

2004年スマトラ沖地震による  
地球自転軸の変化

Shift of the Earth's rotational axis  
with 2004 Sumatra-Andaman Earthquake

北海道大学理学部 地球科学科地球物理学専攻

宇宙測地学研究室

吉見涼

Ryo Yoshimi

2006年 1月 27日

# 目次

## 第一章 はじめに

- 1-1. 研究背景
- 1-2. 研究目的

## 第二章 解説 - 形状軸と LOD -

- 2-1. 形状軸とは
- 2-2. LOD とは

## 第三章 形状軸移動の検出

- 3-1. 検出手法
  - 3-1-1. 軌跡の中心としての形状軸位置の推定
  - 3-1-2. 永年変化率による形状軸位置の推定
- 3-2. 検出結果
- 3-3. 考察
  - 3-3-1. 結果の比較
  - 3-3-2. 推定モデルの不備
  - 3-3-3. 理論予測値の誤り

## 第四章 LOD 変化の検出

- 4-1. 検出手法
- 4-2. 検出結果
- 4-3. 考察

## 第五章 今後の課題

## 第六章 付録

- 6-1. チャンドラー極運動の励起
- 6-2. GPS と VLBI
  - 6-2-1. GPS
  - 6-2-2. VLBI

## 参考文献

## 第一章 はじめに

当研究は、地球の形状軸及び一日の長さ (length-of-day: LOD) に着目し、2004年スマトラ沖地震によって地球の回転がどう変化したのかを明らかにするために行ったものである。ここでは地震によって形状軸がどれだけ動いたのかということについての言及がほとんどではあるが、一年という限られた時間での成果としては自信を持って示したい。また、できる限り多くの人、とりわけ地球物理をよく知らない人にも読めるよう、難解な語句、専門用語の使用はできる限り避けるようにした。やむを得ず使用する際には、専門用語を用いていない、理解しやすい説明を載せている。できる限り多くの人が当論文に触れ、わずかばかりでも地球物理への興味を抱いてもらえれば、またそこまではいかなくとも、再び当論文にて扱っている題材について関連のある事柄に出くわした時、この論文を読んだことを思い出してもらえるようであれば、筆者にとって幸いである。

### 1 - 1. 研究背景

地球の自転は様々な要因で日々変化している。当研究にて取り上げている地震もその要因の一つである。ここでは前述のように、地球の自転軸に影響を与えている形状軸 (慣性主軸)、及び自転速度の変化を表す一日の長さ (LOD: Length-of-day) に焦点を当て、それらが今まで地震によって実際にどのような影響を受けてきたかについて概観する。

地球の自轉變動には大きくわけて三種類ある。ひとつは自転軸の方向が宇宙空間内をゆっくり動くもので、最大の振幅を持つ歳差と様々な周期と振幅を持つ章動から成る。これは太陽や月などの地球以外の天体が地球に及ぼす潮汐力による自転軸の強制振動である。もうひとつは自転速度の変動で、月との角運動量の交換による永年減速というゆっくりしたものから、海洋潮汐に伴う半日周期のものまで様々なものがある。最後は、地球から見た自転軸の方向 (極位置といっても良い) のゆっくりした移動であり、極運動と呼ばれる。

剛体としての地球の形から予測される極運動の周期であるオイラー周期よりやや長いチャンドラー周期 (およそ14ヶ月) で地球が極運動を行っていることは19世紀後半に発見された。その後1899年に国際緯度観測事業 (ILS) が始まり、

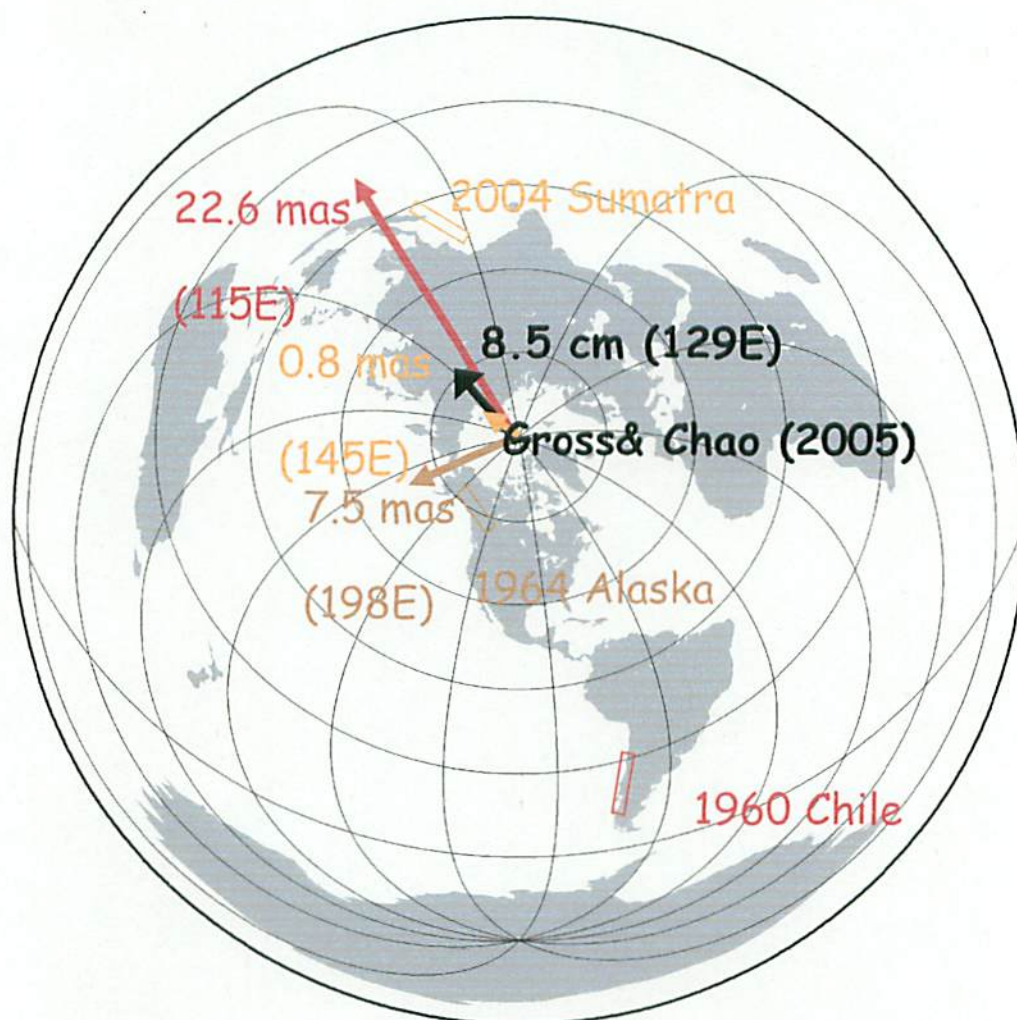
国際共同観測によって地球の極運動（チャンドラーウォブル）が百年あまりの長い間今日に至るまで観測されてきた。

極運動は振り子の運動のような自由振動の一種なので、摩擦などによるエネルギーの散逸の結果いずれ止まるはずである。しかし時期によって振幅の大小はあるものの極運動は観測開始以来継続している。これは何者かが極運動を絶えず「励起」していることを示唆する。チャンドラー運動の励起源に関する最新の研究の動向は付録6-1にまとめてあるが、大気や海洋による励起が本命視される以前は地震によるチャンドラー運動の励起が有力な説であった。地震は断層の両側の岩盤のずれる現象であり、質量の再分配を伴う。従って大規模な地震であれば地球楕円体の形状軸（慣性主軸）の移動を伴っても不思議ではない。

過去に起きた地震のうち、地球回転に影響を与えた地震として、1960年のチリ地震がある。この地震では、形状軸を  $115^{\circ}$  Eへ  $22.6$  mas (=約70 cm,  $1$  mas = 3 cm) 移動させ、LODを 8 ms 減少させた (Chao & Gross, 2005) と言われている。また、1964年のアラスカ地震については、形状軸を  $198^{\circ}$  Eへ  $7.5$  mas (=22.5 cm) 移動させたと考えられている。ここで注意したいのは、これらの数値は現在の観測技術では検出の可能性はあるが、チリ地震についてもアラスカ地震についても発生当時の観測技術では精度不足で検出できていなかったことである。要するに地震による極の移動は予測計算結果のみが存在しており、「まだ一度も実際に観測されたことはない」のである。このような事実を念頭において上記の値を参考にしてもらいたい。

さて、当研究の主題である2004年末に起きたスマトラ沖地震について、地震発生直後の報告 (Chao & Gross, 2005) においては、形状軸の移動は  $145^{\circ}$  Eへ  $0.8$  mas (= 2.5 cm)、LODの変化は  $2.68 \mu$ s の減少と言われていた。しかし、これらの値は、地震発生直後に報告された、スマトラ島近辺の断層運動に限定した  $M_w$  (モーメントマグニチュード) = 9に対応する推定結果であるため、低く見積もりすぎていたと考えられる。事実、現在では断層運動が赤道から離れたアンダマン諸島の方にまで伸びていたことがわかっており、2005 AGU Fall Meeting による最新の報告 (Gross & Chao 2005) では、 $M_w = 9.3$ 、形状軸の移動は  $129^{\circ}$  Eへ 8.5 cm だと上方修正された。

図 1 - 1 : 過去の地震による形状軸位置の変化



1mas = 3 cm

Chao & Gross (1987, 2005)

## 1 - 2. 研究目的

前述の背景を踏まえ、当研究の目的は、(1)形状軸の移動を検出し、最新の予測値「 $129^{\circ}$  Eへ 8.5 cm」に一致することを示すこと、もしくは(2)新しい説、すなわち新たな形状軸移動の方角と距離を導き出すこと、とする。

前者(1)、予測値と同様の結果を観測によって求めることは、理論から演繹され

た予測値を正しいものであるとして証明することである。後者(2)の新たな移動の方角と距離を導き出すとは、Gross & Chao (2005) の予測値が、あくまでも理論による計算値であることによる。つまり、予測値の正しさは未だ実証されておらず、当研究のように観測データの解析結果とは一致しない可能性があるということを念頭においている。

また、極運動だけでなくLODの変化についても同様の目的で検出を試みる。しかし、LODについては変化の予測値が非常にわずかであり、データからの検出は非常に困難であると言わざるを得ない。

