

## 静止衛星・静止デブリの光学観測

鷲尾 智幸\*<sup>1</sup> 梅原 広明\*<sup>2</sup> 木村 和宏\*<sup>2</sup>

(1999年12月2日受理)

### AN OPTICAL SURVEY OF GEOSTATIONARY SATELLITES AND DEBRIS

By

Tomoyuki WASHIO, Hiroaki UMEHARA, and Kazuhiro KIMURA

The space within latitudes  $\pm 0.2$ [deg] of the geostationary orbit was surveyed between 68[deg] and 190[deg] east longitude by using an optical observation system for geostationary satellites developed at Kashima Space Research Center. This system consists of a 35-cm reflecting telescope and a CCD-imaging device with software for detecting geostationary objects. It is shown that the system is available for scanning the geostationary orbit. 67 satellites recognized by North American Aerospace Defense Command (NORAD) were confirmed, and 2 satellites unrecognized by NORAD were found. There were also several objects crossing the viewing field. A low drift-rate object considered to be a space debris was tracked for three days. By the orbit determination and its error estimation, it was found that at least two days are needed to monitor the motion of near-geostationary debris.

[キーワード] 静止軌道, 静止衛星, スペースデブリ, 光学観測, 軌道決定

Geostationary orbit, Geostationary satellite, Space debris, Optical observation,  
Orbit determination

#### 1. はじめに

静止軌道上では、衛星が増加し続け混雑の一途をたどっている。そのため、国際規約により、各衛星には静止経度の割り当て範囲が決められており、衛星どうしの衝突や電波干渉を回避することが図られている。各衛星の運用が安全に行なわれるためには、割り当て範囲を遵守して軌道制御されているか否かを監視することや、現在の衛星の分布を広域的に把握することが必要である。更に、衛星近傍におけるスペースデブリの観測も重要である。

静止衛星の軌道決定で通常行なわれているのは、衛星からの電波を受信し位置を測定する方法である。それに対して、光学望遠鏡を用いた観測も重要であることが指

摘されている<sup>(1)-(3)</sup>。電波観測に比べ光学観測には次のような長所がある。電波受信と異なり、直接、物体の位置を捉えることができるため、バイアス誤差が少ない軌道決定を行なうことができる、また、背景に写る恒星から静止物体の位置を測定する場合には、大気揺らぎによる観測誤差がほとんど無視できる。さらに、電波を発しないスペースデブリの探索ができる。

光学望遠鏡による静止軌道の監視は北米航空宇宙防衛司令部 (NORAD) によって体系的になされている。NORAD では、どの方向にどういった物体が存在するかについての静止軌道リストをインターネット上に公開している<sup>(4)</sup>。国内においては、通信総合研究所小金井本所において静止物体の位置測定を主目的とした多目的望遠鏡システムが設置されている<sup>(1)</sup>。しかし、視野が狭いため、静止軌道の広域サーベイは行われていない。

通信総合研究所鹿島宇宙通信センター宇宙制御技術研

\*1 豊橋技術科学大学 機械システム工学系

\*2 関東支所 鹿島宇宙通信センター 宇宙制御技術研究室

研究室においても、1998年に、光学望遠鏡を用いて静止物体の位置を測定する広視野の専用装置を開発した。開発の報告は、1999年に追加した機能の説明を含め、木村等<sup>(5)</sup>に述べられている。本論では、1999年1月から2月にかけて行なった、国内初となる静止軌道上のスキャン観測および静止デブリの追跡調査の結果を報告する。

## 2. 観測装置の仕様

宇宙制御技術研究室で開発された静止衛星光学観測装置の概観を第1図に示す。装置は、光学系・架台制御部・撮像部・画像処理部から構成される。観測の流れは以下の通りである。

