

## 4.4 近地球小惑星 6489 ゴレブカと 4197(1982 TA)の レーダー観測

小山 泰弘<sup>\*1</sup> 中島 潤一<sup>\*2</sup> 関戸 衛<sup>\*2</sup> 吉川 真<sup>\*3</sup>  
 中村 昭子<sup>\*4</sup> 平林 久<sup>\*3</sup> 岡田 達明<sup>\*3</sup> 阿部 正直<sup>\*3</sup>  
 西堀 俊幸<sup>\*5</sup> 布施 哲治<sup>\*6</sup> Steven J. OSTRO<sup>\*7</sup> Dennis CHOATE<sup>\*7</sup>  
 Reginald A. CORMIER<sup>\*7</sup> Ron WINKLER<sup>\*7</sup> Raymond F. JURGENS<sup>\*7</sup>  
 Jon D. GIORGINI<sup>\*7</sup> Keith D. ROSEMA<sup>\*7</sup> David L. MITCHELL<sup>\*7</sup>  
 Donald K. YEOMANS<sup>\*7</sup> Martin A. SLADE<sup>\*7</sup> Alexander L. ZAITSEV<sup>\*8</sup>

### 4.4 Radar Observations of Near Earth Asteroids 6489 Golevka and 4197 (1982 TA)

By

Yasuhiro KOYAMA, Junichi NAKAJIMA, Mamoru SEKIDO,  
 Makoto YOSHIKAWA, Akiko M. NAKAMURA, Hisashi HIRABAYASHI,  
 Tatsuaki OKADA, Masanao ABE, Toshiyuki NISHIBORI, Tetsuharu FUSE,  
 Steven J. OSTRO, Dennis CHOATE, Reginald A. CORMIER, Ron WINKLER,  
 Raymond F. JURGENS, Jon D. GIORGINI, Keith D. ROSEMA, David L. MITCHELL,  
 Donald K. YEOMANS, Martin A. SLADE, and Alexander L. ZAITSEV

Radar observations of two near-Earth asteroids were performed using a bi-static radar technique with Kashima 34-m antenna and Usuda 64-m antenna as receiving stations and Goldstone 70-m antenna as a transmitting station. The asteroid 6489 Golevka was observed on June 15, 1995 when its distance from the Earth became 0.048 AU and the radar echo from the asteroid was detected from the data observed with Kashima 34-m antenna. The success of the trans-continental bistatic radar observations became the first detection of a radar echo from a solar system object beyond Moon in Japan. The asteroid 4197 (1982 TA) was observed on October 24, 1996 when its distance to the Earth became 0.086 AU. The radar echo signal from the asteroid was detected from both of the data observed at Kashima and at Usuda. The received signal was coherently sampled and recorded at both stations. By using these data, interferometric data analysis was examined.

[キーワード] 近地球小惑星, 小惑星レーダー, 干渉計

Near earth asteroids, Bi-static radar, Interferometry

\*1 鹿島宇宙通信センター 宇宙電波応用研究室 (2001年  
1月より内閣府技官に併任)

\*2 鹿島宇宙通信センター 宇宙電波応用研究室

\*3 宇宙科学研究所

\*4 神戸大学 大学院自然科学研究科

\*5 宇宙開発事業団

\*6 国立天文台

\*7 カリフォルニア工科大学 ジェット推進研究所

\*8 ロシア科学アカデミー 電波電子工学研究所

## 1. はじめに

レーダー観測技術は、これまで約30年にわたって数々の太陽系天体の研究に大きな役割を果たしてきた<sup>(1)</sup>。ごく近年には、惑星探査機が小惑星に接近して詳細な画像を得ることも可能となつたが、それまではレーダー観測技術が小惑星の形状や表面の特性を調査するのにもっとも有力な手法であった。また、現在においても、費用と時間のかかる惑星探査計画より容易に多数の天体を観測できるという点で、レーダー観測技術の重要性は全く失われてはいないと言ってよい。しかし、日本においては、近地球小惑星 6489 ゴレブカ (1991 JX) からのレーダー反射波を検出しようとする今回の観測が行われるまで、月よりも遠距離にある太陽系天体のレーダー観測はまったく行われていなかった。そこで、この小惑星が 1995 年 6 月に 0.034 天文単位という距離にまで地球に接近した機会を利用して、日本で初めての小惑星レーダー観測が行われた。この観測では、カリフォルニア工科大学ジェット推進研究所の運用するゴールドストーン深宇宙通信施設（米国カリフォルニア州）の 70m アンテナを送信局として、鹿島宇宙通信センターの 34m アンテナを受信局として使用した。このように、電波を送信するアンテナとレーダー反射波を受信するアンテナに別のアンテナを使用するような観測形態はバイ斯塔ティックレーダー観測と呼ばれる。この観測の結果、受信データからレーダー反射波の検出に成功し、小惑星 6489 ゴレブカは月以遠で日本で初めてレーダーによって観測された太陽系天体となった。また、同じ小惑星からのレーダー反射波は、ウクライナ共和国のクリミアにあるエブパトリア深宇宙通信施設<sup>(2)</sup>の 70m アンテナによっても受信された。小惑星の正式名称であるゴレブカ (Golevka) は、ゴールドストーン (Goldstone: GOL)、エブパトリア (Evpatoria: EV) そして鹿島 (Kashima: KA) にある 3 つの施設の地名の頭文字を取って名付けられたものである。