以下では、まずは主題である形状軸について、次にLODについての概念解説、変化値の検出方法、結果といった順に述べていく。

## 第二章 解説 - 形状軸と LOD -

ここでは、当論文を読むに当たって最低限知っておく必要がある語句の意味や概念の解説を行う。

### 2 - 1. 形状軸とは

形状軸とは、地球の慣性モーメントが最大になる軸である。この形状軸を中心として周囲を回っているものこそ、皆になじみが深いであろう地球である。

形状軸の移動は、地震等に伴う地球の質量配分の変化によって起きる。移動の方向は、形状軸の性質である慣性モーメントを最大にする方向である。つまり、

「北半球での質量追加 or 南半球での質量欠損 → 変化部より離れる」

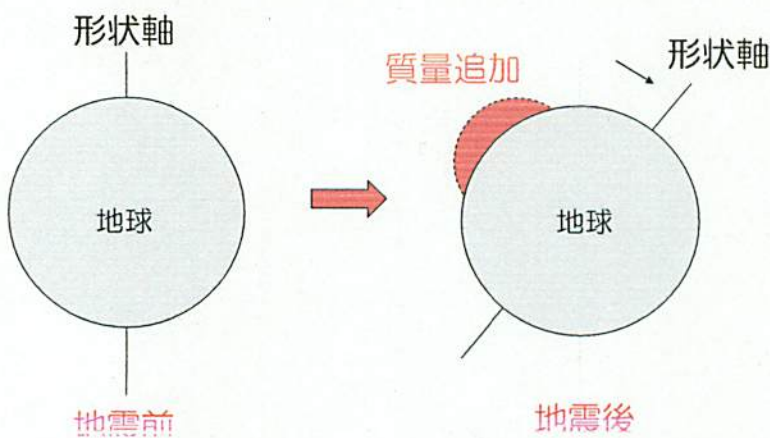
「北半球での質量欠損 or 南半球での質量追加 → 変化部に近づく」



となる。尚、当研究の主題となっているスマトラ沖地震については、Gross & Chao (2005)の計算結果からは北半球での質量欠損を起こしたことになる。沈み込みに伴う逆断層型の地震は一般的に質量の欠損をもたらすようである。これは大局的に言うと地震がプレートの沈み込みを「促進」し、その結果質量欠損がもたらされたということの意味しているのであろう。

形状軸の移動の距離については、前述のいずれの場合においても中緯度域における変化をもたらす地震、すなわち中緯度域で発生する地震が大きくなる。これは、付加された質量が、遠心力によって軸から遠ざかるような力を受ける結果として形状軸が動くと考えると理解できる。つまり、赤道に質量が付加されても、すでにもっとも形状軸から離れたところにあるのでそれ以上形状軸が動く理由がない。また極域に質量が付加されても、遠心力が弱いために形状軸を移動させる原因にはならないのである。

図 2 - 1a : 形状軸移動の概念

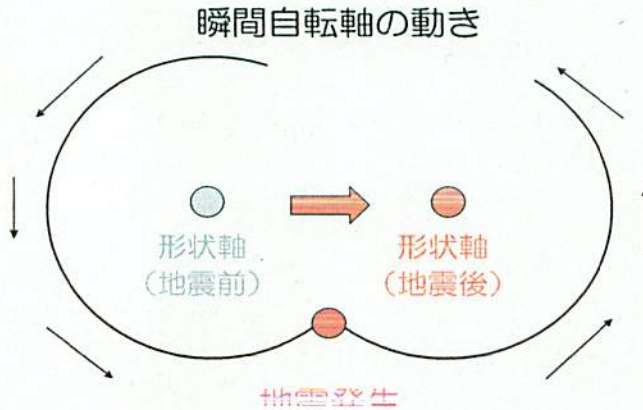


前述の様なきっかけで形状軸が移動すると、それまで極運動によって形状軸の周囲を周期14ヶ月で回っていた地球の自転軸（「瞬間自転軸」）は、移動先の新しい形状軸位置を中心として回り始める。このように地震の発生に伴って頻繁に形状軸が動けば、Chandler極運動は継続して励起されることになる。

極運動は形状軸を中心として起こることから、極運動の軌跡の中心として形状軸の位置を求めることができる。尚、極運動の中心は平均的な極の位置であるということから、「平均極」とも呼ばれる。現在の観測技術によると、GPS (Global

Positioning System, 全地球測位システム) や、VLBI (Very Long Baseline Interferometer, 超長基線電波干渉計) によって、一日ごとの極位置はなんと mm もの精度で推定可能となっている。

図 2 - 1b : 瞬間自転軸の動き



## 2 - 2. LOD とは

LOD (Length of day) とは、地球の自転速度によって決まる、一日の長さのことである。地震等によって地球の慣性モーメントが変化すると、角運動量 (慣性モーメントと回転角速度の積) 保存則に従って地球の自転速度が変化し、それに応じてLODも変化する。変化の向きは、

- 「 慣性モーメント減少 → 自転速度増加 → LOD減少 」  
 「 慣性モーメント増加 → 自転速度減少 → LOD増加 」

というようになる。

尚、LODの変化は、前述の通り地球の持つ慣性モーメント値の変化によって起きるわけだが、地震による慣性モーメントの変化値は、地球が持っている慣性モーメント値と比較すると、非常にわずかなものであり、影響は限りなくゼロに近い。そのため、地震が起きたことによってLODが変化したことを検出することは、形状軸移動の検出に比べ、現在の観測精度ではほとんど不可能である。



## 第三章 形状軸移動の検出

ここでは、当研究の主題である、スマトラ沖地震による地球の形状軸の移動の検出を試みる。以下では、手法、結果、考察という順に述べていく。

### 3 - 1. 検出手法

当研究では、「地震後のデータ（地震後～2006年現在）による形状軸の現在位置」、及び、「地震がなければ存在するはずであった形状軸の現在位置」の両者を比較することによって、形状軸の移動の検出を行う。

「地震後のデータによる形状軸の現在位置」については、前述のように、地震後～現在の極運動の軌跡から中心を求めることで推定する。また、「地震がなければ存在するはずであった形状軸の現在位置」については、1985年～地震前の形状軸位置の永年変化率を用いて推定する。以下に各々の詳細を述べる。

#### 3 - 1 - 1. 軌跡の中心としての形状軸位置の推定

前述の通り、「地震後のデータによる形状軸の現在位置」を求めることは、極運動の軌跡の中心として形状軸の位置を推定することから行う。当研究では、IERS（国際地球回転・基準座標系サービス）のウェブページで一般に公開されている一日毎の極位置データを取得し、そのデータを基に、

- ◆ 年周極運動の除去
- ◆ 最小二乗法による中心位置の推定
- ◆ チャンドラー周期の確認

を行うことで、形状軸の位置を推定した。以下に各々の詳細を述べる。

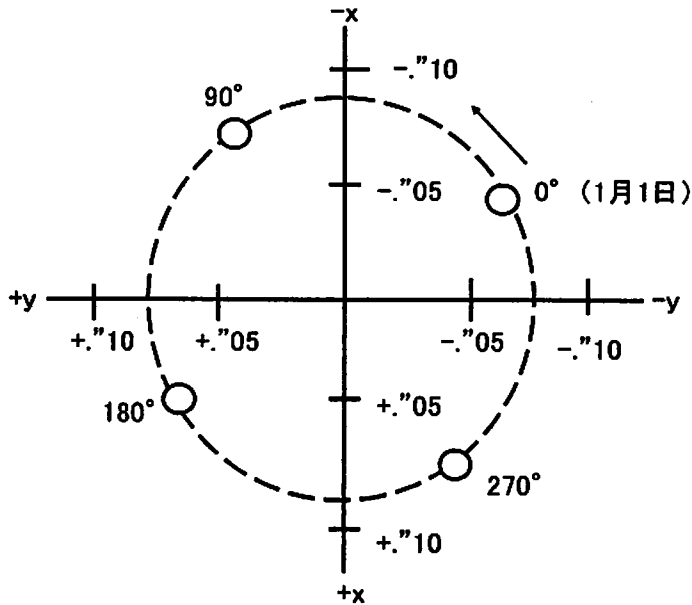
## ◆ 年周極運動の除去

極運動は、チャンドラー極運動と呼ばれる周期約14ヶ月の極運動の他に、年周極運動と呼ばれる周期12ヶ月の極運動の成分が重なっている。チャンドラー極運動は地震や大気・海洋の運動によって起きるのに対し、年周極運動は季節変化に伴う地球の質量変化等によって起きる一年周期の強制振動である。チャンドラー極運動は地震の影響を受けるが、年周極運動は地震の影響を受けない、地震とは無関係の運動なのである。

当研究で形状軸位置の推定に用いるIERSの極位置データには、地震とは無関係の年周極運動成分も含まれている。そのため、12ヶ月周期と14ヶ月周期の振動が干渉し、6年周期でチャンドラー運動の見かけ上の振幅が大きくなったり小さくなったりする。つまり、地震の影響をより明確に検出する為には、地震による変化を表すチャンドラー極運動成分のみからなる極位置データを用いることが必要になる。そのため、地震とは無関係な年周極運動成分を除去し、より一定の振幅を持つ本来のチャンドラー運動のみを取り出すことを試みる。

年周極運動の位相や振幅については、古くから研究が成されており、現在では定性的にも定量的にも無理のない説明ができています。長期間にわたってみれば、年周極運動の振幅や位相角には6~10年程度の変動が見られるが、平均的には、年周極運動は楕円であり、その長軸方向は、偶然にも、経度0度（グリニッジ子午線）を向いている。振幅は、図3-1-1aに示すように、x方向で $0.095''$  ( $=0.095 \text{ as}$ )、y方向で $0.075''$  ぐらいである。図3-1-1aは、H. JEFFEREYSによるもので、1899~1970年の期間の資料から求められている。

図 3 - 1 - 1a : 自転軸の年周極運動 (H. JEFFEREYS, 1970)



以上のように仮定した年周極運動成分を取り除き、チャンドラー極運動成分のみからなる極運動の軌跡を見るために、まず図 3 - 1 - 1b にチャンドラー極運動と年周極運動両成分による極位置の変化を表す図を示す。そして図 3 - 1 - 1c には、年周極運動成分を取り除いたチャンドラー極運動成分のみによる極位置の変化を表す図を示す。また、図 3 - 1 - 1b' には、図 3 - 1 - 1b の 2003 年～現在の極位置変化を横軸に x 方向、縦軸に y 方向の座標をとり平面に表した図を示し、図 3 - 1 - 1c' には図 3 - 1 - 1c の 2003 年～現在の極位置変化を平面に表した図を示す。なお x 軸, y 軸の単位は秒角 (arcsecond) であり 1 秒角は地表でおよそ 30 メートルに相当する。

図3-1-1b: 極位置の変化 (年周+チャンドラー)

図3-1-1c: 極位置の変化 (チャンドラー)

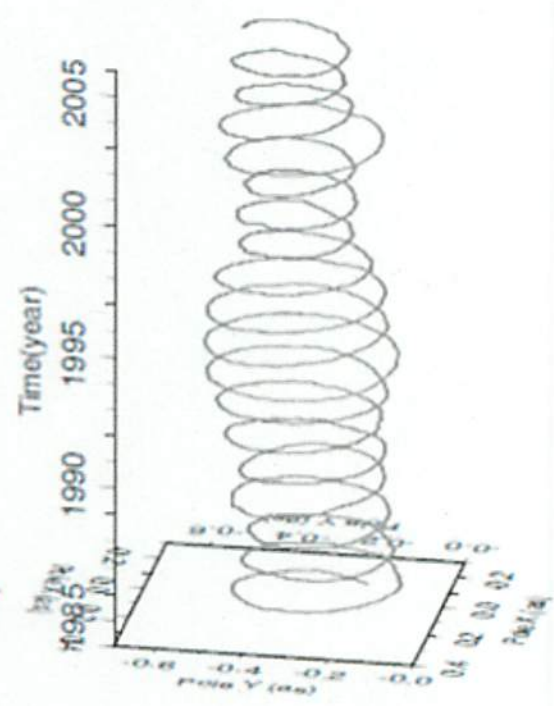
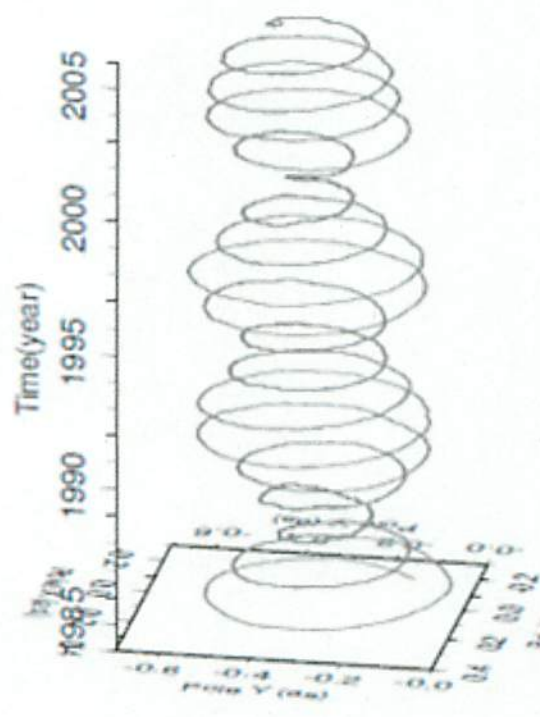


