

VLBIメーザ天文学の展望

三好 真

<国立天文台：VLBI天文学：023 水沢市星ヶ丘 2-12>
e-mail: miyoshi@miz.nao.ac.jp

VLBIによる天体メーザの研究は様々な技術的障害と戦いながら、星間分子雲の内部運動を捉えたり、統計視差による測距を行ってきた。最近の日本の研究グループの奮闘をからめ、紹介する。近年の計算機環境の大発展はVLBIメーザ天文学に飛躍をもたらすだろう。

VLBI（超長基線電波干渉計）

VLBIは最高の空間分解能をもつ望遠鏡である。何台かの遠く離れた電波望遠鏡で天体を同時観測、受信電波をテープに記録、あとで再生、「相関処理」する。すると電波望遠鏡群のひろがりと同じ大きさの巨大望遠鏡と等しい空間分解能が得られる。

その分解能は現在、十万分の一秒角を達成している。ちょうど地球から月面を観察し、1円玉が落ちていれば見えるくらいである。しかし同時に最低感度の望遠鏡でもある。輝度温度で数百万度以上のざらざらした天体、天体メーザやクエーサーの中心核、パルサーやラジオ星などしか見えない。VLBIは視力のいい望遠鏡を求めた電波天文学者の欲が作り出した装置である。今後「感度を！」という欲求がVLBIの高感度化を進めるはずである。

メーザ天体

VLBIの観測対象の一つ、メーザは星生成領域や晩期型星の周辺などの分子ガス中で起こる。エネルギー分布の反転した分子ガスが何天文単位にも広がっている。その巨大な空間を増幅路にして強力なメーザ電波が生み出される。水酸基(OH)、水蒸気(H₂O)、一酸化珪素(SiO)などの分子メーザが有名である。

1967年、ジム・モランは世界初のVLBIによるメーザ観測を行った。彼はこれを博士論文にしてMITに提出し、その後ハーバード大学でVLBIによるメーザ研究を進めた。VLBIで観測すると一つ一つのメーザはスポット状に見える。サイズは1天文単位くらいである。分子ガスの運動にもなってメーザ・スポットも動いてゆく。彼の研究グループは1980年代にはメーザ・スポット群の固有運動をもとに分子雲の回転や膨張運動を捉え、さらに統計視差法で分子雲の距離を求めた。特に銀河中心の分子雲 Sgr B2(N)の距離測定は従来10キロパーセクとされていた銀河中心までの距離を8.5キロパーセクへ改訂する決め手のひとつとなった。

そのような成果にもかかわらず、研究者の数はあまり増えなかった。データ解析が大変なのである。ライン観測のメリットは視線速度の情報が得られることである。そのためには分光をしながら相関処理をしなければならない。当時のMark III相関器は1記録チャンネルあたり16点の相互相関をとる設計だった。これでは8点の分光にしかない。分光能力をあげるには本来14の記録チャンネルに用意されていた遅延ラグを全て、1記録チャンネルにつなぎこみ、点数を増やす。そしてプレイバックして記録チャンネルを一つずつ処理する。14記録チャンネルすべてを使って1日観測するとその相関処理に2週間かかるわけであ

る。

その後のイメージング処理も大変である。星生成領域の水メーザの場合、数秒から数十秒角に百数十個のメーザスポットが散在している。これらの位置を1ミリ秒角以下の精度で明らかにしてゆかねばならない。1秒角の空を0.1ミリ秒角の格子で区切ると1億グリッドになる。100チャンネルに分光すれば総計100億グリッドになる。膨大な計算と巨大なハード・ディスクが必要である。今日、1ギガ・バイトのハード・ディスクはパソコン向けにもある。しかし20年前の計算機環境でこんな作業に挑戦したのだから苦労は計り知れなかった。

日本のおはこ、 一酸化珪素 (SiO) メーザ

星間分子は日本の電波天文の得意の一つである。とりわけ一酸化珪素, SiO のメーザについてはこれを青春だと思ふ研究者が何人かいる。SiO メーザは1973年に海部宣男さんらが発見した。その後、浮田信治さんは三鷹6m鏡(現在、鹿児島にある)でオリオンのSiOメーザをモニターした。理論については出口修至、井口哲雄さんらがその励起モデルを提案した^{1),2)}。また最近では泉浦秀行、中田好一さんらが銀河バルジの中に多数のSiOメーザを検出、銀河バルジの姿を明らかにしつつある³⁾。

SiOメーザはオリオンIRC2のような例外もあるが、晩期型星に特有である。ミラ型や不規則変光星、M型超巨星、OH/IR星などでは、恒星本体からの質量放出によって周囲に分子ガスが漂っている。SiOメーザはここから起こる。

