

# ロケット上段の保護される太陽系天体への衝突確率解析

菊池隼仁 (JAXA)、廣瀬史子 (JAXA)、尾川順子 (JAXA)、仁田工美 (JAXA)、藤田和央 (JAXA)

## Collision Probability Analysis of Rocket Upper Stage with Protected Celestial Body of Solar System

Junji Kikuchi\*, Chikako Hirose, Naoko Ogawa, Kumi Nitta, Kazuhisa Fujita

\*JAXA., 3-1-1 Yoshinodai, Chuo, Sagami-hara, Kanagawa, 252-5210, Japan

E-Mail: kikuchi.junji@jaxa.jp

**Abstract:** The Emirates Mars Mission (EMM) is a Mars Exploration Mission by MBRSC, the UAE space agency. On July 20, 2020, Mitsubishi Heavy Industries' H-IIA Launch Vehicle No. 42 successfully injected the EMM's Mars orbiter HOPE into the Mars transfer orbit. For spacecrafts launched from Japanese launch sites, it is necessary to show that the collision probability with Mars is below the specified value. In this paper, the calculation method of the Mars impact probability of the upper stage of the H-IIA rocket is proposed by performing Monte Carlo calculations considering the initial state error and the  $\Delta V$  disturbance.

**Key words;** Mars, Collision Probability, Planetary Protection, H-IIA, EMM

### 1. はじめに

Emirates Mars Mission(EMM)は、UAE の宇宙機関である MBRSC が火星到達を目指したミッションであり、火星探査機HOPE が開発された。2020年7月20日、Fig.1 に示す(株)三菱重工業の H-IIA ロケット 42 号機は、HOPE の火星遷移軌道へ投入することに成功した。

日本の射場から打ち上げられる宇宙機においては、惑星保護プログラム標準(JMR-014)および関連ハンドブック(JERG-0-057-HB001)、並びに COSPAR 惑星保護方針に従い、火星に対する衝突確率が規定値を下回することを示す必要がある。本稿では、H-IIA ロケット上段の火星衝突確率の計算結果を纏める。



Fig.1 H-IIA ロケット 42 号機による EMM の打ち上げ@種子島宇宙センター。

### 2. 解析条件

#### 2.1 EMM / H-IIA ミッションシーケンス

H-IIA ロケット上段は軌道上での EMM の分離から合計 3 つのシーケンスがあり、内容を Table.1 に示す。まず、H-IIA ロケットは EMM 分離後(No.1)に搭載燃料の廃液のため姿勢変更を行い、これを CCAM (Contamination and Collision Avoidance Maneuver) と呼称する。(No.2)次に、打ち上げ日により異なるが EMM 分離から所定の時間後に Post CCAM-venting と呼ばれる廃液を行う。(No.3)この際に H-IIA ロケット上段には推力が発生する。ノミナルでは 2020 年 7 月 14 日での打ち上げを想定しており、2021 年 2 月付近に火星に最接近すると予想される。Fig.2 に軌道遷移図を示す。

Table.1 H-IIA ロケット上段軌道上シーケンス。

No	シーケンス	内容
1	EMM 分離	H-IIA から EMM を分離
2	CCAM*	廃液のための姿勢変更
3	Post CCAM-venting	廃液(推力発生)

