

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

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決定アルゴリズムに関する研究

研究代表者 海上保安庁企画課海洋研究室 藤田雅之

海上保安庁水路部

企画課海洋研究室 藤田雅之

航法測地課 仙石新・松下優

平成7-9年度合計予算額 8,093 千円
(平成9年度予算額 2,352 千円)

[要旨]

下里水路観測所では、1996年10月から1997年6月（ADEOS機能停止）まで、RISを利用したADEOSのレーザー測距観測を行い、得られた測距データを、通信総合研究所に設けられたデータセンターに即日送付することにより、軌道予報に貢献した。また、主要なグローバル観測局においてもADEOSの観測が行われ、データが蓄積された。

ADEOSの軌道予報精度向上のため、その非対称形状を模したBOX-WINGモデルを構築し、ADEOSのグローバルレーザー測距データを用いた軌道予報実験により、その評価を行った。その結果、モデルの適用により、予報結果が有意に改善されることが示された。また、同様の軌道実験により、解析の条件として経験的加速度のalong-track成分を推定するとよい結果が得られること、質量中心補正量の時間変化を考慮すると予報結果を有意に改善することが示された。さらに、長期データの解析から、現在のモデルを用いた予報精度は、along-track成分で数日から10日後に数百mとなり、once per rev周期の振動誤差が日数の経過に従い増大していくことが示された。

[キーワード] ADEOS、人工衛星レーザー測距、軌道予報、質量中心補正、BOX-WINGモデル

1. 序

1996年8月に打ち上げられた国産地球観測衛星ADEOSには、大気微量分子の観測を目的として、ILAS、RIS等のセンサーが搭載されている。これらの測定精度向上のためには、高精度の衛星軌道決定、予報が必要である。特に、地上からのレーザートラッキングを必要とするRISについては、その観測が軌道予報精度に依存するため、高精度の軌道予報が要求される。そのため、本研究では、人工衛星レーザー測距技術を用いたADEOSの高精度軌道予報のための手法の開発を行う。

2. 研究目的

人工衛星レーザー測距技術は、地上からレーザー光を発射し、それが衛星上に取り付けられた反射鏡（コーナーキューブレフレクター）に反射して戻ってくるまでの往復走時を測定する技術である。これによって、地上の観測局の正確な位置を測定したり、地球回転に関する情報を得るなど、主に地球力学、測地等の分野に応用されてきた。一方この技術は、同時に衛星軌道を正確に決定することができるため、軌道決定・予報の分野においても最も強力な方法である。

地球力学および測地目的のためには、衛星軌道ができるだけ安定していることが望ましいため、一般に測地衛星は単純な球形をしており、衛星高度は、地球重力の不均質や大気の影響を受けにくい高高度とされている。これに対して、ADEOSのような地球観測衛星は、測地衛星に比べて衛星高度が低く、軌道がより不安定である上、その形状は複雑であり、外力の影響を見積もることがより困難である。また、衛星の運動を支配する重心とリフレクターの位置関係が時間的に変化する。

本研究は、こういったADEOSの非対称形状の影響を評価、考慮することによる軌道予報精度の向上を目的とする。そのため、下里水路観測所におけるADEOSのレーザー測距観測を行うと共に、ADEOSの形状モデルを構築し、レーザー測距データを用いて、軌道予報実験を行う。

3. 研究方法

本研究は、大きく分けて以下の3つの項目により行われる。

(1) データの取得

- ①下里水路観測所において、ADEOSのレーザー測距観測を行う。得られたデータは、通信総合研究所に設けられたデータセンターに送付する。
- ②軌道予報実験のためのグローバルデータを、データセンターより、ftpにより取得する。

(2) モデル化

ADEOSの複雑な形状について、以下のモデル化を行う。

- ①重心とレーザー反射鏡（RIS）の光学中心の間の補正（質量中心補正）量を、幾何学的にモデル化する。
- ②大気抵抗、太陽輻射の影響を精密に考慮するため、ADEOSの非対称形状を、本体と太陽電池パネルに分けて、それぞれ直方体と長方形で近似する。

(3) 軌道予報実験

上記モデルを軌道解析ソフトウェアに組み込み、ADEOSのグローバル測距データを用いて、軌道予報実験を行う。軌道予報実験は、以下の3つについて行う。

①解析条件

特に経験的加速度の推定条件について検討する。

②モデルの検証

質量中心補正モデルと形状モデルについて、その有無による軌道予報確度を比較することによって、モデルの有効性を確認する。

③予報精度の検証

1997年2月と3月のデータを総解析することにより、本研究により開発した手法に基づく予報精度の検証を行う。

4. 研究成果

(1) ADEOSについて

① 諸パラメータ

ADEOSは、ほぼ円形の太陽同期軌道を運行し、1時間40分で地球を一周する。また、高度は地上約800kmであり、米国測地衛星ラジオスの6000km、日本の測地衛星あじさいの1500kmなどと比較すると、かなり低高度である。

ADEOSの諸パラメータ（平均値）を表1に示す¹⁾。

表1 ADEOSの諸パラメータ

Orbit type	sun-synchronous
Mean altitude	797km
Orbital Period	101min
Ground track repeat cycle	41days
Semi-major axis (a)	7175km
Eccentricity (e)	0.001
Inclination (i)	98.7 deg.
R.A. of asc.node (Ω)	109 deg.
Argument of perigee (ω)	90 deg.
Mean anomaly (M)	143 deg.
Satellite mass	3475kg
Cross-sectional area	33m ²

② RISと質量中心補正

RISは、大気中の微量元素を測定するためのレーザー光の反射鏡として、ADEOSに取り付けられており、人工衛星レーザー測距観測でもこれを利用する。RISの光学中心の重心からの位置関係は、 $(X, Y, Z) = (1415.7, 101.4, 748.2)$ (mm)と表現できる¹⁾。ここで、Xは衛星の進行方向、Zは地心方向である。

レーザー測距では観測点からRISの光学中心までの距離を測定するが、衛星の軌道は重心の位置で表さなければならない。そのため、上記の位置関係を補正する必要がある、これを質量中心補正とよぶ。

