月・惑星のVLBI観測実現へ向けて

花　田　英　夫
〈国立天文台水沢観測センター　〒023 岩手県水沢市星ヶ丘町 2-12〉

月面上に複数個の人工電波源を設置し，地上からの相対 VLBI で観測すれば，電波源間の距離を数センチメートルの誤差で観測することが可能である．これによって，月の物理秤動や潮汐変形を今までよりも1桁以上良い精度で観測できる可能性がある．国立天文台水沢観測センターを中心とした月面電波源開発研究グループでは，月周回衛星からの投下を想定した 2.2 GHz の発振器を開発し，VLBI 観測実現へ向けて準備を開始した．

1. はじめに

クェーサー等の天体電波源からの電波を観測すると，大陸間の距離がセンチメートルの精度で，地球の自転軸の方向が千分の1秒角以下の精度でわかる．これは，VLBI（超長基線電波干渉法）の威力を端的に示す例である．VLBI では，星からの電波を地上の二つのパラボラアンテナで同時に受信し，その到達時間差を，電波の波形の相関をとることによって正確に測定し，遠方からの，ほぼ平面とみなせる電波の波面に対する，二つの受信アンテナの幾何学的な位置関係を決めることができる．これは，星を基準として地球上の位置や方向を決めるという考え方であるが，一方，同様の手法で，地球を基準にした星の位置や運動，さらには形を決めることも可能である．VLBI については素人であるが，能力をさらに引き出せそうな VLBI を月や惑星に応用した場合に，惑星科学にどのような貢献ができるかについて考えてみることにする．

月・惑星にアンテナを向けただけでは，おそらく電波は観測できない．月・惑星の VLBI 観測を行うためには，まず人工電波源をどこかに設置しなければならない．設置する場所として，月・惑星表面，月・惑星内部，人工衛星内部，人工衛星から月・惑星表面までの空間等が考えられ，観測対象もそれに応じて変わってくる．月・惑星表面に設置した場合には，天体電波源を基準にした月・惑星の軌道運動が観測でき，表面に複数個設置した場合には，月・惑星の回転や変形が電波源間の角距離を通して観測できる．人工衛星からの電波を観測すれば，その軌道の乱れがわかり，その原因となる月・惑星の重力場が推定できる．さらに，大気のある惑星では，上空から電波源を落下させることによって，大気の運動も観測できる．

国立天文台水沢観測センターを中心としたグループ（以下，月面電波源開発研究グループ）では，VLBI による月・惑星計測の実験の最初のチャンスとして，宇宙科学研究所が 1997 年に打ち上げを予定している，月周回衛星（Lunar-A）からの投下を想定した 2.2 GHz の発振器を開発したので[1]，その経験を踏まえて，人工電波源を用いた月・惑星計測の問題点についても考えてみることにする．

2. VLBI の観測精度

VLBI の観測では，二つの観測局で，ある電波源からの信号を同時に受信し，それぞれ磁気テープに記録する．ある周波数帯域について，それらを相関処理することによって，二つの受信信号の間

の相関位相が求められる．相関位相は，二つの観測局への電波の到達時間の差(幾何学的遅延時間)と関係する量であるが，ある周波数でみた場合に，その波長の整数倍の不確定性があるので，直接，遅延時間は求められない．大気伝播遅延，時計の周波数，観測局の受信機や伝送経路での遅延等の，両局における差を無視すると，相関位相 ϕ と幾何学的遅延時間 τ との関係は，

$$\phi=2\pi(f\tau+n) \quad (1)$$

と表される．ここで，f は受信帯域の中心周波数，n は整数である[2]．波長の整数倍の不確定性を取り除くために，雑音電波を観測し，複数の周波数帯域で相関位相を求めることが一般的に行われる．この場合には，位相の周波数微分に相当する，群遅延時間という量が求められる．

