m}^2$  以上へと急速に増大してきている。一方、半導体素子には動作信頼性が確保できる上・下限温度があり、これは通常  $40\sim 80^\circ\text{C}$  程度である。要するに、高速演算を実行する半導体論理デバイスでは、高発熱密度のチップを室温近くの温度に冷却する必要があり、高熱伝達率冷却技術の開発が不可欠である。

さて、図1は、熱伝達率が高いことで知られる衝突噴流冷却系における熱流束を比較したものである。図に示したように、高熱流束・高熱伝達率冷却には沸騰冷却あるいは溶融塩対流冷却等が適している。例えば、飽和沸騰冷却系を高熱流束化する場合の上限界熱流束  $q_{max}$  は、気液界面からの蒸発分子の運動が熱抵抗を形成し始める状況に対応する  $q_{max}=\rho_v L [R_g T_{sat}/(2\pi M)]^{1/2}$  程度<sup>38)</sup> であると考えられる（ここで、 $\rho_v$  は蒸気の密度、 $L$  は蒸発潜熱、 $R_g$  は一般ガス定数、 $M$  は分子量である）。上式の値は大気圧水では、(Newton冷却を仮定すれば) 直径  $30\mu\text{m}$  の SUS 304 球を約  $10^7\text{K/s}$  の冷却速度で冷却できる  $226\text{ MW/m}^2$  となる。この限界値は、液体が飽

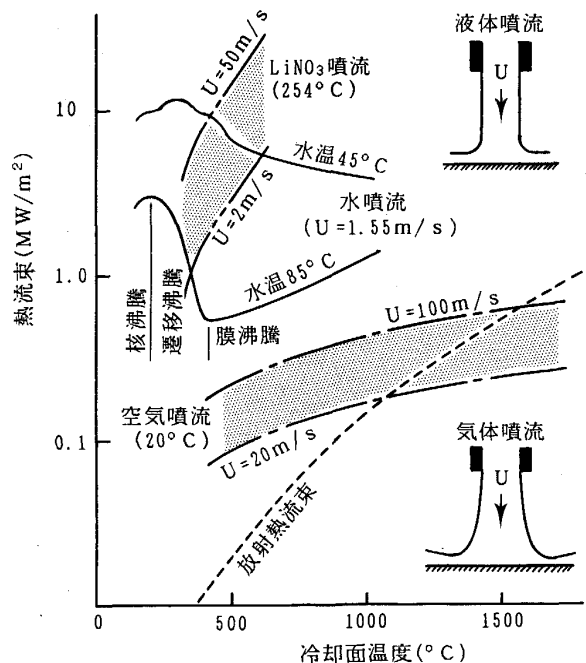


図1 冷却方法による熱流束の差

ノズル幅 10 mm の二次元衝突噴流冷却系における熱流束を比較したもので、図中の水噴流系以外は理論値であり、また放射熱流束は冷却面を黒体近似したときの値である。水の沸騰冷却については核沸騰、遷移沸騰、膜沸騰の各領域を示した。

和温度以下（サブクール状態）の場合は液体顕熱上昇分が加わるので更に高くなる。一方、現在の冷却技術において達成されている熱流束は、例えば高速・強サブクール水の管内流冷却においても  $80 \text{ MW/m}^2$  程度<sup>39)</sup>であり、高熱流束・高熱伝達率化ははまだ限界には到達していない。

### 3.3 冷却促進技術

冷却促進技術は、高熱流束・高熱伝達率冷却技術に関連して要求される場合が多いが、冷却系・媒体が既定である場合等には特に重要となる。低温での冷却技術の多くはこの例であり、例えば超電導磁石の冷却問題がある<sup>9)10)</sup>。一般に超電導材料は常電導状態での電気抵抗がかなり大きくジュール発熱が大きいので、大型超電導磁石に使用する超電導導体は、常電導遷移が発生すると電流が分岐できるように銅等の安定化材中に超電導繊維を多数埋め込んだ構造となっている。さて、超電導コイルに大きな局所的熱擾乱が発生すると導体に常電導遷移部が発生し、電流分岐により安定化材中でジュール発熱が発生する。このジュール発熱は常電導遷移伝播を介してコイル全体の常電導遷移（クエンチ）の原因となるので、現在の大型超電導磁石では、常電導遷移が発生しても冷却により自発的に超電導状態に復帰するようコイル通電量を決定する。このため、現実の通電量は超電導線の臨界電流よりかなり低い値に限定されてしまっている。現在の超電導磁石は冷媒がヘリウムに限定されているので、したがって大型超電導磁石では通電量を臨界電流に近付けるようヘリウムの冷却促進が重要となる。