図3-1-1b': 極位置の変化 (2003~)

図3-1-1c': 極位置の変化 (2003~)

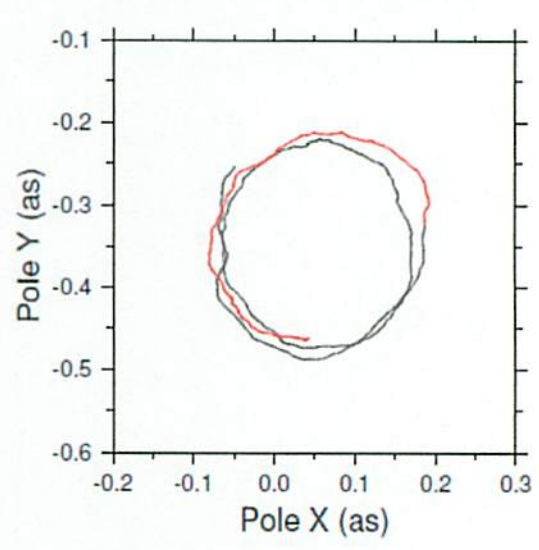
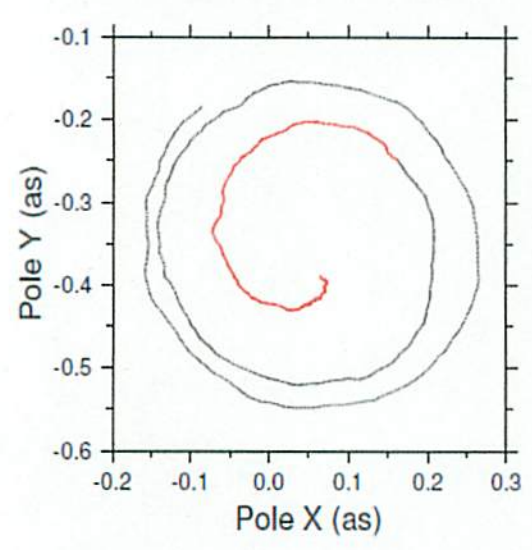


図3-1-1bでは、周期14ヶ月のチャンドラー極運動成分と、周期12ヶ月の年周極運動成分が重なり合うことによって、二ヶ月間の周期のずれが六年毎の振幅の大小の差を生み出していることがわかる。

図3-1-1cでは、図3-1-1bのような6年周期の大きな振幅の差は見られない。一方、チャンドラー運動の中心がゆっくりと左(-y)方向にずれていつているのが見て取れる。これは、極運動の中心である平均極が徐々に動いていることから、「平均極の永年移動」と呼ばれる運動である。この原因は最終氷期の後に氷床の消失に伴って、かつて氷床に覆われていた地域がアイソスタシーの回復のために隆起しつつあるためと考えられている。

平均極の永年移動の方向は-y方向、すなわち北米大陸あるいはグリーンランドの方向に動いている。やや古いデータにはなるが、日本測地学会(1974)によると、 $60^{\circ}$  W へ一年に約 10 cm 移動していると考えられている。尚、後で述べる「地震がなければ存在するはずであった形状軸の現在位置」を求める際に用いる永年変化率とは、形状軸の位置でもある平均極が一年当たりどれだけ動くかということを表すものである。

3-1-1bにおいて2003年から現在までの極位置変化を平面に表した図3-1-1b'、及び図3-1-1cにおいて同期間における極位置を平面に表した図3-1-1c'を比較することにより、年周極運動を取り除いたことによって軌跡が円に近くなり、地震等の影響を明確に検出する為の性能、すなわち形状軸のわずかな移動を検出できる可能性が向上したことがわかる。

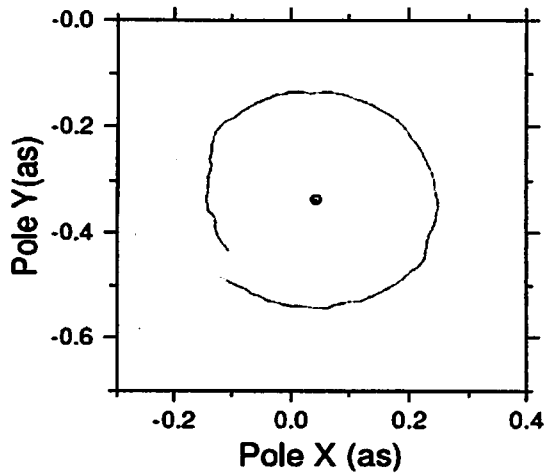
#### ◆ 最小二乗法による中心位置の推定

年周極運動成分を除去した(チャンドラー極運動成分のみが含まれると考えられる)極位置データについて、最小二乗法を用いて適当に定めた期間の軌跡の中心の座標(形状軸位置)を推定する。尚、ここではチャンドラー運動の周期を内藤(2001)に従って435日に固定する。

以下に最小二乗法で用いた数式を示す。また、一例として、図3-1-1dに1995~1996年の一年間の極運動データ(灰色の線)から求めた形状軸の位置(赤丸)を示す。



図3-1-1d: 極位置の変化と中心 (1995~1996)



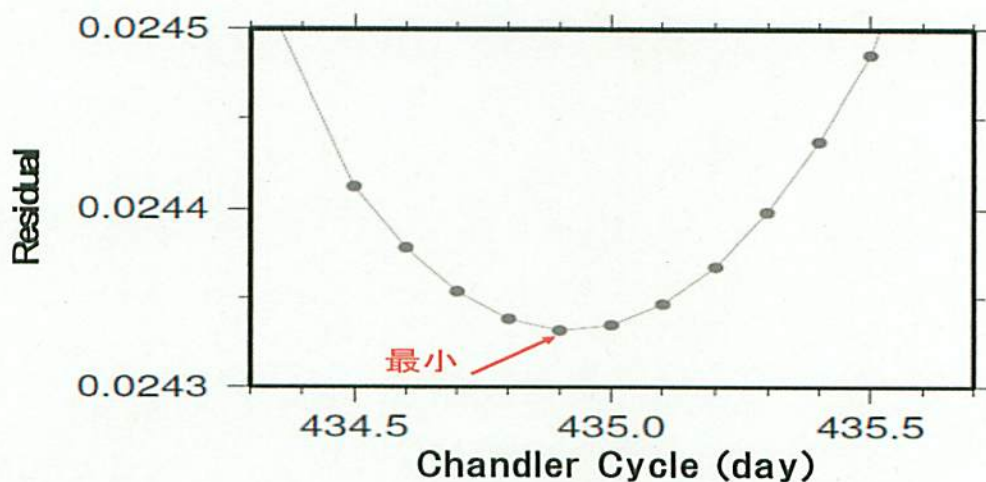
方程式	$x = a \cos(\omega t + \alpha) + x_0$ $y = a \sin(\omega t + \alpha) + y_0$
パラメーター	$a \cos \alpha, a \sin \alpha, x_0, y_0$ $\omega = 2\pi/435 \text{ (day}^{-1}\text{)}$
誤差	$x_0, y_0: 1\text{cm}$

#### ◆ チャンドラー周期の確認

最小二乗法を用いて中心位置を推定する際、435日に固定したチャンドラー運動の周期の妥当性を改めて確認する。そのために、極位置データから最小二乗法を用いて軌跡の中心を推定する際、様々な異なるチャンドラー運動の周期を与えて計算を行い、出てくる残差（推定されたモデルから計算される極位置と観測された極位置の差）が最小となる周期を真のチャンドラー周期と考えることにする。得られた周期が435日に一致すれば、チャンドラー周期を435日に固定して考えることは適切であったと言える。

図3-1-1eに、1985~1995年の10年間における極位置データに対して最小二乗法を行った、横軸にチャンドラー周期、縦軸に残差を表すグラフを示す。

図 3 - 1 - 1e : 残差 (1985~1995)



計算の結果、残差が最小となる周期は434.9日となり、最小二乗法を行う際に用いた435日に非常に近い値が得られた。従ってチャンドラー周期を435日に固定することは妥当であると考えられる。尚、1985~1995年の10年という期間を選んだ理由は、短い期間では期間ごとに残差の値が最小となるチャンドラー周期の値がやや不安定であったからである。その原因として、期間内にチャンドラー極運動が励起されて軌跡の半径が変動した場合、期間が短いとそれによる誤差がチャンドラー周期の誤差にもれこむためと考えられる。

### 3 - 1 - 2. 永年変化率による形状軸位置の推定

次に「地震がなければ存在するはずであった形状軸の現在位置」を、1985年~地震前の平均極、すなわち形状軸の永年移動を用いて推定する。前述の日本測地学会(1974)による移動速度を用いてもよいのだが、幾分データが古いため、ここでは最近の傾向から推定した極位置の変化率を用いることとした。

平均極の移動速度は前述のように、cm/yr で表される。1985年~地震前の形状軸位置の永年変化率を求めるに当たっては、

- ◆ 1985年～地震前の半年間毎の極位置データ
- ◆ 1985年～地震前の一年間毎の極位置データ
- ◆ 1985年～地震前の二年間毎の極位置データ

の三通りの期間におけるデータから、それぞれについて「3-1-1. 軌跡の中心としての形状軸位置の推定」で述べた手法で形状軸位置を推定し、それらの位置を表す近似直線の傾きから全体の期間における形状軸の移動速度を求めた。さらに、これらの移動速度を用いて

- ◆ 半年間毎の極位置データによる形状軸の移動速度を用いた現在の形状軸位置
- ◆ 一年間毎の極位置データによる形状軸の移動速度を用いた現在の形状軸位置
- ◆ 二年間毎の極位置データによる形状軸の移動速度を用いた現在の形状軸位置

の三つの場合の位置を推定する。

尚、ここで半年間毎、一年間毎、二年間毎の三通りのデータのそれぞれの場合について「地震がなければ存在するはずであった形状軸の現在位置」を推定する理由は、「軌跡の中心としての形状軸位置」を推定する際にどのような長さの極位置データが最適なのかわかっていないからである。この問題にはチャンドラー極運動の励起が深くかかわっているが、これに関しては後の考察で改めて議論する。

以下では、x方向（青）、y方向（黄）別に形状軸の位置と近似直線を表した図として、半年間毎のデータによる結果を図3-1-2aに、一年間毎のデータによる結果を図3-1-2bに、二年間毎のデータによる結果を図3-1-2cに示す。

