

伸縮計および歪ゲージによる地殻歪の研究

—多測定点石英管伸縮計と歪ゲージ歪計の開発および
鋸山地殻変動観測所における観測—

東京大学地震研究所 柳澤道夫

(平成元年11月13日受理)

要 旨

地殻歪および傾斜変化は、横坑式の地殻変動観測所において、石英管伸縮計と水管傾斜計により観測されている。千葉県富津市にある鋸山地殻変動観測所では、伸縮計をE-W, N-S および NW-SE 方向に、傾斜計を E-W, および N-S 方向にそれぞれ 25 m 長で設置し、連続観測を実施している。一方測地測量からも、地殻歪変化や地殻の上下変動が求められている。連続観測と測地測量データを比較すると、例えば松山地殻変動観測所の連続観測と四国地方の測地測量のデータのようによい一致をする場合もある。しかし、すでに報告したように、この房総半島では連続観測の結果は測地測量データと必ずしも一致していない。このことは測地測量の成果が房総半島の広域地殻変動を示しているのに対して、連続観測データは広域変動だけでなく鋸山観測所付近のかなり局地的な変動も観測していることを示すと考えられる。また、近年の報告では、歪変化量が観測坑内においても必ずしも全体にわたって一様ではないことが示されている。以上の結果を考慮して、地殻歪に関して次のように詳細な研究を行った。

(1) 歪ゲージによる地殻歪観測法を開発し、横坑内において地球潮汐歪や気圧変化による歪応答の多点連続観測を実施した。

(2) 既存の伸縮計に多数の中間観測点を増設して、上記の歪ゲージ歪計データとの比較を行った。

歪ゲージ歪計開発のための基礎実験は約4年にわたりて実施し、坑内歪測定の信頼性は十分に検証した。開発した歪計を坑内の12地点にそれぞれ2成分ずつ、計24組配置して連続観測を実施した。一方、各成分の伸縮計に12個の中間観測点を設置し、測定端点も含めて計39組の連続観測も実施した。それぞれの多測定点伸縮計データと、気圧変化をみると、観測坑内には気圧変化の影響を強く受ける部分と殆ど受けない部分がある。また坑内に多数設置した歪ゲージ歪計により、坑道の歪変化が一様でなく、場所により異なることがわかった。さらに、観測所坑内より採取した岩石サンプルを測定した弾性定数と、観測坑のある山体の地形データと坑道寸法を用いて、気圧効果による坑道の歪変化を求めるための数値実験を行い、観測結果の比較を行った。

目 次

1章 序論	163
2章 鋸山地殻変動観測所の坑内温度変化	166
2.1 坑内温度変化測定の必要性	166
2.2 高感度温度変化計の製作	167
2.3 温度変化の計測	169
2.3.1 温度変化の計測場所	169
2.3.2 年間温度差の観測結果	171

2.3.3 坑内温度連続観測と解析	173
2.3.4 热伝導による検討	175
3章 鋸山地殻変動観測所周辺の岩石の弾性定数.....	177
3.1 岩石の弾性定数の測定の必要性	177
3.2 岩石サンプル	178
3.3 弹性定数の測定	180
4章 歪ゲージによる地殻歪観測法の開発.....	183
4.1 坑内における歪ゲージ実験の可能性	183
4.2 歪ゲージの原理と選択	183
4.3 サンプル室内実験	185
4.4 接着剤の選定	186
4.5 坑内における防湿実験	187
4.6 電子回路の製作	192
4.7 データ収録方式	197
5章 歪ゲージ歪計による地殻歪の観測.....	198
5.1 鋸山観測所の観測設備配置	198
5.2 感度検定と測定値の補正	200
5.2.1 感度検定	200
5.2.2 測定値に対する補正	202
5.3 観測	204
5.3.1 観測記録例	204
5.3.2 観測データの解析	206
5.3.3 気圧効果	209
5.4 歪ゲージ歪計特有の観測例	211
5.4.1 小形低気圧の通過に伴う歪変化	211
5.4.2 地震時のステップ変化	211
6章 鋸山地殻変動観測所の溶融石英管伸縮計の多測定点化.....	215
6.1 溶融石英管伸縮計の構造と観測方式	215
6.1.1 伸縮計の概要	215
6.1.2 センサおよび記録方式	216
6.1.3 感度検定の問題点	218
6.2 多測定点伸縮計の開発	220
6.2.1 多測定点伸縮計の必要性	220
6.2.2 機械的設備と感度検定機構	221
6.2.3 電子回路とデータ収集	224
6.2.4 感度検定法	226
7章 伸縮計による地殻歪の観測および歪ゲージ歪計による観測結果との比較	228
7.1 伸縮計観測の概要	228
7.2 観測	231
7.2.1 観測記録例	231
7.2.2 観測データの解析	232
7.3 観測結果の検討	234
7.3.1 気圧効果	234
7.3.2 潮汐成分	236
7.4 歪ゲージ歪計と伸縮計の観測との比較	239
7.4.1 気圧効果	239
7.4.2 潮汐成分	242
8章 坑道変形の境界要素法による解析.....	244
8.1 2次元境界要素法による解析	244
8.1.1 解析の目的	244
8.1.2 境界要素法	245
8.2 気圧効果における坑道変形2次元解析	245

8.2.1 地表面が平坦なときの坑道変形	245
8.2.2 地表面が傾斜しているときの坑道変形	249
8.3 地形データによる坑内歪の計算	251
8.3.1 歪ゲージ歪計の観測地点に対応する坑内歪の計算	251
8.3.2 多測定点伸縮計に対応する坑内歪の計算	254
9 章 気圧効果の観測値と計算値の比較および潮汐成分の異常	258
9.1 歪ゲージ歪計による観測値と計算値の比較	258
9.2 多測定点伸縮計による観測値と計算値の比較	260
9.2.1 気圧効果	260
9.2.2 観測による気圧効果と潮汐成分の異常	263
9.3 観測値と計算値の不一致性の解釈	263
10章 結論	266
謝辞	271
参考文献	272

1章 序論

地殻変動の連続観測が地震予知の有力な手段として明確に位置づけられたのは、1962年に提出された通称ブループリント（坪井ほか、1962）と呼ばれている“地震予知一現状とその推進計画”である。このなかで地殻変動の連続観測のため必要な設備として、水平振子傾斜計、水管傾斜計、水晶管伸縮計の3種の計器の併設を提言している。水平振子傾斜計はそのドリフトの不安定性から、連続記録が可能な水管傾斜計に次第に置き換えられ、今ではその使命が終わったかの感がある。水管傾斜計は開設当時から完成までの歴史を山田（1973）がまとめているが、その後は連続記録化への努力を除いて、ほぼ完成されたものとして今日に至っている。これに対して水晶管伸縮計は原理的には開設当時と大幅な変化はなく、そのセンサ部分とデータ収録部分のみが現代のエレクトロニクスの進歩とともに大幅に改変されただけである。このように最近の地殻変動観測所では通常、水管傾斜計と石英（または水晶）管伸縮計の2種の計測器による観測がなされている。

鋸山地殻変動観測所は1959年から上記の連続観測用の設備を持って稼働を始めた。開設以来の観測データの集積状況については柳沢（1983）が詳細にまとめている。現在の定常観測は水管傾斜計（長さ 25 m, E-W と N-S の2成分）、溶融石英管伸縮計（長さ 25 m, E-W, N-S と NW-SE の3成分）によって行われている。

鋸山観測所の水管傾斜計には良質の花崗岩の台石上に、水面高をマイクロメータの目盛りから目視により読み取る読み取り型水管傾斜計（山田、1973）と連続記録ができるフロート型水管傾斜計（地震研究所・技術部、1973）の二種類がある。読み取り型水管傾斜計は傾斜観測用の計器としては極めて高い安定を長期間保持することが可能である。長期安能性を有することから、1959～1985年の長期にわたる鋸山観測所の読み取り型水管傾斜計観測の結果と、房総半島における水準測量との対比を行なうことができている（萩原ほか、1986）。しかし、観測者が観測坑内において読み取る必要がある。入坑せずに観測ができるリモート化または自動読み取り化が試みられているが現在のところ困難な状況にある。一方、フロート型水管傾斜計の役割は連続記録にあり、読み取り型計測データの補間をほぼ満足に行なうことができる。

現在鋸山観測所に設置してある溶融石英管伸縮計は1977年に全面改修されたもので、富士川観測所の伸縮計（岡田ほか, 1975）とほとんど同型が設置されている。伸縮計の主な全面改修点は、標準尺の管径を従来の7 mm のものより太い25 mm とし、その標準尺の保持方法がローラから二重倒立振子と変更され、変位の測定用のトランスデューサとして磁気センサを採用して現在に至っている。改修直後からしばらくの期間には、変位測定用のトランスデューサがしばしば変更されてきたが、磁気センサを採用して以来、最近の10年になってようやく観測結果が連続的に発表できるようになった。しかし、磁気センサは感度の変化が大きく、その補正がないまま観測データを発表することはできない。比較的長期の補正済データは最近になって公表されている（地震研究所・油壺・鋸山地殻変動観測所, 1980; 地震研究所・地殻変動研究室, 1986）。

地殻変動の連続観測には、二つの大きな問題がある。その一つは地殻変動の連続観測と建設省国土地理院などの測地測量との比較がなかなか一致しないことである。傾斜観測と水準測量のデータが相互によく合う例として、松山観測所の傾斜観測（1949～1982年）と、四国地方の水準測量（1893～1978年間で6回）の比較がある（柳沢, 1983b）。しかし、鋸山観測所の場合はE-W成分については比較的よく合うが、N-S成分は傾斜観測と水準測量との間では変動のセンスがむしろ逆になっている（萩原ほか, 1986）。また、新潟県にある地震研究所の間瀬・弥彦観測所の場合は、傾斜観測と水準測量データの相関関係に調和性は認められない（若杉・柳沢, 1985）。伸縮計による観測結果と三角・光波測量との関係を述べたものには志知（1972）、笠原（1972）などがある。このなかで、油壺観測所の伸縮計データと三浦半島における三角測量から求めた主歪データは比較的に調和性がみられるとしている。このように、測地測量と連続観測が同一的な結論を出すことは困難と云わざるを得ない。このような観測項目の違いによるデータの不統一性は観測所の置かれた地域に固有なものであり、その主な原因として地殻構造の不均一性、つまりブロック構造が想定される。

第二の問題として取り上げなければならないことは、地殻変動の連続観測におけるノイズである。最近の地殻変動観測は観測機器の改良により高感度になっている。このため降水、気圧変化、気温変化などの気象に関係するもののほか、振動や海洋の潮位など様々な外的要因が観測結果に影響している。とくに、地殻変動連続観測により地震の前兆現象を捕えようとするときに、これらのノイズ源は大きい障害になりうる。一例として宇佐美臨時観測点における降水の影響をあげることができる（柳沢, 1980）。地震の前兆と思われる時期に降水による地下水位変化が重なって前兆的地殻傾斜変化があったとしてもその検出に困難があった。海洋潮汐による荷重によって地殻の傾斜変化を起こした例として油壺観測所における観測結果（柳沢, 1982）、地震津波の荷重による地殻の傾斜と伸縮変化の例として弥彦観測所における観測結果がある（柳沢・若杉, 1984）。このように、海岸近くにある地殻変動観測所は海洋の影響を受けている。これらの例は原因が判明しているために問題がないが、問題は原因不明のノイズである。気圧変化や降水による傾斜・歪変化の地殻のレスポンスにはメカニズムに不明な点が多い。地殻のブロック構造を仮定しなければ理解できない現象であると思われる。

このように地殻変動を観測する立場から云えば、大は測地測量と地殻変動の連続観測の

対比から、小は観測坑内の観測に対するノイズまで、地殻構造のブロック構造を考慮しなければ解決されない地殻変動観測上の問題がある。筆者はこの問題について直接精密かつ高密度の観測によって解決のいと口を得たいと考えている。勿論観測によって得られる観測坑の歪分布やブロックの状態は観測所固有の部分が大きいと思われるが、幾つかの観測所において同様な試みを重ねることができるならば、必ずやこの問題の一般的な解決のいと口になると考える。

このため先ず観測坑道の微細な変形とその歪変化を計測することとした。なるべく小寸法の歪センサが必要であるため、新たに抵抗型ストレンジージをセンサとした歪計を開発することにする（柳沢、1984）。その目標は

- a) 坑道観測に用いられている従来の伸縮計より小形であること、
- b) 従来の伸縮計と精度の点で遜色がないこと、
- c) ドリフトはできるだけ小さいこと、
- d) 将来ボアホール型にも転用可能であること、
- e) 計器の寿命の目標は当面10年とすること、
- f) 電子回路部品に特殊なものは使用しないこと、

などを考慮することにした。a) 小形であることは観測坑における歪の詳細な分布を計測のため、将来多数の観測点を展開しようとするときにも大変有利である。b) 感度は $10^{-9} \sim 10^{-10}$ strain より高いことが必要であり、かつ安定であることが必要である。c) 可能ならばドリフトが 10^{-7} strain/year 以下であることが望ましい。

このような目標をもとに開発した歪ゲージ歪計を用いて、鋸山観測所の観測坑内の複数の観測地点においてテスト観測を開始した。その結果、各観測点の観測データを見ると、気圧変化の影響が予想をはるかに越えて非常に大きいことがわかつってきた（柳沢、1986）。この原因の究明のため境界要素法を用いて2次元歪分布の理論計算を行ったところ、観測坑周辺の地形が気圧変化のレスポンスに非常に大きく影響していることが予想された（柳沢、1987a）。歪ゲージ歪計のセンサ部分が坑道壁に接着されていることも関係するかもしれないが、その観測値は既設の伸縮計の観測値と比較してあまりにも異なっていることが問題になった（柳沢、1987b）。このことは観測坑が空洞になっていること、歪ゲージ歪計と伸縮計の測定器としての有効な測定寸法が異なるために生じるレスポンスの違いに、地形などの効果も加わって複雑な影響を受けるためと考えられる。地球潮汐を観測から求めるときにもこのことは大きな問題となる（BLAIR, 1977）。さらに観測坑付近の地殻の弾性定数が一様でないことにも原因があろう。このような場合に、測定対象になる地殻の弾性定数の分布が測定値に大きな変動を与える（BILHAM, 1973）。

本格的な観測に先だって、テスト的に複数の歪ゲージ歪計による坑内観測を行ったところ、坑内における気圧変化に原因する歪分布がまったく一様でないことがわかつた。この非一様性が歪計の感度の不統一に起因すると考えるとにはあまりにも気圧との対応がよすぎるので、これに対して、長さ 25 m の伸縮計による坑内の歪は、気圧の変化に対して明瞭な応答を示していない（柳沢、1988）。つまり気圧変化の応答に関しては、歪ゲージ歪計は伸縮計とまったく異なる挙動を示す。この問題を解明するために、一つの成分の伸縮計に13個もの多数のセンサを等間隔に取り付けて、細部にわたる観測を実行することにする。も

しこれ等の比較観測の結果、歪ゲージ歪計の観測値が伸縮計の観測値にかなり近づいてくることがあれば、地盤構造のブロック構造が実証されることになる。観測坑内部の地盤のブロック的構造を実証することを目標にしながら、以下各章に説明する実験を遂行する。

本論文においては以下に述べる順に説明する。2章において観測坑内の温度の年変化と坑内におけるその空間分布の概略を述べる。坑内の観測機器に与える外部温度変化の影響は極力少ないことが望ましいし、これが測定の限界を決める要素となることがしばしばである。また、坑内温度の変化の測定は高精度観測に最も基本的な資料といえる。温度計測に使用するための高感度サーミスタ温度計の製作と観測結果および熱伝導による検討を2章において実施する。3章においては鋸山観測所の坑内より採取した相互に異なる3種の岩石の弾性定数を決めるところにする。岩石の採集にあたっては経験的に硬さの異なるものを選択することにする。弾性定数の非一様性もまた地盤構造のブロック構造の有力な傍証である。また得られた弾性定数は後に理論計算を行う場合に使用することにしたい。

4章においては歪ゲージの開発とそれに用いた地殻歪の観測方法について述べる。まず、開発前の予備的な室内実験、観測坑内の実験について説明する。この目的に適合する歪ゲージの選択過程、接着剤の選定状況などについても触れる。これら一連の実験のなかで、最大の難関であった観測坑内における防湿方法の決定に至るまでの経過を記述とともに、電子回路の開発とデータ収録について述べる。5章は歪ゲージ歪計を使用した観測坑内における多地点観測について説明する。まず感度検定の方法と坑内における実際の感度変化の様子を示し、その補正について述べることとする。また、約1年余にわたって行った観測データをもとにして、気圧変化と地殻潮汐の坑内における分布を調査する。

6章においては歪ゲージ歪計の観測と比較するため、常設の伸縮計の設備について説明する。これらの比較観測結果から、両者の観測値の間には開きがあることが十分に予想されるため、伸縮計に多数のセンサを増設することにより、不一致の原因を調査することとする。ここではその増設の内容と感度検定法を説明する。7章において伸縮計と多測定点伸縮計の観測結果をまとめる。そして歪ゲージ歪計と多測定点伸縮計のデータの相互の関係を説明する。次いで、8章においては2次元境界要素法により歪分布の理論計算を行う。このとき観測所周辺の地形データと3章において測定された弾性定数を使用する。そして9章において歪ゲージ歪計と多測定点伸縮計の観測結果について議論を行う予定である。歪ゲージ歪計と多測定点伸縮計による精密観測をもとに、鋸山地殻変動観測所付近の地殻歪のブロック構造について明らかにする。

2章 鋸山地殻変動観測所の坑内温度変化

2.1 坑内温度変化測定の必要性

地殻変動観測用の傾斜計や伸縮計などの計測器類は観測坑内あるいはボアホールに設置して計測を行う。その理由は機器が設置される場所の環境条件の安定化を図るためにある。とくに、観測坑内の温度変化の影響は機器に与える誤差の最大の原因である。例えば、伸縮計で地殻の伸縮変化の測定を行うとき、溶融石英管製の標準尺の温度変化が問題となる。いま、溶融石英の線膨張係数が 0.5×10^{-6} であり、このときの周囲の温度変化が

$1 \times 10^{-8}^{\circ}\text{C}$ あるとすると、測定のできる歪量の限界は 0.5×10^{-9} となる。この値は振動とかトランスデューサの電子雑音を無視した理想的な場合であり、温度変化の $1 \times 10^{-8}^{\circ}\text{C}$ という制限もかなりの容積をもった観測坑内においては、必ずしも容易に達せられる値ではない。実は現在までに、地殻変動観測のための観測坑内における温度変化の計測結果はほとんど発表されていない。もし発表されたとしても、観測坑ごとに温度変化は独自の値を示すと思われる所以、詳細な部分についてはそのまま参考にすることはできない。これは観測坑ごとに土被りの厚さや岩質も異っているし、坑口の断熱効果も異なつてゐるためである。このことからも地殻変動観測の基礎的資料として観測坑内の温度変化の計測がぜひとも必要なことがわかる。

観測坑内の温度擾乱の熱源として、太陽からの熱輻射が考えられる。鋸山観測所の場所が地熱地帯でないことを考慮するならば、地球内部よりの熱伝導は無視しても差し支えない。観測坑が地中深く位置せず地表面に極めて近いため、太陽からの熱輻射は地表面の岩石を温めるだけでなく、その影響が観測坑内に浸みこむ可能性は十分に考えられる。なお最近、観測坑においては多数の熱源をもつた電子機器が動作しているが、その発生する熱量は極めて少なくまた一定であると仮定して、本論文においてはその影響を無視することとする。

以上述べたように、観測坑内における温度変化の最も大きい原因は地表面からの熱流量の変化である。このほかに観測坑の入口の扉と扉の相互間、最終扉と坑内それぞれの空気層の対流または伝導による熱流量の変化があるものと考えられる。このように太陽の熱輻射量の季節的变化が温度変化のうち最大のものであり、そのうち振幅が大きいのは、1年、 $1/2$ 年および $1/3$ 年などの周期が考えられる。また、1日周期については、変化の周期が極めて短いので、地層内で大きく減衰をうけ検出はほとんどできない。実際に、鋸山観測所の坑内で、分解能 $1/1000^{\circ}\text{C}$ の水晶温度計を使用して温度の日変化の計測を行ったが、明瞭に検出できなかった。

現実に地殻変動を観測するときは、これまで論議してきた時間変化だけでなく、その温度の空間分布も大きな問題である。実際の傾斜計や伸縮計では坑内において数十メートル離れた2点間において測定が行われることが多い。このため、2点間の温度差および温度勾配のみならず、また2点間の温度変化の位相差も考慮しなくてはならない。この章においては、柳沢(1973)にもとづき、坑内温度の時間変化およびその空間分布についても調べることにする。このほかに、観測者の入坑等による坑内温度変化についても言及することにしたい。

2.2 高感度温度変化計の製作

観測坑内の温度変化の測定のために、感部の寸法がなるべく小さく、信頼性も高い温度計測専用のサーミスタを用いて、温度変化計を製作する。製作にあたって特に配慮した点は、電子回路からの発熱量をなるべく微量にし、かつ一定にすること、および使用する電子部品の信頼性を考慮したことなどである。この温度変化計の回路を Fig. 2.1 に、また外観の写真を Fig. 2.2 に示す。温度変化計を設計するためには、鋸山観測所の坑内温度の平均値が必要である。鋸山観測所の坑内温度は過去に棒状水銀温度計により数多く計測

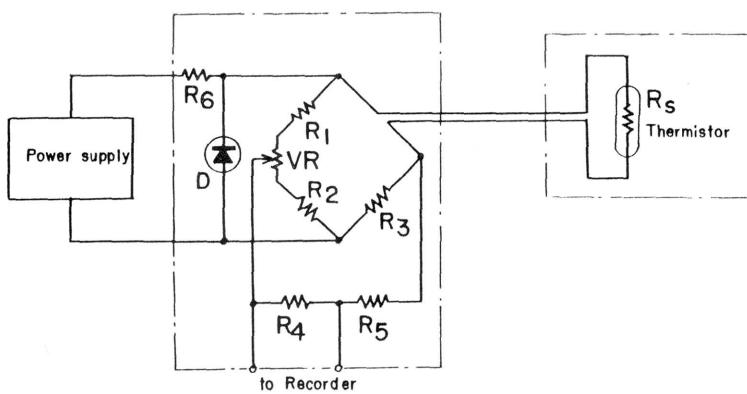


Fig. 2.1. Circuit for temperature measurements.

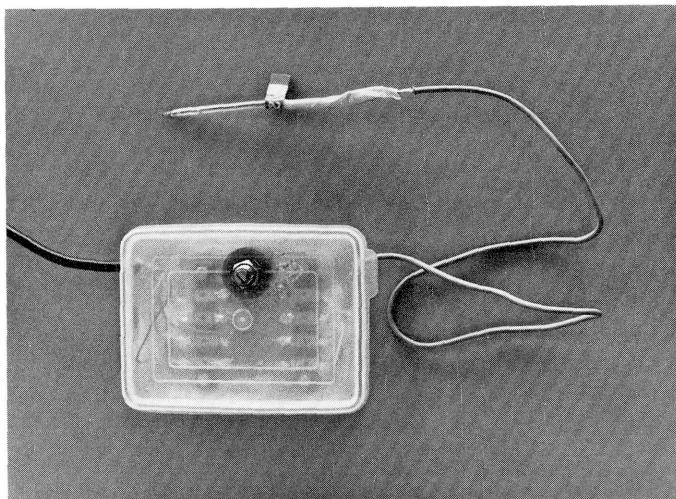


Fig. 2.2. Photograph of a thermister thermometer.

されていて、 $15.1\sim15.6^{\circ}\text{C}$ 程度であることが知られていた。この坑内の温度変化の平均値を 15.4°C と仮定して温度計を設計することにする。

この温度計の設計と製作手順を簡単に説明する。まず、精密恒温槽を用いて、購入したサーミスタの温度対抵抗特性を測定する。このとき恒温槽の温度の安定度 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 以内、恒温槽内の温度勾配 0.1°C 以下という性能のものを使用する。サーミスタの抵抗は電流値と放熱状況に依存して変化するもので、実際の観測となるべく同様な条件下でテストすることが必要である。坑内温度の平均値 15.4°C におけるサーミスタの抵抗値を R_s とすると、それは Fig. 2.1 の抵抗 R_3 に対応するため $R_3=R_s$ となる。そのほかの抵抗については、 $R_1=R_2=2\text{ K}\Omega$, $R_4+R_5\geq 50\text{ K}\Omega$ と選ぶ。VR は零位置の調整用で 100Ω のものを用い、 R_6 と D (温度補償型定電圧ダイオード) によって電源電圧の安定化をはか

っている。電源は $12V \pm 0.1\%$ のものを使用することにした。実際に使用した部品はサーミスタが BT-23(NEC), 定電圧ダイオードは 1S-214 (東芝), 抵抗器は金属皮膜型のものを用いる。記録はすべて打点式記録計 (フルスケール感度 0~10 mV) で行うこととする。

製作した温度計は高感度であり、すべての部品は温度特性を有するため、製作された温度計をプラスチック製の箱に入れ、全体を恒温槽の中に入れて感度検定を行なわなければならない。さらに、恒温槽の中は温度勾配をなくすために換気扇を用いて空気を攪拌しているから、サーミスタ部分と電気回路を納めたプラスチックの箱をさらにタオル状の布切れで厚く包み、精密恒温槽の中に納めて温度変化計の校正を行う。精密恒温槽内の温度勾配を少なくするため、槽内の空気をたえず循環させているので、ほとんど静止に近い空気中で計測する実際の場合と比べて温度計の校正方法は必ずしも適当な方法であるとはいえないかもしない。このような場合の校正法としては、実際の観測坑内で標準温度計を使用し、観測者が近づかないような方法を探るべきで、その場合には絶対値で標準温度計の限界精度 0.03°C まで信頼できる。しかし、このような校正法は観測者のたびたびの入坑により実際には困難があるので、絶対値を測定することを断念し、温度変化分だけを検出することにする。このようにして校正された温度変化計の記録紙上での感度は、 $3.3 \sim 5.6 \times 10^{-3}^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ である。また、半導体サーミスタを温度の検出部として使用したため、長期間にわたるドリフトの存在が予想されるが、この点については後節の観測結果の処理のところで述べることにする。

2.3 温度変化の計測

2.3.1 温度変化の計測場所

Fig. 2.3 に鋸山観測所の坑道とその周辺の地形を示す。これによると観測坑は東西に

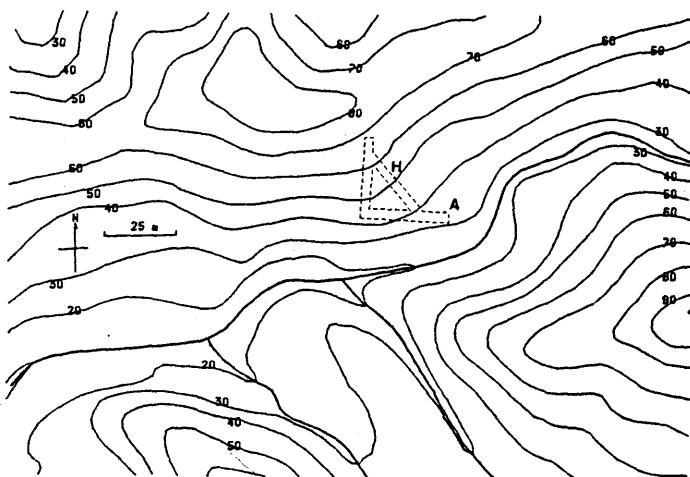


Fig. 2.3. Location map of the Nokogiriyama Crustal Movement Observatory with contour lines of topography (in meters). Secular changes in temperature are observed at A and H.

発達した尾根の南斜面に掘削されている。観測坑のすぐ南側を流れている谷川は観測坑の東側で流路が屈曲している。N-S 坑道は東西に発達した尾根とほぼ直角に掘削されていて、N-S 坑道の南端から北端にかけて土被りの増加が著しく、地形表面は坑道断面に対して東側が幾分下がっている。E-W 坑道は東西の尾根にほぼ平行しているが、その土被りは3本の坑道のなかで最も深い。そのうえ坑道の東端では、ほぼ東西に流れている谷川が北に湾曲するため、この影響を受けて極端に土被りが浅くなっていることがわかる。地形の影響のため NW-SE 坑道も N-S 坑道と同じく南端から北端にかけて土被りが増加するが、増加の傾向は N-S 坑道の場合より緩やかである。

サーミスタ温度変化計は全部で15個製作し、そのうち1個は外気温測定に用い、残りの14個は観測坑平面図 Fig. 2.4 に示すように配置する。図中で○をつけた数字または記号は温度計の置かれた地点とその番号を表わしている。①～⑫は観測坑内の温度変化の空間分布を調べるためにあり、測定場所としてはとくに N-S 坑道に重点をおいている。同一地点に温度計が2個置かれている場所があるが、これは下記に示すように空気中・地中および計器中の三種類に分けられる。

空気中 ①, ②, ④, ⑦, ⑧, ⑨, ⑩, ⑪ および ⑫

地 中 ⑤ および ⑥

計器中 ③

ここで空気中とは観測坑道の側壁に床上から約 1.5 m の場所であり、地中とは坑道の床上から直径 10 cm で深さ 30 cm の垂直孔の中に入れて蓋がしてあり、また計器中とは伸縮計を覆った発泡スチロール箱の中の石英管に近接して設置したものである。⑨の近く

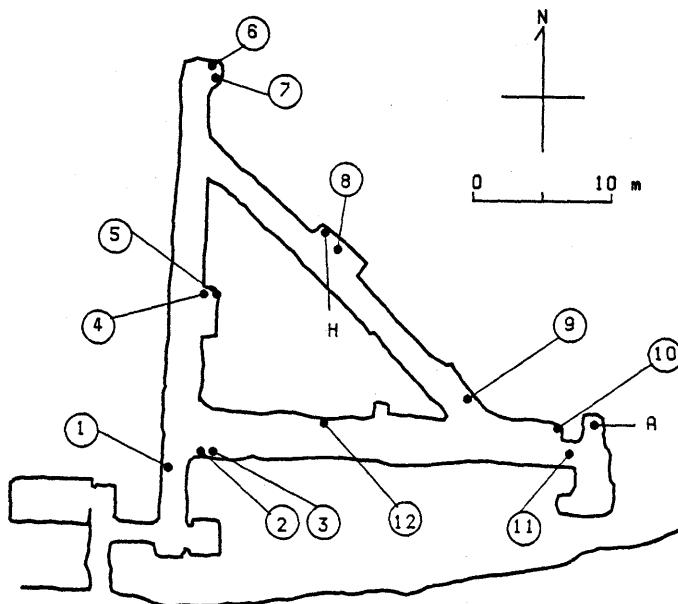


Fig. 2.4. Plan of the Nokogiriyama Crustal Movement Observatory.
A, and H, and ①～⑫ indicate thermometer observation sites.