- 1) 架台制御部において、所望の方向に望遠鏡を向け、静止軌道近傍の物体を点像に、恒星を線像に撮像するために、望遠鏡を固定する。
- 2) 撮像部において、恒星軌跡に時刻の情報を盛り込むため、決められた時刻にメカニカルシャッターを開閉し、恒星の日周運動による軌跡に刻印を入れながら撮像を行なう。
- 3) 画像処理部において、CCD画像をコンピュータに取り込み、シャッター開閉パターンの情報などから恒星と静止天体の識別を行ない、撮像時の概略方向と時刻およびガイドスターカタログ<sup>(6)</sup>により恒星を同定し、静止天体の位置(赤経・赤緯)を算出する。

望遠鏡の口径は350mm、焦点距離は1248mmである。CCDカメラは160万(1536×1024)画素である。画面上での視野角は0.422[deg]×0.634[deg]である。静止軌道上で直径1m程度の物体からの反射光をとらえることができ、しかも、静止衛星の割り当て範囲(0.2[deg]×0.2[deg])を一画面に写すことができるように口径と焦点距離を選定した。架台は赤道儀である。架台制御計算機には、静止衛星の直下点経度・緯度あるいは方位角・仰角から、望遠鏡を目的の方向に指向させるソフトウェアが備えられている。メカニカルシャッターは撮像時刻を正確にするために用いられる。GPSを用い

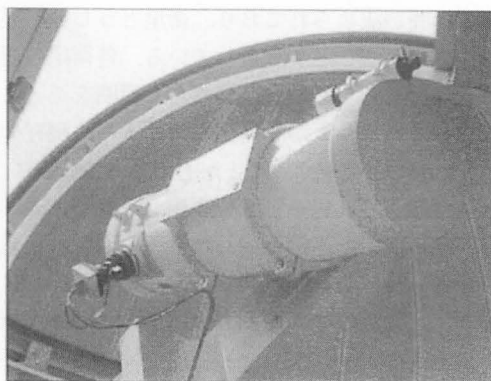
た標準時計からの信号を受け、絶対時刻(UTC)に対して約10msecの精度でシャッターを開閉させることができる。以上の仕様から、画像処理部では、 $10^{-3}$ [deg]の精度で物体の方向を同定することが可能となる。一連の作業は、統合処理を除いてほぼ自動化されている。なお、本観測の直後(1999年3月)、バッチ処理によるシーケンス制御機能が追加された<sup>(5)</sup>。

## 3. 静止軌道サーベイ

1999年1月12日から37日間、東経68[deg]から190[deg]までの静止軌道をスキャンした。この区間は、アジア各国やオーストラリアの衛星が集中しており、比較的軌道が密な部分である。画面の短辺を南北方向にして東西方向のみをスキャンした。すなわち、緯度の幅は北緯0.2[deg]から南緯0.2[deg]までの間に限定されている。異なる画角で同一の物体を少なくとも二回捉えられるよう望遠鏡を0.25[deg]刻みで動かし、そのつど露出20秒で固定撮影し、衛星の有無を調べた。存在した場合には位置を測定した。第2図に検出された衛星の位置を記す。縦軸・横軸はそれぞれ、衛星直下点の緯度・経度を表す。なお、同じ図にスペースデブリの追跡結果を重ねて示しているが、これについては次節で詳述する。

軌道傾斜角が0.1[deg]以上の静止衛星については視野導入を工夫しなくてはならない。スキャンしている緯度幅に常に衛星があるわけではないため、観測時刻を調整して検出する必要がある。そこで、探索方向が赤経90[deg]前後になる時間帯に定期的に固定撮像を行なった。静止軌道近傍の衛星は、太陽重力や地球J2ポテンシャルの影響により、昇交点赤経が90[deg]付近になるためである。この探索法は、軌道傾斜角の大きい静止デブリを探索するときにも、効果的であると思われる。ドリフトレートの大きな衛星については、視野外に去るまで追跡し、赤道に最も近かった点の緯度・経度をその衛星の静止軌道上における緯度・経度とした。

