HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	アポロ深発月震のカオス的活動
Author(s)	小山, 順二
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 68, 179-190
Issue Date	2005-03-15
DOI	10.14943/gbhu.68.179
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/14369
Type	bulletin (article)
File Information	68_p179-190.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北海道大学地球物理学研究報告
Geophysical Bulletin of Hokkaido University, Sapporo, Japan
No. 68, March 2005, pp. 179－190

アポロ深発月震のカオス的活動

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

(2005年1月13日受理)

Chaotic Activity of Apollo Deep Moonquakes

Junji KOYAMA
Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science,
Hokkaido University

(Received January 13, 2005)

Seismic observation on the Moon during the Apollo project from 1969 to 1977 discovered tidally induced moonquakes occurring at depths about halfway to the center of the Moon. The identification of these deep moonquakes and also of other events was made by visual inspection of long-period seismograms, resulting in 12,558 catalogued events. A new computer analysis of the Apollo lunar seismic data using a combination of waveform cross-correlation and single-link cluster analyses revealed about 60% of the identified and catalogued events are deep moonquakes, and increased the number of identified deep moonquakes by more than a factor of five (Nakamura, 2003, 2005). We have applied a nonlinear method of Poincaré map to time distribution in the new catalogue and it reveals previously undetected features of hidden periodic components on the deep moonquake activity. We could classify the deep moonquake activities as (1) monthly-periodic, (2) semi-monthly periodic, (3) successive multiple events within a few days accompanied by a monthly event, (4) chaotic activities, (5) large scatters in periodicities, and (6) random-like activities. The activities of (1) and (4) are understood considering various threshold level to trigger deep moonquakes, those of (4) and (5) are interrelated and that of (6) would be very low threshold level. The threshold trigger levels differ from one deep moonquake source to another, and such difference among deep moonquakes is relevant to the above various types of activities. This would be partly due to the degree of heterogeneity in each source region, making the fluctuation of periodicities of deep moornquake occurrences.

I. はじめに

1969年から1977年の8年余にわたるNASAアポロ計画による月地震観測では，月面上に設置された4つの地震観測点から，地震観測連続データが地球に伝送されてきた（Latham et al.,

1971). この観測から，同じような波形がおおよそ1月ごとに見いだされ，月と地球の潮汐に関係した月震が約1000 kmの深さに発生していることが明らかにされた．多くの研究者の解析により，これらの深発月震をふくめ，長周期地震計記録から12,558個の月震観測記録が得られている(Nakamura, 1982).

最近このアポロ地震観測データから，観測波形の相関解析とクラスター解析を併用して，新しい月震エベントカタログが編集された(Nakamura, 2003). この新しいカタログからは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．たとえば，全期間に観測されたエベントうち，少なくともその約6割が深発月震であったことがわかった．深発月震は観測波形の相関がよいことから，同一震源域からくり返し月震が発生していると考えらている(Lammmlein, 1977). このような深発月震のグループが従来108グループ知られていたが新しいカタログではそれらが77グループに再編され，さらに，複数の観測点で波形の相関が良いものだけでも89のグループが新たに知られることになった(Nakamura, 2003, 2005). そのうち震源位置が推定されている月震は52個あったが(Nakamura et al., 1982), Nakamura (2005) による新たな解析から，従来から知られていたグループでもその推定震源位置が60個に増え，さらに新たに推定されたグループの中でも46個，計106個になり，震源位置についての情報が2倍以上になった．

新しい月震カタログではそれぞれの月震グループに同定されたエベントの数も飛躍的，5倍以上に増え，従来規則正しい1月の周期性を示すと考えられていたグループにも，発生周期にゆらぎがあることがわかった．また従来知られていなかったような非周期的活動の特徴も見出されている(小山，2004). このような複雑な振る舞いをする時系列には，しばしば非線形な解析法が用いられ，時系列の中に隠されている周期性や特徴を抽出している(たとえば，Koyama and Hara, 1992；Trulla et al., 1996). ここでは新たに決められた深発月震の震源情報を踏まえて，月内部の地震活動の空間的・時間的なふるまいについて詳しく考えることにする．

II. 深発月震の周期性解析

深発月震の発生には，周期的・非周期的な活動がある(小山，2004). このような複雑な時系列の性質を一般的に表現するために，次のようなPoincaré写像が考えられている(Faure el al., 2000；Trulla et al., 1996). Poincaré写像からは，ランダムな現象を非線形の力学系から容易に分離することができる．また，決定論的な力学系は，すべての振る舞いが無限の正確さで完全に決まる系であるし，カオス力学系はシステムが決定論的であっても，予測不能である．Poincaré写像することでカオス力学系をも図式的に特徴付けることもできる．

