

# 自由振動を用いたサイレント地震の検出

川崎 一郎 京都大学防災研究所

## 第1章 不思議なこと

これだけ地球科学が進歩したのに、未だに、単純で、グローバルなことで、分からないことが多い。例えば、図1の様に、原因はよく分からないが、「うるう秒」が挿入される間隔が揺らぐのである。地球の自転速度が少しずつ遅くなっているために、平均して1年か1年半ごとに、年初か7月初めに「うるう秒」が挿入される。特に不思議なことに、1999年1月1日に「うるう秒」が挿入されて以来3年半以上「うるう秒」が無い。このようなことは「うるう秒」が1972年に始ってから初めてのことである。単純化して言うと、「地球の回転速度が落ちない」、あるいは「永年的な速度の低下を差し引くと、例年になく高速回転している」のである。

どこかで巨大地震が起こって、地球の回転モーメントが急に小さくなったのであろうか。図2は、1976年から2001年までのMw7.7以上の巨大地震の年別分布である。2000年と2001年にも巨大地震は発生したが、1994年から1996年の間の方が多く発生しており、単純に比較するかぎりでは、巨大地震が頻発したことが「うるう秒」間隔の異常の原因ではない。

では、ひょっとすると、巨大なサイレント地震でも起こったのではないだろうか？ひょっとすると、それは上部マントルではなく、コア・マントル境界である可能性はないだろうか？ 今まで見つかっていないところを見ると、そのような自然現象のシグナルは、広く使われている通常の長周期地震計記録では見つかりにくいものに違いない。このことを頭に置いて、地震研究所の海半球計画で設置されたオーストラリアのキャンベラに設置された超伝導重力計（SGと略記する）記録、気象庁精密地震観測室（長野市松代）の100m伸縮計（EXT）記録を解析にもちいる。筆者の知る限りでは、この2つは、世界でも低ノイズレベルの超長周期観測記録である。

本稿では、SG記録とEXT記録をもちいて、未知の地球超深部サイレント地震を検出する方法論をうち立てたい。

## 第2章 どのようなモードが見えるのか？

1980年から2000年までの20年間に起こった最大5大地震（1989年Mw8.0マコーリー、1994年Mw8.2ボリビア深発、1994年Mw8.3北海道東方沖、1996年Mw8.2イリアン、1998年Mw8.1バレニー）を選ぶ。断層パラメータを、

- (1) 震源の深さをコア・マントル境界（CMB）直上10km
- (2) 震源時間を300秒
- (3) 地震モーメントを $10^{21}$ Nm
- (4) それ以外の震源パラメータはハーバードのCMT解と同じ

と仮定して、地震ごとに松代における各モードの振幅を計算する。モードごとに5つの地震の平均をもとめ、これを「モード平均振幅」と呼ぶ。

0	1972	年	1月	1日	0.5年
2	1973	年	1月	1日	1.0年
3	1974	年	1月	1日	1.0年
4	1975	年	1月	1日	1.0年
5	1976	年	1月	1日	1.0年
6	1977	年	1月	1日	1.0年
7	1978	年	1月	1日	1.0年
8	1979	年	1月	1日	1.0年
9	1980	年	1月	1日	1.0年
10	1981	年	7月	1日	1.5年
11	1982	年	7月	1日	1.0年
12	1983	年	7月	1日	1.0年
13	1985	年	7月	1日	2.0年
14	1988	年	1月	1日	2.5年
15	1990	年	1月	1日	2.0年
16	1991	年	1月	1日	1.0年
17	1992	年	7月	1日	1.5年
18	1993	年	7月	1日	1.0年
19	1994	年	7月	1日	1.0年
20	1996	年	1月	1日	1.5年
21	1997	年	7月	1日	1.5年
22	1999	年	1月	1日	1.5年
23	2003	年	1月	1日	?

図1 「うるう秒」が挿入された年月日の分布

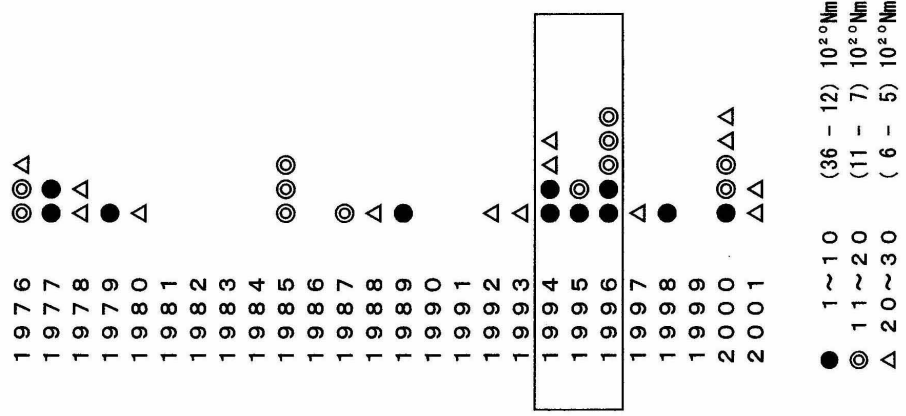


図2 1976年から2001年までの間に発生したMw7.7以上の巨大地震の年別分布

「モード平均振幅」がもっとも大きな10のモードの振幅の平均を「基準振幅」と呼ぶ。表1から表4には、「モード平均振幅」が「基準振幅」の50%より大きなモードが、20%より大きなものが示されている。

EXT記録の場合、第4章で詳しく述べるように、EW成分とNS成分の差(以下、EW-NSと表記)のみを解析対象とするので、捻れ振動(0T5~0T20)が最も強く励起される。それについて、伸び縮み振動の1次の高次モード(2S6)等が強く励起される。なお、以下で「励起されない」というのは、振幅が主要モードの振幅よりオーダー1桁かそれより小さいことを意味する。

固有周期はPREM(Dziewonski and Anderson, 1981)による。PREMに無いモードは、Disper80(Saito, 1988)によって新たに計算した。

表1から表4を比較して次のことが言える。

(1) 表1から分かるように、「UMSEの場合に励起されやすいモード(UMSEモードと呼ぶ)」は、SGの場合、0S6~0S21、1S4、2S6~2S13、EXTの場合、0S6~0S21、1S4、2S4~2S11である。

(2) 伸び縮み振動(Spheroidal oscillation)に限れば、UMSEの場合には、よく励起されるモードは、SGの場合もEXTの場合もほぼ同じ。

(3) 表2から分かるように、「DPSEによって励起されやすいモード(DPSEモード)」は、SGの場合、0S4~0S14、1S4~1S14、2S3~2S4、2S10~2S13、3S2、3S6~3S7、4S2~4S5、5S2~5S5、EXTの場合、0S3~0S12、1S2~1S3、1S8、2S3~2S8、3S7、4S4~4S5である。

基本モードの0S4~0S14がDPSEモードに含まれるのは、CMBにまでかなりの振動エネルギーを持つからである。

「どこか深いところで地震が起こって高次モードだけが励起される」と言うことはあり得ないという言い方をすることも出来る。

(4) DPSEの場合には、伸び縮み振動に限っても、SGとEXTとで、よく励起されるモードは微妙にことなる。特に興味深いのは、1S4~1S14がSGの場合にはよく励起されるが、EXTの場合にはほとんど励起されないことである。

(5) UMSEの場合にもDPSEの場合にも、SGでもEXTでもよく励起されるモードは、0S6(963s)~0S12(502s)。

(6) 表3と表4から分かるように、「UMSEの場合にはよく励起されるが、DPSEの場合にはほとんど励起されないモード」は、SGの場合は0S15~0S21、EXTの場合は0S13~0S21、0T10~0T22。

(7) (6)と逆に、「UMSEの場合にはほとんど励起されないが、DPSEの場合にはよく励起されるモード」は、SGの場合は1S5~1S14、EXTの場合は1T3~1T9。

このようなモードを、「DPSE区別モード」と呼ぶことにする。通常の大地震でも多くのDPSEモードが励起されるので、「DPSE区別モード」が励起されているかどうか非常に重要なポイントになる。

逆に、「0S15(426s)や0T10(620s)より短周期の基本モードは、CMB近傍には振動エネルギーをほとんど持たないので、DPSEによっては励起されない」。このことも、上部マントルか最下部マントルかを区別するポイントである。

