



Title	新しいアポロ月震カタログから明らかになった深発月震の周期性
Author(s)	小山, 順二; KOYAMA, Junji
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 67, 359-373
Issue Date	2004-03-15
DOI	<a href="https://doi.org/10.14943/gbhu.67.359">https://doi.org/10.14943/gbhu.67.359</a>
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/14355">https://hdl.handle.net/2115/14355</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	67_p359-373.pdf



## 新しいアポロ月震カタログから明らかになった深発月震の周期性

小山 順二

北海道大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

(2004年1月9日受理)

### Periodicity of Deep Moonquakes Revealed from Updated Event Catalog of Apollo Passive Seismic Experiment

Junji KOYAMA

Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University

(Received January 9, 2004)

A new computer search for the Apollo lunar seismic events revealed that about 60% of the identified and catalogued events are deep moonquakes (Nakamura, 2003). This makes the number of identified deep moonquakes 7245 from previous 1360 out of all identified 12558 events. In order to confirm monthly periodicity of deep moonquake occurrences, an analysis using the method of Poincare mapping is made on the new catalog. The analysis reveals (1) most of the groups show the monthly periodicity but the fluctuation of the periodicity is unexpectedly large, (2) most of the groups show successive activities within a few days, (3) some show the semi-monthly periodicity about 14 days, (4) some show multiple activities spread out over a month, (5) some show nearly random occurrences and (6) these periodicities are found not only for the groups of deep moonquakes previously identified but also for the newly identified groups. The mechanism of these periodic/apperiodic activities of deep moonquakes is considered in relation to the chaotic behavior excited by the external tidal forces.

#### I. はじめに

1969年から1977年の8年余にわたるアポロ月地震観測では、月面上に設置された4つの観測点から、地震観測連続データが地球に伝送されてきた (Latham et al., 1971). そのデータから、長周期地震計で12,558個の月震記録が得られている。この観測記録が最近再解析されて、新しい月震カタログが編集された (Nakamura, 2003). このイベントカタログは計算機を用いた観測波形の相関から定量的に解析されたもので、従来の見た目による解析ではわからなかった新たな発見が数多くある。全期間に観測された12,558個のイベントのうち、少なくともその約6割にあたる7,245個が深発月震であったことがわかった。深発月震は波形の相関がよいイベントが一月に

一回ないし数回発生するものである。観測波形の相関がよいことから、同一の震源域から周期的に深発月震が発生していると考えられた(Lammlein, 1977)。新しいカタログでは従来知られていた深発月震のグループ(A 01 から A 114)が 77 グループに再編成された。さらに、複数の観測点で記録されたものだけでも新たなグループが、A 201 から A 288 の 88 グループ、同定された。これらの 165 グループから従来同定されていたイベントの 4 倍以上の 5,825 イベントが発生している。残りは深発月震であるが、震源決定の手がかりがないイベントである。

最も活発な活動を示した深発月震 A 01 には波形が反転しているイベントがあることが知られていた(Nakamura, 1978)。さらに詳しく調べると、発生メカニズムが潮汐の位相につれて変化していることがわかった。しかし、A 18 とか A 33 のように周期性が非常に明瞭で、ほとんど同じ潮汐位相で発生しているグループもあったから、月にはたらく地球の潮汐力がトリガーとして作用しているという考えもあった。したがって、従来深発月震の発生には、(A)月-地球間にはたらく潮汐力による(Nakamura, 1978; Koyama and Nakamura, 1980)、(B)テクトニック応力に潮汐力がトリガーとしてはたらく(Toksöz et al., 1977)、(C) (A)と(B)の両方のメカニズムがある(Araki, 2001)とする考えがあった。これらの結論に至るには、従来の見た目のイベント同定による月震カタログの制約が強く現れている。今回、新しい月震カタログを見ると同定されたイベント数が飛躍的に増えて、今まで規則正しい周期性を示していた深発月震のグループにも発生周期にゆらぎがあることがわかった(小山, 2003)。ここでは新しい月震カタログに基づき、イベントが数多く発生した深発月震のグループについて、その発生時刻の周期性を再調査する。そして、深発月震のメカニズムを考えることにする。

## II. 深発月震の周期性解析

深発月震の発生には、周期的・非周期的活動の成分がある(小山, 2002, 2003)。これらの時系列の性質を一般的に定量化するために、次のような Poincaré 写像を考える; ある運動の軌跡  $x_i$  がくり返し特定の面をよぎるとき、その  $k$  番目と  $k+1$  番目の軌跡が写像  $f$  で

$$x_i(k+1) = f(x_i(k))$$

と表わされるとする。これは複雑な運動の軌跡を  $x_i(k)x_i(k+1)$  平面上(位相空間)の点の集まりで表現するものである。今  $x_i(k)$  を  $i$  グループの深発月震の  $k$  と  $k-1$  番目のイベントの発生時刻の差とする。同様に  $x_i(k+1)$  は  $k+1$  と  $k$  番目の時間差である。このような  $x_i(k)x_i(k+1)$  面上での点の集まりは Lorentz 写像(Turcotte, 1997)と呼ばれ、複雑系の時系列解析に良く使われる。

もしイベントが完全に周期的に発生すれば、 $x_i(k) = x_i(k+1)$  となるから、全ての軌跡は位相空間の 1 点に集中する。これはアトラクター点と呼ばれる。Fig. 1 に示す A 39 グループの活動がこの性質を示している。横軸縦軸がそれぞれ約 27 日に集中した点の集まりを見出せる。この周期は月-地球間の潮汐力の周期性である。次に集中しているのは周期が約 14 日の半月の周期性である。このように明瞭な半月の周期性は今まではほとんど見られなかった。ただし、Fig. 1 では(以後

