

4.2.7 解析ソフトウェア

大坪 俊通* 雨谷 純*
(1995年10月16日受理)

4.2.7 ANALYSIS SOFTWARE

By

Toshimichi OTSUBO, and Jun AMAGAI

Functions of the CRL software CONCERTO for Keystone laser ranging analysis are introduced. A European data set was analyzed with the software. Station coordinates were stabilized within 1 cm in the best case for 15-day Lageos analyses using multi-satellite and short-arc technique. It is expected that the Keystone data analysis will determine station coordinates more accurately.

The calibration system in the Keystone laser ranging project can reduce errors of system delay to a few millimeters and can detect local site displacement around ground targets.

[キーワード] レーザ測距, 宇宙測地学, 軌道解析.

Laser ranging, Space geodesy, Orbital analysis.

1. はじめに

1960年代から現在に至るまで、レーザ測距技術は測地学・宇宙工学・地球物理学など広い分野において新しい見識をもたらしてきた。通信総合研究所が開発している首都圏広域地殻変動観測は、レーザ測距の測地学における新しい応用の一形態である。約100 km四方の範囲に、観測局と衛星間の測距（以下、観測局と衛星などの目的物との測距を単に「測距」と呼ぶ）の正確さ5 mm程度の観測局を4局配備し、連日の観測を行おうとするものである。

このような狭い範囲にレーザ測距局が集中して置かれることは世界にも例がなく、また4局すべてが同一機関に属し観測条件・観測スケジュールなどを統一できることで、従来に比べて飛躍的に高いデータ取得効率が期待される。こうしたシステムにより、観測可能な限り毎日測距観測を行い、解析結果を公表できるシステムを構築しなければならない。本稿では、本観測システムの特長を生かした解析ソフトウェアの開発、および比較的観測局が集中しているヨーロッパの測距データの予備的な解析について議論する。

本観測システムでは、測距の正確さの追究が重要視さ

れている。特にシステム遅延量の誤差は、観測局の位置決定に直接影響する。また、レーザ測距局の原点と周辺の基準点との位置関係を監視することは、導かれた測地解を検証する際に不可欠である。このため、各局のシステム遅延量および局近傍における局原点位置の決定法についても言及する。

2. 衛星測距データの解析

本節では、首都圏広域地殻変動観測の解析ソフトウェアとして用いるCONCERTOの概要と特徴的な機能を紹介し、比較的レーザ測距局が集中しているヨーロッパの測距データの解析と首都圏広域地殻変動観測への応用について述べる。

2.1 軌道解析ソフトウェア CONCERTO

通信総合研究所では、レーザ測距データ解析のためのソフトウェアCONCERTOの開発を行っている⁽¹⁾。開発環境は、ダイナス社GAIA 300 AXP (CPU: DEC Alpha 21164 300 MHz) 上のMicrosoft C++である。柔軟なソフトウェア設計になっており、解析条件の設定などを解析者が容易に変更することができる。モジュール・クラスなどの管理も厳格であり、プログラマも新しいモデルの導入などが簡単にできる。第1表にその概要を示す。

首都圏広域地殻変動観測データの解析を行うため、

* 標準計測部 時空計測研究室

第1表 CONCERTO の採用するモデル.

項目	CONCERTOで採用するモデル
諸定数	IERS Standards 1992 に準ずる
数値積分	Cowell 法 (Oesterwinter)
地球回転・局位置の潮汐変動	IERS Standards 1992 に準ずる
地球回転パラメータ	IERS Bulletin B
地球重力場	GEM-T1, JGM-3
固体地球潮汐・海洋潮汐	IERS Standards 1992 に準ずる
太陽輻射圧・経緯項	IERS Standards 1992 に準ずる
惑星暦	JPL DE/LE-245
衛星の軌道 (初期値)	IRV Orbit (University of Texas, Allied Signal, Royal Greenwich Observatory などが提供)
地球固定座標系	ITRF 92
大気伝播遅延	Marini and Murray
相対論補正	IERS Standards 1992 に準ずる

