

## V-8. 惑星電波源のマッピング

高橋富士信\*

### VLBI MAPPING OF PLANETARY RADIO SOURCES

By

Fujinobu TAKAHASHI

#### 1. はじめに

地球引力圏から脱出するに十分な推進能力を持つに至った人類の科学の手は、今や太陽系黄道面全体に達しようとしている。アメリカ、ソビエトによる高速推進ロケット技術の発展は、停滞気味な惑星科学の新たな進展を促しつつある。60年代に飛躍的に発展した惑星電波探査が、70年代に入って行きづまったのに代って、惑星への直接探査によって壁を打ち破ろうという意欲的な試みが行われてきた。金星・火星に対しては、アメリカのパイオニア・マリナーシリーズと、ソビエトの火星・ゾンド・惑星間ステーションシリーズが成功を収めており、木星、土星に対しては、パイオニア外惑星シリーズが実行されつつある。

一方、太陽系を静的にとらえるのではなく、起源にまでさかのぼって太陽系の進化状態としての現在を、動的にとらえようとする動きも生まれている。

太陽系の生誕地を銀河系内の暗黒星雲の中に類推し、その証拠を、隕石の化学分析から見付けようという漸新な方法論が発展しつつある。この方法によって隕石化学組成の不均一性と不均質太陽系の相関関係について、シカゴグループのクレイトン博士らの重要な提唱<sup>(1)</sup>が開始されている。

画期的な事は日本の第15次南極観測隊が、1974年昭和基地に近いやまと山脈で663個という前代未聞の大隕石群を発見し、次の第16次隊も11.3kgという大隕石を始め307個の隕石群を発見し、日本へ持ち返っていることである。これらの隕石は、惑星の形成過程における凝縮、沈殿、微惑星形成、微惑星衝突の四つの過程を究明するのに大きな役割を果たしてきている<sup>(2)</sup>。

惑星物理の新たな発展は、もう一つの方向からもアプローチされている。これが、本章で述べようとしている

新しいVLBIによる惑星観測である。これは、70年代に行きづまった地上からの惑星電波の観測を、再検討する方向からのアプローチと考えることができる。

60年代の天体電波観測の発展は、アンテナとアナログ電子工学の進歩が原動力であった。しかし、アナログ的処理ではデータの精度や安定度を一定水準以上に保持するのが困難であるため、精密で微細な観測には不適當であった。

70年代後半におけるデジタル技術の進歩は、高速信号の処理の信頼性を高めており、高安定原子標準の利用とあいまって、従来の測定限界を打ち破る可能性を持つVLBIシステムが出現した。VLBIによる観測は、上に述べた人工惑星による直接探査や、隕石データから得られる情報等と互いに補い合って、今後の惑星科学を進展させてゆく主導力になるであろう。

本章では、議論をマイクロ波、ミリ波による熱輻射分布の観測の問題に限定し、木星については最後節にデシメータやデカメータ波VLBIについて述べることにする。

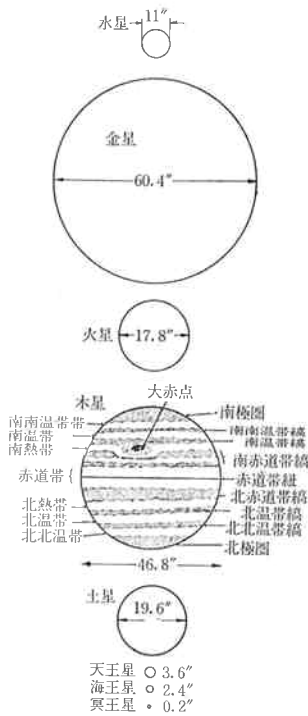
#### 2. 内惑星と外惑星

太陽系空間の全物質量のほとんど全てが、黄道面と呼ばれる太陽系平面上に集中している。黄道面上の物質の状態は、太陽からの距離によって変化している。太陽の近傍のコロナ領域では、太陽から吹き出すプラズマや水素単原子が豊富である。水星軌道から火星軌道までの内惑星領域と呼ばれるところには、岩石性感星を中心とした固体物質の割合が高い。この外側の外惑星領域では、木星から海王星に至る準恒星の惑星を中心とする中性分子ガスと、その液化状態が支配的である。内惑星は一般に、地球と同程度かそれ以下の半径をもち、比重は5前後の比較的大きな値をもつ。一方、外惑星は、半径は地球の10倍近くもあるが、比重は1.5前後で内惑星に比べ

