極低温流体技術の宇宙機器への応用開発

Development of Cryogenic Fluid Technology in Space Applications

技術本部 大 平 勝 秀*¹ 名古屋誘導推進システム製作所 吉 田 裕 宣^{*2}

宇宙機器の高性能化,低コスト化を図る上で極低温流体の宇宙機器への応用が重要となっている.本研究では宇宙用赤外線望 遠鏡等機器の冷却に使用される超流動へリウムと液体水素に比べ密度,寒冷保有量が優れ,スペースプレーン等の燃料として検 討中のスラッシュ水素について開発試験を実施した.その結果,超流動へリウムの気液分離,流量制御に使用されるポーラスプ ラグの特性と加圧超流動へリウムの強制冷却特性,スラッシュ水素の製造法,密度計測法,流動特性等が得られ,宇宙機器の開 発・実用化に適用できる見通しを得た.

Cryogenic fluid technology in space applications has become increasingly important to improve the performance and reduce the cost of space equipments. In this research, developmental tests were conducted on superfluid helium used for the cooling of space infrared telescopes, and on slush hydrogen showing an increased capacity to absorb heat with a higher density than liquid hydrogen, which is currently being studied as a fuel for aerospace planes. The test results provided the characteristics of the porous plugs used for vapor-liquid phase separation and the flow control of superfluid helium, the forced flow characteristics of pressurized superfluid helium, and the production method, densimetry and flow characteristics of slush hydrogen. The authors were able to gain an outlook to applications of these cryogenic fluids in the development of space equipments.

1. まえがき

極低温流体が宇宙分野へ応用される代表的な技術として(1) 冷媒,冷却剤としての利用技術,(2)推進薬としての利用技術, (3)地上,宇宙空間での極低温流体製造技術,を挙げることがで きる.

大気圧, 温度4.2K(-269℃)の液体ヘリウム(LHe)を真 空ポンプで減圧し, 圧力38 Torr以下, 温度2.2K以下にする と量子効果を持つ超流動ヘリウム(He II)が生成する. He II は地上で大気や周囲の赤外線から邪魔されて観測できない星から の微弱な赤外線を宇宙空間で観測する赤外線望遠鏡や宇宙粒子線 を検出する超伝導マグネットの冷却剤として注目されている. He IIは38 Torr以下の減圧状態が必要であるが宇宙空間の真空 を利用して,その優れた熱伝導特性,流動特性により小型・軽量, 高性能な宇宙機器が実現できる.

次に大気圧,温度20K(-253℃)の液体水素(LH₂)を真空 ポンプで減圧し、三重点(圧力53 Torr,温度13.8K)に到達 すると固体が生成するが、固体がみぞれ状に存在する固液混合状 態がスラッシュ水素(SLH₂)である。固化率50 wt %のSLH₂ は通常のLH₂と比べ密度の増加が16%、寒冷の増加が18%期 待でき、将来有人宇宙輸送システムの中心となるスペースプレー ンの燃料タンクの容積減少、空気液化サイクルエンジンの冷却源 確保を狙ってSLH₂を燃料とした推進システムが検討されている。

2. 超流動ヘリウム(HeⅡ)技術の開発

He IIの現象は常流動成分(n成分)と超流動成分(s成分) から成る2流体モデルで説明され、n成分の濃度は温度が高くな るほど増加し、s成分の濃度はその逆になる.n成分は普通の流 体と同様に粘性抵抗を示し、熱(エントロピーを保有)を運ぶ. s成分は粘性ゼロで極めて狭いすきまを圧力差なしで流動できる が熱を運ぶことはできない(エントロピーがゼロ).容器内の He IIの一部をヒータで過熱し温度を上昇させると両成分に濃度 差が生じs成分は高温側へ,n成分は低温側へ流れ,温度を均一 にする働きが生じる.この流れは,質量の移動を伴わずに生じ, 熱輸送が速やかに行われるので通常のLHeの100万倍以上の熱 伝導率となる(熱カウンタ流).また,He IIの入った二つの容 器を細管で連結し,s成分のみ流れるフィルタを設け,一方の容 器を高温にすると温度差によりs成分のみが高温側へ流れ液面が 上昇する(熱機械効果).

