

V-12. 測地測量及び地殻変動測定への応用

北郷 俊郎*

VLBI APPLICATIONS TO GEODETIC MEASUREMENT AND CRUSTAL DEFORMATION MONITORING

By

Shunro HOKUGOH

1. はじめに

1970年代の初頭から、地球力学解明のため、VLBI技術応用の機運は、大きく上昇してきた。これはVLBIが、汎地球的な運動と、もっと小さな地域的ないし局地的な規模での相対地殻運動——位置決定の反復によって——とを、所要の精度で計測できる能力を示してきたためである。

汎地球規模の運動、例えば、極運動、自転速度、自転軸の方向、地球潮汐などが、若し数cm相当の精度で測れば、これから、核とマントルとの結合、慣性テンソル、地球弾性等の多くの地球物理学的性質についての情報が得られる。同様に相対地殻運動を知ることは、地殻の運動に関する理論モデルの発展に極めて重要である。とりわけ、プレート・テクトニクスの研究には、100 kmの規模から1万kmに至る遠隔地点同士の相対運動を、地球上の各地で広く測ることがぜひ必要である。プレートの平均相対運動は、長期平均としては3~15 cm/yrであると信じられているが、直接的検証はVLBIにまたねばならず、短期間、例えば数日~数年での運動の構成は全く知られていない。

更に、地震発生機構として最近有力とされるダイラタンシー・モデルに伴うような、局地的な地殻運動を効率的に測れるようになれば¹⁾地震メカニズムの理解に貢献することが可能であろう。

2. 諸量の算出

VLBIで得られる観測量の一つは、相互相関スペクトルの位相を角周波数 ω で偏微分したものに当たる遅延時間 τ で、

$$\tau = \tau_e + \frac{1}{c} \mathbf{D} \cdot \mathbf{S}. \quad \dots(1)$$

ここで $\omega = 2\pi\nu$ (ν 観測周波数) τ_e ; VLBI両端点の時刻同期誤差 \mathbf{D} ; 基線のベクトル, \mathbf{S} ; 電波源方向の単位ベクトル。(ただし、(1)式では、光行差、伝搬媒質による遅れのような、実際のデータ処理では、必要な多くの影響の議論は十分モデル化したものとしている。また、一方のアンテナに電波が到達してから、他方と同じ波面が達するまでの間に基線が地球自転によって回転する影響も考えていない。)普通の天文座標を使って書くと(1)式は、

$$\tau = \tau_e + \frac{D}{c} [\sin \delta_B \cdot \sin \delta_S + \cos \delta_B \cdot \cos \delta_S \cdot \cos (H_S - H_B)] \quad \dots(2)$$

となる。ここで第2項は一般に τ_g と表される。

もう一つの観測量は、フリッジ周波数でこれは、同様に、

$$f_R = \omega \frac{d\tau_e}{dt} - \frac{\omega D_E \cdot \Omega}{c} \cdot \cos \delta_S \cdot \sin (H_S - H_B) \quad \dots(3)$$

である。ただし、 D ; 基線長 $\delta_S, \delta_B, H_S, H_B$ は、それぞれ電波源と基線ベクトルの赤緯、時角である。 Ω は地球の回転角速度、 D_E は基線の赤道面成分又は、 $D_E = D \cdot \cos \delta_B$ である。

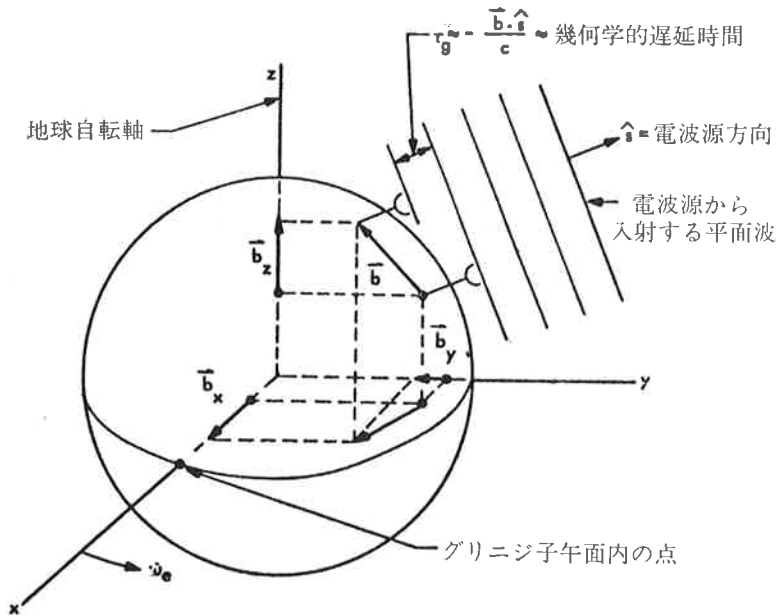
実際の場合に、ある電波源を、ある時間にわたって観測したとする。両端点で用いている時計の同期誤差を仮に簡単に A_1, A_2 なる2個のパラメータで表せるとする。すなわち、

