

水平管内を流動するスラッシュ窒素の圧力損失低減現象

Pressure Drop Reduction Phenomenon of Slush Nitrogen Flow in a Horizontal Pipe

大平 勝秀(東北大学 流体科学研究所)

OHIRA Katsuhide (Institute of Fluid Science, Tohoku University)

E-mail: ohira@luna.ifs.ac.jp

1. はじめに

極低温固液二相スラッシュ流体は、高密度流体、冷媒として優れた特徴を持っている。スラッシュ流体の実用上代表的なものとして、温度 14 K のスラッシュ水素と温度 63 K のスラッシュ窒素がある。重量固相率 50 wt% のスラッシュ水素の場合、温度 20 K の液体水素と比べると密度が 16%、温度 20 K の気体になるまでの寒冷保有量(エンタルピ)が 18%増加する。重量固相率 50 wt% のスラッシュ窒素もスラッシュ水素と同様、密度が 16%、寒冷保有量が 22%増加する。スラッシュ水素を利用すると、水素の効率的な輸送、貯蔵が可能になると共に、配管内を流動する際、侵入熱やクエンチによる発熱がある場合、熱の一部は固体の融解熱で吸収され固相率は低下するが、液体の温度上昇および気液二相化は低減され、機能的熱流体として優れた特性を示す。

燃料電池の飛躍的な普及、情報技術による電力需要増加に鑑み、筆者は Fig. 1 に示す水素エネルギーシステムを提案している[1,2]。水素をスラッシュ水素の形態で長距離(パイプライン)輸送する際、MgB₂ を利用した超伝導送電と組み合わせ、輸送先においては液体水素を冷媒とする超伝導電力貯蔵(SMES)と組み合わせると、水素燃料と電力の同時輸送および貯蔵が可能となる。いわゆるシナジー効果が期待できる。

水素エネルギーシステム実用化のため、筆者らは Fig. 1 の左上に示す磁気冷凍法による高効率水素液化法を始めとする種々の実験研究を実施している[1,2]。筆者以外の圧力損失低減の研究として、スラッシュ水素の実験報告があるが[3]、圧力損失測定が主となっており、スラッシュ流体を輸送、貯蔵するための配管や超伝導送電等超伝導機器に適用する場合の流動特性が十分に解明されていない。

本研究では、スラッシュ流体が水平円管内を流動する際の流動特性を解明するため、スラッシュ窒素を使用した。スラッシュ窒素が管内を流動する際の圧力損失特性を実験により定性的、定量的に把握すると共に、水素エネルギーシステム実用化に重要となる管内流速が大きい場合に、スラッシュ流体の圧力損失が液体より減少する、もしくは液体の圧力損失に漸近する非ニュートン流体的な挙動である圧力損失低減現象について解明を行った[4]。

2. 実験結果

Fig. 2 に Reynolds 数と管摩擦係数の関係を示す。圧力損

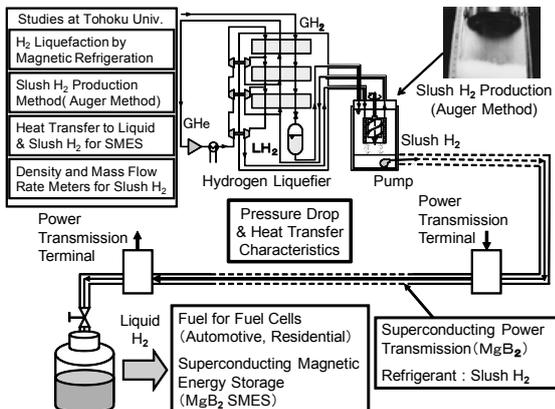


Fig. 1 Synergetic effect of a combination of slush hydrogen and superconducting equipment.