ある運動の軌跡I_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

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

と表されるとする．これは複雑な運動の軌跡を$I_i(k)I_i(k+1)$平面上(位相空間)の点の集まりで表現するものである．今$I_i(k)$をiグループの深発月震のkと$k-1$番目のエベントの発生時刻の差とする．同様に$I_i(k+1)$は$k+1$とk番目の時間差である．Poincaré Map(PM)はこのような$I_i(k+1)$

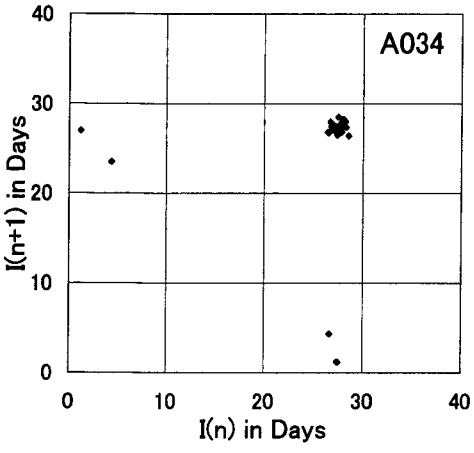

Fig. 1. Poincaré map (PM) for deep moonquake category A034. In this figure, relationship between two successive event intervals, $I(n)$ and $I(n+1)$, is displayed as a scatter plot. Monthly-periodicity of about 27 days is plotted like as an attractor point.

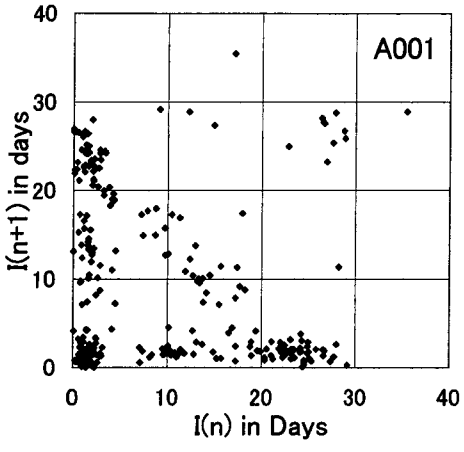

Fig. 2. Poincaré map for deep moonquake category A001. Large scattering of plots is of two to three days. Successive three and more events in a month gather near the origin. Diagonal distribution is obvious including successive events to the monthly periodicity.

の$I_i(k)$に対する点の分布から作り出される.

このようにして小山 (2004) は, 深発月震発生の特徴として,

(1) 1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) 発生周期の大きなゆらぎ

(6) ランダムに見えるような活動

を明らかにした.

ここではさらに解析の幅を広げ, エベント総数が35個以上のすべての深発月震のグループについて再解析する. また, 図式的に表現される Poincaré Map を定量的に評価するために, 引き続く2つのエベントの時間間隔が0から1/4月, 1/4から3/4月, 3/4から5/4月, 5/4から7/4月, 7/4から9/4月に発生したエベントの数も評価した. はじめの数は数日の間に3個ないしそれ以上のエベントが発生する続発性, 2番目は半月の周期性, 3番目は1月の周期性, 4番目は1.5月の周期性そして最後は2月の周期性の, それぞれの成分を示すと考えられる.

III. 深発月震の周期性成分

もしエベントが周期的に発生すると, $I_i(k+1)=I_i(k)$となるから, すべての軌跡は相空間の一点に集中する. これはアトラクター点と呼ばれる. Fig. 1 にグループ A 034 の例を示す. 縦軸横軸

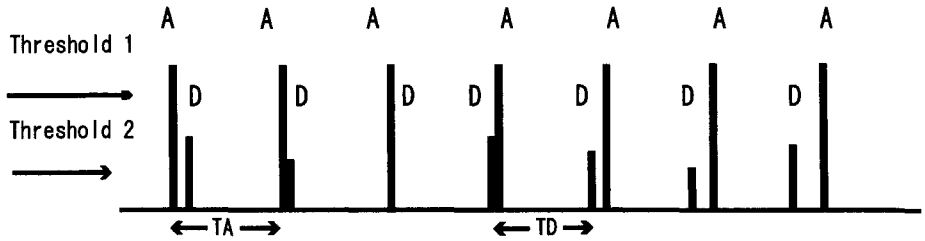

Fig. 3. Threshold model by Faure et al.(2000) is slightly modified to explain an activity above the threshold 1 with anomalistic or draconic month-periodicity(period of TA). At threshold 2, another sequence of activity (period of TD) is intermingled to give rise to diagonal pattern like as one in Fig.2 due to the slight difference in two periodicities.