しかし，(1)式で省略した大気伝播遅延は，実際には最大の誤差要因であり，この影響を取り除かないことには，精度の限界まで到達できない．そのために，相対 VLBI という方法が用いられる[3]．近接した二つの電波源を同時または交互に観測して，それぞれの相関位相の差をとる方法である．この場合には，(1)式で省略した，大気伝播遅延等の二局における差がほとんど相殺され，原理的に，幾何学的遅延時間の差の精度が，相関位相差の精度のみに規制されることになる．相対 VLBI は，(1)式で，相関位相を相関位相差，幾何学的遅延時間を幾何学的遅延時間の差に置き換えたものである．

相対 VLBI によって最終的に求められる量は，二つの電波源の間の角距離 θ であり，その誤差 $\Delta\theta$ は，幾何学的遅延時間差の誤差 σ に比例する．両者の関係は，光速度を c，地上の観測局間の距離（基線長）を L すると，

$$\Delta\theta=c\sigma/L \quad (2)$$

と表される．相関位相差を誤差 3 度で測定するのは，かなり困難であるが[4]，2.2 GHz 帯でその精度の観測を行ったとすると，幾何学的遅延時間差の誤差は約 4 ps（ピコ秒＝1 兆分の 1 秒）と推定され，12,000 km の基線長で観測した場合の角距離の誤差は約 1×10^{-10}（10 万分の 2 秒角）になる．これは，地球から約 38 万 km 離れた月を観測した場合に，月面上の 2 点間の距離を約 4 cm の誤差で測定できる精度である．この誤差は，電波源の周波数や基線長によっていくらでも変わるが，地球回転観測等に運用されている，現在の国際 VLBI 観測網を用いた場合の誤差と考えてよい．それにしても，月面上で 4 cm の誤差というのは驚異的である．うまく利用すれば何か画期的な観測ができそうである．ただし，この精度を達成するためには，二つの電波源の周波数の差，周波数の変動等に対してきびしい条件が課せられるが，それらの測定精度に及ぼす影響については，河野他[4]によって詳細に検討されている．

3. 電波源の設置

最初にも述べたように，VLBI で月・惑星を観測しようとするためには，人工の電波源をどこかに設置する必要がある．ひとことに設置といっても，月・惑星への設置は地上への設置とは訳が違い，そう簡単ではない．最低限ロケットを発射させなければならない．独自でロケットを打ち上げる設備を持たない機関では，他の機関が打ち上げるロケットに相乗りさせてもらうしか方法がない．月面電波源開発研究グループでは，宇宙科学研究所の月周回衛星(Lunar-A)計画に着目し，地震計を月面に打ち込むために開発されたペネトレータと一緒に，電波源も打ち込む可能性を検討した．当

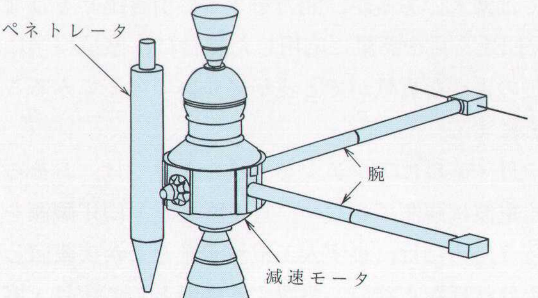

図 1　ペネトレータ・モジュールの模式図（当初案）[5]

初の案では，高度約 200 km で母船から切り離されたペネトレータ・モジュールが，姿勢を安定させるためにスピンさせながらある落下速度まで逆噴射で減速され，その後，ペネトレータ本体のみがモジュールから切り離されて月面に貫入することになっていた[5]．図 1 に示すように，ペネトレータ・モジュールは，軸となる減速モータの片側にペネトレータ本体，反対側にモーメントの釣合をとるための 2 本の腕で構成されているので[5]，腕の先端のおもりの代わりに電波源を取り付け，ペネトレータが切り離された後に，電波源を落下させることを検討した．しかし，おもりの質量は約 500 グラムであり，電池を含めて約 500 グラムの電波源を製作するというのは，かなりきびしい条件である．