$$\tau_e = A_1 + A_2 \cdot t \quad \dots(4)$$

と書けるとすると、(2)の遅延時間は、次のように表される。

$$\tau = C_1 + A_2 t + C_2 \cdot \cos (\Omega t - \Psi). \quad \dots(5)$$

*国土地理院



第1図 VLBI 実験における幾何学的関係

ここで、

$$\begin{cases} C_1 = A_1 + D \cdot \sin \delta_B \cdot \sin \delta_S / c \\ C_2 = D \cdot \cos \delta_B \cdot \cos \delta_S / c \\ \Psi = \alpha_S + H_B. \end{cases}$$

観測データから、(5)を満たすように、4個の常数 C_1 , A_2 , C_2 , Ψ を求めることができる。しかし、未知数はこの場合7個あり、それらは時計の誤差のパラメータ2、基線ベクトルの成分3及び電波源の座標(方向)2である。そこで、更に2個の別の電波源を観測すると、その座標の4個が増えて計11個の未知数になる。しかし、1電波源ごとに(5)式での新しい常数が3個ずつ増えるので、計10個のパラメータを取り出すことができ、赤経の原点である分点位置が任意に決められることから、結局、電波源と基線の座標と、時計のパラメータとが唯一に決まることになる。最後に述べた条件は、例えば経度の零を電波星の平均位置で決めるといった任意性であって、これは τ の理論的表現の中には Ψ のように、電波源と観測点との経度の差の形でしか入ってこないことに由来する条件である。観測電波源の数を増やすことによって、時計の誤差や、その他のものを表現するパラメータを増やして、最小自乗法による最確値を求めることができる。

一方のフリンジ周波数 f_R の使い方には大きい制約がある。データの形は、

$$f_R = A_2 \omega + F_0 \sin(\Omega t - \Psi), \quad \dots\dots(6)$$

ここで $F_0 = -\omega \cdot D_E \Omega \cdot \cos \delta_S / c$.

(6)は、フリンジ周波数が D_E にのみ効くので、干渉

計基線の極方向成分は求められないことを示している。次に、(3)式を偏微分して知れるように、フリンジ周波数の電波源の赤緯誤差へのかかわり方が、 $\sin \delta_S$ に比例することから低赤緯星では、赤緯決定精度が低下することがわかる。また、(6)式の常数項の形から見られるように、基線と電波源位置とは、同時にユニークに決めることはできない。

3. 実験観測例

米国では、大陸間、北米大陸でのVLBI実験を経て、MacDoranらの提唱したARIES計画の発展としてのPPME(太平洋プレート運動測定実験)計画及び惑星空間探査サポートを考慮した極運動、UT1変化測定の計画の実験段階を迎えている。以下では、米国での測定実例をたどりながら、地表位置の純粋に幾何学的な精密計測手段としてのVLBIを、我が国の測地その他に用いるにはどうしたらよいかを探ってみたい。

1972年から1973年にかけてHaystack(37mφ)とGoldstone(64mφ)間3900kmの北米大陸を横断する基線長で、実験観測が行われ⁽²⁾、見事な結果を得た。この実験では、中心周波数7.85GHz、バンド幅合成によって全バンド幅としては、23MHz、最終の実験では46MHzを用いている。周波数標準としては双方とも水素メーザを使用している。遅延時間とフリンジ周波数の誤差は、3f.u.以上の電波源に対してそれぞれ0.15ns、0.1psec/secであった。これから基線ベクトルの成分、星

