北海道大学地球物理学研究報告
Geophysical Bulletin of Hokkaido University, Sapporo, Japan
No. 65, March 2002, pp. 325－333

アポロ深発月震発生の周期性

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

(2002 年 1 月 10 日受理)

Periodicity Analysis of Apollo Deep Moonquakes

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

(Received January 10, 2002)

The periodicity of about 27.3 days has been known for deep moonquakes observed by Apollo Seismic Network on the moon. There still remain the fluctuation of the periodicity about 2 days and the modulation due to Earth-Moon orbital configuration. In order to identify the category of deep moonquakes, detailed analysis of the periodicity of deep moonquakes is made by the Hilbert transform. Thirty groups of identified deep moonquakes with large event numbers are parameterized by their phases of occurrence timing in the Earth libration looking from the moon. Clearly shown is the periodicity of about 206 days resulting from the perturbation of perigee by the sun and 6 years from the beating of anomalistic and nodical periodicities. The former has been suggested from the amplitude variation of deep moonquake signals and is shown quantitatively here. There are many groups of deep moonquakes of which temporal variation of occurrence phases is so regular that the empirical formulae could be determined to predict the time of phases of deep moonquake occurrences. Standard deviation of observed and predicted phases of event occurrences at best is about 0.03 radian, which is about 3 hours. Most of standard deviations are twice or thrice larger than this. Some groups do not show clear regularity in occurrence phases. The present empirical analysis would not help for the identification of those groups of events. Generally speaking the average time interval of Apollo deep moonquakes is about 23 hours. The empirical formulae give the prediction of deep moonquake occurrences much precise than this, so that the present analysis would help the identification of category of deep moonquakes observing arrival times of signals measured in the future mission.

I. はじめに

アポロ月震観測は1969年7月から1977年9月まで約8年弱の間行われ，深発月震・浅発月震・隕石や衛星衝突・日の出日の入り時の熱月震などの地震活動が月面で観測されている（Lammlein et al., 1974）．アポロ11号からアポロ16号までの地震観測では最多で4点の同時観測が高々5.44年間にわたる観測があるだけで，観測されたエベントも振幅が大変小さなものばかりであった．観測期間全体で月震と判定されたエベントは約12,000個，その内詳しく調べられたエベントは1割にも満たない．深発月震は比較的数多く解析され，深さ1000 km付近に発生していることが知られている．浅発月震が主に月の浅部構造に関する情報をもたらすのに比べ，深発月震は月の深部構造を知る上から重用な情報源である．さらに，深発月震は約27.3日の周期で繰り返し発生しているため，月－地球間の潮汐力によるものと考えられている（Lammlein et al., 1974）．その証拠として，Nakamura（1978）やKoyama and Nakamura（1980）は月内部に働く潮汐力の時間変化と深発月震の発生メカニズムが相関していることを明らかにしている．また，深発月震の発生を定常的なテクトニック応力のもとでの断層運動で，潮汐力は単にトリガーとしての役割を果たしているに過ぎないとの考え（Cheng and Toksöz, 1978）や潮汐力が支配的な深発月震と潮汐力がトリガーとして働いている深発月震の両方があるとの考え（Araki, 2001）もある．しかし，月という地震発生環境がまったく異なる天体の内部活動を地球の地震活動の類推で考えてよいのだろうか．

アポロ計画以後，月の軌道解析も3桁以上の精度改善がなされ（Dickey et al., 1994），太陽・諸惑星・地球や月の形状による摂動，地球潮汐や一般相対論補正なども考慮した月の暦が計算できるようになった（Chapront and Chapront, 1983）．ここではいまだ議論の多い深発月震の発生場を明らかにするため，さらに宇宙科学研究所が計画している月探査ミッションLUNAR-A（Mizutani, 1995；小山・他, 1998）の観測期間に活動すると考えられる深発月震の同定を容易にするために，アポロ計画で観測された深発月震発生の周期性と月の軌道との関連を定量的に詳しく調べる．そして，深発月震の周期的発生の予測式について考える．

