

IIII 特集：小型衛星・実験装置 その2 IIII  
(解説)

## 温度勾配炉と実験供試体の開発について

深澤 智晴<sup>1</sup>・岡 利春<sup>1</sup>・荒井 康智<sup>2</sup>・石川 毅彦<sup>2</sup>

### Development of a Gradient Heating Furnace and Sample Cartridges

Tomoharu FUKAZAWA<sup>1</sup>, Toshiharu OKA<sup>1</sup>, Yasutomo ARAI<sup>2</sup> and Takehiko ISHIKAWA<sup>2</sup>

#### Abstract

Japanese Experiment Module - Pressurized Module (JEM-PM) was launched to the International Space Station (ISS) on the STS-124 (1J) in June 2008. The KOBAIRO rack developed by IHI Aerospace (IA) under the contract with Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) was installed on JEM-PM in January 2011. This report describes a Gradient Heating Furnace (GHF) and sample cartridges developed for microgravity experiments.

**Keyword(s):** GHF, Sample Cartridge, Hicari, Alloy Semiconductor

#### 1. はじめに

現在、軌道上で稼働している国際宇宙ステーション (ISS) 日本実験モジュール (JEM) は、2008年3月から2009年7月の間に3回に分けてスペースシャトルによって打ち上げられた。JEMの与圧部(常温・常圧環境)には数多くの実験装置が搭載され、現在も複数の実験が行われている。その実験装置の一つに「温度勾配炉 (GHF)」がある。

GHFは、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) との契約に基づき、(株) IHI エアロスペース (IA) によって開発・製造された。そして2011年1月22日に種子島宇宙センターからHTV2号機にて打ち上げられた。

GHFの主な目的は、重力の影響の非常に小さい環境(微小重力環境下)において、抵抗加熱式のヒータからの輻射熱を用いて金属や半導体材料の熔融・凝固を行ない、金属融体の物性値や結晶成長機構の解明などに使用されるものである。ここではGHF及びGHFに用いる実験供試体(試料カートリッジ)の概要について述べる。

#### 2. 実験装置

##### 2.1 温度勾配炉 (GHF) の概要

###### 2.1.1 GHFの構成

GHFの主要な構成部品は以下の通りである。

- ① 炉体部 (GHF-MP) .....2.2 項参照
- ② 試料自動交換機構 (SCAM) .....2.3 項参照
- ③ 温度勾配炉制御装置 (GHF-CE) .....2.4 項参照
- ④ 試料自動交換機構制御装置 (SCAM-CE) .....2.4 項参照
- ⑤ 実験支援系 (電力供給装置, アビオニクスエア供給装置, 真空排気装置)

GHFは、JEM 与圧部にシステム機器や実験装置などを搭載するための「ラック」と呼ばれる架台を一台すべて使用する、実験装置の中では比較的大きな装置である。このGHFが搭載されたラックは、装置の名称から「KOBAIRO ラック」と呼ばれている。

1 株式会社 IHI エアロスペース 宇宙技術部 宇宙利用技術室 〒370-2398 群馬県富岡市藤木 900 番地  
Space System Department, Space Utilization Office, IHI AEROSPACE Co.,Ltd, 900 Fujiki, Tomioka, Gunma, 370-2398 Japan  
2 独立行政法人 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 ISS 科学プロジェクト室 〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1  
Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), 2-1-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki,  
305-8505, Japan  
(E-mail: tomoharu-fukazawa@iac.ihi.co.jp)

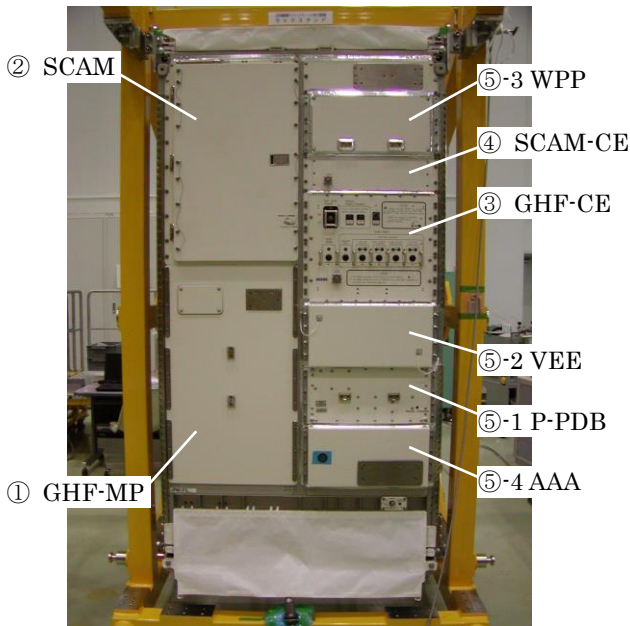


Fig. 1 KOBAIRO Rack

KOBAIRO ラックには、電気炉としての主要なコンポーネント（①炉体部、②試料自動交換機構、③④各制御装置）の他に、それらの作動を支援するための装置（⑤実験支援系）が搭載されており、この実験支援系には、電力供給装置（P-PDB）、真空排気装置（VEE）、冷却水供給装置（WPP）、アビオニクスエアアッセンブリ（AAA）がある。各装置は以下の役割を担い GHF の作動をサポートしている。（Fig.1 参照）

