

ALOS の精密軌道決定

中 村 涼*¹, 中 村 信 一*¹, 工 藤 伸 夫*¹

Precise Orbit Determination for ALOS

By

Ryo NAKAMURA*¹, Shinichi NAKAMURA*¹ and Nobuo KUDO*¹

Abstract: The Advanced Land Observing Satellite (ALOS) has been developed to contribute to the fields of mapping, precise regional land coverage observation, disaster monitoring, and resource surveying. Because the mounted sensors need high geometrical accuracy, precise orbit determination for ALOS is essential. So ALOS mounts the GPS receiver. This paper deals with the precise orbit determination experiments for ALOS using Global and High Accuracy Trajectory determination System (GUTS).

Keywords: ALOS, precise orbit determination, GPS

概 要

陸域観測衛星 (ALOS) は地図作成, 地域観測, 災害状況把握, 資源調査などへの貢献を目的とした地球観測衛星である. ALOS が搭載している工学センサは高い幾何精度を必要とするので, 高精度に軌道を決定する必要がある. そのため, ALOS には 2 波型 GPS 受信機が搭載された. 本論文は JAXA 高精度軌道決定システム (GUTS) を用いて行った ALOS の精密軌道決定実験の結果まとめたものである.

1. は じ め に

陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS) は, 2006 年 1 月 24 日に, 種子島宇宙センターから打ち上げられた. 地図作成, 地域観測, 災害状況把握, 資源調査などへの貢献を目的とする世界最大級の地球観測衛星であり, 観測機器としては, 標高など地表の地形データを読みとる「パンクロマチック立体視センサ (PRISM)」, 土地の表面の状態や利用状況を知るための「高性能可視近赤外放射計 2 型 (AVNIR-2)」, 昼夜・天候によらず陸地の観測が可能な「フェーズドアレイ方式 L バンド合成開口レーダ (PALSAR)」の 3 つの地球観測センサを搭載し, 詳細に陸地の状態を観測する機能を有している. ALOS は多くのミッションがあり, それに伴い多くの技術的要求が存在する[1][2]. そのうちのひとつとして, センサが必要とする高い幾何精度を達成するために, ALOS の軌道を高精度に決定する必要があった. そのため, ALOS は 2 波型 GPS 受信機を搭載している.

GPS 受信機データを用いた低軌道周回 (LEO) 衛星の精密軌道決定は広く研究されており, GRACE や CHAMP など数 cm の軌道決定結果が報告されている[3][4]. JAXA も 1995 年ごろより高精度軌道決定システム (GUTS) の開発を始めた. 1 波型 GPS 受信機を搭載した ADEOS-II の精密軌道決定実験では 23 cm 程度の軌道決定精度を達成し[5], 2 波型 GPS 受信機を搭載した海外の LEO 衛星である GRACE の軌道決定では DLR の結果と比較して 8 cm の軌道決定精度を達成している[6]. また, GPS 衛星群の軌道決定では IGS (International GNSS Service) 軌道暦との比較で 7 cm の精度を達成している.

ALOS の軌道決定精度要求は 1 m 以内であるため, 搭載 GPS 受信機が常に 4 機以上の GPS 衛星を捕捉していれば精度要

* 1 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)

求を満たすことは難しくないと思われた。しかし、実際には搭載GPS受信機は頻繁にロックオフを起こし、捕捉GPS衛星が4機を下回る期間が非常に長く存在することが確認された。GPSを用いた位置決定は3次元位置と時刻を同時に解くために同時に4機以上のGPS衛星が捕捉されている必要がある。そのため、ALOS搭載GPS受信機データを通常のGPS受信機データと同じように処理した場合、2波型受信機使用の他事例と比べ、軌道決定精度が高くない事が判明した。そこで、我々はデータの一時処理を適切に行うことにより、得られたデータを最大限に利用し軌道決定を行った。