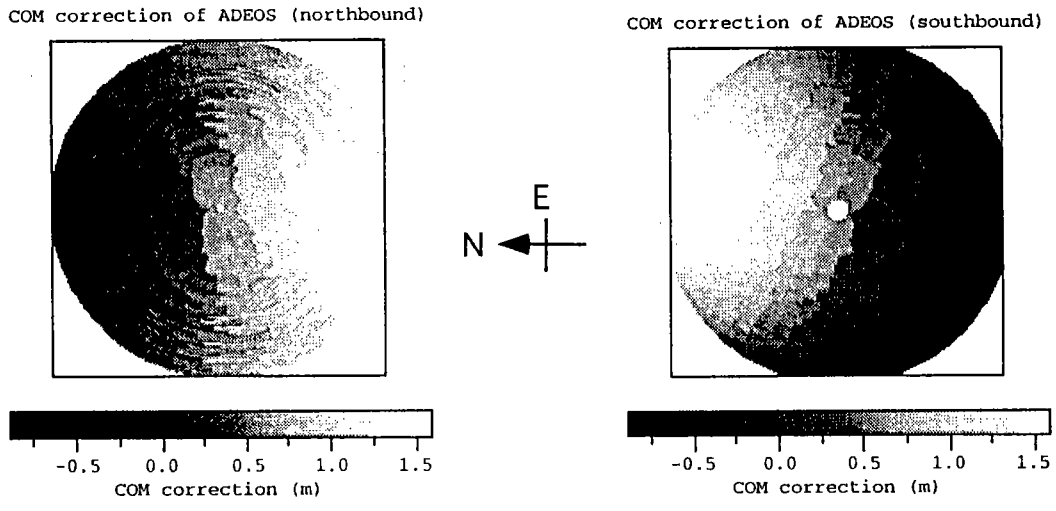


図1 質量中心補正量の方角高度依存性

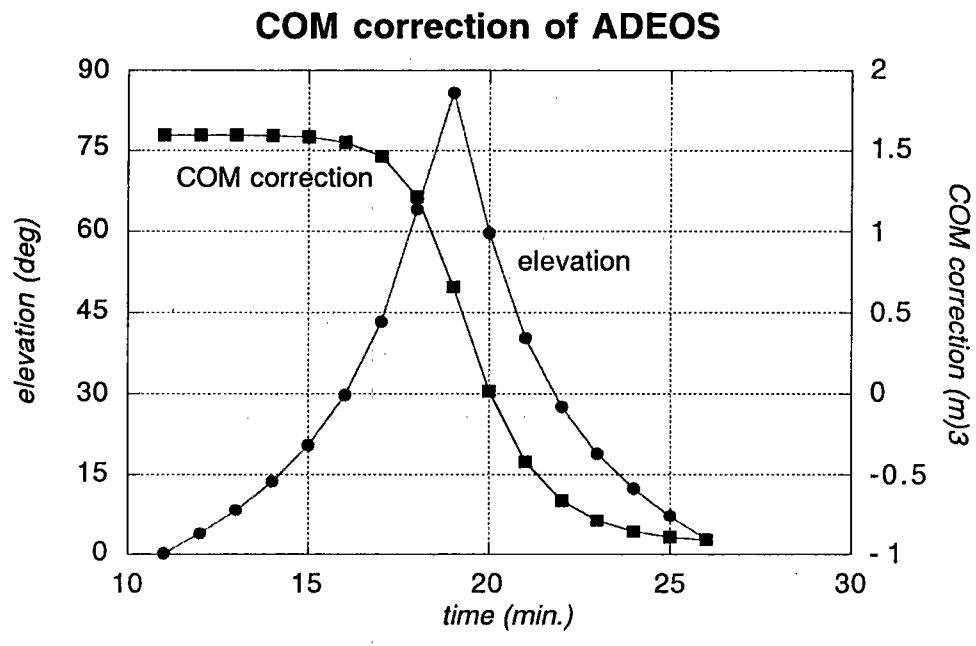


図2 質量中心補正量の時間変化

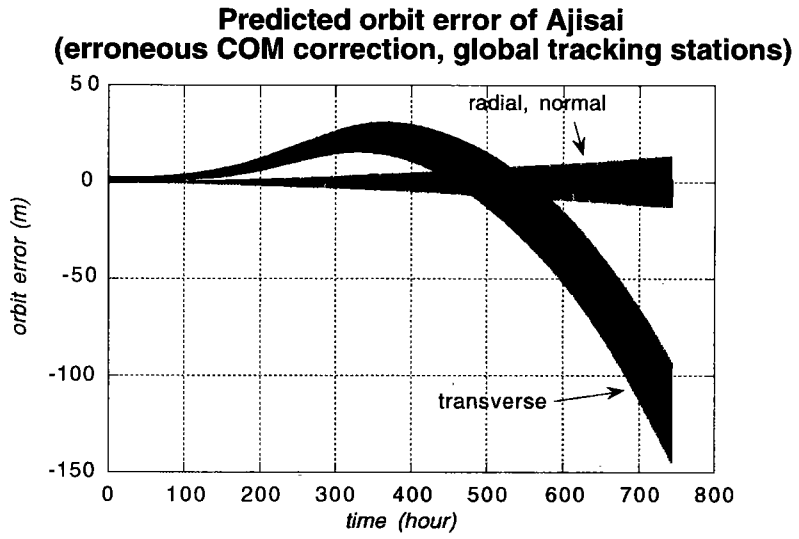
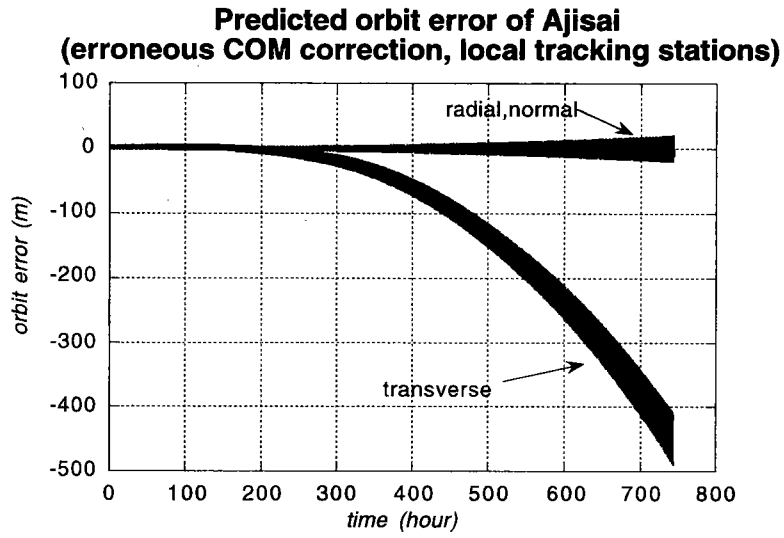


図3 あじさいのデータを用いた予備実験

図1に、ADEOSの質量中心補正量の、方位角・高度角による値の分布を示す。左図が航跡が北向きの場合、右図が南向きの場合である。いずれの場合も、補正量は正の値から負の値へ変化することがわかる。これは、ADEOSが進行方向に対して常に同じ姿勢となるように制御されており、リフレクターが、重心に対して前方に設置されていることによる。また、値は約+1.5mから-1mの範囲で変化する。

図2に、高度と補正量の時間変化の一例を示す。この図から、補正量の変化は時間に対して一様ではなく、最高高度付近を通過する数分間に急激に起こることがわかる。

初年度（平成7年度）には、ADEOSの打ち上げに先立ち、予備実験として、測地衛星あじさいのデータをモニターデータとして、本補正量の軌道予報に与える影響の見積もりを行った。図3は、あじさいのデータに擬似的にADEOSの質量中心補正を加えて3日アーク解析を行い、1カ月後までの軌道誤差の拡大をプロットしたものであ

