

解 説

4. KSP 計画における SLR システム

4.1 KSP 計画における SLR

吉野 泰造*¹ 国森 裕生*² 高橋富士信*³

(1995年10月16日受理)

4. SATELLITE LASER RANGING SYSTEM FOR THE KEY STONE PROJECT

4.1 SATELLITE LASER RANGING IN THE KEY STONE PROJECT

By

Taizoh YOSHINO, Hiroo KUNIMORI, and Fujinobu TAKAHASHI

An SLR system developed for the Key Stone Project has the following unique features. 1) Remote controlled operation from the central station for daily observation, 2) An easy and accurate calibration system by the ground targets for collocation. Collocation with VLBI and SLR in four stations in the Tokyo metropolitan area will significantly improve the global reference frame.

[キーワード] SLR, 遠隔制御, コロケーション,

Satellite laser ranging, Remote control, Collocation.

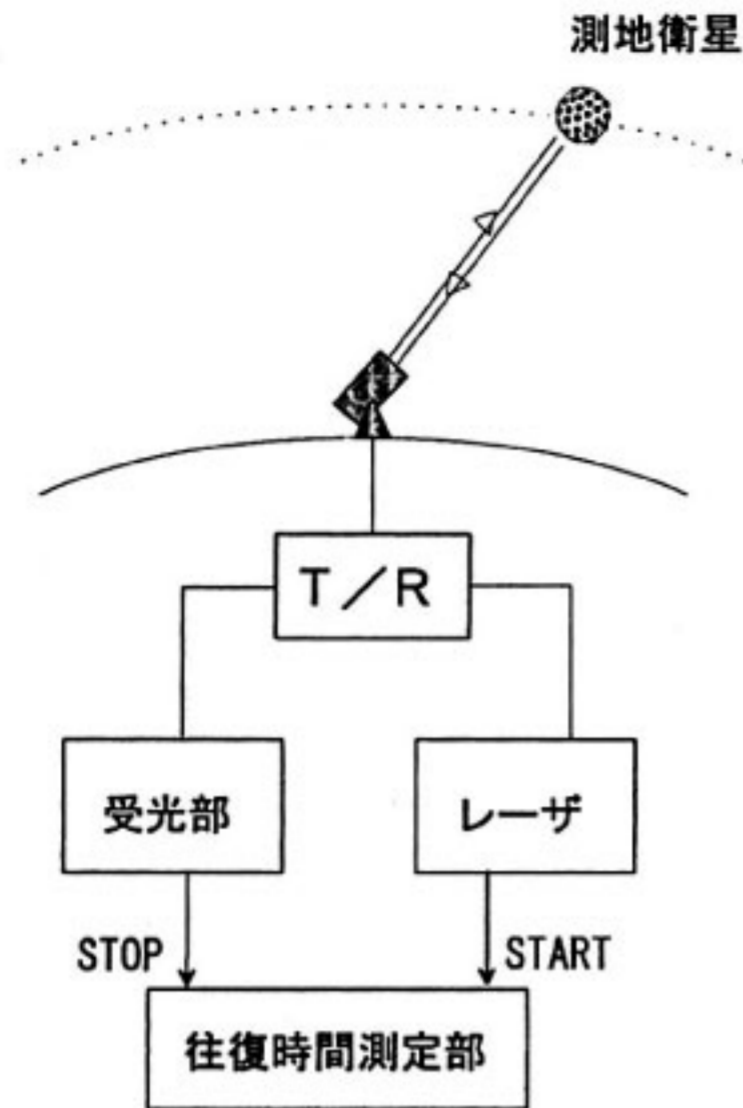
1. はじめに

KSP 計画は、首都圏の広域地殻変動を、連日、数 mm の精度で精密観測するため整備された。このため、現在得られる最も高精度な宇宙測地技術である VLBI (超長基線電波干渉計) と SLR (衛星レーザー測距) 技術を駆使し、4つの観測局をデジタル通信回線で結んだ効率的な運用を行う。特に通信総合研究所では、VLBI に関して 1977 年の国内 VLBI 基礎実験以来、技術開発を行い、SLR に関しては 1990 年の小金井の汎用望遠鏡局 (口径 1.5 m) での SLR 観測以来、能動モードロックレーザー、赤外レーザー等の R&D 実験を重ねている。小金井局の 1.5 m 鏡は多目的望遠鏡であるため、連日観測という本計画の主旨から、地殻観測網の展開のため 4 基の専用システムが設置される。首都圏における地殻変動観測が急がれることから SLR システムの整備は、1995 年度に 4 局同時に実施されることとなった。

