

はじめに

1957年10月4日、人類最初の人工衛星スプートニク1号の実現以来、宇宙開発—宇宙技術の開発—は、急テンポで進められて来た。

地学分野への宇宙技術の応用は、衛星リモートセンシング技術の実用化によって、その端緒が開かれた。1960年4月から実用段階に入った太陽同期気象衛星によって、全地球表面の24時間周期での反覆観測と、その観測データ（映像）のリアルタイム収集システムが完成され、全地球表面付近の雲の分布とその時間的変化の監視が可能となった。一方、マーキュリー（1958～1963）およびジェミニ（1964～1966）両有人衛星計画の過程で、地球軌道上から撮影された数多くの地球表面のカラー写真によって、宇宙空間からの観測方式が地球表面に関する情報収集に対して、科学的にも経済的にも大きな利点をもっていることが確認された。

こうして、1966年には、アメリカ合州国内務省による「地球資源観測システム（EROS = Earth Resources Observation System）計画」が発足し、1972年7月にはその実験段階の「地球資源技術衛星」（ERTS、後にLandsatと改称）が打上げられ、18日周期でほぼ地球全表面陸域の高分解能多波長帯域映像データが反覆して得られるようになった。現在Landsatは3号が運用中であって、そのデータのリアルタイム受信のため、1979年1月現在世界中で11の受信局が稼動中であり、2局が開発中である（図-1）。

1970年代後半に入ると、宇宙技術の実利用および応用研究は、気象、通信から大気・海洋観測、測地、さらには地球外惑星探査にまで著しく拡大されて来た。地球とくにその陸域観測の分野においては、農林資源、土地利用の管理方式改善への利用だけでなく、地質図のマッピング、鉱物資源探査、さらには地殻ダイナミックスの研究への応用についての技術開発とその可能性の実証に向って、積局的な努力がなされるようになって来た。

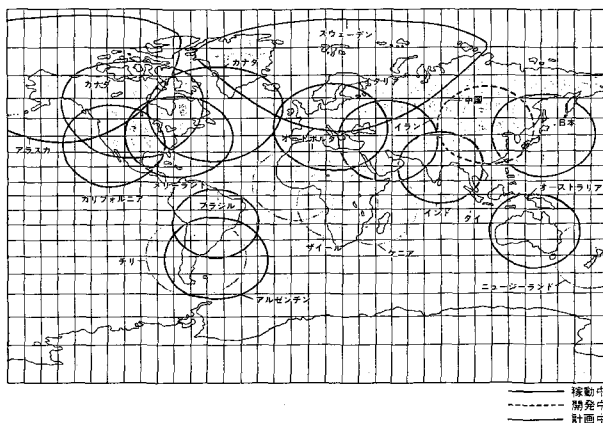


図-1 Landsat 地上受信局整備状況（1979年1月）

地学への応用

地学の終局的目標は、地殻内部の理解にある。この分野における宇宙技術応用の可能性は、マッピング技術、探査技術あるいは計測技術としての位置付けと、そこにおける能力の評価に依存する。地質図のマッピングは、地殻表層部の構成を理解する基本的手段であると同時に、鉱床胚胎の場の理解という点で鉱物資源探査の間接的手法の1つでもある。鉱物資源の開発を対象とする探査技術は、1つの総合システム技術である。資源探査は、通常予備調査、概査、企業化調査あるいは精査という順序で行なわれ、この順序に従って適用される手法も間接的なものから、より直接的なそれが適用されることになる。これらの過程で種々の計測技術が用いられることは他の分野と全く同様である。すべての計測は、目的と対象によって測定法も精度も異なる。とくに、地学上の問

題では測距技術が重要である。

現在NASAの「航空宇宙に関する研究開発5ケ年計画(1980～1984)」が進行中であって、この中で次のような地球観測衛星打上げが、進行中あるいは計画中である(表-1)。この中で、宇宙技術の地学ある