- ⑤-1 P-PDB : ラック内機器への電力供給及び通信の制御
- ⑤-2 VEE : 真空チャンバ内の真空排気
- ⑤-3 WPP : 炉体部、各制御装置の冷却
- ⑤-4 AAA : ラック内のエアの循環による装置の冷却、煙検知による火災検知

### 2.1.2 基本仕様

GHF の基本的な仕様は以下の通りである。

- ・加熱温度範囲 : 500~1600℃以上  
(現在は温度リミッターの設定により 1375℃)
- ・加熱炉内雰囲気 : 真空雰囲気
- ・温度安定性 : ±0.2K (1600℃, 1時間)
- ・温度設定精度 : ±0.4%以内
- ・温度勾配 : 最大 150K/cm (1450℃)
- ・加熱室移動速度 : 0.1~200mm/hr
- ・移動速度安定性 : ±1%以下 (10~200mm/hr)  
±10%以下 (0.1~10mm/hr)

## 2.2 炉体部 (GHF-MP)

実験試料である金属や半導体材料の熔融・凝固を行う多目的真空炉である。

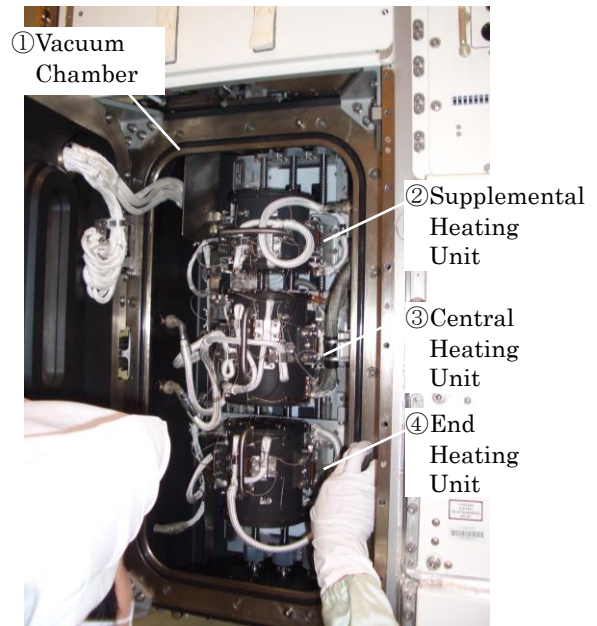


Fig. 2 GHF-MP

高さ : 746mm × 幅 : 368mm × 深さ : 288mm の①真空チャンバの中に、外径 : 135mm, 内径 : 40mm, 長さ 100mm (②補助室), 170mm (③中央室), 150mm (④端部室) の 3 つの独立した加熱室 (ヒータ) が縦一列に配置されている。（Fig.2 参照）

これら 3 つの加熱室は、位置と移動速度及び温度が個別に制御出来るようになっており、研究者は実験の目的に合わせて、これらのパラメータを設定することにより、要求に沿ったさまざまな温度プロファイルを設定することが可能である。

### 2.3 試料自動交換機構 (SCAM)

実験試料の入った試料カートリッジ (3 項参照) を、炉体部に着脱する機構である。

本機構は、大きく分けて 3 つの部分から構成される。試料カートリッジを保持し、GHF-MP に着脱する位置に移動する「①マガジン」と、試料カートリッジを掴んで GHF-MP に取付け・取外しする「②ロボットアーム」、そして取付けられた試料カートリッジを確実に GHF-MP に固定する「③クランプ」である。（Fig.3 参照）

マガジンには、最大 15 本まで試料カートリッジを装着することができ、装着された試料カートリッジは、地上からのコマンド操作により全自動で GHF-MP に取付け・取外しすることが可能である。

実験開始前と終了後は、宇宙飛行士によって試料カートリッジをマガジンから着脱する必要があるが、全ての試料カートリッジを取付けてしまえば、実験期間中は地上からのコマンド操作のみで連続して実験を行うことができるため、宇宙飛行士による作業負荷の大幅な低減が可能となっている。

