

# USERS カプセル飛行データに基づく再突入飛行環境の再構築

山田哲哉<sup>1</sup>・石井信明<sup>1</sup>・松田聖路<sup>2</sup>

## Reproduction of the Reentry Flight Environment based on the USERS Capsule Flight Data

By

Tetsuya YAMADA<sup>1</sup>, Nobuaki ISHII<sup>1</sup>, Seiji MATSUDA<sup>2</sup>

**Abstract :** In the final phase of the USERS mission, the REV capsule with orbital experiment samples made a reentry flight from the low earth orbit and was successfully recovered on the sea. Because the USERS REV capsule is the first domestic reentry capsule developed in pure domestic technologies, the post flight analysis of the recovered heat shield is significant not only for the design validation but also for the future application. Moreover, the READ experiment was carried out by the on-board unit for the diagnostics of the flight environment. This paper presents a reproduction of the reentry flight trajectory and the flight environment based on the comparison between the flight data and numerical simulations for the sake of the post flight analysis of the thermal protection system, READ experiment, and other systems' design validation.

### 1. はじめに

USERSはUSEFが開発した宇宙実験システムであり、その目的は、

1) 8.5ヶ月間の軌道運用後、大気圏再突入技術の開発・実証。2) 微小重力環境下における大型高温超電導材料の結晶成長実験。3) 将来の衛星バスへ適用に向けた民生技術・部品の宇宙環境下における機能検証である。2002年9月10日、H-IIAロケット3号機によって、データリレー衛星DRTSとともに打ち上げられ、450×450 km、軌道傾斜角 $i=30.4^\circ$  のほぼ真円軌道に投入された。約半年の軌道実験を行った後、2003年5月30日に軌道離脱、地球再突入を行い、午前6:22JST、小笠原・南鳥島の南西380kmに着水し、その後、無事回収された。

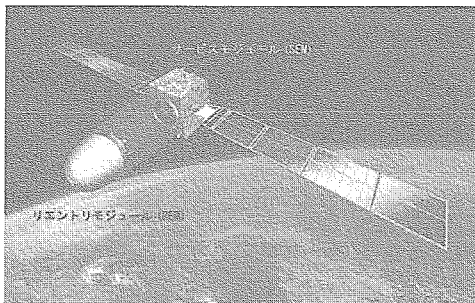
再突入飛行中に、ノーズ澱み点に設けられた小孔より輻射の分光計測を行うREAD実験が行われた。また、設計から製作まで純国産の技術のみによって開発されたアブレタヒートシールドによる国内初の回収成功という意義も大きい。これらのデータを十全に活用するため、再突入飛行軌道の推定、空力加熱条件等飛行環境を推定しておくことは重要である。本稿は、再突入飛行を推定する上での不確定パラメータの飛行データに与える影響度を調べ、その後、再突入飛行環境の再構築を試みるものである。

<sup>1</sup>宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部 (ISAS/JAXA)

<sup>2</sup>IHIエアロスペース (株) (IHI Aerospace)

## 2. USERSカプセルと再突入シーケンス

USERSシステムは軌道上にて姿勢制御，地上との通信等を行うSEMと再突入モジュールREMからなっている。さらにREMは軌道離脱モータからなるPMと，実際に再突入・回収されるカプセルREVに分けられる(図1)。再突入シーケンスは図2に示す通りになっており，トランスポンダーを搭載したSEMとREMの分離後にPMが点火(PM IG)され軌道離脱が行われる。従って，2次レーダによって離脱モータによる $\Delta V$ 後の突入軌道要素を決定することはできない。



PM (Dry)		165.2 kg
REV	Instruments	437 kg
673.1 kg	TPS Ablator	124 kg
	Others	112 kg

