

第5章 月内部潮汐応力の周期性と応用

5-1 月内部潮汐応力計算の意義と目的

4-5節で述べたように深発月震は月深部の情報を持つ重要なグループであり、LUNAR-A計画でも優先して取得する目標となっている。このため深発月震の予報を行うことができれば、非常に有益と考えられる。2-1-2節でも触れたように、深発月震はほぼ27日周期で規則的に発震する性質があり、これを利用すれば将来の予報は容易であると思われがちである。しかし、月軌道離心率の太陽摂動による約207日周期と同期して振幅が変化する深発月震グループがあり、また月における約6年周期の地球位置変動と同期した活動性変化は深発月震一般に見られる現象である(Nakamura, 1978; Lammlein, 1977)。従って深発月震予報を行うには各震源での潮汐応力変化を正確に計算してその短周期(約27日周期)変化のみならず長周期変化(約207日、約6年周期)の対応関係をチェックする必要がある。本章では、アポロ月震観測で震源位置が求められた52個のグループのうち、6年周期が明確に認められるもの及びLUNAR-A計画実行時の1998年に活動中と思われるもの、総計20個の震源を選び、それぞれの震源における地球による潮汐応力を計算し、そのテンソル6成分に見られる6年周期などの対応関係をもとに深発月震発生時期を推定し、深発月震予報表を作成した。これはLUNAR-A計画実行のための基礎資料となるものである。

また、これとは別にA33深発月震グループについては、平均的潮汐シア応力最大面を仮想断層面としたとき、その面のシア応力、垂直応力と活動度周期性の対応関係を検討した。このグループは月震発生時刻の周期性及び約6年周期の活動性変化が極めて明瞭に確認できるため、これを潮汐応力変動の周期性と対応づけることが容易であり、またA33深発月震の発生機構を論ずるときの基礎ともなる。この種の問題は従来からA1という最も活動的な深発月震グループの極性反転問題をめぐって論ぜられたことがあるが、結論としてはA1震源の回りには定常的なテクトニックな応力場があり、極性反転はある決まった断層面上の、方向を反転させた断層運動であるとの説(Toksoz et al., 1977; Cheng and Toksoz, 1978)と、A1震源には決まった断層面はなく潮汐応力場の変動によって断層面が時期ごとに変化する(Nakamura, 1978; Koyama and Nakamura, 1980)との2説が並立したままになっている。この状況もLUNAR-A等の月震探査で良質な波形データが得られれば変化する可能性があり、他の震源についてもよく調べておく必要があると思われる。今回の検討はそのた

めの第一歩と位置づけることができる。

5-2 計算手法

5-2-1 概要

月内部潮汐応力計算は、地球による2次潮汐ポテンシャル(W_2)のみについて行なった。これは、月内部応力の大局的時間変化(特に6年周期の地球位置変化の影響)を取り出すことを主目的にしていたからである。これに次ぐ潮汐ポテンシャルは地球の3次成分、太陽の2次成分であるが、これらをそれぞれ W_3 、 W_{2s} とすると、 W_2 、 W_3 、 W_{2s} の代表的値は、

$$W_2 = \left(\frac{GM_E}{R_{EM}} \right) \cdot \left(\frac{a_M}{R_{EM}} \right)^2 = 21.1(m/s)^2 \quad (5-2-1)$$

$$W_3 = \left(\frac{GM_E}{R_{EM}} \right) \cdot \left(\frac{a_M}{R_{EM}} \right)^3 = 0.095(m/s)^2 \quad (5-2-2)$$

$$W_{2s} = \left(\frac{GM_S}{R_{SM}} \right) \cdot \left(\frac{a_M}{R_{SM}} \right)^2 = 0.12(m/s)^2 \quad (5-2-3)$$

となり W_2 は他の成分より2桁以上も上回っている。ただし G は重力定数($6.67 \cdot 10^{-11} \text{Nm}^2 \text{kg}^{-2}$)、 M_E は地球質量($5.97 \cdot 10^{24} \text{kg}$)、 a_M は月半径($1.738 \cdot 10^3 \text{km}$)、 R_{EM} は地球一月平均距離($3.85 \cdot 10^5 \text{km}$)、 R_{SM} は月一太陽平均距離($1.496 \cdot 10^8 \text{km}$)とした。

計算は以下の方法に従って行なった(Fig.5-1参照)。すなわち、

1. 月面上からみた地球位置(以後地球秤動と呼ぶ、方向2成分と距離)をELP-2000/82、天体位置表(1994)のデータを併用して計算し、必要な時期についてのデータファイルを作成する。
2. 月内部構造を仮定し、それをもとに固体惑星の変形を論ずる際の基本関数6つ(以後 y_i 関数と呼ぶ、 $y_i; i=1 \sim 6$)を求める(e.g. 竹内, 1972)。
3. 月内部の深発月震震源位置における応力テンソル(独立成分6つ)を1、2の結果を組み

合わせ、時間関数として数値的に求める。

4. 必要に応じて応力テンソルから最大シア応力面の方向や、仮想的断層面における垂直応力や、シア応力を求める。

以下5-2-2～5-2-5の各節では、上記1～4の順に説明する。

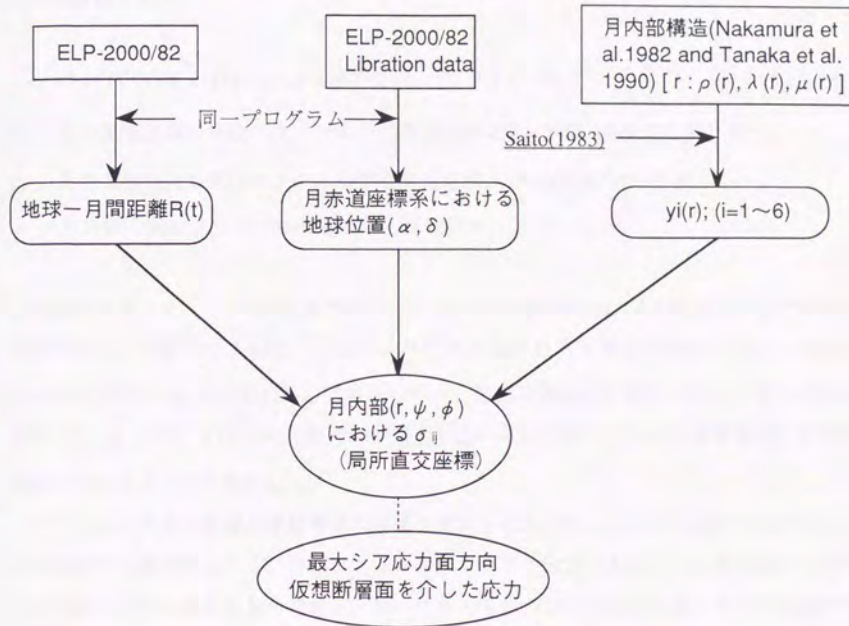


Fig.5-1 月内部潮汐応力計算法の概念図。月の暦(ELP-2000/82)と天体位置表(1994)の月物理秤動データ(Libration data)から月に対する地球の位置を求める(地球秤動)。一方月内部構造モデルを仮定して y 関数(5-2-3節)を求め両者から σ_{ij} を計算する。

5-2-2 地球秤動

地球秤動を計算するための基礎は、明確に定義された月面上の緯度経度と月の暦である。ここでは月面上の緯度経度及びこれを天球上に投影した月赤道系として、1994年度版天体位置表pp.428～433の定義を採用する。すなわち、平位黄道座標系(春分点移動を歳差成分のみ考慮した空間に対して動く座標系)から月赤道系への変換は、回転変換

$$R_z \left(\tan^{-1} \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \right) \cdot R_x \left(\sin^{-1} \left(\sqrt{\frac{P_1}{P_2}} \right) \right) \cdot R_z \left(luna + \pi + \tan^{-1} \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \right) \quad (5-2-4)$$

で行なう。ここで、 R_x は春分点回りの回転、 R_y は平位黄道座標系のy方向を軸とした回転、 R_z は黄道北極回りの回転。 P_1 、 P_2 、 τ は月の物理移動、 $luna$ は平位黄道座標系における月の平均黄経であり、

$$luna = 218^\circ 18' 59''.96 + (1336 \text{rounds} + 307^\circ 52' 52''.832) \cdot T + 4''.789 \cdot T^2 \quad (5-2-5)$$

P_1 --- 月の北極方向の単位ベクトルの平位黄道座標系のx方向（春分点方向）成分、

P_2 --- 月の北極方向の単位ベクトルの平位黄道座標系のy方向成分(右手系)、

τ --- 月自転の黄経成分の一様速度からの進み遅れ、

と定義される。ただし、 T は西暦2000年1月1.5日(JD=2451545.0)から36525日単位で計った時間である。変換式(5-2-4)で、 $\tau=0$ 、 $\tan^{-1}(P_1/P_2)=luna-\Omega$ （月昇交点黄経）とみなせば、Cassiniの3法則(Cassini, 1721)として知られていた月自転運動の経験則が得られる。今回の計算では、 P_1 、 P_2 、 τ は1994年版天体位置表p.429~433に掲げてある主要摂動項、惑星摂動項をそのまますべて使用した。

さて、ある天体の位置が平位黄道座標系で求められた時に、(5-2-4)の変換をほどこせば月赤道系での値が得られる。目標は、月における地球の位置であるがこれは地球からみた月の位置の符号を変えたものである。従ってなんらかの方法で符号を変えた月の位置データを平位黄道座標系での値に変換できれば問題は解決する。

今回月位置を計算するのに用いたのは、Chapront 夫妻の手になるELP-2000/82という半解析暦で主にフランスで使用されているものである。太陽、諸惑星、地球形状の摂動はもちろん、地球潮汐、月形状、一般相対論補正にいたるまで考慮されており、米国ジェット推進研究所(JPL)のE. M. Standishらが作成した、世界標準の座を占める数値月惑星暦DE/LE200との比較で、1世紀にわたって黄経で 10^2arc sec 、黄緯で $5 \cdot 10^{-3} \text{arc sec}$ 、地球との距離にして10mの食い違いがあるだけの高精度を誇る半解析暦である(Chapront and Chapront, 1982; Chapront and Chapront, 1983)。しかも、半解析解であるから、使用する側の要求に応じて精度調節をすることが容易である。データは摂動ごとに種別され、テキストファイルとしてMTに収められている。国立天文台の木下宙教授、中井宏助手の厚意により、宇宙

科学研究所の大型計算機(M1800)にコピーさせていただいた。

計算には2次までの地球潮汐ポテンシャルのみを考慮することや深発震源位置の精度が高々1~2度しかないので、地球の位置計算には必要以上の精度を追求せず、黄経 10^{-2} arc sec.、黄緯 10^{-2} arc sec.、距離10m以上の振幅を持つ摂動成分のみを考慮した。ここで黄経、黄緯というのはELP-2000/82が準拠している瞬間平均力学黄道系(mean dynamical ecliptic of date)+ γ '(2000)での値である(Chapront and Chapront, 1982)。その結果、Table5-1に示すように、太陽摂動、地球形状摂動、惑星摂動の3種の摂動を考慮することになり、黄経487項、黄緯267項、距離385項を使用することになったが、DE200との差は、黄経と黄緯で 10^{-1} arc sec.以内、距離にして100m以内に収まっているようである。計算手法の詳細については、(Chapront and Chapront, 1982)を参照されたい。なおこの文献は正規の論文ではなく、タイプライタ書きで著者の覚書のようなものであるが、実際に計算を進めるには必須である。手に入りにくいと思われるので、付録1としてコピーを添付しておく。

Table5-1 月からの地球位置計算に使用した月運動摂動項の数(ELP-2000/82)

| | 太陽摂動項 | 地球形状項 | 惑星摂動項 | 合計 |
|----|-------|-------|-------|-----|
| 黄経 | 218 | 17 | 252 | 487 |
| 黄緯 | 188 | 15 | 64 | 267 |
| 距離 | 186 | 12 | 187 | 385 |

この方法に従えば、地球からみた月の位置がFK5/2000座標系で求められる。この座標系は、FK5(Fifth Fundamental Catalogue)星表(W. Fricke, H.Schwan, T.Lederle: Veröff. Astr. Rech. -Inst., Nr. 32, 1988)にもとづいたJ2000(JD2451545.0)での平均赤道座標系である。これに下記の座標変換をほどこすと平位赤道座標系に移る(天体位置表、1994)、

$$\begin{pmatrix} \cos \delta \cdot \cos \alpha \\ \cos \delta \cdot \sin \alpha \\ \sin \delta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin z_A & -\cos z_A \\ \cos z_A & -\sin z_A \\ 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ \cos \theta_A & \sin \theta_A \\ -\sin \theta_A & \cos \theta_A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sin \zeta_A & \cos \zeta_A \\ -\cos \zeta_A & \sin \zeta_A \\ 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \delta_0 \cos \alpha_0 \\ \cos \delta_0 \sin \alpha_0 \\ \sin \delta_0 \end{pmatrix} \quad (5-2-6)$$

$$\zeta_A = 2306''.2181 \cdot T + 0''.30188 \cdot T^2 + 0''.017998 \cdot T^3 \quad (5-2-7)$$

$$z_A = 2306''.2181 \cdot T + 1''.09468 \cdot T^2 + 0''.018203 \cdot T^3 \quad (5-2-8)$$

$$\theta_A = 2004''.3109 \cdot T - 0''.42665 \cdot T^2 - 0''.041833 \cdot T^3 \quad (5-2-9)$$

ここで α 、 δ はそれぞれ赤経、赤緯である。平位赤道座標系から平位黄道座標系へは、

$$\begin{pmatrix} \cos \beta \cdot \cos \lambda \\ \cos \beta \cdot \sin \lambda \\ \sin \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & & \\ & \cos \varepsilon_A & \sin \varepsilon_A \\ & -\sin \varepsilon_A & \cos \varepsilon_A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \delta \cdot \cos \alpha \\ \cos \delta \cdot \sin \alpha \\ \sin \delta \end{pmatrix}$$

(5-2-10)

の式が用いられる。ここで β 、 γ はそれぞれ黄経、黄緯である (天体位置表、1994)。

そして最後に、上記の平位黄道座標系での位置ベクトル符号を反転させ、式(5-2-4)で変換して、月重心から地球重心へ向かうベクトルが月表面 (球面とみなす) と交差する点の月赤道系における緯度経度すなわち地球秤動、及び地球-月重心間距離が各時刻で数値的に求められる (Fig.5-2)。ここまでの座標変換を Fig.5-3 にまとめておく。

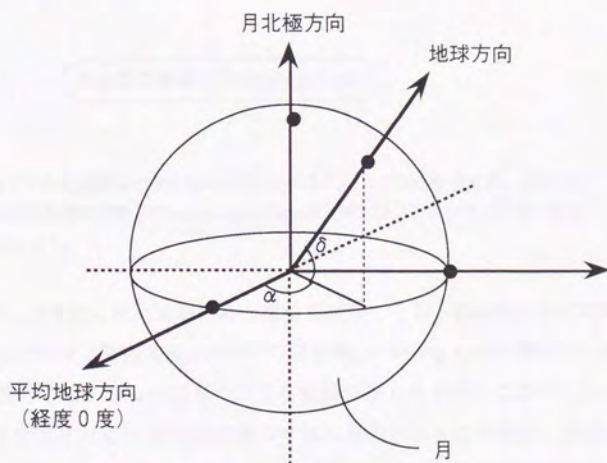


Fig.5-2 月赤道座標系での地球位置の定義。実際は α 、 δ ともに約 ± 10 度以下である。

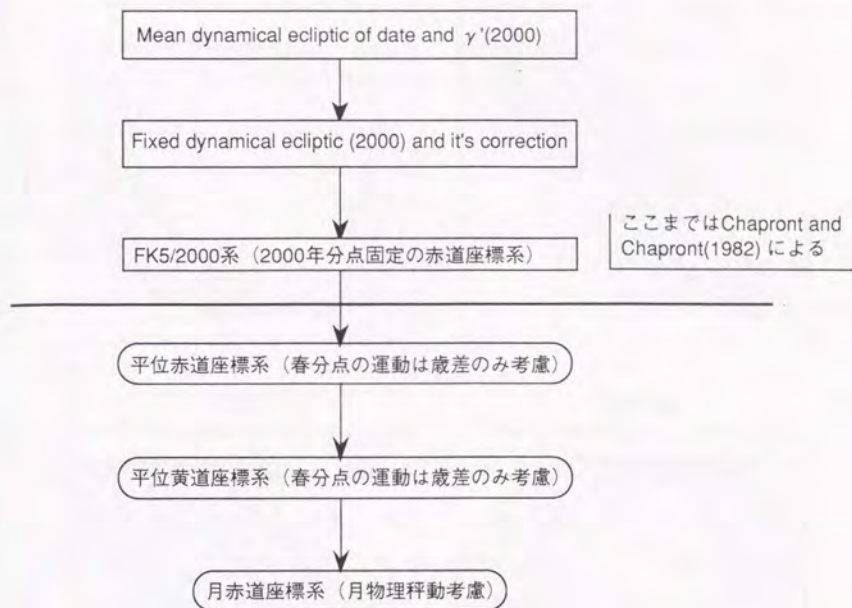


Fig.5-3 月赤道座標系でみた地球位置を求めるために必要な座標変換。上半分は ELP-2000/82付属の覚書き(Chapront and Chapront, 1982)に、下半分は、天体位置表(1994)によった。

このようにして求められた地球秤動と重心間距離のうち、1969年～1977年のアポロ月震観測期間及びLUNAR-A観測期間(1998年)の図をFig.5-4～Fig.5-13に掲げる。地球秤動は約6年の周期を持ってリサージュ図形のような変動を繰り返すが、このほとんどは近点月周期27.5546日と交点月周期27.2122日の間のずれに起因するものである。近点月周期とは、月が地球と最接近してから次の最接近までの時間、交点月は月が昇交点を通過してから次に通過するまでの時間のことである。Fig.5-4～Fig.5-13において地球は、横軸の経度方向には近点月周期で、緯度方向には交点月周期で往復運動するため、うなり T_{beat} が生ずる。

$$(1/T_{beat}) = (1/27.2122days) - (1/27.5546days) \cong (1/6years) \quad (5-2-11)$$

この現象を白道面(月軌道面)の運動に翻訳すると、恒星月27.3217日と近点月27.5546日、交点月27.2122日の差より、月の近地点方向は周期8.85年で前進し、昇交点黄経は周期18.6

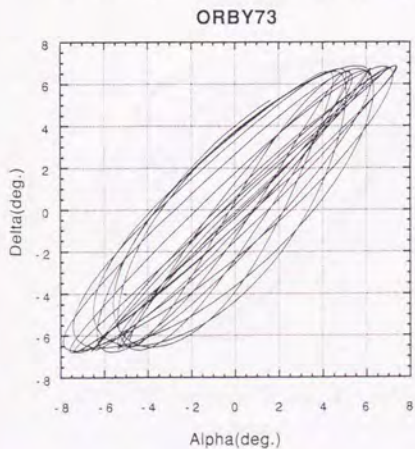
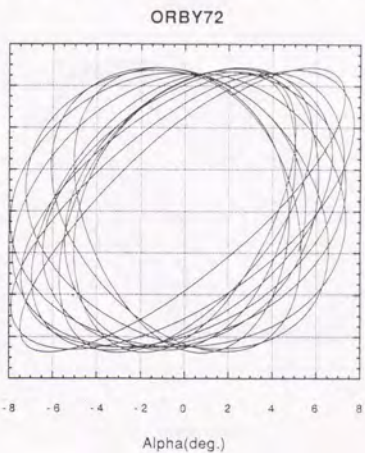
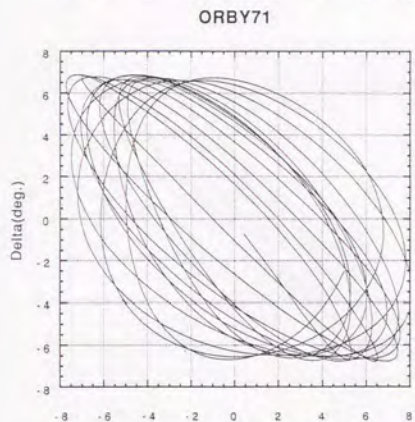
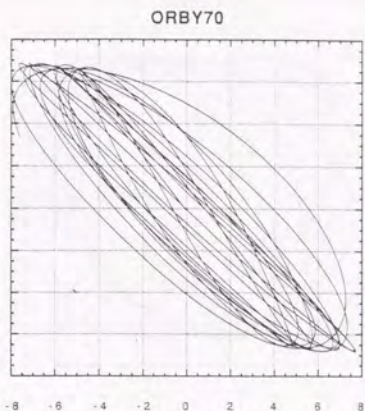
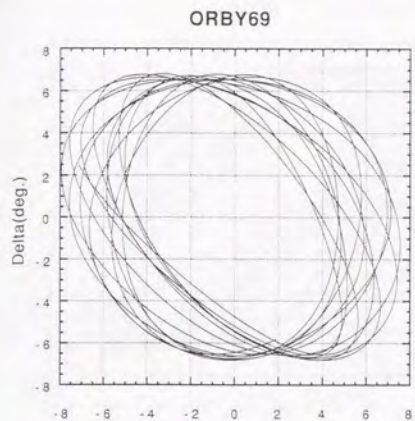


Fig.5-4~5-8 月面($0^{\circ}, 0^{\circ}$)において地球の見える方向を表す(地球秤動、5-2-1節)。グラフで($0^{\circ}, 0^{\circ}$)は天頂方向、 α は東向きを+、 δ は北向きを+にとってある。1969年(ORBY69)から1973年(ORBY73)まで。1969年は時計回り、1972年は反時計回りの図形を描く。

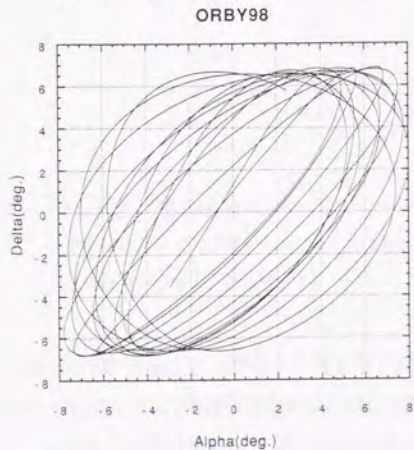
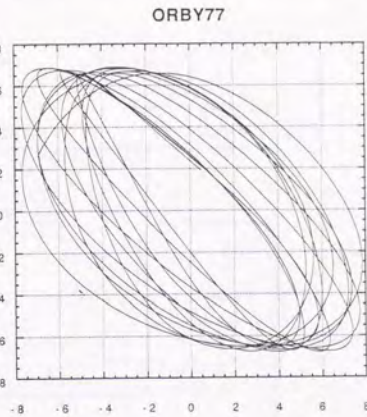
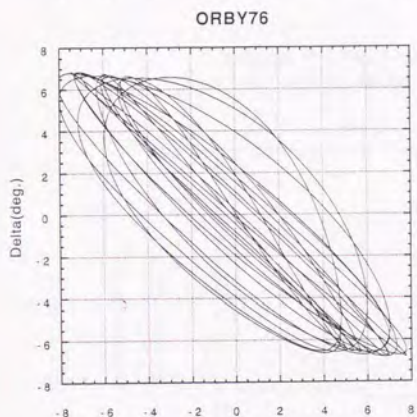
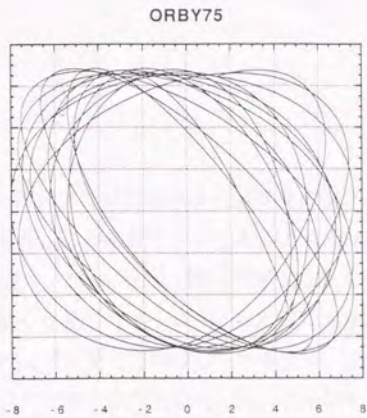
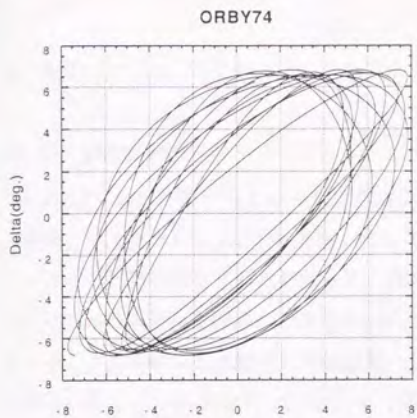


Fig.5-9~5-13 Fig.5-4~5-8の続き。1974年(ORBY74)から1977年(ORBY77)までと1998年(ORBY98)の。1974,75年は時計回り、1977年は反時計回りの図形を描く。1998年は時計回りの図形を描く。

年で後退していることになる。

5-2-3 y関数決定

5-2-2節で地球移動がもとめられたので、次のステップは球対称月内部構造を仮定しその結果として導かれるy関数を決定することである。この結果を用いて次節の月内部応力テンソルの計算を行なうことができる。内部構造は、Tanaka et al. (1990)で検討されたコア半径450kmのモデルを採用した(Fig.5-14)。5-1節でも述べたように、この計算は地球移動から生じる月内部応力変動の大局的振舞いを調べることを主目標にしているため、以後の計算はこのモデルのみについて行ない、現象の月内部構造依存性は考えないことにする。

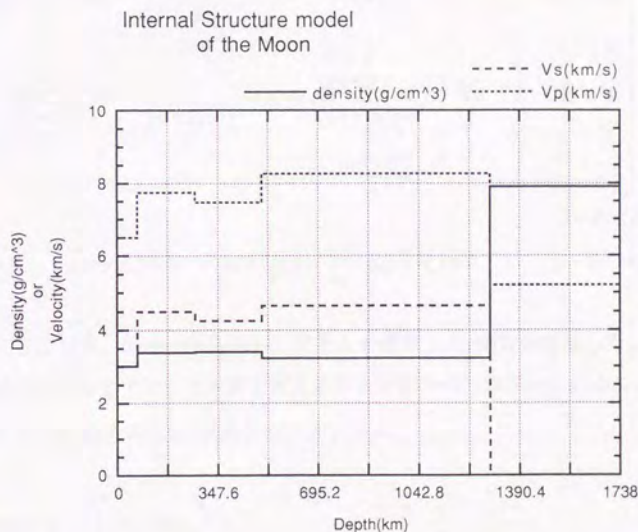


Fig.5-14 Nakamura et al.(1982)の月マントル速度構造とTanaka et al.(1990)による月マントル密度構造及びコア半径450kmのモデルを組み合わせた月内部構造モデル。月内部潮汐応力はこのモデルをもとに計算した。

球対称内部構造モデルが決まるとy関数は数値的に求められる (e.g.Takeuti, 1950; 竹内, 1972)。実際には、y関数は6元連立1次線形常微分方程式を解いて求められるが、本論ではこれらの微分方程式を導く詳細な議論は省略し上記の論文、書籍に譲り、6微分方程式を

以下に列挙するにとどめる。この方程式は球対称構造の天体にのみ通用するものである。また、境界条件は、天体の表面でストレス0、及び球の内外での重力ポテンシャル連続の条件から決められる。

$$\frac{dy_i}{dr} = \sum_{m=1}^5 A_{im} \cdot y_m$$

where,

$$A_{im} = \begin{pmatrix} \frac{2\lambda}{(\lambda+2\mu)\cdot r} & \frac{1}{\lambda+2\mu} & \frac{\lambda N^2}{(\lambda+2\mu)\cdot r} & 0 & 0 & 0 \\ -\sigma^2 \rho - \frac{2\rho g}{r} & 2A_{41} & -\frac{4\mu}{(\lambda+2\mu)\cdot r} & N^2 A_{41} & \frac{N^2}{r} & 0 & -\rho \\ -\frac{1}{r} & 0 & \frac{1}{r} & \frac{1}{\mu} & \frac{1}{\mu} & 0 & 0 \\ \frac{\rho g}{r} - \frac{2\mu(3\lambda+2\mu)}{4\pi G \rho} & \frac{2\mu}{(\lambda+2\mu)\cdot r^2} & -\frac{\lambda}{(\lambda+2\mu)\cdot r} & -\sigma^2 \rho + \frac{4N^2\mu(\lambda+\mu)}{(\lambda+2\mu)\cdot r^2} - \frac{2\mu}{r^2} & -\frac{3}{r} & -\frac{\rho}{r} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{4\pi G \rho N^2}{r} & 0 & \frac{N^2}{r^2} & -\frac{2}{r} \end{pmatrix} \quad (5-2-12)-(5-2-17)$$

$$y_2(r=a_s) = 0, \quad y_4(r=a_s) = 0, \quad y_5(r=a_s) + \frac{n+1}{a_s} y_5(r=a_s) = 0, \quad (5-2-18)-(5-2-20)$$

この条件にもとづき、Saito(1983)のプログラムを使用してy関数を計算した。このプログラムはn=46次の潮汐ポテンシャルまで使えることが確かめられている。これは、半径 a_M の月の中心からの距離rでの地球n次潮汐ポテンシャル、

$$W_n = 1.0(\text{cm/s}^2) \cdot \left(\frac{r}{a_s}\right)^2 \cdot Y_{nm}(\theta, \varphi) \quad (5-2-21)$$

$$Y_{nm}(\theta, \varphi) = P_{nm}(\cos \Theta) \cdot \exp(im\varphi) \quad (5-2-22)$$

によるy関数を計算するものである。ただし P_{nm} はルジャンドル陪関数である。式(5-2-12~5-2-17)は線形であり、その性質は任意の潮汐ポテンシャルに対する潮汐応力を求める際に活用される(5-2-4節)。yの値は実際にかげられた W_n に比例する。この節で仮定した球対称月モデルについての計算結果をFig.5-15-1~Fig.5-15-6に示す。このうち、応力計算に利用するのは $y_1 \sim y_4$ である。

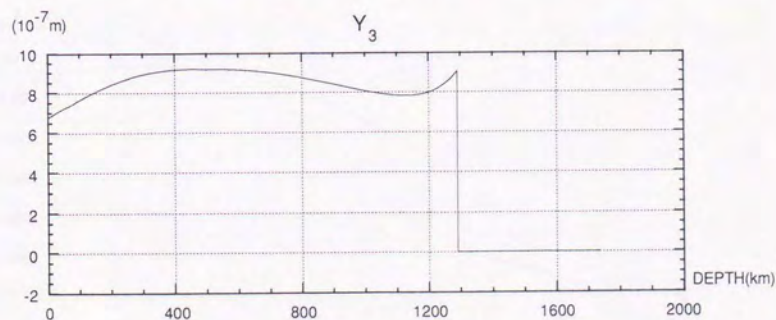
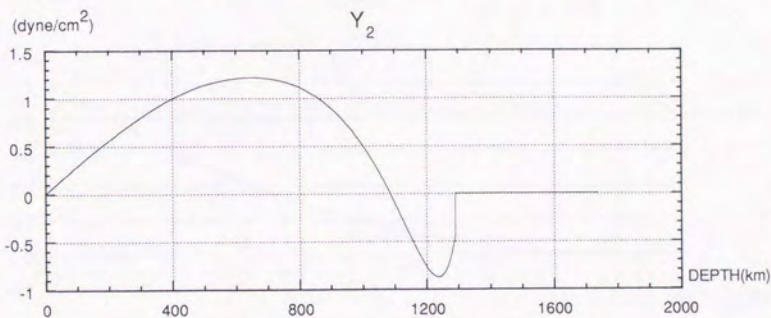
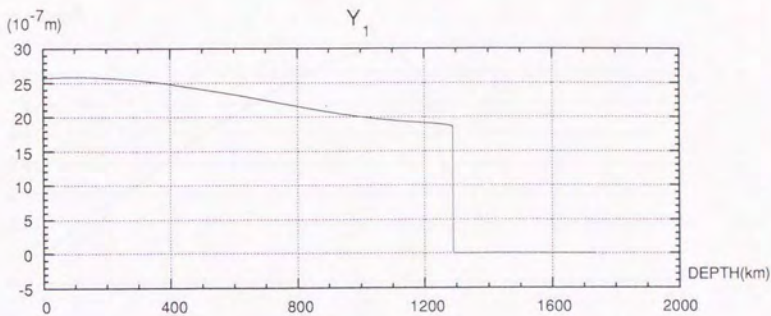


Fig.5-15-1~5-15-3 式(5-2-12)~(5-2-17)の解
 Y_1, Y_2, Y_3 . 月内部構造は半径450kmの流体鉄
 コアを持つモデルFig.5-14を仮定。