2. ALOSのミッション要求

全世界の陸域において1/250,000スケールの地形図作成ミッションにおいて、ALOSは高精度な位置決定が求められた。例えば、SAR(合成開口レーダ)インタフェロメトリ[7]という技術を用いるPALSARは、同じ地点を2度観測して差分を取ることで地殻変動などを精度よく観測することができる。衛星の回帰位置が全く同じで、地面の変化が全くなければ、この差分がゼロになることを利用した技術である。しかし、ALOSは実際には同じ所に帰ってくる確率はほぼゼロで、ずれた分はALOSの軌道情報を用いて補正する必要があるため、ALOSの正確な軌道情報が必要になるのである。具体的には位置決定精度で1m以内が要求されている。

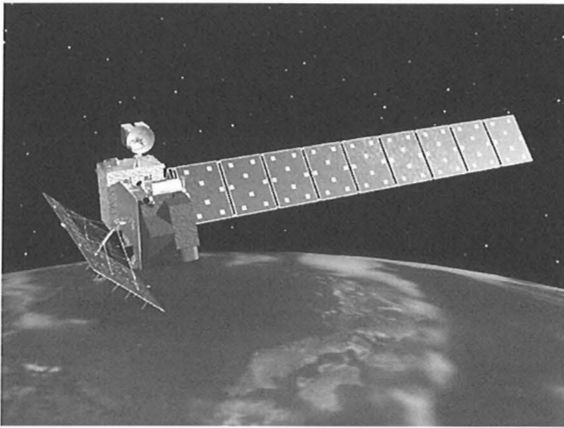


Fig.1 ALOS

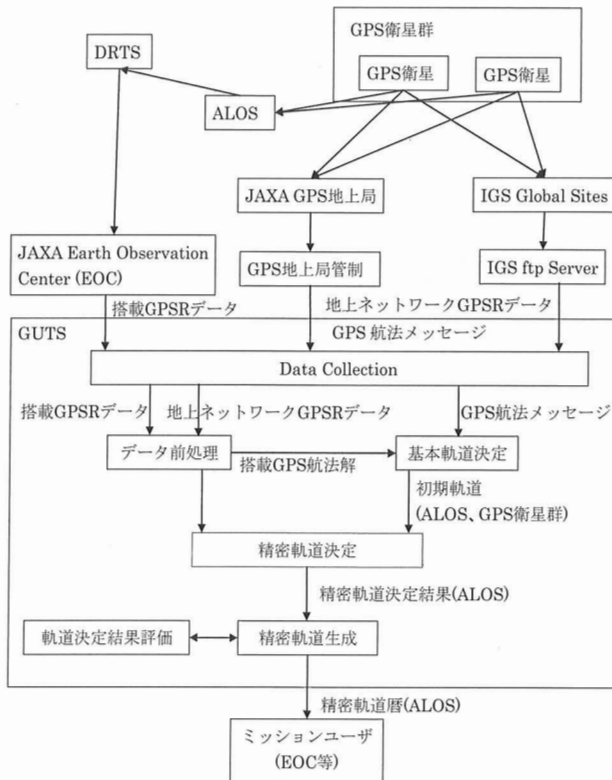


Fig.2 GUTSのシステム

3. 高精度軌道決定システム (GUTS)

3.1 GUTSのシステム構成

GUTSのシステム構成をFig.2に示す。GUTSはALOS搭載GPS受信機データをJAXA地球観測センター(EOC)から受け取り、GPS地上局のデータをJAXA GPS地上局管制とIGSのftpサーバから取得している。GUTSの精密軌道決定はデータ前処理、基本軌道決定及び精密軌道決定からなっている。GPSデータ(RINEX)を観測データとし、力学モデルと観測モデルの最適なパラメータを推定することにより精密軌道決定を実行する。GPS航法メッセージと前処理されたALOS搭載GPS受信機データを用いて基本軌道決定を行い、それを初期軌道として用いている。