一方、今回観測されたもう一つの小惑星 4197 (1982 TA) は、1996 年 10 月に 0.085 天文単位の距離まで地球に近づいた。この小惑星の観測でも、やはりゴールドストーンの 70m アンテナを送信局とし、バイ斯塔ティックレーダー観測によって観測を行った。受信局には、鹿島宇宙通信センターの 34m アンテナに加えて、宇宙科学研究所臼田深宇宙観測所の 64m アンテナも使用した。このことにより、2 地点で同じレーダー反射波を観測することになり、干渉計としてのデータ処理が可能となつた。干渉計の最小フリング間隔は、観測の対象の方向が基線に垂直になる時に得られるが、鹿島局と臼田局の間の距離は 208km であり、鹿島-臼田基線の最小フリング間隔は使用する電波の周波数 8510MHz に対して 34.9

ミリ秒角と計算される。このフリング間隔は、0.085 天文単位の距離では 2.14km の広がりに相当する。小惑星の大きさがこのフリング間隔より小さい場合、2 つの受信局で受信された信号の相互パワースペクトルを計算することによって、基線に平行な方向のフーリエ係数を得ることができる。ただし、レーダー反射波の相互パワースペクトルを得るためにには、2 つの受信局で受信された信号をコヒーレントにサンプリングしてデータレコーダーに記録することが必要である。このため、両局では外部周波数標準信号に内部クロックを同期することができるようとした DAT (Digital Audio Tape) データレコーダーを使用し、外部周波数標準信号として水素メーター周波数標準器からの信号を使用した。

## 2. 観測結果

### 2.1 小惑星

小惑星 6489 ゴレブカ (1991 JX) は、1991 年 5 月、パロマー天文台（米国カリフォルニア州）の 0.46m シュミット望遠鏡で Eleanor Helin により発見された小惑星である。1995 年に地球に接近したのは、小惑星が発見された時の次の接近であり、最接近時の地球からの距離は約 0.034 天文単位であった。この小惑星はアポロ型小惑星として分類されるもので、近日点距離は 1.012 天文単位、離心率は 0.5975 である。ゴールドストーン局で送信と受信の両方を行うレーダー観測<sup>(3)</sup>は、1995 年 6 月 3 日から 6 月 15 日の間行われ、ゴールドストーン局と鹿島局によるバイ斯塔ティックレーダー観測は 1995 年 6 月 15 日に行われた。鹿島での観測が行われた時のこの小惑星の地心距離は約 0.048 天文単位である。

もう一方の小惑星である 4197 (1982 TA) は、1982 年 10 月 11 日、パロマー天文台の 1.2m シュミット望遠鏡で、Eleanor Helin と Eugene Shoemaker によって発見された。この小惑星もやはりアポロ型小惑星として分類され、近日点距離は 0.5166 天文単位、離心率は 0.7555 である<sup>(4)</sup>。この小惑星は 1996 年 10 月 25 日、0.085 天文単位の距離で地球に最接近したが、その前日、1996 年 10 月 24 日に地心距離が 0.086 天文単位であったときにレーダー観測を行った。

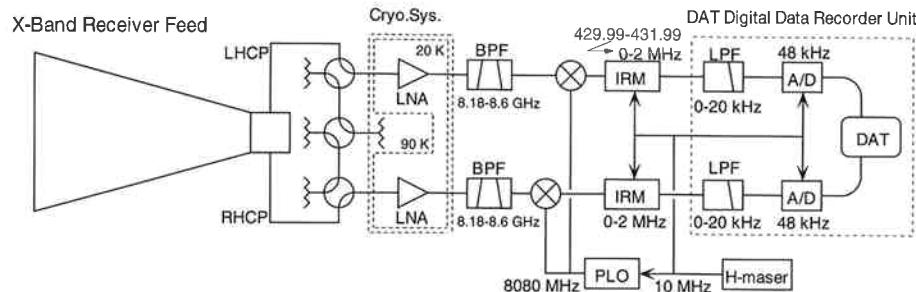
### 2.2 送信システム

小惑星のレーダー観測では、ゴールドストーンの 70m アンテナから送信電波を送信する際、無変調正弦波 (CW) の形式と位相変調した形式のどちらかを選択して送信することができる。後者の形式の電波では、発信信号に時刻コードを重畳することにより、電波の往復に要した時間を測定することができ、視線方向の形状に関する情報を得ることが可能となる。一方、この場合には、レーダー反射波の信号対雑音比は無変調の場合より減少する。小惑星 6489 ゴレブカと小惑星 4197 (1982

