

NASAの地球ダイナミクス計画

松野久也 (第一航業K.K. 元社員)
Kyuya MATSUNO

はじめに

人類最初の人口衛星スプートニク1号が地球軌道上に打ち上げられたのは1957年10月4日のことであった。それから僅か10年余でアポロ7号による3人の宇宙飛行士の月面着陸が実現し、1981年にはスペースシャトル(コロンビア号)による2回にわたる宇宙飛行の実現によって宇宙輸送システムの全面運用が現実化するところまで宇宙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もっとも広範な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といっても過言ではない。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の雲の分布とその時間的変化の監視が可能となった。これと平行してマーキュリー(1958年10月~1963年5月)およびジェミニ(1964年4月~1966年11月)の両有人衛星計画の過程で地球軌道上から手持カメラによって種々の焦点距離のレンズで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およびその付近の情報・データの収集に対して科学的にも経済的にも他に比類のないいくつかの利点を持っていることが実証されるにいたった。

表1 NASAの地球観測衛星開発

計 画	開 始	打 上 げ
Landsat-C	進行中	1978
Heat Capacity Mapping Mission	"	1978
Magsat	"	1979
Landsat-D	"	1982
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

こうして1966年にはアメリカ合衆国内務省による「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=Earth Resources Technology Satellite 後にLandsat=Land Satelliteと改称)」が打ち上げられ18日周期では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4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1982年1月現在世界中で16の地上受信局が運用あるいは建設中である。これらの映像データは地質とくに大規模地質構造のマッピングに世界中で広く用いられるようになってきている。

NASAでは1980~1984年にわたる「航空宇宙に関する研究開発5ヶ年計画」が進行中(表-1)であってこの中で地球科学分野における宇宙技術の応用に関する研究開発は(1)鉱物資源探査戦略の改善および(2)地殻ダイナミクス研究への応用の2つを大きな目標として進められている。すなわち前者では“地質学的モデルの作成および地質図のマッピングについてリモートセンシング技術を生かしたより良い方法を開発し”“あらゆる直接的ならびに間接的な地質学的方法および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“潜在的な表面異常、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”ために宇宙技術の研究開発とその利用を促進しようとしている。これに対して後者は地震に代表されるような地殻の動的過程の解明に宇宙技術の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。

前者についてはリモートセンシング技術の研究開発に関連してわが国でも数多く報告されている。後者については漸く関心が持たれるようになりとりわけVLBI(Very Long Baseline Interferometry)についてその解説記事がいくつかの誌面に見られるようになったところである(土屋:1982 弓:1982)。

筆者は地質調査所在職中宇宙開発に関する日米専門家会議に関与する機会が得られそれ以来NASAから

折に触れて情報が得られるようになった。以下NASAの地殻ダイナミクス計画について大要を紹介することにした。この内容は非常に広範囲にわたるものであり、多様かつ非常に高度な科学技術分野を含んでいる。到底ある特定の分野の知識だけで全体を消化することは不可能である。しかしながらこれは国際的な協力なくしては実施不可能な計画であると同時に地学にとって重要な内容を含むものでもある。したがって内容の不消化というそりを覚悟のうえ、地学分野の読者にその内容を知っていただくために敢えて筆を執った次第である。

計画の概要

NASAの地殻ダイナミクス計画には“地殻ダイナミクスおよび地震研究への宇宙技術の応用”という副題がつけられており、冒頭にも述べたように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。

本計画はUSGS(合衆国地質調査所)NSF(国立科学財団)その他連邦政府機関、外国の同様な機関および国際的機関の協力のもとに着々と実施に移されつつある。このなかで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行うことになっている。

計画の目標は全地球規模での地殻ダイナミクスの総合モデルの構築である。このために10~20年間にわたって(1)プレート内変形(2)プレート間運動(3)地域的変形および(4)局地的ひずみの観測を対象に宇宙測距を実施する。基本的手段としてはLageos(Laser Geodynamic Satellite)によるレーザー測距およびVLBI(Very Long Baseline Interferometry)測距技術がありこれらにいくつかの支援技術が組み込まれている。Lageos測距については1979年から技術の水準向上のための研究開発が開始され、VLBI測距は1980年から開始されている(NASA:1979)。

これらの観測はそれぞれの規模、測定精度、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、それぞれ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、例えばNGS(National Geodetic Survey)に実施責任を移換することになっている。

