



VLBI, ただいま稼働中

宇宙からの電波で大陸間の距離をはかる

宇宙の果てから強い電波を放つクェーサー。このクェーサーからの電波を遠くはなれた2点で同時観測し、大陸間の距離などを精密に測定するのがVLBI(超長基線電波干渉計)である。郵政省電波研究所は鹿島支所にある直径26メートルのパラボラアンテナをVLBIとして使いプレート・テクトニクス理論を確かめたり長期的な地震予知や火山の噴火予知などにも役立てようと観測をつづけている。

木村 繁

郵政省電波研究所鹿島支所にある直径26メートルのパラボラアンテナを下からながめる。このパラボラアンテナもVLBI(超長基線電波干渉計)として使い、日本列島と北アメリカ大陸やハワイとの距離を測定する。

雄大な鹿島灘を見下ろす台地に、巨大なおわん型アンテナ（パラボラアンテナ）がいくつも立ち並んでいる。茨城県鹿島郡にある郵政省電波研究所の鹿島支所である。そもそも鹿島支所は、1964年の東京オリンピック大会を通信衛星を使ってアメリカに中継するためのために建設された。しかし今では通信の実験だけでなく、長期的な地震予知の研究などにもたいせつな役目を果たすようになってきた。

「世界の各地と連絡をとりながら、大陸移動のようすを精密に測定するのです。ハワイのカウアイ島は1年に約7センチメートルの速さで、日本の方に移動していることなどが、これまでの観測で確認できました」と、電波研究所電波応用部の高橋富士信さんは誇らしげにいう。

キューサーにアンテナを向ける。

鹿島支所が開設されたのは1963年のことである。まわりは砂丘と松林で、人家もまばらな静かなところだった。それから20年以上たつうちに、鹿島支所のまわりは鹿島臨海工業地帯として急速に発展していった。このため現在の鹿島支所は、製鉄所や工場の煙突、研究所などに囲まれている。

しかし研究者たちは、そんな周囲のことは少しも気にしていない。彼らの関心は地球から何億光年も何十億光年もはなれた星に集中している。研究者たちは「キューサー」とよばれる天体の方向にしばしばパラボラアンテナを向ける。そのとき同時にアメリカやヨーロッパなどの研究者たちも、パラボラアンテナを同じキューサーに向けているのである。

キューサーは日本では「準星」とよばれている。1960年代に発見されたときには、恒星なのか、星の集団である銀河なのか、よくわからなかった。そこで「恒星に準ずる天体」という意味で準星とよばれた。キューサーは強力な電波を放射する特徴を持っている。鹿島支所の研究者にとっては、キューサーがたえず出しつづけている電波が重要になってくる。

このキューサーからの電波を、たとえば日本とアメリカ、日本と中国といった二つ以上の地点で観測すれば、それぞれの地点の間の距離を

精密に知ることができる。

電波は1秒間に30万キロメートルの速さで空間を飛ぶ。もちろんキューサーからの電波も、同じ速さで宇宙空間を飛んでいる。電波が鹿島支所のパラボラアンテナに届く時刻と、アメリカのロサンゼルス郊外、モハーベ砂漠の中にあるパラボラアンテナに届く時刻は、ほんのわずかだがちがう。電波の到達時間の差を精密にはかり、それをもとに計算すれば鹿島からモハーベ砂漠までの距離がわかる。実際に測定してみたところ、その距離は8091.82411キロメートルと出た。

電波天文学者が開発したVLBI

「われわれが使っているVLBIの技術は、もともとは電波天文学の専門家たちが天体の観測をするために開発した技術です。この技術を利用して、2点間の距離を精密にはかるのです」と、鹿島支所第三宇宙通信研究室長の川口剛幸さんはいった。

