

## 長パルス一次レーダーによるUSERS REVカプセルの追跡

鎌田 幸男<sup>1</sup>・川原 康介<sup>1</sup>・佐川 一美<sup>2</sup>・石井 信明<sup>1</sup>・前田 行雄<sup>1</sup>  
井上 浩三郎<sup>1</sup>・安部 隆士<sup>1</sup>・若林 昭<sup>3</sup>・伊地智 幸一<sup>3</sup>

### Orbit Tracking of USERS Recovery Vehicle (REV) with a High Performance Long Pulse Primary Radar

By

Yukio KAMATA<sup>1</sup>, Kousuke KAWAHARA<sup>1</sup>, Kazumi SAGAWA<sup>2</sup>, Nobuaki ISHII<sup>1</sup>, Yukio MAEDA<sup>1</sup>,  
Kouzaburo INOUE<sup>1</sup>, Takashi ABE<sup>1</sup>, Akira WAKABAYASHI<sup>3</sup>, Kouichi IJICHI<sup>3</sup>

**Abstract :** After 8.5 month-experiments in orbit, the recovery vehicle (REV) of the USERS satellite was reentered into the atmosphere and successfully retrieved on the sea in May 30th, 2003. During the atmospheric flight, the trajectory of the vehicle was tracked with the new precision radar system at Kagoshima Space Center, Uchinoura, Kagoshima. Since, the vehicle has no active tracking instrument such as transponder, the primary radar should be utilized so as to detect the object. However, the usual primary radar system is insufficient to track the tiny vehicle. Thus, a high performance long-pulse primary radar, which had capability of recognizing the 1m<sup>2</sup> object at the distant of approximately 2,000 km range, was applied to the tracking operation. Initially, the radar caught the reentry vehicle in the previously predicted direction. However, the radar lost the tracking data, intermediately. In this paper, the operation sequence of the reentry tracking is briefly introduced. Then, the tracking result is summarized with the estimation of the impact point by the off-line computation.

#### 1. 摘 要

USERS再突入カプセル(REV)の大気圏再突入軌道をUSC(内之浦宇宙空間観測所, 鹿児島県内之浦町)にある新精測レーダを用いて追跡した。

次世代型無人宇宙実験システム(USERS)は経済産業省並びに新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)よりの委託により財団法人無人宇宙実験システム研究開発機構(USEF)が開発と運用を行っている宇宙実験システムであり, 2002年9月10日17時20分にH-IIAロケット3号機によって種子島宇宙センターから打上げられた。打上げ後約8.5ヶ月間軌道上で超電導材料製造実験等を実施した後, 2003年5月30日に再突入カプセル(REV)が母船から

<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>NEC東芝スペースシステム(株)(NTS)

<sup>3</sup>(財)無人宇宙実験システム研究開発機構(USEF)

切り離され、大気圏に再突入し、小笠原東方海上に着水、回収された。REVは周囲が耐熱材料に覆われており、トランスポンダ等能動的なレーダ追跡装置は搭載されていない。また、内之浦から追跡する場合、直距離として500～1,000 kmをカバーする必要があるが、カプセル直径が約1.5mと非常に小さいため、通常の1次レーダ性能では探知できない。そこで、追跡性能が格段に高い長パルス1次レーダ方式を使って再突入飛行中のREVを追跡した。表1に新精測レーダ主要諸元を示す。長パルス1次レーダ方式は、符号変調された広いパルス幅(1,009  $\mu$ s)の信号を送信し、受信側での符号系列の相関処理によって時間方向へパルス圧縮を行う方式で、レーダ断面積が1m<sup>2</sup>の場合、直距離で約2,000kmまで探知する能力を持っている。[1][2]

本稿では長パルス1次レーダによるUSERS REVの追跡運用計画の概略について述べ、追跡結果と着水点予測について報告する。

表1 新精測レーダー主要諸元

長パルス1次レーダ特性	
符号変調された広いパルス幅 (1,009 $\mu$ s) の信号を送信 受信側で符号系列の相関処理によって時間方向へパルス圧縮 レーダ断面積が 1 m <sup>2</sup> の場合、直距離で約 2,000 km まで探知可能 (通常の 1 $\mu$ s シングルパルス幅では約 600 km の探知性能)	
新精測レーダ (主アンテナ) 主要性能	
周波数	: 5.6 GHz 帯
アンテナ直径	: $\phi$ 7 m カセグレイン
ビーム幅	: $\pm 0.25^\circ$
送信出力	: 1,000 kW (クライストロン)、200 kW (TWT)
アンテナ利得	: 送信 48.7 dBi、受信 48.2 dBi
最小追尾レベル	: -106 dBm (1 $\mu$ s)、-133 dBm (1,009 $\mu$ s)