計 画	開 始	打 上 げ
Landsat-C	進行中	1978
Heat Capacity Mapping Mission	"	1978
Magsat	"	1979
Landsat-D	"	(1981)
Multispectral Resources Sampler	1981	1985
Stereosat	1981	1984
Soil Moisture Mission	1982	1985
Advanced Geology Satellite	1982	1986
Operational Earth Resources System	1982	1985
Gravsat	1982	1985
Earth Resources Synthetic Aperture Radar	1983	1987
Thermosat	1983	1986
Spaceborne Geodynamic Ranging System	1984	1987
Tethered Magnetometer	1984	1987

表-1 NASAの地球観測計画スケジュール

いは地球科学への応用に關する研究開発は、(1)鉱物資源探査戦略の改善 および(2)地殻ダイナミックスの研究への応用 を目標として進められている。

(鉱物資源探査戦略改善への応用)

本研究開発は、次の諸項が対象となっている。

① 全地球的規模での岩石タイプの識別、すなわち鉱物資源探査の基礎情報である地質図マッピング能力の開発

② 植物被覆下の土壌および岩石の組成、さらにそれ

に含まれる鉱物の検出能力の開発

③ 広域地質構造と地形的特徴との関連の解明を目的とする全世界陸域の立体映像データ(分解能:水平・垂直共に15m)の収集

④ 地殻表層部浅所の大規模鉱床と重力および磁気異常との関連の解明を目的とし、広域重力および磁気異常のコントラストを識別する能力の改善

⑤ 人間のエンジニアリング活動が自然の地質学的環境に及ぼす影響、さらに後者が人間のエンジニアリング活動に及ぼす影響の解明

以上を要約すると、"地質学的モデル作成あるいは地質図のマッピングについて、衛星リモートセンシング技術を活かしたよりよい方法を開発"し、"あらゆる直接的間接的な地質学ならびに地球物理学的方法の組み合わせによる鉱物資源探査技術と資源評価技術の水準向上を図り"、かつ"潜在的地表面異常、重力異常および磁気異常と鉱物資源賦存との関連を解明する"ため、宇宙技術の研究開発とその利用を促進しようということになる。

(地殻ダイナミックスの研究への応用)

これは、地震に代表されるような地殻の動的な過程の解明のために、宇宙技術の研究開発ならびにその利用を促進しようとするものである。

NASAの地殻ダイナミックス計画は、USGSをはじめとする連邦政府機関ならびに外国の同様な機関および国際機関との協力のもとに着々と進められつつある。この中で、NASAは必要とする宇宙システムおよび宇宙測距技術の研究開発を実施することになっている。

計画の最終目標は、全地球規模での地殻ダイナミックスの総合モデルを作成することであって、10～20年の期間にわたって、a. プレート間運動、b. プレート内変形（あるいはプレートの安定性）、c. 地域の変形およびd. 局地的ひずみの観測を対象とする測距がその主要な柱となっている。このための基本的手段として Lageos (Laser Geodynamic Satellite) を利用するレーザ測距、VLBI (Very Long Baseline Interferometry) 測距技術があり、これらを支援する技術が組み込まれている。Lageos 測距は、すでに1979年から技術水準向上のための研究開発が、VLBI 測距は1980年から開始されている。

これらの観測は、それぞれの規模、測定頻度、地域的条件などに応じて、固定点による観測、可搬型装置による移動観測が採用され、この方法が有効であることが実証されたときには、適当な機関に実施責任が移される。

衛星リモートセンシング

宇宙技術の地学、とくに地質学への応用は、実質的には Landsat リモートセンシングデータの利用によって開始された。そして現在では、前述の通り世界中に Landsat データの受信局の国際的ネットワークも逐次整備されつつあり、データの流通システムも完備し、実利用が現実のものとなりつつある。

Landsat システムの特徴は、データが映像の形で得られ

- a. 多波長帯域観測（可視～近赤外領域4帯域）
- b. 大観的観測（幅185 km）
- c. ほゞ全地球全表面の太陽同期反復観測（18日周期）
- d. リアルタイム観測（各受信局の受信範囲において）

が可能なことである。

このような衛星リモートセンシングデータの地質学分野への応用については、世界中で検討が行なわれ、実利用面で既に基本的技術が確立されているとみてよい。そして、世界的にみて、産業界におけるデータの最大の購入者は、鉱物・エネルギー資源関連の企業であると推定されている。