Dominant UMSE modes

Mode	T	SG	EXT
OS0	1248		
OS2	3233		
OS3	2134		
OS4	1545		
OS5	1190		
OS6	963		
OS7	812		
OS8	707		
OS9	634		
OS10	579		
OS11	537		
OS12	502		
OS13	473		
OS14	448		
OS15	426		
OS16	407		
OS17	390		
OS18	374		
OS19	360		
OS20	347		
OS21	336		
IS0	613		
IS2	1471		
IS3	1064		
IS4	853		
IS5	730		
IS6	657		
IS7	604		
IS8	556		
IS9	509		
IS10	465		
IS11	426		
IS12	391		
IS13	360		
IS14	336		
IS15	316		
IS16	308		
IS17	298		
IS18	288		
IS19	276		
IS20	268		
IS21	258		
IS22	247		
IS23	247		
IS24	247		
IS25	247		
IS26	247		
IS27	247		
IS28	247		
IS29	247		
IS30	247		
IS31	247		
IS32	247		
IS33	247		
IS34	247		
IS35	247		
IS36	247		
IS37	247		
IS38	247		
IS39	247		
IS40	247		
IS41	247		
IS42	247		
IS43	247		
IS44	247		
IS45	247		
IS46	247		
IS47	247		
IS48	247		
IS49	247		
IS50	247		
IS51	247		
IS52	247		
IS53	247		
IS54	247		
IS55	247		
IS56	247		
IS57	247		
IS58	247		
IS59	247		
IS60	247		
IS61	247		
IS62	247		
IS63	247		
IS64	247		
IS65	247		
IS66	247		
IS67	247		
IS68	247		
IS69	247		
IS70	247		
IS71	247		
IS72	247		
IS73	247		
IS74	247		
IS75	247		
IS76	247		
IS77	247		
IS78	247		
IS79	247		
IS80	247		
IS81	247		
IS82	247		
IS83	247		
IS84	247		
IS85	247		
IS86	247		
IS87	247		
IS88	247		
IS89	247		
IS90	247		
IS91	247		
IS92	247		
IS93	247		
IS94	247		
IS95	247		
IS96	247		
IS97	247		
IS98	247		
IS99	247		
IS100	247		
IS101	247		
IS102	247		
IS103	247		
IS104	247		
IS105	247		
IS106	247		
IS107	247		
IS108	247		
IS109	247		
IS110	247		
IS111	247		
IS112	247		
IS113	247		
IS114	247		
IS115	247		
IS116	247		
IS117	247		
IS118	247		
IS119	247		
IS120	247		
IS121	247		
IS122	247		
IS123	247		
IS124	247		
IS125	247		
IS126	247		
IS127	247		
IS128	247		
IS129	247		
IS130	247		
IS131	247		
IS132	247		
IS133	247		
IS134	247		
IS135	247		
IS136	247		
IS137	247		
IS138	247		
IS139	247		
IS140	247		
IS141	247		
IS142	247		
IS143	247		
IS144	247		
IS145	247		
IS146	247		
IS147	247		
IS148	247		
IS149	247		
IS150	247		
IS151	247		
IS152	247		
IS153	247		
IS154	247		
IS155	247		
IS156	247		
IS157	247		
IS158	247		
IS159	247		
IS160	247		
IS161	247		
IS162	247		
IS163	247		
IS164	247		
IS165	247		
IS166	247		
IS167	247		
IS168	247		
IS169	247		
IS170	247		
IS171	247		
IS172	247		
IS173	247		
IS174	247		
IS175	247		
IS176	247		
IS177	247		
IS178	247		
IS179	247		
IS180	247		
IS181	247		
IS182	247		
IS183	247		
IS184	247		
IS185	247		
IS186	247		
IS187	247		
IS188	247		
IS189	247		
IS190	247		
IS191	247		
IS192	247		
IS193	247		
IS194	247		
IS195	247		
IS196	247		
IS197	247		
IS198	247		
IS199	247		
IS200	247		
IS201	247		
IS202	247		
IS203	247		
IS204	247		
IS205	247		
IS206	247		
IS207	247		
IS208	247		
IS209	247		
IS210	247		
IS211	247		
IS212	247		
IS213	247		
IS214	247		
IS215	247		
IS216	247		
IS217	247		
IS218	247		
IS219	247		
IS220	247		
IS221	247		
IS222	247		
IS223	247		
IS224	247		
IS225	247		
IS226	247		
IS227	247		
IS228	247		
IS229	247		
IS230	247		
IS231	247		
IS232	247		
IS233	247		
IS234	247		
IS235	247		
IS236	247		
IS237	247		
IS238	247		
IS239	247		
IS240	247		
IS241	247		
IS242	247		
IS243	247		
IS244	247		
IS245	247		
IS246	247		
IS247	247		
IS248	247		
IS249	247		
IS250	247		
IS251	247		
IS252	247		
IS253	247		
IS254	247		
IS255	247		
IS256	247		
IS257	247		
IS258	247		
IS259	247		
IS260	247		
IS261	247		
IS262	247		
IS263	247		
IS264	247		
IS265	247		
IS266	247		
IS267	247		
IS268	247		
IS269	247		
IS270	247		
IS271	247		
IS272	247		
IS273	247		
IS274	247		
IS275	247		
IS276	247		
IS277	247		
IS278	247		
IS279	247		
IS280	247		
IS281	247		
IS282	247		
IS283	247		
IS284	247		
IS285	247		
IS286	247		
IS287	247		
IS288	247		
IS289	247		
IS290	247		
IS291	247		
IS292	247		
IS293	247		
IS294	247		
IS295	247		
IS296	247		
IS297	247		
IS298	247		
IS299	247		
IS300	247		
IS301	247		
IS302	247		
IS303	247		
IS304	247		
IS305	247		
IS306	247		
IS307	247		
IS308	247		
IS309	247		
IS310	247		
IS311	247		
IS312	247		
IS313	247		
IS314	247		
IS315	247		
IS316	247		
IS317	247		
IS318	247		
IS319	247		
IS320	247		
IS321	247		
IS322	247		
IS323	247		
IS324	247		
IS325	247		
IS326	247		
IS327	247		
IS328	247		
IS329	247		
IS330	247		
IS331	247		
IS332	247		
IS333	247		
IS334	247		
IS335	247		
IS336	247		
IS337	247		
IS338	247		
IS339	247		
IS340	247		
IS341	247		
IS342	247		
IS343	247		
IS344	247		
IS345	247		
IS346	247		
IS347	247		
IS348	247		
IS349	247		
IS350	247		
IS351	247		
IS352	247		
IS353	247		
IS354	247		
IS355	247		
IS356	247		
IS357	247		
IS358	247		
IS359	247		
IS360	247		
IS361	247		
IS362	247		
IS363	247		
IS364	247		
IS365	247		
IS366	247		
IS367	247		
IS368	247		
IS369	247		
IS370	247		
IS371	247		
IS372	247		
IS373	247		
IS374	247		
IS375	247		
IS376	247		
IS377	247		
IS378	247		
IS379	247		
IS380	247		
IS381	247		
IS382	247		
IS383	247		
IS384	247		
IS385	247		
IS386	247		
IS387	247		
IS388	247		
IS389	247		
IS390	247		
IS391	247		
IS392	247		

SG Dominant modes

Mode	T	SG	UM	D"	Mode	T	Strain	UM	D"
OS0	1248				4S2	480			
OS2	3233				4S3	488			
OS3	2134				4S4	439			
OS4	1545				4S5	415			
OS5	1190				5S2	480			
OS6	963				5S3	461			
OS7	812				5S4	420			
OS8	707			4S1	5S5	370			
OS9	634								
OS10	579			4S2					
OS11	537			2S7					
OS12	502								
OS13	473								
OS14	448			2S9					
OS15	426			1S11					
OS16	407								
OS17	390			(2S11)					
OS18	374								
OS19	360			1S13					
OS20	347								
OS21	336			1S14					
1S0	613								
1S2	1471								
1S3	1064			3S1					
1S4	853								
1S5	730								
1S6	657								
1S7	604								
1S8	556								
1S9	509								
1S10	465								
1S11	426			0S15					
1S12	391			3S6					
1S13	360			0S17					
1S14	336			0S17					
2S0	398			7S2					
2S1	2476								
2S3	804								
2S4	725								
2S5	660								
2S6	595								
2S7	536			0S11					
2S8	488			4S3					
2S9	448			0S14					
2S10	416								
2S11	389			(0S17)					
2S12	365								
2S13	345								
3S1	1059			1S3					
3S2	904								
3S5	392			1S12					
3S7	372								
3S8	365			6S3					
3S9	339								

表3 SGの場合の、UMSEモードとDPSEモードの比較。

Ext Dominant modes

Mode	T	EXT	UM	D"	Mode	T	EXT	UM	D"
OS0	1248				0T2	2637			
OS2	3233				0T3	1706			
OS3	2134				0T4	1306			
OS4	1545				0T5	1077			
OS5	1190				0T6	927			
OS6	963				0T7	819			
OS7	812			1T1	0T8	737			
OS8	707			4S1	0T9	673			
OS9	634				0T10	620			
OS10	579			4S2	0T11	575			
OS11	537			2S7	0T12	538			
OS12	502				0T13	506			6S1
OS13	473				0T14	477			1T7
OS14	448			2S9	0T15	452			
OS15	426			1S11	0T16	430			
OS16	407			1T9	0T17	410			
OS17	390				0T18	392			1S12
OS18	374				0T19	375			3S6
OS19	360			0T20	0T20	360			0S19
OS20	347			1S13	0T21	346			1S13
OS21	336			1S14	0T22	333			
1S0	613				1T1	808			0S7
1S2	1471				1T2	758			
1S3	1064			3S1	1T3	695			
1S4	853				1T4	631			
1S5	730				1T5	571			
1S6	657				1T6	519			
1S7	604				1T7	475			0T14
1S8	556				1T8	439			4S4
1S9	509				1T9	408			
1S10	465				1T10	382			0S16
1S11	426			0S15	1T11	359			
1S12	391			3S6	1T12	340			
1S13	360			0S17	2T1	457			0S14
1S14	336			0S17	2T2	436			7S2
2S0	398			7S2	2T3	436			
2S1	2476				2T4	420			5S4
2S3	804				2T5	402			
2S4	725				2T6	383			
2S5	660				2T7	363			
2S6	595				2T8	343			
2S7	536			0S11					
2S8	488			4S3					
2S9	448			0S14					
2S10	416			2T2					
2S11	389								
2S12	365								
2S13	345								
3S1	1059			1S3					
3S2	904								
3S5	392			1S12					
3S7	372								
3S8	365			6S3					
3S9	339								