表2に、これまでに提案されている主な熱伝達促進法をまとめた。冷却促進法の基本は、冷却面積の拡大と熱伝達抵抗低減である。前者ではフィンを用いる場合が多い<sup>2)5)8)29)</sup>。一方、後者については、対流冷却や膜沸騰冷却等の境界層型冷却では、境界層前縁効果<sup>2)</sup>、攪乱や増速等の境界層薄化効果等<sup>29)40)41)</sup>が有効であり、熱伝達

表2 冷却促進法<sup>29)40)41)43)</sup>

熱伝達促進法	対象冷却技術：具体的応用例
1. Turbulence promoter：粗さ，多孔板，加速	対流冷却：熱交換器
2. Vortex generator：捻れテープ，溝付き管	管内対流冷却，管内沸騰流冷却：熱交換器
3. Surface vibrator	対流冷却，沸騰冷却
4. Fluid vibrator：機械振動，超音波印加	対流冷却，沸騰冷却
5. Electric field generator：平等電界，不平等電界，直流電界，交流電界	自然対流冷却，沸騰冷却：工具工具冷却
6. Structured surface：焼結面，機械加工面	沸騰冷却：熱交換器，電子デバイス冷却
7. Treated surface 7.1 疎水(液)性処理面 7.2 熱抵抗型処理面	沸騰冷却 沸騰冷却 <sup>43)</sup>
8. Additives：固体，液体	対流冷却，沸騰冷却

抵抗低減に効果的な因子を見いだすことが重要である。効果的因子は冷却形態により異なるので、具体的には文献(29), (40), (41)等を参照されたい。さて、例えば管内対流冷却において、障害物により乱れを促進する Turbulence promoter 等を使用すると流動抵抗が増大する。したがって、冷却促進効果を判断する場合には、同一ポンプ動力における熱伝達率の比較等を行う必要がある。ノズル・冷却面間に Punched plate を挿入すると、同一流動条件で比べて3倍程度の熱伝達率が得られる衝突噴流冷却促進法<sup>42)</sup>や、冷却対象物表面に適切な厚さで熱抵抗層を設けると逆に図2のように沸騰冷却促進が起こる（断熱層のパラドックス）方法<sup>43)</sup>はこの意味で優れている。

### 3.4 安定性・一様性に富んだ冷却技術

ミスト冷却は均一性に優れた冷却方式として知られているが、このように冷却技術には、高熱流束だけでなく安定で確実あるいは空間的に均一な冷却が要求される場合がある。例えば、3.2節で述べた電子デバイスの冷却では、配線基盤上に多数搭載されたさまざまな形状のチップを確実かつ均一に冷却する必要があり、対流冷却を採用する場合には上流チップから発生する Thermal wake の問題など乱流拡散に関する数値解析が重要となる<sup>44)</sup>。冷却技術における乱流拡散の問題は、ガスタービン翼全面膜冷却等の保護冷却においても極めて重要である<sup>12)</sup>。

さらに、安定・均一冷却の例として鋼材の制御冷却の例を挙げる事ができる<sup>24)</sup>。これは、周知のように  $830^\circ\text{C}$  程度で圧延を完了し、 $750^\circ\text{C}$  程度から  $650\sim 450^\circ\text{C}$  程度まで冷却することにより、従来システムに比べて新たな材質が得られる省工程システムである。しか

