天ヶ瀬観測室の鉛直成分伸縮計で記録された 常時地球自由振動の日周変化について

京都大学防災研究所附属地震予知研究センター* 森井 互

On the Diurnal Variation in the Earth's Background Free Oscillations Recorded by the Vertical Extensometer in Operation at the Amagase Observatory

Wataru MORII

Research Center for Earthquake Prediction, Disaster Prevention Research Institute,
Kyoto University, Uji, Kyoto 611-0011, Japan

(Received July 1, 2000; Accepted December 11, 2000)

Earth's free oscillations excited independently of earthquakes were detected by the vertical strain seismograph being in operation at the Amagase Observatory, Kyoto University, Japan. Though weak, diurnal variation in Earth's background free oscillations was evident. The maximum and the minimum of diurnal variations were found in intervals from 14 to 16 o'clock (JST) and from 6 to 8 o'clock (JST), respectively. It was also found that the feature of the diurnal variation above mentioned was evident in the summer of the northern hemisphere and disturbed in the winter.

Key words: Strain seismograph, Earth's free oscillation, Diurnal variation.

§1. はじめに

これまで地球の自由振動は大地震によって励起されるものと考えられてきたが、南極昭和基地の超伝導重力計の記録から地震の発生とは無関係に地球自由振動が常時存在するらしいことが見い出された[NAWA *et al.* (1998)]. その後同様の結果が昭和基地以外の観測点においても観測されることが報告されている[SUDA *et al.* (1998)]. NAWA *et al.* の結果に対しては疑問も提出された[IMANISHI (1998)]が、より詳細な検討の結果[TANIMOTO *et al.* (1998); NAWA *et al.* (1998)]から判断して、常時励起される地球自由振動は存在すると考えられる。常時地球自由振動は超伝導重力計およびSTS地震計の記録から検出されているが、今回鉛直成分伸縮計の記録からも常時地球自由振動と考えられる信号が検出されたので、それについて報告する。

現在のところ常時存在する地球自由振動の励起源としては大気運動が有力視され[KOBAYASHI and NISHIDA (1998); NISHIDA and KOBAYASHI (1999)], その傍証とし

て常時観測される地球自由振動のスペクトル強度が日周変化を示すことが報告されている[須田・他(1999)]. 須田・他の結果は非常に興味深いものであるが、解析には12時間のタイムウインドウが用いられているため時間分解能が十分とは言えない。常時地球自由振動の特性を明らかにするためには信号強度の時間的な変化をより詳細に調べることが求められる。本稿では時間分解能に優れたスペクトル推定法である「共振法」[森井(2000)]を用いて、常時地球自由振動の信号強度の時間変動の特性をより詳細に検討した。

§2. データと解析方法

2.1 観測システム

今回使用したデータは京都大学防災研究所附属地震予知研究センター天ヶ瀬観測室に設置された鉛直成分伸縮計によって得られた記録である。天ヶ瀬観測室の伸縮計は1995年から1996年にかけて、支持方式、センサーおよび収録システムの全面的な改良が行われ、分解能、動帯域共に大幅に向上している。観測計器の設置場所は、全長1800メートルの直線坑道の入り口から約450

*〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

Fig. 1. A block diagram of the observation system. Numbers and alphabets denote the following equipments: 1-super-invar rod of 5.8 meters length; 2-differential transformer; 3-rectifier circuit and oscillator to excite the differential transformer; 4-antialias filter with cut-off frequency of 0.25 Hz; 5-differential amplifier with gains of 46 dB; 6-A/D converter with a quantization of 14 bits; 7-D/A converter with a quantization of 14 bits; 8-bus extender with optical transceiver; 9-GPS clock; 10-personal computer controlling the A/D converter and the D/A converter; 11-work station making and transmitting data files; 12-terminal adaptor to match ISDN; A-IEEE-488 bus; B-optical fiber cable of two-way communication. Analog signals travel following arrows.