表4 EXTの場合の、UMSEモードとDPSEモードの比較。



## DETECTABILITY

### Accuracy of the Continuous Recording of Matsushiro Extensometer and SCG

100m long extensometer	
21 bit A/D	$\sim 1 \times 10^{-12}$ strain/count

S C G	
21 bit A/D	$\sim 1 \times 10^{-10}$ m/s <sup>2</sup> /count

**Predicted amplitudes** of long period eigenmodes due to silent earthquakes of source time of 300 s

Mode	Period s	Q	$\epsilon_{EW-NS}$		Acc-z	
			UM	D"	UM	D"
0S2	3233	510	0.1	<b>0.2</b>	0.2	<b>0.6</b>
0S3	2134	417	0.8	<b>1.8</b>	0.4	<b>0.5</b>
0S4	1545	373	2.5	<b>4.5</b>	1.4	<b>2.0</b>
0S5	1190	356	3.5	<b>4.7</b>	1.9	<b>1.8</b>
0S6	963	347	4.6	<b>6.2</b>	2.9	<b>3.3</b>
0S7	812	342	4.8	<b>5.0</b>	3.4	<b>2.9</b>
0S8	707	337	5.4	<b>5.4</b>	4.7	<b>3.4</b>
0S9	634	333	7.3	<b>4.5</b>	8.0	<b>3.4</b>
0S10	580	330	7.7	<b>3.3</b>	10.0	<b>3.1</b>
0S11	537	322	8.3	<b>1.8</b>	10.0	<b>2.3</b>
0S12	502	315	8.6	<b>1.2</b>	10.0	<b>1.7</b>

$\epsilon_{EW-NS}$  denotes  $\epsilon_{EW-NS}$  of seismic strain and Acc-z vertical acceleration. Units are  $10^{-12}$  for strains and  $10^{-10}$  m/s<sup>2</sup> for acceleration.

表5 SG記録とEXT記録の分解能と長周期固有振動モードの振幅の比較。下段は、S2～0S12の固有周期と振幅。上段に、EXTの1カウント ( $\sim 1 \times 10^{-11}$  strain) と、SGの1カウント ( $\sim 1 \times 10^{-10}$  m/s<sup>2</sup>) の大きさを示す。

### 第3章 超高分解能低ノイズ記録

松代100m伸縮計のルーティン観測のA/D変換は16ビットで、1カウントは $30 \times 10^{-11}$  strainであった。1998年3月から、東大海洋研、富大理学部、気象庁精密地震観測室の3者で、アナログ信号を分岐し、21ビットでの平行収録を始めた。

表5下段は0S2~0S12の固有周期と振幅である。表5上段に、松代100m伸縮計の1カウント( $\sim 1 \times 10^{-11}$  strain)と、同じく松代に置かれた東大海洋研の超伝導重力計の1カウント( $\sim 1 \times 10^{-10}$  m/s<sup>2</sup>)の大きさを示す(キャンベラもほぼ同じ)。これらが記録の最小の分解能である。

松代100m伸縮計の業務観測では1カウントは $30 \times 10^{-11}$  strainであったので、21ビットにすることで、見たいシグナルの大きさに近づいたことが分かる。ここでは、伸縮計記録の場合、超伝導重力計記録と異なり、捻れ振動(torsional oscillation)も観測できることを強調しておきたい。

### 第4章 主要ノイズ源は大気圧変動

SGでも、EXTでも、最大のノイズ源は大気圧と温度である。図3は、2000年5月12日のEXTの、8つの周期帯の、EW成分(XT-EW)、NS成分(XT-NS)、観測坑内の気圧(AP)、温度(T)である。この図から、XT-EW、XT-NS、AP、Tの間に、長周期ほど強い相関があり、250秒より短周期になればなるほど、4つの観測量の間の相関が無くなる事が分かる。なお、周期250秒より短周期で温度Tが奇妙なのは、温度のA/D変換のビット数が少なく、ダイナミックレンジが小さいからである。

図3のEXT記録のNS成分(original) (XTNS(n))と大気圧T(n)を使って

$(XTNS(n) - c T(n))^2$  を最小にする線形最小自乗法によって気圧計数cを求めた。図4は、大気圧補正(correction) (c T(n))、補正された歪(corrected) (XTNS(n) - c T(n))である。

図4から次のことが分かる。250秒より短周期では、大気圧変化のEXT記録への影響はほとんど無視することができる。500秒より長周期では、観測記録のパワーのほとんどは大気圧変化の影響である。従って、500秒より長周期成分から意味のある情報を取り出すためには、大気圧変動の影響を取り除くことが不可欠である。ただし、単純な線形最小自乗法で、大気圧変動の影響のかなりを除くことが出来る。図には示さないが、SG記録の場合もほとんど同様のことが言える。

図5は、1994年6月9日のボリビア深発巨大地震の5日長のEXT記録のEW成分(EW)、NS成分(NS)、EW成分+NS成分(EW+NS)、EW成分-NS成分(EW-NS)のMEMスペクトルである。EW成分(EW)やNS成分(NS)のみのときより、EW成分-NS成分(EW-NS)をとることによってS/Nが大幅に改善されることは一目見て分かるであろう。逆に、EW成分+NS成分(EW+NS)の場合にS/Nが最も悪い。

EW-NSのS/Nが大幅に改善されたのは、「剪断歪」に変換したことによって、線形最小自乗法では取り除けなかった大気圧変動の影響が自然と取り除けたからであろう。今後は、EW成分-NS成分(EW-NS)を単に原記録と呼ぶことにする。

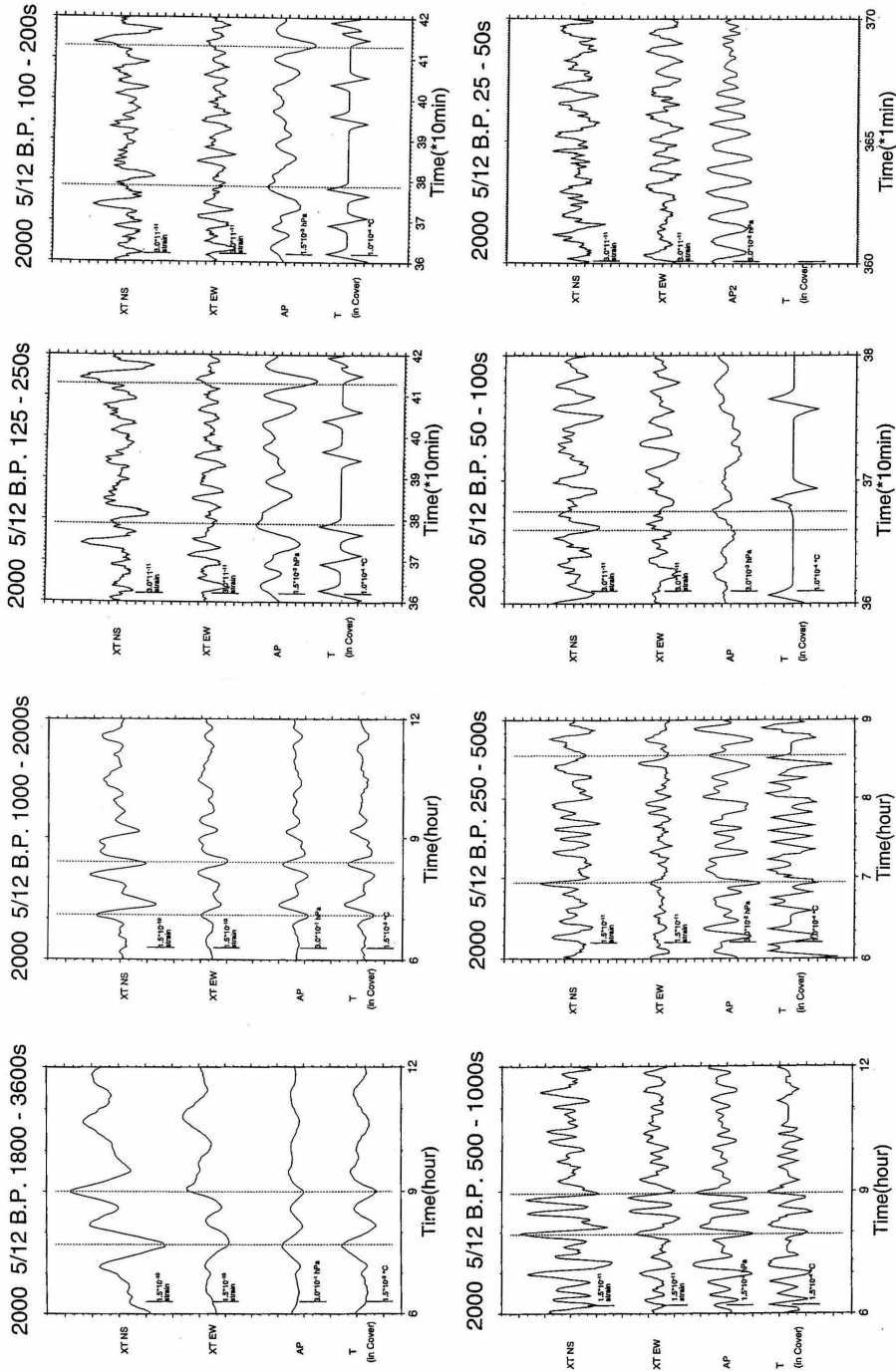


図3 2000年5月12日の、松代100m伸縮計の、8つの周期帯における、EW成分(XT-EW)、NS成分(XT-NS)、観測溝内の気圧(AP)、温度(T)、XT-EW、XT-NS、AP、Tの間に、長周期ほど互いに強い相関があり、250秒より短周期になればなるほど相関が無くなる事が分かる。なお、温度Tの時間変化が奇妙なのは、温度のA/D変換のビット数が少なく、ダイナミックレンジが小さすぎるからである。