で27日付近にエベントが集中して発生していることがわかる．このFig. 1の例のように他の期間に比べて一月の周期性が顕著なグループは，A 003, A 009, A 013, A 015, A 016, A 019, A 022, A 030, A 033, A 034, A 037, A 040, A 041, A 042, A 065, A 104, A 223, A 238などがある．なかでもA 019やA 034はその発生の周期性が近点月周期(27.554550日)にほぼ一致し，A 022やA 037では交点月周期(27.212221日)にほぼ一致している．上のグループほど顕著ではないが，ほとんどすべてのグループが多かれ少なかれゆらぎは大きいが，1月の周期性を示す．

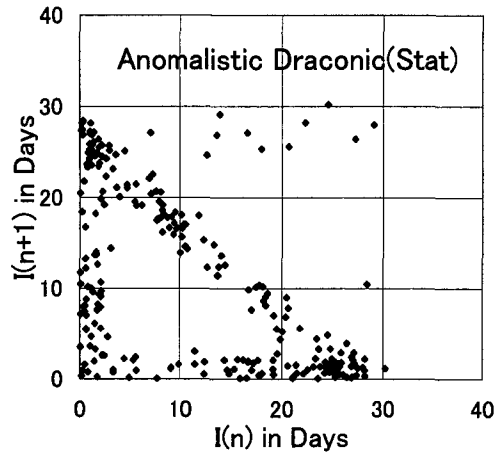

Fig. 4. Synthetic Poincaré map from anomalistic and draconic activities for eight years. Two events in each anomalistic month and one event in each draconic month are assumed, both of which have an occurrence probability of 70%. The fluctuation of up to two days is assumed in the periodicities, which is generated by uniform random number.

もしエベントがランダムに発生するならば，すべての時間差もランダムになる．この場合，軌跡は$I_i(k)I_i(k+1)$平面上に一様に分布することになる．完全に一様にランダムな分布とはいえないが，A 008, A 010, A 026, A 035, A 100やA 256などが$I_i(k)I_i(k+1)$平面上で散漫な分布を示す．

半月の周期性が深発月震に数多く見られることが明らかになったのは，小山（2004）によるものであるが，他の期間に比べて半月の活動が顕著なグループに，A 025, A 032, A 073, A 097, A 224, A 284がある．これらに加えて，Fig. 1に離れて分布している4点は，1月の周期性で複数のエベントが発生した場合で，そのような1月の周期性に引き続く複数のエベントが発生する続発性もほとんどのグループで見出される．そのうちで特に顕著なものは，A 005, A 007, A 014, A 017, A 021, A 023, A 028, A 036, A 051, A 075, A 202, A 204, A 234, A 257などである．

Table 1. Classification of characteristic periodicities of deep moonquake activities.

Nest	Number	(1)	(2)	Remarks	Nest	Number	(1)	(2)	Remarks
A 003	42	0.06	0.18	M	A 224	52	0.06	0.79	H
A 009	121	0.20	0.02	M	A 284	53	0.25	0.34	H
A 013	57	0.10	0.18	M	A 005	76	0.26	0.06	Z
A 015	50	0.08	0.03	M	A 007	85	0.23	0.07	Z
A 016	50	0.20	0.00	M	A 014	108	0.37	0.08	Z
A 019	45	0.00	0.00	M	A 017	49	0.37	0.00	Z
A 022	48	0.05	0.00	M	A 021	69	0.26	0.05	Z
A 030	45	0.07	0.00	M	A 023	79	0.23	0.01	Z
A 033	57	0.09	0.11	M	A 028	39	0.23	0.03	Z
A 034	39	0.09	0.00	M	A 036	43	0.37	0.10	Z
A 037	46	0.03	0.00	M	A 051	50	0.25	0.07	Z
A 040	35	0.07	0.11	M	A 075	49	0.31	0.14	Z
A 041	44	0.03	0.06	M	A 202	36	0.28	0.00	Z
A 042	50	0.10	0.16	M	A 204	85	0.41	0.02	Z
A 065	35	0.17	0.03	M	A 234	44	0.22	0.03	Z
A 104	49	0.17	0.12	M	A 257	45	0.34	0.03	Z
A 223	47	0.04	0.12	M	A 001	318	0.41	0.23	D
A 238	36	0.12	0.00	M	A 006	125	0.32	0.22	D
A 008	229	0.48	0.52	R	A 018	143	0.43	0.16	D
A 010	180	0.44	0.42	R	A 038	41	0.23	0.18	D
A 026	54	0.50	0.56	R	A 039	63	0.29	0.41	D
A 035	70	0.41	0.54	R	A 044	86	0.31	0.23	D
A 100	62	0.46	0.68	R	A 086	46	0.49	0.15	D
A 256	55	0.70	0.52	R	A 094	38	0.88	0.21	D
A 025	72	0.14	0.28	H	A 218	74	0.32	0.26	D
A 032	35	0.15	0.40	H	A 271	35	0.24	0.29	D
A 073	36	0.17	0.45	H	A 020	126	0.31	1.00	H/R
A 097	44	0.04	0.64	H	A 201	69	0.21	0.23	M/D

(1) indicates the ratio of number of time intervals from 0 to 1/4 month to that from 3/4 to 5/4 month, (2) indicates the ratio of number of time intervals from 1/4 to 3/4 month to that from 3/4 to 5/4 month. On remarks: M indicates deep moonquake groups which show monthly activity, R those sparse and random distribution, H those a particular semi-monthly activity, D those scattered diagonal distribution and Z those dominant successive multiple events within a few days. They are classified according to approximate values of (1) and (2) as M for (1)<0.2 and (2)<0.2, R for (1)>0.4 and (2)>0.4, H for (1)<0.25 and (2)>0.25, D for (1)>0.25 and (2)>0.15 and Z for (1)>0.2 and (2)<0.15.