わが国においても、Landsat データの鉱物・エネルギー資源探査を含めて、地質学への応用に関する研究は質調査所をはじめとし、多くの機関によって進められて来た。そして、これらの研究は、

- a. 大規模地形構造の地質学的評価
- b. 多波長帯域スペクトルデータによる岩石種および変質帯の識別区分

という2つの観点から進められ、それぞれのテーマのもとに Landsat データの処理、解析および利用技術の確立が図られて来た。

わが国の国内を対象とする限り、国内には広く岩石地層の露出する乾燥砂漠環境がなく、前者の観点からの研究が大部分を占めている。しかしながら、これらの研究によってもたらされた新しい地質学上の知見への貢献は極めて少く、資源探査への具体的なそれという点では、さらに少ない。すなわち、両者を併せて5件程度であって、日本全土を覆う Landsat 画像数は50であり、10画像当り1件ということになる（松野、1981）。

これまでに Landsat リモートセンシングについて極めて多くの研究成果が公表されているが、国内に関する限り、若干の新しい画像データ処理技術の開発を除いてその大部分は、既存の地質ならびに鉱物資源賦存に関するデータならびに情報との対応についての検討結果について述べたものであると云っても過言ではない。この事実、わが国のように地形図が完備し、地質調査事業が進み豊かつ精度の高い地質学上のデータおよび情報の得られているところではなく、これらを欠く未開発のしかも広大な国土を持つ国々において、地質図マッピングにおける概査的手法として適用して、はじめて大きな効果が得られるものであることを示している。

世界的にみて、鉱物・エネルギー資源に対する需要は加速度的に増大の一途をたどっている。このような傾向

は、工業先進国にとって深刻な問題である。地表面近くの鉱床は殆んど探掘し尽され、既存の鉱床は年々枯渇しその探査・開発は次第に地下深部に及びつゝあるばかりでなく、より地理的条件の悪い僻地にこれを求めなければならない。このために、探査から開発に到るまでに要する時間も益々長期化する傾向にある。さらに、最近の世界 — とくに発展途上国 — の政治的動向は、投資のリスクを回避し、その安全を予測することを著しく困難にしている。

このような問題解決のための一つの手段として大きな役割りを果たすのが衛星リモートセンシング技術であるという認識がある。すなわち、世界の陸域全体にわたって、探査対象地域の予備的評価が従来より迅速かつ効果的に実施出来、探査計画の立案、その経費の見積りがより正確に可能となったことである。さらに、鉱物資源分布を含めた地質学上の諸現象がプレートテクトニクス理論によって統一的に解決されるようになり、この観点からの探査指針の検討が必要となっていることが挙げられる。全地球規模あるいは大陸規模の地質情報収集手段としての評価である。

(地図作成)

地質図のマッピングおよび鉱物資源探査あるいはその計画の立案に際し、対象とする地域について信頼出来る地(形)図が得られるか否かにその成否を根本的に支配する。Landsat データは、世界中の陸域について大縮尺の地形図作成の過程を経ないで、直接最新のデータで、しかも均一な精度の地図の作成を可能とした。因みに Landsat の MSS の地上分解は約 80 m であって、アメリカ合州国に 1 : 500 000 地図の精度規準を充分満足するものである。

(地質構造のマッピング)

地質構造のマッピングは、地質調査における最も基本的事項の一つであると同時に、鉱物・エネルギー資源探査の間接法としての側面をもっている。すなわち、各タイプの地質構造は、それぞれ固体地下資源、流体地下資源胚胎の場として、重要な役割りを果たすものである。

面的な画像データを用いる地質構造要素の抽出とマッピングのための方法論は、すでに写真地質判読技術として確立している。Landsat の多波長帯域データは、これを画像として出力する場合、種々の処理が可能であって、従来の空中写真より幅広い自由度がある。地質構造要素の抽出とマッピングでは、地形的起伏の理解が重要なファクターとなる。Landsat データでは、空中写真と違って三次元の地形形態を再現することは不可能である。将来 Stereosat によって、立体観察可能な画像データが得られることになれば、地形的起伏との関連からの地質単元の区分ならびに地質構造のマッピングが極めて能率化されることになる。