には基準温度計として確度 $\pm 0.03^{\circ}\text{C}$ の水銀寒暖計をあわせて置いてある。

Fig. 2.4 中の A 点および H 点においては、温度変化の年周項などを、とくに長期にわたって観測を行うことにした。Fig. 2.4 において注目されることは、A 点の小部屋の近くに非常用の脱出口が設置されており、この部分の土被りの厚さがわずか 2 m ほどしかないことである。この部分からの熱の流入によって A 点付近の温度が大きく変化することが予想される。サーミスタは 500 cm³ の茶色の薬用瓶にいれて熱フィルタとし、電子回路部分は熱フィルタを兼ねてプラスチック製の密閉箱の中にいれて、床上数 cm の所に置くこととする。

このほかに外気温の測定用としてこれと同様のサーミスタ温度計も設置する。Fig. 2.3 からもわかるように、観測坑の付近は狭い谷地形で、温度計の設置のための適当な場所がなく、やむを得ず観測坑から約 150 m 離れた観測所の庁舎の隣にある井戸小屋中の地上高さ約 2 m の場所に外気用温度計を取り付けることとする。この井戸小屋は通風の点では問題がない。

2.3.2 年間温度差の観測結果

温度変化計を設置した①～⑫の地点で行われた温度変化の空間分布の計測は1972年3月～1973年7月までの16ヶ月間にわたって行われた（山田ほか、1974）。記録をプロットし

Table 2.1. Temperature differences and annual temperature changes.

Observation point No.	Annual temperature difference ($^{\circ}\text{C}$)	Temperature		Remarks
		Lowest date	Highest date	
1	0.44	June 28, '72	Jan. 9, '73	A
2	0.56	Aug. 14, "	Dec. 15, '72?	A
3	0.44	July 17, "	Jan. 15, '73	S
4	0.30	JULY 29, "	Jan. 31, "	A
5	0.24	Aug. 6, "	Feb. 6, "	R
6	0.19	Aug. 4, "	Feb. 24, "	R
7	0.21	July 24, "	Jan. 31, "	A
8	0.30	Aug. 8, "	Feb. 14, "	A
9	0.55	July 4, "	Jan. 4, "	A
10	0.43	July 19, "	Dec. 20, '72	A
11	0.58	June 20, "	Dec. 23, "	A
12	0.38	July 27, "	Jan. 26, '73	A

Remarks A : air temperature in the tunnel.

S : temperature beside the extensometer.

R : rock temperature.

てこれから平均値を求め、この曲線から最高温度を決める。この最高温度と最低温度の差を年間温度差とする。このようにして①～⑫地点について得られた温度データをTable 2.1に示す。

このTable 2.1をみると平面図上の同じ地点に置いた空気中（点④および⑦）と地中（点⑤および⑥）の年間温度差は、地中温度のほうが20%程度数値が小さく、最高および最低温度日も7～20日の遅れがみられる。同じ地点での空気中の②と計器内部③との比較については、年間温度差の方は比較的よく合っているものの、最高および最低温度日の到来に関しては点②がやや異常である。この原因は点②の記録があまり良好でないためで、近くにある点①により付近の温度特性を代表したほうが適当と思われる。

つぎに地形図Fig. 2.3および坑道の平面図Fig. 2.4を参考にして、坑口に比較的近い点②と点③および、N-S坑道最奥の最も土被りの厚い⑥と⑦の温度特性を比較する、この間の距離は約27mあり、坑道奥の空気温度および地中温度の温度差はともに入口の1/2以下で、最高および最低温度日も20日程遅れている。E-W坑道については、土被りが比較的同じ厚さであるためか、温度差が0.44～0.55°Cと変化が少ないので、最高および最低温度日についても差が少ない。これをFig. 2.5中に同時に図示する。実際は地中温度、点線は空気中温度の年間温度差を示す。図をみると年間温度差線は地形高度センターとかなり似ているように見受けられる。

鋸山観測所坑内の主計器である石英管伸縮計は発泡スチロールなどの断熱材で覆い熱的に周囲と絶縁してあるが、観測のため入坑するとパルス状の擾乱が記録の上に現われることを長年経験してきた。この擾乱は歪に換算して 10^{-8} 程度に達するが、主として人体からの輻射によるものと考えられる。Fig. 2.6はこの観測所の主計器の一つである読取型

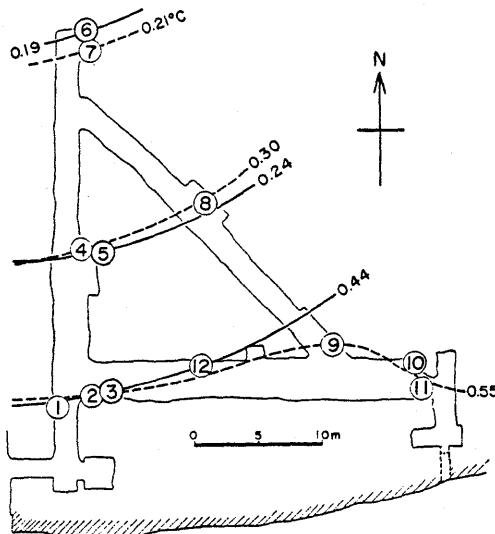


Fig. 2.5. Plan of the tunnel and location of thermometers.
Solid and broken lines denote annual changes in rock
temperature and air temperature, respectively.

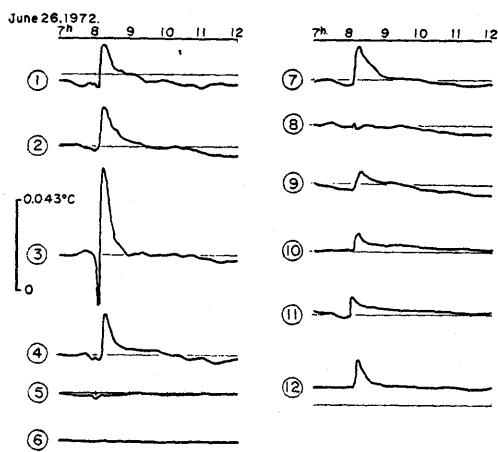


Fig. 2.6. Short-period temperature changes caused by an observer's patrol in the observation tunnel.

水管傾斜計の読み取りのための入坑時の平均的な記録の一例である。とくに②⑦⑪点は観測者が一時停留して読み取りを行うため、より影響が大きいことがわかる。温度上昇に先だって一時的に温度の低下が見られるものがあるが、それは擾乱によって低温の空気の影響を受けたものと考えられる。ここで問題になるのは伸縮計の石英管の近くに置かれた③点の変化が意外に大きいことである。これは断熱材の発泡スチロールがこのような場合に十分に役立っていないのではないかと考えられる。また Fig. 2.6 を見ると、僅か $0.02 \sim 0.03^{\circ}\text{C}$ 程度の温度変化を与えただけなのに旧に復するのに 1.5~2 時間も要し、さらに 0.18°C の変化に対しては 15~16 時間も必要なことがわかる。このように僅かと思われるような温度変化でも観測上甚大な影響があることを知って置く必要がある。不必要的入坑はできるかぎり避けるべきであろう。

2.3.3 坑内温度連続観測と解析

観測点 A 点および H 点で行なわれたより精密な温度の年周変化の観測は1971年4月～1973年3月までの約2年間実施された。記録紙上より0時～23時までの毎正時の値を読み取り、24個の平均をとってその観測値とした。坑内での観測値は日変化がほとんど検出できず、1日1回の読み取り値を用いても大きな差を生じない程度である。これを5日ごとにまとめて平均し、その値をプロットして Fig. 2.7 に示す。実際の解析には日平均値を使用した。

観測結果をみると、A 点のデータはドリフトが少なく良好である。しかし、H 点のデータには明瞭なドリフトがみられる。後にサーミスタを含めた温度計を新品と交換したところ、ドリフトは極めて小さくなったという事実から、ドリフトの原因はサーミスタにあったことがわかる。

温度 $\theta(^{\circ}\text{C})$ のデータについて、下記に示すような式を仮定して、最小2乗法により各係数の大きさを計算する。

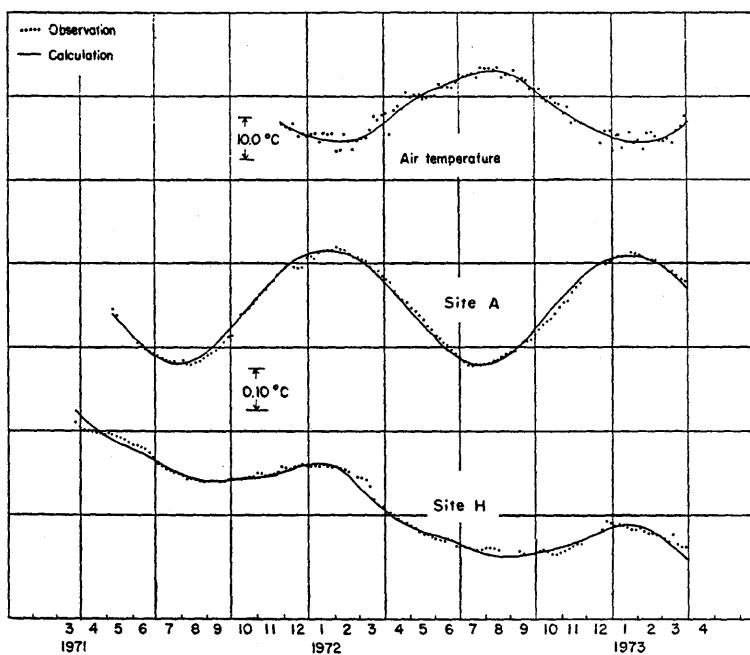


Fig. 2.7. Annual temperature variations inside the tunnel of the Nokogiriyama Crustal Movement Observatory.

$$\theta = A + Bt + Ct^2 + T_1 \sin(\omega t + \phi_1) + T_2 \sin(2\omega t + \phi_2) + T_3 \sin(3\omega t + \phi_3) \quad (2.1)$$

ここに, t は観測時刻 (day), A, B, C はドリフトの係数, T_1, T_2, T_3 はそれぞれ温度の年周項, 1/2年周項, 1/3年周項の振幅, ω は年周項の角速度 ($2\pi/365.25 \text{ day}^{-1}$), ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 はそれぞれの項に対応する温度の位相である。これらのうち, 温度の絶対値 A については定められないで, 最小2乗法によって得られた A 以外の数値を Table 2.2 として示す。これらの数値を用いて求めた式 (2.1) の値を Fig. 2.7 において実線により表わす。なお Table 2.2 の結果をみると温度変化の年周項の振幅は1/2年周項と1/3年周項の20倍以上もあり, このことから, 今後の論議において年周項以下は無視しても差し支えないと考える。

Table 2.2 に示した結果のなかより年周項のみをとり出してみると, 単位を °C にとって

$$\left. \begin{array}{ll} \text{外気温} & 7.94 \sin(\omega t + 238.6) \\ \text{A 点} & 0.134 \sin(\omega t + 60.8) \\ \text{H 点} & 0.0567 \sin(\omega t + 65.6) \end{array} \right\} \quad (2.2)$$

となる。但し, 位相は度で表してある。

これをみると, 観測所開設の当初より棒状温度計により測定されてきた坑内温度変化の振幅および位相とかなりよく一致している。坑内において毎年2月頃に坑内温度が最高

Table 2.2. Coefficients in equation (2.1).

Notations (unit)	Air temperature	Site A	Site H
B (10^{-3} °C)	5.20 ± 0.00	0.00 ± 0.00	-0.05 ± 0.00
C (10^{-3} °C)	-0.00 ± 0.00	-0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
T ₁ (10^{-2} °C)	794 ± 2.2	13.4 ± 0.02	5.67 ± 0.04
φ ₁ (°)	239 ± 0.1	60.8 ± 0.01	65.6 ± 0.04
T ₂ (10^{-3} °C)	418 ± 10.6	0.518 ± 0.028	1.39 ± 0.01
φ ₂ (°)	256 ± 1.5	196.8 ± 0.24	52.0 ± 0.14
T ₃ (10^{-3} °C)	516 ± 9.7	0.112 ± 0.010	0.664 ± 0.004
φ ₃ (°)	110 ± 1.2	-62.7 ± 1.1	-24.9 ± 0.3

値に、8月頃に最低値を示すことが経験されてきたが、式(2.2)の位相からもそれが正しいことがわかる。外気温の年周変化の振幅とA点とH点における坑内温度変化の振幅の比をとって外気温に対する減衰率を求めるとき、それぞれ1/59.2と1/140になる。

年周変化についてその最高温度と最低温度の差、すなわち年周温度差はTable 2.2のT₁(年周振幅)の2倍にあたる。この年周温度差は土被りの比較的薄いA点で0.26°C、土被りが厚く鋸山観測所の坑内で最も条件の優れたH点で0.13°Cである。

2.3.4 熱伝導による検討

A点とH点の2点についてどのように熱が伝導していくかを考察してみたい。Fig. 2.3を見ると、観測坑は東西に発達した尾根の南斜面に掘削されている。観測坑のある山の斜面は、ほとんど灌木または雑草によって覆われており、これは嶋田・藤(1959)の結果を参考にすれば、このような場合、土壤の表面にはそれほど大きな熱伝導の差が生じないと考えられるので、外気温の変化がそのまま岩石表面に熱伝導すると仮定して差し支えないと考えられる。

Fig. 2.3の地形図を参考にして、2つの測定点の模式的な断面をFig. 2.8に示す。地表面からの岩石層の厚さはA点が約7m、H点が約17mである。前にも述べたようにA点のある小部屋の近くには非常用の脱出口があり、この間は長さ約5mの坑道でつながっている。A点とH点の間の坑道は直線的ではないが、約23mにわたった坑道でつながっている。このような点を考慮して熱の伝導について考察を加えてみたい。

平面で仕切られた半無限物体に対する熱伝導の方程式は下式のようになる(GUTENBERG, 1951)。

$$\theta = \theta_0 \exp\left(-\frac{\pi}{\kappa T} X\right) \sin\left(\frac{2\pi t}{T} - \frac{\pi}{\kappa T} X\right) \quad (2.3)$$

ここに、 θ は深さ X (cm)のところの温度(°C)、 θ_0 は $X=0$ のところ、すなわち地表面の温度、 T は温度変化の周期(sec)および t は時刻(sec)である。上式中の温度伝導率 κ はGUTENBERG(1951)に引用されている砂岩の値 $0.0133 \text{ cm}^2/\text{sec}$ を採用する

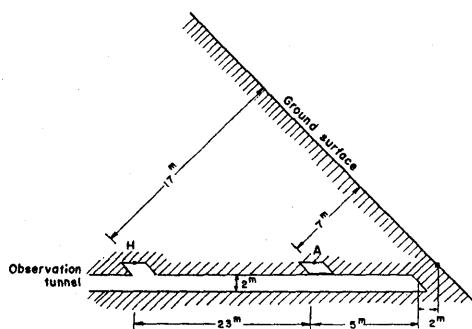


Fig. 2.8. Simplified section of the tunnel.

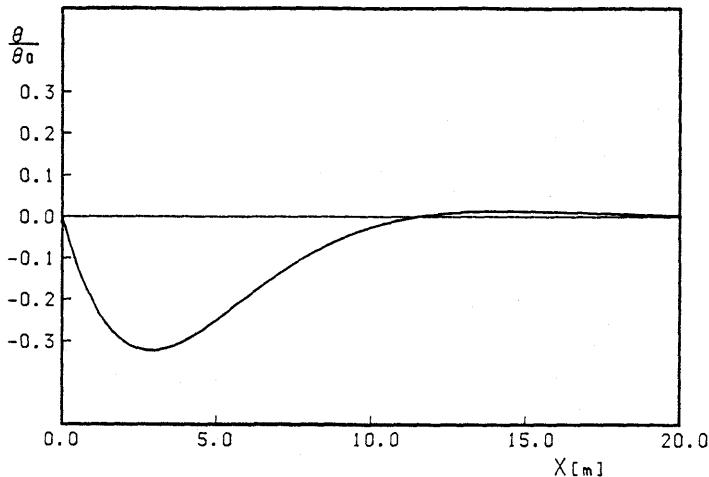


Fig. 2.9. Temperature variation ratio with depth.

こととし、 X に関する θ/θ_0 の変化を式(2.3)より求めた結果をFig. 2.9に示す。この場合式(2.3)は X に関する1次元の熱伝導であるので、実際の3次元問題に必ずしも適用できるものではないが、Fig. 2.8に示すような観測坑道断面についての一応の目安を得ることができると考えられる。

Fig. 2.9によれば、 $X \geq 10\text{ m}$ の範囲で θ/θ_0 は殆どゼロの値を示す。このことは地表により 10 m も入れば気温の年周変化はしみ込まないことを示すものと考えられる。またこの結果は年周温度差がH点(土被り約 17 m)で 0.13°C という実測と調和的である。A点の土被り約 7 m に対応する値は $\theta/\theta_0 = -0.15$ であることから、外気温の年周温度差を 30°C とすれば、A点での年周温度差は 4.5°C となる筈である。実際にはA点での実測値は 0.36°C であって、Fig. 2.9の理論値よりも、もう少し熱伝導率が小さい値をとることが期待される。

脱出口付近は $X=2\text{ m}$ に相当し、この位置となるとFig. 2.6による熱伝導の評価は困難と考えざるを得ない。脱出口は一応密閉されているというものの、かなりの熱量が僅

かな空気の流通によって坑道内に運搬されることは疑いない。外気温の影響を小さくするためには、脱出口の熱的な絶縁について十分考慮する必要がある。

3 章 鋸山地殻変動観測所周辺の岩石の弾性定数

3.1 岩石の弾性定数測定の必要性

この研究全体を通じて測定の目的は、鋸山観測所の観測坑道が環境の変化に応じてその影響を受けるとき、坑道がどの様に変形するかを求めるにある。それと共に、原因によっては坑道変形が異なることがあり、その形態についても解明を行うことにある。このように坑道の変形を生じさせる原因として、地球潮汐、海洋潮汐、気圧変化、温度変化、降雨、地下水位等の種々の要因が考えられる。そのうえ坑道変形はこれらの原因の複合の形で測定されることが多い。現実の観測はこのような様々な原因によって変形された坑道中で実施されている。言いかえれば、ある一つの入力に対して、地殻そのもののレスポンスと坑道変形のレスポンスをあわせて観測している。このように、測定された結果に対して、原因別のレスポンスの分離が行われるとともに、原因によっては坑道変形のレスポンスも考慮しなければならない。このために原因別に分離した観測値と理論的に計算した値と比較を試みることになる。

理論計算で坑道の変形の量を求めることになるが、この理論計算を原因別に行うこととは容易である。したがって、観測値と計算値を比較することにより、観測値の原因別の分離の確かさも併せて論ずることができることになる。この理論計算を実行するためには、現実に即したモデルの設定が必要なことは当然である。このモデル構成のための必要な物理定数として、まずモデルの形の決定のため地形データは坑道の形とその寸法が必要である。地形データについては2章においてある程度の説明をしたが、後にさらに詳しく説明する。

次に、力学的定数として弾性定数が必要である。観測所周辺を構成する岩石の弾性定数を求めるためには、まず地質図によって代表的な岩石を選ぶことから始めなければならない。観測所周辺の最も詳細な地質図としては小池(1950)のものがある。小池(1949)の調査によると、観測所周辺の地質は第三紀鮮新生古期の豊岡群の稻子沢(いなござわ)泥岩層に属していて、その層は比較的均質で、主として灰白色の泥岩より構成され、凝灰岩・スコリア等と互層をなしている。小池・村井(1950)は地層の地史的区分を行うため、火山放出物の堆積運動に注目しながら鋸山付近の凝灰岩の鉱物組成を調査した。さらに村井(1962)はこの鋸山周辺5ヶ所および鋸山から10~20kmの範囲の場所8ヶ所において、稻子沢泥岩層の最上面より150m下位にある凝灰岩の粒度組成と鉱物組成の調査を実施した。その結果、房総半島の西海岸より中央部にわたる東西約20kmの範囲内では、凝灰岩の粒度組成はほぼ完全に均質であり、かつ共通の鉱物組成であることが示された。このようにして、鋸山観測所付近一帯はかなり広い範囲にわたって、共通の粒度組成と鉱物組成からなった地層の中であることがわかる。

鋸山付近の凝灰岩あるいは凝灰質砂岩、泥岩の弾性定数について、文献について調査したが適当なものが見あたらなかった。石井ほか(1964)は日本各地15カ所の砂岩、泥岩

や凝灰岩のヤング率として $0.270 \sim 8.00 \times 10^{10}$ Pa の値を得た。しかし、残念なことにこの中に鋸山付近は含まれていない。林田（1968）は日本国内2カ所（鋸山を含まない）の砂岩についてヤング率 $0.939 \sim 4.58 \times 10^{10}$ Pa を測定した。星野・根岸（1970）も国内2ヶ所の砂岩と凝灰岩についてヤング率 $0.94 \sim 2.31 \times 10^{10}$ Pa を示した。ポアソン比についての文献も少なく、僅かに星野・根岸（1970）の測定がある。これによると、堆積岩を含まない輝緑岩・安山岩など5種類の岩石について $0.15 \sim 0.30$ の値を得ている。今回の目的のためには、このような広範囲の岩石サンプルより得られた弾性定数では不十分であると考えて、実際に測定を行うこととする。

3.2 岩石サンプル

多くの地殻変動観測所の坑道はコンクリート壁で覆われているが、鋸山観測所の観測坑内は素掘であるため、坑道内の岩石を容易に採取することが可能である。鋸山観測所の坑内および周辺の岩石は地質学的には一様な凝灰質砂岩および泥岩であるが、その硬さは場所によってかなり差異が見られる。観測坑内のみに限っても、コンクリート専用の釘が楽に打てる柔らかい場所もあれば、それをほとんど受け付けない硬い場所もあることからも知れる。興味深いことには、坑内の岩石の硬さは岩石に含まれる粒の大きさと岩石表面の色によって区分される。そのため、岩石に含まれる粒の大きさと岩石表面の色による区分が岩石の硬さの定性的な区分になる。観測坑道壁面の岩石について、このような定性的な硬さ分布を示したものが Fig. 3.1 である。この図から東西方向の坑道のみが比較的硬い岩石により構成されていることがわかる。

岩石の弾性定数を測定するためのサンプルはこのようにして決められた定性的な硬さの分類にしたがって、Fig. 3.1 に数字で記入した3個所から各2個づつ計6個採取することにした。図中の数字はサンプル番号である。これらの岩石はいずれも凝灰質砂岩であるが、その色は坑内において観察するときにはかなり異なる。坑内にあるとき、サンプル No. 1 と 2 の色は暗緑色であり、No. 3 と 4 は風化されている表面が暗赤色であるが、その内部は灰色である。また、サンプル No. 5 と 6 は灰白色である。しかしサンプルを整形したのち乾燥するとほとんどが白灰色となる。

小池（1950）によるとこの付近の地質構造は、東西に延びる尾根を持つ鋸山（標高329.4 m）を中心とするしゅう曲構造の向斜軸にあたっている。鋸山観測所は鋸山の北側に位置するため、観測所付近の傾斜はほぼ南下がりとなり、その角度は $10 \sim 30^\circ$ 程度である。Fig. 3.1 をみると、最も軟らかいサンプル No. 1 と 2 は観測坑内の比較的奥の部分、すなわち土被りの厚い部分から得られたものである。サンプル No. 3 と 4 は土被りの比較的薄い部分から、No. 5 と 6 はこの両者の中間の位置から採取されたものである。これを地層の層位から見ると、最も軟らかいサンプル No. 1 と 2 は最も下側で、その上にサンプル No. 3 と 4 が位置し、最も硬いサンプル No. 5 と 6 がそれらの中間に位置することになる。観測坑の上部や周辺の岩石の露頭を調べると、そのほとんどすべてが中間の硬さをもったサンプル No. 3 と 4 と同様に表面が暗赤色の岩石であり、定性的な硬さも似ていることがわかる。以上のことから、ここで採取した6個の岩石サンプルは鋸山観測所周辺のかなり広域的な岩石を代表しているものと考えられる。

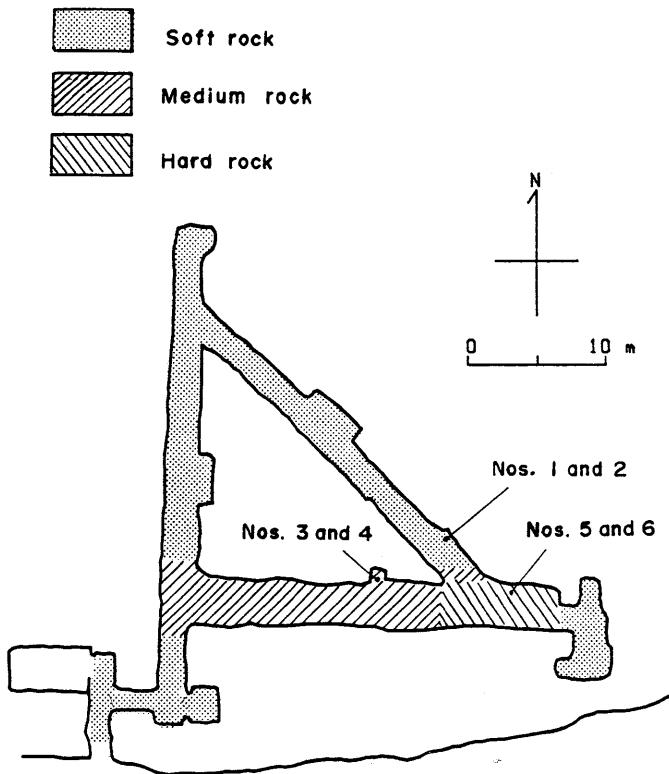


Fig. 3.1. Distribution map of the hardness of rocks forming the tunnel of the Nokogiriyama Crustal Movement Observatory. The numbers indicate locations of rock specimens.

採取した岩石サンプルを圧縮試験機にかけて弾性定数を測定するのであるが、その前にサンプルをダイアモンド丸鋸盤を使用して $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 125\text{ mm}$ 角柱に整形し、さらに表面を研磨する必要がある。このときサンプルの寸法精度は $\pm 1\text{ mm}$ 以下になるよう整形し、寸法の測定を行い測定結果に補正をする。次に、これらサンプルの $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ の両端面に厚さ 5 mm の研磨した軟鋼板を接着する。このように軟鋼板を接着する目的は、圧縮試験機からの圧力がサンプルの両端面になるべく一様に分布して加わるようにするためである。

この接着のときに注意する点として、接着した後にこの軟鋼板が平行になるように注意しなければならない。Fig. 3.2には、整形された岩石サンプルと軟鋼板および歪ゲージの配置を示す。そして、一つの側面 ($50\text{ mm} \times 125\text{ mm}$) ごとに、2軸 90° 交叉歪ゲージ(縦方向と横方向を一組にしたもの)を2個ずつ接着する (Fig. 3.2 参照)，したがって岩石サンプル一個について8個の歪ゲージが接着される。いま、Fig. 3.2において、2組の歪ゲージがみえるが、その右側の歪ゲージの縦成分と横成分は角柱の各側面についてそれぞれ1個ずつあるので、それを直列に接続する。また左側の歪ゲージの縦成分と横

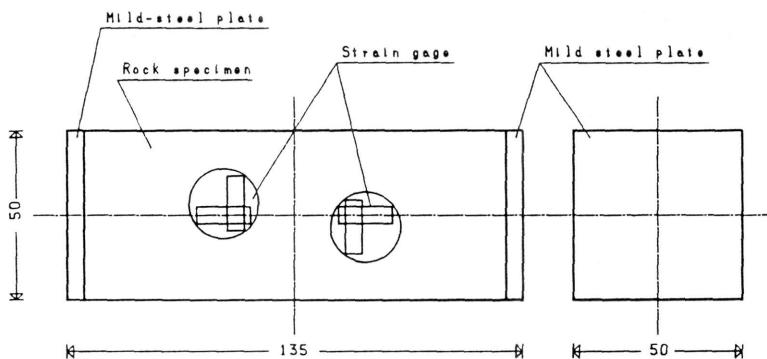
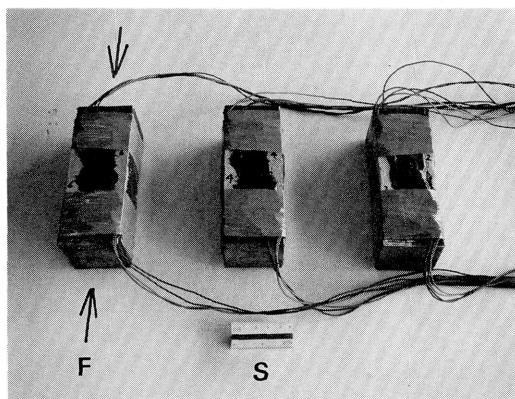


Fig. 3.2. Dimensions of a test piece (unit of mm).

Fig. 3.3. Test pieces of rock for elastic constant measurements.
S: 5 cm scale. F: direction of compression.

