

DESTINY 工学実験:イプシロンロケットによる高エネルギー軌道投入

山本高行, 川勝康弘, 大山聖 (ISAS), 萩原和子 (MSS)

概要

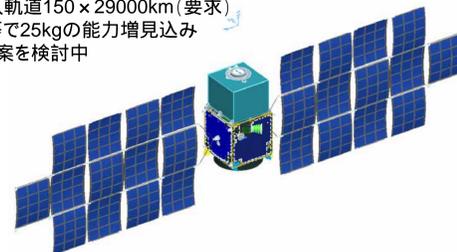
DESTINYはイプシロンロケットにより高エネルギー軌道(長楕円軌道)に投入される。より高い軌道にDESTINYを投入できれば、DESTINYの設計や運用への負荷を下げる事ができる。本研究では、ミッションに適したイプシロンロケットの飛行計画を多目的最適化により追求し、将来の高エネルギー軌道設計における指標を得ることを目的とする。

目的および背景

- DESTINY(小型科学衛星による深宇宙探査技術実験ミッション)は、将来の深宇宙探査の鍵となる様々な先端技術の実験を行うミッションであり、小型科学衛星バスを使用した工学技術実証ミッションとしての提案を目指して検討中である。
- DESTINYは、イプシロンロケットにより高エネルギー軌道(長楕円軌道)に投入される。
 - ここで高エネルギー軌道とは、長楕円軌道、月遷移軌道、惑星脱出軌道を指す。
 - イプシロンロケットは三段式(基本形態)とする。
- イプシロンロケットとDESTINYの暫定インターフェース軌道として、
 - 昨年度は探査機質量350kg, 250km x 24000kmの長楕円軌道を想定していた
 - 今年度は探査機質量400kg, 150km x 29000kmの長楕円軌道を想定する。
- イプシロンロケットによる投入軌道において、より高い軌道にDESTINY投入できれば、DESTINYの耐放射線要求などの設計や運用への負荷を下げる事ができる。ミッションに適したイプシロンロケットの飛行計画を多目的最適化により追求し、高エネルギー軌道への投入能力を評価
- 高エネルギーミッションに対して考慮すべきパラメータ整理
 - 近地点高度の遠地点高度に対する感度
 - 探査機質量の遠地点高度に対する感度
 - コースティング時間など打ち上げシーケンスの達成軌道に対する感度
 - 機体誤差の投入精度に対する感度など
- 本研究の成果は、将来のイプシロンロケットによる高エネルギー軌道設計における指標となる。

イプシロンロケットの打上能力

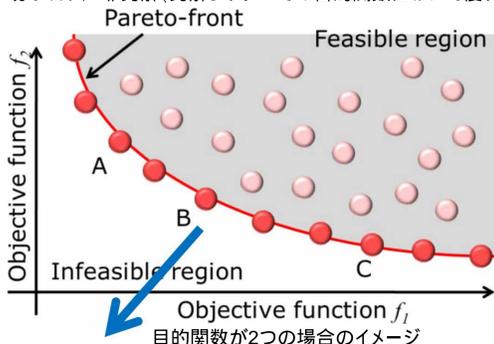
- 1号機(2013年夏, 惑星分光観測衛星)
 - オプション形態, 質量413kg, 投入軌道950 x 1150km(機体誤差最悪見積)
 - 3段式相当に換算すると, 質量約1077kg, 投入軌道700 x 1070km
 - 高エネルギー軌道に換算すると, 質量350kg, 投入軌道250 x 24000km
- 2号機(2015年冬?, ジオスペース探査衛星)
 - 基本形態, 質量355kg, 投入軌道200 x 30700km(要求値)
 - DESTINY軌道150 x 29000kmに換算すると, 質量約385kg
 - 機体構造の軽量化により, 25~36kgの能力増を計画中
- 3号機以降(2017年冬?, DESTINY)
 - 基本形態, 質量400kg, 投入軌道150 x 29000km(要求)
 - 開発項目の実証機器削減等で25kgの能力増見込み
 - その他, 軽量化, 低コスト化案を検討中



多目的進化計算による打上軌道最適化

【多目的設計最適化】

- 灰色エリア: 実行可能領域(解の存在可能領域)
- ピンクプロット: 劣解
- 赤線: パレートフロント
- 赤プロット: 非劣解(劣解よりすべての目的関数において優れている)