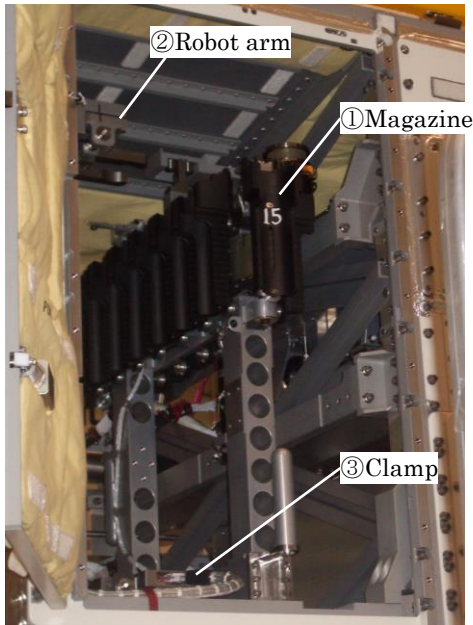


Fig.3 SCAM

## 2.4 制御装置

温度勾配炉制御装置 (GHF-CE) は, GHF 全体の制御及びコマンドの送受信や, 実験データや装置の状態情報の送信を行なう。

また, 試料自動交換機構制御装置 (SCAM-CE) は, GHF-CE を介して, 地上から送られてくるコマンドに従い SCAM の制御を行なう。

## 3. 実験供試体 (試料カートリッジ)

### 3.1 概要

研究者の提供する実験試料を封入し, GHF-MP にて材

料実験を行うためのものである。(Fig.4 参照)

試料カートリッジの基本的な構成は以下の通りである。

- ① ボス部
- ② カートリッジサポート部
- ③ カートリッジ部
- ④ ヒートシンク部
- ⑤ 熱電対

また, 主な仕様は以下の通りである。

・寸法・形状:

全長: 598mm 以下

外径:  $\phi$  60mm (ボス部 (突起等を除く))

$\phi$  35mm (カートリッジサポート部)

$\phi$  35mm 以下 (カートリッジ部)

・質量: 6 kg 以下

・材質: ステンレス (SUS304) (ボス部)

コロンビウム合金 (C-103)

(カートリッジサポート部・カートリッジ部)

モリブデン (Mo) (ヒートシンク部)

・温度測定: 5 点 (C 型熱電対)

試料カートリッジの構成品の機能は以下の通りである。①ボス部は, GHF と機械的・電氣的インタフェースを持ち, 真空チャンバのシールの一部と試料カートリッジの熱電対信号の中継を担っている。②カートリッジサポート部は③カートリッジ部の把持を行い, その中の④ヒートシンク部は, 実験試料に適切な温度勾配をつけるために③カートリッジ部の熱をボス側に排熱する機能を持っている。③カートリッジ部は, 研究者から提供される実験試料の封入容器である。⑤熱電対は, 1 試料カートリッジあたり 5 点まで設置可能であり, 研究者の希望する箇所を測温することが可能である。

①のボス部を除くカートリッジ全体の構造は, 研究者

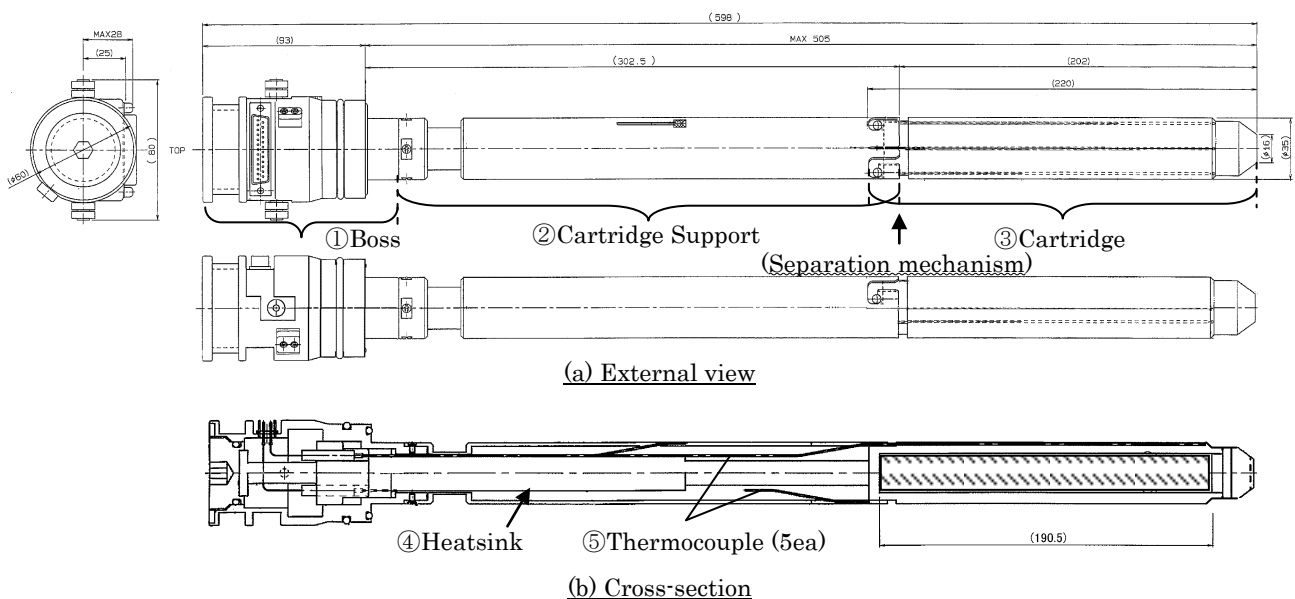


Fig. 4 Sample cartridge (Hicari theme cartridge)