基 線

U.T.1

極運動の X 成分

観測日時	Length (m)	Hour angle (hr × 10 ⁴)	Declination (deg × 10 ⁵)	USNO-VLBI (msec)	BIH-VLBI (msec)	BIH-VLBI (m)
14 Apr. 1972	3,899,998.51 ± 0.22	7,051,413.6 ± 0.3	-914,473.4 ± 1.8	10.7	1.1 ± 0.8	2.2 ± 0.3
9 May. 1972	3,899,997.61 ± 0.76	7,051,414.6 ± 2.8	-914,487.1 ± 5.2	7.7	-3.2 ± 1.2	-1.6 ± 0.6
29 May. 1972	3,899,998.64 ± 0.33	7,051,415.4 ± 0.8	-914,483.0 ± 1.4	3.6	-4.9 ± 0.8	-1.2 ± 0.3
4 June. 1972	3,899,998.60 ± 0.45	7,051,413.7 ± 1.1	-914,482.8 ± 2.2	5.5	-1.6 ± 1.3	-2.0 ± 0.5
17 June. 1972	3,899,998.56 ± 0.28	7,051,412.1 ± 0.7	-914,477.8 ± 1.4	-4.9	-10.1 ± 4.8	-4.4 ± 1.5
29 Aug. 1972	3,899,998.77 ± 0.09	7,051,415.9 ± 0.3	-914,481.6 ± 0.6			
9 Nov. 1972	3,899,998.99 ± 0.15	7,051,415.5 ± 0.4	-914,482.1 ± 1.1	2.2	-1.5 ± 0.8	0.3 ± 0.2
4 Feb. 1973	3,899,998.83 ± 0.10	7,051,413.7 ± 0.4	-914,481.6 ± 0.4	6.3	0.4 ± 0.8	0.6 ± 0.2
30 Mar. 1973	3,899,998.99 ± 0.11	7,051,416.1 ± 0.3	-914,484.7 ± 0.5	3.2	-6.4 ± 0.6	-1.8 ± 0.2
平均値 ± r. m. s.	3,899,998.82 ± 0.16	7,051,414.9 ± 1.2	-914,482.2 ± 2.0	5.1 ± 2.9	-2.8 ± 2.9	-0.2 ± 1.3
測量による値-VLBI	-1.60	18.0 (m)	4.4 (m)			

第1表 3900Km VLBI 実験の結果

の方向、時計の時刻とレートとの両点の差を、2項表示で表した係数、各点の、天頂方向での大気による行路差を求めた。その結果は、第1表に示されるようで、基線長は、平均値に対して r. m. s. で 20 cm 以下のばらつきに収まっており、特に、幾つかの改良を施した後の実験による終わりの4成果では、12 cm までに低下している。Haystack からみた、方位角については、表に時角と緯度成分に分けて書かれているが、最小単位は、それぞれ約 1 m、と 0.7 m にこの場合対応しており、やや、決まり方が悪くなる傾向が見られる。

U.T.1 の変化と極運動について、在来の光学天文的に求めた値 (B.I.H.) との差は r. m. s. で、それぞれ 2.9 ms, 1.3 m を得ている。

一方、基線について在来の測地測量の値との比較は、長さでは -1.6 m、時角、緯度では、それぞれ 18 m, 4.4 m を示すが、これは、米国測地座標系が C I O (慣用国際極原点) 対してもつ方位のずれ、ジオイド面の決まり方 (ジオイドの決まり方として現在 5~10 m の不確かさを考えても不思議ではないであろう)、長さについてのスケールの相違を考えなければ説明のできない量であるが、決して驚くほどの喰い違いとはいえない。

このような、極めて長いスパンでの計測を行うと同時に、はるかに短い基線長で、VLBI のシステム校正と精度確定を目標とした観測も行われてきた。例えば、JPL グループによる 16 km, 307 m, MIT グループによる 1.2 km の観測がそれである。

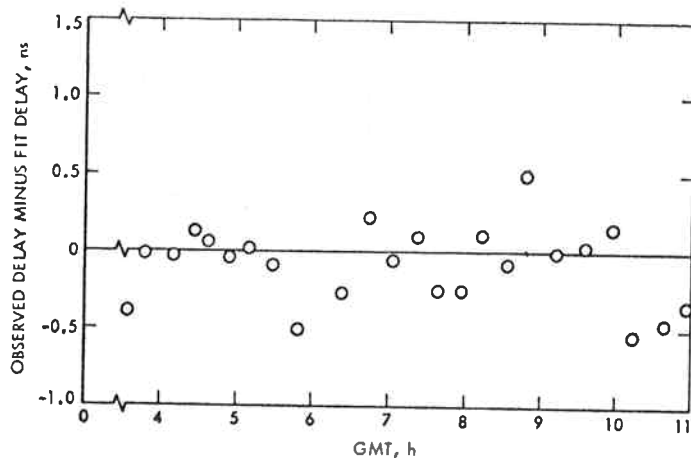
16 km の観測は Goldstone の 26 mφ, 64 mφ の間で 1971 Jan. ~ 1972 Oct. にわたって行われ¹⁰⁾、Sバンド (波長 13 cm) で、2チャンネルで合成バンド幅 40 MHz を得ている。こうした短い基線長では、伝搬媒質による遅延についての校正を除いて、デジタル記録、バンド幅