(岩石および土壌の識別区分)

多波長帯域データの解析技術の中で、最も技術的発展の著しいのがデジタル処理による物質の波長別反射特性に基づく物体の識別区分とその分布のマッピングである。地質・鉱物資源探査において、この技術の直接効果が期待出来るのは、地球上の陸地の約 5 分の 2 を占める乾燥砂漠地域を対象とする場合である。これまでの各種リモートセンシングデータの解析結果から、岩石・土壌についての情報が直接得られるのは、植物被覆が 50 % 以下のところに限定される。また、熱的特性についても、地表に厚さ 10 cm の地衣類被覆があれば、その直下の岩石・土壌のそれは完全にマスクされる。

現在運用中の Landsat の MSS の有効記録波長領域は、0.5 ~ 1.1 μm の範囲であって、この領域では岩石・土壌の識別区分は基本的に不可能である (Goetz & Rowan, 1981)。この点を解決するためには、より有効な波長領域を記録出来るセンサーシステムの開発が不可欠である。現在進行中の Landsat-D では、その TM (The-

matic Mapper) による $0.45 \sim 0.5$, $1.55 \sim 1.75$ および $2.08 \sim 2.35 \mu\text{m}$ の帯域の検出記録が実現される予定である。

地 殻 ダイ ナ ミ ッ ク ス 計 画

NASAの地殻ダイナミックス計画は、“地殻ダイナミックスおよび地震の研究への宇宙技術の応用”という副題がついており、地殻の動的過程の解明のために、宇宙技術の研究開発ならびにその利用の可能性を実証しようとするものである。このために、a. プレート内変形（プレートの安定性）、b. プレート間運動、c. 地域的変形、および d. 局地的ひずみの観測として、宇宙測距離が行なわれる。これを支援する技術として、測距点における精密重力測定、Magsat による磁気測定、Gravsat による重力の観測等々が計画されている。Landsat データによる広域地質構造の研究も潜在的貢献が期待される。

（宇宙測距技術）

その第一はレーザー測距である。地球表面の測距点から Lageos および月までのレーザーパルス の到達時間を測定する。Lageos および月の位置推算暦と地球の極の瞬間位置を求め、これから測距地点の位置を地球の質量中心座標の中で決定する。

第二はVLBI 測距である。これは遠く離れた複数の電波源（恒星電波源）で構成された座標フレームに依存する。これらの電波源からの信号を基線両端の電波望遠鏡で別々に記録し、両方の記録を相互に対比して信号の遅延時間を求め、2つの観測点間の3次元の位置の差を求める。厳密には、これら位置の差は、レーザー測距あるいは地上測距によって得られた結果と比較するため、地球質量中心座標系に結びつける必要がある。しかしながら、基線長あるいは相対的に位置の変化は直接比較が可能である（電波研究所、1978）。

（プレート構造運動グローバル観測）

プレート内変形観測

プレート間運動を観測するためには、異なるプレート上の2点間の距離の変化の観測を実施すればよいのであるが、プレート内の安定性について根本的に疑問がある。現在のところ地球全面規模でのプレート間運動の観測には約30点の観測点で充分であると考えられているが、若しプレート内の変形が認められると、さらに多くの観測点が必要となる。

造構論の観点からプレートの安定性の実証するためには、観測を10年以上にわたって実施し、理想的には週1回程度の頻度の測定が必要である。この観測の対象として、太平洋、オーストラリア、西部ユーラシアプレート等が挙げられている（図-2）。

