

埋込式体積歪計の気圧補正*

檜皮久義, 佐藤馨, 二瓶信一

福留篤男, 竹内新,** 古屋逸夫***

Correction due to Atmospheric Pressure Changes of Data of Borehole Volume Strainmeter

H. Hikawa, K. Sato, S. Nihei, A. Fukudome, H. Takeuchi
(Earthquake Prediction Information Division, J. M. A.)

and

I. Furuya

(Meteorological College, J. M. A.)

The data of borehole volume strainmeter are influenced by atmospheric pressure. The relation between atmospheric pressure and volume strain is simple, so that the correction is easy. The correction due to atmospheric pressure changes is carried out by a linear equation $Y' = AX + Y$.

(Y' : corrected strain changes, A : coefficient of atmospheric pressure changes to strain changes, X : value of atmospheric pressure, Y : observed strain changes)

After correction, the accuracy of data is upgraded very much. The signal which is masked by atmospheric pressure can become clear.

A plan is undergoing to install 15 barometers in Tokai region. It is expected that the correction by atmospheric pressure can be made on real time in 1983.

§1 はじめに

気象庁では、地震の短期予知を主たる目的として、埋込式体積歪計（以下単に歪計とする）による観測を、1976年4月より東海地域の5地点で始めた。その後、1981年4月までの間に、東海地域と南関東地域の26地点に追加設置され、合計31点の観測網（Fig.1参照）が完成し、連続観測がつけられている。

これまでに、歪計は、地震の前兆と思われる歪変化をいくつか観測し、地震の短期予知に有効であることを実証している。例えば、1978年1月14日の伊豆大島近海の地震前の石廊崎や網代の変化は良く知られている。

通常、歪の変化は、短期間だけをとってみると、その主要部分は、半日ないし1日周期の地球潮汐と、数日周期の気圧変化による変動で占められている。この地球潮汐や気圧による変化にかくされている歪変化を

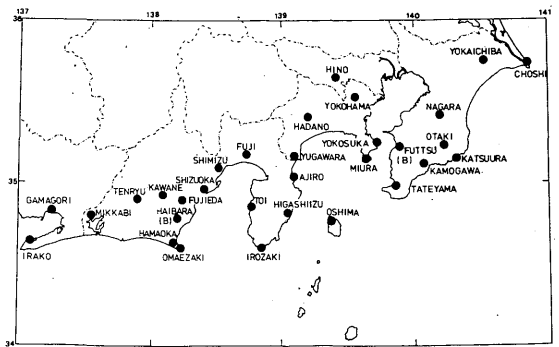


Fig.1 Map of the stations installed borehole volume strainmeter.

(B) indicates station with barometer.

とり出すためには、どうしてもこれらの影響を除去しなければならない。特に気圧の影響は、地球潮汐のような規則性がないので、気圧補正することによって、そのままでは見えなかった歪の異常変化を検出することが可能となる。歪データの監視にとって気圧補正は重要である。また、歪データの解析の場合にも、当然

* Received Feb 19, 1983

** 気象庁地震予知情報課

*** 気象庁気象大学校

気圧の影響を除去しなければならない。

気圧補正を行うためには、歪計の気圧応答を調べる必要があるが、ここではその方法について2, 3検討し、歪計の気圧に対する感度、すなわち歪計の気圧係数を求め、実際に気圧補正を行ってみたのでその結果について報告する。

なお、気圧補正を行うことによって、各地点の歪変化の特徴が明らかになり、降水や、地下水位などの影響をうけていることがわかったので、それらについても概略をのべる。

§2 歪計と観測システムの概要

歪計(観測部地震課, 1979)の地中変換部は、ステンレス・スチール製の長さ3m74cm, 外径約11cmの円筒形で、内部は溢路を持った隔壁で2室に分かれている。下部はシリコンオイルで満たされ、溢路を経て上部の伸縮自由な受感ベローズに通じている。ベローズの先端には差動変圧器がとりつけてある。この変換部を岩盤に埋め、膨張セメントにより周囲と固着する。岩盤の収縮・膨張にともなってシリコンオイルは受感ベローズに出入し、その伸縮量は地中変換部の体積変化率 $\Delta V/V$ に比例する。その量を差動変圧器で電気信号に変換して地上にとり出す。この出力は時間単位から永年変化までの長周期変動を対象にしたもので、DT(1979年以降に設置したものについてはDC)成分と称する。また、第2の出力として、Bm成分と称する圧電素子を用いたものがある。この周波数特性は周期約25分までフラットでそれより長周期の変化に対しては、速度特性を示すので、地震波などの短周期変動を対象にして、感度もDT(DC)より50~100倍高くしてある。その後、雷災でBmがこわれたものと1979年以降設置のものはBmの使用をやめ、ただし、DC成分からBmに相当する周波数特性を電氣的につくり出して、AC成分と称する。両成分の周波数特性をFig. 2に示す。周期20秒位で感度が下っているのは、後に述べるデータのサンプリングタイムを考慮したフィルタによる効果である。

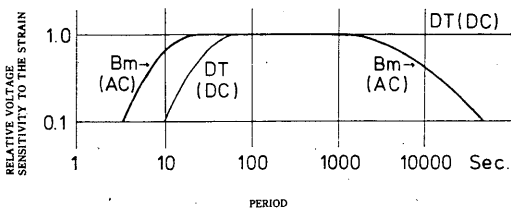


Fig. 2 Frequency response curves of strainmeters.

31観測点の位置、埋設深度、設置年月日、埋設地点の岩質等をTab.1に示す。

各観測点は無人局が多く、モニター記録をとるほか、公社回線を利用してリアルタイムで気象庁にあるセンター局へ伝送している。センターでは、システムの管理と歪データの常時監視を行っている(観測部地震課, 1979)。特に、歪の異常は東海大地震の予知の重要な項目で、地震防災対策強化地域判定会の招集基準の対象とされている。

センターでは、モニター記録計、タイプライタ出力、プザー等による監視のほか、磁気テープにオンライン収録し、データの解析、資料作成等に活用している。磁気テープ中のデータのサンプリングタイムは、

Bm: 1秒 (AC: 2秒)

DT: 5秒 (DC: 10秒)

予備: 10秒 (気圧, 温度など)

となっている。その分解能は、歪にして

Bm: 5×10^{-12} (一部 10^{-13})

AC: 1×10^{-11}

DT: 5×10^{-10} (一部 10^{-11})

DC: 1×10^{-9}

である。気圧の分解能は後の節で述べる。

§3 台風通過時のデータから求めた歪計の気圧係数

Fig.3は、1979年9月から11月の3か月間の毎時の歪値をプロットしたものである。なお、下段から2番目の記録は御前崎における気圧データである。この図から、気圧変化に応じて歪が変化していることがよくわかる。特に、台風が通過した時は、その変化が顕著である。

1979年10月には、大型の台風第20号が日本付近を通過し、大きな歪変化があらわれた。気圧変化量が大きいため、その他の要因による影響があっても、気圧と歪の関係を容易に求めることができると考えて、このときのデータを用いて、各地点の歪計の気圧係数を求めた。気圧データは、それぞれの気象官署の日巻自記気圧計から毎時のデータを読みとり用いた。なお、三ヶ日は浜松測候所、横須賀は横浜地方気象台のものをを使用した。

Fig.4は、台風通過時前後の、伊良湖の歪と気圧の毎時値をプロットしたもので(上段は気圧補正の結果である)、歪変化には、前にも述べたように気圧変化によるものと、地球潮汐成分が重畳している。さらに、この外にドリフトのあることがわかる。そこで、次のような処理を行い気圧係数を求めた。

(1) ドリフトの除去を一次式で行う。

Tab. 1 The stations of strainmeter.

	緯度	経度	標高	設置 深度	岩 質	埋 設 時	観測開始
東海地域 (Tokai region)							
蒲 郡 GAMAGORI	34°50'	137°15'	38 m	100 m	花崗内緑岩	'79. 12. 18	'80. 7. 1
天 竜 TENRYU	34°54'	137°53'	160	149	粘板岩	'79. 12. 14	"
川 根 KAWANE	34°56'	138°05'	170	101	粘板岩	'79. 11. 21	"
藤 枝 FUJIEDA	34°54'	138°14'	50	101	礫岩(傾斜角50°)	'79. 12. 7	"
清 水 SHIMIZU	35°06'	138°31'	60	125	泥岩	'79. 10. 16	"
富 士 FUJI	35°11'	138°44'	210	92	凝灰角礫岩	'80. 2. 29	"
土 肥 TOI	34°52'	138°46'	100	152	凝灰岩	'80. 2. 14	"
東伊豆 HIGASHIIZU	34°49'	139°03'	140	251	安山岩	'80. 1. 14	"
浜 岡 HAMAOKA	34°38'	138°11'	35	250	泥岩(第三紀)	'77. 2. 21	'77. 5. 12
榛 原 HAIBARA	34°47'	138°12'	50	250	泥岩(第三紀)	'77. 2. 23	"
伊良湖 IRAKO	34°38'	137°05'	6	141	黒色片岩(古生層)	'75. 9. 5	'76. 4. 1
三ヶ日 MIKKABI	34°48'	137°33'	15	51	粘板岩(古生層)	'75. 10. 11	"
御前崎 OMAEZAKI	34°36'	138°13'	45	208	泥岩(第三紀)	'75. 11. 1	"
静岡 SHIZUOKA	34°58'	138°24'	14	60	砂岩(古第三紀)	'75. 11. 19	"
石廊崎 IROZAKI	34°36'	138°51'	55	133	安山岩・角礫岩	'76. 2. 2	"
南関東地域 (South Kanto region)							
湯河原 YUGAWARA	35°10'	139°06'	187	150	火山礫凝灰岩	'80. 2. 5	'81. 5. 1
秦 野 HADANO	35°24'	139°12'	206	148	団結細砂	'79. 11. 23	"
三 浦 MIURA	35°09'	139°39'	53	150	砂岩	'79. 10. 30	"
横 浜 YOKOHAMA	35°32'	139°33'	70	203	泥岩	'79. 10. 5	"
日 野 HINO	35°39'	139°25'	140	148	固結砂礫	'80. 2. 2	"
鴨 川 KAMOGAWA	35°07'	140°05'	30	150	泥岩	'81. 1. 17	"
富 津 FUTTSU	35°13'	139°54'	20	150	泥岩	'80. 12. 3	"
大多喜 OTAKI	35°14'	140°14'	100	250	泥岩	'80. 12. 5	"
長 柄 NAGARA	35°25'	140°12'	50	250	細粒細岩	'80. 10. 24	"
八日市場 YOKAICHIBA	35°45'	140°32'	55	300	泥岩	'80. 11. 14	"
大 島 OSHIMA	35°46'	139°23'	185	291	火山礫凝灰岩	'81. 4. 8	"
網 代 AJIRO	35°03'	139°06'	59	120	玄武岩・溶岩	'76. 9. 2	'77. 4. 1
横須賀 YOKOSUKA	35°15'	139°43'	25	146	泥岩(新第三紀)	'76. 9. 8	"
館 山 TATEYAMA	34°59'	139°52'	6	190	泥岩	'76. 8. 4	"
勝 浦 KATSUURA	35°09'	140°19'	12	180	泥岩(新第三紀)	'76. 9. 21	"
銚 子 CHOSHI	35°42'	140°51'	69	100	砂岩(古生層)	'76. 12. 24	"

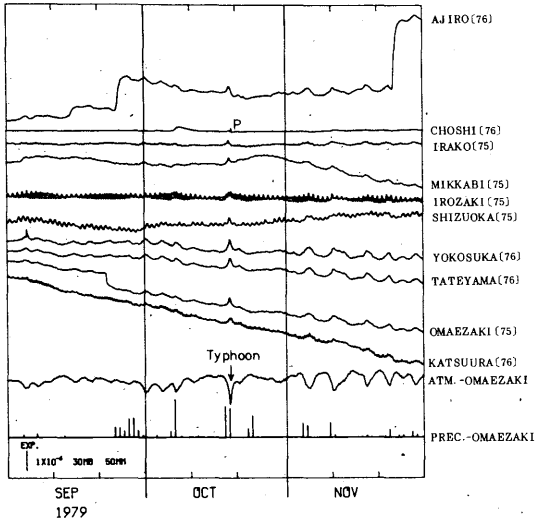


Fig. 3 The records of volume strainmeter. The strain changes correspond to the variations of atmospheric pressure.

