

# 銀河形成の謎を解き明かすー小型 JASMINE 計画

宇都宮 真

## まえがき

小型 JASMINE 計画 (Japan Astrometry Satellite Mission for INfrared Exploration) は、赤外線を用いて位置天文観測を行う科学衛星のプロジェクトである<sup>1)</sup>。超巨大ブラックホールが存在する銀河系の中心部を観測して、銀河系が形成された謎を解明することを目的としている。国立天文台と京都大学が中心となって概念検討を行い、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の公募型小型計画<sup>2)</sup>に提案して、プリプロジェクト候補のひとつとして認められ、2024 年の打ち上げを目標に開発を進めている。この衛星に搭載する望遠鏡は、新規に開発したゼロ熱膨張のスーパーインバーを用いる予定である。実現すれば衛星搭載用としては、世界初のオール金属製の望遠鏡となる。本報では、小型 JASMINE 計画の科学目標と望遠鏡の開発状況について紹

介する。

## 小型 JASMINE の科学目標

### 位置天文観測

位置天文学とは、星像を観察して星やその他の天体の位置と距離およびその運動を求める天文学の分野である。その起源は古代ギリシャのヒッパルコスまで遡り、最も古い自然科学と言ってよい。地球は太陽の周りを公転しているので、星は天球上を1年間で楕円を描くように見掛け上動いている。その楕円の長半径を年周視差と呼び、その大きさから三角測量の原理で星までの距離を求めることができる(図1)。星は周囲の質量などの影響を受け固有の運動をしている。この運動と合わせると星は天球上をらせん型に動くこととなる(図2)。らせんからずれる動きが観測されれば、惑星系、連星系、重力レンズ効果など引力を及ぼす現

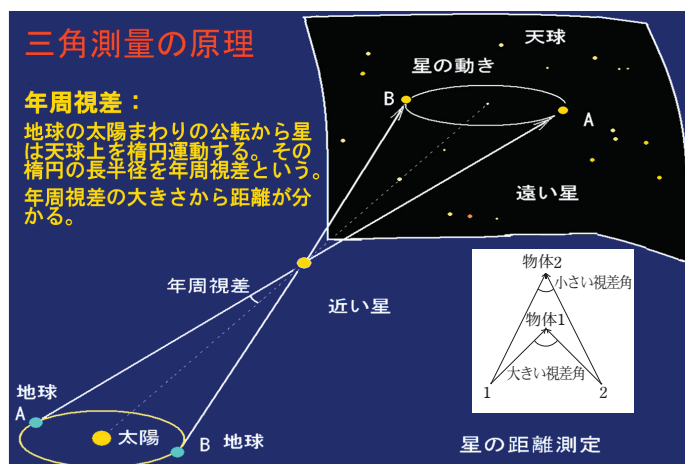


図1 星までの距離測定の原理。

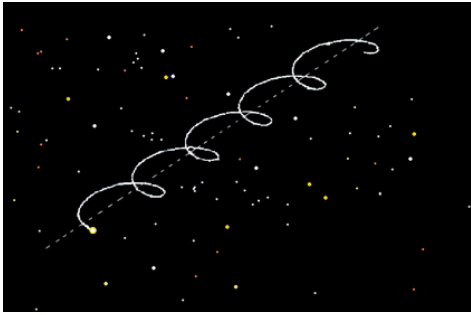


図2 星のらせん運動。

象が星の周囲に存在するということであり、ブラックホールの発見や系外惑星の発見など見えない現象の解明に繋がる。位置天文学は観測天文学の基礎となる手段であり、新たな位置天文観測結果が新規の宇宙理論に結び付き発展してきた。

星までの距離を求める原理はシンプルであるが、星はかなり遠方にあるので年周視差は非常に小さく、極めて高精度な計測が必要である。地動説の直接の証拠として観測が試みられてきたが、300年近く経た 1838 年になってようやくベッセルが観測に成功した。最も近い星(ケンタウルス座  $\alpha$ , 距離 4.3 光年)でも年周視差は 0.77 秒角、すなわち 1 万分の 2 度程度である。小型 JASMINE は天