メートルの位置で、鉛直方向の被りは約 110 メートルである。このため、設置場所の気温変化は年間を通じて 100 分の 2 度未満であり、良好な観測環境を備えている。観測システムのブロック図を Fig. 1 に示す。

このシステムの特徴の一つは、D/A 変換器と差動増幅機を使用して収録システムの動帯域の拡大を図っている点である。センサーからの出力信号は A/D 変換されて「低感度記録」として計算機に取り込まれると同時に D/A 変換される。その D/A 変換出力とセンサーからの出力の差を 200 倍に増幅したものが A/D 変換されて、「残余記録」として取り込まれる。「低感度記録」と「残余記録」は下記の手順で処理され、「高感度記録」が合成される。

時刻 t に得られた低感度記録の値を L_t 、 L_t に対応する D/A 変換出力を $A(L_t)$ 、残余記録の値を R_t 、高感度記録の値を H_t とすると、三者の関係は (1) 式で表される。

$$H_t = \{A(L_{t-\delta t}) \times 200\} / V_d + R_t \quad (1)$$

ここで、 V_d は A/D 変換器の 1 デジット当たりの電

圧、 δt は A/D 変換のサンプリング間隔を表す。本システムで使用している D/A 変換器の数値入力範囲は -8193 から $+8192$ までの整数値であるが、そのすべての数値入力に対するアナログ出力の値は、あらかじめ 6.5 桁保証のデジタルボルツメータで実測して数値表にまとめられている。(1) 式に含まれる D/A 変換出力の値 $A(L_t)$ には、この数値表の値が使用される。

本稿で使用したデータは、以上のようにして得られたサンプリング間隔 1 秒、動帯域 130 dB、最小分解能 4.9×10^{-12} の「高感度記録」である。Fig. 2 に「高感度記録」の一例として、1997 年 12 月にカムチャッカ付近で発生したマグニチュード 7.6 の地震による歪波形を含む記録を示す。

2.2 解析方法

解析方法として使用した共振法は、共振型の特性を持つ応答関数を用いて特定の周波数成分の信号強度の時間的な変化を求める方法である[森井(2000)]。その概要を以下に述べる。まず最初に (2) 式で示した応答関数の双 1 次変換によって合成した再帰型フィルタを使用して時系列データのフィルタリングを行う。

$$H(p) = (p\omega_0/R) / \{p^2 + (p\omega_0/R) + \omega_0^2\} \quad (2)$$

ここで p は複素変数、 ω_0 は共振角周波数を表し、 R は遮断特性を決めるパラメータである。(2) 式の応答関数は極めて急峻な遮断特性を示すが通過帯域には幅があり、完全に単一の周波数成分だけを分離できるわけではない。そこで次のような手続きによって単一周波数成分のみを分離する。

(2) 式のフィルタからは、ほぼ正弦波と見なせる出力時系列が得られる。そこで、時系列の m 番目と $m+1$ 番目のピークの時間差 T_m をその区間の信号の周期と見なす。 T_m が求めるべき周波数成分の周期 ($2\pi/\omega_0$) と一致した場合には時刻 tp_m における振幅を A_m 、一致しない場合にはゼロと見なして、信号成分の振幅を表す時系列 $A(\omega_0, tp_m)$ を (3) 式のように定義する。なお、 tp_m はフィルタ出力時系列の m 番目のピークに対応する時刻を、 A_m は m 番目のピークの振幅を表す。

$$A(\omega_0, tp_m) = A_m \quad (T_m = (2\pi/\omega_0)) \\ 0 \quad (T_m \neq (2\pi/\omega_0)) \quad (3)$$

長さ T の解析区間における角周波数 ω_0 の周波数成分の信号強度は (4) 式で定義する。

$$S(\omega_0) = (2\pi/\omega_0)^2 \sum A(\omega_0, tp_m) / T \quad (4)$$

ある解析区間内で信号強度が卓越する周波数成分の検出を行う場合は、(4) 式の ω_0 の値を微小な刻み $\delta\omega$ で変化させて $S(n\delta\omega)$ を求め、その値を比較することによって行う。特定の周波数成分の信号強度の時間的な変化を求める場合は、解析するデータを時間長 T のタイムウイン

ドウで分割し、順番に $S(\omega_0)_1, S(\omega_0)_2, \dots, S(\omega_0)_n$ を計算する。その後、各ウィンドウごとに求まる $S(\omega_0)_m$ の値を比較することによって時間変動を調べる。

§ 3. 解 析

BENIOFF *et al.* (1961) によって初めて地球自由振動が観測されて以来、伸縮計は重力計と並んで地球自由振動観測のための有力な手段であり、現在も多くの研究で使用されている [例えば、永井・他(1987); 川崎・他(1991)]。今回使用した鉛直成分伸縮計も地球自由振動の周波数帯域に対して十分な感度を有するものであるが、それを確かめるために自然地震で励起された地球自由振動の検出例を最初に示す。