3.1.1 前処理

GUTSは精密軌道決定を行う前に、集めたデータに前処理を施す。搭載GPS受信機データのクロックオフセットの補正や、搭載GPS受信機データと地上局GPS受信機データのサイクルスリップの検出と補正、及び電離層遅延量の補正を行い、その後データのスムージングと圧縮を施す。

3.1.2 基本軌道決定

GPSデータ(RINEX航法データ)から初期軌道を推定する。まず、GPSデータからあるエポックを選び、それを初期状態とし力学モデルを用いて伝播する。そうして得られた軌道とRINEX航法データの残差が最小になるように初期状態を微調整する。この操作を繰り返し、残差を最小にする初期状態を求め、それを力学モデルで伝播したものを初期軌道とする。

3.1.3 精密軌道決定

GUTSの精密軌道決定はGPS受信機観測データ(RINEX観測データ)を観測データとし、それに対し力学モデル及び観測モデルのパラメータをSquare Root Information Filterで推定する。

地上局位置はIGSに公表されている座標（SINEX）を使用し、まずGPS群の軌道決定を行う。そして、決定されたGPS群の軌道を固定し、ALOSの軌道決定を行う。詳細は省略し以下に概要を示す。

3.1.3.1 力学モデル

力学モデルはGPS群及びALOSの軌道伝播を行う際に考慮するそれぞれの衛星に加わる力をモデル化したものである。

Table 1 力学モデル

モデル	GPSのダイナミクス	ALOSのダイナミクス
地球重力	JGM3(12*12)	JGM3(70*70)
他天体重力	太陽、月、全惑星	太陽、月、全惑星
太陽輻射圧モデル (地球と月の食のモデルも含め)	GSPM.04b CODE	球モデル、多面体モデルで推定
地球輻射圧モデル	地球アルベドと地球赤外放射	地球アルベドと地球赤外放射
潮汐	固体地球潮汐	IERS2003準拠
	海洋潮汐	IERS2003準拠
	極潮汐	IERS2003準拠
大気抵抗		球モデル、多面体モデルで推定
相対論効果	IERS2003準拠	IERS2003準拠
経験的加速度	定数	

3.1.3.2 観測モデル

GPS衛星群の軌道決定に用いる観測データは地上局GPS受信データから計算されたものであり、地上局とGPS群の幾何学的な距離に多くの観測誤差がのっている。ALOSの軌道決定に用いる観測データはALOS搭載GPS受信データから計算されたものなので、同様に多くの誤差が存在する。これらの誤差を補正するためにモデル化により考慮しているものを以下に示す。

Table 2 観測モデル

モデル	地上局GPS受信機	ALOS搭載GPS受信機
幾何距離(伝播遅延)	Light Time Equation	Light Time Equation
衛星時計・受信機時計誤差	考慮	考慮
電離層遅延	電離層フリー線形結合	電離層フリー線形結合
対流圏遅延	Lanyi Model	Lanyi Model
GPSアンテナ位相中心	Blockごとに設定	Blockごとに設定
受信アンテナ位相中心	局ごとに設定	ALOS(X,Y,Z)=(1.820m,-0.858m,-1.562m)
観測点位置変位	固体地球潮汐(IERS2003準拠)	ALOSの力学モデルで伝播
	海洋潮汐(IERS2003準拠)	
	極潮汐(IERS2003準拠)	
地球回転パラメータ変動	IERS1998準拠	IERS1998準拠
搬送波位相バイアス	考慮	考慮

3.1.3.3 推定パラメータ

GUTSは軌道要素に加え、上に示したモデル化に関連して多くのパラメータを推定する機能を有している。以下に今回のALOSの軌道決定において推定しているパラメータを示す。GPS群の軌道決定ではGPS受信機(地上局)を固定してGPS群の位置を推定しているのに対し、ALOSの軌道決定ではGPS群の位置を固定してGPS受信機(ALOS搭載)の軌道を推定している点に注意が必要である。