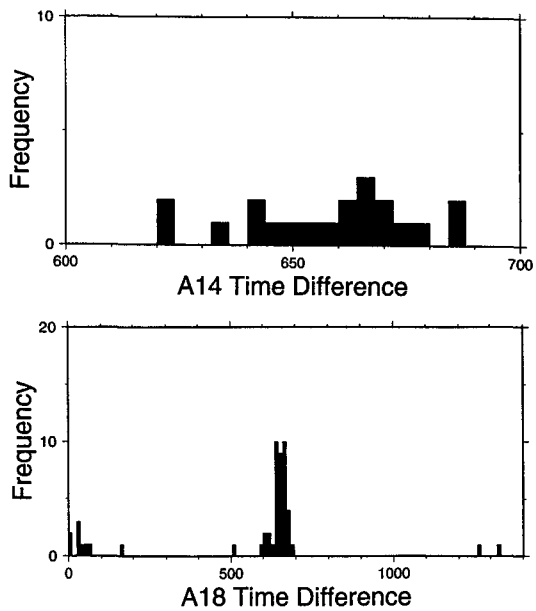

Fig. 1. Frequency of events in terms of the time difference in hours of successive events: Top is for A14 deep moonquake group. The distribution centers at about 27.3 days (655.2 hours). Bottom is for A18, where successive events occurred within a few days and over other month.

II. 深発月震活動

アポロ月地震観測から深発月震と思われるエベントが約3000個ほど見出されている．しかしそのほとんどが非常に小さな振幅，最小分解能の数倍程度，であるため，詳しく調べられているエベントはその内約1000個程度ある．深発月震と同定されるもののうちには観測波形が相似であるエベントが約27.3日の周期で発生しているため，特定の震源域から繰り返し発生していると考えられている．現在までにこのような特定の震源域を持つ深発月震のグループが109個ほど知られている．そのうち相似観測波形をスタッキングすることでSN比を向上させ，P波・S波の到達時間から震源が決められているものは，52グループある（Nakamura et al., 1982）．また，深発月震活動の消長は月－地球の軌道変化による6年の周期変動にも影響されている（Lammlein et al., 1974；Nakamura, 1978）．A 1とよばれるグループの深発月震の振幅には206日の周期的変化も見出されている（Lammlein et al., 1974）．中村（1976）はこのような振幅の周期的変化は深発月震が月・地球・太陽の繰り返し潮汐力による疲労破壊によるためではないかと考えている．

Fig. 1にA 14と呼ばれるグループの引き続き発生したエベントの発生時刻の差を示す．このグループは発生の周期性が規則正しいと考えられてきたグループの一つである．655時間を中心に約70時間の広がりをもっている．図下のA 18グループではこの広がりは約100時間程度である．1月のサイクルのうちに2度3度発生する場合や，2月目のサイクルに発生する場合も見られるが，その場合でも同様に発生時間間隔のゆらぎが見て取れる．このような周期性のゆらぎは他のA 33などの規則的に発生するグループでも同様である．つまり深発月震の発生時刻の周期性には±2日程度のゆらぎがあることがわかる．月－地球間のデータ転送の制約から，LUNAR-A計画では先ず月震到達時の検震表が送られてくる．このような表の限られたデータから深発月震を同定するには，この周期性のゆらぎは大きすぎる．このような発生の周期性をもう少し定量的に調べてみよう．

