

A-3 オゾン層破壊関連大気微量物質の衛星利用遠隔計測に関する研究

(2) 地上衛星間レーザー長光路吸収法による大気微量分子の観測に関する研究

③ 地上衛星間レーザー長光路吸収システムの総合評価に関する研究

研究代表者 郵政省通信総合研究所 地球環境計測部 光計測研究室 板部敏和

郵政省通信総合研究所

地球環境計測部 光計測研究室 板部敏和・水谷耕平・青木哲郎
標準計測部 時空計測研究室 国森裕生

平成7-9年度合計予算額 65,312千円
(平成9年度予算額 21,746千円)

要旨

衛星と地上間や衛星と衛星間にレーザーを伝播させ、レーザー伝播路の長光路吸収を利用してその伝播路中にある大気微量成分を求める方法は、伝播路を大変長くできるため、非常に高感度であり、レーザーを用いる地球環境の新しい測定手法として期待されている。この衛星利用のレーザー長光路吸収法による微量成分測定は、高精度、高頻度で測定を行えることから、グローバルな大気中の微量成分測定に極めて有効である。本研究では、衛星を利用するレーザー長光路吸収による大気微量成分観測の総合的な測定精度の評価に関する研究及び実際に実験を行うために必要な衛星の軌道を高精度に予測する手法の開発を行った。

キーワード 衛星追尾、逆反射器、長光路吸収、レーザー伝播、測定精度

1. 序

衛星と地上間や衛星と衛星間にレーザーを伝播させ、長光路伝播路の吸収を利用してその伝播路中にある大気微量成分を求める方法は、伝播路を大変長くできるため、非常に高感度であり、レーザーを用いる地球環境の新しい測定手法として期待されている。この方法による地球大気微量成分の測定精度には、測定用に用いるレーザーの安定性や検出系の雑音、伝播路での大気揺らぎによる強度変動、衛星追尾の精度等が寄与してくる。実際の衛星地上間でのレーザー伝搬による長光路吸収実験のデータを利用して、衛星利用の長光路吸収による大気微量成分の測定精度を決める要因についての研究が本課題の目的である。このため、衛星軌道予測を高精度に行うレーザー測距ネットワークのデータによる軌道決定手法、衛星搭載RISからの受信光の揺らぎと測定精度の評価に関する研究を行った。

2. 研究目的

地上と衛星間でのレーザー長光路吸収計測手法を用いて地球大気環境問題にかかわる大気微量分子を高精度に測定する場合は、レーザー安定性、検出器の雑音、伝播路大気の揺らぎ、さらには衛星の追尾誤差が衛星等によって、衛星から反射されて帰って来るレーザー光の受信強度は時間的に変動し、微量成分の測定精度に影響を及ぼす。1996年に打ち上げられたADEOSには、地球大気環境にかかわる

大気微量分子を測定するための地上・衛星間レーザー長光路吸収測定用リトロフレクター(RIS:Retro-reflector In Space と呼ばれる)が環境庁によって搭載された。本研究はRISを用いる大気微量成分測定の実験における測定精度の評価を衛星地上間での長光路吸収実験のデータを用いて行うことを目的としている。このため、衛星軌道予測を高精度に行うレーザー測距ネットワークのデータによる軌道決定手法、衛星搭載RISからの受信光の揺らぎと測定精度の評価に関する研究を行った

3. 研究方法

RISの実験を行うためには、まず衛星の捕捉と高精度追尾が必要であり、このような高精度の衛星追尾が可能な望遠鏡システムと高精度衛星追尾のための衛星軌道予測を必要とする。望遠鏡の高精度な追尾では、望遠鏡架台のエンコーダーの周期誤差が追尾誤差の大きな要因となるため、通信総研の望遠鏡においてその誤差の除去のための改良を行い、測地衛星を用いてレーザー光の反射光撮像の予備実験を行った。また、衛星の捕捉、高精度追尾には高精度な軌道予測が必要であり、レーザー測距ネットワークのデータによる軌道決定手法の技術を開発した。

レーザー光の反射を利用した衛星の軌道決定実験は、地球物理学的現象解明のための超精密測地技術として世界的に行われている。国内では海上保安庁水路部で1980年代初頭から和歌山県下里において上記目的のための定常観測を実施しているほか、通信総研では1990年から、小金井の宇宙光通信地上センターにおいて1.5m望遠鏡を利用した衛星レーザー測距システムを開発し、高度20000kmまでの主要な測地衛星の測距実験に成功している。このようなレーザー測距局は北米、欧州を中心に世界で20カ所以上稼働しており、衛星の軌道予測、データ集配システムが確立しつつある。しかし、一般に、地球観測衛星は測地衛星に比べ、高度が低く、衛星の形も複雑なため(特に、予報エポックを長期間経過後の)軌道予測精度が悪いことが経験的に知られており、地球物理モデルや推定アルゴリズム等のソフトウェア面の改良と初期捕捉や追尾を自動化しオペレータの負担を軽減するためのハードウェア面での革新の必要性が指摘されていた。本研究では、RISセンサーを有効に活用し、地上の光学追尾用レーザーを測距用として用いたレーザー測距データを利用し、衛星の軌道を準リアルタイムに高精度に予報する技術を確立した。また、衛星の軌道決定は一局だけでなく、全世界のレーザー追尾ネットワークのデータを利用することがより有効であるため、国内、国外の衛星測居をおこなっている機関と連携をとり、ADEOSのような地球観測衛星のレーザー測距ネットワークを国内外での利用技術を確立した。

地上と衛星間を利用するレーザー長光路吸収計測手法を用いて地球大気環境問題にかかわる大気微量分子を高精度に測定する場合は、レーザー安定性、検出器の雑音、伝搬路大気の揺らぎ、さらには衛星の追尾誤差が衛星等によって、衛星から反射されて帰って来るレーザー光の受信強度は時間的に変動し、微量成分の測定精度に影響を及ぼす。RISを用いる大気微量成分測定の実験における測定精度の評価を衛星地上間での長光路吸収実験のデータを用いて行った。

3. 研究成果

(1) 宇宙光通信地上センター望遠鏡

① 望遠鏡システム概要

ADEOS搭載RISの追尾とこのRISを用いる長光路吸収実験には、通信総合研究所小金井本所北側敷地にある「宇宙光通信地上センター」の1.5m口径望遠鏡が使用された。この大型望遠鏡は、衛星間

の光通信研究を目的とし、さらにそれ以外の各分野の実験研究にも十分利用できるように作られたものであり³⁾、天体観測ともに地上一衛星間光通信実験や衛星レーザ測距を行うために衛星を追尾する機能を有している。また、この大型の望遠鏡とレーザーのような大型の実験機器を組み合わせるために、望遠鏡はクーデ光学系で望遠鏡がある2階のドーム室と1階のクーデ室が光学的に結ばれ、クーデ室には大型の機器を設置できる光学台が4つ設置されて、RISを用いる長光路吸収実験用装置も能動的追尾用機器とともにこのクーデ室の光学台の一つに設置される。望遠鏡の建物の概略図を図1に望遠鏡システムのブロック図を図2に示している。望遠鏡には20cm口径のガイド望遠鏡並びに同じ口径の軸はずしの反射型送信望遠鏡が鏡筒につけられてい。主望遠鏡は、モデファイドカセグレン、ナスミス、クーデと3種類の焦点を2次鏡を変えて選ぶことができ、送信望遠鏡へは10cm径のクーデパスの中央部に5cm径の小さな鏡(ピックアップ鏡)を挿入して光を取り出すことができるようになっている。

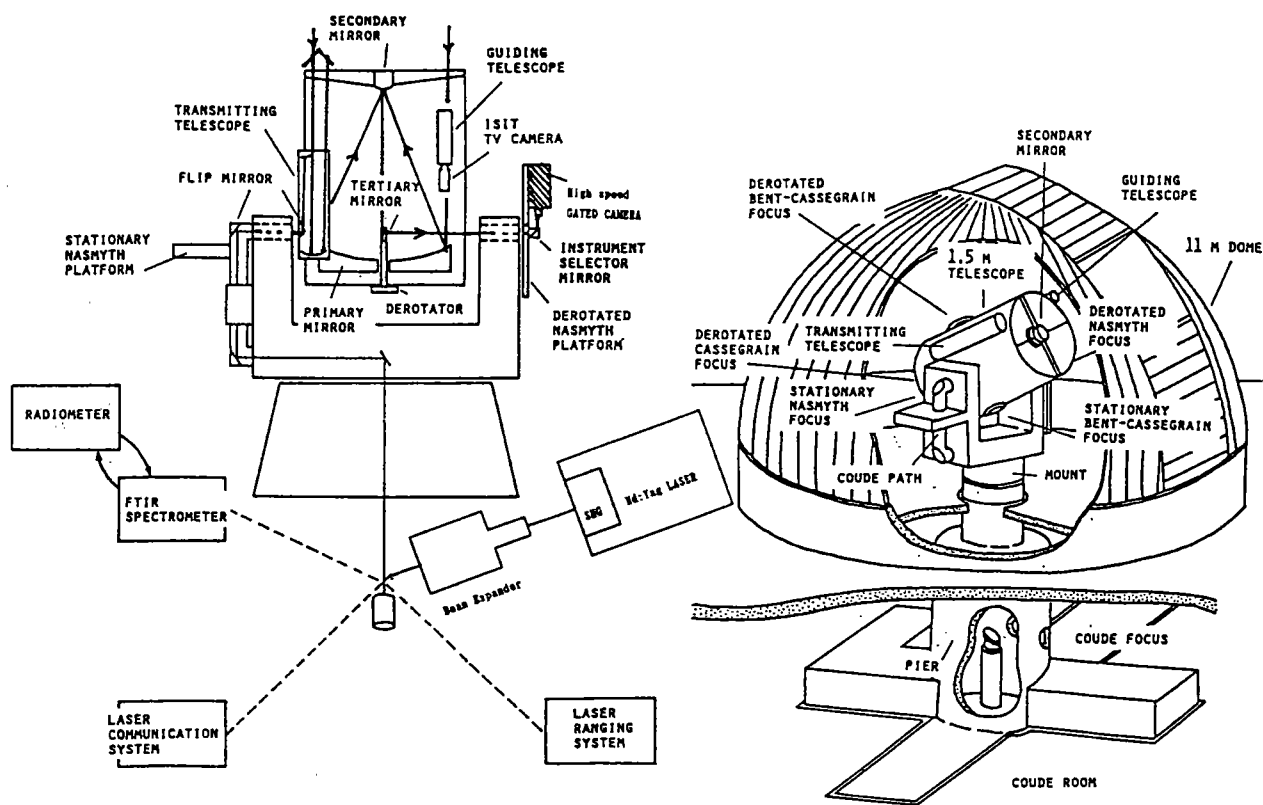


図2 宇宙光通信地上センター望遠鏡システムブロック図

図1 望遠鏡建物の概略図

② 測地衛星を用いる予備実験

宇宙光通信地上センターの衛星レーザー測距装置を用いて、わが国の測地衛星“あじさい”からのレーザー光の反射光撮像の予備実験を行った。実験に用いたレーザー、検出系、光学系の緒元を表1に、実験システムの構成を図3に示している。