失測定部は、長さ $L = 400$ mm、内径 $D = 15$ mm のステンレス鋼製円管である。図の Prandtl-Karman 式は液体窒素 (63 K) の管摩擦係数を示す。実験点の Reynolds 数には、固相率から求めたスラッシュ窒素の密度、液体窒素 (63K) の粘性係数を用い、5 グループに分けた固相率でプロットしている。

Reynolds 数 $4.95 \times 10^4 \sim 1.6 \times 10^5$ の範囲では、全ての固相率において、スラッシュ窒素の管摩擦係数および圧力損失は液体窒素より大きくなる。また、固相率が大きくなるにつれスラッシュ窒素と液体窒素の管摩擦係数の差は大きくなっている。この範囲は管内平均流速 1.1~3.6 m/s に相当する。一方、Reynolds 数 $1.6 \times 10^5 \sim 2.54 \times 10^5$ の範囲で固相率 4.8~17 wt% の場合には、スラッシュ窒素の管摩擦係数が液体窒素より小さな値となる圧力損失低減効果が現われる。この範囲は平均流速 3.6~5.9 m/s に相当する。固相率が 17 wt% 以上では、Reynolds 数が大きくなるとスラッシュ窒素の管摩擦係数は減少して液体窒素の管摩擦係数に近づくが、本実験で実施した Reynolds 数の範囲では液体窒素の管摩擦係数より大きい。実験で得られた液体窒素とスラッシュ窒素の圧力損失低減量の最大値は約 1.8 kPa/m であり、スラッシュ窒素の圧力損失は液体窒素の圧力損失の 0.77 倍に相当する。この時の流速は約 4.2 m/s、固相率は約 12 wt% である。

固液二相流体は固相率の増加に伴い粘性(みかけの粘性係数)が増加する。みかけの粘性係数として式(1)を用いて計算した Reynolds 数(2)(スラッシュ Reynolds 数と名付ける)と管

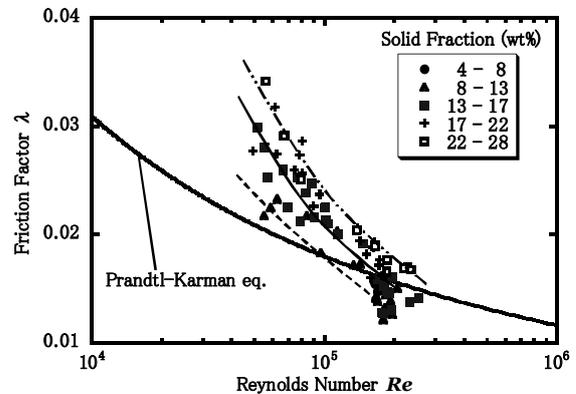


Fig. 2 Pipe friction factor and the Reynolds number of the slush nitrogen.

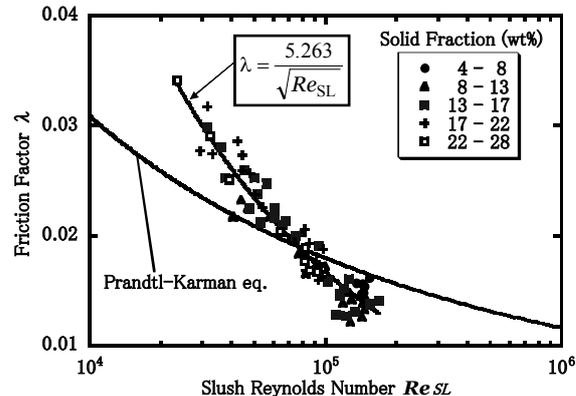


Fig. 3 Pipe friction factor and the slush Reynolds number of the slush nitrogen.

摩擦係数の関係を Fig. 3 に示す。x は体積固相率である。

$$\mu_{SL} = \mu_L \{1 - (x/0.6)\}^{-1.8} \quad (1)$$

$$Re_{SL} = \frac{\rho_{SL} v D}{\mu_{SL}} \quad (2)$$

Fig. 3 の実線はみかけの粘性係数を使用した場合の最小二乗法により得られた曲線であり、式(3)で表わされる。実験点と式(3)の差は±20%以内である。この結果はスラッシュ窒素のみかけの粘性係数が式(1)で近似的に表せることを示している。

$$\lambda = \frac{5.263}{\sqrt{Re_{SL}}} \quad (2.35 \times 10^4 < Re_{SL} < 1.69 \times 10^5) \quad (3)$$

この実験式を使用することにより、任意の固相率と流速からスラッシュ窒素の圧力損失を予測することが可能となり、スラッシュ窒素を輸送する場合のポンプ動力の推定と圧力損失低減効果によるポンプ動力低減が期待できる。

