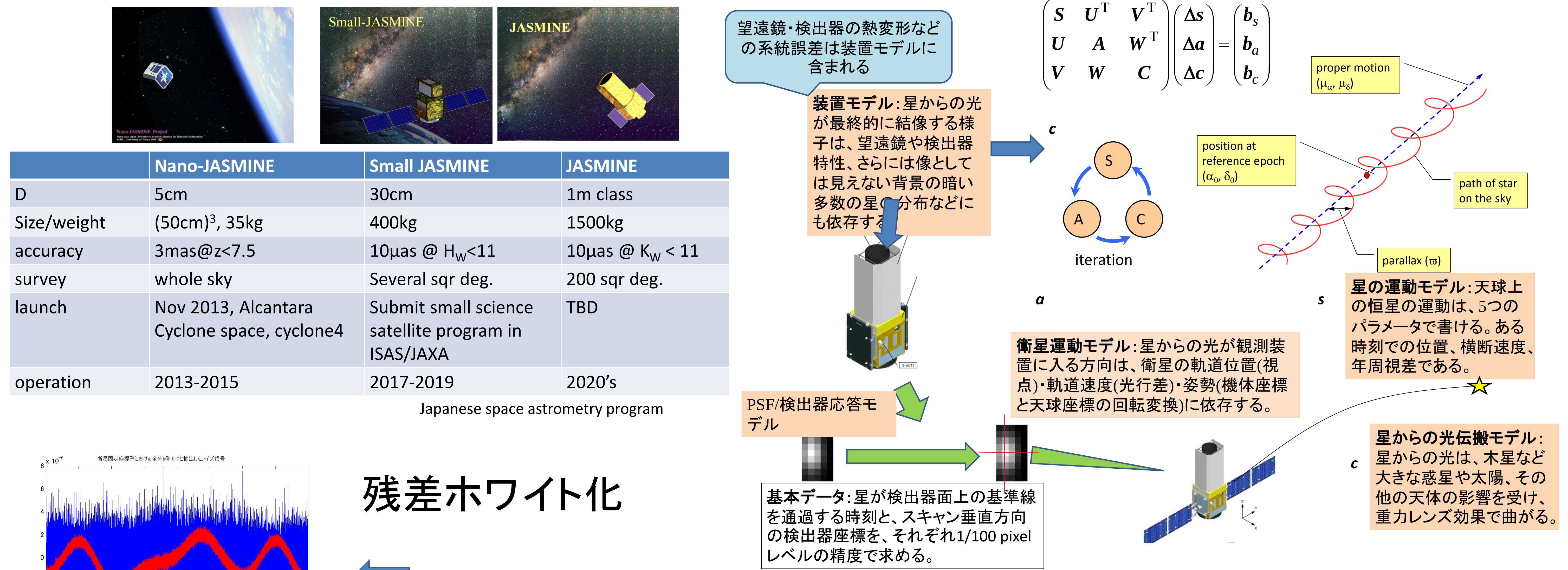


# 小型JASMINEおよびNano-JASMINEのデータ解析

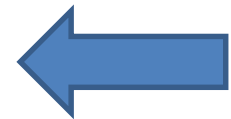
吉岡諭<sup>1)</sup>、山田良透<sup>2)</sup>、穂積俊輔<sup>3)</sup>、原拓司<sup>4,5)</sup>、藤田翔<sup>3)</sup>、郷田直輝<sup>4)</sup>、小林行泰<sup>4)</sup>、宮下尚<sup>6)</sup>、清水淳也<sup>6)</sup>、他JASMINEワーキンググループ