表1 あじさいからの反射光撮像予備実験装置緒元

レーザー	検出系
モードロックNd:YAGレーザー倍波	ゲート付きイメージ増機能付きCCD
波長 : 532nm	画素 : 756x485
繰り返し : 10Hz	放射感度 : 35mA/W (550nm)
出力 : 100mJ/パルス	有効径 : 17.5mm
パルス幅 : 100psec	量子効率 : 17%
レーザー発振ジッター : 100nsec以下	ゲート : 3ns-連続、立ち上がり3ns

光学系

1.5m 望遠鏡 クーデ光学系 (送受信共通光学系)

衛星レーザー測距受信光学系

送受信切り替え : 回転ミラー

送信ビーム広がり : 32秒角 (150 μ rad) 以上

受信視野 : 32秒角 (150 μ rad)

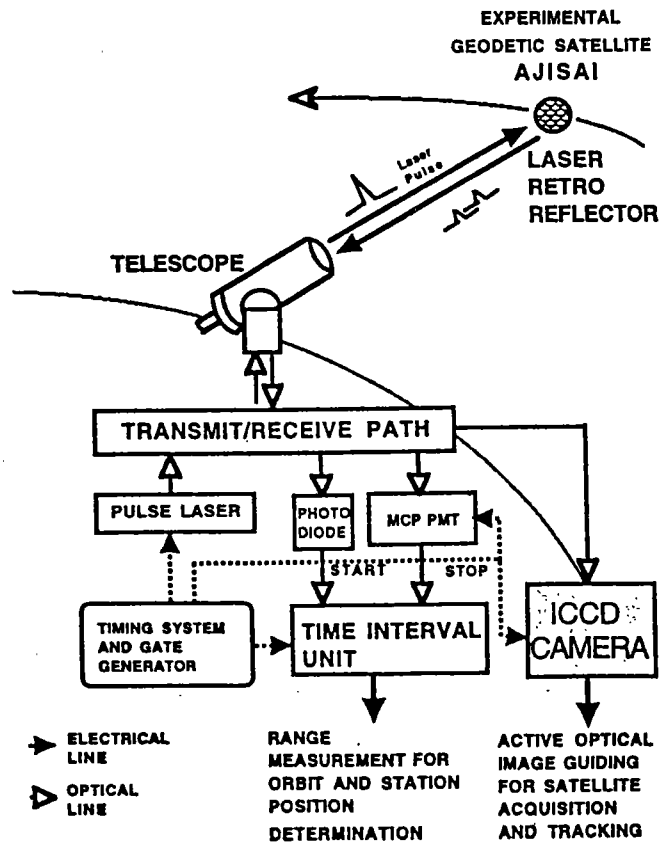


図3 撮像予備実験システム構成図

撮像装置からの信号は、テレビの画面でモニターすると共にビデオに記録した。“あじさい”からのレーザー反射光は約1分間、レーザーの発射に同期した点滅する信号を受信した。その時のビデオ信号から再生されたレーザー反射光の写真を図4に示している。図4の写真の左側の明るい所が“あじさい”からのレーザーの反射光であり、小さな明るい点は撮像装置であるCCDカメラの暗電流雑音である。

1.5m の望遠鏡を使って、送信ビームの視野内であれば測地衛星の逆反射器からのレーザーの反射光を受信できた。RIS で予測される受信強度の見積もりからレーザーの出力を4倍程度にして、衛星を $150 \mu \text{ rad}$ で捕捉、追尾できれば十分にADEOSの能動追尾は可能である。このため、次に述べるような追尾機能の改良を行った。

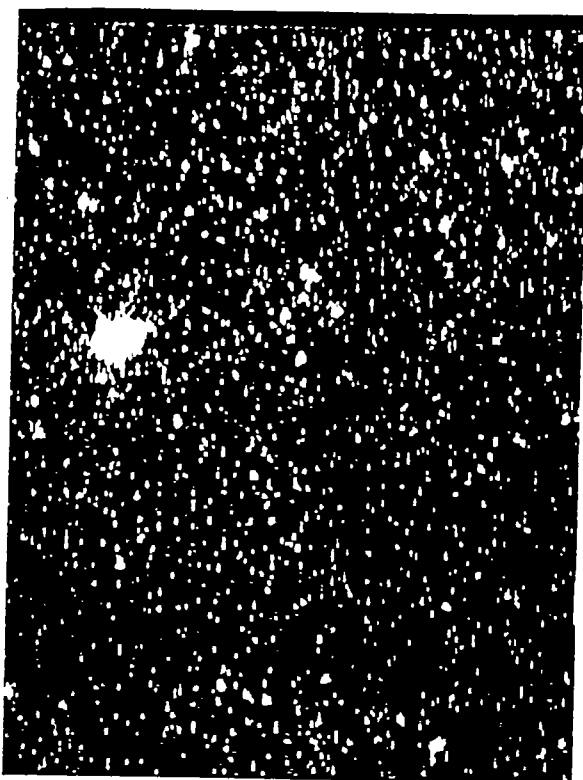


図4あじさいからの反射光の写真
(左側の大きな明るい所があじさいの
反射光)

③光学追尾機能高度化のための光学追尾装置の改良

ADEOS搭載RISの実験に備えて、「宇宙光通信地上センター」の光学追尾装置について以下の改良を行った。この結果、望遠鏡の絶対指向精度 1.4 秒角、追尾精度 0.6 秒角を達成し、測地衛星を使った追尾によって、現在得ることの出来るどの軌道予報値の誤差を含んで 200 μ rad 以下で追尾可能となった。主な、望遠鏡の改造点とそれによって得られた精度は以下の通りである。

(1) 追尾システムの改造点

① 指向・追尾システムの改良

- ア 冷却型CCDカメラと星像位置抽出システムによるスターキャリブレーション機能の自動化。
- イ スターキャリブレーション機能に連続追尾モードを追加とエンコーダごさの補正項の追加。
- ウ 望遠鏡光学系の重力たわみの補正項の追加

② 衛星追尾ソフトウェアの改良

- ア NORAD-2LINE形式平均軌道要素による追尾機能に加えて、IRV接触軌道要素、及びSAO形式平均軌道要素による追尾機能を付加し、3つの現在入手可能な起動要素による衛星追尾を可能にした。
- イ 衛星軌道に平行及び垂直方向にサーチする機能を追加した。

(2) 達成された指向・追尾精度

① 指向・追尾精度

- ア 絶対指向精度 1.37 秒角 (r.m.s) (改造前 7.2 秒角(r.m.s))
- イ 追尾精度 0.58 秒角 (r.m.s) (改造前 1.8 秒角(r.m.s))
- ウ エンコーダ誤差補正精度
 - 方位角軸 0.12 秒角 (Half Amplitude) (改造前 0.88 秒角(Half Amplitude))
 - 仰角軸 0.43 秒角 (Half Amplitude) (改造前 1.48 秒角(Half Amplitude))

② 衛星追尾精度

3つの形式の全によるAjisai及びLageosの測地衛星追尾において、使った軌道予報値の誤差も含めて、200 μ rad (40秒角) 以下が達成された。図5に方位角軸の追尾誤差を示している。図5aは、改造前であり、bは改造後のデータを示している。

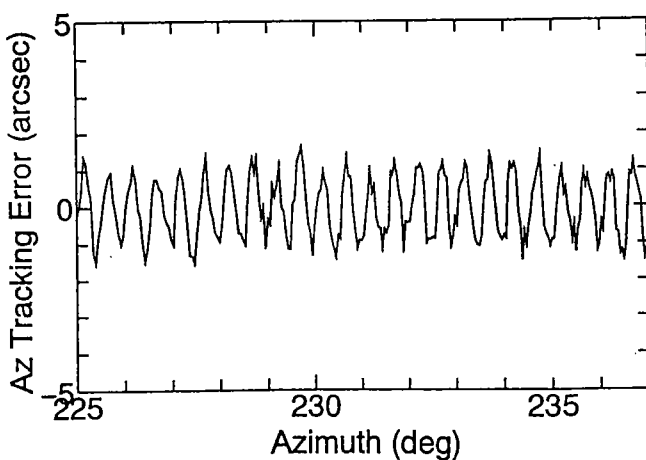


図5 a 改造前の方位軸の追尾精度

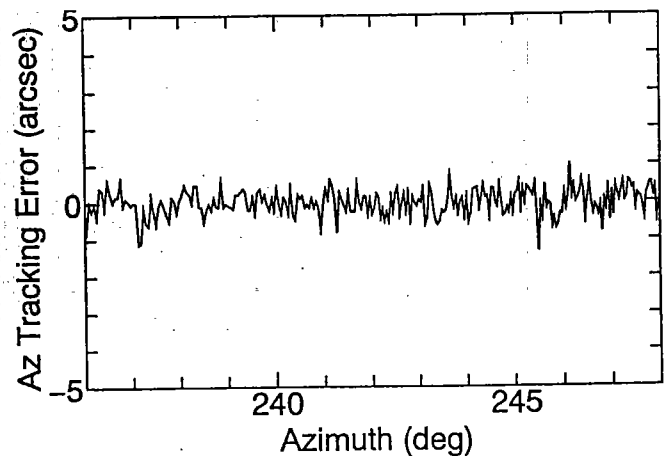


図5b 改造後の方位各軸の追尾精度

(2) 地上衛星間レーザー長光路吸収観測のための衛星軌道高精度決定技術

① 衛星レーザー測距の概要

ADEOS/RIS の大気観測用レーザー受信系は、東京都小金井市の通信総合研究所宇宙光通信地上センター1.5m光学望遠鏡に設置されている。地上衛星間レーザー長光路吸収観測では、大気微量成分の吸収スペクトルに応じた波長を観測するため、送信波長が受けるパス中の地上局と衛星の連続的な相対運動によるドップラーシフトを利用する。ADEOS の低軌道衛星は地上からの有効可視時間が高々3分間であり、初期捕捉とパス中の追尾の安定性がデータの品質を決定づける。従来、通信総合研究所では、大気観測用のレーザーとは別に追尾用レーザーを衛星に向けて照射しその像を望遠鏡視野の中でとらえ衛星の初期捕捉の短縮化を行う能動追尾システムを開発してきた。しかし、衛星の初期捕捉するためには、光学追尾用のレーザービーム内に衛星を導く操作が必要になり予報軌道が悪いと衛星像を得るまでのサーチ範囲が拡大し、オペレータに負担がかかることになる。