最初にSiOメーザのVLBI観測に挑んだのもジム・モランである。1975年のことだった。しかし約千キロの基線ではフリンジが検出できなかった。彼はメーザ・スポットのサイズが大きいのではと考へた。そこで分解能を落として74キロというかなり小振りの基線で観測した。その結果、SiO

メーザは恒星半径の数倍程度の広がり分布しているらしいこと、他のメーザに比べてスポット・サイズが1桁大きいことなどがわかった。しかし、詳しい構造は判らなかつた。

通総研・鹿島34m鏡

日本では野辺山45m鏡の完成後、VLBI天文への動きが始まった。45m鏡による国際ミリ波VLBI実験や通信衛星を用いた宇宙空間VLBI実験をとおし森本雅樹、平林久さんらは技術をみがいていた。そこに1988年ころ、通総研(通信総合研究所)・鹿島に口径34mの電波望遠鏡が出現した。これはSiOメーザの周波数43GHzも受信可能な望遠鏡だった。通総研・鹿島は電波研と呼ばれていたころから電波天文に関わってきた。日本の電波天文発祥の地の一つと言ってよい。

通総研は測地VLBIをアメリカに対抗して研究していた。「ハワイが日本に年間8センチずつ近づいてくる」ことを測ったのは通総研・鹿島である。34m鏡の出現は鹿島を天文、測地両方の日本のVLBI発祥の地にすることになった。国立天文台と通総研・鹿島は野辺山45m鏡と鹿島34m鏡を使って、VLBI天文学の共同研究を始めたのである。基線は200キロと小振りだが世界第一位、第三位のミリ波望遠鏡を結ぶことでミリ波で世界最高感度の基線であった。鹿島のK、野辺山のNをとってKNIFE (Kashima-Nobeyama Interferometer) と呼ばれることになった。

SiOメーザ vs KNIFE

KNIFEの受信機、アンテナ整備など立ち上げの苦労話は「星の手帖」⁴⁾に以前書いた。もう苦労話はせずにすむと思っていたらそうもいかなかった。

次の問題は相関処理であった。1990年当時、日本のVLBI用の相関器は鹿島のK3相関器だけだった。私は松本欣也、亀野誠二、安田茂さんらと鹿島へ行き、空き時間をお借りして相関処理に

励んだ。土曜、日曜、祭日、盆、暮れ、正月を返上し、たびたび鹿島におじゃました。その経験は分光能力のある新しい相関器を作るきっかけとなり、川口則幸、笹尾哲夫さんらを中心に国立天文台で相関器を作ることになった。

さらに解析ソフトウェアの問題もあった。当初データ解析ソフトは小林秀行さんが整備することになっていた。ところがVSOPの仕事が忙しくなってしまう、不可能になってしまった。「それなら一人でやってやらあ」とばかり、私はソフトウェアを自作し始めた。これは小林さんが悪いのではなかった。私が悪いのでもない。共同研究の進行上で現れる障害をどう突破するかは研究を推進させる者が念頭に於くべきことである。

しかし本質的な問題はVLBIの多様な魅力にあると思う。スペースVLBI計画も魅力的だが測地VLBI観測だって面白い。メーザ観測も魅惑的ならクエーサの中心核に迫るのも楽しい。VLBI技術の開発・発展に魅せられた人もいる。交通整理は必要だが、何が一番大事であるとは決めようがない。このころVLBIの多様な魅力に引かれ、人が集まりつつあった。ところがそれぞれの異なる目標を同じ「VLBI」という言葉で表現するものだから、衝突や混乱が起こるのは当然でもあった。

結局、受信機を作りアンテナを立ち上げる作業から相関処理、データ解析、像合成ソフト製作まで全て経験することになった。スリルに満ちた大学院時代だった。

当時SiOメーザのVLBI観測を狙っていたグループは他に二つあった。一つはヨーロッパのグループであった。スウェーデンのオンサラ20m鏡、ドイツのボン100m鏡、スペインのイエベスの14m鏡の3局を用いて観測した。彼らは19個のSiOメーザ源をサーベイ観測した。そして千数百キロの基線($\lambda/D=1$ ミリ秒角)でもフリンジを検出した。これはつぶが大きいと言われてきたSiOメーザにも1天文単位くらいの小さいものが混じっていることを示すものだった。彼らはまず

