

## 論文の内容の要旨

論文題目 超低高度地球観測衛星の軌道制御に関する実践的研究

氏 名 今村 俊介

### 1. 序論

超低高度地球観測衛星は年々高まる地球観測プロダクト要求(例, 光学衛星に対する画像分解能の向上)に対して, 衛星を大型化するのではなく, 軌道を低高度化することでプロダクト品質を向上させ(例, 光学画像分解能は高度低下に比例して向上), 開発コストの大部分を占めるミッションセンサの小型化を狙い, ひいては衛星全体の小型・低コスト化を狙うコンセプトである. 2007年, JAXA は本コンセプトを技術的に実証するための「超低高度衛星技術試験機(Super Low Altitude Test Satellite, 以下 SLATS)」の研究開発に着手することを決定した. SLATS をはじめとする超低高度地球観測衛星の課題は, ①小型低コストを目指す超低高度衛星は複数機同時打上げを求められることが多く, 分離軌道からミッション軌道へ遷移する際には推進剤を極力温存するための軌道制御が必要なこと, ②超低高度域(高度 300km 未満)の非常に大きな大気抵抗下(高度 600km の 1000 倍以上)においても自律的に高度制御を行う必要があること, ③発生推力を考慮した軌道上大気密度推定手法が必要なこと, である. これら課題に対応するため本研究では①大気抵抗と地球重力場による永年摂動を活用した面内・面外制御, ②イオンエンジンおよび化学推進系を用いた超低軌道高度・経度制御, ③超低高度衛星に適した軌道上大気密度推定手法の提案を行った. またこれらを SLATS の軌道解析並びに実際の衛星運用・大気密度評価に適用し, その妥当性検証を行った. 更に, 提案した軌道制御手法を活用した「将来の超低高度地球観測衛星に向けた軌道設計に関する研究」の成果もまとめた.

### 2. 大気抵抗と地球重力場による永年摂動を活用した面内・面外制御

永年摂動(自然力)である大気抵抗および地球重力場摂動を面内制御(降下制御)および面外制御( $\beta$ 角:太陽同期角制御)に利活用するための軌道設計問題を定式化した. 実際の衛星運用において大気変動が発生した場合でも, 得られた基準軌道を維持し続けるための空力姿勢制御(エアロブレーキ, エアロスルー)とその運用方法の提案を行った. 提案した空力姿勢制御は, 衛星自身の姿勢変更によって大気抵抗を変化させること(専用デバイスを必要としない), 日陰領域のみで姿勢変更を行うため太陽電池パネルの発生電力低下が生じない, といった様々な衛星にも適用し易い特徴を有している. また, これらの設計・運用を行うための解析ツールの整備, 空力データベースの導出・利用方法についてもまとめた.

### 3. イオンエンジンおよび化学推進系を用いた超低軌道高度・経度

第一に, IES および RCS を用いた自律高度保持アルゴリズムを提案した. 同アルゴリズムは, 消費電力の大きい IES の噴射時間を IES 噴射 Duty 値を導入することで制御し, 発生電力が潤

沢でない衛星にも適用可能なものである。また、IES と RCS とで独立した目標交点周期を有することで両推進系の併用も実現している。第二に、超低高度域の観測軌道(観測対象を含む準回帰軌道)への投入方法(目標経度追従法)および維持方法(目標交点周期修正法)の提案を行った。目標経度追従法は、衛星搭載推進系による高度制御により、その後の大気抵抗による高度低下履歴を変化させることで、目標時期に準回帰軌道の一軌跡を観測対象経度に合わせる方法である。実際の衛星運用では、大気変動を完全に予測することは不可能なため、本手法を定期的に適用して、高度履歴を修正していくこととなる。目標交点周期修正法は、高度保持中の目標交点周期を一定期間毎に修正することで観測地点通過時の経度保持を行う方法である。また初期目標交点周期は地球重力場高次項やその他考え得る摂動を模擬した高度保持解析を行い、衛星軌道の昇交点赤経変化率を導出した上で設定することが重要であることを示した。

#### 4. SLATS 全期間軌道解析結果

2, 3章で提案した手法の妥当性を解析的に検証するため SLATS の全期間軌道解析(軌道遷移・高度保持)に適用した。2章で提案した軌道設計問題を解くことで SLATS の基準軌道を設計でき、更に空力姿勢制御を実施することで高度制御用の RCS 消費推薬を削減できることが示された。また3章で提案した自律高度保持アルゴリズムを利用することで SLATS ミッションのサクセスクライテリアを満足する高度制御精度が達成できる結果を示した。