2.1 ポーラスプラグ(多孔質栓)の特性

ポーラスプラグ (PP) は赤外線望遠鏡のセンサ冷却, 侵入熱 により蒸発した He IIの気液分離と流量制御を熱機械効果を利用 して無重力下で行い長期間観測を可能とする. 図1(a)に示すよ うに PP 下流側(図の上側)の圧力を下げるとn成分は圧力こう 配により下流側に流れ PP で蒸発する. このとき蒸発潜熱を奪う ので下流側の温度が下がり熱機械効果によりs成分は上流側(図 の下側)に流れようとする. PP の断面積を A, 透過率を K, 圧 力こう配を CP とすると PP を流れる質量流量 Mは,

 $\dot{M} = -\{\rho ST/(\lambda + ST)\}(AK/\eta)PP$ (1) となる⁽¹⁾. ここで、 ρ は He IIの密度、S は比エントロピー、T は温度、 λ は蒸発潜熱、 η は n 成分の粘性係数である. したが って、PP の透過率と断面積を適当に選ぶことにより流量を蒸発 He ガスに対応できるように設定でき、蒸発ガスのみを弁別的に 放出できる.また、PP 下流側にヒータを取付け温度差を小さく すると s 成分の上流側への流量が小さくなり、全体として流量が 増加する.図1(a)に示すように PP を出た He ガスは侵入熱、 赤外線ノイズを低減するためふく射シールド板を冷却して宇宙空 間へ放出される.

PP 試験装置を図1(b)に示す. He II 温度 T_B を制御する真空 ポンプと PP を排気する真空ポンプを設置している. 排気管下端 に取付けた PP の下流側には温度計(T_P)と流量調節機能確認用 のヒータを取付けた. PP の材質として気孔径(透過率)の制御

190



が容易なアルミナセラミックスを採用し、直径 30 mm,厚さ 10 mm,気孔径 1,4,10 μmの3 種類につき試験を実施した.

図2(a)は実験で得られた圧力こう配と質量流量の一例である. 圧力こう配を増加,減少させたときにヒステリシスが発生してい る.図中計算値は式(1)の計算結果であるが、実験値との差が認 められる.この原因として PP の下流出口面に気液界面が存在す るのではなく、PP 内に存在し、流動条件によってその位置が変 わることが指摘されている⁽¹⁾.

ヒステリシスについてはある程度再現性があることを確認して おり、得られたデータを基に流量等使用条件に合った PP を設計 することが可能である.

気孔径 1, 4μmの PP についても同様な流量特性が得られた. 図 2(b) はヒータ熱量による流量増加試験の一例で,ヒータ熱量 と質量流量の関係を示す.ヒータを使用して温度こう配を減少さ せると流量が増加しており,流量調節が可能であることを示して いる.

2.2 加圧超流動ヘリウム(He IIp)の強制冷却特性

He IIを超伝導マグネットの冷却に用いると臨界磁場,臨界電流が増加し,また伝熱特性が改善されるのでマグネットの性能を向上できる.ここでは He IIp の強制冷却試験結果について述べる.

図3に試験装置を示す.He冷凍・液化機から供給された極低 温高圧Heガス(圧力約0.95 MPa)は第1,第2熱交換器で温 度が下げられ,第3熱交換器にて飽和蒸気圧のHe IIと熱交換し てHe IIpとなり,冷却チャネルを模擬するテストセクションに 入る.テストセクションは長さ5m,内径3mmのSUS管で直 径約35 cmのコイル状に巻かれている.

また、テストセクションには温度計とヒータが取付けてあり、 入口、出口部には圧力計を取付 He IIp の圧力損失を測定した.



図2 ポーラスプラグの流量特性 圧力こう配と質量流量との 関係及びヒータによる流量調節が可能であることを示す. Flow characteristics of porous plug



最初にHe IIpをテストセクションに流し定常温度分布と両端 の圧力損失を測定した.入口温度1.5~1.8K,流量0.4~0.5g/s の範囲にて圧力損失は 2~3 Torr であった. Fanning の式を用

三菱重工技報 Vol. 33 No. 3 (1996-5)

192





いて圧力損失係数 f を求めると、通常乱流で用いられる Blasius の実験式 $f=0.79 Re^{-0.25}$ と良く一致することが確認された.

ただし, Reの計算にはn成分の粘性係数を使用した.

次にテストセクション入口部から2mの点に設置したヒータ で定常的に熱負荷を与えた場合の温度測定結果を図4に示す.

ヒータ上流でも温度上昇が見られ,熱カウンタ流による熱輸送 が行われている。一次元と仮定したチャネルに熱負荷がある場合, チャネル内の He IIp のエネルギー変化は熱カウンタ流の熱拡散 と通常流体の強制対流による熱伝達から成る。

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x} \left(\frac{1}{f(T)} \frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x}\right)^{\frac{1}{3}} - \rho V \frac{\mathrm{d}H}{\mathrm{d}x} + Q(t, x) = \rho \frac{\mathrm{d}H}{\mathrm{d}t}$$
(2)

熱カウンタ流の項 強制対流項 熱負荷

ここで、Hはエンタルピー、 ρ は密度、Vは流速、xはチャ ネル位置である.定常状態では、dH/dt=0、Q(t, x)=Q(x)となる.また、He IIp の物性値を一定と仮定して (2Kの値を 使用)、 $dH=C_p dT$ 、 $f(T)=FT^{-4}$ (F は物性値を一定と仮定 したときの定数)とする.実験から得られた入口、出口部温度、 熱負荷 Qを境界条件として数値計算を実行、得られた温度分布 T(x)を図4に示す.実験結果と良く一致しており、He IIp の 冷却時の定常温度分布を推定できる.