の川銀河の中心部の構造を解明することが目的である。天の川銀河の中心部の少し先、バルジ構造の奥までを見ようとすると、3 万光年離れているので、年周視差はただだか 100 マイクロ秒角程度である。これは東京から富士山の頂上にいる人を見た時、髪の毛 1 本の太さに相当する。このようなとてもない高精度で観測を行うため、観測装置開発やデータ解析手法に創意工夫を凝らしているのが位置天文学という分野である。地上から観測する場合には空気の揺らぎが邪魔をする。世界最大級のスバル望遠鏡を用い、揺らぎの校正を施しても 1 ミリ秒角の分解能しか得られない。100 マイクロ秒角以上の高精度で観測するには、衛星を打ち上げて宇宙から観測するしか手段がない。

## 小型 JASMINE の科学目標

天の川銀河を上から見ると渦上の腕の部分と、中央の膨らんだ部分(バルジ)がある(図3)。バルジのさらに中心の領域を中心核バルジと呼んでいるが、そこには太陽の 300 万倍の質量を持つ巨大ブラックホールが存在することが判っている。銀

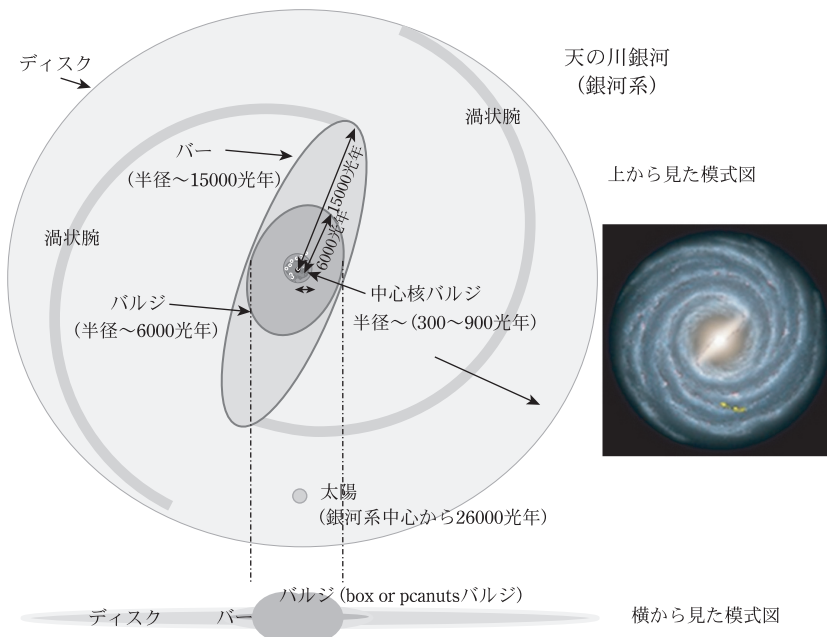


図3 天の川銀河の模式図。

中心核バルジで、小型JASMINEが世界で初めて解析する研究課題

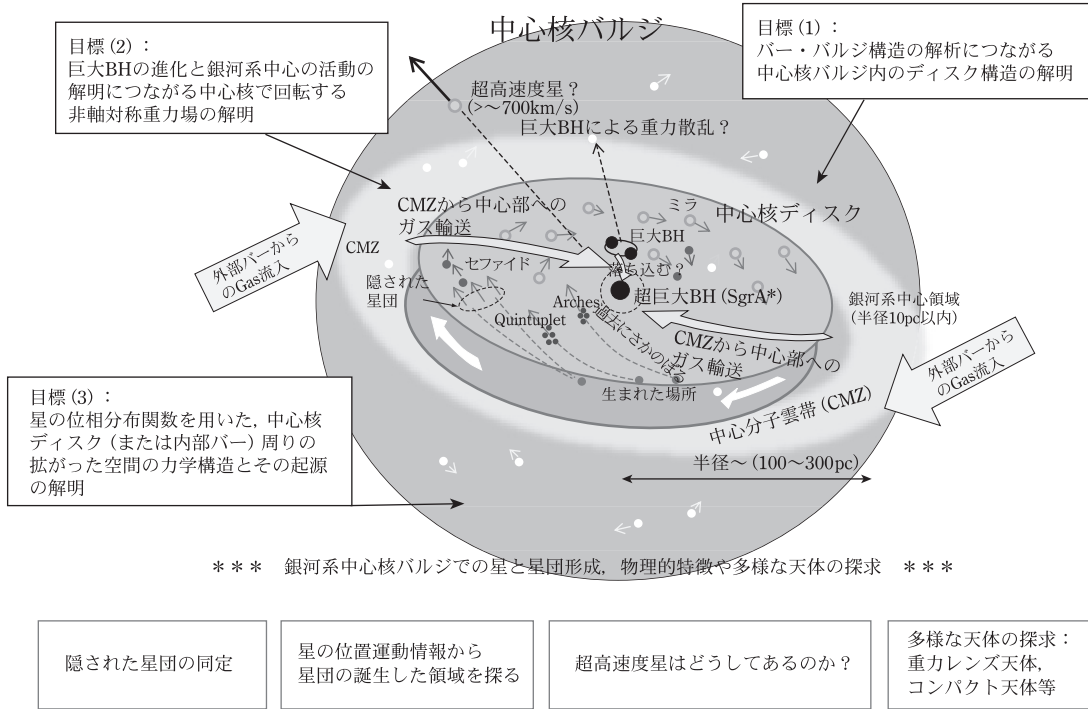


図 4 小型 JASMINE の科学目標.

河系の中心部は塵が多く、可視光は吸収されるので、可視光による観測ができない。特に中心から半径 100 ~ 300 パーセク<sup>注)</sup> のエリアは観測データが少なく、構造が分かっていない。ミッシングゾーンと呼ばれている。小型 JASMINE はここに焦点を絞り、中心核バルジの星の位置と固有運動を調べて、バルジ構造の解明に寄与する研究を行う。観測には比較的吸収が少ない赤外線を用いる。

図 4 に小型 JASMINE の科学目標を示した。主要な目標は次の 3 つである。

- 1) 中心核バルジ内のディスク構造の解明
- 2) 中心核で回転する非軸対称重力場の解明
- 3) 中心核ディスク、内部バーの周りに広がった空間の力学構造の解明

主要な目標の他にも、中心核バルジに属する多数

注) パーセクとは、天文学で用いる距離を表す単位で、年周視差がちょうど 1 秒角になる距離をいう。3.26 光年、 $3.1 \times 10^{16}$  m にあたる。

