

## 光学観測による再突入飛翔体の捕捉

山田 哲哉<sup>1</sup>・矢野 創<sup>1</sup>・内田 右武<sup>1</sup>・石井 信明<sup>1</sup>・安部 隆士<sup>1</sup>・稲谷 芳文<sup>1</sup>  
藤田 和央<sup>1</sup>・柳澤 俊史<sup>2</sup>・伊地智 幸一<sup>3</sup>

## Optical Tracking of the Reentry Capsule

By

Tetsuya YAMADA<sup>1</sup>, Hajime YANO<sup>1</sup>, Yuubu UCHIDA<sup>1</sup>, Nobuaki ISHII<sup>1</sup>, Takashi ABE<sup>1</sup>,  
Yoshifumi INATANI<sup>1</sup>, Kazuhisa FUJITA<sup>1</sup>, Toshifumi YANAGISAWA<sup>2</sup>, Kouichi IJICHI<sup>3</sup>

**Abstract :** Normally, reentry bodies, even if they are to be recovered, are not equipped with on-board instruments such as transponders, which are useful for real-time position monitoring of the reentry bodies during the flight. This is because the surrounding plasma generated by the aerodynamic heating makes the transponder positioning nonsense as the blackout phenomena. If we could know the trajectory during the reentry phase, even if it's not monitored in real-time, the information will be a great help for the rapid recovery. The radiation from the highly-heated reentry body during the aerodynamic heating has enough intense radiation in visible region for the detection on the ground. This paper investigates a method of optical capturing of the reentry bodies by means of the visible radiation from the bodies during the aerodynamic heating. And a result of the optical tracking actually carried out on the occasion of the reentry of the REV capsule is also presented.

### 1. はじめに

無人再突入飛翔体は、回収を前提とするも再突入飛行経路をリアルタイムでモニタする際に有効なトランスポンダーのような機器が搭載されていない場合が多い。再突入時の熱的な制約、すなわち、衝撃波内のプラズマや耐熱材料そのものが電波に対しては遮蔽体として振る舞う点、またアンテナなどの突起物が外部に暴露されると空力加熱により焼損してしまう点などから、有効に機能しないことがわかっているためである。よって、回収点の予測は、分離前の投入軌道条件と、予め大気密度、風の分散、飛翔体の飛行性能等の分散まで考慮した飛行シミュレーション予測に基づいて行われる。通常、再突入の空力加熱回廊を通過した飛翔体は、その後パラシュートなどの減速システムによって緩降下し、着水／着地するが、緩降下中にビーコンシグナル等によって、地上局に位置を知らせる方法をとる。分離をしたら最後、一切の情報がない状態が十数分から数時間続き、開傘後

<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>宇宙航空研究開発機構 総合技術研究本部 (ISTA/JAXA)

<sup>3</sup> (財) 無人宇宙実験システム研究開発機構 (USEF)

に再突入飛翔体から発信されるビーコンを受信して初めて、機能の健全性が確認される。すべての機能、シーケンスが正常に行われれば問題ないが、何かの不具合で予定時刻にビーコンが受信されなかった場合には、着水／着地予定分散域の中をシラミ潰しに探すこと以外に手段がない。このように、再突入飛翔体の分離からビーコン受信まで、回収などに関わる者には非常に長い時間である。

仮に、再突入飛行中の飛翔体の位置情報を何らかの方法で取得することができれば、それは、回収という観点から非常に有用な情報になるのみならず、不測の事態にも状況の把握が非常にスムーズに進むはずである。再突入飛翔体の長パルス一次レーダによる捕捉等は、地上局からの可視範囲に飛行経路がある場合には高精度な追跡が可能であり非常に有効である[1]。一方、再突入飛翔体、特にアブレータ耐熱材をそのヒートシールドとするような弾道突入カプセルの場合、その表面温度が2000～3000℃となり、夜間であれば十分に地上から観測できる程度の強度の輻射光が観測されると見積もられる。この輻射光を利用し、三角測量の原理を適用すれば、リアルタイムとはいかないまでも、非常にそれに近い時間で飛翔体の飛行経路を計測することが出来ると考えられる。本稿では、トランスポンダー非搭載型の飛翔体の着水点の予測を補助する手段として、再突入中の空力加熱による発光を利用した光学観測による突入軌道捕捉方法を提案し、実際にUSERS・REVの再突入において実践した結果を報告するものである。

## 2. 光学観測方法及び観測装置

### 2.1 光学観測と位置決定の原理

#### 2.1.1 輻射光度

弾道突入型のカプセルの場合、通常数MW/m<sup>2</sup>から十数MW/m<sup>2</sup>の高い空力加熱を受けるため、アブレータヒートシールドを用いることが多く、その表面温度はアブレーション解析によれば2000～3000℃になると見積もられる[3]。再突入飛翔体の空力加熱時の地上からみた輻射強度のオーダーを見積もるため、カプセルのヒートシールド

$$L = \frac{q \cdot A}{4\pi R^2}$$

の表面は、(冷温壁)空力加熱とほぼ輻射平衡状態にあるとし、単位面積当りq[W/m<sup>2</sup>]の輻射を行なうとする。

$$M = -2.5 \log \left( \frac{L}{L_0} \right) \quad \text{等星} \quad \text{ただし, } L_0 = 2.4 \times 10^{-8} \text{ [W/m}^2\text{]}$$

(カプセルの代表投影面積をAとすると、距離Rの位置における光度はLは、

となる。これを天体になぞらえ、等級で表現すると、

ここに数値例として、USERS REVカプセルを想定して、再突入飛翔体の見かけ代表面積：1m<sup>2</sup>、加熱率：1MW/m<sup>2</sup>、直線距離200kmとすると、L=2×10<sup>-6</sup> W/m<sup>2</sup>で、M=-4.7等 になる。

