

高性能伝熱面「サーモエクセル」

High-Flux Heat Transfer Surface "THERMOEXCEL"

高性能伝熱面「サーモエクセル」は表面に独特な微細構造をもち、液体の沸騰、あるいは蒸気の凝縮を表面上で活発に促進する。このため、小さな温度差の下でも大量の熱を伝えることができ、「サーモエクセル」加工を熱交換器の伝熱管に施せば熱交換性能は大きく向上させられる。

「サーモエクセル」は、製作の簡単さと性能の良さから各方面での応用が期待されている。特に比較的低温度の熱源と接する多管式熱交換器に用いれば、省エネルギー技術の開発に役立てることができる。更に、「サーモエクセル」加工は平面、あるいは管内にも施せるため、電気機械、電子機器の放熱に有効な高性能冷却器を作ることもできる。

中山 恒*	Wataru Nakayama
大黒崇弘**	Takahiro Daikoku
桑原平吉**	Heikichi Kuwahara
柿崎公男***	Kimio Kakizaki

1 緒 言

熱エネルギーは日常生活に欠くことのできないものであり、すべての工業生産を支える源である。このため、熱を伝える装置はあらゆる場面に見いだすことができる。発電所をはじめ各種のプラントに用いられる大きな熱交換器、身近な暖冷房装置の熱交換器から湯沸かしに至るまで、列挙すれば限りがない。更に電動機とか変圧器に取り付けられた冷却フィン、あるいは集積回路を用いた計算機から熱を取り去る冷却フィンは、しばしば目に触れるものである。これらの様々な伝熱装置を設計する際に、基本となる関係式は次のとおり簡単なものである。

$$Q = SK \Delta T \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 Q は交換熱量(kcal/h)、 S は伝熱面の面積(m^2)、 K は伝熱面の性能を表わす熱通過率(kcal/ $m^2h^\circ C$)、 ΔT は熱交換を行なう物体、あるいは流体の間の温度差($^\circ C$)である。

(1)式は、伝熱装置の性能を高めるために何をしたらよいかをすべて物語っている。すなわち、交換熱量 Q を大きくするためには、

- (1) フィンを多数設けて伝熱面積 S を大きくする。
- (2) 伝熱面の性能を向上させて K を大きくする。

これら二つの方途に沿って従来から数限りないアイデアが提案され、様々な形態の熱交換器と冷却装置が作られてきた。今日、特に強調されるべきことは、伝熱面の性能を向上させる方向である。ここに紹介する「サーモエクセル」と名付けた伝熱面は、飛躍的に高い伝熱性能をもっている。これによって後述するように、各方面に用いられている熱交換装置を小形、且つ高性能にすることができる。更に「サーモエクセル」を使って熱サイクルの効率を高めることにより、省エネルギーの効率を得ることができる。

2 沸騰と凝縮の熱伝達

熱の伝わり方を分類すれば、周知のように輻射、伝導、対流及び沸騰と凝縮がある。これらのうち流体の相変化を伴う沸騰と凝縮は最も複雑な現象であり、この場合の熱伝達現象についてはまだよく分からない部分が多い。それだけに熱伝達を促進するための着想が、豊富に出る可能性を秘めている。「サーモエクセル」は伝熱面の表面に特殊な微細構造をもつも

ので、このために沸騰と凝縮の現象を活発に促進する。

ここで「サーモエクセル」の説明に入る前に、沸騰と凝縮の現象について次のことを述べておきたい。沸騰の熱伝達では、蒸気の泡ができるだけ数多く伝熱面から発生し、周囲の液を激しく攪拌することが望ましい。観察によれば、蒸気泡が発生する場所は別に決まっているわけではなく気まぐれであるが、伝熱面上についた微細なかき傷などから発生する確率が高い。従って、大きな熱伝達率を得るためにまず考えられる方法は、表面を粗くすることである。一方、細かい金網を巻きつけたり多孔質の層を作ることによって熱伝達率が增大することが知られてきた。これは、蒸気泡の発生を極めて容易にするもので、この現象を積極的に利用しようとする試みが行われた。例えば、**図1**に示すように多孔質な焼結金属の層によって伝熱管を覆うと、表面を単に粗くした管よりも熱伝達率は更に大きくなる⁽¹⁾。

凝縮の現象も、沸騰現象と同様に日常頻繁に接している現象である。一般に凝縮の熱伝達では、**図2**に示すように既に凝縮した液の層を通して蒸気分子のエネルギーを奪わねばならない。蒸気分子はほぼ飽和温度で凝縮するから、液層が厚くなるほど伝熱面の温度を低く保たねばならないことになる。これでは結局、ある熱量が伝えられるのに大きな温度差を必要とすることになり、換言すれば熱伝達率が小さくなってし