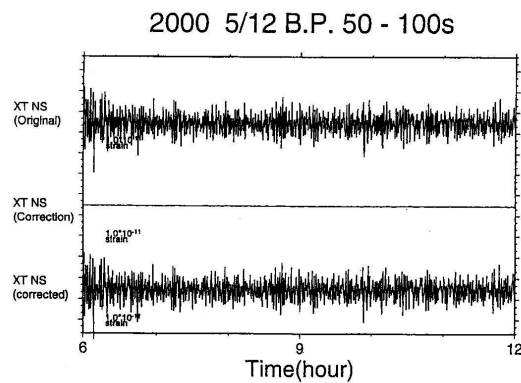
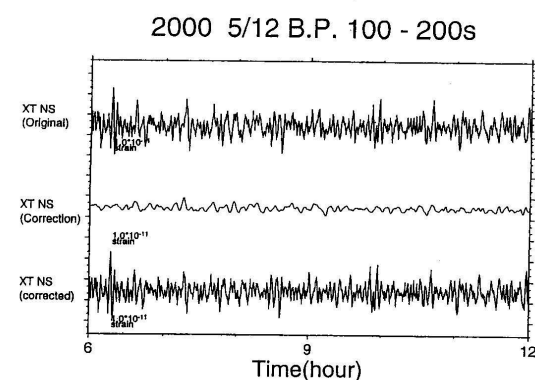
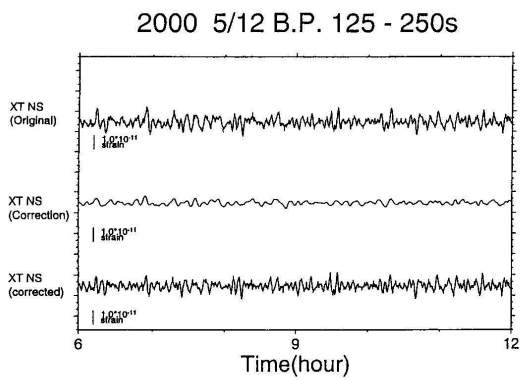
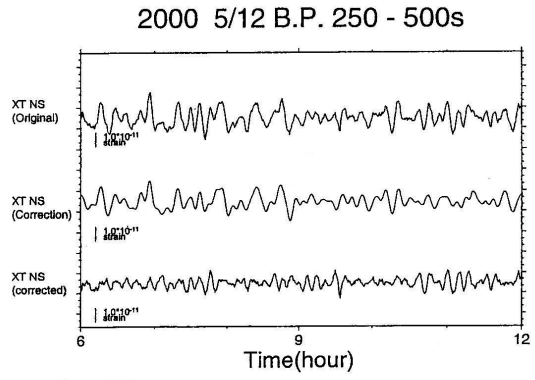
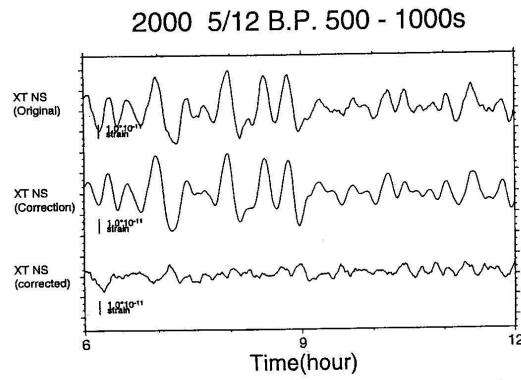
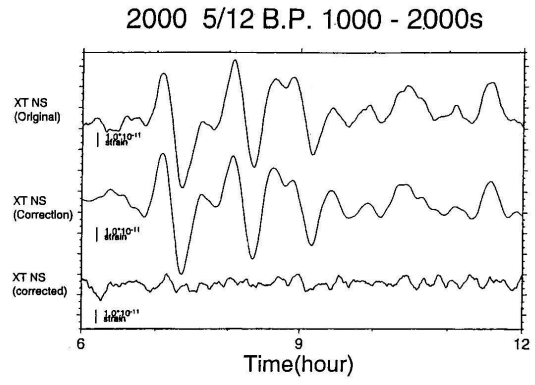
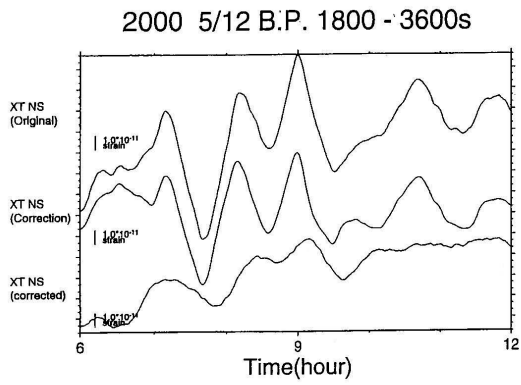


図4 図3の100m伸縮計記録のNS成分 (original)、線形最小自乗法によってもとめた大気圧補正項 (correction)、補正された歪 (corrected)。これらの図から、500秒より長周期では、観測記録の波形変化のほとんどは大気圧変化の影響であることがわかる。

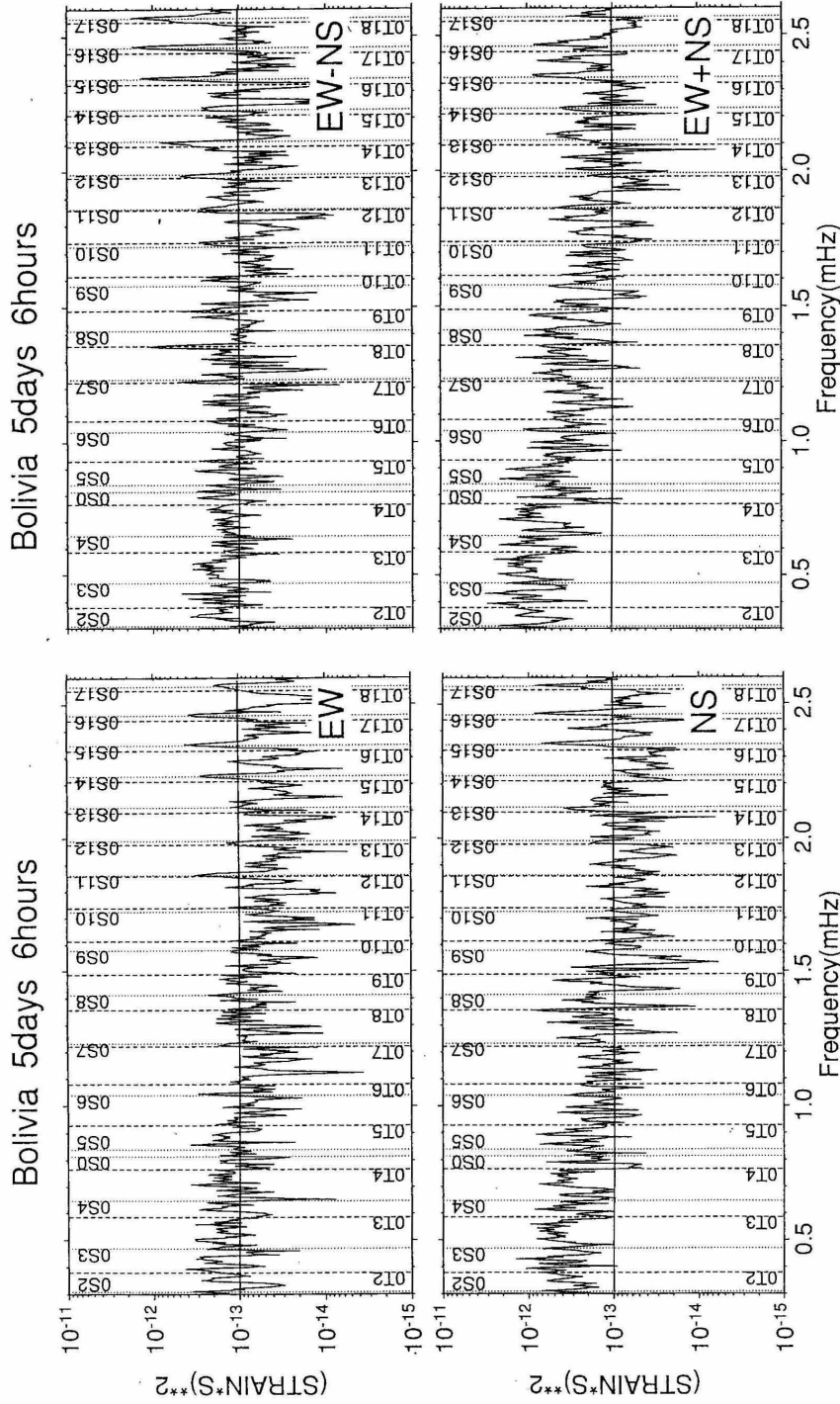


図5  
 1994年6月9日のボリビア深発巨大地震の記録の、EW成分  
 (EW)、NS成分(NS)、EW成分+NS成分(EW+NS)、EW成分一  
 NS成分(EW-NS)のMEMスペクトル。EW成分(EW)やNS成分  
 (NS)のみの場合より、EW成分一NS成分(EW-NS)の場合の方が  
 S/Nが良い。