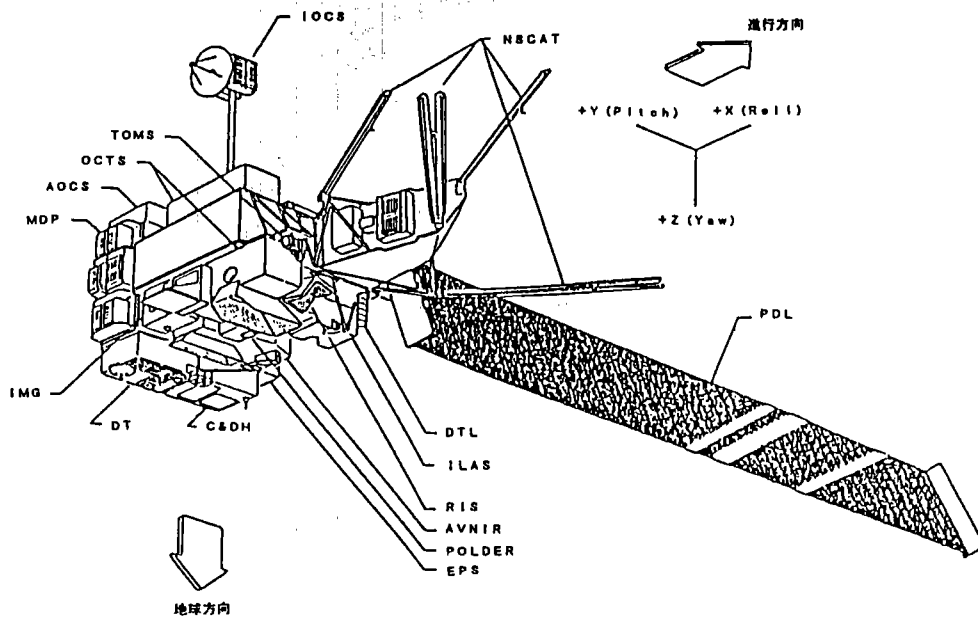


図4 ADEOSの外観図

る。上はローカル局2局のみを用いた場合、下はグローバル局を用いた場合である。両図とも、動径方向、法線方向には軌道誤差はあまり拡大しないが、進行方向に誤差が広がる。1カ月後の予報軌道誤差は、ローカル局のみを用いた場合は約400m、グローバル局を用いた場合は約100mとなる。この結果から、補正量を考慮するか否かで、進行方向の予報軌道に大きな差が現れることがわかり、その有効性が確認された。

③形状および有効断面積の変化

ADEOSは、本体と太陽パネル（以下PDLと略す）で構成される（図4）。その姿勢は、地球と進行方向に対して常に同じ方向を保つように制御されている。

PDLは常に太陽に向けられるため、大気に対する断面積は変化する。大気に対する衛星の断面積Aは、

$$A = A_1 + A_2 |\cos(nt - \delta)|$$

となる。ただし、A1は本体の断面積（13.99m²）、A2はPDLの面積（60.41m²）、nは平均運動、tは時刻、δは初期位相で、初期位相は太陽の位置と衛星の軌道要素で決まる。

図5に、ADEOSの大気に対する断面積の変化を時間に対して示す。図から、ADEOSの大気に対する断面積は、14m²から74m²まで約50分で大きく変化することがわかる。

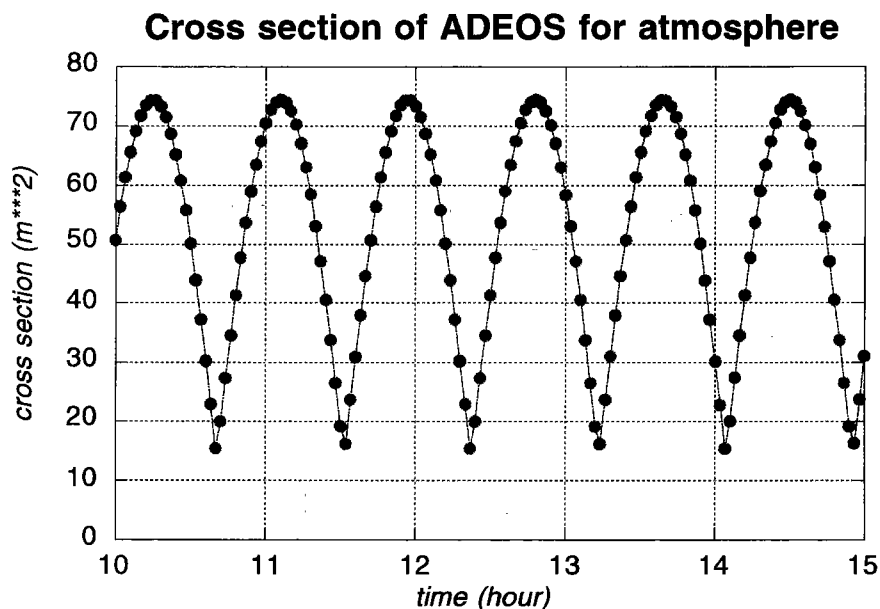


図5 断面積の時間変化

(2) 測距データの取得

平成8年10月より平成9年6月にADEOSが機能を停止するまで、下里水路観測所において、ADEOSのSLR観測を行い、測距データを取得した。RISからのレーザー反射光強度は大変強く、常時3～4cmの測距精度が得られた。ただし、RISの配置の関係上、接近時しかデータが取得できないため、得られるデータの幾何学的分布が制限されるという問題がある。

平成9年6月までに、下里において取得されたデータは、48パス、ノーマルポイント数593である。月毎のパス数、ノーマルポイント数は表2のとおりである。

表2 下里で取得されたデータ数

Mon	Passes	N Points
96/10	2	22
11	11	129
12	6	81
97/ 1	8	124
2	10	105
3	2	28
4	0	0
5	3	32
6	6	72