の星の固有運動が分かれば、様々な謎が解明されると期待されている。たとえば、固有運動から元は同じ星団だった星が分かり、星団が誕生した領域を推定することができる。重力レンズ効果から新たなブラックホールやコンパクト天体が見つかる可能性がある。これらの発見の基礎となる位置天文データを提供することが小型 JASMINE の最大の科学的意義である。

年周視差を観測するには、春分、秋分の時期が適している。春秋分 3 か月間バルジ方向を観測し、夏季や冬季はバルジとは別方向にある興味深い天体に望遠鏡を向けて観測することを行う計画としている。これらの観測は、国際的な応募をベースとして行う。

## 小型 JASMINE のミッション概要

小型 JASMINE の目的は、銀河系中心部の天体

表 1 小型 JASMINE の仕様.

	項目	仕様
望遠鏡	主鏡口径	30 cm
	焦点距離	3.9 m
	視野面積	0.6 度 × 0.6 度
	観測波長	Hw バンド, 1.1~1.7 $\mu\text{m}$
	検出器	HgCdTe
衛星	質量	約 400 kg
	外形	1000 × 1000 × 2800 mm
軌道	軌道	太陽同期軌道, 高度 550 km
打上げ	ロケット	イプシロン
寿命	観測期間	3 年

について位置および測光の時系列データをカタログとして提供することである。そのデータを解析して得られたそれぞれの天体の年周視差と固有運動なども提供する。位置天文学的データは観察天文学の基礎であり、それらのデータを天文学者や宇宙物理学者が解析し、宇宙理論が発展することが期待される。したがってできるかぎりたくさんの星についてデータを得ることが好ましく、15等級以上の明るさの65,000個以上のバルジ星を見る予定である。精度が高い20マイクロ秒角で年周視差を観測できるバルジ星は、12.5等級以上の明るさの星7,000個程度になる。

小型 JASMINE に搭載する望遠鏡の仕様を表 1 に示した。主鏡口径が 30 cm 級の小さな望遠鏡である。

打上げの軌道は、高度 550 km 程度の太陽同期軌道を想定しており、1 周回約 100 分である。地球が視野に入る方向へは望遠鏡を向けられず、半周回 50 分間しか観測できない。50 分間連続撮像して、50 分間非観測時間があり、再度 50 分間観測を行う。それを観測期間終了まで繰り返し行う。年周視差を求めることが目的なので、春分、秋分を挟んだそれぞれ 3 か月間観測を行う。夏と冬は、バルジ方向の観測には適さないため、別の興味ある天体の観測に振り向けることを計画している。図 5 に観測方向と衛星の姿勢を示した。図 6 が観測エリアである。中核バルジの銀緯 0.7 度以内の円形領域と中心部から離れた銀緯 0.3~0.7 度の矩形領域をスキャンしながら観測する。1 撮像時間