実際にはアブレーション効果があるので、当然冷温壁加熱より小さく、また、輻射光が観測点に到達するまで

$$\Delta m = aF(z)$$

い大気による吸収減光がある。再突入飛翔体の輻射を恒星の類推で、地上における見かけの等級と、大気外における真の等級の差Δmを大気減光というが、

と表現され、aは減光係数、F(z)は光が大気外から地表に到達するまでの経路に沿っての空気量(天頂距離の

$z$ の関数であり、天頂における値を単位としたもの）である。 $z<60$ 度では、 $F(z)$ は近似的に $\sec(z)$ に等しい。

表2-1に国立天文台の実測値に基づく天体の減光の例を挙げる。再突入飛翔体の輻射は可視域から赤外である点、また、後述のように上下角は $20^{\circ}\sim30^{\circ}$ （ $z$ にして、 $70\sim80^{\circ}$ ）という点を考慮すると、減光等級は、天候や上下角によって左右されるが、1等～3等程度の減光と考えられる。

以上を考慮すると、USER REV相当のカプセルが再突入する場合、天候や、観測時の上下角によるが、明るい惑星程度の等級、すなわち -1等級～-3.5等級程度で地上観測される可能性がある。

表2-1 天体の減光（国立天文台実測値 理科年表より）

$z$	$\Delta m$		
	透明度良好の場合		
	実 視	青	紫外
	等	等	等
$0^{\circ}$	0.23	0.37	0.72
$20^{\circ}$	0.25	0.39	0.77
$40^{\circ}$	0.30	0.48	0.94
$60^{\circ}$	0.46	0.74	1.43
$70^{\circ}$	0.67	1.07	2.09
$80^{\circ}$	1.3	2.1	4.0

$z$	$\Delta m$		
	薄いもやがある場合		
	実 視	青	紫外
	等	等	等
$0^{\circ}$	0.66	0.95	1.43
$20^{\circ}$	0.70	1.01	1.52
$40^{\circ}$	0.86	1.24	1.86
$60^{\circ}$	1.31	1.89	2.84
$70^{\circ}$	1.91	2.76	4.15
$80^{\circ}$	3.7	5.3	8.0

2.1.2 位置決定

各局から計測した方位角、上下角に基づく視線が1点で交われば、その点が再突入飛翔体の位置であるが、実際に計測値が一点に交わることはまれであろう。角度の誤差を考慮した空間円錐の視線を仮定することで交われば非常によい計測と考えられる（図2-1A）。ここでは、ある時刻における最尤軌道と、計測視線との距離の平方和の根を最小にする2点の中点を再突入飛翔体の位置とする方法をとった（同図B）。計画値に引きずられる可能性があるため、計画値から大きくずれた場合は好ましい方法でなく、その場合には計測のみで飛翔体位置を決定する方法が必要である。いずれにせよ、事前に2局の計測精度を高めることが重要である。その意味で2局の方位、

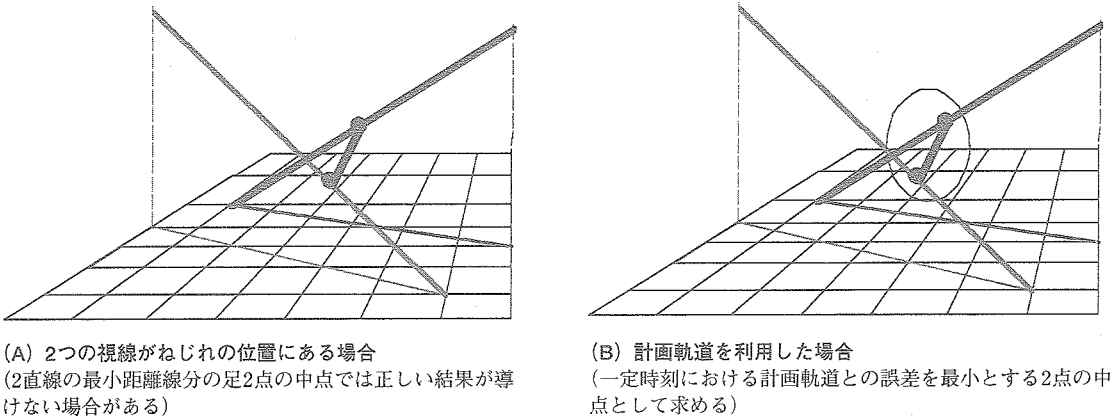


図2-1 再突入飛翔体位置の予測

上下角にオフセットがあることは致命的となる。

2.2 観測方針・全般

ここでは、具体的にUSERS REVカプセルの再突入を捕捉するため、再突入時の飛行経路に近い国内領土として、小笠原諸島・父島、母島を選び、これを具体例として今後の議論を進めていく。これらの観測地点は、ミッション、再突入経路によって基本的には自由に選択すれば良い。現地班は、父、母各島の2班に別れ、カメラを再突入飛行方向に向けた固定式撮影によって発光を記録する。カメラは通常の光学カメラと、赤外線熱画像カメラの2組を各局用意する。

(1) 座標合わせ

USERS-REVの飛行経路 (AZ/EL) を正確に取得するため、事前にカメラの方位を合わせる。基本的には  $\gamma$  日の未明の星を観測して、星図から緯度経度を合わせ、そのままX時 (再突入) を迎える。星による方位合わせを事前に行い、問題点、課題の抽出、および座標合わせ技術の習熟を行う。

(2) 座標基準設定

星による直前の座標合わせは精度が高いが、曇天等により未明に星がみえず、X時を迎える場合を想定して、別途、バックアップとして、基準になる対象を予め地上で確認しておく。

(3) RS (Reentry Simulation) 練習

再突入を観測する場合の、アクセス事情、電力事情、連絡体制の問題／課題の抽出のため、実際と同じシチュエーションでの練習を行う。

(4) 本番

取得した光学飛跡、赤外飛跡をそれぞれ事前に校正済みの画面からAZ/EL情報に換算する。この値をもって、予め決定されている連絡エリア (NTTアンテナの届く位置) に移動し、父母間の情報を合わせる。発光をとらえた場合はまずその旨を本部に連絡する。また、データを元に着水点予測を行う。