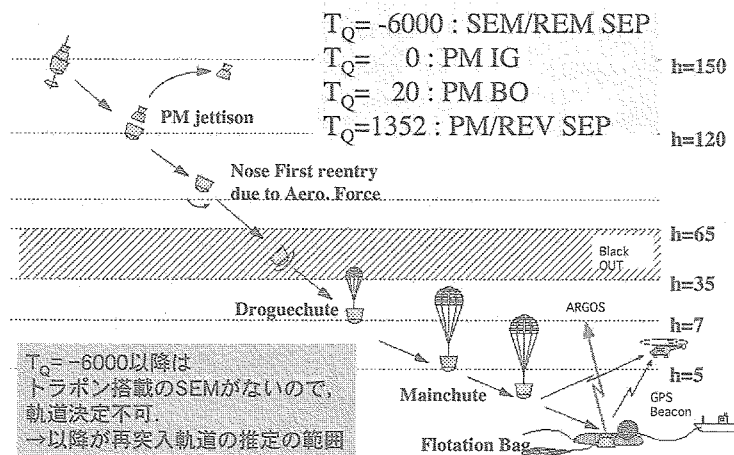


図2 再突入シーケンス概要

そこで，再突入飛行環境計測実験 (READ)，TPSの飛行後解析等を行うためには，誤差を与える要因，その影響感度を踏まえた再突入軌道の推定，再構築が必要となる。表1に再突入飛行環境の再構築に関係する，実際の飛行データ等計測項目と不確定パラメータを整理した。特に鹿児島宇宙空間観測所 (KSC) が1次レーダにより再突入飛行中のREVの捕捉に成功した，実際に回収した位置に加え，再突入飛行中のREVの位置・速度データは非常に有用で，これらに対する不確定な各パラメータの影響感度を調べ，それらを考慮したバランスのよい軌道/再突入飛行環境の推定を行っていくことが大切である。

表1 再突入飛行環境の再構築における計測項目と不確定パラメータ

【計測項目】	【不確定パラメータ】
・回収点位置	・突入条件 (分散あり)
・加速度 (飛行データ)	・高，中層大気 (密度) 及び風
・KSCレーダ軌道・位置情報	・空力係数 (誤差あり)
・地表付近大気 (密度) 及び風	・TPS損耗の重量変化

### 3. 各パラメータの影響感度

#### 3.1. 大気モデルの選択について

飛行軌道が決定されてから以降、つまりSEM/REMの分離後に高層大気を飛行する時間が1時間半と長いこともあり、高層大気の与える影響感度を調べることは重要であろう。高度500 kmにおける大気密度は太陽活動の状態によって数倍異なることもあり得るため、高層大気密度を大きく左右する要因である太陽活動を考慮することとした。GRAM99 (Global Atmospheric Model) は、NASA MSC開発の大気モデルであり、高度120kmから上空は、MET (Marshall Engineering Thermosphere Model, Hickey, 1988) 及び、各種衛星やS T Sの計測データに統計処理を加えたものである。再突入当日の太陽電波強度定数 (F10.7フラックス) を入力することで、高層大気密度を統計に基づいて推測することが可能である。CRLより入手したUSERS再突入時のF10.7フラックスは図3に示されるように $F=113$ であり、変動の平均的な値である。一方、UKMO (英国気象局: United Kingdom Meteorological Office) のデータは、当日の実測値に基づきモデルに照らして導出した実測的推算値である。UKMOデータは時刻が限られている点、高度50km以下のデータのみである点を考慮し、USERSカプセルの再突入飛行を解析する際の大気密度のノミナル値としては、高高度ではGRAMを、低高度ではUKMOデータを用いることとし、これらを高度57kmで相加平均し、接合した。ここで、UKMOのデータは再突入に最も近くの緯度/経度に当たるデータを代表として採用している。