そのサーベイ結果を論文にした。その後ジム・モランに協力を要請し、マッピングを試みたが、やはりSiOメーザには分解能が高すぎたのかうまくいかなかった。

もう一つはアメリカのVLBA (VLBI Array) であった。口径25mのアンテナ10台をその国土8000キロの広がり配置し、VLBIを専門に行う装置である。まだ当時は数局が立ち上がったただけであったが、アメリカ国立電波天文台のダイヤモンドはジム・モランらとともにVLBAのサブネット4局を使って試験観測していたのである。

1993年9月に京都で開催されたVLBI国際シンポジウムでは、KNIFE、VLBAともにSiOメーザの結果を披露した。その結果、観測天体は異なるものの、星の半径2~3倍以内、シェルもしくはリング状に分布すること、速度構造に大局構造が見えない点でほぼ一致していた(図1, 2)。たがいに牽制しあって深い議論はしなかったが、これは両者とも内心ほっとする結果だった。「一基線

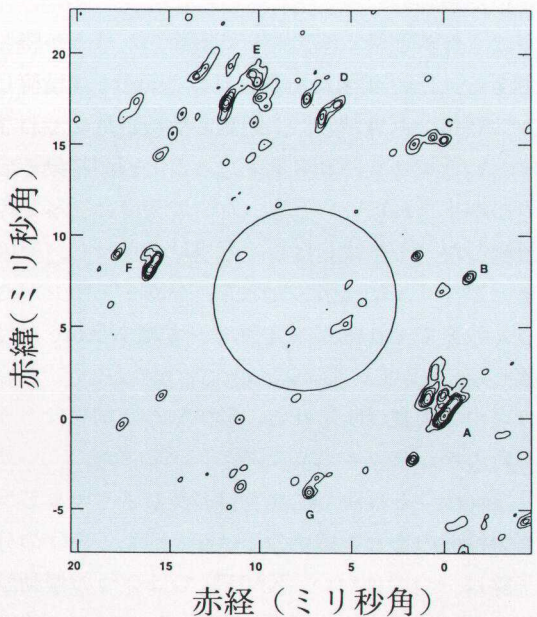


図1 VLBAによるU Her星のSiOメーザ分布
J=1-0, v=1のスペクトル線による。円は恒星本体の推定サイズ

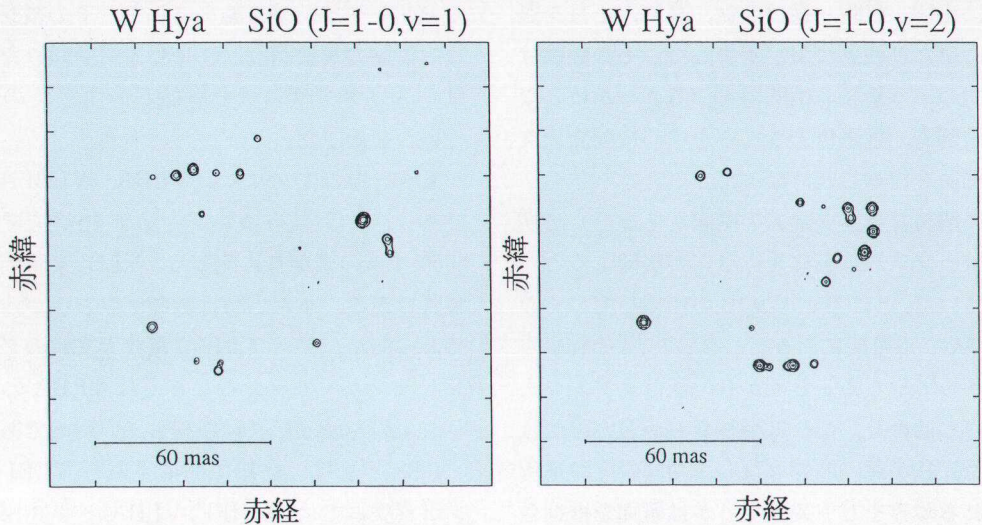


図2 KNIFEによるW Hya星のSiOメーザ分布。
 左図が $J=1-0, v=1$ 、右図が同 $v=2$ のスペクトル線。“mas”はmilli arc second（ミリ秒角）の意味。

しかない干渉計でマップなど描けるはずがない。」という声には私はいつも落胆させられていた。ダイヤモンドも似たような境遇だった。むこうではSiOメーザの速度構造がよく見えない点を疑う人がいたらしい。

こうなると早く論文として出版したほうが勝ちである。1993年末にそれぞれはNatureに投稿した。翌年、返事がきた。観測の解釈が気に入らないというレフリーコメントだった。観測結果そのものが生きればよいと思ったので素直に従って再投稿した。その後しばらく返事はなかった。そのあとアメリカに出張したとき、ジム・モランがそっと教えてくれた。「ダイヤモンドはNatureに投稿した。しかし、“もっとprettyなのがある”という理由で掲載は断られた。君のやった結果はどうしたのかね？」