TA) のバイ斯塔ティックレーダー観測では、レーダー反射波の信号対雑音比を最大限にするため、送信電波は無変調な形式が選ばれた。送信信号の周波数は位相が連続に保たれながら、ゴールドストーン 70m 局で受信した場合のレーダー反射波の周波数が一定になるように制御された。その結果、鹿島 34m 局と臼田 64m 局でのレーダー反射波の周波数は、ドップラー効果のため 8510.0 MHz の周波数の近傍で時間とともにゆるやかに変化した。送信された電波は左旋円偏波 (LHCP=Left Hand Circular Polarization) が用いられ、送信出力  $P_{tx}$  は 450kW であった。また、送信アンテナの利得  $G_{tx}$  は、レーダー観測に使用した X 波帯で 74.3dB であった。

### 2.3 受信およびデータ取得システム

第1図に鹿島 34m 局のデータ受信取得システムの構成を示す。受信信号は右旋円偏波 (RHC=Right Hand Circular Polarization) 信号と LHCP 信号の両方の信号を記録するように構成されている。X 波帯の給電系の偏波器からの信号出力は、2つの独立した低雑音増幅器 (LNA=Low Noise Amplifier) で増幅され、周波数変換部により中間周波数 (IF: 100-600MHz) に変換される。周波数変換部の局部周波数は 8080MHz であり、8510MHz で受信された信号はこの段階で 430 MHz となる。その後、IF 信号はイメージ抑圧ミキサー (IRM=Image Rejection Mixer) で 429.99MHz という局部周波数でベースバンド信号 (DC-2 MHz) に変換される。最後にこのベースバンド信号は DAT データレコーダー内に組み込まれた低域通過フィルターで 20kHz 以上の周波数成分をカットされたのち A/D 部でデジタルサンプリングされて記録される。この際のサンプリング速度は 48kHz で、サンプリングの量子化数は 14 ビットである。水素メーザー周波数標準器からの 10MHz の基準周波数信号は、周波数変換部と IRM の両方に供給されている。また、小惑星 4197 (1982 TA) の観測においては、同じ周波数標準信号を DAT レコーダーにも供給し、受信信号をコヒーレントに記録できるようにした。



第1図 鹿島 34m 局における小惑星レーダー観測時の構成図。RHC 信号と LHCP 信号の両方の受信信号を、DAT データレコーダーにより記録した。低温負荷器と高温負荷器は、受信機雑音温度とシステム雑音温度の推定に使われた。各段階での周波数範囲もこの図の中に示されている

レーダー観測の前には、毎回、受信機雑音温度  $T_{rec}$  とシステム雑音温度  $T_{sys}$  を較正するため、IF 信号をスペクトルアナライザに入力して信号源を低温負荷器、高温負荷器、およびアンテナを天頂方向に向いているときの雑音とに切り替えながら信号強度を測定した。このときのスペクトルアナライザの周波数分解能は 1MHz に設定した。低温負荷器と高温負荷器はともに導波管終端器であるが、低温負荷器は物理温度約 90K の 2 段階冷却器の外側ステージにあり、高温負荷器は室温環境下におかれている。信号源を低温負荷器にしたときに測定された強度を  $P_{cold}$ 、高温負荷器にした場合の強度を  $P_{hot}$ 、そしてアンテナを天頂に向けたときの強度を  $P_{sky}$  としたとき、受信機雑音温度  $T_{rec}$  は次の式により求められる。

$$T_{rec} = \frac{T_{hot} - (P_{hot}/P_{cold})\tilde{T}_{cold}}{(P_{hot}/P_{cold}) - 1} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 $\tilde{T}_{cold}$  は低温負荷器の有効物理温度である。有効物理温度は、低温負荷器から LNA までの導波管などの損失  $L$  を考慮して補正した温度であり、実際の低温負荷器の物理温度  $T_{cold}$  と、次の式の関係にある。

$$\tilde{T}_{cold} = (1-L)T_{cold} + LT_{amb} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$L$  はあらかじめ 0.014 として測定されている。 $T_{amb}$  は  $T_{hot}$  とともに室温であり、同じ値である。また、システム雑音温度  $T_{sys}$  は次の式により求められる。

$$T_{sys} = (T_{hot} + T_{rec}) \frac{P_{sky}}{P_{hot}} \quad \dots\dots\dots(3)$$