成分についても同様に接続する。

以上のような歪ゲージの接続方法をとることによって、一つのサンプル毎に歪ゲージによる測定値は縦方向と横方向にそれぞれ2組の測定値が得られることになる。このようにした理由は、縦方向と横方向のそれぞれ2組の歪測定値の差を数パーセント以下におさえることを目標としたためである。サンプル実験の結果、この目標は比較的容易に達成されることができた。測定用のサンプルの写真を Fig. 3.3 に示す。

3.3 弾性定数の測定

弾性定数の測定は静的方法により行われ、地震研究が所有する二軸圧縮試験機の水平軸方向のみを用いて測定することにした。この装置は垂直軸と水平軸の直角に交わる二軸からなっている。サンプルの加圧は電子回路によりプログラム制御されるため、この装置によって圧力はあらかじめ設定された値を常に保つようになっている。前述のように2軸90°交叉歪ゲージが使用されたが、それぞれの抵抗値は 120Ω でゲージ 縦横それぞれの方向に4個直列になっているから合計 480Ω である。これに歪ゲージへの供給電圧 10.0

V, 増幅度 60 db のロードセル・コンバータを用いている。この出力はペン書きレコーダによるアナログ記録およびコンピュータ組み込みの A-D 変換器によるデジタル記録によっている。

弾性定数はサンプルが乾燥状態であるか湿潤状態であるかによって差があり、その差はヤング率で乾燥状態のほうが10~20%大きいとの実験結果が報告されている（林田, 1968, 星野・根岸, 1970）。測定時のサンプルに対する応力と歪との関係は、フックの法則が適用される範囲を越えないように、細心の注意をもって実施されなければならない。実際に岩石サンプル No. 4 に荷重を加えたときの測定例を Fig. 3.4 に示す。この図において、横軸はサンプルに加えた応力 (kg/cm^2) であり、この時の歪量 (10^{-6} strain) を縦軸に示している。図中で P_1 としたものは縦方向の歪を、 P_e としたものは横方向の歪を表わしている。そして、角柱の側面のゲージにより計測されたデータのうち右側を記号の \times で、左側を \circ で表わしている。また、データが直線のまわりに少しづらついているが、この原因の主なものは周囲温度の影響であると思われる。さらに、この図において最大応力は $5 \text{ kg}/\text{cm}^2$ より小さいところで行われていることがわかる。このほかのサンプルに対し

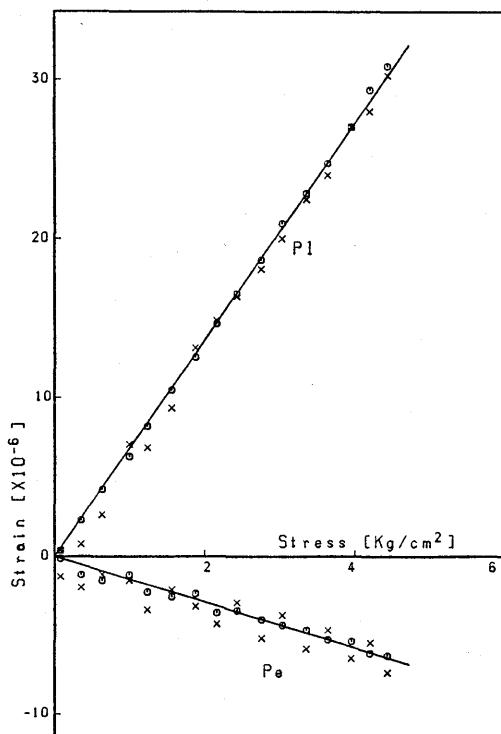


Fig. 3.4. Sample of measurement data of test piece No. 4. P_1 and P_e indicate strains of parallel and transversal to the direction of compression. \times and \circ illustrate measurement values of left and right side strain-gage on a test piece.

Table 3.1. Young's modulus and Poisson's ratios observed in rock samples (tuffaceous sandstone). The sample numbers are indicated in Fig. 3.1.

Rock sample number	Density [g/cm ³]	Young's modulus [10 ¹⁰ Pa]	Poisson's ratio
1	1.40	0.337	0.263
2	1.40	0.428	0.263
3	2.20	3.06	0.191
4	2.24	2.81	0.191
5	2.46	4.38	0.196
6	2.50	4.90	0.213

ても同様である。

弾性定数の測定結果を Table 3.1 にまとめて示す。この表によると、岩石サンプルは地質的に同種のものであるにもかかわらず、定性的な硬さによって密度もヤング率もかなり異なる結果を示している。ここでは、岩石サンプルの重量を測定し、サンプルの外形寸法で除したものを密度として示してある。この密度が 1.40~2.50 g/cm³ と大きく異なっていること、ヤング率も 0.337~4.90×10¹⁰ Pa と 1 枠以上も差があること、またポアソン比も 0.191~0.263 と相当な差があることがわかるのである。しかし同一場所から採取されたそれぞれ 2 個のサンプルの間では、得られた弾性定数に大きなばらつきはみられない。

観測所周辺の岩石について弾性定数はなるべく一様であり、採取したサンプルが付近一帯の岩石の力学的特性を代表するものであることが期待されていた。しかし Table 3.1において得られた弾性定数の測定結果はこの期待を裏切るものであった。とくにヤング率に至っては、サンプル No. 1 と 2 に比較してサンプル No. 5 と 6 はおよそ 10 倍の大きい値を示している。もしいざれかのサンプルをもって、鋸山観測所付近の地質を代表する岩石とするならば、実験結果の解釈に大きな食い違いが生ずるに違いない。この困難を克服するために、8 章のモデル計算において使用する弾性定数の第 0 近似値として、Table 3.1 の各サンプルの平均値を採用することにする。おそらく実際の広域的な弾性定数は Table 3.1 の値の範囲にあることは間違いない。とにかく、このような第 0 近似値から出発してモデル計算を実施し、実際の実験値との比較の結果として、改めて広域的な弾性定数を決定しなおせばよい。したがって Table 3.1 に与えられている数値は一応の目安を与えるものである。

4 章 歪ゲージによる地殻歪観測法の開発

4.1 坑内における歪ゲージ実験の可能性

電気抵抗歪ゲージ（以下歪ゲージと略す）を用いた地殻歪の測定法を新たに開発する。その目的は歪観測設備の小型化と地殻歪の微細で高密度の観測を行うことにある。一般に地殻歪の観測には石英管伸縮計あるいはボアホール型歪計が用いられるが、これには長大な観測坑やボアホール孔を必要とする。しかし、歪ゲージは極めて微小なセンサを構成することができ、従来の計器の代替品として利用できるかも知れない。その検討とともに気圧変化や降雨などの歪観測への影響を調査したいと考えている。

岩石の静的な変形実験には古くから歪ゲージが利用されてきた。最近では応力解放法という、現場における一種の応力測定方式が開発された。地質調査所（1980, 1981）は歪ゲージをセンサにした多軸孔径変化計あるいは多軸の歪計をボーリング孔内に設置し、地殻応力によるボーリング孔の変形を求めている。このほかに、西日本地殻応力調査班（1980）はボーリング孔の底面に直接ゲージを接着して、同じく応力解放法による応力測定を行っている。

これらの測定法においては、歪量は一般に $1 \mu\text{strain}$ (1×10^{-6}) より大きい。これ以下の歪量の測定には、一般に歪ゲージが用いられないが、これには種々の理由が考えられる。なかでも周囲温度の変化や振動といった測定環境条件の不安定が最大の理由ではなかろうか。その意味で鋸山地殻変動観測所坑内は歪ゲージ実験に適当であると考えられる。坑内平均温度は 15.4°C 、その年変化は $\pm 0.13^{\circ}\text{C}$ であり、日変化は $1/1000^{\circ}\text{C}$ より小さい（2章参照）。また振動も少なく、同観測所内に良好な実験場所を選定することは容易である。観測坑内は一般に多湿であり、これが歪ゲージ利用の最大の障害となるが、この問題さえ解決できれば、歪ゲージによる $1 \mu\text{strain}$ 以下の歪変化の測定は可能になると考えられる。このようなことから、 1×10^{-9} の歪量を測定することを目標として実験を進めることにする。

4.2 歪ゲージの原理と選択

地殻歪観測用のゲージセンサ部は4個の歪ゲージと、これを防湿用の金属板またはプラスチック板に接着したものからなっている（柳沢、1984）。この歪ゲージセンサ部を岩石表面に接着して、その岩石の歪の計測を行おうとするものである。

金属抵抗体に歪を加えると電気抵抗変化率は歪に比例する。電気抵抗を R 、歪 ϵ を加えたときの変化分を dR 、比例定数を K とするとき、抵抗変化率は

$$\frac{dR}{R} = K\epsilon \quad (4.1)$$

により表される。 K は金属抵抗体により固有の値を示し、通常は歪感度あるいはゲージ率（gage factor）と呼ばれている。

また一定断面積 A を有する長さ L の金属抵抗体の抵抗 R は

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (4.2)$$

で示される。ここに ρ は比抵抗である。 R は歪 ϵ と温度 T により変化するが、いま温度変化がないものと仮定すれば、式 (4.2) から

$$\frac{dR}{R} = \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (4.3)$$

が得られる。

ゲージ素子は通常円形または長方形断面のものが用いられるので、そのポアソン比を ν とすると、 $dA/A = -2\nu dL/L$ が成立するから、これを式 (4.3) に代入して

$$\frac{dR}{R} = (1+2\nu) \frac{dL}{L} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (4.4)$$

を得る。さらに $dL/L = \epsilon$ であることを考慮すれば、式 (4.1) と (4.4) より歪度は

$$K = 1 + 2\nu + \frac{1}{\epsilon} \frac{d\rho}{\rho} \quad (4.5)$$

により示されることになる。式 (4.5) の右辺第二項はゲージ素子の幾何学的変形の影響を、第三項は物性の変化を表わしている。実際に多くの金属は $\nu \approx 0.3$ 程度であるから、第一項と第二項の和は 1.6 程度となる。しかし実際に使用しているゲージの K の値は 2~3 程度であるので、第三項の影響も大きいといわねばならない。現在歪ゲージとして最も広く使用されているのは銅ニッケル合金であり、弾性域から塑性域にわたって $K \approx 2$ が保たれている。つまり第三項の寄与が小さいわけで、このことからも銅ニッケル合金が歪ゲージとして適していることが理解される。

現在のところ市場に供給されている接着型の歪ゲージは、JIS 規格等がないため多くの場合 NASA の NAS-942 規格によって特性・品質の管理がなされている（渡辺、1981）。最近は、半導体ゲージも実用化されていて、 $K=200$ にも達するものがあり、増幅器の簡略化に大いに役立っている。

歪ゲージの構造について云えば、細線を用いた線ゲージは最近あまり用いられていない。これに対して薄い箔をホトエッチングあるいはダイカットにより格子状にした箔ゲージが用いられることが多い。ゲージのベースとしては、ペーパー、ポリエステル、ベーカライト、エポキシ、フェノール、ポリイミドなど多種である。これらの中から絶縁抵抗の保全や接着の容易さなどの点を考慮し、実験に有利と考えられるものを選択することにする。

各種の箔ゲージのなかで今回テストに供された 5 種類の箔ゲージを Table 4.1 に示す。共和電業社の KFW-5 はフェスチル（フェノールをエポキシ樹脂で変質）ベースの歪ゲージで、これをさらにエポキシ樹脂で全体を包んだ防水型ゲージである。同様の製品として、三栄測器社の N11-FA-5-W1 はポリエステル・ベースの歪ゲージで、同じくエポキシ樹脂で包んで防水型にしたものもある。防湿効果の点では KFW-5 と差は認められず、これまでの実験で優劣を決めかねている。今までのところ、この両者を地殻歪測定のために使用することが最適と思われる。このほかに共和電業社の半導体ゲージ KSP-6 も使用したが、S/N 比が優れているにもかかわらず、防水型ゲージを作ることが困難であり、観測坑内における寿命が短いのが欠点である（柳沢、1987b）。

Table 4.1 には有効長 30 mm の歪ゲージ SKF-3168 がある。しかしこれは外形寸法

Table 4.1. Specifications of strain-gages used.

Gage type	KFW-5	F11-FA-5-W1	SKF-3168	N11-FA-10	KSP-6
Classification	Watertight	Watertight	Watertight	Normal	Semiconductor
Lot number	Y1025-222 Y1238-063	3170-Y13	Y1103-001	1108-041	Y351-015
Resistance(Ω)	120.0 ± 0.3	120.0 ± 0.3	120.0 ± 0.3	600 ± 0.5	$334.7 \pm 2\%$
Gage factor	$2.08 \pm 1\%$ $2.09 \pm 1\%$	$2.10 \pm 1\%$	$2.11 \pm 1\%$	$2.12 \pm 1\%$	$124 \pm 3\%$
Gage length(mm)	5.0	5.0	30.0	10.0	6.0
Gage width(mm)	2.0	1.8	3.0	2.2	0.25
Thermal expansion coefficient (ppm / °C)	10.8	11	10.8	11	
Rate of strain v.z. temperature (μ strain/°C)	± 1.8	± 2	± 1.8	± 2	± 9.4
Gage material	Cu-Ni	Cu-Ni	Cu-Ni	Cu-Ni	P type Si
Base material	Fuestel	Polyestel	Fuestel	Polyestel	Fuestel
Protect material	Epoxi resin	Epoxi resin	Epoxi resin		

が大きすぎて防湿が極めて困難であるため、絶縁抵抗が早期に低下して使用不能となりやすい。このほかに、防水無しの通常の歪ゲージ N11-FA-10(三栄測器社)もテストした。これはゲージ抵抗が 600Ω であり、歪ゲージに加える電力を同じとすると、抵抗が 120Ω のものに比較して 600Ω のほうが同じ歪量について出力電圧が2倍以上得られることがある。しかし、坑内実験によれば絶縁抵抗が1年で低下してしまうために、出力電圧が高い利点を生かすことができなかった。また半導体ゲージ KSP-6(共和電業社)は $K=124$ と感度が高く、增幅器の入力電圧が60倍も高いので S/N 比が大幅に改善される。防水型のゲージが市販されていないため寿命が短い欠点がある。以上のテストの結果、最終的に KFW-5 および N11-FA-5-W1 の防水型歪ゲージを実験に用いることにした。

4.3 サンプル室内実験

まず、実験に先がけて岩石サンプルについて歪ゲージのテストを行うこととする。鋸山観測所観測坑内に掘削当時に切り出したままの角柱(Table 3.1 のサンプル No. 1 と 2 に相当する凝灰質砂岩)が置かれていたので、Fig. 4.1 に示すような形のよい角柱に整形することにした。整形後の角柱(30 cm × 20 cm × 15 cm)の表面を研磨し、そこに接着剤アラルタイトを用いて箔ゲージと半導体歪ゲージを接着して、角柱に圧力を加えて抵抗変化を検出することとした。このときの箔歪ゲージ($K=2$)は長さ 30 mm のもので、増幅器としてはロックイン方式のものを使用した。この角柱に 16 g/cm^2 相当の圧力を角柱の長さ 30 cm の方向に加えた場合に、増幅器の出力として 15 mV 程度が得られた。この圧力によって 4×10^{-8} 程度の歪が期待される。なお、半導体ゲージの場合には、 $K=200$ であるため、増幅器なしで同様な値が得られた。これらの実験は通常の実験室内で行われたため、周囲の温度変化はかなり大きかったと考えられるが、歪ゲージの分解能は 10^{-9} 程度で充分にあることがわかった。以上のような実験室内における岩石サンプル実験によ

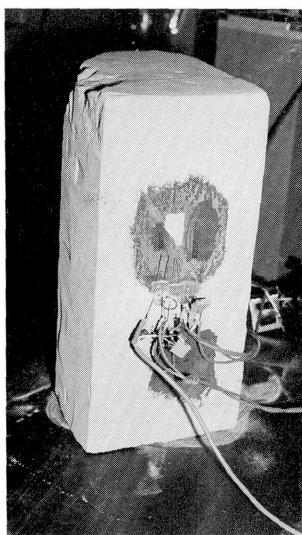


Fig. 4.1. A test piece of rock sampled from the Nokogiriyama Crustal Movement Observatory.

り、観測坑における歪ゲージ使用に一応の目安がたったので、坑内に実験場所を移すこととした。

4.4 接着剤の選定

歪ゲージの選定に一応の目安がついた段階で、次に問題となることは接着である。実際に接着を行う方法については、詳しく防湿実験の項で説明するが、箔歪ゲージの接着は防湿のための薄い板（金属またはプラスチック）への接着、およびこの薄い防湿用の板を岩石表面へ接着することとの2段階で行われる。この場合、どのような接着剤を選択するかが大きな問題である。接着剤として要求される事項は

- a) 硬化時の収縮率が小さいこと、
- b) 弹性率が接着すべき岩石より大きくないこと、
- c) 高湿度において充分な接着力があり、吸湿性がないこと、
- d) 電気絶縁性が高く保たれること、
- e) クリープ特性が優れていること、
- f) 長寿命であること、
- g) 観測坑内の取扱いが容易なこと、
- h) 接着中に悪性のガスを発生しないこと、

などである。このような多岐にわたる条件をすべて満足する接着剤は厳密に云ってないと考えられる。

接着テストした接着剤は8種類にのぼる。シアノアクリレートを用い瞬間接着剤と呼ばれているものとして、アロンアルファ（東亜合成社）とCC-15B（共和電業社）をテストしたところ、観測坑内の歪ゲージは約1年で剥離してしまった。ポリエステルの接着剤PC-12（共和電業社）は接着からほぼ1年後接着力が落ちるらしく、僅かに力を加えて引っ張るとはがれてしまった。材質が不明であるが、X-60（H. B. M. 社）接着剤は固化時間

が 20°C で 10 分間と早いが、2 剤を混合するとたちまち固化するポットライフは観測坑内の使用が困難である。エポキシ系の接着剤として、アラルダイト・スタンダード (CIBA-GEIGY 社), EP-18 (共和電業社), ボンド E セット R (コニシ社) およびアラルダイト AV-138 (CIBA-GEIGY 社) の 4 種をテストしてみた。アラルダイト・スタンダードは 18°C 以下の温度で使用をなるべく避けるように指示している。EP-18 は接着剤の流動性が高く垂直な壁に塗布すると、接着剤が流出してしまう。結局のところ、観測坑内で使用する接着剤としてはボンド E セット R とアラルダイト AV-138 (固化剤は HV-998 指定) が最適との結論になる。この 2 種のうち寿命についてのデータのある後者を使用することにする。CIBA-GEIGY (1984) のデータによれば、極めて悪条件の中において 10 年間その接着力の変化がほとんどないことが示されている。エポキシ系の接着剤は一般に長寿命であり、5°C という比較的の低温でも硬化することなどの坑内作業の容易さから、接着剤として AV-138 と硬化剤 HV-998 を使用することにする。これらの接着剤は金属類をはじめとしてほとんどのプラスチック類すべてを接着することができる。

しかし、テフロンとポリエチレンを接着するときには、特に厄介な前処理が必要である (CAGLE, 1982; CIBA-GEIGY, 1982)。テフロンを接着するための前処理用の液体はアメリカにおいて販売していることであるが、僅かの量を輸入することもないので自製することにした。製法は 2000 cc のテトラヒドロフランを塩化カルシウム入りパイプと攪拌器のついた三つのロフラスコに注ぎ、256 g のナフタリンをこの中に溶かし、つぎに細片にした金属ナトリウム 46 g を加える。この反応は約 2 時間かかり、出来上がった溶液は黒褐色を呈する。これで清浄にしたテフロンを処理するが、その反応時間は室温で 15 分程度である。この作業は比較的容易であるが、悪臭があることと廃液の処理に問題がある。これに対してポリエチレンの前処理は比較的容易で、硫酸 (比重 1.82) 1 kg, 水 50 g と重クロム酸 83 g を用いる。この液により室温で 10~15 分で処理が可能となる。

4.5 坑内における防湿実験

観測坑内の湿度は一般に高い。試みに毛髪型湿度計を観測坑内に設置すると、その指示は常時 100% を示す。このような高湿度の坑道の壁に接着した歪ゲージをむき出しのままで放置すると、たちまち水分を含み絶縁抵抗が低下して歪測定が不能となる。このため歪ゲージの防湿実験が必要となる。

絶縁抵抗は歪ゲージの抵抗と並列であるので、絶縁抵抗が次第に低下すれば、あたかも歪ゲージがドリフトしているかのように見える。歪ゲージの直流抵抗を R_g とするとき、絶縁抵抗が R_1 から R_2 に低下するときの歪量の変化 $\Delta\varepsilon$ は

$$\Delta\varepsilon = \frac{R_g(R_1 - R_2)}{KR_1R_2} \quad (4.6)$$

である。いま $R_g = 120\Omega$, ゲージ率 $K=2$ とし、絶縁抵抗が $10^9\Omega$ から $10^8\Omega$ に低下した場合を求める $\Delta\varepsilon = 0.6 \times 10^{-6}$ となる。実際の歪センサでは電橋接続をしていることも考慮して、絶縁抵抗は $10^7\Omega$ が限界の値ではないかと考えられる。

まず最初に、観測坑内にある旧暗室 (巾 3 m, 奥行 3 m, 高さ 2.5 m, 土被り約 4 m) の内壁で歪ゲージ接着実験を実施した。東西方向の壁面を整形して歪ゲージの接着を試み

たが、防湿方法が拙劣なため絶縁抵抗がたちまち低下してしまった。このときの防湿方法は、接着したゲージの表面にエポキシ樹脂を塗布するほか、ゲージのメーカー指定の防湿剤6種類を各々テストした。テストした防湿剤は次のようである。共和電業社のC-1A(材質、ワックス、以下同じ)、C-4(ワックス)、アラルダイト#100(エポキシ)、KE-48RTV(シリコンゴム)、CIBA-GEIGY社のアラルダイト・スタンダード(エポキシ)およびH.B.M.社のAK-22(ブチルゴムと粘土の混合物、詳細については後述する)である。しかし、いずれの防湿剤の場合も歪ゲージの絶縁抵抗の最低限界である $10^7\Omega$ を割ってしまった。さらに、水中において使用する防水型歪ゲージを、上記と同様に使用したが、やはり防湿効果は期待したほど向上しなかった。

次いで、コンクリート内に埋め込んで使用する歪ゲージの使用を考え、同じ坑道の壁面に直径7.5cm、奥行き11cmの円筒状の横穴を2個所に掘って、石膏と膨張セメントで歪ゲージを埋め込んだ。実験室内において、直径7cm長さ10cmの石膏製の円筒柱の中に埋め込みをし、感度を求めたところ 10^{-9} の分解能が充分にあることが確かめられた。しかし、この埋め込み型歪ゲージの絶縁抵抗は最初に $10^9\Omega$ 以上あつたが、埋設より2ヶ月ほどでたちまち $2\times 10^7\Omega$ に減少してしまった。

このほかの防湿方法を調査したところ、岩石表面に歪ゲージを直接接着するのではなく、岩石表面と歪ゲージの間に金属の箔を挿入して接着するとよいことがわかった(渡辺、

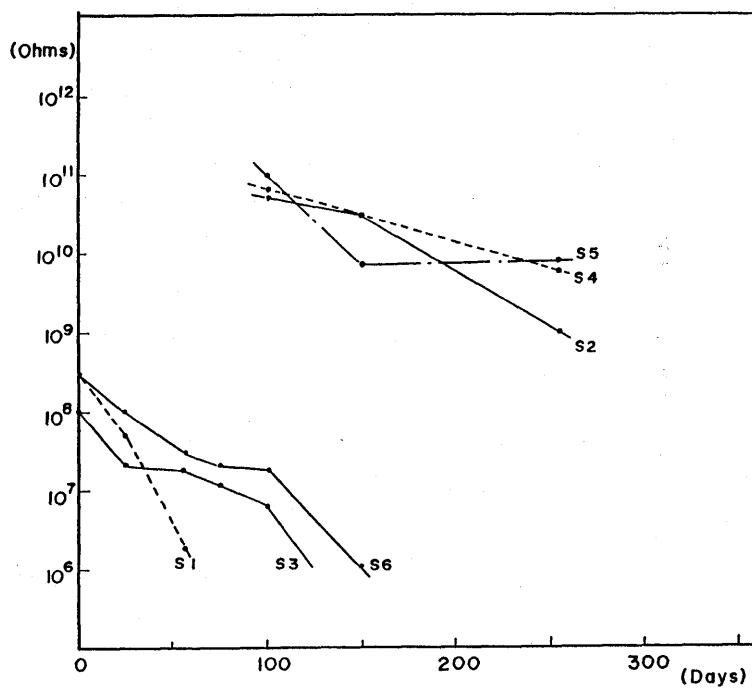


Fig. 4.2. Moisture-proof tests of strain-gages in the tunnel of the Nokogiriyama Crustal Movement Observatory. Normal type strain-gages with covering putty are used for S1, S3 and S6, while water-proof type strain-gages with covering putty are used for S2, S4, and S5.

1981). 防湿処理剤として H. B. M. (HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK) 社の AK-22 というブチルゴムと粘土の混合物 (松井ほか, 1973) があることがわかった。Fig. 4.2 に防湿に関する実験結果を示す。S1, S3 および S6 は 0.3 mm 厚さの銅板上に通常の歪ゲージを接着し、その上にエポキシで被って AK-22 を使用したもの、S2, S4, および S5 は防水型歪ゲージを接着し、その上に AK-22 を使用したものである。これを上記の観測坑内の台上に水平にセットし、100 日以上放置して絶縁抵抗の変化をみたものである。この実験結果によれば、S1, S3 および S6 は 100 日以内に最低限界抵抗 $10^7 \Omega$ 以下に減少した。これに対して S2, S4 および S5 は 250 日経過しても $10^7 \Omega$ 以上の高絶縁抵抗を保ち続けた。すなわち坑内では防水型歪ゲージを使用すべきであるとの結論に達した。リード線の端末などは露出したままであった。もし、この点の不備を除いて実験すれば、これよりさらに良好な結果が得られるものと思われる。

次に、観測坑の垂直な壁の表面に $40 \mu\text{m}$ の銅箔を接着し、その上に防水型歪ゲージを接着し、さらに AK-22 で防湿処理を施した場合の実験結果を Fig. 4.3 に示す。この場合もリード線端末は未処理のまま実験を行った。この様な場合に使用する銅箔として 20 および $50 \mu\text{m}$ の銅箔についても同様な実験を行ったが、岩石表面に接着するとき銅箔が薄いと“しわ”になり易いので $20 \mu\text{m}$ の銅箔は不採用とした。Fig. 4.3 によれば、T1～T5 の 5 個の防水型歪ゲージとも、250 日を経てもなお $10^9 \Omega$ 以上の絶縁抵抗を保ち続け、歪実験の目的には十分に使用が可能であることが判明した。

この 2 つの実験からみて、絶縁抵抗は $10^7 \Omega$ を許容限界とすると、これまでテストしてきた防湿処理で 1 年余は楽に使用できることになる。しかし、数年間となるとまだ不十分であり、さらに絶縁を強化する必要がある。例えば歪ゲージのリード線にポリエチレンなどの管をかぶせる等の絶縁材料の增量、AK-22 の上にさらに防湿効果を高める材料を塗布するといったことが考えられる。なお AK-22 の上にシリコンゴムを塗布することを試みたが、観測坑内でシリコンゴムと銅箔とを密着させることができ難しかった。この方法は放棄せざるを得なかった。

岩石の表面に接着して使用するごく薄い金属板として、初めのうちは銅またはステンレ

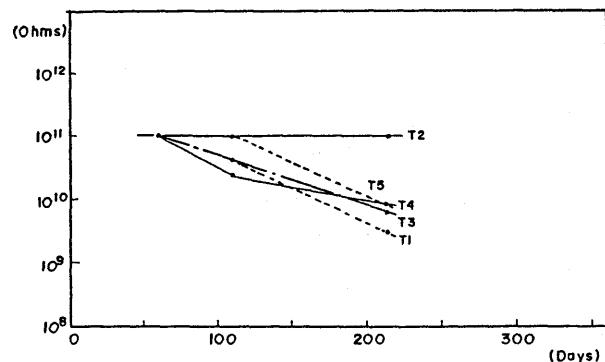


Fig. 4.3. Moisture-proof tests of strain-gages adhering to the wall of the Nokogiriyama observation vault.

スを使用していた。さらに金属板の代わりになるような材質がないかと考えて次のような材料について接着テストを行った。プラスチックの材料としてテフロン(略号、PTFE)、ポリエチレン(PE)、エポキシ(EP)、塩化ビニール(PVC)、アクリル(PMMA)とフェノール(PF)の厚さ1mmの板をそれぞれ10cm×20cmに切断した。比較のため厚さ0.3mmの銅板をプラスチック板と同寸法に切断した。この実験のため参考になると思われる物理的特性について、プラスチック6種と銅板の値をTable 4.2に示す。この表によると、弾性定数の小さい順にテフロン、ポリエチレンそしてエポキシである。防湿用として使用するときには、材料の厚さが同じであるならば、弾性定数が小さいほど歪ゲージに伝達される岩石歪の減衰が小さくなる。このことから防湿板の材料の弾性定数が小さいほどその厚さを増すことができるようになる。吸水率が零に近いほど防湿の点で好ましいが、この点でもテフロン、ポリエチレンそしてエポキシの順である。さらに、固有抵抗は高いほどよいわけで、テフロン、塩化ビニールそしてポリエチレンの順となっている。しかし、これらの弾性率、吸水率と固有抵抗で優れているテフロンとポリエチレンも線膨張係数が大きいことが欠点となる。なによりも困ることは、このテフロンとポリエチレンは接着がかなり困難なことである。

銅板を含めたこれらの7種の薄板の上に防水型ゲージを各々2個ずつ接着し、その上に接着を容易にするため片面放電処理を行った約4cm×約7cmの厚さ0.10mmのテフロンのシートを接着し、さらにその上に充分な量の防湿剤AK-22を圧着した。このような7種類の板をおのおの2組作り、1組は水道水を満たした大型のバケツの中に浸し、他の1組

Table 4.2. Characteristics of plastics and copper.

Material	Modulus of elasticity (10^4 kg/cm^2)	Water absorption (%)	Thermal expansion coefficient ($10^{-5}/^\circ\text{C}$)	Volume resistivity ($\Omega \cdot \text{cm}$)
Polytetrafluoroethylene (Teflon : PTFE)	0.4	0.00	9.9	$>10^{18}$
Polyethylene (PE)	0.4~1.1	<0.01	11~13	$10^{15} \sim 10^{16}$
Epoxy resin (EP)	2	0.08~0.15	2.5~5.0	9×10^{15}
Polyvinylchloride (PVC)	2.5~4.2	0.07~0.4	5~18.5	$>10^{16}$
Polymethylmethacrylate (PMMA)	3.2	0.3~0.4	5~9	$>10^{14}$
Phenol resin (PF)	5~11	0.3~0.7	3~4.5	$10^9 \sim 10^{13}$
Copper	130		1.67	2.3×10^{-6}

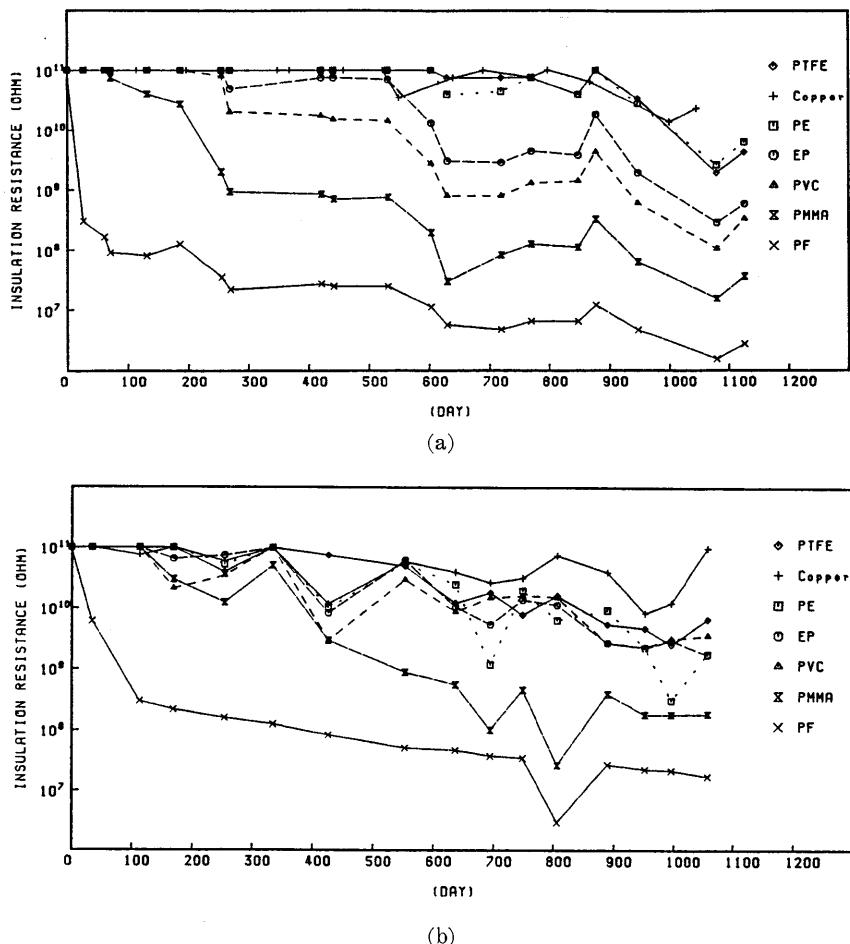


Fig. 4.4. Moisture-proof tests of strain-gages: PTFE: Polytetrafluoroethylene (Teflon), PE: Polyethylene, EP: Epoxy resin, PVC: Polyvinylchloride, PMMA: Polymethylmethacrylate and PF: Phenol resin. (a) Underwater laboratory tests, and (b) in situ tests in the tunnel of the Nokogiriyama Crustal Movement Observatory.