Fig. 5 Hicari theme cartridge



Fig. 6 Alloy Semiconductor theme cartridge

の実験目的や実験試料に合わせて、包絡寸法を逸脱しない範囲で個別に設計・製作される。Fig. 4 の Hicari カートリッジでは、③中の実験試料封入部は内径 23mm 弱、長さ 190.5mm であった。

②カートリッジサポート部と③カートリッジ部の材質は、航空機エンジンのタービンブレードや、ロケットのスカートノズルなどに使用される耐熱合金の一つである、コロンビウム合金 (C-103) を使用しており、GHF-MP の仕様である 1600°C の加熱にも対応可能となっている。

また、この試料カートリッジは、持込の大きさ制限が厳しいソユーズでの回収を想定しており、実験終了後に③カートリッジ部を切り離すことが出来る「分離機構」を備えている。2013 年現在では、Space-X によるカートリッジ全体の回収も可能であり、複雑な分離機構は必須ではないが、回収手段の多様化と回収重量の軽減には極めて有利である。

### 3.2 Hicari テーマカートリッジ

Hicari テーマは、実験試料にシリコン (Si) とゲルマニウム (Ge) を用い、JAXA の開発した結晶成長方法の一つである TLZ 法 (Traveling Liquidus-Zone Method) の有効性を、微小重力環境を利用して実証するための実験である。

実験テーマ：「微小重力下における TLZ 法による均一組成 SiGe 結晶育成の研究」

代表研究者：木下 恭一主幹研究員 (JAXA 宇宙科学研究所 ISS 科学プロジェクト室)

本テーマは、所定の温度プロファイルになるように設定された加熱室を、一定の移動速度で移動させることにより  $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$  の組成の半導体結晶を成長させる、GHF の持つ機能・性能が十分に発揮される実験である。

カートリッジ性能は、温度勾配：15K/cm (BBM による)、加熱可能最高温度：1430°C (地上対照実験炉による) である。

Hicari テーマ用試料カートリッジ (Fig.5 参照) は 4 式製作され、2011 年 1 月に打ち上げられた HTV 2 号機で JEM に輸送された。現在 (2013 年 8 月時点)、既に 2 式の実験が終了し、うち 1 式は既に地上に回収され分析が行なわれている。

### 3.3 Alloy Semiconductor テーマカートリッジ

Alloy Semiconductor テーマは、実験試料にインジウム (In)、ガリウム (Ga)、アンチモン (Sb) の混晶半導体を用いて微小重力環境を利用して結晶成長を行い、その成長過程を調べるための実験である。

実験テーマ：「微小重力環境下における混晶半導体結晶成長」

代表研究者：稲富 裕光 准教授 (JAXA 宇宙科学研究所 学際科学研究所)

本テーマは、加熱中に一定時間ごとに熱パルスを印加して、成長中の結晶に成長縞を形成させ、その結果から成長過程の知見を得るための実験である。そのため、成長中の試料に確実に短時間で熱パルスが伝達するように、Hicari カートリッジと比較して、カートリッジ部の全長と直径を小型化 (149mm × φ25mm) して熱容量を低減させると共に、表面にサンドブラスト処理を施して輻射率を上げる工夫を実施した。

Alloy Semiconductor カートリッジ (Fig.6 参照) は 5 式製作され、2012 年 7 月に打ち上げられた HTV 3 号機によって JEM に輸送された。現在 (2013 年 8 月時点)、うち 1 式の実験が終了している。

## 4. 最後に

GHF を搭載した KOBAIRO ラックは、JEM に搭載される実験ラックとしては最初に完成 (2004 年 3 月) したが、諸般の事情により打上げが凍結されていた。それが 2011 年 1 月に打上げられた。軌道上での初期検証では幾つかの不具合が発生したものの解決され、今年になって本格的な実験が始まり、成果が出始めている。

現在は、ここで紹介した 2 つの実験テーマが順次行なわれているが、今後、GHF を使用する新たな実験テーマが選定され、引き続き成果が出されていく事を期待している。

### 参考文献

- 1) K. Murakami: J. Jpn. Soc. Microgravity Appl. **19** (2002) 164

(2013 年 8 月 30 日受理, 2013 年 10 月 8 日採録)