このため、本研究では追尾用のレーザーを用いて同時にレーザー測距を行い、衛星軌道要素のパラメータを改良するシステムを開発する。これによりあるパスで得られたデータから、次回パス中の追尾の安定性を確保できるほか、通信ネットワークを用いて他の時間帯に取得されたADEOSの他のレーザー局からのデータを用いて最新の軌道情報を得ることができる。本システムを応用すれば、もっとも最近、レーザー測距をおこなった世界の局の軌道情報を用いて、安定した追尾をおこなえる地球観測衛星のトラッキング網を構築することができる。

研究のステップとしては下記の順におこなった。

- 小金井宇宙通信地上センターにおいて、ADEOS衛星と同様な軌道条件をもつ欧州のリモートセンシング衛星に対するレーザー測距と軌道解析(調査)を行い、ADEOS衛星における予測精度、追尾精度、軌道決定条件決定の準備をおこなう。(平成7年度)
- 衛星の軌道決定において、物理モデルを更新するとともに、ロングアーク、ショートアークの軌道パラメータの推定をERS2、ADEOSの測距データを用いて行いその収束条件をしらべる。(平成8年度)
- ADEOS打ち上げ後、大気微量観測用に用いる望遠鏡と同一の望遠鏡でレーザー測距を行い、欧州のリモートセンシング衛星に対して実施した上記の研究との比較をする。(平成8年度)
- 予報値の入手から初期捕捉と軌道改良、改良結果の配信を含めた一連の処理を自動的に行うシステムのプロトタイプを開発し、運用をおこなう。(平成8年度、9年度)

② 欧州リモートセンシング衛星に対する測距条件の調査

ヨーロッパリモートセンシング衛星ERS-1(1991-1996)/ERS2(1995-)はコーナキューブを利用した軌道決定実験を1991年より同衛星に搭載されているマイクロ波海面高度計の校正のため実施している。表2にERSとADEOSの衛星諸元を示す。両衛星とも高度が同じ太陽同期軌道と同一な軌道条件を有している。ADEOSはコーナキューブの大きさから効率で6倍以上のレスポンスが得られる点で有利な一方、太陽パネルの大きさが大きいことによる太陽風の影響、コーナキューブの視野角が狭いことによる観測チャンスの減少など不利な点も予想された。

表2 ERS 1 / 2 と ADEOS の衛星諸元

衛星	ERS1/2	ADEOS
形状	本体：2 x 2 x 3 m 太陽電池パネル：2.4 x 1.2 m	本体：4 x 4 x 5 m 太陽電池パネル：3 x 2.4 m
重量	2.3 t	3.6 t (打ち上げ時)
姿勢安定方式	ゼロモーメントム3軸制御	ゼロモーメントム3軸制御
設計寿命	-	3年
軌道	太陽同期35日、165日 高度：800 km、傾斜角：98.5度 平均観測時間：7分	太陽同期41日再帰、 降点地方時10:30 高度：797 km、傾斜角：98.6度 周期：101分、平均観測時間：3分
コーナキューブ	プリズムアレイ方式 有効開口径：20 cm 有効波長0.35-0.8um	単一開口ミラー 有効開口径：50 cm、有効面積：1570cm ² 有効波長0.4-14um

ERS の軌道決定はヨーロッパ宇宙機関との協定の下、ドイツ GFZ/D-PAF が行っており、そのデータ取得状況は表3-Aのとおりである。1997年の例では、月平均で世界27局のSLR局が450パス（1パスは局の衛星可視時間分のデータ）を取得している。表3-Bには、GFZ/D-PAFの解析サマリーの例を示した。レンジバイアス推定後における各局のデータの品質（精度）は1-2 cm、衛星の軌道決定精度は平均的に10 cm程度で求められている。このようなデータ解析結果は多くの世界のレーザ局が参加した場合の典型例であり、ADEOS においては、国際協力のレベルがどの程度か未知数のこともあり、より少ないデータでどの程度の決定精度が出せるのか、その場合軌道決定後の予報の劣化速度等がどの程度あるのかが重要な課題となっていた。

表3-A 1997年のERS2のレーザ測距データ取得状況

Station	Month of Year													Total		
No.	局名	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	:	Total
1864	Maidanak2	8	5	4	5	3	14	9	12	10	6	7	1	:	84	
1868	Komsomolsk	-	1	12	5	-	-	-	-	-	5	2	-	:	25	
1870	Mendeleev	3	2	5	11	5	8	4	12	7	1	-	1	:	59	
1873	Simeiz	-	-	-	-	1	8	7	-	-	-	-	-	:	16	
1884	Riga	14	16	34	25	17	14	21	42	19	6	2	4	:	214	
1893	Katzively	-	-	-	-	-	2	3	-	2	-	-	-	:	7	
1953	Sant. Cuba	-	-	-	1	4	-	1	1	-	7	8	10	:	32	
7080	McDonald	14	8	16	11	13	15	14	13	21	20	23	12	:	180	
*																
7090	Yarragadee	-	-	7	16	14	21	19	19	29	35	25	37	:	222 *	
7105	Greenbelt	25	14	28	34	20	32	37	32	29	30	21	16	:	318	
*																
7109	Quincy	1	8	1	7	3	1	-	-	-	-	-	-	:	21	

*	7110	Monu m Peak	:	27	23	50	38	44	49	37	47	40	38	26	22	:	441
*	7124	Papeete	:	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	1	:	3	
	7210	Haleakala	:	16	19	12	26	19	17	15	17	22	27	10	18	:	218
*	7236	Wuhan	:	-	-	-	-	2	3	-	3	1	-	-	-	:	9
	7237	Changchun	:	-	-	18	26	15	25	28	15	23	30	31	5	:	216
*	7249	Beijing	:	5	1	2	17	24	17	11	4	4	8	1	-	:	94
	7308	Tokyo	:	2	5	-	2	2	-	-	-	-	-	3	4	:	18
*	7403	ArequipaT3	:	4	14	13	17	9	27	30	24	19	24	8	21	:	210
	7548	Cagliari	:	3	2	7	5	6	7	4	1	1	-	-	-	:	36
	7805	Metsahovi	:	2	8	29	16	17	5	7	19	25	4	2	1	:	135
	7806	Metsahovi	:	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	:	2
	7810	Zimmerwald	:	-	1	-	-	-	-	3	8	8	1	5	8	:	34
	7811	Borowiec	:	4	9	12	9	8	10	7	28	19	15	1	3	:	125
*	7824	S. Fernando	:	2	-	9	12	6	21	7	11	16	14	8	3	:	109
	7831	Helwan	:	-	-	-	-	10	19	19	9	7	-	-	-	:	64
	7832	Riyad	:	16	5	7	2	-	6	3	7	-	-	-	-	:	46
	7835	Grasse	:	20	36	37	34	30	14	20	29	37	19	11	21	:	308
*	7836	Potsdam	:	25	16	33	22	21	29	21	36	34	25	18	11	:	291
	7837	Shanghai	:	2	1	-	-	3	2	1	6	7	5	5	4	:	36
	7838	Simosato	:	5	8	3	1	3	8	3	7	7	-	-	2	:	47
	7839	Graz	:	9	47	36	30	42	14	27	32	55	24	23	16	:	355
*	7840	Herstmonc.	:	17	16	28	39	30	15	40	33	42	41	17	16	:	334 *
	7843	Orroral	:	13	2	12	37	23	18	38	37	18	36	25	29	:	288
*	7939	Matera	:	9	15	22	18	12	9	19	12	11	5	3	6	:	141
	8834	Wetzell	:	12	14	16	21	25	24	20	3	34	21	8	5	:	203
*	-----																
	Sum of passes		:	258	296	453	487	431	454	475	519	549	447	295	277	:	4941
	Sum of stations		:	25	26	26	28	30	30	30	29	29	25	26	26	:	

表 3-B ERS 2 の軌道決定解析 GFZ/D-PAF

ERS2-軌道解析サマリー：1996年10月の例				
	RMS fit:	SLR(cm)	PRA(cm)	PDO(mm/sec)
Orbit 1 (29.09.-03.10.96):		8.2	8.6	0.7
Orbit 2 (03.10.-09.10.96):		9.1	8.2	0.7
Orbit 3 (09.10.-13.10.96):		9.6	9.5	0.8
Orbit 4 (13.10.-17.10.96):		8.9	9.0	0.7
Orbit 5 (17.10.-21.10.96):		8.5	9.1	0.8
Orbit 6 (21.10.-26.10.96):		8.0	8.7	0.8
Orbit 7 (26.10.-31.10.96):		8.9	8.3	0.7
Orbit 8 (31.10.-05.11.96):		8.3	8.5	0.7
Mean:		8.7	8.7	0.7

ERS2-軌道解析 局サマリー：1996年10月の例							
Station 70900513 Yarragadee							
Date	Time	Length	Obs.	Rawrms	Polyrms	Range Bias	Time Bias
	[hh:mm]	[min.]		[cm]	[cm]	[cm]	[microsec.]
Oct. 16	14:53	7.0	29	17.3	2.8	(9.5)	29.6 +- 7.2
Oct. 17	14:26	2.2	10	4.8	0.1	(3.2)	(6.4)
Oct. 17	16:03	3.1	14	12.5	0.3	(-11.7)	(43.9)
Oct. 18	01:34	3.6	16	5.0	0.2	(1.0)	24.1 +- 6.5
Oct. 21	15:36	5.6	24	6.1	0.5	(3.7)	13.7 +- 3.6

Station 71100411 Monu. Peak (MOBLAS 4)							
Date	Time	Length	Obs.	Rawrms	Polyrms	Range Bias	Time Bias
	[hh:mm]	[min.]		[cm]	[cm]	[cm]	[microsec.]
Oct. 03	05:18	4.3	12	4.0	0.5	(-1.3)	(11.2)
Oct. 04	06:29	1.2	6	5.8	0.5	(-5.4)	(-0.7)
Oct. 05	05:53	6.7	22	5.6	0.8	(-1.5)	9.9 +- 2.4
Oct. 06	05:22	6.1	24	12.0	1.4	(-0.1)	30.4 +- 6.5
Oct. 24	06:01	1.3	6	4.8	0.6	(-4.7)	(0.2)
Oct. 30	06:08	5.6	23	10.5	1.1	-9.3 +- 2.5	22.3 +- 5.7

Station 72102313 Haleakala (HOLLAS)							
Date	Time	Length	Obs.	Rawrms	Polyrms	Range Bias	Time Bias
	[hh:mm]	[min.]		[cm]	[cm]	[cm]	[microsec.]