は観測坑内に放置してその歪センサの絶縁抵抗の変化を測定した。前者の場合、経過日数に対する絶縁抵抗の変化を Fig. 4.4(a) に、また後者の場合を Fig. 4.4(b) に示す。くり返し述べてきたように、歪ゲージをセンサとして地殻歪を計測するときに、センサの絶縁抵抗は $10^7\Omega$ より大きいことが必要である。このことを考慮して図をみると、まず水中においてはフェノール (PF) が 600 日、アクリル (PMMA) がほぼ 2 年で不良となることがわかる。同じフェノールとアクリルでも観測坑内では比較的長くもつことがわかる。水中と観測坑内のいずれの場合も優れているものは銅 (Copper), テフロン (PTFE) とポリエチレン (PE) であることがわかる。

推定ではあるが、防湿さえ完全であれば、10 年の寿命も決して困難なことではない。ま

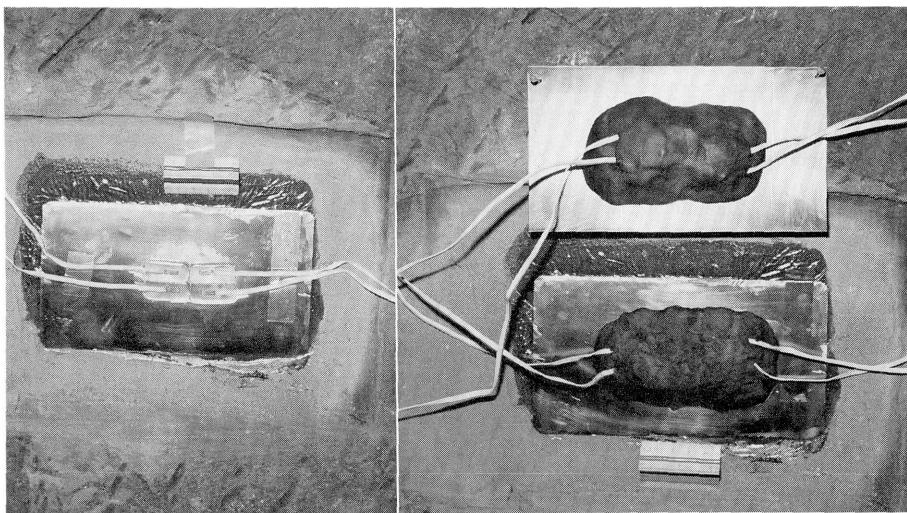


Fig. 4.5. Strain-gages adhered to the wall of the Nokogiriyama observational vault. Strain-gages adhered to the wall by epoxi resin (left), putty covered on strain-gages (right).

た、プラスチック類の中でこの目的に適していると思われるテフロンを用いて実際に観測した結果、固有抵抗が極めて大きいため絶縁抵抗も大きいこと、弾性定数が小さいので材料の厚さを増すことができることなどの長所があることが判った。短所として前処理を入念に行なわないと接着が困難であること、歪センサ部に静電シールドが必要であることなどがある。

現在行っている接着と防湿方法は次の手順によっている。まず薄い金属板またはプラスチック板の表面処理を行い、この上に歪ゲージを接着する。この上にさらに、接着を確実にするため片面のみ放電処理をしたテフロンのシートを接着する。ここまででは実験室内において定温乾燥炉を用いて温度管理しながら行うことができる。次に現場の鋸山観測所の坑内において、歪センサの接着を予定した岩石の表面を整形し、平滑にして乾燥する。乾燥した後に清浄な水で洗浄し、さらに乾燥を繰り返し、アセントで拭いてから歪センサ部の接着を実行する (Fig. 4.5(a))。接着が終了して歪センサ部の表面温度が 30°C 以下になってから、すみやかに防湿剤 AK-22 を押しつけるようにして歪ゲージの表面を覆うのである (Fig. 4.5(b))。なお上記の接着の場合には何れも適当な圧力を加えることが必要である。

4.6 電子回路の製作

歪測定用センサ部は Fig. 4.6 に示すように、歪ゲージ各辺 1 個づつ合計 4 個で電橋を組むようにした。電橋接続にした理由は歪ゲージの温度係数が大きいためその補償としたためである。この場合、対向する 2 辺 (active gage) を壁面に接着し、残りの 2 辺 (dummy gage) はいくぶん厚めの銅板に接着して、銅板を壁面に釘で打ちつけた。ゲージ 1 個の直流抵抗は $120\Omega \pm 0.5\%$ のもので、ゲージ率 K は 2.05~2.20 程度である。製

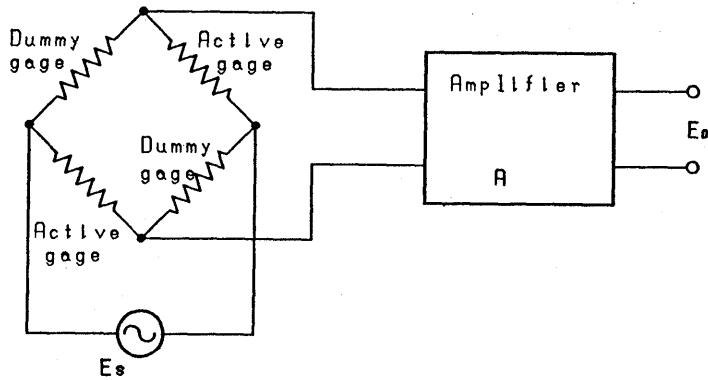


Fig. 4.6. Electronic circuits used.

作されたロットによってゲージ率は多少の差があるがロット内の偏差は $\pm 1\%$ 以下のものである。

必要な増幅度を求めるため Fig. 4.6 において、増幅器からの出力電圧を E_0 、電橋への供給電圧を E_s 、増幅度 A 、歪ゲージの各辺の直列数を N とすると

$$E_0 = \frac{1}{2} KA\varepsilon NE_s \quad (4.7)$$

の関係がある。ただし、上式は電橋を構成する各辺の歪ゲージの抵抗がすべて等しいものとし、電橋および増幅器入力回路の漂遊容量の平衡は充分にとれていると仮定した場合に成立する。いま、式(4.7)において $K=2$, $E_s=2.0V$, $N=1$ としたとき、最小の歪量 $\varepsilon=1\times 10^{-10}$ strain を出力電圧 $E_0=10 \mu V$ にする増幅度は $A=0.5\times 10^6$ あればよいことになる。余裕をみて増幅度を 1×10^6 とすると 100 dB となる。

増幅器の回路方式は以下の経過によって定めた。最初の室内実験の時に用いたプリンストン・アプライド・リサーチ社のロックイン・アンプは周波数範囲が $1\text{Hz}\sim 100\text{kHz}$ と広く、増幅度、フィルタの周波数と帯域幅および同期検波のための信号の位相角などが任意に変化できる多目的のものである。最初の観測坑内の実験にはこの1台のロックイン・アンプを用いたが、これだけでは実験のために不便で複数台増幅器が必要であり、直流増幅器を自作することを考えた。当時この直流増幅器の仕様として、増幅度 80 dB と入力換算のドリフト $1 \mu V/day$ を考えていた。初段の IC として、2種のモノリシックと1種のマイクロ・モジュールを選んだ。しかし、増幅度を上げて地球潮汐を記録しようとすると、ロックイン・アンプと直流増幅器の両者ともドリフトが大きくて、時間が経過してもほとんど減少しなかった。さらに、観測坑内の温度変化が少ない場所に増幅器を移転してみたが、ドリフトはいっこうに減少しなかった。このことから、この両者の使用をあきらめた。なお、この時点で歪ゲージの製作会社が販売している歪ゲージ専用の増幅器の仕様を調査したが、入力換算の雑音と増幅度の点で、この目的のための仕様を満足しなかった。このように既存の増幅器に満足するものがなかったので、Fig. 4.7 に示すようなブロック・ダイアグラムのロックイン・アンプを自作することにした。

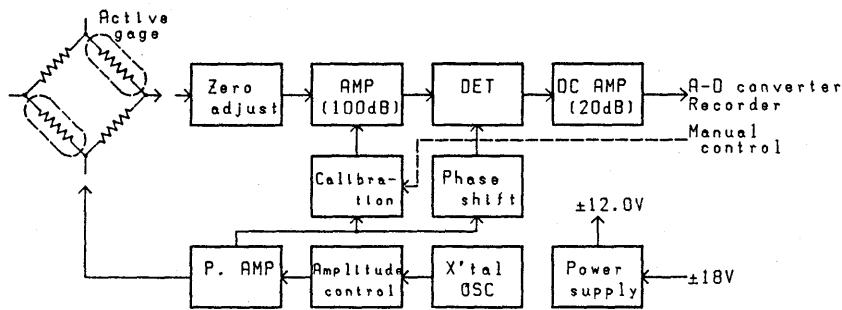


Fig. 4.7. Block diagram of electronic circuits with strain-gages.

電子回路における最大の問題は増幅器の初段に用いる半導体（トランジスタや FET など）の雑音である。その理由は歪ゲージから発生する熱雑音に比較して増幅器の初段の半導体から現生する雑音の方がはるかに大きいことがある。抵抗の熱雑音は抵抗値 R の抵抗体内で電子が不規則な熱運動をしているために生じる雑音電圧である。この抵抗体の絶対温度を T とする。また、このとき抵抗の両端には瞬時値 e_r の電圧を生じ、その 2 乗平均値は雑音等価帯域幅 B をもつものとすると

$$\bar{e}_r^2 = 4kT R B \quad (4.8)$$

が成立する。ここで k はボルツマン定数で $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ である。 $T=270\text{K}$ のとき (4.8) 式から $\bar{e}_r^2 = 1.59 \times 10^{-20} RB \text{ V}^2$ と求められる。歪ゲージの抵抗を 120Ω とし、等価雑音帯域幅を 1Hz とすると歪ゲージの両端子に生ずる雑音は $14 \times 10^{-4} \mu\text{V}$ となる。

増幅に用いる半導体の雑音は熱雑音のほかにショット雑音とフリッカ雑音を考えなければならない。そのうえ、理論的取扱は現実と一致しないことが多い。このため実際には、カタログ上から低雑音の半導体を選択する目安として、雑音指数を用いるのが普通である。いま、雑音指数を NF とすると

$$NF = 10 \log \left[1 + \frac{1}{4KT} \left(\frac{\bar{e}_n^2}{R_G} + \bar{i}_n^2 R_G \right) \right] \quad (4.9)$$

とすることができる。ここで、入力換算雑音電圧を e_n 、入力換算雑音電流を i_n 、信号源抵抗を R_G で表わす。ただし、この式において周波数帯域幅 $B=1\text{Hz}$ としている。

次に、増幅器の初段の半導体としてトランジスタまたは電界効果トランジスタ (FET) の何れを選択するかの問題がある。この場合、歪ゲージセンサ部と増幅器との間は直列的に絶縁するためトランスを使用する事により、アース点の選択の自由度が大きくなる。これは歪ゲージセンサ部と増幅器を別々に接地することが可能となるからである。このトランスの 1 次側と 2 次側の巻線比を $N=4$ のものを使用するとすると、歪ゲージセンサ部の抵抗が 120Ω であるから、トランスの 2 次側からみた等価抵抗は $120N^2 = 1920\Omega \div 2k\Omega$ である。初段増幅器からみた入力信号源抵抗が $10k\Omega$ を境にして、低いときはトランジスタが、高いときは FET が雑音が少ないことが知られている。われわれの実験では、信号源抵抗が約 $2k\Omega$ であることから、初段の増幅にはトランジスタを用いることがよいと

考えられる。

この場合に電子回路の簡略化のため半導体などはすべて IC で構成したかったが、初段の IC としてトランジスタ型で低雑音のものが得られなかつた。このため初段のみ独立のトランジスタを使用することにした。そのほか大電力を扱う以外はすべて IC によって構成することにした。このように初段のトランジスタは、入手の容易さを考慮して、カタログより NF の小さいトランジスタを選べば、2SC-1843 (NEC), 2SC-1682 (東芝) と 2SC-2855 (日立) などが適当であることがわかる。これらのトランジスタは、1kHz の周波数以下で、コレクタ電流 2 mA のとき、NF は 0.15~0.2 dB 程度のものである。これらを多数購入して、実際の回路に接続して、出力側で最も雑音電圧の少ないトランジスタを選んで使用することにする。

Table 4.3. Specifications of lock-in amplifiers.

Instrument	Parameter	Condition	Specification
A-C Amplifier (12 sets)	Voltage gain	Load resistor = 600 Ω	105~108 dB
	Noise	Input conversion Input resistor = 120 Ω	0.06~0.18 μV
	Maximum output voltage	Load resistor = 600 Ω	≥ 3.0 V
	Central frequency of filter		3.20 kHz
	Band width		32 Hz
	Power supply		+18.0 V ± 1% 60 mA -18.0 V ± 1% 55 mA
Crystal oscillator (6 sets)	Frequency		3.200 kHz
	Output voltage	Load resistor = 600 Ω	1.0 V ± 1%
	Fluctuation of frequency	Powersuply ± 2% Temperature ± 1°C	< 0.001%
	Fluctuation of output voltage		< 0.1%
	Power supply		+18.0 V ± 1% 30 mA -18.0 V ± 1% 35 mA
D-C amplifier (12 sets)	Maximum output voltage	Load resistor = 600 Ω	± 12 V
	Adjust range of output voltage		± 12 V
	Voltage gain	Load resistor = 600 Ω	20 dB ± 1%
	Power supply		+18.0 V ± 1% 22 mA -18.0 V ± 1% 18 mA
Power supply (6 sets)	Input voltage		A-C 100 V ± 20 %
	Output voltage		+18.0 V ± 1%, Max. 300 mA -18.0 V ± 1%, Max. 300 mA
	Voltage stability	A-C input ± 20% Load current 0~100 %	< 1% < 2%
	Ripple and noise	Load current = 300 mA	< 2mV

歪ゲージに供給する電源として、水晶発信器を用い、振幅安定回路を経て、電力増幅してから供給する。増幅器を製作するまでの注意として、系全体をワンポイント・アースにすること、初段から2段目までのトランジスタ、ICやCR部品などに風が当たらないようにすることが特に大切である。このほか交流商用電源を用いる場合には、漏洩電流に悩まされることになるので、1次側と2次側の絶縁抵抗が $10^9\Omega$ 以上の絶縁変圧器を使用する必要がある。このようにして、完成した増幅器による測定の結果をTable 4.3に示す。これをみると、入力換算雑音が $0.06\sim0.18\mu\text{V}$ とかなり優れていることがわかる。なお、この段階までに使用した増幅器の増幅度を校正する回路が信頼する動作をしなかったため、この時期のデータの感度は推定である。

Fig. 4.8に示すのは、得られた良好な地球潮汐の記録例である。この歪ゲージセンサ部は1986年4月に接着したもので、同年9月11～13日の3日間のデータである。この3日間の坑内温度変化が 0.02°C 程度でほぼ時間に対して直線的である。さらにFig. 4.8には、歪ゲージセンサ部と平行して設置された25m溶融石英管伸縮計のNW-SE成分の毎正時の瞬時値をあわせて示している。両者共に坑内温度変化の影響を受けているが、伸縮計の方が影響が少ないことがわかる。これは溶融石英の温度係数 0.54×10^{-6} に対して、歪ゲージは 11×10^{-6} と、その大きさは20倍にも達しているためである。このことから、あらかじめ電橋接続によってその影響を減少させようとしたが、今回の実験ではまだ不十分であることがわかる。そこで坑内壁面に接着された歪ゲージセンサ部を、発泡スチロールで覆うことにする。これで以前より温度変化の影響が改善されたようである。

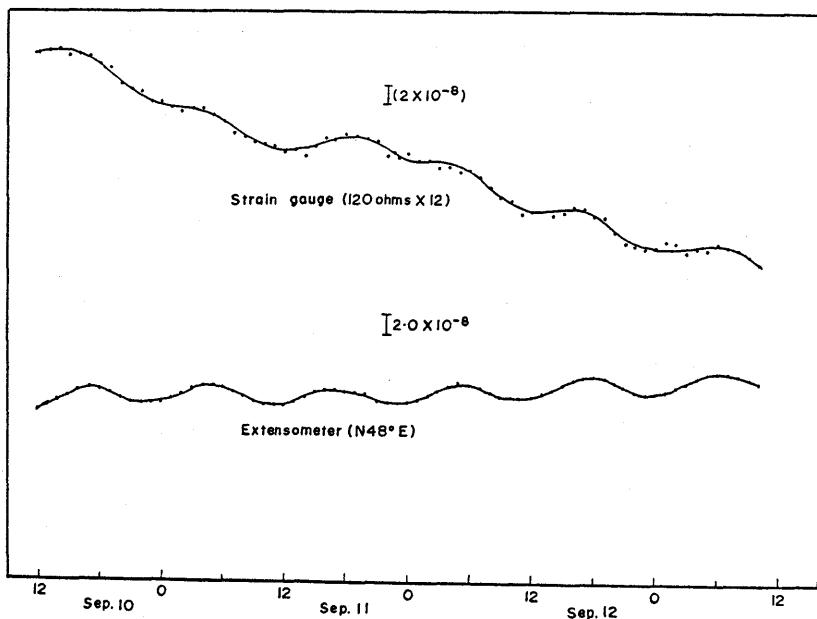


Fig. 4.8. Strain changes observed by a strain-gage (upper) and an extensometer (bottom) for the period from Sep. 10 to 13, 1984.

4.7 データ収録方式

歪ゲージ歪計による観測データの収録方式は Fig. 4.9 に示すような配置になっている。歪センサが接着されている観測点から増幅器は 3 m 以内の距離に置かれている。各観測点からの出力信号は坑内の旧暗室内一ヶ所にまとめておかれている直流増幅器に導かれる。この直流増幅器によってドリフトなどにより変化した出力直流電位の調整ができるようになっている。これは歪ゲージセンサ部のドリフトの補償を行うときに、その度にセンサの設置場所に観測者が行くことなしに調整が行えるように配慮されているものである。このことはすでに 2 章で説明したように、入坑による観測坑内の計測に与える大きな影響を防止するためである。

旧暗室からの出力信号は、観測坑に付属した測定室に送られる。ここにおいてモニタ用の $\pm 5 \text{ mV}$ 感度で 12 ch の打点式記録計と併せて A-D コンバータ（エマック社）に信号が送られる。この A-D コンバータの仕様は次のようである。回路方式は二重積分型で、入力電圧 $\pm 12 \text{ mV}$ 、デジタル出力 16 bit、出力電圧 $0 \sim +5 \text{ V}$ 、ポケット・コンピュータに制御された 32 ch のものである。ポケット・コンピュータとしては 16 bit のもので X-07 (キャノン社) を用いている。このコンピュータの電源の供給は通常は交流商用電源を、停電時は UM-3 型乾電池を用いている。収集された歪ゲージセンサ部のデータは、コンピュータの RS-232C 端子から 4800 bit/sec の速さで、モデムを介して約 150 m 離れた観測所庁舎内のパーソナル・コンピュータ PC-9801E に送られる。

観測坑付属の測定室からのデータ信号はモデムを経てコンピュータに入る。コンピュータ PC-9801E は 20 Mbyte のカセットテープ・ストリーマ付きのハードディスクとフロ

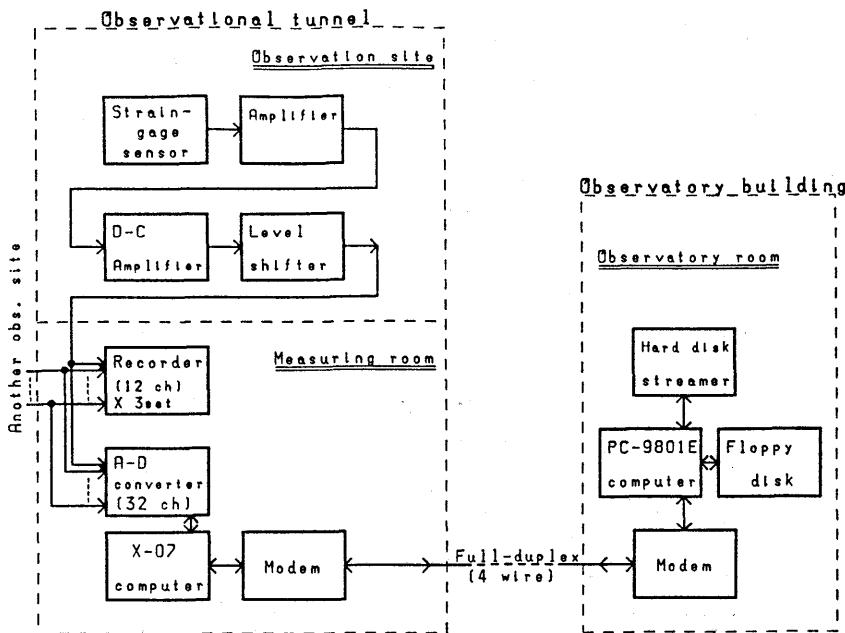


Fig. 4.9. Block diagram of the data sending system.

ッピイディスクを持っている。このコンピュータの電源は交流商用電源のみで、バッテリーなどによる停電時のバックアップは行われていない。このためコンピュータの立ち上げとデータ収集プログラムは、停電があった後送電開始時に自動的に動作を開始するようにプログラムしてある。設置してから現在まで約4年になるが、この間の故障は皆無である。入力した20秒毎のデータは12個（4分間）ずつ平均されて、1986年5月まではフロッピイ・ディスクに、その後はハード・ディスクに記録されている。以後の章においては、防湿部分を含めて坑道の側壁や床に接着する歪ゲージセンサ部、電子回路やデータ収録部分を歪ゲージ記録部とし、これら全体で歪ゲージ歪計と呼ぶこととする。

5 章 歪ゲージ歪計による地殻歪の観測

5.1 鋸山観測所の観測設備配置

鋸山観測所の歪ゲージ歪計による歪観測設備についてすでに4章において詳しく述べた。そこでは歪ゲージの選択法、防湿法、接着法と電子回路における工夫が重要な部分であった。そして多点観測体制に入るべく坑内の各所に歪ゲージ歪計を接着し防湿を施し、電子回路も整備し終わり、こうして1985年8月までに24個の歪計はほとんど完全に整備された。しかしながら問題が残っていた。それはD-C増幅器の出力端子に取り付けられたモニタ用の旧型打点記録計によりある種の雑音が発生して、高感度のA-Dコンバータに妨害を与えることが判明した。これは新型の打点記録計（ER-187型、横河電機社）に交換することによって解決された。それとともに、感度検定法が確立したことにより、歪ゲージ歪計による多点観測が軌道に乗ったのである。

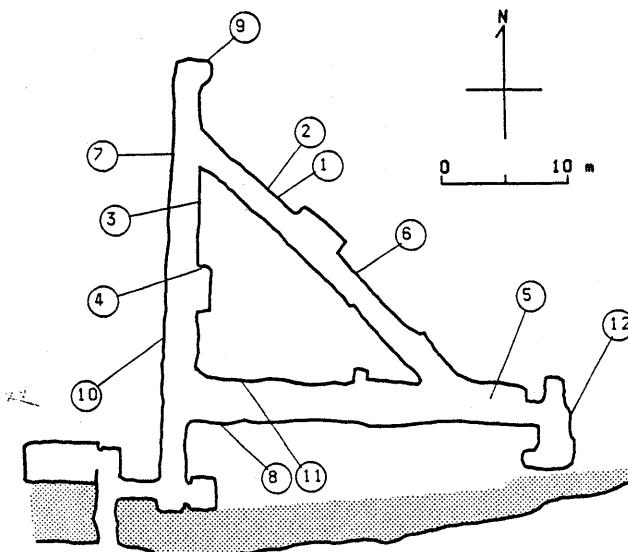


Fig. 5.1. Plan of observation vault in the Nokogiriyama Crustal Movement Observatory. ①～⑪ and ⑫ indicate locations of strain-gage strainmeters.

歪ゲージ歪計による観測の当面の目標は石英管伸縮計の観測記録と比較することにより、それに近いものを得るように努力することであった。しかし実験の経過とともに次第に歪ゲージ歪計独特の観測データが得られることがわかつってきた。石英管伸縮計データとの最も初步的な対比は地球潮汐と気圧変化による気圧効果の比較観測である。本章においては、この比較観測の結果（柳沢、1987b）を示すとともに、歪ゲージ歪計独特の性質も紹介していきたい。

Fig. 5.1 は鋸山観測所の観測坑内における歪ゲージ歪計の配置図である。歪ゲージ歪計は坑内にできるだけ均等に分布するように配置したが、既設の設備があるため坑道壁に加工が不可能であること、あるいは坑道壁を構成する岩石の状態が悪いなどのため、かならずしも均等に配置することができなかつた。また、⑤の観測地点は坑道床上に設置されている。図中に示した○印の中の数字は観測地点番号を表わし、それはまた歪ゲージ歪計の接着順をも表わしている。この配置図の各観測地点における観測方向は

E-W 成分: ④, ⑤, ⑧, ⑨ および ⑪,

N-S 成分: ③, ⑥, ⑦, ⑩ および ⑫,

NW-SE 成分: ①, ②, ⑥ および ⑬,

上下成分: ④, ⑩, ⑪ および ⑫

となっている。上記の成分間で○の中の数字に重複があるのは、1 観測地点に必ずしも一つの歪ゲージ歪計とは限らず、幾つかの方向に歪計が接着されているためである。また、1 観測地点に同一の成分の歪ゲージが 2 個あるいは 3 個設置された場所もある。Table 5.1 に歪ゲージ歪計の全配置と、それぞれの特性を示す。これによると、例えば②観測地点には防水型、通常の防水なしの高抵抗型と半導体型と言うように、各種歪ゲージ歪計を混合して接着してある。このほか観測地点⑦には防水型が 2 個と半導体型が接着されている。また観測地点④の E-W 成分、⑥の NW-SE 成分、⑧の E-W 成分および⑨の E-W 成分については防水型歪ゲージ歪計がそれぞれ 2 個同一方向に接着されている。これは 1 観測地点に複数個の観測データが得られることにより、観測データの信頼性を見極めるためである。

観測地点①は、1984年8月に接着したものであるが、同年9月より観測を開始した。しかし防湿が不完全であったため1986年初頭から絶縁抵抗が急に低下したことにより1986年6月に観測を中止した。また②～⑨の観測地点は1985年8月に接着し、⑩～⑫の観測地点は1986年6月に接着したものである。観測地点⑥では観測中に急に信号が得られなくなつたため原因を調査した結果、歪計の設置場所が坑道の床にあるため排水が悪く、そのうえ地下水の僅かな浸出により銅板と石の接触面が腐食して、銅板と接着剤が剥離はじめたことがわかつた。そこで再度1986年11月に防湿用の金属板をこれまでの 100 μm の銅板から 50 μm のステンレス板に替えて接着した。このように銅板が腐食するような場所においては、ステンレス板またはテフロン板が適していると思われる。なお実際には 1 観測地点に複数個の歪ゲージ歪計があったものを、精度的な見極めがついた時点から順次歪計の数を減らし、他の観測点に転用を行つてきた。

Table 5.1. Specification and location of the strain-gage strainmeters used.