合成のハード、ソフト、両局の発振器等についての各種テストが行える。一般に基線の測定の場合には、(1)電波源から、両アンテナへの行路に沿う伝搬媒質による遅延がほとんど打ち消しあって、誤差源としては大幅に小さくなり、(2)遅延時間に及ぼす電波源の位置の誤差の効きが小さくなるから、別途独立に決定した位置を既知量として扱えるため、遠距離計測の場合のように、星位置パラメータが他の誤差を取り込んでマスクすることがない。ちなみに、遅延時間を星の位置について偏微分したもののこの 16 km 実験での典型的な数字としては 0.1 ns / 1" であり、電波源の位置誤差を多めに 0."5 と見ても 0.05 ns (~1.5 cm) の寄与にしかならない。(3)地球の空間に対する方向についても、(2)と同様な議論が成立し、極運動 U.T.1 について B. I. H. の決定精度を 0."03 と見込むと、ほとんど遅延時間には影響がない。才差、章動についてのモデルでの誤差 0."2 程度も同様である。

したがって、16 km 実験では、遅延時間から求めているのは、地球に固定した基線ベクトルの3成分と、機械装置による遅延時間とその変化率の計5個の量である。その結果は、第2表のようである。観測装置の改善 (B ではバンド幅合成で 10 MHz, C 以降は 40 MHz) や調整、校正の改良を重ねてゆく過程でベクトル成分、基線長について 3~5 cm の r. m. s. を得ている。また、実験 D における遅延時間の残差は、第2図に示すようである。また、測地測量で得られた値との比較をみると、2~15 cm の合致で、前記、外部誤差の範囲を超えればつきが見られるが、その主要な原因の一つは測量の値を、幾何学的なものに引き直すためのジオイド高の計算の精度不足にあると思われる。重力測定値は (5' × 5') のメッシュの平均値を各点近傍 2° にわたって用いているが、重力値のみによる鉛直線偏差計算では、外延の影響

第2表 ゴールドストーン 16 km の基線測定結果

実験と日付	x-成分	y-成分, m	z-成分, m	全長, m
測量による値 (1963—1966)	-3178.49 ±0.09	10,637.26 ±0.12	11,423.19 ±0.10	15,929.33 ±0.07
A (January 29, 1971)	-3178.40 ±0.20	10,636.9 ±0.30
B (April 4, 1972)	-3178.57 ±0.11	10,637.08 ±0.08	11,423.34 ±0.45	15,929.33 ±0.33
C (August 16, 1972)	-3178.515 ±0.047	10,637.111 ±0.073	11,423.103 ±0.055	15,929.167 ±0.042
D (October 14, 1972)	-318.548 ±0.025	10,637.041 ±0.045	11,423.154 ±0.034	15,929.164 ±0.021
E (October 18, 1972)	-3178.568 ±0.026	10,637.132 ±0.046	11,423.115 ±0.033	15,929.196 ±0.031
C, D, E の平均値	-3178.552	10,637.090	11,423.129	15,929.179



第2図 16km 実験Dにおける、遅延時間残差 (r.m.s. 0.3ns)

が、まだ大きいものとも考えられる。16 km 程度の基線でも、測地測量による値と比較するためには、重力を含む観測を行って高精度で、高さを決定しておかなくてはならないので、将来、我が国でも較正用の基線を作る場合、考慮しておくべき点であろう。第2図は、パラメータを合わせた残差時間の例である。

短い基線では基線の各成分について、測地測量との直接比較ができ、観測精度の吟味ができるので JPL では更に、運搬可能な 9 mφ のシステムについて、引き続き実験を行っている⁽⁴⁾。基線長を 307 m にとり、在来法における、高さに関する不確かさの入り難いようにしている。また、電波源の位置の誤差の効きは、前述の場合より、更に減って 0.005^{arc}/1" の程度である。この実験は 64 mφ Mars アンテナと組み合わせて行われ、9 mφ システムでは HP 5060 ルビジウム標準が使用されてい