第1表に小惑星 6489 ゴレブカの観測の前に測定された  $T_{rec}$  と  $T_{sys}$  の値を示す。つぎに、受信系の利得  $G_{rec}$  は、強い較正用天体電波源である CAS-A を使うことにより測定した。アンテナが CAS-A を追跡している時の IF 信号の強度を  $P_{on}$  とし、同じ仰角でアンテナビーム内に電波源がないときの IF 信号の強度を  $P_{off}$  とすると、 $G_{rec}$  は次の式で求められる。

第1表 鹿島34m局の受信機雑音温度  $T_{rec}$  およびシステム雑音温度  $T_{sys}$  の推定結果。 $T_{hot}$  と  $T_{cold}$  はそれぞれ高温負荷器と低温負荷器の物理的温度である。また、受信系の信号源を高温負荷器、低温負荷器、アンテナが天頂を向いているときの雑音に切り替えたときの受信系出力強度をそれぞれ  $P_{hot}$ 、 $P_{cold}$  および  $P_{sky}$  で示す

| Polarization | $T_{hot}$<br>K | $T_{cold}$<br>K | $P_{hot}$<br>dBm | $P_{cold}$<br>dBm | $P_{sky}$<br>dBm | $T_{rec}$<br>K | $T_{sys}$<br>K |
|--------------|----------------|-----------------|------------------|-------------------|------------------|----------------|----------------|
| RHCP         | 294.54         | 93.35           | -38.86           | -43.14            | -46.38           | 22.0           | 56.0           |
| LHCP         | 294.54         | 93.37           | -46.00           | -50.52            | -53.58           | 12.1           | 53.5           |

第2表 鹿島34m局の受信系の利得  $G_{rec}$  の推定結果。アンテナが較正用電波源 Cas-A を追跡しているときと、同じ仰角で方位角方向にアンテナをオフセットさせてビーム中に電波源がないときの出力信号の強度をそれぞれ  $P_{on}$  と  $P_{off}$  で示す

| Polarization | $P_{on}$<br>dBm | $P_{off}$<br>dBm | $G_{rec}$<br>dB |
|--------------|-----------------|------------------|-----------------|
| RHCP         | -36.070         | -38.442          | 65.4            |
| LHCP         | -34.333         | -36.814          | 65.5            |

$$G_{rec} = \frac{8\pi k_B T_{sys}}{\lambda^2 J} \left( \frac{P_{on}}{P_{off}} - 1 \right) \quad \dots \dots \dots (4)$$

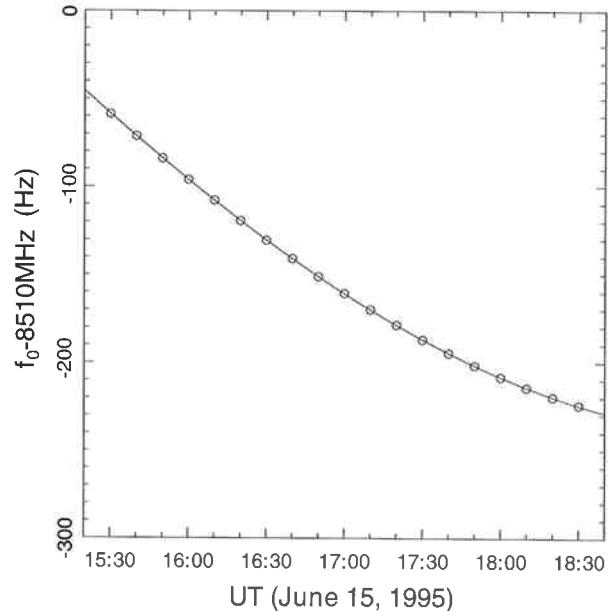
ここで、 $k_B$  はボルツマン定数、 $\lambda$  は観測した電波の波長、 $J$  は Cas-A の有効フラックス密度である。有効フラックス密度  $J$  は、電波源の全フラックス密度のうち、34m アンテナのビーム角内の構造からの寄与に相当するもので、 $328 \times 10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$  と見積もられる。小惑星 6489 ゴレブカの観測の前に測定した  $G_{rec}$  の値を第2表に示す。

### 3. 結果と考察

小惑星 6489 ゴレブカの観測の後、記録したデータはまず GP-IB 通信インターフェースを通じて、UNIX ワークステーションに伝送した。GP-IB によるデータ伝送速度は、DAT レコーダーのデータ再生速度に比較してかなり遅いため、再生されたデータをインターフェースボードのバッファメモリに一旦蓄えて伝送する必要があり、バッファメモリの大きさに合うように小さなブロックに分割しながらデータ伝送を行う必要があった。一方、小惑星 4197 (1982 TA) の観測では、データ伝送速度は SCSI インターフェースを使用することによって大幅に改善し、データ再生速度と同じ伝送速度でデータ伝送をすることができるようになった。UNIX ワークステーションでは、まず伝送した観測データのフーリエ変換  $\mathcal{F}_i(f)$  を求め、次式で定義するパワースペクトルを計算した。

$$\mathcal{P}(\Delta f) = \frac{1}{\sigma} \left( \sum_{i=1}^N [\mathcal{F}_i(\Delta f + f_0(t_i)) \mathcal{F}_i^*(\Delta f + f_0(t_i))] - \mathcal{P}_0 \right) \quad \dots \dots \dots (5)$$