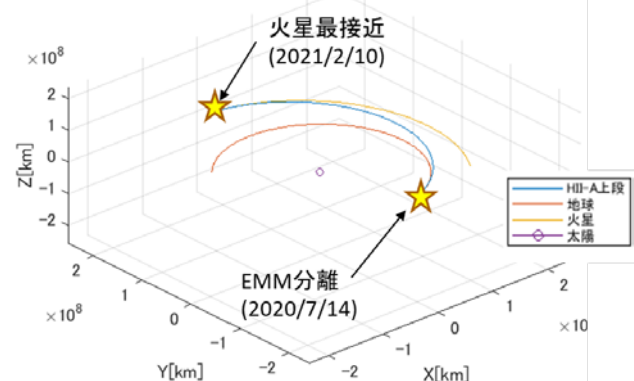


Fig.2 H-IIA ロケット上段軌道遷移図 (太陽中心 J2000 黄道面座標系)。



## 2.2. 軌道解析ソフトウェア

解析には軌道・ミッション解析汎用ソフトウェアである STK / Astrogator を使用する。このソフトウェアは軌道上初期状態やマニューバ量を入力することで、多天体の重力影響下で任意時間後の軌道伝搬結果を出力する機能を有する。

解析条件として、重力を考慮する天体は基本的に太陽系の代表的な天体全て（太陽、水星、金星、地球、月、火星、木星、土星、天王星、海王星、冥王星）とする。それぞれの天体で使用する天体暦を Table.2 に示す。なお、解析には太陽光圧による軌道変動の影響を考慮することとする。

Table.2 解析における適用天体暦.

天体暦	対象天体
JPL DE430	太陽、地球、月
JPL SPICE	水星、金星、火星、木星、土星、天王星、海王星、冥王星

## 2.3. H-IIA ロケット上段

初期状態である EMM 分離時の軌道要素は、ノミナルとして予定されていた 2020 年 7 月 14 日の軌道要素を用いる。H-IIA ロケット上段は、Fig.3 に搭載位置を示す RCS により Post-CCAM Venting を実施し、その際に  $\Delta V$  が発生する。

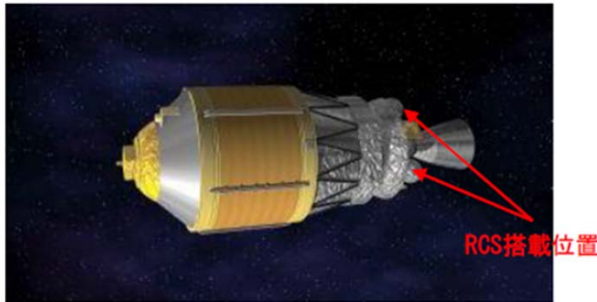


Fig.3 H-IIA ロケット上段 RCS 搭載位置.

## 2.4. モンテカルロ設定

火星衝突確率を計算するために 1000 ケースのモンテカルロ計算を行い、 $\Delta V$  実施後 50 年間の軌道伝搬における火星最接近距離を取得することで、平均値と標準偏差を算出する。モンテカルロ計算では初期状態誤差、 $\Delta V$  の二種類のパラメータを変数とするため、それぞれの設定方法を以下に示す。

### 2.4.1. 初期状態誤差設定

ロケット誘導制御誤差による EMM 分離時(初期状態)の誤差共分散行列  $\mathbf{T}$  を各初期状態量への振り分け方法を示す。まず、誤差共分散行列  $\mathbf{T}$  をコレスキー分解し、次式のように下三角行列  $\mathbf{L}$  に因数分解する。

$$\mathbf{L} = \text{chol}(\mathbf{T}) \quad (1)$$

正規分布を仮定した乱数  $\mathbf{N}(0,1)$  による各成分の初期誤差量  $\mathbf{Error}_{init}$  を次式のように計算する。

$$\mathbf{Error}_{init} = \mathbf{L} \times \mathbf{N}(0,1) \quad (2)$$

初期状態  $\mathbf{State}_{init}$  に初期誤差量  $\mathbf{Error}_{init}$  を加えた値をモンテカルロ計算時の初期状態とする。

$$\begin{pmatrix} Epoch \\ R_{x_0} \\ R_{y_0} \\ R_{z_0} \\ V_{x_0} \\ V_{y_0} \\ V_{z_0} \end{pmatrix} = \mathbf{State}_{init} + \mathbf{Error}_{init} \quad (3)$$

