

## NASA の衛星データ解析ソフトウェア「GEODYN-II」の導入

藤田雅之：海洋研究室

仙石 新：航法測地課

### Introduction of Satellite Data Analysis Software "GEODYN-II" developed by NASA

Masayuki Fujita : Ocean Research Laboratory

Arata Sengoku : Geodesy and Geophysics Division

#### 1. はじめに

水路部では、1982年から第五管区海上保安本部下里水路観測所において、人工衛星レーザー測距 (SLR) の定常観測を行っており、グローバル観測局との位置の結合を行っている。また、米国航空宇宙局 (NASA) に設けられたデータセンター (CDDIS) に得られた測距データを提供することにより、地球力学研究や人工衛星の精密軌道決定に貢献してきた。さらに、海洋測地網一次基準点において、可搬式レーザー測距装置を運用し、主に国産測地衛星「あじさい」のデータを解析することにより、その位置決定を行っている。

SLR データは、今後、精密な地殻変動の検出や、非対称形状を持つ低高度地球観測衛星の軌道決定等、より広い範囲に 응용が期待されるが、そのためにはより高精度の解析が要求されることになる。

SLR データ解析のため、これまで水路部では HYDRANGEA (Sasaki, 1990) と呼ばれるソフトウェアが開発され、海洋測地における成果を挙げると共に、その機能にも少しずつ改良が加えられてきた。しかしながら、今後上記目的に 응용していくためには、地球物理モデルの適用やパラメータ推定機能などに、いくつか克服すべき問題が残されている。

現在、世界で最高水準と評される衛星データ解析ソフトウェアとして、NASA/GSFC (Goddard Space Flight Center) の GEODYN-II (Eddy et al., 1990) とテキサス大の UTOPIA (McMillan, 1973) の2つが挙げられる。このうち、GEODYN-IIは他

機関にも公開され、学術的に広く利用されている。

今般、水路部に GEODYN-II を導入したので、本稿ではその概要について紹介する。ただし、GEODYN-II の用途は多岐にわたっているため、ここでは主に、我々の利用に沿った部分について述べる。

#### 2. GEODYN-II の概要

GEODYN-II は、衛星軌道決定、測地パラメータの推定、測距装置の較正、衛星軌道予報等の目的で、国際的に利用されている。

現在の GEODYN-II の前身である GEODYN は、1971年に、それまで GSFC で運用されていた2つの軌道解析プログラム、NONAME と GEOSTAR を組み合わせることにより作成された。

GEODYN-II は、ベクトル計算機のための最適化を主な目的として、元の GEODYN を全面的に書き換えたものであり、1985年から運用されている。これは、元々 IBM の汎用大型計算機と Cray のスーパーコンピュータで用いられていたが、現在ではワークステーションの普及に伴い、他システムへの移植も進んでいる。

GEODYN-II は、その後も改版が重ねられており、現在水路部が有するものは、94年4月版である。以後、一度改版されているが、SLR 測地解析には直接関係がない。また、ソースプログラムが公開されているため、独自に新たな機能やモデルをつけ加えることも可能である。水路部でも、導入後、「あじさい」の非等方輻射圧モデル (Sengoku et al., 1995) を移植している。

GEODYN-IIには、以下の5巻のマニュアルが整備され、適宜改訂されている。

Vol. 1 : SYSTEMS DESCRIPTION

Vol. 2 : PROGRAMMERS GUIDE

Vol. 3 : OPERATIONS MANUAL

Vol. 4 : SUPPORT PROGRAMS DESCRIPTION

Vol. 5 : FILE DESCRIPTION

このうち、Vol. 3が具体的に解析設定を行うための詳しい説明書であり、最も頻繁に参照する必要がある。また、Vol. 1には解析アルゴリズムに関する理論的説明が書かれており、一般的教科書としても、わかりやすい内容である。

### 3. 物理モデル

SLR解析に必要な物理・地球物理モデルは、例えば IERS Standards (McCarthy, 1992) に実用的な形で詳しく述べられている。GEODYN-IIでは、これらのモデルを、後述の解析設定ファイルの中で指定するか、独立のモデルパラメータファイルで与える。

