

- B-10 地球の温暖化による海面上昇の影響予測に関する研究
(2) 宇宙測地技術を用いた海面上昇の影響評価に関する研究
① V L B I 及び G P S による験潮場の位置測定に関する研究

V L B I 及び G P S による験潮場の位置測定に関する研究

研究代表者 建設省国土地理院測地部測地技術開発室

建設省国土地理院

測地部測地技術開発室

測地第二課

雨宮秀男・石原操・根本正美

飛田幹男・川原敏雄・福崎準洋・谷澤勝

平成5-7年度合計予算額 55,017千円

(平成7年度予算額 17,214千円)

[要旨]

地球温暖化による海面の変動は年間4~5ミリメートル程度の上昇とされている。これを実際の観測で精度よく測定することによって、海面変動の正確な予測に役立て、適切な対処を可能とすることが重要である。国土地理院は国内20カ所以上の験潮場で永年にわたり験潮を行ってきた。しかし、日本の国土は地殻変動により継続的に変形しており、験潮場自体が上下変動してしまい、そのままでは正しい海面の変動を測定することは非常に困難である。したがって、V L B I や G P S 等の宇宙測地技術により験潮場の地球重心に対する動きを測定し、海面の真の変動量を得ることが必要となる。

国土地理院は、郵政省通信総合研究所と協力して、平成4年度までに験潮場近傍でのV L B I 観測を可能とするような超小型V L B I 装置を開発した。

この研究は、その装置を用いて験潮場近傍に高精度の基準点を設置するとともに、地殻変動以外の誤差要因に関するレビューと補正手法について検討を行ったものである。

この3年間の研究により、乾潮変動観測に必要な精度の高い基準点の設置ができた。一方、急速なG P S 観測網の整備により、験潮場近傍でのV L B I 観測の必要性は低下したともいえる。今後はV L B I の定期的な観測値によって高精度に規正されたG P S 観測網の一点として験潮場近傍に観測点を設置し、連続的な験潮場の動きをモニターすることが可能になる。海面変動の立場から、適切な観測点を選定し、長期的に安定した観測を継続することが必要である。

[キーワード] 温暖化、海水面変動、V L B I、G P S、験潮

1. 序

地球温暖化に伴う海面変動が発生し、環境破壊や災害を引き起こすことが、世界的に問題となっている。ところが、地球温暖化による海面変動の予測に関するこれまでの研究においては、気候変動による温度上昇や海水面への影響についてモデルを構築し、海水面の変動量を推定するも

のがほとんどであった。しかしながら、モデルの構築にあたって、未知の部分については当然仮定に立脚することになり、それを基礎として将来を予測する場合、わずかな仮定の差により結果が大きく異なる場合がある。特に、生態系を含めた地球全体を対象とした気象モデルの構築が難しいことから、気温上昇と海水面変動の関連性についての議論が収束していない。現在最も信頼性が高いとされている IPCC の予測値においてさえ、かなりの幅を持っている。

したがって、海水面の変動に関して実測を行い、モデルによる予測値に対して境界条件を与えることが必要であり、海水面変動の実測により、その実態を明らかにすることによって、最適モデルの選定に寄与することが可能となる。これにより、予測精度が向上すれば、対策計画の策定及び実施をよりの確に実施することが可能となる。

本研究は、海水面変動を観測している験潮と宇宙測位技術とを結合し、より精度及び確度の高い海水面変動を実測可能としていこうとするものである。(図-1)

2. 目的

海水面変動の観測は非常に長期にわたって行われることとなるが、その間には験潮場の位置自体が地殻変動等により変化してしまうことが考えられる。これは、海水面変動観測にとって推定できない誤差となり、結果の信頼性を損なうものとなる。したがって、別途地殻変動を測定し、験潮データを補正することが必要となる。しかし、局所的な測地基準系に基づく測量で地殻変動を測定しても、その基準系自体の変動が有り得ること、また、海水面変動がグローバルな現象であり、国際的に統一された基準で議論が必要となること等から、現在最も高い精度で維持されている IERS 地球基準系 (ITRF) に基づく位置座標を用いることとした。

このため、ITRF の最新の座標が与えられている VLBI 観測点を基準として、験潮場近傍での VLBI 観測及び VLBI 観測点との取付観測を行い、験潮場の位置座標の基準とする。このための手法の研究及び実際の観測を行うことが本研究の目的となる。

VLBI は観測精度は高いものの、システム規模が大きいことから、各地の験潮所の近傍で観測を行うことは困難であった。このため、本研究では VLBI システムの小型化軽量化を進めることが大きな課題である。

また、地球の重心と験潮場との位置関係を測定する手法について検討し、その他の海面変動に含まれる誤差を補正する手法の検討とともにとりまとめ、海面変動の観測手法についての検討も行った。