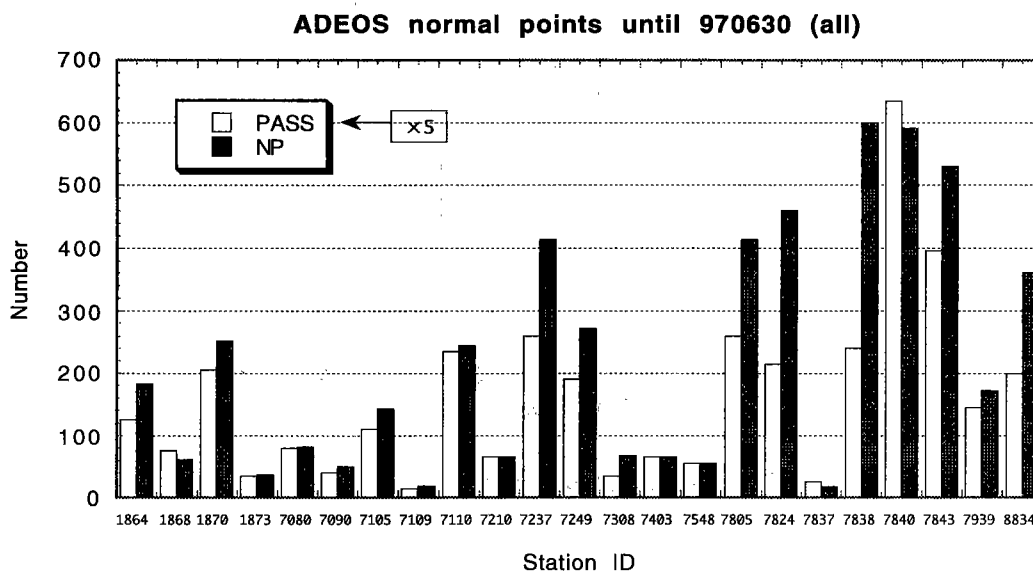


図6 グローバル観測局における測距データ数

ADEOSのSLR観測は、グローバル局においてもなされている。図6に、全期間においてグローバル測距局で得られたデータ数を示す。特に、Greenwich（英国）、Monument Peak（米国）、Orroral（オーストラリア）3局のデータ数が多く、それぞれ、127パス（591ノーマルポイント）、47パス（244ノーマルポイント）、79パス（531ノーマルポイント）である。

(3) ADEOSの非対称形状モデル（BOX-WINGモデル）の構築

ADEOSは、球形の測地衛星と異なり、著しく非対称な形状をしている。特に太陽パネル部は、本体と比較して断面積も大きいため、大気抵抗や太陽輻射圧の影響を正確に見積もるためには、これらの形状を無視できない。

ここでは、ADEOS本体を直方体、太陽パネルを独立の長方形で近似したBOX-WINGモデルを構築し（図7）、軌道解析ソフトウェアに組み込みを行った。各側面の面積は、本体進行方向（along-track） 14m^2 、動径方向（radial） 20m^2 、法線方向（cross track） 16m^2 、太陽パネル 60m^2 とした。太陽パネルは、常に太陽の方向を向くように、本体に対して回転する。

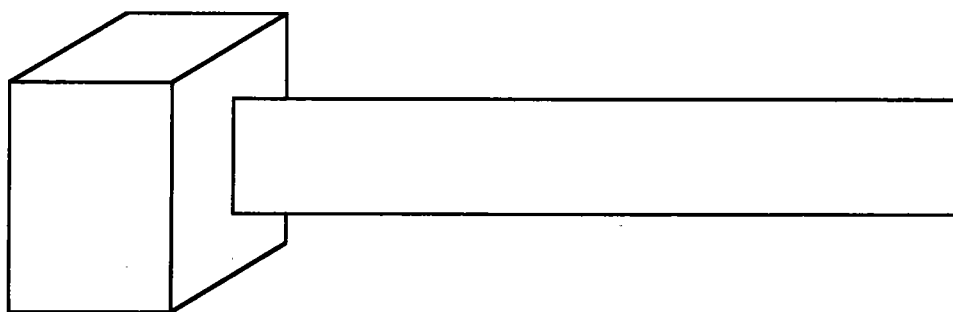


図7 BOX-WING モデル

(4) グローバルデータによる軌道予報実験

① 経験的加速度の推定方法

まず、解析条件について検討した。ここでは、経験的加速度の推定方法についての解析実験結果を示す。経験的加速度とは、モデル化できない外力の誤差を軽減するために便宜的に求めるパラメータであり、各衛星の条件により、その成分や推定頻度を設定する必要がある。

用いたデータは、下里を含むADEOSグローバルデータで、解析期間は、1996年 (a) 10/30-11/1、(b) 11/8-11/10の3日アーク2組である。大気モデルはDTM²⁾、重力モデルはJGM-3³⁾を用いた。また、大気抵抗係数を1日毎に推定し、太陽輻射圧係数は1.5に固定した。

経験的加速度を、(ア) 全く推定しない、(イ) along track成分のみ推定する、(ウ) along track とcross track 成分を推定する、という3通りの条件で解析し、予報結果を比較した。これらの推定は、1日毎に行った。

解析後の残差(cm)は以下の通り。

ARC	Data	(ア)	(イ)	(ウ)
(a)	64	265.9	4.9	2.3
(b)	60	282.0	3.2	1.6

経験的加速度を全く推定しないと、軌道残差は非常に大きくなるのがわかる。

(b)のアーク期間に求められた軌道(決定軌道)を真値と考え、(a)からの外挿結果(予報軌道)と比較した。結果を、図8に示す。これらは、(b)の期間で、(a)からの予報値と(b)による決定値の差を図示したものである。これらの図から言えることは、cross track 成分を推定すると、軌道残差は最も小さくなるにもかかわらず、予報軌道には、1軌道周期の大きな振動誤差があらわれると共に、along track 方向に著しく誤差が拡大する。予報は、along track 方向の加速度のみを推定した場合に最も良く、1週間後に300~400mとなった。

② 質量中心補正および形状モデルの検証

次に、質量中心補正及び形状モデル(BOX-WINGモデル)の有無による、予報軌道の比較を行った。用いたデータ及び解析条件は前節と同一であり、経験的加速度については、上記結果を踏まえて、along track 成分についてのみ行っている。

質量中心補正を行わなかった場合(No COM)と形状モデルを適用しなかった場合(No BW)について解析を行い、両モデルを適用した場合(Ref:上記(イ))を基準として比較した。