3. 圧力損失低減現象

低流速および高流速において PIV 法により測定した固体窒素粒子の流れ方向速度分布を Fig. 4 に示す。測定時の重量固相率 x、タンク液面計から算出した管内平均流速 v、Froude 数 $Fr = v^2/(gD)$ を図中に示す。図の横軸は固体粒子の流れ方向速度 (V) と固体粒子の管内平均速度 (V_{mean}) の速度比である。Fig. 4 (a) の低流速では、固体粒子の流動パターンは速度分布が上下非対称な非均質流である。固体粒子の慣性力よりも重力の影響が大きくなるため、固体粒子が管壁底部付近に多くなり、固体粒子同士の干渉、固体粒子と液体間の干渉、固体粒子と管底部の干渉が増加し圧力損失は増加する。この傾向は速度が同程度であれば、固相率が大きいほど顕著になっている。Fig. 4 (b) の高流速では、いずれの場合も固体粒子の流動パターンは速度分布が上下対称な擬均質流である。低固相率 (△印、◆印) では、Fig. 2 に示すように低減効果が現れるが、高固相率 (●印) では固体粒子同士の衝突、固体粒子と液体間の抗力増加等によりスラッシュ流体の運動量損失が顕著となり圧力損失が増加する。すなわち、低固相率においては低減効果が卓越するが、高固相率では固体粒子同士および固体粒子と液体の干渉に起因する圧力損失の方が卓越すると考えられる。

次に、固相率、流速が増加するにつれ、本来の圧力損失が低減効果に卓越してどの程度まで増加するかを、スラッシュ窒素と液体窒素の圧力損失比 $\Delta P_{SL}/\Delta P_L$ をもとに検討を行った。流速が小さい場合は、圧力損失の絶対値は小さいが、前述のように非均質流となるため圧力損失比は大きくなる。高流速の場合は低減効果が現れて後、高固相率になると圧力損失比 1.15 程度に漸近する。この現象は内径 10 mm の水平円管の実験でも、高流速、高固相率になると圧力損失比が 1.1 程度に漸近する結果と同様である[5]。

固体粒子の可視化観察結果と合せ、スラッシュ窒素の圧力損失低減メカニズムとして、次のことが考えられる。すなわち、擬均質流となる高流速において、固体粒子が管軸方向に移動して管中央部に移動する結果、管壁近傍に固体粒子の少ない薄い液体層が存在する。管中央部の固体粒子群は、管壁面で発生する液体層内の乱流を管中央部に輸送することを抑制すると共に、管壁面で発生する乱流の発達も抑制することが圧力損失低減の要因の一つと考えられる。

4. スラッシュ水素の流動特性との比較

Sindt らのスラッシュ水素の実験[3]でも、低 Reynolds 数領域での圧力損失増加と高 Reynolds 数領域での圧力損失低減現象が見られ、定性的には本研究のスラッシュ窒素の特性

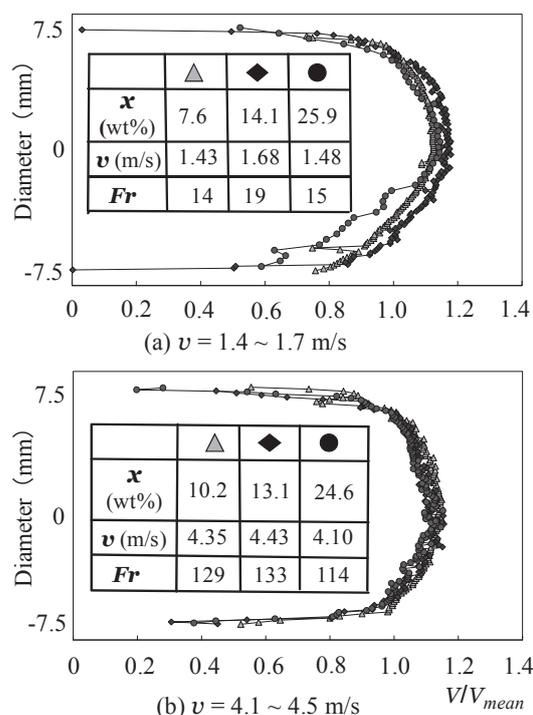


Fig. 4 Velocity distribution of solid nitrogen particles in a pipe measured using the PIV method.