2. 地殻変動観測

まず、験潮場の位置変動の観測手法については、平成4年度までに開発した超小型 VLBI 装置の性能の検証と、それを用いた観測をおこない、験潮場近傍に基準点を設置した。以下、各年度毎の実施状況を示す。

(1) 平成5年度の観測

平成5年度は、前年度に完成した超小型 VLBI 装置 (写真-1) を国土地理院鹿野山測地観測所に移設し、郵政省通信総合研究所の鹿島 34 m VLBI 観測局との間での試験観測を実施し

た。

その結果得られた基線ベクトルは以下の通りである。()内は誤差である。

$$\begin{aligned} X &= -5901.8252 \text{ m} \quad (0.0128) \\ Y &= -78371.0067 \text{ m} \quad (0.0113) \\ Z &= 63053.5450 \text{ m} \quad (0.0121) \\ D &= 100760.0901 \text{ m} \quad (0.0049) \end{aligned}$$

観測精度は各成分とも11～13mmであり、基線長の精度は5mm以下である。これにより超小型VLBI装置でも十分な精度を得られることが確認された。しかしながら、本装置はXバンドのみの受信しかできないことから、二波長の観測値による電離層補正が不可能であり、長距離の観測では大きな系統誤差を生じるおそれがあることから、その使用範囲は比較的短基線での観測に限られることは注意しなければならない。

また、あわせて従来の可搬型VLBI装置(5mアンテナ)及び超小型VLBI装置の移動観測室を用いて、海南、新富でのVLBI観測を行った。

この内、新富は3回目の観測であり、鹿島局に対する移動速度も以下のように求められた。

$$\begin{aligned} \text{北へ} & \quad 1.8 \text{ mm/年} \\ \text{東へ} & \quad 10.3 \text{ mm/年} \\ \text{上へ} & \quad 2.8 \text{ mm/年} \end{aligned}$$

(2) 平成6年度の観測

平成6年度は、超小型VLBI装置を富山県砺波市及び鹿野山測地観測所に移設し、鹿島34mアンテナとの間で観測を実施した。

その結果得られた礪波VLBI観測点の位置は以下の通りである。()内は誤差である。

$$\begin{aligned} X &= -3748985.7062 \text{ m} \quad (0.0114) \\ Y &= 3491875.9001 \text{ m} \quad (0.0111) \\ Z &= 3786423.6988 \text{ m} \quad (0.0119) \end{aligned}$$

観測精度は各成分とも11～12mmである。ただし、これは鹿島34mアンテナ中心の座標を固定したものである。

また、図-2, 3の通り、三国、須佐験潮場との取り付け観測及び電子基準点との取り付け観測を行い、適切な観測手法について検討を行った。

(3) 平成7年度の観測

水沢VLBI観測点と男鹿及び相馬験潮場との取り付け観測を行った。これに合わせて、国立天文台水沢観測センターのVLBI基準点との取り付けも行った。この結果については現在検討中である。この験潮場については平成2年度に観測が行われていることから、その後の変動量が

得られる予定である。

また、水沢-鹿島のVLBI観測については、上記の国立天文台水沢観測センターとの間でのVLBI観測が別途行われていることから、そのデータを用いることとした。これらの成果については現在解析中である。

(4) まとめ

国土地理院がこれまでに行ってきたVLBI観測は、図-4に示すとおりである。

これらの観測で、全国に基準点を設けることができた。今後、定常的な繰り返し観測が必要となる。しかし、近年のGPS観測網(図-5)の充実により、一部の験潮場にはその極めて近傍にGPS観測点が設置されつつある。このため、このような験潮場の活用により、信頼性の高い験潮場の変動データが取得できることとなった。

今後は、VLBIによって規正された高精度のGPS観測網による連続的な験潮場変動観測を中心として海面変動観測を行って行くべきであろう。

なお、今回観測結果の例として示した上記の各数値は観測後最初に得られた暫定値である。ITRFは、観測データの蓄積に伴う高精度化のため毎年更新されている。このため、各観測点の位置も基準が異なっていることになるため、統一的な基準のもと再計算する必要がある。ただし、毎年の基準系の相互の関係は明確に示されているため、長期的な検討にとって問題とはならない。

3. 験潮データの高精度化

本研究の主目的は、験潮場自体の位置変動を験潮データに補正することである。位置の測定精度はVLBIやGPS観測網の整備により、1cmを切る事が可能となりつつある。このような位置測定精度を有効に生かすためには験潮自体の精度の向上も必要である。このため、験潮データに含まれる多くの影響を補正するための検討も行った。

長期的な潮位変動を検討するデータとして広く月平均潮位が用いられる。これに影響を及ぼすものとして、以下の要因が考えられる。

- (a) 大気圧の季節変化
- (b) 海水密度の季節変化
- (c) 海流の変化
- (d) 風
- (e) 降水
- (f) 地軸や太陽・月等の天体軌道の変動