CONCERTO に改良を加えたものを用いる。

一般に従来のレーザ測距用解析ソフトウェアでは、数カ月～数年単位である一つの衛星だけを扱ってきた。本計画では、データが取得できる限り連日の解析結果を公表することになっているため、非常に短い期間のデータだけを使って、複数の衛星への測距データをまとめて処理することを可能にした。

各局の取得パス^{*1}をグラフ形式に可視化し、解析者は解析に必要なデータの組をマウス操作で選択できる。また、ソフトウェアが自動的に最適なデータ組を抽出することもできる。解析条件の選択・変更も、直観的なマウス操作で可能であり、従来必要であったファイル編集などの手続きは省略される。

観測ソフトウェア⁽⁴⁾によって、測距データはファイルサーバに蓄積される。この解析ソフトウェアは、ファイルサーバからデータを得て、解析処理終了後解析結果をファイルサーバに書き込む機能を有する。

2.2 ユーロッパ局の解析

本計画で用いる CONCERTO の改良版の有用性を確認するため、現在世界においてレーザ測距局がもっとも密集しているヨーロッパ地方の解析例を示す。第1図に示すように、定常局がほぼ 1000 km 四方に存在する。首都圏広域地殻変動観測網ではほぼ 100 km 四方でありなおスケールの違いが大きいが、Zimmerwald (Crustal Dynamics Project Number : 7810), Grasse (7835), Graz (7839), Herstmonceux (7840), Wettzell (8834), 以上5局のデータを用いて予備的な解析を行った。

ヨーロッパ地方は気候が複雑であり全地域同時には好天候が得られにくく、また第1図に挙げた局はすべて異



第1図 ユーロッパ地方のレーザ測距局.

なる機関により運用されている。このため、4局以上がある衛星の共通パス^{*2}を数週間にわたって継続して取得しているような、本計画の観測運用で想定する例は見つけられなかった。しかし、1994年10月4日から18日までの15日間は、Lageos-1, Lageos-2の2衛星については、共通パスは少ないが期間を通して各局とも比較的多くのデータがあり(第2表)、ここではこの期間のパスの解析について議論する。

測距データはNASAが作った120秒単位の normal point データを用い、重み付けはすべての normal point について均一にした。衛星の軌道は1日ごとに軌道6要素、太陽輻射圧係数、進行方向の加速度係数を推定した。観測局位置は経験的にもっともレンジバイアスが小さいと思われる Herstmonceux 局のみを ITRF 92 (IERS Terrestrial Reference Frame 1992) に固定し、他の4局は3成分すべてを推定した。各局のレンジバイアスは0とし、推定しない。