## 2. アンテナ予報値

新精測レーダはロケット等の飛翔体を追跡する目的で設置され、約48 dBiのアンテナ利得を有しているがビーム幅は $\pm 0.25^\circ$ と非常に小さい。REVを追跡する場合、新精測レーダはまず、REVが入感すると予測される方向にアンテナを向けREVを待ち受ける。この時、実際の再突入軌道が予測とずれているとアンテナビーム内にREVを捕捉することができない。一度REVを捕捉すれば、以後はアンテナ側の自動追跡機能によって、追跡し続ける事が可能であるから、できるだけ初期に捕捉することが望まれる。つまり、アンテナ予報値、特にその初期値が非常に重要であり、その元となる再突入軌道を極めて高い精度で予測する必要がある。一方、アンテナ予報値は以下の手順によって算出される。

$$\begin{array}{ccccccc} \text{再突入軌道} & = & \text{母船の軌道要素} & + & \text{分離速度} & + & \text{軌道離脱速度} \\ \text{(予測値)} & & \text{(軌道決定値)} & & \text{(計画値)} & & \text{(計画値)} \end{array}$$

従って、再突入軌道予測値には次のような予測誤差が含まれる。

- 地球周回中の軌道決定誤差 (母船の軌道要素に含まれる推定誤差)
- REV分離時の分離速度誤差 (地上試験で評価された分離速度との差)
- 軌道離脱速度誤差 (軌道離脱モータの推進性能計画値との差)

上記のうち、アンテナ指向方向誤差に対し、最も影響が大きな要因は(c)である。(a)には軌道伝搬モデル誤差や観測誤差などが含まれるが、なるべく直前の軌道推定値を用いる事で、影響を最小限に抑えることができる。(b)

は地上試験結果を元に再現性やばらつきを評価し、影響が大きくないことを確認した。(c)の軌道離脱モータ(RBM)によって達成される離脱速度は地上燃焼試験によって極めて高い精度で推進性能推算を実施したが、それでも不確定量(±0.3%)が含まれており、これは待ち受け時刻誤差±1.4秒、方位角誤差±1.5°に相当する。軌道離脱時の加速度積分値がテレメータデータとして地上局に送られてくるので、この計測値を利用すれば、計測誤差に起因する方位角誤差を±0.73°まで減じることができるが、依然アンテナビーム幅±0.25°の約3倍の誤差となる。すなわち、誤差を最小限に抑えたとしても、最終的にはアンテナビーム幅の約3倍の誤差が残る。このため、予測軌道周辺で、アンテナ指向方向をらせん形に振りながらの探索を実施するとともに、予測値とのずれを即座にアンテナ方位にフィードバックするためにレーダデータをもとにオンライン(カルマンフィルタ推定)で再突入軌道推定を実施する必要がある。

### 3. 追跡運用

再突入カプセル(REV)追跡時の運用シーケンスを表2に示す。REVは母船から分離後軌道を約1周回してから軌道離脱モータ(RBM)を点火し再突入軌道に移行する。これを新精測レーダで追跡する場合、ほぼ西方向から入感する事になるが、新精測レーダのスカイライン条件からアンテナは仰角10.5°で待ち受けることとした。従って、再突入軌道要素から仰角が10.5°となる時刻とアンテナ方位角を算出し、これをアンテナ予報値の初期値とした。この予報値はUSOC(千代田区神田小川町)の運用管制室で算出されUSCまで送信される。バックアップという意味で、再突入1日前の軌道データから予報値を作成するが、より精度を上げるため、最終値は追跡運用開始の約3時間前に計算される。従って、極めて短時間の内に運用体制を整える必要があった。さらに予測精度を向上させるため、RBM点火時のテレメトリデータから得られる加速度情報をもとにアンテナ予報値の修正量(オフセット修正)を算出するが、そのデータがUSCで入手できるのは追跡運用の直前である。表3にREV追跡時のアンテナオペレーションの概要を記す。図1にREV分離直前の母船軌道要素をもとに算出された新精測レーダのアンテナ予報値(方位角に対する仰角と直距離の関係)を示す。図中の数値は時刻(分:秒)である。最終的に算出されたアンテナ待ち受け角は[方位角254.3°, 仰角10.5°]、入感予測時刻は06時06分24秒(JST)であった。