## 第5章 スペクトル計算の手順

スペクトルは、次の手順で計算した。

- (1) 10秒にリサンプルする。
- (2) 0.5日づつずらせて、0.95日長(8192×10秒)記録に分ける。
- (3) E X T記録の場合は、EW成分とNS成分差 EW - NS を計算する。
- (4) S G記録、E X T記録、大気圧記録を、200秒から1800秒のバンドパスフィルターに通す。
- (5) 線形最小自乗法によって、気圧補正を行う。
- (6) MEM スペクトルを計算する。

## 第6章 スタッキング

第5章の(1)~(5)は同じで、スペクトルの計算方法をMEMでなくFFTとし、谷本(1998)にならって次の日を除いてスタッキングした。

- (1) Mw8以上の地震が起きた時刻から7日間
- (2) Mw7.0~7.9の地震が起きた時刻から5日間
- (3) Mw6.0~6.9の地震が起きた時刻から3日間
- (4) Mw5.5~5.9の地震が起きた時刻から1日間

本稿では、このスタッキングをノイズレベルと見なし、スペクトル図には滑らかな曲線で示す。

## 第7章 モードの同定

記録長が8192×10秒なので、スペクトルの周波数間隔は0.012mHz(=1/8192×10秒)である。従って、0.5mHzの間に41のスペクトルグリッドが分布していることになる。

表6は、0.5mHz間隔に分布しているモードの個数である。0.05mHzから1.0mHzの間には40、1.0mHzから1.5mHzの間に62もあり、3.0mHzから3.5mHzの間では84にも達する。あまりのも多くのモードが分布し、識別が困難になるので、ここでは3mHzより高周波側は対象としないこととする。S Gの場合は、伸び縮み振動のみなので、モード密度は2/3なる。

表7は、0mHzから3mHzの間のすべての固有モードをスペクトルグリッドに対応させたものである。特に2mHzから3mHzの間では、81のグリッドのうち44にまで対応する固有モードがあり、対応する固有モードのないグリッドの方が少ない。

表8は、0mHzから3mHzの間のDPSEモードのみをスペクトルグリッドに対応させたものである。考慮すべきモード数は大幅に少なくなる。DPSEモードの主要部分は、1mHzから2mHzの間に分布している。

記録長を0.95日ではなく1.9日か2.8日とすると、対象モード数とグリッド数の比が小さくなる。ただし、通常の地震の場合でも、Qが小さな基本モードの場合、あまり記録長を長くすると返って検出しにくくなるので、経験的に言うと、2日以上は長くしない方がベターであろう。

Number of modes at respective frequency bands

mHz	0.0-0.5		0.5-1.0		1.0-1.5		1.5-2.0		2.0-2.5		2.5-3.0		3.0-3.5		3.5-4.0		4.0-4.5		4.5-5.0		Total	
	1 5		4 0		6 2		8 4		9 3		4 4		4 9		9 3		4 9		9 3			
No.	5	10	17	23	30	32	41	43	44	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	294	
0S	0S2-0S3 2	0S4-0S5 0S0 3	0S6-0S8 3	0S9-0S12 4	0S13-0S16 4	0S17-0S21 5	0S22-0S26 5	0S27-0S32 6	0S33-0S37 5	0S38-0S43 6	0S44-0S48 5	0S49-0S53 4	0S54-0S58 4	0S59-0S63 4	0S64-0S68 4	0S69-0S73 4	0S74-0S78 4	0S79-0S83 4	0S84-0S88 4	0S89-0S93 4	0S94-0S98 4	43
1S	1S1 1	1S2-1S3 2	1S4-1S5 2	1S6-1S9 5	1S10-1S11 2	1S12-1S14 3	1S15-1S17 3	1S18-1S20 3	1S21-1S23 3	1S24-1S27 3	1S28-1S30 3	1S31-1S33 3	1S34-1S36 3	1S37-1S39 3	1S40-1S42 3	1S43-1S45 3	1S46-1S48 3	1S49-1S51 3	1S52-1S54 3	1S55-1S57 3	1S58-1S60 3	27
2S	2S1 1	2S2 1	2S3-2S4 2	2S5-2S7 3	2S8-2S10 3	2S11-2S13 4	2S14-2S16 3	2S17-2S18 2	2S19-2S20 2	2S21-2S23 3	2S24-2S26 3	2S27-2S29 3	2S30-2S32 3	2S33-2S35 3	2S36-2S38 3	2S39-2S41 3	2S42-2S44 3	2S45-2S47 3	2S48-2S50 3	2S51-2S53 3	2S54-2S56 3	24
3S	3S1 1	3S2-3S3 2	3S4 1	3S5 1	3S6-3S9 3	3S10-3S12 4	3S13-3S16 4	3S17-3S19 3	3S20-3S22 3	3S23-3S25 3	3S26-3S28 3	3S29-3S31 3	3S32-3S34 3	3S35-3S37 3	3S38-3S40 3	3S41-3S43 3	3S44-3S46 3	3S47-3S49 3	3S50-3S52 3	3S53-3S55 3	3S56-3S58 3	22
4S	4S1 1	4S2 1	4S3-4S5 3	4S6 2	4S7 1	4S8-4S10 3	4S11-4S14 4	4S15-4S17 3	4S18-4S20 3	4S21-4S23 3	4S24-4S26 3	4S27-4S29 3	4S30-4S32 3	4S33-4S35 3	4S36-4S38 3	4S39-4S41 3	4S42-4S44 3	4S45-4S47 3	4S48-4S50 3	4S51-4S53 3	4S54-4S56 3	19
5S	5S1 1	5S2-5S4 3	5S5 1	5S6-5S7 2	5S8-5S9 2	5S10-5S11 2	5S12-5S13 2	5S14-5S15 2	5S16-5S17 2	5S18-5S19 2	5S20-5S21 2	5S22-5S23 2	5S24-5S25 2	5S26-5S27 2	5S28-5S29 2	5S30-5S31 2	5S32-5S33 2	5S34-5S35 2	5S36-5S37 2	5S38-5S39 2	5S40-5S41 2	13
6S	6S1 1	6S2 1	6S3 1	6S4-6S6 3	6S7-6S9 3	6S10 1	6S11 1	6S12-6S13 2	6S14-6S15 2	6S16-6S17 2	6S18-6S19 2	6S20-6S21 2	6S22-6S23 2	6S24-6S25 2	6S26-6S27 2	6S28-6S29 2	6S30-6S31 2	6S32-6S33 2	6S34-6S35 2	6S36-6S37 2	6S38-6S39 2	11
7S	7S1 1	7S2 1	7S3-7S4 2	7S5-7S6 2	7S7-7S8 2	7S9-7S11 3	7S12-7S13 2	7S14-7S15 2	7S16-7S17 2	7S18-7S19 2	7S20-7S21 2	7S22-7S23 2	7S24-7S25 2	7S26-7S27 2	7S28-7S29 2	7S30-7S31 2	7S32-7S33 2	7S34-7S35 2	7S36-7S37 2	7S38-7S39 2	7S40-7S41 2	11
8S	8S1 1	8S2 1	8S3-8S4 2	8S5-8S6 2	8S7-8S8 2	8S9-8S10 2	8S11-8S12 2	8S13-8S14 2	8S15-8S16 2	8S17-8S18 2	8S19-8S20 2	8S21-8S22 2	8S23-8S24 2	8S25-8S26 2	8S27-8S28 2	8S29-8S30 2	8S31-8S32 2	8S33-8S34 2	8S35-8S36 2	8S37-8S38 2	8S39-8S40 2	8
9S	9S1 1	9S2-9S3 2	9S4-9S5 2	9S6-9S7 2	9S8-9S9 2	9S10-9S11 2	9S12-9S13 2	9S14-9S15 2	9S16-9S17 2	9S18-9S19 2	9S20-9S21 2	9S22-9S23 2	9S24-9S25 2	9S26-9S27 2	9S28-9S29 2	9S30-9S31 2	9S32-9S33 2	9S34-9S35 2	9S36-9S37 2	9S38-9S39 2	9S40-9S41 2	7
0T	0T2 1	0T3-0T5 3	0T6-0T9 4	0T10-0T13 4	0T14-0T17 4	0T18-0T22 5	0T23-0T26 4	0T27-0T31 5	0T32-0T35 4	0T36-0T40 5	0T41-0T44 4	0T45-0T48 4	0T49-0T52 4	0T53-0T56 4	0T57-0T60 4	0T61-0T64 4	0T65-0T68 4	0T69-0T72 4	0T73-0T76 4	0T77-0T80 4	0T81-0T84 4	39
1T	1T1 1	1T2-1T3 3	1T4-1T6 3	1T7-1T9 3	1T10-1T12 3	1T13-1T15 3	1T16-1T18 3	1T19-1T22 4	1T23-1T26 4	1T27-1T30 4	1T31-1T34 4	1T35-1T38 4	1T39-1T42 4	1T43-1T46 4	1T47-1T50 4	1T51-1T54 4	1T55-1T58 4	1T59-1T62 4	1T63-1T66 4	1T67-1T70 4	1T71-1T74 4	26
2T	2T1 1	2T2-2T3 3	2T4-2T6 3	2T7-2T9 3	2T10-2T12 3	2T13-2T15 3	2T16-2T18 3	2T19-2T21 3	2T22-2T24 3	2T25-2T27 3	2T28-2T30 3	2T31-2T33 3	2T34-2T36 3	2T37-2T39 3	2T40-2T42 3	2T43-2T45 3	2T46-2T48 3	2T49-2T51 3	2T52-2T54 3	2T55-2T57 3	2T58-2T60 3	19
3T	3T1 1	3T2-3T3 3	3T4-3T6 3	3T7-3T9 3	3T10-3T12 3	3T13-3T15 3	3T16-3T18 3	3T19-3T21 3	3T22-3T24 3	3T25-3T27 3	3T28-3T30 3	3T31-3T33 3	3T34-3T36 3	3T37-3T39 3	3T40-3T42 3	3T43-3T45 3	3T46-3T48 3	3T49-3T51 3	3T52-3T54 3	3T55-3T57 3	3T58-3T60 3	15
4T	4T1 1	4T2-4T3 3	4T4-4T6 3	4T7-4T9 3	4T10-4T12 3	4T13-4T15 3	4T16-4T18 3	4T19-4T21 3	4T22-4T24 3	4T25-4T27 3	4T28-4T30 3	4T31-4T33 3	4T34-4T36 3	4T37-4T39 3	4T40-4T42 3	4T43-4T45 3	4T46-4T48 3	4T49-4T51 3	4T52-4T54 3	4T55-4T57 3	4T58-4T60 3	10