#### 5. SLATS 軌道制御結果

2, 3章で提案した手法を SLATS の軌道上運用に適用した結果について運用段階毎に説明した。SLATS は 2017/12/23 に種子島宇宙センターより H-IIA ロケットにて打上げられ、その運用が終了する 2019/10/1 までに、軌道制御の観点で以下の成果を上げた。

- (1) 分離軌道(遠地点高度 643km, 近地点高度 450km の楕円軌道, 降交点通過地方時 10 時半)から超低高度保持開始軌道(高度 271.5km, 降交点通過地方時 16 時)に至るまでの化学推進系と空力姿勢制御を用いた 1 年間に渡る軌道遷移
- (2) 高度 271.5km/38 日間, 250・240・230km/7 日間, 216.8km/38 日間, 181.1km/7 日間(本高度まで IES のみ), 167.4km/7 日間(IES と RCS 併用), の 7 段階の高度での計 111 日間の高度保持
- (3) 観測対象(東京赤坂地区)を通過する回帰軌道 271.5km/1 日回帰, 216.8km/5 日回帰, 181.1km/3 日回帰, への誘導と経度保持

以上の運用成果を以て、本論文で述べた制御手法が解析だけでなく実際の衛星軌道設計・運用に適用し得るものであることが証明された。

#### 6. 超低高度衛星に適した軌道上大気密度推定手法

第一に、高度保持のために常時推力を発生させている超低高度衛星に向けた軌道上大気密度推定手法を提案した。本手法は、高価な高精度 GPS・高精度加速度計を必要とせず、広く超低

高度衛星に適用可能な手法開発を目的として、交点周期変化率を用いる手法を改良する形で構築した。第二に、同手法を用いて得られた SLATS 軌道上大気密度推定値と COSPAR 標準熱圏大気モデルである MSIS00、JB2008、DTM2013 出力値との比較結果を示した。全ての大気モデルが SLATS 値よりも大きな値を出力する傾向にあり(そのため SLATS は想定よりも降下しづらかった)、SLATS 値が安定した 2019 年 3 月以降において、その平均割合(SLATS 値/大気モデル値)は MSIS00=0.65, JB2008=0.80, DTM2013=0.77 となった。第三に、提案した大気密度推定手法の妥当性と将来に向けた大気モデル補正指針を示すために、高精度加速度計による大気密度推定を実施していた GRACE および GOCE の評価結果との比較を行った。結果として、SLATS も含めた三衛星による MSIS00 の誤差評価は太陽活動時期を合わせると同程度となっており、提案手法の妥当性と太陽活動に応じた MSIS00 の補正方針を明確化することが出来た。

## 7. 将来の超低高度地球観測衛星に向けた軌道設計に関する研究

本論文で提案された軌道制御手法を用いた新たな超低高度地球観測ミッションコンセプトを示した。「全球緊急観測ミッション」は 4 機の衛星で高度 324km からの全球観測と高度 268km/1 日回帰太陽同期軌道からの緊急観測を切り替えるものであるが、超低高度衛星特有の「IES による燃費の良い高度制御」「大気抵抗の有効活用」「高度 268km に存在する 1 日回帰太陽同期軌道の利用」といった特徴を活用したミッションである。高度 324km から高度 268km の軌道遷移には「目標経度追従法」が利用でき、高度 268km の観測軌道維持には「目標交点周期修正法」がそのまま利用可能となる。「特定地域超高分解能観測ミッション」は太陽同期・1 回帰・凍結楕円軌道を利用するもので、一つのケースとして、近地点高度 156km × 遠地点高度 8206km、軌道傾斜角 116.5deg の楕円軌道と近地点からの地球観測を提案している。本軌道を保持する場合は、遠地点側でのみの IES 噴射が必要となるが、本論文で提案した高度保持アルゴリズムをベースにすることで大きな課題無く開発することが可能と考えている。「特定経度スキャンミッション」は SLATS で実施した 1 日回帰観測を改良したもので、目標交点周期を 1 日回帰値から微増・微減することによって若干ずつ観測経度をスライドさせていく軌道制御をベースとしている。本軌道制御を「超低高度スキャン運用」と呼び、低コスト・小型高分解能センサを有する衛星コンステレーションによる緻密な地球観測(インフラ観測、地図更新、環境計測等)を可能にするものである。

## 8. 結論

本論文の総括および今後の研究課題をまとめた。新しい衛星のカテゴリーとなる超低高度衛星の軌道制御・大気密度評価について、課題の整理、解決策の提示(新たな手法の提案)、解析および実運用を通じての妥当性検証、という今後の航空宇宙工学の発展に寄与できる形で成果をまとめることが出来たと考えている。