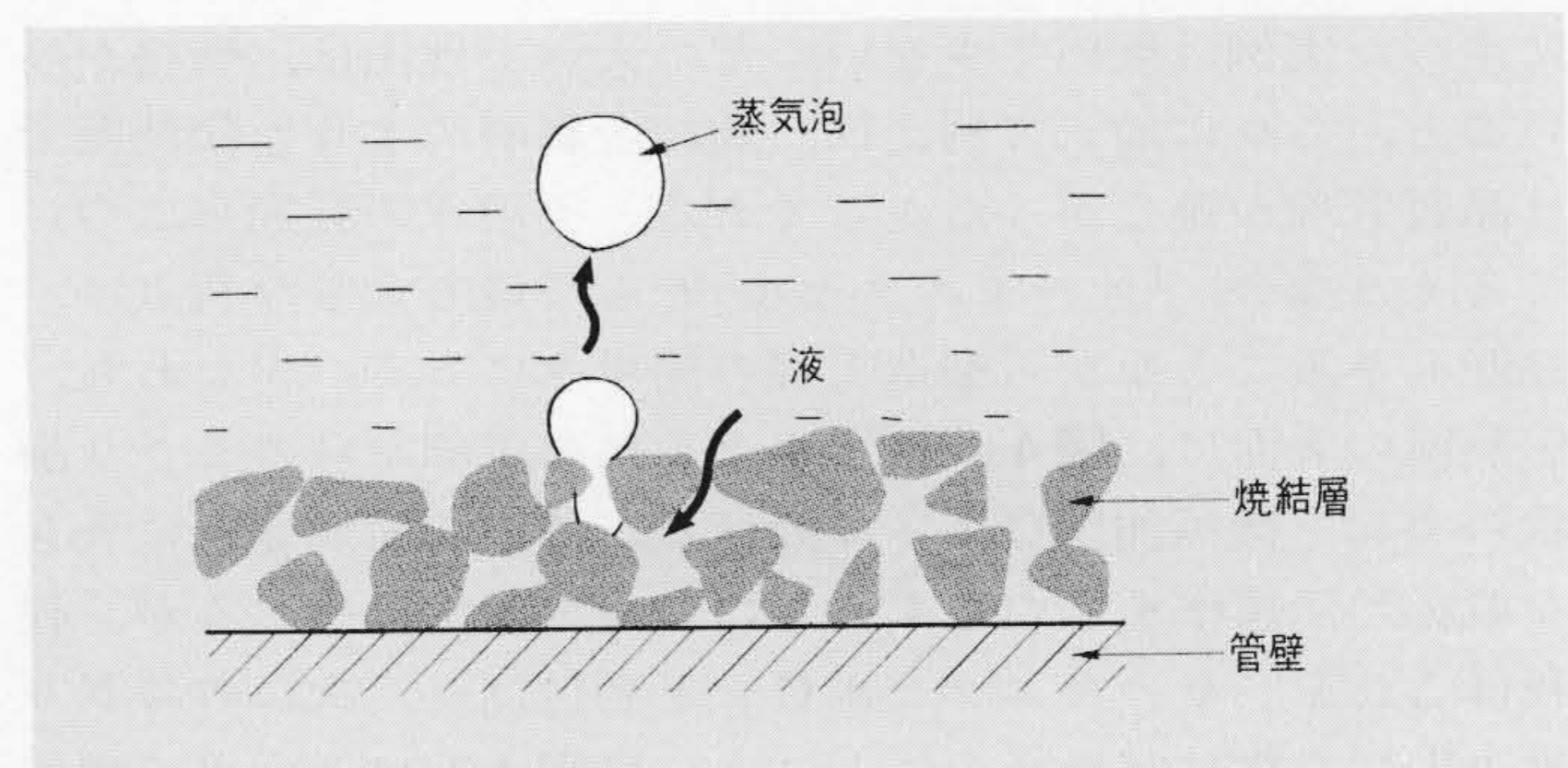


図1 焼結金属層 多孔質焼結金属層が蒸気泡の発生核として作用し、沸騰熱伝達を大きくする。

* 日立製作所機械研究所 工学博士 ** 日立製作所機械研究所 *** 日立電線株式会社研究所

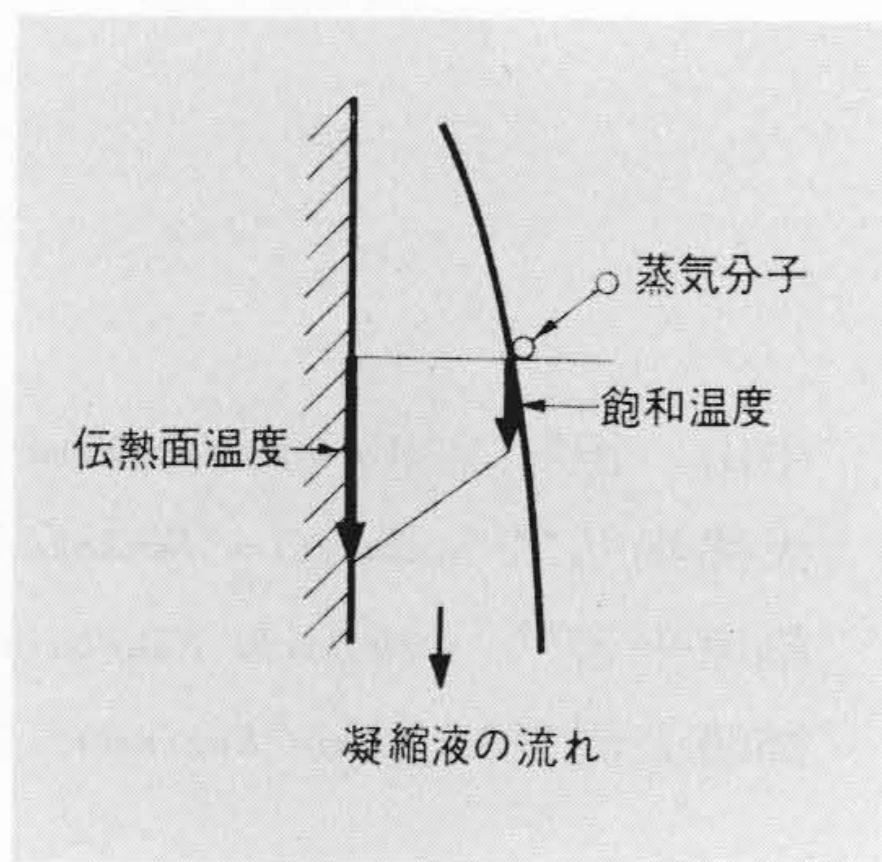


図2 凝縮現象 凝縮液層が厚くなると、熱を伝えるのに大きな温度差が必要となる。