$\Delta f$  は、レーダー反射波の予想周波数  $f_0$  からの周波数オ



第2図 レーダー反射波の中心周波数  $f_0$  の時間変化。たて軸はレーダー反射波の周波数の 8510MHz からのオフセットを示す。 $f_0$  は、10 分間隔で精密軌道要素から計算され、白い円で示されている。実線は、四次多項式により  $f_0$  をモデル化した曲線を示す。

フセッタである。 $\mathcal{P}_0$  と  $\sigma$  はパワースペクトルを正規化するための定数で、それぞれレーダー反射波が存在しない周波数範囲におけるパワースペクトルの平均と標準偏差である。任意の時刻における  $f_0$  の値は、精密軌道要素に基づいて 10 分ごとに計算された値に基づいて計算した。第2図は小惑星 6489 ゴレブカの観測において、時間が経過に伴って  $f_0$  がどのように変化したかを示している。第2図の実線は、10 分間隔で与えられた  $f_0$  に最もよく合うように最小 2乗法で係数を定めた四次多項

式である。式(5)における $f_0$ は、この四次多項式によって任意の時刻における値を計算して計算した。四次という多項式の次数は、 $f_0$ の残差が0.1Hzを超えないという条件を満たすために必要な最小の次数から決められた。

パワースペクトルの周波数解像度は、 $\mathcal{F}(f)$ を計算するために使われるデータ時間長の逆数で与えられる。そのため、周波数解像度を小さくするためには、長い時間のデータが必要である。第3図に、小惑星6489ゴレブカの観測で得られたRHCP信号の正規化パワースペクトルを示す。このときのパワースペクトルの周波数解像度は0.2Hzで、1995年6月15日15:28UTから57分間にわたる受信信号を積分することによって計算した。8.4の最大振幅で、明らかにレーダー反射波の存在を確認できる。また、小惑星4197(1982 TA)の観測で得られたRHCP信号の正規化パワースペクトルを第4図に示す。第4図のパワースペクトルの周波数解像度は11.7Hzであり、1996年10月24日の08:30UTから74分間にわたるデータを積分することによって計算した。鹿島34m局と臼田64m局の観測データの両方で、それぞれ7.2と9.2という最大振幅で明らかにレーダー反射波が検出されていることが確認できる。LHCP観測データも同じように処理したが、LHCPの観測データからはレーダー反射波を識別することはできなかった。ただし、一般にレーダー反射波の信号強度は送信信号と逆の円偏波では強く、同じ円偏波では弱いため、結果は予測されたものと一致している。

レーダー反射波の合計出力は、観測対象の小惑星の断

面積 $\rho_r A$ に比例する。ここで、 $\rho_r$ はレーダー反射率であり、 $A$ は小惑星の反射断面積である。この関係は以下のように表される。

$$P_{rec} = \frac{P_{tx} G_{tx} G_{rec} \rho_r A \lambda^2}{4\pi R_{tx}^2 \cdot 4\pi R_{rec}^2 \cdot 4\pi} \quad \dots\dots\dots(6)$$

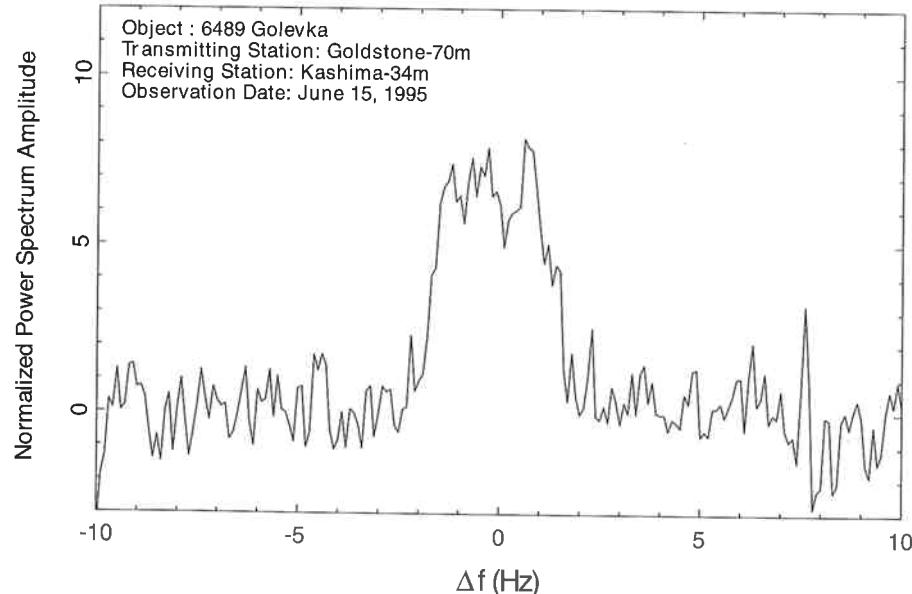
ここで、 $\lambda$ はレーダー信号の波長、 $P_{tx}$ は送信信号出力、 $G_{tx}$ は送信アンテナのゲイン、 $R_{tx}$ は送信局から小惑星までの距離、 $P_{rec}$ は受信信号出力、 $G_{rec}$ は式(4)で与えられる受信アンテナのゲイン、そして $R_{rec}$ は受信局から小惑星までの距離である。一方、雑音のパワースペクトル $N$ に対する標準偏差は次式で与えられる。