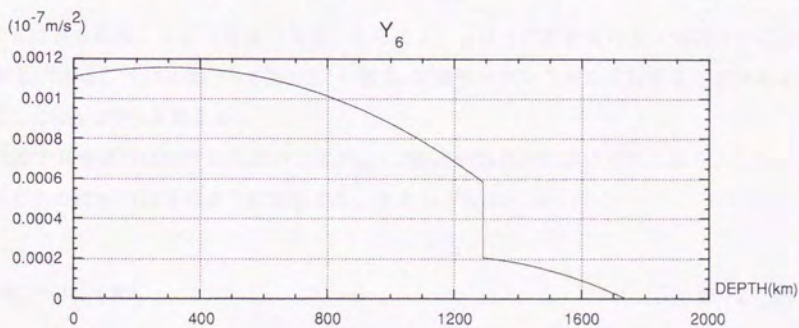
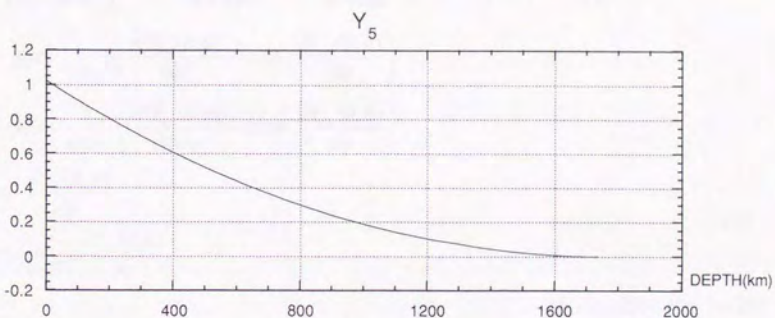
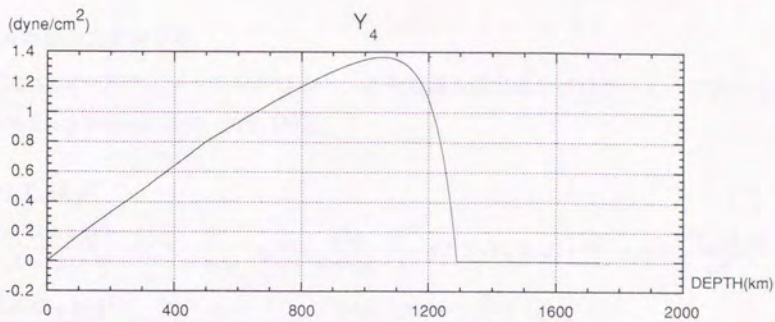


Fig.5-15-4~5-15-6 式(5-2-12)~(5-2-17)の解
 Y_4, Y_5, Y_6 。月内部構造は半径450kmの流体鉄
 コアを持つモデルFig.5-14を仮定。

5-2-4 月内部応力テンソル

式(5-2-22)の潮汐ポテンシャルをかけると、月内部潮汐応力成分は以下のように求めることができる(e.g. Takeuti, 1950; 竹内, 1972)。

$$\begin{aligned}
 \sigma_{rr} &= y_2(r) \cdot Y_{nm}(\theta, \varphi) \\
 \sigma_{\theta\theta} &= \left[\left(\frac{2\mu(3\lambda+2\mu)}{(\lambda+2\mu)r} \right) \cdot y_1(r) + \frac{\lambda}{\lambda+2\mu} \cdot y_2(r) - \frac{2\lambda\mu}{\lambda+2\mu} \cdot \frac{N^2}{r} \cdot y_3(r) \right] \cdot Y_{nm}(\theta, \varphi) + \frac{2\mu}{r} \cdot y_3(r) \cdot \frac{\partial^2 Y_{nm}(\theta, \varphi)}{\partial \theta^2} \\
 \sigma_{\varphi\varphi} &= \left[\left(\frac{2\mu(3\lambda+2\mu)}{(\lambda+2\mu)r} \right) \cdot y_1(r) + \frac{\lambda}{\lambda+2\mu} \cdot y_2(r) - \frac{2\lambda\mu}{\lambda+2\mu} \cdot \frac{N^2}{r} \cdot y_3(r) \right] \cdot Y_{nm}(\theta, \varphi) \\
 &\quad + \frac{2\mu}{r} \cdot y_3(r) \cdot \left(\frac{1}{\sin^2 \theta} \cdot \frac{\partial^2 Y_{nm}(\theta, \varphi)}{\partial \varphi^2} + \cot \theta \cdot \frac{\partial Y_{nm}(\theta, \varphi)}{\partial \theta} \right) \\
 \sigma_{\theta\varphi} &= \frac{2\mu}{r} \cdot y_3(r) \cdot \frac{1}{\sin \theta} \cdot \left(\frac{\partial^2 Y_{nm}(\theta, \varphi)}{\partial \theta \partial \varphi} - \cot \theta \cdot \frac{\partial Y_{nm}(\theta, \varphi)}{\partial \varphi} \right) \\
 \sigma_{r\theta} &= y_4(r) \cdot \frac{\partial Y_{nm}(\theta, \varphi)}{\partial \theta} \\
 \sigma_{r\varphi} &= y_4(r) \cdot \frac{1}{\sin \theta} \cdot \frac{\partial Y_{nm}(\theta, \varphi)}{\partial \varphi}
 \end{aligned}$$

(5-2-23) - (5-2-28)

ここで θ は月余緯度、 ϕ は月経度である。さらに λ 、 μ は月内部物質のラメ常数で中心距離 r の関数である。式(5-2-23~5-2-28)は、一般の n 次潮汐ポテンシャルに対する応答であるが、ここでは $n=2$ のみを考える。

5-2-2節で月赤道系における地球の位置(Fig. 5-2参照)が数値的に求められており、これを利用するために W_2 を以下のように変形する。すなわち W_2 は、

$$W_2 = W_{20} + W_{21}^c + W_{22}^c \quad (5-2-29)$$

where,

$$W_{20} = \frac{GM_E}{r} \left(\frac{a_M}{r} \right)^2 P_{20}(\sin \delta_\oplus) \cdot \left(\frac{\rho}{a_M} \right)^2 P_{20}(\sin \Psi) = f_{20} \cdot \left(\frac{\rho}{a_M} \right)^2 P_{20}(\sin \Psi) \quad (5-2-30)$$

where,

$$f_{20} = \frac{GM_E}{r} \left(\frac{a_e}{r} \right)^2 P_{20}(\sin \delta_\oplus),$$

$$\begin{aligned}
 W_{21}^c &= \frac{GM_E}{r} \left(\frac{a_m}{r} \right)^2 \left(\frac{1}{3} \right) P_{21}(\sin \delta_0) \exp(-i\alpha_0) \cdot \left(\frac{\rho}{a_m} \right)^2 P_{21}(\sin \Psi) \exp(-i\phi) \\
 &= f_{21}^c \cdot \left(\frac{\rho}{a_m} \right)^2 P_{21}(\sin \Psi) \exp(-i\phi)
 \end{aligned} \tag{5-2-31}$$

where,

$$f_{21}^c = \frac{GM_E}{r} \left(\frac{a_m}{r} \right)^2 \left(\frac{1}{3} \right) P_{21}(\sin \delta_0) \exp(-i\alpha_0),$$

$$\begin{aligned}
 W_{22}^c &= \frac{GM_E}{r} \left(\frac{a_m}{r} \right)^2 \left(\frac{1}{12} \right) P_{22}(\sin \delta_0) \exp(-i2\alpha_0) \cdot \left(\frac{\rho}{a_m} \right)^2 P_{22}(\sin \Psi) \exp(-i2\phi) \\
 &= f_{22}^c \cdot \left(\frac{\rho}{a_m} \right)^2 P_{22}(\sin \Psi) \exp(-i2\phi)
 \end{aligned} \tag{5-2-32}$$

where,

$$f_{22}^c = \frac{GM_E}{r} \left(\frac{a_m}{r} \right)^2 \left(\frac{1}{12} \right) P_{22}(\sin \delta_0) \exp(-i2\alpha_0)$$

のように表される。ここで α_0 , δ_0 , r は月赤道系での地球経度、月赤道系での地球緯度、地球一月間距離であり、 Ψ , ϕ , ρ は月赤道系での月内部位置の緯度、経度、月重心からの距離である。(5-2-30)~(5-2-32)は W_2 を月面上の経度、緯度で表現し直したものである。

(5-2-30~5-2-32)の式で f_{20}^c , f_{21}^c , f_{22}^c を式(5-2-23~5-2-28)の σ_{ij} 右辺にそれぞれかけて実数部をとれば、 W_{20} , W_{21}^c , W_{22}^c に対応する応力テンソル成分が得られる。 W_2 に対応する成分は σ_{ij} の式(5-2-23~5-2-28)の線形性を利用してこれらの和を取ればよい。この結果、応力成分は、各地点の緯度方向南 (θ)、経度方向東 (ϕ)、鉛直上向き (r) を3方向を直交軸にとる局所直交座標系で計算される(月内部局所直交座標系)。以上で球対称月モデル内部の任意地点で潮汐応力の時間変化を計算出来る準備が整った。

5-2-5 最大シア応力方向、仮想面を介した力

5-2-4節までの方法に従い、月内部任意地点での地球による2次潮汐応力テンソルは数値的に求められる。この結果、任意の深発震源での潮汐応力場の時間変化が求められる。しかし潮汐応力テンソルの独立6成分を単に眺めるだけでは、潮汐応力場の物理的描像を得にくいので、その最大潮汐シア応力方向の算出と仮想的断層面に対する垂直応力、シア応力の大きさを計算することもA33深発月震に関して行なった(5-4-2節)。このうち前者は、各時刻の応力テンソルを対角化し、最大主応力方向と最小主応力方向の中間45度方向(2方

向)を求めていけばよい(Turcotte and Schubert, 1982)。後者は、応力テンソルと方向ベクトルと仮想的断層面の法線ベクトルとの積で求めることができる。

5-3 震源データ及び検討事項

今回の計算で採用した震源位置データはすべてNakamura et al.(1982)による。この中の52個の深発月震震源のうち以下の1~3の選択基準をひとつでも満たすものについて地球2次潮汐応力テンソル6成分の時間変動とアポロ月震計で観測された発震時刻の対応関係を調べ、1998年のLUNAR-A実行時にどの程度観測できるかを検討することにした。

1. 深発月震のもつ約6年の活動周期性が明白に見られるもの。
2. アポロ月震観測期間を通じて30個以上のイベントが観測されているもの。
3. LUNAR-A計画実行時(1998年)とほぼ同様の応力変化をしていた1974から1975年にアポロ月震計で観測されていた深発震源。

この結果、Table5-2に示す20個の深発月震が対象となった。またこれらの震央位置の分布はFig. 5-16のようになっている。月高地には見かけ上あまり震源が分布していないという深発月震の特徴が現れており、少なくとも震央分布に関する限りここでの選択には、偏りが見られないことがわかる。なお月震発生時刻はテキサス大学の中村吉雄教授から提供されたデータによる。

Table 5-2 月震発生予報を行った20個の深発震源位置データ、括弧内は1 σ の誤差
*は仮定した値(Nakamura et al., 1982)。

| Group | Latitude(deg. N) | Longitude(deg. E) | Depth(km) |
|-------|------------------|-------------------|-------------------|
| A1 | -16.6(2.7) | -39.8(5.4) | 920.0(29.0) |
| A5 | 20.4(1.2) | -41.0(3.6) | 703.0(30.0) |
| A6 | 42.8(2.8) | 55.0(9.7) | 853.0(32.0) |
| A7 | 24.6(1.6) | 53.8(7.5) | 875.0(27.0) |
| A8 | -36.0(8.4) | -36.4(7.2) | 933.0(109.0)* |
| A9 | -7.7(2.5) | -16.5(2.9) | 995.0(66.0) |
| A14 | -24.7(12.3) | -36.6(7.1) | 933.0(109.0)* |
| A16 | 8.6(1.3) | -4.3(1.6) | 1153.0(88.0) |
| A18 | 22.9(2.4) | 32.1(5.4) | 915.0(47.0) 次ページへ |

| | | | | |
|-----|------------|------------|---------------|--------|
| A20 | 24.2(2.5) | -34.6(6.0) | 969.0(47.0) | 前ページから |
| A24 | -35.3(4.3) | -40.3(6.4) | 987.0(27.0) | |
| A25 | 35.9(1.8) | 65.9(11.5) | 961.0(33.0) | |
| A30 | 11.9(1.1) | -34.9(5.4) | 920.0(29.0) | |
| A33 | 4.6(2.4) | 116.5(9.1) | 898.0(112.0) | |
| A40 | -1.4(1.3) | -11.8(1.6) | 898.0(62.0) | |
| A42 | 24.4(1.6) | -54.8(6.9) | 925.0(27.0) | |
| A44 | 61.6(3.7) | 52.7(12.6) | 930.0(42.0) | |
| A50 | 9.7(1.0) | -53.2(5.0) | 832.0(26.0) | |
| A60 | 28.8(2.2) | -81.9(9.1) | 933.0(109.0)* | |
| A61 | 23.7(2.1) | -44.5(6.1) | 805.0(34.0) | |

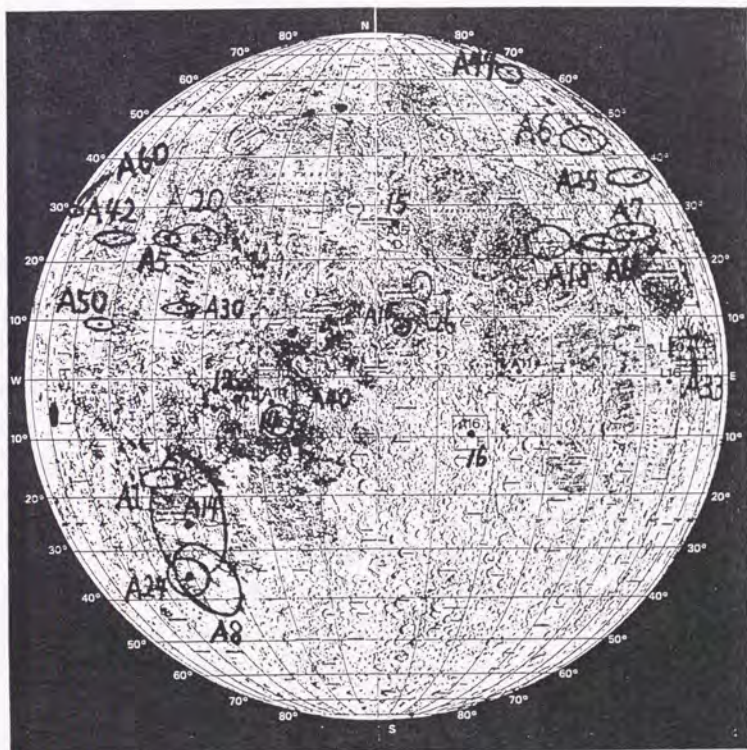


Fig.5-16 潮汐応力変動を計算する20個の震央位置の分布図楕円は 1σ の誤差を表す。数字だけが書いてあるのはアポロ着陸地点。一見、月高地にはほとんど震源が分布していない。

5-4 結果と考察

5-4-1 LUNAR-A 用深発月震予報表の作成

5-2節に記した方法で、月内部の任意の点で潮汐応力計算をすることができる。この節では、5-3節で選択した20個の深発震源における潮汐応力の計算結果を提示し、その考察を述べることにする。まず活動性が高い代表的深発月震A1、A18、A20、A33の深発震源の潮汐応力テンソル時間変化は、アポロ月震観測期間をカバーする1969年から1977年までとLUNAR-A月震観測が行われる1998年を付録2のFig.1~40に示す。またそれ以外の震源については、1974、1975、1998年における潮汐応力テンソルの時間変化を付録2のFig.41~Fig.88に示す。特にアポロ月震観測期間に入っているものには月震発生時刻をプロットして、1998年の月震発生の予測に役立てられるようにした。付録2は章末にまとめて添付する。

5-3節の規準で選んだ20個の深発震源において潮汐応力6成分を計算した結果、約6年間の周期性を確認できた。さらにその周期性を付録2をもとに検討し、LUNAR-A月震観測の行なわれる1998年0日は、1974年の112~114日に相当する事を見いだすことができた。これより各震源における応力テンソル成分変化とアポロで観測された月震発生との関係は以下にまとめる。A1、A18、A20、A33については、数年のタイムスケールを持つ潮汐応力変動を含めてまとめ、それ以外の震源については、1974、1975年に活動があったものについて特徴をまとめる（A7は発生回数が3回しかないので除く）。ここでことわりなく極大、極小というときは約27日の周期におけるものである。また以下の説明で $S(i,j)$ ($i,j=1\sim3$)は月内部局直交座標系(5-2-4節)で求めた潮汐応力テンソル成分であり、1は緯度方向南(θ)、2は経度方向東(ϕ)、3は鉛直上向き(r)の各方向に対応する。

(A1) このグループは深発月震のなかで最も数多く発生し、かつ振幅が大きいものが多い。その半面、周期性は比較的不規則である。1972、1974年以外の頻繁に発生している時期には発生の27日周期はみてとれるが、毎回1ないし2日おきに2から4回まとめて発震する。一般的には $S(2,2)$ 、 $S(2,3)$ 、 $S(3,1)$ 、 $S(1,2)$ が極小から極大に向かうとき、あるいは $S(1,1)$ が極大から極小へ向かうときに複数回発生する。しかし1973年には $S(3,1)$ 、 $S(1,2)$ の極大極小両方に活動が見られ、発生周期は13ないし14日になっている。また1972、1974年は活動が極端に衰えていることがわかるが、1972年のときには $S(1,2)$ と $S(3,1)$ の振幅モジュレーション(周期約6年の長周期振幅変化、以下この語を用いる)の極小にあたり、振幅が最大値の半分

になっている。同様のことが1974年の場合S(1,1)について当てはまるが、こちらは振幅極小値がさらに小さくなっている。

(A5) 1975年にS(1,1)、S(3,1)の極小時に発生

(A6) 1975年にS(3,3)の極大時、S(2,3)の極小時に発生。

(A9) 1974年(1例)、1975年にS(1,2)の極大を約2日過ぎたころに発生。

(A18) 1971年から1972年にかけてS(1,1)が極小時に1~2回発生しているが、1972年末S(1,1)の振幅モジュレーション極小を経過した時を境にS(1,1)の極大時に発生するようになった。1974年3月、S(2,3)の振幅モジュレーション極小化とともに活動を休止したように見える。規則性はA33並に良い。

(A20) このグループA18と同様の特徴をもつ。すなわちこのS(3,3)がA18のS(1,1)と同じ役割を果たしている。ただしA18と違う点はときどき逆位相で発震することである。

(A24) 1975年にS(3,3)の極大ないしその約1日前に発生、このときはS(3,1)とS(1,2)が値をほぼ同じくするときにも当たっている。

(A30) 1974年前半まで、S(3,3)が極大のときに発生。

(A33) A33は遠地点で発生することが知られているが(Lammlein, 1977)、その周期は非常に規則的であり、S(1,1)の極大に対応していることがわかる。さらにS(1,2)及びS(3,1)と他の成分の位相関係に着目すると、両者は約6年の地球秤動周期で同一の関係を繰り返すことがわかる。

(A40) 1974年、S(2,2)極小、ないしS(3,3)極大で発生。

(A42) 1974年、S(2,2)極小、ないしS(3,1)、S(1,2)極大で発生。

(A44) 1974年、S(3,3)極小で発生。

(A50) 1974年(4例)、S(3,3)極大で発生。

(A60) 1974年(5例)、S(3,1)極大で発生。

(A61) 1975年、S(2,3)極小で発生。

これらの例では、A1、A20のように潮汐応力が逆位相に働くときに発震する事がある。A1ではこのとき月震波形も位相反転しているという報告があり(Nakamura, 1978)、震源過程を考察するための手がかりとなりうる。LUNAR-Aで取得された月震を解析する際に留意すべきことの1つとなろう。

ここにあげた月震例で、アポロの観測がそのまま1998年以降に繰り返されるとした場合の深発月震予報図をFig. 5-17に示す。1998年々初を1974年112~114日とみなして作成した。これは、各震源について1974年と1998年との対応を潮汐応力6成分の変化の重なり具合をみながら求めた結果である。

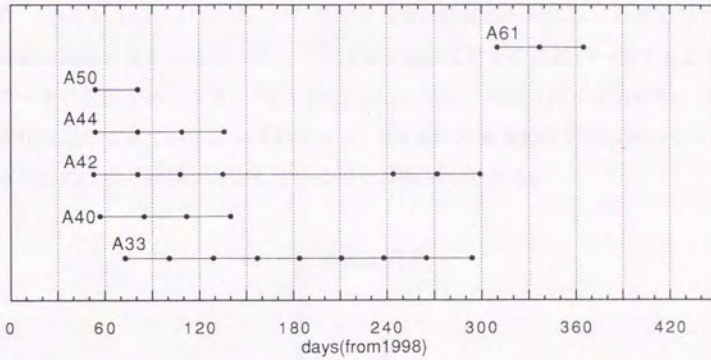
LUNAR-Aの月震観測は、1998年50日ごろから開始される可能性が高く(2-4節参照)それから約12ヶ月間が観測可能期間である。Fig. 5-17では420日あたりまでと考えてよいであろう。明らかにA1は不活発な時期にあたっているが、半面A33、A20、A42は活発である。また、A40、A42、A44は観測期間の前半に、A5、A6、A24、A61は後半に活動し、中間がやや観測可能な深発月震が乏しくなる傾向が見える。全イベント数は63個となる。もちろんここでは考察対象となる深発月震をはじめから20個に絞り、かつそれらがアポロの観測通りにそのまま繰り返した場合である。LUNAR-A月震観測の場合、アポロより高感度な観測が可能と思われるため、これは最もひかえめに予報したものとみなすべきであろう。

5-4-2 A33 深発月震活動の6年周期

ここでは、A33深発月震グループについてその周期性を考察してみる。A33深発月震は約27日の周期で月が遠地点にあるときに発生し、約6年の周期で活動期と非活動期を繰り返す(e.g. Lammlein, 1977)。これらの周期性(約27日と約6年)は他のグループと比較しても明瞭である。この変動が、断層面を介する応力の変動としてどのように整理できるかを検討した。ここでは仮想断層面法線が潮汐シア応力最大となる方向に一致するような場合のみを考察した。そこで、まず深発月震の中でも活動度が大きいA1、A18、A20、A33の各震源位置での潮汐最大シア応力面の法線方向(2方向、互いに直交)を5-2-5節の方法で求め、その平均値を月内部局所直交座標系(5-2-4節及びFig. 5-18参照)の方位角(ψ , ϕ)で求め、Table 5-3にまとめておいた。Table 5-3にはそれぞれの震源位置での平均的潮汐主応力3方向も書いてある。

Fig. 5-19-(1,3---11)とFig. 5-20-(1,3---11)は、それぞれTable 5-3のmaxsh1とmaxsh2の2方向を法線に持つ仮想断層面をとり、潮汐垂直応力と潮汐シア応力、及びA33月震が発生する時刻データをプロットした図である。これらの図から、A33において仮想断層面を潮汐シア

Deep Moonquakes(1)



Deep Moonquakes(2)

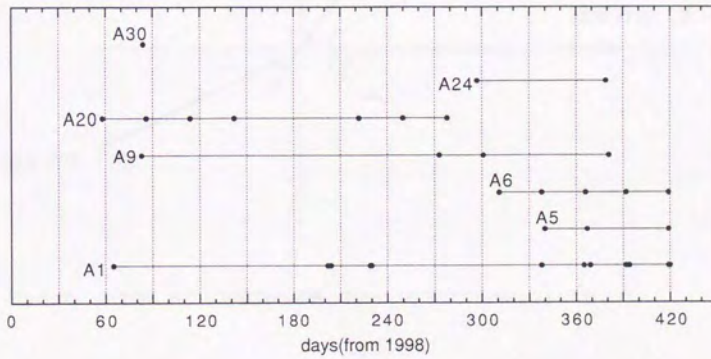


Fig.5-17 深発月震予報表。黒い点が発生予想日。Table5-2の20の深発月震グループのうち13個が1998年に活動している。付録2のFig.1~88にみられる月震各グループの潮汐応力周期性から'98年初日が1974年112日~114日に対応するという関係が見いだされる。この対応関係を利用してアポロの1974年~1975年の月震記録が1998年にそのまま繰り返されると仮定して得られる。

応力最大面と一致させると、月震はその面における潮汐シア応力が極小の時に発生することがわかる。これはmaxsh1、maxsh2の2方向どちらについても同じである。一方maxsh1とmaxsh2では潮汐シア応力に対する潮汐垂直応力の位相関係は常に逆であることもわかる。このため、Fig.5-19-(1,3---11)では、1971年末の月震活動開始時期には、垂直応力とシア応力は逆位相の関係にあるが次第にずれて、1975年始めに両者の位相が一致するようになった段階で一連の活動が終了する。Fig.5-20-(1,3---11)では、周期は同一であるが、位相関係の長期変化は逆になっている。いずれにせよ、約6年の月震活動周期性は潮汐シア応力と潮汐垂直応力のうなり周期に対応していることは明らかである。

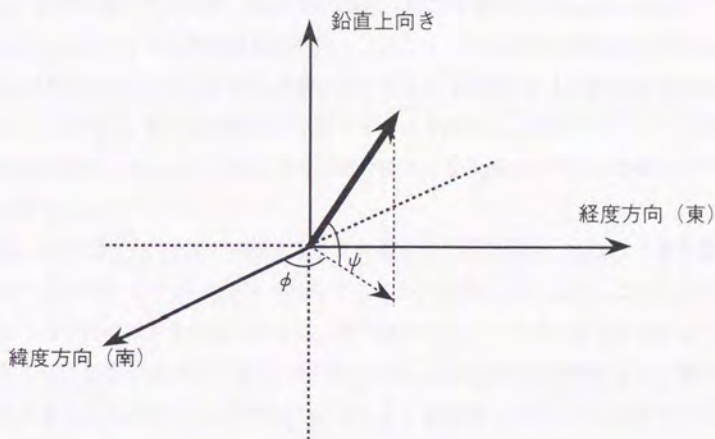


Fig.5-18 月内部における方位角の定義。Table5-3の応力方向は(ψ, ϕ)で表した。

Table5-3 A1,A18,A20,A33の4震源における'69~'77年の平均をとった潮汐最大シア応力面法線2方向(maxsh1,maxsh2)、潮汐主応力面法線3方向、単位はdeg、方向の定義はFig.5-18参照。

| | maxsh 1 | maxsh 2 | 主応力 1 | 主応力 2 | 主応力 3 |
|-----|-----------------|----------------|--------------|----------------|----------------|
| A1 | (-3.1, 109.1) | (86.6, 132.5) | (0.0,19.1) | (-48.1, 109.1) | (41.9, 109.1) |
| A18 | (-0.70, -58.3) | (87.8, 237.7) | (0.0,-148.3) | (-45.7, -58.3) | (44.3, -58.3) |
| A20 | (-2.7, 59.4) | (86.6, 99.5) | (0.0, -30.6) | (-47.7, 59.3) | (42.3, 59.4) |
| A33 | (-19.2, -141.0) | (-19.2, -43.8) | (0.0, 177.6) | (-62.2, 87.6) | (-27.7, -92.4) |

以上の考察をまとめると、A33 震源で仮想的断層面を最大潮汐シア応力面にした場合、

1. 27日周期は潮汐シア応力の周期に対応し、その最小期に発生する。
2. 周期6年であられる活動周期は、潮汐シア応力と潮汐垂直応力のうなりに反映されているが、仮想断層面がTable5-3のmaxsh1とmaxsh2のどちらであるかによって、これらはほとんど正反対の位相関係になる。

という2点が明らかになった。Fig.5-19-(2,4---12)、Fig.5-20-(2,4---12)はそれぞれFig.5-19-(1,3---11)、Fig.5-20-(1,3---11)に対応し、横軸に潮汐垂直応力、縦軸に潮汐シア応力をとってMohr 図形を描いてあるが、Fig.5-19の場合（仮想断層面方向maxsh1, Table5-3）は月震がおこっていないときは軌跡は反時計回り、起こっているときは時計回りであり、潮汐シア応力が最小になっている時に発震する。Fig.5-20の場合（仮想断層面方向maxsh2, Table5-3）は周期 6 年の位相関係が反転することを反映し、月震がおこっていないときは軌跡は時計回り、起こっているときは反時計回りになり潮汐シア応力が最小になっている時に発震する。

以上、A33に関しては仮想的断層面を最大潮汐シア応力面にとる限り、潮汐垂直応力と潮汐シア応力のうなりが6年周期に対応することが判明した。しかしこれがどのように震源過程に結び付くのかを考えることは、月内部のテクトニックな応力がどのように働いているかを知る必要があるため難しい問題である。LUNAR-A月震観測などで震源過程を議論できるような良質のデータが得られれば、より具体的なメカニズムが考察可能となるであろう。

Captions of Fig.5-19 and Fig.5-20.