観測区間内で69天体を捕捉した。ところどころ衛星



第1図 静止衛星光学観測装置。通信総合研究所鹿島宇宙通信センターに設置した。

が近接している部分や、逆に隙間が開いている部分があるが、全体的に見れば規則正しく並んでいる、といえる。

NORADによる静止物体のリスト<sup>(4)</sup>と本観測データを照合して衛星の判別を行った。その結果、NORADリストの中で、軌道傾斜角が0.1[deg]以内に保持されている衛星については、すべて本サーベイ観測により存在が確認された。東経175[deg]および180[deg]付近にはNORADリスト(1999年2月19日現在)には載っていない衛星が1機ずつあった。何日か継続して観測したところ、これらの衛星は同一視野内に収まる程度にしか動いていないため、軌道傾斜角は0.1[deg]以下、ドリフトレートは0.1[deg/day]以下であると思われる。したがって、少なくともこの2機はデブリとは言い難い。打ち上げて間も無いためNORADが未だ把握していない静止衛星であると思われる。

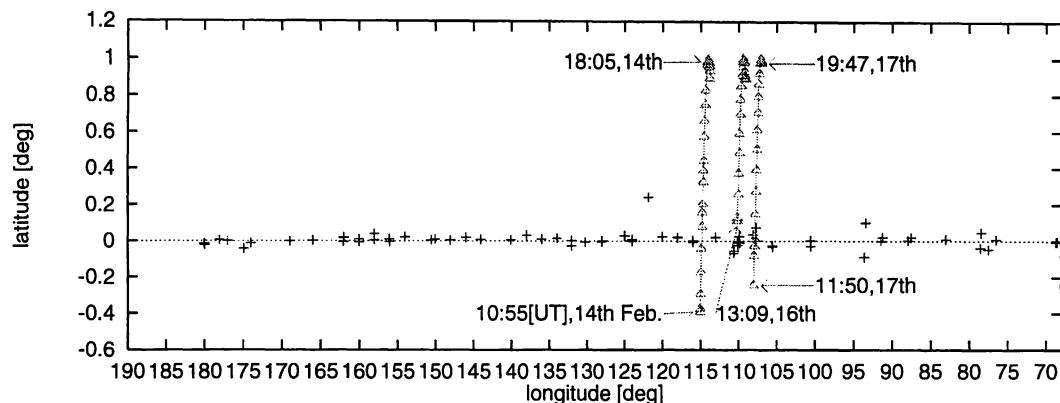
#### 4. スペースデブリの追跡

スペースデブリとは、人工衛星及びロケット運用上の廃棄物、任務を終えた衛星およびロケットそのもの、これらの破片・塗料片等、宇宙空間に存在する不要物の総称である。今回、偶然捉えた1つのデブリを延べ3日間