と同様な結果が得られている。スラッシュ水素の場合、スラッシュ窒素よりも低流速で擬均質流となり、低減現象が現れている。低流速で擬均質流となり易い原因として、液体水素の粘性係数が液体窒素より小さく、固体粒子と液体の干渉による損失が小さくなること、固液密度比がスラッシュ窒素より小さく、固体粒子への重力の影響が小さくなることが考えられる。

5. まとめ

水平円管内を流動するスラッシュ窒素の圧力損失特性および流動様式が実験により明らかとなった。管摩擦係数とスラッシュ Reynolds 数の関係式が得られ、この関係式を使用することにより、任意の流速と固相率からスラッシュ窒素を配管輸送する場合のポンプ動力の推定と圧力損失低減効果によるポンプ動力低減が期待できる。低減現象は擬均質流となる高流速において発生することが示され、固体粒子が管中央部に移動する結果、管中央部の固体粒子群が管壁での乱流発達を抑制することが圧力損失低減の要因の一つと考えられる。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(基盤 B 21360091)により実施した。また、流動試験装置の製作にあたっては、(株)ジェック東理社の技術協力を得た。

参考文献

1. 大平勝秀:「液体水素およびスラッシュ水素技術の現状と応用」, 低温工学 **41** (2006) pp.61-72
2. K. Ohira: "Development of a high-efficiency hydrogen transportation and storage system using slush hydrogen," Proc. 23rd Int. Cryo. Eng. Conf. (2011) pp.269-274
3. C. F. Sindt and P.R. Ludtke: "Slush hydrogen flow characteristics and solid fraction upgrading," Adv. Cryo. Eng. **15** (1970) pp.382-390
4. 大平 勝秀:「水平管内を流動するスラッシュ窒素の圧力損失低減現象」, 低温工学 **45** (2010) pp.484-492
5. 大平勝秀, 中込圭, 高橋則史:「水平管内を流動するスラッシュ窒素の圧力損失低減および伝熱劣化特性に関する研究」, 低温工学 **46** (2011) pp.149-161

Progress and Future Prospects of Superconductivity Technologies for Advanced Power System in KOREA

Ki-Chul Seong, Young-Sik Jo (KERI)
E-mail: kcseong@keri.re.kr

1. Introduction

Now DAPAS (Development of Advanced Power system by Applied Superconductivity technologies) program ended 10 years of research and development supported from the MEST (Ministry of Education, Science and Technology), launched in July 2001. This paper described recent progress and future prospects of superconductivity technologies focused on this project.

2. Progress

Recently KOREA gained top level of global R&D results by DAPAS program i.e.; Developed low-cost and high-speed manufacturing technology of coated conductor, Successfully made 20 m of 1,250 A-class high-performance coated conductor, Developed world's largest capacity of 22.9 kV, 3 kA SFCL with own technology, Established National Standard in HTS cable field for the first time in the world, Developed the highest voltage of 154 kV, 1 GVA HTS cable, Developed Korea's largest capacity of 5 MW HTS motor, Constructed world leading cryogenic electrical insulation testing facility for 154 kV HTS transformer, etc.

In short, it may be summarized as follows,

SmBCO coated conductors

In Korea, KERI (Korea Electrotechnology Research Institute) successfully manufactured high temperature superconducting coated conductor, 20 meters in length, 1000 Amperage class, using a unique EDDC (Evaporation using Drum in Dual Chamber) process, making Korea the leader in the superconducting wire field. And SuNAM developed high-speed manufacturing technology to significantly reduce manufacturing costs of coated conductors and thus acquired world-level competitiveness.

Superconducting Cable

The development and field tests of 154 kilovolt superconducting cable system, which is the largest voltage so far, have been successfully completed. In addition, Korea is the first country to establish the national standard in the superconducting power cable field, laying the foundation for leading global standard in the future.

Superconducting motor

This led to the development of 1 megawatt, 3,600 rpm high speed superconducting motors. After building a test facility for superconducting rotary machines, 5 megawatt, 200 rpm superconducting motors are currently being tested.

Superconducting Fault Current Limiter

We have announced the successful development of SFCL with 22.9 kilovolt and 3000 Ampere, which is the largest capacity in the world. This will be used as a protection system for the most frequently used transformers working at 154 kilovolts and 22.9 kilovolts.