当初は，ペネトレータ切り離し後の減速モータ系の姿勢の不安定さを考慮して，どの角度で切り離されても良いような球形の電波源を検討した．しかしその形状では，月面へ潜り込む深度が十分でない，したがって，温度変化が激しい，貫入時の加速度が非常に大きい，回路素子の耐衝撃性に方向性があり，どの方向に対しても耐えられるようにすることが不可能である，等の大きな問題点がある．たとえば，直径 7 cm，質量 500 g の球が 300 m/s の速度で月面に貫入した場合，最上部は約 3 cm しか潜らなく，加速度は約 50,000g(1g は約 980 cm/s^2) にも達することが予想される[6]．また，月の表面付近での，昼と夜の温度変化の振幅は，深さとともに指数関数的に減少し，表面での振幅は約 150°C にも達するが，30 cm 潜れば約 6°C にまで振幅が減少する[7]．したがって，小型で熱容量の小さい電波源が月面で生き残るためには，30 cm 近く潜らせる必要がある．

このような観点から，球形の電波源は，月面で正常に動作する確率は非常に低いと判断し，結局，ペネトレータ本体と同じようなペンシル型にすることで落ち着いた．直径 7 cm の球とほぼ同じ体積のペンシル型の容器(胴体部直径 5 cm，長さ 13 cm，先端部長さ 10 cm) が 300 m/s の速度で衝突した場合の潜り込む深さは約 50 cm，最大加速度は約 10,000g と球形の場合の約 1/5 になることが予想される[6]．ペンシル型の電波源を月面に特定の入射角で貫入させるためには，電波源をペネトレータ・モジュールから切り離す機構や切り離しのタイミングの条件がより複雑になることが予想されるが，姿勢の安定しているペネトレータ本体と同時に電波源を切り離すことで解決できる見通しがついた．しかし，その後，ロケットの推力の見直しから，月まで運べる重量がさらに制限され，ペネトレータ・モジュールの設計変更を余儀なくされた．それにともなって，電波源の搭載方法についても白紙にもどった．

このように，一般的に，月・惑星まで運べる重量にはかなりの制限があり，すでに何かの目的で計画された月・惑星ミッションに割り込むことは容易ではないことも事実である．いずれにしても，月面電波源開発研究グループでは，図 2 に示すような，月面への設置を想定した 2.2 GHz の電波源を開発した．出力は約 3 mW，本体の質量は約 200 グラム，電源投入後 100 秒間の周波数変動が 5×10^{-7}以下，−20°C から 20°C の範囲での温度変化に対する周波数変動が 2×10^{-6}/°C である[8]．宇宙科学研究所の能代ロケット実験場での砂箱への貫入実験も行い，約 14,000g の加速度にも耐えられることが確認された[8]．効率や大きさ等，さらに改良すべき点はあるが，充分に月面上の電波源として