1つの局の座標だけを固定したことから、水平成分のうち基線方向に直交する成分については、衛星軌道を短

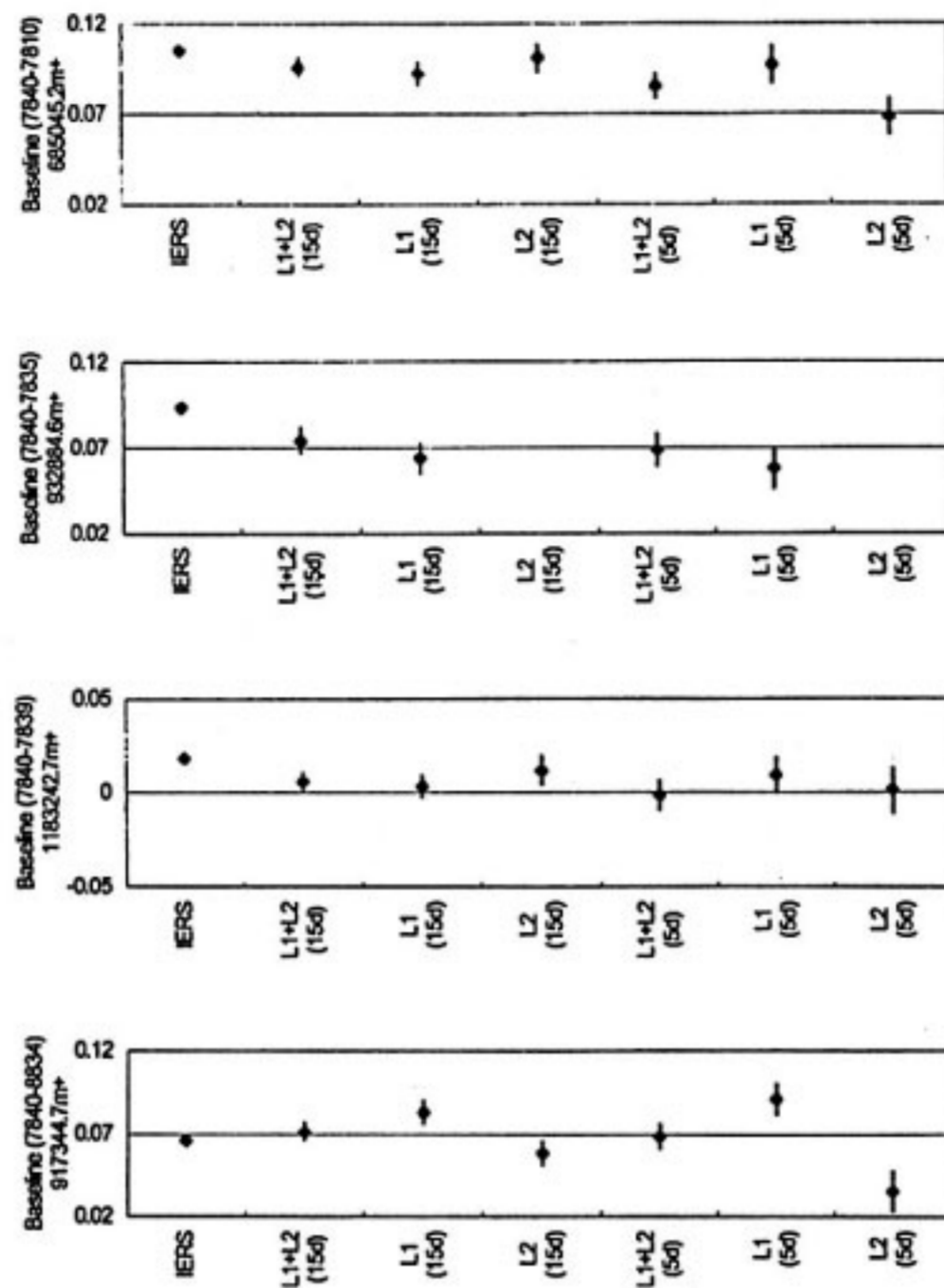
第2表 1994年10月4日から18日までのヨーロッパのレーザ測距局のデータ取得状況.

	1994/10/4~18	うち、1994/10/14~18
Zimmerwald (7810)	18/12	6/ 7
Grasse (7835)	11/ 4	6/ 4
Graz (7839)	28/16	10/ 7
Herstmonceux (7840)	33/24	9/ 7
Wettzell (8834)	34/28	17/10