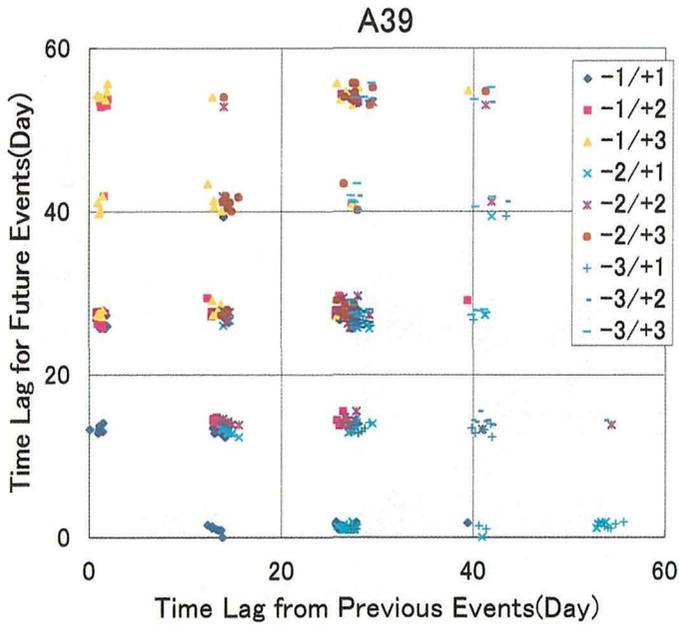


Fig. 1. Lorentz plot of time lags of deep moonquake occurrences for category A39. Time lags from each event to the first, second and third future events are mapped against these to the first, second and third past events. Monthly periodicity of about 27 days, semi-monthly periodicity of about 14 days, and successive activity in every semi-monthly and monthly periodicities are plotted like as attractor points.

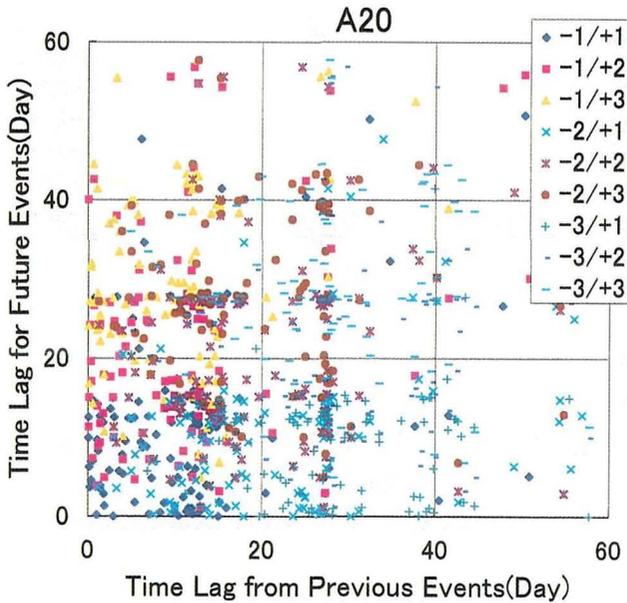


Fig. 2. Lorentz plot for category A20, as in Fig.1. Nearly random nature of A20 events is found in this analysis.

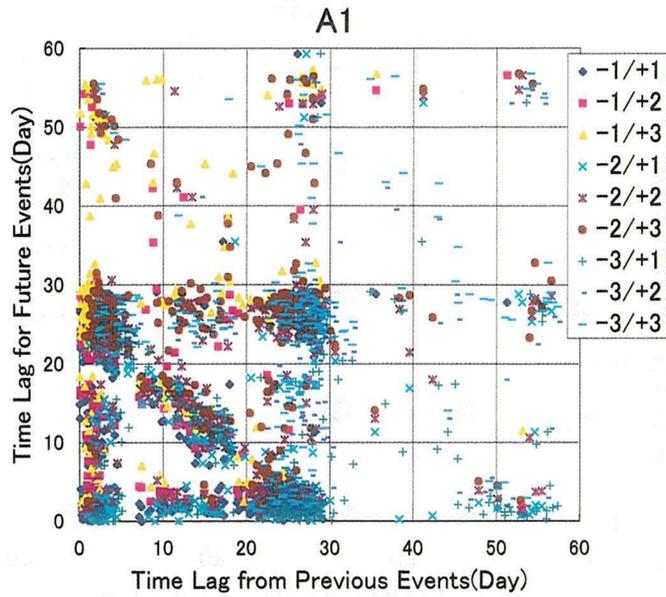


Fig. 3. Lorenz plot for category A01. Large scattering of the periodicities is found, though the plots are not like at random manner as in Fig.2.

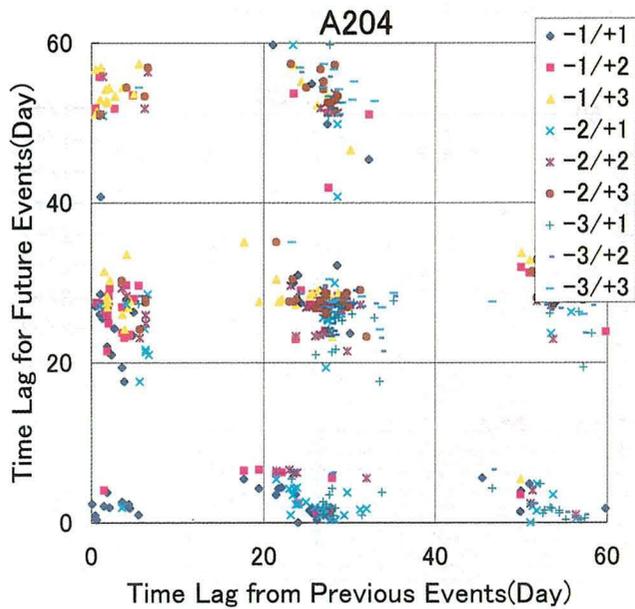


Fig. 4. Lorenz plot for new category A204. Periodic nature like A39 in Fig.1 is demonstrated.

同じ), 時間差を取る差分を前後3回まで考えているから, アトラクター点は $x_i(k)x_i(k+1)$ 面上で周期的にくり返し現れている. また, 一月・半月の周期性で数日の間に2回3回と引き続き発生するイベントがあることもわかる. それらは図中の(14, 0), (27, 0), (0, 14), (0, 27)付近にプロットされる. それらも上と同じ理由でくり返し現れる. 集中している点のばらつきは, 発生周期性のゆらぎである. その大きさは2ないし3日であることが見て取れる.