Oct. 01	20:22	2.8	13	10.2	0.3	(0.1)	(53.0)
Oct. 01	22:01	2.6	12	3.1	0.3	(-2.6)	(15.3)
Oct. 02	09:05	6.3	27	5.3	0.8	(0.3)	12.9 +- 2.7
Oct. 02	21:28	5.8	22	12.3	0.5	-12.6 +- 2.8	(8.0)
Oct. 03	20:57	5.6	17	14.6	1.6	(-4.2)	30.2 +- 7.9

Station 73085001 Tokyo (CRL)

Date	Time [hh:mm]	Length [min.]	Obs.	Rawrms [cm]	Polyrms [cm]	Range Bias [cm]	Time Bias [microsec.]
Oct. 16	13:31	2.7	10	13.7	2.1	(-7.3)	(21.1)
Oct. 18	12:30	2.6	11	20.6	3.1	(-16.8)	(24.5)
Oct. 21	12:35	0.4	3	31.9	1.8	--	--

このため、局数を表 3-A コラム右端*で示す 14 局の参加により、現実的なデータ量で、ERS2 に対するのロングアーク解析を試みた。データ期間は 1996 年 8 月 1 - 19 日を 0.5 日オーバーラップをもたせつつ 3.5 日間に区切った (図 6)。

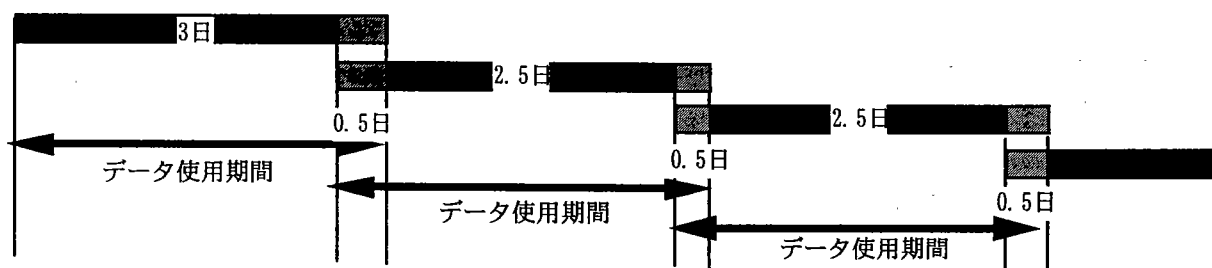


図 6 軌道決定精度評価方法

解析モデルは④を参照されたい。次にショートアーク解析では 5 - 10 分間の衛星パスをヨーロッパ地上の 4 局で同時に受けた例をとり解析をおこなった。ロングアーク結果を表 4-A、ショートアーク結果を 4-B に示す。

表 4-A ERS2 ロングアーク解析

Arc No.	Overlap	Stations	Pass	Difference in position(m)			Difference in Velocity(mm)		
				X	Y	Z	VX	VY	VZ
1-2	96/8/01 Oh -	1	1	<5	<60	<5	<60	<10	<10
2-3	12h	5	6	<5	<50	<5	<50	<10	<10
3-4	96/8/04 Oh -	7	8	<3	<10	<3	<10	<3	<3
4-5	12h	3	3	<3	<25	<3	<25	<8	<3
5-6	96/8/07 Oh -	2	2	<5	<25	<5	<25	<5	<5
6-7	12h	4	6	<1	<15	<5	<15	<1	<5
7-8	96/8/10 Oh -	3	3	<3	<25	<3	<25	<3	<3
	12h								
	96/8/13 Oh -								
	12h								

96/8/16 Oh - 12h									
96/8/19 Oh - 12h									

表4-B ERS2 ショートアーク解析

CAS E No.	Residual in orbit determination (m)				Total O-C RMS (m)	Standard Deviation	
	960521- 2024 FOROWIEC	960521- 2025 GRAZ	960521- 2031 WETTZELL	960521- 2023 HERST MONC EUX		Orbit Position (m)	Orbit Velocity (mm/s)
1	0.1900	0.0023	0.0215		0.1100	1.860	2.000
2	0.0402	0.0018			0.0270	0.339	0.384
3	0.0429		0.0029		0.0320	0.926	0.738
4		0.0019	0.0035		0.0030	1.500	1.510
Long -Arc	0.3057	0.1729	0.1599				

ロングアーク解析では、各アークの位置の差は1 mから60 mとばらつきがみられるが、これは各アークのデータ量の差からくるものと思われる。各アークで5-7局のデータがあれば10 m以内の再現性は達成されるものと予想される。

一方、ショートアーク解析では2-3局の同時可視パスで衛星位置を1-2 mで推定することが可能である。ただし、ERS や ADEOS の軌道高度は低いため、同時可視パス条件を得る地上局の範囲が限られ、天候条件も同時に良いことが必要なため実用化に関しては局配置、観測可能性を十分に吟味する必要がある。

③ 宇宙光通信地上センター観測システム

R I S実験の地上局は、小金井の宇宙光通信地上センター内に設置されており、通信総研の1.5 m望遠鏡とその追尾システムが利用される。精密な追尾を行うために、高調波YAGレーザをR I Sに照射し、反射光を画像として捕らえる能動的手法を用いる。能動追尾装置の諸元を表1に、本実験の概念図を図7に示す。レーザ照射像はガイド望遠鏡で確認された後、マニュアルの時間または角度オフセットによって主望遠鏡クーデカメラによって視野の中心に導かれる。カメラには狭帯域のフィルターおよび時間ゲートがかけられており、バックグラウンドノイズと送信光の後方散乱光を遮断し昼間でも観測が可能である。

表5 観測システム能動追尾システムの諸元

主望遠鏡	口径	1.5 m
	方式	AZ-EL 駆動、クーデ合成焦点
	視野	30 秒角
	最大駆動速度	5 度/秒 (Az,EL 軸)
	送信効率	30 %
	送受信方式	送受一致、送信センターホールとダイクロイックミラーによる分離

	送信ビーム幅 (YAG)	0.4 mrad
	送信ビーム幅 (CO ₂)	0.1 mrad
	能動追尾用クーデカメラ	DICAM2 (CCD with gated II)
ガイドシステム	方式	シュミットカセグレン
	口径、焦点距離	20 cm、200 cm
	能動追尾用ガイドカメラ	ゲート付き Image intensifier CCD カメラ Hamamatsu-C4078+C4412
	スペクトラムフィルター	532nm バンドパスフィルター
	視野	0.5度

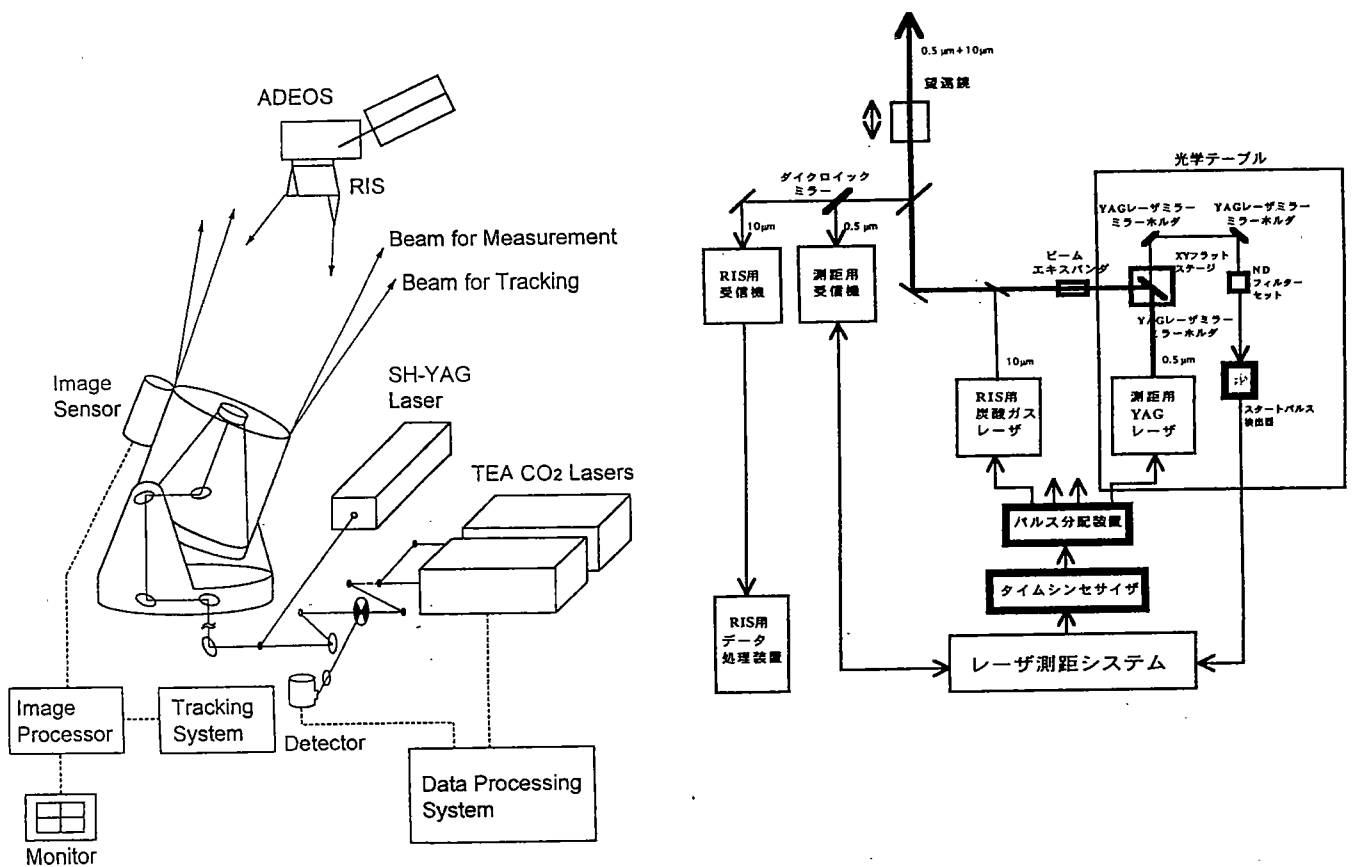


図7 能動追尾の実験概念図

④ 軌道決定アルゴリズムと RIS 軌道決定への適用

ア 運動モデルとその検証

本解析に用いたソフトウェアは宇宙開発事業団が開発した軌道決定システム (NOCS) をベースにしている。ADEOS の軌道決定に用いる物理モデルは国際地球回転事業 (IERS) 概ねスタンダードに準拠し、その力学モデル、観測モデル、座標系は表 6 のとおりである。