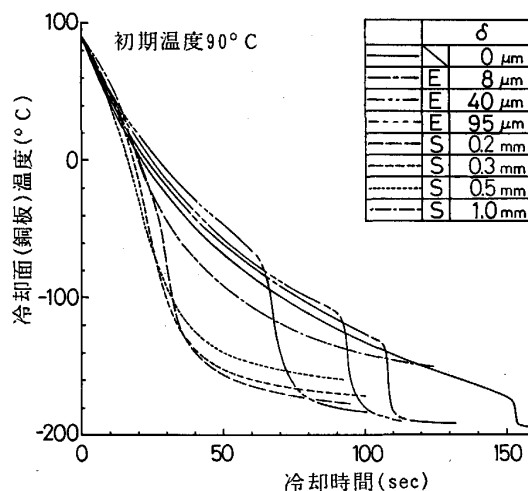


図2 冷却促進法の一例<sup>43)</sup>

厚さ 2 mm, 50 mm×50 mm の銅製平板の片表面以外を断熱し、これを液体窒素中で沸騰冷却した時の銅板冷却曲線に対する（銅板表面に設けた）テフロン層厚さ  $\delta$  の影響を示した図で、 $\delta = 0.2 \text{ mm}$  程度で冷却速度が最大となっている。

し、現在のところ水冷時の熱伝達不安定・不均一による温度偏差に起因する形状不良の問題が大きな障壁を形成している。水冷の不安定・不均一の原因の一つは、沸騰冷却が冷却面熱伝導性、表面粗さ及び濡れ性に敏感であることである。例えば、液体窒素の沸騰冷却では、冷却面材料の熱伝導性（熱伝導率や温度伝導率）の低下とともに、核沸騰域及び遷移沸騰域（図1）が高冷却面表面温度側へ顕著に移行<sup>45)</sup>することが報告されているが、これは沸騰冷却一般に現れる本質的傾向である（図2の冷却促進はこれを利用したものである）。現実のシステムでは、冷却面側因子は酸化・汚損等による鋼材表面性状の時間・空間的变化を介して沸騰冷却に影響を及ぼすので、安定・均一冷却の実現には、これらの定量的評価が必要である<sup>46)</sup>。

### 3.5 特殊環境での冷却技術

宇宙環境では低温熱源としての大気と対流駆動力としての重力が存在しないため、冷却工学上で特殊な問題が生じる。すなわち、前者の理由により付属機器消費エネルギー等の廃棄を放射冷却に頼らざるを得ず、また後者の理由により熱流体輸送及び熱伝達に対する重力の影響を解明する必要がある。こうした放熱システムでは、ヒートパイプの応用、微小重力場での熱伝達及び熱流体挙動の解明といった問題を解決する必要がある<sup>1)</sup>。

## 4. 冷却効果に関する問題と課題

### 4.1 冷却対象物のマクロ特性

冷却技術は、微粒化あるいは発生熱応力等を介して対象物の形状・強度等のマクロ特性を支配する。冷却過程における熱応力や変態応力は、翼冷却では翼高温強度の点からタービン入口温度を、ガラス強化過程では最終的強度を、また鋼板の冷却では上述のように板形状を、さらに双ロールによる急速凝固では操業条件や板形状・表面性状を決定するので、定常・非定常冷却を問わず冷却工学における重要問題である。一方、こうしたマクロ特性に関する冷却効果を積極的に利用することもできる。例えば、わが国のようにエネルギー資源に乏しい国では特に重要なエネルギー源の多用化の一環として考えられている、高温岩体の熱エネルギー利用もその一つである<sup>28)</sup>。これは、水噴流を高温岩体に衝突させ、発生熱応力により高温岩体中に破碎帯を形成し、地上水を循環させることにより高温岩体から熱抽出するアイデアである。また、粉末の成形固化技術の進展とともにない需要の高まつてきたアルミニウム合金を初めとした急速凝固合金粉末製造システムにおいても、微粒化に関連して冷却効果が利用されている<sup>26)27)</sup>。急速凝固粉末の製造法としては、噴霧法（Gas atomization, Ultrasonic GA, water atomization, 回転水噴霧等）、溶湯攪伴法、遠心力法（Rotating disk, Melt extraction 等）及びその他（Melt spin, Rotating electrode process, Plasma REP, Melt

spin）等がある。しかし、各システムには得られる冷却速度、粒形状、粒度分布あるいは製造コストの点で一長一短があり、省工程、高冷却速度であるとともに微粒化特性の優れた粉末製造システムの開発が必要である。ちなみに写真1は、融液滴を水中に落下させた際の蒸気爆発を利用して省工程・高冷却速度を目指す急速凝固粉末製造法で作成された粉末である<sup>47)</sup>。