もしイベントが完全にランダムに発生しているとすれば, 時間差もランダムになるから,  $x_i(k)x_i(k+1)$ 平面状の点の分布は一様になるだろう. Fig. 2にA20グループの例を示す. ここで見られる点の分布は特定の周期性のゆらぎが大きいから, ばらばらに分布するように見えるわけではない. その理由は次のFig. 3に示す. 深発月震のこのようなランダムな発生は従来ほとんど知られていなかったもので, 見た目の相関から特定のグループのイベントを探すときに暗黙に周期性を考えて, イベントの相関を取っていたからだと考えられる.

Fig. 3に発生イベント数が最も多いA01グループの結果を示す. この図でも一月の周期性, 半月の周期性, 数日のうちに複数回発生する続発性, さらに, 一月の間にひろがって発生するイベントが見て取れる. 最後のイベントは(0, 27)と(27, 0)を結ぶ斜めの位置に発生していて, 月震が発生する潮汐の位相が1月の周期性のなかでずれていることに対応する. この図でわかることは, それぞれの周期性や続発性に非常に大きなゆらぎがあることである. これはこのグループのイベント数が他のグループに比べて圧倒的に多いから, また, 震源域の広がりもほかのグループに比べて大きいからであろう. しかし, Fig. 2と比べると, ゆらぎが大きいにもかかわらず,  $x_i(k)x_i(k+1)$ の位相空間で一様な分布を示し空間を埋め尽くしているわけではなく, A01のイベントはランダムに発生しているのではないことがわかる.

ここまで述べた新たに見つかった周期性や非周期性は従来知られていた深発月震のグループにばかり特徴的なものではなく, Nakamura(2003)で新たに見いだされた深発月震のグループでも同様である. Fig. 4にA204の結果を示すが, このグループはA39と同様に非常に規則正しい一月と半月の周期性を示している. また, Fig. 5に示すA256はA20のようにランダムに発生しているのが見て取れるし, Fig. 6に示すA218は発生周期性にゆらぎが大きく, Fig. 3に示したA01の発生に酷似している. したがって, ここで述べた周期性や非周期性は深発月震に普遍的・特徴的な性質であることが結論される.

### III. 深発月震発生の周期性

前節のLorentz写像から深発月震発生の特徴が次のように明らかになった:

- (1)一月の周期性
- (2)半月の周期性
- (3)数日のうちに続けて発生する続発性
- (4)一月のうちにひろがって発生する続発性
- (5)周期性の大きなゆらぎ

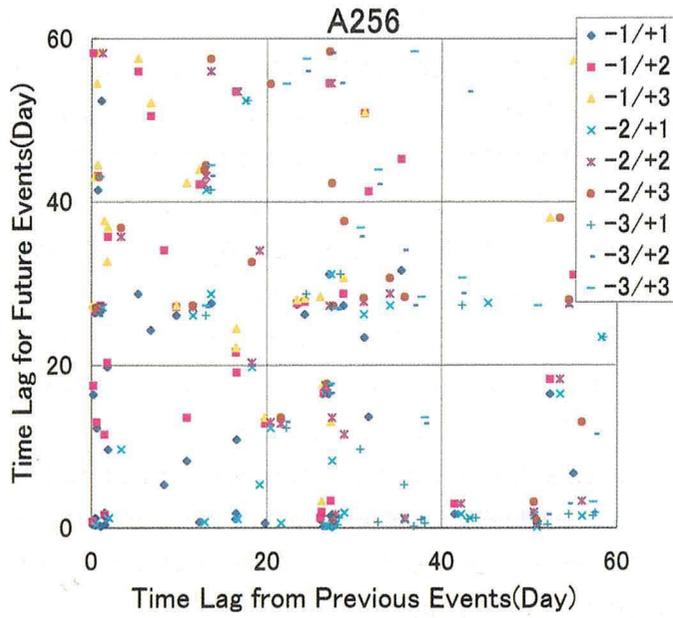


Fig. 5. Lorenz plot for new category A256. Random nature like A20 in Fig.2 is found.

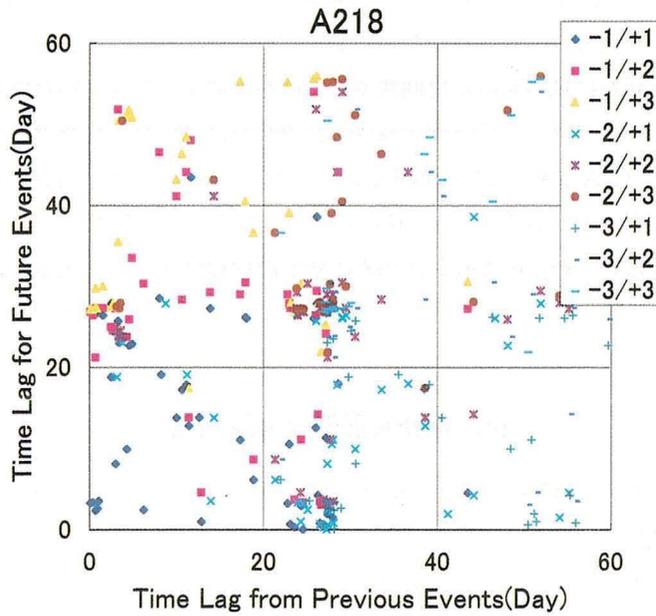


Fig. 6. Lorenz plot for new category A218. Large scatterings of periodicities like A01 in Fig.3 can be seen.

**Table 1.** Characteristic periodicities of deep moonquake activities.  
Modified from Nakamura(2004, unpublished data).