プレート間運動観測

地震の危険性の評価という観点からみても、もっとも基本的かつ全地球規模の現象は、プレート間の相対的な運

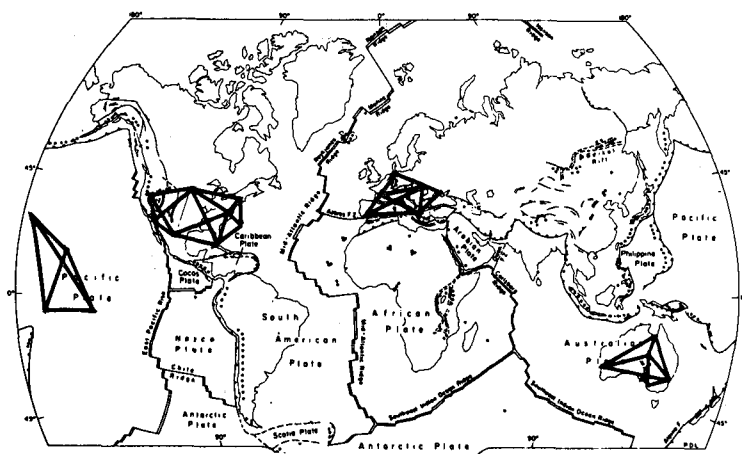


図-2 プレート内変形観測地域

動である。図-3に示すとおり、種々の根拠から推定されたプレート境界部における相対的運動のベクトルは、場所によってかなりの変化がある。ナスカ-太平洋プレート間が最大であって 18 cm/yr と推定されている。断層に沿うひずみ蓄積の速度の指標は、相接するプレートの相対的運動の速度と、局所的なみかけの変位速度との比較することによって推定可能である。例えば、太平洋プレートと北アメリカプレートは、サンアンドレアス断層を境にして $5\sim 6\text{ cm/yr}$ の相対的変位速度をもっている筈である。しかしながら、この断層を横切るいくつかの場所での測定結果から、現在のところ変位運動は検知されていない。だが、この地域には、数 cm/yr のプレート間運動に対応するひずみが蓄積されている筈であると考えられている。このようなひずみが限界に達すると地震が発生するのである。

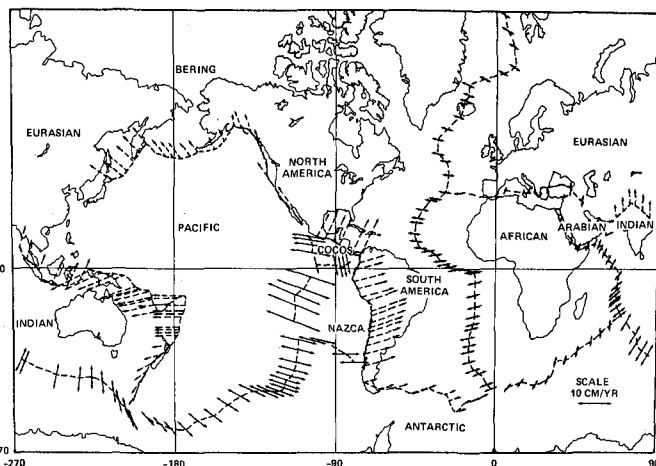


図-3 プレート境界における運動量 (Minster et al 1974)

プレート間運動のグローバルな観測のためのVLBIおよびレーザー観測点網は図-4に示す通りである。

地域の変形および局地的ひずみ観測

活断層地域は、ひずみが蓄積されつゝあるところであり、また変形が進行中の地域でもある。ひずみ速度は、地震の発生頻度に関係があり、破壊時における蓄積ひずみは予期されるマグニチュードを決定する重要な要素である。また、断層変位の規模は、破壊に先立つ地域的ひずみとも対応する。

