

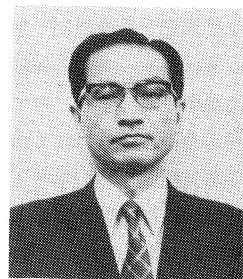
■ 論 説 ■

第5回国際ヒートパイプ会議について

5th International Heat Pipe Conference

大 島 耕 一*

Koichi Oshima



1. 宇宙用動力源

われわれ地球上に住む生物は、太陽からの熱放射を受け、或るいは過去に受けた太陽エネルギーの蓄積変形である化石燃料を用いて、或いは核反応によって発生したエネルギーによって高熱源を得て、これを地球環境中へ放出することにより熱力学サイクルを形成して生存を続けて来たのであるが、最近のように人間によるエネルギー消費が激しくなると、地球環境の温度を上昇させる、つまり熱力学サイクルの低熱源温度を上昇させることになり、すべての機械エネルギー効率を低下させていることが注意をひくようになって来た。つまり地球自体から宇宙空間への熱放射による熱放出が十分でなくなると地球自身の温度上昇を招き、地上の熱機関の効率の低下をきたすのである。

人工衛星(宇宙機)は、地球と同じ意味で宇宙空間に孤立したシステムであるので、エネルギー源として、太陽の光エネルギーを利用する太陽電池や、搭載している推進剤の化学エネルギー、燃料電池による発電、その他同位元素の分裂による核反応熱を利用するシステム等各種の方法があるが、熱力学サイクルを構成する低熱源としては、最終的には絶対零度に近い宇宙空間への放射熱放出によるほかはない。固体平板から宇宙空間へ放射により放出する熱量は、周囲に視界を妨げる他物体がないとすると、 $\epsilon\sigma T^4 A$ で表わされる。ここで、 ϵ は表面の放射放出率、 σ は Stefan-Boltzmann の定数で $5.67 \times 10^{-12} \text{ w/cm}^2 \text{ K}^4$ であり、 T は固体の絶対温度、 A はその表面積である。 ϵ は 0 と 1 の間の値をとる物性定数で、黒色塗装面で 0.9 位、白色塗装面で 0.8 位、磨いた金属面では 0.1 程度の値をとる。例えば ϵ が 0.9 の黒色塗装面であるとすると、それぞれ 200K, 250K, 300K, 350K, の放熱面 1 m^2 当たり 81, 199, 413, 765w の放熱量となる。つまり

定格発熱量 100W の TWT を冷却するにはその放熱面温度を、200K, 300K, 400K とすると、それぞれについて 1.23, 0.24, 0.076 m^2 の放熱面積を必要とする。このように大きい放射放熱系をどのようにして作るか? がわれわれ宇宙機設計者に与えられた課題であり、そのためにヒートパイプが生まれたのである。丁度 20 年前のことであった。

2. 宇宙用ヒートパイプの開発

1960年代は宇宙開発の最も華やかな時代であった。そのなかの 1 グループとして米国ロスアラモス研究所のグローバ博士等は原子力エネルギーの宇宙での利用に注目し、その効率が上記の理由により放射放熱系の特性に強く関係することを知り、そのような高効率放熱系の開発に取り組んでいた。そのためには、広い平板状の放熱面に宇宙機内部で発生した熱を伝え、その広い放熱面の温度を出来るだけ一様に保つようにするための伝熱装置の開発が緊急課題であった。銅や銀の固体伝導を用いることは重量の点から問題外で、液体冷却系を用いることは無重力状態にある宇宙空間での液体の振る舞いに未知の部分が多くリスクが大きすぎた。そこで、ウイックの毛細管作用によって、液相の作動流体をウイックの中に保持しながら蒸発部へ還流させるヒートパイプに着目し、その動作原理を解明して宇宙用として完成したのが彼等であった。

グローバ博士に対してこの関係の最初の特許が許可されたのが 1964 年、彼等による最初の論文が出版されたのが 1965 年、そしてこの間にヒートパイプという名前が自然発生的に彼等の間で使われるようになってはいたが、文献上では同じグループのコッター博士の 1966 年の論文表題が最初であった。ここで宇宙用ヒートパイプの定義を考えてみよう。それはまず作動流体を封入した密閉した管であって、温度の高い部分に接している管の内壁で作動流体の蒸発がおり、温度の低い部分に接している管内壁で蒸気が凝縮することによ

