



超低高度衛星の利用に向けたワークショップ（第5回）

2020/01/24

「つばめ」における 大気抵抗補正係数推定結果

JAXA 追跡ネットワーク技術センター
坂本拓史

Introduction

背景と目的

- 地球観測衛星は、軌道制御によって所定の軌道を維持する必要がある
 - 超低高度衛星は大気抵抗が大きい（目的の軌道からの逸脱がはやい）ため、イオンエンジン等を用いて継続的に軌道を維持する必要がある
- ※ 高度200 km付近の大気密度は、高度700 kmの1000倍以上



- 超低高度衛星を、所定の軌道に精度良く維持するためには、大気抵抗（大気密度）を正確に予測することが重要
- 現状、超低高度域(300 km以下)の大気密度実測値は十分なデータがない

本ミッションでは、超低高度衛星の実用化のために
超低高度域の大気密度の高度分布、時間変動を計測する

Introduction

軌道決定による大気密度の計測

オンボードGPS測位信号データおよび姿勢角データを使用した高精度軌道決定によって、
 実際の大気密度 $\rho_{observation}$ と既存の大気密度モデル値 ρ_{model} の比率を推定

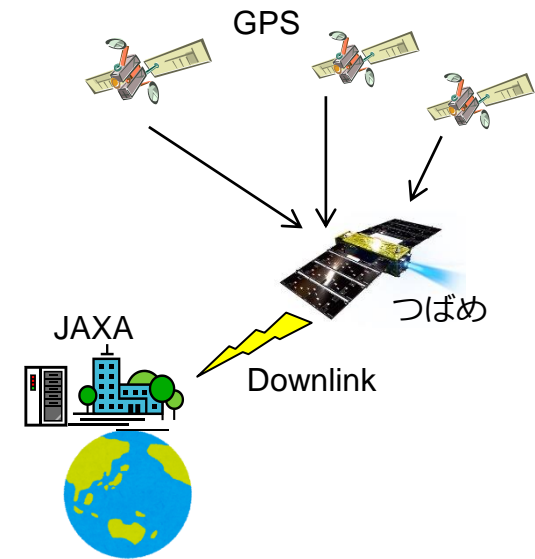
$$\text{大気抵抗補正係数 } \eta = \frac{\rho_{observation}}{\rho_{model}}$$