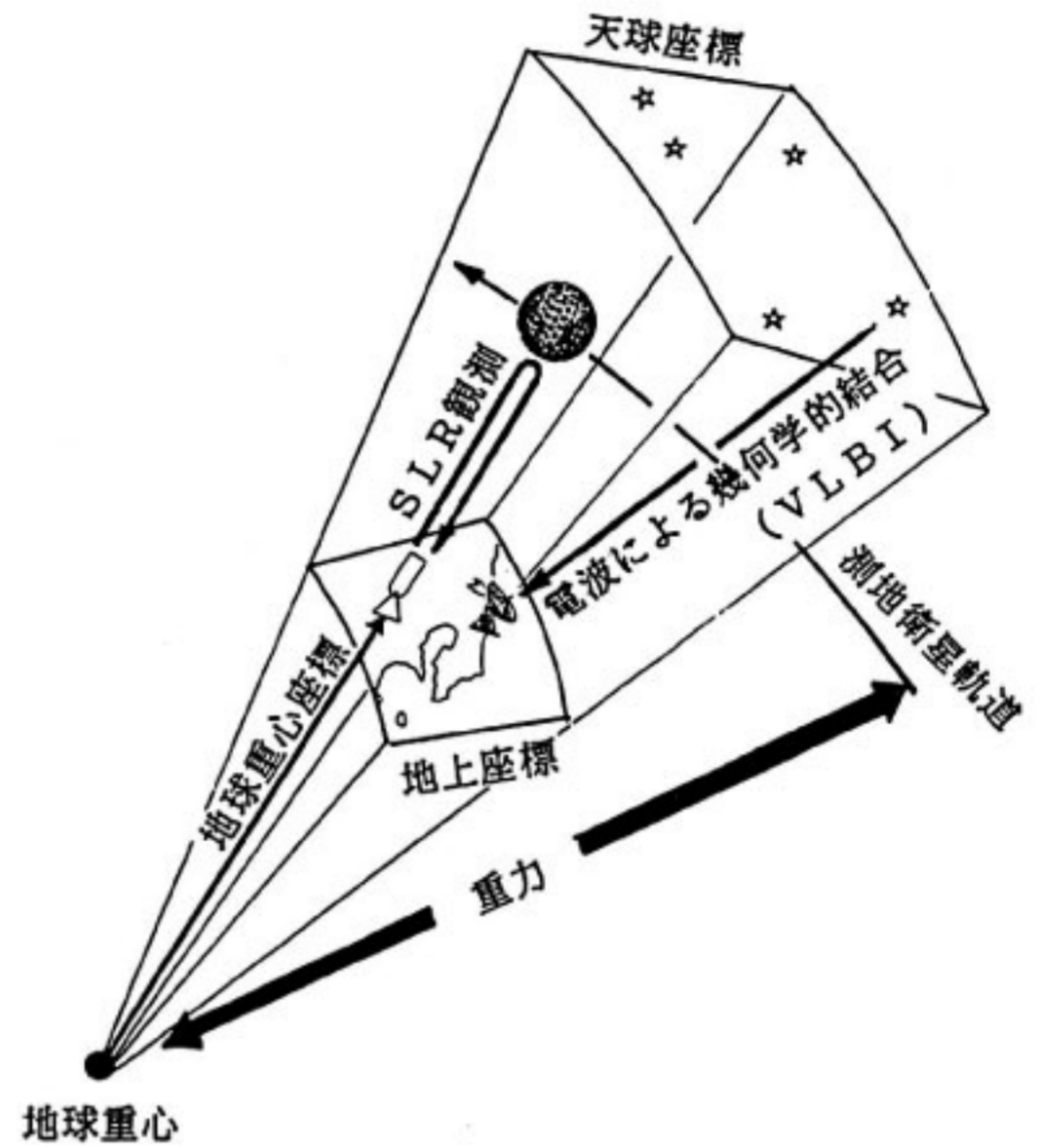
2. SLR 観測の特徴

SLR 観測では地上局から発した超短光パルスを衛星上で反射させ、再び地上局へ帰るまでの往復時間を計測する (第 1 図)。その時間は距離に換算し測距量として軌道解析に用い、精密軌道を媒介に測位等に利用される。測距精度の向上には光パルスの半値幅を短くすることが重要であり、KSP の場合 30 ps 以下を予定している。また、SLR は衛星軌道を基準としたレンジングであるため地心座標系で地球重心から見た局位置が測れ、天体電波源の位置を基準にした慣性座標系での測位を行う VLBI と独立な原理に基づく (第 2 図)。