空気を作動流体とした二相密閉型サーモサイフオンの 広範囲な圧力条件下における熱伝達特性に関する研究

中納 暁洋, 白石 正夫, 西尾 匡弘, 村上 正秀*

通商産業省工業技術院 機械技術研究所 つくば市並木 1-2

* 筑波大学構造工学系 つくば市天王台 1-1-1

(1999 年 1 月 22 日受理)

Investigation of Performance of Closed Cryogenic Two-phase Air Thermosyphon in Wide Dynamic Pressure Range

Akihiro NAKANO, Masao SHIRAISHI, Masahiro NISHIO and Masahide MURAKAMI*

Mechanical Engineering Laboratory, Agency of Industrial Science and Technology,

Ministry of International Trade and Industry, 1-2 Namiki, Tsukuba 305-8564

* Institute of Engineering Mechanics, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba 305-8573

(Received January 22, 1999)

Synopsis:

This paper describes the results of an experimental study of closed cryogenic two-phase thermosyphon with air as the working fluid. The thermosyphon, which was 270 mm long with an inner diameter of 8 mm, was operated over a wide pressure range, from near the triple point to the critical point of air. The axial temperature distributions within the thermosyphon were measured as a function of heat transfer rate under the conditions of various operating vapor pressure. The thermal resistance and the maximum heat transfer rate were obtained from the measurement. The present experimental data for air are compared with the data of thermosyphon with nitrogen as the working fluid.

Keywords: liquid air, heat pipe, cryogenic thermosyphon, thermal resistance, maximum heat transfer rate

1. はじめに

近年, 各種の高温超電導 (HTS) 電子デバイスが試作され, HTS フィルターなどいくつかの電子デバイスは, ほぼ実用段階に達しつつある。HTS 技術が発展するにつれ, HTS 素子とそれを冷却するための冷凍機との間を繋ぐ, 液体窒素温度レベルで作動する伝熱素子の開発が要求されると考える。ここでは, この要求に応えるような伝熱素子を開発することを目的として, 極低温用ヒートパイプの一種である二相密閉型空気サーモサイフオンの研究を行った。ここで取り上げたサーモサイフオンとは, 重力を利用して作動流体を還流させるウイックを持たないヒートパイプの一種である。サーモサイフオンはその構造の単純さ, 低

い製造コスト, また沸騰現象を積極的に利用することで得られる高い伝熱性能等の理由から, 現在, 極低温域以外の常温域, 中高温域において工業分野で広く利用されている。しかし, 極低温域についてはいまだ実用化の段階には達していない。主な理由として, 1) サーモサイフオンが極低温環境から室温域に至るまで, 大きな環境変化に晒されるため実験が困難であり, 広範囲な作動圧力下での作動特性の把握が十分でない。2) 極低温用サーモサイフオンを従来のサーモサイフオンのように作動流体を封じ切った形で設計すると室温環境下で内部圧力が非常に大きくなる。よって, 極低温用サーモサイフオンの場合には作動流体の放出, 再供給を自由に行えるような機能を持たせた設計が必要になる等の取扱い上の問題が未解決であるな

どが挙げられる。極低温域についてはこれまでにいくつかの研究がなされてきているが¹⁻³⁾、その動作圧力範囲は極めて狭く、作動流体の三重点近傍から臨界点に至るまでの広範囲な条件下での作動特性を網羅した研究は、ほとんどないのが現状である。我々は、既に窒素を用いた極低温用のサーモサイフォンについての研究結果を報告してきた^{4,5)}。今回は取扱い上の問題を回避できると考える空気を用いたサーモサイフォンについて実験を行った。空気を作動流体として利用する場合には、大気をリザーバーとして利用するため、特別にリザーバタンク等を用意する必要がなく、その構造や取扱い上、大きなメリットがある。しかし、空気は窒素の場合と異なり多成分で構成されているため、作動特性の面においては単成分の二相密閉型窒素サーモサイフォンよりも悪くなることが予想される。このため、ここではその多成分性により、窒素サーモサイフォンに比べ、どのように作動特性が変化するかを明らかにする目的で、二相密閉型空気サーモサイフォンの三重点近傍から臨界点近傍に至るまでの作動特性について調べ、以前同じ目的で行った窒素サーモサイフォンの実験結果との比較を行った。