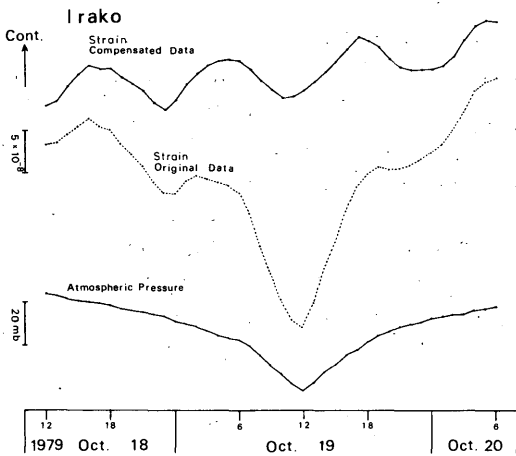


Fig. 4 Original and corrected records of volume strainmeter at Irako during a period from October 18 to October 20, 1979, with a typhoon.

(2) 地球潮汐成分を除去するために、12時間前後をカットするバンドカットフィルタをとおした。地球潮汐成分は1日周期のものもかなり大きく含まれているが、1日周期分をカットすると、気圧による変動分も一部除去されてしまうので、12時間前後だけをカットした。

(3) ドリフトおよび12時間周期をカットした歪データと、気圧データから、最小自乗法で一次式の係数を求め、気圧係数Aとする。なお気圧補正は一次式

$$Y' = AX + Y$$

で行う。

Y' : 気圧補正歪 Y : 観測した歪

A : 気圧係数 X : 気圧値

Fig.5は、各地点毎の気圧と歪の関係図である。気圧の上昇と下降のときでは、歪の応答が異なっているところもあるが、ここでは両方まとめて計算を行った。ただし、静岡および銚子については、下線の部分は、計算から除いてある。

求めた気圧係数は次のとおりである。

伊良湖	$0.53 \times 10^{-8} / \text{mb}$	網代	$0.89 \times 10^{-8} / \text{mb}$
三ヶ日	0.76	横須賀	1.41
御前崎	1.20	館山	1.46
静岡	1.16	勝浦	0.78
石廊崎	0.61	銚子	0.13

これらの値によって、気圧係数を求めるために用いた期間の歪変化について、実際に気圧補正を行った。その結果をFig.6に示す。

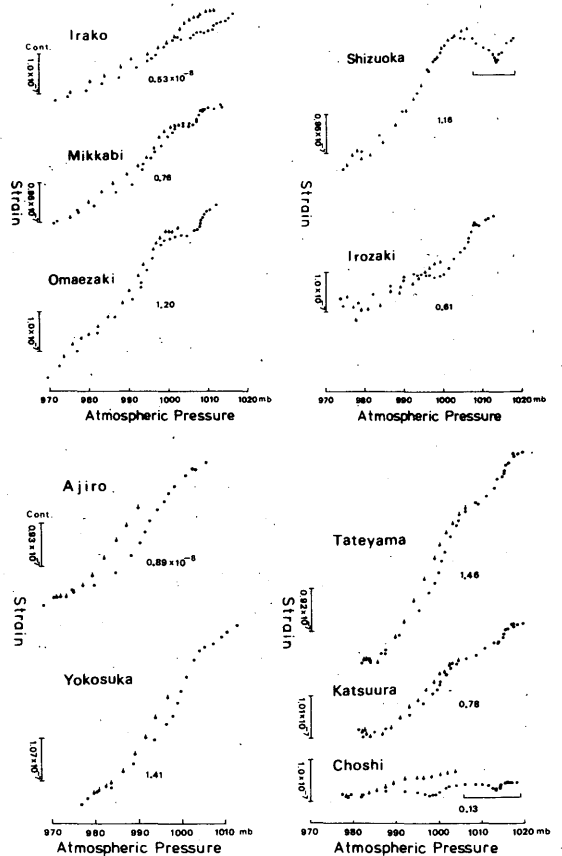


Fig. 5 The relation between atmospheric pressure and strain changes.

↓ : Atmospheric pressure increasing.

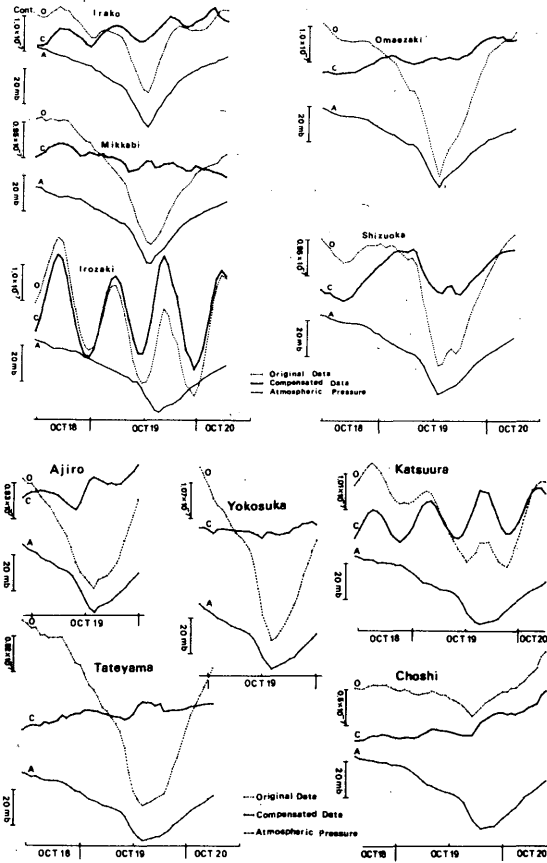


Fig. 6 The original strain changes O, the corrected strain changes C and atmospheric pressure A.

伊良湖の変化をみると、補正前には気圧の影響あまりよくわからなかった地球潮汐の変化がはっきり現われている。他の地点でも気圧補正の効果が明瞭で、補正前にはわからなかった歪の変化が認められる地点もある。例えば、静岡の1日周期の変化や、網代のやや急な変化などがある。

§ 4 通常の気圧変化時の気圧係数

台風通過時の気圧変化は急激で変化量も大きく、特異現象であり、通常の気圧変化時とは異なっていることも考えられるので、通常の時の気圧係数を求めた。

Fig. 7は、1年間の伊良湖のデータを用いた、フーリエ積分法による歪のスペクトル図である。12時間および24時間前後には、はっきりしたピークが見られるのは、気圧変化や地球潮汐によるものである。また、約80時間のところのピークは、3～4日間程度の気圧変化によるものと考えられる。

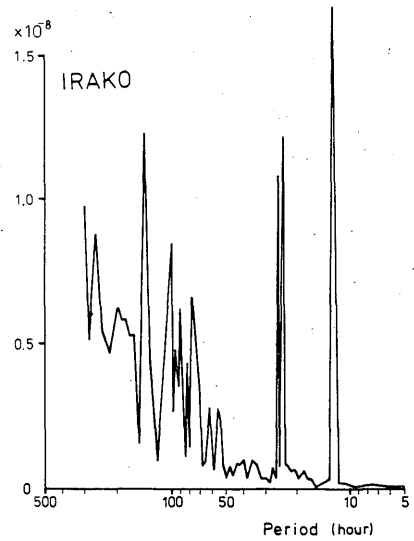


Fig. 7 The spectrum of strain changes for 1982 at Irako.

そこで、地球潮汐の影響のない30～80時間の周波数帯域のデータを比較して、通常の気圧変化時の気圧係数を求めた。気圧データは、1978年12月分の日巻自記気圧計から毎時値を読みとり使用した。ここでは、30～80時間の帯域を用いたが、スペクトル図からみて、もっと周期の長い帯域の方が望ましいかもしれない。

30～80時間のバンドパスフィルタをとおした後の気圧と歪の関係を示したのが、Fig. 8である。静岡と銚子を除き、両者はほぼ直線に沿っており、きわめて良い相関を示している。静岡の相関が良くないのは、地下水位の変化等、気圧以外の要因による歪変化がまじっているからと考えられる。また、銚子の歪変化量は、他の地点と比べ非常に小さく、これについては§ 8で述べる。

このようにして求めた各地点の気圧係数は次の表のとおりで、台風通過時のデータを用いて求めたものと比べ大差はなかった。なお、網代は歪の変化が激しく、処理を行わなかった。

伊良湖	$0.66 \times 10^{-8}/\text{mb}$	網代	—
三ヶ日	0.71	横須賀	$1.65 \times 10^{-8}/\text{mb}$
御前崎	1.25	館山	1.54
静岡	0.95	勝浦	0.96
石廊崎	0.57	銚子	0.12

§ 5 日平均値の歪変化の気圧補正結果について

以上二つの方法で求めた気圧係数のうち、後者の値

(網代については前者)を用いて、これまでの歪変化の気圧補正を行って検討した。全体にみて、生のデータに比較すると、気圧による変動分が消えて非常に見やすくなった。

Fig.9は、1979年9~11月の日平均値の歪変化図であるが、台風第20号通過のところは補正されて、気圧による変動はほとんど消えている。静岡の変化は、他の観測点に比べ乱れが目立つが、よく見ると谷の部分が日曜日あたり、1週間周期で変化している。これは、近くの工場でふだん多量の地下水くみ上げを行