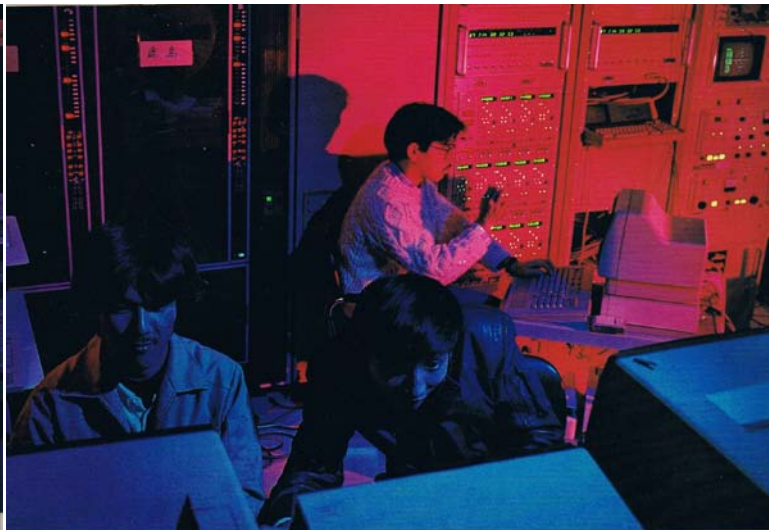
VLBIというのは、英語のVery Long Baseline Interferometerの頭文字をとってつくった略語で



同じキューサーからの電波を、鹿島支所と同時観測するアメリカのフェアバンクスやハワイ諸島のカウアイ島でも、観測結果を磁気テープに記録する。このテープを鹿島支所まで運び、コンピューターにより相関処理する。



「K-3」とよばれる処理システムにより相関処理されたテープも、さらにコンピューターにかけて分析する。その結果、大陸間の距離がセンチメートル単位まで精密に計算される。



鹿島支所のVLBI観測の心臓部分。ここではキューサーにパラボラアンテナを向けたり、電波の受信データを磁気テープに記録することなどが、コンピューターにより自動的に行われている。

ある。これを日本語に訳すと「超長基線電波干渉計」となる。

恒星や惑星、銀河などを調べるには、昔から星の光をみる光学望遠鏡が使われた。しかし1930年代からは星が放つ電波を調べる天文学がさかんになった。そのための観測機器が電波望遠鏡であり、普通はパラボラアンテナが使われた。星の形や内部の構造を細かく知りたいと思うと、パラボラアンテナの直径を大きくしなければならぬ。しかしそれには限界があった。

そこで考えられたのが電波干渉計だった。池の水面の波と同じように、電波は波の形が伝わると考えてよい。その電波が二つ重なり合うとき、つまり山と山とが重なり合うときはひときわ高い山になり、逆に山と谷が重なり合うと平らになる。このように電波が重なり合うことを「干渉」という。この現象を利用して、遠い宇宙の見や銀河からやってくる電波の正体を調べようというのが電波干渉計である。