Fig.5-19-1～5-19-11(odd) A33深発月震グループ(Table5-2参照)において、法線がTable5-3のmaxsh1である平面を仮想的断層面としたときその面に対するシア応力(TANSTR)と法線応力(NORSTR)の時間変化(1971年～1976年)。黒点は月震発生を表す。A33はTANSTRが最小の時発生する。また1971年後半から1975年初めにかけての一連の月震活動が開始される時はTANSTRとNORSTRが逆位相関係にあるが、1975年に活動が終了する時には同位相になっている。

Fig.5-19-2～5-19-12(even) Fig.5-19-1～11(odd)の各図を縦軸TANSTR、横軸NORSTRとして表す。一連の月震発生期間は実線で表し、非発生期間は点線で表してある。実線はほぼ時計回りに対応し、点線はほぼ反時計回りに対応する。

Fig.5-20-1～5-20-11(odd) Fig.5-19と同じで仮想的断層面の法線をTable5-3のmaxsh2にした場合。A33はTANSTRが最小の時発生するのはFig.5-19と同じ。しかし、一連の月震活動が開始される時は、TANSTRとNORSTRが同位相関係にあり、1975年に活動が終了する時には逆位相となるのはFig.5-19と反対である。

Fig.5-20-2～5-20-12(even) Fig.5-20-1～11(odd)の各図を縦軸TANSTR、横軸NORSTRとして表す。一連の月震発生期間は実線で表し、非発生期間は点線で表してある。実線はほぼ反時計回りに対応し、点線はほぼ時計回りに対応している。

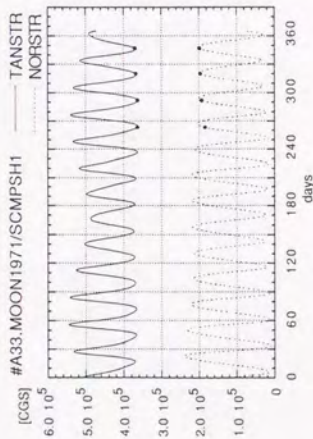


Fig. 5-19-1

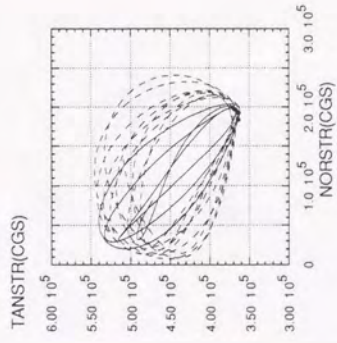


Fig. 5-19-2

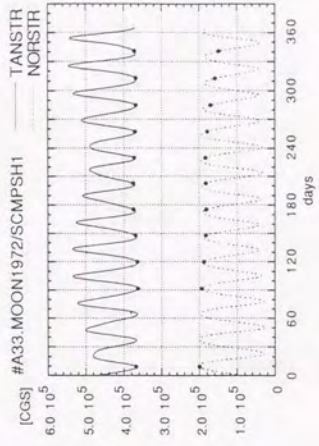


Fig. 5-19-3

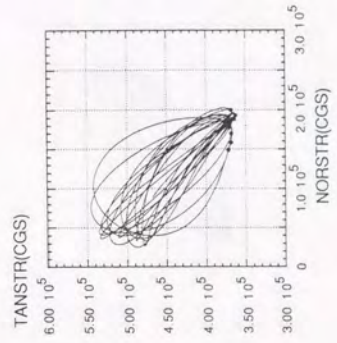


Fig. 5-19-4

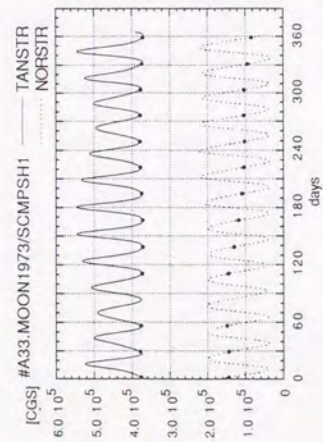


Fig.5-19-5

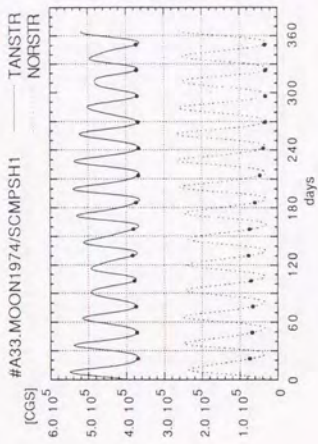


Fig.5-19-7

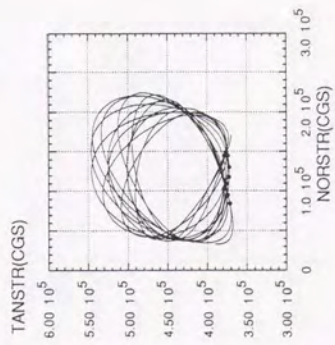


Fig.5-19-6

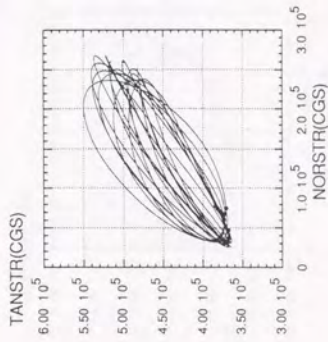


Fig.5-19-8

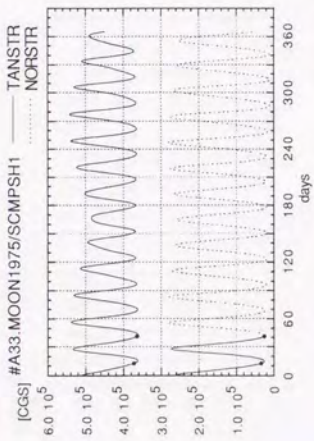


Fig.5-19-9

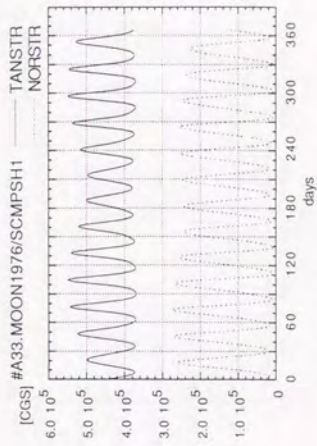


Fig.5-19-11

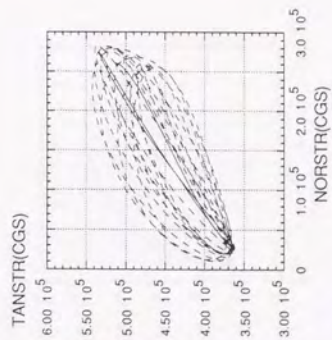


Fig.5-19-10

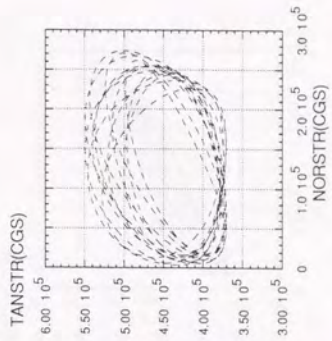


Fig.5-19-12

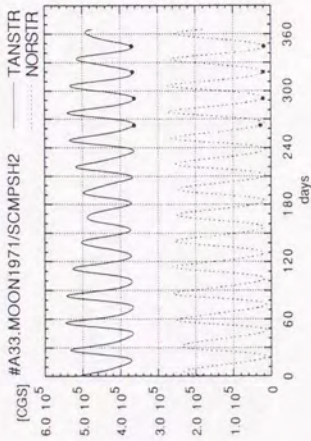


Fig. 5-20-1

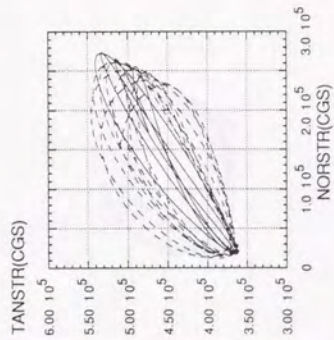


Fig. 5-20-2

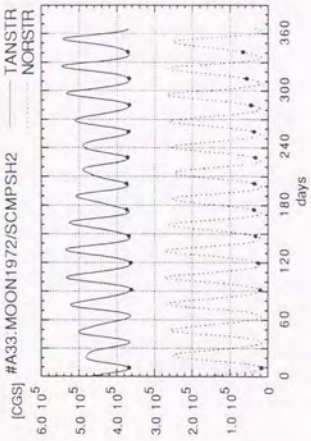


Fig. 5-20-3

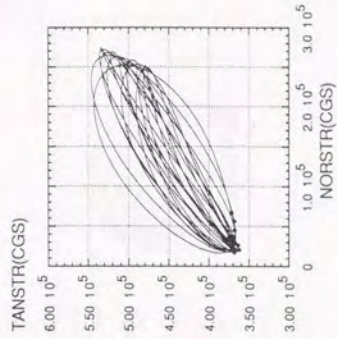


Fig. 5-20-4

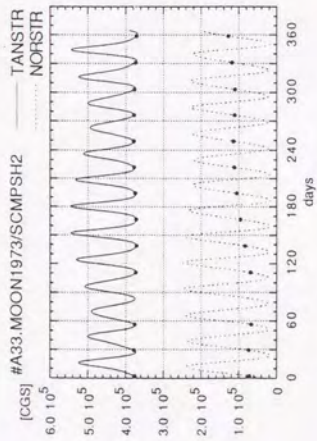


Fig.5-20-5

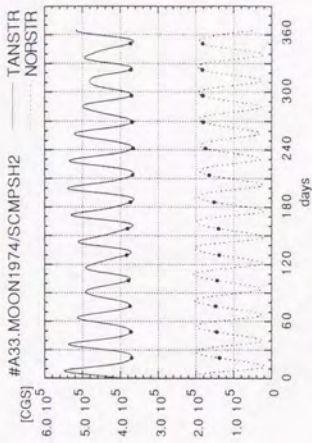


Fig.5-20-7

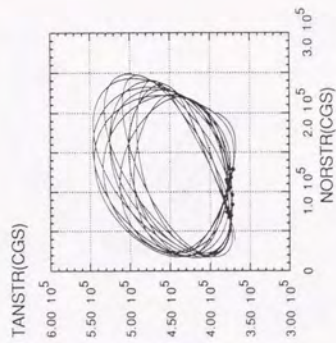


Fig.5-20-6

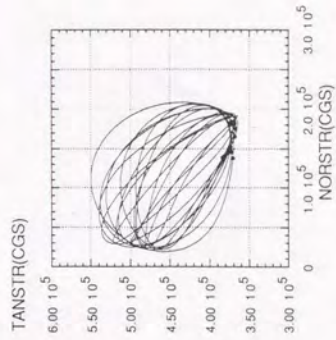


Fig.5-20-8

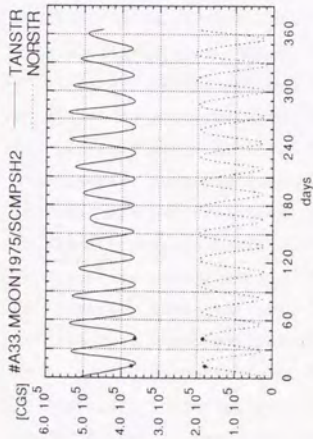


Fig. 5-20-9

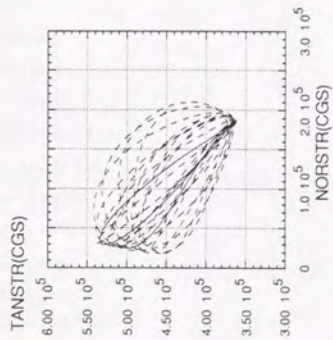


Fig. 5-20-10

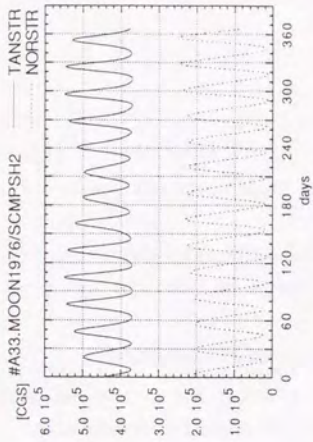


Fig. 5-20-11

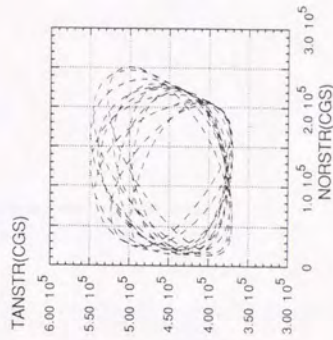


Fig. 5-20-12

I. TAPE ORGANIZATION

- 9 tracks, 1600 BPI, EBCDIC code.
- No label.
- Blocksize=2000bytes (20 blocked logical records of 100 bytes).
- 36 files separated by a tape mark.

II. FILES DESCRIPTION

The sequence of the files is:

- 1- Main problem. Longitude (sine). Periodic terms.
- 2- Main problem. Latitude (sine).
- 3- Main problem. Distance (cosine).
- 4- Earth figure perturbations. Longitude.
- 5- Earth figure perturbations. Latitude.
- 6- Earth figure perturbations. Distance.
- 7- Earth figure perturbations. Longitude/t.
- 8- Earth figure perturbations. Latitude/t.
- 9- Earth figure perturbations. Distance/t.
- 10- Planetary perturbations. Table 1. Longitude.
- 11- Planetary perturbations. Table 1. Latitude.
- 12- Planetary perturbations. Table 1. Distance.
- 13- Planetary perturbations. Table 1. Longitude/t.
- 14- Planetary perturbations. Table 1. Latitude/t.
- 15- Planetary perturbations. Table 1. Distance/t.
- 16- Planetary perturbations. Table 2. Longitude.
- 17- Planetary perturbations. Table 2. Latitude.
- 18- Planetary perturbations. Table 2. Distance.
- 19- Planetary perturbations. Table 2. Longitude/t.
- 20- Planetary perturbations. Table 2. Latitude/t.
- 21- Planetary perturbations. Table 2. Distance/t.
- 22- Tidal effects. Longitude.

- 23- Tidal effects. Latitude.
- 24- Tidal effects. Distance.
- 25- Tidal effects. Longitude/t.
- 26- Tidal effects. Latitude/t.
- 27- Tidal effects. Distance/t.
- 28- Moon figure perturbations. Longitude.
- 29- Moon figure perturbations. Latitude.
- 30- Moon figure perturbations. Distance.
- 31- Relativistic perturbations. Longitude.
- 32- Relativistic perturbations. Latitude.
- 33- Relativistic perturbations. Distance.
- 34- Planetary perturbations (solar eccentricity). Longitude/t².
- 35- Planetary perturbations (solar eccentricity). Latitude/t².
- 36- Planetary perturbations (solar eccentricity). Distance/t².

III. RECORDS DESCRIPTION

The first logical record of each file contains a title. Each following record contains one term of the series, according to the following formulations and Fortran formats.

1° Files 1, 2, 3

The adopted formulation for the series is:

$$\int A \frac{\sin}{\cos} (i_1 D + i_2 \ell' + i_3 \ell + i_4 F)$$

sin for files 1, 2, cos for file 3.

Each logical record gives:

$$i_1, i_2, i_3, i_4, A, B_i \quad (i=1..6)$$

where the six quantities B_i are the derivatives of A : $\frac{\delta A}{\delta \alpha_i}$ (for longitude and

latitude), or $a_0 \frac{\delta}{\delta \alpha_i} \left(\frac{A}{a_0} \right)$ (for distance), with respect to six constants

$$\alpha_i = (m, \Gamma, E, e', \alpha, \mu) \quad (\text{See sect. VI and VIII for definitions}).$$

The format is:

4I3, 2X, F13.5, 6(2XF10.2)

2° Files 4 to 9

The adopted formulation for the series is:

$$\int A \sin (i_1 \zeta + i_2 D + i_3 \ell' + i_4 \ell + i_5 F + \phi)$$

Each logical record gives:

$$i_1, i_2, i_3, i_4, i_5, \phi, A, P$$

where ϕ is a phase and P is an approximate value of the period of the term as far as this period is less than 99999.999 years. For periods longer than this

limit value, the limit value is given.

The format is:

SI3, IX, F9.5, IX, F9.5, IX, F9.3

3° Files 10 to 15

The adopted formulation for the series is:

$$\int A \sin (i_1 M_e + i_2 V + i_3 T + i_4 M_a + i_5 J + i_6 S + i_7 U + i_8 N + i_9 D + i_{10} L + i_{11} F + \phi)$$

Each logical record gives:

$i_1, i_2, i_3, i_4, i_5, i_6, i_7, i_8, i_9, i_{10}, i_{11}, \phi, A, P$

ϕ and P have the same meaning as in 2°.

The format is:

11I3, IX, F9.5, IX, F9.5, IX, F9.3

4° Files 16 to 21

The adopted formulation for the series is:

$$\int A \sin (i_1 M_e + i_2 V + i_3 T + i_4 M_a + i_5 J + i_6 S + i_7 U + i_8 D + i_9 L' + i_{10} L + i_{11} F + \phi)$$

Each logical record gives:

$i_1, i_2, i_3, i_4, i_5, i_6, i_7, i_8, i_9, i_{10}, i_{11}, \phi, A, P.$

The format is the same as in 3°

5° Files 22 to 36

The description is the same as in 2°, the value of i_1 (ζ coefficient) being always 0.

IV. UNITS

For longitude and latitude, coefficients A are given in arc seconds; for distance, they are given in kilometers. Coefficients B_1 are given in the same unit as A , the constants $m, \Gamma, E, e', \alpha, \mu$ being dimensionless.

Phases are given in degrees.

Periods are in years.

t is dynamical time expressed in julian centuries from J_{2000} (julian date 2 451 545).

V. COMMENTS

- All the series of this magnetic tape have been computed by M. Chapront-Touzé and J. Chapront except for the relativistic effects which have been computed by J.F. Lestrade, M. Chapront-Touzé and J. Chapront (see sect. XI).

- Series of files 7, 8, 9, 13, 14, 15, 19, 20, 21, 25, 26, 27, must be multiplied by t , series of files 34, 35, 36 must be multiplied by t^2 so as to obtain mixed terms (t in centuries from J_{2000}).

- The mean longitude

$$w_1 = w_1^{(0)} + \nu t + w_1^{(2)} t^2$$

must be added to the sum of the longitude series (Fourier and mixed terms) so as to obtain the longitude of the Moon. In this expression, $w_1^{(0)}$ is a constant, ν is the sidereal mean motion of the Moon given in sect. VI, $w_1^{(2)}$ is given in Table D. The so obtained longitude and latitude are referred to the Mean Dynamical Ecliptic of date and Departure Point (see sect. X for definitions).

- All perturbations (files 4 to 33) have been obtained at the first approximation as it is defined in (Chapront-Touzé, Chapront, 1980) p.237 except for the main perturbations due to the secular terms in solar eccentricity. Nevertheless, lunar mean motions, including approximate values of planetary and Earth figure perturbations, have been introduced in the integration.

- The adjustment of integration constants, as defined in (Chapront-Touzé, Chapront, 1980) p. 237, has been performed separately for the different kinds of perturbations. It gives rise to supplementary Fourier terms which have been added respectively to files 4 to 6 (for Earth figure perturbations), 16 to 18 (for planetary perturbations), 22 to 24 (for tidal effects), 28 to 30 (for Moon figure perturbations), 31 to 33 (for relativistic perturbations).

- The *Earth figure perturbations* (files 4 to 9) include perturbations due to J_2 and J_3 . The motion of the true equator has been taken into account through : the linear term of precession included in argument ζ (see sect. VII); the four main terms of nutation in longitude and the three main terms of nutation in obliquity from Woolard (coefficients computed for 2000); the linear term of obliquity ϵ_A from (Lieske et al, 1977)[†]

- The *Planetary perturbations*. Table 1 (files 10 to 15) include indirect and direct planetary perturbations without any adjustment of integration constants. The indirect planetary perturbations have been computed with Bretagnon's solution VSOP 80* for the Earth-Moon barycenter up to the 3th order in masses. As far as Table 1 is concerned, short periodic perturbations of the Earth-Moon barycenter due to the Moon action, and relativistic perturbations, have not been included in VSOP 80. Furthermore, the secular terms of variables $K = e' \cos \tilde{\omega}'$, $H = e' \sin \tilde{\omega}'$, $Q = \gamma' \cos \tilde{\Omega}'$, $P = \gamma' \sin \tilde{\Omega}'$ for the Earth-Moon barycenter have been dropped out from VSOP 80, these terms being taken into account elsewhere.

[†] Lieske, J.H., Lederle, T., Fricke, W., Morando, B., 1977, *Astron. & Astrophys.* 58, 1

* Bretagnon, P., 1980, *Théorie planétaire VSOP 80*, Magnetic tape.

The direct planetary perturbations have been computed with Bretagnon's solution VSOP 80 for the planets up to the 1st order for all planets, up to the 3rd order (Fourier terms only) for the major planets. Especially, the linear terms of H, K, P, Q have been taken into account. The effect of the relativistic terms of the planets has been found negligible.

- The *Planetary perturbations*. Table 2 (files 16 to 21) include several perturbations:

a) The main effect of the linear term of the solar eccentricity. If we note the solar eccentricity as:

$$e' = e'(0) + e'(1)\tau + e'(2)\tau^2 + \dots$$

the main effect of the linear term on a coordinate is: $\frac{\delta X}{\delta e'} e'(1)\tau$. The main effects of the linear and quadratic terms of the solar perigee have been taken into account in the arguments themselves (see sect. VII).

b) The secondary effects of the linear terms of the solar eccentricity and perigee as described in (Chapront-Touzé, 1982).

c) The secondary effects of the linear and quadratic terms of variables P and Q of VSOP 80 for the Earth-Moon barycenter. The main effects of those terms refer the Moon to the Mean Dynamical Ecliptic of date. The so-called secondary effects take place through Coriolis forces.

d) The indirect planetary perturbations due to the short periodic terms of the Earth-Moon barycenter produced by the Moon action.

e) The complete effect of the adjustment of integration constants has been added to Table 2 as far as the perturbations of *Planetary perturbations. Table 1* and *Planetary perturbations. Table 2* are concerned

- The *Planetary perturbations (solar eccentricity)* (files 34 to 36) include only the main effect of the quadratic term of the solar eccentricity that is $\frac{\delta X}{\delta e'} e'(2)\tau^2$.

- The *Tidal effects* (files 22 to 27) have been computed with an acceleration model from (Williams et al, 1978)^{*} and constants given in sect. VI

- The *Moon figure perturbations* (files 28 to 30) include the effects of the harmonic development of the lunar potential up to the 3rd order (4th order for $W_1^{(2)}$), with coefficients given in sect. VI, and Moons' solution for the libration[†].

- The *Relativistic perturbations* include the Main relativistic perturbations and the Indirect relativistic perturbations produced by the relativistic terms of VSOP 80 for the Earth-Moon barycenter in the indirect planetary perturbations of the Moon.

† Moons M., 1982, *Celes. Mech.* 26, 131

* Williams, J.G., Sinclair, W.S., Yoder, C.F., 1978, *Geophys. Research Let.* 5, 11, 943

VI. CONSTANTS

The constants given here have been used in the construction of the magnetic tape series.

1° Main problem *

| | |
|--|--|
| v sidereal mean motion of the Moon | 1 732 559 343''18 /cy |
| 2E coefficient of $\sin l$ in longitude | 22 639''55 |
| 2F coefficient of $\sin F$ in latitude | 18 461''40 |
| e' solar eccentricity (Newcomb) | 0.016 709 24 |
| n' sidereal mean motion of the Sun (Newcomb) | 129 597 742''34/cy |
| $\mu = m_L / (m_T + m_L)$ | 0.012 150 568 |
| $\mu' = (m_T + m_L) / (m_S + m_T + m_L)$ | 3.040 423 956 10^{-6} |
| $G' = Gm_T$ | 3.986 005 10^{14} meters ³ /second ² |

2° Earth figure

| | |
|--------------------------------------|------------------|
| J_2 | 0.001 082 63 |
| J_3 | -0.254 10^{-5} |
| ϵ Earth obliquity | 23° 26' 21''448 |
| a_T equatorial radius of the Earth | 6 378 140 meters |
| p precession constant | 5 029''0966 /cy |

3° Planetary perturbations

Constants of theory VSOP 80 (Bretagnon, 1980) have been used for the orbits of the planets

4° Lunar figure perturbations

We have used parameters from (Ferrari et al, 1980)[†], β and γ being corrected from lunar mean tidal distortions (model from Yoder, 1979).[‡]

| | | | |
|-----------|---------------------|-----------|---------------------|
| B | 0.632 108 10^{-3} | S_{31L} | 0.561 07 10^{-5} |
| γ | 0.228 443 10^{-3} | C_{32L} | 0.488 84 10^{-5} |
| J_{2L} | 0.202 15 10^{-3} | S_{32L} | 0.168 7 10^{-5} |
| J_{3L} | 0.121 26 10^{-4} | C_{33L} | 0.143 6 10^{-5} |
| C_{22L} | 0.223 04 10^{-4} | S_{33L} | -0.334 35 10^{-6} |
| C_{31L} | 0.307 1 10^{-4} | a_L | 1 738 000 meters |

5° Tidal effects

| | |
|-------------------|--------|
| k_2 Love number | 0.30 |
| δ phase | 0.0407 |

* From these values, we deduce the value of the constant semi-major axis of the Moon, a_0 (see definition in sect.VIII) 384 747 980.674 meters

† Ferrari, A.J., Sinclair, W.S., Sjogren, W.L., Williams, J.G., Yoder, C.F., 1980, JGR, 85, 3939

‡ Yoder, C.F., 1979, in Natural and Artificial Satellite Motion, p.210, University of Texas Press

VII. ARGUMENTS

The 13 arguments $D, \ell', \ell, F, \zeta, M_e, V, T, M_a, J, S, U, N$ referred to in sect. III and W_1 , mean longitude of the Moon, are polynomial functions of the time (degree ≤ 2) under the general formulation:

$$\lambda = \lambda^{(0)} + \lambda^{(1)}t + \lambda^{(2)}t^2$$

M_e, V, M_a, J, S, U, N are mean longitudes of the planets referred to the fixed equinox 2000: γ_{2000} . They are linear functions of time ($\lambda^{(2)} = 0$). Table A gives $\lambda^{(0)}$ and $\lambda^{(1)}$ from VSOP 82 (Bretagnon, 1981)*

T is the mean longitude of the Earth referred to γ_{2000} . Its mean motion is n' given in sect. VI. $T^{(2)}$ is given by Bretagnon's theory:

$$T^{(2)} = -0.02046 / \text{cy}^2$$

If we consider $\tilde{\omega}'$, mean perihelion of the Earth referred to γ_{2000} and given by Bretagnon with:

$$\begin{aligned} \tilde{\omega}^{(1)} &= 1161.2283 / \text{cy} \\ \tilde{\omega}^{(2)} &= 0.5411 / \text{cy}^2 \end{aligned}$$

we deduce:

$$\ell' = T - \tilde{\omega}'$$

D, ℓ, F are deduced from W_1, W_2 (mean longitude of lunar perigee), W_3 (mean longitude of node), and T by:

$$D = W_1 - T + 180^\circ$$

$$F = W_1 - W_3$$

$$\ell = W_1 - W_2$$

W_1, W_2, W_3 are referred to the Departure Point γ'_{2000} (see sect. X).

The mean motion of W_1 is v . The mean motions of perigee $W_2^{(1)}$ and node $W_3^{(1)}$ (Table B) are computed values. They depend on constants given in sect. VI. For the main problem, derivatives of those mean motions (Table C) with respect to the constants $m, \Gamma, E, e', \alpha, u$ have been also computed. The coefficients of t^2 : $W_1^{(2)}, W_2^{(2)}, W_3^{(2)}$ for W_1, W_2, W_3 are computed values given in Table D.

ζ is deduced from W_1 by:

$$\zeta = W_1 + pt$$

p is given in sect. VI.

For the initial values of $W_1, W_2, W_3, T, \tilde{\omega}'$ see sect. IX.

VIII. DERIVATIVES

1° First set of constants S_1

Derivatives, given in files 1, 2, 3 and in Table C, are derivatives of the corresponding coefficients of the main problem with respect to the set of constants S_1 ($m, \Gamma, E, e', \alpha, u$) with:

* Bretagnon, P., 1981, Private communication.

$$m = n'/v$$

Γ = half coefficient of $\sin F$ in latitude

E = half coefficient of $\sin \lambda$ in longitude

e' = solar eccentricity

$\alpha = a_0/a'$ where a_0 is the constant semi-major axis of the Moon related to v by:

$$v^2 a_0^3 = G(m_T + m_L)$$

a' is the semi-major axis of the Sun related to n' by:

$$n'^2 a'^3 = G(m_S + m_T + m_L)$$

where m_S, m_T, m_L are respectively Sun, Earth, and Moon masses.

We shall call respectively $B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6$ the derivatives of a coefficient A with respect to $m, \Gamma, E, e', \alpha, \mu$ as they are given on the magnetic tape (N.B. For the distance, B_i are ' a_0 derivative of A/a_0 '). We shall also call B_i the derivatives of $W_2^{(1)}/v$ and $W_3^{(1)}/v$ as they are given in Table C.

2° Second set of constants S_2

The following table gives the derivatives of coefficients A for longitude, latitude, distance and derivatives of the mean motions $W_2^{(1)}, W_3^{(1)}$ with respect to the set of constants S_2 : ($v, \Gamma, E, n', e', \mu, \mu', G'$) as far as the main problem is concerned. To obtain the derivatives of longitude, latitude or distance themselves, it is necessary to use both coefficients derivatives and mean motions derivatives. The numerical values of the constants (S_2) used for the computation of the coefficients A of the tape and mean motions of table B are given in sect. VI.

Derivatives of the coefficients of longitude, latitude and distance and of the mean motions of perigee and node with respect to the constants S_2

| | v | Γ | E | n' | e' | μ | μ' | G' |
|-------------------------------------|---|----------|---------|--|---------|-------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|
| Longitude or latitude coefficient A | $-\frac{m}{v} \{B_1 + \frac{2}{3} \frac{\alpha}{m} B_5\}$ | B_2 | B_3 | $\frac{1}{v} \{B_1 + \frac{2}{3} \frac{\alpha}{m} B_5\}$ | B_4 | B_6 | $\frac{m^2}{3\alpha^2} B_5$ | 0 |
| Distance coefficient A | $-\frac{m}{v} \{B_1 + \frac{2}{3} \frac{\alpha}{m} B_5 + \frac{2}{3} \frac{A}{m}\}$ | B_2 | B_3 | $\frac{1}{v} \{B_1 + \frac{2}{3} \frac{\alpha}{m} B_5\}$ | B_4 | $B_6 + \frac{1}{3} \frac{A}{1-\mu}$ | $\frac{m^2}{3\alpha^2} B_5$ | $\frac{1}{3} \frac{A}{G'}$ |
| $W_i^{(1)}$ (i=2,3) | $\frac{1}{v} \{W_i^{(1)} - v m \{B_1 + \frac{2}{3} \frac{\alpha}{m} B_5\}\}$ | $v B_2$ | $v B_3$ | $B_1 + \frac{2}{3} \frac{\alpha}{m} B_5$ | $v B_4$ | $v B_6$ | $\frac{v m^2}{3\alpha^2} B_5$ | 0 |

IX. COMPUTATION OF A LUNAR EPHEMERIS FROM ELP 2000/82.

1° Improved numerical values of the constants S_2

We propose here corrections to the numerical values of constants S_2 given in sect. VI. These corrections, and values given in the next paragraph, have been obtained by a comparison over 100 years of ELP 2000/82 to a JPL numerical integration LE 200 (Williams, 1981)*. The standard deviations are given between parenthesis.

$$\begin{aligned}\delta v &= 0''556\ 04 \text{ /cy} & \left(\begin{array}{l} + \\ - \end{array} \right. & 0.00049) \\ \delta E &= 0''017\ 89 & \left(\begin{array}{l} + \\ - \end{array} \right. & 0.00003) \\ \delta \Gamma &= -0''080\ 66 & \left(\begin{array}{l} + \\ - \end{array} \right. & 0.00003) \\ \delta n' &= -0''0642 \text{ /cy} & \left(\begin{array}{l} + \\ - \end{array} \right. & 0.0037) \\ \delta e' &= -0''128\ 79 & \left(\begin{array}{l} + \\ - \end{array} \right. & 0.0003)\end{aligned}$$

N.B. For this comparison we have used: $G' = 3.986\ 004\ 481\ 10^{14}$ meters³/second² and $\mu = 0.012\ 150\ 581\ 62$ instead of values given in sect. VI.

2° Initial values of the angles

At epoch J_{2000} we have:

$$\begin{aligned}W_1^{(0)} &= 218^\circ\ 18'\ 59''955\ 71 & \left(\begin{array}{l} + \\ - \end{array} \right. & 0''00017) \\ W_2^{(0)} &= 83^\circ\ 21'\ 11''674\ 75 & \left(\begin{array}{l} + \\ - \end{array} \right. & 0''00091) \\ W_3^{(0)} &= 125^\circ\ 02'\ 40''398\ 16 & \left(\begin{array}{l} + \\ - \end{array} \right. & 0''00126) \\ T^{(0)} &= 100^\circ\ 27'\ 59''220\ 59 & \left(\begin{array}{l} + \\ - \end{array} \right. & 0''00200) \\ \tilde{w}'^{(0)} &= 102^\circ\ 56'\ 14''427\ 53 & \left(\begin{array}{l} + \\ - \end{array} \right. & 0''01731)\end{aligned}$$

3° Mean motions

The corrections to numerical values of constants given in sect. IX-1° produce the following corrections on the mean motions of perigee and node:

$$\begin{aligned}W_2^{(1)} &= 1''7009 \text{ /cy} \\ W_3^{(1)} &= -0''4465 \text{ /cy}\end{aligned}$$

Improved mean motions of W_1 , W_2 , W_3 , T , and \tilde{w}' are gathered in Table E.

4° Substitution of the time in the arguments

Main problem (Files 1,2,3)

For a t value of time (dynamical time, julian century, origin J_{2000}), the fundamental arguments of the main problem, D , F , ℓ , ℓ' must be computed from W_1 , W_2 , W_3 , T , \tilde{w}' (formulae in sect. VII) with initial values (IX-2°), mean motions (Table E), and quadratic terms (Table D and sect. VII). The secular part of longitude is W_1 .

* Williams, J.G., 1981, Lunar ephemeris LE 200, Magnetic Tape.

Perturbations

For the computation of D , F , ℓ , ℓ' only the linear parts in t should be taken into account. Planetary arguments must be computed from Table A.

5° Coefficients of the series

Main problem (Files 1,2,3)

Because of the corrections IX-1°, each coefficient A must be replaced by A' in the following way:

Longitude and latitude

$$A' = A - m \left\{ B_1 + \frac{2}{3} \frac{\alpha}{m} B_5 \right\} \frac{\delta v}{v} + \left\{ B_1 + \frac{2}{3} \frac{\alpha}{m} B_5 \right\} \frac{\delta n'}{v} + \{ B_2 \delta \Gamma + B_3 \delta E + B_4 \delta e' \} / 206\,264.81$$

Distance

$$A' = A - m \left\{ B_1 + \frac{2}{3} \frac{\alpha}{m} B_5 + \frac{2}{3} \frac{A}{m} \right\} \frac{\delta v}{v} + \left\{ B_1 + \frac{2}{3} \frac{\alpha}{m} B_5 \right\} \frac{\delta n'}{v} + \{ B_2 \delta \Gamma + B_3 \delta E + B_4 \delta e' \} / 206\,264.81$$

with

$$m = 0.074\,801\,329\,518$$

$$\alpha = 0.002\,571\,881\,335$$

Perturbations

Coefficients of files 4, 5, 6, 10, 11, 12, 16, 17, 18, 22, 23, 24, 28, 29, 30, 31, 32, 33 are not to be modified.

Coefficients of files 7, 8, 9, 13, 14, 15, 19, 20, 21, 25, 26, 27 must be multiplied by t (dynamical time in julian centuries from J_{2000}).

Coefficients of files 34, 35, 36 must be multiplied by t^2 .

X. THE REFERENCE SYSTEM

The solution obtained in sect. IX is referred to the *Mean Dynamical Ecliptic of date* and the *Departure Point* γ'_{2000} . By *Mean Dynamical Ecliptic*, we designate a plane deduced from the Dynamical Ecliptic 2000 (Reference plane of VSOP 82) using the secular terms P_T and Q_T of variable P and Q of Bretagnon's solution VSOP 82 (Bretagnon, Chapront, 1981)[†]. The *Departure Point* γ'_{2000} is a point of the Mean Dynamical Ecliptic deduced from the Equinox γ_{2000} of the Dynamical Ecliptic 2000 by:

$$N\gamma'_{2000} = N\gamma_{2000}$$

N being the node of the 2 planes.