こうした点で対照的な VLBI 観測と SLR 観測は相補的な関係にあると言える。いずれの技術を用いても、現状では鉛直成分の決定精度は水平成分の数倍劣化するが、SLR は基本的に測距技術であるから、局内バイアス等の校正を十分に行えば、天頂を通過する衛星に対する観測からは局の鉛直方向の位置情報が得られる。この点は、低仰角観測が鉛直成分決定で重要な VLBI 観測と性格の異なるところであろう。

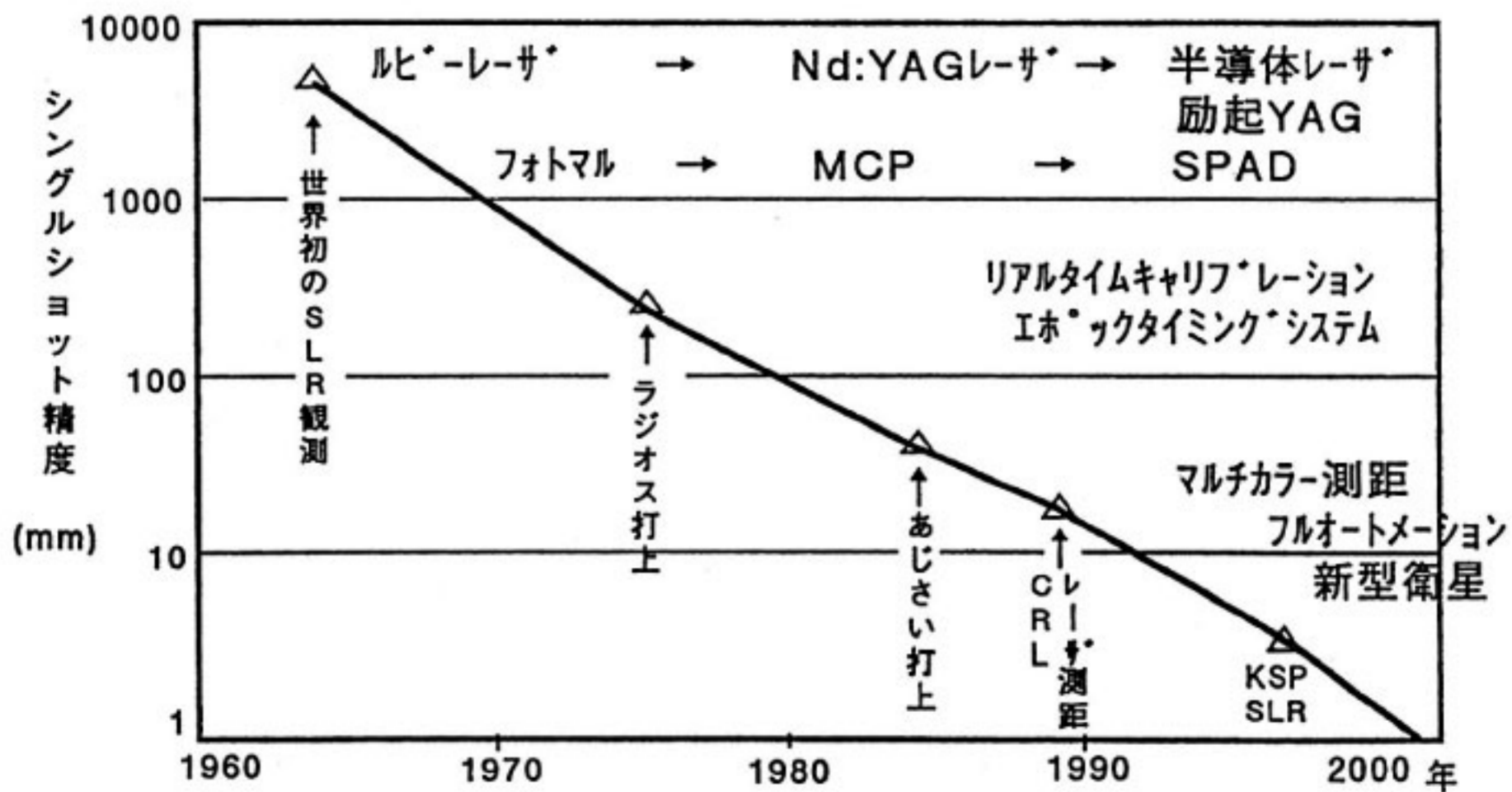
*¹ 標準計測部 時空技術研究室*² 標準計測部 時空計測研究室*³ 標準計測部