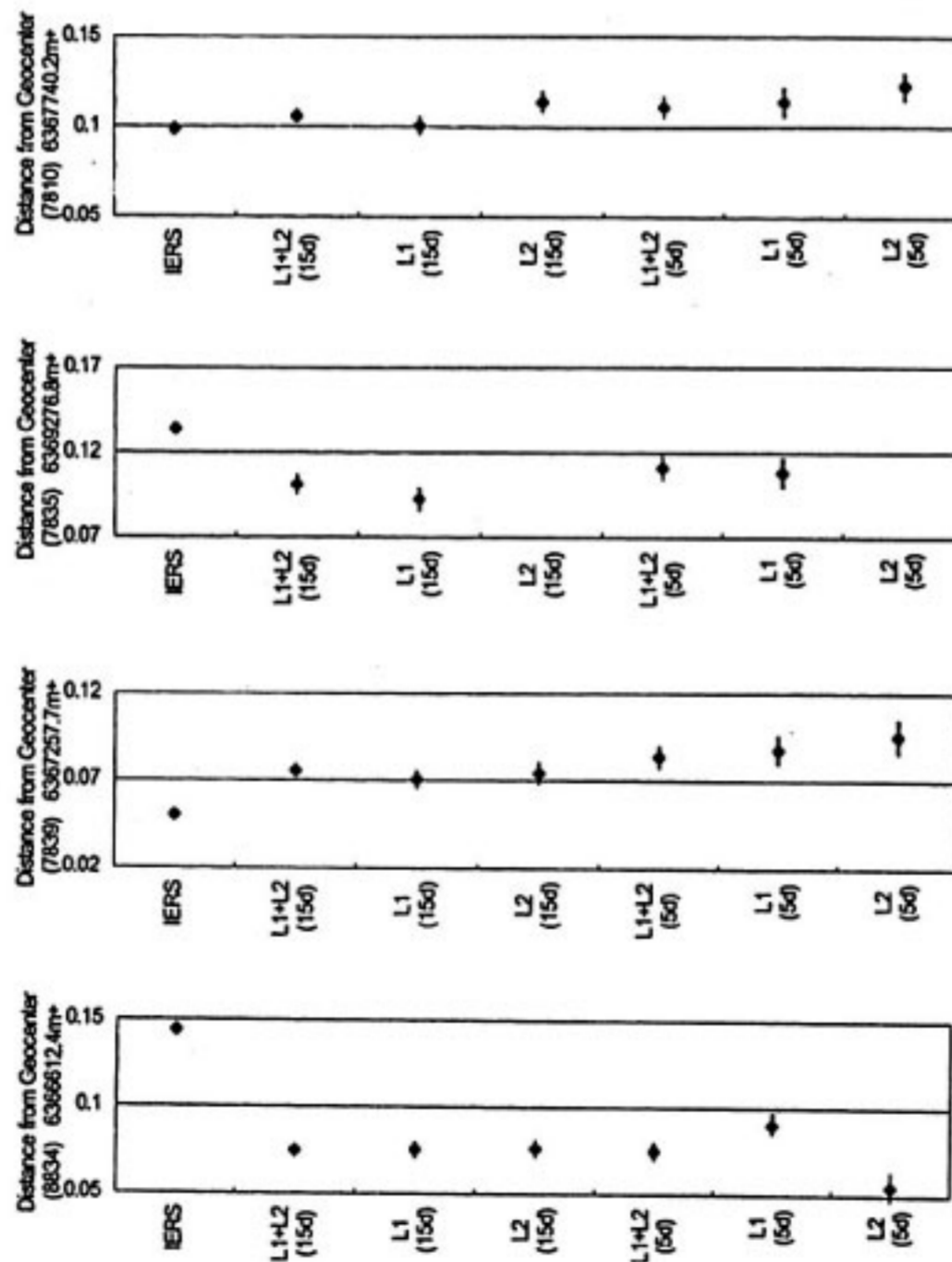
パス数 (Lageos-1/Lageos-2)

*1 パスとは、ある観測点から見て、周回衛星が現れて消えるまでの軌跡をいう。

*2 ここでは、「共通パス」とは複数の局から共通可視域にあるパスを指す。



第2図 解析方法による各局・Herstmonceux局間の基線長 (15d: 1994年10月4日からの15日間, 5d: 1994年10月14日からの5日間, L1+L2: Lageos-1とLageos-2の複合解析, L1: Lageos-1のみによる解析, L2: Lageos-2のみによる解析).



第3図 解析方法による各局座標の地心距離 (15d: 1994年10月4日からの15日間, 5d: 1994年10月14日からの5日間, L1+L2: Lageos-1とLageos-2の複合解析, L1: Lageos-1のみによる解析, L2: Lageos-2のみによる解析).

時間に区切った場合、座標系の回転のため一般に解が安定しない。よって、ここでは、各局の局位置解の、水平方向のうち Herstmonceux 局との基線に直交する方向の解は取り上げず、Herstmonceux 局への基線方向および鉛直方向の二成分に限定して議論する。観測局位置に関する解析結果を第2,3図に示す。それぞれ、Herstmonceux 局からの基線長、地心からの距離を、使った解析法別にプロットしたものである。第2,3図とも、横軸の一番左が ITRF 92 の値、二番目が15日間のデータを使って Lageos-1 と Lageos-2 をまとめて解いた場合、三番目・四番目が同時期のデータをそれぞれ Lageos-1, Lageos-2 のみについて解いた場合の結果である。第2表に示すように、この15日間のうち特に最後の5日間には同時観測パスが多かったため、その5日間のデータだけを使った解析も行った。第2, 3図中、右側の3つが5日分の解析結果で、それぞれ左から、Lageos-1 と Lageos-2 の複合解、Lageos-1 のみ、Lageos-2 のみによる解である。Grasse については Lageos-2 の観測パスが少なかったため、Lageos-2 単独での解析はできなかった。すべての場合において、最小二乗推定後の標準偏差はほぼ1cmであり、これを全観測量、すなわち全 normal point データの誤差として用いている。