表 6 軌道決定に用いた物理力学モデル

	項目	モデル名、内容
力学モデル	重力場	GEM-T 3
	潮汐	地球潮汐 (IERS94)
	太陽・月位置	DE200
	太陽輻射圧	Hoard
	大気ドラッグ	Jachier-Nicolet
観測モデル	大気補正	Marini and Murray
	重心補正	3 軸 - 姿勢モデル
座標系	慣性座標	J2000.0
	局位置	ITRF94
	地球回転	IERS Bulletin-A
推定パラメータ	衛星状態ベクトル (6 要素)	アーク
	$\Gamma 1$, $\rho 1$	太陽輻射圧調整係数 大気抵抗調整係数

イ 軌道決定精度解析

ADEOS の SLR データによる軌道決定精度を検証するため、3.5 日間のアーク内にある SLR 実データを用いた軌道決定を行った。期間は 1996 年 10 月 30 日 - 11 月 14 日の 2 週間で、この軌道決定に使用したアークの間には、最大 8 局分のデータを含み、また、ERS 2 の解析と同じように 0.5 日間のオーバーラップ期間を持たせ二つの軌道を比較することにより、軌道決定精度を評価した。表 7 に軌道決定に使用したデータ期間と、軌道決定における O-C の値、推定パラメータである $\rho 1$ (大気抵抗調整係数)、 $\Gamma 1$ (太陽輻射圧調整係数) の値を示す。

表 6 軌道決定使用アークと O-C

アークNo	Start (UTC)	End (UTC)	パース数	局数	データ数	O-C RMS (m)	$\rho 1$	$\Gamma 1$
1	1996/10/30 0:00	1996/11/2 12:00	13	7	89	2.72	0.26	0.48
2	1996/11/2 0:00	1996/11/5 12:00	10	7	61	1.94	0.36	0.27
3	1996/11/5 0:00	1996/11/8 12:00	12	8	70	1.42	0.37	0.37
4	1996/11/8 0:00	1996/11/11 12:00	15	8	94	2.17	0.46	0.46
5	1996/11/11 0:00	1996/11/14 12:00	11	5	65	2.25	0.53	0.54
6	1996/11/14 0:00	1996/11/17 12:00	8	3	58	0.75	0.57	0.51

軌道推定後の O-C の値は およそ 1~2m 程度であり、通常行われている RARR による軌道決定（十数メートル）のに比べると良い値となっているが、SLR データの分解能である数 cm と比べるとかなり大きな値となった。これは、運動モデル・観測モデルがその精度まで追従できていないことを示していると思われる。表 8 にそれぞれの軌道位置決定値をオーバーラップ期間において比較した値を示す。この結果より、各データアークの軌道決定値どうしの差は、良いところで 10m 以内、悪いところで 20m 程度となった。このばらつきは両決定に使用した局数やオーバーラップ期間内のパス数に依存していると思われる。

表 8 軌道決定精度（オーバーラップ比較）

アーク No.	オーバーラップ期間		パス数	局数	位置の差 (RMS : m)				速度の差 (RMS : mm/s)			
	Start(UTC)	End(UTC)			Radial	Along	Cross	RSS	Radial	Along	Cross	RSS
1-2	96/11/2 0:00	96/11/2 12:00	2	2	1.514	3.979	0.759	4.325	1.612	3.144	0.802	3.623
2-3	96/11/5 0:00	96/11/5 12:00	2	2	2.357	7.879	3.364	8.885	2.465	4.89	3.54	6.521
3-4	96/11/8 0:00	96/11/8 12:00	3	3	1.039	4.613	2.008	5.137	1.102	2.148	2.034	3.157
4-5	96/11/11 0:00	96/11/11 12:00	1	1	4.876	23.133	5.986	24.387	4.952	10.12	6.109	12.816
5-6	96/11/14 0:00	96/11/14 12:00	1	1	2.347	14.147	2.622	14.578	2.448	4.873	2.723	6.096

ウ 軌道予報精度解析

軌道予報精度の評価は、軌道決定の評価法と同様だが予報エポックを変えて図 8 に示す方法で行った。まず一つの軌道要素を使用して軌道予報値を作成し、この軌道予報値と同じエポックを持つ軌道決定値と比較することによって予報精度を最大で 15 日間のスパンで評価した。位置予報精度に関しては、電波によるレンジ・レンジレートの様式であり RIS 観測の要求条件として「3 日後で 100m 以内に納まっていること」という要求があった。

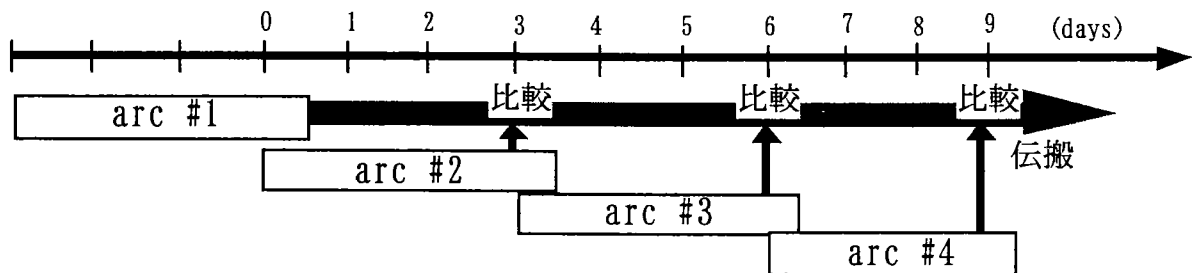


図 8 軌道予報精度評価方法

評価の結果を図 9 に示す。値にばらつきはあるものの、結果としてどれも 3 日後に 10 m 以内、異臭間後でも 50 m 以内の満たしている。仮に、軌道決定に 2m 程度の誤差が含まれているとしても、3 日後に 100m の要求を満たすことは可能と考えられる。

しかし、今回の軌道予報精度評価は太陽活動極小期から中間期にかけてのものである。大気抵抗による摂動の影響を受ける低中高度衛星の軌道予報精度は、太陽活動の予測精度によって大きく左右される。2000 年くらいから太陽活動は再び極大期に入るが、太陽活動極大期には太陽活動の予測が困難になるとともに大気抵抗による摂動も非常に大きくなるため、軌道予報精度は今回の

数値よりも悪くなるであろう。

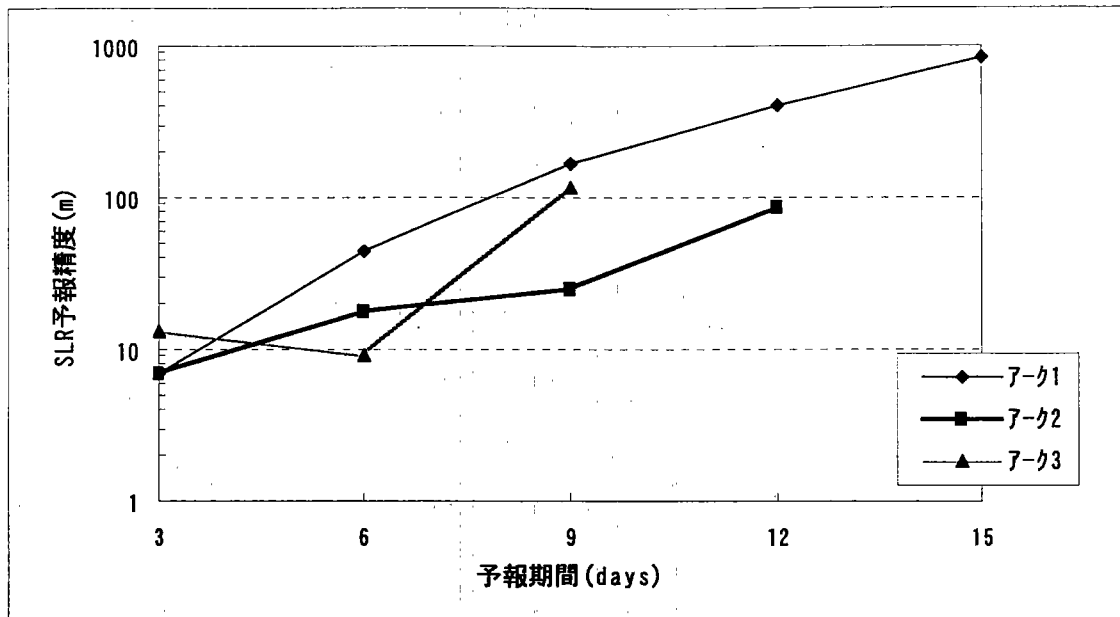


図9 軌道予報精度

⑤ 軌道予報・データ収集システムの開発

ア ADEOS/RIS 実験データ配布ネットワーク

本実験は衛星の打ち上げ管理を行っている宇宙開発事業団との共同研究として行われ、国内外 SLR 局関連機関との協力の上に成り立っている。本実験のために設置した ADEOS/RIS データ配布ネットワークの構成を図10に示す。