第1図 SLR 原理図



第2図 VLBI 測位と SLR 測位の関係

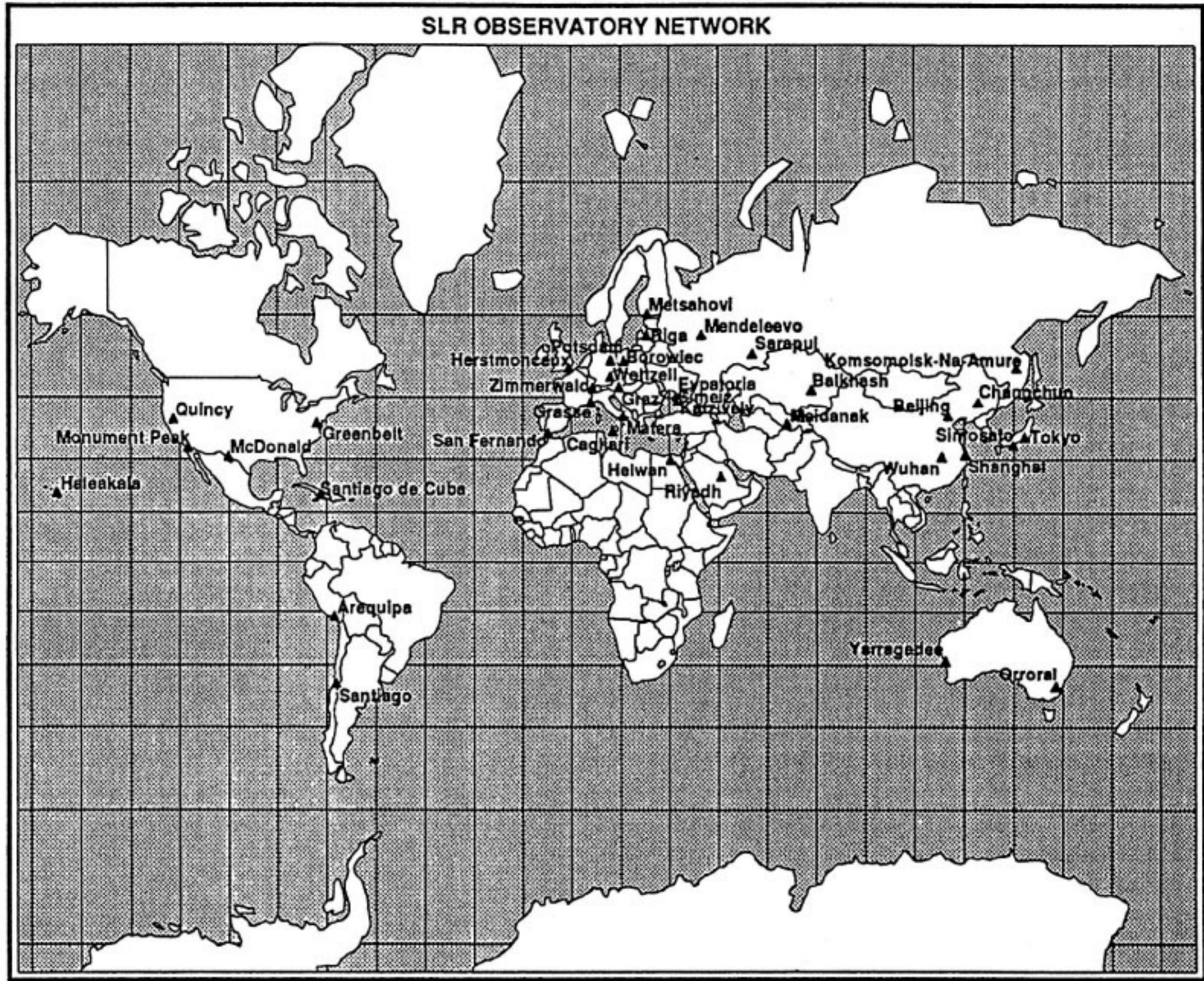


第3図 精度向上の経過

SLR の先駆的な実験として、1960年代にはNASAのGSFCでRbレーザーによる衛星までの測距が数mの精度で行われた。その後、観測精度は、年を横軸にとるとログスケールで直線的に改善されてきており、その著しい進歩は驚異的である(第3図)⁽¹⁾。また、この進歩と相まって、グローバルな観測局が増加し、現在では第4図⁽²⁾のように観測局が広く展開されており、移動局を加

えるとその活動はさらに広範囲なものである。

観測データはデータ解析局(これまでは欧米)に集中されるのが原則である。従って、観測局を結ぶ同時観測を特にプログラムしないでも定常観測データのやりとりから国際的な局間の位置関係が明らかとなる。ただし、観測する衛星の種類や、その観測頻度により得られる結果に若干の相違が出ることは考えられる。また、SLR観