15日分の解析による3つの解法では、基線長で2.5cm、地心距離で1.5cmの範囲で解が一致している。Graz 局は中でも安定しており、二成分とも1cm以下で一致している。Lageos-1 のみの解析と、Lageos-2 のみの解析は互いに全く独立であり、それらからこの程度近い解が得られることは意義深い。これに比べ、5日分の解析では3つのケースで全般に解のばらつきが大きい。基線長で3.5cm、地心距離で5.5cm程度のばらつきが見られる。このように、エラーバーに現れないシステムティックな誤差の影響は、データが多くなると平均化されるが、データが少ない場合には解析結果に敏感に反映される。Wettzell 局は5局のうちもっとも局内遅延量の誤差(レンジバイアス)の変動が大きな局であるが、解のばらつきももっとも大きい。

ITRF 92 と CONCERTO との解を比べると、水平成分である基線方向よりも、鉛直成分に差異が見られる。ITRF 92 も1cm程度の誤差をもつ可能性があるが、それを真値として考え、また鉛直成分が一致しない局にレンジバイアスが存在すると仮定すると、レンジバイアスが水平方向にはキャンセルするが鉛直方向にはオフセットを与えるという性質も一つの原因として考えられる。

2.3 首都圏広域地殻変動観測への展望

ここに挙げたヨーロッパの局については、局によって

あるいはパスによって1~5cmのレンジバイアスがあることが報告されており、上の解析での1cmを超える局位置解のばらつきの一つの要因であると考えられる。首都圏広域地殻変動観測では、次節で述べる校正システムにより数mmの正確さで局内遅延量を求めることが可能であり、レンジバイアスによる局位置解の誤差は数mm程度に抑えられることを期待している。

また、衛星の軌道のモデル化が不十分なことに起因する誤差を抑えるには、観測方程式がランク落ちしない範囲で軌道要素などのパラメータをできるだけ短い時間に区切って推定することが有効である⁽⁵⁾⁽⁶⁾。しかし、上のデータの組の場合、3局以上から観測されている共通パスは全体の20%以下であり、1日以下に区切ることは不可能であった。これに対し、首都圏広域地殻変動観測の局配置・運用形態では、ほぼ全パスが全局から観測されることが予想される。条件が良い場合には、全衛星で1局あたり1日30パス程度が観測できる。したがって、軌道推定を1パスごとあるいは2パスごとに行うことが可能になり、衛星軌道の誤差が観測局位置に与える影響を軽減できる。

大気遅延補正モデルの誤差により、最大1cm程度の測距値が誤差を含んでいることが報告されている⁽⁷⁾。本観測システムでは、1局のみであるが2波長による測距が将来可能な設計になっている。2波長による測距値の差の精密計測を定常的に行うことができれば、大気遅延量を直接推定することが可能になり、観測局位置解も安定する。

このように、首都圏広域地殻変動観測の解析結果を厳密に評価するには、実観測によるデータを待つ必要があるが、ヨーロッパ解の結果の例から、天候などの条件がそろえば1日から数日のデータにより、少なくとも上の結果をしのぐ精度・正確さで相対的な局位置を導くことが可能である。

3. 地上ターゲット測距データの解析

近年の光・電子技術の発達とともに、レーザ測距システムの精度、つまり測距値残差のばらつきの程度、は飛躍的に向上し、現在では1cmを切る局も現れている。精度の向上により、前節でも触れたように、従来無視できると考えられていた誤差要因のうち特にオフセット誤差を与えるものの影響が問題になってきている。すなわち、精度よりも確度が重要になってきている。一つは大気遅延量の推定における誤差⁽⁷⁾⁽⁸⁾であり、一つは衛星の形状と測定タイミングに起因する誤差であり⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾、もう一つが本節でとりあげるレンジバイアスと局所的な局原点位置の変動である。