図 3 - 1 - 2a: 半年間毎の形状軸位置の変化と永年変化

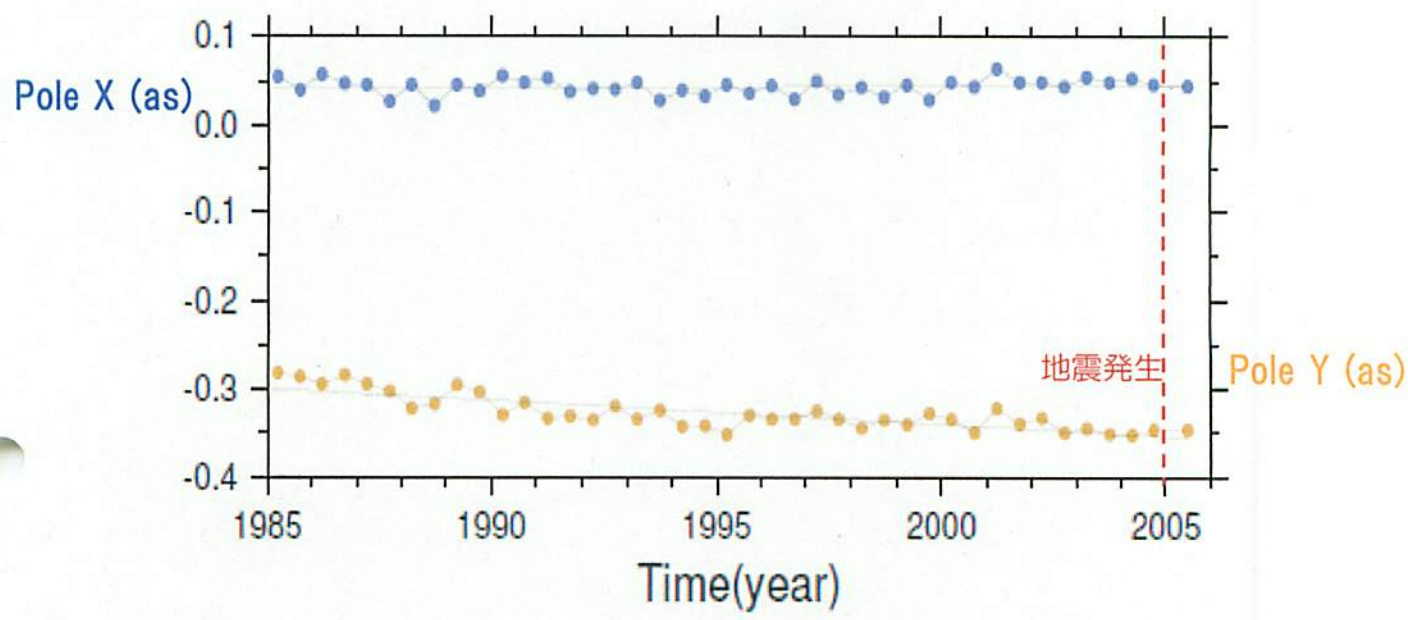


図 3 - 1 - 2b: 一年間毎の形状軸位置の変化と永年変化

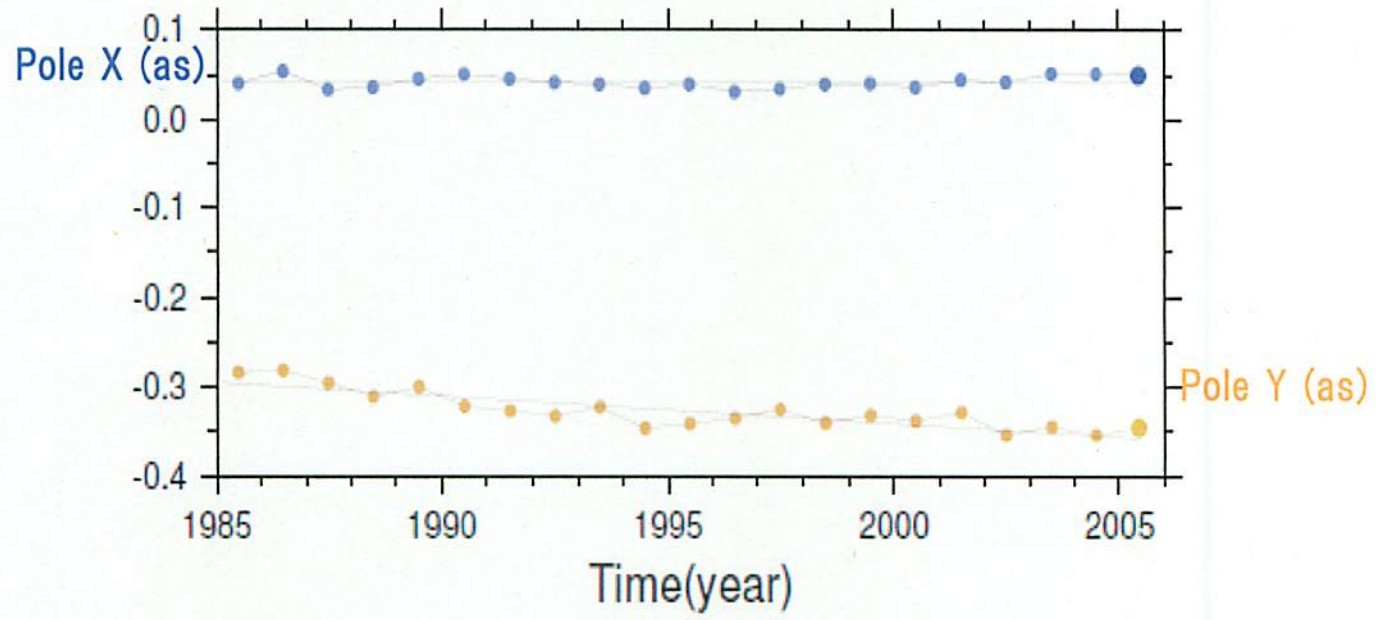
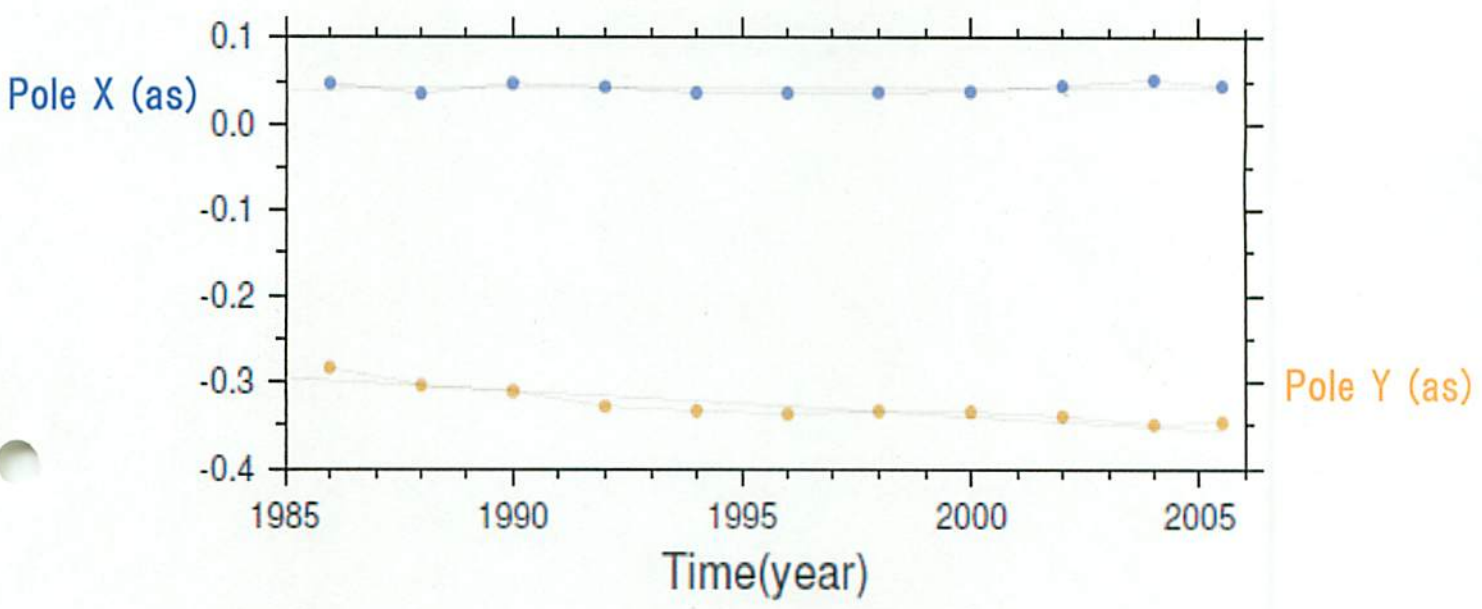




図 3 - 1 - 2c : 二年間毎の形状軸位置の変化と永年変化



これらの図で重要なのは、形状軸位置を表す最終点（これについてはデータで用いた期間に関わらず全て地震後～現在のデータから推定）と、近似直線の最終点の差、つまり「地震後～現在の極位置データから軌跡の中心として求められた形状軸位置」と、「1985年～地震前の形状軸位置の移動速度から予測される形状軸位置」との差である。この差こそが、当研究において形状軸の移動を示す値そのものであり、スマトラ沖地震によって形状軸が移動したかどうかを議論する材料なのである。

### 3 - 2. 検出結果

図3 - 1 - 2a, b, cにおける、軌跡の中心としての形状軸の現在位置と、永年移動による形状軸の予測現在位置の差に着目し、スマトラ沖地震による形状軸移動の検出を行った。

上記の求めるべき差をより明確に示すため、図3 - 2a, b, c では x 方向と y 方向を分けて表している形状軸位置と近似直線を、横軸に x 方向、縦軸に y 方向の座標をとり、平面上に表した図を示す。先と同様、図3 - 2a, b, c にそれ



それ、半年間毎、一年間毎、二年間毎のデータによる形状軸の推定位置と永年移動を表す回帰直線を示す。いずれの図においても、「地震後～現在の極位置データから軌跡の中心として推定した形状軸位置」を赤で示し、「1985年～地震前の形状軸位置の永年変化率によって求められた地震がなければ存在するはずであった形状軸の現在位置」は茶で示している。