2.3 観測機材

主な機材は表2-2の通りである。

表2-2 主な観測機材 (1局あたり)

(1) 可視光CCDカメラ及び赤道儀、レンズ・フィルター式	6セット
(2) 赤外線サーモグラフィ (母島には短波長、長波長の2機種)	1セット
(3) 連絡用携帯電話	1台
(4) 地上目標確認用磁針付双眼鏡	1台
(5) GPSレシーバ	1台
(6) WGS-84準拠海図 (父島、母島周辺)	1式

2.3.1 可視光撮像系

早朝に再突入するREVの飛行光跡を撮像するポイントは、太陽光散乱による明るい背景光をできる限り排除し、いかに高いS/N比で光跡を取得するかという点である。そのため事前試験として、背景が本番と同程度の明るい時間帯に、REVと同程度明るさの金星 (−3.9等級) 及び、若干暗い木星 (−2.6等) を利用した予備撮像試験を行なうことで、カメラレンズの焦点距離、CCDカメラの感度等に関する知見を事前に得ることとした。

出港前試験では、CCDカメラ「WATEC Neptune100(WAT-100N)」に複数のレンズを装着、可視光観測機器の焦

点距離を決定し、日照下で明るい惑星（木星及び金星）が検出できるかを確かめた。その結果、135mmのレンズにおいて木星（-2.6等）、85mmレンズにおいて金星（-3.9等）を検出した。85mmより短焦点のレンズでの検出は不可能であったため、全てのレンズの焦点距離を85mmとした。

なお中望遠レンズ85mm（Nikon AF Nikkor 85mm f/1.8D）を使用することで視野角が狭まり、REVを追尾する場合、トラッキングの要求精度が高くなるため、複数のカメラをモザイク状に固定して並べ、REVの落下予想空域の視野を十分にカバーする「待ち受け観測方式」を採用することにし、父-母島局にそれぞれ6台の可視光システムを用意することにした。

一方、レーリー散乱の強度は波長の4乗に反比例するため、 $0.65\mu\text{m}$ より波長の長い近赤外領域では、太陽光の最大強度波長である $0.55\mu\text{m}$ よりも半分以上になる。WAT-100Nは近赤外領域まで十分な感度を有するCCDを使用していることから、可視光をカットして近赤外を透過するフィルタ(MC R-64)を対物レンズに装着することとした。

表2-3に可視光システムのスペックを示す。

表2-3 可視光観測システムのスペック

1) CCDカメラ（6セット）；Watec NEPTUNE-100（WAT-100N）	
測定波長	$0.6\mu\text{m}\sim 1\mu\text{m}$ (R64フィルター装着)
検出器	1/2" Interline transfer CCD image sensor
有効画素数	768(H)×494(V)
ピクセルサイズ	$8.4\mu\text{m}\times 9.8\mu\text{m}$
仕様視野角	$4.19^\circ$ (H)× $3.15^\circ$ (V)
信号出力	NTSC(アナログビデオ信号)
電源電圧	DC+12V (10%以内) *電源は1.5Vアルカリ乾電池×8本
2) 対物レンズ； Nikon, Pentax	
焦点距離	85mm
開放F値	1.4～1.8も使用.
3) フィルタ ケンコー MC R-64	
4) 記録装置	デジタルビデオ mini DV(SONY Master DV 60min)
6) 自動導入架台	ビクセン・GPD赤道儀+スカイセンサー2000PC

さらに現地では同システムを用いた昼間の木星の試験撮影を行い、観測時のCCDカメラのゲイン、レンズのピント位置や絞りなどの観測条件の最適値を求めた。その結果、木星検出時のカメラレンズの絞りはF16、CCDカメラWAT-100Nの設定は、ゲイン：最小、シャッター：OFF(1/30秒ビデオレートによる連続撮影)、 $\gamma$ 特性：OFFとなった。ただし父島においては、日出後X時付近の曇天の撮像に際して、画像のサチュレーションを防ぎ、コントラストを最適化するため、シャッター速度は1/1000~1/2000秒とした。

### 2.3.2 赤外線撮像系

既述したが、早朝に再突入するREVの飛行光跡を撮像するポイントは、太陽光散乱による明るい背景光をできる限り排除し、いかに高いS/N比で光跡を取得するかという点である。光路中に薄雲、微小ダストなどが存在する場合、光はレイリー散乱により一様散乱、吸収を受ける。この効果（散乱断面積）は波長が短い程大きいため、上記の様な環境下でも、REV放射光の赤外成分は可視成分よりも散乱・吸収を受けることなく観測点まで到達する。一方背景光は、表面温度約6千度の太陽光輻射がレイリー散乱されたものであるため、散乱光には比較的短波

長側の成分が支配的に含まれる。よって赤外線による撮像は、背景ノイズを排除し、散乱・吸収を受けることなく観測点に到達した放射光の赤外成分を選択的に観測できる点から、非常に有効であることが予想される。そうした観点から、可視光学撮像系に加え、今回の観測では赤外線サーモグラフィによる撮像を並行して行なうこととした。表2-4に赤外線観測システムの仕様を示す。

注) 雲が厚すぎる場合は有効ではない (IRの透過限界がある)。雲の場合はさらに、水蒸気バンドスペクトルによる吸収もあるので、任意の赤外線波長が透過するのではなく、サーモグラフィーではこの吸収帯を避ける波長を使っている。