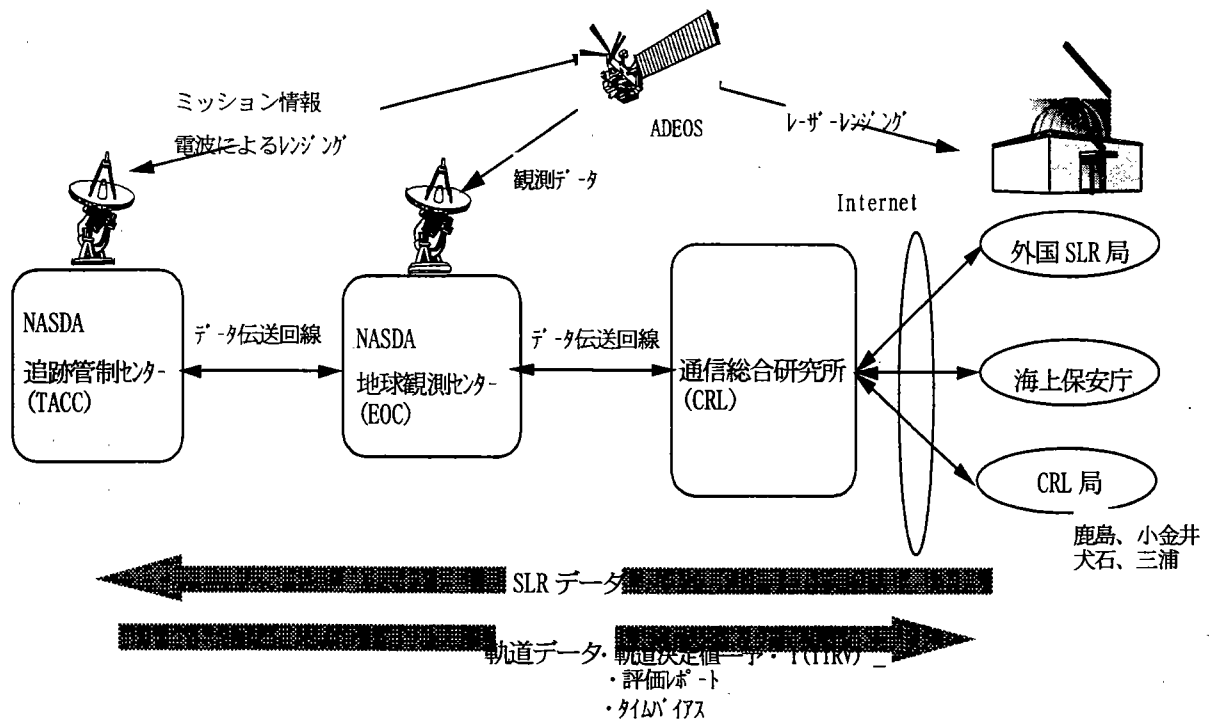


図10 ADEOS/RIS実験データ配布ネットワーク

本ネットワークでは、各 SLR 局（日本、米国、ドイツ、イギリス、豪州、中国、ロシア等）から送られてくる SLR データは、FTP もしくは e-mail にて Internet 経由で一旦 CRL に集められ、データ品質のチェック後に NASDA/地球観測センター（EOC）を経由して NASDA/追跡管制センター（TACC）に伝送される。この SLR データを用いて軌道決定を行い、軌道決定値をもとにして軌道予報値等を算出する。配布算出する情報を表9に示す。これらの情報は SLR データと同じ経路を通して各 SLR 局に配信され、SLR の運用に使われる。

表9 配布作成する軌道情報

TIRV (Tuned Interrange Vector)	毎日 0:00UT における地球回転座標系での軌道位置・速度情報。
Time Bias	予報精度を向上させるために、トラッキングの際に予報値に対する補正量を与えるためのパラメータ。最新の軌道決定値と最新の追跡データのずれを時間で表したものの。
軌道決定評価レポート	軌道決定結果のレポート。以下の情報を含んでいる。 ・軌道決定日時 ・軌道決定条件 ・軌道決定結果 ・軌道決定使用データ ・軌道決定 O-C*

*O-C : Observation - Calculation

イ ADEOS/RIS に対するレーザ測距と国際 SLR ネットワーク

レーザレーダは、1960年代に欧米において考案されてきたが、大気観測と軌道力学の目的の違いにより、大気観測ライダーとレーザ測距観測システムにそれぞれ特化してきた。RISの追尾システムでは、パルスレーザを利用する点、高い追尾精度を必要とする点など共通の技術項目も多い。また、RISはホロー型、大口径（あじさいの15倍の有効面積）という世界でもまれな対象のため、世界のレーザ測距コミュニティから2色レーザ測距に関する最適な対象衛星として注目を集めた。これは、現在のレーザ測距の正確さの限界である1cmをきるには、大気補正精度向上が必須であり、2色レーザ、特に短波長のリンクバジット向上とホロー型のため、波長による方向と遅延の衛星依存性がないクリーンな解析が期待できるためである。

国際SLRネットワークにおいては、CSTG:宇宙技術委員会(International Coordination of Space Techniques for Geodesy and Geodynamics)のSLR部門委員会で、追尾対象プライオリティ、科学的意義、観測体制が審議されるため、打ち上げの1年前より同委員会での紹介、NASAやヨーロッパの各局への追尾依頼をおこなってきた。また“ADEOS/RIS Tracking Standards”, (June 1996)を発行し、各局のADEOSの基本トラックパターンや予報分配、データ収集のプロトコル等を周知してきた。

ADEOSの追尾に参加登録した海外局を図11に、ADEOS打ち上げ前後から実験終了までの経過を表10に示す。

表10 ADEOS打ち上げ前後から実験終了までの経過

経過		
1996年		
8月17日	ADEOS(みどり)打ち上げ成功、レーザ局の登録、NASA協力覚え書き。	
9月22日	ADEOSの初リターン(9:46-9:48JST)CRLで取得。	
10月15日	海上保安庁で初リターン。	
10月29日-11月13日:システムチェックアウト期間		
1997年		
2月-3月	SLRキャンペーン	
NASDA-CRL-海上保安庁-海外局との間に設置されたデータ集配システム本格運用		
6月	みどり運用停止	
平成9年6月30日みどりの運用停止された後、レーザ測距ネットワークで受信した局は下記のとおり。		
局	国	時間
Herstmonceux	(英国)	1997.07.01 21:50:35
Herstmonceux	(英国)	1997.07.01 21:50:36
Mendeleevo	(ロシア)	1997.07.05 20:07:44
Greenbelt	(米国)	1997.07.06 16:39:22
Metsahovi	(フィンランド)	1997.08.15 20:32:27

図12にNASAの2局(Hollasハワイ局、MOBLAS4 米国西海岸 MonumentPeak)において取得したADEOSのシングルショット精度を他衛星(LAGEOS(米国)、Fizeau(ロシア)衛星)、

および地上標的 (Calibration) とともに比較したものを示す。ここで LAGEOS という高度 6 0 0 0 k m の標準的な衛星に比べ、精度が高く、地上に置かれた単一コーナキューブに対する CALIBRATION の精度と同等の精度を示している。これは信号強度が高いこととともに、RIS の単一開口キューブによるリターンパルスのクリーンさによる精度の向上を示唆している。

1997 年 8 月の打ち上げ以来、ADEOS/RIS に対する国際 SLR 追尾ネットワークからの SLR データ数を表 1 1 に示す。ここでパス数とは、局上空において衛星が飛来した数をいい、データ数とは 15 秒間に得られたのリターンショットを一つに平均化したもの (ノーマルポイント) の数を指す。また、表中ハッチで示した局はデータ入手をオフラインで行った局である。

このように、ADEOS は全体で 2 8 局のレーザ追尾局が参加、総パス数 7 5 9、受信データ数 5 1 9 3 のデータ量を得た。機能停止後も複数のヨーロッパ局においてデータ数を受信することができたが、CRL 局を含みほとんどの局で測距が困難になった。衛星の姿勢の不確定性、予報軌道の劣化によるものと思われ、追尾実験は 1997 年 8 月で終了した。