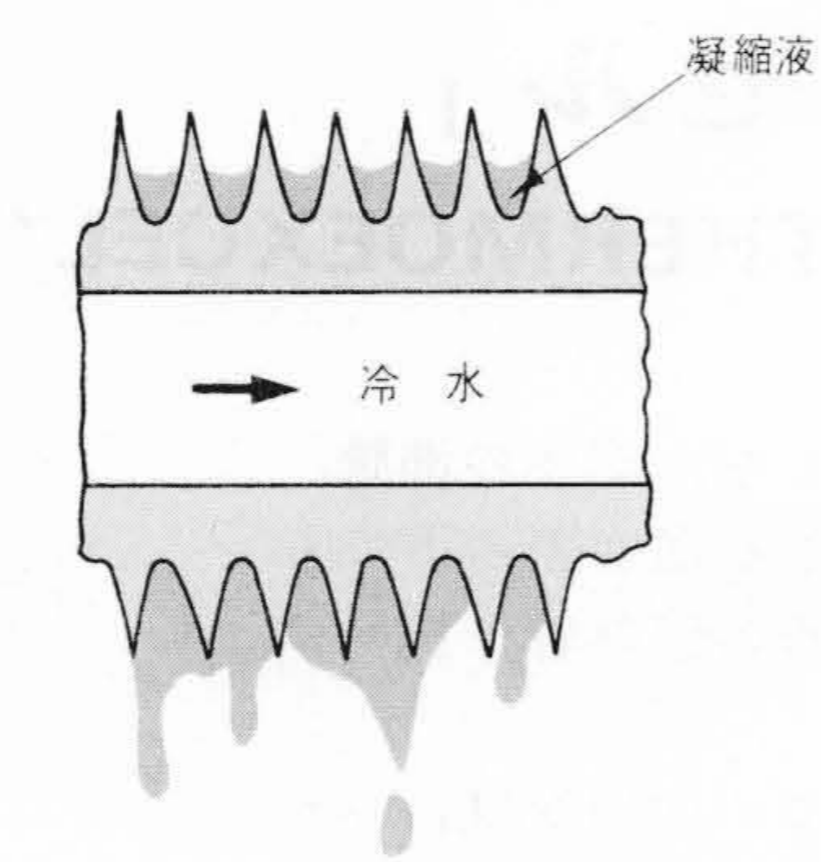


図3 ローフィン管 伝熱面積増大の効果とフィン先端近くの液膜が薄くなる効果により、凝縮熱伝達率が大きくなる。

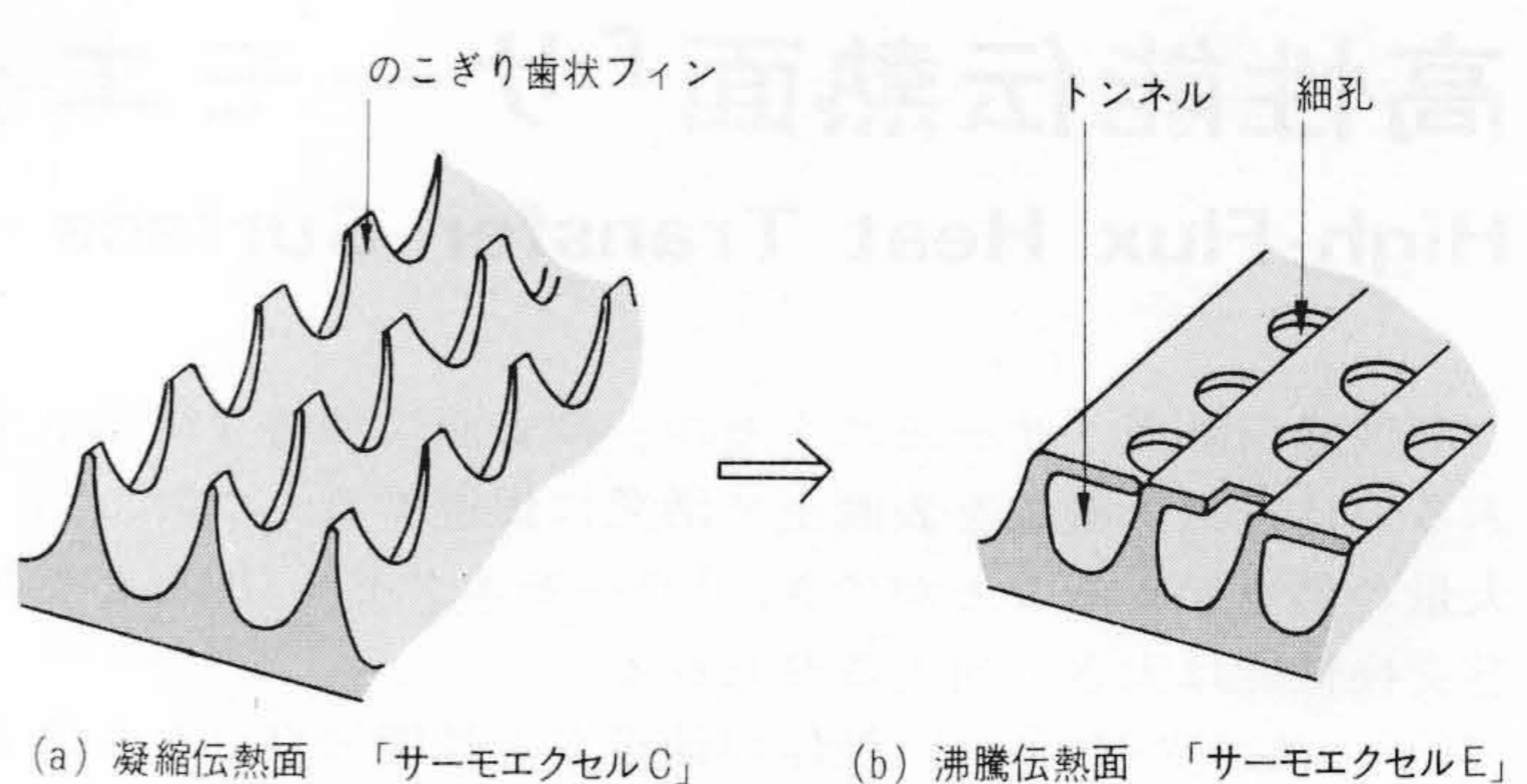


図4 「サーモエクセル」の製法 凝縮伝熱面はのこぎり歯状フィンを多数配列したもので、沸騰伝熱面は凝縮伝熱面ののこぎり歯状フィンを横に倒し、トンネル上に多数の細孔を設けた構造である。