### 4.2 冷却対象物の Microstructure との関係

さて、対象物の凍結や凝固を伴いながら冷却する場合には、冷却過程はその Microstructure と重要な関連を持つ。例えば凝固プロセスでは、 $10^{-6}$  (Large ingots)  $\sim 10^9$  K/s（電子・レーザービームによる表面処理）までの広い冷却速度が経験されるが、 $10^2 \sim 10^3$  K/s 程度以上の冷却速度では、微細 Dendrite の形成及び Cell や Dendrite 間の偏析低減を介してより微細組織で均一な

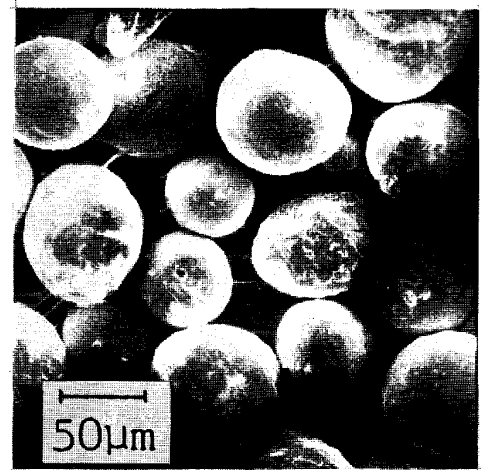


写真1 冷却技術により作られた急速凝固粉末例<sup>47)</sup>

2gの溶融すず滴を水中に落下させた際に発生する蒸気爆発を利用して作成された急速凝固粉末の顕微鏡写真で、すず初期温度は1000℃、水温は80℃である。

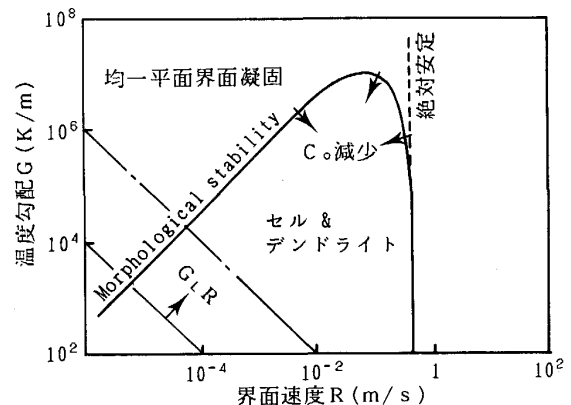


図3 冷却過程と Microstructure との関係

Al-Cu系合金における温度勾配、凝固界面速度及び凝固組織の関係を文献17)をもとに示した図で、 $G_L$ は液相側温度勾配、 $C_0$ はCuの初期濃度である。

材料を、あるいは固溶限拡大、準安定相や非晶質相の生成を介して新たな組成や組織の合金を得ることができ

る。<sup>17)~19)25)</sup>  
 こうした急冷を利用する急速凝固=急冷凝固では文字どおり高冷却速度システムを実現することが重要であるが、RSP (Rapid Solidification Processing) の観点からは、例えば図3に示したように、凝固界面安定性、分配係数、界面温度、凝固速度等の関係を熱・物質移動を含めて総合的に解明する必要がある<sup>17)18)48)</sup>。例えば、LEVI and MEHRABIAN<sup>49)50)</sup>は急速凝固時の微小融液滴内の熱移動を解析し、核生成に先行する過冷却→核生成後の Recalescence を伴う急速凝固→界面不安定・偏析の発生を伴う凝固過程といった凝固組織の時間発展を議論している。こうした凝固界面の不安定を伴う凝固組織形成の時間発展を具体的に追跡するには、(不安定波長等を推定するには有効である)線形安定性理論では無視される非線形項を考慮する必要が生じ、数値解析が必要となる<sup>51)</sup>。しかしこの場合、例えば凝固範囲 10 K の合金が 10 K/mm の温度勾配で 0.1 mm/s の速度で凝固するとすると、10 μm 程度のセルを含む少なくとも 1 mm の凝固帯を数値計算することになり、十分な計算精度を得るためには膨大な計算領域が必要となる<sup>52)</sup>。こうした凝固・凍結を伴う熱移動問題は、熱工学の分野では「移動境界問題」として扱われ、非線形問題や 3 次元物体に適用できる固定格子法、エンタルピー法、境界固定法、有限要素法、グロスリング法などの数値的手法の開発が行われており<sup>53)</sup>、こうした手法からの Microstructure 解析による最適なプロセス設計と合理的なプロセス制御が期待される。