支援技術としては精密重力計による測距観測点における垂直方向の変動の監視、地球内部における質量分布の推定およびその変化を把握し、プレート運動の駆動力に関する情報収集を目的とするGravsat(Gravity Satellite)地球内核とマントルとの間におけるダイナミッ

クな過程に関する情報を得るためのMagsat(Magnetic Satellite)による観測等々である。また衛星リモートセンシング技術すなわちLandsat画像データによる遠隔僻地の広域地質構造の検討も、潜在的にこの計画に大きな貢献を果たすことになる。

これらの支援技術あるいは周辺技術については計画の進展に伴って逐次総合的かつ詳細な検討が進められることになろう。

宇宙測距技術

レーザー測距法は極く短いレーザーパルスの地球表面から高いところにある反射体までの到達時間を測定し、その間の距離を求める方法である。このためには軌道位置を適切な精度で決定できる高い高度の衛星が必要である。この点Lageosおよび月は地球の密度の不均一さに起因する影響を受けない高度にある反射体を備えた衛星である。Lageosおよび月の位置推算層および地球の極の瞬間位置がわかればレーザー測距地点の位置を地球の地心座標系の中で決定出来るのである。

VLBI測距法すなわち極長基線マイクロ波干渉測定技術は遠く離れた所にある複数の電波源(恒星電波源)で構成される座標フレームに依存する。すなわちこれらの電波源からの信号を基線両端の2つの電波望遠鏡で別々に記録する。この2つの記録を相互に対比して信号遅延時間を求め、2つの観測点間の3次元の位置の差を求めるのである。厳密にはこれらの位置の差は地心座標系に結びつけられなければ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ことは出来ない。しかしながら基線長あるいは相対的位置の変化は直接比較が可能である。

これら宇宙測距技術についての細部はそれぞれ専門の技術書に譲るとしても現在のところプレート間の運動(数cm/yr)を充分検知出来る精度(2~3cm)が得られる段階にきているのである。

プレート造構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数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

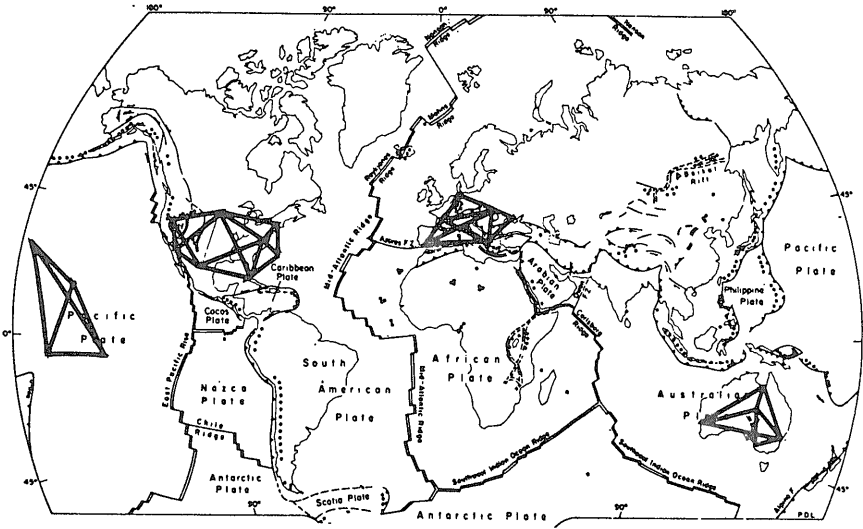


図1 プレート内変形観測地域

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をするためには 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を必要とする。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-1)。

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動である。図-2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運動のベクトルは場所によって可なりの変化がある。ナスカー大洋平

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 5~6cm/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。