Category	Number	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	Remarks
A01	320	27.264	2.673	3.487	0.41	0.23	Diagonal
A05	76	27.939	1.628	1.725	0.26	0.06	
A06	132	27.636	2.739	4.120	0.33	0.23	Diagonal
A07	87	27.587	2.902	4.840	0.23	0.07	Scatter
A08	224	27.691	2.761	3.949	0.47	0.57	Random
A09	123	27.337	1.453	2.303	0.21	0.02	
A10	185	27.306	3.126	4.311	0.45	0.43	Random
A13	59	27.654	2.111	2.559	0.13	0.20	Random ?
A14	105	27.437	2.472	3.828	0.37	0.05	Scatter
A15	50	28.046	1.769	0.000	0.08	0.03	
A16	50	27.807	2.315	0.000	0.20	0.0	
A17	51	27.065	1.379	0.736	0.38	0.08	Semi
A18	143	27.403	1.999	3.438	0.42	0.15	Diagonal
A20	136	27.481	2.831	3.225	0.36	0.98	Random
A21	69	27.394	1.802	3.897	0.26	0.06	Scatter
A23	79	27.273	0.888	0.000	0.24	0.01	
A25	72	27.592	0.821	2.871	0.14	0.28	Diagonal
A26	61	27.339	3.735	3.922	0.39	0.48	Random
A33	60	27.793	1.990	1.859	0.14	0.12	
A35	71	27.888	2.949	2.846	0.43	0.54	Random
A39	63	27.516	0.951	0.681	0.29	0.41	Semi
A42	50	27.346	0.734	3.273	0.11	0.16	
A44	94	27.534	2.149	4.188	0.34	0.24	Diagonal
A51	50	27.238	2.502	4.341	0.25	0.07	Scatter
A75	49	27.144	1.927	2.231	0.31	0.14	Diagonal
A104	52	27.318	2.316	3.253	0.17	0.13	Diagonal
A201	69	27.449	2.755	4.199	0.21	0.23	
A204	88	27.579	2.838	0.880	0.43	0.02	Scatter
A218	74	27.418	2.361	3.476	0.32	0.26	Diagonal
A224	57	26.857	2.622	3.035	0.05	0.77	Diagonal
A256	57	27.771	2.563	3.306	0.68	0.51	Random

(1) Average value of monthly intervals(3/4 to 5/4 month), (2) standard deviation of (1), (3) standard deviation of semi-monthly intervals(1/4 to 3/4 month), (4) ratio of the number of intervals shorter than 1/4 month and (5) that in the semi-monthly intervals to the number of the monthly intervals. All units are in days. Remarks describe the characteristic periodicity of each activity to be semi-monthly, spread over one-month (diagonal), large scatterings and nearly random. Monthly periodicity can be found for almost all and not indicated.

#### (6)ランダムな発生

ここでの一月の周期性には、交点月周期 (27.212221 日) と近点月周期 (27.554550 日) がある。しかし周期性のゆらぎが大きいから今回はこの両者を区別しないで議論をすすめる。

Table 1 に新しい月震カタログで同定されたイベントが 50 以上の深発月震のグループについて、上に述べた周期性の特徴をまとめて示す。グループ名、発生したイベント数、(1)は一月の平均周期性、(2)はその標準偏差、(3)は半月の周期性の標準偏差、(4)は発生間隔が 1/4 月より小さな総数と(5)は発生間隔が 1/4 から 3/4 月の期間である総数を発生間隔が一月 (3/4 から 5/4 月) である総数で割った比を示す。一月の周期はほとんど全てのグループで明瞭である。半月の周期性が

明瞭なグループには、Semi の判定を記入した。ランダムと判定されたグループは、(4)と(5)の相対的なイベント比が大きく、かつ(2)と(3)の標準偏差値も大きい。(2)と(3)が小さいものはゆらぎが小さく、明瞭な一月と半月の周期性を示す。特に、(5)の値が大きく、(3)の値が小さな A 39 などは明瞭な半月の周期性を示す。半月の周期性は従来わずかに知られていたが、Table 1 の Diagonal とした一月にひろがって続発するグループも考えれば、この半月の周期性も深発月震に一般的に見出されることがここであらためてわかった。

A 08, A 20, A 26, A 35, A 256 などランダムな周期性を示すグループは今回初めて見出された。A 08 では 224 個と同定されたイベント数も充分数多く、また数多くのグループが同じ性質を示しているから、ランダムな発生周期性を示す深発月震が存在することは明らかである。

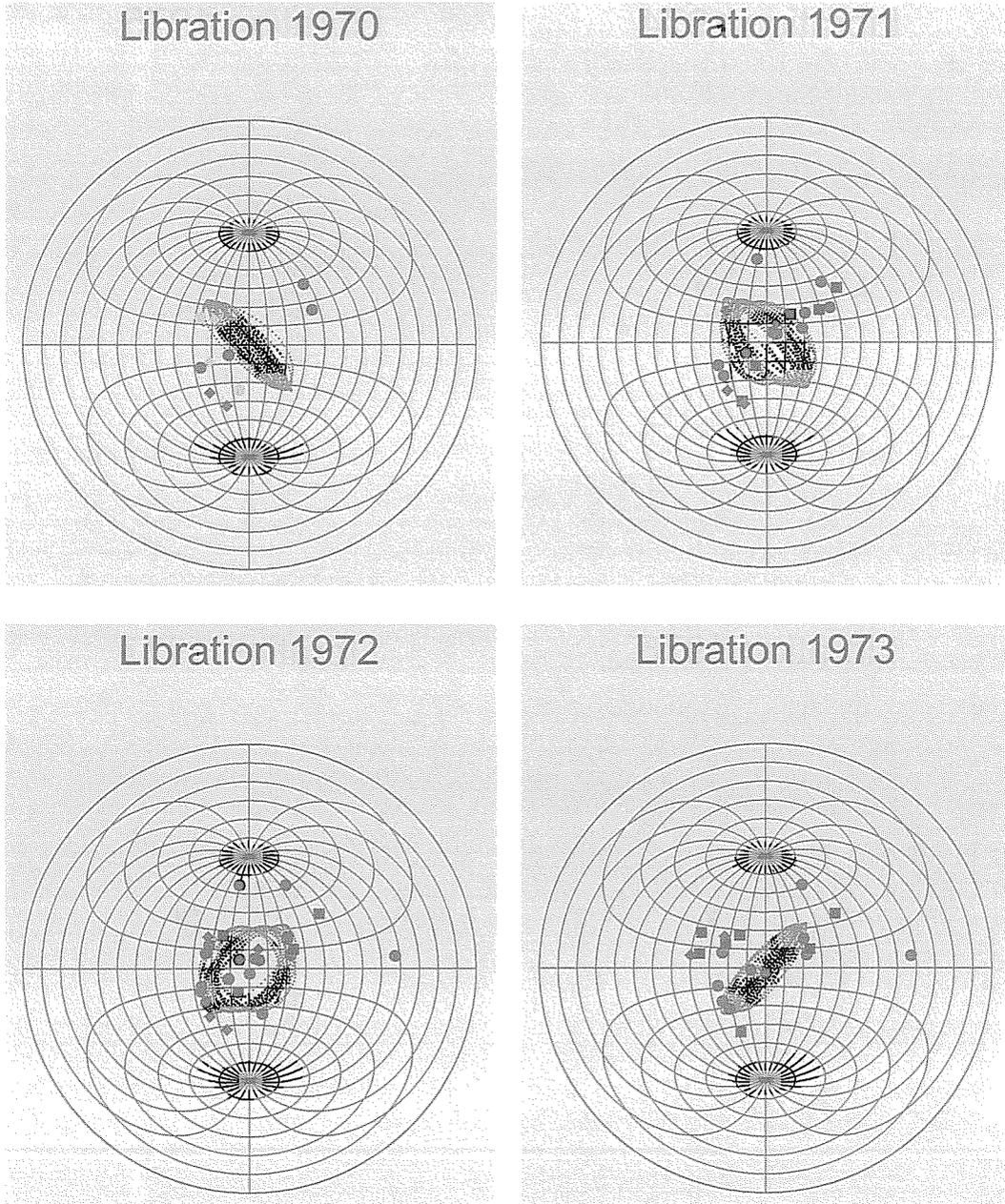
従来の解析では波形の相関が特に良いイベントだけが同じグループに同定されていたから、例えば、最も活動的なグループである A 01 の震源域でも、その大きさが高々 1 km 程度の広がりであると考えていた (Nakamura, 1978)。新しい月震カタログでは、従来独立なグループであると考えられていた深発月震のグループのなかにも 31 ものグループがいずれかのグループと同じであることが明らかにされた。したがって、個々のグループの震源域の広がりも従来考えられていたものよりはるかに広く、それは同じグループのイベントでも波形の相関係数に大きな広がりがあることから確かめられている (Nakamura, 2003)。ここで明らかになった深発月震の周期性に大きなゆらぎがあることや単に一月の周期性ばかりではないいろいろな周期性があることなどは、深発月震の時間的・空間的多様性を示していると考えられる。地球の地震でも相似な観測波形を示す活動がある (Ito, 1984)。それらは同一断層面上のくり返し破壊や微小破壊の進展と考えられている。深発月震も地球の地震と同じく単純なものではないことがわかる。