Table 1に，このような深発月震の特徴をまとめて示す．左から順に月震のグループ名，そのエベント総数，0から1/4月に発生したエベント数と1/4から3/4月に発生したエベント数をそれぞれ3/4から5/4月に発生したエベント数で割った比とそれぞれの月震活動の特徴を示す．これらの値は，(1)数日の間に3個ないしそれ以上のエベントが発生する続発性と(2)半月の周期性が特徴的な1月の周期性に比べてどれくらい顕著であるかを示している．

上の(1)と(2)の値がともに0.2より小さいグループは，1月の周期性が特に顕著である．また逆

に(1)と(2)の値がともに 0.4 より大きなグループでは，Poincaré map が散漫でランダムに近い分布を示す．半月の周期性が顕著なグループでは，(1)の値が 0.25 より小さく，(2)の値が 0.25 より大きくなる．PM 上でばらつきが大きく，一月にひろがって続発するグループでは PM 上では対角線上の分布となるのだが，(1)が 0.25 より大きく，(2)が 0.15 より大きい．また，特に 3 個ないしそれ以上のエベントが続発する傾向にあるグループでは，(1)が 0.2 より大きく，(2)が 0.15 より小さい．これらの値は月震活動を特徴付ける厳密な数値ではないが，Poincaré map 上に現れる特徴を定量的に表している．

それぞれのグループで時間間隔の累積頻度分布を見ると，べき分布というよりは指数分布に近いものがほとんどである．これは後の議論にも関係するが，今回での解析では用いているサンプル数が少ないため，見かけ上指数分布に近いものとなっているのかもしれない(Koyama, 1999)．

Ⅳ. Poincaré Map の特異な構造

一般的に見られる 1 月の周期性とは別に，Fig. 2 に示すような対角線上の分布も数多く見出される．たとえば，A 001, A 006, A 018, A 038, A 039, A 044, A 086, A 094, A 218, A 271 などである．これは 1 月の間にひろがって発生するエベントがあることを示している．Fig. 2 の原点付近のかたまりは，数日の間に 3 個ないしそれ以上のエベントが続発したものである．

対角線上の分布は Fig. 3 のような簡単なモデルで考えられる (Faure et al., 2000)．Fig. 3 では周期 TA の周期的な活動があり，その振幅（発生確率）が発生のトリガーレベル Threshold 1 より大きな活動を考える．月震では，この周期性は交点月周期あるいは近点月周期である．これははっきりとした周期性を示すグループの活動となる．別の周期 TD を持つ周期的な活動があり，その振幅（発生確率）は小さいためトリガーレベルが低いときにのみ活動する．そのトリガーレベルを Threshold 2 にあるとする．また，この活動の周期 TA と TD はわずかにずれているとする．前が交点月なら近点月周期，またはその逆である．わずかな周期のずれから Fig. 3 の D にあるように一月の間に分布する対角線上の活動が生まれる．ここで注意しなければいけないのは，もし，これらの二つの周期的な活動が規則正しいものであるなら，交点月・近点月周期の 2 つの対角線上に分布することになる．しかし，計算上はこの違いは 0.3 日程度なの対し，Fig. 2 に見られる対角線上の分布は 2 ～ 3 日の大きなゆらぎが見られるのが特徴である．

実際に Fig. 4 では近点月周期にしたがって発生する 2 つのエベントと交点月周期にしたがう 1 つのエベントを確率 70%で発生させたときの Poincaré Map である．ただし，発生の周期性にはどちらの活動にも最大 2 日のゆらぎを一様乱数で与えた．図ではアポロの観測期間に対応する 8 年分の計算結果である．Fig. 2 にある対角線上の複雑な月震活動がよく再現されている．すなわち，二つの近寄った周期性のずれからこのような対角線上の活動が生じるのではあるが，実際に観測されているものはここの計算例からもわかるように，発生するしないの確率的な要素と，月—地球潮汐の周期性ばかりではない大きなゆらぎが存在し，完全には予測することができないことである．

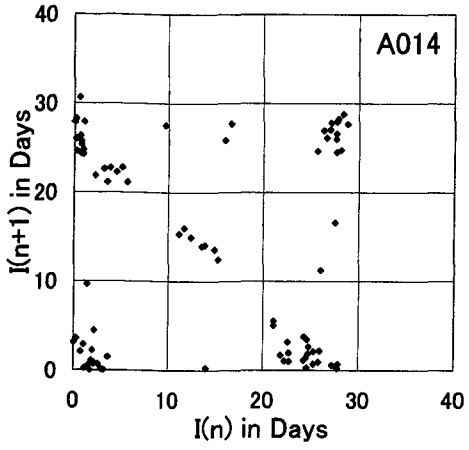

Fig. 5. Poincaré map for deep moonquake category A014. Monthly, semi-monthly, diagonal, and successive activities are clearly seen.

