

イプシロンロケットによるDESTINYの高エネルギー軌道投入

佐藤 峻介, 山本高行, 川勝康弘, 大山聖 (ISAS), 萩原和子 (MSS)



概要

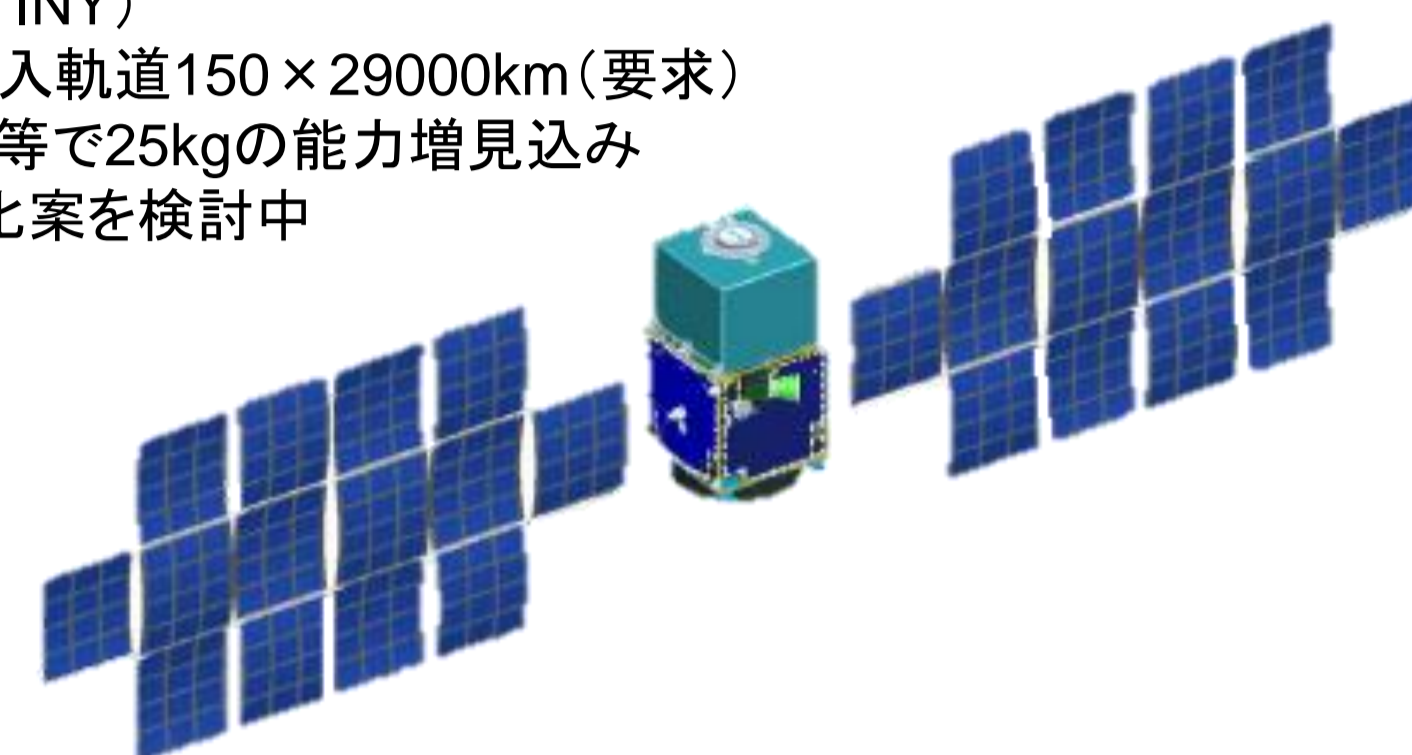
DESTINYはイプシロンロケットにより高エネルギー軌道(長楕円軌道)に投入される。より高い軌道に DESTINYを投入できれば、DESTINYの設計や運用への負荷を下げる事ができる。本研究では、ミッションに適したイプシロンロケットの飛行計画を多目的最適化により追求し、将来の高エネルギー軌道設計における指標を得ることを目的とする