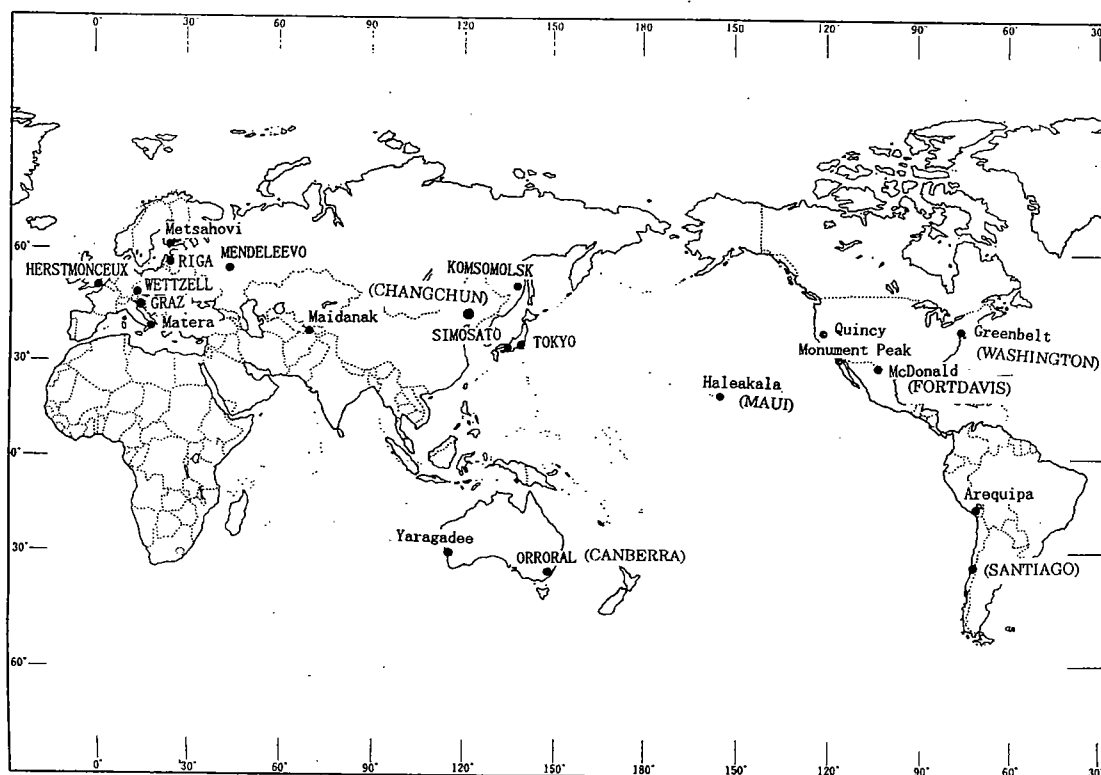
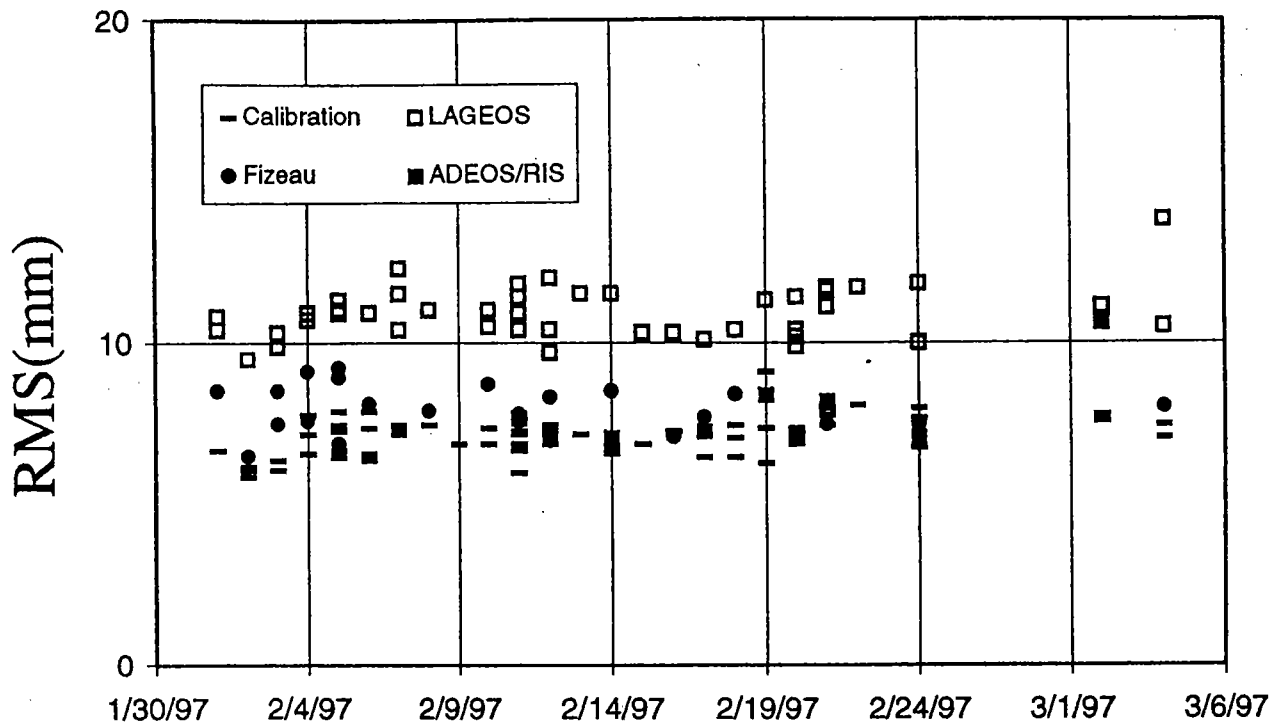


図 1 1 ADEOS の追尾に参加登録した国際 SLR 局

表 1 1 国際 SLR 追尾ネットワークからの最終 SLR 受信パス数とデータ数

局番号	局名	総受信 パス数	8mmによ る入手	受信 データ数	データRMS (mm)	1パスあたりの平均 データ数
1864	MAIDANAK	25	3	192	138.0	7.68
1868	KOMSOMOLSK	15	2	61	58.1	4.07
1870	MENDELEEVO	45	4	283	75.3	6.29
1873	SIMEIS	7	7	37	28.0	5.29
1893	KATZIVELY	2	2	9	12.3	4.50
7080	FORT DAVIS	16	0	78	17.5	4.88
7090	YARAGADEE	8	0	50	8.6	6.25
7105	WASHINGTON	22	0	142	10.1	6.45
7109	QUINCY	3	0	19	7.3	6.33
7110	MONUMENT PEAK	47	0	242	9.0	5.15
7210	MAUI	13	0	66	10.1	5.08
7236	WUHAN	1	1	4	8.9	4.00
7237	CHANGCHUN	52	40	414	58.6	7.96
7249	BEIJING	38	38	271	46.2	7.13
7308	TOKYO	7	0	68	53.1	9.71
7403	AREQUIPA	13	0	53	8.7	4.08
7404	TLRS-2(SANTIAGO)	1	0	6	33.3	6.00
7548	CAGLIARI	11	11	55	14.7	5.00
7805	METSAHOVI	53	1	393	33.1	7.42
7810	ZIMMERWALD	1	1	15	1.0	15.00
7824	SAN FERNANDO	44	43	453	50.5	10.30
7831	HELWAN	1	1	10	25.3	10.00
7837	SHANGHAI	5	5	18	36.5	40.10
7838	SIMOSATO	48	1	578	33.9	12.04
7840	HERSTMONCEUX	127	7	580	9.9	4.57
7843	CANBERRA	84	28	564	8.4	6.71
7939	MATERA	30	30	172	84.6	5.73
8834	WEITZELL	40	40	360	2.6	9.00
	計	759	265	5193	-	-

HOLLAS RMS's



MOBLAS 4 RMS's

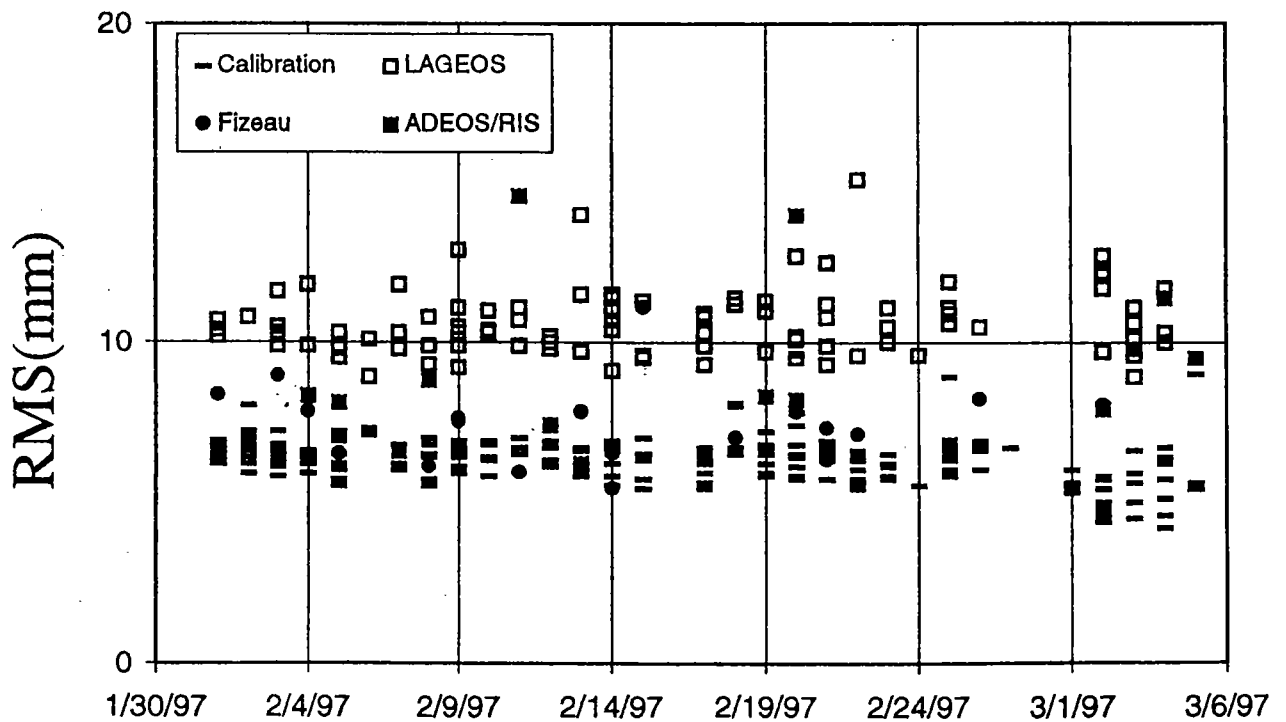


図 1 2 ADEOS/RIS と他衛星のシングルショット精度比較

(3) 地上衛星間長光路差分吸収法での測定精度の検討

① RIS による受信強度

地上から出力 P_0 のレーザーを衛星に向けて出し、距離 R にある衛星の逆反射器(反射率 r 、有効断面積)で反射してきて、地上の面積 S (ここでは口径 1.5m 、 $S=1.77\text{m}^2$)の受信望遠鏡で受信される電力 P_r は、

$$P_r = P_0 \cdot T_{u_i} \cdot T_{d_i} \cdot \frac{16 \cdot S}{\pi^2 \theta^2} \cdot T_r \cdot \eta_{\text{sat}} \quad (1)$$

で与えられる2)。ここで、

t : 送信レーザー光の広がり

s : 衛星の逆反射器の回折角

$T_{u_i} \cdot T_{d_i}$: i 番目の波長での大気透過率であり、大気微量成分の吸収を含み、 u, d はup-linkとdown-linkをそれぞれ表す。

T_r : 地上システム受信系の全光学効率

であり、(1)式で衛星の軌道や光学反射体のパラメーターによる項は

$$\eta_{\text{sat}} = \left[\frac{\sigma}{R^4 \cdot \theta^2} \right] \cdot r \quad (2)$$

であり、この値はRISの逆反射器の特性と光の回折を使って理論的に計算されている2)。ここで、大気微量分子 N の吸収 i を含む大気透過率は、

$$T_{u_i} = \exp\left(-\int_0^R (\sigma_{u_i} \cdot N(R) + \sigma_{u_i}(R)) dR\right) \quad (3)$$

$$T_{d_i} = \exp\left(-\int_0^R (\sigma_{d_i} \cdot N(R) + \sigma_{d_i}(R)) dR\right) \quad (4)$$