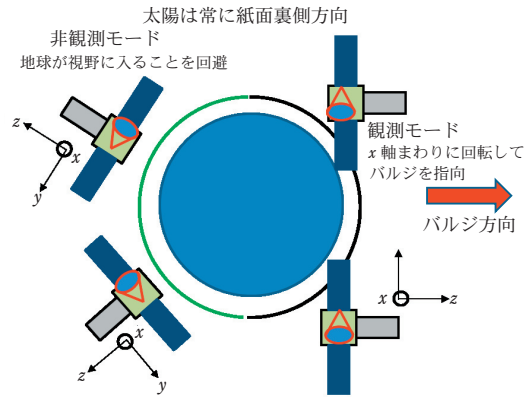


図 5 小型 JASMINE 衛星の観測姿勢.

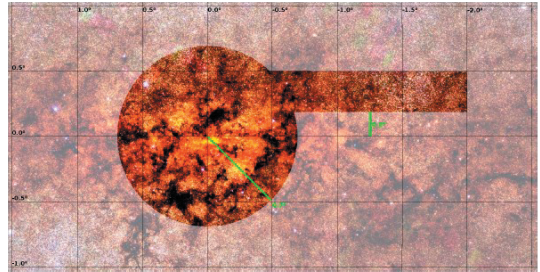


図 6 小型 JASMINE が観測する領域。中心部赤緯半径 0.70° の円形領域および中心部から離れた 0.3° × 0.25° の長方形領域。

は約 7 秒であり、1/2 ずつ視野をずらしながら目的領域全てをスキャンする。これを半周回の内何回も繰り返して行う。

望遠鏡の回折限界で決定される天体の位置は、せいぜい数ミリ秒角程度である。小型 JASMINE の場合は、同じ星に対して 15~60 万回の撮像を行い、それを統計処理して回折限界で求まる値より 200 倍程度の高精度 (20 マイクロ秒角) で年周視差を推定する。統計誤差のうちランダム成分は、観測回数  $N$  に対して、 $1/\sqrt{N}$  則で低減していくと考えてよい。ランダム成分を除いた系統誤差について、適当な関数系でフィットしてモデル化し、それをランダム成分を除いたデータから差し引くことにより誤差を低減していく。半周回 50 分間程度の撮像時間の範囲では星は不動とみなせる。検出器上の星像の位置を変えて多数回撮影することにより、望遠鏡の持つ誤差関数を解析的に求めるこ

とができる。求めることができる関数や係数は有限であり、誤差関数ができるだけ簡単な多項式で表されることが望ましい。その仮定が成立する条件として望遠鏡システムが回折限界以上の高い安定性を持つことが要求される。望遠鏡構造に対しては機械的振動や熱変形を極限まで小さくすることが要求されることになる。長期間の変動についても単独星はらせん運動しているとみなせるので、らせん運動のパラメータを用いて同時に解析する。星の運動と縮退する系統誤差成分も存在するが、星の運動が既知の観測データを用いて補正を行うことで対処する。

## 望遠鏡の設計

### 光学設計

望遠鏡の光学設計は、コルシエ 3 枚鏡を採用した(図 7)。入手できるアストロメトリー用検出器が限られている事情があり、その検出素子のピクセルサイズに合わせて焦点距離を決定する。2 ピクセル程度に星像半径が広がっている場合に最も中心の推定精度がよくなるのが分かっており、開口径 30 cm から焦点距離は 3.9 m に決められた。長焦点距離であり、光路を平面鏡を用いて折りたたんで、ロケットに搭載できるサイズとしている。M1, M2, M3 が曲面を持つミラー、M4, M5, M6 が光路を折りたたむ平面ミラーである。迷光を防ぐため内部にバツフル構造がある長いフードを付ける(図 8 参照)。

### 構造設計

反射鏡には、ゼロ熱膨張のガラスセラミックを用いる。反射鏡や検出器を支持する構体にもゼロ熱膨張材料を用いる。小型科学衛星の打上げロケットはイプシロンと決められており、その打ち上げ能力からミッション機器の質量は、150 kg 程度が許容される。小型 JASMINE では、望遠鏡構造にゼロ熱膨張のスーパーインバーを採用することとした。密度  $8,200 \text{ kg/m}^3$  と非常に重い金属を用いても望遠鏡構体はせいぜい 30 kg 程度であり