プレート間運動のグローバルな観測のための VLBI お

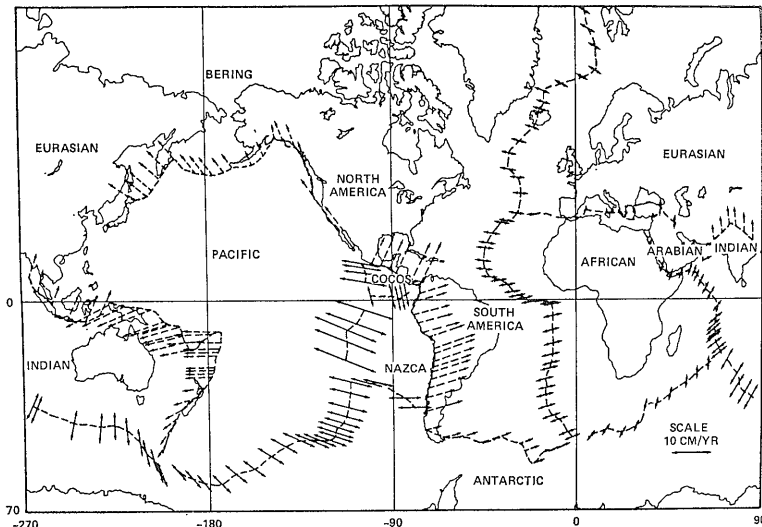


図2 プレート境界における運動量 (Minster et al 1974)

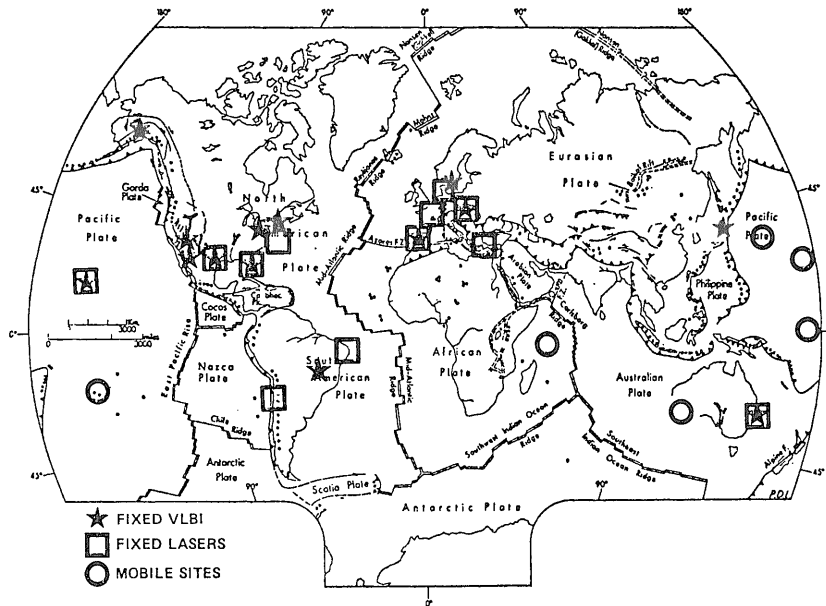


図3 プレート間運動観測点網

よびレーザー観測点網は図-3に示す通りである。

地域的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つあるところであり 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づるとすると ひずみの蓄積は 変形が進行しつづる地

域の大きさに関係があることになる。 例えば 相対的変位速度が5cm/yrであり このすべてのひずみが50kmの断層の範囲に集中すると 平均ひずみ速度は 10^{-6} /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の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} /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