$$N = k_B T_{sys} \sqrt{\frac{B}{t}} \quad \dots\dots\dots(7)$$

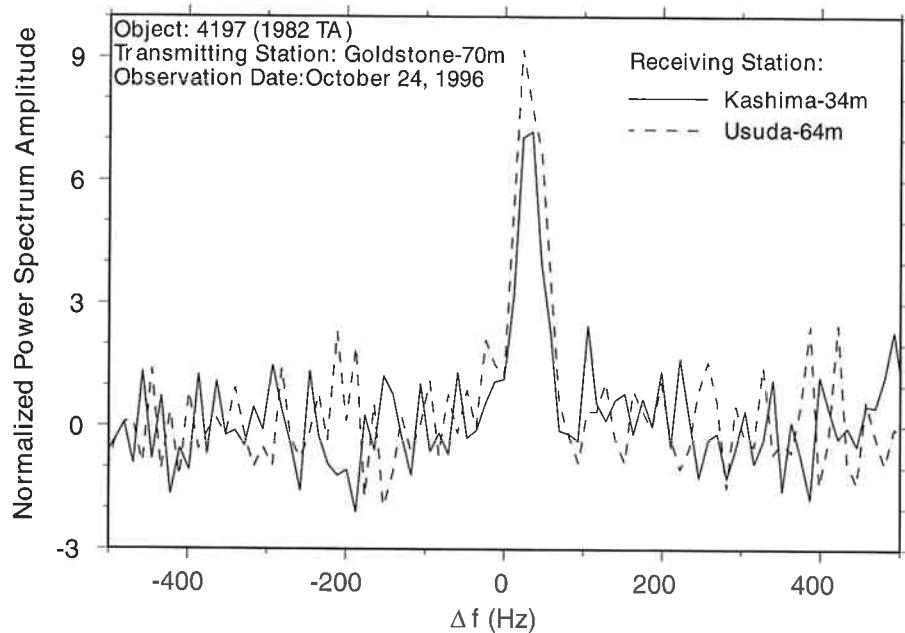
ここで $k_B$ はボルツマン定数、 $T_{sys}$ は式(3)で与えられる受信局のシステム雑音温度、 $B$ はパワースペクトルの周波数解像度、 $t$ は積算時間である。以上により、受信データの正規化パワースペクトルは次式で与えられる。

$$\sum_{\Delta f} \mathcal{D}(\Delta f) = \frac{P_{rec}}{N} \quad \dots\dots\dots(8)$$

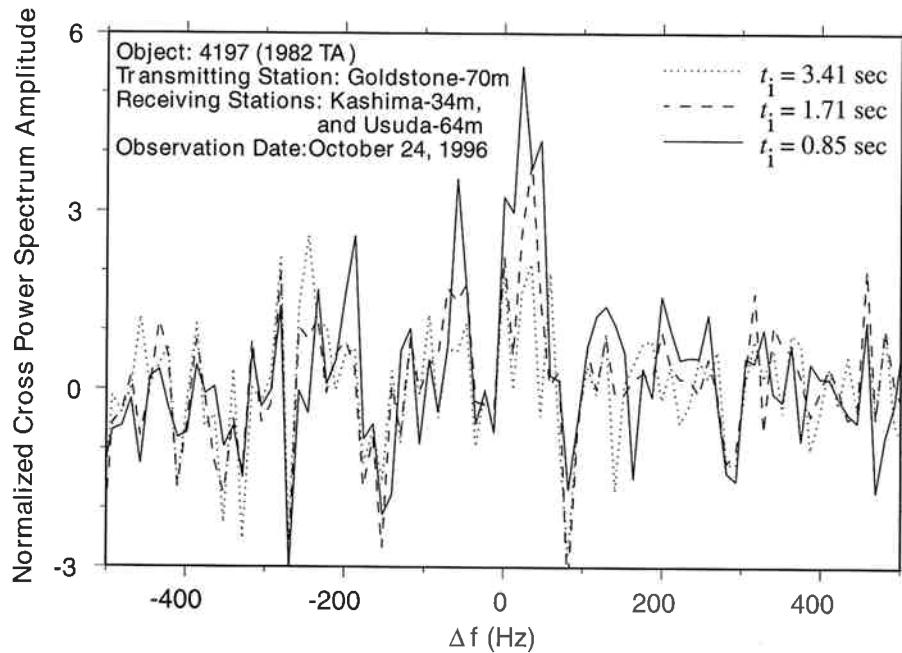
式の左辺の総和は、レーダー反射波が存在する周波数範囲に対して行われる必要がある。第3図から、 $\mathcal{D}(f)$ が2.0を超え、したがってレーダー反射波があると考えられる範囲は、 $-1.8(\text{Hz}) \leq \Delta f \leq 1.5(\text{Hz})$ である。この周波数範囲にわたって $\mathcal{D}(f)$ を積算することにより、