表 6

0.5mHz間隔に分布している地球固有振動モードの個数。0.5mHzから1.0mHzの間には40、1.0mHzから1.5mHzの間には62もあり、3.0mHzから3.5mHzの間では84にも達する。

ALL MODES

0mHz	N	NΔf	MODE
	0		
	1		
	2		
	3		
	4		
	5		
	6		
	7		
	8		
	9		
	10		
	11		
	12		
	13		
	14		
	15		
	16		
	17		
	18		
	19		
	20		
	21		
	22		
	23		
	24		
	25	0.305	0S2(3233)
	26		
	27		
	28		
	29		
	30		
	31	0.378	0T2(2637)
	32		
	33	0.403	2S1(2475)
	34		
	35		
	36		
	37		
	38	0.464	0S3(2134)
	39		
	40		
0.5mHz	41		
	42		
	43		
	44		
	45		
	46		
	47		
	48	0.586	0T3(1706)
	49		
	50		
	51		
	52	0.647	0S4(1545)
	53		
	54		
	55		
	56	0.684	1S2(1471)
	57		
	58		
	59		
	60		
	61		
	62		
	63	0.769	0T4(1306)
	64		
	65		
	66		
	67	0.818	0S0(1228)
	68		
	69	0.842	0S5(1190)
	70		
	71		
	72		
	73		
	74		
	75		
	76	0.928	0T5(1077)
	77	0.940	1S3(1064) 3S1(1059)
	78		2S2(1048)
	79		
	80		
1mHz	81		

1mHz	N	NΔf	MODE
	82		
	83		
	84		
	85	1.038	0S6(963)
	86		
	87		
	88	1.074	0T6(927)
	89		
	90		
	91	1.111	3S2(904)
	92		
	93		
	94		
	95		
	96	1.172	1S4(853)
	97		
	98		
	99		
	100	1.221	0T7(819)
	101	1.233	0S7(812) 1T1(809)
	102	1.245	2S3(805)
	103		
	104		
	105		
	106		
	107		
	108	1.318	1T2(758)
	109		
	110		
	111	1.355	0T8(737)
	112	1.367	1S5(730)
	113	1.379	2S4(725)
	114		
	115		
	116	1.416	0S8(707) 4S1(707)
	117		
	118	1.440	1T3(695) 3S3(693)
	119		
	120		
	121		
	122	1.489	0T9(673)
1.5mHz	123		
	124	1.514	2S5(660)
	125	1.526	1S6(657)
	126		
	127		
	128		
	129	1.575	0S9(634)
	130	1.587	1T4(631)
	131		
	132	1.611	0T10(620)
	133		
	134	1.636	1S0(613)
	135		
	136	1.660	1S7(604)
	137		
	138	1.685	2S6(595)
	139		
	140		
	141	1.721	0S10(579) 4S2(581)
	142	1.733	0T11(575)
	143	1.746	1T5(571) 6S1(574)
	144		
	145		
	146		
	147	1.794	1S8(556)
	148		
	149		
	150		
	151		
	152	1.855	0T12(538)
	153	1.868	0S11(537) 2S7(536)
	154		
	155		
	156		
	157		
	158	1.929	1T6(519)
	159		
	160		
	161	1.965	1S9(509)
	162	1.978	0T13(506) 6S1(505)
	163	1.990	0S12(502)
2mHz			

2mHz	N	NΔf	MODE
	164		
	165		
	166		
	167		
	168	2.051	2S8(488) 4S3(488)
	169		
	170		
	171	2.087	5S2(480)
	172	2.100	0T14(477) 1T7(475)
	173	2.112	0S13(473)
	174		
	175		
	176	2.148	1S10(465)
	177		
	178	2.173	5S3(461)
	179	2.185	2T1(457)
	180		
	181	2.209	0T15(452)
	182	2.222	7S1(450)
	183	2.234	0S14(448) 2T2(448)
	184		
	185		
	186		3S5(440)
	187	2.283	1T8(439) 4S4(439)
	188	2.295	2T3(436)
	189		
	190	2.319	0T16(430)
	191		
	192	2.344	0S15(426) 1S11(426)
	193		
	194		
	195	2.380	2T4(420) 5S4(420)
	196		
	197	2.405	2S10(416)
	198	2.417	4S5(415)
	199		
	200	2.441	0T17(410)
	201	2.454	0S16(407) 1T9(408)
	202		
	203		
	204	2.490	2T5(402)
2.5mHz	205		
	206	2.515	2S0(398) 7S2(397)
	207		
	208		
	209	2.551	0T18(392) 1S12(392)
	210	2.563	0S17(390)
	211	2.576	2S11(389)
	212		
	213		
	214	2.612	2T6(383)
	215	2.625	1T10(382)
	216		
	217		
	218	2.661	0T19(375)
	219	2.673	0S18(374) 4S6(374)
	220	2.686	3S7(372)
	221		
	222	2.710	5S5(370)
	223		
	224	2.734	2S12(365)
	225		
	226	2.759	2T7(363)
	227	2.771	0S19(360) 0T20(360)
	228	2.783	1T11(359)
	229		
	230		
	231	2.820	3S8(355) 6S3(354)
	232		
	233		
	234		
	235	2.869	8S1(348)
	236	2.881	0S20(347)
	237	2.893	0T21(346)
	238	2.905	2S13(345)
	239	2.917	2T8(343)
	240		
	241	2.942	1T12(340)
	242	2.954	3S9(339)
	243		
	244	2.979	0S21(336) 1S14(336)
	245		
3mHz			

表7 0 mHzから3 mHzの間のすべての固有モードをスペクトルグリッドに対応させたもの。特に2 mHzから3 mHzの間では、81のグリッドのうち44にまで対応する固有モードがある。





表 6、表 7、表 8 を考慮して、次の条件を満たしたとき、そのピークは DPSE モードと一致したと見なすこととした。

- (1) 固有周波数にもっとも近いグリッドがピークになったとき、
- (2) ピークの振幅が、ノイズレベルの 2 倍より大きいとき。

以上のことを考慮して、次の条件を満たしたとき、そのピークは DPSE モードと一致したと見なすこととした。

(1) のように厳しくしても、すべての固有モードを対象にモードの同定をするのは意味がない。表 3 の様に、上部マントルの地震ならどのモードが励起されるのか、最下部のマントルの地震ならどのモードが励起されるのかを明確にし、焦点を絞っておくことが重要である。

## 第 8 章 励起候補日

図 6 に、1998 年 3 月 25 日の Mw8.1 のバレニー地震のスペクトルを示す。印は、全章(1) と(2)の基準によって固有モードに一致していると判断したピークである。多くの基本モードがよく励起されていることが分かる。

非常に多くの固有モードが見いだされたサイレント地震候補日の例として、図 7 に 1999 年 3 月 24 - 25 日、図 8 に 1999 年 4 月 02 - 03 日、図 9 に 1999 年 5 月 07 日のスペクトルを示す。02 - 03 日と表記した場合は、02 日の午後 0 時から 03 日の午後 0 時までの記録であることを、単に 07 日と表記した場合は、07 日の午前 0 時から 03 日の午前 0 時までの記録であることを示す。