η の推定精度要求と推定間隔

精度要求： η を誤差10%以下で推定

推定間隔：高度100m毎

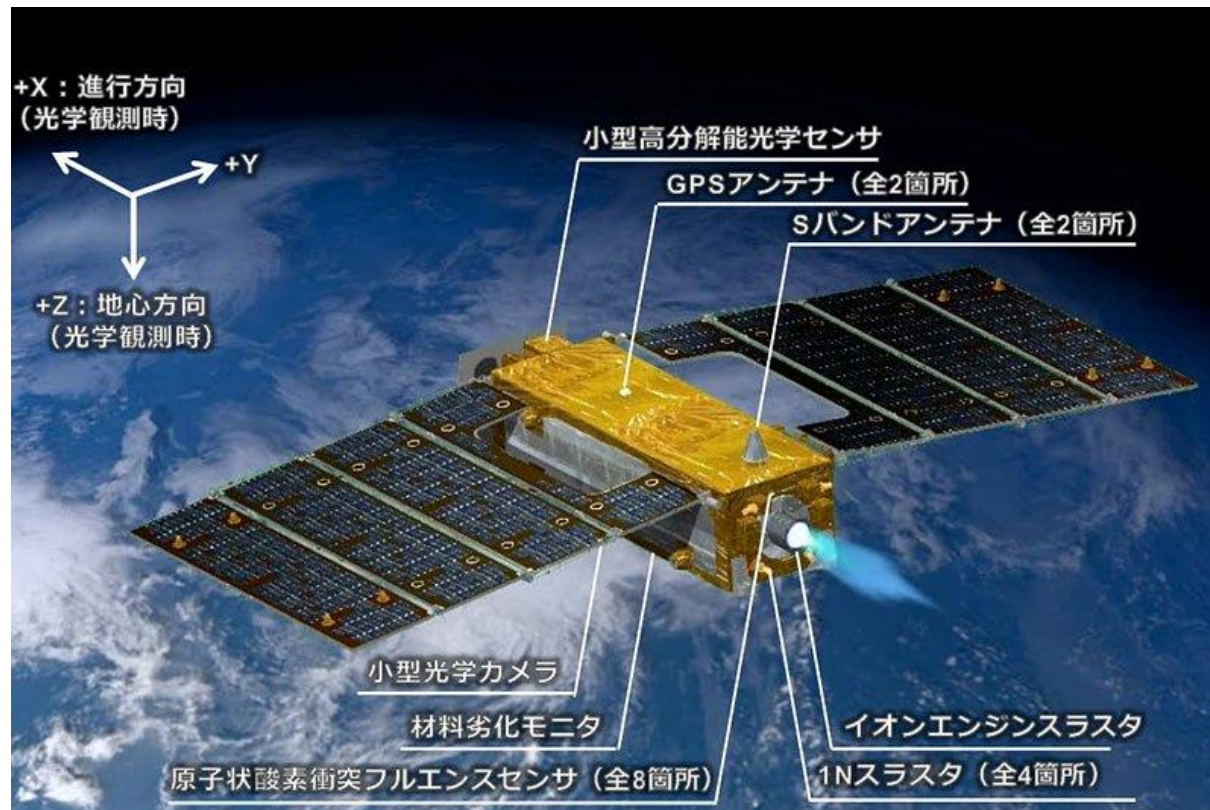
※平均高度低下率が100m/rev以上の領域では軌道1周回毎



「つばめ」の高精度軌道決定

GPS受信機とアンテナ

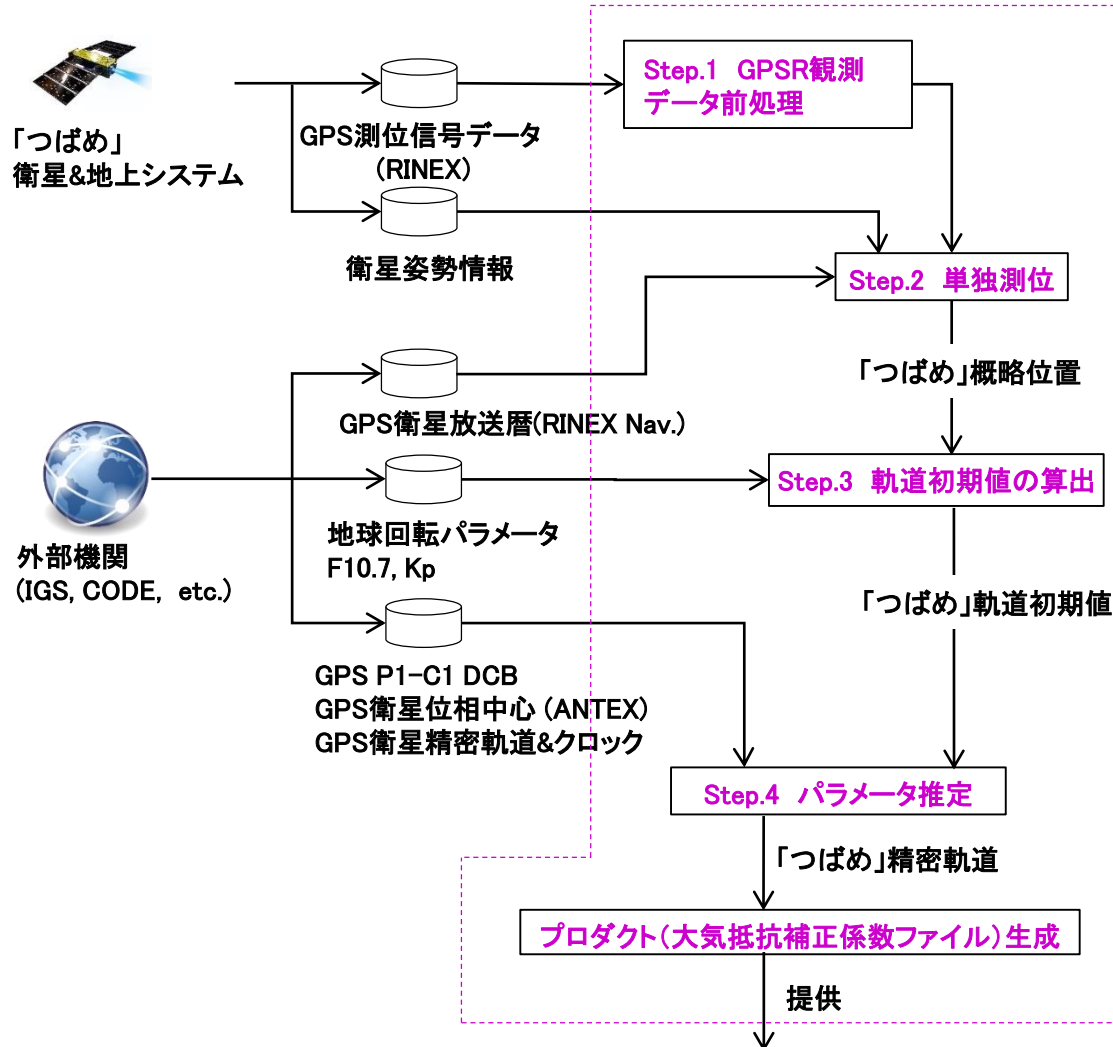
- 1周波型GPS受信機 (L1帯)
- GPSアンテナ2基 (+Z面および-Z面)