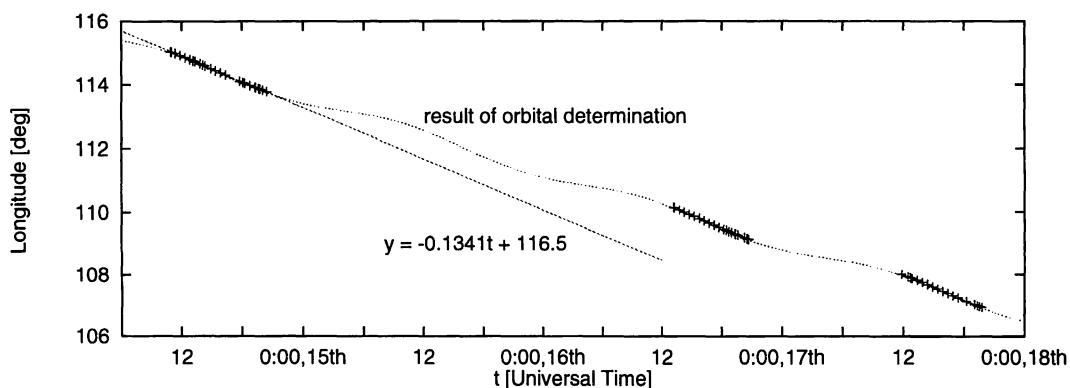
に渡って追尾し、軌道決定および誤差評価を行なった。

1999年2月14日10時54分40秒(UT)、望遠鏡を東経115.0[deg]、南緯0.4[deg]に指向していたとき、ある物体がCCD視野内に検出された。その付近には軌道傾斜角の大きいCHINASAT5という衛星があり、当初はそれであるかと思われた。しかし、その衛星の軌道傾斜角に比べて余りにも南北方向の移動速度が遅い。したがって、別の物体である可能性があると判断し、付近を搜索した。その結果、ごく近傍の東経115.5[deg]、南緯0.4[deg]に新たな衛星が1機見つかった。この衛星は、視野内の移動速度がCHINASAT5の軌道傾斜角から概算される速度におおよそ一致したので、CHINASAT5と断定した。また、NORADリストによると、東経115[deg]近傍にCHINASAT5以外の動く静止衛星は存在しない。したがって、最初に捕捉した飛翔体はデブリ(以下、Dと呼ぶ)であると判断した。

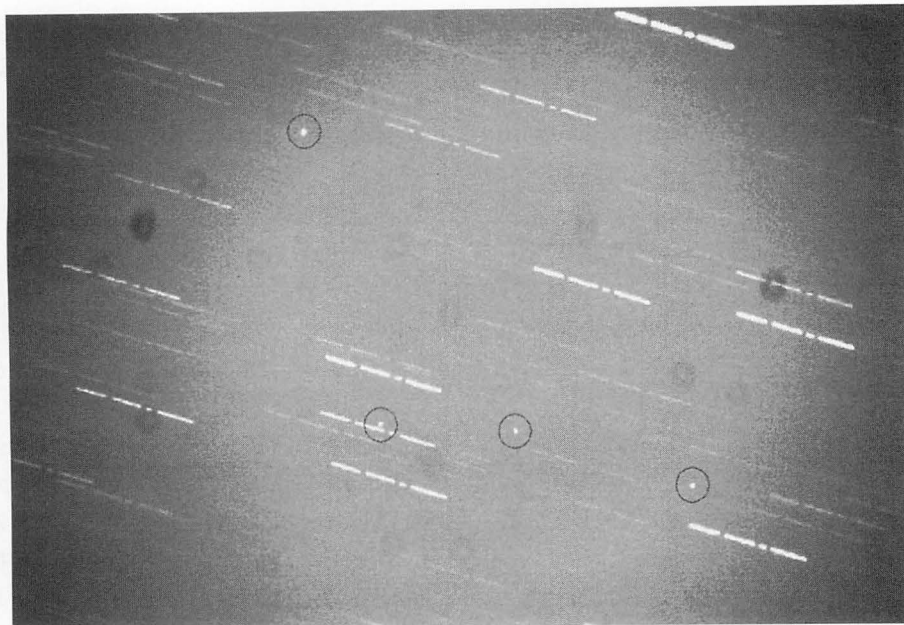
2月14日は、約30分間隔で撮像し、夜明けで観測が不可能になるまで通算9時間半追尾した。その結果(経度・緯度)を第2図に示す。また、経度の時間推移を第3図にクロス印(+)で示す。直線・曲線の意味は後述する。図より、物体が西ヘドリフトしていることがわか



第2図 静止軌道近傍における人工天体の分布。1999年1月12日から同年2月17日の間に探索した結果である。



第3図 発見したスペースデブリの直下点経度の時間推移。1999年2月14, 16, 17日の観測結果である。直線は2月14日のデータを最小二乗法で当てはめた結果を示す。



第4図 静止衛星光学観測装置による画像データ。1999年2月16日13:13:30(UT)に撮像した。露出時間は20秒である。画面の下半分にある3点は静止衛星を表す。左からB-SAT 1 B, B-SAT 1 A, BS-3 Nである。上半分にある1点はスペースデブリである。