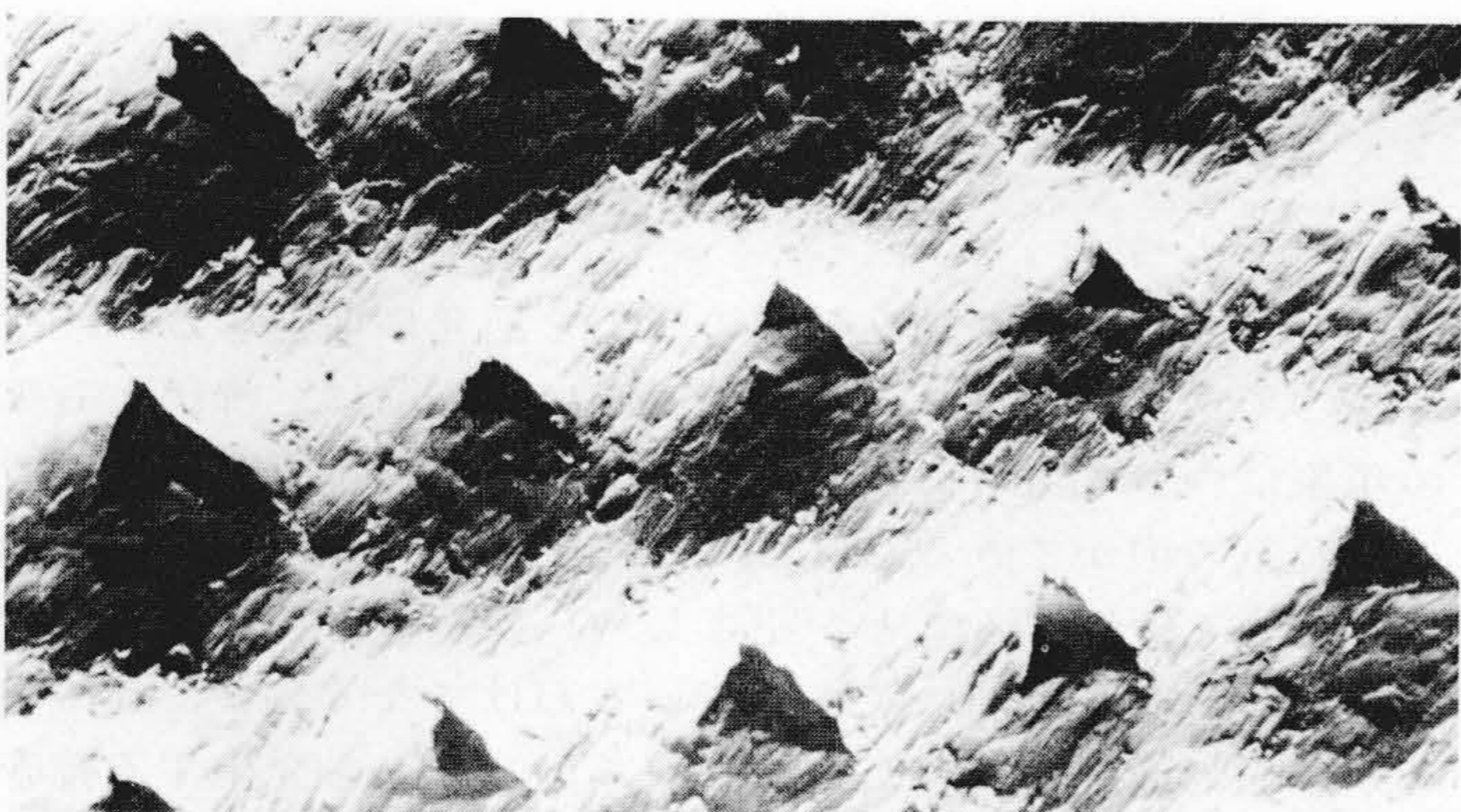


図5 「サーモエクセルE」の表面拡大写真 「サーモエクセルE」の顕微鏡写真で、伝熱面のトンネル内部及び細孔状態を示す。



まう。従来から凝縮伝熱管に用いられてきた方法は、図3に示すように背の低いフィンを多数設けることであった。こうすると、伝熱面積が大きくなるだけでなく、フィンの先端近くで液膜の薄い領域ができ、熱伝達率が大きくなるからである。また滴状凝縮では、膜状凝縮に比べ2～20倍の熱量を伝えることができる。これも液滴周辺部の液層が極端に薄いことから説明されているが、滴状凝縮を工業的に利用しようとする試みは、現在までのところほとんど成功していない。

3 「サーモエクセル」の構造と性能

沸騰あるいは凝縮の伝熱促進法については、従来から多くのアイデアが提案されてきた。しかし、工業上広く実用化に至った実例は極めて少ない。その大きな理由は、価格が高いこと、これに加えて例えば、焼結金属層のような伝熱面では品質管理が難しかったからである。実用化の見通しについて考えた場合、「サーモエクセル」がもつ最も大きな利点は、性能もさることながら製造工程の簡単さにある。すなわち、伝熱面の表面に、図4(a)に示すようにまず細かいのこぎり歯状の突起を機械加工によって設ける。この表面が非常に大きな凝縮熱伝達率をもたらすことについては次に述べるが、我々はこれを「サーモエクセルC」と名付けた。次にのこぎり歯の先端を横に寝かせることによって図4(b)に示す表面構造を作ることができる。すなわち、表皮の下をトンネルが走り、このトンネルの上部に定期的に細孔が開けられた状態になる。このような構造は沸騰熱伝達に有効であり、これを「サーモエクセルE」と呼ぶことにした。

わずか1工程の違いによって、沸騰と凝縮のどちらかに有

効な伝熱面を作れるため、加工設備は1種類で済み、製造原価が安くなる。また機械加工であるため、品質管理は行ないやすい。このような理由から「サーモエクセル」は実用化のための条件を十分に備えていると言える。

3.1 「サーモエクセルE」の性能

「サーモエクセルE」の断面と表面の顕微鏡写真を図5に示す。トンネルのピッチはそれぞれの用途によって異なるが、0.1～0.8mm程度が有効である。伝熱面の温度を液の飽和温度以上に高めると、トンネル内の液は過熱されて蒸気泡が発生しやすくなる。いったん気泡が発生すると、図6(a)に示すようにトンネル内部には蒸気が常に保持され、これを核として気泡の成長離脱が活発に繰り返されるようになる。図6には過熱された液の領域を示してあるが、「サーモエクセル」ではトンネル内部に過熱液が存在し、これが蒸発して多量の蒸気を供給している。これに比べ通常の平滑面では同図(b)に示すように、伝熱面上の過熱液の層が薄いため、この過熱液が蒸発して気泡が成長するまでには長時間を要する。あるいは、「サーモエクセル」と同じ頻度で泡を発生するためには、伝熱面の温度を高く保ち、過熱液層の温度を上げねばならない。

実際に伝熱面上の熱流束と過熱度(伝熱面の壁温—飽和液の温度)を測定してみると、図7に示すようになる。このデータは、銅管の内部に電気ヒータを埋め込んでこれを加熱し、管の外側で冷媒R-11を沸騰させて得られたものである。銅管は表面が平滑なままのもの、焼結金属層で覆ったもの、及び「サーモエクセル」の加工を施したものの計3種についてそれぞれ比較してみた。これによると「サーモエクセル」は、小さい過熱度の下でも気泡を数多く頻繁に発生するため、大きな

熱流束が得られ、上記の推察を裏付けている。平滑面と比べると同じ熱流束を伝えるのに約 $\frac{1}{5}$ の過熱度しか必要とせず、また同じ過熱度を与えると約10倍大きな熱流束を伝えることができる。但し、熱流束を算出する際の伝熱面積は加工前の素管の表面積をとっている。実質的な伝熱面積は平滑面に比べ3~4倍増しているが、上記の性能増加は面積の増大だけでは説明できない。

性能を帯で示してあるのは、表面構造の寸法を違えると異なる曲線が得られるからである。焼結金属層の場合も同様に、金属粒子の径とか焼結状態によって性能が異なるが、図8中には代表的な性能を示した。焼結金属層では性能のばらつきを少なくすることが難しい。これは製法を考えてみれば容易にうなずけるが、「サーモエクセル」は機械加工によって作られるため、性能の管理が比較的容易である。