Superconducting transformer

Korea has succeeded in manufacturing 22.9 kilovolt, 1 MVA superconducting distribution transformers, and secured some of key technologies for 154 kilovolt class superconducting transformers. Korea developed the CTCC (Continuous Transposed Coated Conductor) manufacturing process with long length, which can reduce AC loss, and for the first time in the world, succeeded in developing AC loss reduction method that includes both striation and transposition.

3. Future Prospects

The biggest achievement of DAPAS program is connecting R&D results into commercialization. It promoted R&D and commercialization in collaboration with end-users from the beginning, and could lay groundwork of practical use of HTS power apparatus by transferring the developed results of HTS cable and SFCL to GENI(Green superconducting Electric power Network at Icheon substation project) of KEPCO (Korea Electric Power Corporation) successfully. In addition, HTS motor underway to Navy, SFCL underway to KEPCO, and SuNAM, the Superconducting wire company, entered the market by supplying HTS wire to Doosan Heavy Industries. Fig. 1 shows the commercialization plan for superconducting equipment of DAPAS program.

4. Conclusion

As one of an important technology necessary to prepare low carbon future green society, superconducting technology is included to the government's green technology R&D master plan and other relevant ministries and institutions of the technology development road map. In order to be competitive in the future society, the results obtained from the study of DAPAS program should be led to the development of high magnetic field and high current HTS apparatus. There are various fields of applying superconducting technologies like HTS wind generator for offshore wind turbines that can replace nuclear power, medical field by developing high magnetic field, maglev train that will be the future transportation, and so on.

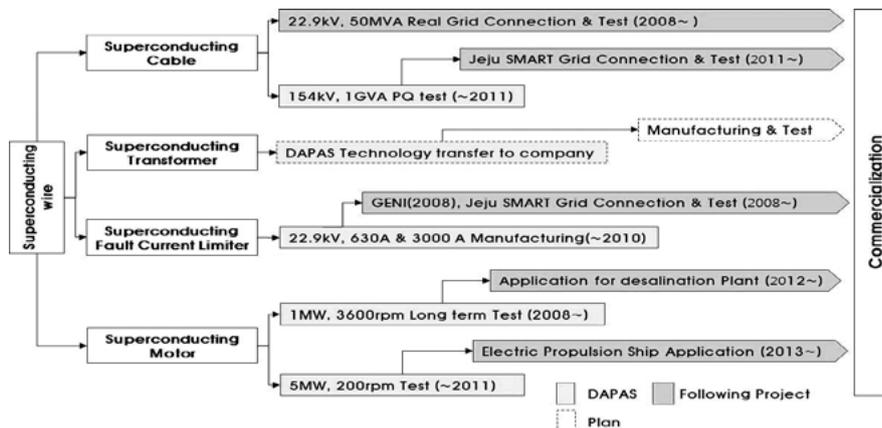


Figure 1 Commercialization plan

宇宙観測と低温技術

Space observations and cryogenic engineering

藤本 龍一(金沢大学)

FUJIMOTO Ryuichi (Kanazawa University)

E-mail: fujimoto@se.kanazawa-u.ac.jp

1. はじめに

宇宙と言うと「無限に広がる暗くて冷たい空間」というイメージを抱かれるかもしれない。確かに宇宙空間は3 Kのマイクロ波背景放射で満たされて、極低温の世界である。ここまで冷えたのは、137億年前に誕生した後、一貫して膨張を続けてきたためである。一方で宇宙には、X線を強く放射するような非常に高温の天体も数多く存在する。例えば、多数の銀河が重力的に束縛された銀河団と呼ばれる宇宙で最大規模の天体は、温度が1億K程度の高温プラズマで満たされている。これは可視光線を観測だけではわからないことであり、電波、赤外線、可視光線、紫外線、X線、ガンマ線のあらゆる波長域で観測が行われるようになった結果、我々の認識する宇宙の姿は大きく変わったのであった。そしてそれを支えた大きな要因として、技術革新があげられる。近年は技術の進歩が目覚ましく、それに歩調をあわせて宇宙観測も飛躍的に進歩している。中でも「低温技術」は大幅な感度の向上をもたらせている。本講演では、宇宙観測と低温技術の関わりについて概観したい。講演者は現在、日本の次期X線天文衛星ASTRO-Hに搭載される極低温X線分光装置の開発に携わっており、それについても紹介する。