これらの内、(f)は無視でき、(e)は一次的な要因ではなく、(d)は月平均の風速から考えて平均潮位に及ぼす影響は小さい。したがって、大きな影響をもたらすものは(a)~(c)である。さらに、(a)は広範囲に同じような影響を与えることから、理論的に補正ができると考えられ、理論値(-10.0mm/hPa)と観測値も良く整合している。

本研究では、(b)と(c)についてレビューと若干の検討を行った。

(1) 海流

平成5年度には、駿潮の含まれる海流の影響を補正する手法の調査を行った。

この中では、海況と潮位変動に関する研究のレビューを行い、特に、海流の影響について検討を行った。

潮位変動は古くから多くの研究者によって研究されてきたが、その中でも潮位変動に地域性があることが指摘されている。また、その特性はある広い地域毎に類似していることも指摘されている。これは、日本周辺に存在する、黒潮、親潮、対馬海流等によって広い範囲に同じ影響を与えるためと考えられている。

このような地域的に同じように変動するブロックを駿潮データのクラスター分析によって客観的に求めた。図-6に示す駿潮データを用いたクラスター分析によると、日本周辺の海域はおおむね下記の6海区に区分できる。

- (a) 北海道・東北の太平洋岸
- (b) 伊豆半島より東の関東の太平洋岸
- (c) 東海及び紀伊半島の東
- (d) 紀伊半島西部と播磨灘，四国南岸
- (e) 瀬戸内海西部と九州東岸
- (f) 九州の南・西岸と日本海沿岸

(a) については親潮，(b)～(e)については黒潮，(f)については対馬海流の影響と考えられる。また、紀伊半島の東西で顕著に異なる変動が見られるが、これは黒潮の流路の変動によって沿岸の潮位に及ぼす影響が異なるためである。特に、黒潮の蛇行が東海地方沖での北東からの逆流を引き起こしそれによる影響が大きいと考えられる。

(d) や (e) のように、瀬戸内海の潮位変動が東西で別のブロックに分類されるのは、東側が紀淡海峡、西側が豊予海峡からそれぞれ侵入する黒潮の影響と考えられる。また、対馬海流が津軽海峡から東側に抜ける影響で、本州日本海側と北海道日本海側で多少の違いが生じるようでもある。

現在では海流の変動を潮位変動から推測しているような状況であり、逆に海流が潮位変動に及ぼす影響を定量的に精度良く見積もることは残念ながら困難な状況である。

(2) 海水密度

平成6年度は、海水密度の影響について調査した。日本近海では、海水密度は、水温と塩分濃度によってほぼ決定される。特に水温変動が海水密度変動の大部分を占める。

今回は、日本近海で年間の水温測定データが手に入れられた4海域（三陸，相模湾，九州東岸，富山湾）について水温と潮位変動の関係を調査した。

これらによると、海水面の温度（SST）と潮位とは位相遅れを持って対応していることが示唆される（図-7）。これは、海水面温度の変化が深層まで到達するのに時間がかかることと、潮位変動は海面から深層までの温度変化の積分値によって定まることによる。ただし、海水面温

度と潮位との間の位相遅れの量は地域によって異なる。三陸では約1ヶ月弱、相模湾では約2ヶ月、九州東岸では約1ヶ月、富山湾では約1ヶ月強である。これは、水温の伝達速度や伝達システムが地域によって異なるためと考えられる。

例えば、三陸沖では冬季に深い混合層が形成されるので、かなり早く深い層まで温度変化が到達する。これに対して、相模湾や九州東部では年間を通じて安定した黒潮の影響を受けており、海水面温度の変化が深部まで到達しないと考えられる。また、富山湾はやや特殊ではあるが深部に安定した水海が存在するためやはり海水面の影響が深部に到達しないと考えられる。

海水密度の潮位変動への影響を正確に補正するためには、深層までの海水分布のデータがあれば有効だが、現実には常時このようなデータを定常的に取得することは困難であり、海水温を各海域に応じた位相遅れを定めた上で補正することで対処することを考えるべきであろう。これは十分な観測資料があれば補正できると考えられる。

4. 総合的評価

(1) 観測データの取得手法

V L B I は、現在最も精度の高い測地観測手法である。また、観測対象が非常に遠方の電波天体であることから、最も高精度で安定した座標系に基づいていると考えられる。ただし、観測システムは非常に複雑であり、また、観測も完全に自動とはなっていない。このため、空間的に密度の高い観測点の設置は実際上不可能といっても良い。

一方、G P S は比較的短距離ではV L B I と比肩しうる精度を有している。また、受信機は近年非常に小型軽量となっており、観測も自動化されている。このため、多くの観測点を設置し自動的にデータ収集することも容易となっている。ただし、アメリカ合衆国が管理している人工衛星が不可欠であり、その基準系の安定性も完全とはいえないため、長期的な観測手法としては未だ確立されたものではない。