主要な地球物理モデルとしては、

#### (a) 大気密度モデル

Jacchia 1971 Density Model (Jacchia, 1971), Thermospheric Drag Model (Barlier et al., 1978), MSIS Model (Hedin, 1987) の中から選択できる。これらのモデルに用いられる地球磁場係数は、観測値を、後述のテーブルファイルの中で与える。

#### (b) 重力場モデル

球関数に展開した係数を、ファイルとして与える。また、解析の際に用いる次数は、解析設定ファイルで設定できる。

#### (c) 地球・海洋潮汐モデル

Columbo (1984) の潮汐モデルを用いている。

### 4. 推定パラメータの種類

解析によって推定されるパラメータは、2種類に分類されている。これは、多アーク、多衛星解析を念頭において、各アークに依存しない共通のものそれぞれに依存するものを分けたもので、前者をグ

ローバルパラメータ、後者をアークパラメータと呼ぶ。このように区別することで、次節で述べる解析アルゴリズムにより、計算機メモリの節約が図られている。

#### 4.1 グローバルパラメータ

グローバルパラメータには、各種の物理・地球物理パラメータと観測局位置・速度が含まれる。

地球物理パラメータとしては、重力ポテンシャル係数、地球潮汐、海洋潮汐荷重変形、地球回転パラメータ（極運動及び自転速度変化）等がある。これらは、既存のモデル値あるいは観測から求められた値を与えて、固定値とすることも多い。

#### 4.2 アークパラメータ

最も重要なアークパラメータは、衛星の初期位置・速度である。これらの初期値及び推定結果は、慣性座標系で与えられ、True of Date, Mean of Date, J2000等の中から選択ができる。解析における軌道積分計算は、True of Dateで行われている。

また、衛星に働く外力のパラメータとして、大気抵抗係数、太陽輻射圧係数、経験的加速度が推定できる。

大気抵抗係数は、衛星が受ける大気抵抗力に関する比例定数で、大気密度モデルに依存する。また、太陽輻射圧係数は、太陽の輻射圧によって受ける力に関する比例定数である。

経験的加速度は、物理的にモデル化されていない外力の効果を総合したものであり、いわば便宜的なものであるが、これによって軌道誤差を小さくし、観測局位置の決定精度を向上させることができる。

GEODYN-IIでは、衛星軌道の along-track, cross-track, radial 方向の3成分について、各々定数項と平均運動周期のフーリエ成分に分解し、最大9成分まで推定できる。

これら外力のパラメータは、単アーク内で推定頻度を自由に設定できる。このことによって、長期間アークの精密解析が可能となる。一般には衛星の高度が低いほど、より多種類のパラメータをより頻繁に推定する必要がある。

これ以外に、観測誤差である距離バイアスと時間バイアスも推定することができ、便宜的にアークパ

ラメータに含められている。

5. 解析アルゴリズムの特徴

GEODYN-IIの観測方程式の解法として用いられている解析アルゴリズムは、ベイジアン最小二乗法である。この方法は、推定パラメータに与える初期値の、真値からの誤差が、正規分布をもつ統計量であると仮定して定式化を行い、最尤解を求めるものである。

概念的には、次式を最小にする解を求めている。

$$\begin{bmatrix} x_A - \hat{x} \end{bmatrix}^T \Sigma_A^{-1} \begin{bmatrix} x_A - \hat{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} z - f(\hat{x}) \end{bmatrix}^T \Sigma_z^{-1} \begin{bmatrix} z - f(\hat{x}) \end{bmatrix}$$

ここで、 $x_A$ は推定パラメータの初期値、 $\hat{x}$ は推定パラメータの最尤値、 $\Sigma_A$ は $x_A$ のアプリオリな分散・共分散行列、 $z$ は観測値、 $f(\hat{x})$ は最尤値 $\hat{x}$ から理論的に計算される観測値、 $\Sigma_z$ は観測誤差の分散・共分散行列である。通常、最小二乗法は上式の第二項を最小にする手法であり、推定パラメータのアプリオリ分散を無限大とした場合と等価になる。

上式を最小にする方程式は非線形になり、Newton-Raphson公式を用いたiterationによって解かれる。その際、前節で述べた分類に従い、推定パラメータをアーク部とグローバル部に分割して求める解法を用いている。