目的関数が2つの場合のイメージ

【計算条件】

- 計算ツール: 3次元6自由度軌道計算プログラム
- イプシロンロケット諸元(1号機相当)
 - 構造質量最大, 推薬質量最小(慣性モーメント固定)
- 射点: 内之浦
- 打上方式: 垂直打上
- 座標系: C-7系
- 環境: 内之浦夏風/ミナル
- 打上シーケンス

TIME[s]	イベント
0	リフトオフ
116	1段燃焼終了
(150)	フェアリング分離
161	1/2段分離
165	2段燃焼開始
270	2段燃焼終了
W-4	2/3段分離
W(-307)	3段燃焼開始
W+90	3段燃焼終了

【多目的遺伝的アルゴリズム(NSGA-II)固有パラメータ】

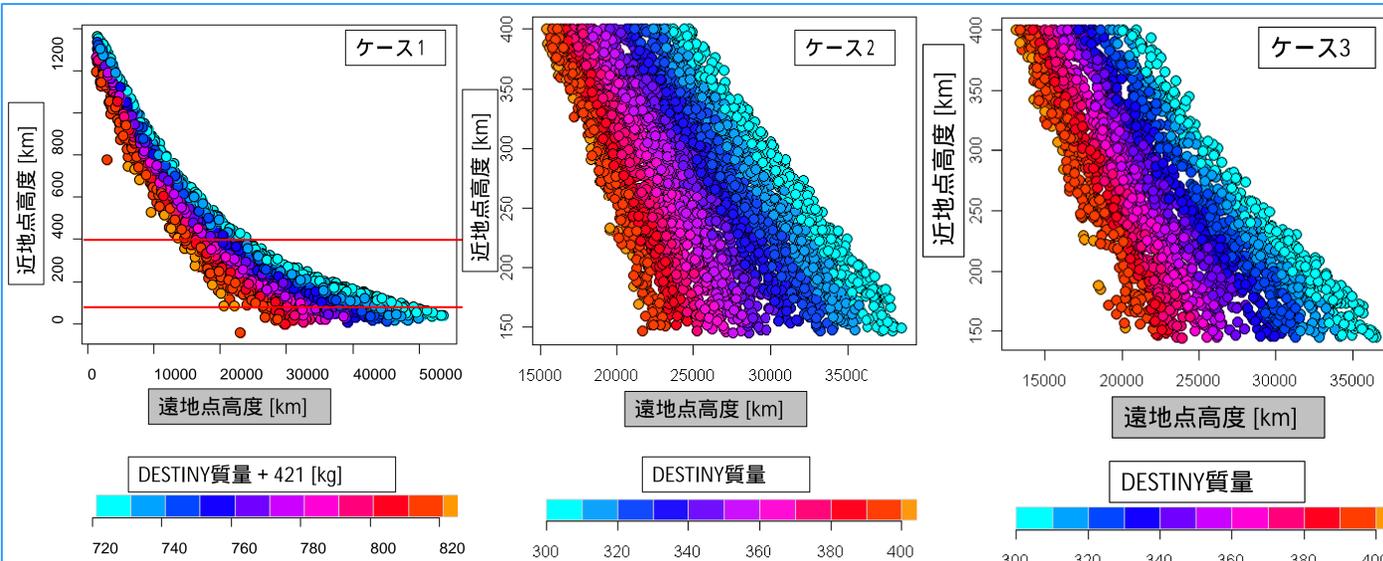
項目	島1	島2	島3	島4	
疑似乱数の種	: seed	0.1	0.367	0.633	0.9
集団サイズ	: popsize	300			
世代数	: ngen	300 ←200@ケース1			
実数型設計変数の交叉の確率	: pcross_real	0.9 ←1.0@ケース3			
実数型設計変数の突然変異の確率	: pmut_real	0.05			
交叉の分布のインデックス	: eta_c	5			
突然変異の分布	: eta_m	10			