2. 肉眼、写真乾板から冷却 CCD カメラへ(可視光観測)

1609年にガリレオが自作の望遠鏡で宇宙を観測し、これにより人類は肉眼の制約から解放された。近代天文学の端緒となった画期的な出来事である。しかしながら、天文学と宇宙観測が進歩のスピードを速めるのは20世紀に入ってからである。1920年頃にはまだ、我々の住む天の川銀河が唯一の銀河なのか、それとも宇宙に存在する多数の銀河の一つにすぎないのか、明らかになっていなかった。それに決着をつけたのがハッブルである。1924年、ハッブルはアンドロメダ銀河までの距離を測定し、アンドロメダ星雲ではなくアンドロメダ銀河であることを明らかにした。

ハッブルはまた、遠い銀河ほど速く遠ざかっているということを見出した(1929年)。これは宇宙が膨張していることを示唆するが、宇宙がビッグバンで始まり現在も膨張を続けているということが広く受け入れられるようになるには、1964年の3 Kマイクロ波背景放射の発見を待たねばならなかった。2011年にノーベル物理学賞を受賞したパールマッター、シュミット、リースは、遠方の銀河に存在するIa型超新星の観測を多数行ない、宇宙膨張が加速していることを突き止めた[1, 2, 3]。これは1998年のことであるから、ほんの10年ほど前の出来事である。それ以前は宇宙に存在している物質の重力(引力)によって、宇宙は無限に膨張するものの膨張が遅くなるか、いずれは収縮に転じると考えられていたので、宇宙膨張についての認識が大きく変わった。

この間、観測装置は大きな進歩をとげた。ハッブルの時代は写真乾板が使用されていたが、現在では冷却 CCD カメラが主流になっている。もちろん、信号はすべてデジタル化され、計算機によって高速に処理されるようになったことが、より感度の高い観測に大きく貢献していることは言うまでもない。

3. 電波観測

可視光以外の波長域での観測が始まったのもそれほど昔のことではない。比較的可視光に近い近赤外線については

19世紀には既に観測例があるが、電波観測が初めて行われたのは1931年、電波望遠鏡が登場したのは1940年のことである。電波観測では光を波として検出するので、観測装置もカメラではなく受信機である。当初は室温での観測であったが、現在では受信機の動作温度を下げて感度を上げることが広く行われている。観測する周波数帯域にもよるが、数十GHz以上になると4 K程度にまで冷却する。この場合、観測を長期間にわたって続けることを考えると、液体ヘリウムではなく、機械式冷凍機(ジュールトムソン冷凍機)が使用される。

4. 赤外線観測

赤外線の中でも、波長の長い遠赤外線の領域では状況が異なる。例えば波長100 μm は温度に換算すると100 K程度に相当する。したがって室温では望遠鏡そのものが赤外線の放射源になってしまい、観測の邪魔をする。望遠鏡を含めた観測装置一式を冷却する必要になる。1983年に打ち上げられた赤外線天文衛星 IRAS (Infrared Astronomical Satellite) では、実に720リットルの液体ヘリウムが搭載され、波長12~100 μm での全天探査が行われた。一般に、塵に覆われた天体では、天体からの放射が塵に吸収され遠赤外線として再放射される。したがって、他の波長では塵に隠されて観測することが難しい天体が、遠赤外線では非常に明るい天体として観測される。IRASによる全天探査では、塵に覆われた星や銀河が多く検出され、誕生したばかりの原始の星や銀河の研究に重要なデータをもたらした。しかしながら、寒剤を使用している人工衛星では、寒剤がなくなったら観測はできなくなる。IRASでは10か月で液体ヘリウムがなくなり、ミッションを終えた。

IRASに続いて第2世代の赤外線全天探査を行なったのが、日本の赤外線天文衛星「あかり」である。「あかり」に搭載された液体ヘリウムは170リットルで、IRASの4分の1以下であるが、2段式スターリング冷凍機を使用してヘリウムタンクの周りの放射シールドの冷却を行なうことによってヘリウムタンクへの侵入熱を抑制し[4]、液体ヘリウムへの寿命は1年半以上であった。