解析後の残差(cm)は以下の通り。なお、比較のためRefの場合を再掲した。

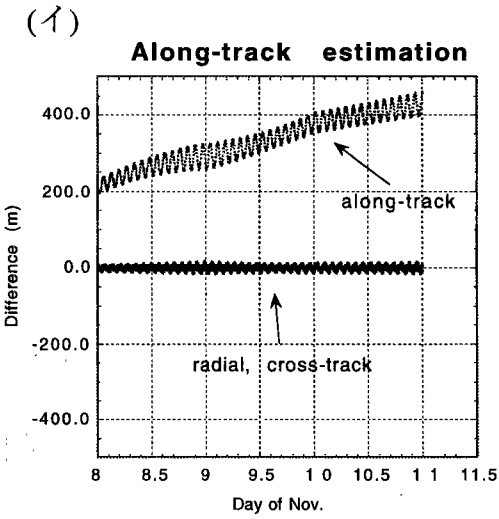
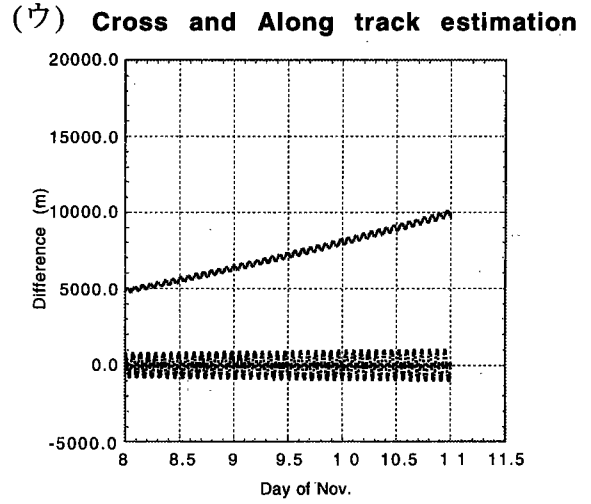
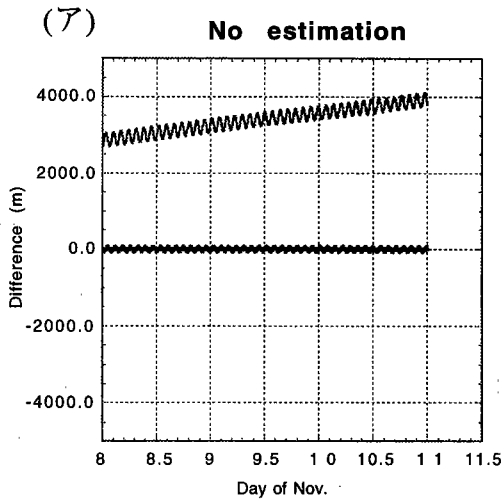
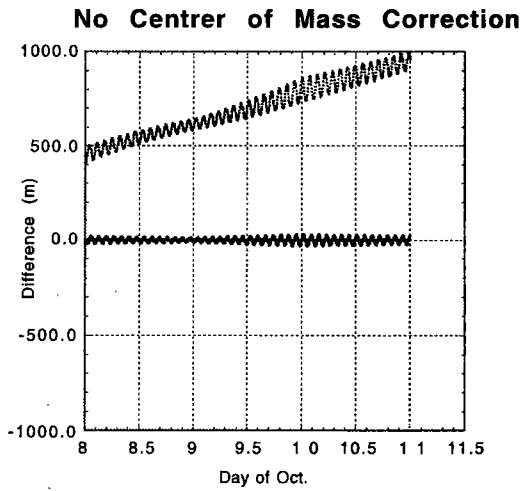
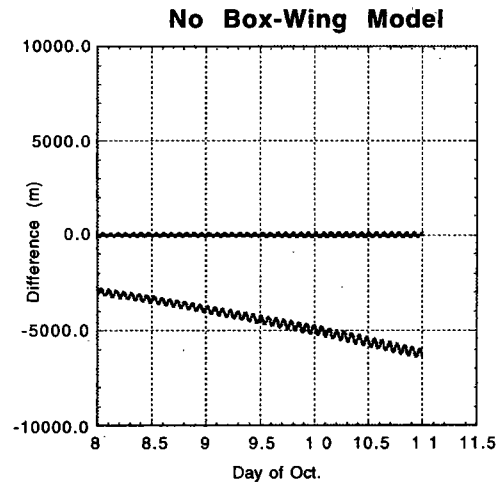


図8. 経験的加速度の推定条件による予報軌道誤差



(No COM)



(No BW)

図9. モデル適用を行わない場合の予報軌道誤差

ARC	Data	Ref	No COM	No BW
(a)	64	4.9	9.3	2.9
(b)	60	3.2	5.0	2.1

上記と同様にして、それぞれの場合について、1週間後の予報軌道を決定軌道と比較した。結果を図9に示す。それぞれ形状モデル、質量中心補正を適用しなかった場合の予報軌道と、決定軌道との差を示している。

図からわかるように、一週間後のalong track方向の予報誤差は、両モデル適用の場合300~400mであるのに対して、質量中心補正を適用しなかった場合で約2倍の700~800m、形状モデルを適用しなかった場合、約10倍の4000~5000mに達する。

それに対して、cross track及びradial方向の誤差は、両モデルの不適用による差の拡大は若干あるものの、絶対値としてはるかに小さい。

これらの予報誤差の絶対値自体は、データ数や分布にも依存すると思われるものの、両モデル、特に形状モデルの適用が、結果を有意に改善することは明らかである。

③長期データの総解析による精度評価

ア. 方法

ADEOS全観測期間中、比較的データの多い平成9年2月~3月のデータを総解析し、決定軌道評価を行うと共に、軌道予報精度の検証を行った。

総解析の方法は以下の通りである。まず、この期間のデータを、10日アークで解析し、軌道残差を元にデータ編集を行う。さらに、この編集データを用いて、3日アーク解析を行った。3日アーク解析は、1日毎の移動アークとした。このような手順とした理由は、当初から3日アーク解析を行うと、含まれるデータが少なすぎることから、粗悪なデータを編集除去することが困難であるためである。また、3日アークと10日アークの結果を比較することにより、決定軌道の評価ができる。

予報軌道は、前節までと同様、これらの3日アークからの外挿軌道積分により求める。これを、アーク内の決定軌道と比較することによって、予報軌道評価を行う。

解析に用いられた2月、3月のグローバルデータ数を図10に示す。図は、それぞれの月で、解析された累積データ数を日に対してプロットしたものであり、傾斜が急な部分はデータ密度が高いことを示している。また、離散化したそれぞれのブロックが、同一パスである。パス数は、最も多くて1日に4~5パス程度である。

移動3日アークの解析残差を表3に示す。残差は、数cmから十数cmぐらいの値となる。これらの値は、結果が十分に収束している事を示しているが、全体としてのデータ密度がかなり低いため、この値のアーク間の相対的な大小は、必ずしもその軌道決定精度を反映していない。

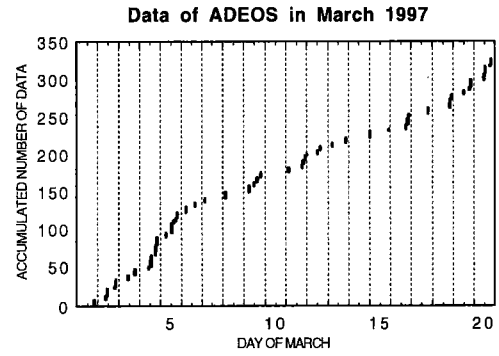
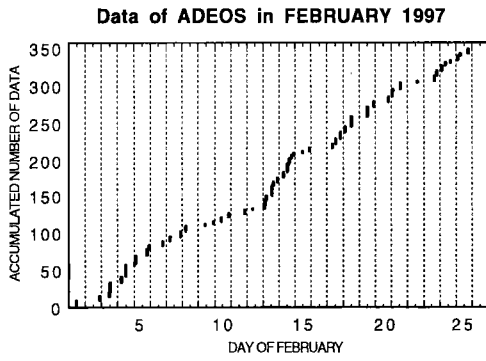