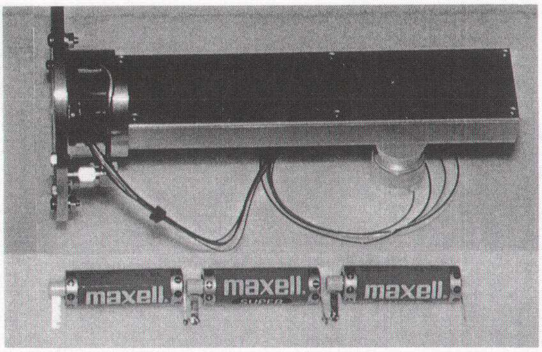

図 2　2.2GHz の月面電波源

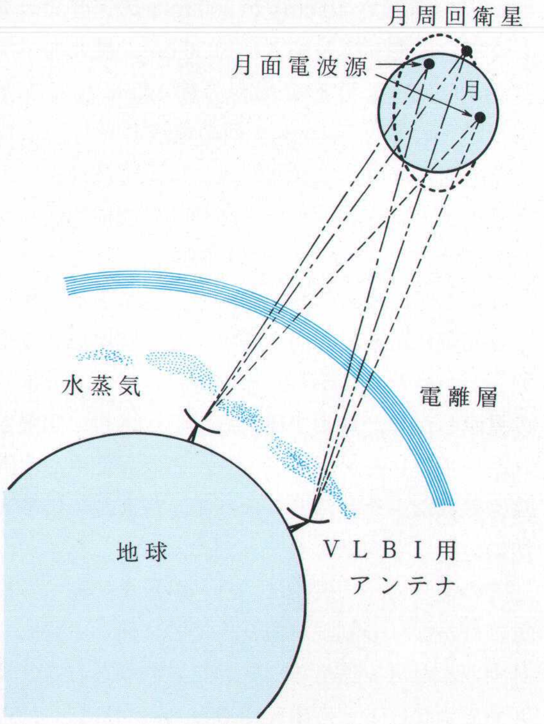

図3　月面上の電波源と月周回衛星との相対VLBI観測の概念図

使用できるものと思われる．あとは，何時，月面へ運ぶ手段を確保できるかの問題である．

月・惑星の表面に電波源を設置する上で大きな問題点は，いかに地球上と極端に異なる温度環境下で回路を正常に動作させるか，いかに電力を確保するかである．月面の場合には，50 cm程度潜らせることで，温度環境を克服できそうであるが，惑星に拡張する場合には，金星では高温，それ以外の惑星では低温に対する対策が必要である．今後の開発課題である．

4. VLBIを通して見える月・惑星の内部

ここでは，かりに，電波源を月・惑星の表面に設置できたとして，VLBIによって何が観測できるかについて考えてみる．具体例として，月面電波源開発研究グループが計画している，月面の複数の電波源と月周回衛星からの電波を観測する場合について検討してみる（図3参照）．

月面上の2点の間の角距離は，月の変形や回転運動によって変化する．したがって，その距離の変化を観測することによって潮汐変形や月の回転変動である物理秤動を捉えることができる．電波源を設置する月の緯度・経度を，ペネトレータの当初の投下予定点である，(90°, 0°)，(−5°, −35°)とすると[9]，物理秤動による電波源間の角距離の変化の最大振幅は約0.5秒角に達する[10]．これを10万分の2秒角の誤差で観測すれば，物理秤動の振幅を4から5桁の精度で決められることになる．これは，アメリカ合衆国のアポロ計画で，月面上の5個の電波源の相対VLBI観測等から決められた物理秤動の振幅[11]よりも1桁以上良い精度である．物理秤動の振幅は，月の低次の重力場の係数と，慣性モーメントの関数である．重力場の係数を別の観測から求めることができれば，物理秤動の振幅から慣性モーメントが求められる．慣性モーメントは月の内部の密度分布を反映するので，この観測によって，鉄を主成分とする中心核が存在するか否かに対する拘束条件を与えることが可能になる．これは，月の起源を推定する上で重要な要素の一つである[12]．一方，月の潮汐変形による，月面上の2点間の角距離の変化の観測から，月の弾性的性質を表すラブ数が求められる．理論的見積もりによると，月面上での距離変化に換算した振幅は約10 cmであり[13]，約4 cmの誤差のVLBI観測では不十分であるが，潮汐変形を直接検出しただけでも画期的なことである．

月面上の複数の電波源以外にも，月面上の電波源と月周回衛星との相対VLBI観測も可能である．月の重力場は，ドプラー観測による，周回衛星の視線方向の軌道の乱れから求めるのが一般的であるが，VLBI観測では，月の視線方向と直交する平面内での軌道の乱れを観測することができる．したがって，両者の併用によって，もっとも良い結果をもたらすことが期待できる．月の慣性能率に関係する重力場の2次の係数の，VLBI観測のみによる推定誤差は，C_{21}を除き約10^{-5}以下で

あり[10]，ドプラー観測と同等かそれよりも良い精度の重力場の推定が期待できる．ただし，この場合の周回衛星は，軌道傾斜角90度（極軌道）で高度200 kmの円軌道としている．

