

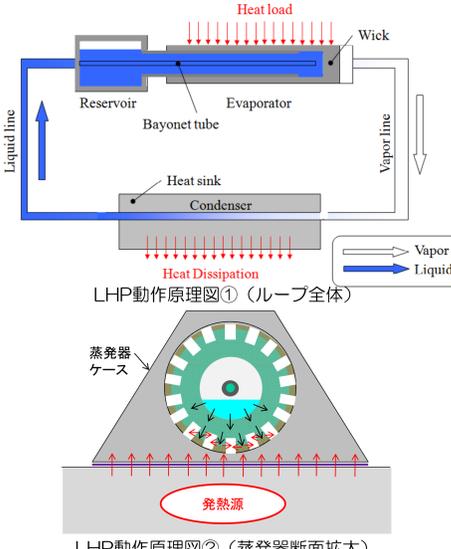
P7-094 先進型熱制御デバイス ループヒートパイプの研究開発



岡本 篤, 富中 龍太, 川崎 春夫, 杉田 寛之 (JAXA研究開発本部熱グループ)
小川 博之 (JAXA宇宙科学研究所熱・流体グループ), 長野 方星 (名古屋大学),
大串 哲朗 (広島国際大学), 村上 正秀 (筑波大学), 永井 大樹 (東北大学)

ミッションの高度化に伴い、従来よりも高度かつ複雑な熱制御技術が要求されてきている。また、複雑に熱環境が変動する次世代宇宙機ミッションは、現状の熱制御技術のみでは対応できないことが予想される。そのような背景からブレークスルーとして、毛細管力のみで作動流体が循環し、蒸発潜熱を利用して大容量・長距離熱輸送が可能な二相流体ループシステムである、ループヒートパイプが注目されている。本発表では、その技術、国内外の技術動向および日本における研究開発の状況について報告する。

ループヒートパイプ (Loop Heat Pipe: LHP) とは・・・



LHPの特長

- **重力の影響を受けにくい**
ヒートパイプの場合は熱輸送特性が重力の影響を強く受けるため、地上で行う検証試験の際にはヒートパイプが正常に動作する姿勢になるよう配置する必要が生じるが、LHPは重力の影響を受けにくい試験時の姿勢制約が少ない。この特長は、射場においてロケット搭載後にトップヒートでの動作が必要となる場合にも生かされると考えられる。
→地上試験時・射場作業時の姿勢制約が少ない

- **高発熱機器の自由なレイアウトが可能**
従来の宇宙用ヒートパイプは内壁にグルーブやウィックが設けられているため、曲げる等の加工は可能だが、複雑なレイアウトは不可能である。一方、LHPの蒸発器と凝縮器は平滑管（内壁に特別な加工を施していない配管）で結ばれているため、複雑な配管レイアウトが可能であり、高発熱機器の自由な配置が可能。
→複雑な経路をもつ排熱パスの確保が可能

- **高精度な温度コントロールが可能**
リザーバの温度をヒータやペルチェ素子等を用いてわずかな電力により加熱冷却することで、ループの動作温度（＝飽和温度）を高精度に制御／一定制御が可能。
→外部熱環境が大きく変動する条件下において、タイトな温度制御が要求される機器の熱制御に極めて有効

- **保温ヒータ電力低減が可能**
ヒートパイプ：温度差が存在する限り機能し続けるため、冷えずすぎる場合にはヒータ保温が必要。
LHP：リザーバの温度を蒸発器よりも少しだけ上げると圧力バランスが崩壊し冷媒の循環、すなわち熱輸送をストップすることが可能。（シャットダウン機能）
→保温ヒータ用電力の大幅な低減が可能

LHP動作原理

- ①ウィック（多孔質）を内蔵した蒸発器に熱源からの熱が入ると、LHP内部に封入された作動流体ウィック内部で蒸発。
- ②ウィック内部に形成されるメニスカスの曲率半径の違いにより毛細管力が発生。
- ③毛細管力を駆動源として蒸気が蒸気管を流れ、凝縮器で凝縮し、液管を通して、蒸発器に戻ってくる。
- ④戻ってきた液は蒸発器で再度蒸発する。

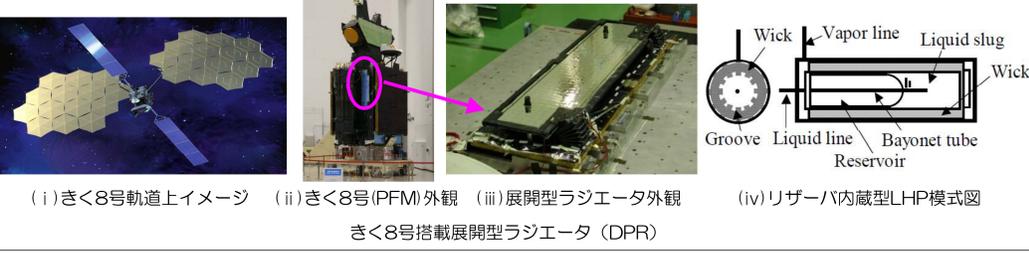
上記サイクルを自動的に繰り返すことにより冷媒の蒸発潜熱を利用した大容量・長距離熱輸送が行われる。

LHPは1980年代に旧ソ連で発明・開発された技術である。ソ連の崩壊後、技術が公開されロシア・米国を中心に発展。ロシア、米国では1990年代後半から軌道上実証を経て実用され始め、**ロシア、欧米ではすでに多くの搭載実績がある**。最初は、1つの蒸発器に対して1つの凝縮器を持つタイプのLHPのみであったが、最近では、複数の蒸発器や複数の凝縮器を持つタイプのLHPの研究開発が行われている。また、近年では、宇宙機への適用だけでなくパソコンのCPL冷却などの地上アプリケーションへの適用検討も行われている。