3.1 大規模地震に際して検出された地球自由振動

解析に用いたのは1997年12月に発生したカムチャッカ地震 ($M_s=7.6$) と1998年3月に発生したバレー地震 ($M_s=8.0$) の記録である。解析区間はいずれの場合も60時間である。解析方法は前節に述べた「共振法」を使用し、200秒から2200秒までの周期帯についてスペクトル強度を求めた。解析には、(2)式で $R=300$ とした共振フィルタを使用した。解析結果をFig. 3に示す。図に示したように、スペクトルピークの多くが地球自由振動の各モードとして同定された。スペクトルピークの周期とPREM [DZIEWONSKI and ANDERSON (1981)] モデルの固有周期の理論値との差をTable 1に

示す。Table 1の数値は、(観測値-理論値)/理論値を百分率で表したものである。スペクトルピークを地球自由振動のモードとして同定する際に、スペクトルピークの周期と理論値との差が0.5%未満であることを条件としているので、Table 1の数値は総て0.5%未満となっている。なお「共振法」の特性から、求められるスペクトルの周期の最小分解能はデータのサンプリング周期と等しくなるので、ここで求められたスペクトルの周期の刻みは1秒である。したがってPREMモデルに対して求まる各モードの固有周期の理論値と比較する場合には、理論値の小数点以下を四捨五入した値を用いている。

3.2 常時地球自由振動の検出

解析に用いたのは1998年1月1日から12月31日までの1年間の記録である。「常時地球自由振動」は地震の発生と無関係に励起される地球自由振動を意味するものである。解析すべき記録から地震の影響を取り除く必要がある。本稿では、地震の影響を取り除くためにマグニチュード5以上の地震が記録されている部分を、解析する記録に遮断周波数1/21600 Hz、減衰特性-72 dB/dec.の低域通過フィルタを掛けたもので置き換えた。置き換える範囲は地震の表面波マグニチュードに基づいて、1) マグニチュード5以上6.5未満の場合は24時間、2) マグニチュード6.5以上7.0未満の場合は72時間、3) マグニチュード7.0以上7.5未満の場合は96時間、4) マグニチュード7.5以上の場合は120時間、

Fig. 2. An example of strain seismogram containing an earthquake record. The upper figure shows the continuous record from December 1 to December 10, 1997. The lower one shows the expanded record of the earthquake.

Fig. 3. Spectra of strain seismograms for the Kamchatka earthquake on December 05, 1997 and the Balleny earthquake on March 25, 1998. Vertical lines denote spectral peaks identified as spheroidal modes. Inset numbers correspond to modes listed in the Table 1. Horizontal coordinates indicate period in seconds. Vertical coordinates indicate the ratio to the maximum value of spectra obtained.

とした。このような基準を定めた理由は以下のとおりである。鉛直成分伸縮計に記録された基本モードの歪振幅は、前述のカムチャッカ地震およびバレーニー地震の場合

で高々 10^{-9} のオーダーであった。より小規模な地震に際して励起される基本モードの振幅はマグニチュードに応じて小さくなるはずである。したがって、報告されて

Table 1. Deviations of observed eigenperiods from theoretical ones evaluated for PREM model.