3.2 「サーモエクセルC」の性能

図8には「サーモエクセルC」の断面と表面の顕微鏡写真が示してある。先が鋭くしかもごぎり歯状のフィンが直立しており、微細フィンの上では凝縮液の液膜が常に薄く保たれ、滴状凝縮に近い状況が作られている。一方、凝縮した液はフィンとフィンの中の溝の中を流れるため、凝縮量が多い場合でも高い熱伝達率を維持することができる。

フィンのピッチは0.4~0.8mm程度が有効である。

「サーモエクセルC」の性能を調べるため、次の実験を行なってみた。すなわち、銅板の上に「サーモエクセルC」の加工を施し、これを冷媒R-113の蒸気中で垂直に立て、銅板の裏面から水で冷却して凝縮を行なわせた。データを整理する

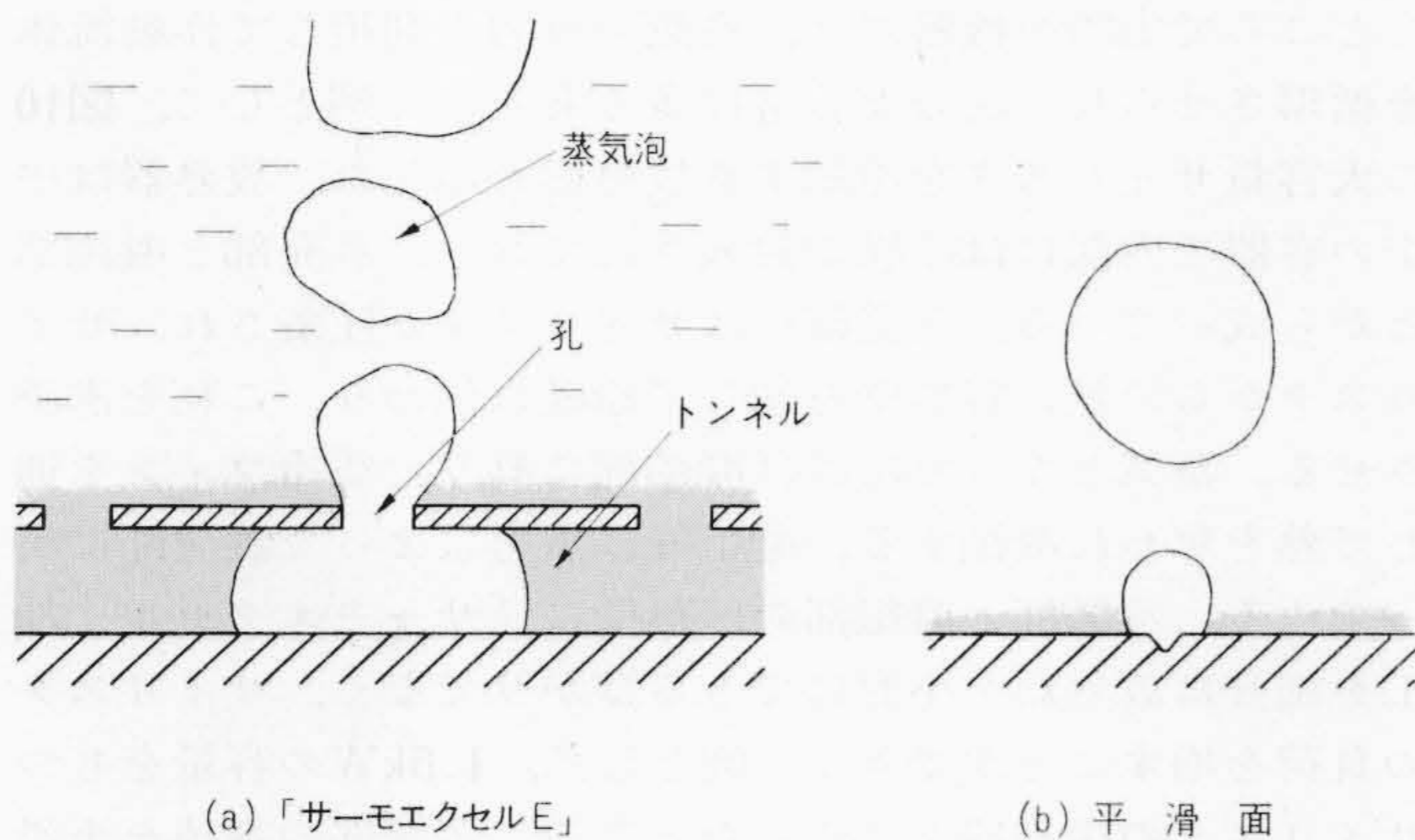


図6 沸騰モデル 沸騰熱伝達のメカニズムの説明である。

際、伝熱面積にはここでも平滑面の面積を用いている。図9に結果を示してあるが、縦軸に熱伝達率、横軸に蒸気温度と伝熱面の表面温度との差をとっている。同図には更に比較のため、平滑面の実験結果と、通常よく用いられているローフィン面(1in当たり19山)の性能も示してある。実質的な伝熱面積の増加は、平滑面に対しローフィン面で2.9倍、「サーモエクセルC」で3.5倍であるから、明らかに面積の増大以上の性能が得られていることが分かる。

4 「サーモエクセル」の用途

熱源から沸騰によって熱を吸収し、蒸気を放熱源に導いて凝縮させるという熱輸送の方法は、従来から非常に多くのものに用いられている。

一般に熱交換装置は、製法、価格、使用状況から加えられる制約をそれぞれにもっているから、「サーモエクセル」の適用を図るにはそれなりのくふうが必要なことはもちろんである。しかし「サーモエクセル」の加工は、平面上、円管の外表面、あるいは適当な大きさの径の管であれば内面にも施すことができ、また母材の材質は銅、アルミニウム、鋼などのい