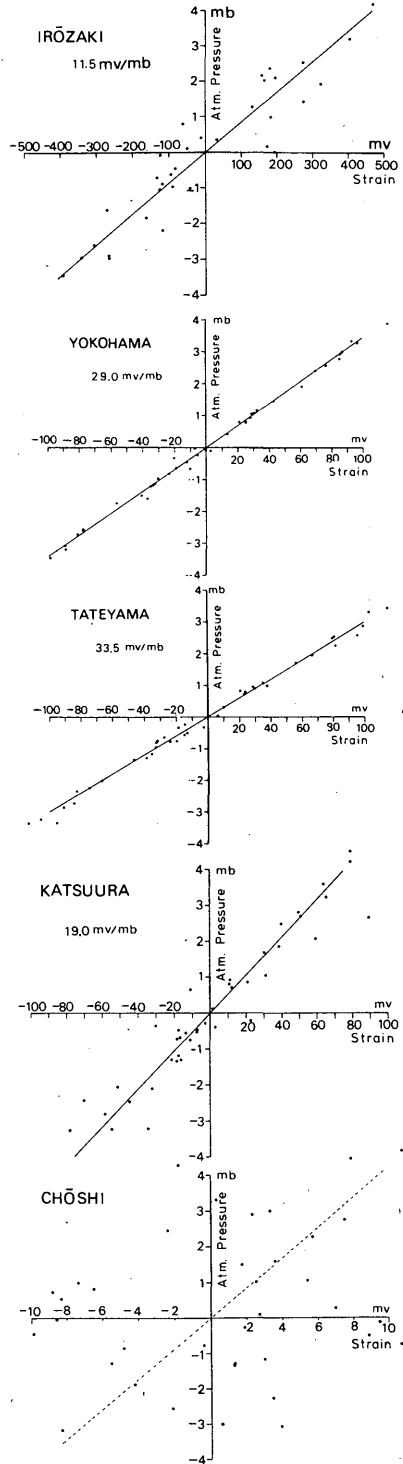
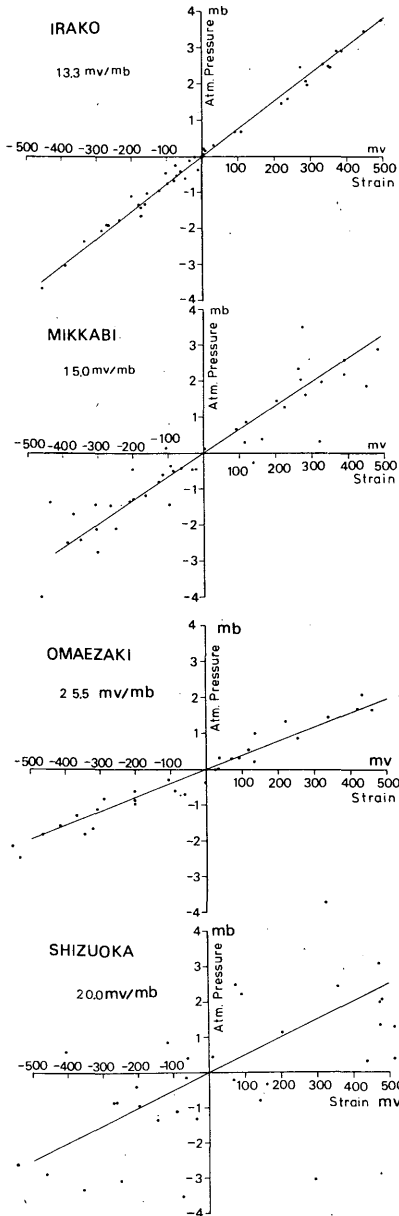


Fig. 8 The relation between atmospheric pressure and strain changes in a period band from 30 hours to 80 hours.

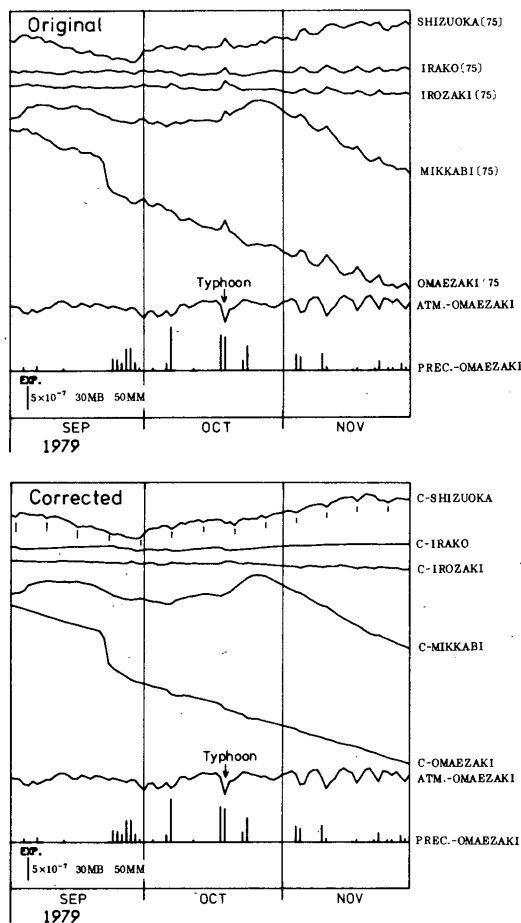


Fig. 9 Original and corrected strain change records. The correction is very good even when the typhoon passed the area. Weekly variations are seen at Shizuoka.

っており、週末にはそれを休止するためである。地下水をくみ上げると歪計の埋設地点の付近が膨張し、休止すると収縮するものと考えられる。なお、地下水位と歪との関係は、静岡地方気象台の太田金房・吉田明夫(1982)の調査がある。

次に、1978年1月14日の伊豆大島近海の地震前後の変化について調べてみる(Fig.10参照)。これまで地震の前兆として石廊崎では、1977年12月3日の収縮変化があって、1978年1月10日に膨張に変化して4日後に地震が発生したと言われてきた(観測部地震課, 1979)。気圧補正結果を見ると、その変化は明瞭になるとともに、生のデータでははっきりしていなかった11月10日の膨張の変化が認められる。前後の変

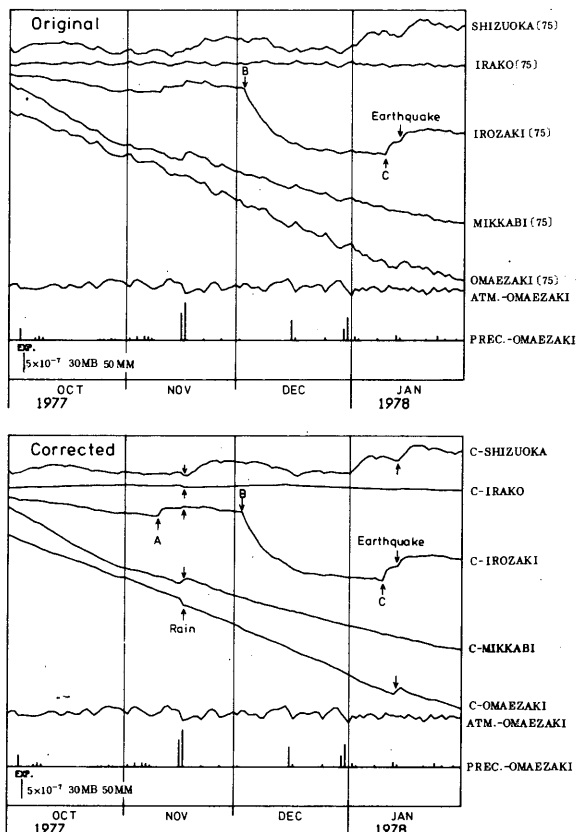


Fig. 10 Original and corrected records from October 1977 to January 1978. The precursory changes B and C are recognized on original record at Irozaki before the earthquake of near Izu Oshima. The primary precursor of the earthquake at Irozaki is seemed to begin from Nov. 10 marked (A) after the correction. Precipitation influences the strain changes at each station (marked Rain).

化状況から考えて、これも地震に関連したものと思われることもない。その他、各地点の11月15日頃に見られる変化は降水による影響と考えられるが、これは観測点の地質・地形によって膨張するところと、収縮するところがある。なお、1月14日の地震にはコサイスマックステップがあらわれている。

§6 磯原と富津の気圧による気圧係数と気圧補正

1981年5月までは、気象官署の気圧データを用いて、気圧補正を行っていたので、歪データとは別の経路で

気圧データを入手しなければならない。また、気象観測では気圧は3時間または6時間毎のものだけで、毎時データを利用するためには、自記記録から読み取らねばならなかった。そのため、常時気圧補正をすることはできなかった。

1981年5月から、東海地域を代表して榛原に、南関東地域を代表して富津に、気圧計を設置して、歪と同様にテレメータによる連続観測ができるようになった。データはDT(DC)成分と同様に10秒毎に磁気テープに記録している。

用いた気圧計は、中浅測器株式会社製の円筒振動式気圧計で、その動作原理および主な仕様を簡単に説明する。

この気圧計は、薄肉円筒を共振させて、気圧変化による円筒の共振周波数の変化から気圧の測定を行うもので、気圧感部、変換部、演算部および表示部で構成されている(Fig.11参照)。

気圧感部は、Fig.12のように薄肉の円筒レゾネータ(共振子)の外側を真空にし、内側に圧力が加わると、

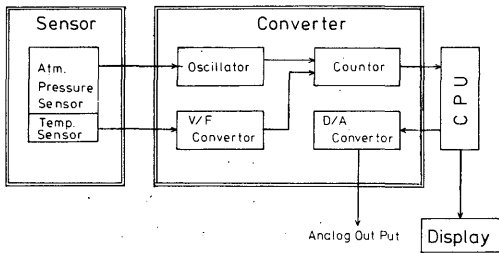


Fig. 11 Block diagram of barometer.

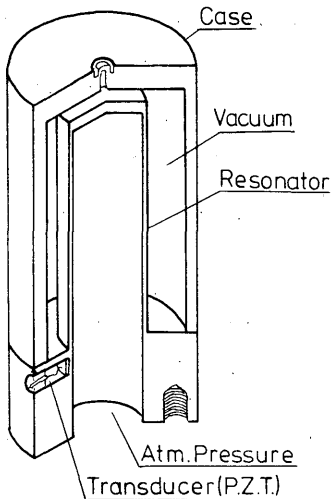


Fig. 12 Sensor of barometer.

円筒の共振周波数が変化するので、その共振周波数を測定することにより気圧を求めることができる。

Fig.13のように、円筒レゾネータの節の部分に圧電素子(P. Z. T.)が4片付けられており、2片は駆動用、他の2片は共振周波数の検出を行っている。温度変化や経時変化などに対する精度維持のため、複合モード(2次モードと4次モード)を利用している。

変換部は、共振回路、計数回路およびD/A変換回路などで構成されている。

演算部は、8ビットマイクロコンピュータを使用して、データの演算および表示出力を行っている。

表示部は、LEDにてデータを0.01mbまで表示している。

主な使用は次のとおりである。

測定範囲：930～1030mb

非直線性：±0.1mb

分解能：0.05mb以下

温度安定度：±0.1mb以内/0～40℃

長期安定度：±0.1mb以内/6か月

アナログ出力電圧：DC-10～+10V(0.01mbごとに变化する)

また、1981年3月17日、東京管区気象台測器課における検査結果は次のとおりであった。

示度mb	1030	1010	980	940	機番他
補正值mb	+0.02	0	-0.04	-0.04	81001 (富津)
補正值mb	0	+0.01	-0.01	+0.04	81003 (榛原)

非常に補正值が小さいので、使用に当たっては、アナログ出力電圧値を補正值なしでそのまま使用している。

また、1981年4月～1983年1月までの間、両機とも1981年10月に1回ずつ故障した。原因はノイズの混入のためで、出力データが一定値または、フルスケールオーバーの値を示していた。そのため、電源にノイズフィルタを挿入した。また誤動作の予防および異

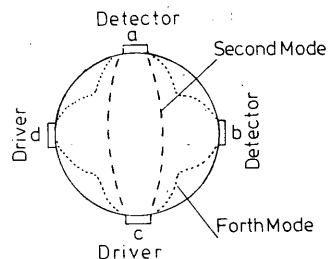


Fig. 13 The mode of cylindrical resonator.