第3図 鹿島34m局で得られた、小惑星6489ゴレブカのレーダー反射波のパワースペクトルの振幅。周波数解像度は0.2Hzで、1995年6月15日の15:28 UTから16:25 UTまでの57分間にわたってRHCPで受信したデータを積分して計算した。パワースペクトルは、レーダー反射波のない周波数での平均と標準偏差がそれぞれ0と1になるように正規化した



第4図 鹿島34m局と臼田64m局で得られた、小惑星4197(1982 TA)のレーダー反射波のパワースペクトルの振幅。周波数解像度は11.7Hzで、1996年10月24日の08:30 UTから09:45 UTまでの74分間にわたってRHCPで受信したデータを積分した。パワースペクトルは、レーダー反射波のない周波数での平均と標準偏差がそれぞれ0と1になるように正規化した。鹿島34m局のパワースペクトルは実線で示されており、臼田64m局のデータは点線で示されている



第5図 鹿島34m局と臼田64m局で記録されたRHCP受信データの相互パワースペクトルの正規化振幅。コヒーレントな積算時間  $t_i$  を変化させて、1996年10月24日の08:30 UTから74分間にわたって積分した。周波数解像度は11.7Hzである

レーダー反射波の合計出力として  $211 \times N$  という値が得られる。前節までにすでに与えられているいくつかのパラメータを使うことにより、 $\rho_r A = 0.063(\text{km}^2)$  が得られる。小惑星 6489 ゴレブカの大きさは 600m 以下であると予測されている<sup>(3)</sup>が、このことはレーダー断面積から予測されるレーダー反射率が最低でも 0.22 であることを意味している。この値は、多数の小惑星に対して現在までに報告されている典型的な値より非常に大きいものである。第 4 図で示したパワースペクトルを得たのと同じ手順を、小惑星 4197 (1982 TA) の観測データに対しても適用し、 $\rho_r A = 0.98(\text{km}^2)$  という関係が得られ、光学的観測からの推定に基づいた 4km という値を直径として用いることによってレーダー反射率は 0.078 という値が得られた。

小惑星の見かけの回転軸に直角な方向の最大寸法を  $D$ 、見かけの回転角速度を  $\omega$  とすると、ドップラー周波数幅  $W$  は次式で得られる。

$$W = \frac{D\omega \sin \theta}{c} f_0 \quad \dots\dots\dots(9)$$

ここで、 $f_0$  はレーダー反射波の中央周波数、 $c$  は光の速度、 $\theta$  は見かけの回転軸と小惑星から受信局への方向ベクトルのなす角である。第 3 図から、レーダー反射波周波数の低いほうの端は  $-1.9\text{Hz}$  と  $-1.8\text{Hz}$  の間、高いほうの端は  $1.5\text{Hz}$  と  $1.6\text{Hz}$  の間である。したがって、レーダー反射波のドップラー周波数幅は  $W = 3.4 \pm 0.1\text{Hz}$  と見積もることができる。小惑星の自転周期は、光学観測から 6.02 時間であると求められている<sup>(2)</sup>。以上のことから、 $D \sin \theta = 0.41 \pm 0.01\text{km}$  を得ることができる。この結果は、 $\theta$  が 40 度以下であれば、光学観測から推定されている小惑星の直径とよく一致する。同じ手順を小惑星 4197 (1982 TA) の観測データに適用すると、 $D \sin \theta$  は  $4.2 \pm 0.8\text{km}$  として評価され、この値は  $\theta$  が 90 度に近ければ、つまり小惑星の自転軸が、視線方向に対して直角に近ければ、光学的観測から推定された大きさとよく一致する。