* 文部省宇宙科学研究所教授

〒153 東京都目黒区駒場4-6-1

り高温部から低温部へ熱輸送が行われる。一方凝縮した液はウイック中に保持されつつ毛細管作用によって高温部へ還流する。さて一般に、蒸発・凝縮により熱輸送を行う装置は古くから各種知られており、ワットの蒸気機関も熱力学サイクルに相変化を含むという点では同様な原理によるものであろう。だから、グローバ等の発明したものの特徴は、密閉した管の中で相変化を完結させるクローズした受動的システムであり、その故に高い信頼性が期待される点にある。

宇宙機搭載用の機器は、苛酷な宇宙環境の下で、数年にわたり、保守作業を受けることなく作動することを要求されており、それ故に受動的システムで信頼性が高いということは何にもまして宇宙技術者にとって魅力的な特質であった。ただし、宇宙空間に原子炉が打ち上げられたことはなく、同位元素熱源も限られた範囲でしか実用化されなかったから、ロスアラモスのヒートパイプも当初の目的であった宇宙用動力源として用いられたことはなく、最初に宇宙において実用化されたのは大型の天文衛星の望遠鏡の鏡筒の等温化のためであった。その後1970年代に入り、衛星が次第に大型化し、大電力を消費するようになるにつれて、大型衛星内部の等温化、高出力TWTの冷却用として広く使われるようになり、またいわゆる可変コンダクタンス型のヒートパイプの登場によって、宇宙用の熱制御系としての地位を不動のものとした。

1960年代の後半にグローバ博士はイタリアのイスプラにあるヨーロッパ連合機構の研究所に招かれヨーロッパにおけるヒートパイプ研究の開始に貢献し、その後ヨーロッパ宇宙開発機構においても宇宙用ヒートパイプの研究はおおいに進展し、また地上用への応用を含む基礎応用両面の研究開発がドイツのスタットガルト大学などにおいて精力的に進められて来ている。表題の国際ヒートパイプ会議は、第1回を1973年ドイツのスタットガルト、第2回を1975年イタリアのボローニヤ、第3回を米国のパロアルト、第4回を英国のロンドンで開催された後を受けて、1984年第5回を筑波で開催されたものである。この会議は国際ヒートパイプ会議委員会によって主催されてきており、前記のグローバ博士、イスプラのブッセ教授、スタットガルトのグロル博士などが中心となって活動していた。たまたま今年1984年は1964年にグローバ博士に最初のヒートパイプ特許が許可されてから丁度20年目に当たるので、同氏を“ヒートパイプの父”として表彰しその功績を称えることをこの第5回会議の1つの行事として

企画した。幸いに同氏始め、ヒートパイプの命名者であるコッター博士も出席され、まことに盛会で、参会者一同に深い感銘を残した。

3. 宇宙用ヒートパイプの特性

ここでは宇宙用ヒートパイプの内部の流れの流体物理的性質について論じよう。まず作動流体は蒸発部にある液の表面から静かに蒸発する、つまり蒸発部においては蒸気の圧力と液面圧力は釣り合っており、蒸気温度と液の温度は等しい。蒸気は管内を満ち凝縮部に達するがこの間に圧力の変化はなく、従って蒸気温度の変化もない。凝縮も静かに、熱力学的に平衡状態を保ちつつ起こるので、蒸気相と液面の間には温度差・圧力差はない。但し、液内部と液面の圧力は、液面が曲率をもつ場合は、その表面張力分だけの差が生じ、液面が凹面の場合は液内圧力は液面圧力より高い。さて凝縮した液が毛細管中を通して蒸発部へ還流するには圧力差を必要とする。この圧力差は、蒸発部と凝縮部の液面曲率の差による表面張力差によって発生する。すなわち凝縮部では液面の曲率が小さく、液内圧力は大きい。これが液を毛細管中を流す原動力となる。この最大毛細管圧力差は作動液体の表面張力係数とウイックの構造によってきまる。一方液を還流させるに必要な圧力差は最大毛細管圧力差より大きくはなれないが、その値は液流路の長さに比例し、液流量に比例する。液流量に流体の潜熱を乗じたものが熱流量であるから、液還流に必要な圧力差は熱流量と管長の積に比例し、この積はウイック構造と作動流体の物性によって定まるそれぞれのヒートパイプについて固有の定数である。すなわちある特定のヒートパイプの特性は最大熱輸送量と管長の積によって比較することが出来る。現在の代表的な宇宙用ヒートパイプでは、20Wm程度の値のものは容易に得ることが出来、高度の技術を駆使すれば、100Wm程度までは製作可能であろう。