「つばめ」の高精度軌道決定

処理フロー

ユーザ衛星高精度軌道決定ツール "TAKUMI"
(Tools for high Accurate orbit and clock estimation
Using Multi-GNSS Information)



Step.1 GPS観測データ前処理

- 各種線形結合の生成
- サイクルスリップや異常値の検出

Step.3 軌道初期値の算出

- 単独測位解を観測量として、簡易力学モデルを使用した最小二乗フィッティング

Step.4 パラメータ推定

- GPS測位信号データを観測量とした最小二乗法によるパラメータの推定
- Step.2~3で得られた解を初期値とする

「つばめ」の高精度軌道決定

観測モデル

項目	設定値
基本観測量	GRAPHIC (GRoup And Phase Ionospheric Correction)
GPS衛星軌道暦・クロック	MADCOCA Rapid (MGR) または IGS Final
「つばめ」姿勢角データ	オンボード推定値
GPS衛星アンテナ位相中心オフセット	IGS14
送信機 P1C1DCB	CODE推定値
地球回転パラメータ	IGS Rapid または IGS Final

力学モデル

項目	設定値
地球重力モデル (次数, 位数)	EGM2008 高度200 km以上 : 70次 高度200 km未満 : 120次
潮汐モデル	固体潮汐、海洋潮汐、極潮汐
他天体重力モデル	太陽、月、木星、金星
大気密度モデル	NRLMSISE-00
大気抵抗係数および衛星断面積	両者の積(CDS)を、高度50 km毎、迎角、横滑り角各1 deg毎にモデル化
太陽輻射圧	スケールファクタを推定
大気抵抗補正係数	軌道決定アーク中一定値を推定
相対論効果	考慮
経験的加速度	対気速度ベクトルの垂直方向成分(2軸)について10分間隔で推定

大気抵抗補正係数の推定方法

大気抵抗加速度モデル

$$\mathbf{a} = -\frac{1}{2} \rho_{model} \underline{(1 + \rho_1)} v^2 \frac{C_D S}{m} \mathbf{e}_v$$

ρ_{model} : 大気密度モデル値
 ρ_1 : 補正係数(推定パラメータ)
 v : 対気速度
 C_D : 抗力係数
 S : 衛星断面積
 m : 衛星質量
 \mathbf{e}_v : 対気速度方向単位ベクトル

$$1 + \rho_1 = \eta = \frac{\rho_{observation}}{\rho_{model}}$$

- 軌道決定において、衛星位置速度等と同時に ρ_1 を推定
(ρ_1 は軌道決定アーク中一定値として推定)
- 抗力係数と衛星断面積は既知の値として扱う
 - ⇒ 抗力係数と衛星断面積のモデル誤差は、 ρ_1 に吸収されてしまう
 - ⇒ 地上での風洞試験や数値計算等により、極力精密にモデル化
(両者の積($C_D S$)を、高度50 km毎、迎角、横滑り角各1 deg毎にモデル化)

推定精度の評価手法

$$\eta = \frac{\rho_{\text{observation}}}{\rho_{\text{model}}}$$

軌道長半径の変化率から η の推定精度を評価

- Step.1 大気抵抗補正係数を推定した軌道決定期間の2倍の軌道決定期間で軌道決定を行う
- Step.2 両者の平均軌道長半径変化率の差異（平均a-dot誤差率）を算出し、大気抵抗補正係数 η の推定精度とする