Obs. site	Sensor no.	Component	Observation period	Strain gage			
				Type	Resistance	Gage factor	Remarks
①	SG-16	NW-SE Hor.	June, 1984~Aug., 1986	KFW-5	120Ω	2.08	Watertight
②	SG-13	NW-SE Hor.	Aug., 1985~	KFW-5	120Ω	2.08	Watertight
	SG-14	NW-SE Hor.	Aug., 1985~	KFW-5	120Ω	2.08	Watertight
	SG-15	NW-SE Hor.	Aug., 1985~June, 1986	N11-FA	600Ω	2.12	
	SG-16	NW-SE Hor.	Aug., 1985~	KFW-5	120Ω	2.08	Watertight
	SG-19	NW-SE Hor.	Aug., 1985~	KSP-6	350Ω	124.	Semiconductor
③	SG-01	N - S Hor.	Aug., 1985~June, 1986	KFW-5	120Ω	2.08	Watertight
	SG-02	N - S Hor.	Aug., 1985~	KFW-5	120Ω	2.08	Watertight
④	SG-07	E - W Hor.	Aug., 1985~	KFW-5	120Ω	2.09	Watertight
	SG-08	E - W U-D	Aug., 1985~	KFW-5	120Ω	2.09	Watertight
	SG-09	E - W Hor.	Aug., 1985~June, 1986	KFW-5	120Ω	2.08	Watertight
⑤	SG-10	E - W Hor.	Aug., 1985~	KFW-5	120Ω	2.08	Watertight
	SG-11	NW-SE Hor.	Aug., 1985~	KFW-5	120Ω	2.09	Watertight
	SG-12	N - S Hor.	Aug., 1985~	KFW-5	120Ω	2.08	Watertight
⑥	SG-03	NW-SE Hor.	Aug., 1985~	KFW-5	120Ω	2.08	Watertight
	SG-04	NW-SE Hor.	Aug., 1985~	KFW-5	120Ω	2.08	Watertight
⑦	SG-17	N - S Hor.	Aug., 1985~	KFW-5	120Ω	2.08	Watertight
	SG-18	N - S Hor.	Aug., 1985~	KFW-5	120Ω	2.08	Watertight
	SG-20	N - S Hor.	Aug., 1985~	KSP-6	350Ω	124.	Semiconductor
⑧	SG-05	E - W Hor.	Aug., 1985~	KFW-5	120Ω	2.08	Watertight
	SG-06	E - W Hor.	Aug., 1985~	KFW-5	120Ω	2.08	Watertight
⑨	SG-22	E - W Hor.	Aug., 1985~	KFW-5	120Ω	2.09	Watertight
	SG-23	E - W Hor.	Aug., 1985~	KFW-5	120Ω	2.09	Watertight
⑩	SG-27	N - S Hor.	July, 1986~	KFW-5	120Ω	2.09	Watertight
	SG-28	N - S U-D	July, 1986~	KFW-5	120Ω	2.09	Watertight
⑪	SG-01	E - W Hor.	July, 1986~	KFW-5	120Ω	2.09	Watertight
	SG-09	E - W U-D	July, 1986~	KFW-5	120Ω	2.09	Watertight
⑫	SG-15	N - S Hor.	July, 1986~	KFW-5	120Ω	2.09	Watertight
	SG-16	N - S U-D	July, 1986~	KFW-5	120Ω	2.09	Watertight

5.2 感度検定と測定値の補正

5.2.1 感度検定

歪ゲージを用いた歪計の感度検定については各種の方法が考えられるが、観測坑内という特別な事情もあるため次のような条件を採用する。検定するために与える歪量は 10^{-7} 程度以下であること、観測の途中においても検定できること、検定により歪ゲージに流れる電流がなるべく変化しないことなどである。各種の方法を試みた結果、歪ゲージ歪計の平衡を取るための抵抗を既知量変化（約 10^{-7} strain を目標とした）させることが最善であることがわかった。この方法によっても電流変化による温度変化は完全に零とはならないが、記録を見る限りでは無視して差し支えない。このほかに可変抵抗を動かしたときに容量の平衡が僅かにくずれるのではないかと心配されたが、これも問題がないことがわかった。

った。なお、これは配線上の問題であるが、歪ゲージと増幅器間の配線は、ポリエチレンを絶縁に用いているため絶縁抵抗が高い同軸ケーブル(1.7C-2V)を4本束にして用いている。この時のケーブルの長さは誘導雑音を防止するうえからなるべく短いことが望ましい。そこで3mより長くしないようにし、漂遊容量が変化しないようするため束にしたケーブルが動かないように固定して用いることとした。

感度検定は初期の頃は2~3ヶ月に1回の割合で実施していた。しかし、感度の変化が初期に想定した値より少ないことがわかったので、最近は4ヶ月に1回程度の感度検定を実施したに過ぎない。なお、1回の検定値は数回のダイアルの変化を行いその平均とした。検定の状況を見るために、過去に増幅器の故障がなく途中で感度の変更を行わなかつたもののうちから、観測地点⑦の2個の歪ゲージ歪計の番号SG-17およびSG-18を選んだ。観測期間の経過とともに感度変化の様子をFig. 5.2に示す。図中には感度とその標準偏差を示している。この2個の歪計は期間中に約±10%の感度変化を起こしたようである。このような感度変化の原因は歪ゲージ歪計の側ではなく、ほとんどが増幅器側にあると思われる。その原因は歪ゲージ歪計に供給する3.2kHzの水晶発信器の出力電圧または周波数の変化、A-CとD-C増幅器の増幅度の変化およびA-C増幅器のフィルタの定数変化などが予想される。

数多くの歪ゲージ歪計の感度検定を実施するうちに気付いたことは、一般にドリフトの小さい歪計ほど感度変化が小さい傾向があるようである。反対にドリフトの大きい歪ゲージ歪計ほど一般に感度変化が大きい。この原因として考えられることは、増幅器のダイナミックレンジの不足にあるのではないかと思われる。つまり原因はA-C増幅器の内部抵

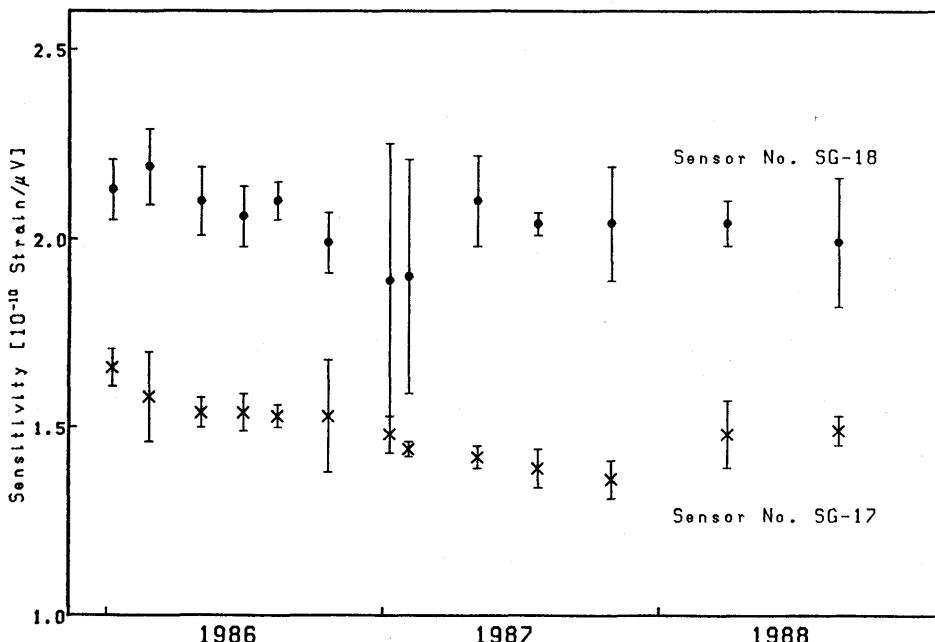


Fig. 5.2. Sensitivity calibrations of strain-gage strainmeters.

抗が大きく最大出力電圧が 3V (≈ 9 Vpp) と小さくなるためではなかろうか (Table 4.3, 参照)。増幅器に供給している電源電圧は ± 12 V であるから、理屈の上では最大出力電圧を 7V (≈ 20 Vpp) までは容易にとることができるのである。出力電圧を増加するためには、出力段の IC を電力增幅用に変更すれば解決できることになる。このためには増幅器の供給電源も現在より増強することが必要となる。しかし、増幅器を大きくして取り扱う電力を大きくすることは発生する熱量も大きくなることであり、観測坑内の温度上昇につながるために好ましくないと考えられる。

現状では歪ゲージ歪計自体がドリフトを起こす真の原因はまだわかつていない。想像するに、金属あるいはテフロン板の壁面への接着の仕方に問題があるらしい。歪ゲージ歪計のドリフトが非常に大きいときには接着をやり直すとかなり改善されることが多く、このことから接着に主要な原因があると考えられる。

5.2.2 測定値に対する補正

上述のような感度検定法を用いると、歪ゲージセンサ部の感度検定を全面的に歪ゲージのメーカに依存することになる。歪ゲージの抵抗変化を測定し歪値を求めるためにはゲージ率 K が必要であるが、この K はメーカから与えられる数値を信用するほかない。ゲージ率は前述 (4.2 参照) のように NAS-942 規格に準じている。この規格の K 値は 10^{-6} のオーダーより大きな歪により求めたもので、いま我々が使用する歪のオーダーと比較して 4 衡以上の差があり、式 (4.5) の第三項の影響が気になるところである。この問題については今までのところなにも解決策を持っていない。

歪ゲージの K 値を求めるときには、製作された一つのロット毎に一定数の抜取り検査を行うように決められている。その K 値の偏差は $\pm 1\%$ 以下とされている。この K 値を求めるときには、あらかじめ形状と外形寸法が定められたスチール製ビーム材に製品の歪ゲージを接着して測定することになっている。歪ゲージの感度方向は主測定方向（縦感度と呼ぶ）であるが、それと直角の方向（横感度）にも幾分感度がある。この原因はゲージを格子状にするための折り返し部分があるためで、横感度は厳密には零とはならない。このためスチール材（ポアソン比 0.3）とポアソン比の異なる岩石の歪測定の場合には、横感度の補正が必要になると考えられる。しかし、一般にゲージの有効長が 5 mm より長い箔ゲージの横感度は縦感度の 0.2% 程度である（渡辺, 1981）。したがって地殻歪を $\pm 1\%$ の精度で求めようとするとき、横感度の補正是あまり問題にならない。

もう一つの大きな問題は接着剤を用いて歪ゲージを岩石に接着しているため、岩石の歪がそのまま歪ゲージに伝達されるか否かの問題である。これは歪ゲージの K 値を測定するときにすでに一回接着を行っていることから、これと同じ程度に接着が管理されていると考えるほかない。

このほかに、この歪ゲージによる岩石歪の測定には、防湿のために歪ゲージと岩石表面の間に挿入した薄い金属板 (4.5 参照) による岩石歪の減衰が問題である。通常の歪ゲージを用いた歪測定においては接着は一度だけ行われるが、われわれの場合は防湿のため二回行っている。したがって、岩石に生じた歪が一旦防湿用の薄い金属板に伝達され、さらにこの薄い金属板から歪ゲージに伝達されることになる。この場合、Table 3.1 の岩石のヤング率 ($0.337 \sim 4.90 \times 10^{10}$ Pa) に比較して銅板のそれ (13×10^{10} Pa) は数倍から数十

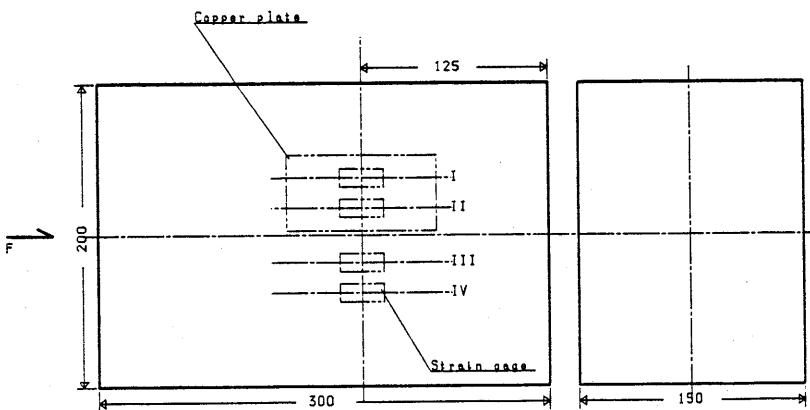


Fig. 5.3. Dimensions of a test piece for copper sheet attenuations.
F: direction of compression.

倍と非常に大きいだけではなく、さらに接着層の影響も加わることとなる。この問題の理論的な取扱いはかなり困難であろう。

このようなことから、岩石サンプルについて、銅板の厚さの違いによる歪の減衰をあらかじめ室内実験により求めておき、その結果を実際の測定値の補正に用いることを考えた。まず、鋸山観測所の観測坑内より Table 3.1 のサンプル No. 1 と 2 と同種の岩石柱 ($30 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$) を切り出した。おそらくヤング率は Table 3.1 のサンプル No. 1 と 2 のそれと同じであろう。サンプルの一つの側面 ($30 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$) に Fig. 5.3 にみるよう中心線をはさんで対象の位置に歪ゲージを 4 個接着する。このとき図中の記号 I と II の位置の歪ゲージには、最初の実験時は銅板なしで、2 回目以後は長さ 10 cm 幅 5 cm の薄い銅板を挿入して実験することとした。一方記号 III と IV の位置の歪ゲージには銅板なしで接着をする。この各位置の歪ゲージと銅板の関係をまとめると次のようにある。

実験 1 回目：位置 I と II に銅板なし、位置 III と IV に銅板なし

" 2 回目：" 40 μm の銅板, " 銅板なし

" 3 回目：" 100 μm の銅板, " 銅板なし

実験 4 回目：位置 I と II に銅板なし、位置 III と IV に 100 μm の銅板

" 5 回目：" 銅板なし, " 40 μm の銅板

" 6 回目：" 銅板なし, " 銅板なし

このとき、実験 1～3 回目が終わった後、岩石柱表面を再研磨して実験 4～6 回目を行った。このように、実験 1～3 回目と実験 4～6 回目の違いは、位置 I と II および位置 III と IV の銅板の有無である。加圧方向は Fig. 5.3 の $15 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ の面全体に垂直に加えるようにする。加圧は歪量にしてほぼ $1 \sim 3 \times 10^{-7}$ strain とし、常にペン書き記録計によりモニタする。歪量は加圧を 10 回繰り返し、それを平均して求めた。このようにして得られた結果を Fig. 5.4 に示した。以上の様な実験を行ったため、銅板の厚さ零でも標準偏差が求められているのはこのためである。

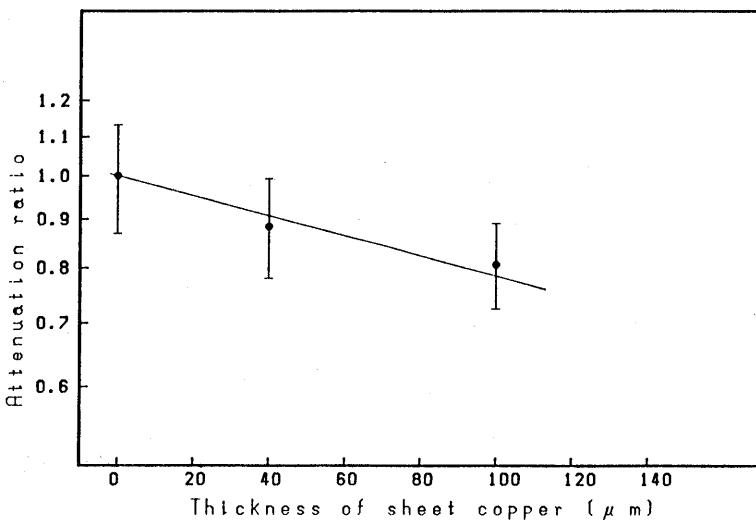


Fig. 5.4 Measurements of strain attenuation versus the thickness of a copper sheet.

歪の減衰量の比を D とする実験的に

$$D = D_0 \exp(-Bt) \quad (5.1)$$

の関係が認められる。ここに t は銅板の厚さ、 B は定数で、 D_0 は $t=0$ のときの値で $D_0=1.0$ とおく。また Fig. 5.4 における直線の勾配から $B=0.00207/\mu\text{m}$ を得た。坑内における実際の観測値は用いた銅板の厚さとともにこの関係によって補正されることが必要で、実際に観測坑内で防湿に最も好都合な $100\ \mu\text{m}$ の銅板を使用すると、観測値の 1.16倍することが必要であることがわかる。ヤング率が異なるサンプル No. 3~6 の岩石の場合にも同様な実験を行うことが必要であったが、この実験に必要な大寸法の標本が入手できなかったので実験を省略し、すべての観測値に 1.16 倍の補正を行うこととした。

5.3 観測

5.3.1 観測記録例

4章において述べたように、歪ゲージ歪計のデータはすべての高感度の A-D コンバータ ($1\ \mu\text{V}/1\text{ digit}$) を通して、パーソナル・コンピュータのフロッピー・ディスクかハード・ディスクに一時的に蓄えられ、最終的にはフロッピー・ディスクに 4 分間隔のデータとして蓄えられるようにしている。フロッピー・ディスクは 8 inch の 1 Mbyte のものを使用していたが、後に 5.5 inch の 1 Mbyte のものに変更した。このフロッピー・ディスク 1 枚には 15~20 日分のデータを収納することができる。

これらのデータの一つをプロッタによって画いたものを Fig. 5.5 に示す。これは Fig. 5.1 に示した観測地点②のもので、観測方向は NW-SE の坑道壁に水平に接着されたものである。これをみると地球潮汐が比較的小さい時期の記録であるが、気圧変化に極めて良く似た記録を示していることがわかる。気圧変化と僅かに違う部分は潮汐が含まれてい

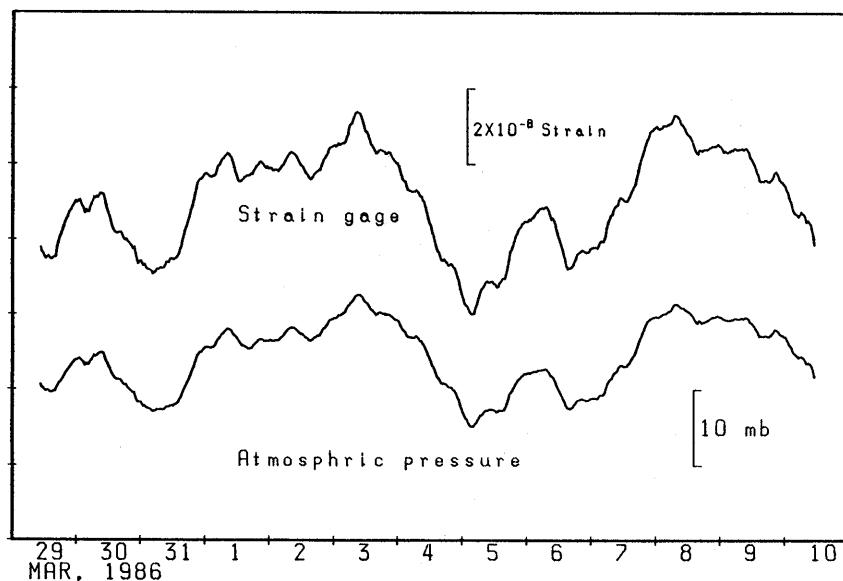


Fig. 5.5. An example of a record observed by strain-gage strainmeter No. 13 and atmospheric pressure.

るためである。このデータからわることは観測坑の坑道壁は気圧変化の影響を大きく受けることである。

上記の歪ゲージ歪計による観測データ Fig. 5.5 をみると、鋸山観測所に常備の伸縮計記録データに比べて、気圧変化の影響が格段に大きく、地球潮汐成分はむしろその中に埋もれて明瞭ではない。そこで歪ゲージ歪計によつて得られたデータにデジタルフィルタの適用を行うことにする（柳沢，1986）。ここでは1985年6月1日～7月1日までの30日分のデータを採用する。また同時比較のための伸縮計のデータは歪ゲージ歪計と平行な成分を採用することとする。伸縮計のデータはカセットレコーダに30分毎の値として記録されている。各々の観測データの記録における感度は、その 1 digit に対して、歪ゲージ歪計は 6.31×10^{-10} 、伸縮計が 5.97×10^{-10} の歪量である。まずははじめに、これらの歪ゲージ歪計と伸縮計のデータを用いて FFT 分析を試みた。その結果を Fig. 5.6 に示す。この結果をみると両者共に一日潮と半日潮成分が明瞭である。しかし 1/3 潮は明瞭でない。

このように周波数分布からみれば、地球潮汐成分が確実に含まれているので、デジタルフィルタを適用することにした。地球物理観測用に適した各種のデジタルフィルタを自動設計するためのコンピュータのプログラムが発表されている（斎藤，1978）。このプログラムはフィルタの通過特性、通過帯域の周波数の上限と下限、通過帯域と遮断帯域の最小と最大の減衰量を与えることによって自動的にフィルタを設計することができるようになっている。ここではチェビシェフ・フィルタを採用することとし、その通過帯域の上限と下限を周期で表わして 10～30 時間 (0.8～2.4 cycle/day) とし、通過帯域で 98% と遮断帯域で 2% の伝達量を与えて計算した。ここに設計されたフィルタの周波数と位相特性を Fig. 5.7 に示す。

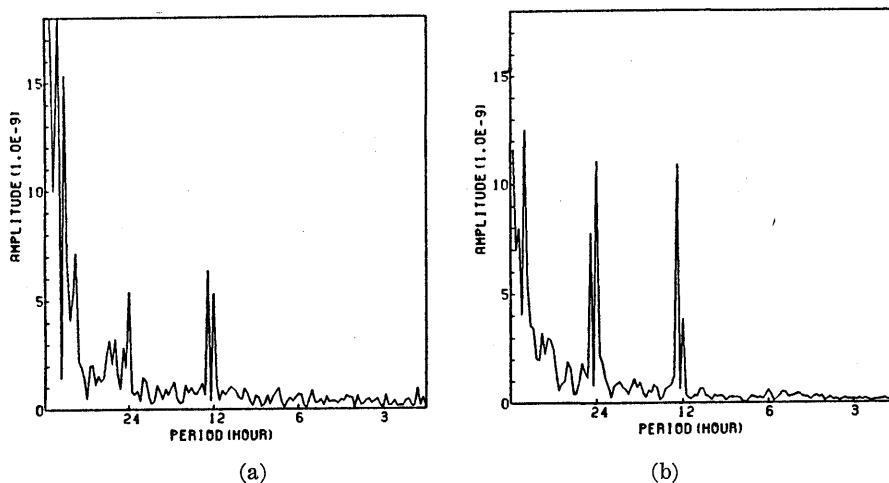


Fig. 5.6. Frequency characteristics of strain changes obtained by a strain-gage strainmeter (a) and an extensometer (b).

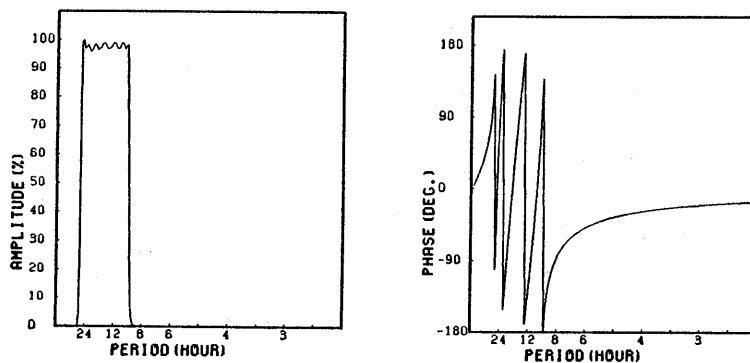


Fig. 5.7. Frequency and phase characteristics of Chebyshev's band-pass filter.

このようなチエビシェフ・フィルタを歪ゲージ歪計と伸縮計のデータに適用した結果を Fig. 5.8 に示す。なお、フィルタを観測値に対して適用するときに、時間軸について往復計 2 回適用して、その位相の変化を除いている。Fig. 5.8 によると、伸縮計の記録に比較して、歪ゲージ歪計の方が幾分 S/N 比が悪いようである。しかし、原記録に比べると両者はかなりよい類似性を示している。また、両者の振幅比は元来 1.0 になるべきであるが、実際には歪ゲージ歪計の方が小さく 0.6~0.7 程度であり、波形をみると各分潮成分ごとの振幅比がかなり異なっているようである。現在のところ、これらの不一致の理由はよくわからないが、この点について今後順次に解明を行ってみたいと思う。なお Fig. 5.8 の結果の最初と最後の部分にはデータ切断の影響を含んでいる。

5.3.2 観測データの解析

歪ゲージ歪計のデータに含まれる周波数分布は、伸縮計に比較して S/N 比が悪いものの、分潮成分を充分に含んでいることがわかった。そこで収集された長期データの解析を

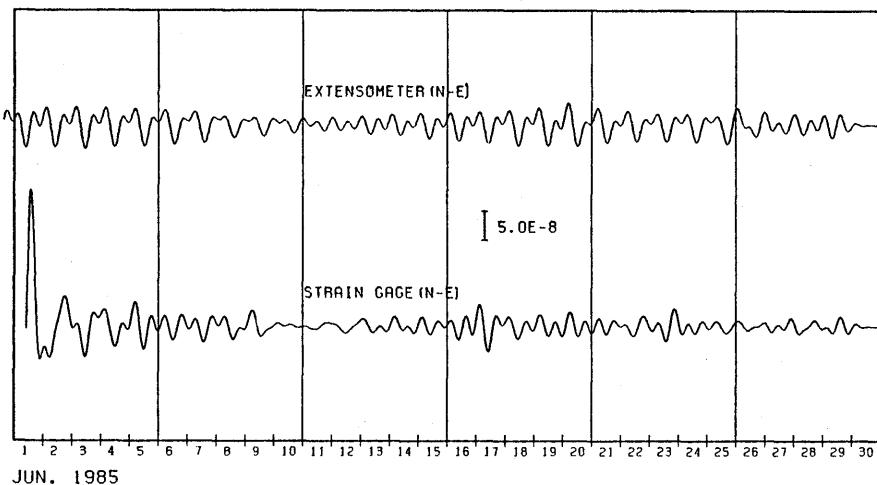


Fig. 5.8. Earth-tide strain changes computed with Chebyshev's band-pass filter.

行うこととする。一連のデータの解析は前記したフロッピー・ディスクを単位として行うこととする。今回の解析に使用したフロッピー・ディスクの数は25枚にのぼり、観測データの使用期間は1986年1月24日～1987年3月5日の1年余である。

いま、ある時刻 t における、観測値の振幅を $L(t)$ とする。それは

$$L(t) = At^2 + Bt + C + DP(t) + \sum_{i=1}^4 (F_i \sin \theta_i t + G_i \cos \theta_i t) \quad (5.2)$$

のように表わされる。ここに A, B と C はドリフトの係数、 $P(t)$ は時刻 t における気圧、 D は気圧係数、 F_i と G_i は潮汐の振幅の正弦と余弦、 θ_i はその角速度である。 i は分潮成分を表わすが、ここでは半日潮として M_2 と S_2 分潮を、1日潮成分として O_1 と K_1 分潮を用いることとする。

観測データのサンプリング間隔は4分であるが、補間を行って毎正時と30分の値をピックアップし、上記の式によって各数値を求めた。このとき、データにステップが含まれているかもしれないで、これを確かめるために BAYTAP-G プログラム (ISHIGURO & TAMURA, 1985; 石黒ほか, 1984) を利用して捜し、モニタの記録紙上より確かめて補正した。また、この BAYTAP-G プログラムを使用しているため、分潮データも得られている。式 (5.2) 各々の定数は最小2乗法により求められた。このようにして求めた結果のうち D の気圧係数および各分潮成分を Table 5.2 に示す。

Table 5.2 によると気圧効果の標準偏差が小さいことがわかる。このことは観測が大変よく気圧変化に対応していることを示している。これに対して潮汐成分の標準偏差は各分潮の数パーセント以下となって、比較的大きいことがわかる。

上記のように潮汐成分には、最小2乗法では式 (5.2) で示しているように4個の分潮が、BAYTAP-G プログラムの場合で15（プログラムのなかでデータ量より自動的に決まる）の分潮が求められている。ここで、2つの方法の比較のために最も振幅の大きな M_2 分潮を選択することにする。最小2乗法により求められた値 (Table 5.2) を Fig.

Table 5.2. Atmospheric pressure effects on the ground strain changes and tidal factors calculated from the strain-gage strainmeter data.

Obs. site	Sensor no.	Component	Obs. day	Pressure effect [10^{-10} strain/mb]	Earth tide (Amplitude) [10^{-10} strain]			
					M ₂	S ₂	O ₁	K ₁
①	SG-16	NW-SE Hor.	100	1.95±0.00	37.0±1.7	49.2±1.8	41.7±1.8	43.1±1.8
②	SG-13	NW-SE Hor.	353	1.85±0.00	20.3±1.4	26.9±1.4	36.5±1.4	45.8±1.4
	SG-14	NW-SE Hor.	359	6.23±0.00	52.2±1.5	38.3±1.5	47.7±1.5	59.9±1.5
	SG-15	NW-SE Hor.	103	2.98±0.00	75.5±2.9	62.1±3.0	78.1±3.0	96.1±3.0
	SG-19	NW-SE Hor.	351	3.92±0.00	13.5±0.3	15.2±0.3	16.5±0.3	11.8±0.3
③	SG-02	N - S Hor.	335	3.50±0.00	31.7±1.3	24.7±1.3	39.8±1.3	36.1±1.3
④	SG-07	E - W Hor.	331	6.40±0.00	30.6±2.6	58.1±2.7	58.8±2.7	61.1±2.7
	SG-08	E - W U-D	356	5.80±0.00	29.4±2.3	80.2±2.4	63.3±2.4	72.9±2.4
	SG-09	E - W Hor.	101	3.33±0.00	54.6±3.0	86.7±3.1	84.6±3.0	82.4±3.1
⑤	SG-10	E - W Hor.	81	1.22±0.00	22.3±1.3	37.5±1.4	34.8±1.4	24.6±1.4
	SG-11	NW-SE Hor.	82	2.35±0.00	33.3±1.4	42.3±1.4	30.3±1.5	47.5±1.5
	SG-12	N - S Hor.	78	6.35±0.00	61.3±1.9	42.6±1.9	57.4±2.0	69.2±2.0
⑥	SG-03	NW-SE Hor.	349	7.06±0.00	50.2±3.2	66.4±3.3	85.1±3.3	100.2±3.3
	SG-04	NW-SE Hor.	353	1.09±0.00	23.9±1.8	34.0±1.8	45.3±1.9	49.6±1.9
⑦	SG-17	N - S Hor.	360	8.40±0.00	27.3±0.8	28.4±0.8	19.2±0.8	23.4±0.8
	SG-18	N - S Hor.	343	1.25±0.00	32.4±0.8	55.0±0.8	35.3±0.9	38.2±0.9
	SG-20	N - S Hor.	265	7.68±0.00	15.7±0.7	25.5±0.7	17.7±0.7	23.4±0.7
⑧	SG-05	E - W Hor.	339	29.5±0.00	38.1±2.9	53.7±2.9	69.9±2.9	87.8±2.9
	SG-06	E - W Hor.	358	18.9±0.00	28.4±2.0	60.4±2.1	54.8±2.1	50.2±2.1
⑨	SG-22	E - W Hor.	358	3.62±0.00	25.9±1.3	30.4±1.3	30.8±1.3	27.1±1.3
	SG-23	E - W Hor.	349	3.56±0.00	28.0±2.1	39.5±2.1	51.9±2.1	53.6±2.1
⑩	SG-27	N - S Hor.	221	4.32±0.00	31.5±1.8	68.7±1.8	41.8±1.8	55.8±1.8
	SG-28	N - S U-D	210	12.1±0.0	19.2±0.7	35.1±0.7	27.6±0.7	23.4±0.7
⑪	SG-01	E - W Hor.	234	10.2±0.0	27.6±1.5	61.0±1.5	32.4±1.5	49.9±1.5
	SG-09	E - W U-D	228	9.59±0.00	28.1±1.1	119.0±1.1	48.8±1.1	63.6±1.1
⑫	SG-15	N - S Hor.	233	4.55±0.00	16.8±1.6	57.9±1.6	51.8±1.7	58.5±1.6
	SG-16	N - S U-D	232	23.8±0.0	35.0±2.0	51.2±2.0	66.3±2.1	77.3±2.0

5.9(a) に、BAYTAP-G プログラムにより求められた値を Fig. 5.9(b) に示す。解析プログラムの問題として、2つのプログラムによって解析された値を比較するとかなりの差があることがわかる。よく一致しているのは①～⑨の各観測地点であるが、あまりよい一致を示さないのが⑩～⑫の各観測地点である。

このようにみると計算結果が一致しない地点は気圧効果の大きな地点とほぼ同一点である。そして、僅かの例外を除いて、いずれも BAYTAP-G プログラムの値のほうが小さな数値を示している。このように BAYTAP-G プログラムの場合には気圧効果が極めて大きい場合に問題が残るようである。別な言い方をするならば、BAYTAP-G プログラムがその威力を発揮するときは S-N の良いときであると思われる。

一つの坑道に対向して置かれた観測地点が2組あり、それは③と⑦および⑧と⑪である。地面が傾斜している方向に、歪が大きくなる傾向がみられる。これは以下で述べる気圧効果のときとも同様であって、後に詳しく論議するが、前報（柳沢、1987b）の結論か

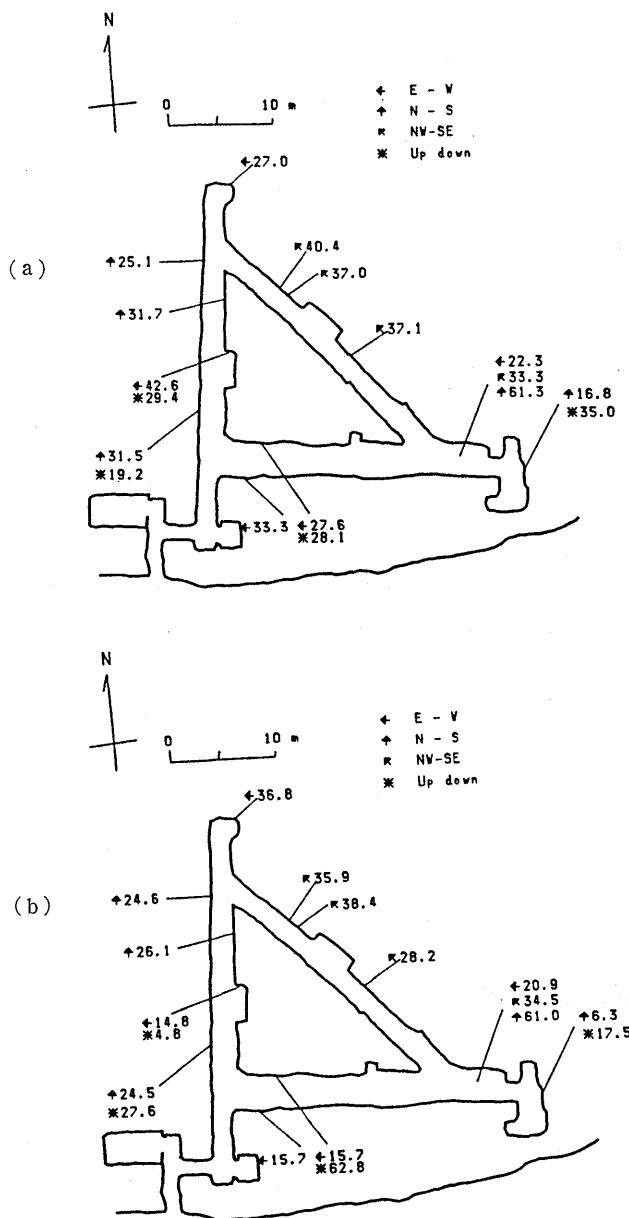


Fig. 5.9. Comparison between amplitudes of M_2 tide observed from harmonic analysis (a) least square method and (b) the BAYTAP-G programs. Unit: 10^{-10} strain.