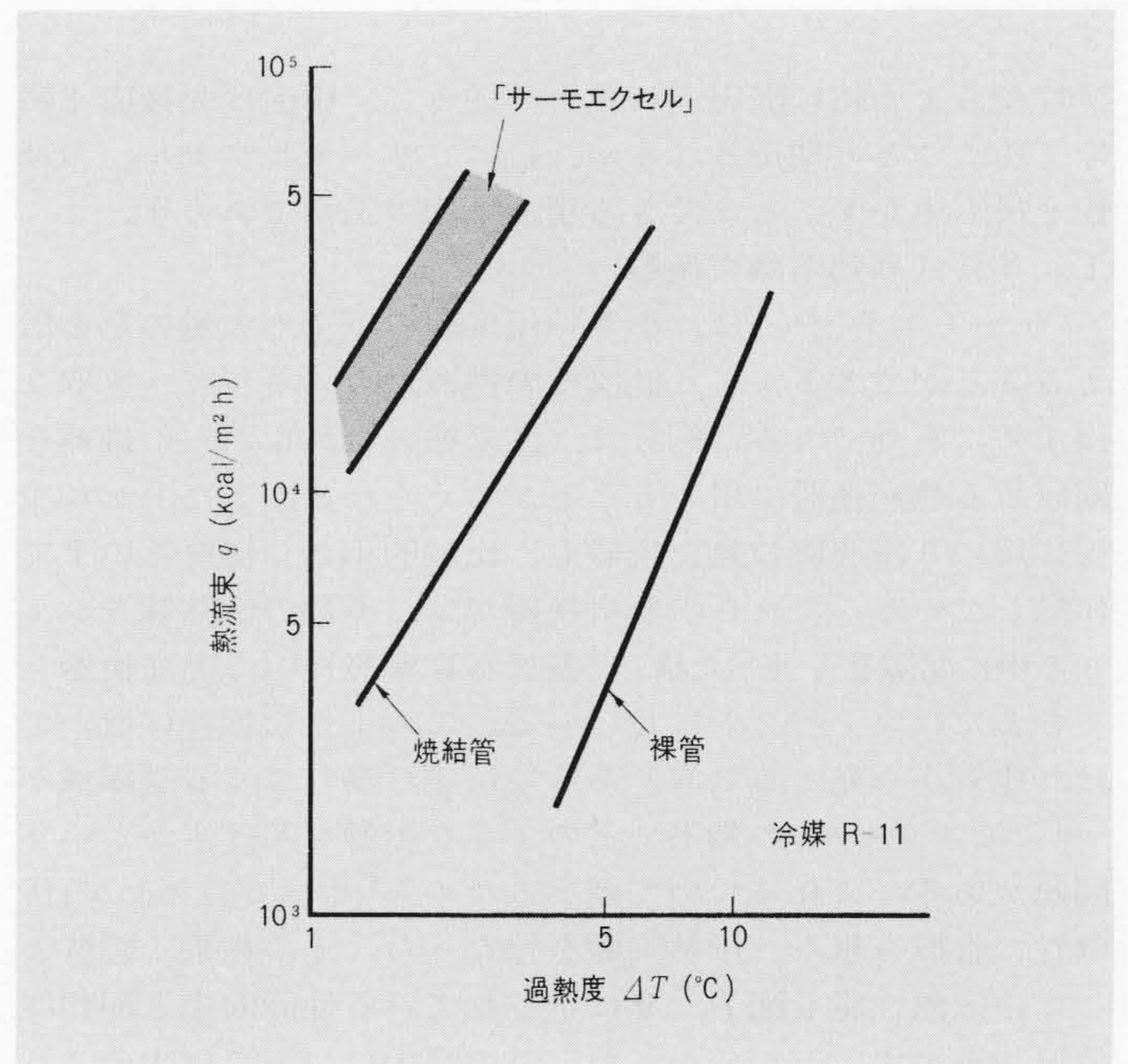
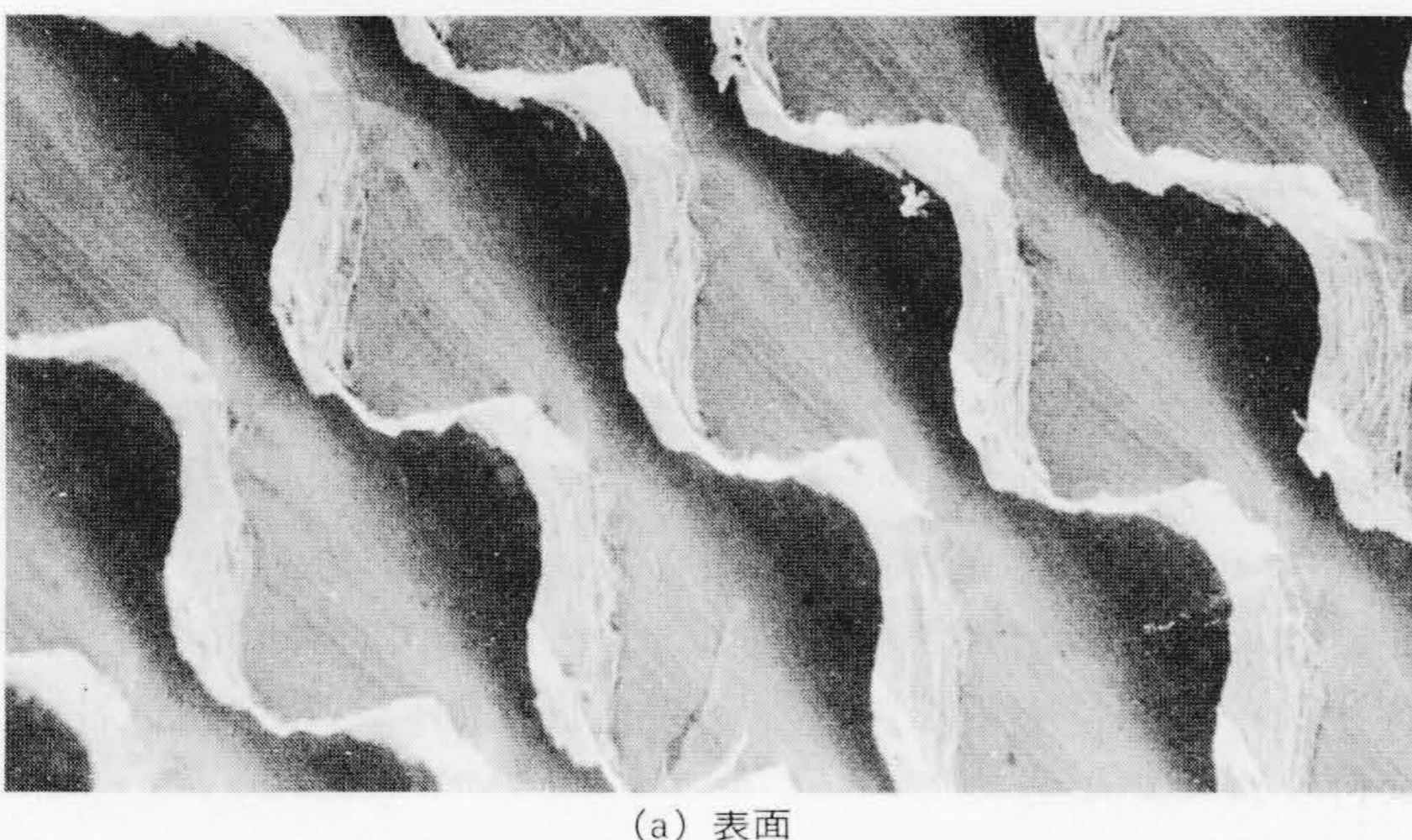