図 3 - 2a : 半年間毎の形状軸位置の変化と永年変化

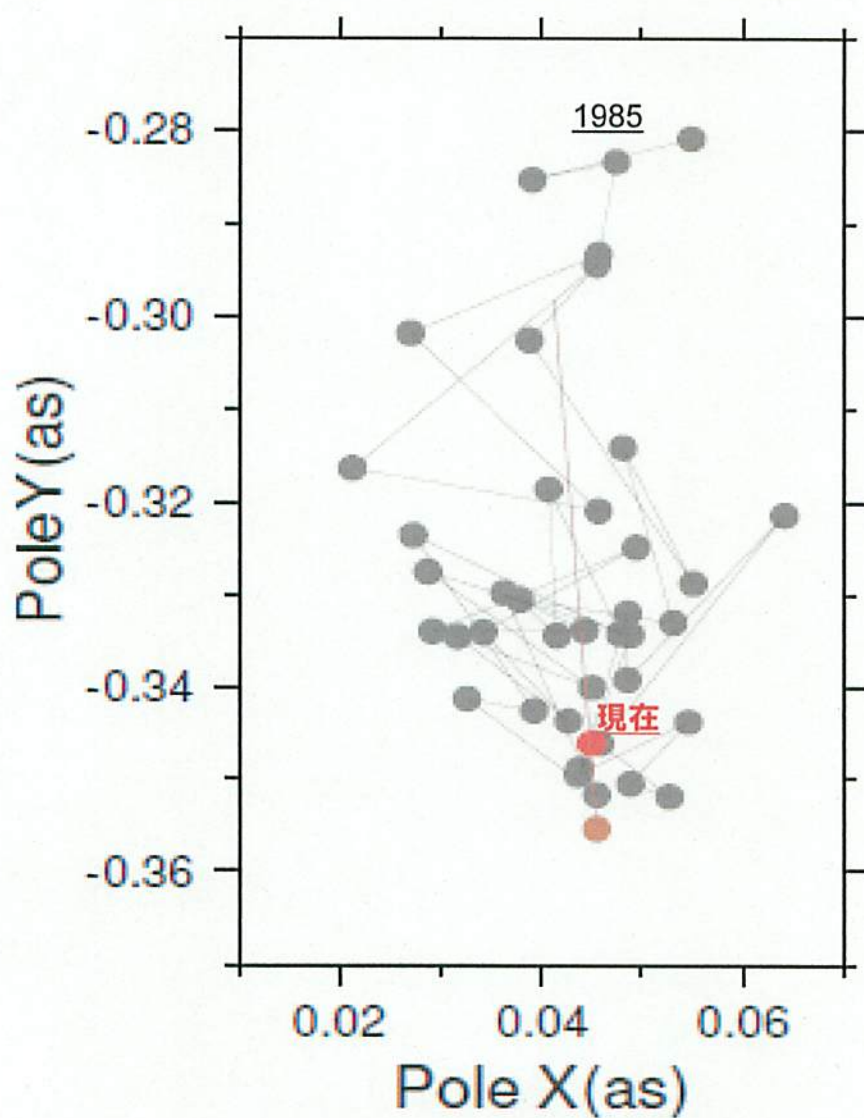


図 3 - 2b : 一年間毎の形状軸位置の変化と永年変化

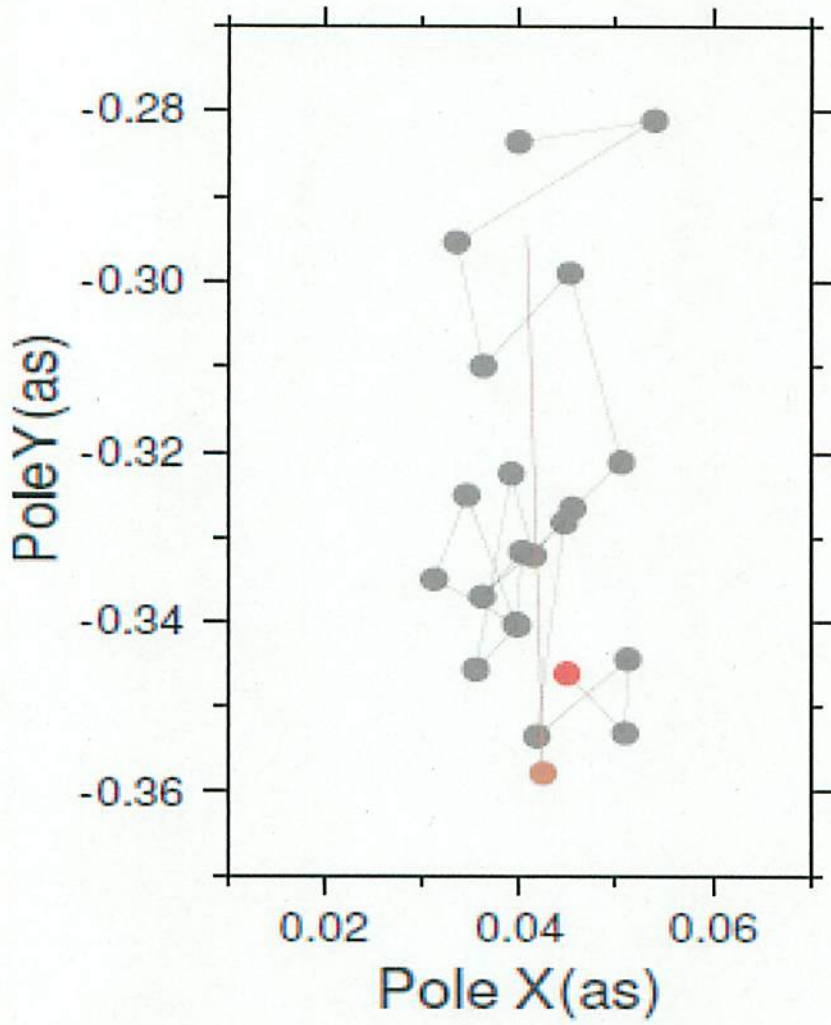
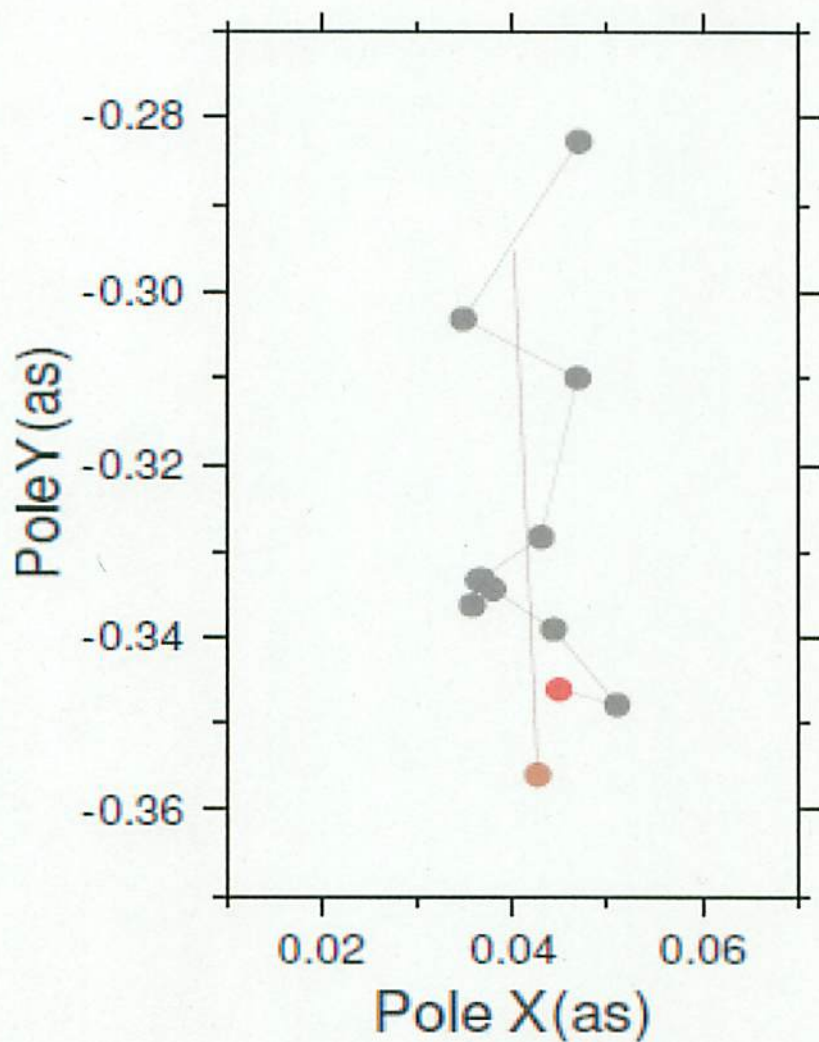


図 3 - 2c : 二年間毎の形状軸位置の変化と永年変化



前述の繰り返しではあるが、地震後—現在の極位置データから求めた形状軸位置は赤の点で記してあり、永年変化率より求めた形状軸位置は茶の点で記している。つまり、赤の点と茶の点の距離の差が、スマトラ沖地震によって移動したと考えられる形状軸の移動距離である。以下に、各期間のデータから求められた検出の結果を記した表を示す。

**半年間毎の極位置データを用いた場合**

スマトラ沖地震後～現在（約一年）における

データによる形状軸位置 (as) X : 0.0448 Y : -0.3461

永年移動による形状軸位置 (as) X : 0.0454 Y : -0.3553

移動距離 (mas) X : -0.59 Y : 9.29

誤差 (mas) +/-3.14 +/-3.95

**結果 94° E へ約 28cm 移動**

**一年間毎の極位置データを用いた場合**

スマトラ沖地震後～現在（約一年）における

データによる形状軸位置 (as) X : 0.0448 Y : -0.3461

永年移動による形状軸位置 (as) X : 0.0424 Y : -0.3577

移動距離 (mas) X : 2.45 Y : 11.65

誤差 (mas) +/-3.14 +/-5.31

**結果 78° E へ約 35cm 移動**

二年間毎の極位置データを用いた場合
-------------------

スマトラ沖地震後～現在（約一年）における

データによる形状軸位置 (as)	X : 0.0448	Y : -0.3461
永年移動による形状軸位置 (as)	X : 0.0425	Y : -0.3559
移動距離 (mas)	X : 2.29	Y : 9.84
誤差 (mas)	+/-4.05	+/-5.74

**結果**      77° E へ約 30cm 移動

この表について、データによる形状軸位置とは、「地震後～現在の極位置データから軌跡の中心として求めた形状軸位置」、つまり図3-2において赤点で記しているものであり、永年変化による形状軸位置とは、「1985年～地震前における形状軸位置の永年移動速度によって求められた現在の形状軸位置」、つまり図3-2の茶点のことである。また、形状軸位置の単位は as (1 as は地表で約 30 mに相当) であるのに対し、移動距離の単位は mas (1 mas は同じく約 3 cmに相当) で表していることに注意して欲しい。移動距離の誤差については、A = データによる形状軸位置の誤差、B = 永年移動による形状軸位置の誤差とすると、

$$\text{移動距離の誤差} = \sqrt{A^2 + B^2}$$

という式で求められる。

### 3 - 3. 考察

まず、3 - 2. で示した地震に伴う形状軸の移動推定値の表からわかるように、x 方向y方向ともに形状軸の移動距離の誤差は10-15cm程度となった。ここでは



その予測値との整合性について考察する。

### 3 - 3 - 1. 結果の比較

最新の予測値 (Gross & Chao, 2005) と、当研究における推定結果を比較した表を載せる。

この表について、「推定値 (半年)」とは半年間毎の極位置データを用いて推定された値であり、推定値 (一年)、(二年) についても同様である。また、「予測値との差 (半年)」とは理論予測値と上記「推定値 (半年)」との差を表す。

#### 予測値と推定値の比較

	方角	移動距離
理論予測値	129° E	8.5 cm
推定値 (半年)	94° E	28 cm
推定値 (一年)	78° E	35 cm
推定値 (二年)	77° E	30 cm
予測値との差 (半年)	35°	+19.5 cm
予測値との差 (一年)	51°	+26.5 cm
予測値との差 (二年)	50°	+21.5 cm