さて、この最大熱輸送能力を越えて熱を注入した場合はどうなるであろうか？ つまり蒸発部の温度を限界値以上にあげた場合は、蒸発部に液がなくなり、熱流は凝縮部に伝えられることなく蒸発部に蓄積され、その温度を爆発的に上昇させる、いわゆるドライアウトの現象がおこる。言いかえると、ヒートパイプは正常な作動状態では管内圧力・温度は管内全部にわたって一様で、蒸発部より凝縮部へ温度降下なしに熱が伝えられるが、一度この正常な動作状態から外れ、過大な熱入力が増えられると、蒸発部温度の暴走を招く。

これが宇宙用ヒートパイプの応用の際には考えているシステム全体の状態についての完全な理解が必要な所以である。

4. 地上用ヒートパイプの開発

1960年代における宇宙用ヒートパイプの開発成果はただちに地上用の伝熱機器の技術関係者の注目するところとなった。そしてその関心の対象がその基礎物理の理解に対してでなく専ら目新しいウイックの利用という即物的な点に向けられたのは、よくあることとはいえ残念なことであった。そしてこの早飲み込みによってとにかくウイックを封じ込んだパイプが市場に現れ、結果として、“ヒートパイプは役に立たない”、“ヒートパイプは難しい”という一般的な認識を形造ってしまった。

地上には重力があり、液は自然落下して下に落ちるから、蒸発部を下にもつヒートパイプは液還流を心配する必要がない。逆に、重力に逆らってウイックの表面張力作用によって液を上方にあげるのは有効ではない。これはいわゆるサーモサイホンとして古来用いられていた装置で、前世紀に広く用いられた蒸気暖房装置や同時代に工業炉、パン焼き釜等に広く使用されていたパーキンソン管などがこれにあたる。英国では1950年頃までのこの方式の釜を用いたパン屋があったそうである。これらは地下室にボイラー室をおき、作った蒸気を管を通して導いて暖房や加熱に用いて、凝縮した水はそのまま落下させてボイラーに戻したり、または復水機で液にする方式のものもあった。何しろ引き抜き鋼管などなかった時代である。当時の重い鋳鉄管、鋳鉄のラジエーターは今では古き良き時代を偲ぶ遺物となってしまった。このように構造材が未発達であったので、管を封じ切ることは危険がおおすぎた。事実ボイラーの爆発事故は当時は日常茶飯の出来事であった。また真空排気なども工業的には望み得ない技術であった。さてこのような周囲の環境にいつまでも安住して、関連技術の進歩に無頓着に過ぎてきた古典的伝熱技術者にとっては、ヒートパイプの出現は一種のカルチャーショックであった。熱流体物理学的な基礎研究の上に、最新の材料・製造技術を駆使した宇宙用ヒートパイプの開発過程が知られるにつれて、古来あったパーキンソン管を見直し、密閉し、完全に不純ガスを除去した、クローズド・2相サーモサイホンの動作原理が確立し、製造技術も長足の進歩をとげた。ここに先端技術としての宇宙技術の波及効果、特に開発の

ソフトの応用の1つの優れた実例がみられる。

5. 地上用ヒートパイプの特性

さて、このようにして作られたサーモサイホンは、ほぼ鉛直におかれた直管で、内部にウイックなどの構造は持たず、完全に真空排気した後に作動流体を封入したものであって、パワー・プラントの廃熱回収用として広く実用化されている。このような機器の最大熱輸送能力は通常数kW・mにもなり、この際に熱輸送を妨げる要因の第1は逆流効果である。すなわち下部から上昇する蒸気流と上部から落下する液滴が干渉して、液滴を吹き戻す現象がおこる。これを避けるために蒸気の流路と液の落下路を分離した装置が開発された。従来ある復水機をもつシステムはこれにあたるが、復水機や弁類などの可動部分を含むものが多く、そうでない方式のものは作動が微妙のものが多いようである。