#### IV. 月の秤動と深発月震活動

深発月震の活動には、これまでに詳しく述べた周期性のほかに、月軌道の離心率が太陽の摂動を受け約 207 日周期で変化するのに依存する性質、また、月から見た地球位置が約 6 年で変動するのに依存する性質が知られている (Lammlein, 1977; 小山, 2002)。

月はほぼ一定の自転速度で自転しながら地球の周りをケプラー運動するから、月-地球の質量中心を結ぶ月面上での位置 (subearth point) が経度方向に変化する (経度秤動)。また、月の軌道面の傾きと自転軸の傾きにより、緯度方向にも変化する (緯度秤動)。それぞれ約  $\pm 7$  度 45 分、 $\pm 6$  度 31 分の大きさである (大金, 1994)。この変動により地球が月におよぼす潮汐応力が変化する。その変動の大きさはごくわずかで、たかだか  $10^4$  Pa 程度ある。ここではまず、時々刻々変化する地球秤動を Chapront and Chapront (1983) による半解析暦 (ELP 2000-82) を用いて計算する。求めた地球秤動は約 6 年の周期で月面上でリサージュ図を描く。6 年の周期性は交点月周期 27.21221 日と近点月周期 27.55455 日の違いから生じるもので、経度秤動は近点月周期で、緯度秤動は交点月周期で運動するためである。

Fig. 7 に計算された地球秤動の値を 5 倍し、月面上に描く。従来同定されていた深発月震 109 グ



**Fig. 7.** Subearth point on the moon, which is the footprint on the lunar surface connecting the mass centers of the earth and the moon. Longitudinal and latitudinal libration angles are enlarged five times for the convenience of plotting. Epicenters of active groups of deep moonquakes of each year are plotted on the equal area projection of the whole surface of the moon. Circles indicate the epicenters(Nakamura et al., 1982) for groups with large scatters. Diamonds for random nature, squares for periodic nature. There are two groups, where two hypocenters for one group identified to be the same now. They are plotted by gray symbols. Year of 1969 was omitted since the observation period was very short.