以上のような Macro-及び Microstructure に対する冷却効果は、例えば最近話題の YBCO ( $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ) や BSCCO ( $\text{BiSrCaCu}_2\text{O}_x$ ) など高臨界温度を有する酸化物超電導物質の組織微細化、配向化及び粒界制御等の材料工学や、耐凍性等と関連した生体・生物学あるいは冷凍を利用した食品工学等の広い分野で極めて重要である。

## 5. おわりに

以上、冷却工学がかかわる技術領域、冷却方法と冷却効果に関する問題について簡単に述べたが、紙面の都合から、熱力学的冷却方法については全く触れることができず、また各冷却方法の特性・解析法、冷却促進法あるいは Microstructure 解析等については詳細に議論できなかった。しかし要するに従来、伝熱学、超電導工学、電子工学、原子炉工学、材料工学等で分散的に研究されてきた冷却技術・冷却過程は、冷却方法及び冷却効果に関するお互いの研究成果・解析手法等を融合することにより新たな発展へと向かう時期に至っていると考える。本稿がこうした冷却技術の進展の一助となれば幸いであ

る。

## 文 献

- 1) 塩冶震太郎, 森岡幹雄, 落合淳一, 桑原啓一: 日本機械学会誌, **88** (1985), p. 1078
- 2) M. KAJINO and M. HIRAMATSU: Heat Transfer in High Technology & Power Engineering, ed. by W. J. YANG and Y. MORI (1987), p. 420 [Hemisphere Pub. Co.]
- 3) 吉田嘉太郎, 三井公之: 日本機械学会誌, **88** (1985), p. 1071
- 4) 坂本守義: 電気学会雑誌, **99** (1979), p. 373
- 5) A. D. KRAUS and A. BAR-COHEN: Thermal Analysis & Control of Electronic Equipment (1983) [Hemisphere Pub. Co.]
- 6) R. C. CHU and R. E. SIMONS: 文献 2), p. 106
- 7) L. T. YEH: 文献 2), p. 131
- 8) K. OGISO: 文献 2), p. 160
- 9) C. SCHMIDT: Stability of Superconductors in Helium I and Helium II (1981), p. 17 [Intern. Inst. Refrigeration]
- 10) W. NICK: 文献 9), p. 139
- 11) 吉田豊明: 機械の研究, **31** (1979), p. 106
- 12) R. J. SIMONEAU: 文献 2), p. 285
- 13) 関口 忠: 日本機械学会誌, **90** (1987), p. 1401
- 14) 村尾良夫: JAERI-M 83-032 (1983)[日本原子力研究所]
- 15) G. YADIGAROGU: Nuclear Safety, **19** (1978), p. 20
- 16) K. E. THELNING: Steel and its Heat Treatment (1975) [Butterworths]
- 17) R. MEHRABIAN: Intern. Met. Rev., **27** (1982), p. 185
- 18) W. J. BOETTINGER, S. R. CORIELL and R. F. SEKERKA: Mater. Sci. Eng., **65** (1984), p. 27
- 19) 新宮秀夫, 尾崎良平: 日本金属学会会報, **15** (1976), p. 171
- 20) R. GARDON: Glass Sci. Technol., ed. by D. R. UHLMANN and N. J. KREIDL, **5** (1980), p. 145 [Academic Press]
- 21) A. AMBRAZEVICIUS, A. ZUKAUSKAS and P. VALATKEVICIUS: High Temperature Heat Exchangers, ed. by Y. MORI, A. E. SHEINDLIN and N. H. AFGAN (1986), p. 165
- 22) 冷凍 (日本冷凍協会編), **57** (1982), p. 535
- 23) 冷凍 (日本冷凍協会編), **58** (1983), p. 1125
- 24) 尾上泰光, 梅野正紀, 萬谷興亜, 十河泰雄, 酒井和夫, 岩永 健, 森川博文: 製鉄研究 (1982)309, p. 14411
- 25) 新宮秀夫, 石原慶一: 鉄と鋼, **69** (1983), p. 1087
- 26) 岩尾 修: 軽金属, **37** (1987), p. 646
- 27) 新宮秀夫: 日本金属学会シンポジウム (1987)
- 28) 幾世橋広, 京 宗輔, 石浜 渉: 日本鋳業会誌, **94** (1978), p. 515
- 29) 甲藤好郎, 佐藤 俊, 西川兼康, 水科篤郎, 森 康夫編著: 伝熱学特論 (1984)[養賢堂]
- 30) 伝熱工学資料 (改訂第4版) (日本機械学会編) (1986) [日本機械学会]
- 31) 熱と流れのコンピュータアナリシス (日本機械学会編) (1986) [コロナ社]
- 32) 沸騰熱伝達と冷却 (日本機械学会編) (1989 出版予定) [日本工業出版]
- 33) G. HETSRONI: Handbook of Multiphase Systems (1982) [Hemisphere Pub. Co.]
- 34) M. FUJII and T. OGUSHI: 文献 2), p. 63
- 35) 文献 5), p. 199
- 36) 大中逸雄: 日本機械学会誌, **88** (1985), p. 1060
- 37) K. MIYAZAWA and J. SZEKELY: Metall. Trans. A, **12** (1981), p. 1047
- 38) R. W. SCHRAGE: A Theoretical Study of Interphase Mass Transfer (1953), p. 25 [Columbia Univ. Press]
- 39) 勝又一郎, 平田 賢: 日本機械学会論文集, **43** (1977),