Table 3 推定パラメータ

	GPS衛星軌道決定	ALOS衛星軌道決定
軌道要素	6要素	6要素
太陽輻射圧	太陽輻射圧スケールファクタ Γ_1	GSPM.04b(スケールファクタ、yバイアス)
大気抵抗		大気密度スケールファクタ
クロック	送受信機クロック	受信機クロック
搬送波バイアス	推定	推定
対流圏	湿潤成分	
経験的加速度	定数	

4. ALOS 搭載 GPS 受信機データの特徴

GUTS の性能からして、ALOS 搭載 GPS 受信機が常に 4 機以上の GPS 衛星を捕捉していれば ALOS の軌道決定精度要求を満足することは難しくないように思われた。しかし、ALOS 搭載 GPS 受信機は他のセンサとの干渉により、GPS 信号のロックオフが発生するという問題を抱えていたため、捕捉 GPS 衛星数が 4 機を切る期間が頻発した。

4.1 干渉問題

ALOS 搭載の合成開口レーダ PALSAR は L バンドを用いた電波センサであり、GPS の L2 周波数 1227.6 MHz に近接した送信周波数を用いている。そのため電波干渉が起こるのを避けるため、PALSAR と GPS 受信期間に間に Fig.3 のようなインターフェースを設け、PALSAR の信号出力の瞬間は GPS 受信機の L2 信号の受信処理を止める機能を設けている。このため、PALSAR の運用頻度が増加すると L2 のロックオフが頻発する。また、PALSAR 以外にも想定外の干渉が発生し、搭載センサの運用頻度が増加すると、L2 だけでなく L1 のロックオフも頻発し、結果として、補足 GPS 衛星数が 4 機を切る期間が頻発した。GPS 信号を用いた位置決定は時刻と 3 次元位置を解く為に補足 GPS 衛星が 4 機以上であることが求められる。そのため、補足衛星数が 4 機を切る時間帯が長くなると軌道決定精度も必然的に悪くなる。

Fig. 4 に実際に取得されたデータの中で棄却されたデータの割合を示している。L1 擬似距離はロックオフのため 10% 前後棄却され、L2 擬似距離もロックオフとエラーのため 20% 強棄却されている。また、L2 搬送波もロックオフのため 20% 強棄却されている。Fig. 5 に軌道決定に用いられた GPS 衛星数を示す。点線がデータが得られている衛星数で、実線が軌道決定に用いられた衛星数である。これを見ると軌道決定に用いられている衛星数が 4 機を切っている期間が頻発しているのがわかる。これを時間比にしたものを Fig. 6 に示す。GPS 衛星を 4 機以上補足できている期間が 35.7% しかないことが確認できた。