“pretty”とは決して見た目の美しさやマッピングの精度のことを指すのではなかった。SiOの分子線は一つではない。KNIFEでは2つの振動励起状態 $v=1, 2$ にある回転遷移 $J=1 \rightarrow 0$ のSiOメーザを同時観測、比較した。この同時である点が“pretty”なのである。SiOメーザはスペクトル

だけ見ていても1、2ヶ月で変動する。従って異なる時期の観測では比較にならない。また43GHzの高周波VLBI観測では原子時計の調子やら大気変動で位相はすぐ乱れてしまう。もちろん較正は可能だがやりだすと際限がない。同時観測なら位相の乱れ方は共通である。較正はやはり必要だが、それが少々間違っていたとしても比較は正確にできる。 $v=1, 2$ の空間分布の比較からメーザの励起機構についてなにがしかが言えたのである⁵⁾。

一方、VLBAでは観測局数が多いためマップの精度は格段だった。が、立ち上げ途中のため旧式のレコーダしかなく、 $v=1$ のラインを観測しただけだった⁶⁾。

後日、ダイヤモンドは「KNIFEのおかげでVLBAの結果に問題がないと確信できたのだよ」と言ってくれた。しかしそれはKNIFEにとっても同じであって、おそらくダイヤモンドの結果がなければ、信用されなかったに違いない。

KNIFE vs NGC 4258 の 超高速・水メーザ

1992年5月、系外銀河 NGC 4258 の超高速・水メーザを中井直正さんが見つけた時も KNIFE は活躍することになった。超高速・水メーザは発見報告で Nature にのる成果だ^{7),8)}。が、少しでも詳しい報告をしたい。発見の報を受けた森本さんは「是非 KNIFE で観測しろ。失敗しないよう2回観測しろ」とまでいう。普通 VLBI 観測をやろうとすると、共同利用ネットワークにプロポーザルを提出するか、各国の電波天文台に個別に交渉するかしなければならない。そうすると観測内容を秘密にはできない。超高速・水メーザの発見は論文投稿まで海外には知られなくなかった。KNIFE なら通総研と国立天文台の共同研究として心配なく VLBI 観測ができる。森本さんは2回と言ったが、失敗していれば、そのときあわてることにして、1回観測することにした。

観測はうまくいった。次は相関処理である。このころ国立天文台で開発していた新型相関器は何かハードが動くまでになっていた。その運用ソフトはまだ完成していなかった。それでも亀野さんがなんとか生データを出力できるようにしてくれた。U、V などの付加情報は別途計算し、藤沢健太さんとともに新発見の高速メーザは主メーザから2パーセク以内にあることを求めた。

さらにこのとき別の発見があった。主メーザ源の構造がどうも見えているのである。メガ・メーザはそれまで大陸間基線を用いた VLBI のミリ秒角をきる分解能でも分解できないと思われていた。「200 キロ基線で分解出来るわけない」とだれも本気にしてくれなかったが、これまた大発見！とがんばった。主メーザ源は1パーセクくらいの広がりがあるらしいところまでいって、野辺山の大型計算機が夏のメンテナンスに入って休止してしまい、それ以上の解析はできなかった。この発見は間違いではなかった。NGC 4258 の超高速メ

ーザの発見に驚いたジム・モランは10年前の VLBI 観測のデータを引っ張り出し、弟子のグリーンヒルに改めて解析させた。そして主メーザ源のメーザ・スポットが視線速度の順に並んでいることを見つけた。ケプラー円盤の一部だった^{9),10),11)}。あのとき計算機が止まらなかったら、あるいは私が博士論文で忙しくなければ、ジム・モランをもう一度出し抜くことができたのである。

KNIFE から国内 VLBI ネットワークへ

KNIFE は、鹿児島6m鏡、水沢10m鏡が立ち上がって国内 VLBI ネットワークに発展した。鹿児島大の面高さん、通総研・鹿島の岩田さん、宇宙研の小林さん、国立天文台の笹尾、宮地、亀谷、川口さんらの努力によってネットワークは運営されている。

国内 VLBI ネットワークによって東北大の今井裕さんは星生成領域 W3 IRS5 の水メーザの分布が20年前にゲンツェルが示した構造とほぼ変わらない、フィラメント状の構造を持っていることを明らかにしている。鹿児島大学の望月奈々子さんはオリオン KL にあたる水メーザを見つけた。また電通大の佐藤聡子さんは系外銀河 NGC 3079 のメガ・メーザを観測、中心領域のメーザの構造が見えているが、まだ念入りの解析が必要である^{12),13),14)}。

ウルトラ・メーザ?