### 2.4.2. $\Delta V$ 設定

EMM 分離から所定の時間後に Post CCAM-venting と呼ばれる廃液を行う。この際に H-IIA ロケット上段には推力が発生するため、解析モデルに  $\Delta V$  シーケンスを加える。まず、 $\Delta V$  はタイマー実行のため初期状態の時刻誤差  $\mathbf{Error}_{init}$  と同量の誤差を  $\Delta V$  時刻に加える。次に  $\Delta V$  量は任意の平均値  $\mu$ 、標準偏差  $\sigma$  の正規乱数とする。 $\Delta V$  方向は各打ち上げ日ごとに単位方向ベクトル  $\mathbf{VNC}$  が規定されている。解析で設定する  $\Delta V$  の方向ベクトル  $\mathbf{DV}$  は、上記の  $\Delta V$  量と単位方向ベクトル  $\mathbf{VNC}$  から次式のように定義する。

$$\mathbf{DV} = \begin{pmatrix} DV_x \\ DV_y \\ DV_z \end{pmatrix} = \Delta V \text{ 量} \times \mathbf{VNC} \quad (4)$$

### 2.4.3. 火星衝突確率計算方法

本解析では、火星衝突の判定基準を火星衝突半径と定める。火星衝突半径の導出方法は、まずエネルギー保存式から火星に対する H-IIA ロケットの無限遠接近速度  $v_\infty$  を求める。ここで、火星最接近時の距離を  $r$ 、火星最接近時の相対速度を  $v$ 、火星重力定数を  $\mu$  とすると、次式で表すことができる。

$$E = \frac{v^2}{2} - \frac{\mu}{r} = \frac{v_\infty^2}{2} \quad (5)$$

火星半径を  $r_p$  とすると、火星衝突半径  $b$  は次式で求めることができる。

$$b = r_p \sqrt{\frac{2\mu}{r_p v_\infty^2} + 1} \quad (6)$$

本解析で計算を行った各パラメータを Table.3 に示す。なお、火星衝突半径  $b$  は  $7.38 \times 10^3$  [km] の値を用いることとする。

火星衝突確率の計算  $P_b$  は、 $\Delta V$  実施後から 50 年間軌道を伝搬させた中での火星最接近距離から計算を行う。1000 ケースのモンテカルロ計算でそれぞれの火星最接近距離を取得し、これらの値が正規分布に従い平均値を  $\mu$ 、標準偏差を  $\sigma$  とすると、火星衝突半径  $b$  に入る確率  $P_b$  は次式で表すことができる。



$$P_b = \int_{-\infty}^b \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\}} \quad (7)$$

次に、故障等(メテオロイドインパクト含)により  $\Delta V$  が行えなくなる可能性を考慮する。 $\Delta V$  が行えなくなる故障確率を  $P_n$ 、 $\Delta V$  を行う場合の衝突確率を  $P_b$ 、 $\Delta V$  を行わない場合の衝突確率を  $P_0$ 、とすると最終的な衝突確率  $P$  は次式で表すことができる。

$$P = P_b \times (1 - P_n) + P_0 \times P_n \quad (8)$$

Table.3 火星衝突半径計算パラメータ.

項目	値
$r[\text{km}]$	$1.23 \times 10^5$
$v[\text{km/s}]$	2.74
$v_\infty[\text{km/s}]$	2.61
$\mu$	$4.31 \times 10^4$
$r_p[\text{km}]$	$3.40 \times 10^3$
$b[\text{km}]$	$7.38 \times 10^3$

### 3. 解析結果

#### 3.1. Reference 軌道結果

まず、初期状態誤差と  $\Delta V$  の両者を解析に入れず、ノミナルの初期状態で 50 年間伝播させた軌道を Reference 軌道と呼称する。Fig.4 は Reference 軌道での 50 年間の H-IIA ロケットと火星距離の推移を表している。本結果より、2020/7/14 の Reference 軌道では火星衝突半径  $b$  より火星最接近距離は十分大きいことを確認した。また、H-IIA ロケットは約 8 年周期で火星との接近を繰り返すが、火星重力圏内( $5.78 \times 10^5[\text{km}]$ )に入るのは 2021/2/9 の第 1 会合のみという結果となった。