らも妥当であることがわかる。

5.3.3 気圧効果

気圧変化による歪変化の最小2乗法による解析値 (Table 5.2) を各観測地点ごとにま

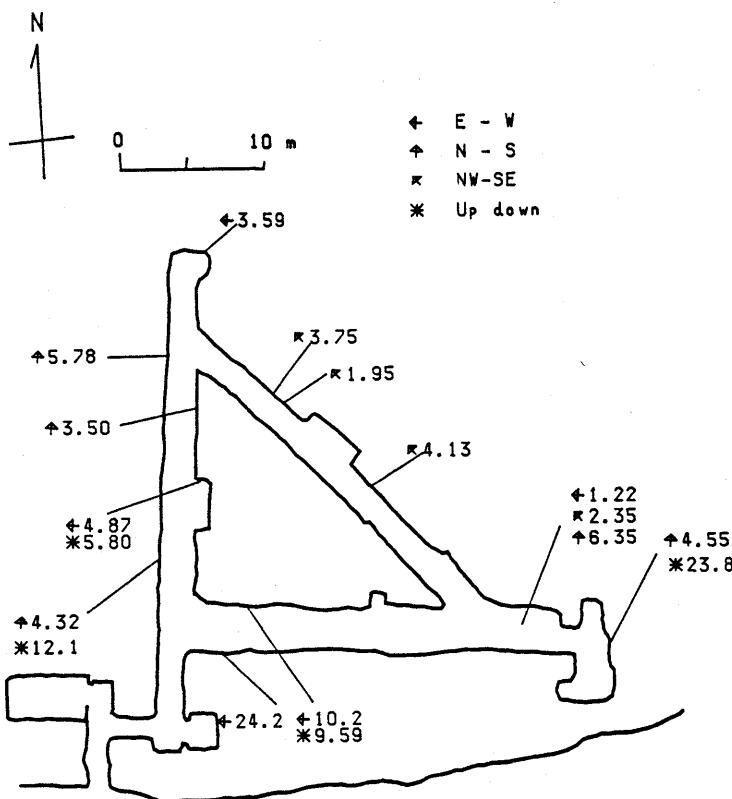


Fig. 5.10. Observed strain responses to atmospheric pressure changes.
Unit: 10^{-10} strain/mb.

とめて Fig. 5.10 に示す。この図を観測坑の南から北を見ていくと、E-W 坑道付近一帯に歪が大きく、山の尾根に近づく、すなわち北に行くに従って歪が小さくなることがわかる。まず、歪の E-W 成分についてみると、S-N 坑道との分岐点の近くにある E-W 坑道の南側観測地点⑧が 24.2×10^{-10} strain/mb、同じく北側観測地点⑪が 10.2×10^{-10} strain/mb、N-S 坑道の中間にある観測地点⑩が 4.87×10^{-10} strain/mb と同坑道の北端にある⑨が 3.59×10^{-10} strain/mb と順次に減少する傾向にある。しかし、E-W 坑道床面の観測地点⑥は 1.22×10^{-10} strain/mb と壁面に比較してかなり小さいことがわかる。N-S 成分についてみると、E-W 坑道東端の観測地点⑫において 4.55×10^{-10} strain/mb、N-S 坑道に沿って観測地点⑩が 4.32×10^{-10} strain/mb、③が 3.50×10^{-10} strain/mb と⑦が 5.78×10^{-10} strain/mb となつていて、この N-S 成分は E-W 成分と異なって大きな変化はしていない。坑道床面の観測地点⑥は 6.35×10^{-10} strain/mb を示し、他の N-S 成分に比して多少大きいようである。NW-SE 成分は東南から西北方向に観測地点⑥が 4.13×10^{-10} strain/mb、①が 1.95×10^{-10} strain/mb と②が 3.75×10^{-10} strain/mb となっている。また、坑道床面の観測地点⑥は 2.35×10^{-10} strain/mb である。

観測坑のある山体の地形は Fig. 2.3 に示したようにほぼ東西に延びる尾根の南斜面に

ある。このことから、気圧効果が大きい E-W 成分においては土被りの厚さに対応して歪量の変化が著しいことが理解される。すなわち、E-W 成分の気圧効果は土被りが浅い所で大きく、土被りが深い所で小さくなる傾向にある。このほか坑道を隔てて対称的な位置に観測地点が設置されている⑧と⑪、および③と⑦の観測値が、それぞれ 24.2 と 10.2 および 3.50 と 5.78×10^{-10} strain/mb である。これは坑道上部の地形が関係しているものと推定される（柳沢、1987a）。

上下成分は E-W 坑道付近の 4 観測地点のみで観測されているが、観測地点④が 5.80×10^{-10} strain/mb、⑩が 12.1×10^{-10} strain/mb、⑪が 9.59×10^{-10} strain/mb と ⑫が 23.8×10^{-10} strain/mb となっている。これをみると、E-W の観測坑の東端がほかの 3 地点に比べてかなり大きい値を示すことがわかる。

以上の観測値を総括してみると、観測坑周辺の地形が歪量を大きく支配していることがわかる。それに加えて観測坑の空洞効果も無視できないと考えられる。なお、坑道の床および壁を含む論議は後の章でする予定である。

5.4 歪ゲージ歪計特有の観測例

5.4.1 小形低気圧の通過に伴う歪変化

1987年3月19日12時から20日12時までの約24時間に小形低気圧が房総半島上を通過した。このとき鋸山観測所における気圧の低下量は約 20 mb、雨量は 48 mm で風もかなり激しかった。このときの気圧変化の形が極めて特徴的であり、これに伴う歪変化の様子を明らかにすることは気圧変化という外力に対して観測坑道付近の地殻がどのような応答を示すか興味深い問題である。フロッピーディスクの記録をプロッタによってまとめて Fig. 5.11 に示す（柳沢、1987b）。

Fig. 5.11 に見るように、この観測データについては式 (5.2) の潮汐成分は小さいので無視して

$$L(t) = At^2 + Bt + C + DP(t) \quad (5.3)$$

として、最小2乗法により係数 A～D を決定する。解析の結果は各観測地点ごとにまとめて Fig. 5.12(a) に示す。同時比較のため、長期観測による気圧効果 Fig. 5.10 を再び Fig. 5.12(b) として再録する。観測を方向成分別にみると E-W と NW-SE 成分についてはかなりよく一致しているが、N-S 成分はすべての観測地点において長期観測のほうが 3～10倍も大きな値を示している。本来一致すべきものがこのように異なった原因については、低気圧の位置によって観測坑のある山体の傾斜が異なることが原因の一つかもしれない。あるいは観測期間の差、降雨や地下水位の影響なども考えられる。いずれにしても、この様な短期の気圧変化のデータを集め、その上で詳細な論議をすることが必要であると思われる。

5.4.2 地震時のステップ変化

1984年9月19日2時2分、房総半島沖の経度 $141^\circ 33'$ 、緯度 $34^\circ 3'$ に M6.6 の地震が発生した（気象庁、1985）。この地震は鋸山観測所から東南方約 70 km に震央が位置し、震源の深さはおよそで 13 km ある。このとき観測所常置の傾斜計、伸縮計および歪ゲー

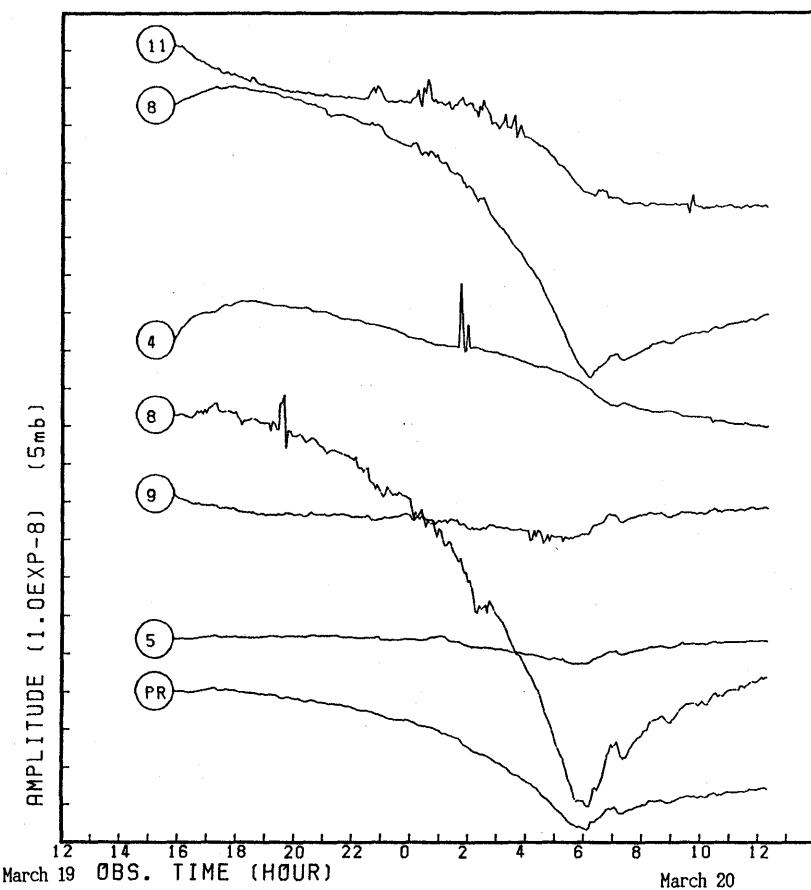


Fig. 5.11. Example records of strain-gage strainmeters observed for the period of March 19~20, 1987. Numerals indicated in ○ are observation point numbers; PR shows the atmospheric pressure changes.

ジ歪計に共通して地震時の変化が記録されたので紹介する。常設のセンサとしては、水管傾斜計2成分、伸縮計3成分と各々の伸縮計にその固定端から9mと17mに中間検出点があり、計11個の信号の記録が得られる筈であるが、そのうちたまたま1個（伸縮計NW-SE成分の9m）が故障を起こしていたので、実用になる記録は計10個となる。地震時のステップはこの10個すべてに記録された（Fig. 5.13；柳沢，1984）。

一方、地震時に同時に作動していた歪ゲージ歪計はNW-SE坑道観測地点①と②の合計4個である。このときの記録をFig. 5.14に示す。これらの歪ゲージ歪計と平行している伸縮計NW-SE成分から予想すると、対応するこれらの歪ゲージ歪計データは記録紙全幅のほぼ1/10程度の大きさになってもおかしくない。しかし、実際には歪ステップは歪ゲージ歪計データには記録されなかった。このように、歪ステップが常設の傾斜・伸縮データには出現して、歪ゲージ歪計データには発生しなかった理由は何であろうか。考えられる理由はつぎのようである。

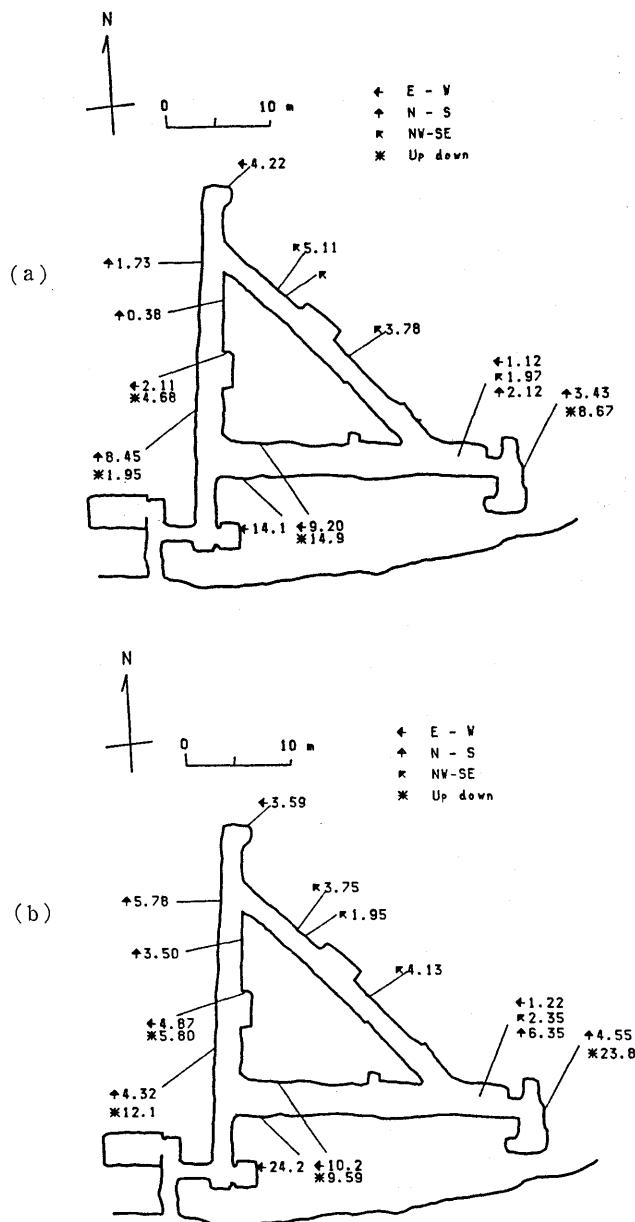


Fig. 5.12. Comparison between the effect of atmospheric pressure observed (a) for the period of March 19~20, 1987 and (b) during the period from January 1986 to March 1987.
Unit: 10^{-10} strain/mb.

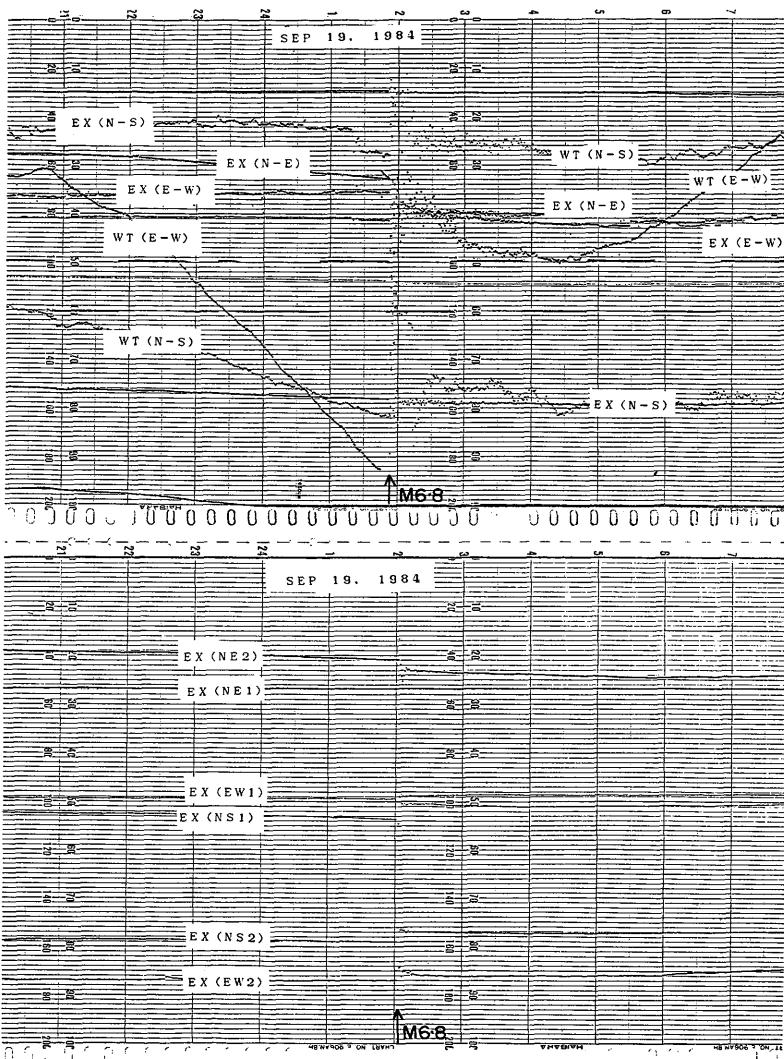


Fig. 5.13. Tilts and strains observed before and after the earthquake of $M6.6$ occurring on September 19, 1984 off the Eastern Boso Peninsula. WT's indicate floating type water-tube tiltmeters and EX's extensometers.

- a) ステップは傾斜・伸縮計ともに機械的部分が地震の振動によって生じたガタではなかろうか。
- b) たとえ歪ステップが実際に発生したとしても、それは歪ゲージ歪計に検出されないような、 1×10^{-9} より小さいものと考えられる。
- c) 傾斜・伸縮計のステップは事実であると仮定すれば、歪ゲージ歪計の設置場所ではたまたまステップが発生しなかったことになる。このことはステップが岩盤の割れ目などで生じる可能性を示唆する。

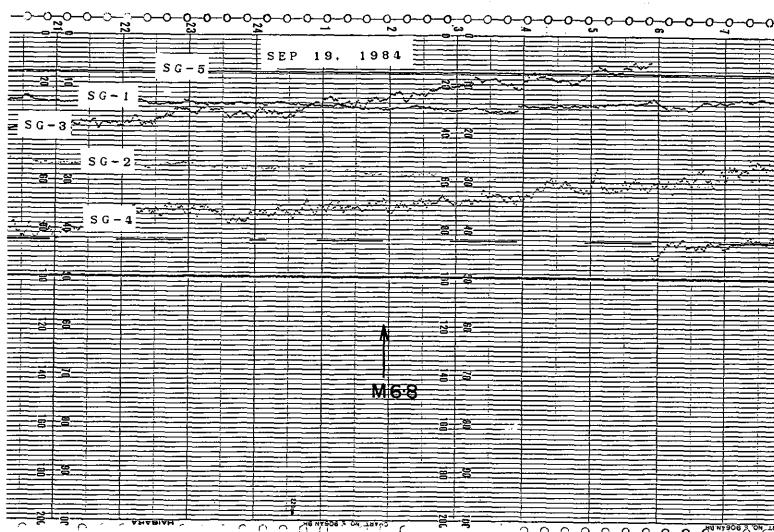


Fig. 5.14. Strain observed by strain-gage strainmeters before and after the earthquake of $M6.6$ occurring of September 19, 1984 off the Eastern Boso Peninsula.

実際、歪ステップを安易に地殻内に発生する自然現象と考える傾向があるが、この問題については今後とも注意深く観測を続けてゆく必要があると思う。

6 章 鋸山地殻変動観測所の溶融石英管伸縮計の多測定点化

6.1 溶融石英管伸縮計の構造と観測方式

6.1.1 伸縮計の概要

伸縮計による地殻歪の測定原理は、地殻の表面の岩盤に A と B の固定台 2 個を作り、片方の固定台 A (以下で固定端と表わす) に標準尺を固定し、この標準尺の先端と他方の固定台 B (以下で測定端と表わす) の間の距離の伸縮を測定するものである。鋸山観測所の伸縮計は1959年観測所の開所時から設置されている。以来度重なる改修が加えられてきた。これらの事柄については柳沢 (1983a) が詳しく記述している。

鋸山観測所の伸縮計の標準尺は外径 25 mm, 肉厚が 2.5 mm, 長さ 2 m の溶融石英を使用し、これをすべて溶接して全長 25 m の標準尺としている。この伸縮計の写真を Fig. 6.1(a) に示す。標準尺の材料としては周囲の温度変化の影響を少なくするため、溶融石英管が用いられるている。溶融石英の線膨張係数は $5.4 \times 10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ (伴, 1974) であるから、溶接などの加工歪が加えられているとはいっても、全長に対して溶接部分は短いため、標準尺の温度係数はほぼこれと同じであるとみて差し支えないと思われる。標準尺の材料に対するもう一つの問題点は、長さの永年変化であり、この点に関しては伸縮計として基本的に重要なことにもかかわらず、標準尺の長さが 25 m という長い尺の検定であるため、これに関するデータが得られていないのが現状である。

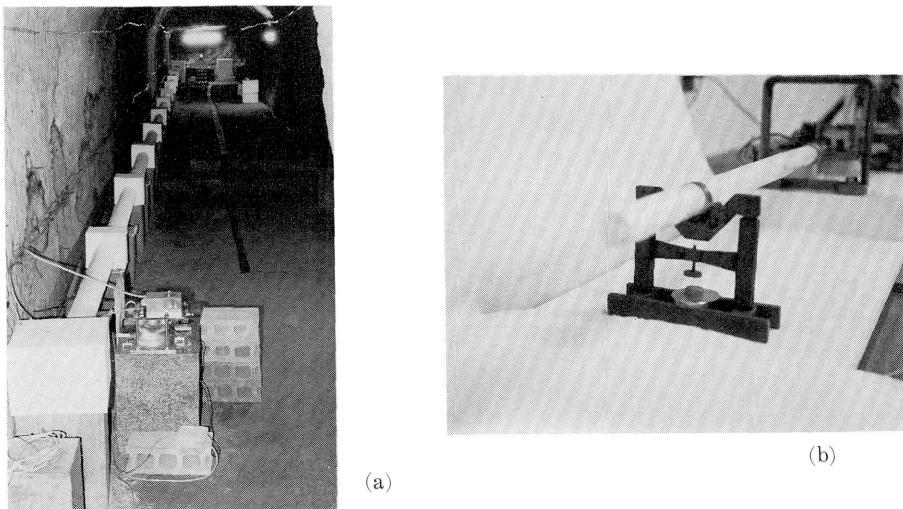


Fig. 6.1. A silica-extensometer of the Nokogiriyama Crustal Movement Observatory.
(a) The E-W component and (b) supporting mechanism by an inverted double-pendulum.

標準尺を地殻に固定するための固定台の材料はコンクリート柱が用いられている。永年変化や地震等の強い振動に耐えるために、地表面上の長さに比べ地中に埋設している部分の長さを同じ程度あるいはそれ以上にしてある。標準尺を支持するための中間支持台は固定台に準じて作製してある。標準尺は管径が 25 mm と太いため、その支持間隔を 2 m にしてある。支持台上で標準尺を支持するメカニズムとしては Fig. 6.1(b) に見るように二重倒立振子が用いられている。この二重倒立振子は比較的軟かいバネ材が使用されていて、標準尺と同一方向に自由に抵抗なく動くことができるが、直角方向にはほとんど動かない。これと同様の形式を BLAYNEY & GILMAN (1965) が用いている。

伸縮計の配置は Fig. 6.2 に示すように E-W 成分（設置方位 N93.0°E）、N-S 成分（N3.0°E）そして NW-SE 成分（N42.0°W）の 3 つの成分からなっている。さらに、1984 年 3 月より伸縮計の固定端から 9 m と 17 m の距離の点にそれぞれ中間測定点を増設した（柳沢、1987b）。これにより、伸縮計の観測データは 1 成分に、既設の測定端と、中間測定点 2 個の合計 3 個となり、したがって 3 成分の総合計 9 個のデータが得られることになった。伸縮計の観測設備を各成分の名称を含めて Fig. 6.2 に示してある。各伸縮計の観測値は固定端から①、②および③と記号を付けて表わすこととする。

6.1.2 センサおよび記録方式

伸縮計の測定端または中間測定点において標準尺と固定台あるいは中間測定点の間の変位を電気信号に変換するためトランスデューサを用いる。鋸山観測所においては、これまでにトランスデューサとして、光学的方法、コンデンサ、差動トランスや磁気センサ等が用いられてきた。このように多種のものが試みられているが、いずれにしても標準尺と測定端の間は非接触であることが必要である。感度としては 10^{-10} m 程度の変位を電気信号に変換可能なことが必要であり、当然のことながら電子雑音もこれと同程度に低いことが

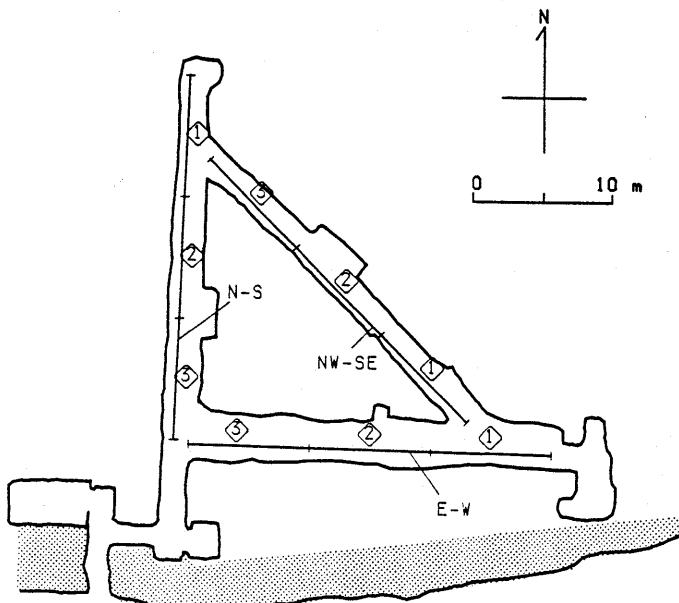


Fig. 6.2. Plan of the Nokogiriyama Crustal Movement Observatory. ①, ② and ③ indicate the location of three parts of the extensometer.

要求される。それとトランスデューサは高い信頼性と、多い湿度中で長寿命であること、万が一故障の場合には代替用の新品と交換が容易にできることが必要である。このような要求に対して、差動トランジストが優れているといえるが(柳沢, 1971), 感度が高い割に部品数が少ない点と簡便という点から磁気センサが主として選ばれている。ここに使用されている磁気センサは初期のものを除いてすべての商品名はマグネセンサB3(ソニー社)である。

測定端の機械的構造は現在の油壺観測所にも同様の形式のものが設置されているが、これは測定端におけるセンサの感度検定の遠隔操作が可能になるように考案されたものである。パルスモータに歯車を介して直結した差動ねじにより顕微鏡用のステージを利用して微小変位を与えるようになっている。このステージには磁気センサの検出ヘッドが取り付けられていて、パルスモータに与えるパルスの数に対応した微小変位が検出ヘッドに生じるよう設計されている。

測定端において変位を電気信号に変換するトランスデューサとして磁気センサが採用されていることはすでに述べた。この磁気センサは比較的最近になって開発された高精度磁気信号検出器であって、変位に対応して磁界の強さが変化し、磁界の強さに比例した直流出力電圧を外部増幅器なしで容易に取り出すことができる。構造は発磁体(マグネット)と検出ヘッド(ディテクタ)の相対位置を電気信号として読み出すものである(堀, 1973)。いま Fig. 6.3 に示すように、発磁体が N と S に磁化されているとき、この方向が感度方向(X 軸方向)であり、検出ヘッドの表面と平行に Y 軸、これから遠ざかる方向に Z 軸をとる。この Z 軸方向における検出ヘッド面と磁石間の距離をクリアランスと称して、このクリアランスを通常 0.5~1 mm 程度にして使用する。このクリアランスの変化と、

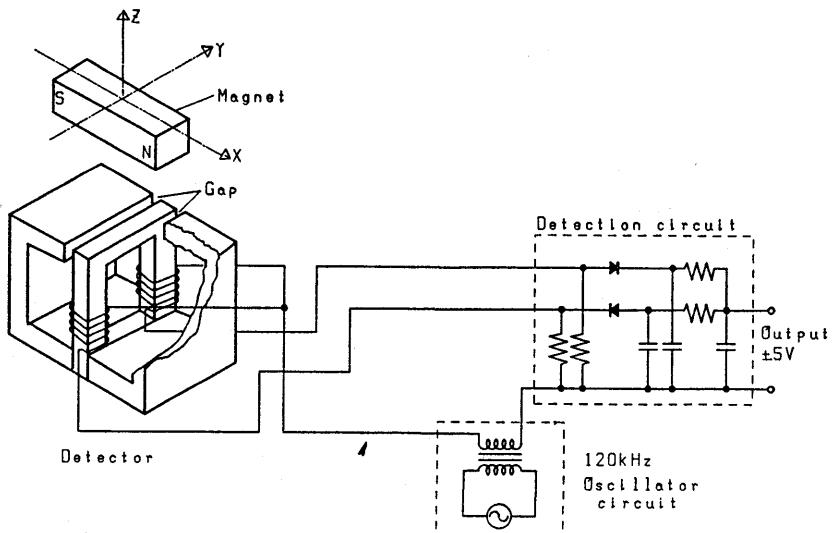


Fig. 6.3. Principle of a magnetic sensor (after HORI, 1973).