このような差が生まれた理由として、

- ◆ 推定モデルの不備
- ◆ 理論予測値の誤り

のどちらか、又は両方が考えられる。以下にそれぞれの詳細を述べる。

### 3-3-2. 推定モデルの不備

推定結果と予測値との差が生じた理由として、推定モデルの不備が考えられる。推定モデルの不備とは、当研究において極運動データから形状軸の移動を推定した手法に正しくなかった部分があるということであるが、可能性があるのは、「3-1-2. 永年変化率による形状軸位置の推定」にて三通りの期間についてのデータを用いる理由としても述べた、軌跡の中心として形状軸位置を推定する際に用いる時間窓の大きさである。

この理由に関しては、チャンドラー極運動の励起に関して未だ良くわかっていない点が存在することが挙げられる。例えば、励起源が何かということだけでなく、励起がどのようなタイミングで起こるかである。

チャンドラー極運動の自由振動は励起されなければいずれは減衰してしまうが、極運動の観測結果によると振幅の増減はあるにせよ、チャンドラー極運動の振幅がゼロになったことはこれまでのところ一度もない。つまり何かによって励起されてきたはずなのではあるが、この励起源がかつてはチャンドラー極運動発見以来の謎であったのである。励起源の説としてこれまで提唱されてきたものには、上は大気から下は流体核に至るまで様々であるが、1970年代の一時期には「地震励起説」が一世を風靡したこともある。これは、1960年のチリ地震にともなって極の位置が変化したように見える観測結果があったためである。しかし、地震が励起するという説は現在では理論的にはほぼ否定されてはいるものの、チリ地震クラスの巨大地震が起きれば、現在の宇宙測地技術によればその地球回転への影響の検出は可能である（日本測地学会）。

このようにチャンドラー極運動の励起について、その源を地震と考えることは間違っていない。では、励起する周期、タイミングについてはどうだろうか。

チャンドラー極運動の励起については古くから研究が成されているものの、その明確な励起源についてもさることながら、励起がランダムに起こるのか、またはある周期を持って起こるのか良くわかっていない。現在は大気・海洋の14-16ヶ月周期変動がチャンドラー極運動を励起するという考え方(Plag, 1997)がやや現実味を帯びているようだが、やはりチャンドラー極運動の励起はランダムであるとの見方が強い(測地学テキスト)。つまり、現状では極運動がいつ励起されるかは特定できないのである。

このような理由から、当研究にて形状軸位置を推定するために用いた各期間についてのデータには、励起することによって振幅が変化しているものが、その数、時期ともに特定できない形で含まれていることになる。これが形状軸の推定位置に誤差を与え、各期間における検出結果にばらつきを生むと共に、当研究の目的である形状軸の移動方角、距離についても理論予測値と検出値との間に差を生じさせた可能性がある。

以上のことより、軌跡の中心として形状軸位置の推定を行う際のデータについての不明瞭さが、推定モデルの不備という結果につながったと考えるのが妥当である。この励起時期のあいまいなデータについて、特定不能な振幅の変化などを補うために行ったことが、半年や一年等期間を分けてその中では振幅を一定と仮定した形状軸の推定であったのだが、残念ながら有効な結果を導くことはできなかった。

### 3-3-3. 理論予測値の誤り

理論予測値と推定値の差の原因として考えられるもう一つの理由は、理論予測値の誤りである。理論予測値の誤りとは、その言葉の通り、Gross & Chao (2005) によって提唱されている予測値「 $129^\circ$  Eへ 8.5 cm」が間違っている可能性があるということである。

予測値はあくまで理論的な考察で演繹された値であり、実証されてはいない。そのため、必ずしも正しいという保証はない。逆に、今回行ったような形状軸移動の推定結果が予測値に一致するという例が積み重なってゆけば、この理論の正しさが実証されるわけである。しかし、スマトラ沖地震が起こってから一年が過ぎる現在においても、未だ予測値と一致するという成果は得られていない。つまり、世界中で多くの研究者が検出を試みた結果、理論と観測が一致しないということは、予測理論を疑うべきであるとも考えられるのである。

## 第四章 LOD の変化の検出

ここでは、当研究におけるもう一つの主題である、スマトラ沖地震によるLODの変化の検出を試みる。以下では形状軸移動の検出と同様、手法、結果、考察という順に述べていく。

### 4 - 1. 検出手法

LOD変化の検出は、IERS（国際地球回転・基準座標系サービス）より一日毎のLODデータを取得し、地震前後の値を比較することより行う。

### 4 - 2. 検出結果

IERSより取得したデータをもとに作成した、1985年～現在のLODの変化とLOD変化値の変化率を示した近似直線を表すグラフを図4 - 2aに、2000年～現在のLODの変化を表すグラフを図4 - 2bに、さらに地震前後に着目した2004年～現在のLODの変化を表したグラフを図4 - 2cに示す。いずれも地震発生後は赤で記してある。

図 4 - 2a : LOD の変化と近似直線 (1985~現在)

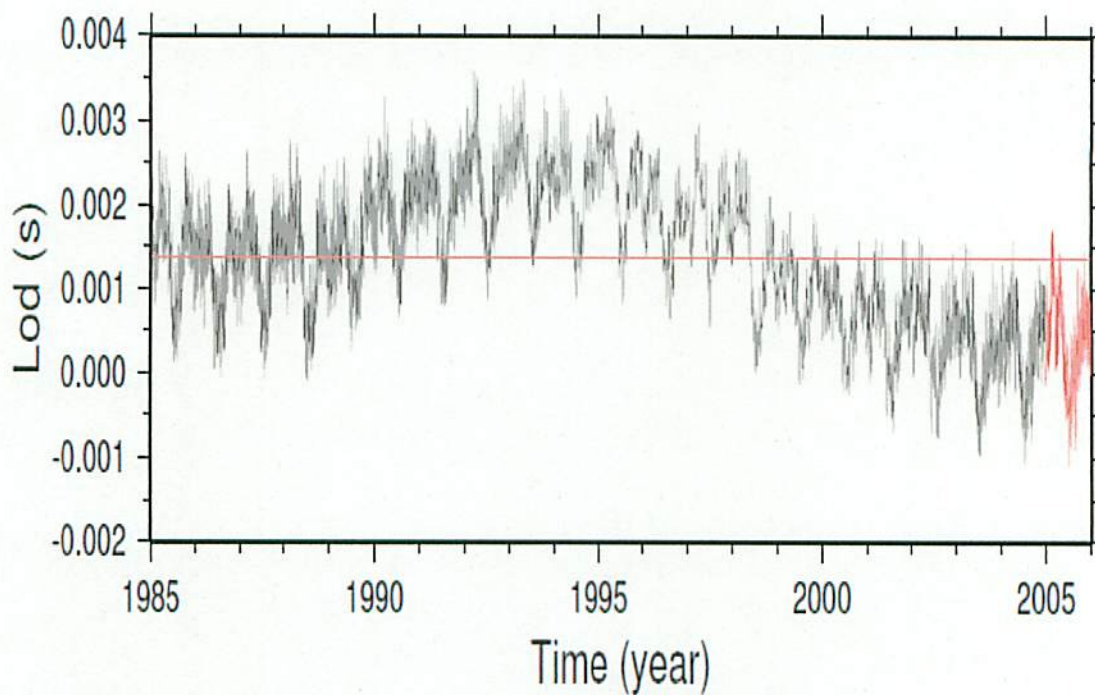


図 4 - 2b : LOD の変化と近似直線 (2000~現在)

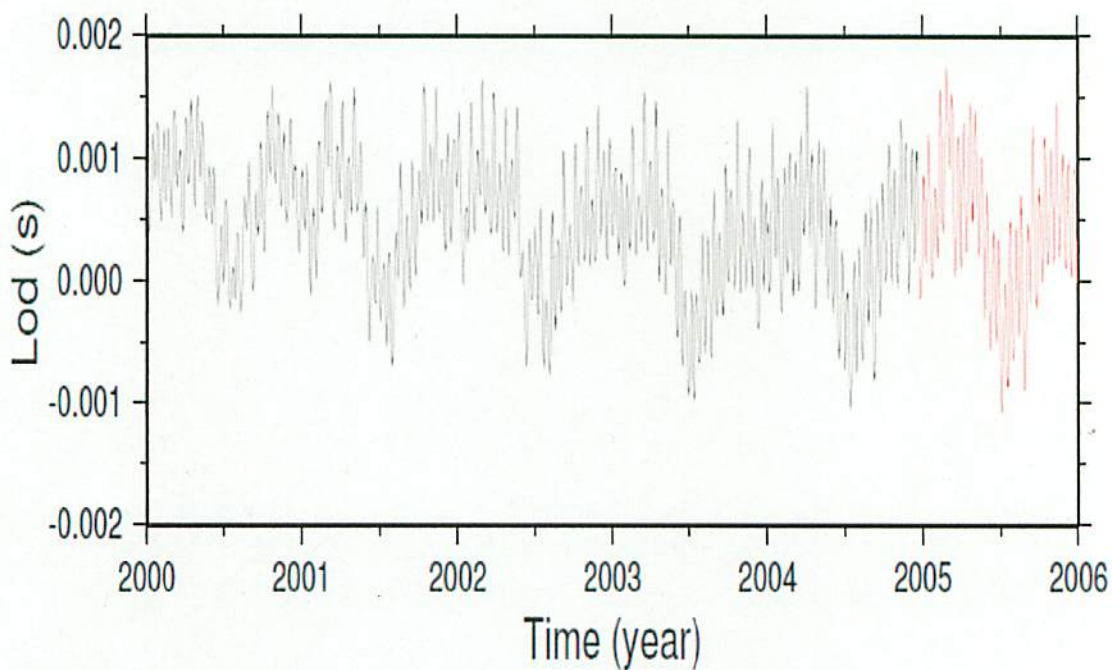
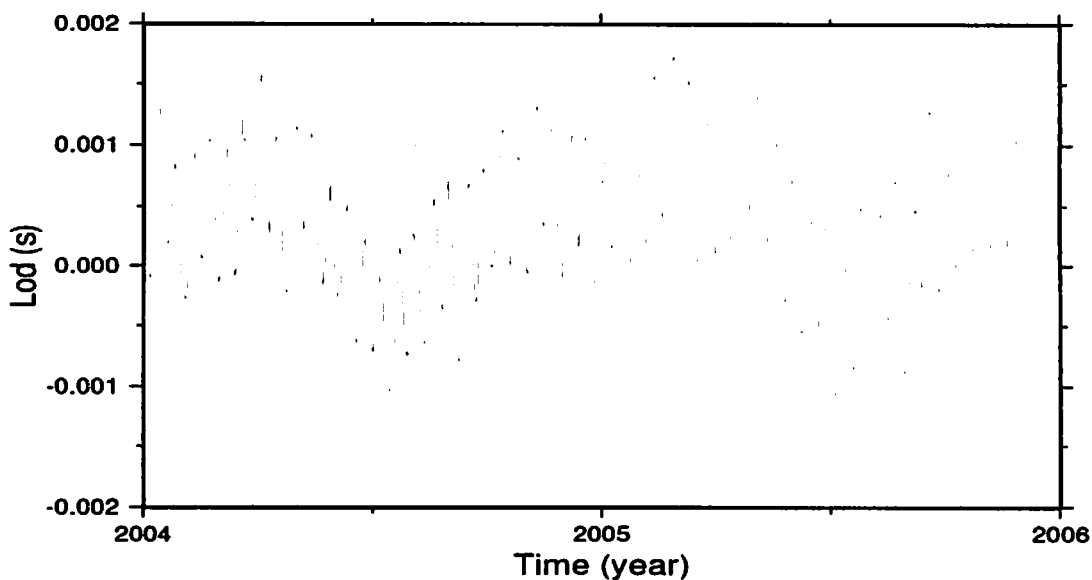