表2-4 赤外線観測システムの仕様

TH5102	注) 父島, 母島とも設置					
測定波長	8~12 $\mu$ m					
測定レンジ	レンジ1; -20℃~100℃      レンジ2; 0℃~800℃					
検出器	HgCdTe (スターリング冷却型)					
視野角	水平21.5° * 垂直21.5° (2倍ズーム機能あり)					
瞬時視野角	1.5mrad					
焦点範囲	30cm~∞					
フレーム時間	ノーマルモード (0.65sec)    ファーストモード1 (1/22sec) パソコン書き込み5secに1画面					
リアルタイムメモリー	1secに1画面    64画像    リングメモリー					
熱画像画素数	255 (H) * 223 (V)					
データ深度	12bits					

2.3.3 観測装置パラメータまとめ

天体をもちいた観測練習も含め、観測システムのゲイン等の確認、評価ができるよう、表2-5に、観測装置のパラメーター一覧を観測天体の明るさとともに示す。

表2-5 可視・赤外観測装置パラメーター一覧

観測可能 天体	レンズ (焦点距離)	絞り値	ゲイン	露出 (シャッター)	明るさ	地上照度 (ルクス)
可 視 光 観 測						
金星 <sup>i)</sup>	135mm <sup>i, iii)</sup>	F16	最小	1/30秒	-3.9等 <sup>iv)</sup>	1.1e+05
木星 <sup>ii)</sup>	85mm <sup>ii, iii)</sup>	F16	最小	1/30秒	-1.9等	1.0 e+03
恒星	85mm <sup>i, iii)</sup>	F1.4	最大	1/30秒	+8等級 <sup>v)</sup>	2.0e-03
本番	85mm <sup>ii, iii)</sup>	F16	最小	1/30秒	-4等級	2.5e+04
赤 外 観 測						
月 <sup>iii)</sup>	標準	オート	オート	1/30秒	約-8等級	3.2e+03
本番	標準	オート	オート	1/30秒	-4等級	2.5e+04

i) R-64フィルターなし

ii) R-64フィルターあり

iii)  $\gamma$ 特性オフ

iv) 映像を記録していないのでS/N値は不明

v) 限界等級

I) 太陽離隔29度

II) 太陽離隔度67度

III) 太陽離隔47度, 月齢25.3

## 2.4 カメラ視野方向合せ方法

カメラの視野方向を合せる方法に各島間で若干の違いがあったが、各島にいる班員の個人的バックグラウンドの（得手不得手）関係から両者は事前に了解された方法であった。いずれも精度の観点からは要求を達成できるものである。

基本的に、再突入時刻の瞬間さえ晴れていれば、データが取得できる方法を取ることにする。すなわち、直前の天候その他の理由によって、位置合せが不能となる方法は取らない。そのため、6台用意したカメラのうち1台（便宜上#1カメラとする）は位置合せレファレンスとしての機能を徹底させ、残り5台との視野方向の相対関係を予め合せておく。当日の天候に左右されない地上の対象に#1カメラを合せることで、他の5台の方向が自動的に合う。こうした位置合せの基本的方針に従い、例として父島班の方法は、以下の通りである。

- 1) 予め直線見通し距離が25m以上取れる地上（二見港）において、6台のカメラの相対方向をインターフェイス（マウント）プレートと上で合わせて固定しておく（後述）。このカメラセットはプレートごと、赤道儀架台からはずし、それぞれの向きが変わらぬよう安全に保管する。
- 2)  $\gamma$ 日のオペレーション開始とともに、観測点にいき、架台にマウントプレートを固定する。
- 3) 予め方向（緯度、経度、高度）がわかっている地上の対象（野羊山頂上のランプ）に#1レファレンスカメラを向けることでカメラの視野方向セッティングは終了する。
- 4) 再突入時刻直前までに、星がみえる晴天となった場合は、さらに星図を用いた観測（後述）により、各カメラ視野中心の相対位置の再確認を行なう。

カメラの相対方向合せは、まず予めビニールテープによって2cmの等間隔に印を付けられた長さ約4mの角材を

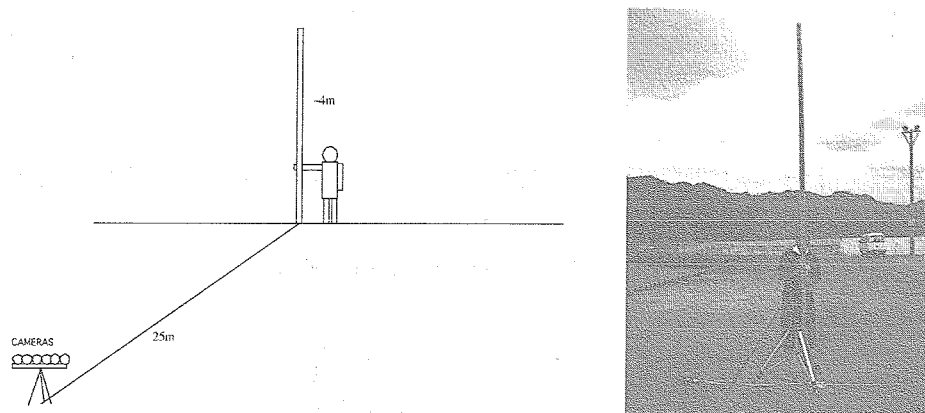
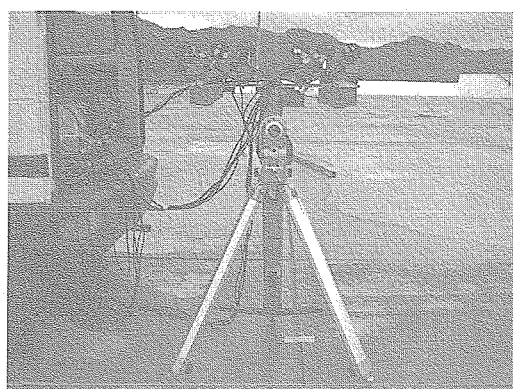
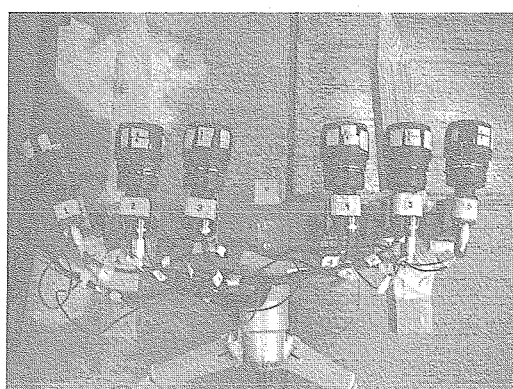