若し、プレート境界がロックされた状態で運動しつゝあるとすると、ひずみ

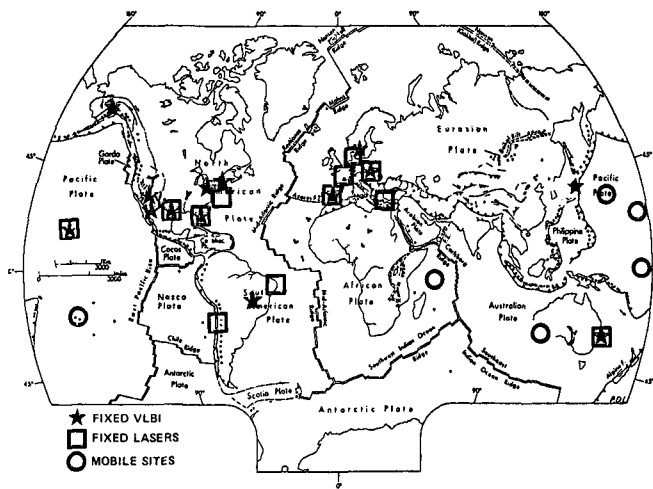


図-4 プレート間運動観測点網

の蓄積は、変形が進行しつゝある地域の大きさと関係があることになる。例えば、相対的変位速度が 5 cm/yr であり、このすべてのひずみが 50 km の断層の範囲に集中すると、平均ひずみ速度は $10^{-6}/\text{yr}$ である。ひずみが空間的にどのような分布を示すかは、地質条件に支配されるが、ひずみ速度は一般に断層付近で高く、離れるに従って低くなることが経験的には知られている。サンアンドレアス断層に沿うひずみ速度は $10^{-7}/\text{yr}$ であるが、断層を離れてどの範囲まで有意なひずみが認められるか、全く不明である。

断層に沿う地域が、プレート間運動によって生じる力に対して同じような応答をするとは限らない。これは地質時代における地殻変動をみても明らかであり、地域的にそれぞれ異った傾向がある。したがって、この地域的変形観測は、数 1000 km の大きさのプレートよりは小さい数 100 km の範囲の地域的変形を観測することを目的としている。そして、その具体的目標は

- 地域内のひずみとその速度

b. 地域内の主要断層の変位速度

c. 断層変位運動およびひずみ速度が均一であるか挿話的であるか否か

を求めようとすることに置かれている。

このために、それぞれ特徴のあるプレート境界地域、合計8地域(図-5)が観測の対象に挙げられている。
すなわち、

(走向変位プレート境界)

北アメリカ地域

ニュージーランド地域

(沈み込み境界)

アラスカ地域

南アメリカ地域

スンダ弧～ニューギニア地域

(混合地域)

カリブプレートおよび中央アメリカ
地域

日本および北西太平洋地域

(拡大帯)

フィジー台地地域

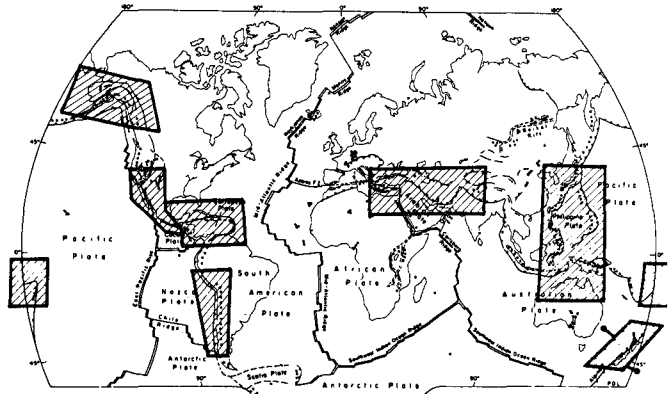


図-5 地域的変形観測地域

である。

走向変位プレート境界として挙げられている2地域は、それぞれサンアンドレアス断層およびアルパイン断層を含んでいる。これら両地域では走向変位断層帯を挟んで水平せん断変形が卓越する。このような地域では、変形がかなりの範囲に及ぶものと考えられているが、実際にプレート境界からどの範囲まで及ぶか全く不明である。主断層だけによって変位するのではなく、他の多くの断層が関与しているかも知れない。もちろん垂直方向の変位も考えられる。

沈み込み帯の3地域は、それぞれ特徴がある。アラスカ地域は、太平洋プレートが北アメリカプレートの下に沈み込むところであって、沈み込み速度は5 cm/yrと推定されている。こゝではベニオフ帯がよく発達し、ベリング海の下に拡がっており、発生する地震に関する研究がよくなされている。南アメリカ地域は、大西洋中央海嶺の縁からナスカプレートがアンデス山脈の下に沈み込む所までを含む地域である。アンデス山脈は、沈み込み帯の上に存在する典型的な造山帯である。巨大地震の発生する所であって、プレート間の相対的運動の速度も非常に速く18 cm/yrと推定されている。スンダ弧～ニューギニア地域は、インドネシアとオーストラリアを境する沈み込み帯を挟む観測である。この地域は、多くの島々に分かれ戦略的に困難も多い。