- p. 4257
- 40) A. E. BERGLES: Proc. 6 th Intern. Heat Transfer Conf., 6(1978), p. 89 [Hemisphere Pub. Co.]
- 41) A. E. BERGLES: 文献 2), p. 333
- 42) M. M. ALI KHAN, N. KASAGI, M. HIRATA and N. NISHIWAKI: Proc. 7 th Intern. Heat Transfer Conf., 3 (1982), p. 363
- 43) S. NISHIO: Proc. 1983 ASME-JSME Thermal Eng. Joint Conf., 1 (1983), p. 103
- 44) 文献 31), p. 103
- 45) M. E. IRVING and J. W. WESTWATER: Proc. 8 th Intern. Heat Transfer Conf., 4 (1986), p. 2061 [Hemisphere Pub. Co.]
- 46) 大久保英敏, 西尾茂文: 日本伝熱シンポジウム講演論文集, 22 (1985), p. 67, 24 (1987), p. 422, 25 (1988), p. 265
- 47) 秋吉 亮, 西尾茂文, 棚沢一郎: 日本伝熱シンポジウム講演論文集, 25 (1988), p. 322
- 48) M. C. FLEMINGS and Y. SHIOHARA: Mater. Sci. Eng., 65 (1984), p. 157
- 49) C. G. LEVI and R. MEHRABIAN: Metall. Trans. A, 13(1982), p. 13
- 50) C. G. LEVI and R. MEHRABIAN: Metall. Trans. A, 13 (1982), p. 221
- 51) S. R. CORIELL, G. B. MCFADDEN and R. F. SEKERKA: Ann. Rev. Mater. Sci., 15 (1985), p. 119
- 52) J. A. DANTZIG, L. S. CHAO and I. LEKAKIS: Proc. 1987 ASME-JSME Thermal Eng. Joint Conf., Hawaii, 3 (1987), p. 251
- 53) 斎藤武雄: 日本機械学会誌, 90 (1987), p. 577