2. 実験装置

実験で使用したサーモサイフォン本体を Fig. 1 に示す。これは以前報告した窒素サーモサイフォンと同じ仕様⁴⁻⁶⁾の内径 8 mm、全長 270 mm の鉛直管で、下部から加熱部 (75 mm)、断熱部 (35 mm)、凝縮部 (160 mm) で構成されている。加熱部は肉厚 0.3 mm のステンレス管で、それを銅ブロックで覆っている。この銅ブロックをシースヒーターで加熱する仕組みになっている。断熱部は加熱部と連なっており、ステンレス製である。凝縮部は銅製で外径 80 mm の銅ブロックに外径 8 mm の穴を開けたもので、凝縮部上部は G-M 冷凍機のコールドヘッドと接続している。凝縮部の温度制御は、その上部に設置したシースヒーターにより行う。また、凝縮部と断熱部の間は溶接接合されている。サーモサイフォンの内壁面に沿った軸方向の温度分布の測定は、図中に示した熱電対を用いて行った。熱電対は加熱部に 16 個、凝縮部に 8 個そしてサーモサイフォンの内部温度測定用にシース熱電対を 1 つ設置した。なお、解析に際し、凝縮部の温度はサーモサイフォン内壁面から 3 mm の所に設置した 4 つの熱電対の出力値から読み取っている。

作動流体の封入率は、液体状態での作動流体の体積

Fig. 1 Schematic illustration of experimental apparatus.

と加熱部内容積との比で定義し、本実験では、この封入率を全て 100% とした。実験では凝縮部の温度 (T_{cond}) を一定に保ち、設定した加熱部からの熱入力値に対し作動が定常状態に達した後、サーモサイフォンの内壁面に沿った軸方向の温度分布の計測を行った。作動圧力及び作動温度を変えながら求めた一連のデータから、三重点付近から臨界点近傍までのサーモサイフォンの作動特性について調べた。

3. 実験結果

空気を作動流体として用いた場合の代表的な実験結果の一例を Fig. 2 に示す。この図は凝縮部壁温を一定温度に保ち、加熱部からの加熱量 (熱輸送量) を変化させた時の軸方向温度分布を示している。縦軸はサーモサイフォンに据え付けた熱電対の位置を表し、加熱部底部を原点にとった。なお、加熱部の温度は Fig. 1 で示した左右それぞれの熱電対の温度の平均値で整理している。Fig. 2(a) は凝縮部温度を約 80 K と比較的低く設定した時の実験結果を、Fig. 2(b) は凝縮部温度を約 120 K と高く設定した時の実験結果

Fig. 2 Axial temperature distribution at various heat transfer rates. (a) Temperature of the condenser section is 80.1 K. (b) Temperature of the condenser section is 119.8 K.

を示す。いずれの図からも熱輸送量が増していくにつれ、加熱部の温度が上昇していくことが分かる。また Fig. 2 (b)では、熱輸送量が約 47.5 W の時、加熱部の温度上昇が止まらなかった。これはこの時、サーモサイフォンが作動限界に達したことを示している。Fig. 2 (a)の実験例の場合、実験で用いた G-M 冷凍機の冷凍能力の限界から、サーモサイフンの作動限界までの加熱はできなかった。なお、以前行った窒素サーモサイフンの実験結果^{4,5)}の場合、断熱部内部に設置した熱電対の温度（その位置での環状液膜流の液体温度）は加熱部平均温度と断熱部平均温度とのほぼ中間の値を示していたのに対し、本空気サーモサイフンの場合、この断熱部での温度は凝縮部平均温度の方により近くなっており、加熱部平均温度との差についていえば窒素の場合に比べ温度差が大きいことが分かった。

次に、Fig. 2 に示したような一連のデータについて、加熱部の平均温度と凝縮部の平均温度の温度差 ΔT を熱輸送量 Q に対してプロットしたものを Fig. 3 に示す。ここで、Fig. 3 (a)は空気サーモサイフンの実験結果である。また、作動流体に空気を用いた場合と窒素を用いた場合とでの比較を行うため、同じ実験装置を用いて行った窒素の実験結果を Fig. 3 (b)に示す。これらの図から作動流体に空気を用いた時と窒素を用いた時とでは全く作動特性が異なることが分かる。空気の場合、熱輸送量の増加に対し、明らかに異なる 3 つの熱輸送特性を示す領域が存在することが確認できる。領域 I では小さな熱輸送量にもかかわらず