系外銀河にも水酸基 (OH)、水 (H₂O) のメーザが検出されている。そのうち銀河中心核に見えるメーザは太陽光度の数百倍にもなるものがある。強度に合わせてキロ・メーザ、メガ・メーザ、ギガ・メーザと分類する場合もある。こだわらず、まとめてメガ・メーザとよぶことも多い。系外メガ・メーザがすべて NGC 4258 のように中心核の回転円盤を起源にする可能性は大きい。メガ・メーザを VLBI 観測すれば活動銀河中心核について良く判ってくるだろう。また遠くのクエーサに

メガ・メーザがあれば、そこまで直接測距できるかもしれない。

しかし実はメガ・メーザはあまり見つからない。これはメガ・メーザが珍しい現象だからではなく、サーベイが不足しているせいである。水沢 10 m 鏡や鹿児島 6 鏡のような小口径だが時間が豊富にある望遠鏡でサーベイしてみようという人はいないだろうか？口径が小さいから微弱なメーザは絶対受信不可能である。だから小口径でも十分受信できるウルトラ・パワフルなメーザを求めて全天の系外銀河をどんどん調べるのである。ないかもしれない。だが発見者は大いばりでスペース VLBI, 「VSOP」で観測できよう。もしあればだが、小口径で発見できるウルトラ・メーザは口径 8 m の VSOP 衛星にうってつけの対象なのである。

銀河系を測る VERA (ベラ)

VLBI によるメーザ観測は、星生成領域や星の周囲のガス運動を調べ、活動銀河核にせまる活躍をしてきた。次のテーマは銀河の精密測量である。

メガ・メーザばかりではなくメーザは一般にサーベイが足りない。それでも現在約千個の水メーザ源、約 700 個の SiO メーザ源が検出されている。それらは銀河全域に分布している。VLBI をもってすれば、銀河全域のメーザ天体の三角視差や固有運動を測れるはずである。

これまで VLBI はクエーサなどの連続波源については群遅延を測定して 1 ミリ秒角以下の精度で位置決めをしてきた。メーザの場合、ラインなので、周波数に対する位相の傾斜である群遅延を正確に測ることができない。そのためメーザ源の三角視差や天球上での固有運動の精密測定は無理だと思われてきた。

最近、相対 VLBI を使って、参照天体との位相差からメーザ源の位置を天球上で決定できるめどがついてきた。普通の VLBI では各局アンテナは 1 台だけである。相対 VLBI ではこれを 2 台にす

る。見かけの近接する参照天体と目標天体をそれぞれが観測する。その位相差を使えば、大気等の位相の乱れも消去され、2 天体間の位置の差が正確に求まる。これも“pretty”な方法と言えよう。国立天文台は世界初の相対 VLBI ネットワーク、「VERA (VLBI Exploration of Radio Astrometry)」を「すばる」の次計画として推進している。

KNIFE のデータ解析には大型計算機を酷使しました。それを結局、最後まで許してくださった野辺山計算機運用グループ、とりわけ森田さん、さらには富士通の皆さま方にはお詫びと感謝をこの場を借りて述べさせていただきます。有り難うございました。

参 考 文 献

- 1) 「電波望遠鏡をつくる」海部宣男・大月書店
- 2) 地人選書 15 「星間分子物語」出口修至・地人書館
- 3) 天文月報 vol 88, 1995 年 10 月号 p 399-404
- 4) 星の手帖 vol 53, 1991 年夏号 p 104-106
- 5) Miyoshi M. et al. 1994 Nature, 371, 395-397
- 6) Diamond P. et al. 1994 Ap. J., 430, L61-L64
- 7) Nakai et al. 1993 Nature, 360, 45-47
- 8) 天文月報 vol 86, 1993 年 5 月号 p 211-212
- 9) 天文月報 vol 88, 1995 年 7 月号 p 285-290
- 10) Greenhill L. et al. 1995 Ap. J., 440, 619-627
- 11) Miyoshi M. et al. 1995 Nature, 373, 127-129
- 12) 今井裕, 東北大 修士論文 in preparation
- 13) 望月奈々子 鹿児島大 修士論文 in preparation
- 14) 佐藤聡子 電通大 修士論文 in preparation

Development of VLBI maser astronomy

Makoto MIYOSHI

National Astronomical Observatory

Research of astrophysical masers using VLBI has revealed internal motions of interstellar clouds while fighting against various technological difficulties. Here I show its history, including recent struggle of Japanese VLBI group. Recent great development of computer environments shall bring about a leap for VLBI maser astronomy.