図10 解析データ数

表3 解析残差

(FEB)			(MAR)		
1stday	data	rms(cm)	1stday	data	rms(cm)
1	34	1.9	1	47	9.4
2	47	2.3	2	78	14.4
3	67	10.9	3	82	16.5
4	54	6.4	4	82	16.6
5	45	5.2	5	50	8.8
6	26	0.5	6	27	0.6
7	26	0.6	7	40	7.5
8	24	20.2	8	34	3.9
9	22	25	9	48	9.0
10	18	*	10	34	6.7
11	49	6.7	11	46	12.3
12	77	8.1	12	24	18.1
13	82	10.3	13	23	20.0
14	40	4.4	14	27	8.1
15	28	11.6	15	34	8.5
16	42	7.2	16	40	11.6
17	62	8.3	17	42	11.6
18	48	1.2	18	62	12.2
19	46	2.4	19	58	16.0
20	17	*	20	70	34.4
21	35	2.8			
22	0	*			
23	43	11.5			
24	29	8.2			
25	16	*			
26	0	*			

イ. 決定軌道の精度

決定軌道の評価は、同一日の4通りの軌道を比較することにより行った。すなわち、10日アークの軌道および3つの移動3日アークの軌道である。

データ数、パス数が比較的多い2月14日について、決定軌道を比較した結果を表4に示す。表は、10日アークから求めた軌道と移動3日アークから求めた軌道の差、および移動3日アーク間の差を、進行方向、法線方向、動径方向について、それぞれ平均値とRMSを求めたものである。3日アークについては、それぞれ、(a)2/14-2/16, (b)2/13-15, (c)2/12-14のアークから求めた軌道について示している。

異なるアークから求めた軌道の一致度を、軌道決定確度の目安となると考え、表4の結果を評価すると、3日アーク解については、進行方向で1~2m程度、それ以外の成分は数10cm程度で決まっていることがわかる。

解析した2月、3月全ての日について同様の比較を行ったものを、進行方向についてのみ表5に示す。左の二つの表が、10日アークと移動3日アーク間の、右が、移動3日アーク間の差である。アスタリスクで示した部分は、データ数が少ないため、解を求めることができなかったアークを含むものである。

表からわかるように、一部のアークについては、この差が著しく大きくなっている。これを、図のデータ数と対応させると、差の大きな日あるいはアークは、その中に含まれるデータ数がほとんどないものであることがわかる。このように、今回用いられたデータは、精密軌道決定の目的のためには、データの時間密度が不足していると言わざるを得ない。

表4 アーク間の決定軌道差

ARC	COMPONENT	(a)	(b)	(c)
10d-3d	ALONG	-55 ± 78	-25 ± 39	-11 ± 44
	CROSS	1 ± 52	0 ± 32	0 ± 50
	RADIAL	-1 ± 24	0 ± 15	-1 ± 14
		(b)-(a)	(c)-(a)	(c)-(b)
3d-3d	ALONG	30 ± 58	44 ± 52	14 ± 48
	CROSS	0 ± 21	0 ± 13	0 ± 17
	RADIAL	1 ± 14	0 ± 14	-1 ± 7

表5 アーク間の決定軌道差(進行方向) ; 単位はcm
 左が10日-3日アーク、右が3日アーク間の差

day	1st day	2nd day	3rd day	day	2nd - 1st	3rd - 1st	3rd - 2nd
2/1	25 ± 124	*	*	2/1	*	*	*
2/2	84 ± 88	21 ± 45	*	2/2	-63 ± 79	*	*
2/3	-14 ± 33	-28 ± 98	-15 ± 76	2/3	-14 ± 98	-1 ± 74	13 ± 53
2/4	-117 ± 103	-22 ± 33	-150 ± 165	2/4	95 ± 91	-32 ± 140	-128 ± 136
2/5	-47 ± 40	18 ± 74	-23 ± 23	2/5	65 ± 80	24 ± 25	-41 ± 81
2/6	79 ± 40	17 ± 17	-117 ± 111	2/6	-62 ± 35	-195 ± 120	-133 ± 115
2/7	184 ± 131	131 ± 87	-19 ± 38	2/7	-54 ± 103	-203 ± 140	-150 ± 115
2/8	398 ± 378	47 ± 55	143 ± 143	2/8	-351 ± 361	-254 ± 259	96 ± 142
2/9	-128 ± 201	-90 ± 132	-128 ± 124	2/9	37 ± 190	-1 ± 190	-38 ± 202
2/10	*	44 ± 274	5 ± 210	2/10	*	*	-39 ± 97
2/11	133 ± 133	*	-451 ± 359	2/11	*	-584 ± 451	*
2/12	-166 ± 195	126 ± 76	*	2/12	291 ± 200	*	*
2/13	-27 ± 34	-34 ± 41	-2 ± 38	2/13	-6 ± 10	26 ± 26	32 ± 28
2/14	-55 ± 78	-25 ± 39	-11 ± 44	2/14	30 ± 58	44 ± 52	14 ± 48
2/15	392 ± 385	-144 ± 177	-56 ± 142	2/15	-537 ± 500	-448 ± 469	89 ± 74
2/16	3795 ± 2880	-52 ± 156	824 ± 561	2/16	-3847 ± 2807	-2970 ± 2906	877 ± 616
2/17	24 ± 19	1067 ± 1235	2 ± 71	2/17	1043 ± 1230	-22 ± 59	-1065 ± 1206
2/18	-58 ± 55	-13 ± 32	-1971 ± 1678	2/18	45 ± 32	-1913 ± 1640	-1958 ± 1662
2/19	-111 ± 299	-15 ± 126	7 ± 55	2/19	96 ± 191	118 ± 254	22 ± 75
2/20	*	-3059 ± 3066	-3272 ± 3178	2/20	*	*	-213 ± 140
2/21	31 ± 85	*	24 ± 104	2/21	*	-6 ± 38	*
2/22	*	167 ± 35	*	2/22	*	*	*
2/23	26 ± 21	*	84 ± 89	2/23	*	58 ± 91	*
2/24	30 ± 49	3 ± 4	*	2/24	-27 ± 47	*	*
2/25	*	76 ± 56	-6 ± 8	2/25	*	*	-82 ± 63
2/26	*	*	194 ± 96	2/26	*	*	*