No.	MODE	Kamchatka 1997/12/05	Balleny 1998/03/25	Incessant excitation	No.	MODE	Kamchatka 1997/12/05	Balleny 1998/03/25
01	0S00	-0.16 %		-0.16 %	46	1S05	0.27 %	
02	0S03	-0.47 %	-0.47 %	0.09 %	47	1S06	-0.15 %	
03	0S04	0.06 %		-0.13 %	48	1S07	0.17 %	-0.17 %
04	0S05	-0.00 %			49	1S08		0.00 %
05	0S06	0.21 %	0.00 %	-0.21 %	50	1S09	-0.20 %	0.00 %
06	0S07	0.12 %		0.12 %	51	1S14		0.00 %
07	0S08	-0.14 %	0.14 %	0.14 %	52	1S15	0.00 %	
08	0S09	0.16 %	-0.16 %	0.32 %	53	1S20	0.41 %	0.00 %
09	0S10	0.00 %	0.00 %	0.00 %	54	1S21	0.41 %	
10	0S11	-0.19 %			55	1S23	-0.44 %	
11	0S12	0.20 %	-0.40 %	-0.20 %	56	1S27	0.00 %	
12	0S13	0.21 %	0.00 %	-0.42 %	57	2S00	0.25 %	-0.25 %
13	0S14	0.00 %		0.22 %	58	2S02	0.38 %	-0.10 %
14	0S15	-0.23 %	0.23 %	-0.23 %	59	2S03	0.00 %	
15	0S16	0.25 %	0.00 %	-0.25 %	60	2S04	0.14 %	
16	0S17	-0.26 %		-0.26 %	61	2S05	0.00 %	0.15 %
17	0S18		0.27 %	0.27 %	62	2S06	-0.34 %	
18	0S19	0.28 %	0.00 %	-0.28 %	63	2S07		0.00 %
19	0S20	-0.29 %	0.29 %		64	2S08	0.00 %	
20	0S21	0.00 %		0.30 %	65	2S09		0.22 %
21	0S22	-0.31 %	-0.31 %		66	2S10	-0.24 %	
22	0S23		-0.32 %		67	2S12		-0.27 %
23	0S24		0.00 %		68	2S15	0.00 %	
24	0S25	0.34 %	0.34 %	0.34 %	69	3S01	-0.09 %	0.09 %
25	0S26	-0.34 %	-0.34 %	0.00 %	70	3S02	-0.11 %	-0.11 %
26	0S27	0.00 %	-0.35 %	0.00 %	71	3S03	0.00 %	0.29 %
27	0S28	0.36 %	-0.36 %	-0.36 %	72	3S06	0.26 %	0.26 %
28	0S29	-0.37 %	0.37 %	-0.37 %	73	3S09	0.00 %	
29	0S30	-0.38 %	0.00 %	0.00 %	74	3S11		0.00 %
30	0S31	0.00 %	0.39 %	0.39 %	75	3S12	-0.34 %	
31	0S32			0.40 %	76	3S14	0.00 %	
32	0S33			0.00 %	77	3S16	0.00 %	
33	0S34	-0.42 %	0.00 %	0.00 %	78	3S21	0.00 %	
34	0S35	0.00 %	-0.43 %	0.00 %	79	4S03	0.20 %	
35	0S36		0.00 %	0.43 %	80	4S05	-0.24 %	
36	0S37			0.00 %	81	4S13	0.00 %	
37	0S38	0.00 %	0.00 %	-0.45 %	82	4S14		0.00 %
38	0S39	-0.46 %	0.00 %		83	5S02		0.21 %
39	0S40		0.00 %	0.00 %	84	5S03	-0.22 %	-0.22 %
40	0S41			0.48 %	85	5S05	0.00 %	0.00 %
41	0S42	0.00 %	0.00 %	0.49 %	86	5S06		0.30 %
42	1S00	-0.16 %	-0.16 %		87	5S07	-0.33 %	
43	1S02	0.48 %			88	6S01		0.00 %
44	1S03	-0.38 %			89	6S03	-0.28 %	
45	1S04	0.00 %	0.35 %		90	6S09		0.00 %

いる Q 値 [MASTERS and GILBERT (1983)] に基づけば、1000 秒より短い固有周期をもつ基本モードの振幅は上記の時間範囲内で観測計器の最小分解能 (4.9×10^{-12}) 以下の値に減衰するはずである。1000 秒より長い固有周期をもつモードについては上記の時間範囲内では十分に減衰し得ない可能性もある。しかし、1000 秒以上の固有周期をもつモードが十分に減衰するのに必要な時間範囲を設定した場合、記録全体の約 59% が置き換えられてしまうため、今回の解析に当たっては上記の時間範囲を設定した。1000 秒を越す固有周期を持つモードについては別個に議論する。また、マグニチュード 5 未満

の地震については、使用した記録上に目視で波形が認められるものがなかったため、「置き換え」の対象とはしなかった。USGS の震源情報に基づいて上記の手続による処理を行った結果、低域通過フィルタを掛けた記録に置き換えられた部分は解析区間全体の約 23% であった。

地震の影響を取り除いた記録から共振法によって求めたスペクトルを Fig. 4 に示す。共振フィルタは、(2) 式で $R=300$ としたものを使用した。求められたスペクトルピークの周期と PREM モデルに対して求まる固有周期の理論値との差が 0.5% 未満の場合に、そのスペクトルピークを地球自由振動による信号と同定した。各モー