3. スラッシュ水素 (SLH₂) 技術の開発

SLH₂技術実用化のため、まず比較的簡単な Freeze-Thaw 法 (間欠減圧法) により SLH₂を製造、製造状況の観察、密度計測 を実施し、管内流動特性を取得した。次に将来の大量製造を想定 した He 冷凍法による製造を実施し、製造メカニズムを把握した。

3.1 Freeze-Thaw 法による製造と流動特性

LH₂を真空ポンプで減圧し,三重点圧力に達すると液表面に固 体水素が生成する.このとき真空引きを停止すると表面の固体水 素が融解し密度差のため下方へ沈降する.この真空引きと停止を 繰返し(間欠減圧),さらに撹拌器で撹拌して細かい粒状の固体 水素を製造する方法がFreeze-Thaw法である.図5(a)に製造 に使用したデュワー(断熱容器)を示す.製造状況を観察するた めガラス製とし,密度計,撹拌器を内部に設置している.







図 5(b)に製造時のデュワー内の様子を示す.製造が進むにつ れ固体水素粒子のためデュワー内が白濁している. 製造した SLH₂の密度(固化率)を計測するため静電容量型の



図7 ヘリウム冷凍法によるスラッシュ水素製造試験 Slush hydrogen production test by helium refrigeration method

密度計を試作した。密度計の校正は極低温での熱収縮の影響を考 慮して LH₂中にて実施した。LH₂を三重点まで減圧すると LH₂ の誘電率が変化することを利用して密度計の誘電率と静電容量特 性を求めた⁽²⁾.

次にデュワー内の SLH₂をほぼ大気圧状態に加圧し (53 \rightarrow 790 Torr) デュワー内に挿入した移送管 (内径 6 mm の真空断熱管) 内を流動させ圧力損失データを取得した.また,三重点液体水素 についても SLH₂と同様に製造,加圧して流動試験を実施した. 図6に流動時測定した直管部 (長さ 445 mm)の管摩擦係数を示 す.装置の制約上レイノルズ数を変化させたデータは取得できな かったが,通常流体の実験式と三重点液体水素の場合がほぼ一致 しており,試験方法が妥当であることを示すとともに固化率によ り管摩擦係数が変化することを示している.

3.2 ヘリウム (He) 冷凍法による製造

He 冷凍法は極低温 He ガスと LH₂の熱交換により伝熱面に固 体水素を生成し、回転する刃物(オーガ)で削り落として製造す るためオーガ法とも呼ばれている.製造装置は図7(a)に示すよ うに熱交換器、オーガ、密度計を設置したガラスデュワーと極低 温 He 供給装置から構成される.極低温 He は温度 13.8 Kの SLH₂製造のため温度約 11 K, 圧力約 0.44 MPa の超臨界状態で 供給する.オーガは直径 70 mm の円筒に高さ 5 mm の刃をらせ ん状に取付けたもので固体水素が生成する熱交伝熱面とのすきま は 50 μ m である.図7(b)にオーガの外観を示す.試験方法は最 初デュワー内のLH₂を三重点付近まで減圧後,極低温 He を流 すとしばらくして熱交伝熱面に固体水素が生成し、これがオーガ で削り落とされ細かい粒状となって下方へ沈降する.オーガの回 転数は 30, 50, 80 rpm の 3 通りを実施した. 図 7(c)に 80 rpm での製造状況を示す.目視によれば固体粒子の粒径はオーガが速 く回転するほど小さく観察された.図 7(d)に実験で得られた回 転数と極低温 He の寒冷供給量,固体水素製造量の関係を示す. 高回転ほど製造量が多くなっており,次の理由が考えられる.固 体水素の熱伝導率は小さいので伝熱面に生成する固体水素の厚さ が増すに従い He-LH₂間の交換熱量が減少するが,高回転では 薄いうちに削り取られるため伝熱が促進され,製造量が増加する. 80 rpm での固体水素製造量 0.062 g/s は固化率 50 %のスラッシ ュ水素に換算すると 5.5 l/h の製造能力となる.

4.む す び

宇宙機器開発に関連する極低温流体技術のうち,超流動ヘリウ ム技術とスラッシュ水素技術について技術的特徴と実用化をにら んだ基礎技術の開発状況を述べた.両技術は搭載機器,スペース プレーン等宇宙機器の性能向上,信頼性向上,コストダウンを図 る上でますます重要になると思われ,今後とも技術開発に努めて いく考えである.

参考文献

- Murakami, M. et al., Experimental Study on Porous-Plug Phase Separator for Superfluid He II, ISAS Report No. 612 (1984)
- (2) Ohira, K. et al., An Experimental Investigation of Production and Density Measurement of Slush Hydrogen, Cryogenics Vol.34 (1994) p.397