本レーザ測距システムでは、局内遅延量や基準点・局原点位置を監視するための様々な工夫が施される。望遠鏡3次鏡付近にはコーナーキューブリフレクタ (Corner-cube reflector; 以下 CCR と略す) が局原点と等価な位置に設置され、測距観測中はリアルタイムで局内遅延量を知ることができる⁽¹¹⁾。一方、観測塔周辺に置かれる基準柱および観測塔下部室内に置かれる水準基準点にも CCR が設置され、望遠鏡からの直接・間接の測距が可能である⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。特に、望遠鏡鏡筒先端部のプリズムにより光線を折り曲げて水準基準点を測距することは、直接視準できない仰角 -90° への測距を意味する。観測運用では、これらの地上ターゲットへの測距を定期的に行うことになっている。このデータを使って、望遠鏡駆動軸直交点にあたる局原点^{*}1の位置を監視すると同時に、局内遅延量も推定することができる。以下、その方法を示す。

基準柱・水準基準点に置かれる CCR (以下、外部基準点と呼ぶ) n 個のうち、 i 番目の外部基準点の任意の座標系における3次元座標を (x_i, y_i, z_i) とし、 n 個の外部基準点の位置は正確に決められているものとする^{*}2。 i 番目の外部基準点に対する生の (局内遅延量を含んだ) 測距値を ρ_i とすると、

$$\rho_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} + \delta \quad \dots\dots(1)$$

と表せる。ここで、局原点位置の座標を (x_0, y_0, z_0) 、局内遅延量 (長さの次元) の値を δ とした。この4つが未知のパラメータであるならば、それらによる偏微分は容易に求められる。

$$\begin{aligned} \partial \rho_i / \partial x_0 &= -(x_i - x_0) / \rho_i \\ \partial \rho_i / \partial y_0 &= -(y_i - y_0) / \rho_i \\ \partial \rho_i / \partial z_0 &= -(z_i - z_0) / \rho_i \\ \partial \rho_i / \partial \delta &= 1 \end{aligned} \quad \dots\dots(2)$$

第3表 基準柱・水準基準点に設置される CCR の予定位置および未知パラメータの推定精度。局原点の鉛直下方の地面との交点を原点とし、水平面を xy 平面、鉛直上方を z 軸の正の方向とした。水準基準点の CCR については、実効的な値を示した。測距精度を 1 mm と仮定した。

	小金井				鹿島				三浦				館山			
	E	N	U	δ	E	N	U	δ	E	N	U	δ	E	N	U	δ
局原点	0.0	0.0	10.0		0.0	0.0	5.5		0.0	0.0	5.5		0.0	0.0	5.5	
基準柱の CCR	11.7	0.0	10.0		-20.5	18.5	2.5		-5.0	18.8	2.5		2.6	11.1	2.5	
基準柱の CCR	-8.8	-18.8	2.5		0.0	-17.0	2.5		-17.5	-9.8	2.5		-13.0	3.1	2.5	
基準柱の CCR	-13.4	21.0	2.5		21.5	22.0	2.5		24.5	-20.5	2.5		2.0	-4.0	5.0	
水準基準点の CCR	0.0	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	
水準基準点の CCR	0.0	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	
推定精度	0.88	0.85	1.16	0.76	0.99	0.74	1.06	0.68	0.88	0.83	1.06	0.69	0.99	0.79	1.13	0.74

単位: m (原点, CCR の位置), mm (推定精度)

4 パラメータ全てを推定する場合においても、 $n > 4$ であれば(1), (2)式を用いて最小二乗法で解くことができる。

全局における外部基準点の位置、および局原点の位置を第3表に示す。このデータを用い、測距値の誤差を 1 mm と仮定して、最小二乗法による推定誤差を見積もると、全局にわたって、水平成分で 0.7 ~ 1.0 mm、鉛直成分で 1.1 ~ 1.2 mm、局内遅延量は 0.6 ~ 0.8 mm となる。