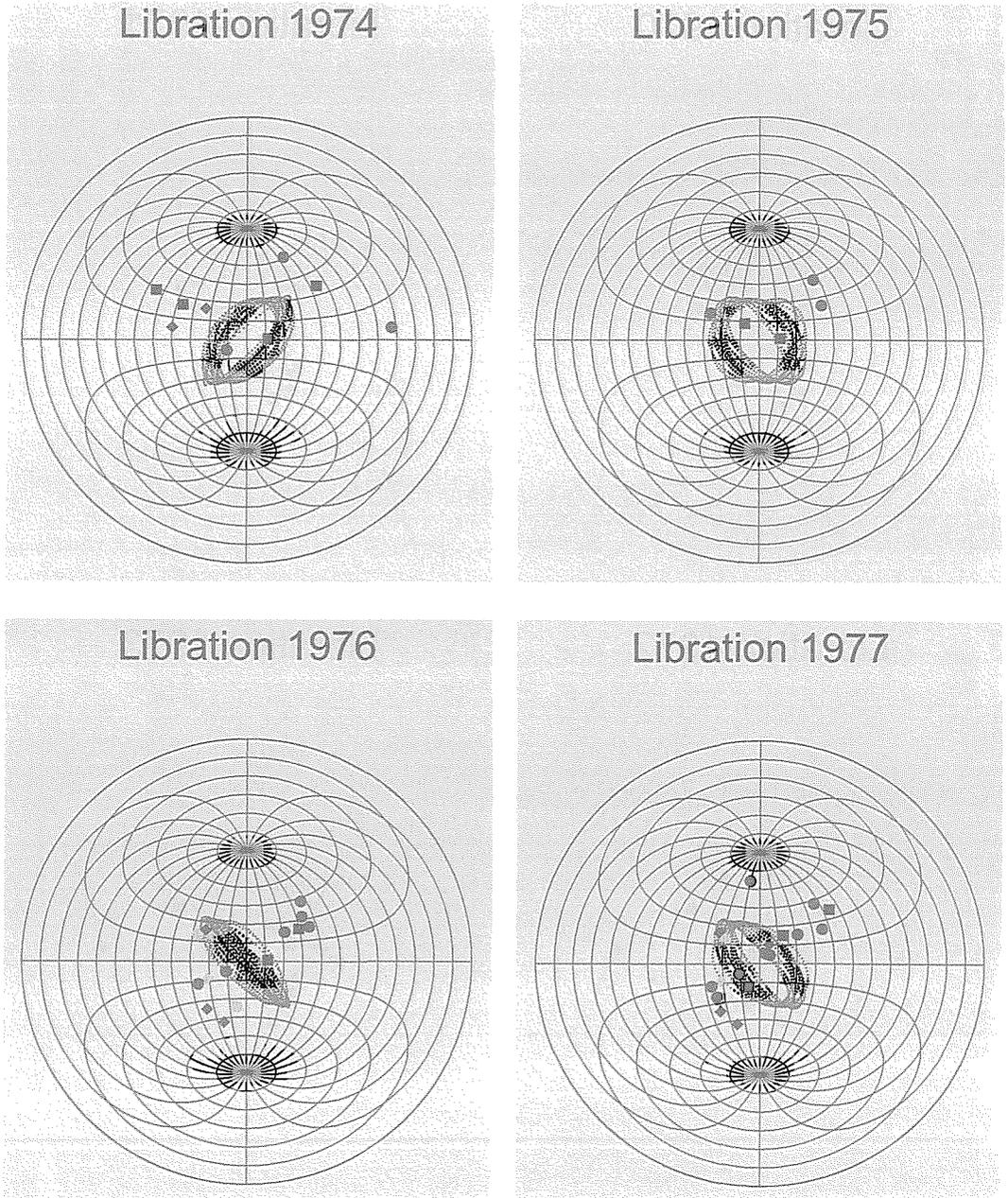


Fig. 7. (continued)

ループのうち 52 グループの震源位置が決定されている (Nakamura et al., 1982). 地球秤動の図にその活動が活発であった時期の深発月震の震央を重ねてプロットした. 1969 年は観測期間が短いので載せない. 1970 年は南東から北西方向に時計回りに地球秤動が往復運動した. 1971 年には反時計回りに変化し, 1973 年になると北東から南西方向に反時計回りに往復運動した. 1974 年には再び時計回りに変化し, 1976 年になると 1970 年の運動にもどっていることがわかる.

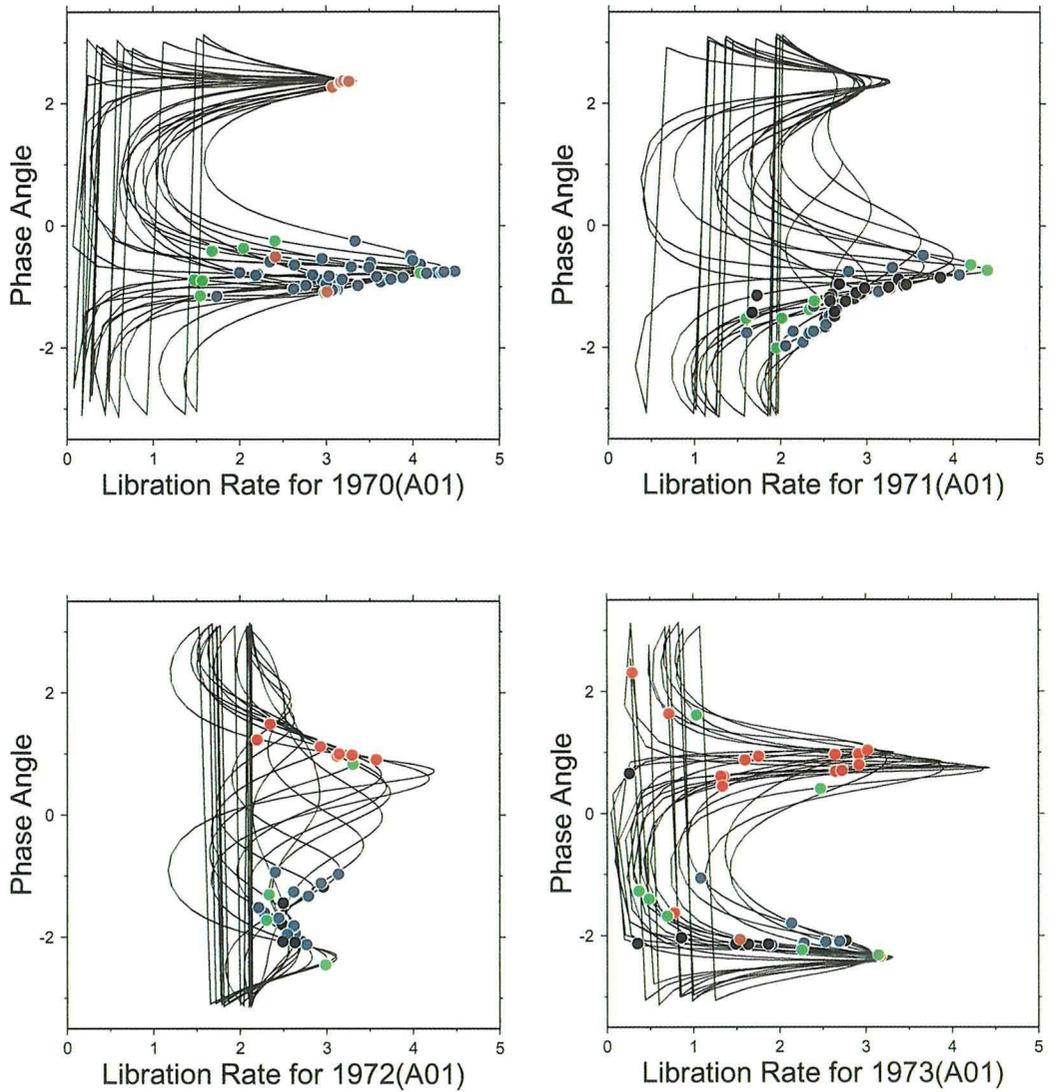
深発月震活動で見ると, 地球秤動が南東・北西方向に運動する期間は南西・北東方向の震源が活発で, 地球秤動が北東・南西方向に変化するとその逆の北西・南東方向の震源が活発になったように見える. 月の南東方向に深発月震の震源がもともと決まっていなかったから, 後半の議論は半分だけではある. 深発月震活動のこのような消長はここで始めて指摘された事実で, 新たに同定された深発月震のグループの中には今まで知られていなかった月の南東部に震源を持つものもあるかも知れず, これからの研究が重要である.