図2-2 地上における各光学カメラの相対視方向の合せ方（例、父島班）



地上校正時のカメラセットアップ

（実際は、反時計周りに架台ごろ90°回転させて利用する。）



校正後の各カメラの相対角度

（一番左は90°回転時に地上のターゲットを捕捉するカメラである。）

図2-3 光学カメラのセットアップ

用意した。カメラの視野方向計画（後節参照）に基づき、所定の角度を出すためには25m先での水平方向，上下方向の長さを求めておき，実際にカメラで撮像することで，各カメラの方向を校正した。この方法による方向合せ精度は25m先で2cm程度，すなわち約 $0.05^\circ$ である。

※ 恒星だけに頼る位置合わせは天候に左右されるため，地上風景を用いた方法で位置合わせを行った後に，そのままの状態で見えれば，位置精度が上がり最良であるということが分かった。

### 3. 再突入飛行データ

USERS軌道データ（最良推定軌道の履歴 ATT: at6d.out）に基づき，光学観測班のデータとして用いるべく，各観測点からの見える方向，および光度等級を見積り整理した。

#### 3.1 REVの飛行経路（初期計画値）

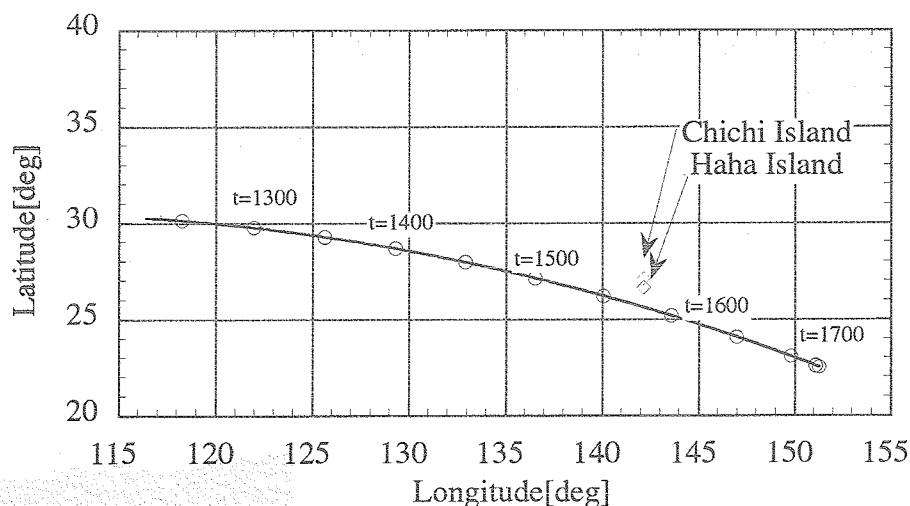


図3-1 REVの飛行経路と父島／母島観測点

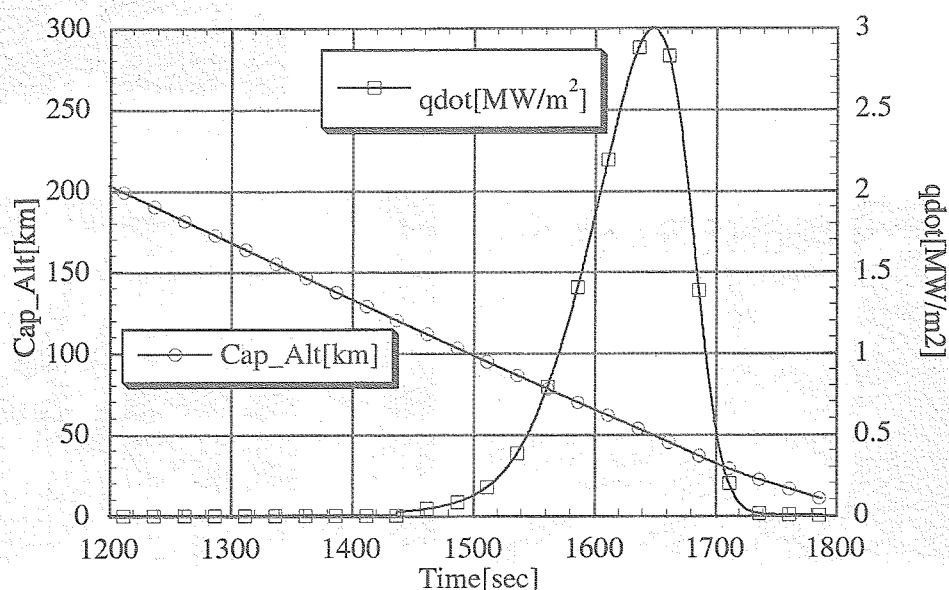


図3-2 REVの飛行高度，空力加熱率の時間履歴（軌道離脱を $t=0$ ）



3.2. 観測地点

REV光学観測班の観測点は以下の通りである．1) 観測点は，南側が水平線より見えること，2) 携帯電話の通話圏内にあること，3) 自然的・人的に装置の安全が保たれること等を考慮して各島とも選択した．

表4 REV光学観測班の観測点

	経度 [deg]	緯度 [deg]	高度 [m]
父島 三日月山展望台	142.18443	27.095520	176.5
母島 新ヘリポート上	142.17842	26.628080	113

※WGS-84測地系を用い、ハンディGPSレシーバにより測定した結果である．



図3-3a 父島三日月山展望台より南側を臨む  
(奥の岬は位置合せに用いた約2.5km先の野  
羊山)