Fig. 3 Relation between the heat transfer rate and the temperature difference. The T_{cond} shows the average temperature in the condenser section. (a) The working fluid is air. —: Calculation result of nitrogen; ---: Calculation result of oxygen. Refer to chapter 3 in detail. (b) The working fluid is nitrogen.

ず、比較的大きな温度差が認められる。さらに熱輸送量を増していくと、今度は線形的に温度差が増加していくものの、領域Ⅰに比べ明らかに温度勾配が小さい領域Ⅱが形成される。さらに熱輸送量を増加させると再び大きな温度差が現れる領域Ⅲが形成される。一方、窒素の場合、熱輸送量の増加に対し、温度差が単調に増加していく。凝縮部温度が約 60 K のデータに大きな温度差がみられるが、この場合の凝縮部温度は窒素の三重点の温度より約 3 K ほど低く、固体窒素が凝縮部内壁面を覆う凍結限界の状態に至ったため、このように大きな温度差が形成されたものと考ええる。ここで得られた空気の実験結果は、土方らによって調べられた二成分混合の作動流体を用いたサーモサイフンの作動特性と定性的に似ている⁷⁾。その報告から得た知見を基に、空気サーモサイフンの作動特性をみると定性的には次のように理解できる。領域Ⅰでは低沸点成分の窒素が凝縮部で非凝縮性ガスのごとく振る舞い、そこでの熱抵抗が大きくなると考える。領域Ⅱでは熱輸送量の増加に伴い、凝縮部入り口からの蒸気の流入が激しくなり、非凝縮性ガスとして振る舞っていた窒素が上端方向に押し上げられ非凝縮性ガスの領域が小さくなり凝縮領域が広がっていくことから、一定の伝熱特性を示すようになるものと考えられる。さらに熱輸送量が増加すると、それ以上は非凝縮性ガスのごとく振る舞う窒素の領域が小さくならない状態に達するため、新たに領域Ⅲが形成されると考える。Fig. 3 (a)中における実線と一点鎖線は凝縮部温度が 80.1 K (▲) の領域Ⅲにおける実験データの内部圧力に対応した、窒素単成分と酸素単成分の場合の計算結果⁵⁾である。これら計算結果と比較して、領域Ⅲでの実験データの傾きは非常に大きくなっていることが分かる。このことは、単成分系とは異なる二成分系に特有な付加的な熱抵抗の存在を示唆している。これについては、後ほど触れる。

3.1 熱抵抗値の測定

次に、空気サーモサイフンの全熱抵抗値を窒素の場合と比較する。サーモサイフンの全熱抵抗値は $\Delta T/Q$ で定義し⁸⁾、ここではそれぞれ異なった凝縮部温度でのサーモサイフンの全熱抵抗値を、サーモサイフンの内部圧力で整理したものを Fig. 4 に示す。Fig. 4(a)が空気サーモサイフンの実験結果を、Fig. 4(b)が窒素サーモサイフンの実験結果をそれぞれ示す。空気サーモサイフンの場合、前に示した 3 つの異なる熱輸送特性を示す領域がはっきりとみて

Fig. 4 Total thermal resistance plotted against the inside vapor pressure for various T_{cond} . (a) The working fluid is air. (b) The working fluid is nitrogen.