## V. A01 深発月震のメカニズム

最も活発な活動を示した A 01 深発月震の観測から波形が反転しているイベントがあることが知られていた (Toksöz et al., 1977; Nakamura, 1978). これらを Inverted events と呼んで注目していたが, Inverted events は A 01 だけではなく, A 05 や A 20 でも見つかっている. 今回, Inverted events はこれらのグループに限らず, 深発月震にもっと一般的に見出されることがわかった (Nakamura (2003, 私信)). 観測波形が反転するのは, 深発月震を起こす応力が反転するからである. Toksöz et al. (1977) が考えたように, テクトニックな応力に潮汐力がトリガーとしてはたらき, 深発月震が発生すると考えると, もともと潮汐応力もその時間変動も,  $10^3$  から  $10^4$  Pa 程度で小さいので, トリガーとして有効かどうかも疑わしい. また潮汐応力の変動は小さく, 応力値の符号を変えることはない. トリガーモデルでは, 先に述べたランダムな深発月震の発生の周期性などを説明することが出来ない.

地球秤動の運動方向と震源分布の関係にあったように, 潮汐応力そのものより, その変化に深発月震の発生が依存していると考えてみる. Fig. 8 に地球秤動の 1 日あたりの変化量とその向きを示す. 横軸の単位は地球秤動角で  $0.6^\circ$ /日であり, ここではその絶対値は重要ではない. 縦軸は東から反時計回りに計った地球秤動の変動方向の角度を表わす. 縦軸は  $-\pi$  から  $+\pi$  であるが, これは月の交点月の位相に対応している. 図中には A 01 深発月震が発生した時刻をこの位相空間での位置で重ねて示した.

従来の解析 (Nakamura, 1978) にあるように, Inverted events といっても, 全ての観測点で波形の相関が反転しているわけではない. 時にはノイズで相関が計算できない場合もあるし, 相関係数自体が小さい場合もある. これらは深発月震を発生させる応力の向きが, 単に普通の向きと反転した向き (Inverted events) と言った単純なものではないことを意味している (Koyama and Nakamura, 1980). 相関係数に関して, 新しい月震カタログの A 01 イベントでも同様のことが言える (Nakamura, 2003 私信).



**Fig. 8.** Phase diagram of libration rate and its phase angle for each year from 1970 to 1977. The rate is time derivative of absolute values of libration angles and the phase is its direction measured counter-clockwise from the east. Occurrences of A01 deep moonquakes are plotted on their corresponding position in the phase diagram. Black, blue, green and brown symbols indicate normal polarities at all observations, normal but not all, inverted polarities at some observations and inverted polarities at all observations.

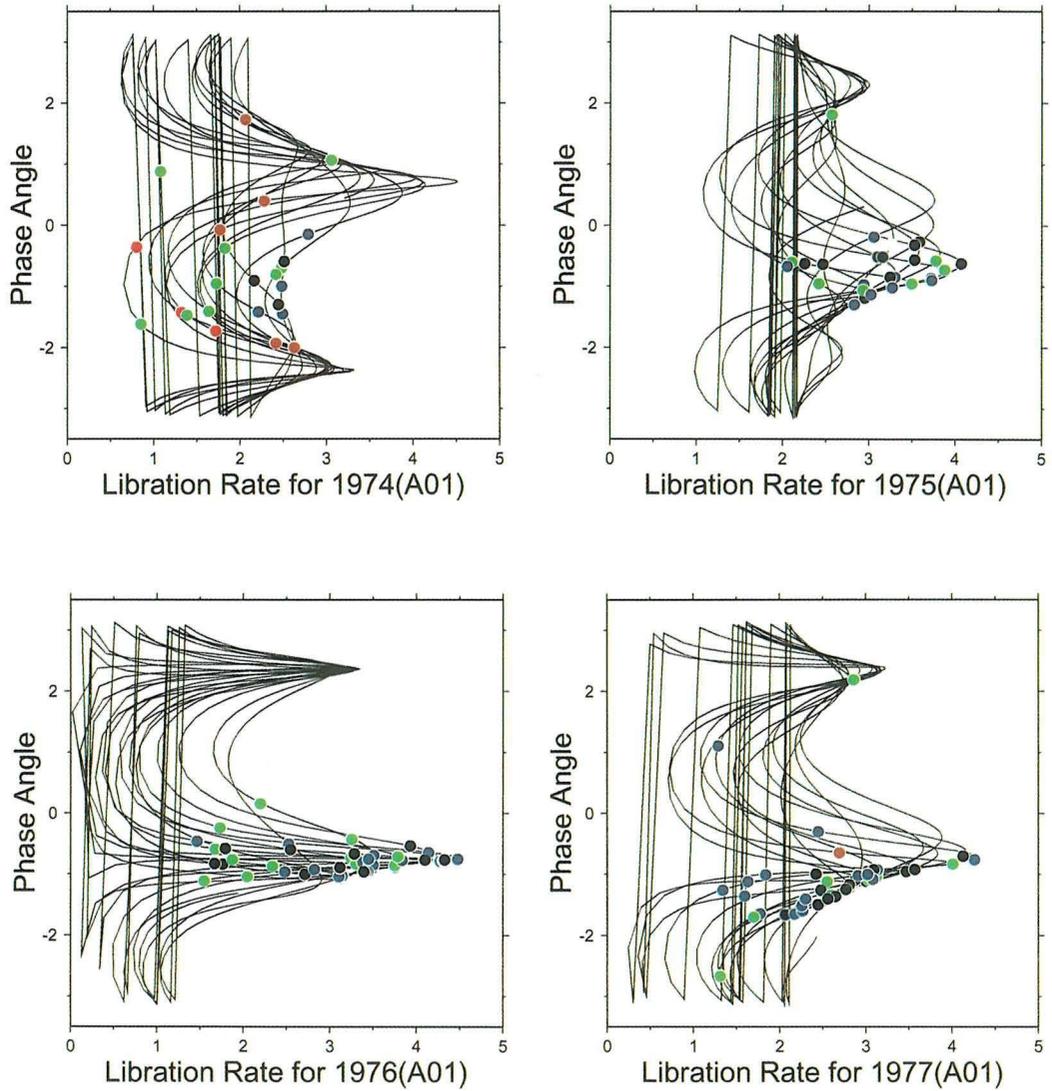


Fig. 8. (continued)