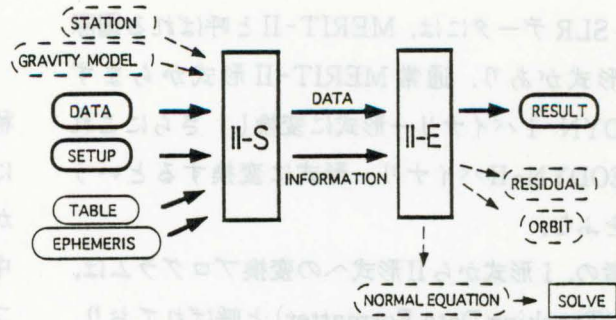
具体的には、最初にグローバルパラメータを初期値に固定して、各アーク毎にアークパラメータのみのiterationを行い、十分に収束させる。次に、全てのパラメータを含んだ方程式の行列を、グローバル部とアーク部との小行列に分割し、それぞれの補正量を別々に求める定式化を行う。計算効率上、グローバル補正量をまず求め、これを用いて各アーク補正量を導出するという順序となる。これを1サイクルとして、指定した回数あるいは収束条件を与えて計算させる。

6. 解析手順の概要

実際の解析を行う手順について簡単に述べる。流れを第1図に示す。

6.1 必要なファイル

(a) 解析設定ファイル



第1図 GEODYN-IIの解析手順

```

*****
*** GLOBAL CARD
*****
EARTH 2 70 70 3.986004415D+14 6378136.3 298.2564
EPHEM 200
FLUX 1 1367.2035
GCOEFC 2 1 -2.4140000000000D-10
GCOEFS 2 1 +1.5431000000000D-09
GEOPOL
GRVEPO 0.86010100D+12
GRVTM11 1 0 0.00000000D+00
GRVTM11 2 0 1.16275000D-11
GRVTM11 3 0 0.00000000D+00
GRVTM11 4 0 0.00000000D+00
GRVTM11 5 0 0.00000000D+00
ATMDEN 86
H2LOVE 609
L2LOVE 0852

*****
*** AJISAI ARC CARDS
*****
REFSYS05211 8801210000
SATPAR 0 0 0 0 08606101 3.6300000000000E+00 6.85000000E+02 0.000000E+00 0.0E+00
EPOCH 8801210000 8801210000 8803020000
ELEMS100 -3.2707824195E+06 +4.9015752060E+06 +5.1958047988E+06
ELEMS2 -3.7387434271E+03 -5.4145301279E+03 +2.7378206075E+03
DRAG 0 8606101 3.5000000000000E+00
DRAG 0 8606101 3.5000000000000E+00 0.00880124000000.00 0.100000E+02
DRAG 0 8606101 3.5000000000000E+00 0.00880127000000.00 0.100000E+02

ACCEL9 99 8606101 880124000000.00
ACCEL9 21 8606101 0.0 0.10E+12
ACCEL9 22 8606101 0.0 0.10E+12
ACCEL9 31 8606101 0.0 0.10E+12
ACCEL9 32 8606101 0.0 0.10E+12
ACCEL9 99 8606101 880127000000.00
ACCEL9 21 8606101 0.0 0.10E+12
    
```

第2図 解析設定ファイルの例

個々の解析について、解析設定ファイルを作成する。このファイルには、解析エポックその他の解析条件の指定をはじめ、推定パラメータの初期値及びそのアプリオリな誤差分散、各種の物理定数値、出力情報に関する設定等が含まれる。

ファイルの例を第2図に示す。中身は各行毎に80カラムのカードイメージになっており、それぞれの行の1-6カラムに、そのカードの設定内容を示すタイトルがついている。また、ファイル全体が、ほぼ前述の推定パラメータに対応して、グローバル部とアーク部に分かれている。

(b) データファイル

GEODYN-IIバイナリー形式のデータが必要で

ある。SLR データには、MERIT-II と呼ばれる国際標準形式があり、通常 MERIT-II 形式からまず GEODYN-I バイナリー形式に変換し、さらにこれを GEODYN-II バイナリー形式に変換するという手順をふむ。