5. X線観測

X線は、温度が数百万K以上の高温物質や非熱的な高エネルギー現象において強く放射されるので、これらの現象を観測するのに適した波長域である。1960年代初めまでは、太陽以外の天体からのX線は強度が弱く観測するのが難しいと考えられていたが、1962年にジャコーニたちによって行なわれたロケット実験によって、宇宙にはX線を強く放射する天体が存在していることが初めて確認された。その後のX線観測により、中性子星やブラックホールと恒星の連星系では伴星から主星に降り積もったガスが数千万Kにまで加熱されることや、銀河団の重力ポテンシャルの中には温度が1億K程度の高温プラズマが閉じ込められていること等が明らかになった。現在ではX線は天体観測における最も重要な波長域の一つになっている。

X線は地球大気に吸収されてしまうため、観測するには人工衛星等の飛翔体が必要となる。観測装置としては、当初はガス検出器とコリメータを組み合わせたものが使用されていたが、その後X線反射望遠鏡が発明されて他の波長と同じよう

に撮像観測が行なわれるようになり、検出器にも改良が加えられた。1993年に打ち上げられた日本のX線天文衛星「あすか」には、米国との国際協力によりX線 CCDカメラが初めて搭載され、撮像性能、分光性能が大きく向上した。今ではX線 CCDカメラが主力の検出器の一つになっている。X線 CCDカメラは通常-100°C程度に冷却され、「あすか」ではペルチェが使用された。

6. X線マイクロカロリメータとASTRO-H SXS

分光観測は、手の届かない天体の物理状態や元素組成、運動速度を知ることができ、ありがたい観測手法である。0.1-10 keVのX線帯域には、炭素、酸素、ケイ素、鉄等の宇宙に多く存在する元素のK特性X線が存在し、分光観測を行なう上でも重要な波長帯の一つである。X線 CCDカメラ(シリコン半導体検出器)の登場により、X線観測の分光性能が向上したとはいえ、その分解能(エネルギーを半値全幅で割った値)は6 keVのX線に対して50程度であり、可視光に比べるとはるかに小さい。この性能では輝線の微細構造を見分けることができないので、不定性が残ってしまう。分光性能を1桁以上向上させ、微細構造を見分けることがX線天文学にとっての悲願であった。これに対しては回折格子を使うことが一つの方法である。現在軌道上で活躍している米国のチャンドラ衛星や欧州のXMMニュートン衛星には回折格子が搭載されており、特に波長の長い(エネルギーの低い)X線に対しては有効である。ただし、もともと光子数の少ないX線領域においては回折格子は効率が悪く、また銀河団や超新星残骸といった広がった天体を観測すると性能が落ちてしまうという問題がある。

このような問題を克服する観測装置としてもっとも期待されているのが、X線マイクロカロリメータである。これはX線光子を吸収した際の素子の温度上昇を高い精度で計測することにより、入射したX線のエネルギーを正確に求める検出器である。0.1 K以下の極低温に冷却することにより、半値幅10 eVを切るエネルギー分解能(6 keVのX線に対して分解能600以上)を実現することが可能である。X線マイクロカロリメータの研究は、衛星への搭載を前提に1980年代に米国で始まった[5]。その後紆余曲折を経て、X線分光装置XRSとして日本のX線天文衛星「すざく」に搭載されて2005年に打ち上げられた。XRSは軌道上で0.06 Kを達成、要求を上回る半値幅7 eVという性能を実現した[6]。しかしながらヘリウム排気バルブの設置場所に設計上の不具合があり、打ち上げ1か月で液体ヘリウムが消失して観測を行なうことができなくなった。