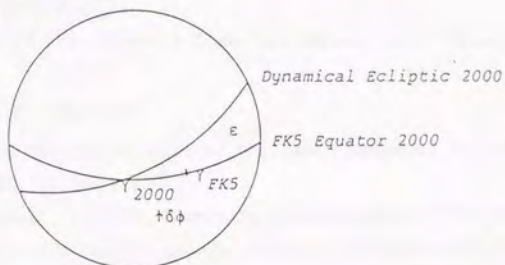
The position of the Equinox γ_{2000} in the Dynamical Ecliptic 2000 is introduced here in an additive way, through the initial values of W_i , \tilde{w}' , and planetary longitudes. As a matter of fact, $W_1^{(0)}$ is the most important, for the main problem periodic terms depend only on differences of the arguments W_i , T and \tilde{w}' . The initial values of arguments given in sect. IX and those of Table A have been determined by comparison to a numerical integration referred (after rotations)

[†] Bretagnon, P., Chapront, J., 1981, *Astron., Astrophys.*, 103, 103

to the *FK5 Equator 2000* and *FK5 Equinox 2000*. (By *FK5 Equator 2000* and *FK5 Equinox 2000*, we mean equator and equinox deduced from *FK5 Equator* and *FK5 Equinox* by precession formulae given in (Lieske et al, 1977) and used between 1950 and 2000). That determination induces *Dynamical Equinox 2000* as intersection of the *FK5 Equator 2000* and the *Dynamical Ecliptic 2000*. Values of the inclination of the *Dynamical Ecliptic 2000* on the *FK5 Equator 2000* (ϵ) and angular distance :

$$\delta\phi = \gamma_{FK5} \gamma_{2000}$$

have been obtained from our comparison of ELP 2000/82 to LE 200.



We find:

$$\delta\phi = -0''098\ 45 \quad \left(\begin{array}{l} + \\ - \end{array} 0.00016 \right)$$

$$\epsilon = \epsilon_0 + \delta\epsilon \quad (\epsilon_0 = 23^\circ\ 26'\ 21''\ 448)$$

with:

$$\delta\epsilon = -0''039\ 17 \quad \left(\begin{array}{l} + \\ - \end{array} 0.00006 \right)$$

These values are very near of the ones found by Bretagnon in his comparison of VSOP 82 to the JPL numerical integration DE 200 (Standish, 1981)[†]. Bretagnon's values are:

$$\delta\epsilon = -0''038\ 92$$

$$\delta\phi = -0''098\ 98$$

A solution, referred to the Mean Dynamical Ecliptic and Equinox of date, can be obtained by adding the precession given in (Bretagnon, Chapront, 1981) to the lunar longitude as obtained in sect. IX. But one must be cautious because the so-defined Mean Dynamical Ecliptic and Equinox of date is different from the commonly used Mean Ecliptic and Equinox of date, which is deduced from *FK5 Ecliptic* and *Equinox 2000* by means of precession formulae given in (Lieske et al, 1977). (The inclination of *FK5 Ecliptic 2000* on *FK5 Equator 2000* is ϵ_0). For that reason it may be easier to use a solution for the orbital motion of the Moon referred to the fixed *Dynamical Ecliptic 2000*. This can be done by adding

[†] Standish, E.M., 1981, Planetary ephemeris DE 200, Magnetic tape.

the following quantities to the longitude λ and latitude β computed in sect. IX:

$$\delta\lambda = \sin^2\tilde{\nu}_A (\sin^2\tilde{\lambda}_A \sin\lambda + \cos^2\tilde{\lambda}_A \cos\lambda) (-\text{tg}\beta + (\frac{1}{2} + \text{tg}^2\beta) \sin^2\tilde{\nu}_A (\sin^2\tilde{\lambda}_A \cos\lambda - \cos^2\tilde{\lambda}_A \sin\lambda))$$

$$\delta\beta = \sin^2\tilde{\nu}_A (\cos^2\tilde{\lambda}_A \sin\lambda - \sin^2\tilde{\lambda}_A \cos\lambda) - \frac{1}{2} \text{tg}\beta (\sin^2\tilde{\lambda}_A \sin\lambda + \cos^2\tilde{\lambda}_A \cos\lambda)^2 \sin^2\tilde{\nu}_A$$

with, from (Bretagnon, Chapront, 1981):

$$\sin^2\tilde{\nu}_A \sin^2\tilde{\lambda}_A = 4''1997\tau + 0''19396\tau^2 - 0''000222\tau^3$$

$$\sin^2\tilde{\nu}_A \cos^2\tilde{\lambda}_A = -46''8093\tau + 0''05105\tau^2 + 0''000524\tau^3$$

(τ in julian centuries from J_{2000}).

Distance is independant of the reference frame but depends on G' value.

XI. REFERENCES ON ELP SOLUTION

- Chapront-Touzé, M., 1980, *The ELP solution of the Main Problem of the Moon*, Astron. Astrophys., 83, 86 (In French)
- Chapront-Touzé, M., Chapront, J., 1980, *Planetary perturbations of the Moon - Comparison of ELP 1900 with Brown's theory*, Astron. Astrophys., 91, 233 (In French)
- Chapront, J., Chapront-Touzé, M., 1980, *Planetary perturbations of the Moon in ELP 2000*. Proceedings of the Conference on Analytical Methods and Ephemerides (Namur, Belgium) in Celes. Mech. (To be published)
- Chapront-Touzé, M., 1980, *The ELP solution of the Main Problem of the Moon and some applications*, Proceedings of the Conference on Analytical Methods and Ephemerides (Namur, Belgium) in Celes. Mech. (To be published)
- Chapront, J., Chapront-Touzé, M., 1981, *Comparison of ELP 2000 to a JPL numerical integration*, Proceedings of IAU colloquium n°63 (Grasse, France), Reidel Publ. Co. (To be published)
- Chapront, J., Chapront-Touzé, M., 1981, *Comparison of ELP 2000 to a JPL numerical integration*, Astron. Astrophys., 103, 295 (In french)
- Lestrade, J.F., Chapront, J., Chapront-Touzé, M., *The relativistic planetary perturbations and the orbital motion of the Moon*, Proceedings of the IAU colloquium n°63 (Grasse, France), Reidel Publ. Co. (To be published)
- Lestrade, J.F., Chapront-Touzé, M., 1982, *Relativistic perturbations of the Moon in ELP 2000*, (To be submitted to Astron. Astrophys.)

TABLE A.

Planetary longitudes 2000 and mean motions ("/cy) from VSOP 82

| | | |
|-------|---------------------|--------------------|
| M_e | 252° 15' 03" 259 86 | 538 101 628.688 98 |
| V | 181° 58' 47" 283 05 | 210 664 136.433 55 |
| M_a | 355° 25' 59" 788 66 | 68 905 077.592 84 |
| J | 34° 21' 05" 342 12 | 10 925 660.428 61 |
| S | 50° 04' 38" 896 94 | 4 399 609.659 32 |
| U | 314° 03' 18" 018 41 | 1 542 481.193 93 |
| N | 304° 20' 55" 195 75 | 786 550.320 74 |

TABLE B.

Computed values of mean motions of perigee and node ("/cy) for constants of sect. VI

| | | $w_2^{(1)}$ | $w_3^{(1)}$ |
|-------------------------|--------------------|-----------------|-----------------|
| Main problem | | 14 642 537.9368 | -6 967 167.2643 |
| Earth figure | Without C.A. | 615.8833 | -588.2007 |
| | C.A. | 17.5201 | -4.3350 |
| Planetary perturbations | Indirect | -21.6127 | 6.2526 |
| (Table 1) | Direct | 267.9736 | -142.8236 |
| | Solar eccentricity | 0.0339 | 0.0000 |
| Planetary perturbations | Ecliptic motion | 0.0000 | 0.0000 |
| (Table 2) | Moon on barycenter | 3.3492 | -8.2329 |
| | C.A. | -2.6388 | 0.7306 |
| Tidal effects | Without C.A. | 0.0663 | 0.0002 |
| | C.A. | 0.0007 | -0.0002 |
| Lunar figure | Without C.A. | -2.2689 | -16.8108 |
| | C.A. | 0.5217 | -0.1335 |
| | Main effect | 4.4528 | 1.2534 |
| Relativity | Indirect effect | 0.6897 | -0.1989 |
| | C.A. | -3.3454 | 0.8474 |
| Total | | 14 643 418.5623 | -6 967 918.9157 |

C.A. means Constant Adjustment

TABLE C.

Derivatives of $w_2^{(1)}/v$ and $w_3^{(1)}/v$ for the main problem

| | $w_2^{(1)}/v$ | $w_3^{(1)}/v$ |
|----------|----------------|----------------|
| m | 0.311 079 095 | -0.103 837 907 |
| Γ | -0.004 482 398 | 0.000 668 287 |
| E | -0.001 102 485 | -0.001 298 072 |
| e' | 0.001 056 062 | -0.000 178 028 |
| α | 0.000 050 928 | -0.000 037 342 |
| μ | -0.000 000 418 | 0.000 000 220 |

TABLE D.

Coefficients of t^2 (" / cy)

| | | $w_1^{(2)}$ | $w_2^{(2)}$ | $w_3^{(2)}$ |
|-------------------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|
| Earth figure | | 0.1925 | 0.1003 | -0.0958 |
| Planetary perturbations | Indirect | 0.0020 | -0.0057 | 0.0016 |
| (Table 1) | Direct | 0.0005 | -0.0008 | 0.0002 |
| Planetary perturbations | Solar eccentricity | 5.8664 | -38.5481 | 6.5026 |
| (Table 2) | Ecliptic motion | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| | Moon on barycenter | 0 | 0 | 0 |
| Tidal effects | | -11.9473 | 0.1761 | -0.0464 |
| Lunar figure | | -0.0151 | 0 | 0 |
| Total | | -5.9010 | -38.2782 | 6.3622 |

TABLE E.

Computed values of mean motions for constants of sect. IX-1° (" / cy)

| | |
|------------------|----------------------|
| $w_1^{(1)}$ | 1 732 559 343.736 04 |
| $w_2^{(1)}$ | 14 643 420.263 24 |
| $w_3^{(1)}$ | -6 967 919.362 24 |
| $\Gamma^{(1)}$ | 129 597 742.275 8 |
| $\omega_1^{(1)}$ | 1 161.228 3 |

Please send questions and comments concerning this magnetic tape to:

Michelle Chapront-Touzé
 Jean Chapront
 Bureau des Longitudes
 77, avenue Denfert Rochereau
 75014 Paris
 France

第5章 付録2

Table5-2の深発月震20グループの震源における月内部潮汐応力テンソル計算結果。月内部局所直交座標系(5-2-4節参照)にて計算。各グラフは上半分が $S(1,1), S(2,2), S(3,3)$ 、下半分が $S(2,3), S(3,1), S(1,2)$ 。Fig.1~Fig.88まで。内訳は以下の通り。

| Fig.no. | 深発月震グループ | 計算時期 |
|---------------|-------------|-------------------|
| Fig.1~Fig.10 | A1 | 1969年~1977年、1998年 |
| Fig.11~Fig.20 | A18 | 同上 |
| Fig.21~Fig.30 | A20 | 同上 |
| Fig.31~Fig.40 | A33 | 同上 |
| Fig.41~Fig.42 | A5 | 1974年~1975年 |
| Fig.43~Fig.44 | A6 | 同上 |
| Fig.45~Fig.46 | A7 | 同上 |
| Fig.47~Fig.48 | A8 | 同上 |
| Fig.49~Fig.50 | A9 | 同上 |
| Fig.51~Fig.52 | A14 | 同上 |
| Fig.53~Fig.54 | A16 | 同上 |
| Fig.55~Fig.56 | A24 | 同上 |
| Fig.57~Fig.58 | A25 | 同上 |
| Fig.59~Fig.60 | A30 | 同上 |
| Fig.61~Fig.62 | A40 | 同上 |
| Fig.63~Fig.64 | A42 | 同上 |
| Fig.65~Fig.66 | A44 | 同上 |
| Fig.67~Fig.68 | A50 | 同上 |
| Fig.69~Fig.70 | A60 | 同上 |
| Fig.71~Fig.72 | A61 | 同上 |
| Fig.73~Fig.74 | A5 and A6 | 1998年 |
| Fig.75~Fig.76 | A7 and A8 | 同上 |
| Fig.77~Fig.78 | A9 and A14 | 同上 |
| Fig.79~Fig.80 | A16 and A24 | 同上 |
| Fig.81~Fig.82 | A25 and A30 | 同上 |
| Fig.83~Fig.84 | A40 and A42 | 同上 |
| Fig.85~Fig.86 | A44 and A50 | 同上 |
| Fig.87~Fig.88 | A60 and A61 | 同上 |

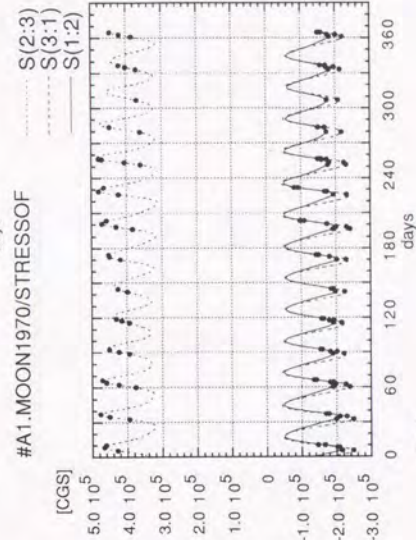
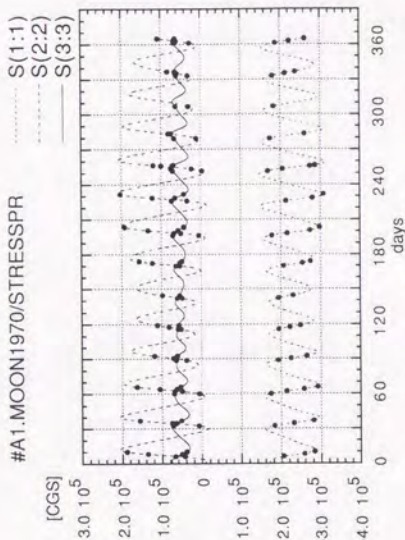


Fig.2

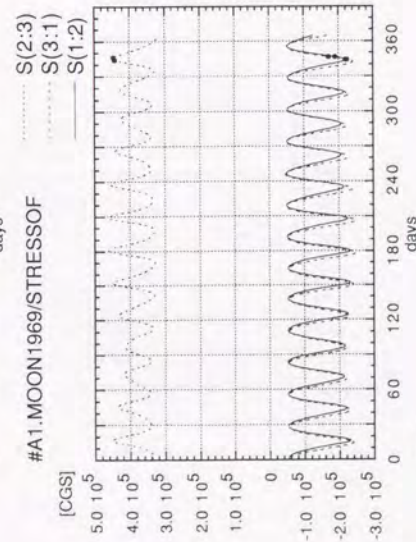
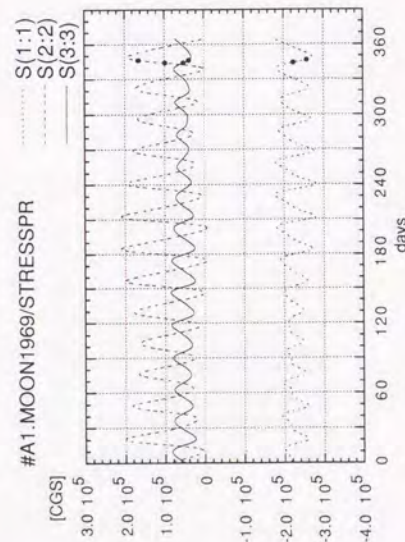


Fig.1

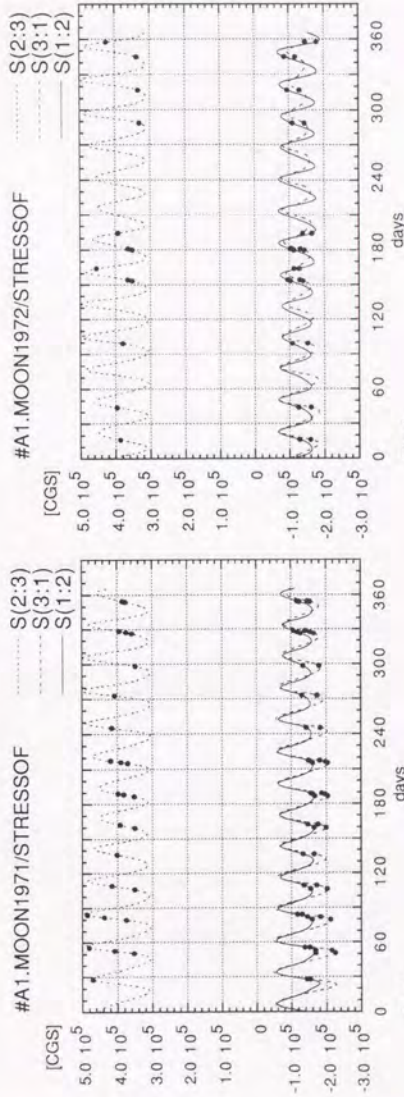
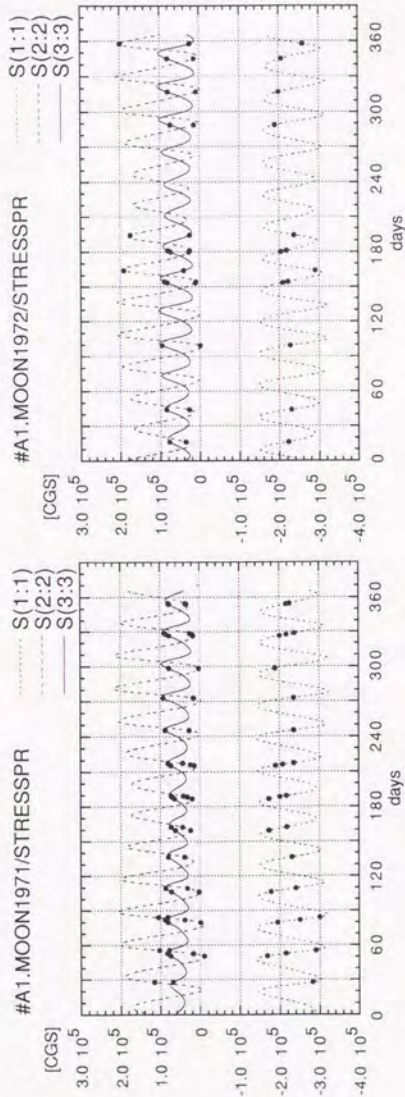


Fig.3

Fig.4

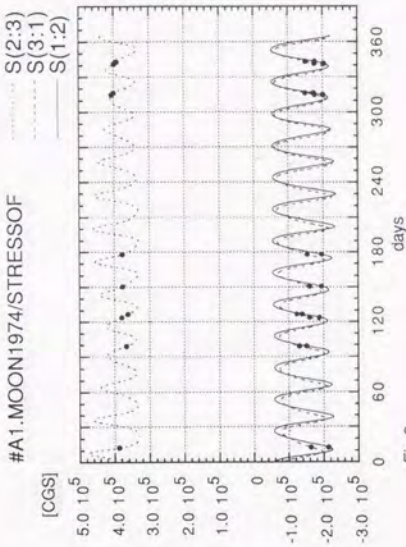
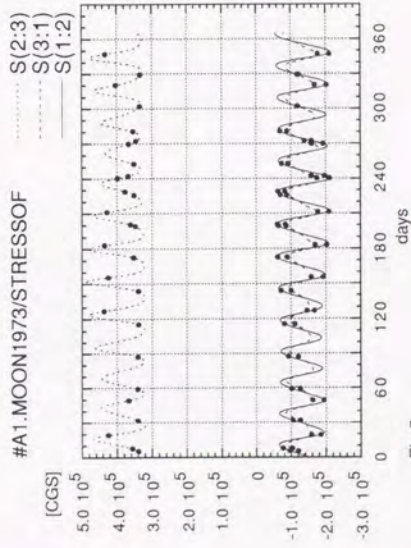
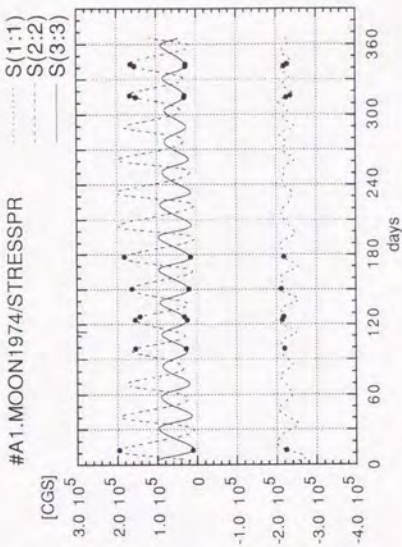
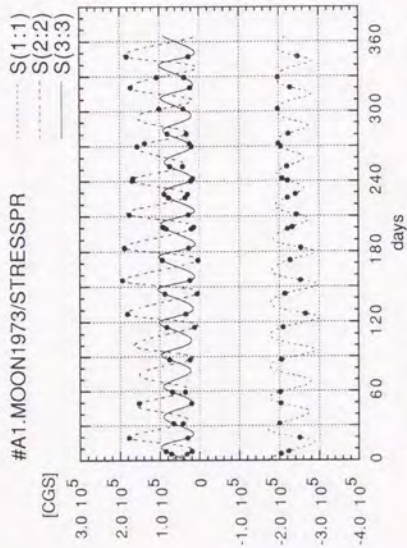


Fig.6

Fig.5

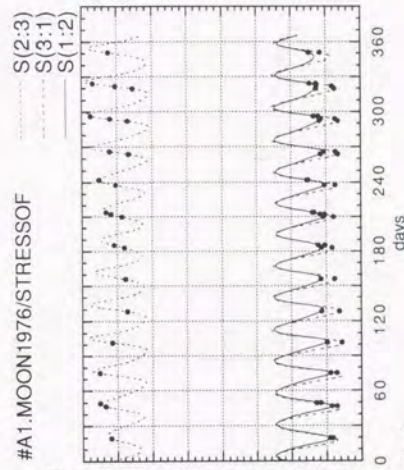
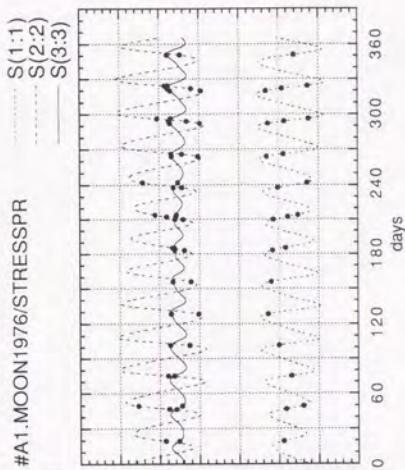


Fig.8

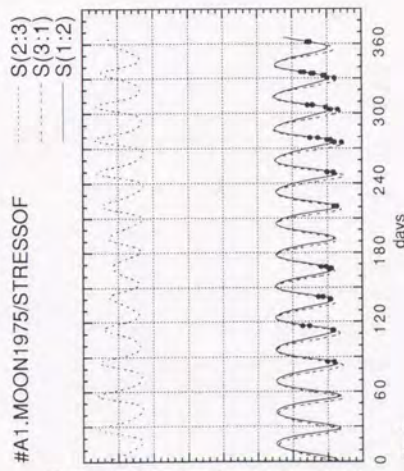
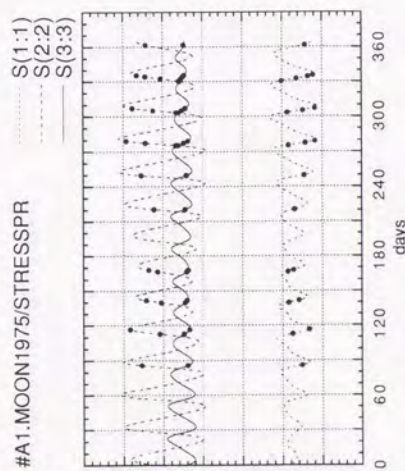


Fig.7

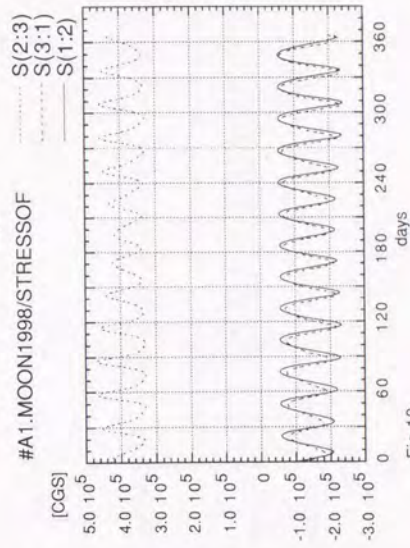
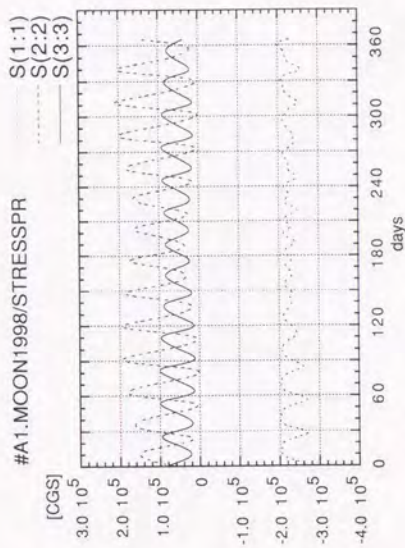


Fig.10

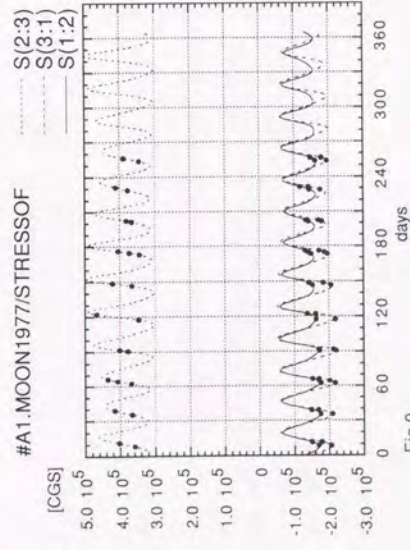
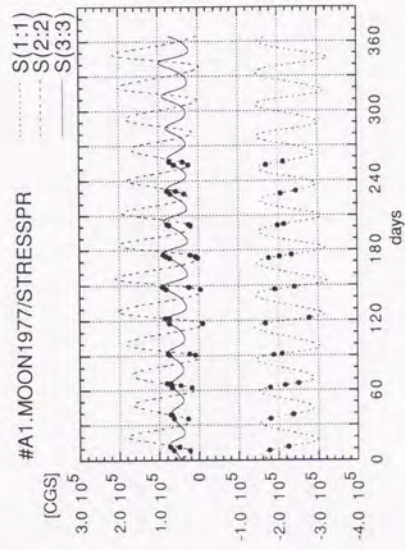


Fig.9

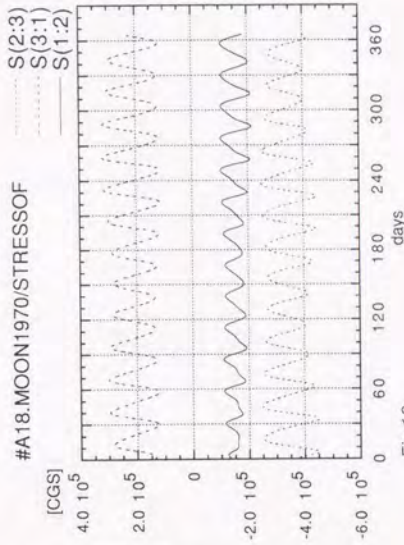
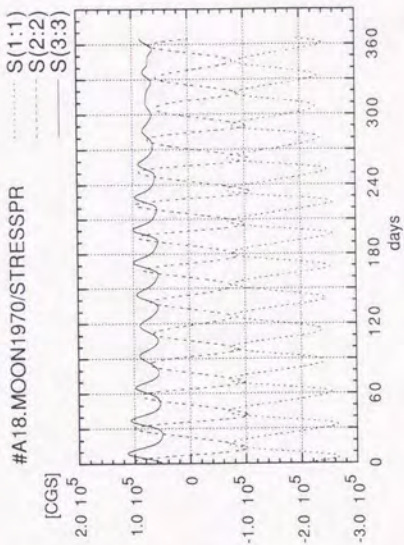


Fig.12

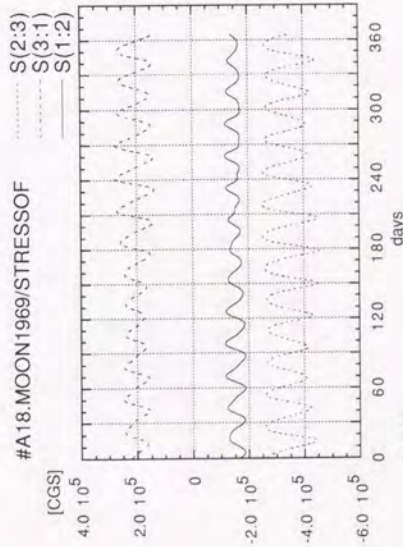
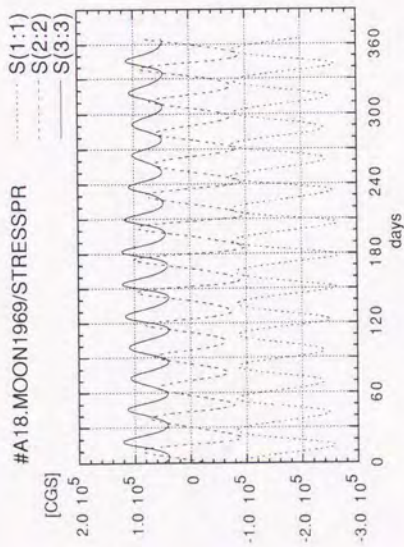


Fig.11

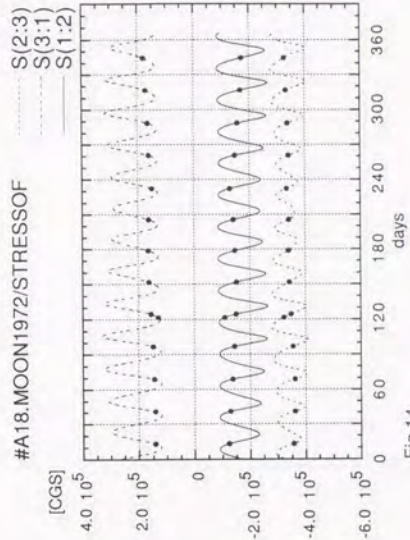
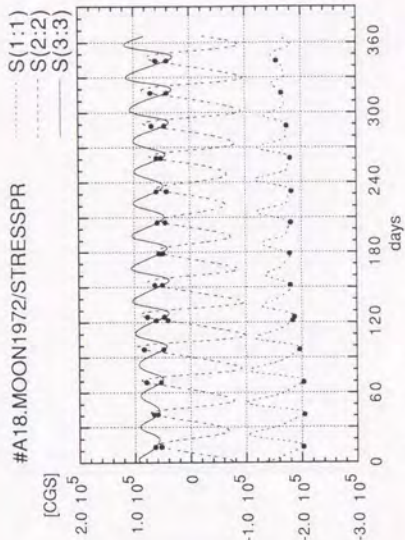


Fig.14

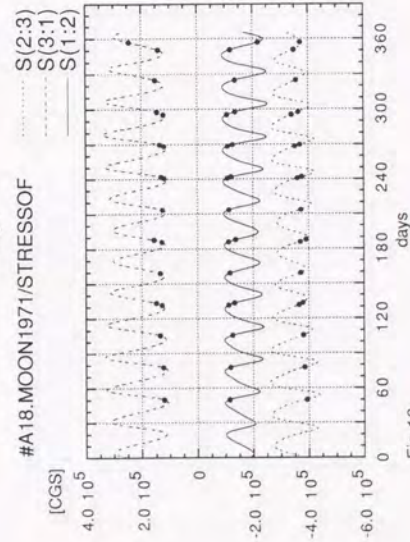
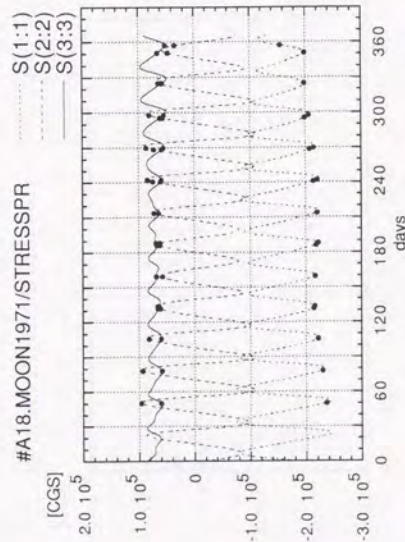


Fig.13

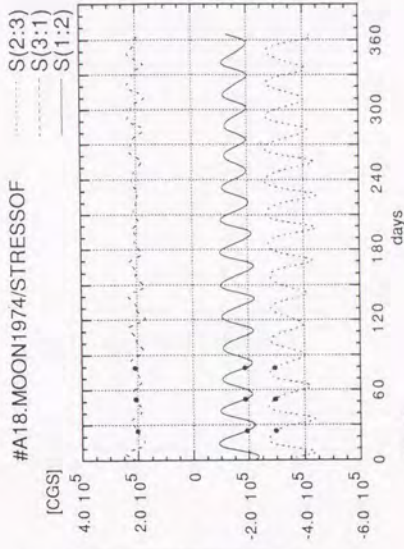
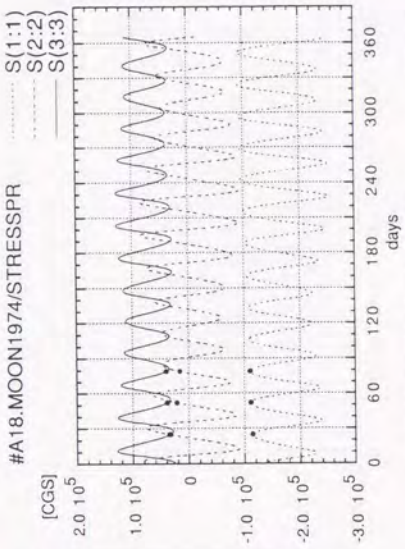