とれ、その定性的な特徴は内部圧力が低い時でも、高い時でも基本的には変わらない。それに対し、窒素の場合、一連のデータにおける全熱抵抗値は内部圧力の増加と共に減少していき、内部圧力が約 1 MPa を越えたあたりから全熱抵抗値が、ほぼ一定の値を示していることが分かる。次に、これらの図から各内部圧力における代表的な熱抵抗値を求めたものを Fig. 5 に示す。空気の場合は、これを領域Ⅱにおける全熱抵抗値の平均値とした。窒素の場合は、各内部圧力で整理した一連のデータの一定値を示した所の平均値を求め、これを代表的な熱抵抗値とした^{4,5)}。高圧力条件下で、窒素の場合の代表的な熱抵抗値が圧力依存性を示さなくなるのに対し、空気の場合は圧力依存性を示す。また、低圧側では空気の代表的な熱抵抗値と窒素の場合との間で、あまり差異は認められないが、高圧側では空気の代表的な熱抵抗値は窒素のそれに比べ、1.5~2 倍程度大きい。圧力の高い領域でその熱抵抗値が窒素の場合と全く異なることに気付く。このよう

Fig. 5 Comparison of the nominal thermal resistances for air and nitrogen as the working fluids.

な差異が生じる原因として、空気サーモサイフの場合、先にも少し触れたが、径方向に付加的な熱抵抗が働いていると考えられる。この熱抵抗は気相と液相での窒素と酸素の構成比の違いから生じる気液界面での濃度勾配と深く関わっていると考える^{7,9-12)}。定性的な説明を行うと、サーモサイフを径方向に切った各断面での気液界面付近では窒素と酸素の相平衡は成り立っていると考えられる。しかし、全体の質量保存則と各成分の質量保存則を考慮すると、任意の断面において気相と液相の質量分率は平均として等しくなければならない。つまり、これは各断面で相平衡が崩れていることを意味する。よって、気液界面付近で大きな濃度差、及び温度差がつくことになり、単成分系ではみられない熱抵抗がここで生じると考える。本実験結果から、この付加的な熱抵抗は、内部圧力が高い時に大きく働くと考えるが、この熱抵抗についての定量的な検討については、今後の課題である。

3.2 限界熱輸送量の測定

加熱部からの熱入力値が大きくなり、熱輸送量が増加していくと、先の Fig. 2 (b) で示したように、やがては作動限界へと達する。実際にサーモサイフを使用する場合、その作動限界時における限界熱輸送量、 Q_{max} を把握しておくことは、サーモサイフを含む全システムを安全に作動させる上で非常に重要である。窒素サーモサイフの広い圧力範囲にわたる限界熱輸送量については、既に報告しているので^{4,5)}、ここでは、作動流体に空気を用いた場合の限界熱輸送量を窒素の場合と比較した結果について報告する。Fig. 6 に作動流体に空気を用いた時と、窒素

Fig. 6 Relation between the inside vapor pressure and the maximum heat transfer rate. Calculation results by using the empirical prediction proposed by Imura et al.¹²⁾ —: Air; ---: Nitrogen; ----: Oxygen.

を用いた時のそれぞれの限界熱輸送量を内部圧力に対しプロットしたものを示す。図中●が空気の▲が窒素のサーモサイフの限界熱輸送量を各々示す。○と△はサーモサイフが作動限界に到達できなかった場合の冷凍機の最大冷凍能力 (RL) での空気及び窒素の実験結果を各々示す。なお、○や△の場合、サーモサイフの作動限界はデータの値よりも大きい値になる。図中の実線、一点鎖線、点線は、井村らの相関式¹³⁾から求めた空気、窒素、酸素をそれぞれ作動流体とした場合の限界熱輸送量の予測値である。この図から内部圧力の高い領域で空気サーモサイフの限界熱輸送量が窒素のそれに比べ、大きいことが分かる。これは、高沸点成分である酸素の存在が、窒素単成分の場合に比べ、限界熱輸送能力を大きくしたと考える。しかし、空気の実験データは窒素の実験データに比べ、かなりばらついている。また、井村らの相関式に対し、窒素サーモサイフの実験データは良く一致しているが、空気サーモサイフの実験データは系統的にこの予測値より大きく、実験点は窒素（一点鎖線）と酸素（点線）との間に位置している。井村らの相関式は、単成分の作動流体を基にしているため、窒素サーモサイフの作動限界を見積もる上では有効であるが、多成分系の空気に対して用いた場合には、そのままでは差が大きいと考える。よって、これを見積もるためにもサーモサイフ内部における蒸気相内を含めた多点の温度測定実験を行い、作動流体の各成分の濃度分布を把握する必要がある。内部温