Tab.2 Time shift of the best correlation between atmospheric pressure and strain change.

+ : Atmospheric pressure is delayed.

- : Atmospheric pressure is fast.

Station	Station of the barometer	Time shift (hour)												Distance from FUTTSU	Distance from HAIBARA
		'81.5	6	7	8	9	10	11	12	'82.1	2	3	Average		
GAMAGORI	HAIBARA	+3	+1		+3	+3	+3	+1	+1	+3	+3	+3	+2	245 (km)	87 (km)
TENRYU	"	+1	0		+2	+2		+1	0	+1	+2	0	+1	187	32
KAWANE	"	0	0		+3	+2		+1	0	+1	+1	+2	+1	169	20
FUJIEDA	"	-1	-1		+3	+1	-2	0	+1	+1	+1	0	0	156	13
SHIMIZU	"	-2	-1		+3	-1		0	-2	+1	+1	-1	0	127	46
FUJI	"	-1	+1					0	-1	+1	+2	+1	0	106	66
TOI	"	+2	0		+3	+2	0	0	-1	+1	0	0	+1	116	114
HIGASHIIZU	FUTTSU	+1	-2	+3	+1	+1	+1	0	0	0	0	0	0	89	78
YUGAWARA	"	-1	-3		0	-3	(-8)	0	-2	-1	-1		-1	73	93
HATANO	"	-1	-2	+2	(+6)	-4	+1	-1	0	0	0	+1	0	67	114
MIURA	"	0	-1	0	+1	+1	0	0	0	+1	+1	+1	0	24	138
YOKOHAMA	"	-1	-1	+2	+1	-1	0	0	-1	0	0	+1	0	47	148
HINO	"				0	0	+2	+1	-1	0	-2	0	0	65	147
KAMOGAWA	"	0	0	-2	+1	0	-3	+1	-1	+1	+1	+1	0	20	176
FUTTU	"	+1	-1		+1	+2	-2	0	-1	0	+3	+1	0	0	162
OTAKI	"	0	+1		+1	+1	(-5)	0	-1	+1	0	0	0	30	192
NAGARA	"	0	-2	0	+2	+1	-2	0	-1	+1	+1	0	0	35	195
YOKAICHIBA	"		0	-1		0	-1	0	-2	+2	-1	+1	0	82	238
OSHIMA	"	0	-2		+1	+1	0	-1	-1	0	-1	0	0	69	108
HAMAOKA	HAIBARA	0	0	0	+1	+2	+2	0	0	+1	+2	0	+1	170	17
HAIBARA	"	0	-1	-1	+3	+1	-1	0	-1	0	+1	-1	0	162	0
IRAKO	"	+4	+1		+4	+3	+4	+2	+1	+3	+4	+3	+3	265	104
MIKKABI	"	+1	+2		0	+2	0	+1	+1	+1		0	+1	219	60
OMAEZAKI	"	0	-1	-1	+1	+2	+1	0	-1	0	+1	0	0	168	20
SHIZUOKA	"						(-5)	+2	+1				+2	140	27
IROZAKI	"	0			+2	-1	-3	+1	-1	+1	0	0	0	118	63
AJIRO	FUTTSU	-2	-2	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1		-1	75	87
YOKOSUKA	"	0	-3	0	+1	0	0	0	-1	0	0	0	0	17	148
TATEYAMA	"		+3		+6					+6	+4		+5	26	154
KATSUURA	"	0	0	0	+1	+1	-1	0	-1	0	0	+1	0	39	197
CHOSHI	"	+8	+6	+10			+7		+9	+10	+9		+9	102	262

Note () : Rejected from average

常発生の場合、自動的に復帰するようプログラムを変更した。その後は全く異常なく安定に作動している。

これら榛原および富津の気圧データを用いて、全ての歪の観測点(31点)の気圧係数を求め、気圧補正を行った。

気圧はある地域を1点で代表することは、気圧の変化のしかたから考えて問題はあるが、毎時値程度のサンプリングのデータには、十分補正に利用できることがわかった。

気圧係数の求め方は、前と同じ方法により、歪、気圧ともに30~80時間のバンドパスフィルタをとした後、両者の相関および一次式の比例係数を最小自乗法にて求めた。ほとんどの観測点では、非常に良い相関を示したが、静岡や日野などのように、歪の変化が特異な動きをする地点や、ステップ状変化がよく表われる地点では相関がよくなかった。

1982年1月分の各地点の榛原または富津の気圧に対する歪の関係をFig.14に示す。右上から左下に45度の直線に数字が並んでいるものは相関の良いところで、蒲郡や伊良湖のように楕円状のものは気圧と歪に時間差のあるところである。八日市場や静岡のように45度の直線からずれた動きのあるところは、気圧に関係なく別の要因で歪が変化していることを表わしている。館山と銚子はかなり時間差があり相関は良くない。なお、榛原と富津の気圧の関係も示してあるが、その相関は0.98程度でかなり良い。

1981年5月から1982年3月までの11か月間のデータを1か月毎に、それぞれ約8日間をえらび出して、前に述べたような処理を行い、相関係数が0.8以上のものの比例係数の算術平均を行い、それをその地点の気圧係数とした。相関係数が0.8以下のものは降水など他の要因が大きい場合なので除外した。

各地点とも、榛原、富津両者の気圧に対する係数を求めたが、地理的な関係から、どちらか一方に対してよりよい相関を示したので、相関の良い方を採用した。東伊豆を除いて観測点から距離の近い方の気圧に対して相関が良かった。東伊豆については、榛原の方が距離的には近いが、平均すると富津に対しての方が良い相関を示した。通常気圧変化は、一般に西から東へ移動することが多く、その速度は毎時数10km程度である。歪観測点と別の地点の気圧データを使用すると、そのずれが発生する。遠い地点で約100kmになるので、2~3時間の差が予想される。Tab.2に各地点の月毎の相関の最も良い時の時間差を示したが、ほとんどの地点で±2時間程度である。夏期に時間差が大きくなってるのは降水の影響が入っていることと、気圧

変化の移動速度が冬期に比べておそくなるためと考えられる。

館山と銚子で時間差が、距離に比してかなり大きな値となっているが、館山は歪計感部に異常があるためであり、銚子は周辺の地質に関係があるものと思われる。

求めた気圧係数をTab.3に示す。

Tab. 3 Atmospheric pressure coefficient of strainmeter.

Station	Coefficient ×10 ⁻⁸ /mb	Station	Coefficient ×10 ⁻⁸ /mb
•GAMAGORI	0.42	NAGARA	1.91
•TENRYU	0.83	YOKAICHIHA	2.04
•KAWANE	0.67	OSHI MA	1.07
•FUJIEDA	0.51	•HAMAOKA	1.33
•SHIMIZU	0.99	•HAIBARA	0.95
•FUJI	1.33	•IRAKO	0.59
•TOI	0.70	•MIKKABI	1.12
HIGASHIIZU	0.62	•OMAEZAKI	1.18
YUGAWARA	0.49	•SHIZUOKA	1.17
HADANO	1.43	•IROZAKI	0.60
MIURA	1.26	AJIRO	1.43
YOKOHAMA	1.86	YOKOSUKA	1.77
HINO	1.86	TATEYAMA	1.21
KAMOGAWA	0.76	KATSUURA	1.04
FUTTSU	1.92	CHOSHI	0.11
OTAKI	1.54		

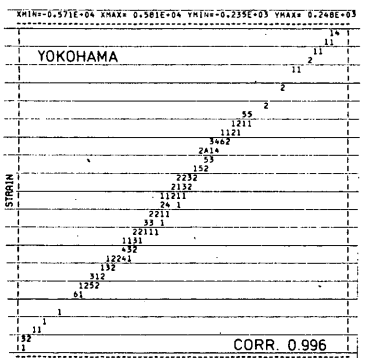
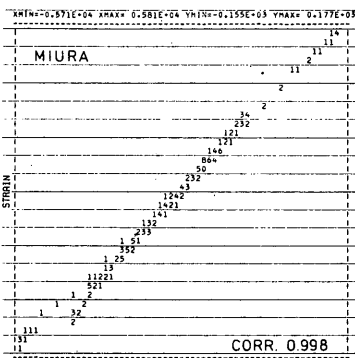
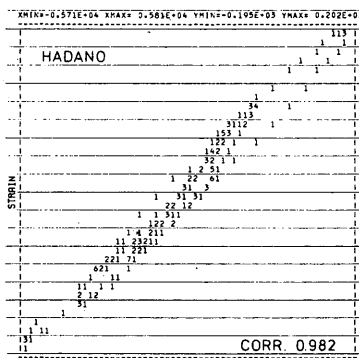
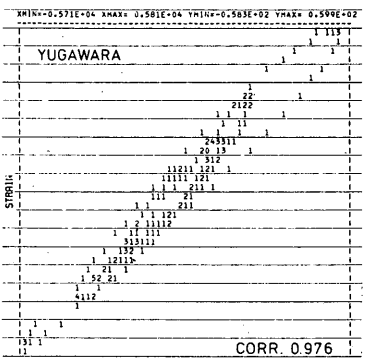
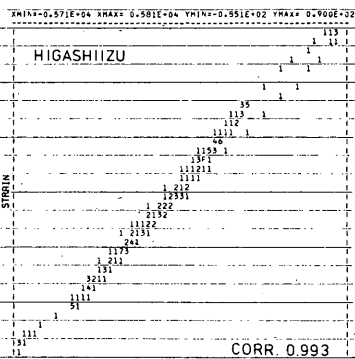
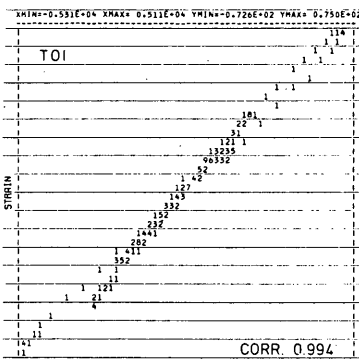
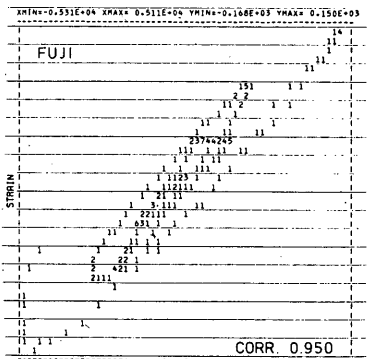
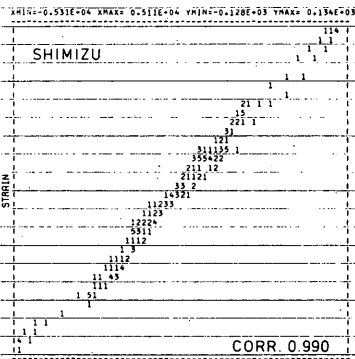
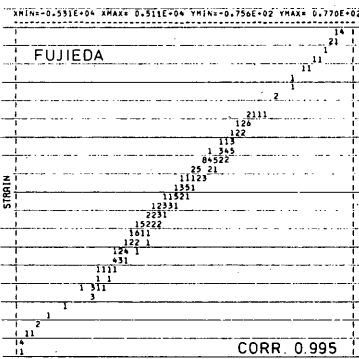
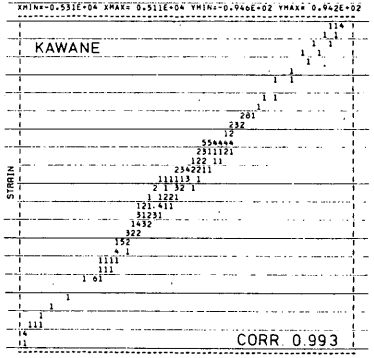
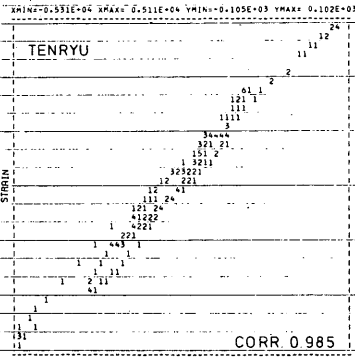
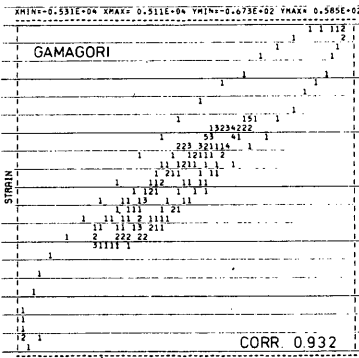
Note: (*) use Haibara's atmospheric pressure. No mark use Futtsu's one.