図 4 - 2b : LOD の変化と近似直線 (2004~現在)



図より、風等の影響により、年周期の変動や細かい変化が起きていることは読み取れるが、地震前後の決定的な変化が見えるとはいえない。

### 4 - 3. 考察

LODの変化について、そもそも理論に基づく予測値が 2.68 us の減少とごくごくわずかであることもさることながら、図4-2からわかるように、LODが様々な原因で絶えず変化していること、そして短周期の変化は大気との角運動量の交換によるものでそもそも極めて不規則なものであることが地震による変化を検出できなかったことの原因として挙げられる。2-2. において、LODは、地震等によって地球の慣性モーメントが変化することによって自転速度が変化し、それに応じて変化すると述べたが、実のところ、その直接の要因となっている自転速度の変化を引き起こす原因についてはすべてが解明されているわけではない。

LODの変化の要因である自転速度の変化について、現在では固有の角運動量を持っている貿易風や、偏西風等の風の変化による大気の角運動量の変化が、地



表面での摩擦をとおして固体地球との角運動量の交換が起こり、結果として地球の自転速度に変化をもたらすことはわかっている（測地学テキスト）。この変動自体はランダムであるが、気象学的に観測される大気角運動量（帯状風の強さを地球全体で足し合わせたもの）の値から求められるので、その寄与を差し引いた残りの時系列ならLODの不連続な変化がより検出しやすいかもしれない。それでもなお数 $\mu$ 秒のLODの変化は現在の観測技術では難しいだろう。

一方、図4-2aに見られる数十年周期の変動については、まだ不明な点が多い。その原因として長周期の気候変動等とともに、地球磁場変動との関係も指摘されている。地球が流体核を持つことを考えると、流体核とマントル間での角運動量のやり取りがあっても不思議ではなく、地球深部構造を知る上で大変興味深い研究テーマである（測地学テキスト）と言われている。

以上のように、LODの変化要因については不明瞭な部分が多く、またあまりに細かい変動が多い為、地震によるわずかな変化を検出することはできなかった。

## 第五章 今後の課題

最後に、当研究の成果を踏まえ、今後の課題を述べる。

当研究を通して、一番重要であると考えられる今後の課題は、3-3. 形状軸移動の検出における考察で述べた、チャンドラー極運動の励起源に関する問題であろう。これについては古くから様々な説が成されてはいるが、未だ謎に尽きず、今後も注目されるであろう地球物理分野における大きな課題である。

また、LODの変化の要因である自転速度の変化の原因についても、最近の研究ではチャンドラー極運動が、大気や海洋の変動に起因すると考えられるようになってきている為、大気海洋の動態の解明が地球回転変動の様々な謎を解明するための最重要課題であると言えよう。

## 第六章 付録

ここでは、当論文内にて登場した幾つかの語句について、測地学テキストによる解説や研究成果を載せる。

### 6-1. チャンドラー極運動の励起

地球変動であるチャンドラー極運動の励起源の調査は、地球全体の角運動量保存則に従う。つまり、地球システムを構成するマントル、コア、海洋、大気、陸水・雪氷圏の角運動量の総和は、時間変化しないことから、地球全体の角運動量収支を見ればよい。コア・マントル非結合によりマントルとコアは独立と見なせ、その角運動量は観測された極運動の微分で計算できる。一方、大気や海洋等の角運動量は、大循環モデルの出力から求める。大気大循環モデルの場合、数値予報という現業で使用されているため、現実の大気状態に近づけるべく気象観測値が同化される。この過程で得られる6時間毎の3次元格子データである全球客観解析値（最近では再解析値）から大気角運動量が計算され、大気・マントル間の角運動量収支の研究に用いられてきた（国際地球回転事業の Special Bureau for the Atmosphere, IERS/SBA でも公開されている）。チャンドラー極運動の励起源としても大気変動がすぐに注目され、1970-1980年代においては気圧変動による大気質量再配分効果が論じられたが、観測されたチャンドラー極運動の励起の20-30%程度しか説明できなかった。ところが近年になって、衛星観測データが同化され精度が格段に向上したことにより、それまで励起を論ずるに足る精度が得られなかった風による相対角運動量成分が、14ヶ月周期近傍でパワーを持ち、観測されたチャンドラー極運動を励起するのに十分な角運動量を持つことが発見された（Furuya et al. 1996, 1997; Aoyama and Naito, 2001）。これらの日本発の研究は気象庁データに基づく大気角運動量を用いてなされたが、奇妙な（不幸な？）ことに IERS/SBA で公開されている米国環境予測センター（NCEP）のデータから計算された風の相対角運動量には、同様なピークは見当たらず、チャンドラー極運動を励起するパワーも足りなかった（Gross, 2000; Aoyama and Naito, 2001）。ところが NCEP 再解析値から角運動量を計算しなおすと、図3に示す通り、風の相対角運動量の14ヶ月周期近傍でピークが現れた。加えて、国際的に最も信頼されている欧州中期予報センター（ECMWF）に基づく風の相対角運動量では14ヶ月周期近傍に顕著なピークが認められた。さらに気圧の寄与を加えると、観測されたチャンドラー極運動

を励起するのに十分なパワーを持つことが示された (Aoyama et al., 2003)。風の相対角運動量は時間とともに変動するが、少なくとも、1980-1993年の期間には風（特に対流圏の風）が最も主要なチャンドラー極運動の励起源であると考えてよいことが分かる。

風の約14ヶ月周期の変動の存在は、Gross氏の「チャンドラー極運動の励起において海底圧力変動が重要である」という主張と相容れないものではない。なぜなら海洋角運動量の計算に使用される海洋大循環モデルは大気角運動量の計算にも使用されている再解析値の風（ならびに熱フラックス、そして最近では気圧も）で駆動されているからである。Gross氏は明言していないが、海洋にも14ヶ月周期変動が存在する。例えば、以前より海水面変動データの解析から、北海での非常に振幅が大きい極潮汐（極潮汐はチャンドラー極運動による地球の重力変化に対する海洋の応答で、14ヶ月周期を持つ）が報告されており、それは風の吹き寄せに起因すると説明されている (Tsimplis et al., 1994; O'Connor et al., 2000)。加えて、風の14ヶ月周期現象は赤道域の太平洋に見られる14ヶ月近傍の海洋変動 (Naito, 1983; Philander et al. 1989; Jin et al. 2003) などとも関係がある可能性が高い。今後、海洋大循環モデル（あるいは駆動力となる大気再解析値）が高精度になることで、海洋角運動量にも前述したような14ヶ月周期近傍にピークが出現することは十分考えられる。

こうなると、大気・海洋の14-16ヶ月周期変動がチャンドラー極運動を励起するという考え方（例えば、Plag, 1997が提唱）が現実味を帯びてくる。これまでチャンドラー極運動の励起といえはランダム変動が暗黙のうちに仮定されてきたが、14-16ヶ月周期変動が発見されることで、チャンドラー極運動のダイナミクスそのものも再考する必要があるかもしれない。少なくともマンツルの非弾性を反映するQ値も変わってくるであろう。14-16ヶ月変動が大気・海洋のどのような地球変動によるものであるのか、またマンツルの長周期帯における物性構造の解明など、チャンドラー極運動の問題はまだまだ課題の尽きない分野横断型の研究テーマである。

## 6-2. GPSとVLBI

### 6-2-1. GPS

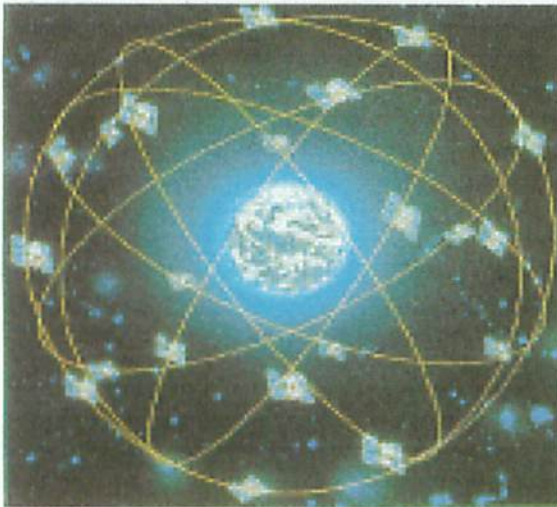
GPS (Global Positioning System, 全地球測位システム) は、複数の GPS 衛星が発する電波を同時受信し、受信点の 3 次元位置を決定する手法である。利用形態は、受信点の絶対位置を単独で決定する単独測位と、すでに位置が求められている基準点に対するもう一方の点の相対位置を決定する相対測位 (干渉測位) の 2 つがある。一般に、単独測位は、地球に対し静止または運動している物体の概略位置を求めるのに用いられ、相対測位は、静止点の精密位置を決定するのに用いられる。ただし、地表の 1 点の静止位置を精密決定する精密単独測位や、移動体の時々刻々の位置を相対測位によって決定するキネマティック測位などの手法もある。

GPS 衛星は、地表高度約 20000km の 6 つの軌道面に 4 個ずつ、計 24 個が投入されている (図 6-2-1)。衛星は原子時計を搭載し、L1 (1575MHz) および L2 (1228MHz) の 2 つの周波数の搬送波を、衛星ごとに割り当てられたコードで変調し送信している。どの GPS 衛星も同じ周波数の電波を用いているので、受信機には、コードで変調された搬送波が混信して届く。受信側では、目的とする衛星のコードの逆パターンを生成し受信電波に積算する。衛星から受信点までの電波伝播時間だけずらして積算したとき、コードによる変調が消え、もとの搬送波が再生される。この過程を通し、混信した電波から目的の衛星の信号を取り出し、衛星から受信点までの電波伝播時間を決定することができる。これに光速を乗じ、衛星からの距離 (擬似距離) を求める。通常の単独測位では、擬似距離が観測量となる。相対測位では、2 点以上で搬送波の位相を同時観測し、後処理操作において位相差を作成する。そのため、相対測位は干渉測位とも呼ばれる。

衛星の動きは地球上の監視局によって追跡されている。各衛星は、送信電波に載せて、数時間前までの衛星の運動から予測した現在位置を放送している (放送暦)。これはリアルタイムで利用可能である。また、衛星の運行から 1 週間程度遅れるものの、地球上の多数の観測データから衛星が実際に運動した軌跡が精密に決定されている (精密暦)。いずれにせよ、GPS 測位では衛星位置は既知である。単独測位では、受信点は、衛星を中心に擬似距離を半径とする球面上

のどこかに位置する。複数の衛星に対し同時に球面を描くと、球面が交わる点  
が求める受信点の位置である。相対測位では、基準点に対し、位相差の等しい  
点を結んだ等位相面が交わる位置が求める受信点の位置である。ただし、この  
場合は解の候補が多数存在するので、何らかの方法によって真の解を決定する  
必要がある。

図 6 - 2 - 1 : GPS 衛星の配置図 (日本測量協会)



GPS衛星の配置  
(Copyright 日本測量協会)

6つの軌道面に4個ずつ計24個が投入されている。

## 6 - 2 - 2. VLBI

測地目的のVLBI (Very Long Baseline Interferometer, 超長基線電波干渉計) は、地球から数億光年以上離れた準星 (クェーサー) が発する電波雑音を受信し、2点間の相対的な基線ベクトルを決定する手法である。