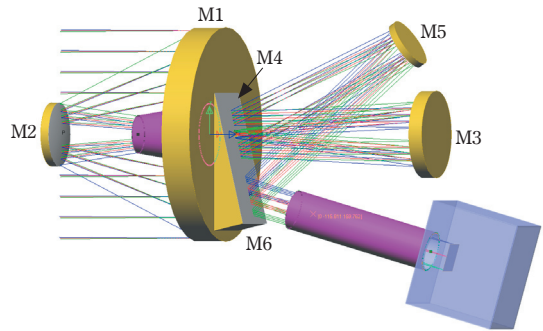


図 7 小型 JASMINE の光学系。

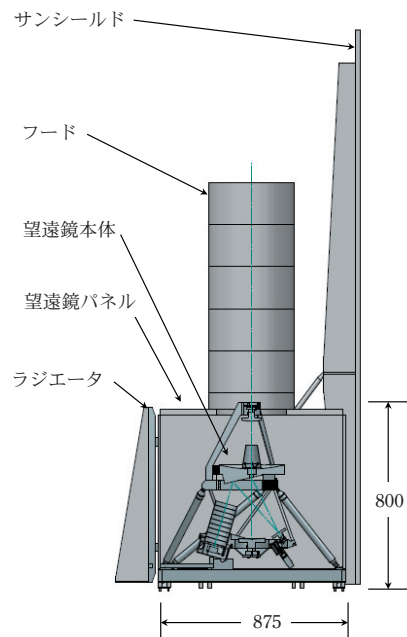


図 8 小型 JASMINE ミッション部。

質量要求を満足する。通常のスーパーインバーでは、熱膨張率が  $5 \times 10^{-7}/\text{K}$  程度でありこの大きさは許容できない。成分を微調整することにより  $0 \pm 5 \times 10^{-8}/\text{K}$  のスーパー・スーパーインバーを材料メーカーに開発して貰い採用することとした。スーパーインバーには低温でマルテンサイト変態を起こしてインバー特性を失う欠点があり、250 K 程度までしか使えなかった。この欠点についても改良を行い、173 K まで使用できる材料の開発に成功し、採用に至った。

望遠鏡構造は基本的に静定のトラス構造である。

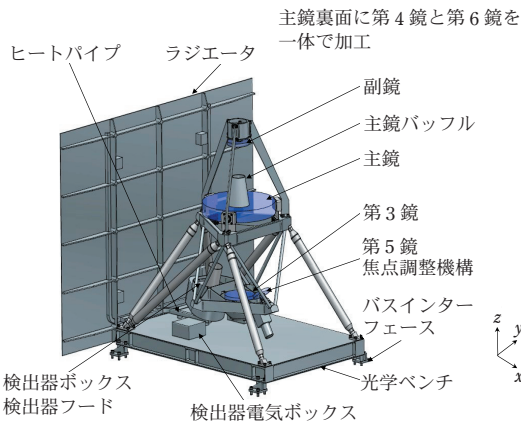


図9 小型 JASMINE 望遠鏡の構造。

全ての部品にスーパー・スーパーインバーを用いたアサーマルな構造とした(図9)。金属製なので複合材料と比べると接着や吸湿などの不安定な要素が少なく、設計どおりの精度が実現し再現性が高い。

### 熱設計

ほとんどゼロ熱膨張の構造であるが、熱安定性をさらに保証するため、半周回の撮像時間中は温度を $\pm 0.1$ 度の精度でコントロールする。望遠鏡全体を6面のヒーターを設置したパネルで囲い、パネルを温度制御して遠火でじんわりコントロールする要領で制御を行う設計とした。望遠鏡構造と鏡面の温度は、 $5^{\circ}\text{C}$ 程度に設定している。地上での組み立てやアライメント調整が容易な観点と熱雑音が許容できる温度との兼ね合いでこの温度に決定した。検出器は低温に冷却する必要がある。ペルチェ素子を用いて $170\text{K}$ 程度に冷却する。ペルチェの高温部は、ヒートパイプを介してラジエータに熱的に繋がれ、ラジエータから深宇宙へ放熱する。太陽光が望遠鏡に直接あたることのないよう、サンシールドを設け遮光する。運用中は常にサンシールドがある面を太陽に向けた姿勢を取る。衛星バス部とミッション部は断熱とする。ミッション部の電気機器と望遠鏡パネルも断熱する。