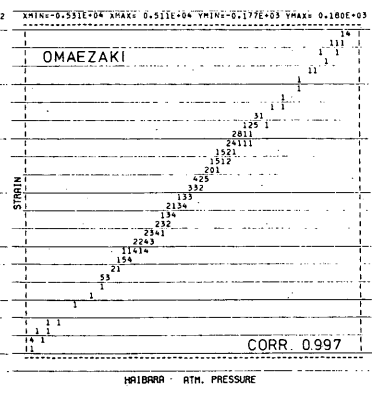
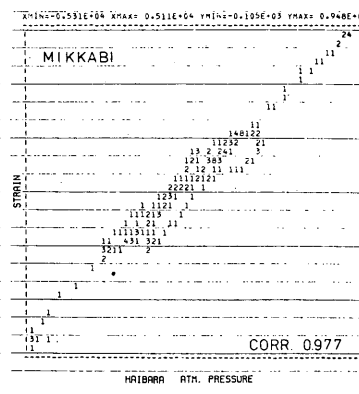
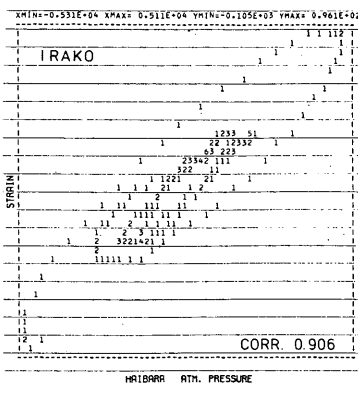
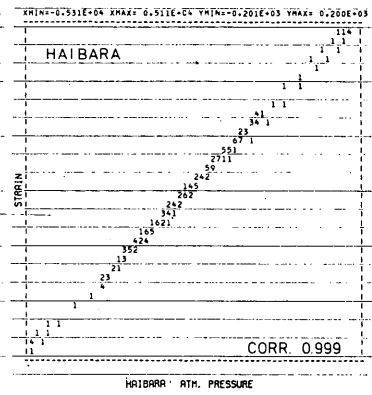
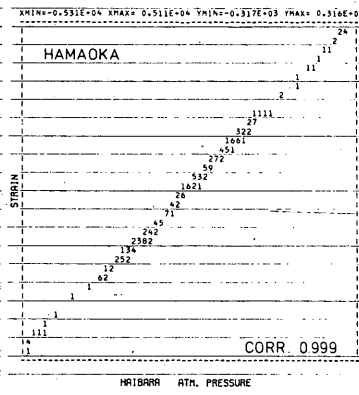
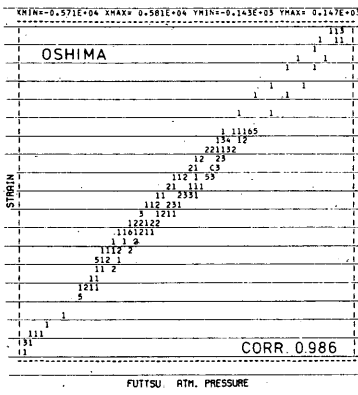
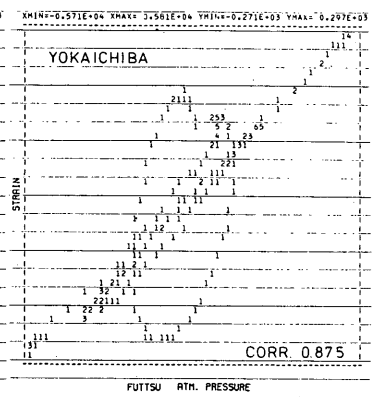
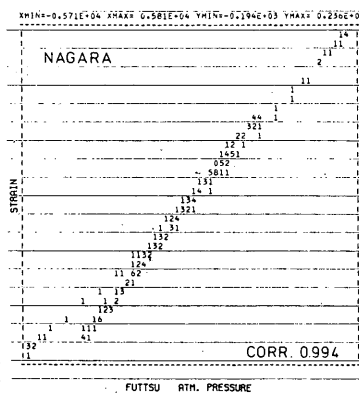
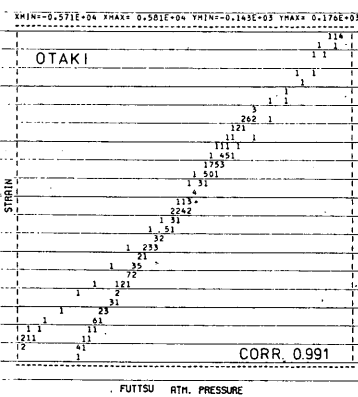
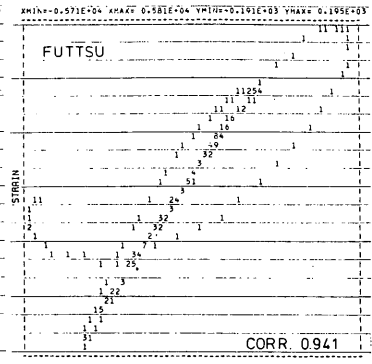
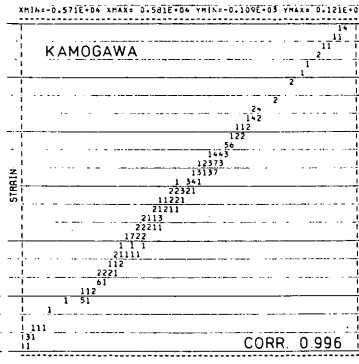
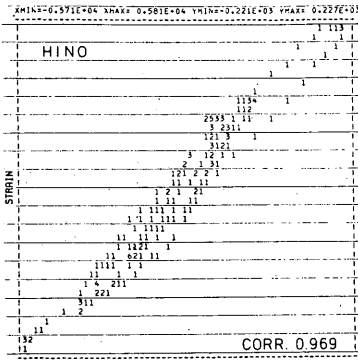
館山と銚子を除いて、補正結果を検討してみると、いずれも補正前に比べて、データは非常にみやすくなっている。Fig.15には、1982年10月から12月までの毎時データの補正例を示してある。これらの資料は地震予知連絡会や、地震防災対策強化地域判定会委員打合せ会等への資料として毎回提出している。気圧補正したために、降水の影響が明瞭に現われたり、歪の変化がはっきりと見られる例が認められる。

館山と銚子の気圧補正は、別の節で論じる。

埋込式体積歪計の気圧補正

101





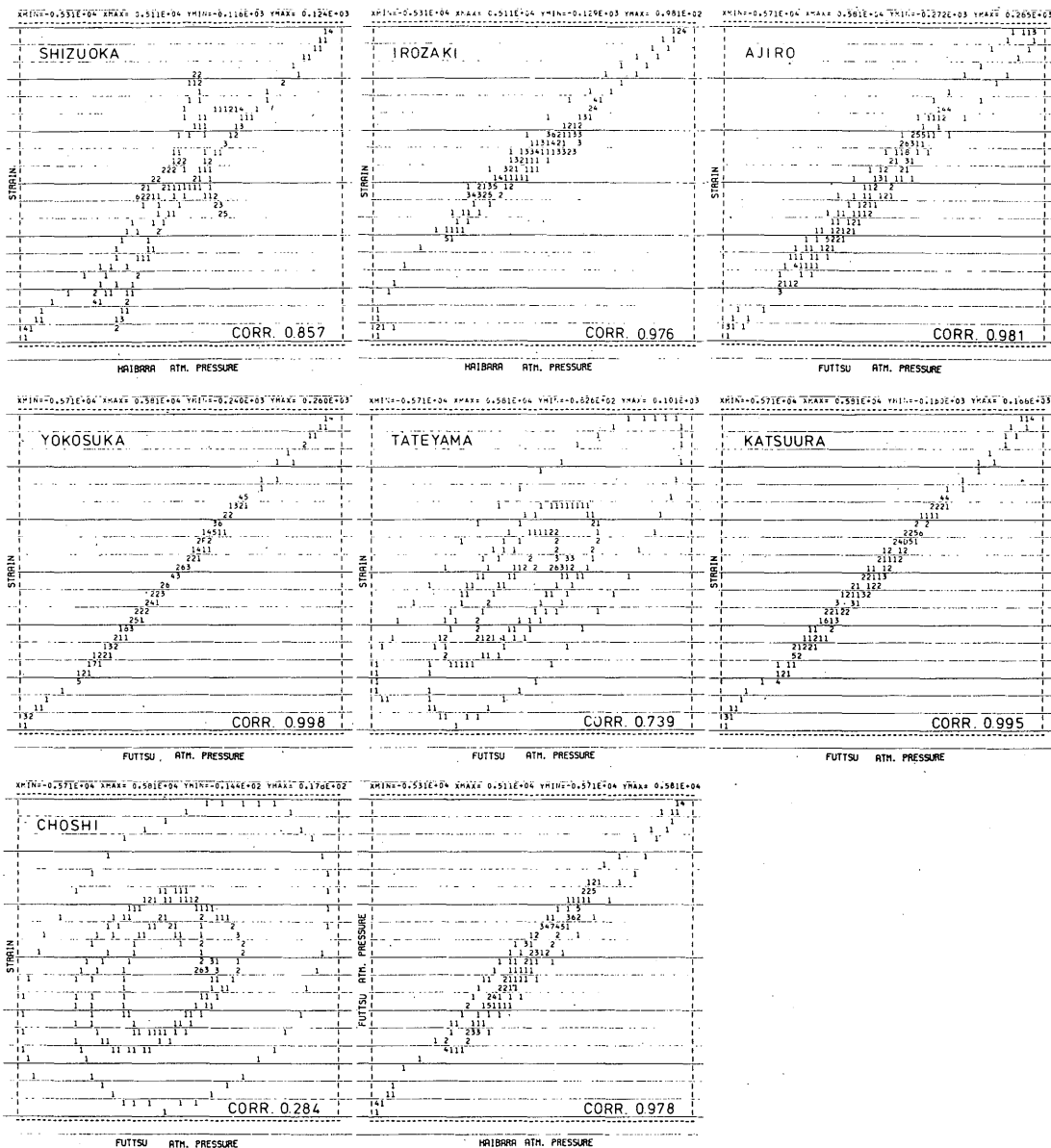


Fig.14 Relation between strain changes at each station and atmospheric pressure at Haibara or Futtsu.