図7 沸騰伝熱面「サーモエクセルE」の性能 「サーモエクセルE」は裸管と比べ同じ熱流束を伝えるのに約 $\frac{1}{5}$ の過熱度ですむ。



(a) 表面



(b) 断面(×50)

図8 「サーモエクセルC」の表面拡大写真 「サーモエクセルC」の顕微鏡写真で、のごぎり歯状の多数のフィンが直立している。

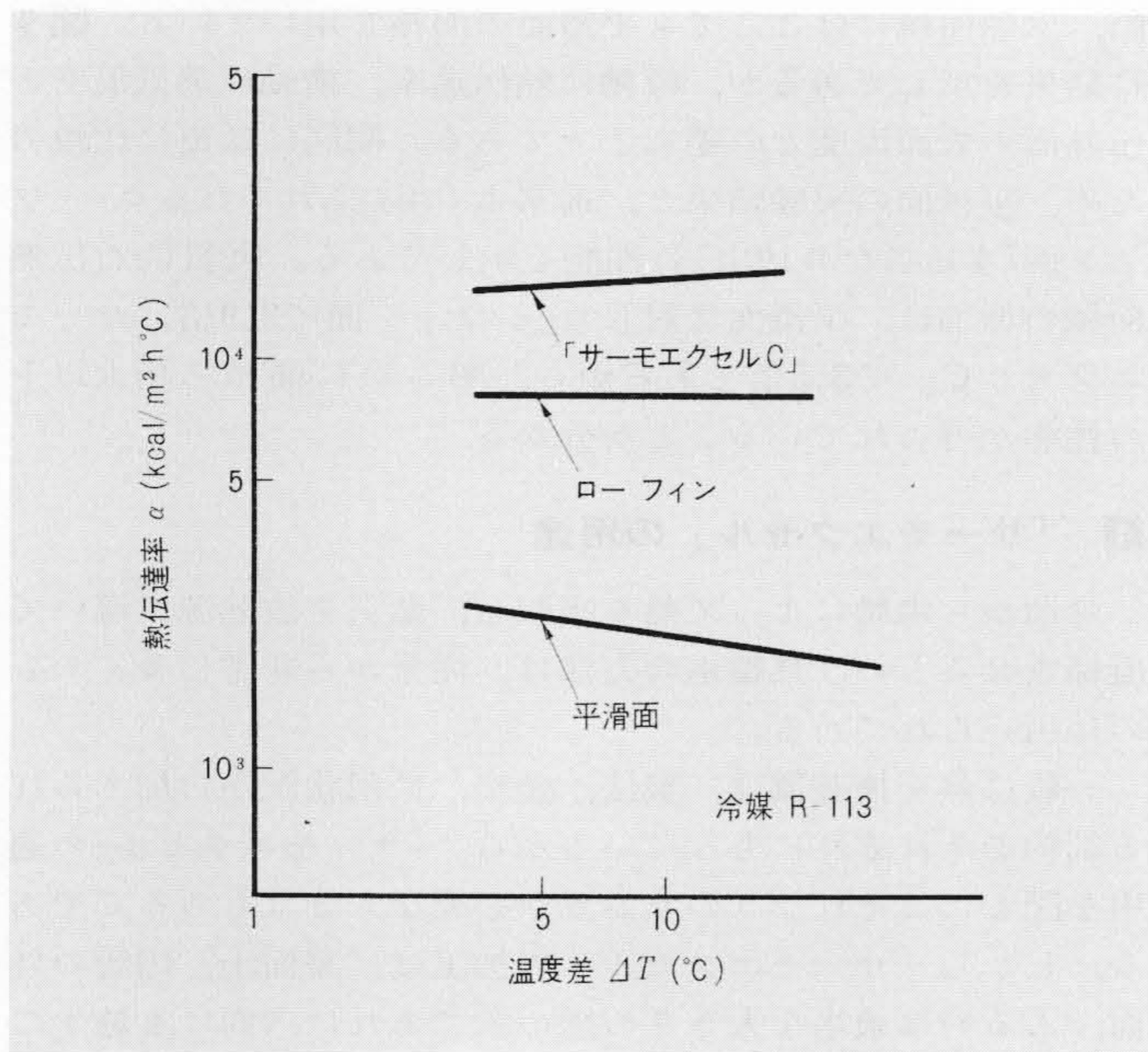


図9 凝縮伝熱面「サーモエクセルC」の性能 「サーモエクセルC」は、平滑面と比べ熱伝達率が約7倍優れている。

ずれでもよく特に限定されない。従って、用途は今後広く開けてゆくことと期待されるが、特に「サーモエクセル」の特長を最も生かすことができる用途は次の二つであろう。

(1) 多管式高効率熱交換器

「サーモエクセル」は、小さい温度差の下でも大量の熱を伝えることができるから、低温度の熱源からエネルギーを取り出すのに有効である。例えば、従来顧みられなかった排熱を回収する熱交換器に用いることが考えられる。また、ビル冷房に用いる冷凍機の熱交換器も、比較的小さい温度差の下で作動している。これらの熱交換器では、多数の伝熱管をシェルの中に間隔狭く並べた構造(表紙写真参照)にし、熱交換器をできるだけコンパクトにしている。このような管群においては、他管から発する気泡、あるいは流れ落ちてくる凝縮液が「サーモエクセル」の効果にどのような影響を及ぼすかという問題がある。これについて調べるため、「サーモエクセル」伝熱管で管群を組み、伝熱実験を行なった。その結果、管群としての伝熱性能も図7、9に示されている性能向上と同程度の増加を示すことが分かった。この理由については次のように考えることができる。沸騰の場合、「サーモエクセル」からは微小な気泡が密度濃く活発に噴出するため、周囲の影響を受けにくい。また凝縮の場合も、上部の管から落下してくる液が微細フィンを覆ってしまうことがなく、極めて鋭いフィンの効果が常に保たれる。

上記のように「サーモエクセル」は多管式熱交換器の性能を向上させる。300冷凍トン級の冷凍機の蒸発器、凝縮器について試算したところ、ローフィン管を用いた場合に比べ容積で約30%縮小することが可能となる。