Y 軸方向の検出ヘッドと磁石の相対位置の変化によって感度が比較的に大きく変わりやすい。このような変化が磁気センサを使用する上で大きな問題点である。特に地震動およびそのほかの原因により磁気センサが Y または Z 軸方向に位置変化が生ずると、感度変化が起こることに注意しなければならない。このように差動トランジストに比較して、一般に磁気センサが地殻変動関係の観測者から好まれない理由はこのような欠点があるからである。このように磁気センサを使用するときには、Y 軸と Z 軸方向の変位について厳重な管理が必要である。

磁気センサが優れていると思われる点は増幅器なしで感度が $10 \text{ mV}/\mu\text{m}$ とかなり高いことと、取扱いが比較的に簡便であることなどである。欠点は上記に示したことの他に、検出ヘッドの表面がアルミニウム製のため腐食し易いこと、検出ヘッドの巻線が極めて細く断線し易いことなどである。検出ヘッドの巻線の防湿の問題は最近の製品ではかなり改良されている。また、外部磁界変化による感度変化のデータが最近の磁気センサの取扱説明書には付けられているが、磁気センサの取り付け方向によっては磁気嵐などに対する注意も必要である。なお、磁気センサの材質の温度係数も比較的大きいと思われるが、恒温性の高い坑内測定においては、この点についての問題は比較的少ないと思われる。

観測データの記録方式は、1970年代前半まで主としてペン書きまたは打点式の記録計によって行われていた。1970年代後半頃からは A-D 変換器によりデジタル化し、カセットテープに記録する方式となり、打点記録計はモニタとしての役割を受け持つようになった。さらに、1980年代からは有線テレメタ方式によるデータ伝送が加えられ、毎定時に東京にある地震研究所までデータ伝送が行われるようになった。

6.1.3 感度検定の問題点

伸縮計の感度検定は、上述のように遠隔制御で行うことができるようになっている。し

かし、この設備は今まで積極的に使用されたことはほとんどない。その原因はパルスモータによる熱の発生にあった。2章においてすでに説明したように、観測作業などのため極く短時間の入坑が行われても坑内の温度は上昇し、旧に復するのに2~3時間以上を要する。これと同じように、一度でもパルスモータを使用して短時間で終了する感度検定を実施すると、パルスモータからの発熱で標準尺の長さに変化が生じ、原状に復するのに数時間以上を要することになる。このようにモータの発生する熱に悩まされたが、解決方法はモータを検出端から30cmも離せばよいことを経験している(坪川ほか, 1970)。しかし、同様な改造のためにはスペースなどの制限があり現状では不可能である。このため現在の感度検定法は発磁体は動かさずに検出ヘッドの動きをダイアルゲージで測定し、これに対応する出力電圧変化を求めることにより行っている。通常の検定作業においては、まずダイアルゲージの0μmの目盛りを検出ヘッドの電圧出力が0Vのところに合わせる。つぎにダイアルゲージの±100μmまたは±200μmの出力電圧を求めて、感度を計算する。普通はこれを数回繰り返して、平均値を感度としている。

1978年4月にかなり時間をかけて伸縮計の厳重な感度検定作業が行われ、3成分の感度もほぼ同一値に設定した。比較的定期的に感度検定が行われるようになった、1983年以後の感度検定の様子をFig. 6.4に示す。この図をみると磁気センサを地殻変動観測に使用するときの問題点が幾つか示されることがわかる。この図において○記号は新品の磁気センサをセットしたことを示している。この図からみて、この記号が必ずしも多くないが磁気センサの寿命が多湿の観測坑内では比較的短いことがわかる。実際に長くても3年程度である。この点についてはセンサの改良が行われ、1986年以降に設定した磁気センサは現

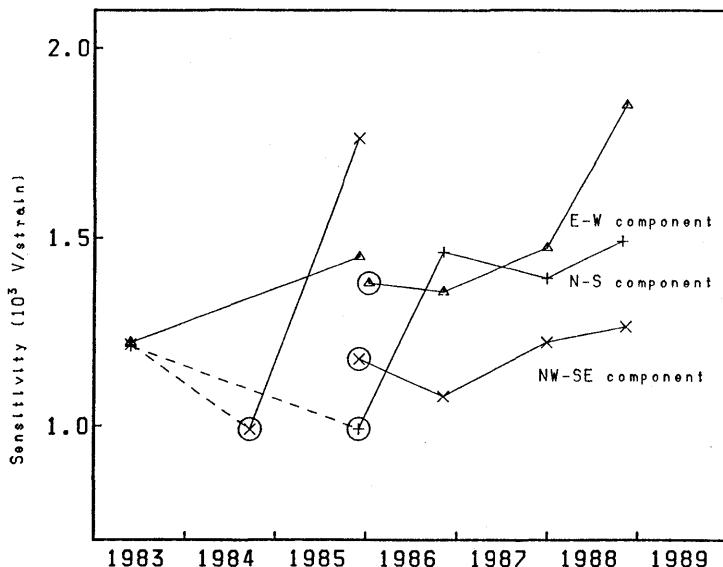


Fig. 6.4. Sensitivity calibration results of silica extensometers of the Nokogiriyama Crustal Movement Observatory. ○ indicate new magnetic sensors.

在でも動作を続けている。

またもう一つの問題点は、Fig. 6.4 に示すように感度の変化が大きいことで、それもほとんどの場合感度が上がることが多く、はなはだしい場合には1.5年で2倍と言う例もみられる。このように感度変化の経年変化が大きいため、1年に1回の感度検定では高精度の観測に十分でないことがわかる。さらに、磁気センサが故障した時点では、感度検定が不可能な場合がほとんどで、このためにも普段からの感度検定がぜひとも必要であることが痛感される。

このような実例として Fig. 6.4 の中の点線で示した場合がそれに相当する。例えば、1983年初めにかなりの時間をかけて3成分の感度をほぼ等しく合せることと感度測定が同時に行われた。しかし E-W, N-S と NW-SE の3成分の磁気センサは1985年終わりに不良となりすべて新品と交換した。N-S 成分はそれよりも早く 1984 年末頃にすでに交換している。この新品と交換する時、E-W と N-S 両成分は交換前に感度検定をしてから新品をセットすることができた。しかし、1984年の N-S 成分は磁気センサ不良状態が発見されたとき、すでに感度検定が不可能であるほど磁気センサの性能が悪化していたし、1985年の NW-SE 成分も同様であった。当然のことであるが前回の感度検定までは問題がないが、検定後の感度変化は次回の感度検定がないとこの間の感度を決めるることはできない。このような場合には過去の感度変化から感度の外挿で済ませてきたが、精密に歪観測をする今回のような場合には感度が決められないような状態を作らないことが重要である。したがって、このような観点にたてば、年間当たりの感度検定の回数を多くする方が好みしい。しかし、前述のように長時間にわたる検定作業のための坑内温度の擾乱はできるだけ避けたいという矛盾がある。

6.2 多測定点伸縮計の開発

6.2.1 多測定点伸縮計の必要性

歪ゲージ歪計により鋸山観測所の観測坑内における多点観測の結果を5章において記述した。詳しいことは次章で述べる予定であるが、歪ゲージ歪計と伸縮計の観測結果を比較すると（柳沢, 1987b），その観測値の間に大きな差異がみられる。比較に当たっては、個々の平行成分ごとに比較しなければならないが、まず全体的な傾向について論述することにする。気圧効果についてみると、歪ゲージ歪計が $1.2 \sim 24 \times 10^{-10}$ strain/mb であるのに対して、伸縮計は $0.14 \sim 0.76 \times 10^{-10}$ strain/mb となって、その比は 10 倍程度にもなる。また地球潮汐の M_2 分潮について、歪ゲージ歪計が $17 \sim 42 \times 10^{-10}$ strain であるのに対して伸縮計が $45 \sim 120 \times 10^{-10}$ strain もあり、その比は逆に 1/3程度となっている。

このように鋸山観測所の坑内というようなかなり狭い地域において、寸法の小さな歪ゲージ歪計とこれに比較して寸法の大きな伸縮計を用いて同じ歪を測定したときに、その対象が同じであるにもかかわらず観測値に格段の差が生じる原因は一体なんであろうか。このような差がセンサの寸法に起因するものであるのか、あるいは観測地域の地盤構造特有のものであるのかを確かめたいと考える。この原因を確かめるためには、歪ゲージ歪計測定に対応するように、短区間の伸縮を計測する必要がある。現在の伸縮計の全長は 25m で、たとえ中間測定点 (8~9 m) を設定したとしても、歪ゲージ歪計との対応をつけるこ

とは困難であると考えられる。そこで伸縮計の標準尺にさらに多数の中間測定点を付加することを考案した。最終的に、中間測定点を 2 m 間隔にして、伸縮計の一つの成分毎に既設の 3 個に新設の 10 個を加え、合計 13 個の歪計を取り付けることにした。このように一つの成分に 13 個もの多数の観測点を持った伸縮計であるから、ここでは多測定点伸縮計と呼ぶこととする。

棒形式の伸縮計の一般的な長さは 20~50 m であるが、なかには松代観測所のように 100 m に達するものもある（山岸ほか、1976）。現在までに用いられた最も短い伸縮計として、油壺観測所において 1 m のものが試みられている（HAGIWARA *et al.*, 1948；萩原ほか、1949）。油壺観測所観測坑において 8, 10 および 25 m の伸縮計 3 成分のごく近くに平行して設置された 1 m 伸縮計 7 台により坑内の歪分布を求めるための比較観測が行われた。しかし、当時の伸縮計の標準尺の支持方法としてローラーが用いられていたため、ローラの摩擦に起因して 1 m の伸縮計の 7 個の観測値がすべて長い伸縮計に比較して観測値が小さいという結果が得られた。

これとは別に伸縮計に中間測定点を付加して歪観測することはかなり多くの観測所において行われている。例えば山内ほか（1981）は三河観測所において 40 m 伸縮計の各成分に降雨による歪変化の影響を調査するため中間観測点を付加している。また山内（1987）は同じ伸縮計に、10 m ごとの中間観測点を加えて坑道床面の動きを調べている。このほか、断層の挙動を見るため 15.5~18.5 m の伸縮計の 3 成分にそれぞれ中間観測点を 4~5 個付加している（LATYNINAY *et al.*, 1968）。田中ほか（1972）は六甲断層を中心としてその両側にいくつかの中間測定点を付加した伸縮計を配置した。全長 8 m と 12 m の伸縮計に 4 m 間隔の中間点を配置して、断層破碎帯付近の地球潮汐の異常の調査を行っている。

このように伸縮計に中間測定点を付加する目的は地殻の微細な歪変化を明らかにすることにある。しかしこれらの伸縮計のうち、中間測定点相互の間隔は最短で 4 m であった。しかし、われわれの場合にはこの間隔を半分の 2 m とした。これはさらに細密な地殻歪の観測を可能としようと考えたからである。しかし、25 m というような比較的長い伸縮計に 2 m ごとの中間点を設定すると、変位を電気信号に変換するトランスデューサの負担が増加することになり、さらに感度検定も高精度が要求されることになる。その理由は信号の強度が伸縮計の長さに原則的に比例するからである。例えば 8 m の伸縮計に 2 m の中間地点を設置すると、地球潮汐などの信号は伸縮計の長さに比例することから、信号強度は 1/4 にほぼ 1 衍下がるのである。このような S/N 比の悪化をカバーするためには、より高感度のセンサを選定することが必要となる。センサとしていくつかの問題があることを別にしても、総計 39 個というような多数のセンサの保守と管理面も考慮しなければならない。感度検定については後に説明するような特別な工夫を加えることにより解決している。

6.2.2 機械的設備と感度検定機構

鋸山観測所の開設当初の溶融水晶管製の標準尺は外形が 7 mm と細く、支持台は 1 m 間隔で設置してあった。後に標準尺が溶融石英製となり外径が 25 mm と太くなつたため、支持台の間隔が 2 m と広くなり、支持台が一つおきに余ることになった。この観測

所の伸縮計は 25 m であるから、総計12個の支持台が余ったことになる。上記のように、このうち2個は中間測定点としてすでに使用してあった。したがって、当時残り10個の支持台が余っていたわけである。今回はこの残された10個の支持台のすべてに中間測定点を

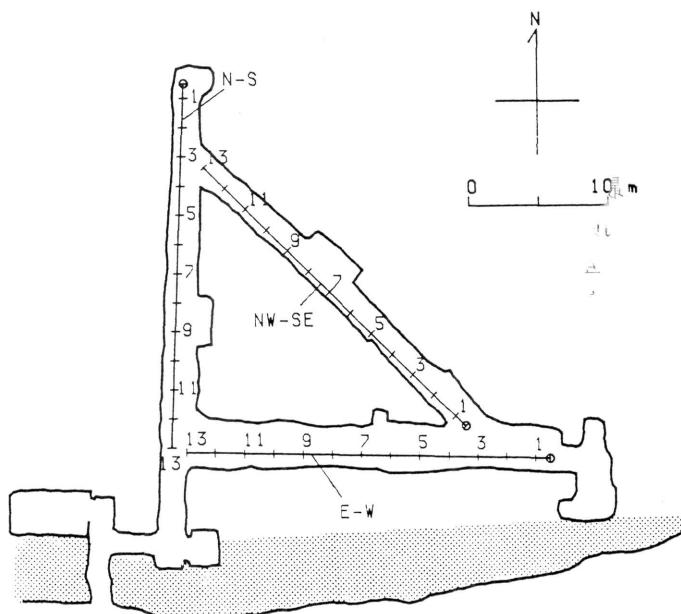


Fig. 6.5. Plan of observation vault in the Nokogiriyama Crustal Movement Observatory. Numerals indicate magnetic sensors.

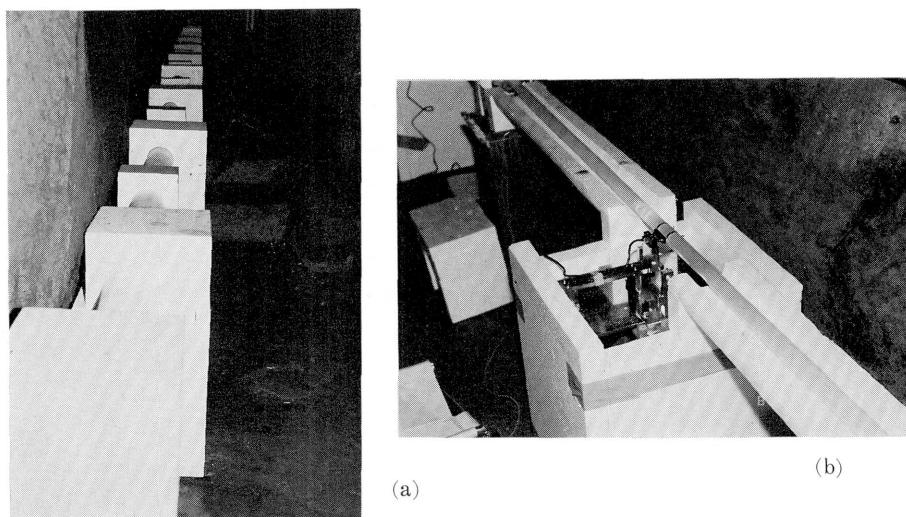


Fig. 6.6. Multi-sensored silica extensometer of the Nokogiriyama Crustal Movement Observatory. (a) The NW-SE component and (b) the measuring mechanism and standard bar of the extensometer.

増設したわけである。したがって、一成分の伸縮計ごとの中間測定点の数は既設の測定端と中間測定点が3個、それに新たに10個の中間観測点を併せて合計13個となり、三成分の総合計で39個のデータが得られることになる。この39個の伸縮計の観測点の配置をFig. 6.5に示す。この図中において伸縮計の傍らに付けた数字は磁気センサの番号である。各成分について、センサ番号の内No. 13は最も早くから設置されていた測定端で、No. 5とNo. 9は後に増設された中間測定点、そのほかのNo. 1~4, 6~8および10~12は今回新設した中間測定点である。

また、増設後の伸縮計の写真をFig. 6.6(a)に示す。この写真はNW-SE成分を東南から見たもので、最も手前の発泡スチロールのカバーは固定端のもので、その先に連なるカバーのうち、相対的に大きなものが中間測定点で、小さなものが標準尺の支持点のものであって、これが交互に連なっている。Fig. 6.6(b)は中間測定点の上部カバーを取り去って、中間測定点内部の構造を示したものである。

ここに採用した中間測定点の機械部分の図をFig. 6.7に示す。基本的には名古屋大学の犬山地殻変動観測所において差動変圧器をセンサとして用いているものとほとんど同じ

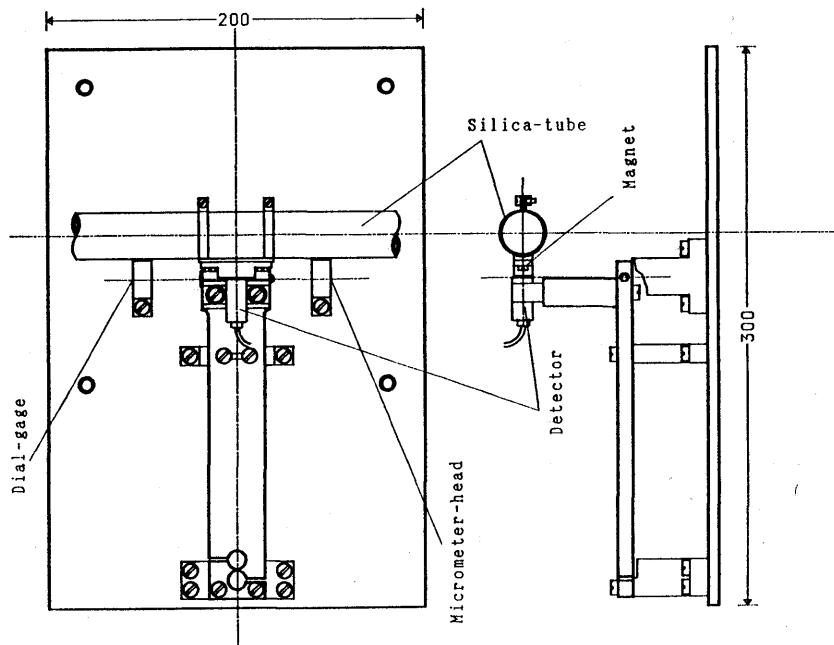


Fig. 6.7. Drafting of the extensometric mechanism.

である（飯田ほか, 1969）。犬山観測所で使用している差動トランスをここでは磁気センサに変更したほか多くの変更はない。このシステムを使用した理由は構造が極めて簡便であることと、感度検定が確実で容易にできることである。感度の検定時には、Fig. 6.7 の左側の取り付け金属に磁気検出ヘッドの移動量を測定するためのダイアルゲージを、右側の取り付け金属にビームを微動させるためのマイクロメータ・ヘッドを取り付ける。そして磁気センサの検出ヘッドに取り付けられたビームを固定する“ねじ”を少しゆるめ、ダイアルゲージの目盛りに対する磁気センサの出力電圧を読みとることによって感度検定が行われる。

6.2.3 電子回路とデータ収集

多測定伸縮計に用いた電子回路は上述と基本的に変りないが、S/N 比が 2 m 長の伸縮計と等価となり、結果として信号が弱くなる。このことから下記に述べるように雑音を減少させるためのローパス・フィルタを附加している。また伸縮計の測定点の数が 9 個であったものが、多測定点伸縮計においては 39 個と極めて多いため、データ収録方式に特別の工夫が必要になる。データの量が極めて多くなるので、あらかじめデータ収録後のデータ処理の負担ができるだけ軽減する配慮が必要である。このデータ収録部のブロック・ダイアグラムを Fig. 6.8 に示す。

Fig. 6.8 に示すように、磁気センサの検出ヘッドからの出力信号は測定端の台石または

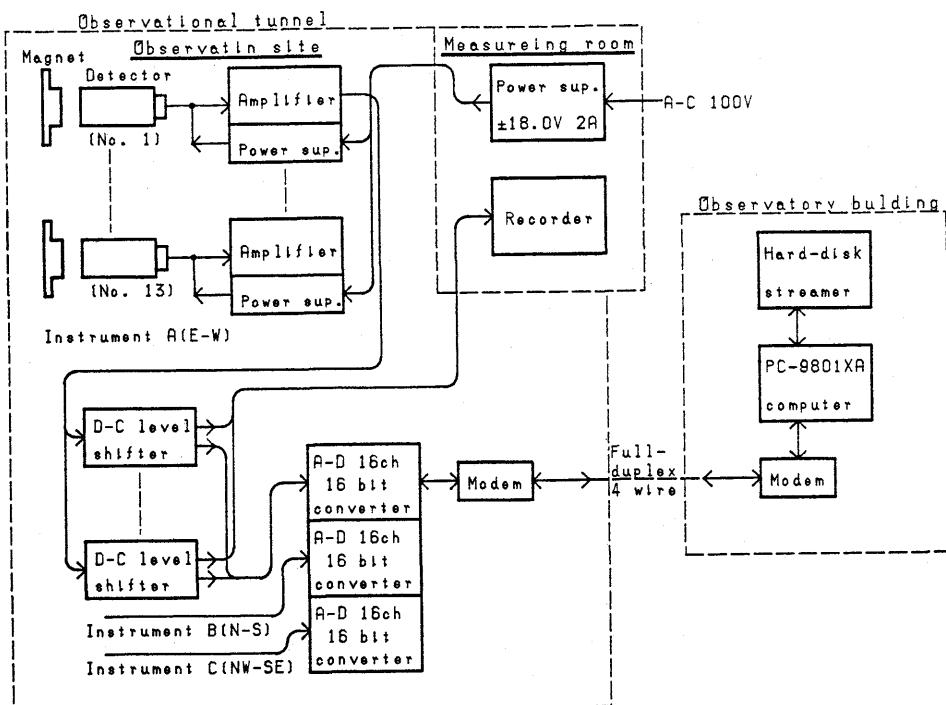


Fig. 6.8. Block diagram of the data sending system.

中間測定点台石のかたわらにおかれた増幅器箱に供給される。この増幅器箱の中には磁気センサの出力信号を坑内の旧暗室まで送出するためのバッファ用増幅器と、センサに供給するための $\pm 12.0V$ の安定化電源が内蔵されている。増幅器箱と旧暗室との間の信号ケーブルの長さは $20\sim 50m$ に達するため、バッファ用の増幅器はぜひとも必要である。E-W, N-S と NW-SE の各成分ごとに13個の増幅器箱がおかれており、この一つの成分に13個ある増幅器箱を一つにまとめて、電源を供給するための $\pm 18V$ で $2A$ の安定化電源設備が3組観測坑付属の測定室に設置されている。このような場所に増幅器箱への供給用電源を設置したのは、電源より発生する熱をできるだけ坑内の伸縮計に持ち込まないように配慮したからである。

出力信号は各成分ごとに1本のケーブルにまとめられ、合計3本のケーブルによって観測坑内の旧暗室に導かれる。この場所においては、磁気センサからの入力信号のD-Cレベルが $\pm 12V$ の範囲ならば、その出力電圧を任意のレベルに調整するための増幅器が一つの入力に対して2回路付加されている。その2回路のうち一つはモニタとして使用する打点レコーダの出力用で、ほかの一つはA-Dコンバータに加える信号用である。さらにこの増幅器には積分回路(6 db/octave のローパス・フィルタ)が付加され、雑音の低減をはかっている。A-DコンバータはMark-1E型(エヌ・シー・シー社)のモデルE-32で、その仕様は16 bit 積分型 A-D 変換方式、最小分解能 $20 \mu V$ 、制御と信号出力のためにRS-232Cの非同期ポートを持っている。入力チャンネル数は1~16chである。このほか入力に増幅器が付加されており、その利得は1, 2, 5と10の4段階に調整可能である。また使用したA-Dコンバータは最高16台をカスケードに接続できるように設計されていて、いずれもRS-232Cポートからソフトウェアにより自由に選択制御できるようになっている。この観測においては、1台あたり13ch、増幅器の利得を10(最大入力電圧範囲 $\pm 0.65V$)とし、各成分1台ずつ使用しているので、合計3台をカスケードに接続することになる。A-DコンバータのRS-232Cポートからは、送出する伸縮計のデータ信号と逆に受取る制御信号があり、いずれも同一のモデムを介して観測所庁舎のパソコン・コンピュータとの間に連結されている。

観測坑の測定室には上述のように伸縮計関係の電源設備3組とモニタ用の打点記録計が各成分ごと1台、合計3台置かれている。観測坑の旧暗室からの伸縮計の信号は地中埋設のケーブルを通じて、接続方式は4線全2重の通信回路により非同期方式で観測所庁舎に送出されている。観測所の庁舎側においては再びモデムを通してパソコン・コンピュータPC-9801XAに接続されている。パソコン・コンピュータPC-9801XAには歪ゲージ観測の場合と同じストリーマ付きの20 Mbyteのハードディスクを接続してある。現在のところデータはすべて2分間隔でハードディスクに収録している。データをハードディスクから取り出すには、付属のカセット・テープに吸い上げることによって行われる。

観測所の庁舎に置かれたコンピュータとモデム、および観測坑内の旧暗室のA-Dコンバータとモデムは30分間程度のバックアップができる停電用の電源を持っている。これを装備した主な理由は、特に夏期に多い誘導雷など、外部から商用交流電源を通じて侵入するパルス性の雑音防止、および1分間以下の短い停電対策である。30分間以上の停電があった時は、コンピュータは停止するが、再び送電が開始されたとき自動的に立ち上がる

ようにソフトを作成してある。現在までのところ電源からのトラブルは全く発生していない。

6.2.4 感度検定法

感度検定は長期的な多測定点石英管伸縮計の観測には基本的なものであり、その成果は感度検定により左右されると云っても過言ではない。通常の 25 m 長さの伸縮計に比較して多測定点石英管伸縮計の場合はその長さが 2m とほぼ 1 術下がったことにより、同じ歪量を求めるためには、長さ変化量の精度を 1 術上げなければならない。これはかなり大変な問題で、今まで検定に使用していたダイアルゲージによる測定の精度を 1 術上げることができたならばこの問題の解決は容易であるが、現実には極めて困難なことである。このように困難であるからといって、この問題を避けて通るわけにはいかない。

従来から行ってきた伸縮計の検定法は上述した（6.1.3 参照）ものの中から重要な点を整理すると、標準尺に取り付けられた発磁体は動かさずに検出ヘッドの動きをダイアルゲージにより測定する。同時に磁気センサの出力端子にデジタル電圧計を接続し、検出ヘッドを微動させて、ある一定量 (± 100 または $\pm 200 \mu\text{m}$) の変位に対するデジタル電圧計の読みを求める。これを数回繰り返して平均値を感度として採用する。この検定法の問題点は、検出ヘッドを観測のときは固定してあるが、検定のときには微動させなければならないため固定ねじを緩める。本来ならば検出ヘッドは固定したときと緩めたときで感度は変わることがない筈であるが、実際には数パーセントは変わることがあり得るという事実を再三にわたって経験している。これは磁気センサが測定目的の方向 (Fig. 6.3, X 軸方向) のみならず、本来は零であるべき Y 軸と Z 軸方向の感度が比較的高いことが原因である。このように大きな問題点がある上に、検定に必要とする時間も長く坑内の温度擾乱も考慮しなければならない。そのうえ、このような感度検定の方法では直接伸縮計の測定用の機械部分に触れることになるから、その影響はより甚大であると云わざるを得ないことになる。このような方法に依存しているかぎり、感度検定の精度を 1 術上げることは不可能に近い。

多測定点伸縮計に採用している感度検定法は、中間観測点に取り付けられている磁気センサに対して、従来から行われている感度検定を年に 1 回程度実施することとし、これを絶対的感度検定と呼ぶことにする。さらに、2 ヶ月に 1 回程度の相対的感度検定を行うこととしている。この相対的感度検定は一つの成分に取り付けられている 13 個の磁気センサの相互間の相対的な感度を求め、絶対的感度検定と併せて、多測定点伸縮計の感度検定値としようとするものである。この相対的感度検定を実際にに行う方法は伸縮計の標準尺を固定している固定端の台石に力を加えて僅かな変形を起こさせることによって、標準尺の固定端に僅かな変位を与えることにした。固定端に僅かな量の変位を与えることは標準尺の保持が理想的に行われているならば、一つの成分に取り付けられたすべての磁気センサに同じ量の変位を与えたことになる。この場合加圧による望ましい変位としては $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$ (測定点の間隔が 2 m のときの歪量は、 $0.5 \sim 5 \times 10^{-7}$ strain である) 程度である。もしも観測坑内においてこのような微小変位が $\pm 1\%$ の精度で容易に計測できるならば、相対感度ではなく絶対感度を求めることができる。このように $1 \mu\text{m}$ 以下の変位の $\pm 1\%$ 精度の測定法としては、可視レーザ光と干渉計を使用することが考えられる。しかし、観測坑内

における設置場所を確保すること、多湿の坑内において長期にわたって光学系を維持すること、恒温性を擾乱したことなどの条件を考慮すると、絶対感度を求めるのは極めて困難であることがわかり測定を断念した。この相対的感度検定を全成分に対して1回実施するに必要な時間は、観測者が4回の入坑でその合計滞留時間が10分程度ですみ、検定開始から終了までの全所用時間が4時間もあれば容易に $\pm 1\%$ の精度が得られている。以下に今までに実施した感度検定作業状況を説明する。

多測定点伸縮計の絶対的感度検定は、1988年の

6月21日と28日：新設中間点の磁気センサ30個

7月13日：既設中間点の磁気センサ6個

11月16日：測定端の磁気センサ 3個

このように検定作業に4日間も要したが、磁気センサ39個の感度検定の観測坑内における実作業時間の合計は13時間にも達した。始めは予想もしなかった長時間の検定作業は、一度にまとめて行うと作業者の疲労が大きく、坑内温度上昇もより大きくなることもわかつた。このような理由から、検定作業を再々実行することは不可能であると感ずる。

同じく相対的感度検定は、1988年8月31日、10月27日と12月15日の3回行なった。その結果をみれば3本の標準尺はほぼ理想的に保持され、検定精度も目標値の $\pm 1\%$ もほぼ達成されている。

以上の絶対ならびに相対的感度検定の例をFig. 6.9に示す。ただし、すべての磁気センサについて表示すると、煩雑であるから、代表として各成分のNo. 7のセンサを選ぶことにした。感度の絶対値は、便宜的に伸縮計の一つの成分ごとの全磁気センサの平均的な感度は変化しないものとして6月21日の値を採用して計算したものである。Fig. 6.9をみてわかるように、このような短時間においてはかなりよい結果を示していると思われる。

このFig. 6.9をみると、N-S成分のNo. 7のセンサは、4回の検定値がかなり良い一致を示しているし、ここに示していないがほかの大多数のセンサもこれと同様な結果で

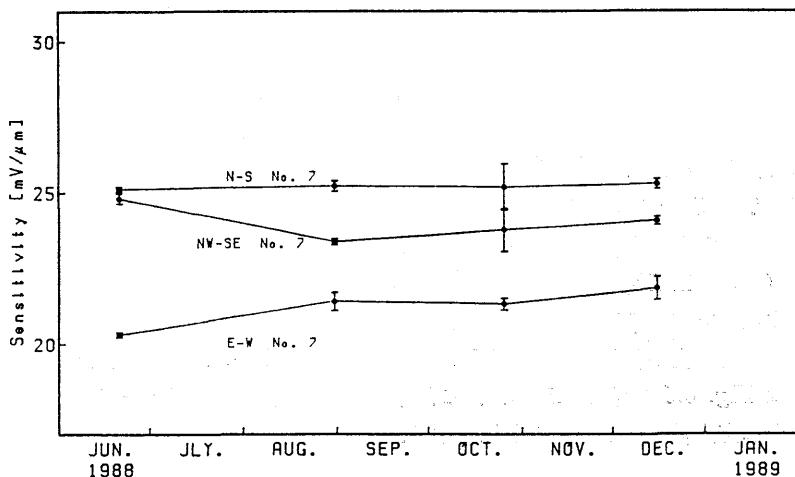


Fig. 6.9. Sensitivity calibrations of the extensometric sensors.