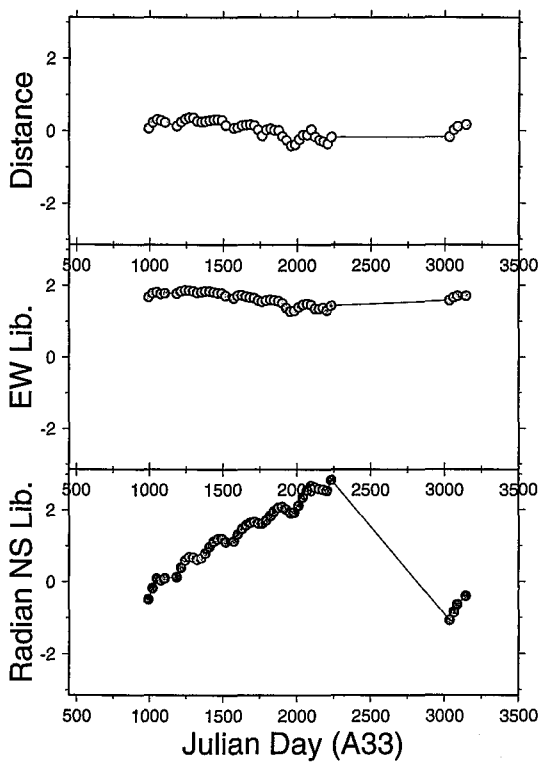

Fig. 2. Phases of the earth libration in latitude, longitude and distance at the timing of A33 events. Julian day in abscissa starts from January 1, 1969.

III. ヒルベルト変換による地球秤動の位相

月は地球の周りを楕円軌道でケプラー運動している．また，月の自転軸は1.53度，月の公転面は約5.13度黄道面に対して傾いている．したがって，月面上に投影される月と地球の重力中心を結ぶ位置（subearth point；月から見た地球の位置）は月の緯度・経度方向に変化する．ケプラー軌道で月－地球間の距離も変化する．この変動を月から見た地球の緯度・経度秤動という．緯度方向の変化は交点月周期（27.212221日），経度方向の変化は近点月周期（27.554550日），そして距離は経度変化に同調している．先に述べた6年の周期性はこの交点月・近点月周期のちがいに起因している．

そこで深発月震が地球秤動のどの位相で発生しているのかを定量的に調べることにする．地球秤動の時間変化を $f(t)$ とすると，複素時系列 $F(t)$ が

$$F(t)=f(t)+i\mathscr{H}(f(t))$$

で定義される．$\mathscr{H}(f)$ は f のヒルベルト変換，i は虚数単位である．従来ヒルベルト変換は時系列の包絡線振幅を計算するのに用いられてきたが(Vidale, 1996)，$F(t)$ から時々刻々の位相が求められる：

$$P(t)=\tan^{-1}(\mathscr{H}(f(t))/f(t))$$

である．位相は $-\pi$ から π まで，時系列 $f(t)$ が最大になる位置で位相がゼロである．

地球秤動はChapront and Chapront（1982）によるELP-2000/82の計算に従った．基準の座標値は荒木（1995）にまとめられてあるJ2000（2451545.0ユリウス日）での値を用い，平均赤道座標系での位置を計算し，それを月赤道系における緯度経度に変換した．位相角は地球秤動の緯度／経度／距離のそれぞれについて8時間ごとに計算した時系列から月震の発生時に内挿して求めた．これは月の1日が約27.3日であるから，地球潮汐を計算するのに1日100個弱のデータ数を用いていると考えればよい．このような位相解析を，同じグループと同定されたエベントが10個以上ある深発月震のグループについて調べた．全部で30個の深発月震のグループが解析の対象になった(Table 1)．ただし，1月に複数個のエベントが発生しているグループについては始めのエベントだけ解析の対象とした．Table 1でTotal numberより解析したエベント数が少ないグループはそのような深発月震のグループである．

IV. 深発月震発生時の位相角

深発月震A 33の発生時刻で緯度・経度・距離秤動の位相角をFig. 2に角度ラジアンで示す．横軸はA 33の発生時刻をユリウス日 t（1969年1月1日から数えた）で表した．このA 33は発生時刻が特に規則正しく，遠地点で1月に1度発生することが知られている(Lammlein, 1977；荒木, 1995)．それはFig. 2で距離の位相角がほぼゼロ付近で一定であることからも定量的に見て取

Table 1. Deep moonquake, number of events and total, libration dependence.