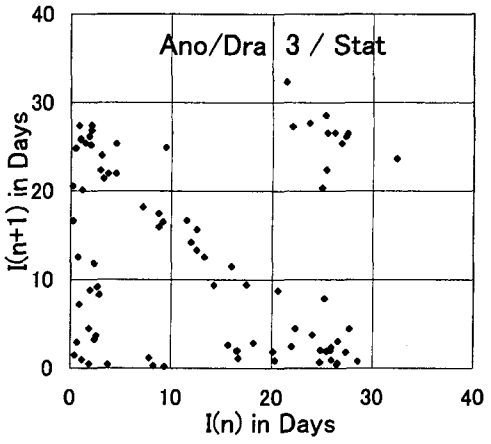

Fig. 6. Synthetic Poincaré map for A014 in Fig.5. Three events in each anomalistic month are assumed, which have occurrence probability of 55%. Another three event in each draconic month are assumed, which have occurrence probability of 5%. The fluctuation of up to two days is also assumed in both periodicities. This strong probability contrast gives rise to the monthly attractor point, though the diagonal distribution can be observed.

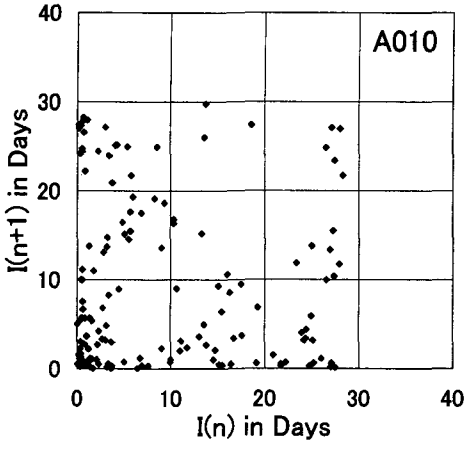

Fig. 7. Poincaré map for deep moonquake category A010. Successive and semi-monthly activities are very high, showing a sparse distribution like as random. Note the difference between this and those in Figs.3 and 5.

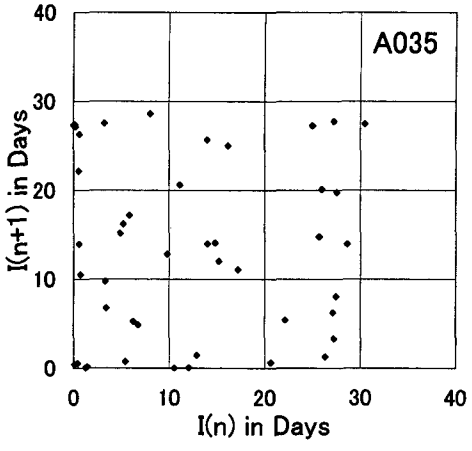

Fig. 8. Poincaré map for deep moonquake category A035. The distribution looks like almost uniform on $I(n)I(n+1)$ plane.

深発月震 A 014 の Poincare Map を Fig. 5 に示す．上に述べた(1)から(5)までの深発月震活動の特徴がきれいに見える．Fig. 6 は先ほどと同じように，2 つの周期的な活動から求めた図である．ここでは，それぞれ 1 月に 3 個のエベントを仮定して，それぞれの活動が近点月周期では 55%の確率で，交点月周期では 5 %の確率で発生するとして計算した．当然のことではあるが，Fig. 5 にあるような 1 月の周期的な活動のアトラクター点を導くには，いずれかの周期的な活動を強調する必要がある．またわずかな確率で発生するエベントでも発生の周期性に対角線上となる複雑な振る舞いをもたらすことがわかる．Fig. 5 でも Fig. 6 でも約 15 日付近に半月の周期性と思われるプロットがあるが，それは安定なアトラクター点ではなく，位相が連続的にずれているのが見て取れる．他の半月の周期性が顕著な月震のグループでも安定な半月のアトラクター点となるものはなく，Fig. 5 と同様に位相が連続的に変化しているものが多い．つまりここでの半月の周期性は，交点月と近点月周期がちょうど半周期ずれた時に発生するエベントであり，位相が 1 月ごとに少しづつずれていることを思わせる．Figs. 1,3,5 のいずれの場合でも，発生の周期性にゆらぎが大きく，予測不能であるという点ではカオス的な活動であることが言える．