このような特性を踏まえると、長期的に安定したデータが必要な海面変動観測にはV L B I 観測が不可欠であることはいうまでもない。但し、験潮場近傍での観測をすべてV L B I で行うことは非常にコストがかかることであり、G P S 観測網の有効な活用が必要である。

このため、長期の基準系を維持するためにV L B I を用い、その基準系に準拠してG P S 観測網を規正し、高精度・高密度なデータを蓄積していく方法が最適と考える。

このようなV L B I とG P S さらには高精度な取り付け観測によって、験潮場の地心座標は、現在最も精度が高いと考えられるI T R F に準拠して与えることが可能となった。ただし、I T R F は観測データの蓄積に応じた高精度化に対応するため、毎年改訂されているため、長期の観測データを評価する場合には十分な注意が必要となる。

(3) データの提供

データのとりまとめ及び提供の手法については現在検討中であるが、現在の考え方について簡単に紹介する。

V L B I , G P S の観測点については、上記の通り、適当な時点のI T R F を基準として、適切な時点の座標及び速度を与える。座標については、最新のV L B I 観測データを用い、速度については連続的なデータが使用できるG P S のデータが中心となろう。海面変動観測のための験

潮場の近傍では極力GPS連続観測を行うこととし、その観測点と験潮場自体との取り付け観測は煩雑に必要としないようにすべきである。

また、験潮データの提供については、補正に必要な環境情報の提供とあわせ、より詳細な解析に必要な分潮データも必要と考えられる。しかし、すべての験潮場について処理することはかなりの負担となることから、海面変動観測に適していると考えられる験潮場のみで対応することが考えられる。

いずれの場合も、国内の多くの験潮データをすべて海面変動に用いることは大きな負担であり、観測条件の良い観測点の選定が重要となろう。

5 まとめ

本研究の期間に、地殻活動観測については極めて大きな進展があった。特に、GPS連続観測による、日本全国の電子基準点網の整備は目を見張るものがある。この施設を有効に活用することにより、この研究が当初目指していた、験潮場近傍でのVLBI観測の必要性は低くなったといえよう。しかしながら、海面変動は非常に長期にわたる変動であり、その期間の中で相互に十分な精度で比較できる観測データが維持されていく必要がある。そのためには、極めて長期的に安定と考えられる天体を基準として測定が行われているVLBIによって、GPS観測が規正されなければならない。今後は、定期的なVLBI観測とそれによって高精度に規正されたGPS連続観測網に結合された験潮場によって測定された海面の地球中心にたいする変動を長期にわたり提供していくシステムが確立されなければならないであろう。

また、海面変動を実際に測定している験潮データのより精密な補正手法については、未だ十分な精度とはいえず、継続して検討されなければならない。あわせて、グローバルな海面変動を適切に捉えるためには、地殻変動の激しい日本だけのデータでは系統的な差が生じる可能性が大きくなり、グローバルな験潮データの収集と総合的な検討が必要である。

このようなグローバルな測地観測データの総合解析を進めるための体制づくりも今後早急に検討すべきである。

研究発表の状況

なし

写真-1 鹿野山VLBI観測点における超小型VLBI装置

図-1 VLBI, GPS, 験潮による海面変動の高精度観測の概念

図-2 三国験潮場への取り付け観測

図-3 須佐験潮場への取り付け観測

図-4 国土地理院が行った国内VLBI観測

図-5 電子基準点網(1996年)

図-6 クラスタ分析に用いた験潮場

図-7 海水面温度(SS T)と海面変動の相互相関の例
(三陸: トドヶ崎沖SS T-宮古験潮データ)
(相模湾: 相模湾SS T-油壺験潮データ)