ドの固有周期の観測値と理論値の差は Table 1 に示した。

3.3 常時地球自由振動の日変化

常時地球自由振動の日変化の検出は以下の手順で行った。

1) ${}_0S_n$ と同定したスペクトルピークの角周波数を ω_n として (3) 式に示した時系列 $A(\omega_n, t_{pm})$ を求める。ここで t_{pm} は 1998 年 1 月 1 日 0 時 0 分 0 秒を起点とした積算時間である。

2) 解析区間全体を 1 時間のタイムウインドウで切り分け、1998 年 1 月 1 日を起算日として第 i 日 j 時までのウインドウに含まれる $A(\omega_n, t_{pm})$ の総和を ${}_iA_j(\omega_n)$ とする。なお、 j 時は日本標準時である。

3) 次に (5) 式で示すように 0 時から 23 時の範囲での信号強度の変化 $B_j(\omega_n)$ を次のようなスタッキングによって求める。

$$B_j(\omega_n) = \sum_{i=k}^l {}_iA_j(\omega_n) \quad (5)$$

ここで k, l はスタッキングを行う期間を示す数値である。さらに、 $B_j(\omega_n)$ の平均値 $C(\omega_n)$ を求める。

$$C(\omega_n) = \sum_{j=0}^{23} B_j(\omega_n) / 24 \quad (6)$$

最後に $B_j(\omega_n)$ の、平均値 $C(\omega_n)$ からの偏差 $D_j(\omega_n)$ を求める。

$$D_j(\omega_n) = (B_j(\omega_n) - C(\omega_n)) / C(\omega_n) \quad (7)$$

以上の手順によって求めた結果を Fig. 5 に示す。図に示した曲線は、Fig. 4 および Table 1 に示した各モードの内 ${}_0S_6$ から ${}_0S_{42}$ までに対応する 31 本の曲線である。Fig. 5A は (5) 式で ($k=0, l=364$) とした場合、すなわち 1998 年 1 月 1 日から 12 月 31 日までの一年間のスタッキングによる結果である。Fig. 5B および C は、春分と秋分を境にして北半球の冬を含む半年と夏を含む半年についてのスタッキングの結果である。各々のスタッキングの区間を示す k と l の値は、Fig. 5B では ($k=0, l=79$) と ($k=263, l=364$)、Fig. 5C では ($k=80, l=262$) である。

Fig. 5A に示したように、信号強度の時間変化は平均値からの偏差が高々 10% 程度と微弱なものであり、また各モードごとにばらつきがあるものの、全体として明瞭な日周変化を示している。Fig. 5B と C は、上述のように北半球の冬と夏を含む各々の半年間についてのスタッキングの結果である。図から明らかなように、Fig. 5A にみられた日周変化の傾向は夏を含む半年間の区間でより明瞭になっている。冬を含む半年間では各曲線ごとのばらつきも大きく、日周変化の傾向は不明瞭になっている。これは常時地球自由振動の信号強度が季節変化を示すこと [NISHIDA *et al.* (2000)] と関係している可能性が考えられる。

Fig. 4. The spectrum of the strain seismogram from January 1 to December 31, 1998. For the seismogram, effects from earthquakes were minimized as much as possible using with a kind of filter. Vertical lines denote spectral peaks identified as fundamental spheroidal modes. Inset numbers correspond to modes listed in the Table 1. Horizontal coordinates indicate period in seconds. Vertical coordinates indicate the ratio to the maximum value of spectra obtained.

前述のように、地震による影響を除去するために、地震の発生した時間帯の記録はマグニチュードに応じて一定の区間を原記録に遮断周波数 $1/21600$ Hz の低域通過フィルタを掛けたもので置き換えている。したがっ

Fig. 5. Diurnal variations of signal intensities of fundamental spheroidal modes. Vertical coordinates indicate deviation of the signal intensity and horizontal coordinates indicate the time in JST. Each curves were obtained by stacking the amplitudes on the same hour for three intervals indicated above figures.