る。合成バンド幅 40 MHz, S バンド (2.3 GHz) での観測である。結果は第3表のようで、平均値と、測量による値との差は、ほぼ 3~4 cm の範囲に収まって、所期の目標を達成している。しかし、June 18 の数値に見られるような 8 cm~17 cm ほどの r. m. s. を生ずるのは、周波数標準の安定度が大きく寄与するものようである。

更に、固定アンテナでの短い基線での実験では MIT, Haystack グループ⁽⁵⁾が、1.2 km の Haystack, Westford 間で Oct. 1974~Jan. 1976 の間に行った 11 回の観測がある。中心周波数 7.85 GHz, 100 MHz のバンド幅合成を行い、装置機器による遅延についての較正装置を付け加えるとともに、観測対象の分布を吟味し、周波数標準の安定な時間と、観測時間とのマッチングをするなどの注意を払っている。結果は、第4表に示したように、長さでは r. m. s. で 3 mm, それぞれの成分につい

第3表 307-m 実験による結果

	X, m	Y, m	Z, m	基線長, m
Apr. 23, 74	221.728±0.056	-172.432±0.095	-123.584±0.060	306.866±0.051
Jun. 5, 74	221.732±0.039	-172.516±0.032	-123.538±0.038	306.902±0.034
Jun. 18, 74	221.763±0.091	-172.488±0.145	-123.639±0.084	306.948±0.086
平均値	221.734±0.030	-123.562±0.030	-123.562±0.030	306.896±0.027
測量よる値	221.733±0.02	-172.471±0.03	-123.513±0.02	306.867±0.02
測量-平均値	0.001±0.036	-0.035±0.042	-0.049±0.036	0.029±0.034

第4表 Haystack-Westford 間の VLBI 実験結果

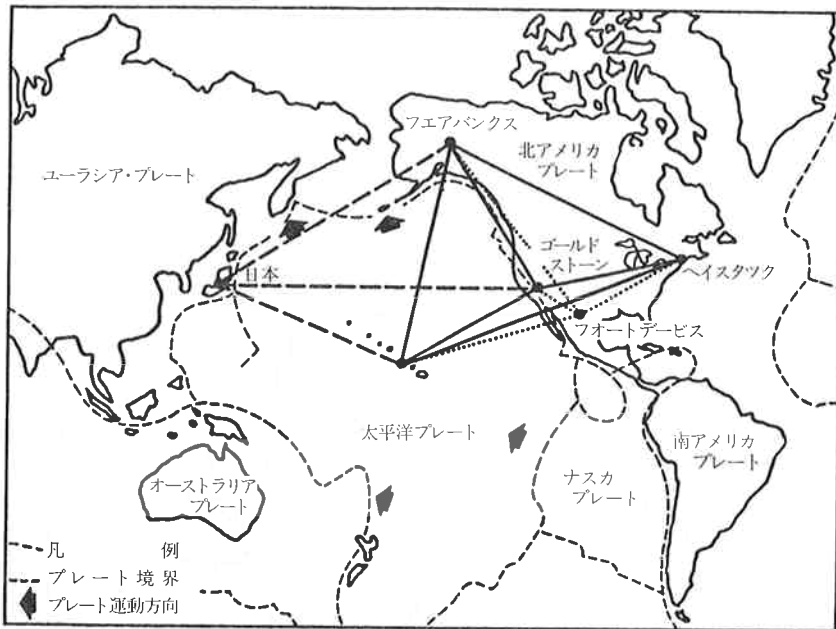
観測月日	観測時間	観測数	Westford の地心位置			Haystack からの距離	パラメータ フィット後 の残差 r. m. s	アンテナ軸 オフセット 量		
			半 径	経 度	緯 度					
			6,368,462,400+	7,149,428,300+	4,241,901,400+	1,239,300+				
(day)	(mo)	(yr)	(hours)	(mm)	(10 ⁻⁸ deg)	(10 ⁻⁸ deg)	(mm)	(ps)	(mm)	
23	Oct	74	10.5	53	73.1±4.2	3.6±1.8	73.6±2.2	81.3±2.3	18	332±13
6	Nov	74	19.3	70	63.2±2.2	6.3±1.0	64.0±1.2	92.1±1.3	11	312±6
14	Jan	75	12.3	40	78.8±4.1	3.4±1.9	66.9±1.8	88.4±2.1	12	296±13
19	Jan	75	6.6	32	86.6±2.9	4.0±1.4	68.8±1.2	86.1±1.3	8	300±14
30	Jan	75	7.0	22	72.6±2.7	2.1±1.2	63.4±2.0	91.2±2.2	7	286±21
14	June	75	4.9	28	85.4±7.0	6.0±2.9	63.1±3.6	92.3±4.0	18	336±23
11	July	75	14.0	59	88.5±2.5	3.8±0.9	62.2±1.1	92.6±1.1	9	269±12
21	July	75	15.0	80	87.0±1.9	6.9±0.9	61.7±0.8	94.9±0.8	10	312±6
4	Oct	75	19.5	93	73.0±2.0	14.6±0.9	59.5±0.9	99.2±1.0	11	307±6
15	Jan	76	8.0	44	70.7±1.6	18.7±0.6	65.0±0.7	94.4±0.7	6	308±6
16	Jan	76	13.0	66	73.5±1.1	17.7±0.5	64.9±0.5	94.7±0.5	5	307±3
	平均値				75.4±7.1	12.7±6.3	64.1±2.6	93.9±3.1		307±9
	測量数値-VLBI				10±30	-157±170	42±70	-8±20		10±9