ここでは、Fig. 8 で黒・青・緑・茶色の順に波形相関が正の相関から逆の (Inverted events) 相関になっていることを示している。黒は観測されたすべての観測点、すべて成分で正の場合、茶は逆に負の場合である。1970 年を見ると A 01 深発月震は北西・南東方向に地球秤動の変化が最大になる時に発生している。南東・北西方向に最大になるときは Inverted events が発生していることがわかる。1973 年は北東・南西方向に秤動変化が最大になるときに Inverted events が発生している。1971 年は Inverted events が見出されていないのか、元々なかったのか、いずれにしても北東・南西方向のときに普通のイベントが発生している。1974 年は波形の相関が変化するイベントが多く発生したが、秤動変化も 1970 年のように単純なパターンではない。

先に述べた A 05 深発月震を見れば、1973 年の A 01 の振る舞いと同様で Inverted events と普通のイベントが発生している。しかし、地球秤動の同じ位相で必ず Inverted events や普通のイベントが発生しているわけではないから、地球秤動の変化に伴った潮汐応力の変化だけが深発月震の発生を全て支配しているわけではないようだ。

## VI. 結 論

深発月震の P 波・S 波の観測波形から A 01 月震のメカニズムが月潮汐位相につれて時間変化していることを Nakamura (1978) や Koyama and Nakamura (1980) が示し、地球の地震活動にはない深発月震発生メカニズムを議論した。しかし、月面での地震観測はアポロ 12, 14, 15, 16 号で設置された 4 観測点に限られているため、深発月震は月内部のテクトニック応力に潮汐力がトリガーとしてはたらくために発生すると言う考えもあった (Toksöz et al., 1977; Araki, 2001)。

月内部の潮汐応力やその変化量は小さく (Lammleign, 1977)、単純な潮汐トリガーモデルではんとうに観測波形の相関が反転する Inverted events を励起できるのか、疑問であった。さらに、深発月震の波形が単に普通のイベントと Inverted events と言った簡単なものではなく、時間により変化して、正の相関をもつもの、相関係数が小さいもの、負の相関になるものと、さまざま存在していることが明らかにされている (Nakamura, 1978; Nakamura, 2003 私信)。本研究により一月とか半月とかの周期的に発生する深発月震ばかりではなく、ランダムな発生間隔を示すような深発月震活動も存在することが明らかになり、これらは単純な潮汐トリガーモデルで説明することは難しいと考える。

一つの周期がその半分の周期になり複雑な過程に発展し、カオス的な振る舞いを示す例は数多く知られている (Jackson, 1991)。特に、2つの周期をもつ潮汐力が外力として顕著にはたらくような系では、地震活動の消長がそれら周期的な外力と非線形な相互作用をすることで、複雑な振る舞いをすることが知られている (Ouchi, 1993; Thompson and Stewart, 1986)。2つの周期性に同調した活動からより長い周期の活動へ引き込まれ、それがカオス的な非周期的活動に発展することが知られている。深発月震活動も地球の地震活動に見られるテクトニック応力の解放と言った単純な過程ではなく、このような外力 (潮汐力) と深発月震活動の非線形な相互作用に

強く依存していることが考えられる。

謝辞 テキサス大学中村吉雄先生に未公開の計算結果を提供して頂きました。記して感謝いたします。

#### 文 献

- Araki, H., 2001. Focal processes of deep moonquakes, 測地学会誌, **47**, 508–513.
- Chapront-Touze, M. and J. Chapront, 1983. The lunar ephemeris ELP2000, *Astron. Astrophys.*, **124**, 50–62.
- Ito, A., 1984. High Resolution Relative Hypocenter Determination by a Cross-Spectral Analysis, *J. Phys. Earth*, **33**, 279–294.
- Jackson, E.A., 1991. *Perspectives of nonlinear dynamics I*, Cambridge University Press, 452pp.
- 小山順二, 2002. アポロ深発月震発生の周期性, 北海道大学地球物理学研究報告, **65**, 325–333.
- 小山順二, 2003. 月地震学の新たな一歩, 日本地震学会ニュースレター, **14**, 30–36.
- Koyama, J. and Y. Nakamura, 1980. Focal mechanism of deep moonquakes, *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.*, 11th, 1855–1865.
- Lammlein, D.R., 1977. Lunar seismicity and tectonics, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **14**, 224–273.
- Latham, G., M. Ewing, J. Dorman, D. Lammlein, F. Press, N. Toksöz, G. Sutton, F. Duennebieer and Y. Nakamura, 1971. Moonquakes, *Science*, **174**, 687–692.
- 大金要治郎, 1994. 星の位置と運動, 東海大学出版会, 164 pp.
- Nakamura, Y., 1978. A1 moonquakes: Source distribution and mechanism, *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.*, 9th, 3589–3607.
- Nakamura, Y., 2003. New identification of deep moonquakes in the Apollo lunar seismic data, *Phys. Earth Planet. Iner.*, **139**, 197–205: <ftp://ig.utexas.edu/pub/PSE/catsrepts>.
- Nakamura, Y., G.V. Latham and H.J. Dorman, 1982. Apollo lunar seismic experiment – Final Summary, *J. Geophys. Res.*, **87**(Supplement), A117–A123.
- Ouchi, T., 1993. Population dynamics of earthquakes and mathematical modeling, *PAGEOPH*, **140**, 15–28.
- Thompson, J.M.T. and H.B. Stewart, 1986. *Nonlinear dynamics and Chaos: Geometrical methods for engineers and scientists*, John Wiley and Sons Ltd, 376pp.
- Toksöz, M.N., N.R. Goins and C.H. Cheng, 1977. Moonquakes: Mechanisms and relation to tidal stress, *Science*, **196**, 979–981.
- Turcotte, D.L., 1997. *Fractals and chaos in geology and geophysics*, Cambridge University Press, 398pp.