る。この場合、 $D$ は任務を終えた静止衛星の可能性がある。運用中の衛星に衝突しないよう、静止軌道より数百km程度高い位置へ軌道離脱(de orbit)したことが予想される。また、時間経過によって $D$ の経度はほぼ直線的に変化している。図では、僅かに三角関数状の膨らみがあるものの、おおよそ直線であり軌道は円軌道で近似可能であると判断した。経度( $y$ [deg])の時間( $t$ [h])に対する推移を最小二乗法でフィッティングした直線は $y = -0.1341t + 116.5$ で与えられた。よって、次の日の同じ時刻には、西に $0.1341 \times 24 = 3.2$ [deg]ずれた場所に現れるはずである。

15日は曇天の為、観測を延期した。16日に上記の考え方のもと、12時50分(UT)に東経108[deg]付近の赤道上空を通過するであろう、と予測をたて、12時30分(UT)頃から望遠鏡を向けて待ち構えた。しかし、予定時刻になっても現れなかった。付近一帯を探索したところ、東経110[deg]に $D$ と思われる物体が見つかった。図4がそのCCD画像である。本当に $D$ かどうか一見しただけでは判別できないため、追跡し軌道決定をする。その間にも探索を続けたが、結局この1機以外に見つけ出すことはできなかった。追跡結果(経度・緯度)を第2図に、経度の時間推移を第3図に重ねた。緯度・経度で表した軌跡は、14日の $D$ とほとんど同じ傾向を示し、第3図の近似直線の傾きも14日とほぼ同じである。よって、この時点で同一のデブリを追跡したと判断した。

14日から16日の48時間で、赤道上空を通過した経度がどれだけずれているかを測定した。その結果、ドリフトレートは $2.3$ [deg/day]と算出された。16日の赤道

通過経度からドリフトレート値を差し引くことで、翌17日における経度値を概算することができる。17日には東経107.90[deg]の赤道上空を12時42分(UT)に通過する。誤差の分も含め予定時刻の1時間程前から観測を開始した。観測結果を第2, 3図に示す。赤道通過経度と時刻はおおよそ予測と一致し、観測3日目にして $D$ の動きを把握することに成功した。

これら3日間分の観測データを元に、軌道決定を行なった。すなわち、ある時刻 $t$ における軌道要素——軌道長半径( $a$ )、離心率( $e$ )、軌道傾斜角( $i$ )、昇交点赤経( $\Omega$ )、近地点引数( $\omega$ )、平均近点離角( $M$ )——を求めた。軌道決定の原理は、最初に初期値を仮定し、摂動の影響を加味して観測値との差の二乗平均値が小さくなるよう、反復計算を繰り返すものである。

決定された軌道要素を第1表に示す。1日分の観測データのみを使って軌道決定をしたときは、各々の日で $a$ 、 $e$ に無視できない大きさのばらつきが生じていることがわかる(表中[1],[2],[3]を参照のこと)。また、2月14日0時UTの時ににおける軌道要素を見ると、1日分と2日分の観測データから求めた $a$ 、 $e$ には大きな差が生じている(表中[1],[4]を参照のこと)。しかし、同じ2月14日0時UTの軌道要素でも、2日分と3日分の観測データから求めた $a$ 、 $e$ にはほとんど差がない。(表中[4],[5]を参照のこと)。なお、観測誤差(o-c)について、[1]から[5]のいずれにおいても経度方向では $0.001$ [deg]、緯度方向では $0.0008$ [deg]であった。複数日の観測においてもo-cが増えないことから、これら一連の観測で検出した物体は同一物であることが示さ





鷺尾 智幸  
Tomoyuki WASHIO  
豊橋技術科学大学 機械システム工学系  
構造健全性工学  
E-mail:  
washio@knt.mech.tut.ac.jp



木村 和宏  
Kazuhiro KIMURA  
関東支所 鹿島宇宙通信センター  
宇宙制御技術研究室  
衛星軌道の設計・解析・制御・推定  
E-mail: kimura@crl.go.jp



梅原 広明  
Hiroaki UMEHARA  
関東支所 鹿島宇宙通信センター  
宇宙制御技術研究室  
クラスター衛星システムの軌道制御・  
スペースデブリの観測・N体力学  
E-mail: ume@crl.go.jp