UKMO :  $\rho_1 = 4.294E-4 @H=57.04$

GRAM99 :  $\rho_2 = 4.932E-4 @H=57.0 \text{ km}$

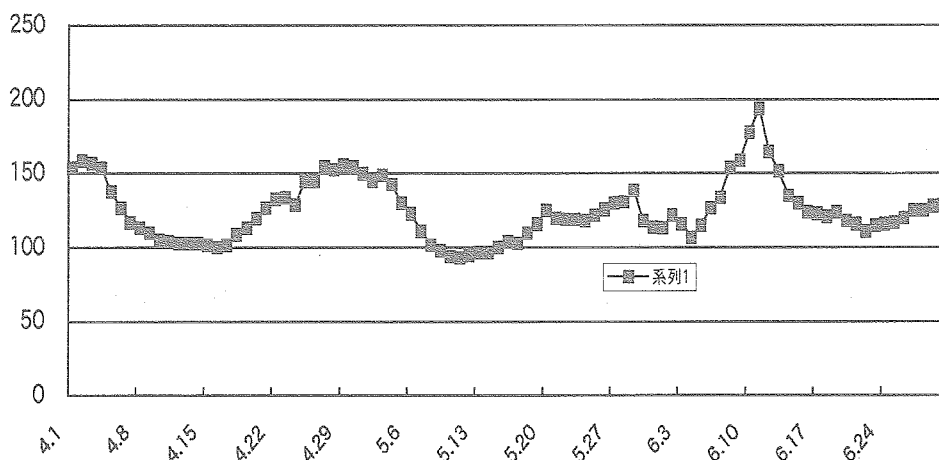


図3 最近の太陽電波強度変動(F10.7)

#### 3.2 突入軌道初期条件

USERSはほぼ円軌道であるため、通常の軌道決定における近地点、近地点引数等を精度よく決定することが難しい。軌道離脱の $\Delta V$ の大きさ、方向分散等があるが、結局これらは最終的には、軌道離脱モータ燃焼終了後の出来上がり軌道の分散パラメータとしてまとめることが可能である。

前項の太陽電波強度の違いによる高高度密度の影響(当日の $F10.7Flux = 113$ と最大に近い $F230$ )、及び近地点引数 $\omega$ をノミナル $69^\circ \pm 3\sigma$  ( $\pm 20^\circ$ ) をパラメータとして、これらがREVの高度10kmにおける緯度経度の与える影響調べ、図4に示した。同図より、太陽電波強度、すなわち高層大気密度の違いが着地点に与える影響はほとんどなく、今回の場合は軌道初期条件の分散が支配的であり、H10km位置における緯度/経度はそれぞれ、 $23.6 \sim 24.1$  (約55km)、 $148.2 \sim 146.6^\circ$  (約180km) である。

図5に、近地点引数をパラメータとした軌道初期条件の最大減速率，最大減速時刻への影響を示す。想定される近地点引数の設定誤差の範囲内では，最大減速率は8.9～9Gと変化が小さいものの，最大減速率を与える時刻は，20秒の範囲で大きく変化する。