(2) 高性能熱サイフォン冷却器

発電機、変圧器などの電気機械、あるいは半導体を用いた電子機器では、できるだけ容積を制限し、且つ大きな能力を要求するため熱放散密度が増大の一途をたどっている。これらの機器の寿命を保証するためには、発熱源から熱を速やかに取り出す効果的な冷却方法を用いる必要がある。このため、ヒートパイプが最近盛んに検討されるようになってきた。ヒートパイプはウィック材の毛細管力を駆動力として、作動流

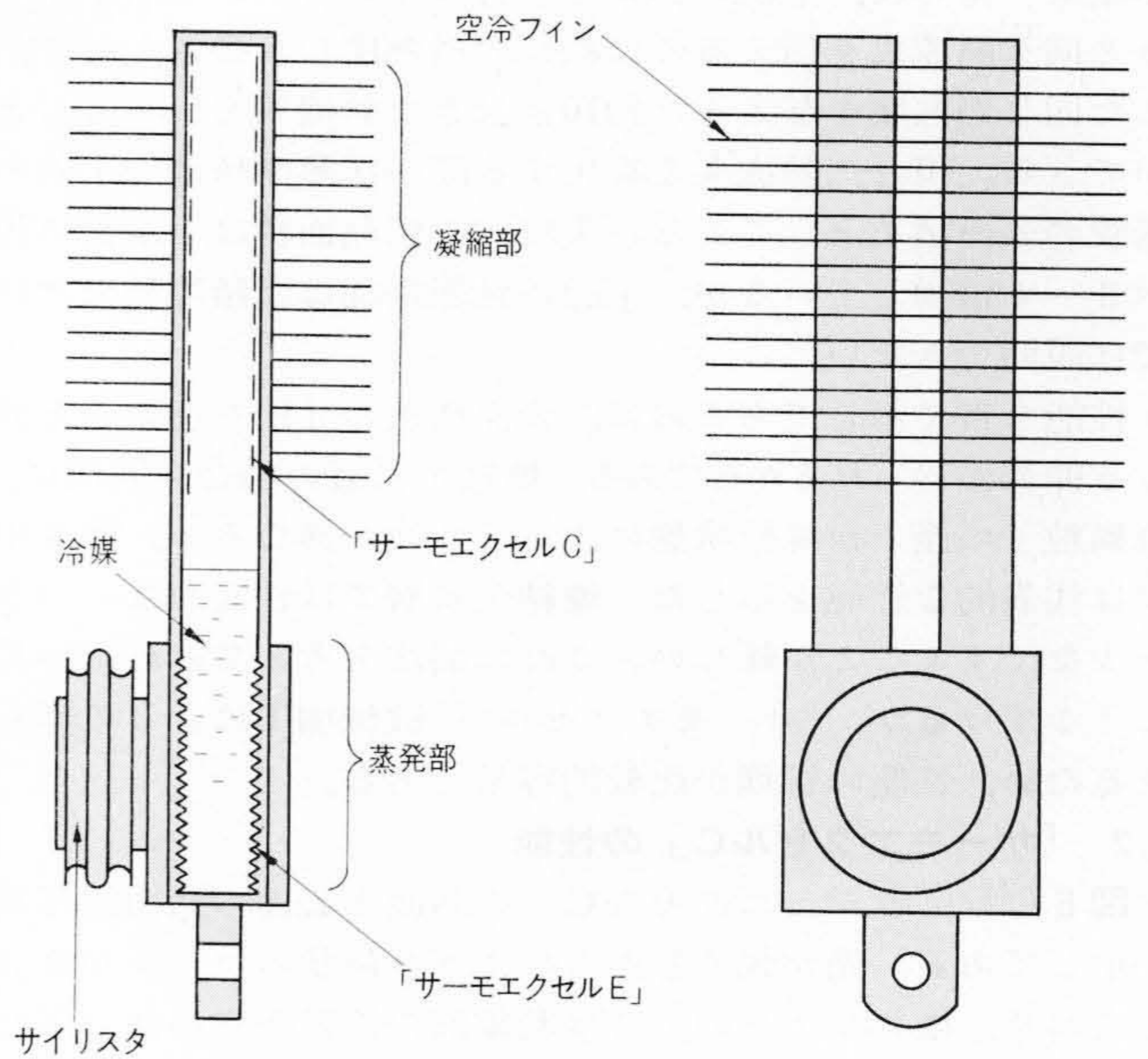


図10 サイリスタ冷却器 重力利用の熱サイフォン式のヒートパイプの内壁に「サーモエクセル」加工を施し、サイリスタ冷却器に応用した例を示す。

体の循環を行なっている。このため、例えば放熱部を発熱源の下に設け凝縮液を重力に逆らって蒸発部に戻すことができる。すなわち、非常に狭い場所から任意の方向に熱を取り出し得る点が、ヒートパイプのもつ最大の利点である。しかし、ウィック材を用いるため性能が良いものは価格が高い。これが広範な普及を妨げている難点である。

ところで実際の機器では、自然の重力を利用して作動流体を循環させられる場合が非常に多くある。一例として、図10に大容量サイリスタを冷却する放熱器を示した。放熱器は中空の容器で内部には冷媒が封入されており、蒸発部と凝縮部とから成っている。蒸発部にはサイリスタが圧着され、サイリスタからの熱は容器壁を通じて冷媒に伝わり、これを沸騰させる。蒸気となった冷媒は凝縮部に昇り、空冷フィンを通じて熱を奪われ凝縮する。凝縮液は重力によって蒸発部に戻ってくる。蒸発部と凝縮部の伝熱壁に「サーモエクセル」加工を施せば放熱器を小形にできるばかりでなく、サイリスタの負荷を増すことができる。例として、1.5kWの容量をもつサイリスタの冷却器を試作したところ、蒸発部の容積を平滑面の場合と比べ約1/4に小形化できることが分かった。凝縮部では空冷フィンがあるため容積はあまり小さくできないが、「サーモエクセルC」の採用によって熱抵抗を減じ、ひいてはサイリスタの温度低減に役立てることができる。

5 結 言

高性能伝熱面「サーモエクセル」の広い普及を図るためには、次のような課題に答えなければならない。すなわち、伝熱面の汚れ、腐食などによって性能がどのような影響を受けるかという問題である。これについて検討を進めた結果、焼結管ほど汚れに対し弱くないこと、また表面の酸化によって性能はほとんど影響されないことを確かめている。我々は更に今後各方面に応用を図りながら、長期間にわたる耐久性の資料を得たいと考えている。

参考文献

(1) P.S.O' Neill, C.F.Gottzman and J.W.Terbot, Adv. Cryo. Eng. Vol. 17, p. 420 (1972)