5. 将来の展望

前節で述べたように，月面上の電波源を相対VLBI観測することによって，月の慣性モーメントや低次の重力場の係数を，今までの他の手段よりも1桁以上良い精度で観測できる可能性がある．しかし，この種の観測を，そのまま惑星に拡張しようとしても，地球からの距離に比例して誤差が増大することや，同じ電力に対する，地上での電波強度が極端に小さくなる等の問題点があり，同様の成果は期待できない[14]．最も地球に近い金星や火星でさえも，月までの約百倍の距離があり，そこでの位置測定精度は数メートル程度しか期待できない．大気の運動を測定するには，この精度でも十分かもしれない．また，多数の電波源を小惑星に設置し，それらの運動を追跡するのもおもしろいかもしれない．観測方法の改良や観測対象の検討によって，まだ多くの可能性が残されている[15]．

最後に，月面電波源開発研究グループのメンバーは，阿部　誠（明星電気㈱），岩舘健三郎，大江昌嗣，亀谷　收，川口則幸，河野宣之，久慈清助，笹尾哲夫，佐藤克久，鶴田誠逸，花田英夫，原　忠徳（以上，国立天文台），藤下光身（九州東海大学），藤村彰夫，水谷　仁（宇宙科学研究所），三好　真（国立天文台），森川公夫（明星電気㈱），森本雅樹，安田　茂（以上，鹿児島大学），（あいうえお順，敬称略）である．

参 考 文 献

1）佐藤克久，久慈清助，鶴田誠逸，花田英夫，河野宣之，1992，国立天文台水沢観測センター技報，4，128
2）Thompson A. R., Moran J. M., Swenson G. W., 1986, Interferometrty and Synthesis in Radio Astronomy, (John Wiley, New York), 247
3）Counselman III C. C., Hinteregger H. F., King R. W., Shapiro I. I., 1973, Science 181, 772
4）河野宣之，藤下光身，久慈清助，花田英夫，佐藤克久，鶴田誠逸，笹尾哲夫，安田　茂，川口則幸，1992，国立天文台水沢観測センター技報，4，116
5）宇宙科学研究所，1990，月ペネトレータミッションの工学的検討，53
6）鶴田誠逸，1992，国立天文台水沢観測センター技報，4，100
7）久城育夫，武田　弘，水谷　仁，1984，月の科学，岩波書店，145-167
8）久慈清助，河野宣之，大江昌嗣，花田英夫，佐藤克久，岩舘健三郎，鶴田誠逸，原　忠徳，亀谷　收，朝木義晴，1993，'93 Dec. VLBIシンポジウム集録，161
9）藤村彰夫，1991，地震（第2輯），44，41
10）Hanada H., Ooe M., Kawaguchi N., Kawano N., Kuji S., Sasao T., Tsuruta S., Fujishita M., Morimoto M., 1993, J. Geomag.　Geoelectr. 45, 1405
11）King R.W., Counselman III C. C., Shapiro I. I., 1976, J. Geophys.　Res. 81, 6251
12）水谷　仁，藤村彰夫，河島信樹，田中　智，山田功夫，1990，第11回太陽系科学シンポジウム集録，18
13）Ooe M., Hanada H., 1992, J. Phys. Earth 40, 525
14）河野宣之，花田英夫，久慈清助，佐藤克久，朝木義晴，1993，'93 Dec. VLBIシンポジウム集録，156
15）大江昌嗣，1994，日本惑星科学会誌（遊・星・人），（印刷中）

Towards Differential VLBI Observation of the Moon and the Planets

Hideo HANADA
Mizusawa Astrogeodynamics Observatory, National Astronomical Observatory

Abstract : Differential VLBI technique can measure the variation in the angular distance between two artificial radio sources on the Moon with an accuracy of a few centimeters. Calculations show that this technique can determine the amplitude of the physical librations with an accuracy one or two orders higher than the previous studies. We have developed radio transmitters which will be put on the lunar surface by hard landing from a lunar orbiter.