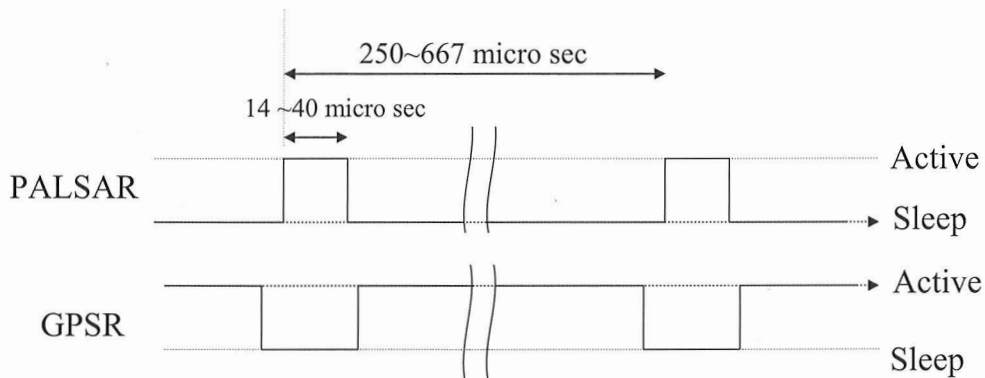


Fig. 3 PALSAR と GPS 受信機のインターフェース

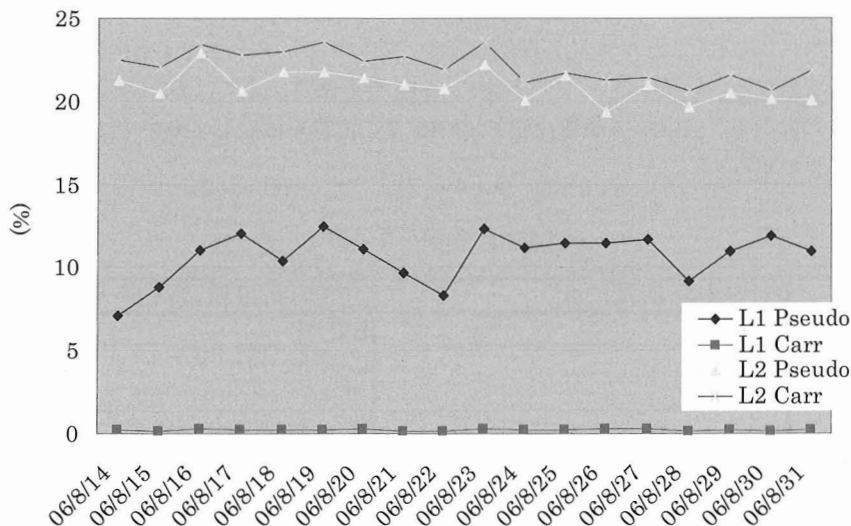


Fig. 4 データ棄却率

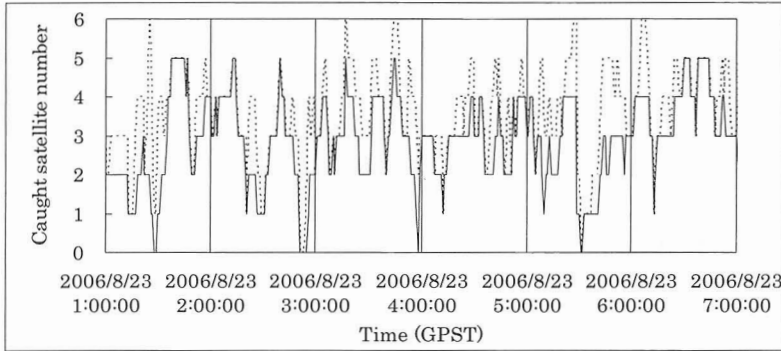


Fig. 5 捕捉GPS衛星数(点線)と軌道決定に用いられたGPS衛星数(実線)

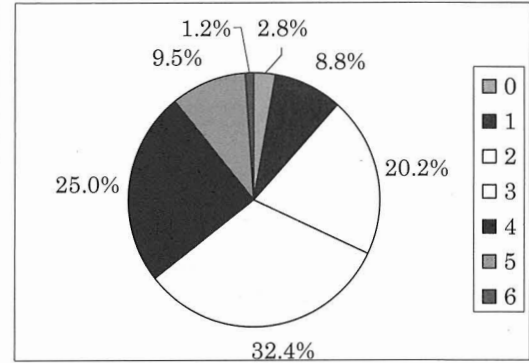


Fig. 6 軌道決定に用いられたGPS衛星数(時間比)

4.2 前処理時のパラメータ調整

GRACE-Bのように良好なGPS受信機データを用いた解析では、地上局GPS受信機データと同様にデータ処理を施しても十分な精度が達成できることが確認できているが、ALOS搭載GPS受信機データを同様に処理すると不良データが多いため補足GPS衛星数が4機を切る時間帯が頻発し、軌道決定精度を荒らす原因となると考えられる。そこで、我々は以下の3つのデータ処理パラメータをチューニングすることにより使用できるデータをできるだけ多くとれるようにした。