day	1st day	2nd day	3rd day	day	2nd - 1st	3rd - 1st	3rd - 2nd
3/1	763 ± 670	*	*	3/1	*	*	*
3/2	-47 ± 59	-40 ± 53	*	3/2	7 ± 39	*	*
3/3	71 ± 78	5 ± 25	-72 ± 115	3/3	-66 ± 87	-143 ± 132	-77 ± 104
3/4	-28 ± 45	-8 ± 22	-3 ± 11	3/4	21 ± 36	25 ± 41	4 ± 14
3/5	16 ± 31	1 ± 6	10 ± 38	3/5	-15 ± 28	-6 ± 46	9 ± 35
3/6	12 ± 184	25 ± 19	-17 ± 25	3/6	13 ± 174	-28 ± 203	-42 ± 42
3/7	-134 ± 145	494 ± 372	-377 ± 386	3/7	627 ± 479	-244 ± 445	-871 ± 629
3/8	334 ± 167	-141 ± 90	1119 ± 703	3/8	-475 ± 210	785 ± 605	1260 ± 761
3/9	139 ± 205	72 ± 119	39 ± 95	3/9	-67 ± 143	-100 ± 226	-33 ± 125
3/10	863 ± 925	1363 ± 903	361 ± 877	3/10	499 ± 192	-502 ± 239	-1001 ± 332
3/11	48 ± 58	46 ± 57	116 ± 169	3/11	-2 ± 54	68 ± 180	70 ± 132
3/12	-102 ± 91	-104 ± 98	-112 ± 129	3/12	-2 ± 19	-9 ± 127	-8 ± 121
3/13	-102 ± 152	168 ± 112	204 ± 138	3/13	270 ± 194	305 ± 211	36 ± 31
3/14	-3006 ± 1360	-287 ± 128	283 ± 274	3/14	2719 ± 1349	3289 ± 1124	570 ± 245
3/15	229 ± 271	231 ± 834	108 ± 400	3/15	2 ± 568	-121 ± 166	-123 ± 466
3/16	436 ± 372	465 ± 316	919 ± 630	3/16	29 ± 146	483 ± 369	454 ± 322
3/17	356 ± 490	827 ± 532	432 ± 311	3/17	471 ± 237	76 ± 332	-395 ± 266
3/18	-238 ± 422	377 ± 257	768 ± 625	3/18	615 ± 501	1007 ± 588	392 ± 456
3/19	-203 ± 143	-23 ± 63	-31 ± 103	3/19	179 ± 138	172 ± 146	-8 ± 45
3/20	88 ± 226	-21 ± 120	-9 ± 45	3/20	-109 ± 190	-97 ± 210	12 ± 78

ウ. 予報軌道の評価

次に、予報軌道と決定軌道を比較することにより、予報軌道の評価を行った。一例として、上記2月14日の決定軌道について、時間移動した異なる3日アークから求めた予報軌道と比較した結果について示す。基準とする決定軌道としては、(b)のアークから求めたものを用いた。予報の精度からみると、基準決定軌道はほぼ真値とみなして議論することができる。

図11に、それぞれの成分毎に、予報軌道と決定軌道の差のプロットを示す。これらは、5日間の移動アークからの予報軌道との比較であり、比較日（2月14日）までの経過日数は、5日～9日である。

図では、それぞれの成分に、バイアス誤差とonce per rev 周期の振動誤差が見られる。表6に、図11に見られる予報軌道と決定軌道の差の平均（バイアス誤差）とRMS（振動誤差の大きさ）を成分毎に示す。Along-track 成分については、総じて数百m程度の誤差があることがわかる。平均軌道差が必ずしも経過時間に依存していないのに対して、ばらつきを示すRMSは、経過時間に伴って変化する。すなわち、時間が経過するに従って、予報軌道の振動が大きくなる。このことから、平均予報精度は、そのアーク内のデータ取得状況にかなり影響されるのに対して、RMSは、時間経過に支配されると考えられる。

他の成分については、Along-track成分に比べると誤差は小さい。特にバイアス誤差は、数cmから数十cmであり、決定軌道の精度内である。振動誤差については、Cross-track成分で数m、Radial成分で数十m程度である。全てにおいて、Cross-track成分の予報精度が最も小さい。時間経過に対する依存性は、両成分共、Along-track成分と同様、バイアス誤差についての依存性ははっきりせず、振動誤差については時間と共に増大する傾向が見られる。

軌道予報精度は、無論データ取得状況に影響されるものの、前項で示した軌道決定に比べると、データ密度の制約はより低いと考えられる。これは、軌道予報を行う過程で、データは、軌道積分のよりよい初期値としての決定軌道を与える意味をもつが、積分そのものには影響しないことによる。したがって、その精度向上のためには、積分過程で用いられるパラメータやモデルの精度がより重要である。

その意味で、形状モデルの適用は本質的に重要であると共に、そのモデルパラメータをさらに精密化することが予報精度向上につながる。形状モデルパラメータの精密化は、本研究の次の目標であったが、この目的のためには、今回のADEOSデータの時間空間密度はかなり不足している。形状モデルは一度精密化すれば、その後はデータ数の多少に関係なく有効なので、このためには、例えば強化観測期間を設けるなどして、グローバル局の協力を仰ぎ、時間空間密度の高いデータを取得することが望まれる。

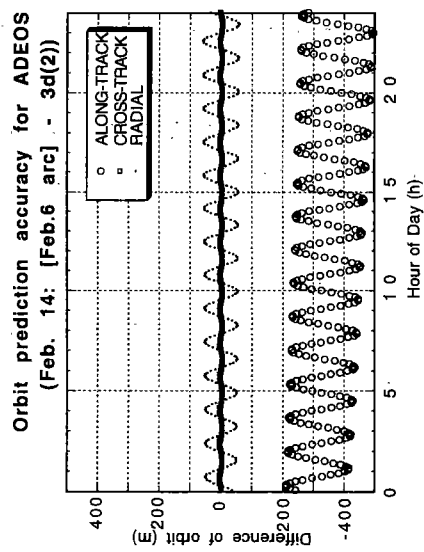
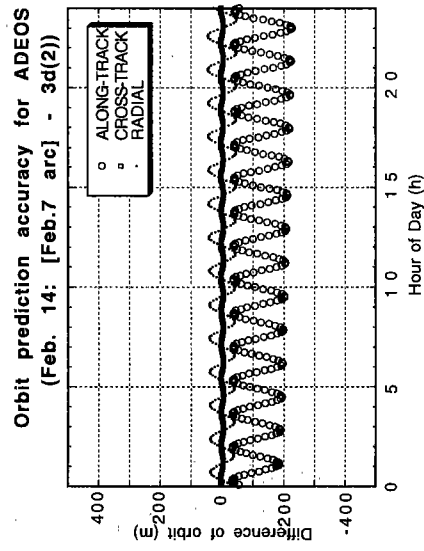
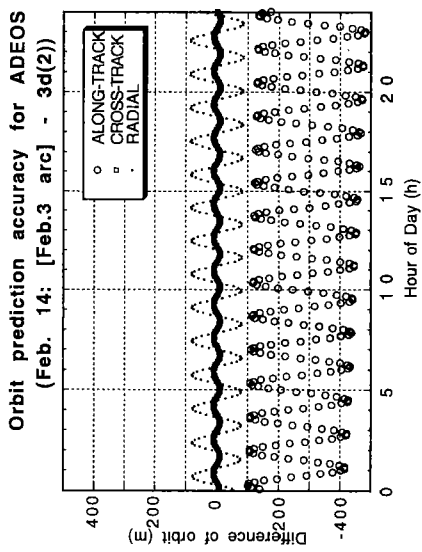
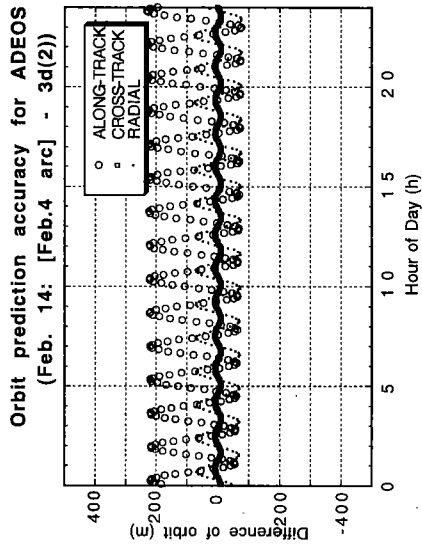
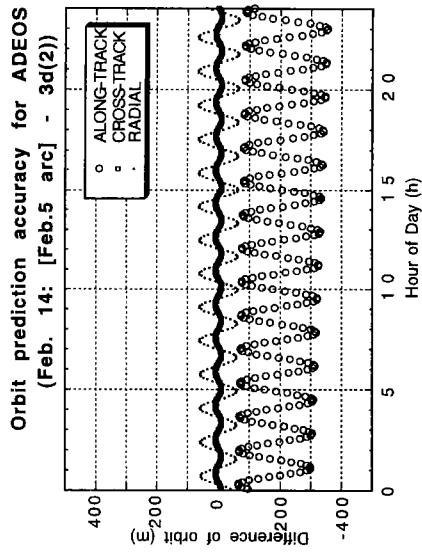