従来のレーザ測距システムでは、外部基準点に対する局原点位置の変動を監視するために、望遠鏡筒をとりはずして測量を行うなどの労力が必要であった。さらに、局内遅延量の絶対値を求める際にも、直接局原点位置を参照することは不可能で、あらかじめ行われる局原点・外部基準点間の測量結果を真値として、一つの外部基準点への測距から決められていた。本システムにおいては、周囲の複数の外部基準点に対して測距をすることにより、自動的かつ定期的に局原点位置の監視が可能になっている。外部基準点間の位置関係は測量にて決定されなければならないが、それは局位置原点への測量に比べるとはるかに容易であり正確である。また、局原点位置と等価な点に対して直接測距すること、複数の外部基準点へ測距すること、の2通りの方法により局内遅延量を求めることが可能であり、信頼度を高め、レンジバイアスを抑制することが期待される。

4. ま と め

軌道解析ソフトウェア CONCERTO を改良し、複数衛星・短期間データの処理を可能にした。これにより、15日間のヨーロッパの局の Lageos-1, Lageos-2 の測距データを解析して、基線方向・鉛直方向において 1 ~ 2.5 cm の範囲で解の再現性が見られた。首都圏広域地

^{*}1 レーザ測距では、パルス信号が局原点から出て局原点に戻ってくるまでの時間間隔を測距データとする。
^{*}2 現実には、1 mm 程度の測量誤差が伴う。

殻変動観測が開始されれば、これを上回る正確さでの観測局間相対位置関係の決定が期待される。

レーザ測距データの絶対値の正確さを高めるため、首

都圏広域地殻変動観測計画では局原点と等価な CCR への測距, および複数の外部基準点への測距という 2 つの方法で, 局内遅延量を数 mm の精度で決めることができる。また, 外部基準点と局原点との位置関係に変化が生じた場合でも, それを容易に検出できる較正システムになっている。

参 考 文 献

- (1) T. Otsubo, H. Kunimori, B. Engelkemier, and F. Takahashi, "Error control of numerical integration in SLR analysis software CONCERTO," *Journal of the Geodetic Society of Japan*, **40**, No.4, pp. 347- 355, 1994.
- (2) D.D. McCarthy (Ed.), "IERS Standards (1992)," International Earth Rotation Service, 1992.
- (3) C. Oesterwinter, and C.J. Cohen, "New orbital elements for moon and planets," *Celestial Mechanics*, **5**, pp. 317- 395, 1972.
- (4) 大坪俊通, 後藤忠広, "4.2.6 観測ソフトウェア", *通信総研季*, **42**, 1, pp.177-182, Mar.1996.
- (5) A. Sinclair, and G. Appleby, "A short-arc method for determination of station coordinates and baselines applied to the Mediterranean area," *Contributions of space geodesy to geodynamics : crustal dynamics*, AGU Geophysical series **23**, pp. 389- 396, 1993.
- (6) A. Milani, M. Cappino, A. Rossi, G. Catastini, and S. Usai, "Local geodesy by satellite laser ranging : a European solution," *manuscripta geodaetica*, **20**, pp.123- 138, 1995.
- (7) C.S. Gardner, "Correction of laser tracking data for the effect of horizontal refractivity gradients," *Appl. Opt.*, **16**, No.9, 1977.
- (8) J. Marini and C. Murray, "Correction of Laserlaser tracking data for atmospheric refraction at elevations above 10 degrees," NASA Technical Report, X- 591- 73- 351, 1973.
- (9) G.M. Appleby, "Satellite signatures in SLR observations," *Proceedings of 8 th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation*, pp.2- 1 - 2 - 14, 1992.
- (10) T. Otsubo, H. Kunimori, and B. Engelkemier, "Satellite signatures on multi-photon laser ranging system," *Proceedings of 1994 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, pp. 1055- 1062, 1994.
- (11) 野尻英行, 国森裕生, "4.2.3 望遠鏡光学系", *通信総研季*, **42**, 1, pp.159-166, Mar.1996.
- (12) 雨谷純, 三木千紘, "4.2.2 観測塔および周辺施設", *通信総研季*, **42**, 1, pp.151- 158, Mar.1996.