Fig.16

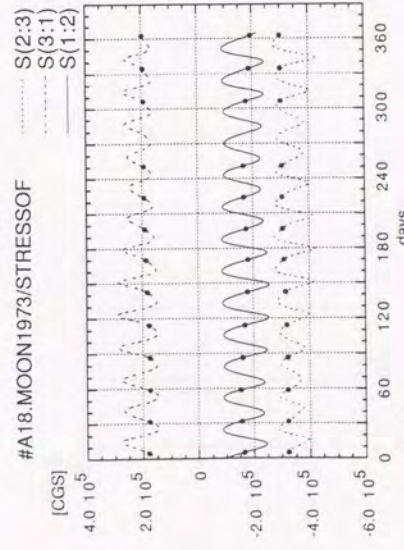
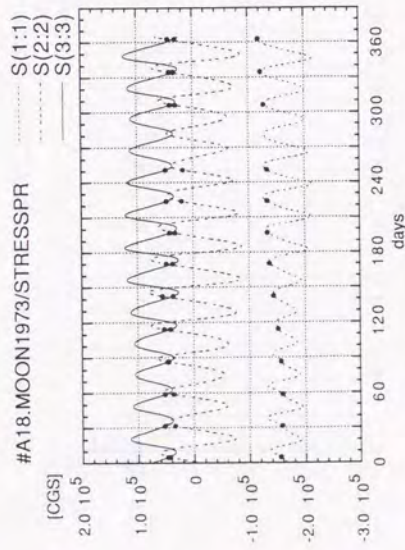


Fig.15

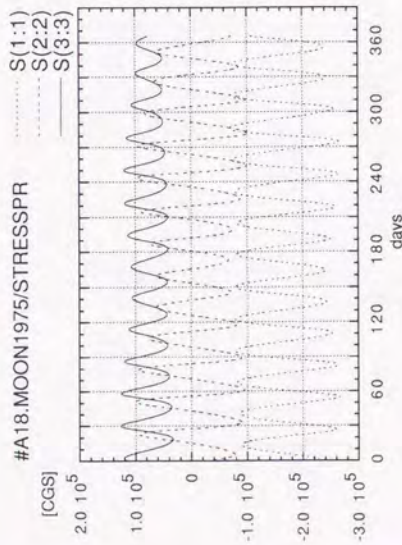
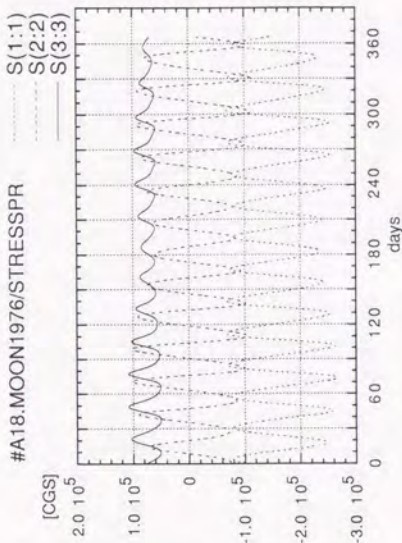


Fig.17

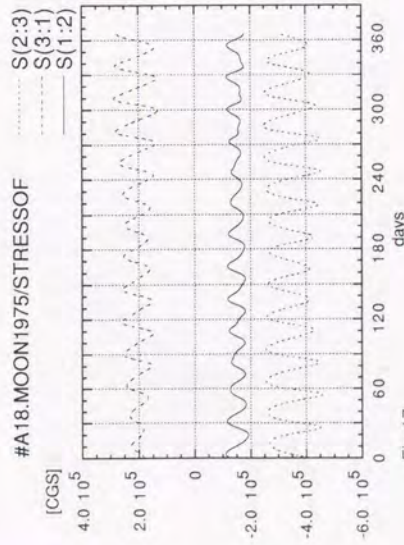
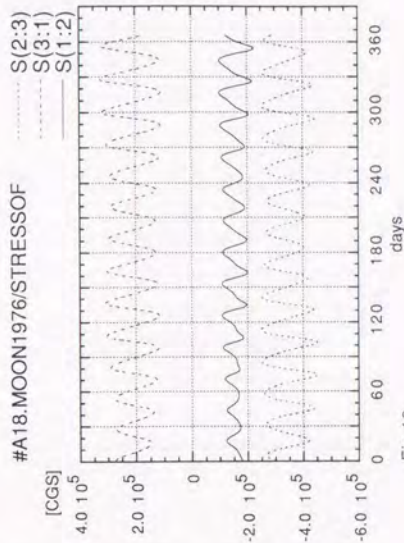


Fig.18

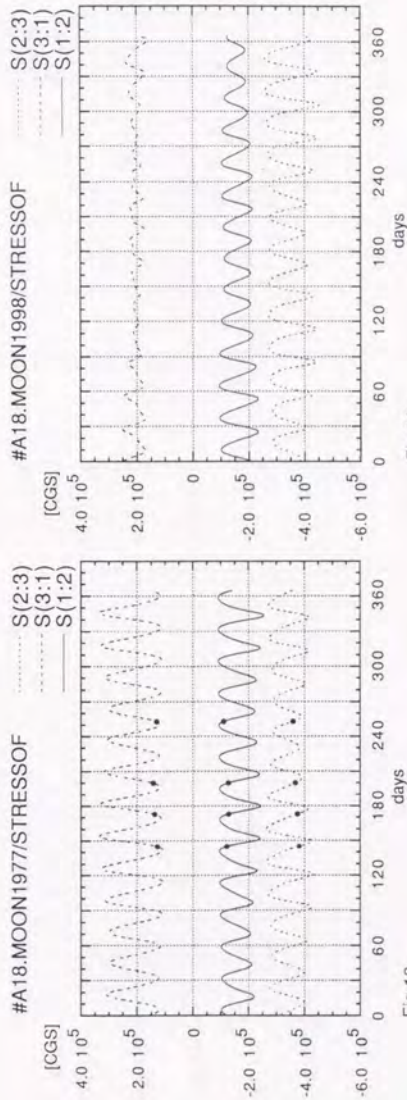
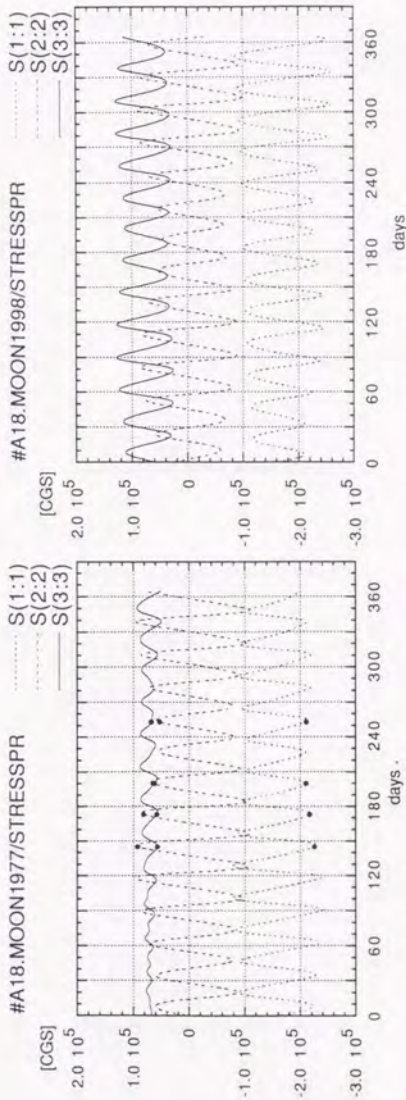


Fig.19

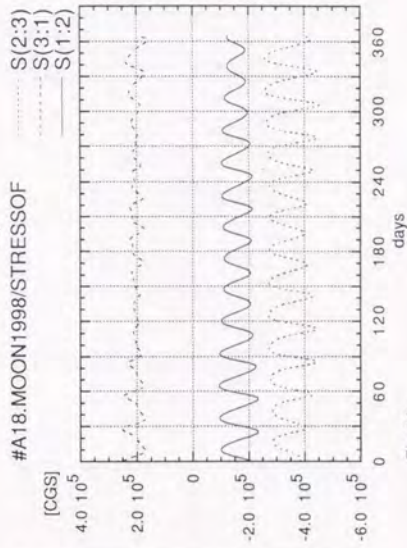
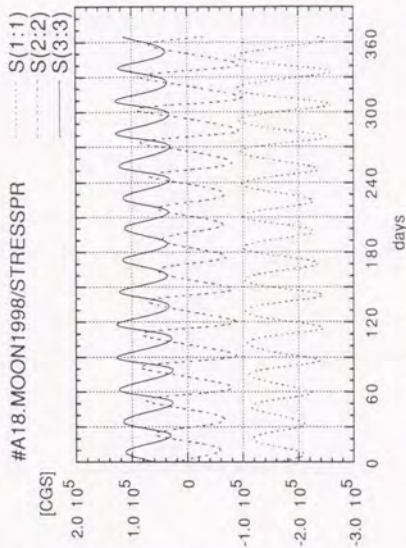


Fig.20

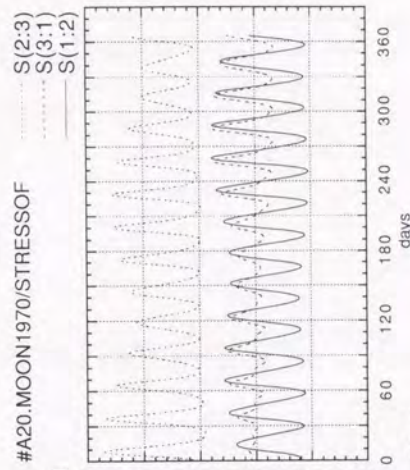
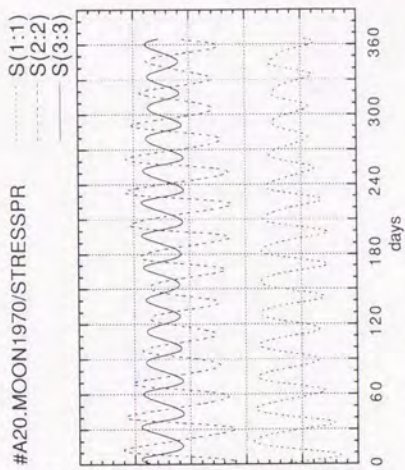


Fig.22

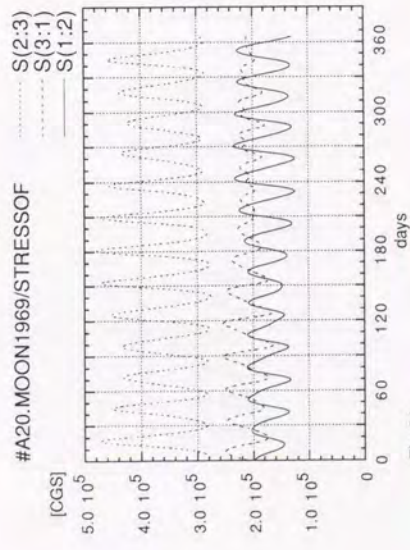
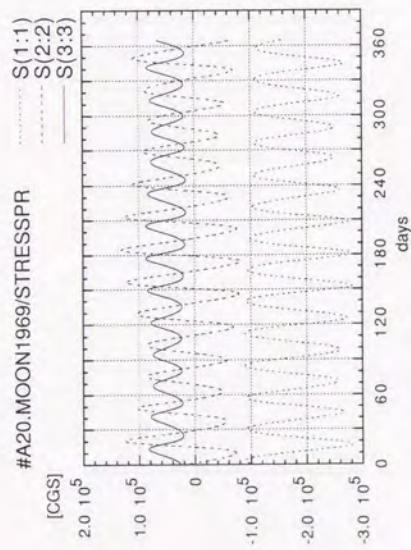


Fig.21

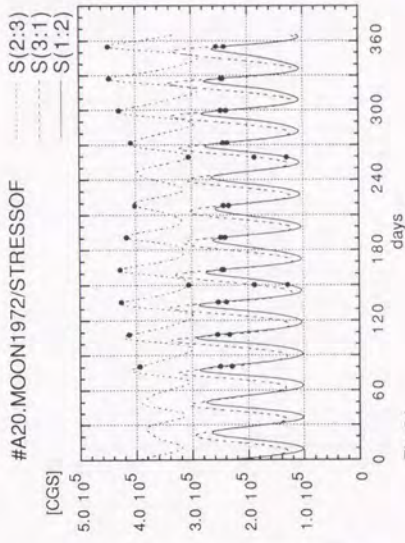
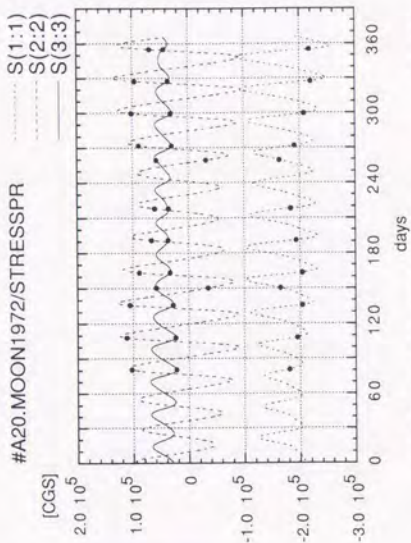


Fig.24

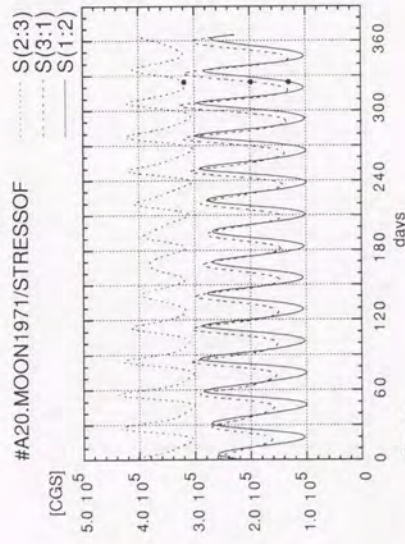
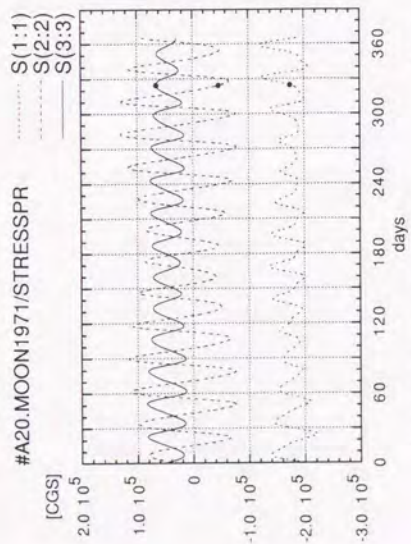


Fig.23

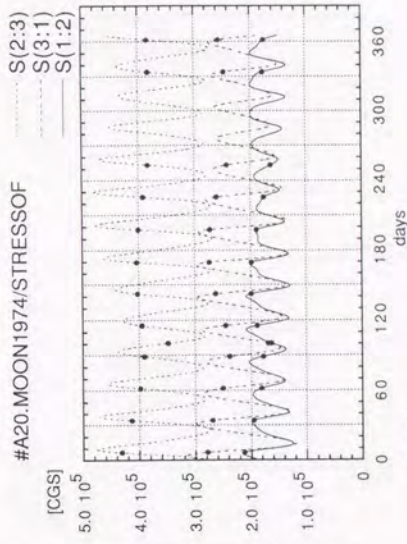
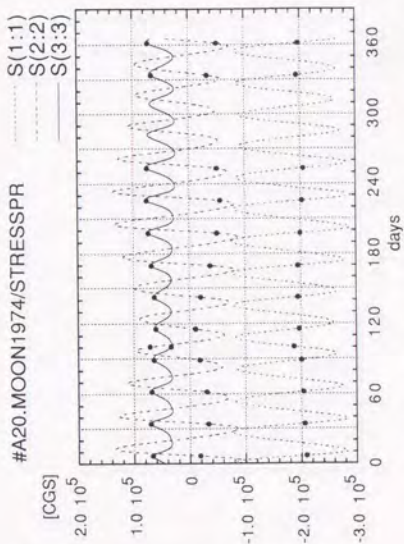


Fig.26

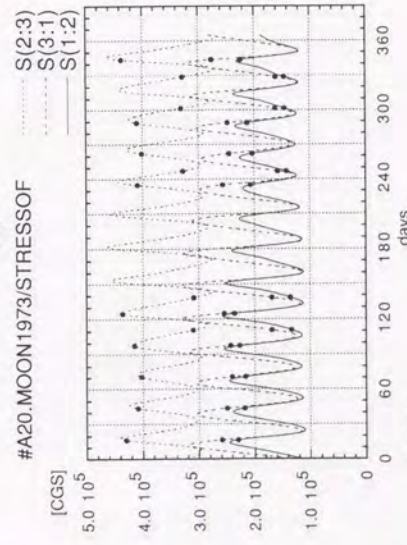
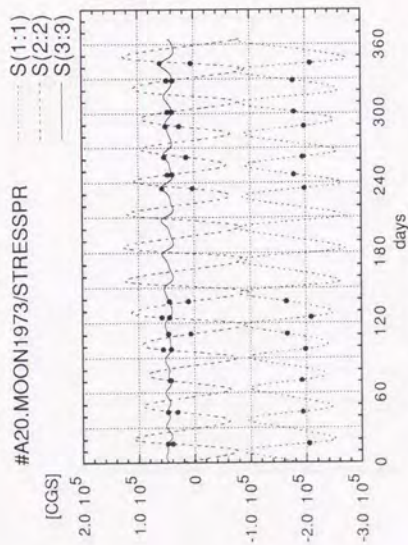


Fig.25

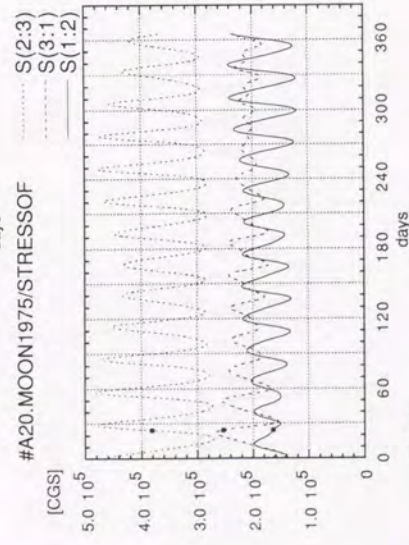
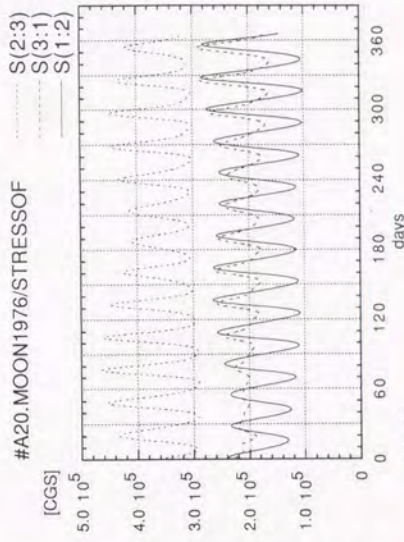
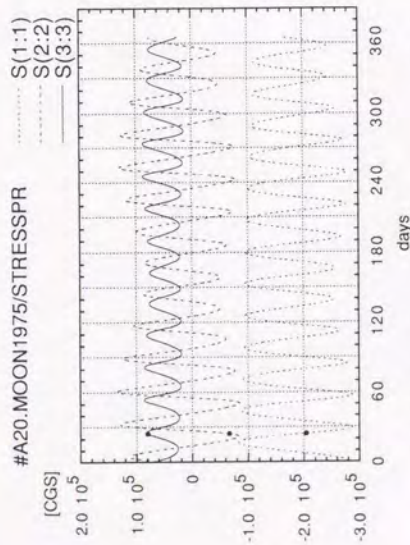
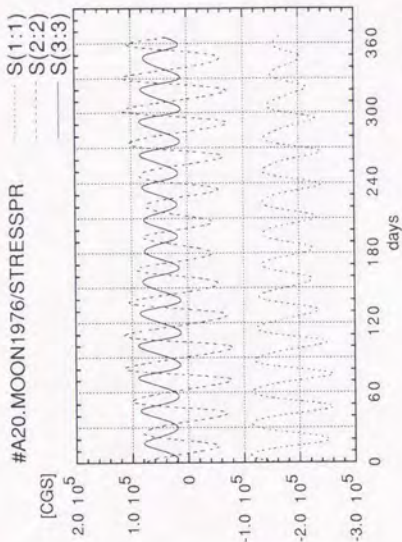


Fig.28

Fig.27

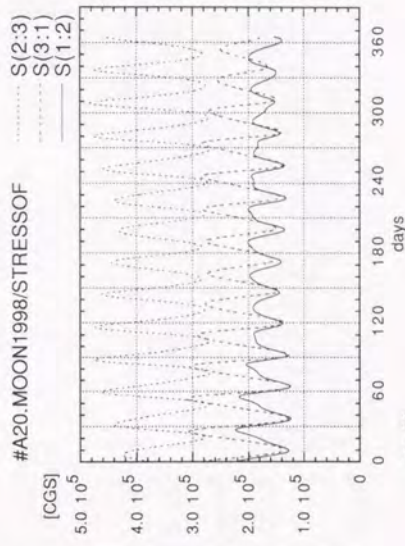
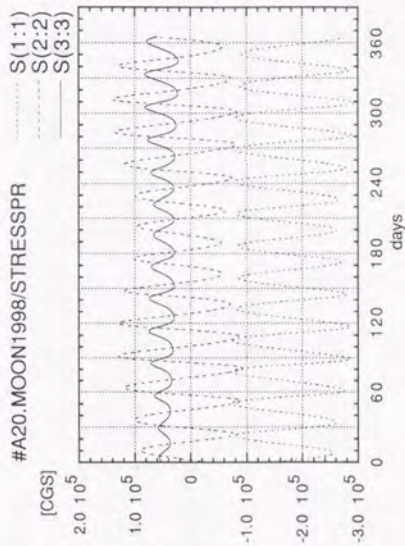


Fig.30

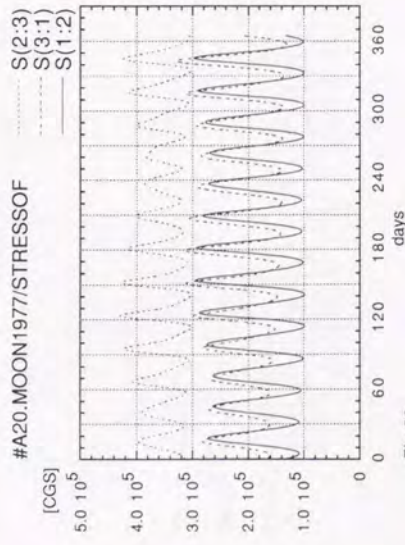
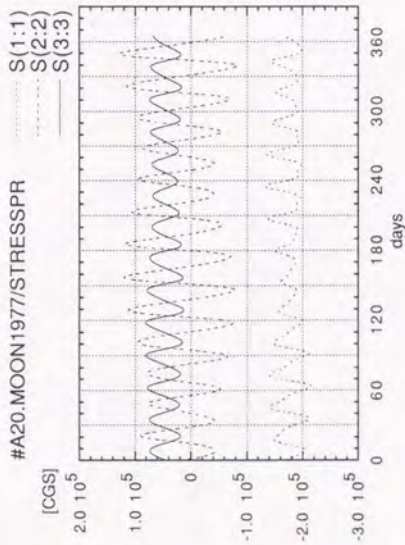


Fig.29

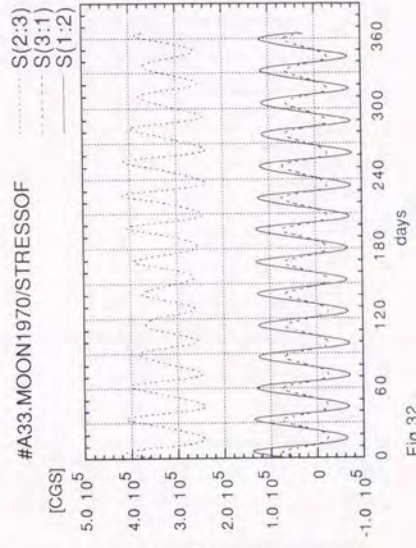
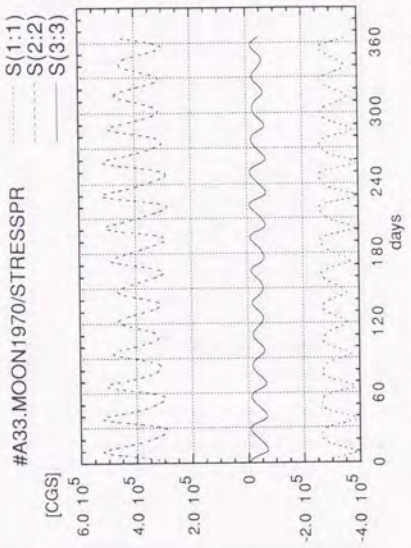


Fig.32

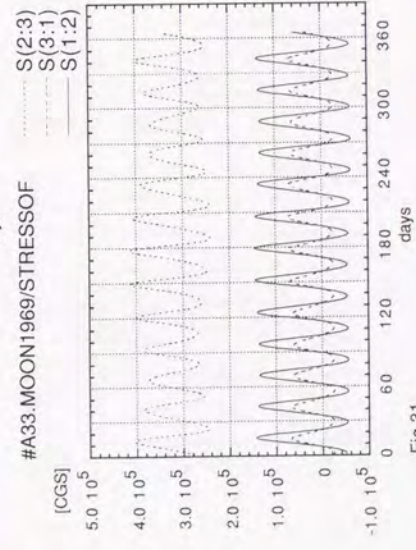
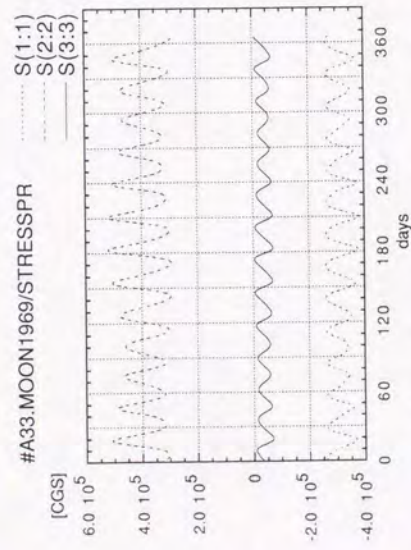


Fig.31

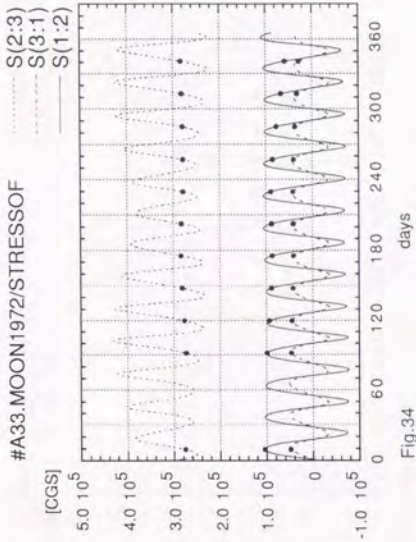
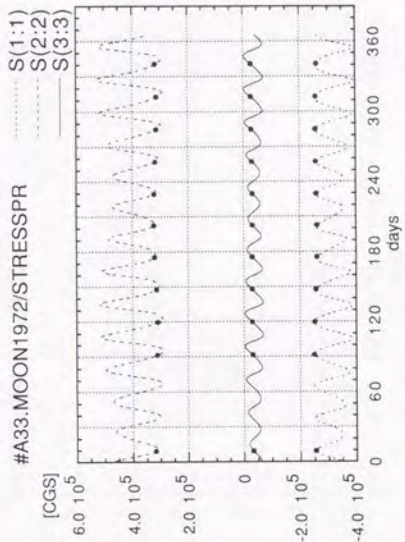


Fig.34

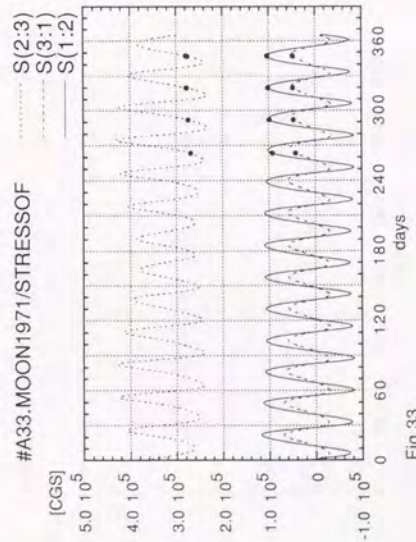
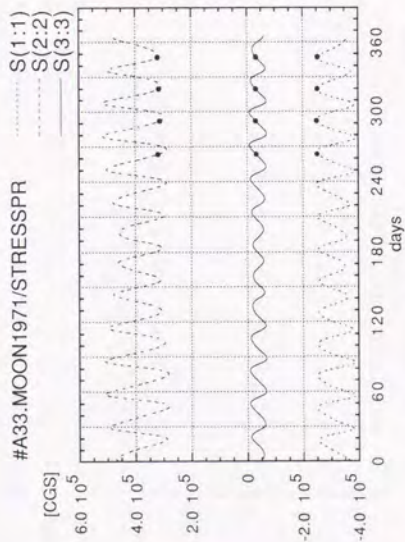


Fig.33

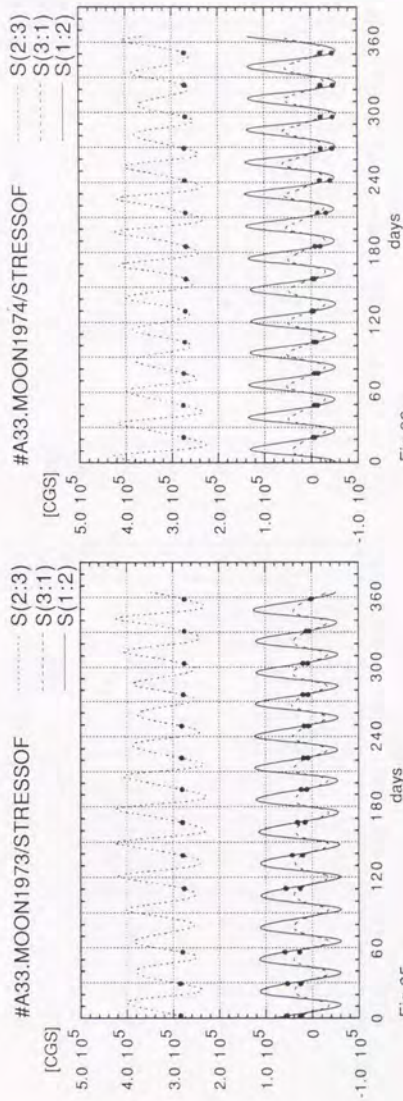
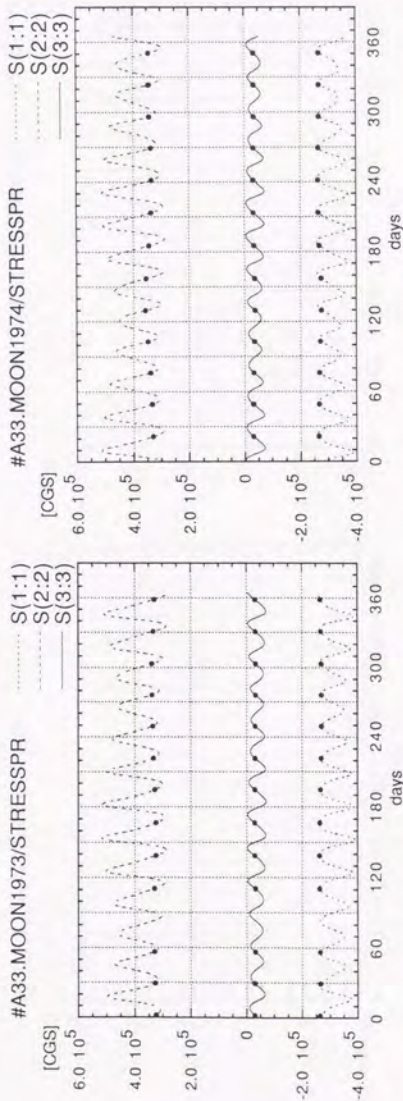