で、「置き換え」を行った区間では地球自由振動の信号強度はゼロになるはずである。しかし、共振法では記録上の信号成分が消失した後もフィルタの共振がしばらく続くために、擬のスペクトルが生じると言う特性がある

Fig. 6. The relation between the signal-to-noise ratio and resolution. The vertical coordinate indicates resolving power of "RESONATOR". The horizontal coordinate indicates signal-to-noise ratio. The synthesized records used are sinusoidal waves immersed in white noise. The numerical tests were made for cases that periods of sinusoidal waves were 200, 500 and 1000 seconds, respectively. The length of the data are 6 hours.

[森井(2000)]. このため、今回の解析の場合も「置き換え」を行った区間に擬の信号強度が認められた。しかし、「置き換え」を行った区間に対して求まる信号強度の値は、各モードごとに異なるが、全解析区間に対して求まる信号強度の値の0.7~1.5%程度であり、解析結果に影響を及ぼすものではない。また、「置き換え」は24時間単位で行っているため、全解析区間でスタッキングを行って求めた日周変化のパターンには影響を与えない。北半球の夏と冬の期間それぞれについては、「置き換え」を行った区間が占める割合が異なっている。「置き換え」を行った区間全体の46%が冬の期間に、54%が夏の期間に含まれる。このことが夏期と冬期の日周変化のパターンの違いに関係している可能性は否定できない。しかし、スタッキングを行う期間が長い程結果が安定するのが一般的であるので、「置き換え」区間の占める割合が高い夏期により安定した結果が得られていることから、夏期と冬期の日周変化パターンの相違の原因が「置き換え」区間の占める割合の違いである可能性は低いと考えられる。

§4. 解析結果の検討

最後に、解析結果に対するバックグラウンドノイズおよび解析に使用した共振フィルタの影響について検討した。

4.1 バックグラウンドノイズ

Fig. 6 に、角周波数 ω の正弦波と白色雑音を重ね合わ

せた数値合成データを使用して、共振法によって求められる信号強度とS/N比の関係を示す。 ω としては、 $2\pi/200$, $2\pi/500$, $2\pi/1000$ の3通りの値を使用した。横軸はS/N比を、縦軸はS/N比Iの合成データに対して求められる信号強度 $S_I(\omega)$ とノイズが無い場合の合成データに対して求められる信号強度 $S_F(\omega)$ の比 $S_I(\omega)/S_F(\omega)$ を百分率で示す。なお、S/N比は正弦波と白色雑音の二乗平均振幅の比である。図に示すように、共振法によって求められる信号強度 $S(\omega)$ の値は、S/N比の低下に伴って減少する。したがって、Fig. 5に示した日周変化が実際に地球自由振動の振幅の変化によるものであるのか、あるいはバックグラウンドノイズの影響によるものであるのかを確認するために、ノイズの日周変化を調べた。

最初に、Fig. 5に日周変化を示した31の各モードの中間の周期に対して求められる信号強度の日周変化を調べた。隣接する二つのモードの角周波数を ω_m , ω_n として、その中間の角周波数 $(\omega_m + \omega_n)/2$ に対して、(5)~(7)式の処理によって求めた曲線をFig. 7Aに示す。スタッキングの期間は1年間である。図から明らかに、各モードの中間の周期に対応する信号強度の値には、Fig. 5Aに示したような明瞭な日周変化が見られなかった。

次に、周期100秒から1000秒迄の帯域における二乗平均振幅の変化を調べた。解析した1年間の記録にバンドパスフィルタを掛けた後、幅1時間のタイムウィンドウで分割し、各ウィンドウごとの二乗平均振幅を求め、地球自由振動の日周変化を求めた場合と同様に、スタッキングによって二乗平均振幅の日周変化を求めた。結果をFig. 7Bに示す。二乗平均振幅は、日中に増加し深夜に減少する傾向を示すが、その変化は $\pm 2\%$ 程度であり、曲線の形も地球自由振動の日周変化と異なっている。二乗平均振幅を歪に換算すると、約 5.7×10^{-10} である。一方、地球自由振動に関しては、共振法で求めた信号強度をそのまま歪に換算することができないので、(3)式で求める時系列 $A(\omega_0, tp_m)$ のゼロでない値だけの平均値を求めて各モードの平均振幅と見なした。バックグラウンドノイズがランダムノイズである場合は、Fig. 6に示すように共振法で求める信号強度の値はS/N比の低下に伴って減少する。これは共振フィルタの出力波形がノイズの影響で歪むためにピークの位置が移動し、(3)式の処理に際して $A(\omega_0, tp_m)$ がゼロになる率が増すことが主たる原因である。ノイズの影響による出力波形の振幅 A_m そのものの変化は無視できる程度に微小であり、信号成分の振幅と見なし得る。平均振幅の値は各モードごとに異なるが、歪に換算して $3.9 \times 10^{-11} \sim 7.4 \times 10^{-11}$