星や銀河からの電波を二つの地点で同時に観測し、たがいに重なり合う電波を選びだして、その電波のく方向などを分析する。その結果、

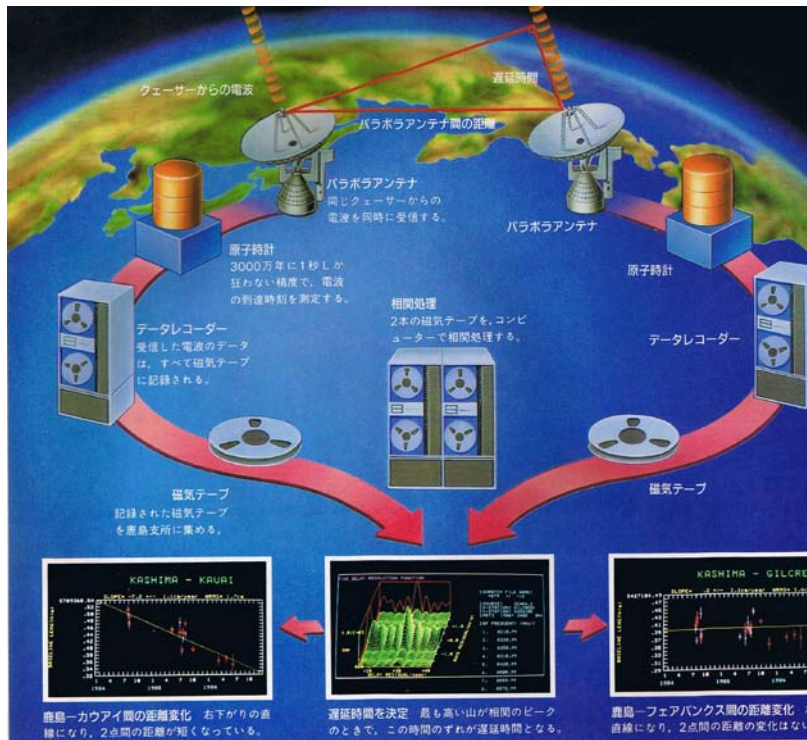
星や銀河の正体が明らかになるというわけだ。

電波干渉計が置かれた2点間の距離が遠くはなれていなければならないほど、観測の分解能は高くなる。これは光学望遠鏡の口径が大きいほど、より遠い星や銀河がよくみえるのと似ている。電波干渉計の場合は、2点間の距離が光学望遠鏡の口径に相当する。鹿島とモハーベ砂漠とに電波干渉計の両局があったとすると、この2点間の距離は、8091キロメートル強である。つまりこの電波干渉計の口径は8091キロメートルということになる。このように二つの電波干渉計の置いてある2点間の距離が非常に長いとき、それを超長基線電波干渉計というのである。

2点間の距離測定にも応用される。

天文学者たちはVLBIを使って、電波を出すキューサーやほかの銀河など、宇宙のかなたにある天体の研究を進めた。しかし地球科学者たちはまるで逆の方向に目を向けた。

「はるかかなたのキューサーから出た電波は、地球からみると1点から出ているようにみえる。とすれば、その電波を地球上の2点で観測して



計算すれば、2点間の距離などを正確に知ることができるはずだ」と、地球科学者たちは考えた。星の位置を調べるために天文学者たちが開発した技術で、地球科学者たちは地上の距離測定のために役立てようと考えたのである。

地上の2点間の距離を調べるには、普通は三角測量法が使われる。地面の上に大きな三角形をえがき、幾何学の定理にしたがって、1辺の長さを測りだす方法である。

地図をつくるときにはこの三角測量法を利用する。そのために使われる測定の基準点が「三角点」である。だれでも知っているように、日

本各地にも数多くの三角点がある。しかし三角測量法には欠点がある。日本とアメリカの間の距離や、アメリカとイギリスの間の距離などををはかるときには、おいそれとは使えない。二つの大陸の間には太平洋や大西洋のような大きな海がある。海の途中に数多くの三角点を置くわけにはいかないからだ。

そこで地球上に三角形の底辺を置き、宇宙に三角形の頂点を置くことが考えられた。三角形を空間に立てて、測量に使おうというのである。その三角形の頂点としては、「測地衛星」とよばれる人工衛星が利用された。この方法を使って、

電波研究所が開発した水素メーザー原子時計の内部。水素分子は原子になるとき振動する。水素メーザー原子時計はこの水素原子の振動数を利用したものである。

2点間の距離を測定するVLBI

VLBIを使って2点間の距離を測定する場合、まずはじめに測地衛星の位置を観測して、三角形をえがき、距離を計算したのである。すると、これまでの地図にのっていた位置にくらべて、実際の島は西に1.5キロメートルずれていた。



太平洋上の島々の位置が測定された。島と日本の本土の1点とで同時に測地衛星のみえる方向を観測して、三角形をえがき、距離を計算したのである。すると、これまでの地図にのっていた位置にくらべて、実際の島は西に1.5キロメートルずれていた。

プレートの移動を実測するために

このように測地衛星を使えば、遠くはなれた二つの地点の間の距離をかなり正確に知ることができる。しかしその結果出てくる数字は10メートルの単位ではかれる程度のもので、何センチメートルといった細かい単位まで測定することはできなかった。