Fig.35

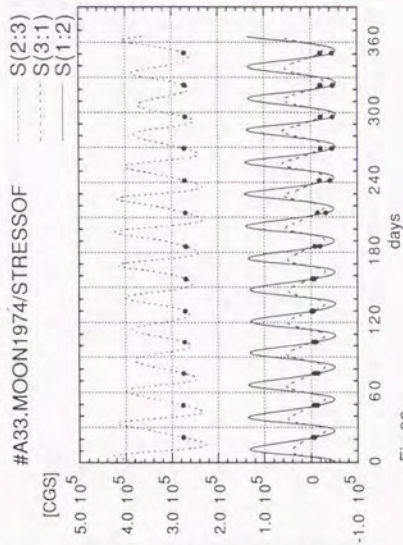
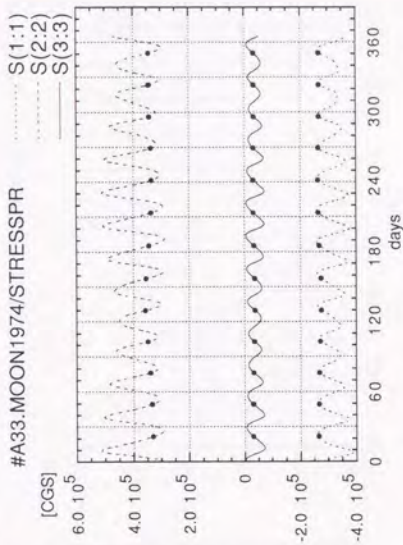


Fig.36

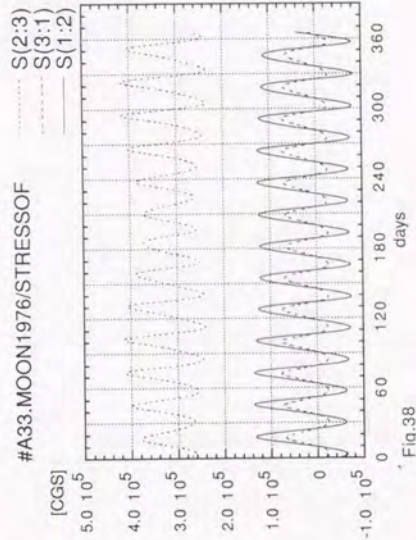
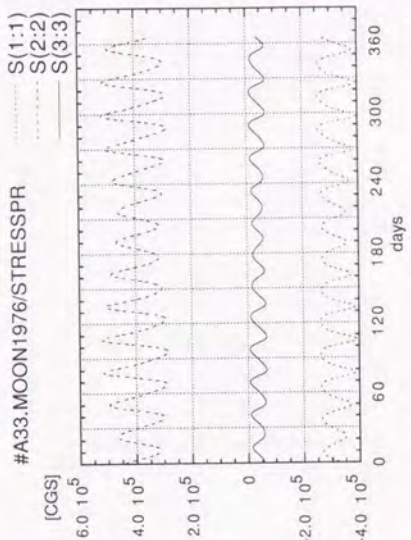


Fig.38

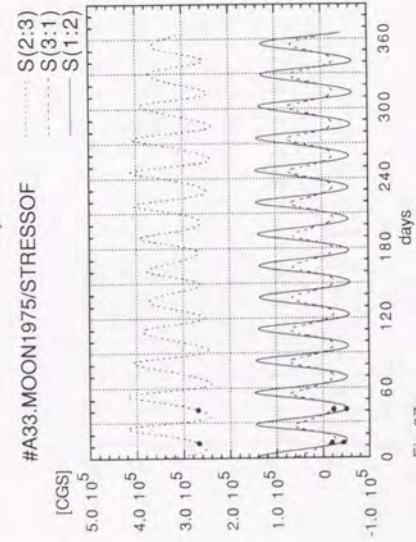
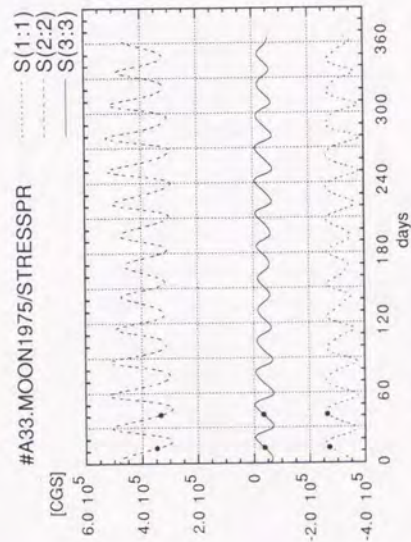


Fig.37

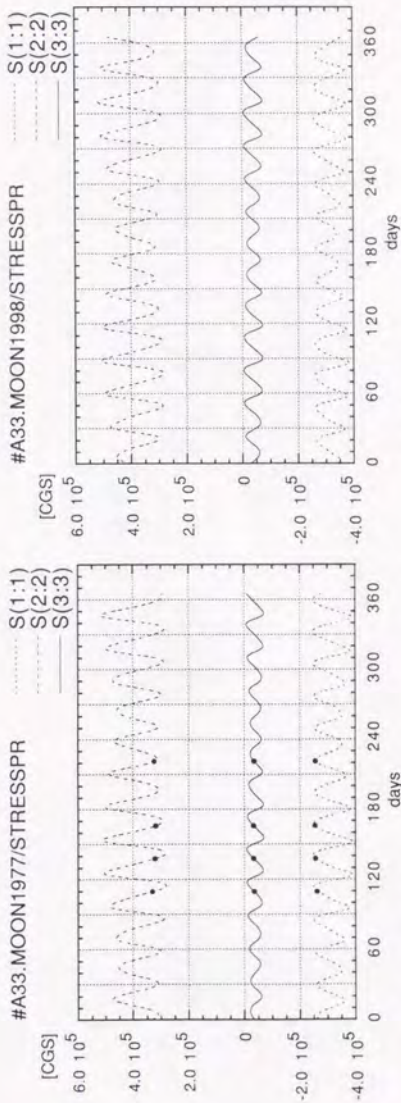


Fig.39

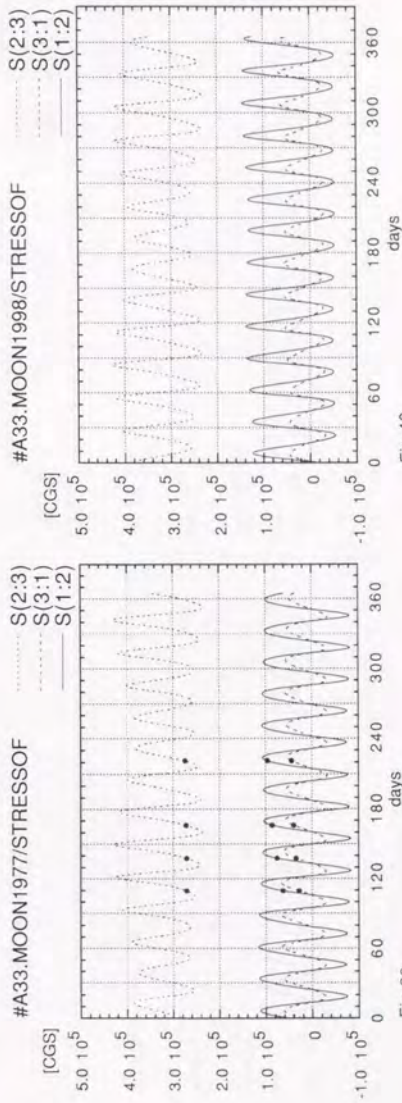


Fig.40

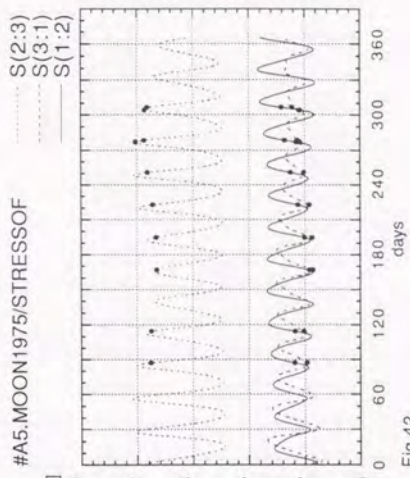
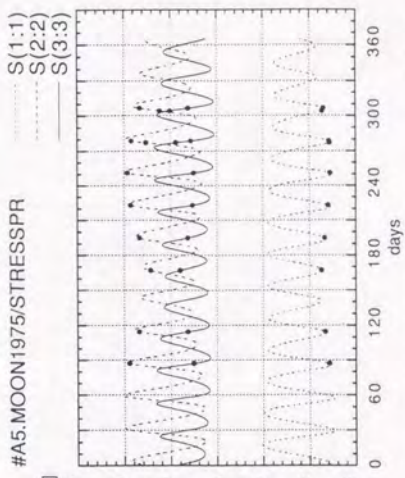


Fig.42

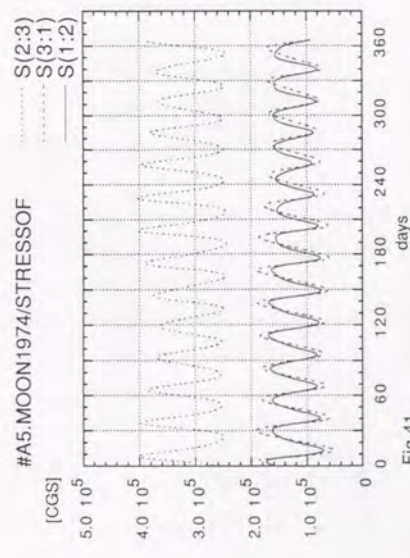
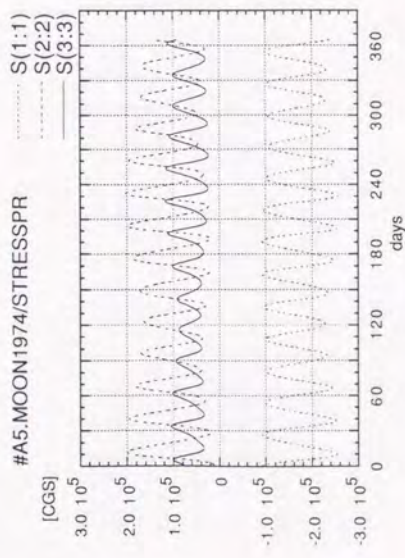


Fig.41

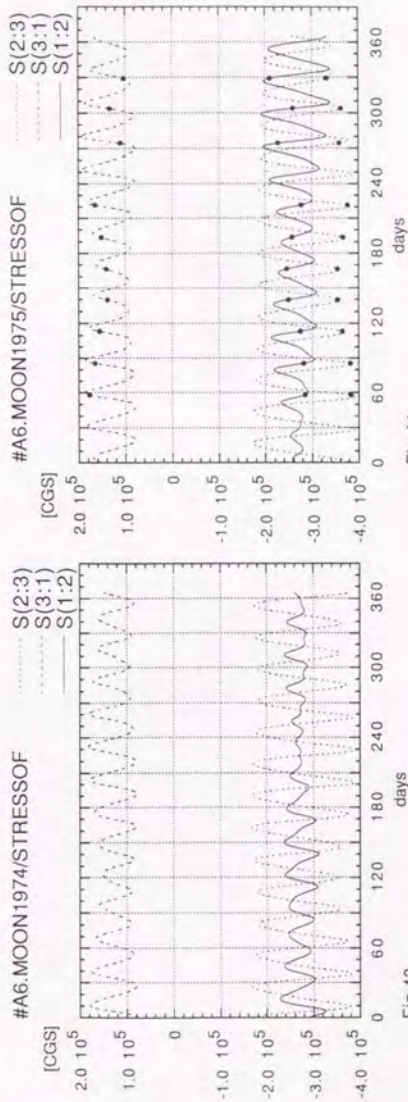
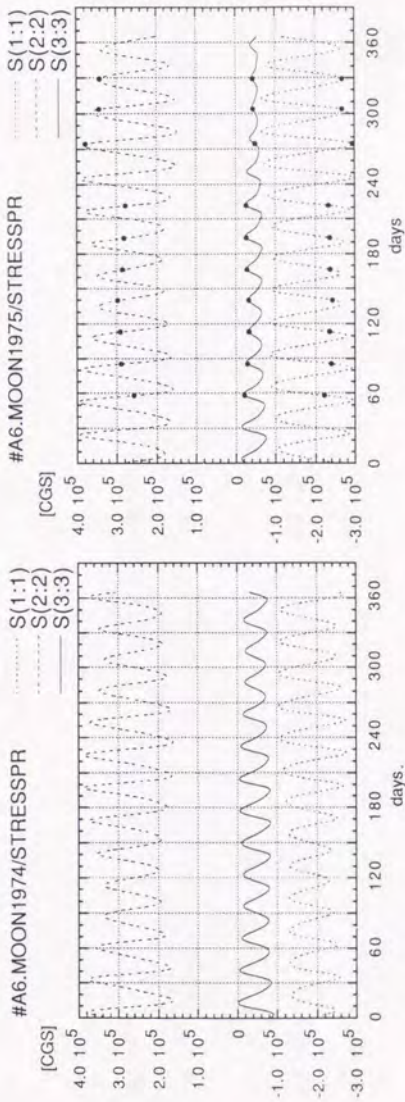


Fig.43

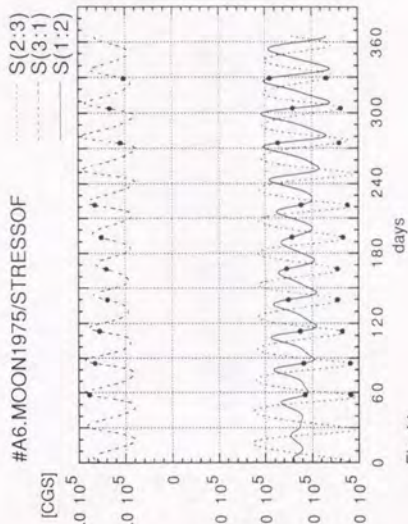
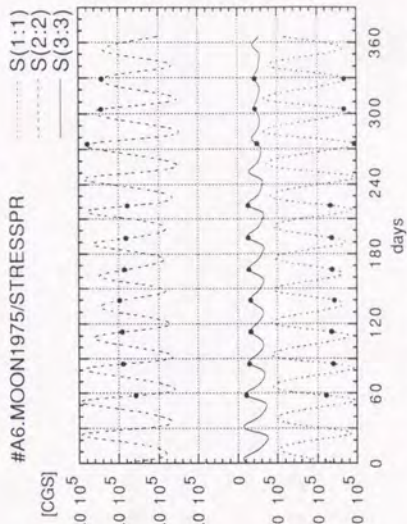


Fig.44

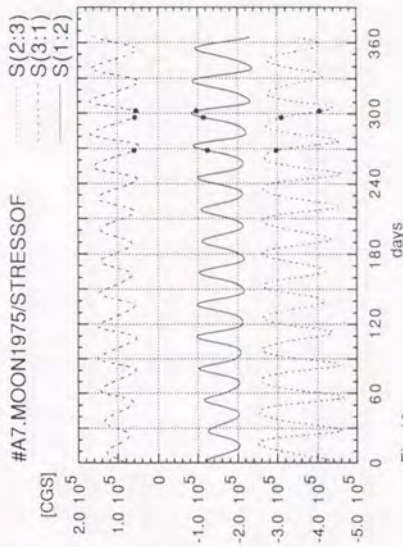
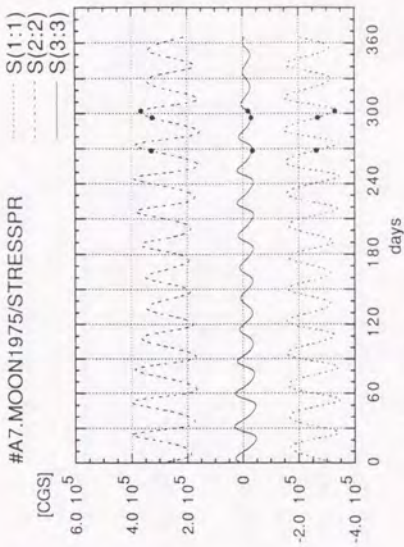


Fig.46

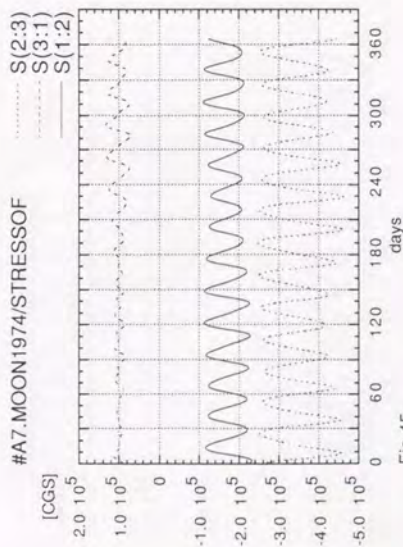
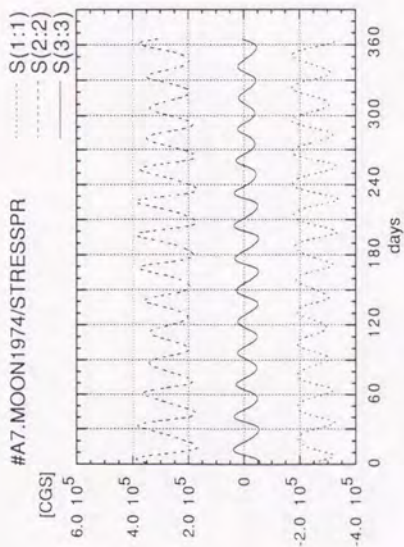


Fig.45

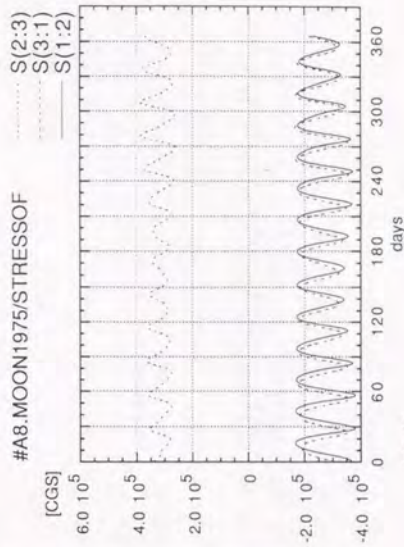
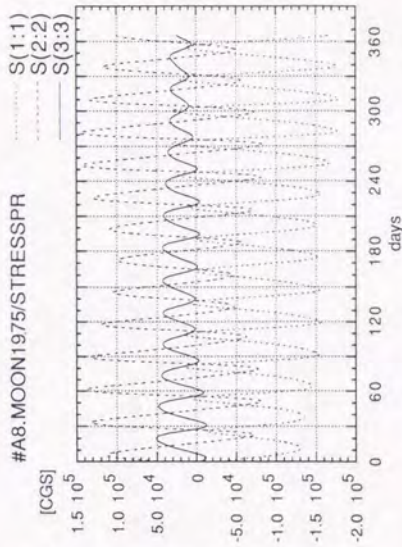


Fig.48

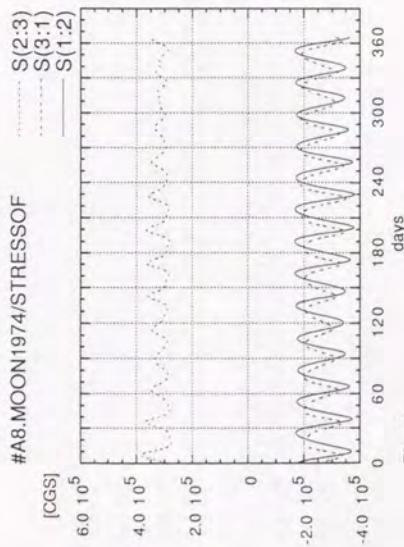
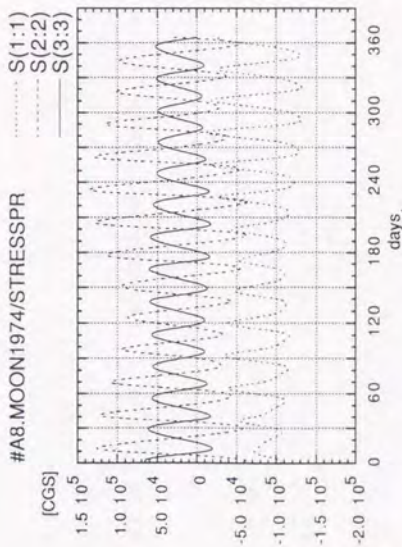


Fig.47

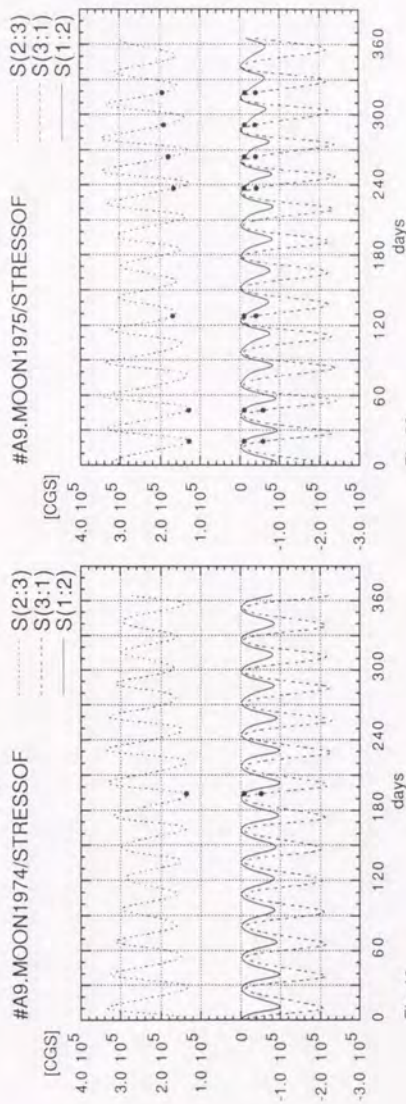
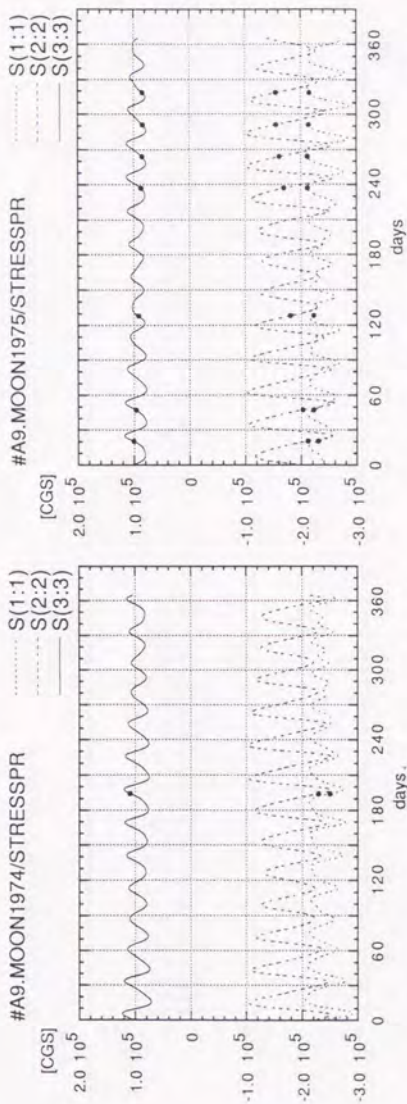


Fig-50

Fig-49

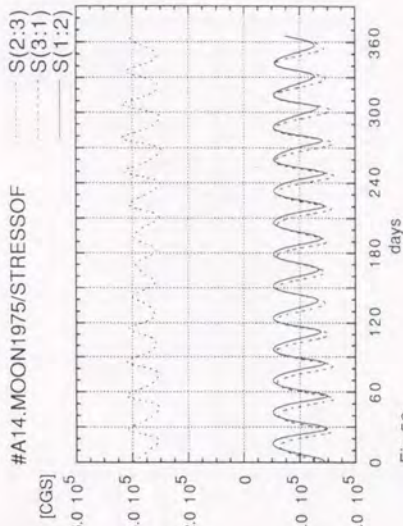
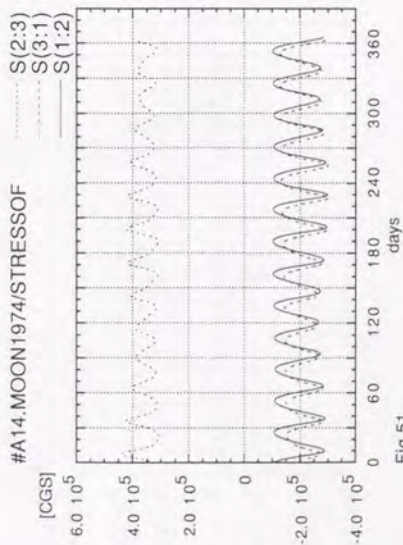
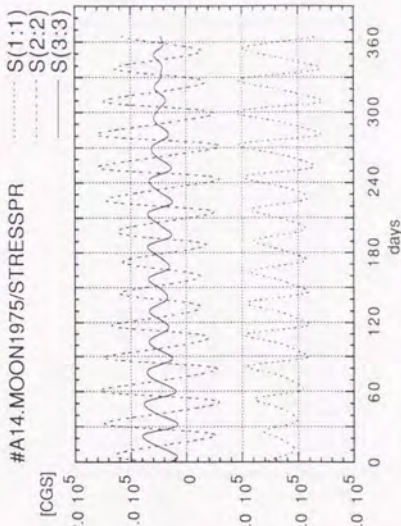
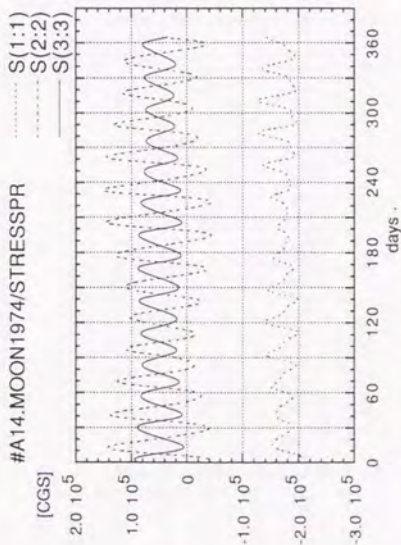


Fig.52

Fig.51

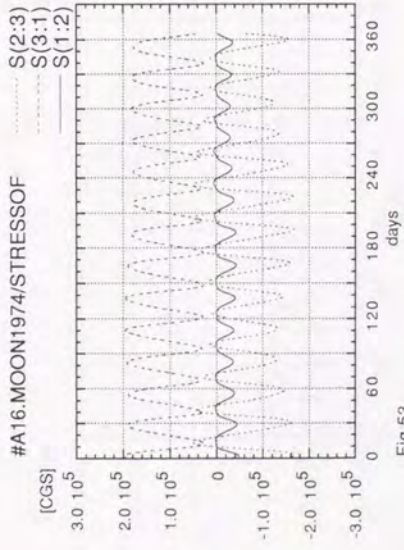
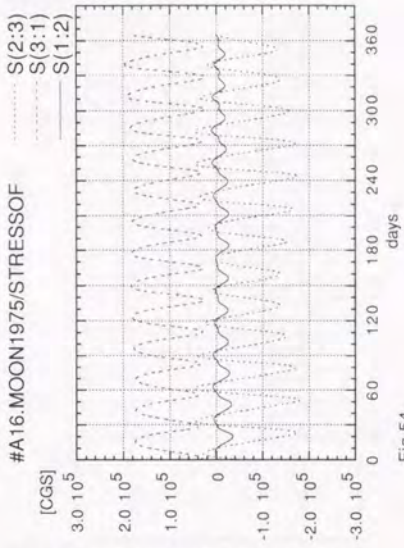
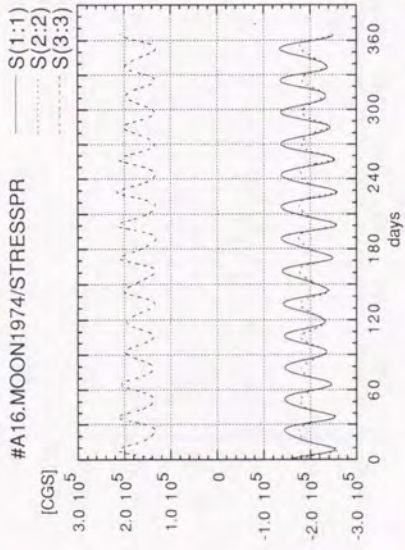
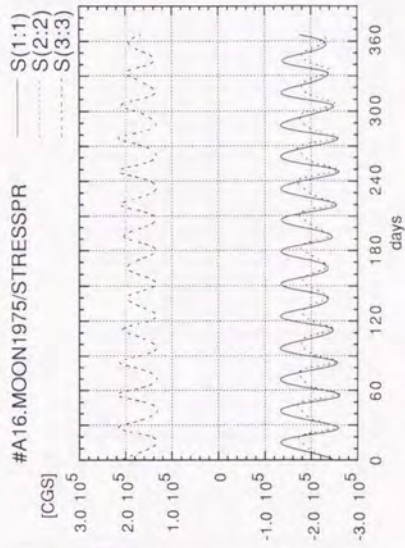


Fig.54

Fig.53

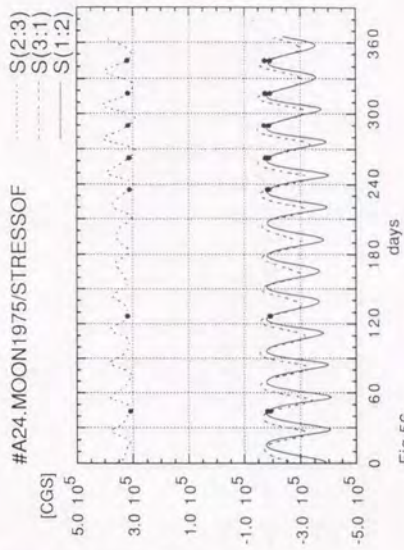
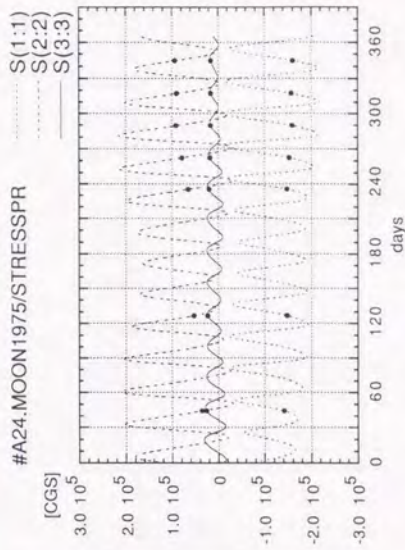


Fig.56

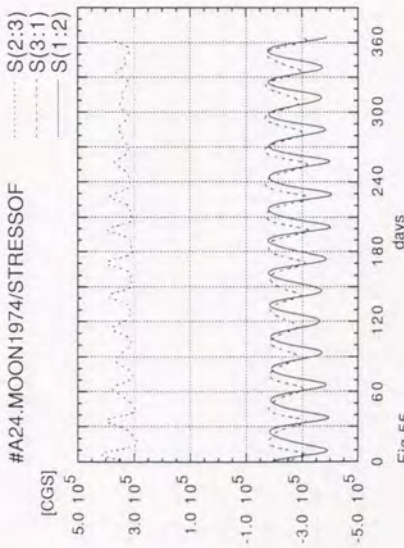
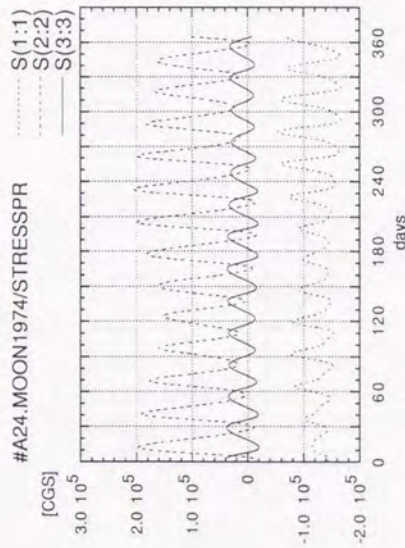