Fig. 7. Diurnal variations of background noise. The upper figure shows variations of signal intensities evaluated for intermediate periods between adjacent modes identified. The lower one shows variations of the rms amplitude in the period range from 100 to 1000 seconds. All curves were obtained in the same manner as Fig. 5.

と成り、S/N比は $-23 \text{ dB} \sim -18 \text{ dB}$ と見積もられる。Fig. 4では S_6 から S_{42} までの各モードの信号強度が5倍程度異なっているのに対して、ここで見積もった平均振幅の違いが2倍程度であることは矛盾しているように見えるかもしれないが、この違いは信号強度を求める際に(3)式の処理をすること、信号強度 $S(\omega_0)$ を定義した(4)式に $(2\pi/\omega_0)^2$ の項が含まれるためである。Fig. 6を参照して、 -18 dB から -23 dB の範囲においてS/N比の変動だけで信号強度に $\pm 5\%$ の変化を生じさせようとするれば、ノイズレベルが15%~20%以上変動することが必要である。逆に、Fig. 7Bに示したような $\pm 2\%$ 程度のノイズレベルの変動が信号強度の変化に及ぼす影響は0.6~0.7%程度である。

以上述べたように、本論で使用したデータはS/N比が良好とはいいがたいが、各モードの中間の周期に対応

Fig. 8. Correction for the filter response. The upper figure shows the average of 31 curves in Fig. 5A. Vertical segments indicate deviations of 31 curves from the average. Making a correction of the upper one for the filter response, lower one was obtained. The vertical and horizontal coordinates are the same as Fig. 5.

する信号強度が地球自由振動の信号強度に見られるような日周変化を示さないこと、また、ノイズの二乗平均振幅の変動が定性的にも定量的にも地球自由振動の信号強度の日周変化の原因とは考えられないことから、Fig. 5に示した日周変化は常時地球自由振動の振幅変化を表すものと考えられる。

4.2 共振フィルターの影響

(2) 式の応答函数から導かれるように、解析に使用した共振フィルタは移相を生じないフィルタである。しかし、共振特性を決定するパラメータ R の値が大きくなるにしたがってフィルタの時定数が増大し、入力信号の最大値とフィルタの出力信号の最大値の間の時間遅れが増大する特性がある。共振法では信号強度を求める際に(3)式に示す処理を行うため、信号強度と共振フィルタの出力振幅は必ずしも1対1に対応しない。したがっ

て、求められた信号強度の変化に対して、無条件にフィルタ特性の補正を行うことはできない。しかし今回の解析例では、Fig. 7Bに示したようにバックグラウンドノイズのレベルの変動が少いことから、求められた信号強度の変化と共振フィルタの出力信号の振幅はほぼ対応していると考えて良さそうである。共振フィルタは前述のように再帰型のフィルタなので、対応する再帰型のデコンボリューションフィルタを使用する事によって、因果律を保ったまま容易にその特性を補正することができる[KULHANEK (1976)]。

Fig. 8AはFig. 5Aに示した31の曲線の平均値である。この曲線を包絡線とする正弦波を合成し、デコンボリューションフィルタによる補正を行って得られた信号の包絡線がFig. 8Bである。補正後の結果が階段状に成っているのは、Fig. 8Aの曲線が実際には1時間ごとの値を直線で結んだ「折線」であることの影響である。なお、フィルタの時定数による時間遅れは正弦波の周期に関係なく一定である。図に見られるように、補正前と補正後の曲線を比較すると、最大値最小値共に約2時間の時間差を生じているが、日周変化のパターンには変化がみられなかった。