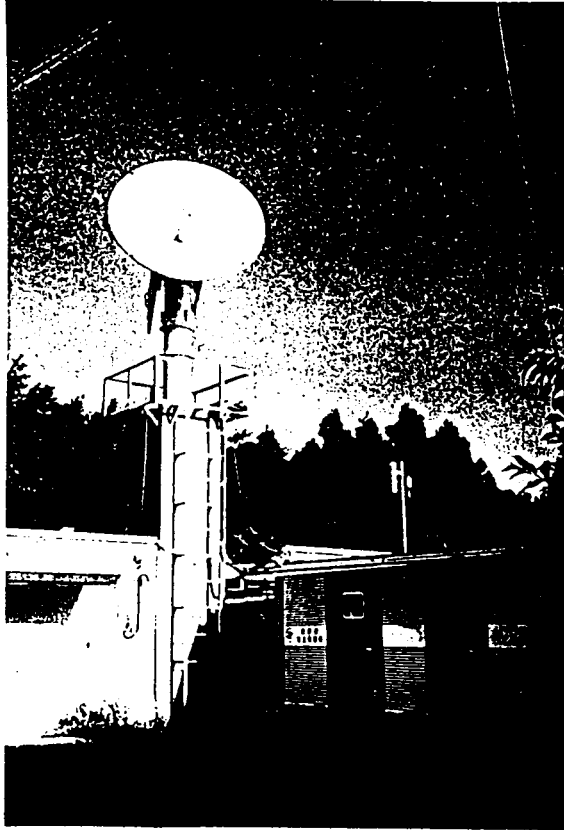


写真-1 鹿野山VLBI観測点における超小型VLBI装置

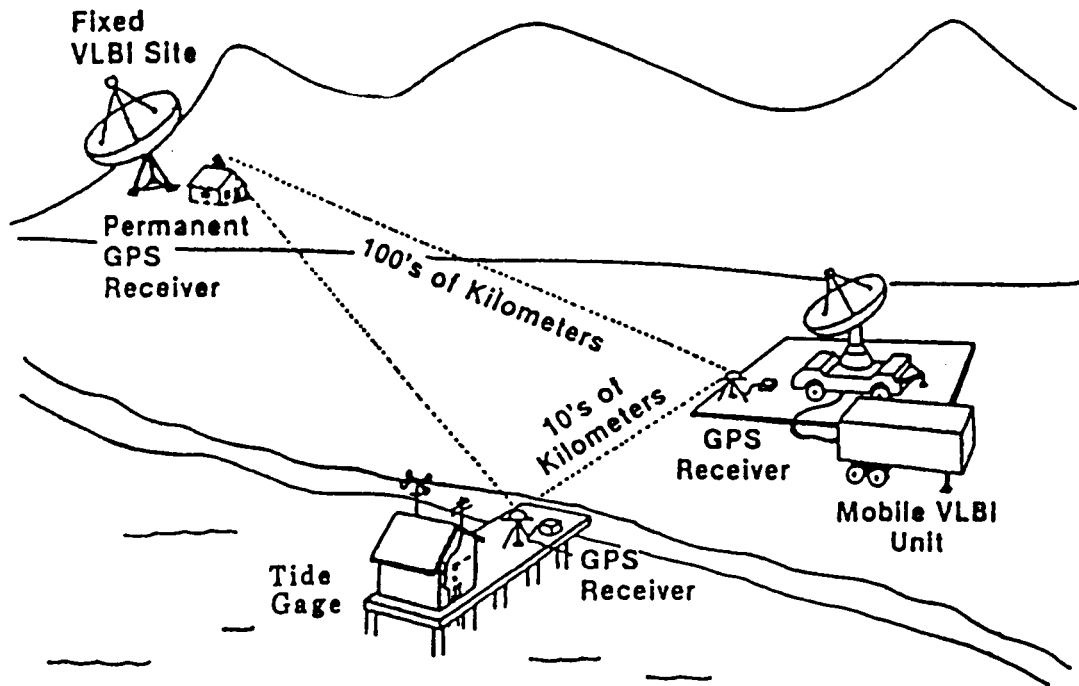