表2 USERS REV 再突入追跡運用シーケンス

軌道離脱からの相対時間	JST	イベント	高度	USCからの直距離
Q-20h14m	5/29 09:30	軌道追跡データ配信(前日値)		
Q-15h	14:45	帰還シーケンス移行判断		
Q-2h44m	5/30 03:00	軌道追跡データ配信(最終値)		
Q-1h39m	04:05:52	再突入カプセル分離		
Q-8s	05:44:45	スピンモータ点火		
Q=0	05:44:53	軌道離脱モータ点火		
Q+20s	05:45:13	デスピンモータ点火		
Q+19m	06:04	アンテナオフセット修正		
Q+19m14s	06:04:07	内之浦入感(USC_AOS)	200 km	1,640 km
Q+21m28s	06:06:21	アンテナ仰角10°(Elev=10)	155 km	717 km
Q+22m32s	06:07:25	推進モジュール分離		
Q+22m39s	06:07:32	タンブルモータ点火		
Q+22m48s	06:07:41	アンテナ仰角最大(Max_Elev)	130 km	349 km
Q+25m09s	06:10:02	内之浦消感(USC_LOS)	80 km	1,060 km
Q+29m34s	06:14:27	パラシュート開傘		
Q+39m	06:24	着水		

表3 アンテナオペレーション（追跡手順）のフロー

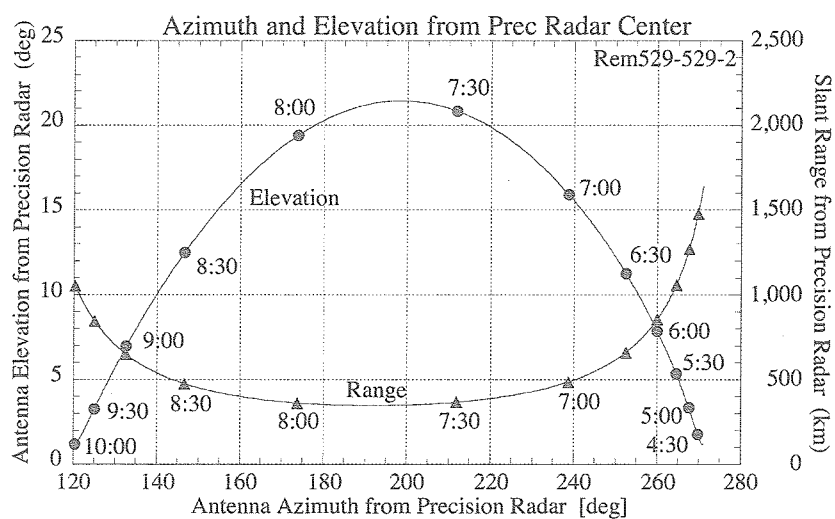
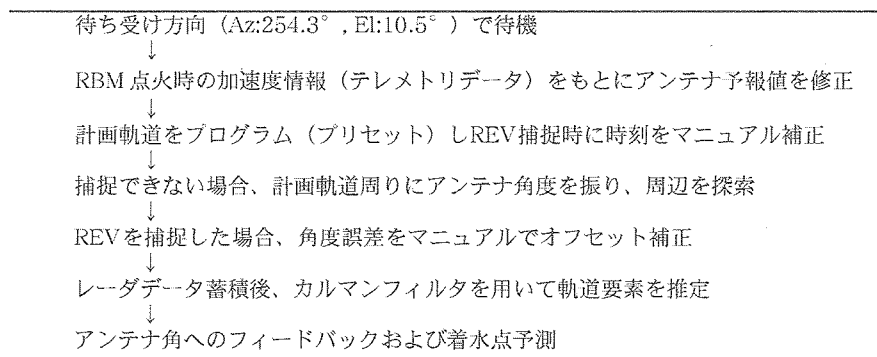


図1 アンテナ予報値 (仰角, 方位角, 直距離)

#### 4. 軌道解析

再突入軌道解析には3次元6自由度プログラムを使用した。数値計算に使用したREVモデル形状と質量諸元を図2に示す。風洞試験および数値解析にもとづいて算出された空力データを入力し、USC入感 (USC\_AOS) の位置と速度を初期条件にして軌道伝搬した。ただし、初期姿勢とスピンのレートは計画値を用いた。