§5. おわりに

カムチャッカ地震およびバレー地震の記録の解析から、鉛直成分伸縮計が地球自由振動の帯域に対して十分な感度があり、その記録から各モードが分離できることが示された。また、地震の影響を除去した後の記録から地球自由振動の各モードに対応するスペクトルピークが検出されたことから、これらのスペクトルピークは常時地球自由振動によるものと考えられる。検出された各モードの信号強度の時間変化を調べた結果、 ${}_0S_6$ よりも周期の短い各モードの信号強度は微弱ではあるが明瞭な日周変化を示すことが確認された。日周変化の特徴としては、日本標準時の午後に最大値が、午前に最小値が見られた。求めた信号強度に共振フィルタの補正を行った結果を考慮すると、最大値は日本標準時の14時から16時の間に、最小値は6時から8時の間にあると考えられる。さらに、信号強度の日周変化が北半球の夏を含む半年間でより明瞭になり、冬を含む半年間では不明瞭になることも明らかになった。しかし解析した記録の期間が1年間だけであることから、季節変化については今のところ結論は下せない。今後のデータの蓄積をまって検討したい。

また、 ${}_0S_0$, ${}_0S_3$, ${}_0S_4$ の各モードについてはFig. 5に示したような信号強度の日周変化の傾向が見られなかった。前述のように、これらのモードについては大規模地

震によって励起された信号が十分に除去されていない可能性がある。やはりデータの蓄積をまって、より厳密な検討を行いたい。

謝 辞

原稿を読み貴重な助言を下さった京都大学防災研究所の重富國宏氏に感謝致します。また、観測システムの改良にご支援を頂いた京都大学防災研究所技術室の山田勝氏、市川信夫氏、園田保美氏にお礼申し上げます。査読をして頂いた小山順二氏と小林直樹氏の貴重なコメントにより、本論の不備な点が改善された。お礼申し上げます。

文 献

- BENIOFF, H., F. PRESS and S. SMITH, 1961, Excitation of the free oscillations of the earth by earthquakes, *J. Geophys. Res.*, **66**, 605-619.
- DZIEWONSKI, A. M. and D. L. ANDERSON, 1981, Preliminary reference Earth model (PREM), *Phys. Earth Planet. Interiors*, **25**, 297-356.
- IMANISHI, Y., 1998, Comment on "Incessant excitation of the Earth's free oscillation" by NAWA *et al.*, *Earth Planets Space*, **50**, 3-8.
- 川崎一郎・大嶋主悦・三上直也・堀 貞喜, 1991, 日本列島近辺のサイレントアースクエーク検出の試み, *地震* **2**, **44**, 75-83.
- KOBAYASHI, N. and K. NISHIDA, 1998, Continuous excitation of planetary free oscillations by atmospheric disturbances, *Nature*, **395**, 357-360.
- KULHANEK, O., 1976, Introduction to Digital filtering in Geophysics, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, pp. 120-129.
- MASTERS, G. and F. GILBERT, 1983, Attenuation in the earth at low frequencies, *Phil. Trans. Roy. Soc. London, A*, **308**, 479-552.
- 森井 互, 2000, 共振型応答函数を使用したスペクトル推定法開発の試み, *地震* **2**, **53**, 107-113.
- 永井 章・三上直也・柏原静雄, 1987, 松代で観測された地球の自由振動, *気象庁地震観測所技術報告*, **8**, 58-64.
- NAWA, K., N. SUDA, Y. FUKAO, T. SATO, Y. AOYAMA and K. SHIBUYA, 1998, Incessant excitation of the Earth's free oscillations, *Earth Planets Space*, **50**, 3-8.
- NAWA, K., N. SUDA, Y. FUKAO, T. SATO, Y. AOYAMA and K. SHIBUYA, 1998, Reply, *Earth Planets Space*, **50**, 887-892.
- NISHIDA, K. and N. KOBAYASHI, 1999, Statistical features of Earth's continuous free oscillations, *J. Geophys. Res.*, **104**, 28741-28750.
- NISHIDA, K., N. KOBAYASHI and Y. FUKAO, 2000, Resonant Oscillations Between the Solid Earth and the Atmosphere, *Science*, **287**, 2244-2246.
- SUDA, N., K. NAWA and Y. FUKAO, 1998, Earth's background free oscillations, *Science*, **279**, 2089-2091.
- 須田直樹・菊池康友・名和一成・深尾良夫, 1999, 常時地球自由振動の日変化, *地球惑星科学関連学会 1999 年合同大会予稿集*, De-018.
- TANIMOTO, T., J. UM, K. NISHIDA and N. KOBAYASHI, 1998, Earth's continuous oscillations observed on seismically quiet days, *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 1553-1556.