\*鹿島支所 第三宇宙通信研究室

第1表 太陽及び惑星の諸元

		赤道半径	視直径	黒体温度
太	陽	690,000 km	31'59"	10,000 K
水	星	2,440	5~11"	400
金	星	6,056	11~60"	550~700
地	球	6,378	—	—
火	星	3,390	4~17.8"	211
木	星	71,400	32~46.8"	145
土	星	60,400	14~19.6"	106
天	王	23,700	3.6"	159
海	王	25,110	2.4"	—
冥	王	3,400	0.2"	—



第1図 最接近時における惑星の視直径

ると随分軽く、恒星である太陽と同程度である。第1表<sup>(3),(4)</sup>に、太陽と惑星の基本的な定数表と示す。

第1図は、地球から見た惑星の視直径を図示したものである。この直径は地球に最接近したときの値である。金星や木星は視直径が大きいので、地上からの観測にとって好都合である。一方、天王星より外側の三つの惑星は観測が非常に困難である。

岩石性の内惑星と準恒星的な外惑星では、電波観測によって得られる結果に大きな違いがある。内惑星の代表

として金星を、外惑星の代表として木星を例にとって比較すると、次のようになる。

金星については、1976年のパイオニア金星オービタの観測により大量のデータが得られた<sup>(5)</sup>。それによれば、金星には砂漠状の堅い地表と濃い大気層があるので、当然、大気の大循環によるグローバルな気象現象が起きていると考えられる。パイオニアの観測データは、膨大な量にのぼるが局部的、かつ一時的であるために、データの分析には幾つかの困難を伴っている。気象学のような、タイムスケールの長い現象から短い現象まで、複雑にからみあった系の解明には、継続的でグローバルなデータが必要である。したがって、パイオニアのデータの利用者は、グローバルな条件について、幾つかの仮定をする必要がある。海をもたない惑星である金星において、気象を左右する2大要素は、太陽熱と大地の表面温度である。したがって、金星地表温度分布を測定する方法があればこれを仮定する必要がなくなるので、大変有効である。

ミリ波やマイクロ波のVLBI測定をすれば、金星大地の輻射温度分布をマッピングをすることが可能である。電波を利用しているので、金星や地球の雲の影響をほとんど受けないのも、VLBI観測法の有利な点である。

金星の電波観測のもう一つの意義は、光学的観測では難しい夜側の観測ができる点である。金星は満ち欠けをしており、特に、地球に最接近する内合の時期には、地球側が夜側になるため、ほとんど観測できない。つまり、最接近という観測の好条件を生かせない。しかし、電波による表面輻射温度の観測は、太陽電波がアンテナのサイドローブに入ることを防ぐことができれば、内合の時期でも支障は起こらない。

次に、外惑星の代表として木星を考える。第4節で述べるように、木星には強いデシメータ波があるので、表面温度の測定にはマイクロ波よりもミリ波の方が良いだろう。

第1図に、木星の表面の模様を模式的に示した<sup>(6)</sup>。南北両半球ともに縞模様で区切られた五つの帯域から成っている。よく似た模様は土星にも見られるので、外惑星に共通したものと考えられる。これまでのところこの模様の原因についてはほとんどわかっていない。VLBI輻射温度マッピングをすればこの縞模様と輻射温度の関係を知ることができる。これによって、大気大循環と縞模様との関係がはつきりできる可能性がある。また、木星表面に特徴的な大赤点は、地球上の低気圧のような渦状流に近いものと考えられているが、表面温度分布を知ることによって、大赤点の謎の解明も可能になるかもしれ

ない。

このように、VLBIによって木星表面の温度分布が測定できれば、木星気象物理の発展に重要なデータを提供できることになるであろう。

また、木星等の外惑星は、質量が恒星となる基準より小さかったために、恒星になりそこねた準恒星的惑星と呼ばれている。したがって、恒星になる前の原始大気の状態を保存していると考えられる。木星気象についての理解が深まることは、恒星が核融合を起こす以前の、原始恒星大気の物理の発展にも大きな影響を及ぼすであろう。

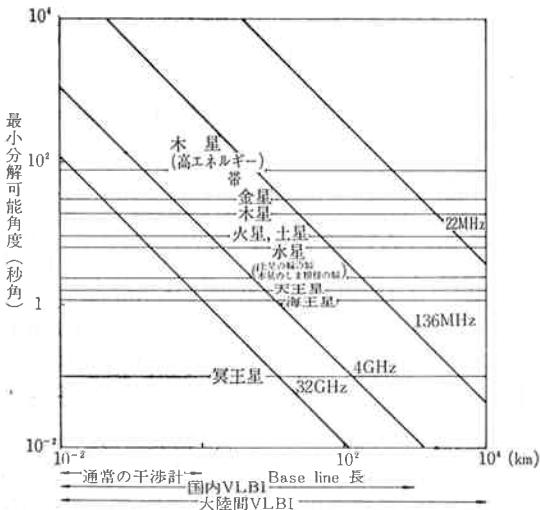
3. 惑星 VLBI における分解能

I-2. VLBIの原理のところでも詳しく述べているように、VLBIはこれまでの電波干渉計の限界を破ったものである。VLBI干渉計の分解能を決めるベースラインの長さは原理的に制限をもっていない。第2図に、鹿島でVLBIを実施できる周波数について、ベースラインの長さ $D$ 、縦軸は分解できる最小角度を示している。観測電波の波長を $\lambda$ とすると、