図-1 VLBI, GPS, 驗潮による海面変動の高精度観測の概念

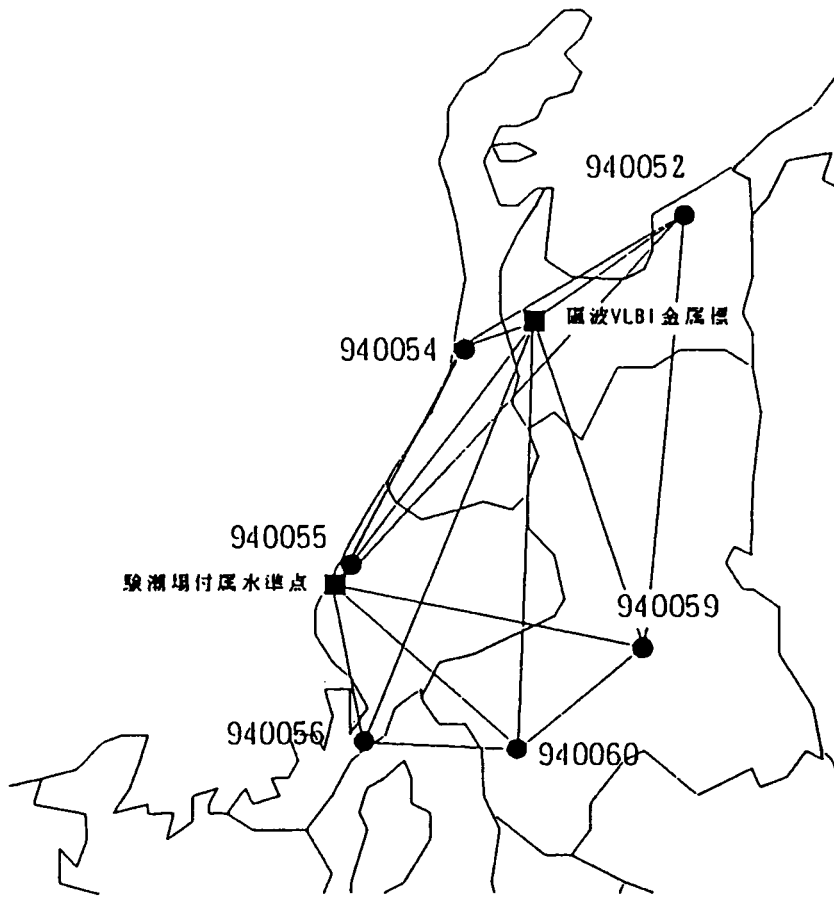


図-2 三国験潮場への取り付け観測

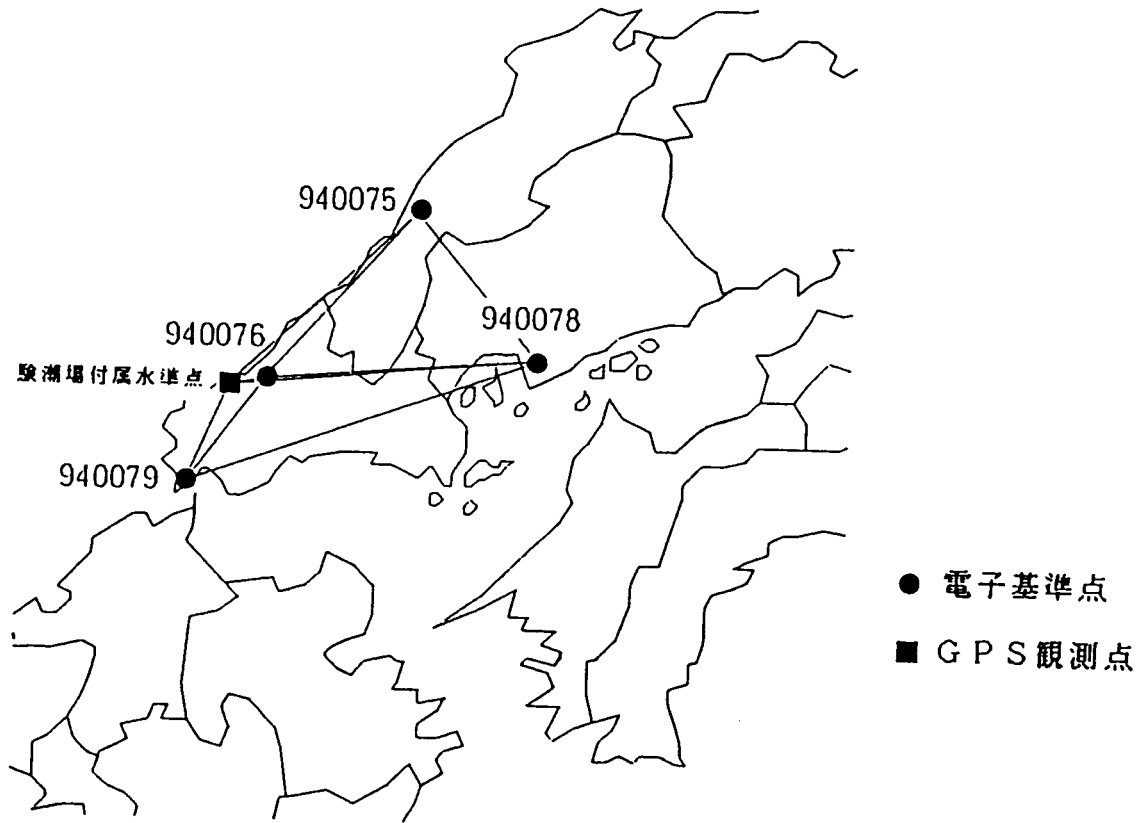