- ・パスが接続しているとみなす最大時間…これより長いとパスが分割される。
- ・有効なパスとみなす最小時間…これより短いパスは棄却される。
- ・キャリアスムージングをする間隔…キャリアスムージングは電離層フリー擬似距離データと電離層フリー搬送波位相データの差をとり、その差をある期間で平均したものを搬送波位相データに加えたものを擬似距離データとして用いているが、その平均をとる期間を調整する。

5 実 験

5.1 実行条件

地上GPS受信機データは30秒間隔のデータを、ALOS搭載GPS受信機データは1秒間隔のデータをそれぞれ40時間用いて軌道決定を行う。また、前処理はTab.5のパラメータを用いて実行した。

5.2 精度評価

軌道決定アークはFig.7に示すように16時間の重複部分を有しているために、その前後5時間を除いたアークでオーバーラップ比較を行い、差の最大値を軌道決定精度とした。この評価は相対評価であるが、軌道決定のランダム性の評価には用いることができる。

また、ALOSは衛星レーザ測距(SLR)用の反射鏡を搭載しているため、SLRにより得られるALOSまでの距離とGPS受信機データにより推定された軌道から計算されるALOSまでの距離との差(O-C)をとることで絶対評価を行っている。さらに、SLRデータのみで軌道決定した結果とGPS受信機データにより軌道決定した結果を比較することでも軌道決定精度の絶対評価を行っている。SLRデータのみを用いた軌道決定はデータが多く取得できている期間を選び、短いアークで軌道決定を行った。また、それでもSLRのデータは少なくSLRのみによる軌道決定はデータが存在しない期間は精度が悪いので、軌道決定結果を比較するのはSLRデータが存在する期間のみとした。

Table 5 前処理時のパラメータ

パスが接続しているとみなす最大時間	2秒
有効なパスとみなす最小時間	120秒
キャリアスムージングをする間隔	60秒

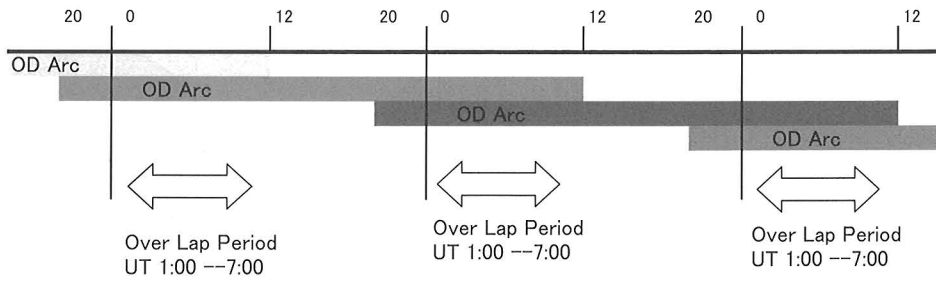


Fig. 7 軌道決定アークとオーバーラップ期間

Table 6 SLR 軌道決定結果との比較

	Radial	Cross-Track	Along-Track
平均(cm)	-2.98	-4.69	-5.44
標準偏差(cm)	20.54	38.32	28.76

6 結 果

まず、パラメータをチューニングすることにより捕捉 GPS 数が4機以上の時間が35.7%から49.5%へ上昇することが確認できた。オーバーラップによる評価の結果を Fig.8 に示すが、軌道決定精度が格段に良くなっていることがわかる。また、チューニング後は概ね 30 cm 以内に収まっていることが確認できる。

次に SLR との比較による評価を示す。SLR データが取得できた14日間のデータすべてを用いて O-C 評価を行った結果、差の平均が -4.78 cm、標準偏差が 12.03 cm であるので推定された軌道の示す ALOS までの距離と SLR データは誤差の範囲で矛盾がないことが確認できた。軌道決定結果の比較結果を Tab. 5 に示す。この結果からも、やや分解能は低いですが誤差の範囲で GPS の指し示す軌道と SLR が指し示す軌道が一致していることがわかる。また、1σの範囲内であれば絶対精度においても ALOS の位置決定精度である 1 m 以内を満足していることが確認できる。