1)東京海洋大学,2) 京都大学, 3)滋賀大学,4) 国立天文台, 5) 東京大学, 6) IBM東京基礎研究所, 7)慶応大学

**Abstract:**JASMINEワーキンググループでは、先行技術実証衛星Nano-JASMINEの打ち上げが迫り、データ解析・公開の準備を進めている。Nano-JASMINEでは、ESAのGaia衛星がNano-JASMINEと同じ観測方式であることから、Gaia衛星のために開発されたAGISを解析コアプログラムとして使う予定であり、このプログラムに入力するテレメトリの前処理プログラム部分を日本で作成している。既存カタログとのクロスマッチ、これによる視野の識別の部分はGaiaにない開発事項であり、ほぼ動作が確認できた。高精度で星像中心を導出するアルゴリズムは、本シンポジウムの原のポスターで発表される。姿勢擾乱の取扱い(ホワイトノイズ化)についてはIBM東京基礎研究所(TRL)との共同研究が進行している。さらに、小型JASMINEはNano-JASMINEとは異なる観測手法を用いるが、異なる観測手法でも共通の「モデル駆動」プラットフォームの開発をIBM TRLと進めている。



## 残差ホワイト化



位置天文データ解析では最小二乗推定を用いるため、最小二乗解の一致性の条件からモデル化残差が白色ノイズであることが望ましい。

衛星の全外部トルク信号から、制御信号から取り出したトルク(ノイズ信号)を除去すると、残差は有色ガウストルク信号になる。さらに、有色ガウス信号はデシメーションを繰り返すことで周波数成分を取り出すことができる。

また、Nano-JASMINEのHardware In the Loop Simulator から得られたトルクデータをサンプルに解析し、この方法、およびいくつかの信号処理手法を試し、非白色のノイズをホワイト化することに成功している。

適切な条件のもと、モデル化で残差を白色化出来ることが確認できた。



**位置天文データ解析:** 位置天文観測は、地球が太陽の周りを公転することによる星の天球上の見かけの楕円運動(上図)と、銀河内を星が自由に動く等速直線運動の合成運動であるらせん運動(右上図)のパラメータを正確に決めることで、星のあるepochでの位置、固有運動、年周視差(距離の逆数)を高精度に決める天文学の一分野である。高精度測定をするため、星の運動( $s$ )だけでなく、観測装置の歪み( $c$ )や衛星の姿勢( $a$ )など高精度にモデル化し、瞬時瞬時に観測される焦点面上での星像の位置から最小二乗推定でパラメータ $s, a, c$ をきめる(上図)。

天文学のモデルだけでなく、衛星システムや観測装置のシステム同定を行いつつ、複雑に絡み合う物理的に異なる種類のパラメータ群の巨大な最小二乗問題を解く必要がある。そのため、

- ・天球上の角距離にして10 $\mu$ 秒角(装置変動にして200pm)に相当する詳細なモデル化
- ・巨大(数百万次)かつ複雑な(非ゼロ要素約1000個/行)行列の反転
- ・約60万回の観測から1/200程度の大きなレンジでほぼvN則で誤差を低減させることがポイントとなる。

JASMINEチームではNano-JASMINEのデータ解析のためにGaiaのデータ解析チームとの共同研究を進め、世界で唯一のスペース位置天文で得られた知見を導入しつつ、国内でも解析チームを組織している。さらに、誤差論やモデル化の専門家との共同研究も立ち上げ、小型JASMINEの解析に必要な要素技術の検討を進めている。