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
 - 探査機質量400kg, 150km×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を投入できれば、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950×1150km(機体誤差最悪見積時)
 - 3段式相当に換算すると, 質量約1077kg, 投入軌道700×1070km
 - 高エネルギー軌道に換算すると, 質量350kg, 投入軌道250×24000km
- 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200×30700km(要求値)
 - DESTINY軌道150×29000km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
- 3号機以降(2017年冬?, DESTINY)
 - 基本形態, 質量400kg, 投入軌道150×29000km(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)

【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: 内之浦夏風ノミナル
- 打上シーケンス

【計算ケース】

	ケース1, 2, 3
目的関数	(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)
設計変数	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	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

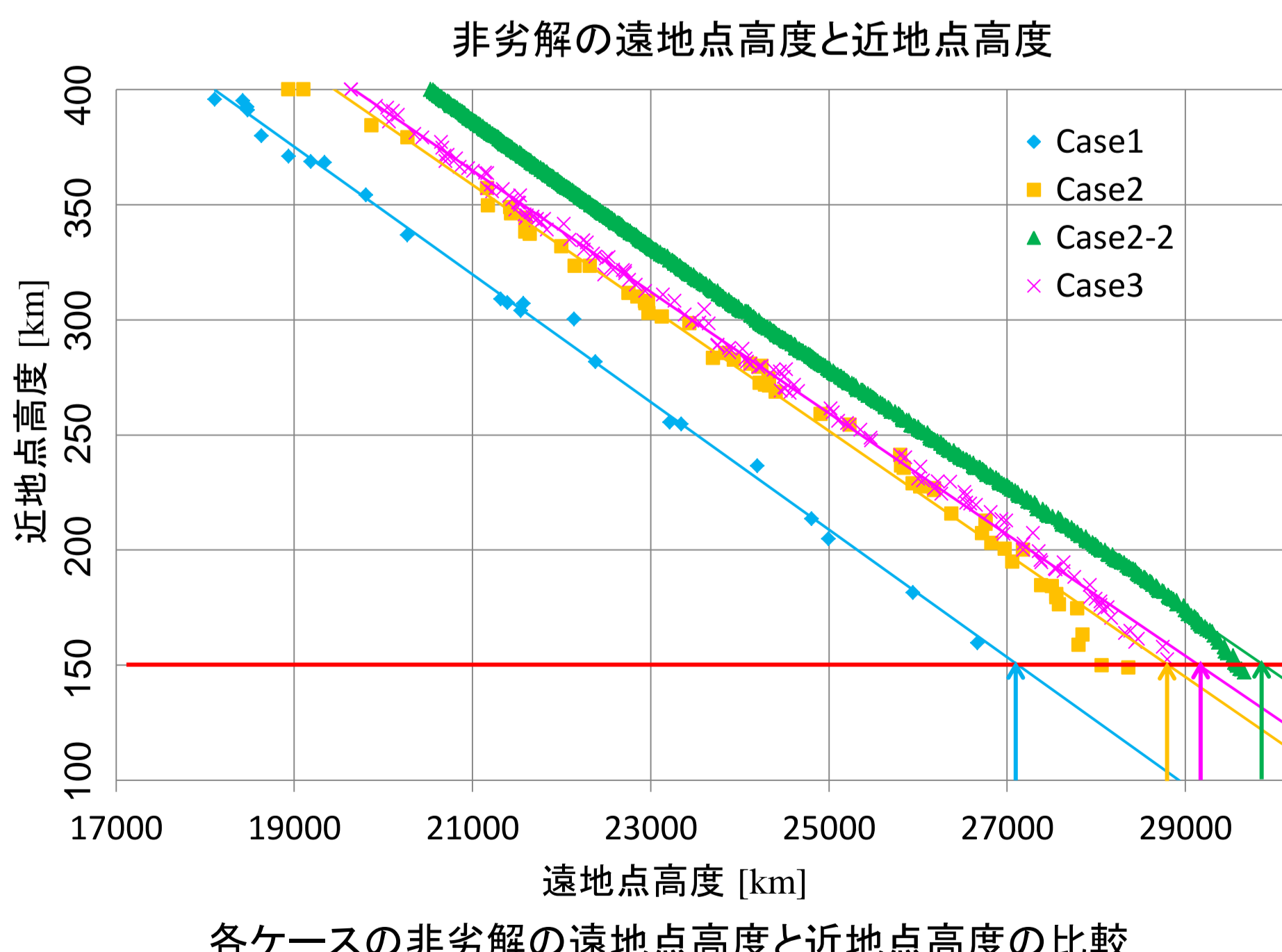
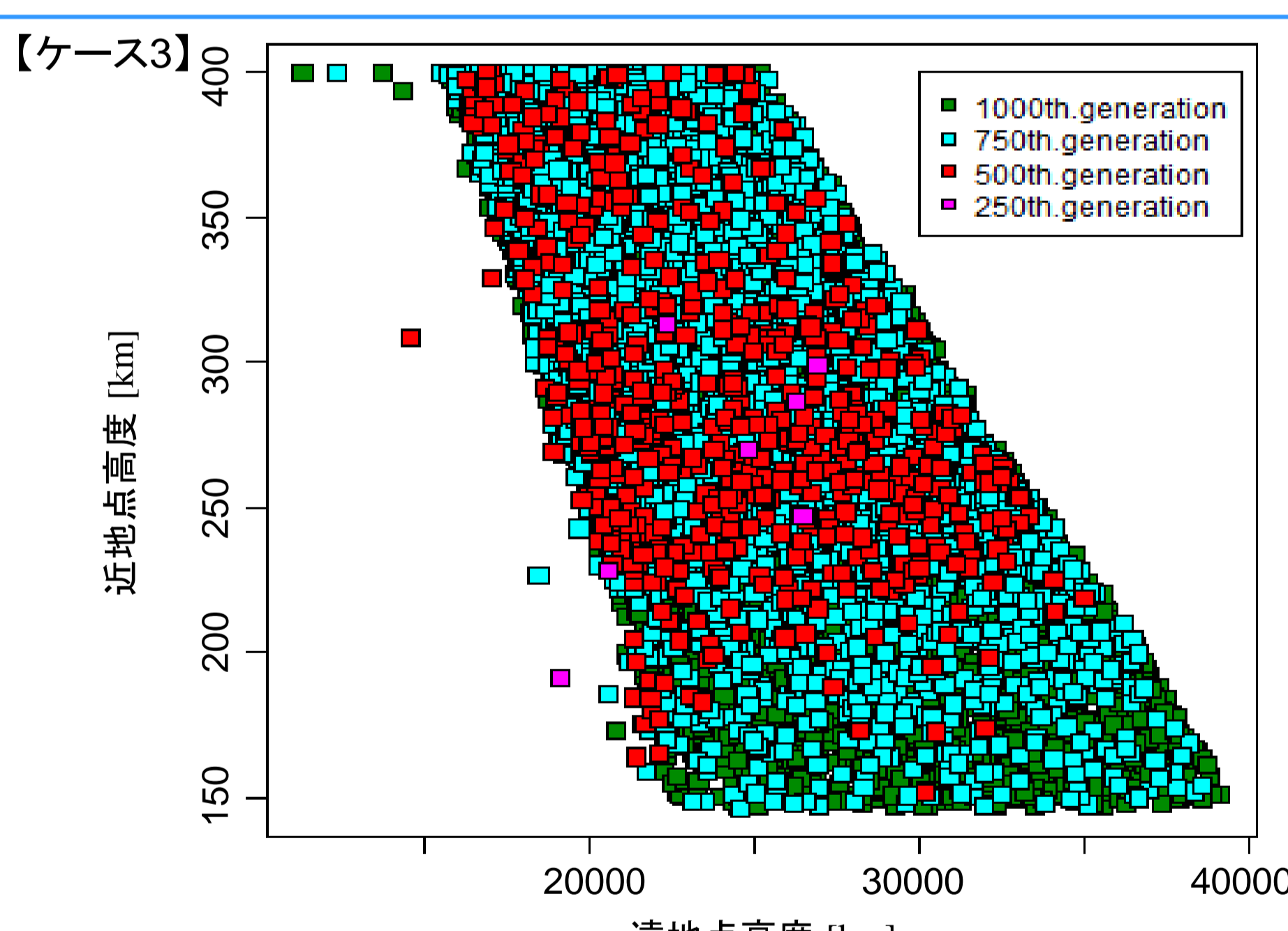
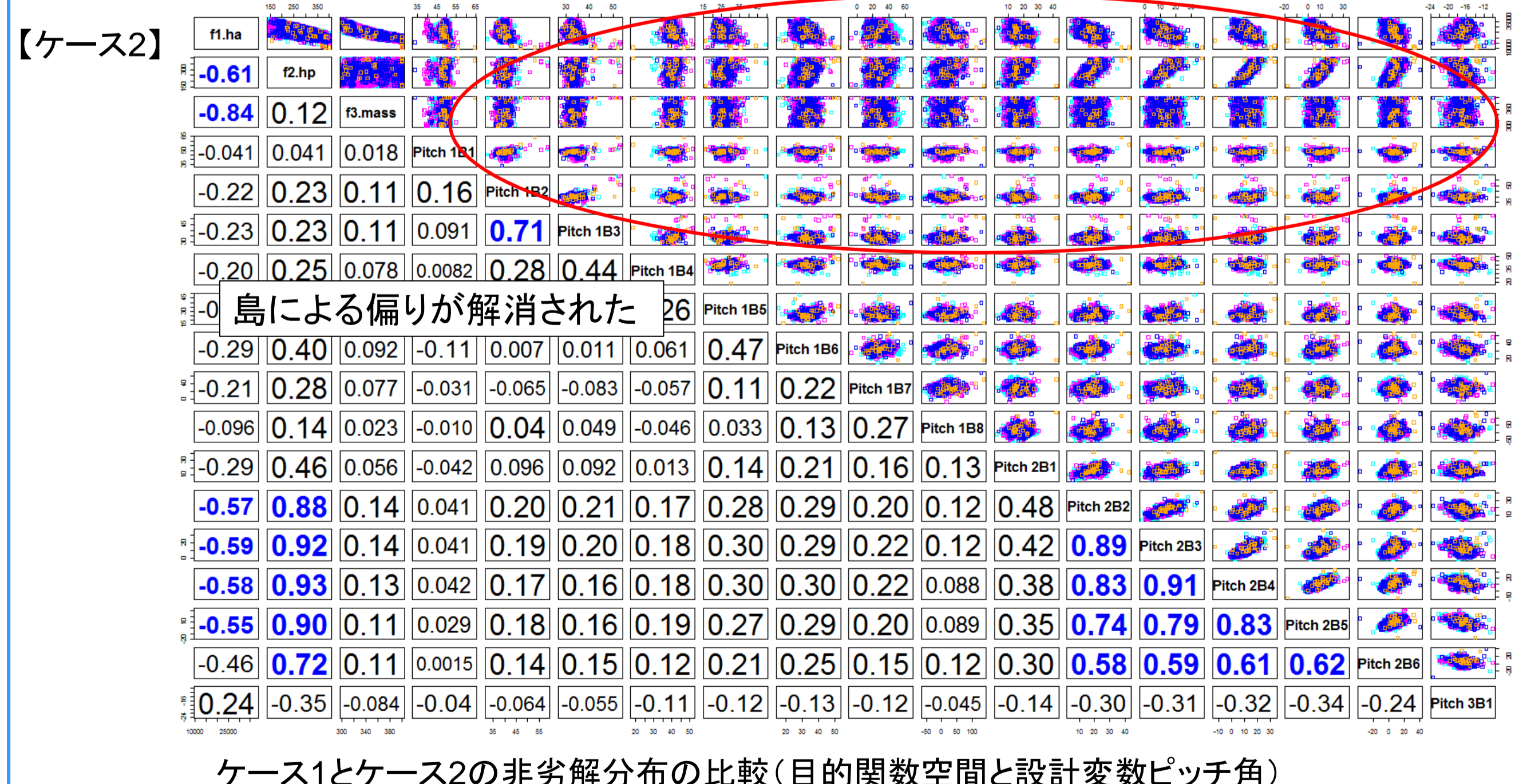
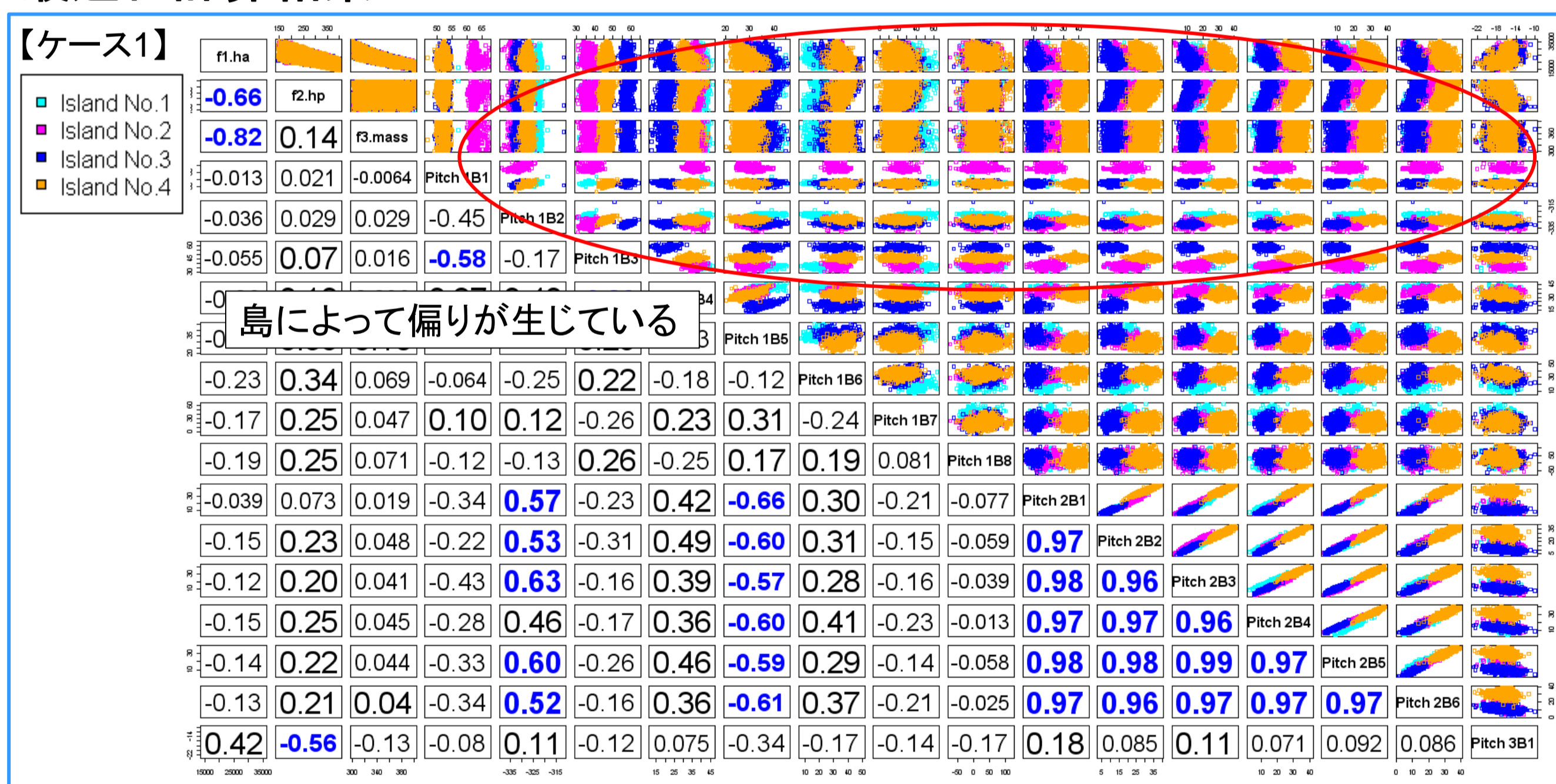
TIME[s]	イベント
0	リフトオフ
116	1段燃焼終了
(150)	フェアリング分離
161	1/2段分離
165	2段燃焼開始
270	2段燃焼終了
W-4	2/3段分離
W(≥307)	3段燃焼開始
W+90	3段燃焼終了