Fig.55

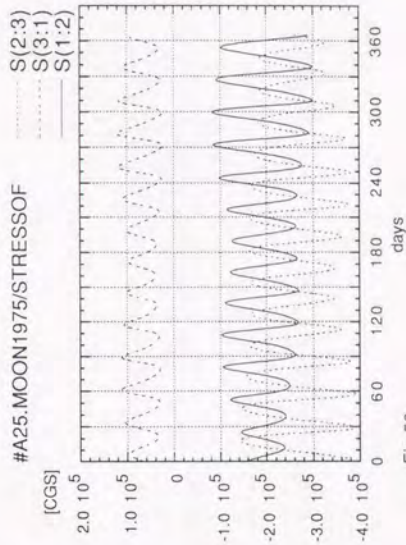
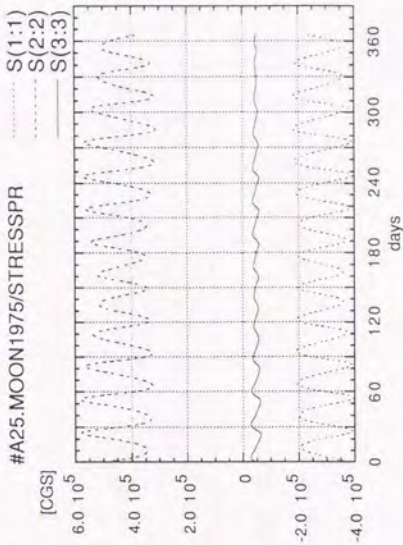


Fig.58

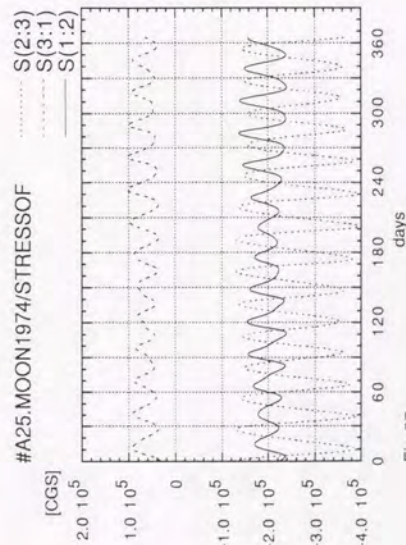
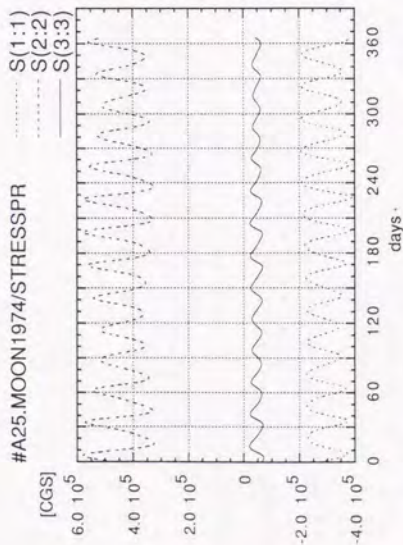


Fig.57

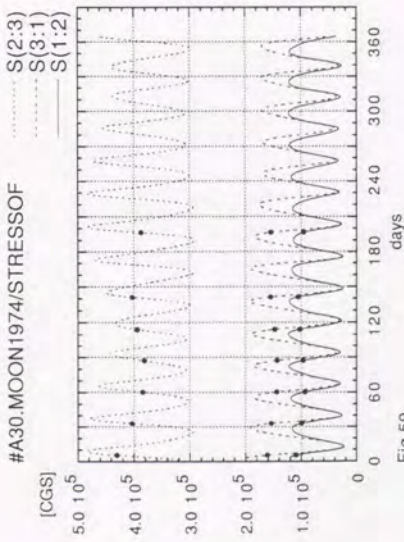
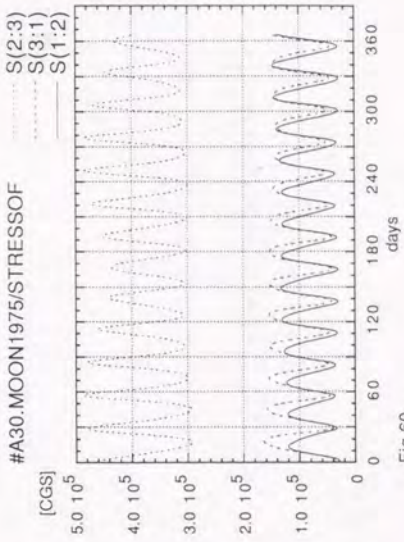
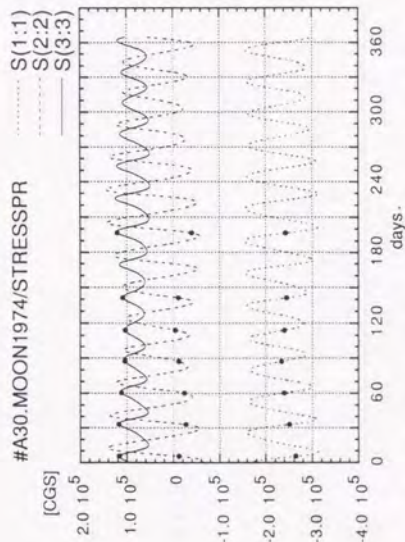
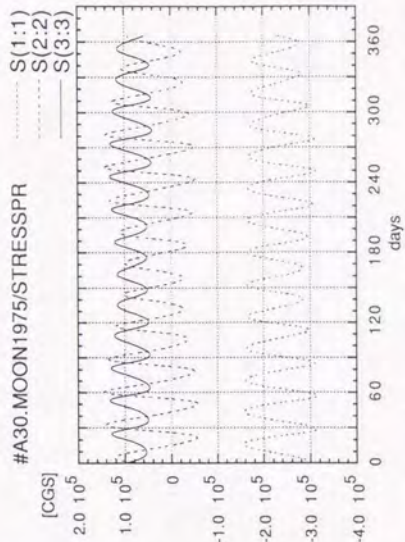


Fig.60

Fig.59

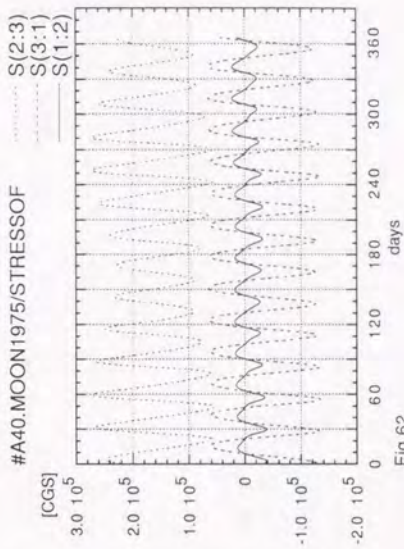
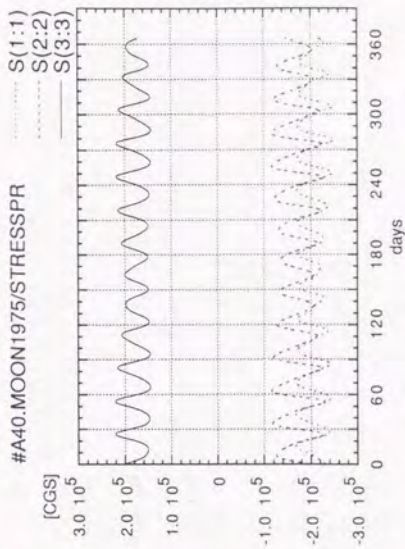


Fig.62

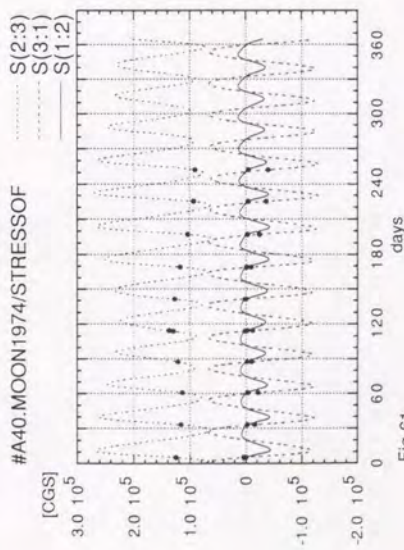
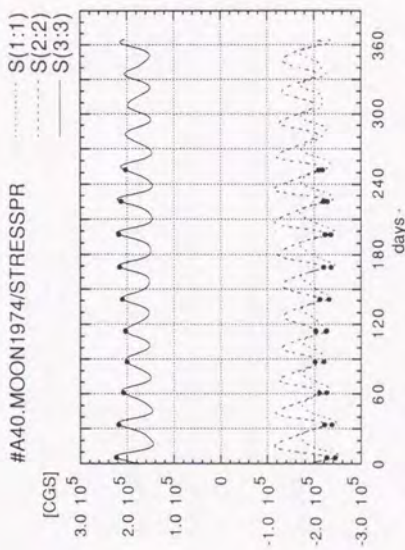


Fig.61

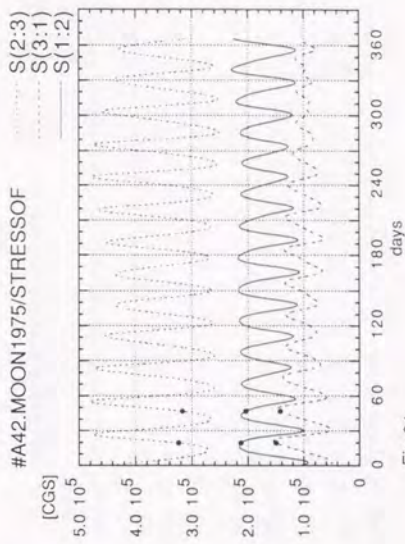
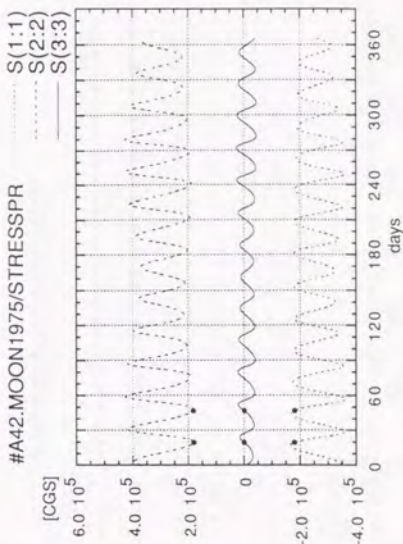


Fig.64

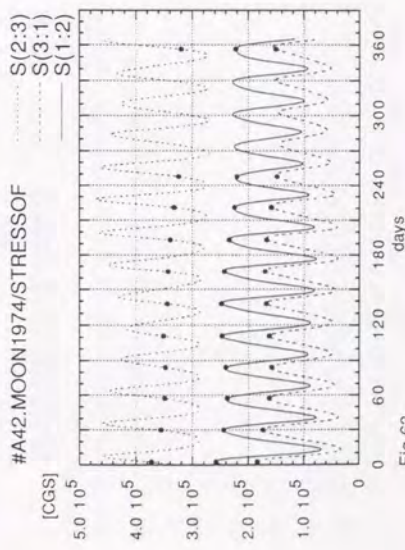
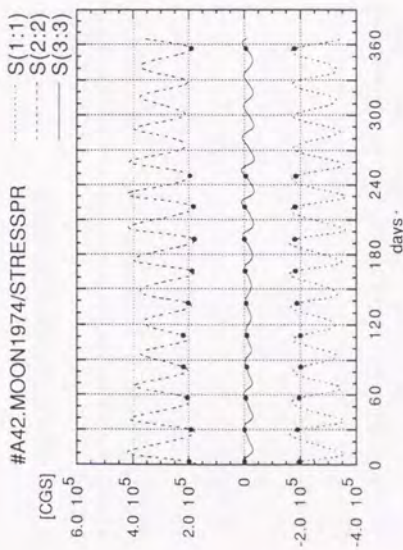


Fig.63

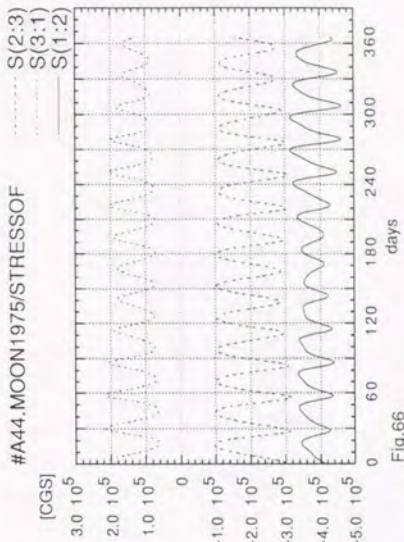
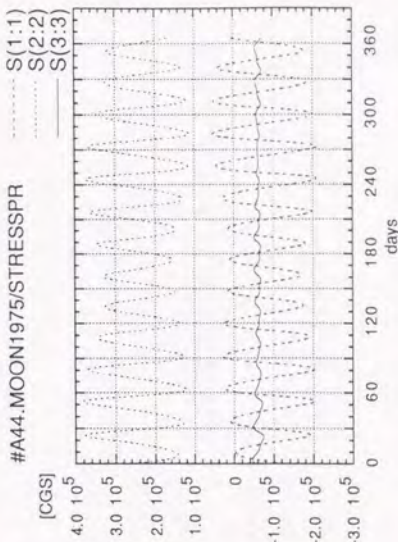


Fig.66

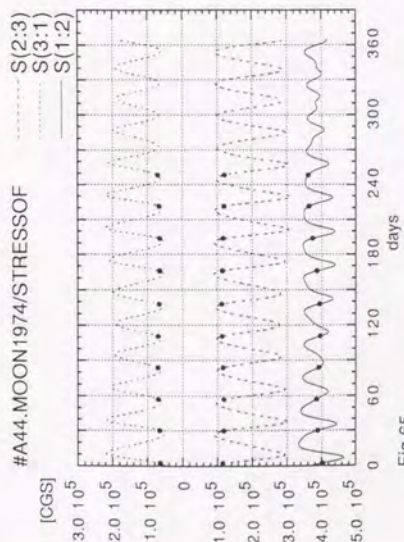
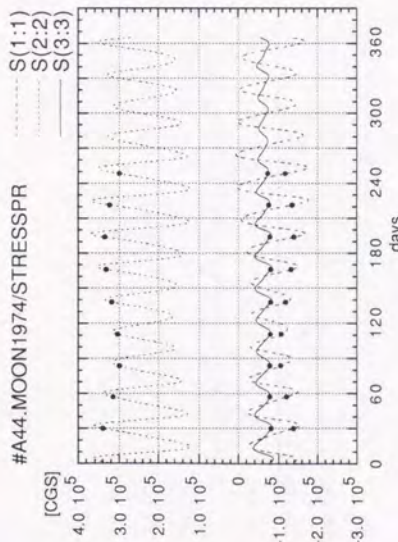


Fig.65

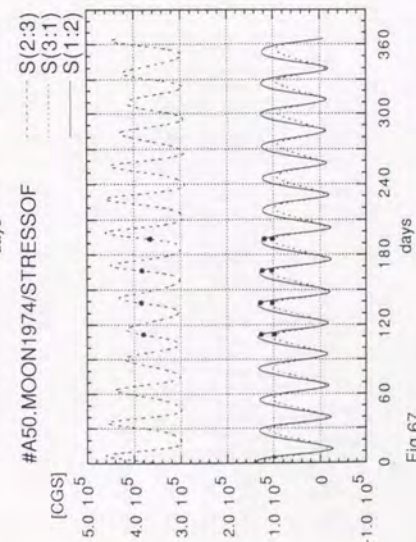
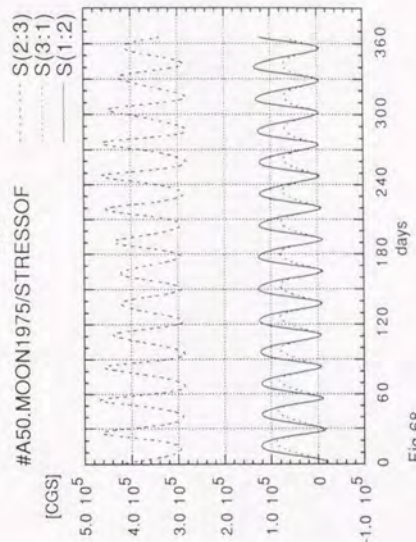
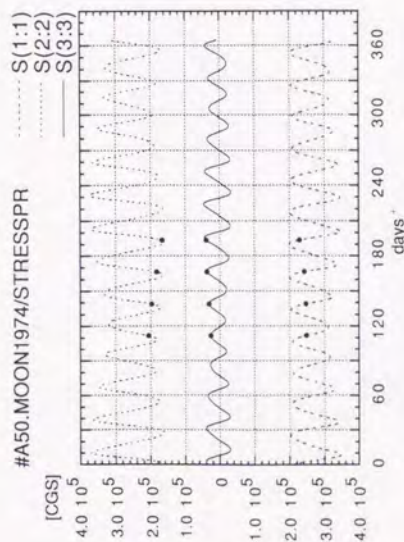
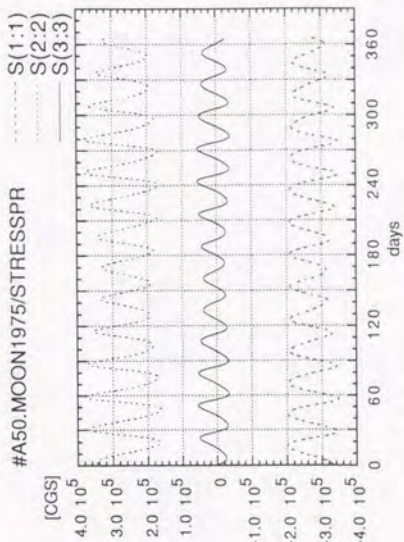


Fig.68

Fig.67

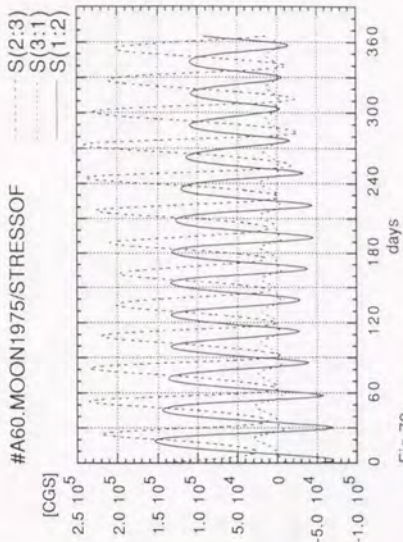
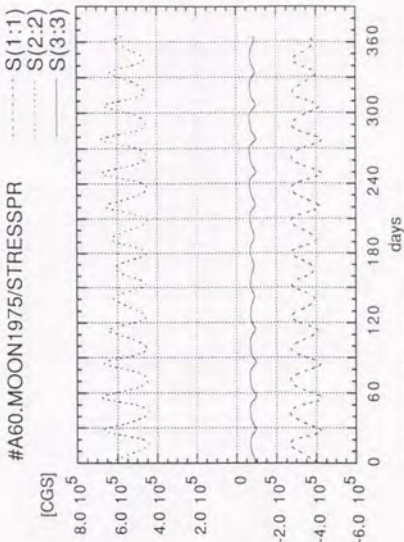


Fig.70

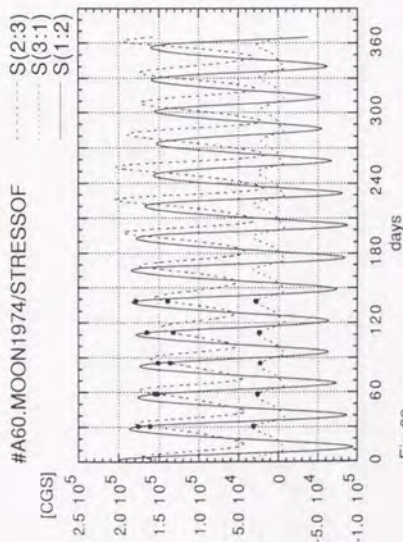
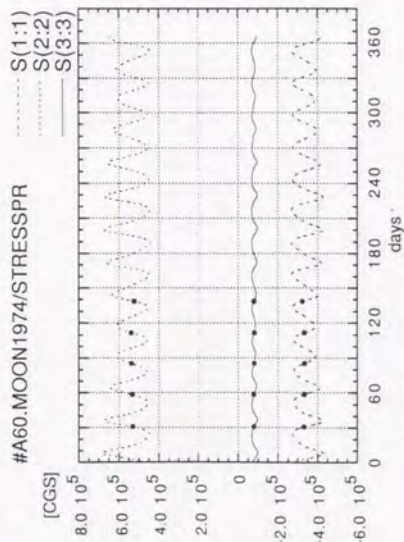


Fig.69

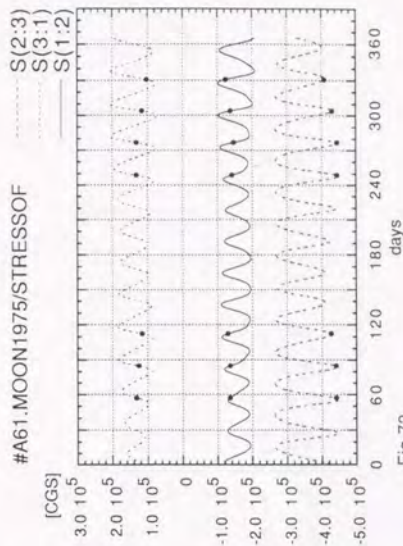
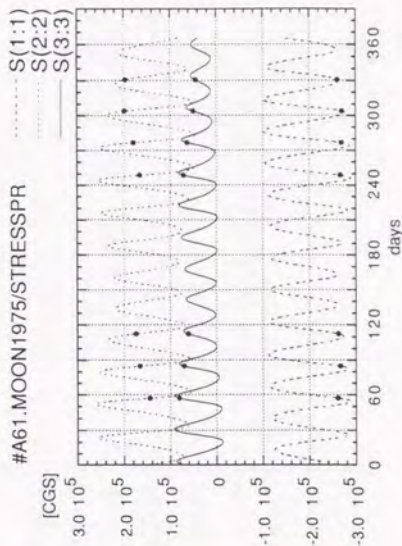


Fig.72

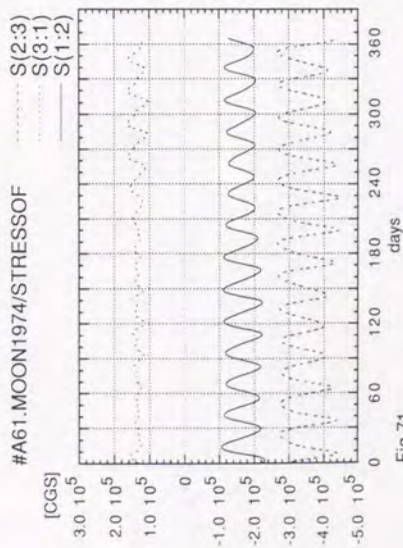
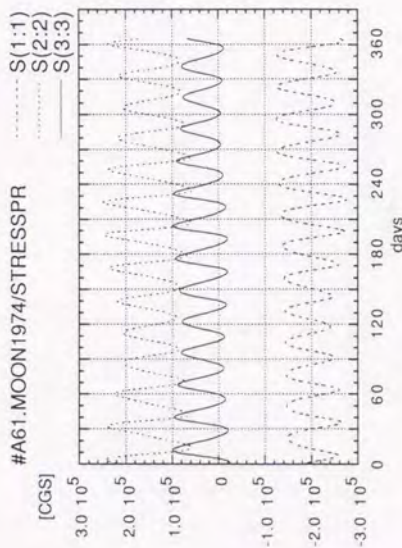


Fig.71

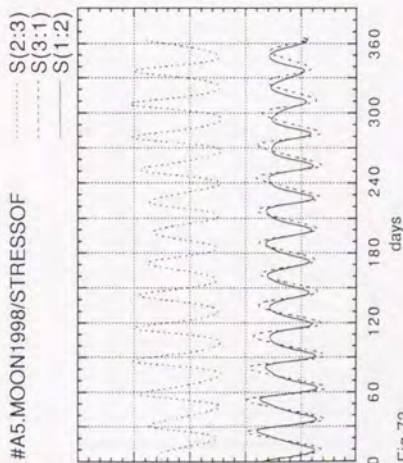
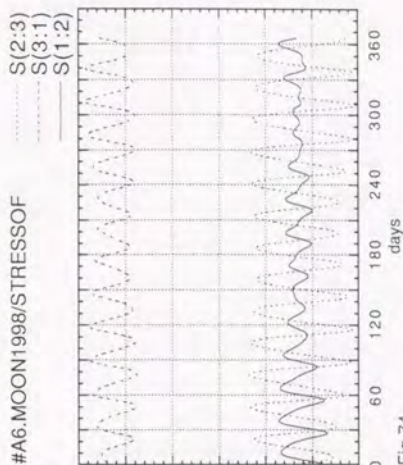
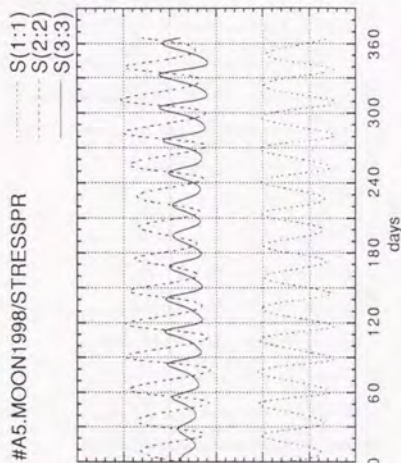
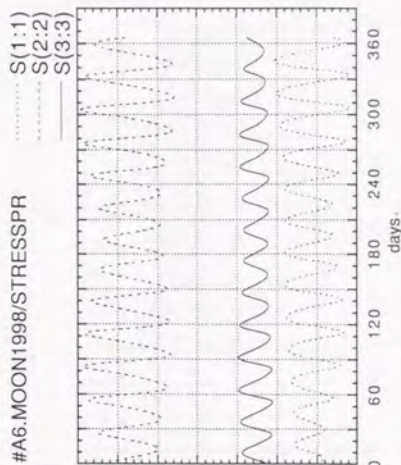


Fig.74

Fig.73

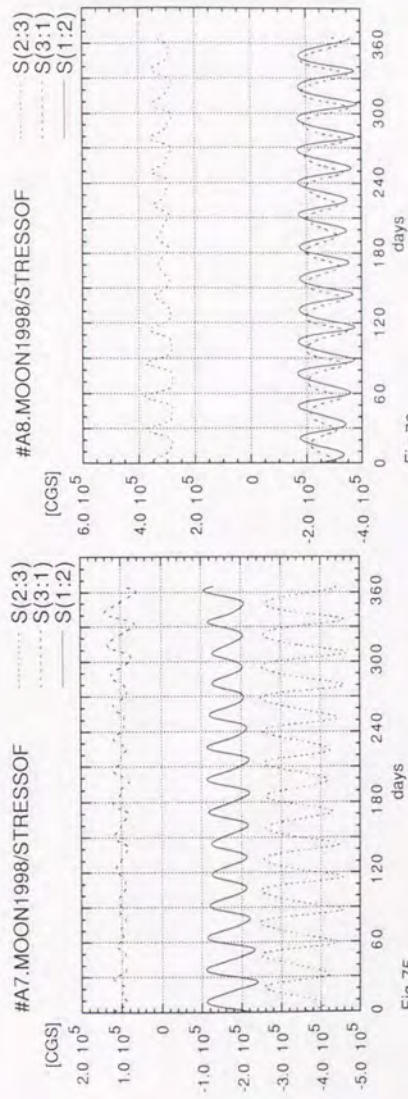
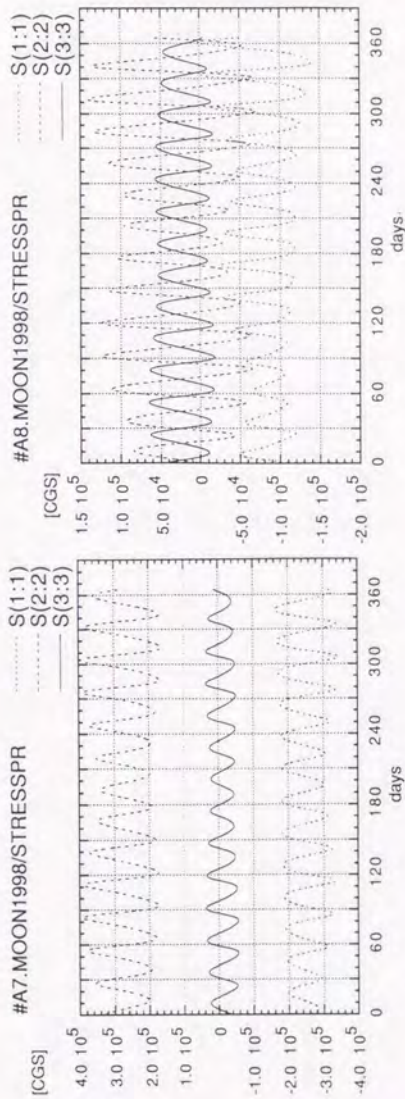


Fig.75

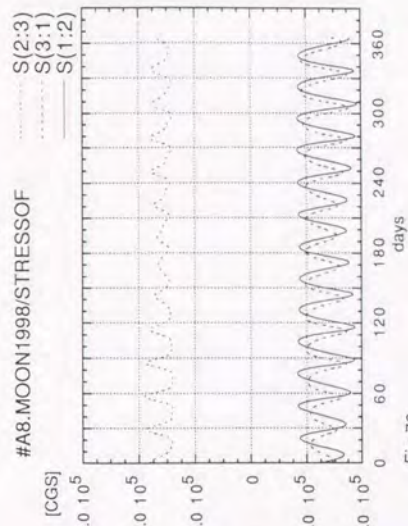
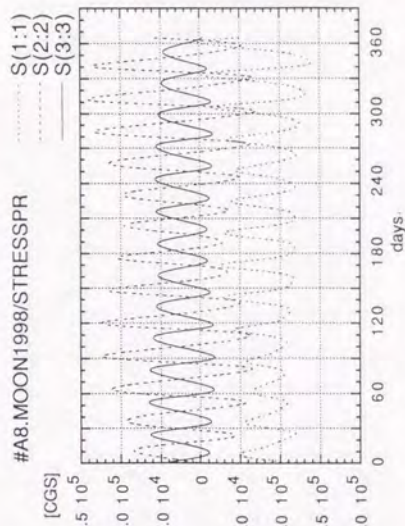


Fig.76

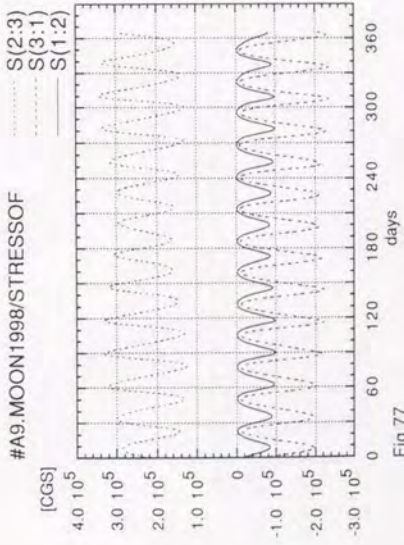
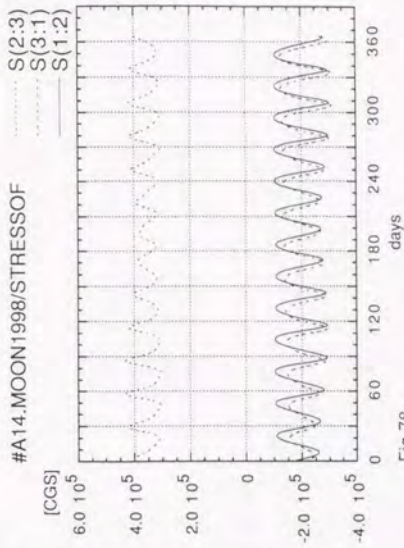
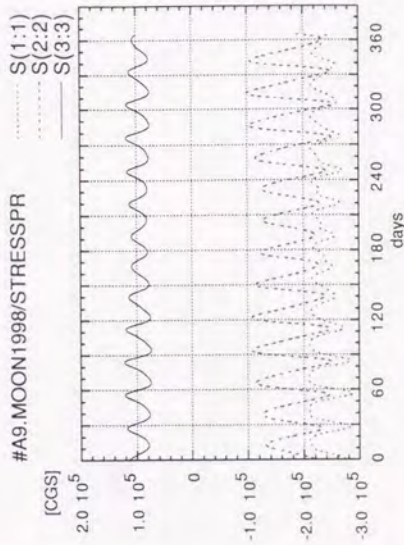
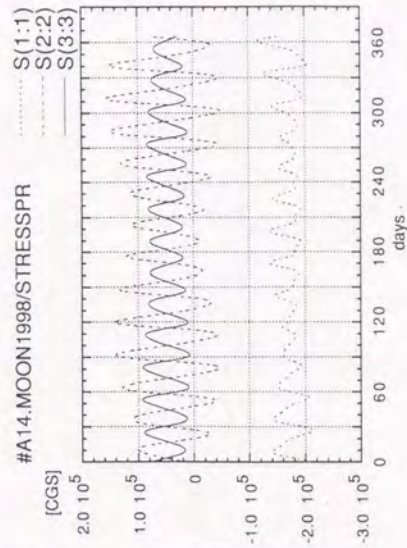