図-3 須佐駿潮場への取り付け観測

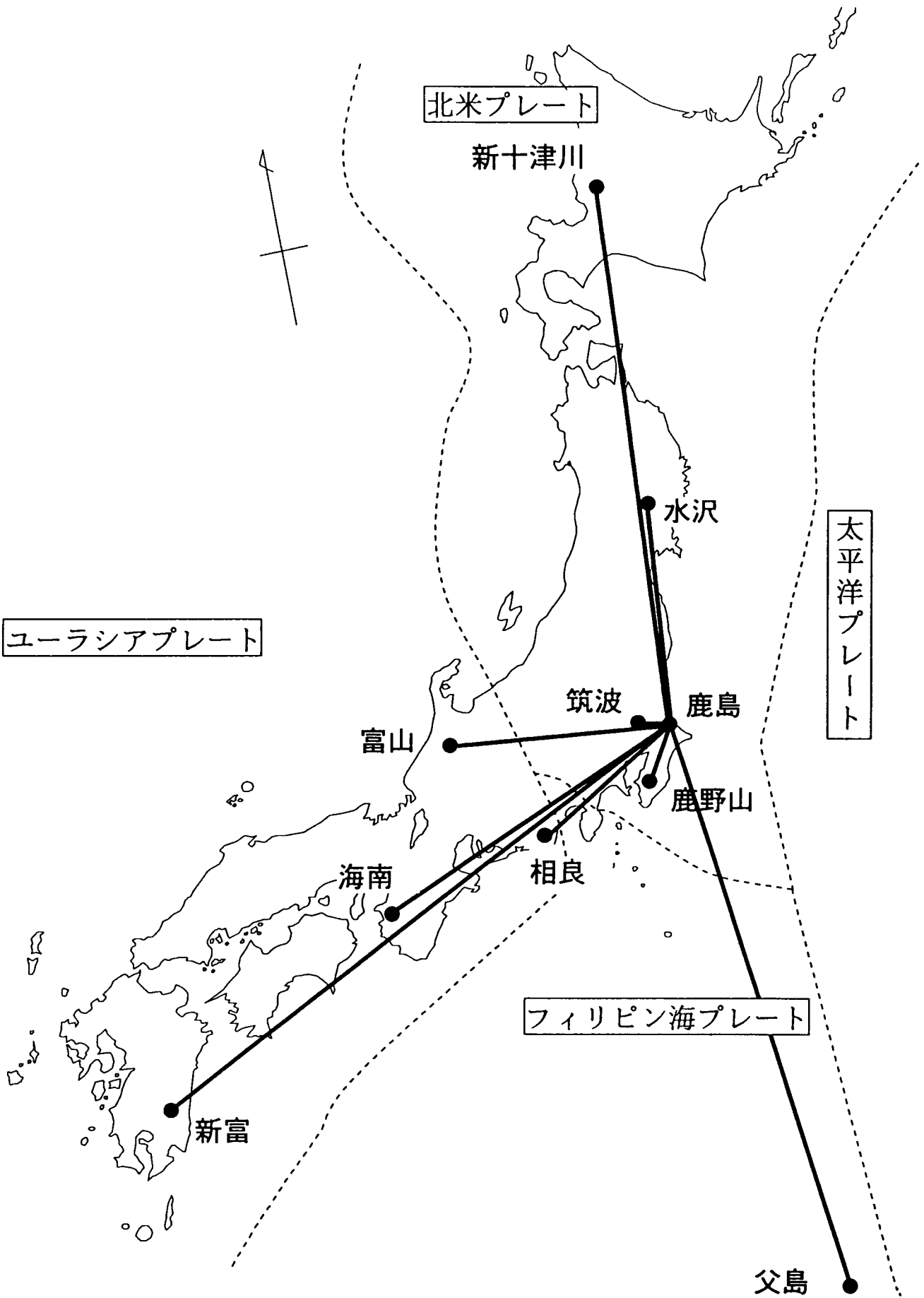


図-4 国土地理院が行った国内VLBI観測



図-5 電子基準点網 (1996年)