第4図 国際SLR観測網

測の泣き所である天候依存性は毎日のデータ取得を保証はしない。必ずしも同時観測を必要としないという点はVLBI観測と性質が異なり、プレート運動等の巨視的挙動をモニタするのに都合がよい。

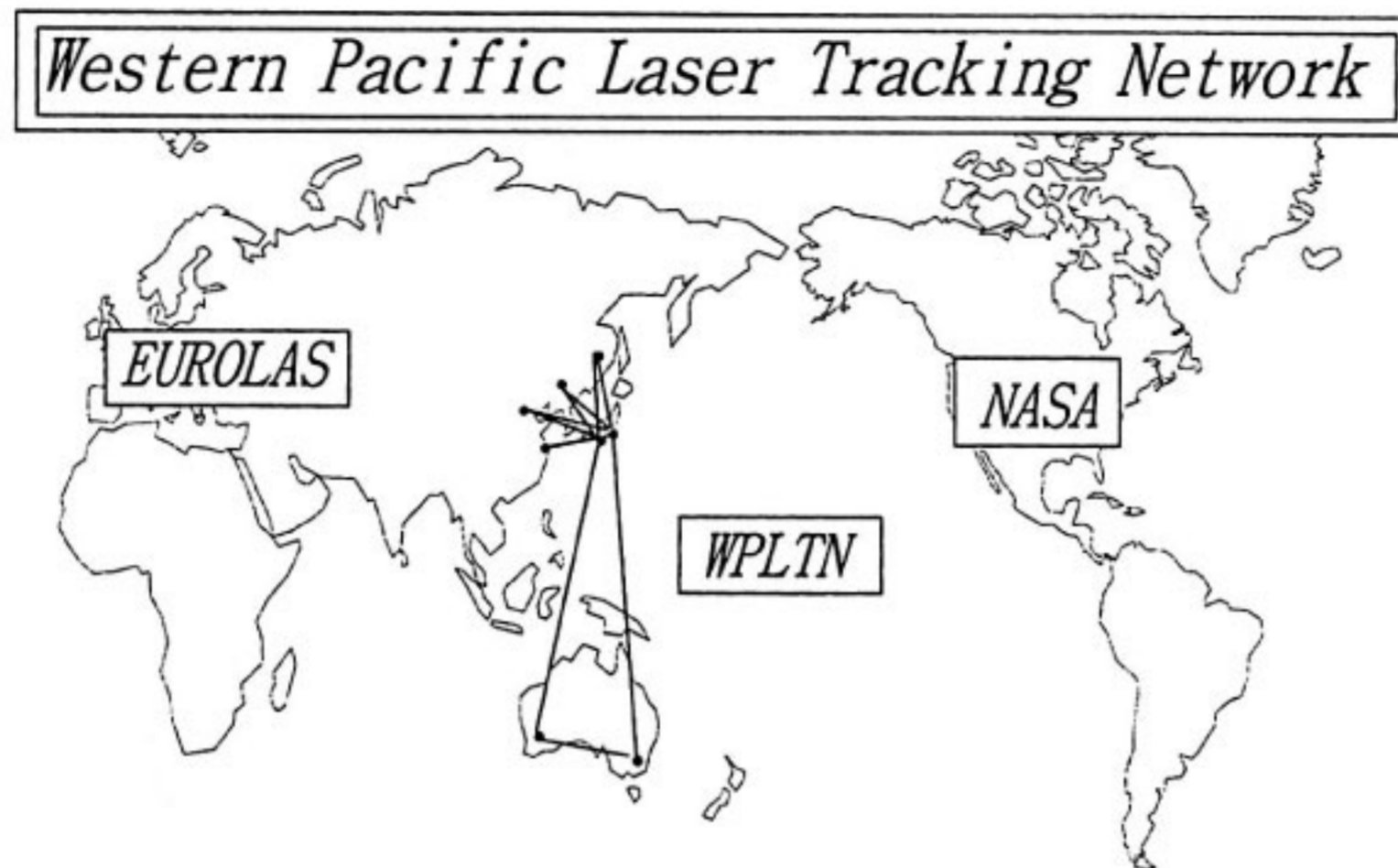
SLR測地で位置の基準とするのはCCR（コーナークューブリフレクタ）を搭載した衛星軌道である。測地衛星の数が限られていた時代は、衛星配置の偏りから基線成分の決定精度にも偏りが出たり、地球重力場のマップも高精度化が困難であった。しかし、LAGEOS-I衛星に対するLAGEOS-II衛星、あるいはETALON-1衛星に対するETALON-2衛星などは、軌道配置に工夫がなされており、測地観測に好都合である。また、TOPEX/POSEIDONやERS-1などのいわゆるリモート・センシング用衛星へのCCR搭載も、軌道の精密決定が主目的ではあるものの、ターゲット衛星の増加が地上測地の観測条件を向上させていることは間違いない。