ところが地球科学者たちは日本とハワイの間とか、日本とアメリカ大陸の間などの距離をセンチメートル単位で知りたいと思うようになった。地学の分野では、1960年代になってから「プレート・テクトニクス」という新しい理論がさかんにいわれるようになってきたからだ。

プレート・テクトニクスの理論によると、地球の表面は何枚かの大きな岩盤に分かれていて、それぞれの岩盤はゆっくりと移動している。たがいにぶつかり合ったり、一つの岩盤の下にもう一つの岩盤がもぐりこんだりしている、というのである。

たとえば日本列島はユーラシアプレートとよばれる岩盤の東の端に位置していると考えられていた。しかし最近では「日本列島の北部はユ

ラシアプレートではなく、北アメリカプレートの上に乗っている」という説も出てきた。ユーラシアプレートと太平洋プレートとの間にはフィリピン海プレートがはさまれているとされている。日本の近くでは四つものプレートが複雑にかみ合っている。このため日本では地震や火山の噴火に見舞われることが多いのだという。

このプレート・テクトニクスの理論が正しいとすると、確かに地学のいろいろな現象がすつきりと理解できる。しかしプレートはほんとうにじわじわとたえず移動しているのだろうか。それとも地震などの地殻変動がおこったとき、一度に移動するのだろうか。もしじわじわと移動するとしたら、年々の移動距離は一定しているのだろうか。それとも年によって移動の速度にむらがあるのだろうか。

これらの疑問を解明するには、2点間の距離をセンチメートル単位で測量する必要がある。そのために地球科学者たちはVLBIに目を付けたのである。VLBIを利用すれば、何千キロメートルもはなれた地点の距離をセンチメートル単位ではかることができそうに思われた。

VLBIを地学に応用することを最初に思いついたのはアメリカ、マサチューセッツ工科大学のアーウィン・シャピロとアラン・ロジャース、NASA(アメリカ航空宇宙局)のゴダード宇宙飛行センターの科学者たちだった。彼らのアイデアにもとづいて1977年アメリカ測地調査局は、地球回転運動を専門とするVLBIを3か所に建設する計画を立てた。それはボラス計画(電波干渉測量による地球回転運動解析計画)とよばれた。

VLBIの処理システム「K-3」

日本の電波研究所がこのVLBIの技術に着目したのは、アメリカの科学者たちと大差のない時期だった。

電波研究所は1977年1月28日から2月4日にかけて、鹿島支所の直径26メートルのパラボラアンテナと、当時の電電公社横須賀電気通信研究所の直径12.8メートルのパラボラアンテナを使ってVLBI実験を行った。基線の長さは約120キロメートルにすぎなかったが、初期の実験



としては十分な距離だった。

この実験では「ATS-1」というアメリカの人工衛星が出す電波と、「3C273B」というクェーサーの電波を利用した。このときに試作された処理システムは「K-1」とよばれ、今も記念碑的な装置として鹿島支所に保存されている。

つづいてK-1システムを改良した「K-2」システムが開発された。今度は鹿島支所の26メートルパラボラアンテナと、茨城県那珂湊市にある電波研究所平磯支所の直径10メートルのパラボラアンテナを使って実験が行われた。基線の長さは約47キロメートルだった。

そのあと登場したのが、本格的な「K-3」システムだった。このシステムでたいせつな役割を果たすのが原子時計である。それぞれのVLBIには、クェーサーなどの電波が到達した時刻を正確にはかることができれば、2点間の距離を正確に算出することはできない。

幸いなことに電波研究所は、原子時計の研究を長年つづけてきた日本で数少ない研究所の一つだった。同研究所は蓄積した技術を駆使して、3000万年に1秒しか狂わない精度の「水素レーザー原子時計」をつくった。