ては3~7mmという好結果を得ている。表の10⁻⁸deg. は、ほぼ1mm(0.8mm, 1.1mm)と読み替えてもよいものであるが、在来法と比較して、長さでは8mm, 成分ではcm台の差を示している。経度については十数cmの差があるが、座標系の向きの合わせ方に問題があることを暗示しているようにも見える。これら、上に挙げてきた実験観測から、再現性の点では、各種の測地、地球物理的現象の研究用には十分であることを示し、在来法との比較については、むしろ、測地測量の精密再測(例えば16km基線の場合など)を行なうべきであると考えられる程度に、十分な精度段階に達しているといえる。

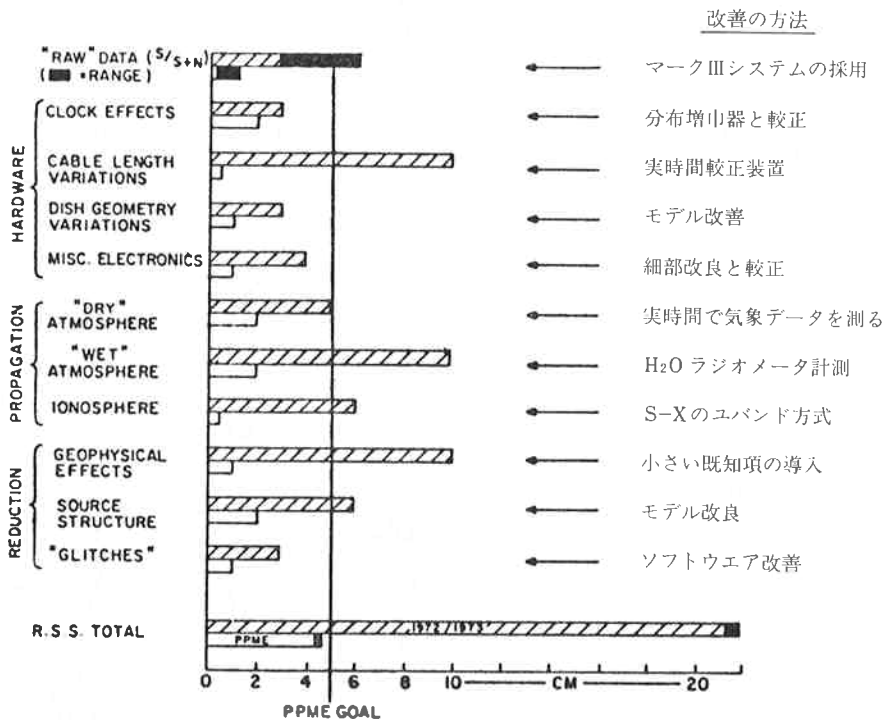
4. VLBI の今後の測地利用計画

以上のような実績を踏まえて、NASAのR. J. Coates⁽⁶⁾らはPPME(太平洋プレート運動測定実験

Pacific Plate Motion Experiment)を、M. I. T., Haystack Obs., J. P. L., SAOと協同で実施する案を発表した。これは、先にMacDoranらがARIES計画として提唱したものを発展させたものとも考えられる。これは、太平洋プレートに浮かぶハワイ諸島カウアイ島に、VLBIステーションを配置し、第3図の実験で結ばれた局間で観測を行って、同島の北米プレートに対する相対運動速度を検出しようとするものである。従来、各種の根拠から、この運動速度は長期間の平均では8cm/yrであるといわれているが、VLBIで最も直接的な証明を試みるわけで、設定している精度目標は、基線長の赤道成分を5cm, 極方向成分を8cm, 極運動を10cm, UT1を150μsecで決定することとしている。このためには、幾つかの改良を装置、観測法に施すことが必要で、誤差見積りと改善点は、第4図にあるようで、主なものは、①MARK III記録システムによるS/N比の改善、②全ケーブル長(1日以内で、電氣的長さは4cm変