Group	Latitude[n] deg N	Longitude[n] deg E	Depth[n] km	Number[p]/Total	Libration[e]
A 01	−16.6	−39.8	920	186 / 186	?
A 05	20.4	−41.0	703	23 / 27	?
A 06	42.8	55.0	853	37 / 41	?
A 07	24.6	53.8	875	42 / 51	? EW-π
A 08	−36.0	−36.4	933	33 / 68	? EW $\pi/2$
A 09	−7.7	−16.5	995	25 / 57	EW NS−2
A 14	−24.7	−36.6	933	32 / 32	NS EW−2.5
A 16	8.6	4.3	1153	29 / 29	NS EW+1
A 17	25.5	−22.0	814	14 / 15	EW NS+1
A 18	22.9	32.1	915	45 / 53	NS+EW
A 19	14.3	−34.6	807	13 / 13	NS EW −2.5
A 20	24.2	−34.6	969	32 / 41	NS+EW
A 21	−13.0	−38.6	969	21 / 25	NS+EW
A 24	−35.3	−40.3	987	32 / 52	?
A 25	35.9	65.9	961	16 / 16	NS EW+0.5
A 27	22.2	19.8	1047	13 / 13	?
A 30	11.9	−34.9	918	34 / 34	EW NS−1.8
A 33	4.6	116.5	898	47 / 49	NS EW 1.7
A 34	7.7	−7.7	993	16 / 16	EW NS−1.7
A 39	−18.8	−9.2	939	16 / 26	NS EW+1
A 40	−1.4	−11.8	898	29 / 30	NS
A 41	17.9	−33.0	801	15 / 15	?
A 42	24.4	−54.8	925	30 / 30	EW NS−2.5
A 44	61.6	52.7	930	18 / 18	NS+EW
A 50	9.7	−53.2	832	11 / 11	?
A 52	−	−	−	10 / 12	EW NS−2.5
A 61	23.7	44.5	805	14 / 14	EW NS+0.5
A 79	−	−	−	11 / 11	?
A 82	24.8	30.4	871	11 / 11	?
A 97	0.8	17.0	960	18 / 18	?

[n]: Nakamura et al. (1982); [p]: the first event at every month; [e]: dependence on NS or EW libration (constant value of libration), numbers are in rad.

れる．そのゆらぎを標準偏差で表せば，0.2 ラジアン程度である．約 27.3 日で 1 周期であるから，この発生周期のゆらぎは 20 時間程度と見積もられる．緯度の秤動を見れば，約 6 年で位相角が繰り返していること，それから微小ではあるが約 206 日のモジュレーションが 6 年の変動にのっているのが明らかである．したがって，特に位相角の特徴的な時刻に発生するA 33 を予測するには±20 時間程度の不確定さがあることになる．周期性だけからは± 2 日程度であったから，位相角の表現から推定される発生時刻のゆらぎは少し改善されている．

Fig. 3 にはA 14, A 18, A 33 の緯度秤動の位相角をそれぞれの発生時刻でプロットした．いずれのグループでも 6 年と 206 日の周期性が見て取れる．206 日の周期性は月軌道に与える太陽の摂動から生じるもので，この周期性は深発月震の観測波形振幅の変化に見出されていた．定量的にこの周期性を示したのは重要で，太陽の摂動が深発月震の発生周期のゆらぎの原因の一つで

あることがわかる．これらのグループの中には特定の経度秤動の位相で発生するものと経度秤動もやはり変化するものの2つがある．しかし，深発月震のなかにはFig. 3の例とはちがい，経度秤動に明瞭な位相角変化を示すグループもある．Fig. 4にA 21，A 30，A 42の例を示した．やはり6年と206日の周期性が見出される．この他に，緯度経度両方に位相角変動が見出せるグループ，いろいろな位相角で月震が発生し規則的な変動が見えにくいグループがある．それらをまとめてTable 1に示した．秤動の特定の位相が顕著に見えるものについてはその値も示した．

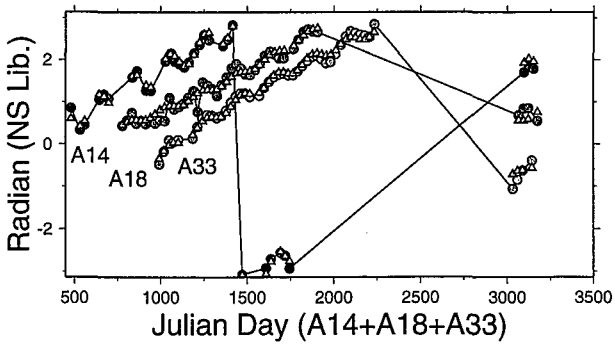

Fig. 3. Latitudal libration phases for A14, A18 and A33 events. Circles indicate the phases of actual timing, whereas triagles the phases calculated from the empirical formula from the data. Periodicities of about 6 years and modulation of 206 days are noticed.