図3-3b 母島ヘリポート上より南側を臨む

3.3. REVの位置予測 (例. 父島データ)

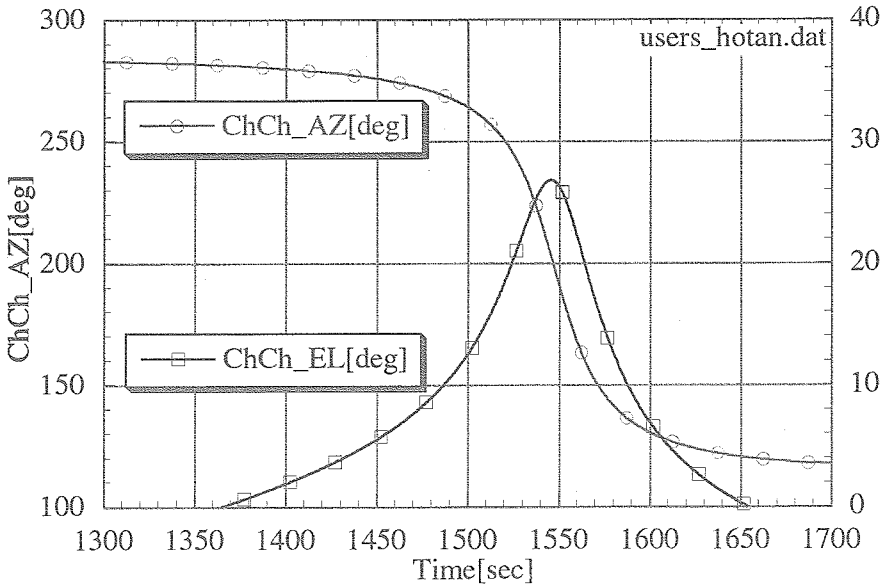


図3-1 島・三日月山展望台から見えるREVの方位角，上下角 (軌道離脱をt=0)

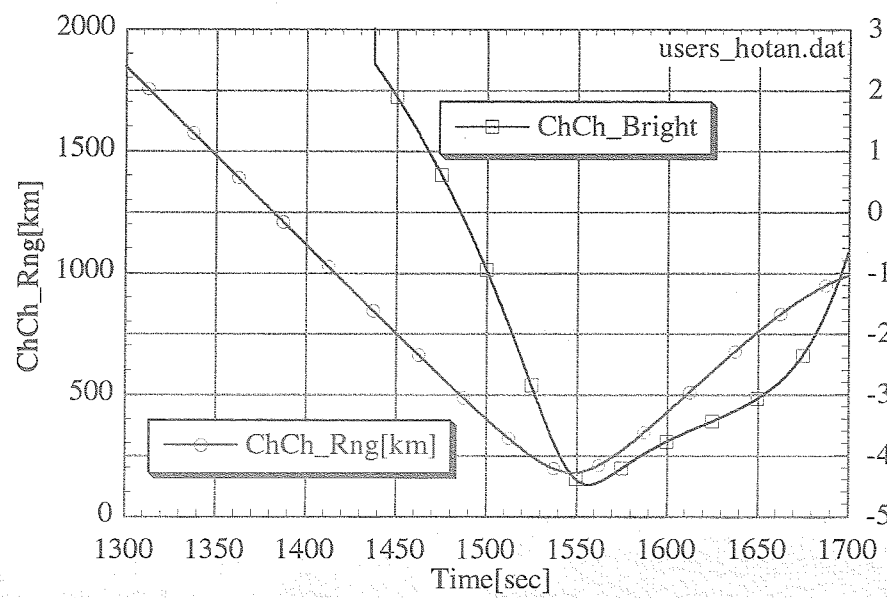


図3-2 島・父島・三日月山展望台から見えるREVまでの距離と明るさ（等級）（軌道離脱をt=0）

3.5 協定視野方向セッティング

父島、母島の両班とも、協定時刻として5月30日の午前6時10分29秒にREVが視野の中心を通るように設定し、それぞれ図3-3および3-4に示す通りの視野方向セットを行なった。

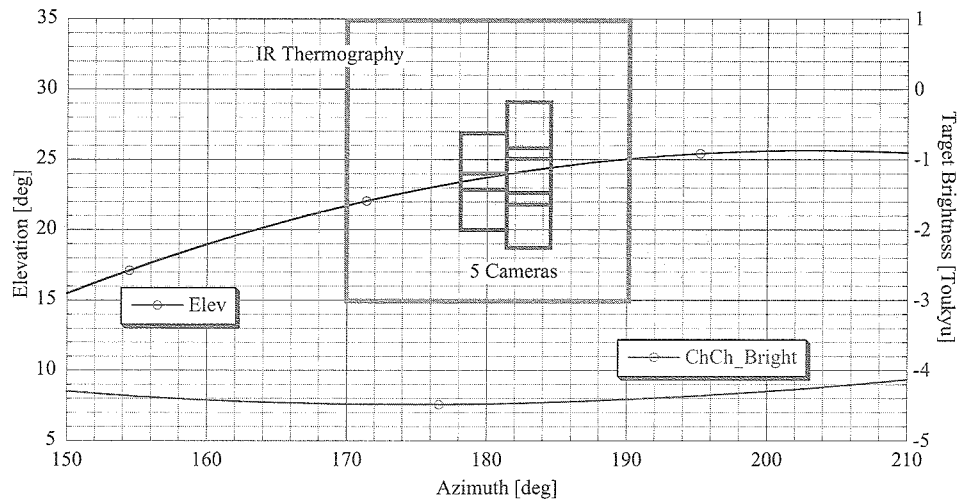


図3-3 父島から見えるREVの方向・光度とカメラ視野方向のセッティング計画

## 4. 結果

### 4.1 可視光観測予備実験

図4-1は、5月26日18時10分に母島局の可視光システムでとらえた昼間の木星である。日没およそ10分前の天空での木星の位置は、方位角258度、仰角62度、光度は-2.6等であった。この時の太陽高度は0.6度、地上照度は $1.0\text{e}+03$ ルクス。木星は薄雲を通して $S/N=17$ で観測され、同システムの有効性が証明された。