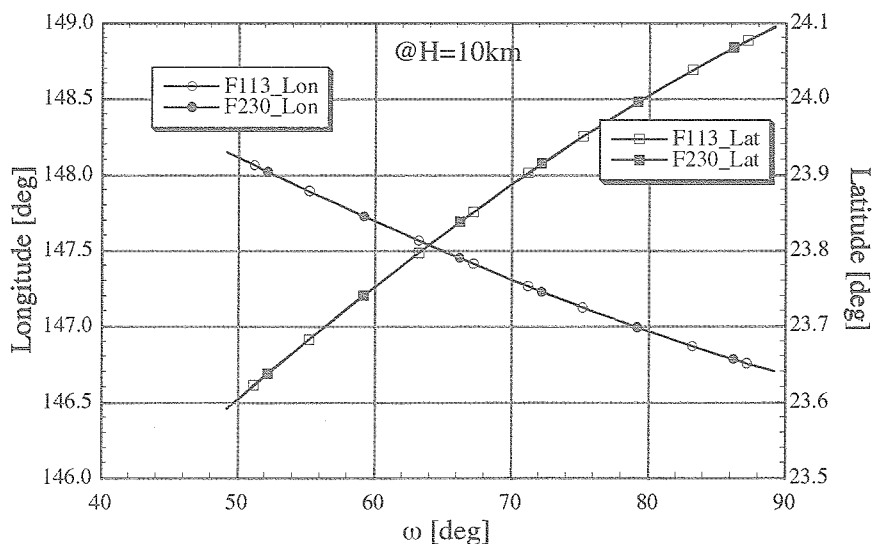


図4 近地点引数をパラメータとした軌道初期条件のH10km位置への影響

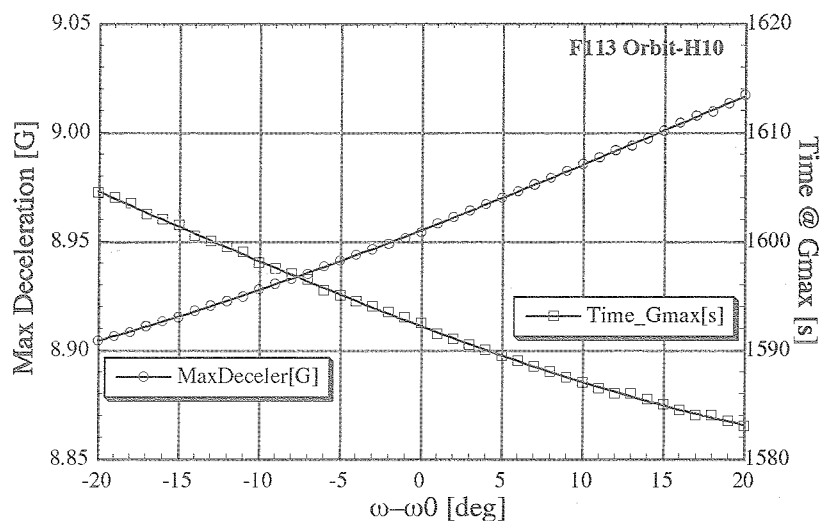


図5 近地点引数をパラメータとした軌道初期条件の最大減速率，最大減速時刻への影響

### 3.3. カプセル重量

飛行重量誤差としては，もともとの計測誤差，アブレータヒートシールドの飛行中における熱分解・焼損による重量変化予測誤差が考えられるが，後者が主である。アブレータ重量損耗は，熱分解と表面損耗に因るもので，およそ30kg。その内，重量予測エラーを±20%として±3kgを考慮すると，不確定量はREV重量に比して( $3\sigma=1\%$ )となり，僅かである。着地点等に対して，空力係数，カプセル重量の誤差が，高度10km位置に対して軌道初期条件ほどの影響を与えないことは，先に数倍変化する大気密度の影響が小さいことから，自明のことである。(空力係数，重量は弾道係数という形で，減速率に影響を与えるが，大気密度の変動はさらに大きいにも関わらず，影響がなかったからである。重量誤差の飛行環境に与える影響は非常に小さい。

### 3.4. 高度100km以下の低高度における大気密度，抵抗係数の影響

高度100km以下の低高度における大気密度，抵抗係数の影響感度を見るため，それぞれの分散を正規乱数として与え，5000ケースの再突入シミュレーション解析を行った。

カプセルの空力係数に関して，設計上マッハ数の全域に関して一定値 $3\sigma=10\%$ の誤差があるとしている。また，高度100km以下の大気密度の変動は，先に記述したGRAM99+UKMOのUSERSノミナル大気にGRAM99の統計分散を適用したもの（図6）を用いた。大気密度は高度100kmで15%の分散が有るが，最大減速の起こる高度約35kmでは，数%の大気密度分散に留まる。