混合地域のうちカリブプレートおよび中央アメリカ地域は、グローバル構造モデルのうち非常に興味がありかつ重要なところである。この地域には多くの小プレートがあり、その運動は強い地震活動と火山活動と関係があるものと考えられ、メキシコからパナマまで2000 kmの広範囲にわたっている。日本および北西太平洋地域(図-6)は、ユーラシアプレートの縁辺部に位置し、相対的にユーラシアプレートが南東側の太平洋プレートおよびフィリピンプレート上に衝突しているところである。こゝでは、これら3つのプレートの間の沈み込み帯を横断して移動観測点の展開が可能である。したがって、日本本土の太平洋プレートおよびフィリピンプレートに対する運動を明らかにすることが可能である。さらにユーラシアプレート縁辺部の変形が、日本本土およびアジア大陸に展開された観測点間の測距によって把握出来る可能性がある。

日本の場合、長期にわたる精密な測地成果があるうえ、日本自身による移動VLBIあるいはレーザー測距も

実施可能であるという期待もある。固定VLBI観測点として、茨城県鹿島の郵政省電波研究所の20 m アンテナがある。このアンテナと北アメリカおよびオーストラリア等の固定点のアンテナを結んで、1983年までにこれらの間の相対的運動を測定するためのシステムレベルの実験を完了させる計画が進行中である。

拡大帯として挙げられているフィジー台地地域は、太平洋プレートとオーストラリアプレートが、小さなプレートを伴って複雑に作用し合っている地域である。ここでは、フィジー南東ラオ海盆およびフィジーとニューヘブリデスとの間に活動的な拡大帯が存在することが知られている。とくに、ニューカレドニアとフィジー間の水平変位は、フィジー台地縁辺部の拡大とニューヘブリデスにおける沈み込みを併せて11 cm/yrであると見積られている。

お わ り に

現在の宇宙技術は、著しい速度で発展、大きく成長し、種々の分野における問題解決に大きな可能性をもつに到っている。とくに、グローバルな規模の多くの現象の直接的あるいは間接的観測あるいは計測が可能である。

地学分野では、地体構造の形成、鉱床の分布、火山活動、地震の発生等多くの現象が、最近プレートテクトニクス理論によって統一的に解釈されるようになってきている。これは、地質時代からずっと継続する動的過程によるものであり、現在なお進行中である。この動的過程の実証、定量、モデル化が、今後宇宙技術の応用によって、極めて急速に進められることが期待される。

文 献

電波研究所, 1978: 超長基線実験特集, Goetz & Rowan, 1981: Science, 松野久也, 1981: 石油技術協会誌, Minster et al., 1974: Geophys. J. Roy. Astron. Soc., NASA, 1979: NASA Conf. Publ. 2115, NASA, 1979: NASA Tech. Paper. 1464.

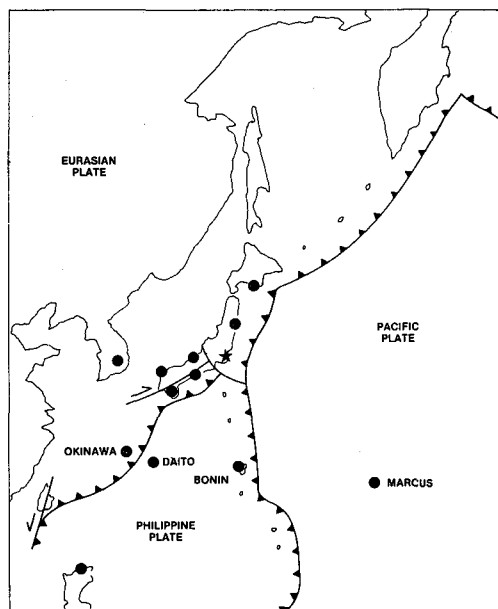


図-6 日本周辺の地質構造と移動観測点の配置(提案)