西暦2000年には測距対象となる衛星の数は20を越すと予想される。なお、1988年の全世界のSLR観測パス数は1万以下であったが、1993年で3万パスを越すに到っている。

3. 世界のSLR研究動向

米国のNASAはCDP計画（地球力学計画：1991年終了）を核として、技術開発を進めてきた。そして、次世代の計画として、SLR 2000⁽³⁾と呼ばれるシステムを開発中である。これは、観測精度の向上とともに観測システムの小型化と無人化による運用コスト低減を目標としている。

観測網としては、グローバル観測網に対し広域観測網として、欧州でのWEGENER/MEDLAS（Working-group of European Geo-scientists for the Establishment of Networks for Earth-science Research/MEDi-



第5図 WPLTN 観測網

terrestrial LASer ranging) が知られている。アジア太平洋網としては、1994年11月に豪州キャンベラで通信総合研究所が主催したWPLS (Western Pacific symposium on satellite Laser ranging network Symposium) ワークショップ⁽⁴⁾で設立が決議されたWPLTN (Western Pacific Laser Tracking Network) (第5図) があげられるが、活動は緒についたばかりであり、今後、日本、中国、豪州、ロシアを中心に発展が期待される。

4. KSP 計画における SLR システム

システムの設計にあたり、計画の目標からして実績のあるシステムを中心に検討を進めたが、近い将来を見越したシステムの改善も視野に入れている。4局の観測システムはすべて同一のものとし、4式の観測システムに加え、さらに1式の可搬局を整備する。これは、システム校正、システムトラブル時のバックアップ機能、さらにはKSP網以外の観測点での緊急観測対応を可能とする。

KSPでは数mmの測位精度を達成目標としている。このため、SLR観測ではレーザーパルスの超短光化を進めており50ps以下を目指している。また、高精度測位のため、望遠鏡駆動軸が直交する基準点の安定性を確保する必要がある。そこで、外気温、風圧の影響を避けるため、望遠鏡を設置する観測棟は二重構造とし温度、湿度を制御している。

KSP計画では観測用レーザーはシステム性能を左右するので実績を重視する必要がある。1.5m鏡での観測で採用したYAGレーザー方式を採用する。運用面では今後の連日観測のため4局のオペレータに大きく依存するシ