#### 5. 追跡結果

REVはほぼ予報値通りの方角で捕捉された。これはRBMの推進性能がほぼ計画値通りに達成されたと解釈できる。初期捕捉後約50秒間、レーダはREVを追跡したが、その後ロックオフした。計画軌道周りの探索を繰り返した結果、内之浦消感 (USC\_LOS) 直前に再捕捉する事ができた。図3にレーダ受信レベルを示す。初期の約50秒間と終了まぎわの約15秒間はデータが得られたが、それ以外の時刻でのデータは得られなかった。図中破線で示した山形のグラフはレーダ断面積を $1\text{m}^2$ と仮定した場合の受信感度である。受信感度、すなわち直距離としては十分に捕捉可能であったにも拘わらずロックオフしたわけであるが、その詳細な原因はわかっていない。オンライン計算で再突入軌道要素を推定するには十分なデータが得られなかったため、運用終了後オフライン処理 (最小

自乗法推定)で再突入軌道を推定し、着水点を求めた。オフライン計算で求めた再突入軌道を図4、図5に示す。図4はUSC入感からの相対秒時に対する高度履歴、図5は再突入軌道のフットプリント(緯経度への投影軌跡)である。図中黒丸(●)がレーダデータで実線がシミュレーション軌道である。オフライン計算により求めた着水点予測値は回収時のGPSビーコンから取得された緯経度とよく一致していた。