【多目的遺伝的アルゴリズム(NSGA-II)固有パラメータ】

パラメータ	ケース1	ケース2	ケース3	ケース2-2
疑似乱数の種		島1:0.1 島2:0.367 島3:0.633 島4:0.9		0.1(島1のみ)
集団サイズ(第1世代のサイズ)	300 (30000)	300 (1000*)	300 (1000*)	1000
世代数	300	500	1000	667
交叉の確率	1.0	1.0	1.0	1.0
突然変異の確率	0.05	島1:0.01 島2:0.05 島3:0.10 島4:0.25	島1:0.01 島2:0.05 島3:0.10 島4:0.25	0.01

*ケース2と3では、第1~50世代を1000個体で実行し第51世代でランク上位300までの個体を選択。また、島ごとの偏りを軽減するために、50世代進化計算を行う度に100個体を隣の島へ移住させる

最適化計算結果



概要ではDESTINY質量の目標値として400kgを想定しているが、これはイプシロンロケット上段の軽量化を見込んでいるためである。今回の考察ではこの軽量化による能力増を考慮せず、質量350kg, 近地点高度150kmを基準に比較評価を行っている。

- 【ケース1結果概要】
 - 3目的3制約32設計変数での進化計算を行った
 - 質量350kgで近地点高度150kmのときに、遠地点高度は27200km
 - 各設計変数島ごとに進化に偏りがみられる。各島が独立して生き残った個体の特徴を進化させた結果、島によっては無駄な角度変化を生じる集団が生成されるなど、偏りが生じる結果となった
- 【ケース2結果概要】
 - ケース1の条件に対し、島ごとに突然変異率を変化させ50世代ごとに100個体を隣の島へ移住させる処理を追加
 - 質量350kgで近地点高度150kmのときに遠地点高度は28800km
 - 完全に均等ではないが、各島が設計変数に対し偏りなく非劣解を有しており、島を移住させた効果が確認できた
 - ケース2-2でDESTINY質量を350kgに固定して解析を行った場合、近地点高度150kmのときに29900kmとなることから、まだ進化計算による解が収束していないことが考えられる
- 【ケース3結果概要】
 - ケース2と同条件で、世代数を1000に増やした
 - 質量350kgで近地点高度150kmのときに、遠地点高度は29100km
 - 非劣解の個体数が、第1~250世代は29, 第251~500世代は2202, 第501~750世代は13519, 第751~1000世代は23634と、計算初期は急激に増えるが500世代以降増分が収束してきている
 - ケース2-2よりも遠地点高度が小さい結果となったが、非劣解の世代間の増え方からもわかるように、これ以上進化計算を進めることは計算負荷の増大につながる。目的関数や設計変数の傾向を観察するには現在の計算量で充分であり、今後より効率よくさらに良い結果を得るために、軌道に影響を与える設計変数の範囲、数を検討し、絞っていく必要がある。

結論と今後の課題

- 【結論】
 - 多目的設計最適化を用いた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, 32設計変数, 3制約, 300世代
 - 昨年度の進化計算に比べ低い遠地点高度が得られ、各島で進化に偏りがみられた
 - ケース2: 3目的関数, 32設計変数, 3制約, 500世代(50世代ごとに100個体を島へ移住)
 - 島を移住させる処理を施すことで、島ごとの進化の偏りを軽減できた
 - ケース2-2: 2目的関数, 31設計変数, 3制約(DESTINY質量を350kgに固定)
 - ケース2よりも約1000km大きな遠地点高度が得られることから、ケース2の解はまだ収束できていないことが分かった

- ケース3: 3目的関数, 32設計変数, 3制約, 1000世代
 - ケース2よりも約300km大きな遠地点高度が得られた。ケース2-2と比較すると遠地点高度は低いが、現在の条件での解析でこれ以上世代を増やすことは計算負荷が膨大になるため、パラメータの検討が進み、変数が絞られてから詳細な解析を行っていく予定である
- 【今後の課題】
 - 今後は以下の順に解析を進めていく予定である
 - 制約数の増加
 - 打ち上げ初期(X~X+50s)の変数化
 - 設計パラメータの検討
 - 飛行安全制約の追加