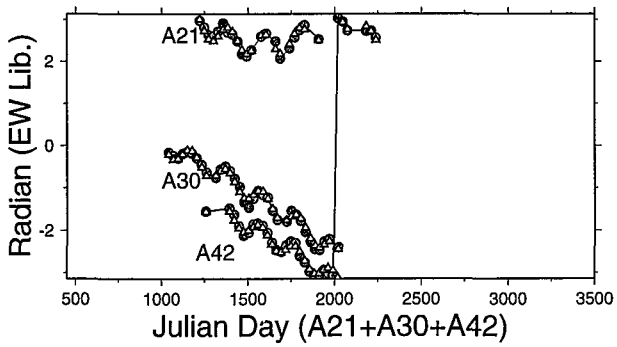

Fig. 4. Longitudinal libration phases for A21, A30 and A42 events. Others are the same as in Fig. 3.

一番数多く発生しているA 1では，あらゆる位相で発生しているため，このような一般的な方法では規則性は見られない．また，A 24のように約半月の周期のエベントが混在しているグループもある．A 1のように本当は同じ深発月震のグループの中でもいろいろな位相で発生しているものがあり，我々が検知したエベントはたまたま特定の周期性や位相特性をもつものだけである可能性も否定できない．これは主に深発月震の振幅が非常に小さく，位相がすこしだけずれたエベントを見出すことが出来ないことが十分考えられるからである．

Lammlein et al. (1974) によれば，East Belt と North-south Belt の2つの深発月震帯が見かけられる．Table 1の結果を見れば，Fig. 3に示した緯度秤動に顕著なグループは East Belt に，Fig. 4に示した経度秤動のグループは North-south Belt に多いようだ．

V．位相角の予測式

深発月震の発生周期性に太陽摂動の206日や6年の周期性が明らかになったので，それぞれのグループが発生する秤動位相の経験式を計算することが出来る．ここで位相角をそれぞれのグループで発生時刻の関数

$$ph(t)=\alpha t^2+\beta t+\gamma+\varepsilon\cos(\omega t+\phi)$$

と仮定し，まず，α，β，γ を最小自乗法で決め，残りの残差から ε と ϕ を決めた．ただし，ω は周期 205.8922237 日の角周波数である．$\alpha=0$ の場合も計算したが，一般に α は非常に小さくその影響は少ない．Fig. 3 や Fig. 4 の図中に三角で印してある位相が，このようにして計算された予測式からそれぞれの深発月震発生時の位相予測値である．

Fig. 5 にはA 14，A 18，A 33 の深発月震が発生した時の緯度秤動の位相角と上の経験式から期待される位相角の差を示した．A 33 の前半 2000 日以前ではその残差は非常に小さい．A 14，A 18 ではいくつかの特に大きな残差が見られる．この傾向は Fig. 6 に示した経度秤動の位相角でも同じである．Table 2 にそれぞれの深発月震のグループで観測値と予測される値との標準偏差をラジアンで示した．特に大きな残差のエベントをのぞけば，標準偏差は Table 2 の値よりさらに小さくなる．A 20，A 30，A 42 など標準偏差が一番小さなグループでは，予測位相の不確定さは約 0.05 ラジアン程度である．秤動の 3 成分を用いた予測にすれば約 0.03 ラジアン程度の