図11 2月14日の軌道予報評価

表6 2月14日の予報軌道評価

component	arc (3day)	Difference(m)	
ALONG	2/ 3-5	-281.59 ±	118.54
	4-6	80.99 ±	103.60
	5-7	-200.06 ±	90.18
	6-8	-345.17 ±	80.15
	7-9	-120.11 ±	61.36
CROSS	2/ 3-5	-0.07 ±	7.76
	4-6	-0.06 ±	6.83
	5-7	-0.07 ±	7.29
	6-8	0.03 ±	2.47
	7-9	0.07 ±	2.80
RADIAL	2/ 3-5	0.29 ±	58.21
	4-6	-0.07 ±	51.24
	5-7	0.18 ±	44.23
	6-8	0.36 ±	38.45
	7-9	0.06 ±	30.14

エ. 大気抵抗係数の見積もり

本解析では、大気抵抗係数を1日毎に推定している。推定方法としては、他の推定パラメータ同様、ベイジアン最小自乗法を適用しており、係数の初期値を2.5、拘束条件としてのアプリアシグマを1.0としている。

図12に、3日アーク及び10日アークから推定された大気抵抗係数を、2月分について示す。3日アークでは、異なるアークからの値を重ねてプロットしている。図から、推定された大気抵抗係数は、2.5付近にばらついており、上記の拘束条件を考慮しても、ADEOSに適用すべき大気抵抗係数は、ほぼ2.5としてよいことがわかる。大気抵抗係数は、定義上本来衛星に固有の定数であるが、特に低高度衛星の軌道解析を行なう際には、他の誤差要因を吸収させるために、これを、便宜的に推定することが有効かつ必要である。

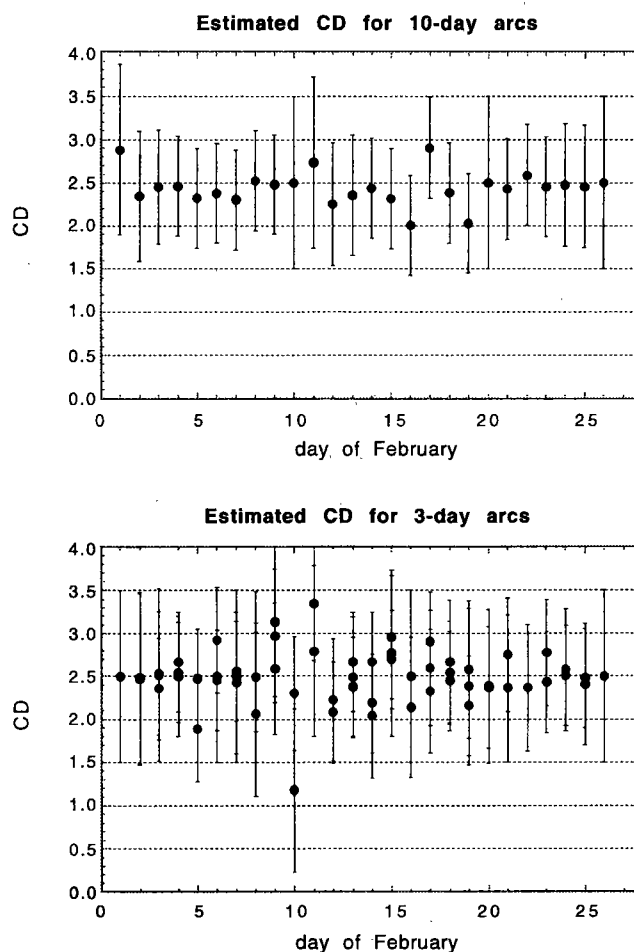


図11 推定された大気抵抗係数 (2月)

5. 本研究により得られた成果

ADEOSの軌道解析について、物理モデル、解析条件、補正モデル等について検討し、軌道決定・予報精度を改善した。特に、ADEOSの非対称形状モデルとして、BOX-WINGモデルを適用し、軌道予報実験を行うことにより、その有効性が確認できた。本研究は、ADEOSのセンサーの一つであるRIS観測の支援技術開発として行われたものであるが、ここでADEOSの実データを用いて開発・検証された手法は、今後打ち上げられる他の低高度地球観測衛星にも十分に応用が可能であり、高精度の軌道予報、決定を必要とするセンサーのための基盤技術として大きな意味を持つものである。

研究を通じての問題点として、モデルの高精度化のための測距データの時間密度が

研究を通じての問題点として、モデルの高精度化のための測距データの時間密度が不足していたことが挙げられる。したがって、今後の衛星については、打ち上げ後初期に強化観測期間を設けることが望まれる。

6. 参考文献

- 1) ADEOS/RIS Tracking Support Coordination Group: ADEOS/RIS Tracking Standards, (1996).
- 2) Barlier, F., Berger, C., Falin, J., Kockarts, G., Thuillier, G.: Atmospheric Model Based on Satellite Drag Data, Ann. Geophys., 34, 9-24, (1978).
- 3) Tapley, B.D., Watkins, M.M., Ries, J.C., Davis, G.W., Eanes, R.J., Poole, S.R., Rim, H.J., Schutz, B.E., Shum, C.K., Nerem, R.S., Lerch, F.J., Pavlis, E., Klosko, S.M., Pavlis, N.K., Williamson, R.G: The JGM-3 Gravity Model, XIX General Assembly of the European Geophysical Society, Grenoble, France, April 25-29, (1994).

[国際共同研究等の状況]

なし

[研究成果の発表状況]

(1) 口頭発表

- ① A.Sengoku, M.Fujita, H.Matsushita : 2nd International Workshop on ADEOS, Yokohama (1997) "Orbit Analysis of ADEOS -numerical and analytical approaches -"
- ② 松下優・仙石新 : 第29回天体力学研究会 (1997) 「人工衛星の断面積が軌道に及ぼす影響」