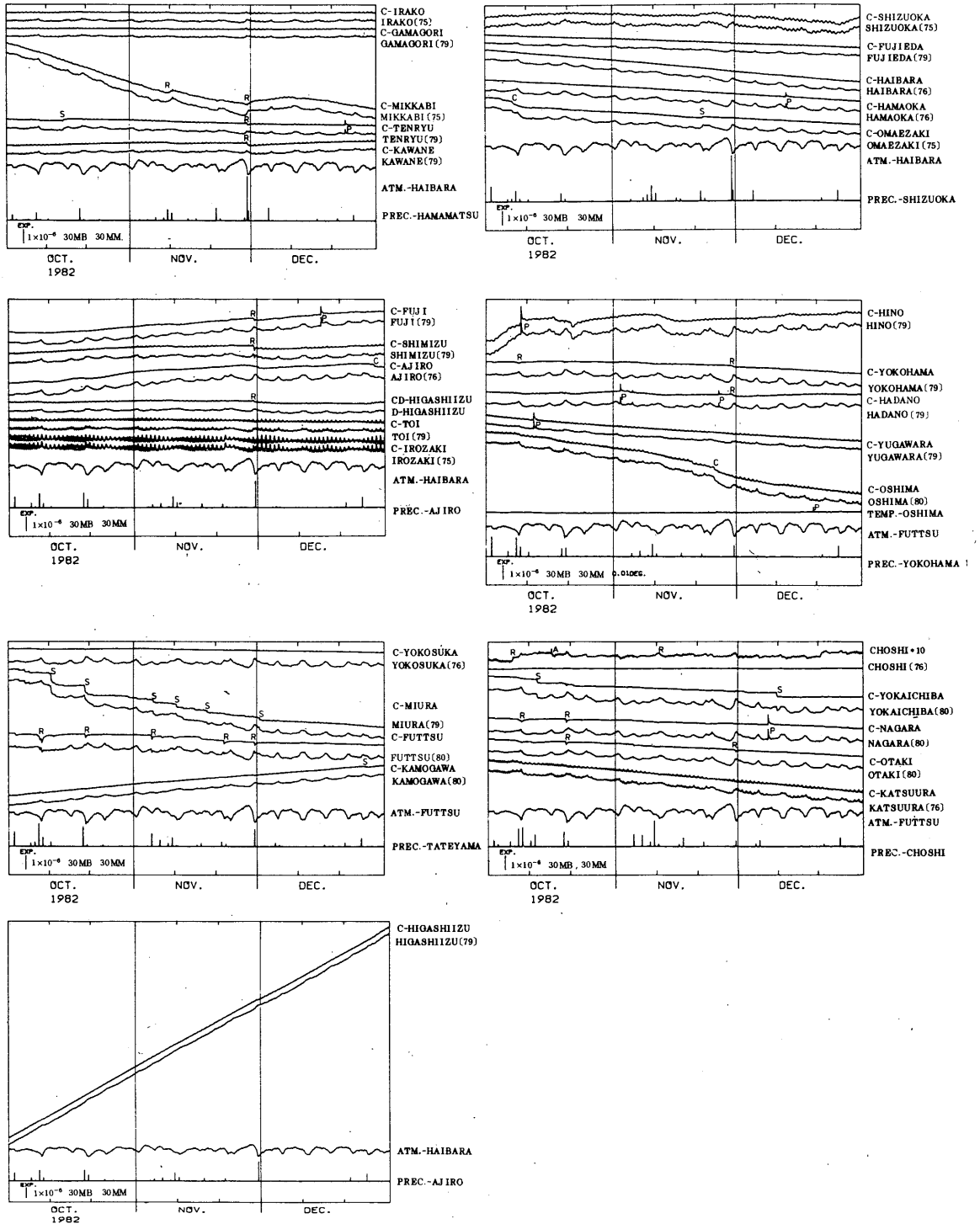


Fig. 15 Original and corrected strain change records (C-: corrected).

P: Power failure, R: Precipitation, S: Strain step, C: Remarkable strain change

Fig.16は、1982年2月5日0時から2月7日12時までの富津における気圧補正例である。2月6日16時頃の変化は、補正後はその形状が明瞭になっている。この補正結果から、長期間のデータから求めた気圧係数は、短期間のデータにも用いることができることがわかる。このことは、気圧に対する歪の応答は、短周期のものも長周期のものもあまり相異なることを示している。

§7 館山の歪計について

1979年12月12日から館山の歪計は急に変化をはじめた (Fig.17 参照)。

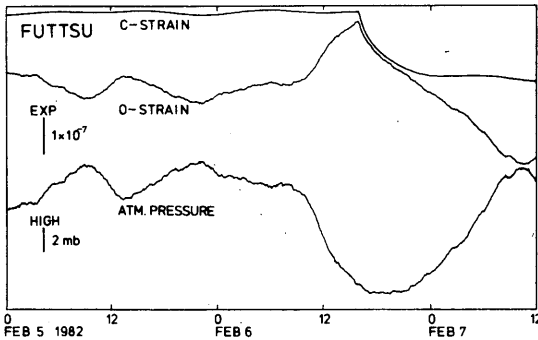


Fig. 16 The example of original and corrected strain change at Futtsu on February 5-7, 1982. The strain step is recognized evidently after correction.

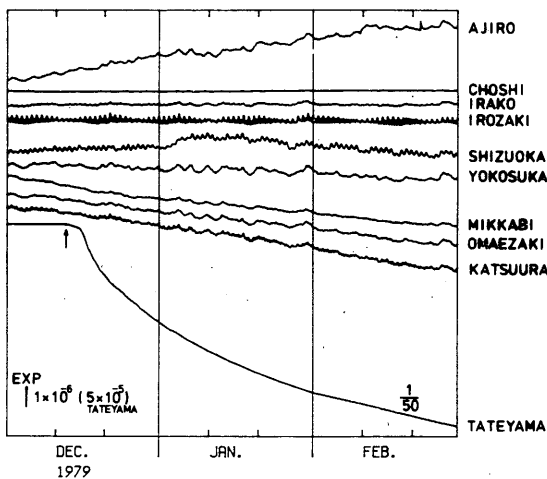


Fig. 17 The record of strain changes from December 1979 to February 1980. Abnormal change began from December 12, 1979, at Tateyama.

その後、バルブオープン動作後に急激な縮みの変化が起こるようになり、モニター記録でDC成分が7-8V位になると(ペローズが測定範囲の50%程度動く)比較のおちついた状態を示す。この異常変化の前は、気圧補正も他の地点と同じように行うことができたが、これ以後は、歪計の感度も半分以下に落ち、気圧に対する応答にも異常を示すようになってしまった。気圧係数も約 $1.5 \times 10^{-8}/\text{mb}$ から約 $1.2 \times 10^{-8}/\text{mb}$ に変化した。このことから、地下の歪センサーに何らかの異常が起こったものと考えられる。このため、館山の気圧補正は行わないことにする。

§8 銚子の気圧応答について

銚子は、設置時から歪変化は小さく、気圧係数も小さく、他の観測点の気圧係数の約1/10程度である。しかし、10倍に拡大して歪変化をみると、いろいろな変化が現われているようである。例えば、降水のあったときは、その後のびに変化し、気圧に対する応答も時間のずれがかなりある。

1982年1月のデータで、30-80時間のバンドパスフィルタをとおした後の気圧と歪の関係を、時間をずらしてみると、10時間ほどあとの気圧との相関が最もよくなる (Fig.18 参照)。逆に約15時間前の気圧と逆相関が高くなるが、これは気圧が高くなると歪が縮むという歪計の気圧応答に反するので、採用できない。

銚子では、バルブオープン操作後も正常に記録していて、歪センサーの異常とは考えられない。歪計の埋設地点の地盤の性質や歪計との結合状況によるものと考えている。

Fig.19に銚子の歪計埋設時にボーリングした柱状図を示す。

Fig.20は、気圧補正例である。時間をずらさないで補正した場合(上から2番目C-CHOSHI)より、気圧を10時間ずらして補正した場合(最上段)の方が若干の効果はあるが、完全とはいえない。

§9 短周期成分(Bm, AC成分)の気圧補正

これまで述べたことは、すべてDT(DC)成分のデータを用いて気圧との関係を調べ、補正を行ったものである。

歪データは、短周期成分(Bm, AC成分)もモニターしており、異常発生の際に監視に用いている。小さな歪変化まで監視するためには、DT(DC)成分よりおよそ50-100倍感度が高いBm(AC)成分の気圧補正も行わなくてはならない。榛原と富津についてDT(DC)成分同様に処理して、その気圧補正を試みた。