XRSの不具合を踏まえて設計が一から見直され、2014年打ち上げ予定のJAXAの次期X線天文衛星ASTRO-H [7]に搭載されるのが、軟X線精密分光装置SXSである[8]。SXSの冷却装置の中心は断熱消磁冷凍機(ADR)と30リットルの超流動液体ヘリウムであり、この点はXRSと同じである。X線の場合はセンサのみを冷却すればよく、望遠鏡を冷却する必要はない。そのため、必要になる液体ヘリウムの量は赤外線の場合に比べてずっと少なくてすむ。その代わりに、液体ヘリウムへの侵入熱を極限まで小さくすることが求められる。そのためXRSでは固体ネオンを使用していたが、SXSでは20 K級の2段階スターリング(2ST)冷凍機と、4 K級のジュールトムソン(JT)冷凍機を使用し、軌道上で3年以上の寿命を実現する[9]。スターリング冷凍機は「あかり」で実績のあるものの改良版、JT冷凍機はSMILESミッションで実績のあるものの改良版であり、いずれも信頼性の向上が図られている[10]。JT冷凍機の予冷機にも2ST冷凍機が使用されており、さらに2ST冷凍機は1台が故障しても観測を続けられるように冗長化されている。したがって合計で4台の2ST冷凍機を使用する。ADRは、1.3 Kの熱浴から50 mKを実現する2段階ADRと、JT冷凍機を熱浴として1.3 K以下を作り出すことができる3段階

ADRの3段階構成になっている。これにより、万が一不具合があっても液体ヘリウムが消失しても、機械式冷凍機とADRだけを使って観測が続けられるようになっている。センサとADR、その制御回路はNASAが担当し、液体ヘリウムと機械式冷凍機を含む冷却系とその制御回路、デジタル信号処理回路はJAXAを中心とする日本のグループが担当する。さらに欧州の協力も得ている。エネルギー分解能は少なくともXRSと同等以上、目標はXRSの2倍近い4 eVに設定している。SXSが実現できれば、例えば銀河団ガスの運動を直接測定することが可能になり、銀河団が衝突・合体して成長していく様子が初めて観測的に明らかになるはずである。これは現在の宇宙の大規模構造がどのようにして作られたのかを観測的に明らかにする上で重要な一歩である。

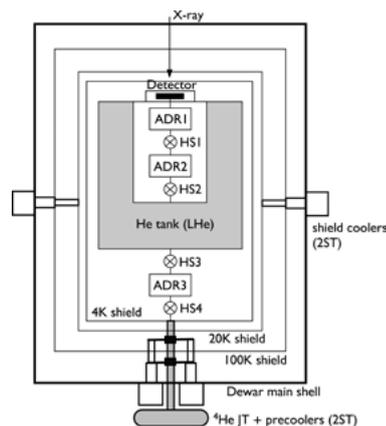


Fig.1 Schematic view of the SXS Dewar and cooling system

7. おわりに

宇宙観測の高精度化に伴い、観測装置を冷却する必要性は地上でも軌道上でも今後ますます高まっていくものと予想される。JAXAが進めている小型科学衛星のプログラムでも、極低温を必要とする計画がいくつか提案されており、今後は軌道上において極低温が必要な場合でも、寒剤を使用しないミッションが主流になっていくであろう。前節で述べたように、ASTRO-H SXSは液体ヘリウムが消失した場合でも観測を続けられるようになっており、基本的には寒剤フリーのオペレーションが可能である。SXSの開発を通して得られた知見は、今後のミッションにとっても貴重なものと期待される。

SXSは、JAXA、首都大、埼玉大、立教大、理研、NASA他の多数の研究者との国際共同実験です。金沢大の松本宏一教授並びに低温工学・超電導学会の皆様にはこのような講演の機会を頂きましたことをこの場を借りてお礼申し上げます。

参考文献

1. S. Perlmutter, et al: *Astrophys. J.*, Vol. 517 (1999) p. 565
2. B. P. Schmidt, et al.: *Astrophys. J.*, Vol. 507 (1998) p. 46
3. A. G. Riess, et al.: *Astron. J.*, Vol. 116 (1998) p. 1009
4. T. Nakagawa, et al.: *Publ. Astron. Soc. Japan*, Vol. 59 (2007) p. S377
5. S. H. Moseley, J. C. Mather: *J. Appl. Phys.*, Vol. 56 (1984) p. 1257
6. R. L. Kelley, et al.: *Publ. Astron. Soc. Japan*, Vol. 59 (2007) p. S77
7. T. Takahashi, et al.: *Proc. SPIE*, Vol. 7732 (2010) 77320Z
8. K. Mitsuda, et al.: *Proc. SPIE*, Vol. 7732 (2010) 773211
9. R. Fujimoto, et al.: *Proc. SPIE*, Vol. 7732 (2010) 77323H
10. Y. Sato, et al.: *Cryogenics*, Vol. 50 (2010) p. 500