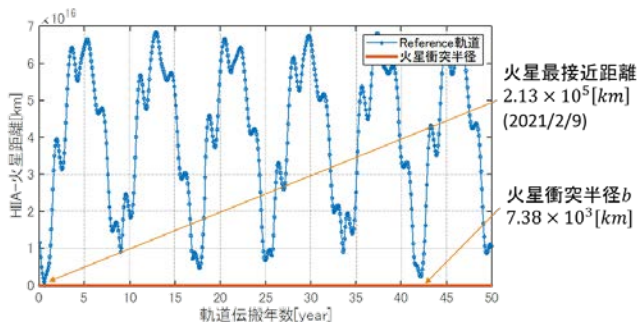


Fig.4 HII-A ロケット上段と火星距離の推移 (2020/7/14 Reference 軌道).

#### 3.2. 火星 B 平面比較結果

火星 B 平面上での H-IIA ロケットの火星距離について評価を行う。まず、火星 B 平面の定義を Fig.5 に示す。H-IIA ロケットの火星に対する相対速度ベクトルに垂直な火星中心の平面を火星 B 平面とする。T 軸は B 平面と火星公転面との交線、R 軸はそれに直交する軸とする。

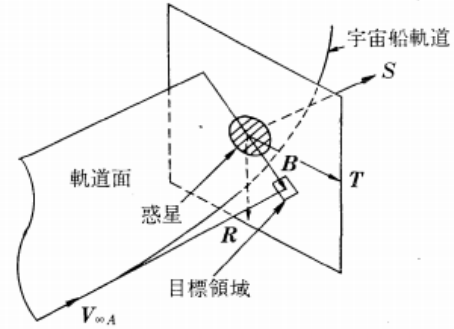


Fig.5 火星 B 平面定義 (\*出典:松尾弘毅”惑星間飛行軌道の最適化”)

解析条件は 2020/7/14 で初期状態誤差のみを考慮し、 $\Delta V$  を行わない場合のモンテカルロ計算とする。Fig.6 は第 1 会合での火星最接近時の相対速度ベクトルを火星 B 平面上にプロットした解析結果であり、横軸は B 平面 T 軸、縦軸は B 平面 R 軸、カラーバーは H-IIA ロケットと火星との距離を表している。モンテカルロ解析数は 1,000 ケースである。本結果は EMM 側との解析とも比較しており、形状は概ね一致していることから、両者の解析手法の妥当性を検証している。

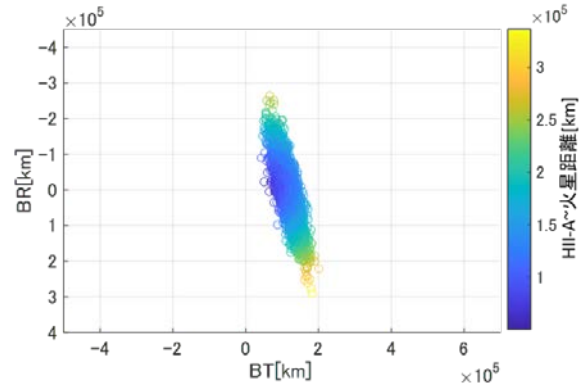


Fig.6 第 1 会合火星 B 平面結果.