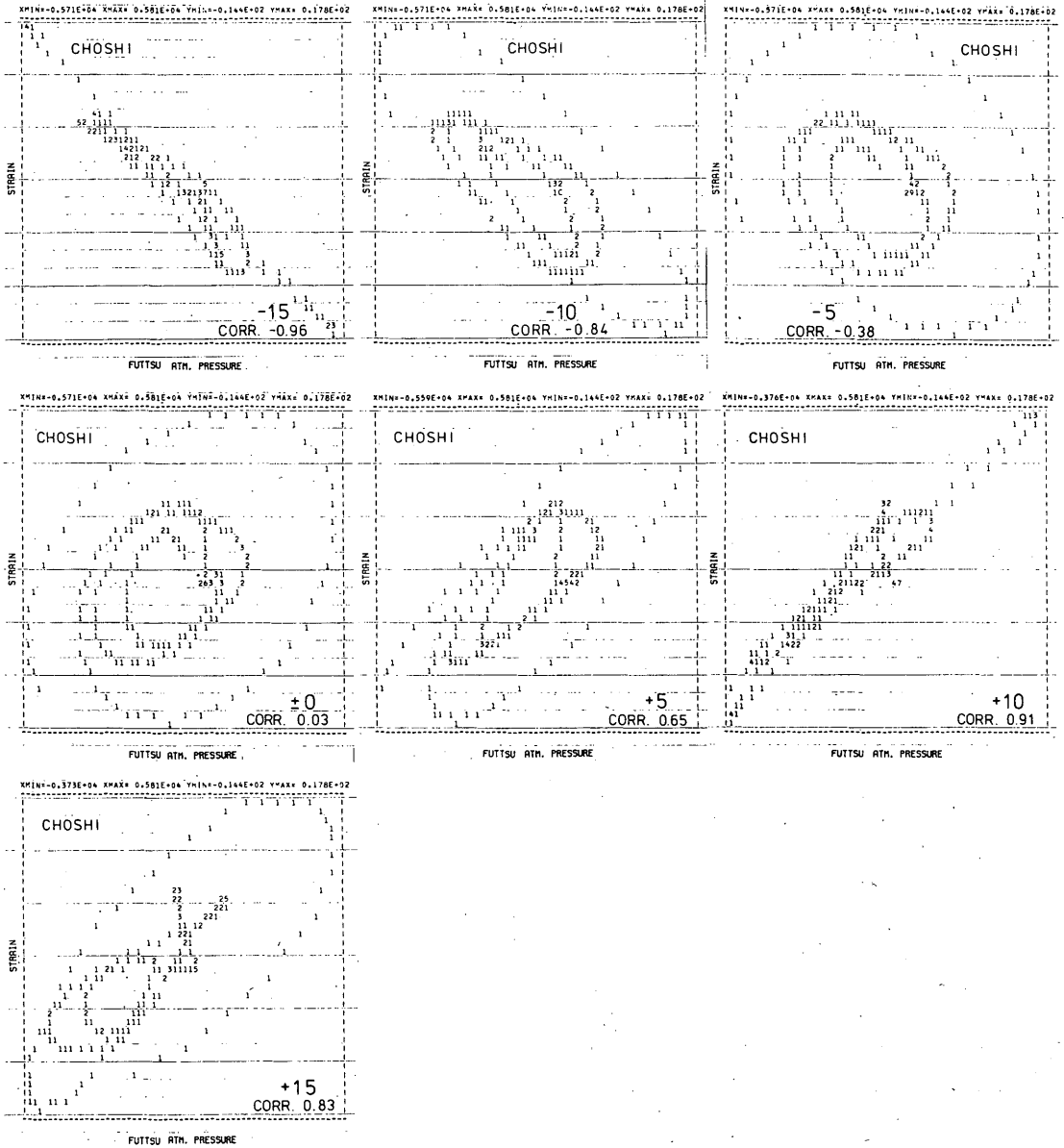


Fig. 18 The relation between strain changes at Choshi and atmospheric pressure at Futtsu with a time shift from -15 to +15 hours. The best correlation between them is seen when the atmospheric pressure is delayed 10 hours.

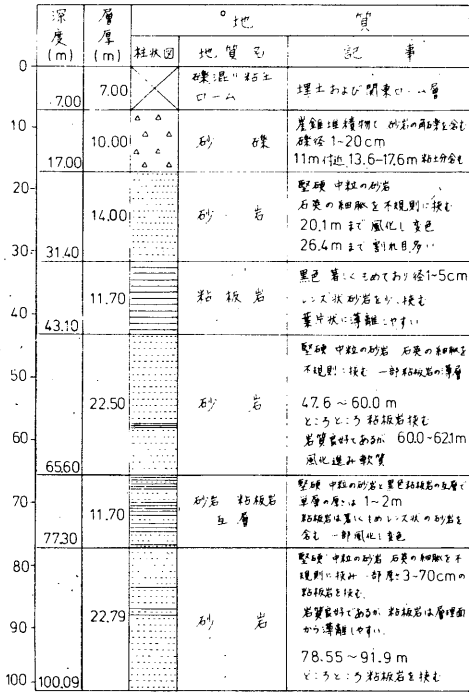


Fig. 19 The cross section of columnar illustration of the boring at Choshi.

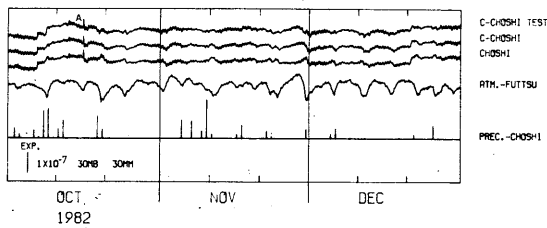


Fig. 20 Example of corrected strain changes at Choshi. (A) indicates adjusting system.
 C-C HOSHI: Corrected without time delay.
 C-C HOSHI TEST: Corrected strain changes with a delay of 10 hours.

Bm (AC) 成分の周波数特性は、前に示した Fig.2 のように約 10 秒から 25 分までの周波数帯域で平坦であるが、25 分以上の長周期帯域ではその感度を減じている (速度に比例した出力が得られるようになっている)。

はじめに、気圧と Bm (AC) 成分をいくつかの周波数帯域において、相互相関について調べてみた。調べた期間は 1982 年 1 月 1 日の 0 時から 5 時間分のデータ

を使用した。

周波数帯域	榛原 (Bm) の相関係数	富津 (AC) の相関係数
1 - 5 分	0.05	0.05
5 - 25 分	0.96	0.98
25 - 50 分	0.94	0.95
50 - 100 分	0.79	0.90

上の表のように、榛原と富津では Bm と AC のちがいはあるが、いずれも 5-25 分、25-50 分の帯域でかなり良い関係を示している。短周期成分の気圧係数としては Bm (AC) の感度特性から考えて、5-25 分の帯域のものについて求める。

5-25 分のバンドパスをとおしたあとの気圧を、歪に対して 90 秒前のものから 60 秒あとのものまで、時間をずらせて歪との相関を調べた。Fig. 21 は、1 月 1 日分の榛原と富津の 30 秒毎の時間差のものを示しているが、30 秒前の気圧との相関が最もよい。31 日分を平均すると、自局については約 20 秒前の気圧と相関がよい。ただし、これはデータ 2 個分なので、短周期成分については、ほぼリアルタイムで気圧補正を行ってよい。

また、榛原・富津以外の地点についても、榛原または富津の気圧との相関を求めてみたが、時間をかなりずらせても全く相関が認められないので、気圧補正は不可能である。その例として、榛原の気圧に対する藤枝と浜岡の歪の関係を Fig. 22 に示した。短周期成分の気圧補正を行うためには、各地点毎に気圧データが必要である。

榛原および富津について、1982 年 1 月 1 日から 31 日まで、毎日の気圧係数を求めて、相関係数が約 0.9 以上のものの算術平均を、その地点の気圧係数とした。得られた係数は、

$$\begin{aligned} \text{榛原} & 0.65 \times 10^{-8} / \text{mb} \\ \text{富津} & 1.53 \times 10^{-8} / \text{mb} \end{aligned}$$

であった。DT (DC) で求めたものに比べ、20%ほど小さい値を示した。これらの気圧係数を用いて、Bm (AC) 成分の気圧補正をしたところ、やや小さめで、DT (DC) 成分から求めた係数の方が補正結果は良かった。これは、もとの Bm (AC) 成分の感度特性が 25 分から長い方で減じているのに対し、気圧は長周期までフラットであるものに、気圧係数を求めるために使用したフィルタが、両方に均等にかけられたため、歪の応答が気圧に比べて相対的に小さく出ていると考えられる。このため、Bm (AC) 成分の補正にも、DT (DC) 成分から求めた気圧係数を用いてよい。

Fig. 23 は、気圧・歪ともにもまずドリフトを除去し

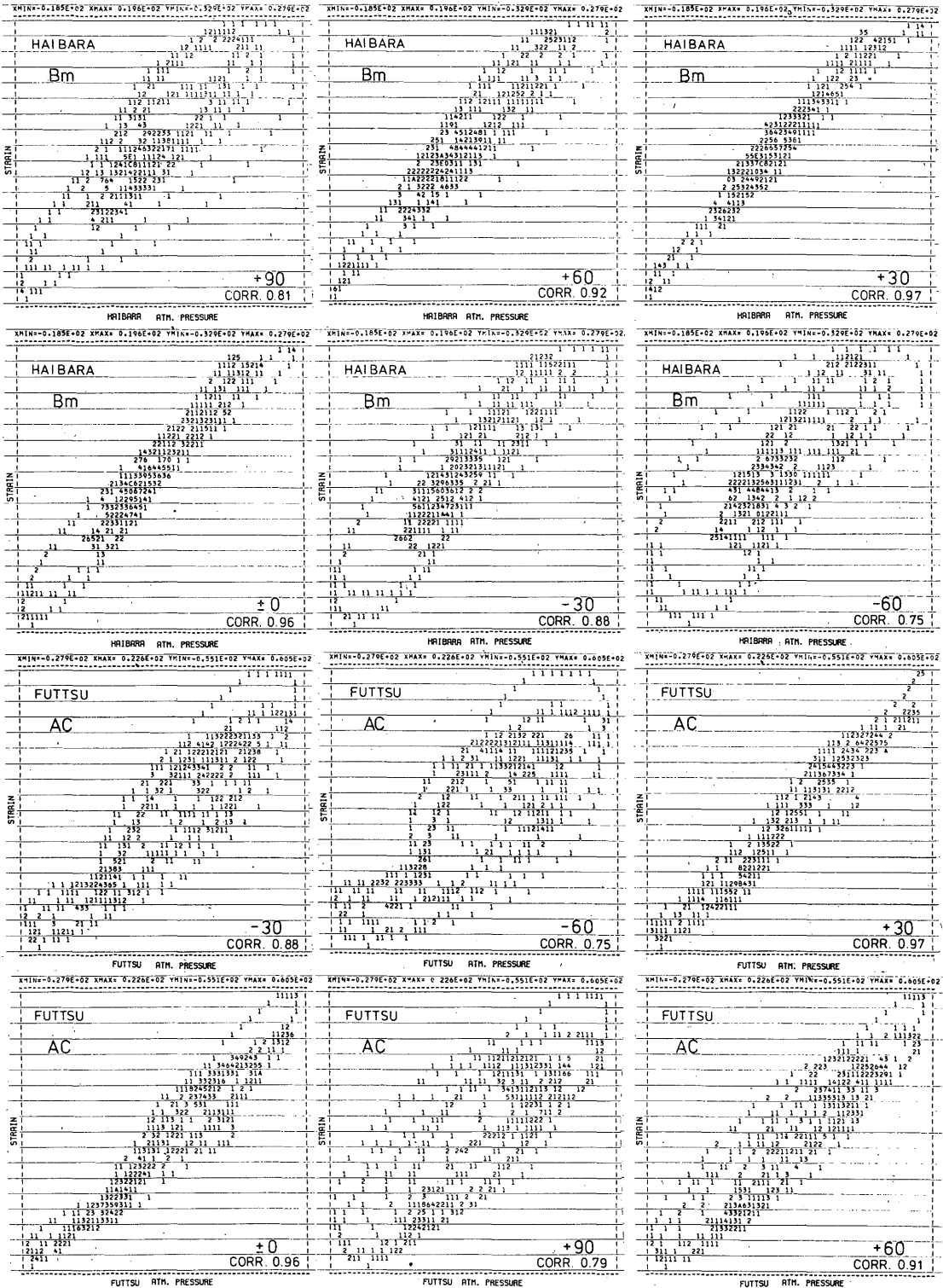


Fig. 21 Relation between atmospheric pressure and Bm(AC) component of strain changes at Haibara and Futtsu. Correlation of putting forward atmospheric pressure by 30 seconds to strain changes is best at both station.