続発性や周期性のゆらぎが特に大きく，ランダムに近い分布の例を Fig. 7 に示す．これは深発月震の A 010 の Poincaré Map である．Fig. 3 や Fig. 5 の分布に比べ空間的に散漫な分布であることが見て取れる．Fig. 8 にはさらに散漫な分布である A 035 の例を示す．エベントの発生総数は多くはないが，空間的にまばらで一様に近い分布を示している．Fig. 9 には，近点月・交点月周期でそれぞれ 1 月に 3 個のエベントが確率 50%で発生する場合の Poincaré Map を計算した．ただしこの場合，発生周期のゆらぎを先の計算の倍である最大 4 日に仮定した．同様に 2 個のエベン

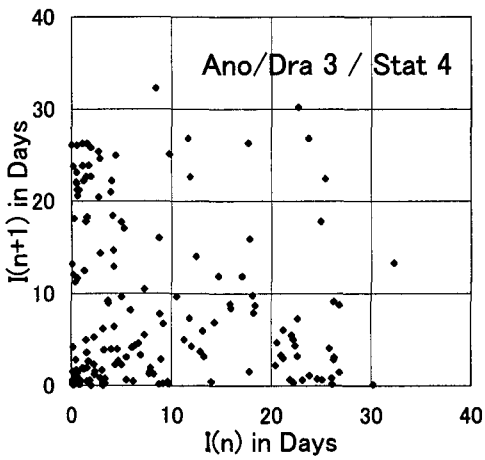

Fig. 9. Synthetic Poincaré map calculated from anomalistic and draconic periodicities, where three events in each month with probability 50% are assumed. The fluctuation of up to four days is assumed in the periodicities.

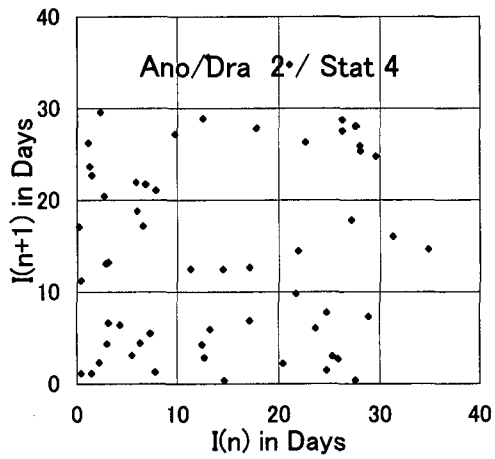

Fig. 10. Synthetic Poincaré map calculated from anomalistic and draconic periodicities. Two events in each month with probability 40% are assumed. Others are the same as those in Fig.9.

トが40%の確率で最大4日のゆらぎで発生する場合のPoincaré MapをFig. 10に示す．Fig. 7とFig. 9，Fig. 8とFig. 10の比較から，ランダムに近いような散漫な分布も，二つの周期性に依存する活動が重なり合い，その発生が確率的でしかも周期性のゆらぎが大きな場合として，理解される．

V．議　　論

この解析で最も重要な点は，従来月と地球の潮汐力により励起され，1月の周期性が明瞭であると信じられてきた深発月震の活動様式が，周期的ではあるが周期性にゆらぎが大きくカオス的な活動として捉え直されたことにある．ここでいう発生確率の違いは，トリガーレベルがそれぞれの月震震源域で異なり，励起されるべきエベントがそのトリガーレベルをこえるかこえないかの違いによる．それにより，二つの周期性で特徴付けられる月震活動のトリガーされる月震が異なり，さまざまな活動パターンを示すと考えられる．1月の周期性が明瞭なグループ，半月の周期性が顕著なグループ，複数のエベントが数日間に発生する続発性が強いグループ，発生の周期性にゆらぎが大きいグループ，ランダムなような散漫な分布を示すグループの活動はそのいずれを見ても発生の周期性にゆらぎが多きいことから，完全には予測不能でカオス的な活動の一部を見ていることになっていると理解される．Faure et al.(2000)は脳のノイズについて，二つの周期性が弱いカップリングをすることで，Poincaré mapの対角線上の分布を確率論的なゆらぎを考えなくも再現できるとしている．しかし，半月の周期性の連続的な位相変化でも考えたように，また，ここで考えている周期性は地球と月の軌道から決まる外力によるもの考えられるから，その周期性がカップリングしていると考えるより，震源毎の応答が2つの周期性と複雑にからみ合い，大きな発生周期のゆらぎを生み出していると考えられる．

それぞれ特徴的な深発月震活動の震央をNakamura(2005)の最新のデータからFig. 11に図示する．顕著な1月の周期性を示すグループ，半月の周期性，カオス的な活動，ランダムに近い散漫な活動のそれぞれ