*ケース3では、第1世代のみ10000で実行しランク上位300までの個体を選択

【計算ケース】

	ケース1	ケース2	ケース3
目的関数	(1) DESTINY質量の最大化(300~400kg) (2) 3段燃焼終了(B3BO)時のアポジ高度最大化 (3) B3BO時のペリジ高度最大化	(1) DESTINY質量の最大化(300~400kg) (2) X+1800秒時のアポジ高度最大化 (3) X+1800秒時のペリジ高度最大化(最大400km)	同左
設計変数	合計20点 ・3段点火時刻(B3IG) ・1段ピッチ角(6点), ヨー角(6点) (X+45, 50, 55, 65, 95, 127.4秒) ・2段ピッチ角(2点), ヨー角(2点) (B2IG, B2BO) ・3段ピッチ角(1点), ヨー角(1点) ・DESTINY質量(300~400kg)	同左	合計32点 ・3段点火時刻(B3IG) ・1段ピッチ角(8点), ヨー角(8点) (X+50秒以降, 10秒毎) ・2段ピッチ角(6点), ヨー角(6点) (20秒毎) ・3段ピッチ角(1点), ヨー角(1点) ・DESTINY質量(300~400kg)
制約	制約なし	3制約 ・最大動圧64 [kPa]以下 ・フェアリング分離時の自由分子流加熱率1,135 [W/m ²]以下 ・フェアリング分離後の最大自由分子流加熱率1,135 [W/m ²]以下	13制約 ・同左 + ・動圧 x 迎え角 307 [kPa·deg] ・1段燃焼中最小リックアングル10[deg] レーダ局数 2 ・1段燃焼中最小リックアングル10[deg] コマンド局数 2 ・1段燃焼中最小リックアングル10[deg] テレメ局数 1 ・2段燃焼中最小リックアングル20[deg] レーダ局数 2 ・2段燃焼中最小リックアングル20[deg] コマンド局数 2 ・2段燃焼中最小リックアングル20[deg] テレメ局数 1 ・1段燃焼後から2段分離までの最小エレベーション角5 [deg] レーダ局数 2 ・1段燃焼後から2段分離までの最小エレベーション角5 [deg] コマンド局数 2 ・1段燃焼後から2段分離までの最小エレベーション角5 [deg] テレメ局数 1

最適化計算結果



ケース2(続き)

- 飛行経路角との関係
 - 非劣解のB3BO時の飛行経路角とペリジ高度には相関があり、飛行経路角が小さくなるとペリジ高度が低くなる。
 - 非劣解になるには、飛行経路角が-1.9deg ~ -3.9deg である必要がある。
- 最大動圧
 - 打上初期に記録しており、DESTINY質量との相関がない
- フェアリング分離時の自由分子流加熱率
 - 分離時の高度110~120強[km] (イプシロンロケットの現在の制約は124[km]以上と高度で決め打ちしている)
- フェアリング分離後の最大自由分子流加熱率
 - ケース1でのB3BO後に高度が下がる解を取り除くことができた。
 - 固有値直交分解より2段, 3段Pitch角と評価関数の相関が高い
 - 2段, 3段Pitch角は作用時間が長いので、ここをもっと刻めばより良い結果が得られる可能性がある
- 非劣解は、Yaw設計変数について約15°の幅で分布している
 - 飛行安全を考慮することになって、評価関数はあまり劣化しない可能性あり
 - ペリジ高度が1km低くなるとアポジ高度が38km高くなる

ケース3

- ペリジ高度が144.657km以上
- アポジ高度が13138.86km アポジ高度 36509.24km
- 制約増加によるアポジ高度の低下、もしくは最適化計算が局地解、未収束の可能性が考えられる。
- 3段点火時刻は516秒以下
- ケース2に比べて、2段の設計変数を増やしても、打上能力の有意な向上は見られない
- 各段の燃焼終了近くの姿勢感度は低い
- 2段ヨー角感度は低い
- ペリジ高度が1km低くなるとアポジ高度が41km高くなる

【考察】

- ケース1
 - 非劣解となるためには、ペリジ高度は「正」でなければならない
 - 目的関数である近地点高度に上限を設けなかったため、非劣解が分散し、高エネルギー軌道と言えないような解が生き残った
- 制約がないため、近地点が極端に低くなる解が生存してしまった
- ケース2
 - ペリジ高度が145.548km以上
 - アポジ高度が15413.88km アポジ高度 38545.81km
 - 3段点火時刻は550秒以下

結論と今後の課題

- 多目的設計最適化を用いイプシロンロケットによる高エネルギー軌道への投入軌道最適化計算を実施した
 - ケース1: 3目的関数, 20設計変数, 制約無し
 - ケース2: 3目的関数, 20設計変数, 3制約
 - 適切な制約を追加することで、衛星分離後に極端に低高度となる解を取り除くことができた
 - ケース3: 3目的関数, 32設計変数, 13制約
 - 地上局制約を追加しても、打上能力に大きな低下は見られない。一方、設計変数増加により期待された能力向上も見られなかった

【今後の課題】

- 未考慮の制約追加
 - 2段落下点の制約(飛行安全の観点から、有人島との干渉回避)
 - 1段の打上初期の設計変数および制約条件の追加(打上能力向上)
- 機体パラメータの見直し
- 夏風と冬風の比較