最後に、鹿島 34m 局と臼田 64m 局で記録した受信データの相互パワースペクトルを計算した。第 5 図は、コヒーレントな積分時間長  $t_i$  を変化させながら得た相互パワースペクトルの結果を示している。相互パワースペクトルは、まず時間  $t_i$  の間コヒーレントに積分され、その後 1996 年 10 月 24 日の 08:30 UT から 74 分間にわたって振幅の平均を計算した。第 5 図で示されているように、相互パワースペクトルでのレーダー反射波の平均振幅は、コヒーレントな積分時間が長くなると急速に減少することがわかる。ドップラー周波数シフトや観測時の周波数標準信号のレート誤差などの数種類のパラメータを変化させたが、結局、結果は同じであった。小惑星 4197

(1982 TA) の大きさは、光学観測の結果フリンジ間隔よりも大きいと推定されるため、干渉計としてのフリンジ振幅は非常に小さくなることを考えるとよく理解できる。

#### 4. ま と め

小惑星 6489 ゴレブカからのレーダー反射波が、鹿島宇宙通信センターの 34m アンテナで受信したデータから検出された。これは、日本では月よりも遠い距離にある太陽系天体として初めてのレーダー観測の成功である。観測期間は短かったが、小惑星のレーダー観測に対する観測施設の能力が十分に実証されたと言って良い。今後は、この成功に基づいて、多数の近地球小惑星に対するレーダー観測の可能性が検討されることになるであろう。今回の観測の経験を通じて、我々は今後のレーダー観測に対して必要な教訓を多く学ぶことができた。まず、小惑星の大きさや形状を精度よく推定するためには、少なくとも自転周期よりも十分に長い観測期間が必要である。さらに、長い観測期間のデータがあれば、レーダー観測データだけから小惑星の自転周期を予測することも可能となる。次に、視線方向の形状に関する情報を得るために、時間コード変調を送信信号に適用することが重要である。変調された送信信号を用いることにより、レーダー反射波から小惑星の視線方向の形状を推定することができる。小惑星 4197 (1982 TA) の観測においては、干渉計としてのデータ解析も行われた。その結果、鹿島 34m 局と臼田 64m 局で記録された観測データの相互パワースペクトルを得たが、コヒーレントに積分する時間を 3 秒以上に設定するとレーダー反射波を検出することができなくなるという結果が得られた。この小惑星の大きさは、今回の観測局配置で与えられるフリンジ間隔より大きいと推定されるので、相互パワースペクトルからレーダー反射波を検出することができなかつたものと考えられる。したがって、干渉レーダー観測から有益な情報を得るには、小惑星が地球に十分近づく必要があり、かつ十分短い基線で観測を行ってフリンジ間隔を小惑星のサイズより大きくなるようにすることが重要である。

#### 謝 辞

本論文で述べた小惑星レーダー観測では、通信総合研究所、宇宙科学研究所、およびカリフォルニア工科大学ジェット推進研究所の関係者に大変お世話になりました。また、小惑星 6489 Golevka を発見した Elenor F. Helin 博士には、ご好意により、レーダー観測の成功を記念して名称をつけていただきました。ここに深く感謝いたします。この研究の一部は、米国航空宇宙局との契約のもと、カリフォルニア工科大学ジェット推進研究所で行われました。

## 参考文献

- (1) S. J. Ostro, "Planetary radar astrometry", Rev. Modern Phys., vol. 65, pp.1235-1279, 1993.
- (2) A. L. Zaitsev, S. J. Ostro, S. P. Ignatov, D. K. Yeomans, A. G. Petrenko, D. Choate, O. K. Margorin, R. A. Cormier, V. V. Mardyshkin, R. Winkler, O. N. Rghiga, R. F. Jurgens, V. A. Shubin, J. D. Giorgini, A. P. Krivtsov, K. D. Rosema, Y. F. Koluka, M. A. Slade, A. L. Gavrik, V. B. Andreev, D. V. Ivanov, P. S. Peshin, Y. Koyama, M. Yoshikawa, and A. Nakamura, "Intercontinental bistatic radar observations of 6489 Golevka (1991 JX)", Planet. Space Sci., vol. 45, no. 7, pp. 771-778, 1997.
- (3) R. S. Hudson, S. J. Ostro, R. F. Jurgens, K. D. Rosema, J. D. Giorgini, R. Winkler, R. Rose, D. Choate, R. A. Cormier, C. R. Franck, R. Frye, D. Howard, D. Kelley, R. Littlefair, M. A. Slade, L. A. M. Benner, M. L. Thomas, D. L. Mitchell, P. W. Chodas, D. K. Yeomans, P. Palmer, A. Zaitsev, Y. Koyama, A. Nakamura, A. W. Harris, and M. N. Meshkov, "Radar and Physical Modeling of Asteroid 6489 Golevka", Icarus, vol. 148, no. 1, pp. 37-51, 2000.
- (4) J. Graham, "Asteroid Discovery 1982TA", Foundation News, World Space Foundation, Oct. 1982.
- (5) W. A. Dent, Astrophys. J., vol. 188, p.L11, 1974.