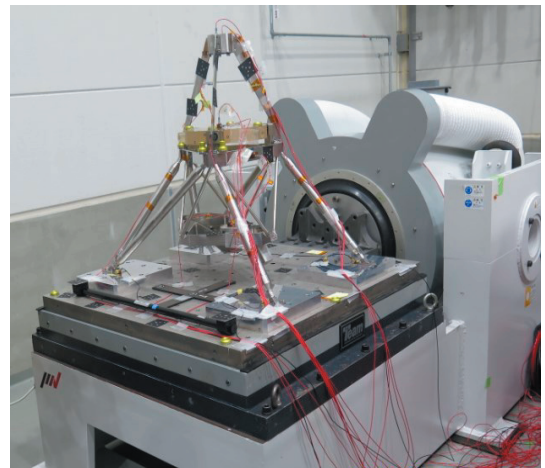


図10 望遠鏡の振動試験状況。

### 検証試験

小型 JASMINE 望遠鏡は、ブレッドボードモデル(BBM)を製作して、熱変形試験、機械環境試験および熱試験を行っている。ダミーの主鏡、副鏡をつけて計測した熱変形試験では、 $15\text{K}$ の温度変化を与えた場合、ダミー主鏡の鏡面精度が $10\text{nm}$ の計測精度で変化がないことを確認した。主鏡-副鏡間のアライメント変動は $0.2$ 秒角以下であった。要求を上回る十分な熱安定性を示した。機械環境試験についても、イプシロンロケットの搭載条件を振動試験により負荷したが、試験前後で有害な変形がないことは無論のこと、振動応答に試験前後で全く変化がなく、耐環境性を満足するとともに、金属製であるがゆえの高い再現性と信頼性を示した(図10)。

### スーパー・スーパーインバーの開発

表2にインバー合金の種類を示す。 $36\%\text{Ni-Fe}$ 合金がインバーとして知られているが、この熱膨張率は $2 \times 10^{-6}/\text{K}$ 程度である。NiをCoで置換した $32\%\text{Ni-5\%Co-Fe}$ がスーパーインバーであり、熱膨張率が $5 \times 10^{-7}/\text{K}$ 程度とインバーより1桁低熱膨張となっている。このスーパーインバーについて熱膨張率をさらに下げゼロ熱膨張を目指して、成分の微調整を図ってもらった。 $0.1\%$ 単位で調整

表 2 インバー合金.

合金名	成分	熱膨張率 ( $10^{-6}/K$ )
インバー	Fe-36%Ni	2
スーパーインバー	Fe-32%Ni-5%Co	0.5
ステンレスインバー	Fe-52%Co-11%Cr	0

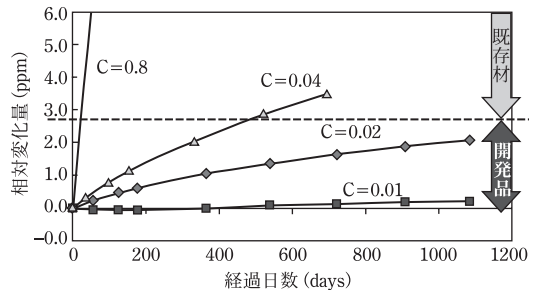


図 12 スーパー・スーパーインバーの経年変化(産業技術総合研究所計量標準総合センターによる測定).

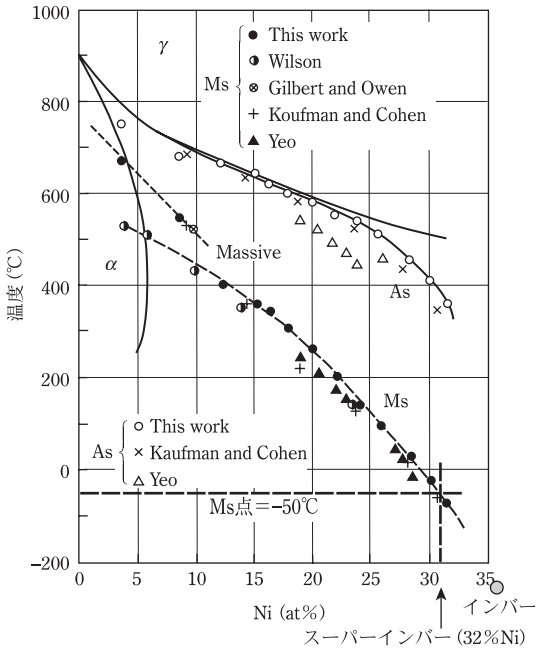


図 11 Fe-Ni 合金のマルテンサイト変態温度<sup>3)</sup>.