$$\Delta\theta \approx \frac{\lambda}{D} \text{ (radian)} \quad \dots\dots(1)$$

の関係があるので、ベースラインが長ければ長いほど $\Delta\theta$ は小さくなる。つまり、第1図は右下がりの直線となる。また、波長が長くなれば $\Delta\theta$ は大きくなるので、同図のように低周波帯ほど、右側にシフトした直線となる。

この分解可能角度は、干渉パターンが出現又は消失す



第2図 VLBIの分解能

る境界値を示している。つまり、ある干渉計について $\Delta\theta$ より大きな対象からの電波では、干渉パターンは現れない。逆に $\Delta\theta$ より小さい対象からの電波は、干渉パターンを作る。第5節の、木星からのデカメータ波のところで触れるが、Slee と Higgins (1963)<sup>(7)</sup> の観測によれば、19.7 MHz の受信周波数で 32 km のベースラインの観測でデカメータ波の干渉縞は消失しなかった。このことから、デカメータ電波源の大きさは、木星半径の3分の1を超えないことがわかった。

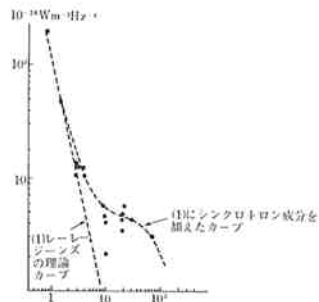
VLBIによる輻射温度マッピングでは論理が逆になる。探査したい対象の角度よりも十分小さいビームをもつベースラインによらなければ、対象を分解するマッピングは不可能である。

第2図では、本章で対象とする各惑星の視直径に対応する所に惑星名を書き込んでいる。金星や木星であれば1秒角の精度でマッピングすればよいので、4GHzの観測では10km以上のベースラインが必要となる。木星の場合には32GHzの干渉計の方が望ましいが、この場合には2km以上のベースラインが必要である。火星や土星のマッピングでは0.2秒角の精度が必要だから、4GHz帯では50km以上のベースラインが望ましい。

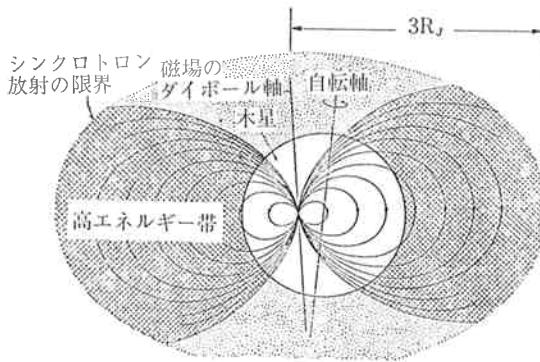
ミリ波干渉計によれば、国内VLBIでも、天王星と海王星についても原理的にはマッピングは可能であるが、受信アンテナへの輻射温度が小さいので、多くの観測時間を要する点で問題が発生する可能性がある。冥王星については、ベースライン長と観測時間の両面からみて困難であろう。

4. 木星からのデシメータ波

本章2.でも述べたとおり、マイクロ波で木星表面の輻射温度を測定すると、レーレンジーズの法則からはずれることが、1950年代末から60年代はじめにかけて明らかになってきた<sup>(8)</sup>。第3図<sup>(8)</sup>の、木星の連続輻射のスペクトルからわかるとおり、ミリ波帯からセンチメー