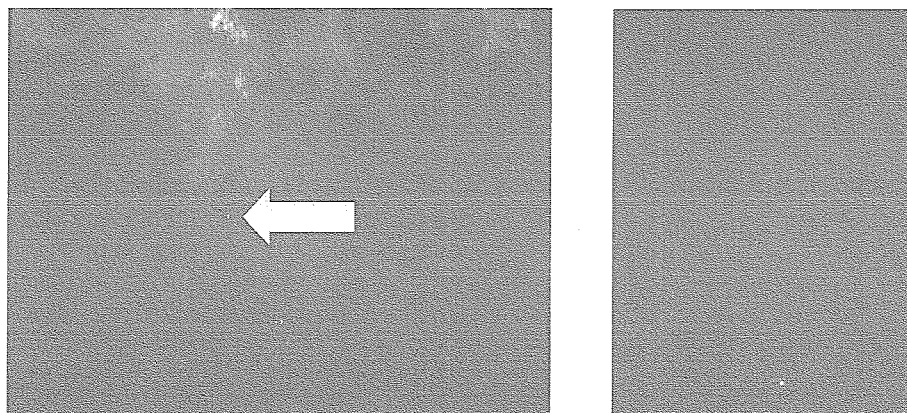
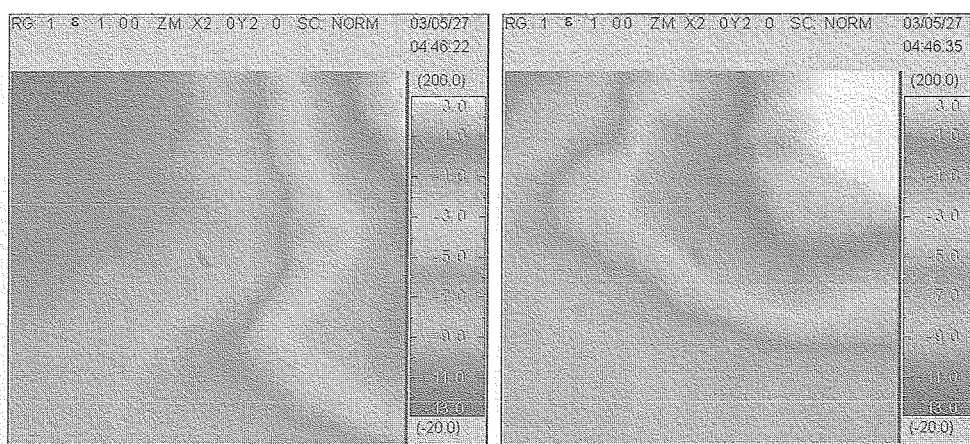


図4-1 (左) 日没前の青空で撮像された木星(画面中央よりやや左の光点)。画面上方には白く雲が写っている。黒斑点はCCD保護ガラス上のゴミで、本番観測前のセッティング時に清掃を行って除去した。絞りをF16に絞っている関係で、シャッターの絞りの影により中央部分にサークル状のスポットが見られる。  
(右) 恒星を用いたセッティング方法で取得した恒星画像。F1.4レンズを用いた限界等級は約8等である。

### 4.2 赤外線観測予備実験

図4-2は、AM6時（ほぼ、本番の時刻）において薄曇りの向こうにある肉眼では見えない三日月を撮像したものである。再突入飛翔体に比して対象の視直径が大きいという優位な点はあるが、赤外線を利用した場合は、薄曇りでも対応できる可能性がある点を示唆しておく。



(a) 雲間より見える状態

(b) 雲海に隠れて肉眼では見えない状態

図4-2 赤外サーモグラフィにより薄曇りの向こうに撮像された三日月（画面中央）。  
(IR Thermography 5102 視野角： $10^\circ \times 10^\circ$  望遠レンズ装着)

月の平均視直径は $0.5^\circ$ であり、サーモグラフィは $24 \text{ Pixel}/^\circ$ より、 $12 \text{ pixel}$ 分となる。

REVの最大視直径： $3 \times 10^{-4}^\circ$ （図4-3参照）より、サーモグラフィ上で $0.007 \text{ pixel}$ 分となり、対象が静止している場合には、小さすぎて取得できない可能性が大きい。しかしながら、実際にはサンプリング時間中に対象は動いており、視直径が実効的に大きくなるため、取得できる可能性も少なくない。