ステム作りは避けた。当初は各局にオペレータを配置した観測で性能を確認し、最終的には、各局のインテリジェント観測機能を生かし小金井中央局から1人のオペレータで通信回線を通じ遠隔制御できる設計とした。また、衛星の初期補足に他の局の情報を取り込むなどの工夫がなされ、運用形態は単に1局のSLR運用を4倍したのとは大きく異なる。こうした意味で、KSP用SLRシステムでは信頼性を確保しつつ挑戦的な開発を行っている。なお、無人運用に伴うレーザーの安全対策にも十分留意した設計となっている。

KSPの観測点はいずれも関東平野に位置し高度が100m前後であるため、シーイングの条件に恵まれてはいないが、これは地殻変動観測目的のため致し方ない。これを克服するため、まず望遠鏡の開口径75cm口径の望遠鏡を設置する。また、マルチカラーシステムによる大気遅延の補正が望まれるが、開発途上であるため、YAGレーザーによる532nmのみの観測を行い、将来の精度向上を容易に図れるようにした。

信頼性の高い観測点を提供するためには、周辺に安定な基準点を用意し、VLBI基準点を含め、SLR基準点とこれらの地上基準点をを結ぶことで真のコロケーション観測点としての機能を十分に果たす必要がある。SLRでは地上ターゲットとして基準点設備にCCRを備え、この点をレーザー測距観測で直接に参照する。これは、VLBI基準点と地上基準点を結ぶ場合と大きく異なる。

5. 波及効果

グローバルな基準座標系の構築に宇宙測地技術観測点、すなわちVLBI、SLR、GPS等の観測点のコロケー

ションの重要性は従来から叫ばれていた。しかし、国際的に見ても、観測点間の距離が大きく離れている例が多く、その座標結合には各観測技術で期待される以上の誤差が考えられ、有効性には疑問があった。今回、KSPの4局によりアジア太平洋地域で最も充実したコロケーション点を実現することは重要である。さらに、KSPでの連日の観測は、座標系の維持に必要な高頻度の観測の繰り返しの条件を満たしており、その信頼性は高い。

基準座標の高精度化は、近年地球温暖化に伴い、VLBIもふくめ海水準の変動観測にも大いに有効であり⁽⁵⁾、GPS観測網とも協力しつつ環境問題にも寄与していくことが望まれる。

6. ま と め

KSP計画におけるSLRシステムとして、これまでの通信総合研究所の開発、観測実績に立ち、21世紀をにらんだものを開発している。そのため、超短光パルスレーザーによる高精度化と通信回線を利用した各局運用の集中制御化を同時にねらっている。特に、4局の遠隔制御による運用は、4つの観測局の単なる集合ではなく通信回線により有機的な結合がなされたネットワーク型SLR観測の威力を発揮するものと考えられる。

また、KSPにおけるSLR観測を通じた、WPLTNの推進はアジア地域における高精度な基準座標系の展開を可能とし、衛星による宇宙航行技術等の発展を促すこと

になろう。

米国では、SLR 2000と呼ばれる21世紀をにらんだ技術開発が進行中である。いわゆる第3世代のシステムからの脱皮を図るものである。KSP計画でも、SLR開発の世界的な動向でもあるシステムの小型化、オペレーション費用低減のための自動化、遠隔制御、安全対策等に十分配慮した設計となっており、今後の技術協力により、さらなる発展が期待される。

参 考 文 献

- (1) 国森, “地殻変動観測の高精度化に向けて—ピコ秒衛星レーザー測距システムの研究開発—”, 第89回通信総合研究所研究発表会予稿, 平成7年11月.
- (2) NASA CDDIS Bulletin Vol. 10, Issue 5, 1995.
- (3) Proceedings of Symposium on Western Pacific Satellite Laser Ranging Network (WPLS' 94), Canberra, 7-10 November, 1994.
- (4) Degnan, J.J., “SLR 2000”, Satellite Laser Ranging in the 1990's, Report of the 1994 Belmont Workshop, NASA Conference Publication 3283, February 1994.
- (5) 吉野, 高橋, 栗原, “郵政省通信総合研究所の計画(宇宙測地技術による海水面変動精密観測へのアプローチ)”, 月刊地球, 168号, Vol. 15, No.6, 1993.