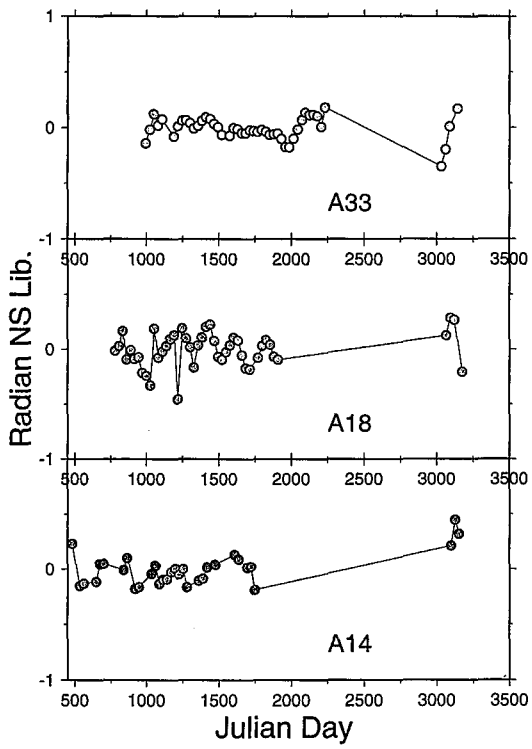

Fig. 5. Deviation of observed and predicted phases in latitudal libration for the events of A33, A18 and A14. Some events show very large deviations but most of them distribute around zero.

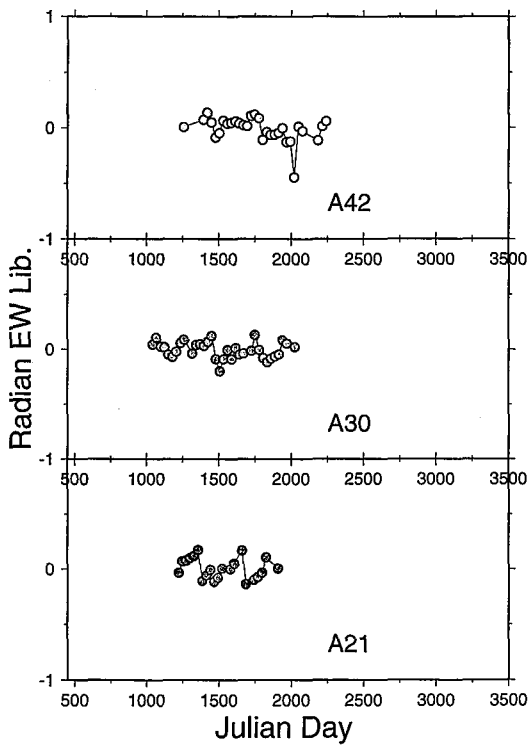

Fig. 6. Deviation of observed and predicted phases in longitudinal libration for the events of A42, A30 and A21.

不確定さとなるだろう．この値は先にA 33で求めた値の7分の1程度で，約3時間と見積もられる．これが最良の場合であり，他の多くの深発月震では予測値のゆらぎはこの2倍から3倍くらいである．

VI. ま と め

アポロ深発月震のなかには1月に1度発生する約27.3日の周期性を示すものがある．しかしその周期性には月の軌道や太陽の摂動などによるゆらぎが含まれているため，周期性に±2日程度の不確定さがある．月震発生の時刻を地球秤動の位相で調べると，発生時刻(位相)のもっとも小さなゆらぎは約20時間程度である．ここでは月－地球，月－太陽の摂動を考え，位相に現れるゆらぎの経験式をつくり，深発月震の発生時刻の予測を試みた．月震の発生位相が規則的で予測が最も良い場合，約3時間程度の不確定さが見積もられた．多くの場合はこの2倍以上である．また，時々予測式から大きくずれて深発月震が発生する場合もある．

一般的に言って，アポロ深発月震は平均約23時間に1個の割で発生していた．したがって，発生時刻を数時間で予測できれば，LUNAR-A計画での将来の月地震観測データの回収に大きく貢献することになる．しかし，Fig. 7に示したように，おおよそ1500日から1800日の範囲ではA 20とA 30の発生位相が完全に重なってしまう．そのような時期と深発月震のグループも存在する．また，A 1のようにあらゆる位相で発生する深発月震のグループもあり，今回の解析手法だけからでは，エベントの同定を完全に行えるわけではないことがわかった．