第3図 木星デシメータ波のスペクトラム

第4図 木星デシメータ波の発生領域<sup>(9)</sup>

タ波帯に入るとともに、レーレーゾーンの法則のカーブをはるかに上回る輻射強度になっている。Radhakrishnan と Roberts の波長 31 cm の干渉計の観測<sup>(9)</sup>によれば、このデシメータ波の発生する領域は、第4図に示すように、木星の約3倍の半径をもっていることがわかった。更に、このデシメータ波は直線偏波をしており、一定の周期で偏波面が変動していることも明らかになった。これらの事から、現在ではデシメータ波は木星磁気圏内で発生するシンクロトロン輻射であると推定されている。第3図のレーレーゾーンの分布からの差は、シンクロトロン輻射のスペクトラムとよく一致する。したがって、VLBIによる木星デシメータ波の観測は、木星の内磁気圏における active 領域の解明のための重要なデータを供給することができる。例えば、上で述べたデシメータ波の偏波面の一定周期の変動は、次節で述べるシステムⅢという自転系と一致している。この自転系は、木星内部の核部分の自転による木星双極磁場の自転と考えられている。デシメータの偏波を精密に観測すれば、木星自転軸と磁気軸のずれを決定できることになる。

木星磁気圏は木星半径よりも大きいので、3. で述べた条件よりも緩い条件でVLBI観測が可能になるだろう。

現在、地球と木星の磁気圏の比較が大きな検討項目となっているが、VLBIで木星磁気圏を様々な方向からマッピングすることは、磁気圏物理学にとって興味深いテーマになるだろう。

## 5. 木星からのデカメータ波

前節4. までに述べてきた熱輻射とシンクロトロン輻射は、いずれも連続性の電波である。しかし、木星からは30 MHz以下の短波帯でバースト状の強い電波が発生していることは1950年代後半から観測されていた<sup>(10)</sup>。

18—20 MHzの領域ではデカメータバーストとして、 $10^{-19} \text{ Wm}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$ の電力フラックスが観測される。この値は、太陽の彩層フレアの爆発による電力フラックスと同程度である。地球からみると木星の方が太陽よりも約5倍遠方であることを考慮すれば、デカメータ領域では、太陽系の中で木星が一番明るく輝いていることになる。

デカメータ波は木星の電離層で発生しているが、バーストの発生する間隔は木星の自転周期と一致しない。木星の自転速度は、赤道付近と中高緯度とで大きな差をもっている<sup>(11)</sup>。赤道付近を一带とするシステムⅠの自転周期は、9時間50分30秒であり、中高緯度のシステムⅡの周期は9時間55分40秒である。バーストの発生する周期は9時間55分29秒であり、上で述べた二つの値と明らかに異っている。この新しい周期は、前節で述べたシステムⅢという木星内核の自転周期と解釈されている。この仮説を実証するためには、バーストの発生位置を、木星表面上で正確に追跡する必要がある。ところが、3節で触れたように、デカメータ波の波長が長いために、数10 kmのベースラインでは発生位置を正確に知り得ない。この要求に応えるためには、1万 kmのベースラインを持つ大陸間VLBIを実施する必要がある。VLBIの測定では、相対位相変動の測定精度はベースライン長にほとんど依存しないので、大陸間VLBIは、国内の場合と同様に実行できる。

## 6. ま と め

これまでに述べてきたことは、将来の可能性の範囲に属する議論がほとんどである。しかし、惑星物理学の興味深い論点の幾つかをVLBIが解決できる有効性については、現実的な観点から強調してきた。特に、輻射による温度分布の測定は、対象の温度が100°Kから300°Kであるために、通常用いられている赤外線による温度測定では、非線型効果が現れて解析を困難にするのに対して、マイクロ波では、単純なレーレーゾーンの法則に従うので処理が簡単になる。惑星の表面温度の測定には、本章で述べたVLBI法が最も良い方法となるであろう。

## 参 考 文 献

- (1) 小沼直樹；“不均質太陽系の発見”，自然，pp. 71—83, Jun. 1977.
- (2) 松井孝典；“惑星の形成過程”，自然，pp. 59—71, Aug. 1977.
- (3) 理科年表；昭和50年版，天文部，pp. 2—3. 丸善株式会社。

- (4) Kraus, J. D., *Radio Astronomy*, McGraw-Hill, p. 352, 1966.
- (5) Special Issue; "Venus Exploration", *Space Sci. Rev.* **20**, No. 3~4, 1977.
- (6) 鈴木敬信, 天体観測ハンドブック, 誠文堂新光社, 1971.
- (7) Slee, O. B., and C. S. Higgins; "Long Baseline Interferometry of Jovian Radio Burst", *Nature*, **197**, pp. 781-783, 1963.
- (8) Zheleznyakov, V.V.; *Radio Emissions of the Sun and Planets*, Pergamon Press, pp. 269-271, 1970.
- (9) Radhakrishnan, V. and J. A. Roberts.; "Polarization and Angular Extent of the 960 Mc/sec Radiation from Jupiter", *Phys. Rev. Letters*, **4**, pp. 493-494, 1961.
- (10) Zheleznyakov, V.V., *Radio Emissions of the Sun and Planets*, Pergamon Press, pp. 250-269, 1970.