である。RISの実験では、衛星が地上装置の方向に動いてくることによるドップラー効果によって、down-linkの吸収係数 d はレーザーそのものによる吸収係数と異なってくる3)。 $i=0$ と 1 の2波長で測定を行うが、 $i=0$ は衛星のドップラー効果の範囲内でフラットな波長特性を有し、差分吸収で参照用である。時間 t に $i=0$ のレーザーを大気中に出し、大気が凍結していると考えられる短い時間 t 後に $i=1$ のレーザーを発射し、送信電力で規格化されたおのおの受信電力を $x(t)$ 、 $y(t)$ とすると、大気透過率は、

$$\ln\left(\frac{x(t)}{y(t)}\right) = \int_0^R \{(\sigma_{u1} - \sigma_{u0})N(R) dR + \int_0^R \{\sigma_{d1}(t) - \sigma_{d0}(t)\}N(R) dR$$

$$+ \int_0^R \{ \alpha u_1 - \alpha u_0 + \alpha d_1(t) - \alpha d_0(t) \} dR \quad (5)$$

で与えられる。衛星を追尾しているためRも当然tの関数である。 σd_0 、 σd_1 、 σd_0 はtに依存しないように選ぶことができる。RISの実験では、(5)式の左辺が測定量で第2項のの値を衛星軌道に沿って成層大気(onion skin assumption)を仮定して、積分方程式(5)式の積分核とすることにより大気の微量成分の高度分布を得る³⁾。

② RIS実験での差分測定精度の検討

ADEOS搭載のRISを用いる長光路吸収実験用装置の概略と緒元は文献2の第1図と第1表に示されている2)。RISの実験では、差分吸収の方法を用いるため各々の受信強度の誤差ではなく(x/y)の誤差が問題となり、その標準偏差S(x/y)は以下のように表される。

$$\frac{S(x/y)^2}{\langle x/y \rangle^2} = \frac{S(x)^2}{\langle x \rangle^2} + \frac{S(y)^2}{\langle y \rangle^2} + \frac{S(xy)}{\langle x \rangle \langle y \rangle} \quad (6)$$

ここで、x及びyは2台のCO₂レーザ各々の送信電力で規格化された受信強度であり、受信強度の平均値で規格化した標準偏差を小文字のsで

$$s(x) = \frac{S(x)}{\langle x \rangle} = \frac{\sqrt{\langle (x - \langle x \rangle)^2 \rangle}}{\langle x \rangle} \quad (7)$$

と表すと、相関係数ρは

$$\rho = \frac{s(xy)}{s(x) \cdot s(y)} \quad (8)$$

である、(6)式は、

$$s(x/y)^2 = s(x)^2 + s(y)^2 - 2\rho \cdot s(x) \cdot s(y) \quad (9)$$

と表される4)。相関係数は、xとyとのレーザ発射の時間間隔Δtの関数であり、数m以下の風速の時の相関係数は炭酸ガスレーザの波長域でターゲットの種類によって文献4)の第2図のようになる。いずれの場合も風速が5m/sec程度以下であれば、1msec以下では相関係数が一定となる大気の揺らぎが凍結しているといえる。RISの実験においては、2台のCO₂レーザの発射の間隔は200 μ secである。また、

このレーザーの発射の間にADEOSの動く角度は 10^{-8} rad 以下であり、大気の揺らぎは凍結していると言える。(4)式の誤差は、非相関の誤差 $s(u)$ となりこの値は、ターゲットによらず実験装置の方で決まる常数となることが知られている^{4),5)}。 $s(u)$ は

$$s(x/y) = s(u)\sqrt{2} \quad (10)$$

$$s(u) = s(x)\sqrt{(1-\rho)} \quad (11)$$

となる。

これまでの RIS の実験で得られた結果はを表12にまとめている。

表 12 RIS 実験での誤差

DATE	s(x)	s(y)	ρ	s(u)	s(x/y)
96-Dec.23	0.98	0.96	0.90	0.30	0.40
97,Jan.11	0.77	0.62	0.78	0.33	0.51
97,Mar05	0.80	0.77	0.97	0.14	0.25
97,Mar.24	0.45	0.49	0.41	0.36	0.57
97,Apr.10	0.61	0.64	0.84	0.25	0.47

備考 96-Dec.23 : オゾン測定用2波長、レーザーモード選択用ピンホール無し
 97,Jan.11 : 波長同じ、レーザーモード選択用ピンホール無し
 97,Mar05 : 波長同じ、レーザーモード選択用ピンホール有り
 97,Mar.24 : オゾン測定用 2 波長、レーザーモード選択用ピンホール有り
 97,Apr.10 : オゾン測定用 2 は長、レーザーモード選択用ピンホール有り

これと比較するために、これまでのCO₂レーザーを用いた長光路差分吸収実験で得られている $s(u)$ と $s(x/y)$ を示している。

表13 CO₂レーザを用いた長光路差分吸収実験での誤差

Ref.	s(x)	ρ	s(u)	s(x/y)	Target,platform
(4)	0.22	0.46	0.16	0.23	(Extended diffuse)
	0.79	0.87		0.28	(retro- reflector)
	0.62	0.92		0.18	(small mirror)
(5)			0.046	0.064	(ground tests, diffuse)
			0.90	0.13	(ground test, diffuse)
			0.91	0.13	(airborne, ocean)
			0.21	0.30	(airborne, land)

RISの実験での s(x/y)、s(u)の非相関誤差はこれまでの長光路差分吸収実験での誤差と比較すると大きな値を示している。これは、衛星を追尾しているために 2 つのレーザ光のわずかなずれと追尾のずれとの重なりでおこっていることが原因としてかんがえられる。しかし、97年3月5日のように表13の値にたいして妥当なところに位置しているものもある。これは、2つのレーザビームをうまくそろえることで地上衛星間でも長光路差分吸収法が十分利用できる方法であることを示している。

4. 結果・考察

RIS 実験のために ADEOS のレーザ測距ネットワークデータを用いた高精度な衛星光学追尾技術を確立し、RIS の追尾実験を行った。これまでに得られたデータより、一定の観測モデル・運動モデルを利用して軌道決定精度・予報精度解析をおこなうことができた。軌道決定精度については、今回の結果ではオーバラップ期間の比較で、進行方向でおおよそ数 m~数十 m の精度であった。SLR データを使用することにより従来の方法である RARR データを使った場合よりも精度の良い軌道決定が可能となることが示され、軌道予報精度については、3日後に 100m 以内という精度要求を満たした。実験において太陽活動極大期の SLR データを取得できなかったことは非常に残念である。また、本研究を通じて、今後の日本の地球観測衛星のレーザ追尾システム（予報分配、データ収集）のプロトタイプ作成と国内外の協力関係を築く貴重な経験が選られた。

この RIS 追尾実験によって選られたデータを解析し、衛星地上間の長光路差分吸収実験を行う際の、誤差要因の検討を行った。特に、非相関誤差についてこれまで他の実験で得られている値と比較し、RIS のように地球観測衛星を用いても長光路差分吸収法が十分活用可能な精度になることが明らかになった。

5. 本研究により選られ成果

RIS 実験のために ADEOS のレーザ測距ネットワークデータを用いた高精度な衛星光学追尾技術を確立した。本技術による軌道予報精度については、3日後に 100m 以内という精度要求を満たした。

RIS のように地球観測衛星を用いても長光路差分吸収法が十分活用可能な精度になることが明らかになった。

6. 参考文献

- 1) T.Aruga,T.Itabe,M.Ishizu,N.Hiromoto and M.Shikatani:A new optical facility for multi-purpose studies,Dennsi Tokyo,27,53(1988)
- 2) N.Sugimoto et.al.,;Plan for the experiment with the Retroreflector in Space (RIS) on ADEOS,SPIE,2583,217(1995)
- 3) A.Minato, N.Sugimoto and Y.Sasano; Spectroscopic method for atmospheric trace species measurement using a satellite retroreflector (RIS); Rev.Laser Eng.,19,1153 1163(1991)
- 4) N.Menyuk and D.Killinger; Temporal correlation measurements of pulsed dual CO a lidar returns; Opt.Lett.,6,301-303(1981)
- 5) J.Buften, T.Itabe and D.Grolemund; Dual-wavelength correlatioin measurements with an airborne pulse carbon dioxide lidar system; Opt.Lett.,7,584-586(1982)

[研究発表の発表状況]

(1)口頭発表

- ① T.Aoki et al., ; System Accuracy of Atmospheric Observation by RIS, OSA Topical Meeting,96, Feb. Santafe,US
- ② T.Aoki, M. Takabe, K. Mizutani and T.Itabe ; Development of a laser ranging system to observe deformation of a volcano, 18th International Laser Radar Conferenc,1996、 July Berlin, Germany.
- ③ H. Kunimori, T. Gotoh, H. Nojiri, M. Sawabe, M. Ogawa and M. Maeda, : Preliminary Report on ADEOS/RIS Laser Tracking Experiments, Proceedings of 10th international workshop on Laser Ranging Instrumentation, pp.614-620, Shanghai, November, 1996
- ④ 沢辺幹夫、小川美奈、前田真紀、国森裕生：「ADEOS/RIS データを用いた軌道決定実験」, 第 40 回宇宙科学技術連合講演会講演集 1G11, 1996.10
- ⑤ 前田真紀、小川美奈 沢辺幹夫 広田正夫、国森裕生、山本洋介、山田哲：「ADEOS/RIS のレーザー測距による軌道決定実験 (2)」第 41 回宇宙科学技術連合講演会講演集 1G11, 1997.10

(2)論文発表

- ① 青木哲郎、高部政雄、水谷耕平、板部敏和;レーザー測距計を用いた火山地形変形検出手法の開発,日本リモートセンシング学会誌,15,432-437(1995)
- ② H. Kunimori, T. Otsubo, B. Engelkemier, T. Yoshino and B. Greene, : Timing precision of Active Q- switched Mode_Locked Laser and firing system for synchronous laser ranging', IEEE Trans. IM Vol.44. No3 1995,
- ③ T.Aoki, M.Takabe, K.Mizutani and T.Itabe; A Laer Ranging System to Observe Topographical Deformations of Volcanos, Appl. Opt., 36, 1239-1244, 1997
- ④ M. Maeda, M. Ogawa, M. Sawabe, M. Hirota and H. Kunimori,: Accuracy of Trajectory

Determination and Prediction of ADEOS with RIS experiment, Proceedings of SPIE Conference of Laser Radar Ranging and Atmospheric Lidar Techniques, Vol.3218, pp.31-39, 1997

- ⑤T. Otsubo, J. Amagai and H. Kunimori,: 'Satellite Signature effects by ranging system and satellite attitude', Proceedings of SPIE Conference of Laser Radar Ranging and Atmospheric Lidar Techniques, Vol.3218, pp.50-54, 1997