後者の、I 形式から II 形式への変換プログラムは、TDF (Tracking Data Formatter) と呼ばれており、例えばアルチメータデータなど、SLR 以外のデータも入力として扱えるよう汎用化されている。

(c) その他の補助ファイル

その他、いくつかの補助ファイルをリンクする。上の(a), (b)のファイルは、各解析毎に異なるが、ここでいう補助ファイルは、多くの場合に共通に用いることができる。

必須ファイルとしては、以下の2つがある。

・テーブルファイル

AT-UTC, 地球回転パラメータ (xp, yp, A1-UT1), 地球磁場係数等が含まれる。これらは、基本的に観測に基づく時系列情報なので、新しいエポックの解析を行う場合には、更新する必要がある。

・暦ファイル

太陽・月・惑星の暦情報が含まれる JPL 暦ファイル。ほとんど更新する必要がない。

これ以外にも、重力モデルファイル、観測局ファイル等を補助ファイルとして外部から与えることができる。

6.2 ジョブの実行

GEODYN-IIの解析は、第1図に示すとおり、通称II-SとII-Eと呼ばれる二つの段階(プログラム)に分かれている。II-Sは、上記種々の入力ファイルから必要な情報を選択しII-Eの入力となる二つの中間ファイルを作成するためのものである。中間ファイルの一つは、データをII-E用に最適変換したデータファイルであり、もう一つが、解析設定、パラメータ等その他のあらゆる必要情報を含むファイルである。II-Eは、これらを入力として、実際の解析計算を行い、最終結果を出力する。

GEODYN-IIというソフトウェア名は、厳密にはこのII-S, II-Eに加え、上記データの項で述べたデータ変換プログラムTDFをも含めた三つの独立したプログラムをまとめて指すが、ここでは便宜上二段階として説明した。

6.3 解析結果の出力

解析結果は、アスキーファイルとして出力される。このファイルには、パラメータの推定値を初め、各iterationの残差情報等その解析に関する様々な情報を含んでいる。第3図に、例としてファイルの一部を示す。含まれる情報については、解析設定ファイル内で変更することができる。

また、指定に応じて、特定の情報を含んだファイルを独立に出力することもできる。このうち最も重要なものの一つは、E-matrix と呼ばれる最終 itera-

1	RESIDUAL SUMMARY BY STATION AND TYPE FOR ARC 1 INNER ITERATION 1 OF GLOBAL ITERATION 2										UNIT 6	PAGE NO.	309
0	NUMBER	MEAN	RMS	NO. ·WTD	WTD-MEAN	WTD-RMS	WTD-RND	TYPE	CONFIGURATION				
	793	.0011	.0570	793	.0113	.5704	116.9641	2W RANGE	HERS7840	8606101			
	416	.0216	.1034	413	.2142	1.0251	114.9715	2W RANGE	MAUI7210	8606101			
	1974	.0023	.0760	1960	.0187	.7458	78.1256	2W RANGE	SIMO7838	8606101			
	148	.0040	.0702	148	.0402	.7022	52.2217	2W RANGE	WASH7105	8606101			
	139	.0033	.0589	139	.0334	.5894	17.5426	2W RANGE	AREQ7907	8606101			

1	RESIDUAL SUMMARY BY MEASUREMENT TYPE FOR ARC 1 INNER ITERATION 1 OF GLOBAL ITERATION 2										UNIT 6	PAGE NO.	310
0	NUMBER	MEAN	RMS	NO. ·WTD	WTD-MEAN	WTD-RMS	TYPE						
0	7817	.0018	.0667	7590	.0147	.6511	2W RANGE						
0	TOTAL NUMBER OF OBSERVATIONS =				7817	EDITING RMS =	.6543						
0	NUMBER OF OBSERVATIONS DELETED DUE TO CUTOFF ANGLE =				215								
0	NUMBER OF WEIGHTED OBSERVATIONS =				7590	WEIGHTED RMS =	.6543						