このような状態で作動しているヒートパイプのなかで起こっている過程は最早熱力学的に準静的過程ではない。蒸発部における蒸発過程、蒸気と液の流れ、凝縮部における凝縮過程それぞれに熱力学的に不可逆な過程が加わり、流体力学的にも総圧損失を伴う流れとなる。宇宙用ヒートパイプに対して組み立てられたヒートパイプ理論は最早適用出来ず、それぞれの過程についてのより高精度の解析が必要となる。

蒸発過程では単位面積当たりの熱負荷が大きくなると沸騰が起こる。大気中の沸騰現象でみられる核沸騰、プール沸騰、膜沸騰などの現象が同様に認められるが、ヒートパイプは蒸発部、凝縮部を含む全体が閉じた系を構成しているので蒸発部におけるこのような非定常過程はヒートパイプ全体の状態に対して影響を及ぼし、激しい振動現象を伴うのが常である。高負荷状態にあるヒートパイプから音が発生することは今ではよく知られていることである。さらにこの沸騰現象に関連して、単位面積当たりの蒸発熱負荷を増加させるために固体面にグループを刻んだり、ウイックをつけたりすることが有効なことがわかり、多くの改良がなされた。宇宙用ヒートパイプで液還流のために導入されたウイックは、地上用サーモサイホンの液還流のためには有害無益であるが、蒸発部熱負荷密度を高めるのに役立っているのはちょっと面白い話である。

6. 残された課題

ヒートパイプという一つの閉じたシステムを、それ

を構成する各素過程について物理的解析を行い、それぞれの特性を定めて最適設計をもとめる、という手法を確立したのがロスアラモスの人たちの最大の功績であろう。その手法を地上用ヒートパイプに適用し、今日の巨大なヒートパイプ産業を築き上げたのは我が国の関連技術者の努力の賜物である。さてここで、さらに宇宙開発に関連して用いられた開発手法で地上用にも使われようとしている方法について述べよう。人工衛星は宇宙空間に孤立したシステムであり、ヒートパイプはその一部を構成するものであるが、人工衛星全体についての数学モデルを作り、それを解析して最適設計を求めるといった方式が宇宙開発全部において行われている。

地上用のヒートパイプについても単一のヒートパイプの特性を定めることは勿論大切で十分に行われているが、ヒートパイプを含む全システムについての数学モデル化、それをういた設計の最適化がこれから必要になるであろう。例えば冬期道路面の融雪・凍結防止のために地熱をヒートパイプで汲み上げることが数多くの試験プラントで実施されているが、積雪地で雪を融かし黒い道路面を露出させると放射冷却が強く起こり、さらに風による対流冷却も激しくなり、地中に蓄積されていた熱量は急速に失われ、結局その地域全体の寒冷化を招くことになりかねない。地域全体のエネ

ルギーバランスを考えた環境アセスメントが必要な一例である。

また別に発電プラントにおける燃焼廃ガスからの廃熱回収システムを考えよう。硫酸腐食を避けるためにヒートパイプ熱交換機の廃ガスに接する部分の温度を常に硫酸露点より高く保つよう種々の工夫がこらされており、特にプラントの起動時、緊急停止時の操作等についても配慮がなされているが、一歩を進めて、ヒートパイプ技術者が直接プラント全体の数学モデル作成に関係して、全システムとしての最適化に貢献出来るようにするのが望ましいのではなからうか。そうすれば少なくともヒートパイプの物理に関心の無いプラント設計者が、カタログの中の特性値だけから選択してヒートパイプを購入、取り付けしたシステムを完成、稼働させたところが、いくつかの動作条件で必ずしも期待どおりでなかったという話を聞くことはなくなるであろう。つまりヒートパイプはそれ程にむつかしい物理現象をふまえているものであり、それ故にこそ国際会議を5回も開く必要があったのである。また第6回国際ヒートパイプ会議は1987年フランスのグレノーブルの原子力研究所で開催されることが決定している。そこでもこの新しい技術分野にさらに新しい研究成果が発表されるであろう。期待して待ちたい。