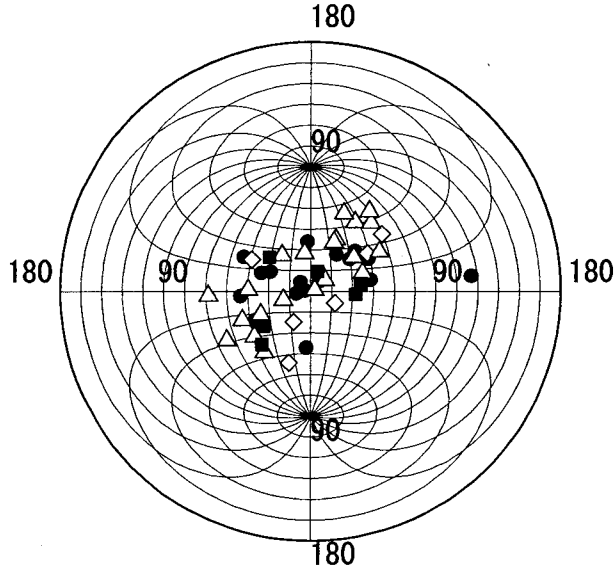

Fig. 11. Epicenters of deep moonquakes (Nakamura, 2005) are plotted on the whole lunar surface by an equal area projection. Solid circles indicate those for groups with prevailing monthly periodicity, diamonds for significant semi-monthly, triangles for chaotic (including diagonal, successive, large scatter) and solid squares for sparse distribution like random.

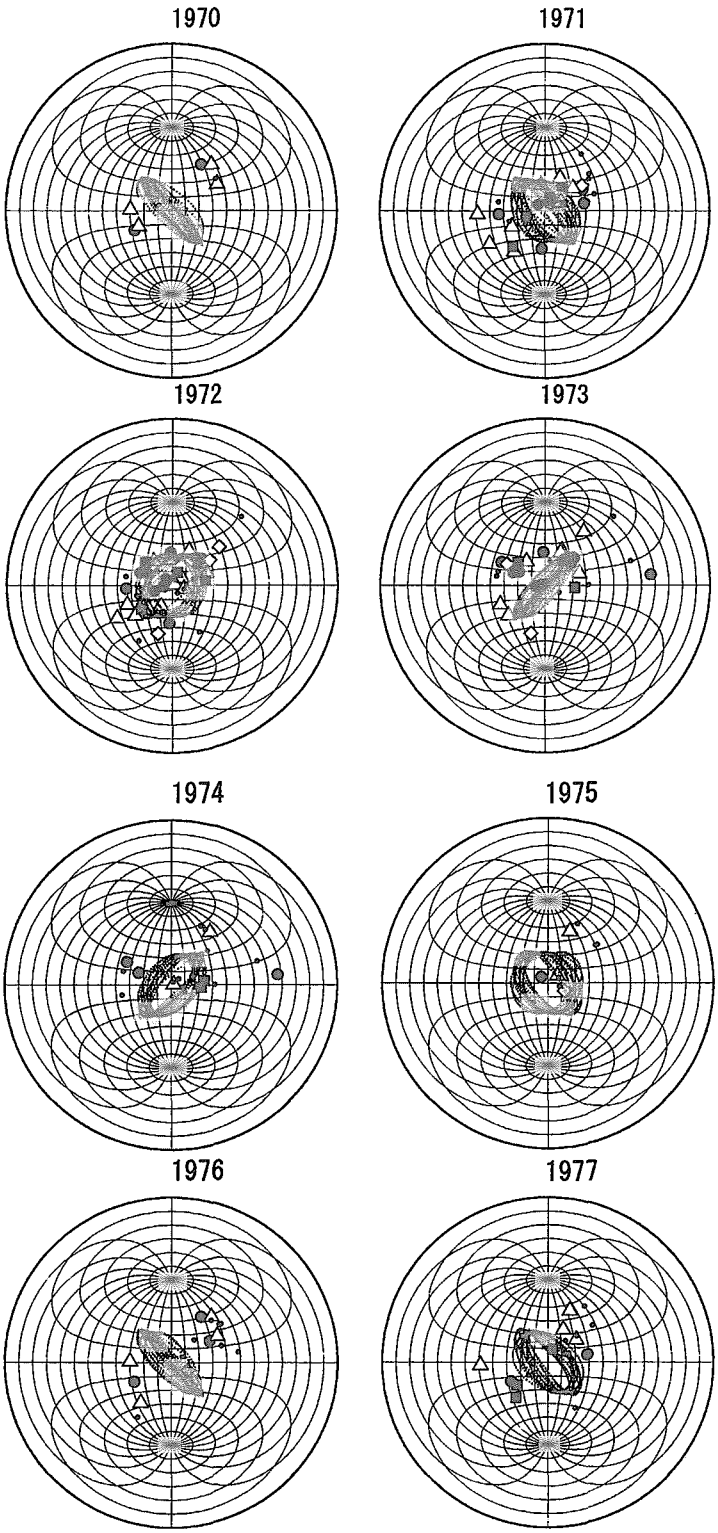
1970
1971
1972
1973
1974
1975
1976
1977

Fig. 12. Libration of the Earth 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. Selecting the most active two years for each deep moonquake source, its epicenter is plotted for each year on the equal area projection of the whole surface of the Moon. Those groups of deep moonquakes of which annual activities were less than five events are omitted. Other symbols are the same as those in Fig.11 except for small dots which indicate epicenters unclassified because of the small number of events. Year of 1969 is not shown since the observation period was very short.