第3図 出力ファイル例  
(a)残差情報

EARTH FIXED RECTANGULAR COORDINATES

STATION			X	Y	Z
NAME	NUMBER		(M)	(M)	(M)
APRIORI	YARR709	70900507	-2389007.928	5043331.810	-3078526.657
ADJUSTED	YARR709	70900507	-2389007.707	5043332.032	-3078526.523
DELTA	YARR709	70900507	.221	.222	.134
APRIORI	WASH710	71050711	1130720.209	-4831352.955	3994108.556
ADJUSTED	WASH710	71050711	1130720.209	-4831352.955	3994108.556
DELTA	WASH710	71050711	.000	.000	.000
APRIORI	QUIN710	71090805	-2517236.074	-4198558.293	4076571.702
ADJUSTED	QUIN710	71090805	-2517236.121	-4198558.235	4076571.699
DELTA	QUIN710	71090805	.046	.057	.004
APRIORI	MONU711	71100403	-2386279.352	-4802356.660	3444883.270
ADJUSTED	MONU711	71100403	-2386279.408	-4802356.569	3444883.274
DELTA	MONU711	71100403	.057	.091	.005
APRIORI	SIM0783	78383601	-3822388.346	3699363.550	3507573.118
ADJUSTED	SIM0783	78383601	-3822388.232	3699363.652	3507573.286
DELTA	SIM0783	78383601	.114	.102	.168

STANDARD DEVIATION

CORRELATION

X	Y	Z	X-Y	X-Z	Y-Z
(M)	(M)	(M)			
100.000	100.000	100.000	.0000	.0000	.0000
.025	.024	.022	.2644	.0465	.1897
.000	.000	.000	.0000	.0000	.0000
.000	.000	.000	.0000	.0000	.0000
100.000	100.000	100.000	.0000	.0000	.0000
.021	.018	.019	.1663	.0522	.0906
100.000	100.000	100.000	.0000	.0000	.0000
.023	.020	.021	.1314	.0188	.0637
100.000	100.000	100.000	.0000	.0000	.0000
.019	.019	.019	.2637	.0424	.0606

(b)局位置推定結果

tion 段階の正規方程式ファイルである。これは、SOLVE と呼ばれる別のソフトウェアを用いて解くことができ、ここで推定パラメータのアプリオリ標準偏差を改めて設定できると共に、多衛星、多アーケの結合解析も可能である。その他、衛星軌道要素ファイル、残差ファイルなどを出力することができる。

7. おわりに

GEODYN-IIは、その誕生以来、常に改良、汎用化が進められてきた。その結果、現在では SLR 以外のデータ、例えばアルチメータ、GPS データ等にも適用できるようになっている。こういった歴史を反映して、そのソースプログラムは多くの人々によって書かれており、オプションも多岐にわたっているため、GSFC 関係者でもその全貌を把握している人は少ない。また、使用頻度の低いオプションに対しては、十分にデバッグがなされていないこともある。したがって、新たな条件で使用する場合には、目的に応じて十分なテストを経た後に使うことが望ましい。また、ユーザーインターフェイスは必ずしも充実しているとは言えないため、実際の運用を行うにあたっては、解析準備及び後処理のために、独自のユーティリティを作成しておくことが効率的である。

参 考 文 献

Barlier, F., C.Berger, J.Falin, G.Kockarts, G. Thuillier, Atmospheric Model Based on Satellite Drag Data, Ann. Geophys., 34, 9-24, (1978).

Columbo, O.L., Altimetry Orbits and Tides, NASA Technical Memorandum 86180, (1984).

Eddy, W.F., J.J.McCarthy, D.E.Pavlis, J.A.Marshall, S.B.Luthke, L.S.Tsaoussi, G.Leung, D.A.Williams, GEODYN-II System Operations Manual, Vol.1-5, Contractor Report, ST Syst. Corp., Lanham, Md., (1990)

Hedin, A.E., MSIS-86 Thermospheric Model, J. Geophys. Res., 92, 4649-4662, (1987).

Jacchia, L.G., Revised Static Models of the Thermosphere and Exosphere with Empirical Temperature Profiles, Special Report 332, Smithsonian Institution Astrophysical Observatory (SAO), Cambridge, MA, (1971).

McCarthy, D.E., IERS Standards (1992), IERS TECHNICAL NOTE, 13, (1992).

McMillan, J.D., Mathematical Specifications of the University of Texas Orbit Processor and Application to the Laser Observations