衛星名	国	打上げ年	LHPの用途
商用衛星/ALPHA	米国	1998	搭載機器の熱制御
FY1-C	ロシア	1999	バッテリーの熱制御
FY1-D	ロシア	2002	バッテリーの熱制御
Yamal-200	ロシア	2003	バッテリーの熱制御
ICESat/GLAS	米国	2003	レーザーの熱制御
AURA/TES	米国	2004	ミッション機器TESの熱制御
SWIFT/BAT	米国	2004	ミッション機器BATの熱制御
INMALSAT-4	米国	2004	搭載機器の熱制御

一方、**日本ではまだ軌道上実証段階**にあり、きく8号（2006年末打上げ）に実験装置としてLHPを利用した展開型ラジエータ（DPR, DeDeployable Radiator）を搭載し、日本初のLHP軌道上実証実験を実施中。打上げ後、約4年経過した現在でも、劣化はほとんど見られず安定した熱輸送特性を示している。

DPR搭載タイプのLHP（リザーバ内蔵型LHP、動作安定性を優先した日本独自の形式）は実用化前の最終段階にあり、実装性向上/システム組込/信頼性評価などを実施している。また、DPR開発のノウハウを生かして温度制御/シャットダウン等が可能な世界標準タイプのLHP（リザーバ外付け型LHP）の研究開発も並行して実施中である。本ポスターではこれらの活動の概要を紹介する。



研究開発実施内容

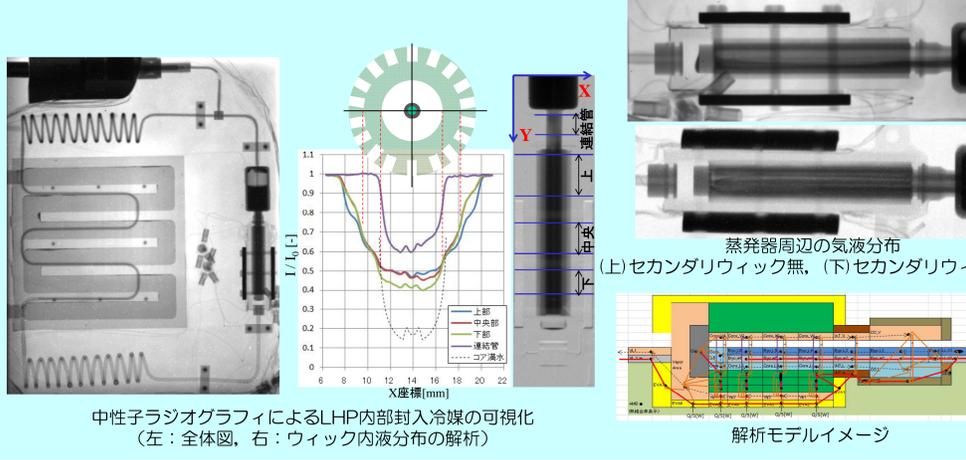
■キーテクノロジーの研究開発

- ① **プライマリウィック開発**
 - ・小型・軽量高分子ウィックの開発
 - ・ウィック特性評価（毛管力、浸透率、熱伝導率）
 - ・形状パラメータの最適化検討
 - ・要素試作/評価
- ② **セカンダリウィック開発**
 - ・要求機能の整理
 - ・作業性検討/試作
 - ・液移送能力の評価
 - ・ループ組込後の性能評価



■解析モデル構築/精度向上

- ① **定常/非定常解析モデルの構築**
LHPの性能・挙動を予測/模擬できるような解析モデルの開発を実施中、試作ループの評価試験結果をフィードバックし、予測精度の向上を行う。
- ② **LHP内部の作動流体挙動の把握**
中性子ラジオグラフィ技術を利用してLHP動作時の作動流体の挙動を確認する。H/W設計の妥当性の確認を行うと共に、画像と同期して取得する温度データを使って解析モデルの精度向上を実施。



■評価試験用ループ試作/評価

- ① **リザーバ内蔵型LHP**
きく8号搭載DPRにて軌道上実証を行ったLHPの実装性（取付I/F）を向上したBBMを製造して評価試験を実施。その後、次期高性能静止衛星システムSTMに搭載して熱真空試験によりシステム搭載状態における特性評価を実施。
- ② **リザーバ外付け型LHP**
温度制御性、シャットダウン機能を有するリザーバ外付け型LHP（実験室モデル）の設計/試作し、評価試験を実施。

■宇宙機への適用検討/海外製LHPの評価

- 下記ミッションに対してLHPの適用検討を実施（設計検討、H/W評価、解析）
- ・ **ASTRO-H**
搭載ミッションである軟X線カラーメータ（SXS）の冷却系排熱システムに海外製LHPを使用予定。LHPの適用検討、購入LHPの仕様検討・ベンダーとの仕様調整を実施。今後、評価試験を実施予定。
 - ・ **SPICA**
LHPを使用した冷却系排熱システムを検討し、従来技術を用いたシステムとのトレードオフ検討を実施。
 - ・ **月面ローバー**
LHPを使用した冷却系排熱システムを検討し、従来技術を用いたシステムとのトレードオフ検討を実施。

まとめ

次世代のスタンダードな熱制御技術として期待されるループヒートパイプについて、その特徴、海外の開発動向および日本における研究開発の実施内容について紹介した。今後、ミッションの高度化および宇宙機が遭遇する熱環境の複雑化に伴い、熱制御系に対する要求が高度化することは容易に想像でき、そのような熱制御要求に柔軟に対応できるループヒートパイプ技術を早急に実用化（実用ミッションへの適用）する必要がある。まずは海外にキャッチアップすることを目指して、国内の有識者の叡智を集結して研究開発を進めている。