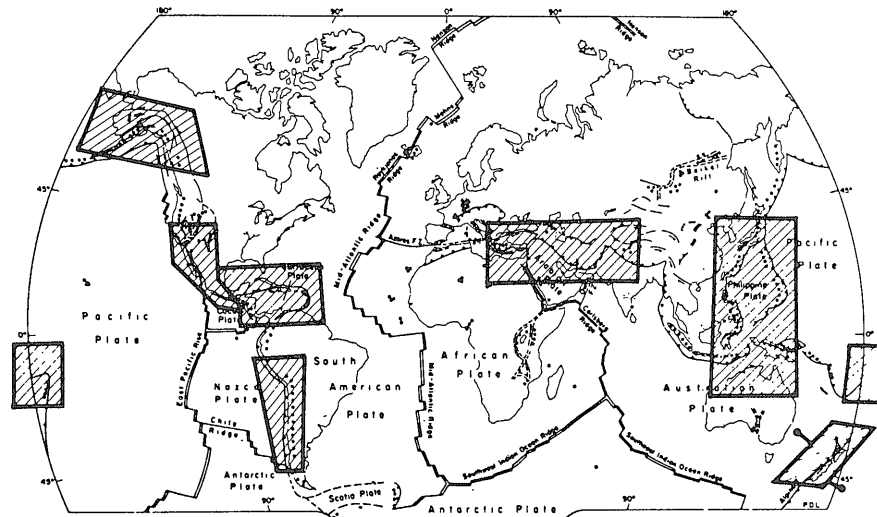


図4 地域的変形観測地域

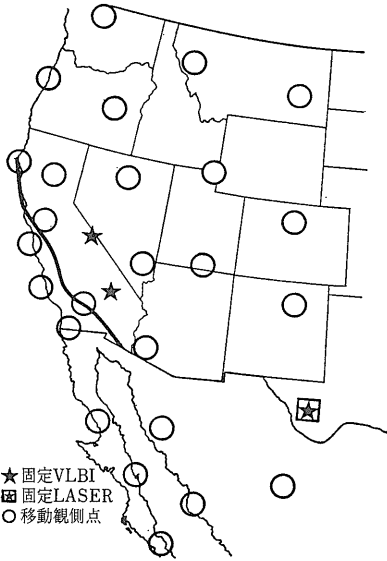


図5
北アメリカ
地域的ひず
み観測網

変形がかなりの範囲に及ぶものと考えられているが 実際には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。サンアンドレアス断層は連続的クリープ性の運動をしている。本断層については予期される変形域をカバーするように200~500km間隔の移動 VLBI あるいはレーザー測距点が設けられることになっている(図-5)。これらの測距点の間20~100 km 間隔の測点の位置決定は 維持費のかからない別の方法で補完される。

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 大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5cm/yrと推定されている。ここではベニオフ帯がよく発達しベー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18cm/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上しているところである。ここでは 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20m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

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なった傾向がある。したがって この地域的変形観測は 数1000kmの大きさのプレートよりは小さい数100km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 その具体的万策は

- a. 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-4)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

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

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中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11cm/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至っている。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: 超長基線電波干渉計 (VLBI) 実験特集号 電波研究所季報 vol. 24. no. 130
 Minister et al 1974: Numerical Modelling of Instantaneous Plate Tectonics. Geophys. J. Roy. Astron.

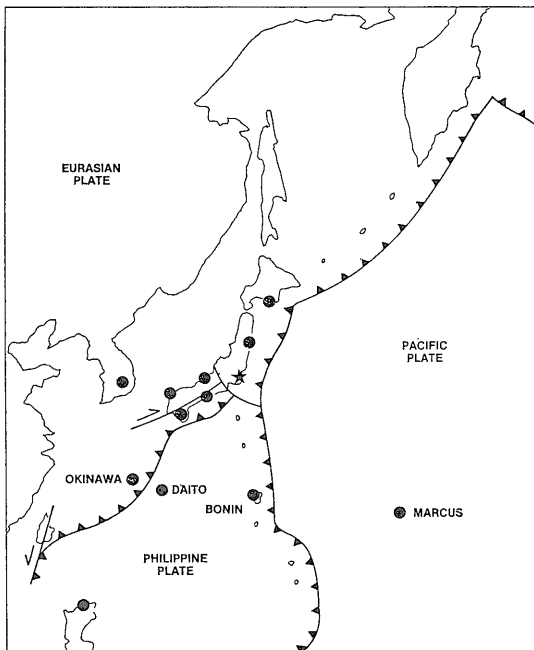


図6 日本周辺の地質構造と移動観測点の配置提案

Soc. vol. 36. pp.541~576.

NASA 1979: Radio Interferometry Techniques for Geodesy. NASA Conf. Publ. 2115, 4939.

NASA 1979: Application of Space Technology to Crustal Dynamics and Earthquake Research. NASA Tech. paper 1464, 257P.

土屋 淳 1982: 宇宙と測量. 測量. vol. 32. no. 2. pp. 12~16.

弓 滋. 1982: 宇宙技術を用いた地殻変動観測. Restec. no. 8, pp. 4~7.

地学と切手



オーストラリアの宝石切手

1973年から74年にかけてオーストラリアで5種6枚の宝石切手が発行された。いずれも宝石とその原石が図案となっている。同時により低額の海洋生物5枚が発行されている。

6c: クリソプレース (Chrysoptase) 玉髓の1種美しい緑色を生じ 蛇紋岩中に細脈となって産する。天然での産出は少ないが オーストラリアは ソ連のウラル カリフ

P. Q.

オルニア ニュージランドと並んで世界の特産地のひとつ

7c : めのう Agate

8cと9c: 蛋白石 Opal

9c : パラ輝石 Rhodonite

10c : スターサファイヤ コランダムの一種 サファイヤ中にルチルの針状結晶を含んだもの。c軸に垂直にカットして6条の星彩効果を出している