第3図 PPME と VLBI ステーション (本文参照)



第4図 PPME の 誤差見積り

化するといわれる。)を実時間で較正する装置の付加,
 ③大気の wet 成分の補正のために、22 GHz の水蒸気ラ
 イン測定用に、ラジオメータを各ステーションで用いて
 その量を測る、④2.3 GHz と 8.4 GHz の S/X 2バンド

で受信することで、電離層による遅延を補正する(合成
 バンド幅は100 MHz)⑤較正システムを計算機制御する
 とともに、4ステーションまでのデータを同時処理して
 Closure error の配分を即時に行える処理システムとす

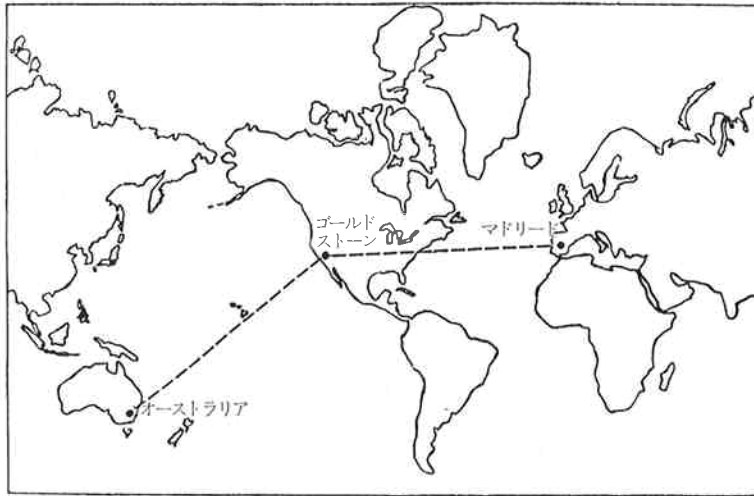
る、⑥全ステーションの周波数標準には、水素メーザを用いる、などである。

また、NASAは、第5図に示すようなJPL (Goldstone) とマドリッド、オーストラリアの装置を用いて極運動とUT1の精密決定を行う計画も明らかにし、特に、極運動については、Deep Space 航行用に、1977年から運用を開始する模様である。

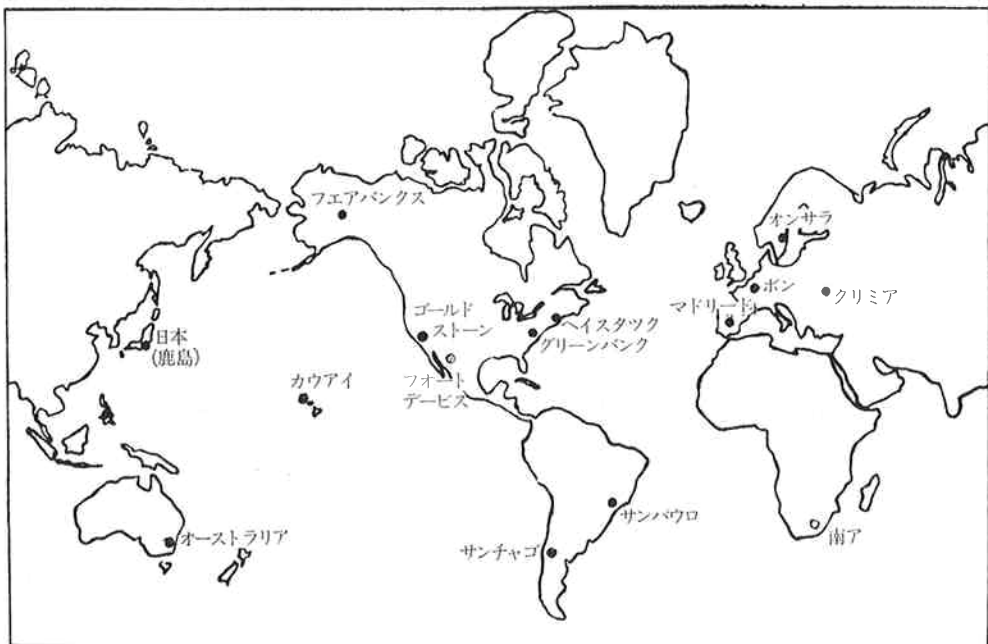
5. 我が国の方向

第6図は、現在世界中で運用可能なVLBI局を表したものである。ここで、VLBI局は、独立した標準周波数装置を備えているもののみで、いわゆるSBIは含んでいない。

PPME計画を述べている中で、Coatesらは(第3



第5図 NASA, JPL による極運動 VT1 精密決定のための VLBI ネットワーク (DSN)