VLBIにとってもう一つたいせつなことは、A地点とB地点の2点で受信した電波を重ね合わせて、電波の到達した時刻にどれだけのずれがあるかを知ることである。

実際の方法としては、2点で受信した電波をデジタル化して、それぞれ0と1の二つの数字で表現する。デジタル化された二つの電波をくらべ、0と1の数列のぴったり合ったところをさがします。その際どれだけずれたかが、電波到達の遅れに相当する。このような処理を自動的に行うのがK-3システムなのである。

世界各国と共同観測が行われる。

「K-3システムを最初に使った国際共同観測は、1983年11月5日に行われました。あの日の緊張は、今も忘れることができません」と、高橋さんはいう。その日、高橋さんや川口さんたちは午前4時におきて準備をはじめた。同時観測を行ったのはモハーベ砂漠にある観測所と、同じカリフォルニア州のオーエズバレーにあ



る観測所だった。

午前5時にはこじし座のクェーサー「4C39.25」の電波が受信された。受信の記録はデータレコーダーにおさめられた。テープは1秒間に3.43メートルという超高速でまわり、12分間の観測が終わるまでには2.5キロメートルもの長さのテープが使われた。

アメリカで記録されたテープは、2週間後に鹿島支所に届いた。そのテープと鹿島支所のテープとを装置にかけて比較したら、同じ電波をわずかな時間差で受信していたことがわかった。

1984年からは本格的な観測がはじまった。モハーベだけでなく、アラスカ州のフェアバンクス、ハワイのカウアイ島、中国の上海、中部太平洋のクェゼリン島などの共同観測も行われている。

カウアイ島との共同観測は、1984年と1985年

鹿島支所のVLBIの全景。VLBIでの観測は1日(24時間連続)の測定が単位となる。観測には約15の星を使って測定する。もちろん相手のVLBI局と打ち合わせて、同じ星を同じ時刻に観測する。



パラボラアンテナをクェーサーの方向に向けるときは、コンピュータを使って自動的に行われる。しかしパラボラアンテナの補修をするときは、手で動かすという。



鹿島支所でVLBI観測を担当する研究者たちのミーティング。この場で世界各国とのVLBI共同観測の計画が討議されたり、観測結果の報告が行われる。



に8回も行われた。その結果カウアイ島が北西の方向に、1年に7センチメートルも移動していることがわかった。クェゼリン島も日本へ1年に9センチメートルの割合で近づきつつあった。しかしモハーベは動いていなかった。この結果はどういうことを意味するのだろうか。

「鹿島支所は北アメリカプレートに乗っているのかもしれませんが、もしそうだとすればアメリカの観測地点と鹿島支所とは、同じ岩盤の上にある、いっしょに移動していることになります。それなら距離が変わることはありません。しかしまだ結論が出たわけではないのです。鹿島支所のあたりがユーラシアプレートの上にあるか、北アメリカプレートの上にあるかは、これからの観測結果ではっきりするでしょう」と、川口さんはいう。

地震の予知などにも利用が可能

VLBIによる距離の精密測定は、国際間の超長距離だけに応用されるわけではない。国内の短い距離も、これまでの三角測量法より簡単でより正確に測定することができる。

茨城県筑波研究学園都市にある建設省国土地理院は電波研究所と協力して、運搬可能なVLBI用アンテナを開発した。それは直径5メートルのパラボラアンテナを使うもので、まず筑波一鹿島間54キロメートルの測定を行った。そのあとアンテナを宮崎県に運んで、鹿島の距離測定を行った。どちらの場合も数センチメートルの誤差で正確な距離を算定することができた。現在はさらに3メートルという小さなパラボラアンテナの開発にも成功している。

このような距離の精密測定によって、国土の収縮や延長のようすがわかれば、地盤のひずみが推定できる。プレート・テクトニクスによると、地震はプレートに蓄積されたひずみが解放されるときにおこるといふ。VLBIによる測定の結果は、地盤のひずみの大きさを推定するのに、大いに役立つと期待されている。

VLBIは太平洋の海底のプレートの移動や、国土のひずみなどを科学者たちに知らせる有力な手段である。近い将来、長期的な地震予知や噴火予知などにも役立つられるだろう。