して、 $1 \times 10^{-7}/K$  以下の低熱膨張を再現よく得ることができるようになった。天文台において実測した値で、 $N=5$  で  $0 \pm 5 \times 10^{-8}/K$  (273~303K) を得ている。しかし、インバーには Ni 量が少なくなるにつれマルテンサイト変態を起こしやすいという性質がある(図 11)。32%Ni のスーパーインバーでは 223 K 前後でマルテンサイト変態を生じ、インバー特性を喪失する。変態を生じた後に室温へ戻しても逆変態を起こさず、インバー特性を喪失する。その欠点のため、スーパーインバーは低温では用いることができなかった。新報国製鉄(株)では、Ni 量がマルテンサイト変態と関連が深いことに着目し、Ni 量を狭幅にコントロールすることにより、173 K までマルテンサイト変態を生じない

スーパーインバーの開発に成功した。

赤外線検出器は熱雑音を低減するため、極低温で使用されることが多い。衛星搭載機器は深宇宙にさらされると放射冷却によって 150 K 程度に温度が下がることがある。極低温でマルテンサイト変態を生じずインバー特性を保つことは必須の条件である。さらにこのスーパー・スーパーインバーは、低炭素にしたことにより経年変化も著しく低減した(図 12)。製造から運用終了まで寸法が安定していることは重要な性質であり、これにより衛星搭載の望遠鏡構造材料として適した特性が得られたといえる。

## まとめ

小型 JASMINE では、小型の望遠鏡を採用したことにより、ミッションの搭載質量に余裕が生まれ、密度が大きいスーパーインバーを採用することが可能となった。材料メーカーの協力により、熱膨張率  $10^{-8}/K$  オーダの低熱膨張材料を開発することに成功した。低温環境耐性についても改善が図られ、173 K まで使用できるスーパーインバーの開発に成功し、実用に供する可能性が生まれた。超高精度を要求する計測機器では、熱的寸法安定性は非常に重要なポイントである。さらに熱雑音はセンサーの性能をリミットする課題であり、赤外線検出器やポロメータなどは極低温に冷却して用いる必要がある。ゼロ熱膨張と低温安定性を実現した材料は、そのような機器にとって非常に有用

な材料である。

本報では、材料開発に焦点を当てて記述したが、開発すべき課題はもちろんこれだけではない。科学衛星は地上では到達できない高い精度の観測を行うことを目的として打ち上げられる。これまで開発されてきた地上の機器とは桁違いの性能を要求する。出発点である材料から見直した設計が要求されるゆえんであり、その一例として紹介した。小型 JASMINE は、ミッション要求を満足することの地上検証を現在も進めており、技術リスクを低減し衛星の製造実現性を高め計画の実現を目指している。

### 謝辞

この研究開発は、JAXA 宇宙科学研究所の戦略的開発費を用いて行われた。国立天文台の先端技術センターには構造の機械加工に協力いただいた。

新報国製鉄(株)にはスーパー・スーパーインバーを開発していただいた。関係各位の多大なるご支援と協力に感謝する。

### 参考文献

- 1) 国立天文台 JASMINE 検討室ホームページ  
<https://www.nao.ac.jp/research/project/jasmine.html>
- 2) JAXA 宇宙科学研究所公募型小型計画募集  
<http://www.isas.jaxa.jp/researchers/application/epsilon/>
- 3) 石田清仁, 西沢泰二:「鉄鋼中の合金元素のフェライトオーステナイト安定化パラメーター」, 日本金属学会誌, **36** (1972), 270-277.

うつのみや・しん UTSUNOMIYA Shin

1972 東京大学卒業後、三菱電機(株)に入社。先端技術総合研究所にて 20 年間材料開発に従事。鎌倉製作所相模工場に転じ、宇宙航空・防衛用材料の開発、設計、製造を担当。別会社勤務を経て、2007 JAXA に転籍し、CFRP の研究開発に従事。退職後も国立天文台、東京大学 IPMU などが開発する科学衛星の概念設計に参画している。