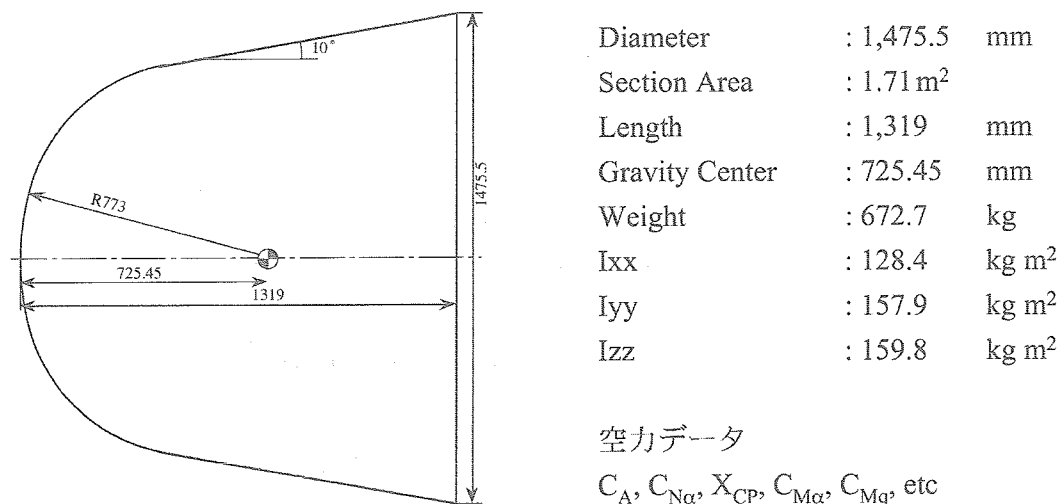


図2 REV数値計算モデル形状と質量諸元

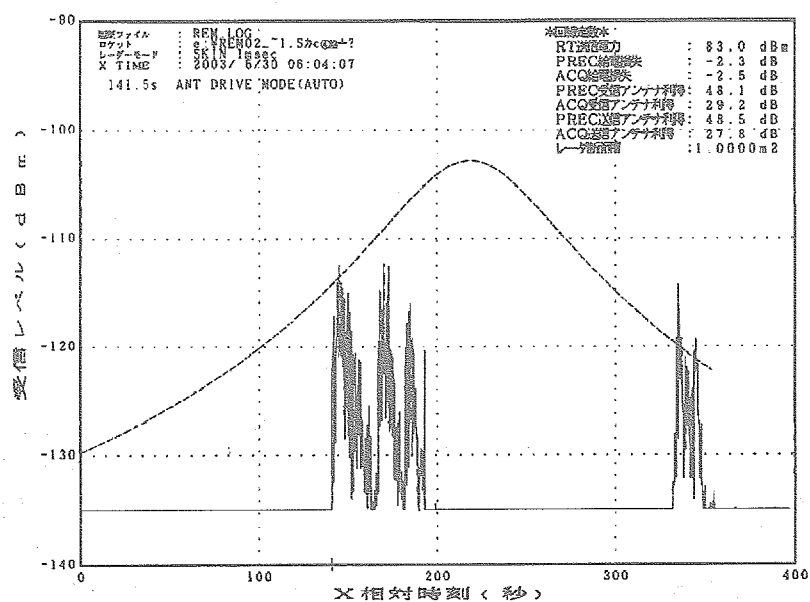


図3 新精測レーダ受信レベル

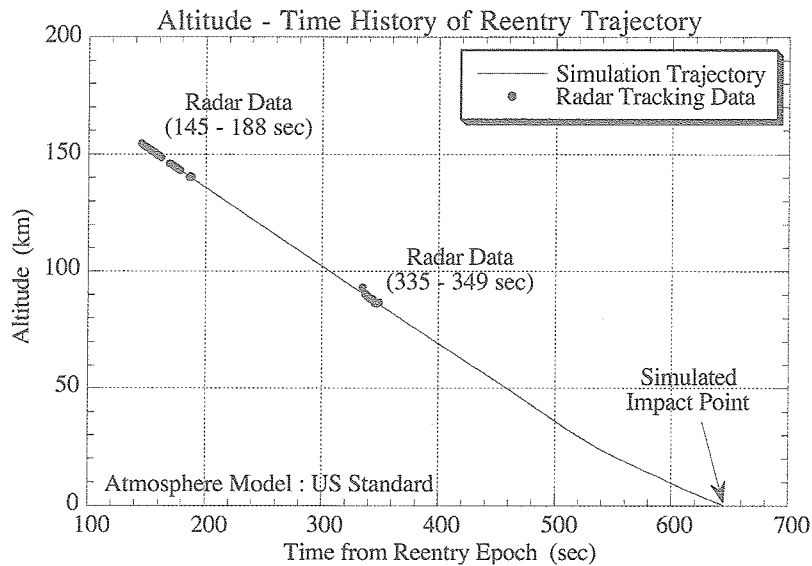


図4 レーダー追跡データと再突入軌道推定値との比較 (高度履歴)

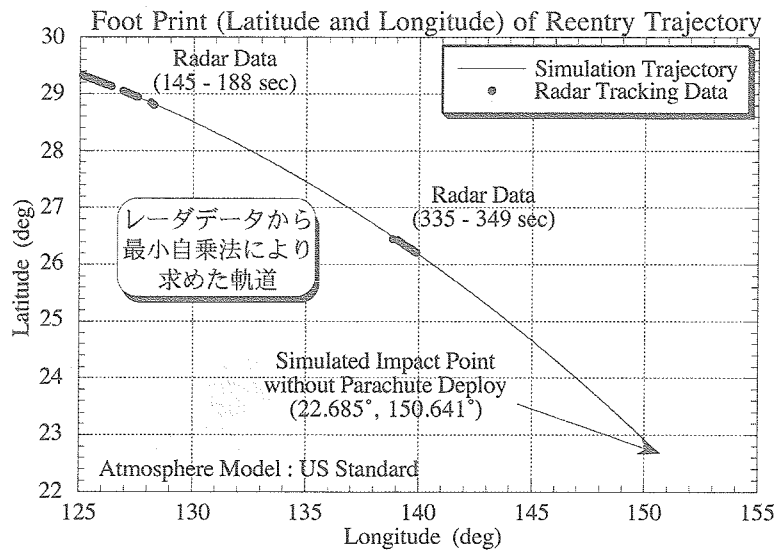


図5 レーダー追跡データと再突入軌道推定値との比較 (緯経度への投影軌跡)

## 6. まとめ

トランスポンダ等能動的なレーダ追跡装置を搭載していない再突入カプセル(REV)を長パルス1次レーダ方式を使用して追跡した。新精測レーダのスカイライン制限から仰角 $10.5^\circ$ で待ち受けたが、REVはほぼ予測値通りの方角で捕捉され、再突入軌道予測値ひいては軌道離脱モータ(RBM)の推進性能推算がほぼ計画値通りであった事が実証された。初期捕捉後レーダは約50秒間追跡したがそこでロックオフした。ロックオフの詳細な原因については解明されていない。計画軌道周りの探索を繰り返した結果、USC消感(USC\_LOS)直前にREVを再捕捉する事ができたが、オンライン計算で軌道決定し着水点予測をするための十分なデータは得られなかったため、運用終了後にオフライン計算で軌道推定し着水点予測値を算出した結果、回収時に取得されたGPSビーコンの緯経度と同等の値を得る事ができた。

## 参考文献

- [1] 市川, 鎌田, 他「長パルス一次レーダ機能を備えた科学衛星打ち上げ追跡用レーダ設備」, 電気通信学会信学技法, 2001-12(2001-05)
- [2] 広沢, 市川, 他「新精測レーダ」, 宇宙科学研究所報告第122号, 2003年3月