解析結果より，大気密度変動，空力係数誤差が，カプセルの高度10km位置，最大減速率 $G$ ，最大空力加熱率 $q$ と，それらの発生時刻 $T$ ，高度 $Z$ に対する影響感度を表2に整理する。大気密度の変動のみの感度，空力係数（抵抗係数 $C_d$ のみ考慮）の変動それぞれと，それらの組み合わせを別に示してあるが，影響感度はほぼ同程度である。 $H=10\text{km}$  緯度/経度は， $1\sigma=3\text{km}/10\text{km}$ 。最大減速率の発生する時刻は $1\sigma=1\text{sec}$ 程度の影響をもっている。これらの影響感度は，軌道初期条件に比して，一桁以上影響が小さい。

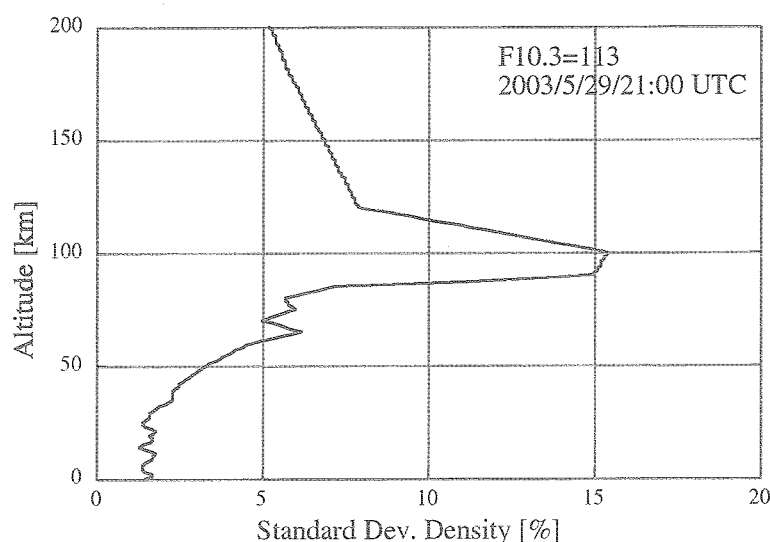


図6 高度200km以下

### 3.5. その他のパラメータ

開傘地点（ $H=7\sim 8\text{km}$ よ）と着水点は，開傘から着水までの予測時間（約2000秒）と当日の平均風速 $1.2\text{m/s}$ を考慮して最大約3kmのずれになる。ここで海流（ $0.15\text{m/s}$ 程度）による影響は小さい。すなわち，開傘位置から，回収位置までのずれは，空力的誤差（大気密度変動+空力係数誤差）の程度であり，この値は，再突入軌道決定の誤差に比して1桁以上小さい。

表2 大気密度，抵抗係数の影響感度

		Nominal	$\sigma$		
			Dens	$C_d$	Dens+ $C_d$
Longitude	deg	147.336	0.055	0.059	0.087
Latitude	deg	23.88	0.019	0.020	0.030
G max	G	8.95	0.034	0.030	0.048
Z (G max)	km	34.9	0.11	0.25	0.30
T (G max)	s	1592.27	0.52	0.77	1.06
q max	MW/m <sup>2</sup>	1.7	0.008	0.033	0.034
Z (q max)	km	49.22	0.35	0.38	0.65
T (q max)	s	1550.22	1.09	1.14	2.00

#### 4. 再突入飛行環境の推定

前節までに行ってきた影響感度解析結果から再突入環境の再構築する際の考え方について整理する。計測データとの比較において、

- ・ H=100kmまでは、REVのCd,(姿勢も)、大気密度変動の影響はない。
- ・ 上記以下では、Cd,大気密度が最大G発生時刻に $\sigma = 1s$ 程度の影響ということである。よって、再突入飛行環境を再構築するあたっては、

##### 1) 軌道の初期条件の決定 (3自由度)

REVの発見回収点を参考にH=10km位置を予測する。この際、Max G時刻を1, 2秒の違いまで追い込み、かつ、KSCレーダー情報を満たす、軌道初期条件を決定する。(近地点引数 $\omega$ のみの1パラメータ) (図7)