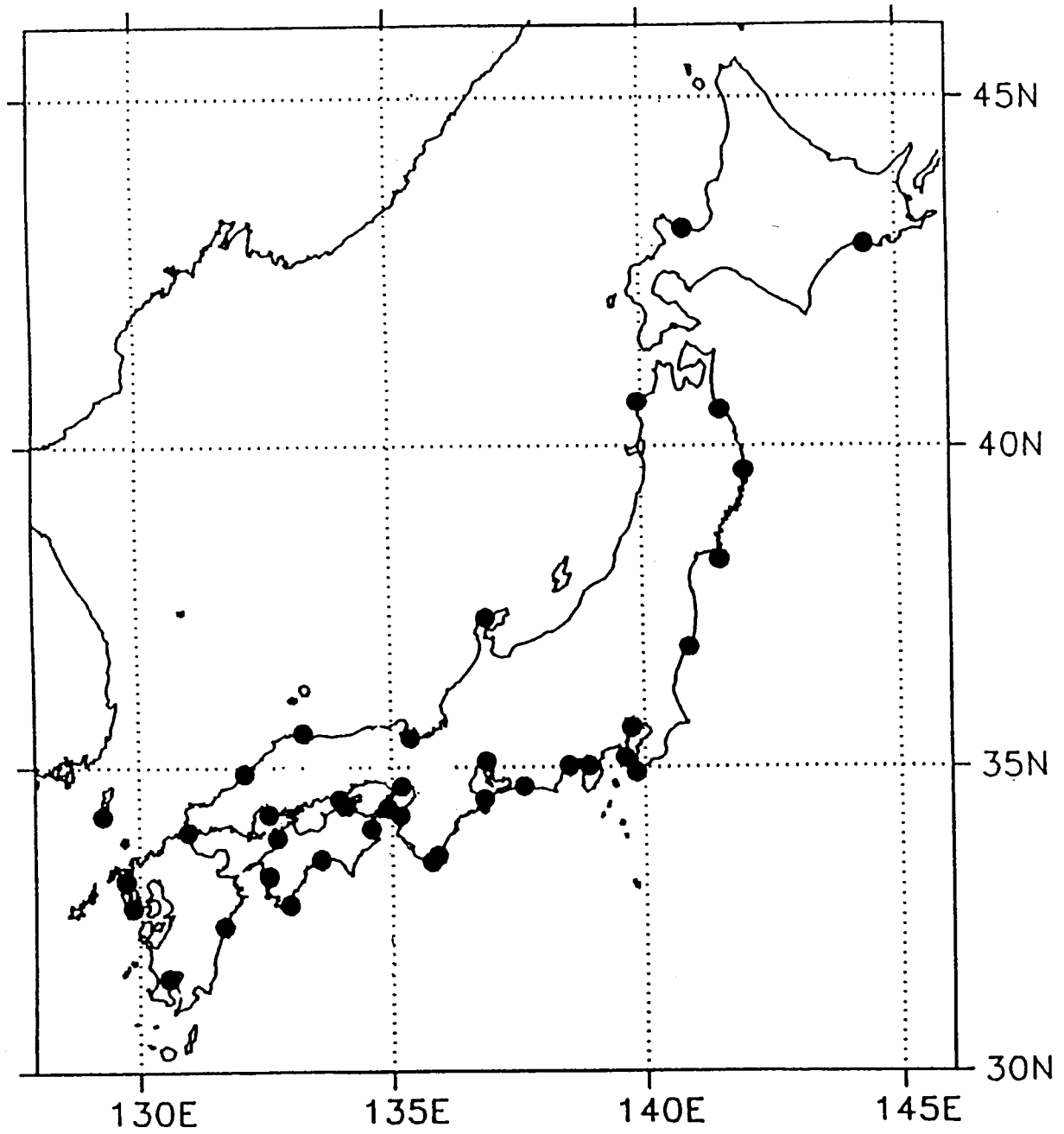
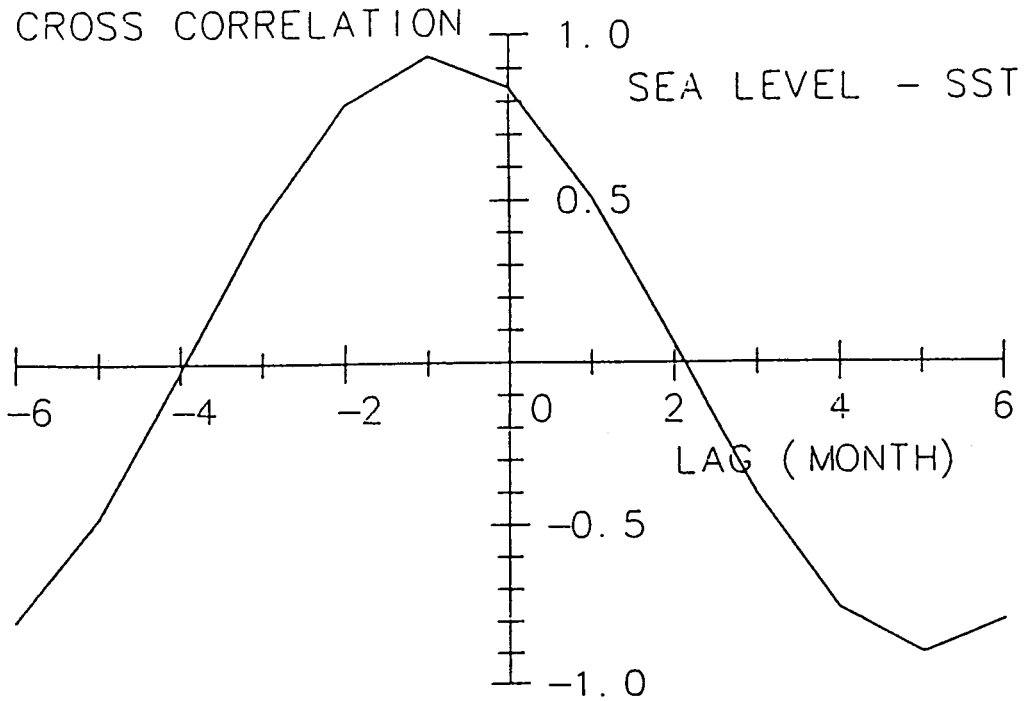


図-6 クラスタ分析に用いた験潮場

図-7 海水面温度 (SST) と海面変動の相互相関の例
 (三陸：トドヶ崎沖 SST-宮古駿潮データ)



(相模湾：相模湾 SST-油壺駿潮データ)