#### 3.3. 火星衝突確率計算結果

Fig.7 は 2020/7/14 の打ち上げ日で初期状態誤差と  $\Delta V$  の両者を解析に含めモンテカルロ計算を 1000 ケース行い、全てのケースで 50 年間軌道を伝播させ H-IIA ロケットと火星との最接近距離を取得しプロットした図である。本結果より、2020/7/14 のモンテカルロ解析では全ケースで火星衝突半径  $b$  より火星最接近距離は十分大きいことを確認した。

続いて、Fig.8 は Fig.7 でのモンテカルロ解析結果から平均値、標準偏差を算出し、確率密度関数を描画した図である。火星最接近距離の平均値である  $2.61 \times 10^5 [\text{km}]$  で最も確率密度が大きく、平均値から離れるに従い確率密度は減少する。火星衝突確率  $P_b$  は式(7)より、 $-\infty \sim b$  の範囲を積分することで算出することができる。



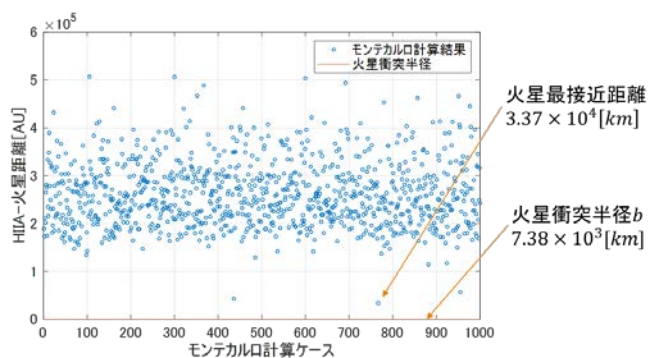


Fig.7 H-IIA ロケット上段 - 火星最接近距離  
(モンテカルロ 1000 ケース計算結果).

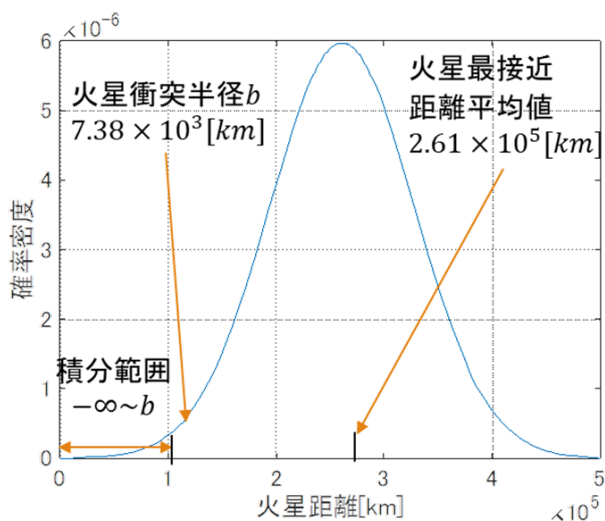


Fig.8 火星最接近距離の確率密度関数.

EMM 分離後～Post-CCAM Venting までの時間は最大でも数十分程度であり、その間にメテオロイドインパクトで H-IIA ロケットの機能が喪失するケースは著しく小さいため、メテオロイドインパクトによる機能喪失の確率はゼロとする。また、H-IIA ロケットの RCS 系故障確率も極めて微小であるため、 $P_n$  はゼロとする。

これより、火星衝突確率  $P$  は  $P_b$  と同値となる。H-IIA ロケット 42 号機における全ての打ち上げ日での火星衝突確率は、惑星保護で規定されている  $10^{-4}$  を超えないという結果となった。

#### 4. 結論

本稿では、UAE の火星探査プロジェクトである EMM を打ち上げた、H-IIA 42 号機ロケット上段の火星に対する衝突確率の計算手法を紹介した。解析の際には、惑星保護プログラム標準 (JMR-014) および関連ハンドブック (JERG-0-057-HB001) , 並びに COSPAR 惑星保護方針が推奨する方法を用いて実施している。

衝突解析では、初期状態誤差量や発生  $\Delta V$  を考慮したモンテカルロ計算を行うことにより、全ての打ち上げ日において 50 年間に渡る火星に対する衝突確率が、JMR-014 に規定される許容上限値  $10^{-4}$  を超えないことを確認した。