##### 2) 加速度履歴を満たすCd倍数, 大気密度倍数を決定する。

- ・ 6自由度(姿勢考慮)でREVの飛行模擬
- ・ Cd,  $\rho$ の標準偏差が最小になり、かつ、Max Gの時刻を1秒以下まで一致させるものを解とする。(図8)

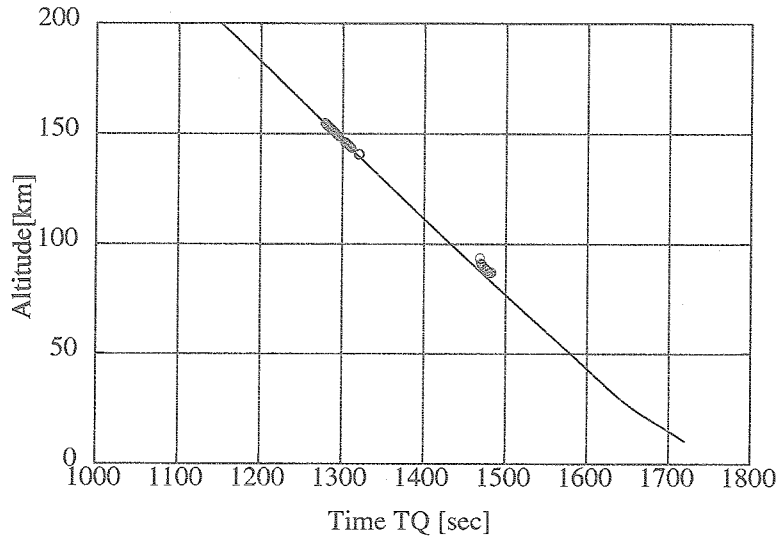


図7 レーダデータと軌道初期条件の合せ込み

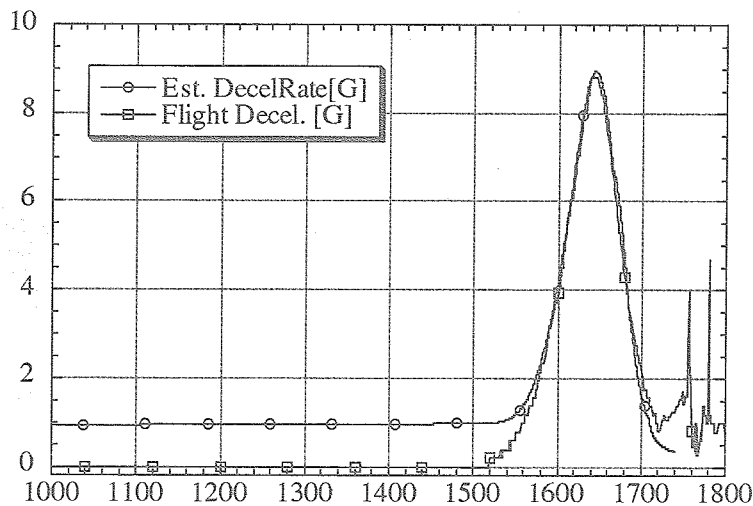


図8 減速率(解析及び飛行データ)

※ 解析結果は正確には速度変化率ベクトルのノルムであり、落下中も約1Gとなっている。

## 5. まとめ

USERカプセルの再突入飛行環境の再構築を行うため、各不確定パラメータの実際に計測されるデータへの影響感度を取得し、以下のことがわかった。

1. 高高度 (>100km) における大気密度, Cdの変動/誤差が飛行に与える影響はほとんどなく, 唯一, 再突入軌道初期条件のみが, 開傘(回収)位置を100kmのオーダーで, 最大減速Gを20秒程度の範囲で変化させる。
2. 上記より, 再突入軌道の再構築には, 軌道初期条件(近地点引数の1パラメータ)により, 回収位置を10km以内, 最大G時刻を1秒程度に追い込むことことで, ほぼ目的が達成できる。

尚, 回収位置の精度は数km以内, 最大G時刻を1秒未満であり, これ以上は, 風, 海流の影響もあるので, 有意な推定とならないと考える。