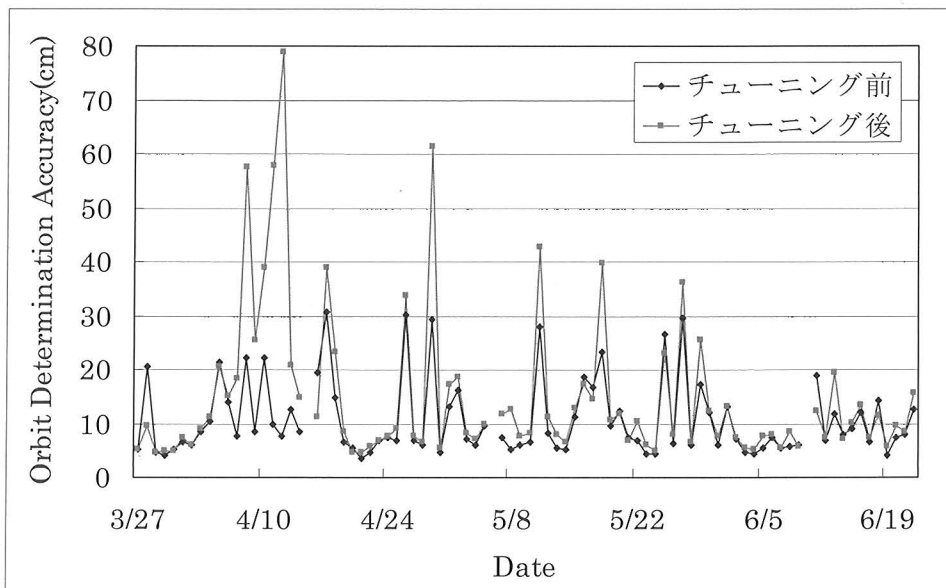


Fig. 8 オーバーラップ比較結果 (アーク中最大値)

7 結 論

我々は2波型GPS受信機を搭載しているALOSの軌道決定を行い、オーバーラップ及びSLRデータとの比較によって精度を評価した。ALOS搭載受信機は他のセンサとの干渉問題があり捕捉GPS数が4機を切る時間帯が多く存在したため、データ処理パラメータを調整することにより、できる限り多くのデータを用いられるようチューニングを施した。チューニングを施しても常に4機以上の衛星を捕捉している時間は十分ではなかったが、それにもかかわらずALOSの位置決定精度要求である1m以内を達成することができた。

参 考 文 献

- [1] T. Hamazaki, "Overview of the Advanced Land Observing Satellite (ALOS): Its Mission Requirements, Sensors, and a Satellite System," presented to ISPRS Joint Workshop "Sensors and Mapping From Space 1999," International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), Hannover, Germany, Sept. 27-30, 1999
- [2] JAXA Web Site: <http://alos.jaxa.jp/index-e.html>
- [3] IJssel, J. vd, P. Visser, CHAMP Precise Orbit Determination Using GPS Data, *Adv. Space Res.*, 31/(8), 2003
- [4] Z. Kang, B. Tapley, S. Bettadpur, J. Ries, P. Nagel and R. Pastor, "Precise orbit determination for the GRACE mission using only GPS data", *JOURNAL OF GEODESY* 80 (322-331)
- [5] S. Nakamura, S. Katagiri, "Comparison of OD systems of JAXA and DLR GSOC for ADEOS-II", JAXA Technical Note (QNX-050066)
- [6] S. Nakamura, T. Uchimura, S. Katagiri, "Comparing OD system for GRACE-B between DLR and JAXA - Changing the JAXA gravitational potential model from JGM-3 to GGM-02c -". JAXA Technical Note (QNX-050045)
- [7] <http://jaxa.eco.goo.ne.jp/interview02.html>