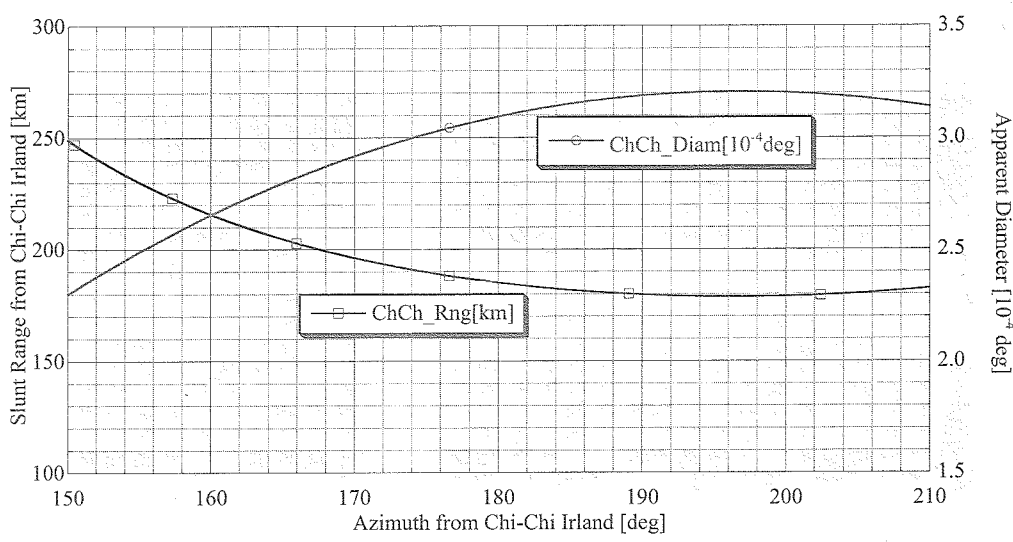


図4-3 REVのレンジと視直径（参考として父島）。

4.3 再突入本番

再突入日は、父島、母島両班とも前夜23：00より観測場所に行き、雲の切れを待ったが、非常に狭い雲の切れた領域が10分程度の存続するものの、星による位置合わせ、カメラ方向確認ができる状態にはなかった。図4-4a, bに父島、母島それぞれの可視光系及び赤外撮像系の最終セッティング状態を示す。

また、この天気の状態はR時まで続き、最大光度になると予想される時刻AM6：10：29近傍においても、本来見えるべき方向の視界が晴れることはなかった。天候の理由により残念ながらREVの捕捉は到らなかった。



図4-4a 島・可視光系（左）及び赤外撮像系の最終セッティング



図4-4b 母島・可視光系（左）及び赤外撮像系の最終セッティング  
（奥から赤外システム、モニター・システム、可視光システム）

## 5. 反省点および今後に向けて

今回のREV落下の地上観測は電波観測や飛行機による着水地点目視らのバックアップという位置づけであった。しかし独立した複数の検出方法を同時に行い、観測運用に冗長性を持たせ、着水地点の早期割り出しに万全に備えようとした。残念ながら本番では天候の理由により、REVの捕捉こそできなかったが、それまでの検討、オペレーションを実際に行ったことにより得られた知見は少なくない。今回の観測経験を今後に生かすためには、以下に挙げる反省点をよく認識し、今後の観測機会に向けて改良を進めていくことが必要であろう。

- 1) 当初の観測計画案では、落下するカプセルを自動ないしマニュアルでトラッキング観測することも検討された。予測軌道と実際の軌道分散の予測の困難さ、また日中観測におけるS/N比を稼ぐためにあえて狭い視野の光学カメラを採用したことから、それは実現可能性の低いものとして却下した。また、軌道の分散、各カメラの方角合せの精度を考慮して、協定を成立させるために、軌道に沿ったカメラの配置ではなく、アレイ状に視野を向けることが大切であり、光学カメラをアレイ式に並べた「固定観測」を採用した。
- 2) 光学カメラの観測視野方向を合わせる方法としては、最も位置精度の高い校正法は恒星観測による星図上の位置確認であるものの、その実現には夜間の晴天が練習時および観測本番で保証される必要がある。しかし実際の運用では、今回の大洋上の梅雨・台風気象のようなケースも十分想定する必要がある。むしろ観測直前まで曇天であって本番だけ晴れるという最悪条件でも、ベストパフォーマンスを発揮できる「天候に左右されない」校正法をノミナルとすべきである。もちろん、導入精度・位置精度共に星像を用いる方法は高い精度を達成できるため、視野のセッティング精度の確認や、観測対象の軌道決定精度を上げる目的で、観測前後の星像チェックが行えれば、より好ましい。
- 3) 今回のオペレーションからの直接の帰結ではないが、(流星の立体協定観測でもよく知られるように) 一般に2地点からの方位角、上下角方向により軌道を推算するには、この2地点は視野角が45度近傍になるようにベースラインを適切に取り(観測すべき発光高度に依存)、なおかつ再突入軌道の両側(今回の場合は南北)に位置する2点を選択すべきである。太平洋上回収のため、陸上の観測可能地点が制限されていたので仕方ないが、今回のように高度数十キロの飛跡から水平距離で数百キロ離れた地点、しかも飛跡を挟まな

い同じ側からの立体協定観測である場合、観測データからの軌道計算の際の誤差は大きくならざるを得ない。

- 4) 機器の位置合わせの精度を達成させるためには強固な架台と、風や温度変化などの多少の外乱が生じても移動しないカメラ・マウント、およびその微動機構が重要である。今回の観測を通して、これらの要求を達成する幾つかのメカニカルな改善点が判明した。
- 5) 今回、父島局では二見港での測量器具を使った視野合わせを行い、一方母島局では観測現場から見える地形を使った視野合わせをおこなったが、それぞれに短所があった。父島局の場合、カメラの校正後、観測場所までの機材運搬の際にカメラの相対的な位置関係がずれるリスクがあり、母島局の方法では地図上に示された限られた地形情報から視野を合わせる必要があった。結論としては、観測地点で改めて父島局のような測量器具を使った位置合わせを行うことが、オペレーションとしては最適であろう。
- 6) 曇天における赤外サーモグラフィーを使った「面光源」の観測については、今回流動して光学厚さが変化する雲に遮られた三日月の検出が今回達成できたことは、今後の地上観測計画を考える上で興味深い。雲の光学厚さと観測波長、検出器感度、カバーすべき視野角などについて、今後さらなる検討が必要であるものの、落下カプセルの諸条件によってはアブレーション物質の「尾」などが「移動する面光源」として捉えられる可能性がある場合、この観測機器を使った立体協定観測は有効かと思われる。

#### 参考文献

- [1] 石井信明, 他, 「長パルス一次レーダによるUSERS・REVカプセルの追跡」, JAXA報告「鈍頭型カプセルの再突入飛行及び熱空力的研究」, 2005.3月.宇宙科学研究本部/JAXA
- [2] MUSES-C飛行計画書, 「13章 再突入カプセル」, 宇宙科学研究所 (現:宇宙科学研究本部/JAXA), 2003.