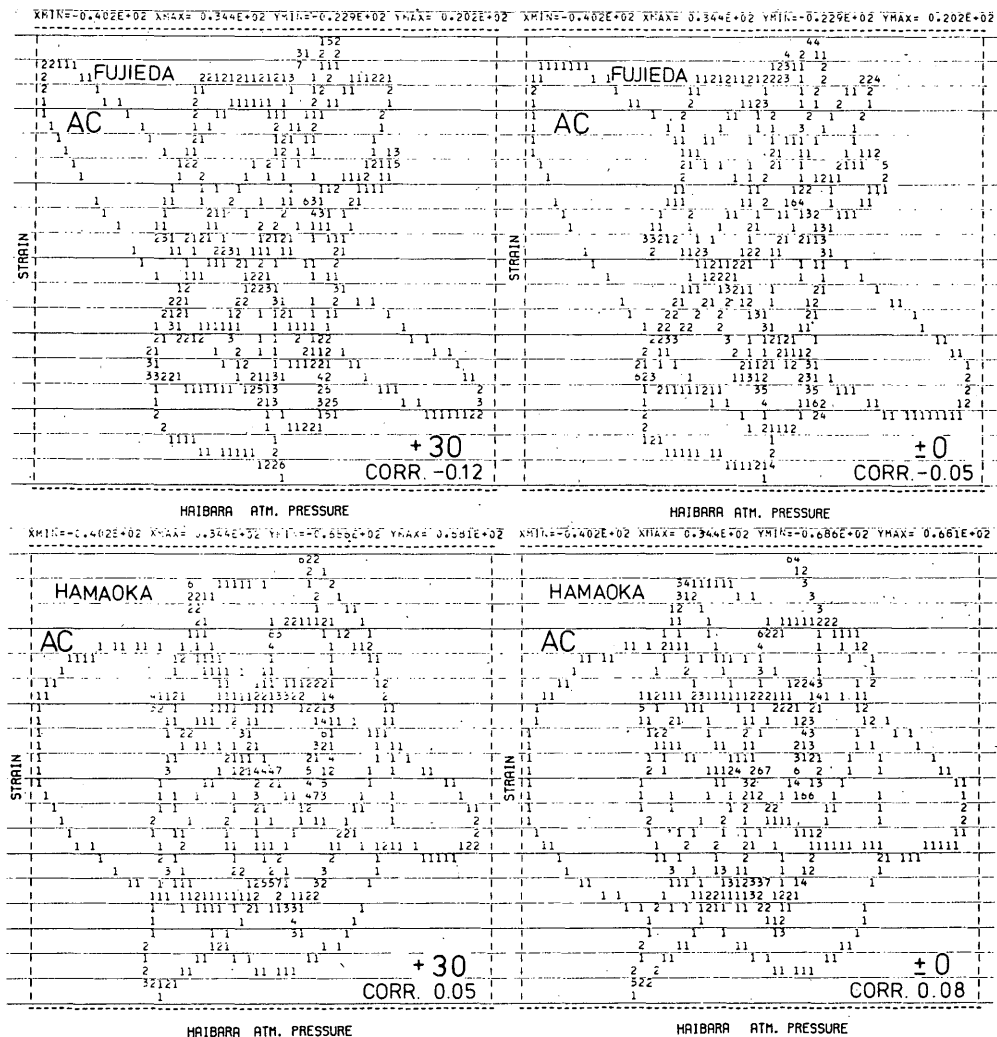


Fig. 22 Relation between strain changes of Fujieda (Hamaoka) and atmospheric pressure of Haibara shows no correlation.

のち、さらに気圧データの25分以上の長周期成分をカットして歪を補正した例である。補正結果(C-STRAIN)には、周期約1時間より長い気圧によると思われる変動は補正されているが、気圧の短周期変動が現れている。これら短周期変動も除去するため、歪は5分のハイカットフィルタを、気圧は5-25分のバンドパスフィルタをとおした後に補正をおこなった(Fig.24参照)。Fig.23に比べると、非常に良い結果が得られた。

Bm (AC)成分の気圧補正は、DT (DC)から求めた係数を用い、この方法で行うことにする。

§10 気圧係数の時間的変化

歪計の気圧に対する応答は、不変ではなく、その時の岩石の状態によって変化していることが予想される。地下水位の気圧係数が、地震の前に異常な値を示したとの報告がある(田口雄作ら, 1982)。そのために各地点の月毎の気圧係数の平均値に対する比をプロットした(Fig.25参照)。歪変化や降水による影響等によって、気圧と歪の相関が悪い月もあるので、気圧係数が正確に求められないこともあるが、気圧係数の値はかなり変動している。

気圧計が2点だけなので、各観測点における気圧変化を正確に代表していないために、気圧係数が変動しているとも考えられる。気圧係数が季節や岩石の状態によって変動しているかどうかについては、この結果

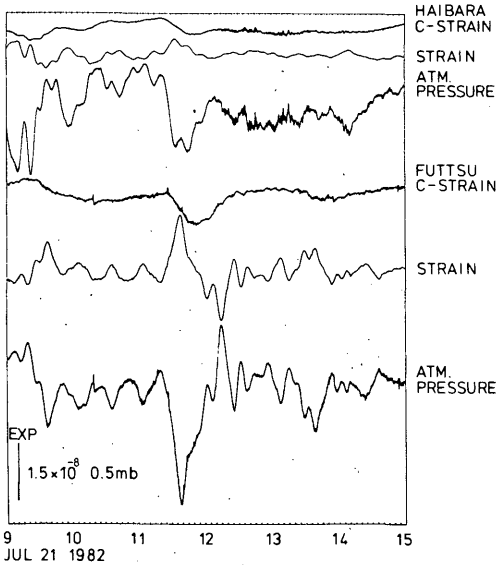


Fig. 23 Examples of corrected Bm (AC) component of strainmeter at Haibara and Futtsu. Atmospheric pressure is processed through low cut filter (25 minutes). Short period changes still remain on corrected records.

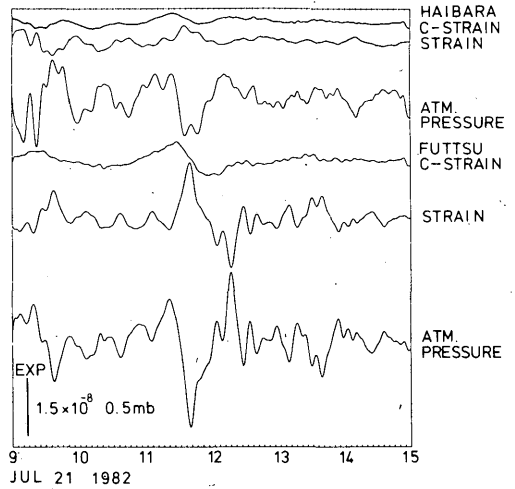


Fig. 24 Examples of corrected Bm (AC) component of strainmeter at Haibara and Futtsu. The strain changes and atmospheric pressure are processed through a band pass filter of 5 to 25 minutes. Results of correction are very effective.

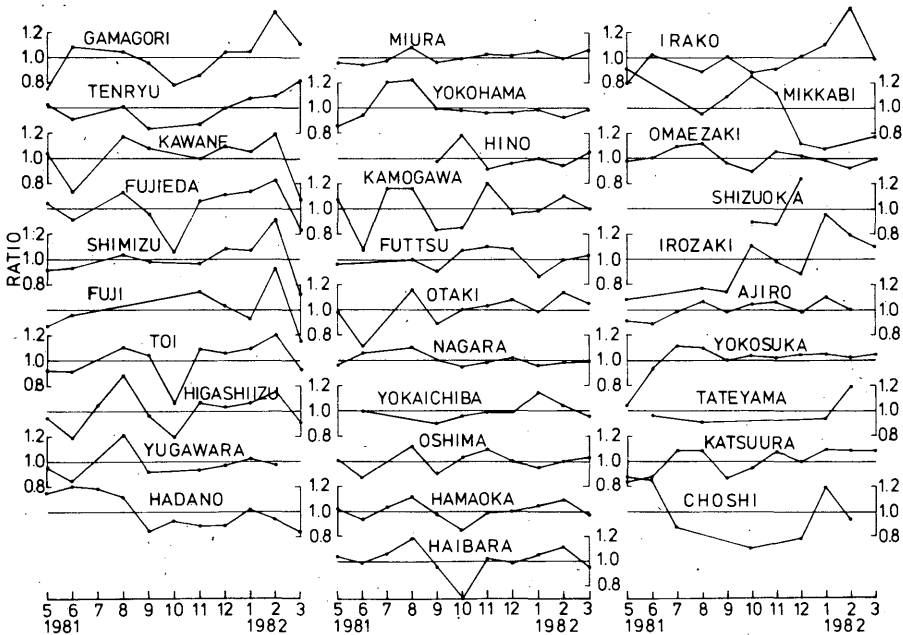


Fig. 25 Ratio of atmospheric pressure coefficient of DT (DC) component to their mean coefficients.

からは何んともいえない。

短周期成分についても、1982年1月分について毎日の係数を調べた (Fig. 26 参照)。通常、気圧係数の大きさは、平均値から±約10%の範囲にあるが、一時的に15~20%位減ずることがある。富津の1月24~25日の気圧係数の変化は顕著であるが、気圧によらない歪変化の影響があることも考えられる。その原因については、今のところ不明である。

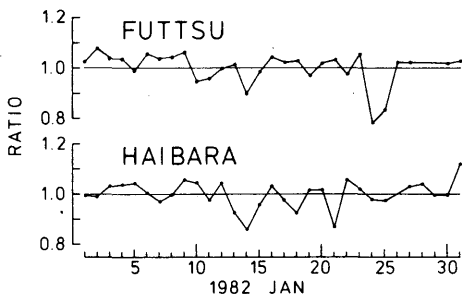


Fig. 26 Ratio of atmospheric pressure coefficient of Bm (AC) component to their mean coefficients.

§ 11 あとがき

長周期データも短周期データも、いずれも気圧補正を行うことによって、生のままではみえない歪の変化が明瞭になる。気圧補正の効果は実に大きいものがある。

しかし、その一方で、これまで降水による影響は浅く埋設した地点にだけ現われると考えられていたが、多くの地点でその影響が出ていることがわかった。今後、

降水による影響の解明をする必要がある。これまでの観測から、降水による圧力によって一時的に収縮する富津、降水の後長い期間にわたって徐々に膨張する三ヶ日、あるいは降水の後一時的に膨張する銚子など、観測点毎にそれぞれ特有の性質を持っていることがわかった。

また、静岡などのように、付近の工場が休みになって地下水くみ上げを休止すると地下水位が上がり、それが歪に影響を与えるところもある。

季節による気圧係数の変化も調査したが、今回はその点まで確認できなかった。しかし、気圧に対する歪の応答がかなり変動していることは確かであり、興味ある問題である。

いずれにしても、歪データは気圧補正を行うことにより、小さな歪変化まで明らかにすることができる。常時、気圧補正をして歪データをモニターすることが、常時監視の精度を上げるためにも重要なことである。1983年に、東海地域の15地点に気圧計を設置し、リアルタイムで短周期成分を気圧補正することは、この意味から極めて有意義である。

参考文献

- 観測部地震課 (1979) : 地殻変動連続観測と埋込式歪計 (I), 測候時報, **46**, 9-25
- 観測部地震課 (1979) 地殻変動連続観測と埋込式歪計 (III), 測候時報, **46**, 55-59
- 太田金房・吉田明夫 (1982) 地下水位と歪みとの関係, 東管技術ニュース, **67**, 56-63
- 田口雄作・高橋誠・東野徳夫 (1982) 気圧係数を指標とする地震予知, 地震学会講演予稿集, 昭和57年春季大会, 178