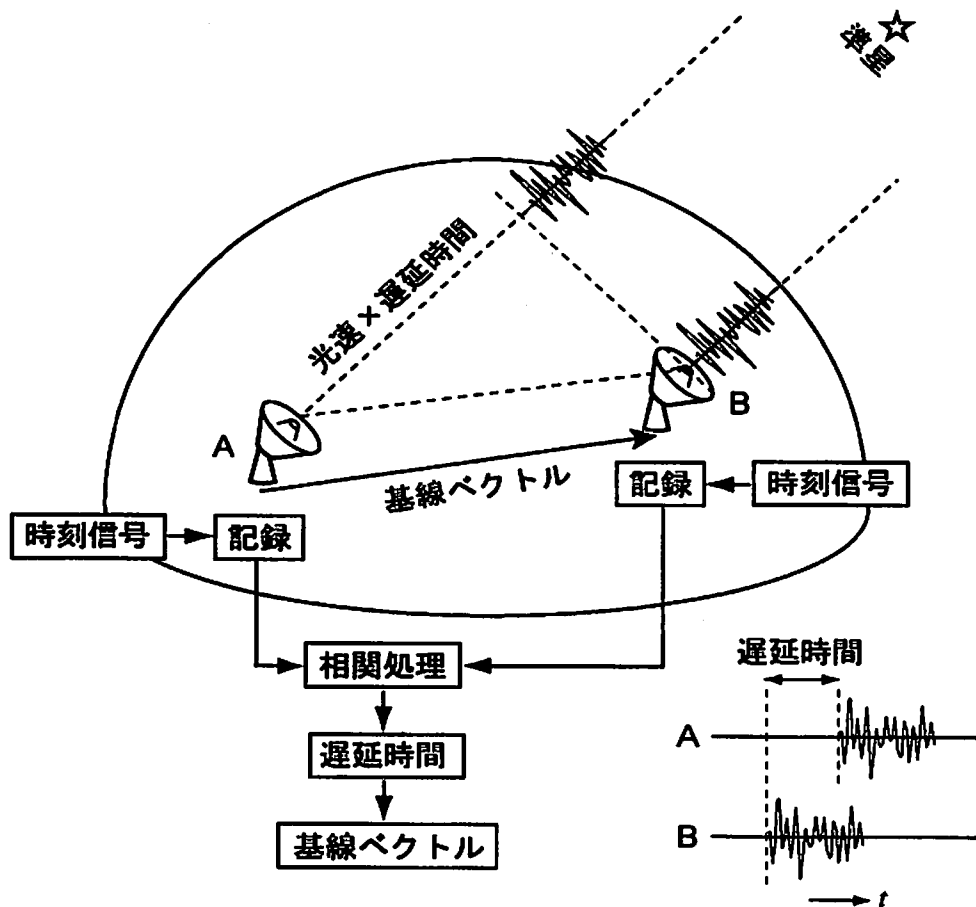
準星は十分遠方にあるので、慣性基準座標系を与えると見なせる。また、地球に到達する電波は、平面波としての扱いが可能である。ただし、電波の強度は極度に小さいので、受信するには大口径のアンテナが必要となる。一般に、直径が数m~数10mのアンテナを用いる。



観測局では、数 GHz の周波数の白色電波雑音を、高精度な周波数標準（原子時計）が出す刻時信号とともに記録する。2つの観測局で受信した電波雑音の到着時刻にはずれがあり、この遅延時間を未知数として事後処理によって決定する。遅延が存在した状態のままでは、2つの雑音時系列の相関はつねにゼロである。2つの時系列の時間軸を少しずつずらしながら相関を計算していくうちに、真の遅延時間だけずらしたとき、相関は突然 1 に近くなる。これは、白色雑音といえども、自己の複製との相関は 1 になるからである。遅延時間が決定されれば、それに光速を乗じたものが幾何学的な遅延距離となる。電波源の方向（赤緯と赤経）が既知であれば、2点間の相対的な基線ベクトルを決定することができる（図 6-2-2a）。

VLBI の利点は、共通の電波源が観測できれば、観測精度は原則として2点間の距離に依存しないことである。実際には、地球の曲率の影響で、距離の増大とともに同じ電波源を観測する時間が短くなり、結果として精度の低下が生じる。それでも、GPS などと比較して、長距離観測でも 1cm を切る高い精度を有している。また、準星を基準とする VLBI は、地球の重心の位置や形状に依存しないという特徴をもつ。これは、地球の重力場のもとを運動する人工衛星を基準とした GPS や SLR と、事情がまったく異なる。VLBI の短所は、装置の建設と維持に費用がかかり、装置の可搬性もほとんど期待できないことである。従って、実際の運用面では、大陸間や国家間の座標系の結合を主な目的とし、その隙間に GPS 観測点を配置していく方法がとられている。日常的に運用されている VLBI 観測局は、全世界で約 30 点ある（図 6-2-2b）。

図 6 - 2 - 2a: VLBI 観測の原理



準星からの電波の到着時間差（遅延時間）から 2 つのアンテナ間の基線ベクトルが求められる。

図 6 - 2 - 2b : 世界の主な VLBI 観測局



### 参考文献

- 測地学テキスト  
<http://wwwsoc.nii.ac.jp/geod-soc/web-text/index.html>
- 内藤勲夫 パリティ 2001.02 vol.16 No.2 地球自転軸の自由振動
- 日本測地学会 1974年 測地学の概観
- Chao, B.F. and R. Gross, Did the 26 December 2004 Sumatra, Indonesia, Earthquake Disrupt the Earth 's Rotation as the Mass Media Have Said? , Eos, Vol. 86, No. 1, 4 January 2005.
- IERS (国際地球回転・基準座標系サービス)  
<http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/>
- R. S. Gross & B. F. Chao, G24A-01 2005 AGU Fall Meeting

## 2004 年度 卒業論文発表会 プログラム

2005 年 1 月 31 日(月) 09:30 ~ 16:30

1. 楠瀬 友洋, 「2004 年 9 月 5 日の紀伊半島南東沖地震の津波解析」
2. 上田 満治, 「2003 年十勝沖地震による北海道の地殻変動と内陸部地震活動の関係」
3. 花房 瑞樹, 「渦位を用いた総観規模現象の診断」
4. 大城 正裕, 「縲り込み群と臨界現象」
5. 栗山 悟, 「北大西洋の SST と北大西洋振動の変動と両者の関係 - レビュー」
6. 坂田 朋規, 「大気・海洋大循環モデルによる太平洋における十年変動のメカニズム - レビュー」
7. 大石 尊久, 「金星上層雲の構造と運動に関する研究」
8. 鈴木 健太, 「日本付近における降雪現象のタイプ」

9. 佐藤 流, 「火山性微動スペクトルの時間変化 - Montserrat 島 Soufriere Hills 火山の例 -」
10. 吉田 友香, 「ハイブリッド測地観測から推定されるマグマの挙動 - 2000 年新山の沈降 -」
11. 広瀬 佑介, 「水星の熱史と固有磁場の起源について」
12. 成田 悠一, 「氷河の質量収支評価法 - グローバルな観点から」
13. 太田 晴信, 「海岸部における地下水の塩水化機構」
14. 小川 涼子, 「非プレートテクトニクス起源の地球の大規模変形の検出」
15. 細田 伸一, 「ガンマ線バースト: その生物進化への影響の可能性」
16. 和田 知之, 「アフリカ高地帯における流出応答特性」
17. 新屋 雅之, 「北海道内陸地殻内地震による強震動の研究: 2004 年斜里岳南部地震 (M4.8)」
18. 二本柳 芳宣, 「太陽フレアによる電離層全電子数変化の定量的研究」
19. 高雄 文仁, 「有珠山頂火口原における熱活動のいま」
20. 藤原 忠誠, 「温暖前線上の巻雲フロントの検出と大気構造」
21. 中司 展人, 「断層周辺の地下水流動」
22. 石井 智, 「自転軌道結合の安定性について」
23. 佐藤 真悠, 「地震に伴う電離層の擾乱の研究」
24. 山口 剛司, 「2001 年中央崑崙地震 (Mw7.8) の破壊過程」
25. 東 龍介, 「北海道南方沖における海底地震観測から得られた 2000 年の地震活動」
26. 工藤 正則, 「全球凍結現象の簡単なモデルによる再現」
27. 佐藤 克成, 「海洋生態系と物質循環、及びそれらのモデリングに関するレビュー」
28. 江頭 亮太, 「札幌における大気エアロゾルの吸湿特性と化学組成との関係」

2004 年度 卒業論文発表会 プログラム

2005 年 1 月 31 日(月) 09:30 ~ 16:30

1. 楠瀬 友洋, 「2004 年 9 月 5 日の紀伊半島南東沖地震の津波解析」
2. 上田 満治, 「2003 年十勝沖地震による北海道の地殻変動と内陸部地震活動の関係」
3. 花房 瑞樹, 「渦位を用いた総観規模現象の診断」
4. 大城 正裕, 「縲り込み群と臨界現象」
5. 栗山 悟, 「北大西洋の SST と北大西洋振動の変動と両者の関係 - レビュー」
6. 坂田 朋規, 「大気・海洋大循環モデルによる太平洋における十年変動のメカニズム - レビュー」
7. 大石 尊久, 「金星上層雲の構造と運動に関する研究」
8. 鈴木 健太, 「日本付近における降雪現象のタイプ」
9. 佐藤 流, 「火山性微動スペクトルの時間変化 - Montserrat 島 Soufriere Hills 火山の例 -」
10. 吉田 友香, 「ハイブリッド測地観測から推定されるマグマの挙動 - 2000 年新山の沈降 -」
11. 広瀬 佑介, 「水星の熱史と固有磁場の起源について」
12. 成田 悠一, 「氷河の質量収支評価法 - グローバルな観点から」
13. 太田 晴信, 「海岸部における地下水の塩水化機構」
14. 小川 涼子, 「非プレートテクトニクス起源の地球の大規模変形の検出」
15. 細田 伸一, 「ガンマ線バースト: その生物進化への影響の可能性」
16. 和田 知之, 「アフリカ高地帯における流出応答特性」
17. 新屋 雅之, 「北海道内陸地殻内地震による強震動の研究: 2004 年斜里岳南部地震 (M4.8)」
18. 二本柳 芳宣, 「太陽フレアによる電離層全電子数変化の定量的研究」
19. 高雄 文仁, 「有珠山頂火口原における熱活動のいま」
20. 藤原 忠誠, 「温暖前線上の巻雲フロントの検出と大気構造」
21. 中司 展人, 「断層周辺の地下水流動」
22. 石井 智, 「自転軌道結合の安定性について」
23. 佐藤 真悠, 「地震に伴う電離層の擾乱の研究」
24. 山口 剛司, 「2001 年中央崑崙地震 (Mw7.8) の破壊過程」
25. 東 龍介, 「北海道南方沖における海底地震観測から得られた 2000 年の地震活動」
26. 工藤 正則, 「全球凍結現象の簡単なモデルによる再現」
27. 佐藤 克成, 「海洋生態系と物質循環、及びそれらのモデリングに関するレビュー」
28. 江頭 亮太, 「札幌における大気エアロゾルの吸湿特性と化学組成との関係」