Table 2. Standard deviation of predicted phases by empirical formulae

Group	NS (rad)	EW (rad)
A 09	0.1744	0.1789
A 14	0.1469	0.0760
A 16	0.1789	0.1672
A 17	0.0969	0.0731
A 18	0.1551	0.1391
A 19	0.0681	0.0971
A 20	0.0470	0.0630
A 21	0.0807	0.0939
A 25	0.0932	0.1151
A 30	0.0563	0.0748
A 33	0.1010	0.0678
A 34	0.1091	0.1276
A 39	0.0991	0.0943
A 40	0.1161	0.1170
A 41	0.1211	0.1217
A 42	0.0526	0.0771
A 44	0.0584	0.0913
A 50	0.1060	0.1483
A 52	0.0931	0.1148
A 61	0.1442	0.1788
A 79	0.0765	0.0878
A 82	0.1253	0.1268
A 97	0.0803	0.0689

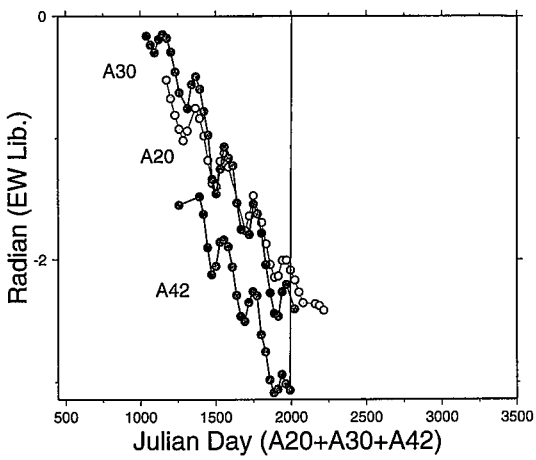

Fig. 7. Longitudial libration phases for A20, A30 and A42 events. From days about 1500 to 1800 the phases of A20 and A30 are overlapped.

文　献

荒木博志, 1995. 月震発生様式の解明とその LUNAR-A 計画における月震観測への適用, 博士学位論文, 宇宙科学研究所, 186 pp.

Araki, H., 2001. Focal processes of deep moonquakes, *J. Geod. Soc. Japan*, **47**, 508−513.

Cheng, C.H. and M.N. Toksöz, 1978. Tidal stresses in the moon, *J. Geophys. Res.*, **83**, 845−853.

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

Dickey, J.O., P.L. Bender, J.E. Faller, X.X. Newhall, R. L. Ricklefs, J.G. Ries, P.J. Shelus, C. Veillet, A.L. Whipple, J.R. Wiant, J.G. Willians and C.F. Yoder, 1994. Lunar laser ranging: A continuing legacy of the Apollo program, *Science*, **265**, 482−490.

Koyama, J. and Y. Nakamura, 1980. Focal mechanism of deep moonquakes, *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.*, **11**, 1855−1865.

小山順二・山田功夫・村上英記・本多理恵・石原靖・伊藤潔・寺薗淳也・荒木博志・藤村彰夫・早川雅彦・田中智・横田康弘・飯島裕一・水谷仁, 1998. ルナーA計画：ペネトレータ月探査の概要, 北海道大学地球物理学研究報告, **61**, 141−166.

Lammlein, D., 1977. Lunar seismicity and tectonics, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **14**, 224−273.

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.

Mizutani, H., 1995. Lunar interior exploration by Japanese lunar penetrator mission, LUNAR-A, J. Phys. Earth, **43**, 657−670.

中村吉雄, 1976. 月の地震学, 科学, **46**, 135−144.

Nakamura, Y., 1978. A1 moonquakes: Source distribution and mechanism, *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.*, **9**, 3589−3607.

Nakamura, Y., 1983. Seismic velocity structure of the lunar mantle, *J. Geophys. Res.*, **88**, 677−686.

Nakamura, Y., G.V. Latham and H.J. Dorman, 1982. Apollo Lunar Seismic Experiment-Final Summary, *J. Geophys. Res.*, **87**, A117−A123.

Vidale, J.E., 1996. Complex polarization analysis of particle motion, *Bull. Seismo. Soc. Am.*, **76**, 1393−1405.