度分布と内部圧力から濃度分布を求め、その効果を考慮した多成分系対応（少なくとも二成分系には対応）の相関式を求めなければならないと考える。

また、Fig. 6 から空気（窒素）の臨界圧力の方が窒素（空気）の臨界圧力に比べ高いにもかかわらず、空気（窒素）サーモサイフンの限界熱輸送量が約 3 MPa を越えた辺りから急に小さくなり、窒素（空気）サーモサイフンと同程度の圧力範囲でしか作動しないことが分かった。窒素（空気）の臨界圧力が空気（窒素）サーモサイフンの作動圧力の限界に深く関与していることが本実験により明らかになった。

最後に、作動限界に達した後の加熱部の温度上昇の様子について述べると、内部圧力の高い領域では窒素（空気）サーモサイフンの温度上昇の仕方に比べ、空気（窒素）サーモサイフンの温度上昇の仕方の方がかなり遅かった。空気（窒素）サーモサイフンの場合、低沸点成分の窒素（空気）が臨界点に達しても高沸点成分である酸素（窒素）は気液二相共存状態にあり、この酸素（窒素）の存在が加熱部の温度上昇の速度を抑制しているものと推測する。

4. ま と め

広い圧力範囲にわたり、二相密閉型空気（窒素）サーモサイフンの作動特性を実験的に調べ、二相密閉型窒素（空気）サーモサイフンの作動特性との比較を行った。その結果、

- 1) 空気を作動流体とした場合、熱輸送量に対し、3 つの異なった熱輸送特性を示す領域が存在することが明らかになった。これは空気の多成分性による凝縮部内における凝縮形態の変化に起因していると考えられる。
- 2) 代表的な熱抵抗値は空気（窒素）サーモサイフンの方が窒素（空気）サーモサイフンに比べて大きい。
- 3) 限界熱輸送量に関しては、サーモサイフン内部の圧力の高い領域で、空気（窒素）サーモサイフンの方が窒素（空気）サーモサイフンに比べ大きくなる。また、空気（窒素）サーモサイフンの実験値は、井村らの提案した相関式の値より系統的に大きい。

4) 空気（窒素）サーモサイフンの作動圧力の限界は窒素（空気）サーモサイフンの作動圧力の限界と同程度であることが分かった。

5) 空気（窒素）サーモサイフンの場合、その熱輸送特性や限界熱輸送量を予測する際、その構成成分である窒素及び酸素のサーモサイフン内部における濃度分布の影響を考慮する必要がある。

参 考 文 献

- 1) F.C. Prenger, D.D. Hill, D.E. Daney, M.A. Daugherty, G.F. Green and E.W. Roth : Adv. Cryog. Eng. **41A** (1996) 147
- 2) N. Ichikawa and M. Shiraishi : Adv. Cryog. Eng. **37** (1990) 453
- 3) M. Shiraishi, N. Ichikawa and M. Murakami : 7th Int. Heat Pipe Conf. **1** (1993) 381
- 4) 中納暁洋, 白石正夫, 西尾匡弘, 村上正秀 : 低温工学 **33** (1998) 30
- 5) A. Nakano, M. Shiraishi, M. Nishio and M. Murakami : Cryogenics **38** (1998) 1259
- 6) A. Nakano, M. Shiraishi, M. Nishio and M. Murakami : Proc. of ICEC **17** (1998) 663
- 7) 土方邦夫, 長谷川浩巳, 長崎孝夫 : 日本機械学会論文集 **B55** (1989) 1469
- 8) W.B. Bienert and E.A. Skrabek : Heat pipe design hand book, Dynatherm Corp. Rept. to NASA, NAS 9-11927 (1974)
- 9) C.L. Tien and A.R. Rohani : ASME Paper 71-WA/HT-30 (1971) 1
- 10) C.L. Tien and A.R. Rohani : Trans. ASME, J. Heat Transfer (1972) 479
- 11) K. Kadoguchi and T. Fukano : Proc. 2nd JSME-KSME Thermal Eng. Conf. **1** (1992) 143
- 12) 長崎孝夫, 土方邦夫 : 日本機械学会論文集 **B60** (1994) 4244
- 13) H. Imura, K. Sasaguchi, H. Kozai and S. Numata : Int. J. Heat Mass Transfer **26** (1983) 1181