## 10マイクロ秒角に至る道筋

| 誤差要因                   | 誤差                                       | 配分の評価                            | 値                                           | 観測数※                         | 誤差            |
|------------------------|------------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------|---------------|
| 地上局と衛星上の時刻不一致による時系誤差   | 衛星測位(位置・速度)誤差                            | GPSに対する要求を設定、影響を誤差バジェットに積み上げている。 | 1.5mm/s=>1.03 $\mu$ as                      | 1                            | 1.03 $\mu$ as |
| 地球重力による衛星軌道への摂動        |                                          |                                  | 2 $\times$ 10 <sup>7</sup> m=>1.03 $\mu$ as | 1                            | 1.03 $\mu$ as |
| 電波の電離圏遅延               |                                          |                                  | 270mas                                      | 3 $\times$ 10 <sup>10</sup>  | 1.5 $\mu$ as  |
| 電波の対流圏遅延               |                                          |                                  | TBD                                         |                              |               |
| 衛星構体の振動                | 指向誤差                                     | Nano-JASMINE地上実験でモデル化精度を検証済み     | 1/8 $\lambda$ =99mas                        | 3 $\times$ 10 <sup>10</sup>  | 0.5 $\mu$ as  |
| 宇宙放射線による半導体損傷          | 半導体検出器の感度むら                              |                                  | 30e = 452mas                                | 3 $\times$ 10 <sup>10</sup>  | 2.57 $\mu$ as |
| 搭載機器の仕様                | 波面誤差                                     |                                  | 57e/s = 303mas                              | 3 $\times$ 10 <sup>10</sup>  | 1.73 $\mu$ as |
|                        | 読み出しノイズ                                  |                                  | 1242e / exposure = 531mas                   | 3 $\times$ 10 <sup>10</sup>  | 3.03 $\mu$ as |
|                        | Dark                                     |                                  | 1/300 pixel                                 | 5.9 $\times$ 10 <sup>5</sup> | 2.1 $\mu$ as  |
|                        | 迷光                                       |                                  |                                             |                              |               |
| 熱変動                    | 検出器系統誤差                                  | モデル化して解き、残差を誤差バジェットとして積み上げている。   | 5 $\mu$ as                                  | 1                            | 5 $\mu$ as    |
| 湿度変動                   | 望遠鏡・検出器構造の膨潤・脱湿・構造・熱変形・経年変形(wfe等として組み込む) |                                  | 43.7mas                                     | 3 $\times$ 10 <sup>10</sup>  | 0.2 $\mu$ as  |
| 地球重力変化による構造変形          | 星像中心アルゴリズム誤差                             |                                  | 50 $\mu$ as                                 | 7800                         | 0.57 $\mu$ as |
| 打ち上げ時の振動               | 色補正                                      |                                  | TBD                                         |                              |               |
| 解析アルゴリズムや補正に使用するデータの誤差 | 校正天体                                     | モデル化誤差の影響を評価済み                   | 2300stars                                   | 5.9 $\times$ 10 <sup>5</sup> | 0.7 $\mu$ as  |
|                        | 星の運動モデル                                  |                                  |                                             |                              |               |
|                        | 連結誤差                                     |                                  |                                             |                              |               |
|                        | スループット誤差                                 |                                  |                                             |                              |               |
| アウトガスによる光学系汚染          | スループット、迷光レベル                             | 影響するレベルに地たらない見込み                 |                                             |                              |               |
| 材料表面の腐食(原子状酸素の影響)      | 指向誤差                                     |                                  |                                             |                              |               |
| 衛星の姿勢誤差                |                                          | 小型JASMINEのデータ解析の精度には影響しない        |                                             |                              |               |
| 電源電圧の変化                |                                          |                                  |                                             |                              |               |
| プラズマ環境下での帯電            |                                          |                                  |                                             |                              |               |
|                        |                                          |                                  |                                             | RMS                          | 7.3 $\mu$ as  |

望遠鏡の回折限界が約480masであり、基準の明るさの星のミッション期間中の光子数は3x10<sup>10</sup>個なので、vN則が成立すれば達成精度は約2.5 $\mu$ asと計算される。表のような誤差が載っても誤差を積算して10 $\mu$ as程度が実現すると見込まれる。このうち、赤字の部分についてはセントロイド実験の結果約2 $\sigma$ /vNが達成しているが、誤差の積算で約2.5 $\sigma$ /vNと評価されている結果と無矛盾であり、この戦略は成立している。表の観測数※は、光子数で効く部分が3 $\times$ 10<sup>10</sup>、撮像数で効くところは5.9 $\times$ 10<sup>5</sup>、大フレーム数で効くところは7800、vNで低減しないノイズは1を割り当てている。

Yoshiyuki Yamada, [yamada@amesh.org](mailto:yamada@amesh.org)  
Department of Physics, Kyoto University, Kyoto Japan