異なる活動様式を示す深発月震の分布は重なっていて，特定の地域によって特徴的にどれかの発生様式を示しているようには見えない．地球の地震は特定の領域に特定のメカニズムを持つ地震が発生していること（たとえば，Lay and Wallace, 1995）から考えると，深発月震活動と地球の地震活動との違いが顕著である．

深発月震の活動には，これまでに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て約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)．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の位置 (subearth point) が経度方向に変化する(経度秤動)．また，月の自転軸と月の軌道面が傾いていることにより，subearth point は緯度方向にも変化する．これを地球秤動と呼ぶ．それぞれ約±7度45分，±6度31分の大きさである（大金，1994）．経度秤動は近点月周期で，緯度秤動は交点月周期で変化する．

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）を用いて計算し，Fig. 12 に示す．交点月周期と近点月周期の違いにより地球秤動は約6年の周期で月面上にリサジュー図を描く．Fig. 12 中の地球秤動の値は図示する関係上5倍して描かれている．この図に新たに Nakamura(2005)により震源位置が決定されている106個の深発月震のグループのうちで，それぞれその活動が最も活発であった2年を選びそれぞれの年に重ねてプロットした．1年間の活動が5エベントより少ないグループはプロットしていない．また，1969年は観測期間が短いから載せない．1970年は南東から北西方向に時計回りで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年の運動に戻っている．

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－北東方向の震源グループが活発で，地球秤動が北東－南西方向に変化するとその逆の北西－南東方向の震源グループが活発になっているように見える．深発月震のこのような消長は，小山（2004）により指摘されていたが，ここで震源情報が2倍以上に増えた現在，さらに確かなものになった．

このように深発月震の発生にはさまざまな周期成分を持つ外力が作用している．Poincaré Map は，複雑な生態系の研究ばかりではなく（Trulla et al., 1996），非線形でその力学系が良く知られていないシステムを特徴付ける有効な方法であることが，あらためて理解された．しかし，月－地球間の潮汐に同期はしているものの深発月震に見られる発生周期のゆらぎが単なる確率的なノ

イズではなく，カオス的なものであり，その背景にはどんな未知の物理則が存在しているのかも知れず，今後の研究課題である．

謝辞 テキサス大学中村吉雄先生に出版前の資料を提供していただき，議論していただきました．記して感謝いたします．

文　献

Chapront-Touze, H. and J. Chapront, 1983. The lunar ephemeris ELP2000, *Astron. Astrophys.*, **124**, 50−62.

Faure, F., D. Kaplan and H. Korn, 2000. Synaptic efficacy and the transmission of complex firing patterns between neurons, *J. Neurophysilo.*, **84**, 3010−3025.

Koyama, J., 1999. Stochastic scaling and non-linear scaling law of complex earthquake activity, *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser. VII(Geophysics)*, **11**, 665−690.

小山順二，2004．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，北海道大学地球物理学研究報告，**67**，359−373．

Koyama, J. and H. Hara, 1992. Scaled Langevin equation to describe the $1/f^{\alpha}$ spectrum, *Phys. Rev.*, **A46**, 1844−1849.

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. Duennebier and Y. Nakamura, 1971. Moonquakes, *Science*, **174**, 687−692.

Lay, T. and T.C. Wallace, 1995. *Modern global seismology*, Academic Press, San Diego, pp.434−495.

Nakamura, Y., 2003. New identification of deep moonquakes in the Apollo lunar seismic data, *Phys. Earth Planet. Iner.*, **139**, 197−205.

Nakamura, Y., 2005. Farside deep moonquakes and deep interior of the moon, *J. Geophys. Res.*, **110**, in press.

Nakamura, Y., G.V. Latham and H.J. Dorman, 1982. Apollo lunar seismic experiment−Final Summary, *J. Geophys. Res.*, **87** (Supplement), A117−A123.

大金要治郎，1994．星の位置と運動，東海大学出版会，164 pp.

Trulla, L.L., A. Giuliani, J.P. Zbilut and C.L. Webber Jr., 1996. Recurrence quatification analysis of the logistic equation with transients, *Phys. Lett.*, **A223**, 255−260.