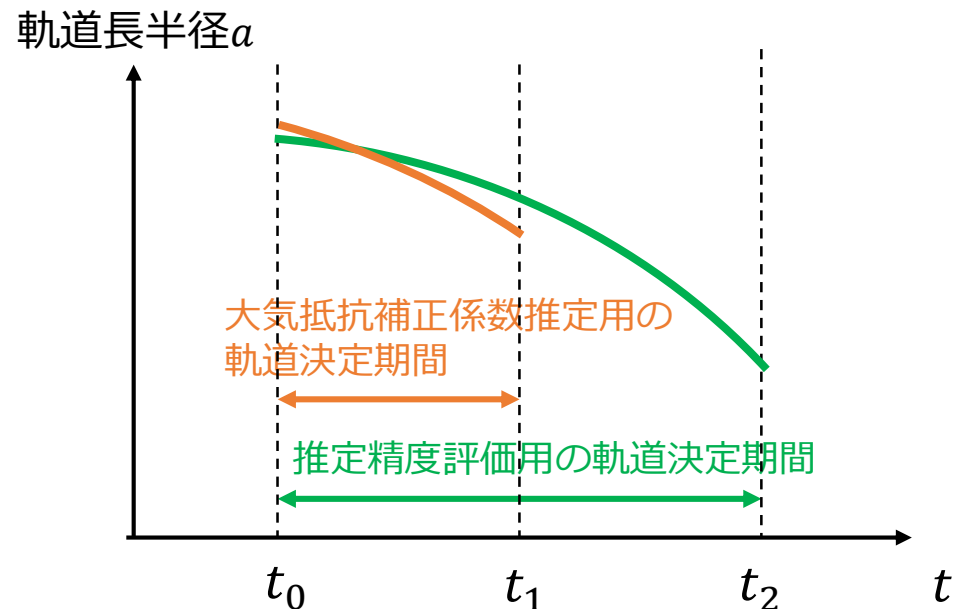
平均a-dot誤差率

平均軌道長半径の変化率の差異率

平均a-dot誤差率

$$= \left(\frac{\dot{a}_1}{\dot{a}_2} - 1 \right) \times 100$$

$$= \left\{ \frac{a_1(t_1) - a_1(t_0)}{a_2(t_1) - a_2(t_0)} - 1 \right\} \times 100$$



推定精度の評価手法

$$\eta = \frac{\rho_{\text{observation}}}{\rho_{\text{model}}}$$

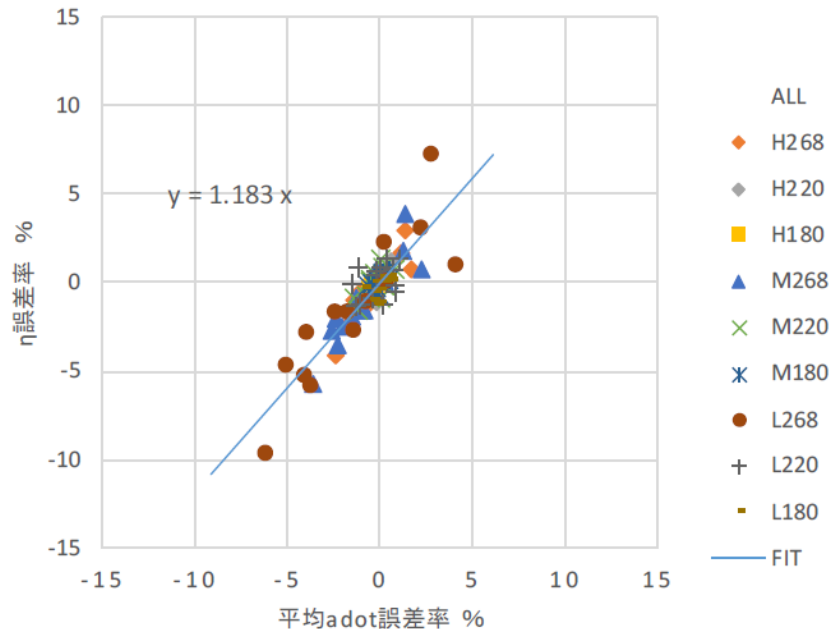
η の推定精度と平均a-dot誤差率の関係

疑似データ解析により、大気抵抗補正係数の推定精度（真値と推定結果の比較）と平均a-dot誤差率の関係を評価

比例定数1の線形関係があることを確認

平均a-dot誤差率と大気抵抗補正係数の相関（疑似データ解析結果）

η 誤差率と平均a-dot誤差率の関係 (LEOAR、 $\sigma = 2.3E-6$)



$$\left(\frac{\text{疑似データ解析で推定された}\eta}{\eta\text{の真値(設定値)}} - 1 \right) \times 100$$

$$\eta = \frac{\rho_{\text{observation}}}{\rho_{\text{model}}}$$

「つばめ」の大気抵抗補正係数推定

- 高精度軌道決定により、超低高度域の大気抵抗補正係数を誤差10%以下の精度で推定することに成功
- 推定された超低高度域の大気密度は、NRLMSISE-00モデル値よりも小さく、平均的には約68%であった
- 一方で、磁気嵐発生時の大気密度の上昇幅は、NRLMSISE-00よりも実際の観測値の方が大きく、NRLMSISE-00は地磁気の寄与を正確にモデル化できていないことが示唆された
- 得られた大気密度データは、超低高度衛星の実用化に活用する他、共同研究等の中で更に詳細に分析、利用される予定