Fig.78

Fig.77

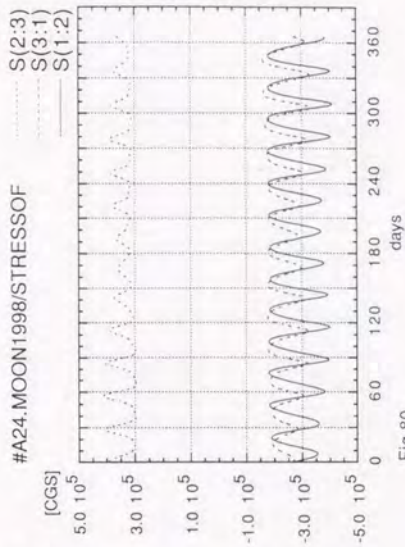
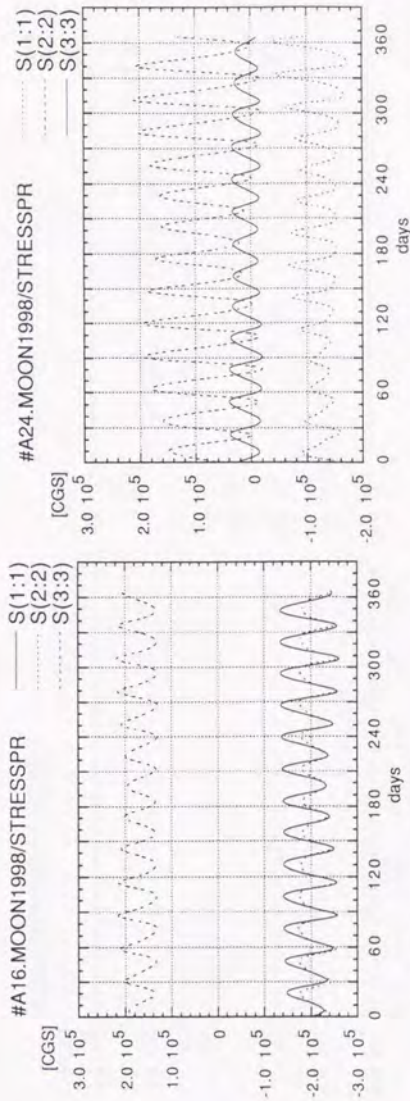


Fig.80

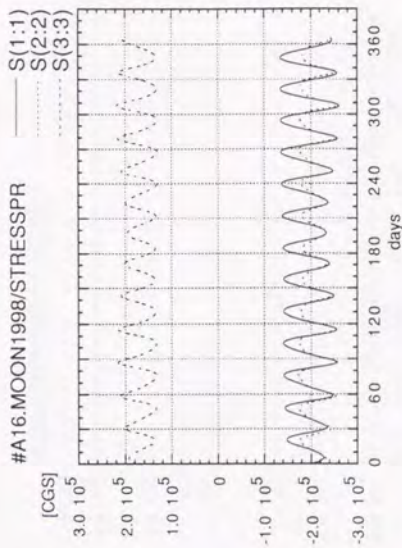


Fig.79

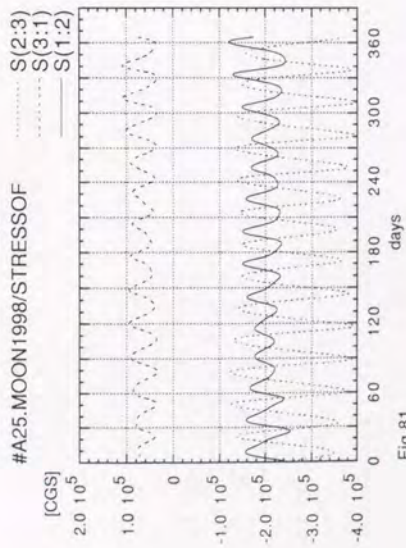
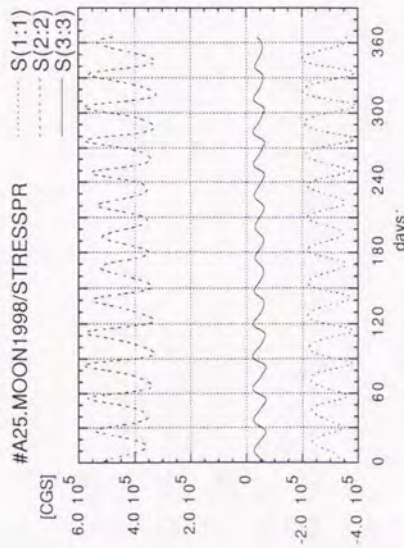
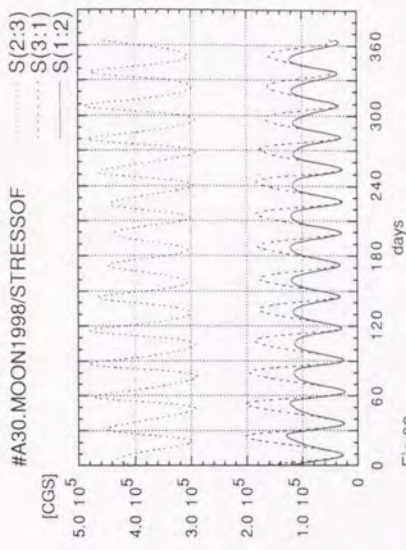
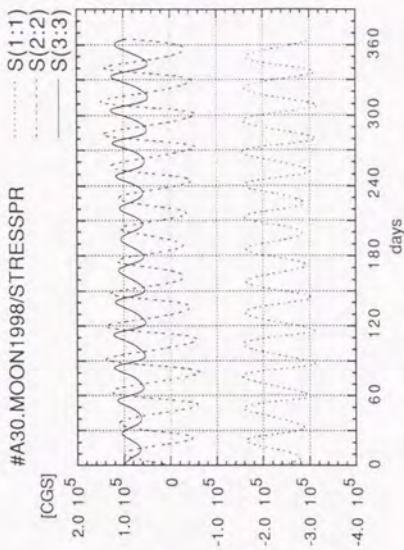


Fig.82

Fig.81

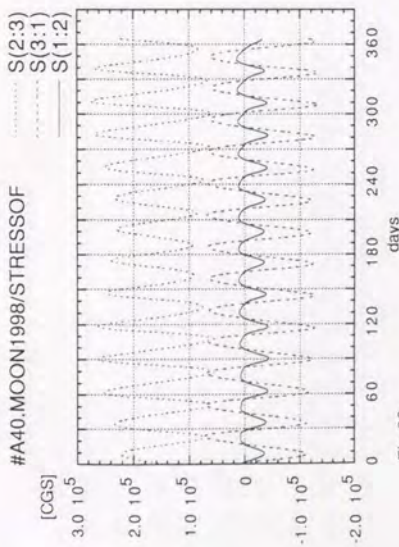
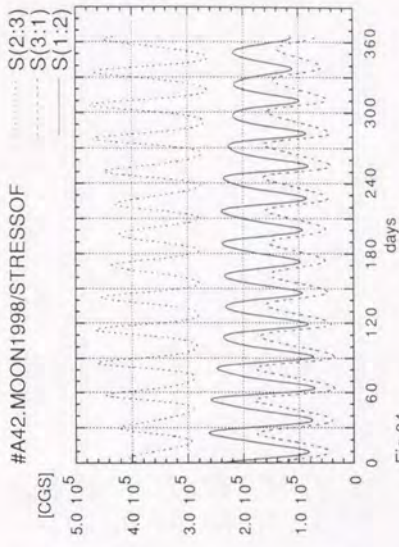
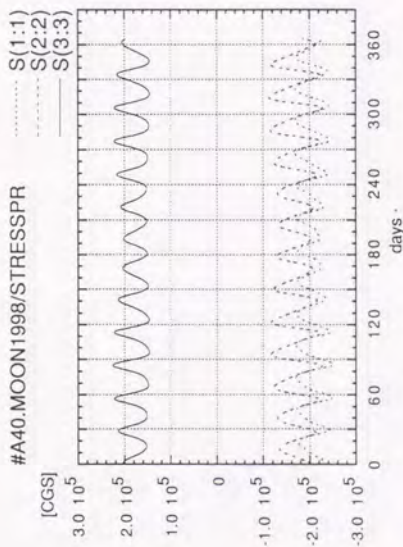
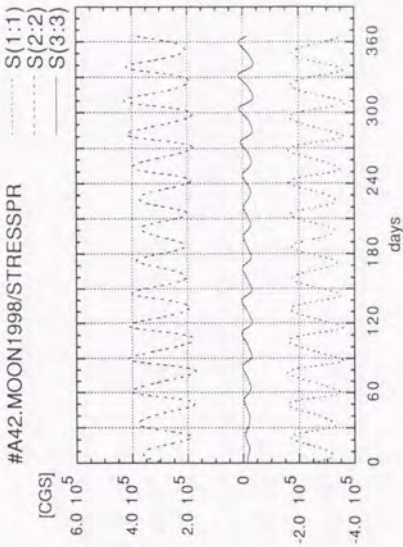


Fig.84

Fig.83

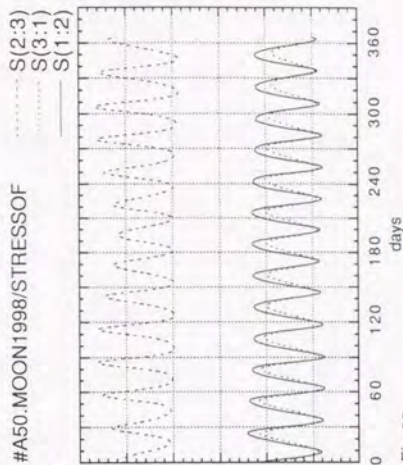
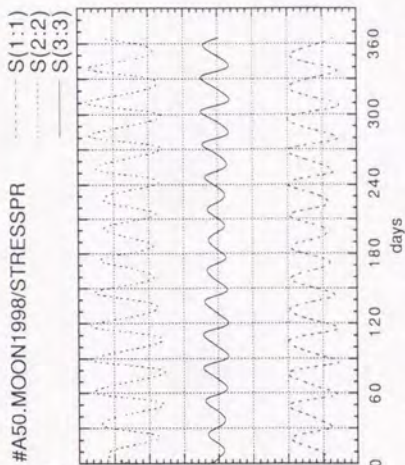


Fig.86

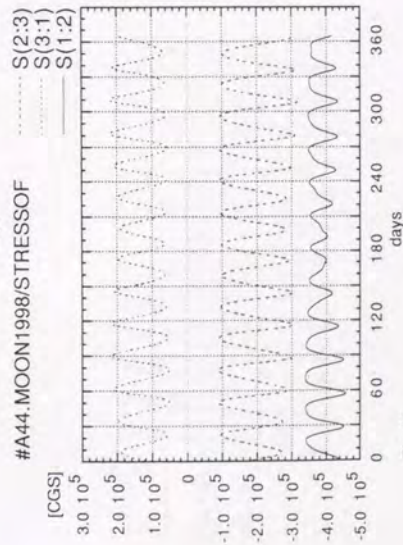
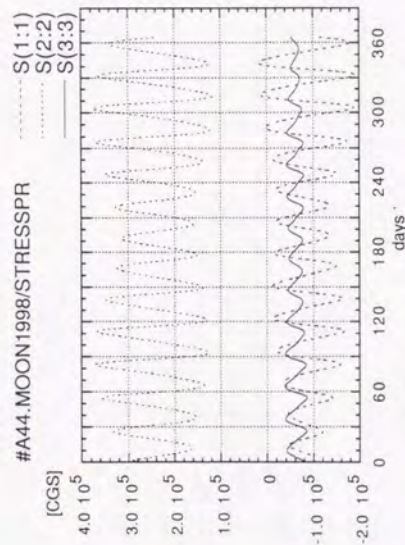


Fig.85

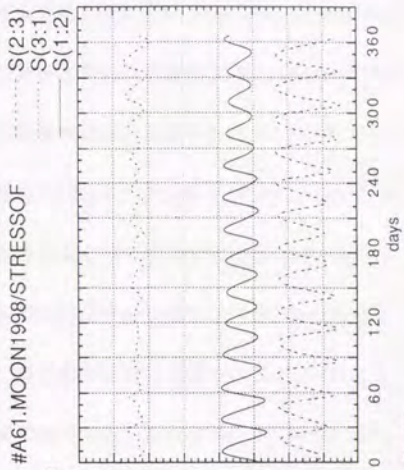
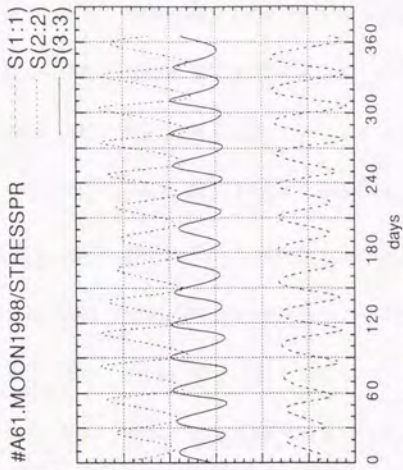


Fig.88

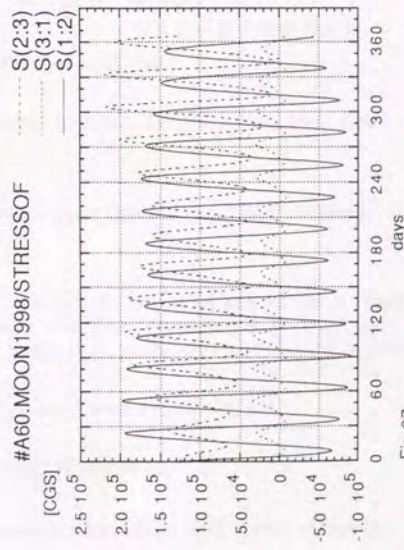
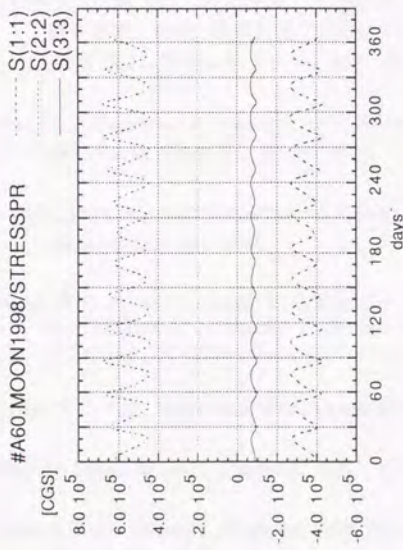


Fig.87

参考文献

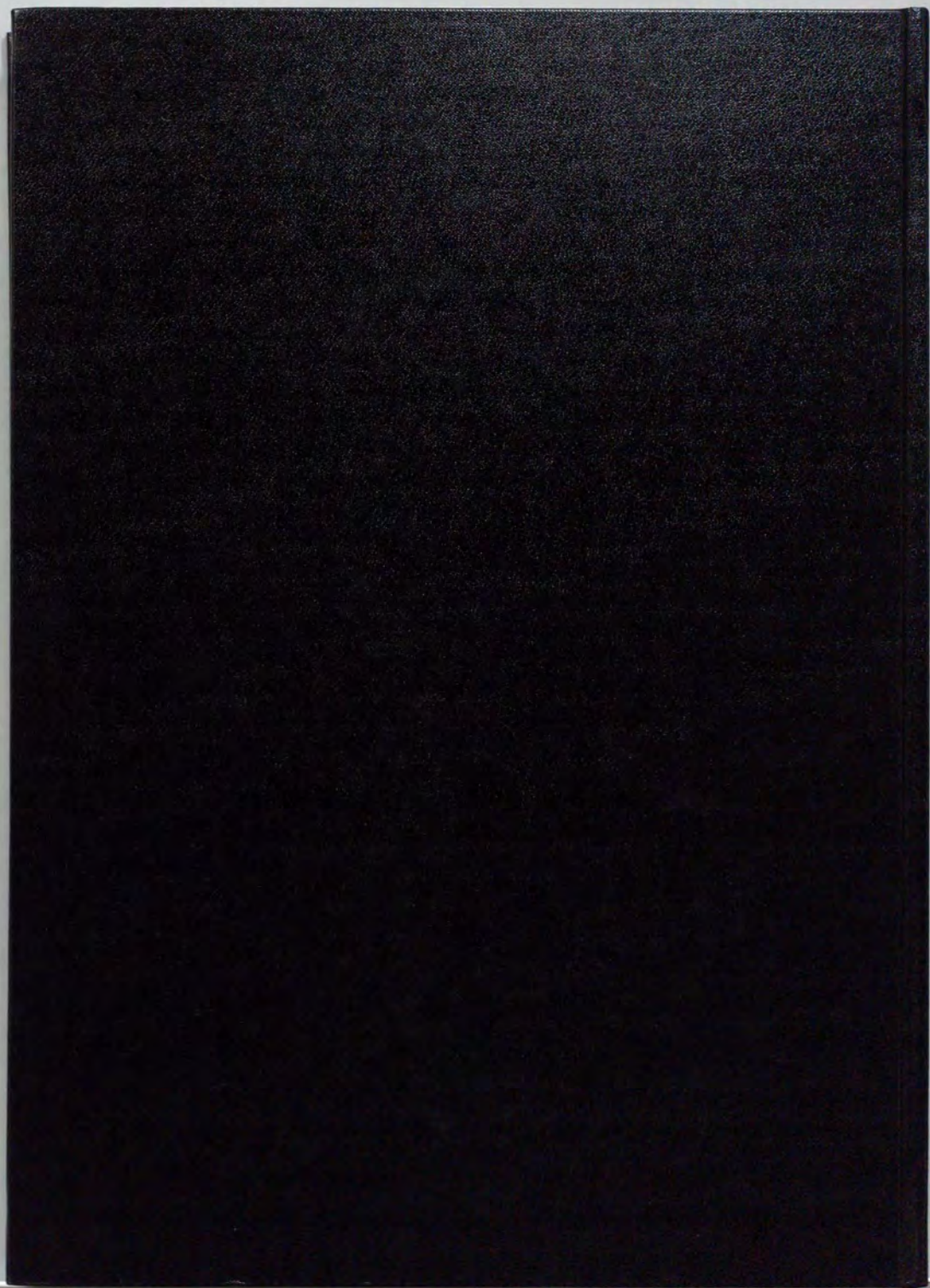
- アカシ (株), 1993a. 第 16 回ベネトレータ搭載地震計設計会議資料(V243-M-930617-1).
- アカシ (株), 1993b. 第 18 回ベネトレータ搭載地震計設計会議資料(V243-M-930823-1).
- アカシ (株), 1993c. 第 20 回ベネトレータ搭載地震計設計会議資料(V243-M-931122-1).
- アカシ (株), 1994a. 第 21 回ベネトレータ搭載地震計設計会議資料(V243-M-940124-1).
- アカシ (株), 1994b. 第 25 回ベネトレータ搭載地震計設計会議資料(V243-M-940705).
- アカシ (株), 1994c. 第 27 回ベネトレータ搭載地震計設計会議資料(V243-M-940922).
- アカシ (株), 1994d. 第 28 回ベネトレータ搭載地震計設計会議資料(V243-M-941024).
- アカシ (株), 1994e. 第 29 回ベネトレータ搭載地震計設計会議資料(V243-M-941122).
- 青木治三, 1990. 微小地震検出のためのノイズ解析に関する一考察. *地震*, **43**: 283-285.
- 荒木博志, 田中 智, 早川雅彦, 安部正真, 岡田達明, 藤村彰夫, 水谷 仁, 鹿熊英昭. 1992. '地震計落下実験について'. ベネトレーター貫入実験報告書 (第 12 回) 平成 4 年 12 月, SES-TD-92-014, pp.97-102.
- Araki, H., J. Terazono, H. Mizutani. 1993. Re-analysis of Apollo SP seismic data. *Proc. 26th ISAS Lunar Planet. Sci. Symp.*: 76-79.
- Araki, H. 1994. Seismic Periodicity of A33 Deep Moonquake Group. *Proc. 27th ISAS Lunar Planet. Sci. Symp.*: 7-10.
- Brown, W. E. Jr., G. F. Adams, R. E. Eggleton, P. Jackson, R. Jordan, M. Koblrick, W. J. Peeples, R. J. Phillips, L. J. Porcello, G. Shaber, W. R. Sill, T. W. Thompson, S. H. Ward, and J. S. Zelenka. 1974. Elevation profiles of the Moon. *Proc. Lunar Sci. Conf.*, **5th**: 3037-3048.
- Cassini, J. C. 1721. *Memoires de l'Academie Royale des Science a Paris*. 108-126.
- Chapront-Touze, M. and J. Chapront. 1982. ----> 第 5 章の付録 1
- Chapront-Touze, M. and J. Chapront. 1983. The lunar ephemeris ELP 2000. *Astron. Astrophys.* **124**: 50-62.
- Cheng, C. H. and M. N. Toksoz. 1978. Tidal Stresses in the Moon. *J. Geophys. Res.* **83**: 845-853.

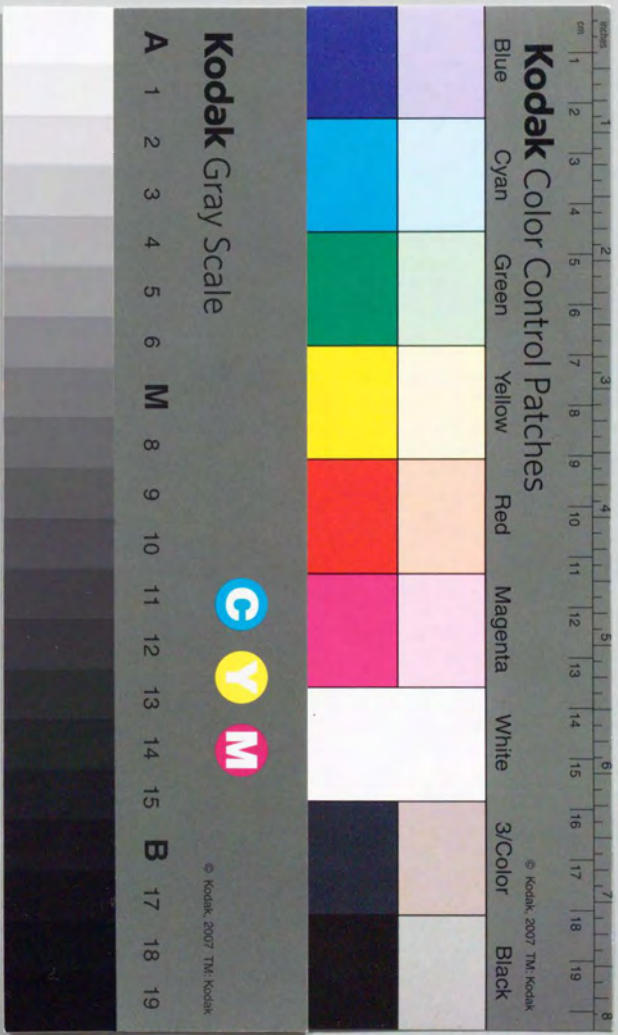
- Cooper, M. R., R. L. Kovach, and J. S. Watkins. 1974. Lunar Near-Surface Structure. *Rev. Geophys. Space Phys.* **12**: 291-308.
- Dainty, A. M., M. N. Toksoz, K. R. Anderson, P. J. Pines, Y. Nakamura, and G. Latham. 1974. Seismic scattering and shallow structure of the Moon in the Oceanus Procellarum. *Moon* **9**: 11-29.
- Dainty, A. M. and M. N. Toksoz. 1977. Elastic wave propagation in a highly scattering medium: A diffusion approach. *J. Geophys.* **43**: 375-388.
- Dickey, J. O., P. L. Bender, J. E. Faller, X X Newhall, R. L. Ricklefs, J. G. Ries, P. J. Shelus, C. Veilet, A. L. Whipple, J. R. Wiant, J. G. Williams, and C. F. Yoder. 1994. Lunar Laser Ranging: A Continuing Legacy of the Apollo Program. *Science* **265**: 482-490.
- Duennebier, F. and G. H. Sutton. 1974a. Thermal Moonquakes. *J. Geophys. Res.* **79**: 4351-4364.
- Duennebier, F. and G. H. Sutton. 1974b. Meteoroid Impacts Recorded by the Short-Period Component of Apollo 14 Lunar Passive Seismic Stations. *J. Geophys. Res.* **79**: 4365-4374.
- Duennebier, F. 1976. Thermal movement of the regolith. *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.*, 7th: 1073-1086.
- Ferrari, A. J., W. S. Sinclair, W. L. Sjogren, J. G. Williams, and C. F. Yoder. 1980. Geophysical parameters of the Earth-Moon system. *J. Geophys. Res.* **85**: 3939-3951.
- Goins, N. R., A. M. Dainty, and M. N. Toksoz. 1981. Lunar seismology: The internal structure of the Moon. *J. Geophys. Res.* **86**: 5061-5074.
- Horvath, P. 1979. Analysis of the Lunar seismic signals - Determination of the instrumental parameters and seismic velocity distributions. Doctoral Thesis. Univ. of Texas at Dallas.
- King, R. W., C. C. Counselman III, and I. I. Shapiro. 1976. Lunar dynamics and selenodesy: results from analysis of VLBI and laser data. *J. Geophys. Res.* **81**: 6251-6256.
- Kovach, R. L., and J. S. Watkins. 1973a. Apollo 17 seismic profiling-probing the Lunar crust. *Science* **180**: 1063-1064.
- Kovach, R. L., and J. S. Watkins. 1973b. The structure of the Lunar crust at the Apollo 17 site. *Geochim. Cosmochim. Acta.* **37**(Suppl.4): 2549-2560.
- Koyama, J. and Y., Nakamura. 1980. Focal mechanism of deep moonquakes. *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.*, 11th: 1855-1865.
- Lammlein, D., G. V. Latham, J. Dorman, Y. Nakamura, and M. Ewing. 1974. Lunar seismicity, structure and tectonics. *Rev. Geophys. Space Phys.* **12**: 1-21.
- Lammlein, D. 1977. Lunar seismicity and tectonics. *Phys. Earth Planet. Inter.* **14**: 224-273.
- Latham, G. V., M. Ewing, F. Press, G. Sutton. 1969. The Apollo Passive Seismic Experiment. *Science* **165**: 241-250.

- Latham, G. V., M. Ewing, F. Press, G. Sutton, J. Dorman, Y. Nakamura, N. Toksoz, R. Wiggings, J. Derr, and F. Duennebieer. 1970a. Passive seismic experiment. *Science* **167**: 455-457.
- Latham, G. V., M. Ewing, F. Press, G. Sutton, J. Dorman, Y. Nakamura, N. Toksoz, R. Wiggings, and R. Kovach. 1970b. Passive seismic experiment. *NASA SP- 235*: 39-53.
- Lehner, F. E., E. O. Witt, W. F. Miller, and R. D. Gurney. 1962. A seismometer for Lunar experiments. *J. Geophys. Res.* **67**: 4779-4786.
- Lognonne, P. and B. Mosser. 1993. Planetary Seismology. *Surveys of Geophysics* **14**: 239-302.
- McAllister, B. D., J. Kerr, J. Zimmer, R. L. Kovach, and J. S. Watkins. 1969. A seismic refraction system for lunar use. *IEEE Trans. Geosci. Electron. GE-7*: 164-171.
- Mizutani, H. and D. F. Newbigging. 1973. Elastic wave velocities of Apollo 14, 15 and 16 rocks and thermal conductivity profile of the lunar crust. *Geochim. Cosmochim. Acta.* **37**(Suppl.4): 2601-2609.
- 名出 and 田中, 1994. "ベネトレータ計測回路使用について". (日産(株)から宇宙研、名大への私信資料)。
- Nakamura, Y., G. Latham, D. Lammlin, M. Ewing, F. Duennebieer, and J. Dorman. 1974. Deep Lunar interior inferred from recent seismic data. *Gephys. Res. Lett.* **1**: 137-140.
- Nakamura, Y. 1976. Seismic energy transmission in the Lunar surface zone detected from siganls generated by movement of Lunar rovers. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **66**: 593-606.
- Nakamura, Y. 1977. Seismic energy transmission in an intensely scattering enviroment. *J. Geophys. Res.* **43**: 389-399.
- Nakamura, Y. 1978. A1 moonquakes; Source distribution and mechanism. *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 9th*: 3589-3607.
- Nakamura, Y., G. V. Latham, H. J. Dorman. 1980. How we processed Apollo Lunar seismic data. *Phys. Earth. Planet. Inter.* **21**: 218-224.
- Nakamura, Y., G. V. Latham, H. J. Dorman. 1982. Apollo Lunar seismic experimet-Final summary. *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 13th, J. Geophys. Res.* **87**: A117-123.
- Nakamura, Y. 1983. Seismic velocity structure of the Lunar mantle. *J. Geophys. Res.* **88**: 677-686.
- Nakamura, Y. 1991. personal communication by e-mail(12.28).
- NEC, 1994a. 日本電気(株), LUNAR-Aシステム確認書(LUNAR-A-100)第7版('94.12.14).
- NEC, 1994b. 日本電気(株), LUNAR-A最新軌道報告書(LUNAR-A-1210)第3報.
- NEC, 1994c. 日本電気(株), LUNAR-A観測運用系ベネトレータ運用解析4(LUNAR-A-1315).

- NEC, 1994d. 日本電気 (株), 技術連絡書 (月震観測アルゴリズム確認、優先順位判定アルゴリズム) .
- NEC, 1994e. 日本電気 (株), 技術連絡書 (観測アルゴリズムパラメータに関する質問) .
- NM, 1992. 日産自動車 (株), LUNAR-Aベネトレータモジュールシステム確認書(LPM-000, 671-Y-4-078).
- NM, 1994a. 日産自動車 (株), ベネトレータアナログトリガ回路試験報告(622-M-6-125).
- NM, 1994b. 日産自動車 (株), LPM設計現状(672-M-6-279).
- Oberst, J. 1987. Unusually high stress drop associated with shallow moonquakes. *J. Geophys. Res.* **92**: 1397-1405.
- Oberst, J. and Y. Nakamura. 1991. A Search for Clustering among the Meteoroid Impacts Detected by the Apollo Lunar Seismic Network. *Icarus* **91**: 315-325.
- Press, F., P. Buwalda, and M. Newgebauer. 1960. A Lunar seismic experiment. *J. Geophys. Res.* **65**: 3097-3105.
- 斉藤正徳. 1978. 漸化式デジタル・フィルターの自動設計. *物理探鉱*, **31**: 240-263.
- Saito, M. 1983. 本論5章の式(5-2-12)~(5-2-20)を解くプログラム。宇宙研の大型計算機(M1800)にある。
- Sutton G. H. and G. V. Latham. 1964. Analysis of a feedback-controlled seismometer. *J. Geophys. Res.* **69**: 3865-3882.
- 竹内 均. 1972. 地球科学における諸問題.(裳華房): 第3章.
- Takeuti, H. 1950. On the Earth tide of the compressible earth of variable density and elasticity. *Eos Trans. AGU.* **31**: 651-689.
- 天体位置表. 1994.(海上保安庁). 平成6年度: pp.403-443.
- 寺藺淳也. 1993. 月探査計画のための深発月震解析. 東京大学. 修士論文.
- Tanaka, S., A. Fujimura, and H. Mizutani. 1990. The internal structure of the moon. *Proc. 23rd ISAS Lunar Planet. Sci. Symp.*: 277-282.
- Toksoz, M. N., A. M. Dainty, S. C. Solomon, and Kenneth R. Anderson. 1974. Structure of the Moon. *Rev. Geophys. Space Phys.* **12**: 539-567.
- Toksoz, M. N., N. R. Goins, and C. H. Cheng. 1977. Moonquakes: Mechanism and relation to tidal stresses. *Science.* **196**: 979-981.

- Turcotte, D. L. and G. Schubert, 1982. *Geodynamics-Application of Continuum Physics to Geological Problems*. Chap. 2. Willey, New York.
- Wang, H., T. Todd, D. Richter, and G. Simmons. 1973. Elastic properties of plagioclase aggregates and seismic velocities in the moon. *Geochim. Cosmochim. Acta.* **37**(Suppl.4): 2663-2671.
- Watanabe, J. 1993. Activity of Leonids Meteor Shower and its Effect to the Lunar-A Mission. 太陽系科学シンポジウム (平成5年度) . 80-83.
- Watkins, J. S. and R. L. Kovach. 1973. Seismic investigation of the lunar regolith. *Geochim. Cosmochim. Acta.* **37**(Suppl.4): 2561-2574.
- Wood, J. A., J. S. Dickey, U. B. Marvin, and B. N. Powell. 1970. Lunar anorthosites and a geophysical model of the Moon. *Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf.*, pp.965-988.
- 山田功夫、水谷仁、藤村彰夫、早川雅彦、田中 智、荒木博志. 1992. LUNAR-A月震計の開発. 第1回科学衛星、宇宙観測シンポジウム (平成4年度) .
- Yamada, I. 1994. personal communication.





Kodak Gray Scale

C **Y** **M**

© Kodak, 2007 TM, Kodak

A 1 2 3 4 5 6 **M** 8 9 10 11 12 13 14 15 **B** 17 18 19