図 7 の 1999 年 3 月 24 - 25 日と図 9 の 1999 年 5 月 07 日は次章に述べる統計的検定手順に基づき浅い地震(上部マントルの地震という意味)と判断されたので、基本モードのみが縦波線で示されている。図 8 の 1999 年 4 月 02 - 03 日の事件は、マントル最下部の事件である可能性が高いと判断したので、DPSE モードが示されている。ただし、IRIS/IDA の記録には、これらの固有モードの異常励起は見えない。

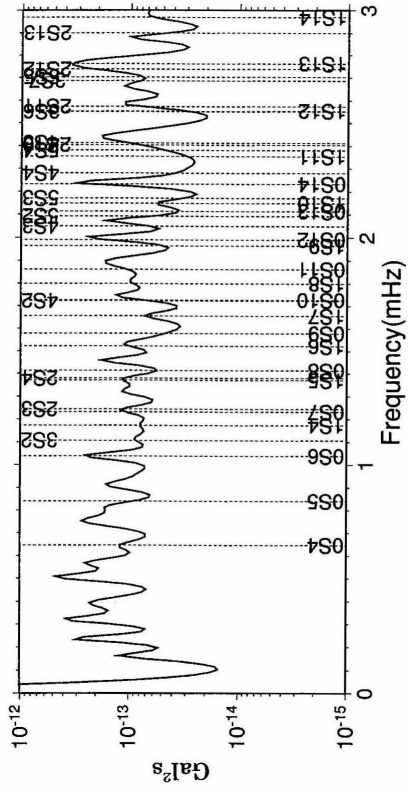
## 第 9 章 統計的検定

次に、図 8 の 1999 年 4 月 02 - 03 日の観測記録を例に、統計的検定の手順を示したい。

まず、「0 mHz から 3 mHz の間の任意のピークが、偶然、表 1 ~ 表 4 の かに一致する確率」を荒っぽく見積もってみよう。周波数間隔  $\Delta f$  が 0.0122 mHz なので、0 mHz から 3 mHz の間にスペクトルグリッドは 245 ある。SG の場合、この間に、UMSE モードは 23、DPSE モードは 34 ある。従って、245 のグリッドのうちどこかに立った任意のピークが偶然 DPSE モードと一致する確率は、あらっぽく、 $23 \sim 34 / 245 = 0.094 \sim 0.139$  と言うことが出来る。スペクトルのピークは、だいたい 30 ~ 40 程度なので仮に 35 と仮定し、0.094 ~ 0.139 に 35 を掛けて 3.3 ~ 4.9 となる。つまり、スペクトルのピークが偶然 UMSE モードや DPSE モードに一致する個数は 3.3 ~ 4.9 と言うことになる。

EXT の場合は、0 mHz から 3 mHz の間に UMSE モードが 43、DPSE モードが 38 ある。これより、スペクトルのピークが偶然 UMSE モードや DPSE モードに一致する個数は 6.1

1999 4/2-3 Canberra MEM AR=1500



1999 4/2-3 Matsushiro MEM AR=1500

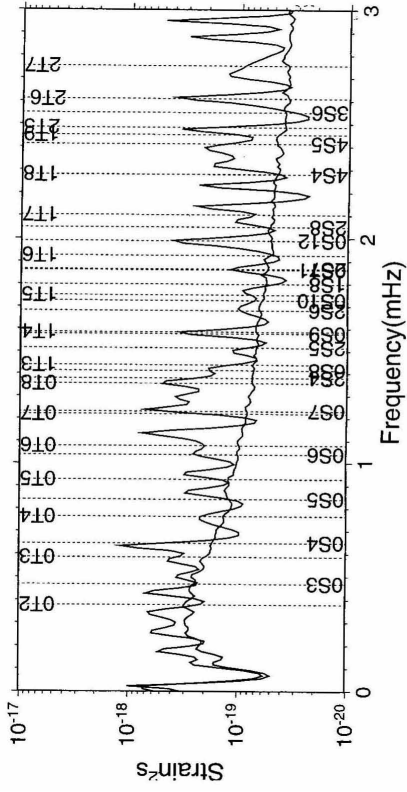
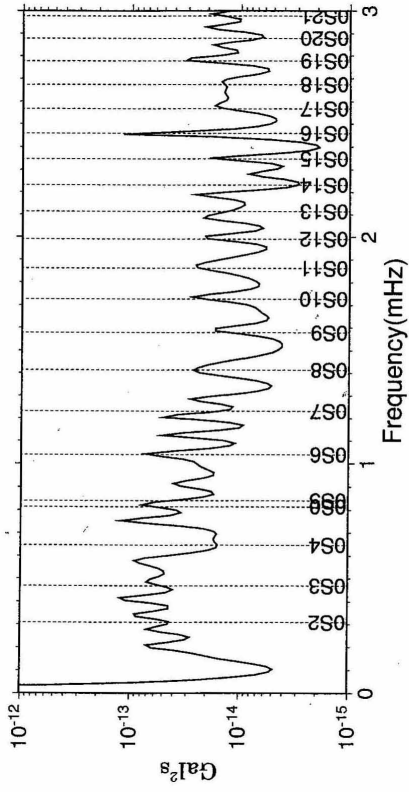


図8 1999年4月02-03日の記録のMEMスペクトル。最下部マントルサイレント地震の候補日。縦波線はDPSEモードの位置を示す。

1999 5/7 Canberra MEM AR=1500



1999 5/7 Matsushiro MEM AR=1500

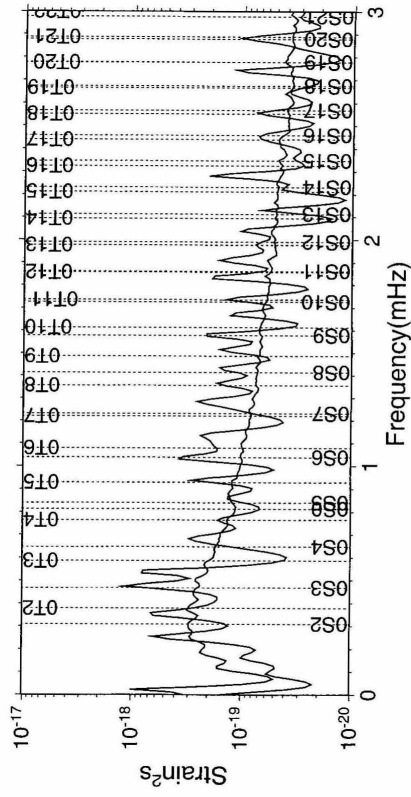
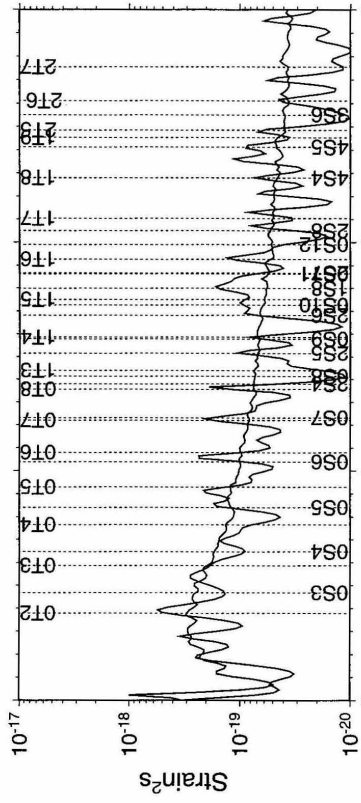
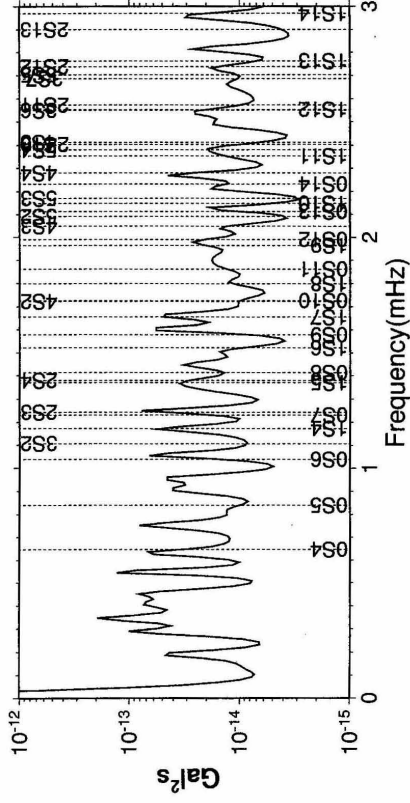