第6図 VLBI ステーション分布図 (NASA 関係)

図参照)北米大陸の3局,及び太平洋プレートまったただ中のカウアイ島に対する,鹿島局との相対運動測定も目標の一つにしたいと述べている。日本は,ユーラシアプレートの縁辺にあり,かつ,太平洋プレートとの境界に位置しているが,太平洋プレートは日本列島の下に潜り込んで消滅し,その際,しばしば破壊的地震を引き起こすというのが,目下有力な議論である。VLBIの精度検定校正には,より短い基線を使うのが有効であるが,VLBIの測定誤差は,基線長の大小に強い依存性を持たない点が特色であるから,地球計測への応用としては,まず,大スパンから出発して,その特長を發揮するのが望ましい方向と考えられ,プレート理論の直接的検証は,最も適当で,魅力的な課題であろう。これによって,巨大地震機構解明に寄与することができるし,緯度観測(ILO)で知られている永年の項,例えば水沢の緯度が減少するという事象が,地殻運動によるのか,鉛直線方向の変化によるのかという課題について,分離,検証も行えることになる。

更に,地域的(数百km~1,000km)規模では,日本列島のねじれ,回転の計測を行い(例えば,日本列島内に3角形を組んで観測する),初めの大規模観測と結び付けることによって,縁海の成立過程の検証,日本列島近傍での,歪みの蓄積の早さなどを知ることができる。

更には,移動可能な観測システムによって,J.P.L.グループが,試みたような,断層運動の監視といった仕事にも使える可能性は十分あるので,こうした面にも,コストパフォーマンス等の条件が満たされれば,我が国でも将来使えるようになるかも知れない。

いずれにしても,我が国におけるVLBI実験は,明るい見通しで第1段階を通り過ぎた状況にあり,興味,関心を持たれる関係各位の,期待を結集した方向付けを,1日も早く持ちたいと考えている。

参 考 文 献

(1) MacDoran, P. F.; "Radio Interferometry for

International Study of the Earthquake Mechanism", Report for NASA, Contract No. NAS 7-100. (Oct. 1973).

- (2) Shapiro, I. I., Robertson, D.S., Knight, C. A., Counselman III, C.C., Rogers, A.E.E., Hinteregger, H. F., Lippincott, S., Whitney, A. R., Clark, T.A., Niell, A. E. AND Spitzmesser, D. J.; "Transcontinental baselines and the rotation of the earth measured by radio interferometry", *Science*, **186**. pp. 920-922 (1974).
- (3) Thomas, J. B., Fanselow, J. L., MacDoran, P. F., Skjerve, L. J., Spitzmesser, D. J. and Fliegel, H. F., "A Demonstration of an Independent-Station Radio Interferometry System with 4 cm Precision on a 16km Base Line", *J. G. R.*, **81**. 5. pp. 995-1005 (1976).
- (4) Ong, K. M., MacDoran, P. F., Thomas, J. B., Fligel, H. F., Skjerve, L. J., Spitzmesser, D. J., Batelaan, P. D. and Newsted, M. G.; "A Determination of a Transportable Radio Interferometric Surveying System with 3 cm Accuracy on a 307 m Base Line", *J. G. R.*, **81**. 20. pp. 3587-3593 (1976).
- (5) Rogers, A. E. E., Knight, C. A., Hinteregger, H. F., Whitney, A. R., Counselman III. C. C., Shapiro, I. I., Gourevitch, S. A. and Clark, T. A.; "Geodesy by Radio Interferometry, I. Determination of a 1.24. Kilometer Baseline Vector with ~5 Millimeter Repeatability", submitted to the *J. G. R.*, (Nov. 1976).
- (6) Coates, R. J., Clark, T. A.; "Worldwide Time and Frequency Synchronization by Planned VLBI Networks", Presented at the PTI meeting (1976).