図9 1999年5月07日の記録のMEMスペクトル。上部マントルサイレント地震の候補日。縦波線はUMSEモードの位置を示す。

1999 3/24-25 Matsushiro MEM AR=1500



1999 3/24-25 Canberra MEM AR=1500



Ballyn MEM AR=1500

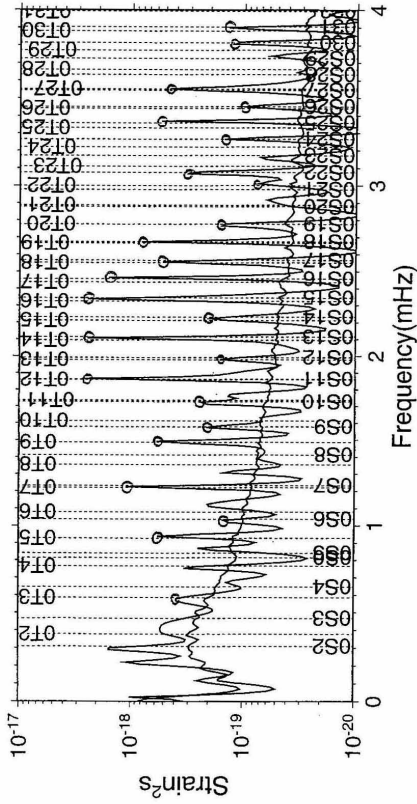


図6 1998年3月25日のMw8.1のパレニー地震の記録のEXTのMEMスペクトル。縦波線は基本モードの位置を示す。

図7 1999年3月24-25日の記録のMEMスペクトル。上部マントルサイレント地震の候補日。縦波線はUMSEモードの位置を示す。

## Number of modes detected

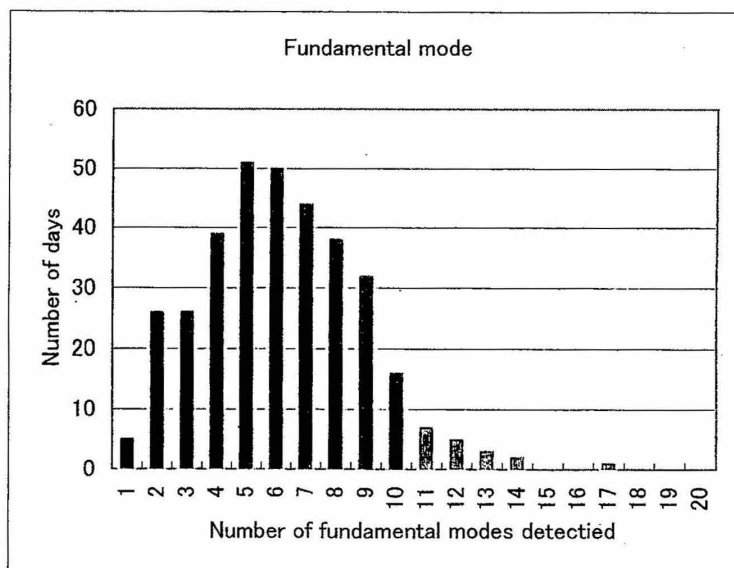
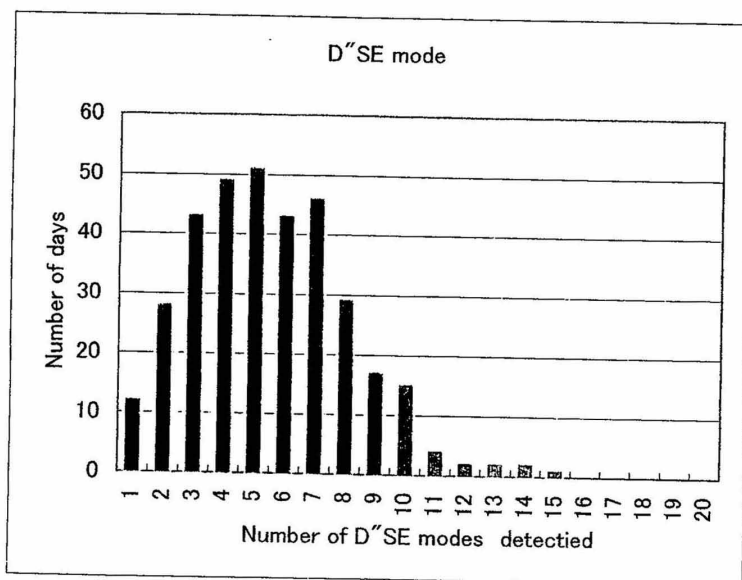


図10 固有モードへの一致個数の分布。横軸は一致個数、縦軸はその一致個数の日数。

5.4 となる。

図10の横軸はEXTの場合の一致個数の頻度分布で、横軸は一致個数、縦軸はその一致個数の日数である。4～7辺りをピークに分布しており、上記の見積もりと観測が調和的である。SGの場合もほぼ同様である。

図10の一致個数の頻度分布はポアソン分布をしていると仮定する。図10を見れば、この仮定は第ゼロ近似で間違っていないであろう。

SGのUMSEの場合、同定されたモードは、0S6, 0S7, 0S10, 0S15, 0S16, 0S17, 0S20, 1S4, 2S10, 2S11 の10である。出現確率が0.094で平均3.3の現象(つまり観測スペクトルのピークがUMSEモードのどれかに一致すること)が10以上現れる確率は0.0022(ほぼ450回に1回)で、ぎりぎり「偶然では無い」ことになる。

SGのDPSEの場合、同定されたモードは、0S6, 0S7, 0S10, 1S4, 1S5, 1S6, 1S10, 2S10, 2S11 の9モードである。平均4.9の現象が、9以上現れる確率は0.062(ほぼ16回に1回)で、「偶然」ということになる。

EXTのUMSEの場合、同定されたモードは、0S9, 0S11, 0S12, 0S14, 0S20, 2S5, 2S6, 2S8, 0T3, 0T4, 0T5, 0T6, 0T7, 0T8, 0T12, 0T15, 0T17 の17である。平均6.1の現象が17以上現れる確率は0.0002(ほぼ4800回に1回)で、「偶然ではない」。

EXTのDPSEの場合、同定されたモードは、0S4, 0S7, 0S9, 0S11, 0S12, 1S8, 2S5, 2S6, 2S8, 0T2, 0T3, 0T4, 0T5, 0T6, 0T7, 0T8, 1T4, 1T5, 1T8, 2T5 で29ある。平均5.4の現象が29以上現れる確率はほとんど10(-6)以下で、「偶然ではない」。

以上のことから単純に結論をだすと、統計的には、1999年4月02 - 03日にはMw8クラスの大サイレント地震は発生したが、上部マントルの事件であって、DPSEである可能性は小さい。

しかしながら、SGの場合もEXTの場合も、第2章でのべた、UMSEの場合にはほとんど励起されないが、DPSEの場合にはよく励起される「DPSE区別モード」(SGの場合は1S4, 1S5, 1S6, 1S10、EXTの場合は1T4, 1T5, 1T8, 2T5)が明瞭に出現している。また、500秒より短周期の基本モードが少なく、その視点からはDPSEの可能性は高いように見える。

暫定的な結論として、ここでは、1999年3月24 - 25日と1999年5月07日には上部マントルの大サイレント地震が、1999年4月02 - 03日にはマントル最下部の大サイレント地震が起こった可能性もあるとしておきたい。

また、1999年4月02 - 03日の場合には、観測点の大気圧のスペクトルにも大くの固有モードが出現している。これらのことを考慮し、最終的な結論は今後の検討に待ちたい。

1999年3月24 - 25日と1999年5月07日には、観測点の大気圧のスペクトルには固有モードは有意には出現していないので、大気圧の振動が原因ではない。

## 第10章 サイレント地震のサイズ

図6の1998年3月バレー地震のスペクトルと、図7、図8、図9を比較すると、3つのサイレント地震のパワースペクトルの振幅はバレー地震の10分の1程度、従ってスペクトルの振幅で言うと、3～4分の1程度と言うことになる。従って、マグニチュード言うと、Mw8.1より0.1から0.2小さいモード、つまり、Mw7.9からMw8.0程度と言うことに

なる。将来は、振幅のインバージョンによって、モーメントとメカニズムを決定する方向に進む必要がある。

## 第11章 要約

一日長記録の場合、周波数間隔が $\sim 0.012\text{mHz}$ となり、周波数グリッド密度が $\sim 82/1\text{mHz}$ となり、特に500秒(2mHz)より短周期側では固有モードの数があまりも多く、単なる「ピークが固有モードに一致している一致していない」の議論は意味がない。上部マントルの地震かマントル最下部の地震かに、標的をしぼる必要があることが分かった。

1000秒より長周期(1mHzより低周波)側では、記録はほとんど大気圧に追従している。逆に言うと、大気圧補正をしないと、意味のあるシグナルは取り出せないであろう。ただし、大気圧補正は、単純な線形補正でもかなり効果的である。

多くのスペクトルの検討から、1999年3月24 - 25日、1999年4月02 - 03日、1999年5月07日には大サイレント地震が起こった。ただし、1999年4月02 - 03日にはマントル最下部の大サイレント地震である可能性もある。サイズは、いずれも、 $M_w7.9$ から $M_w8.0$ 程度と推定できる。

今後は、次のような方向で研究を発展させて行くことが必要である。

- (1) 記録長を2日長に伸ばして、スペクトルの周波数分解能を上げる。
- (2) 瑞浪の伸縮計記録や、防災科学技術研究所のHi-netの仙台や岐阜羽島などkm級の深層ボーリング坑の傾斜計記録、南極の超伝導重力計記録など、非常にノイズレベルの低い記録を併用する。

## 参考文献

Dziewonski, A. M. and Anderson, D. L., 1981, Preliminary reference Earth model, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 25, 297-356.

川崎一郎・布野健太郎・今西祐一・舟崎淳・上垣内修、1999、D”層サイレント・アースクエイクの可能性、月刊地球、242、8、511 - 515.

Saito, M., 1988, Disper80: A subroutine package for the calculation of seismic normal mode solution, in *Seismological Algorithms*, ed. by D. J. Doornbos, Academic press.