ある。しかし、同図をみるとさらにもう一つの問題点があることがわかる。それは同図の E-W 成分の No. 7 と NW-SE 成分の No. 7 が感度検定法によって、求められた数値が異なることを示してると考えられることである。E-W 成分の No. 7 は絶対的検定を行った 6 月 28 日が $24.82 \text{ mV}/\mu\text{m}$ に対して、その後の相対的な検定の結果が $23.39, 23.76, 24.07 \text{ mV}/\mu\text{m}$ となっていることである。これは磁気センサを使用するときの問題点(6.1.2 参照)として示したが、それが現実となったのである。すなわち、従来の方法によって感度検定をすると、検定前にセンサが取り付けられたビームの固定ねじを緩めなければならないし、検定後に再びセンサを固定する必要がある。このことは固定しているときと、検定のときとでセンサの位置が、極く僅か Y 軸方向に変化していることを示している。このためか E-W 成分の No. 7 は感度が $5 \sim 6\%$ 下がっている。この原因は磁気センサが Y 軸方向 (Fig. 6.3 参照) に感度変化を持つために起こることは前述したところである。同様に NW-SE 成分の No. 7 は逆に感度が $5 \sim 6\%$ 上がっている。このことから在来のダイアルゲージを使用して磁気センサの検出ヘッドを動かして感度検定を行うと、土数%の誤差を含むことがあり得ることがわかる。

以上のことから、この多測定点伸縮計の変位の測定値には絶対値として $\pm 1 \sim \pm 2\%$ の誤差は含まれる恐れがあるかもしれないが、同一成分の 13 個のセンサの相対的な感度の誤差として $\pm 1\%$ は充分に保持されていると思う。以下の測定値の議論にはこのような検定値を採用していると考えてよい。

7 章 伸縮計による地殻歪の観測および歪ゲージ歪計による観測結果との比較

7.1 伸縮計観測の概要

鋸山観測所の溶融石英管伸縮計の設備についてはすでに 6 章において詳しく述べた。そこで既存の設備として E-W, S-N と NW-SE の 3 成分の伸縮計があり、その一つの成分ごとに測定点と中間点(2 個)の 3 個の合計 9 個の測定のための設備があった。歪ゲージ歪計による観測坑内の多点観測と比較する必要と、さらに詳細に地殻歪の状況を知るために、伸縮計の一つの成分について中間観測点 10 個を増設することにした。したがって、観測点の数は伸縮計の一つの成分毎に 13 個で、3 成分で合計 39 個に達することになった。

これから解析する伸縮計の観測データは、歪ゲージ歪計(5 章)の多点観測と同一期間の 1986 年 1 月 24 日～1987 年 3 月 5 日のデータを選び、また多測定点伸縮計のデータについても 1988 年 7 月 15 日～1988 年 12 月 15 日の約半年分について解析を行うこととする。解析方法は 5 章に述べたものと同じ手法を採用する。この両者の観測は歪ゲージ歪計による観測との比較(柳沢, 1987b)が主な目標であるが、他の目的として鋸山観測所の坑内の歪の微細な分布についても何らかの論議ができるようなデータを得ることは重要と考えられる。鋸山観測所坑内の伸縮計による歪観測設備の配置は Fig. 6.2 に、また多測定点伸縮計の配置は Fig. 6.5 にすでに示した。これらの設備を用いて、歪ゲージ歪計による観測データを多測定点伸縮計のデータと比較する。

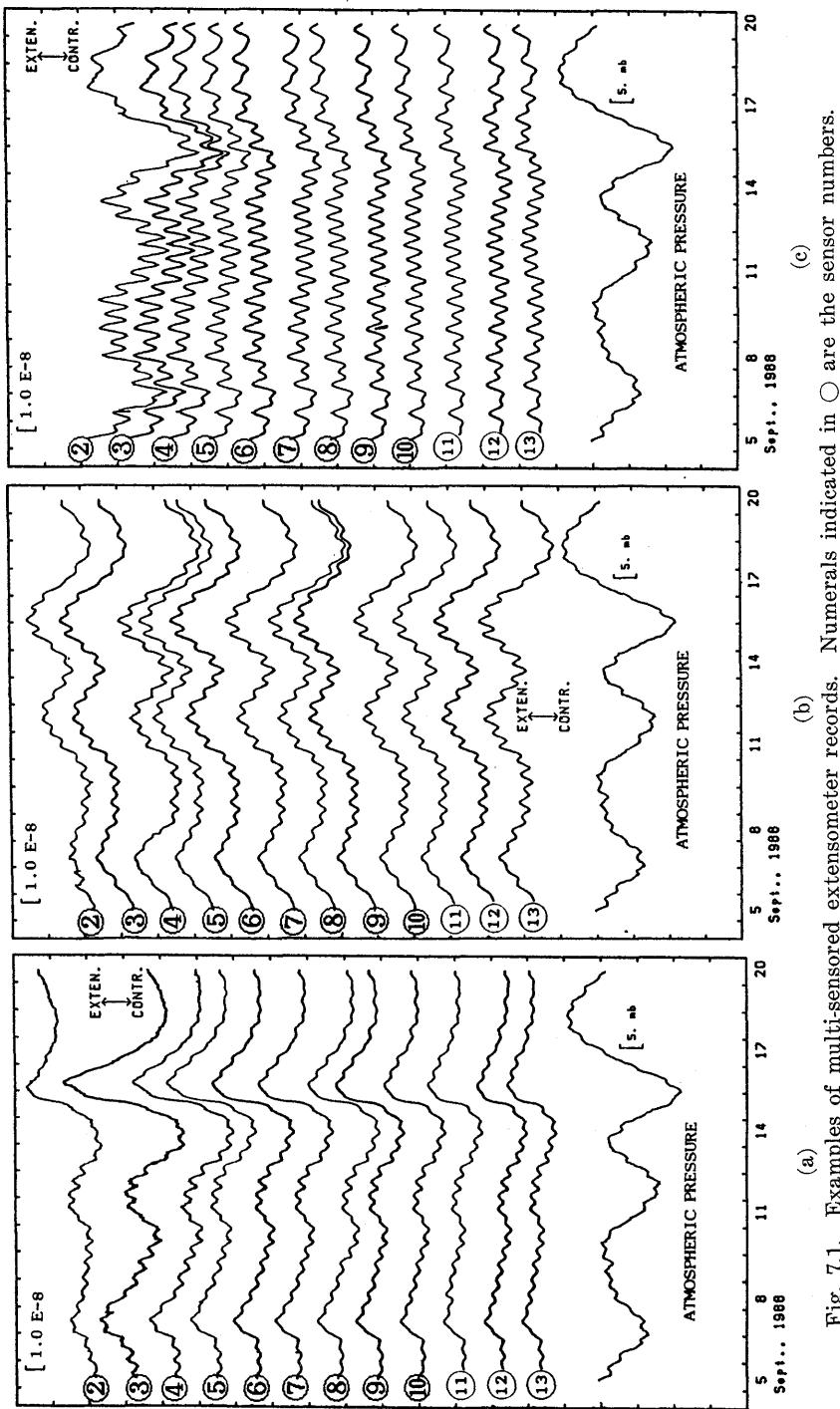


Fig. 7.1. Examples of multi-sensored extensometer records. Numerals indicated in ○ are the sensor numbers.
 (a) E-W component, (b) N-S component and (c) NW-SE component.

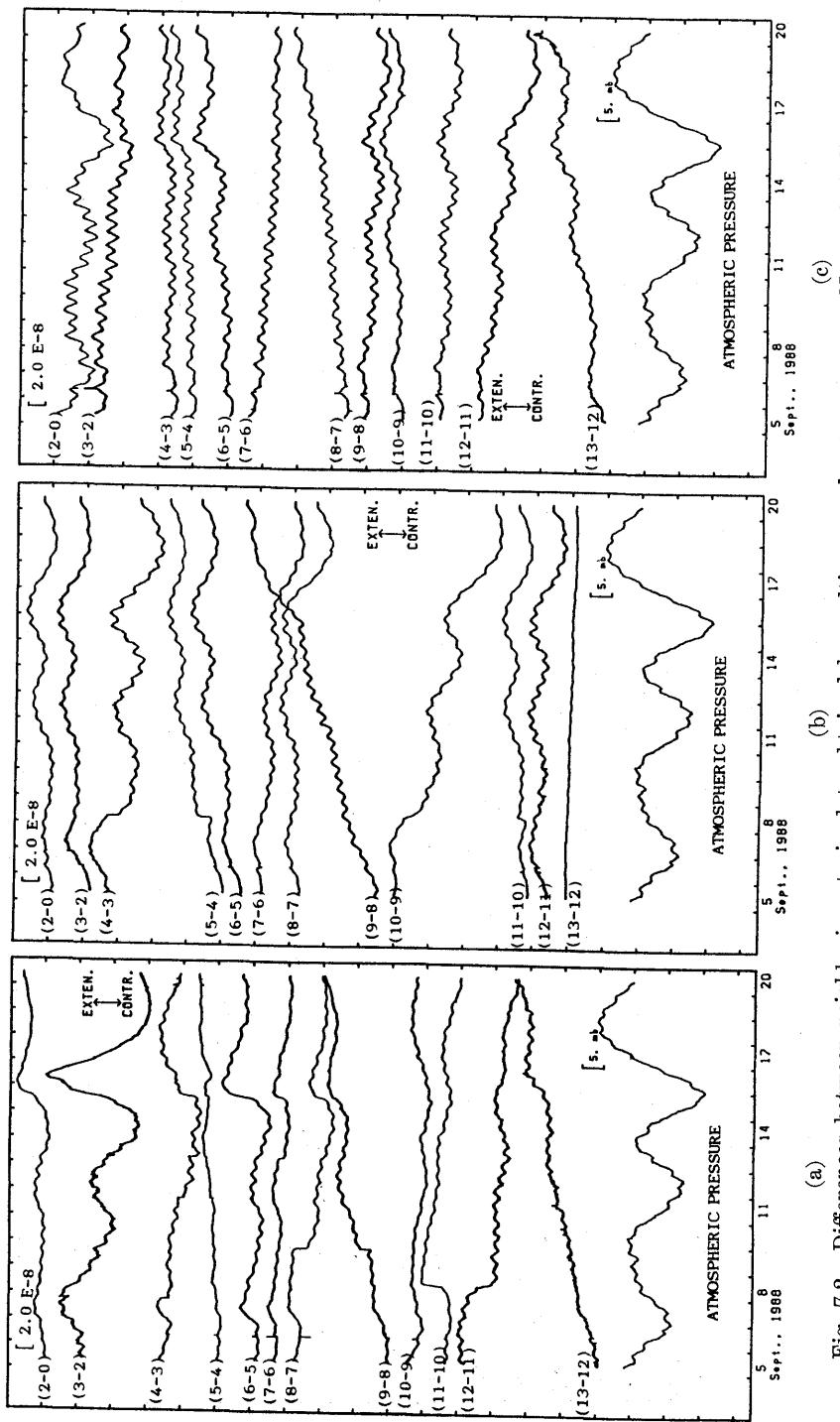


Fig. 7.2. Differences between neighboring strain data obtained by multi-sensored extensometers. Numerals indicated in () are the neighboring sensor numbers. (a) N-S component, (b) E-W component and (c) NW-SE component.

7.2 観測

7.2.1 観測記録例

伸縮計の観測データは毎正時とその中間の30分ごとに計測され、ディジタル・カセットテープに約2週間分ずつ記録されている。多測定点伸縮計の2分間隔の観測データはFig. 6.8において示したようにカセット・ストリーマ付きのハードディスクに納められている。この収録されたデータは約2週間分まとめてカセット・テープに取り出すことにしている。これまでの観測データのうちから、気圧変化が比較的大きいものを選んでFig. 7.1にまとめることにする。この図においては、歪量は伸縮計の標準尺の長さに比例することから、固定端からの距離によって除して歪量として表わした。同じ図に気圧変化も併せて示してある。なお、Fig. 7.1と後に示すFig. 7.2とも、図の上で上向きが伸張歪が正の方向である。図の(a), (b)と(c)にそれぞれE-W, N-SとNW-SE成分別に順次示すこととする。この図のなかで左端の○の数字はFig. 6.5に示したセンサの番号である。また、同時に気圧変化も示している。

Fig. 7.1(a)に示したE-W成分でまず気がつくことは、気圧変化と歪の変化がよい対応を示していることである。それとともに、センサNo.3において気圧に対する変化が急に大きくなっていることがわかる。しかし、センサNo.4~12に行くにしたがって気圧変化の影響が少なくなっている。これはセンサNo.3の付近で気圧効果が最大であることを表わしている。この状況を明らかにするため、各観測点における観測値の各々の隣のセンサとの差をとって、そのセンサ間の距離で除して歪値を求めてFig. 7.2(a)に示すことにする。図に示すときにセンサNo.1と固定点との距離が短いため、短時間の記録では変動が明瞭でないのでNo.1の部分は除き、この端の部分のみセンサNo.2と固定端間のデータで示してある。この図において()のなかの数字3-2は、センサNo.3の観測値からセンサNo.2の観測値を差し引いた数値をセンサNo.3とセンサNo.2間の距離で除して歪値として示してあり、以下同じようにして求めてある。

このFig. 7.2(a)をみると幾つかの事柄に気がつくようである。まず気圧変化による歪の影響が、()のなかの数字(以下数字のみに省略)2-0や他の部分に比して3-2が断然大きく、この部分が気圧変化を大きく受け持っている様子がわかる。一方4-3は3-2に比べて気圧変化の影響が逆方向であることがわかる。そのほかにFig. 7.1(a)においては明瞭でなかったが、Fig. 7.2(a)で明瞭な中間観測点の支持台の動きが目だつようである。例えば9月8日の8-7と9-8に反対向きのステップがみられる。この他に同じ日付けで11-10と12-11のところにも同様のものがあるようであり、その他にもいくつかみられる。これらはいずれも支持台が僅かにステップ的に動いたものと思われる。このように4-3と5-4が同時に反対に動いたときは、センサNo.4の支持台が機械的部分がステップ的に動いていると考えて差し支えないようである。このことは、地震によって発生するストレイン・ステップの判定のとき、本来のストレイン・ステップか機械的な動きか否かを判定するための一助としてかなり有効であると思われる。

つぎに、Fig. 7.1(b)のN-S成分をみると、今までのE-W成分とは異なり、気圧変化の影響が比較的一様で、そのうえE-W成分に比較してかなり大きいことがわかる。E-W成分と同じように隣のセンサとの差をとってFig. 7.2(b)として示す。気圧変化に

対して大小様々な影響を受けているが、9-8のみは他の場所と異なって、逆センスの変化を受けている様子がみられる。

Fig. 7.1(c) の NW-SE 成分はセンサ No. 2, 3 と 4 の観測点が気圧変化に対して大きな影響を受けているようである。これを明瞭にするため Fig. 7.2(c) に他の成分と同じように隣の観測点との差をとり歪を示す。例えばやはり 2-0 と 3-2 は気圧変化の影響があり、気圧が上昇すると圧縮歪を受けることがわかる。しかし 7-6 と 8-7 は気圧変化の影響をほとんど受けないことがわかる。このように 2 m の長さの伸縮計で気圧変化に対する歪を観測すると、これまでの 25 m あるいは 8~9 m の伸縮計によりみてきた地殻の応答とは異なり、かなり複雑多岐であることがわかる。

このほかに、Fig. 7.2(a) の 5-4, 9-8 と 13-12 のように、約 2 週間にわたって一方的に伸張を続いているものがある一方、7-6 や 12-11 などはこれと反対に圧縮歪を受けていて、隣りあうブロックでバランスを取っているようである。同じく Fig. 7.2(b) の 9-8 と 10-9 が隣合って伸縮歪と圧縮歪を生じて、互いに補償しあっていることがわかる。このような場所は Fig. 7.2(c) においても見られ、7-6 と 8-7 は圧縮歪と伸張歪が隣合っている。以上のように圧縮歪と伸張歪が相互に隣合っているような場所が随所に見られる。

7.2.2 観測データの解析

歪ゲージ歪計の場合と同じように、伸縮計データにもいろいろな原因によるステップが記録されているので、これを確かめるために BAYTAP-G プログラム (ISHIGURO *et al.*, 1985; 石黒ほか, 1984) を利用してステップを搜しだし、モニタの打点記録紙上より確かめて補正した。

いま、観測方程式 (5.2) と同じように、ある時刻 t における観測値 L は

$$L(t) = At^2 + Bt + C + DP(t) + \sum_{i=1}^4 (F_i \sin \theta_i t + G_i \cos \theta_i t) \quad (7.1)$$

Table 7.1. Atmospheric pressure effects on ground strain changes and tidal factors calculated from extensometric data.

Instrument	No. of sensor	Distance between neighboring sensors (m)	Observation period (days)	Pressure effect [10 ⁻¹⁰ strain/mb]	Earth tide amplitude [10 ⁻¹⁰ strain]			
					M ₂	S ₂	O ₁	K ₁
E-W	①	8.984	323	0.763 ± 0.00	83.8 ± 0.4	16.5 ± 0.4	24.1 ± 0.4	26.4 ± 0.4
	②	8.017	393	0.208 ± 0.00	44.8 ± 0.3	10.9 ± 0.3	30.9 ± 0.3	12.2 ± 0.3
	③	7.953	403	0.326 ± 0.00	47.4 ± 0.6	16.5 ± 0.6	35.1 ± 0.6	4.1 ± 0.6
N-S	①	9.005	397	0.692 ± 0.00	50.2 ± 0.1	20.2 ± 0.1	24.9 ± 0.1	34.0 ± 0.1
	②	7.999	400	0.514 ± 0.00	69.9 ± 0.2	39.0 ± 0.2	36.6 ± 0.2	47.4 ± 0.2
	③	7.954	409	0.927 ± 0.00	104.8 ± 0.2	61.2 ± 0.2	47.2 ± 0.2	60.7 ± 0.2
NW-SE	①	9.002	397	0.267 ± 0.00	119.7 ± 0.2	61.2 ± 0.2	88.3 ± 0.2	112.8 ± 0.2
	②	7.991	397	0.135 ± 0.00	96.2 ± 0.2	41.3 ± 0.2	65.1 ± 0.2	89.7 ± 0.2
	③	7.955	402	0.669 ± 0.00	118.9 ± 0.3	49.7 ± 0.3	82.4 ± 0.3	100.3 ± 0.3

により表わされるものとする。ここに A , B と C はドリフトの係数, $P(t)$ は時刻 t における気圧, D は気圧係数, F_i と G_i は潮汐の振幅の正弦と余弦, θ_i はその角速度であつて, i は分潮成分を表わす。 $i=1 \sim 4$ はそれぞれ M_2 , S_2 , O_1 と K_1 の主要4分潮に対応する。各係数は最小2乗法により求めるが、この場合ドリフトを式(7.1)のように t に関

Table 7.2. Atmospheric pressure effects on ground strain changes and tidal factors calculated from multi-sensored extensometric data.

Instrument	No. of sensor	Distance from fix end (m)	Observation period (days)	Pressure effect [10 ⁻¹⁰ strain/mbar]	Earth tide amplitude [10 ⁻¹⁰ strain]			
					M_2	S_2	O_1	K_1
E-W	①	0.986	119	-6.38±0.00	20.6±0.9	41.3±0.9	42.2±0.9	39.9±0.9
	②	2.992	119	16.06±0.00	146.4±1.2	55.1±1.2	78.9±1.2	148.4±1.2
	③	4.979	120	64.94±0.00	274.6±2.6	75.6±2.7	126.2±2.6	263.1±2.7
	④	6.994	120	60.58±0.00	463.3±2.7	127.1±2.7	203.0±2.7	363.8±2.7
	⑤	8.984	107	73.14±0.00	524.6±3.7	191.8±3.7	292.2±3.7	481.7±3.7
	⑥	10.997	119	74.26±0.00	656.3±4.4	176.0±4.4	252.4±4.4	465.6±4.4
	⑦	12.995	120	77.88±0.00	723.3±3.9	156.8±3.9	417.6±3.9	805.1±3.9
	⑧	14.990	119	93.22±0.00	811.6±6.4	205.8±6.4	452.1±6.4	873.6±6.4
	⑨	17.003	106	93.50±0.00	888.4±5.4	194.2±5.4	549.2±5.4	731.2±5.4
	⑩	18.995	120	93.71±0.00	981.3±6.6	193.8±6.6	544.8±6.6	744.5±6.6
	⑪	20.995	119	97.18±0.00	1111.1±7.3	254.7±7.3	621.0±7.3	776.9±7.3
	⑫	22.994	119	99.97±0.00	1213.1±7.6	235.2±7.6	664.7±7.5	786.6±7.6
	⑬	25.002	106	109.25±0.00	1432.5±10.1	248.1±10.1	817.1±10.0	882.3±10.0
N-S	①	0.970	120	15.29±0.00	82.7±0.7	114.3±0.7	43.6±0.7	86.0±0.7
	②	2.985	120	28.86±0.00	197.2±0.8	180.6±0.8	104.1±0.8	165.8±0.8
	③	5.002	120	49.61±0.00	344.2±0.8	251.3±0.8	180.4±0.8	242.8±0.8
	④	6.991	77	78.33±0.00	506.5±0.8	383.2±0.8	259.7±0.8	317.6±0.8
	⑤	8.998	107	96.88±0.00	656.9±1.2	465.8±1.2	332.1±1.2	438.2±1.2
	⑥	10.991	120	116.52±0.00	821.0±1.3	545.0±1.3	417.2±1.3	523.5±1.3
	⑦	12.989	120	133.62±0.00	972.5±1.7	639.4±1.7	502.1±1.7	607.8±1.7
	⑧	14.996	120	158.93±0.00	1138.1±2.3	779.6±2.3	592.9±2.3	755.9±2.3
	⑨	16.994	107	151.65±0.00	1327.0±3.0	921.7±3.0	682.0±3.0	962.4±3.0
	⑩	18.984	120	183.83±0.00	1488.9±3.3	1088.2±3.3	760.5±3.2	968.0±3.2
	⑪	20.991	77	199.31±0.00	1524.9±3.6	1274.1±3.6	733.4±3.6	1002.8±3.6
	⑫	22.993	120	229.46±0.00	1824.1±4.5	1308.2±4.5	967.9±4.3	1157.1±4.3
	⑬	24.941	106	241.20±0.00	2181.3±5.6	1475.8±5.6	1149.9±5.4	1344.1±5.4
NW-SE	①	0.985	119	-39.28±0.00	242.9±1.3	136.1±1.3	195.8±1.3	172.6±1.3
	②	2.985	117	-46.92±0.00	559.9±1.8	307.1±1.8	404.7±1.7	356.4±1.7
	③	4.984	120	-37.10±0.00	870.1±2.2	479.7±2.2	658.5±2.1	704.4±2.1
	④	6.988	120	-29.40±0.00	1107.6±2.6	593.3±2.6	835.8±2.5	963.3±2.5
	⑤	8.975	106	35.19±0.00	1450.3±3.8	640.7±3.8	1083.9±3.8	1582.7±3.8
	⑥	10.988	120	-8.22±0.00	1604.1±3.4	835.9±3.4	1195.2±3.3	1458.2±3.3
	⑦	12.988	120	-9.37±0.00	1844.2±3.5	948.9±3.6	1358.1±3.5	1654.9±3.5
	⑧	14.988	120	-9.92±0.00	2062.8±3.6	1067.4±3.8	1511.8±3.6	1868.4±3.6
	⑨	16.992	107	-9.44±0.00	2247.4±4.0	1196.7±4.0	1609.9±3.9	2005.2±3.9
	⑩	18.989	120	23.59±0.00	2449.7±4.4	1286.6±4.4	1807.4±4.3	2226.6±4.4
	⑪	20.984	119	35.20±0.00	2648.0±4.4	1392.1±4.4	1936.9±4.3	2395.8±4.4
	⑫	22.979	120	53.97±0.00	2806.9±5.1	1452.7±5.2	2091.3±5.1	2539.3±5.1
	⑬	24.955	106	55.50±0.00	3035.9±4.9	1578.3±4.9	2143.2±4.8	267.68±4.8

する2次式で長期間にわたって近似するのは無理であるから、データは30日分ごとにまとめて計算を行うことにする。また、伸縮計の値はFig. 6.2に示したように、固定端と中間点、中間点と中間点および中間点と測定端のように各伸縮計を3分割したものを計算する。多測定点伸縮計の値はセンサが多数のためFig. 6.5の各点に取り付けた磁気センサごとの変位で表わしてある。このようにして求めた計算結果のうち、 D および $\sqrt{F_i^2+G_i^2}$ により求めた、各磁気センサごとの気圧効果と地球潮汐の振幅をTable 7.1とTable 7.2に示す。ただし、Table 7.1には各センサ間の歪量を、これに対してTable 7.2は各磁気センサと固定端間の歪量を表わしてある。そこで、Table 7.1の場合は例えば歪として①、②と③の記号で表わす。また、Table 7.2の多測定点伸縮計の場合の例として、センサNo. 13とセンサNo. 12の変位の差を求め、そのセンサ間の距離で除して[13-12]の記号で表わしている。以後の伸縮計と多測定点伸縮計の歪の表現はすべてこれら2種類の記号により表示することとする。

7.3 観測結果の検討

7.3.1 気圧効果

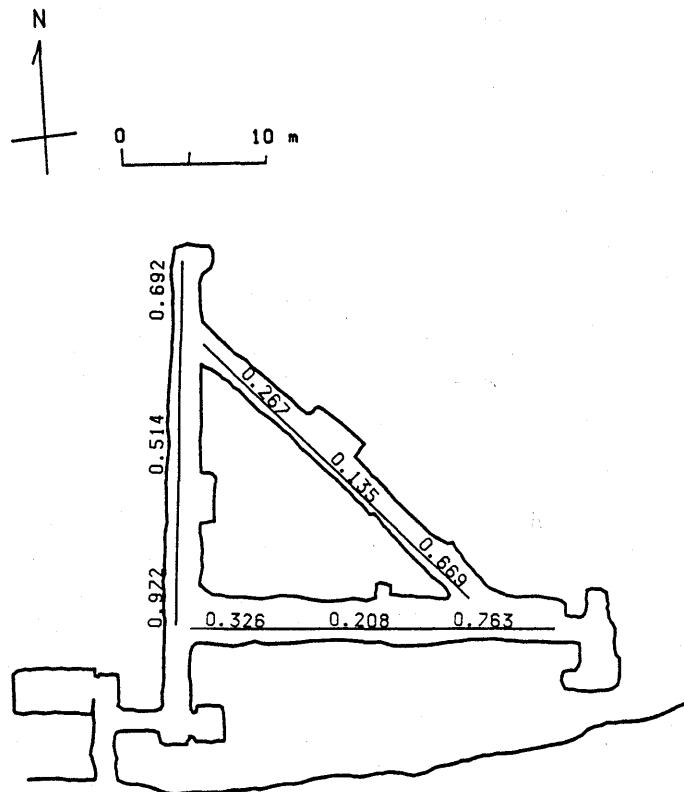


Fig. 7.3. Observed strain responses to atmospheric pressure changes obtained by the extensometers. The unit is 10^{-10} strain/mb.

a) 伸縮計

最初に、気圧効果について調べることにする。Table 7.1 の中から気圧効果の歪値を Fig. 7.3 に図示する。このとき①、②と③など観測点の坑内の位置は Fig. 6.2 によっている。この Fig. 7.3 をみると多少の差があるけれど、いずれの伸縮計も中央部分②の値に比べて両端①および③の値が大きいことがわかる。別の表現をすれば、直角三角形の形をした坑道の角の部分の歪が大きいことがわかる。この気圧効果は地形の影響だけでなく、これに加えて観測坑の空洞効果があると考えることができる。

E-W 成分をみると①の部分が②と③の部分に比較して 2~3 倍大きいことがわかる。観測所のある山全体 (Fig. 2.3 参照) をみると、観測坑の南側を東西に流れていた谷川が、E-W 坑道のある東端において屈曲している。このため、E-W 成分の置かれた坑の東南端において土被りが薄くなっていることが原因ではなかろうか。N-S 成分はほぼ土被りの厚さに対応しているようであり、土被りの最も厚い①の部分が、土被りの浅い③に比べて気圧効果が小さくなっている。またこの成分 N-S の③は伸縮計の観測値 9 個のうち最大の値を示している。NW-SE 成分は E-W 成分と同じく東南端①の部分が②と③の 2~3 倍の値を示している。これらの事実から観測坑の上および周辺の地形が歪量への気圧の影響を大きく支配していることがわかる。

b) 多測定点伸縮計

Table 7.2 の計算結果のなかから気圧効果を Fig. 7.4 に示す。気圧が増加したときに

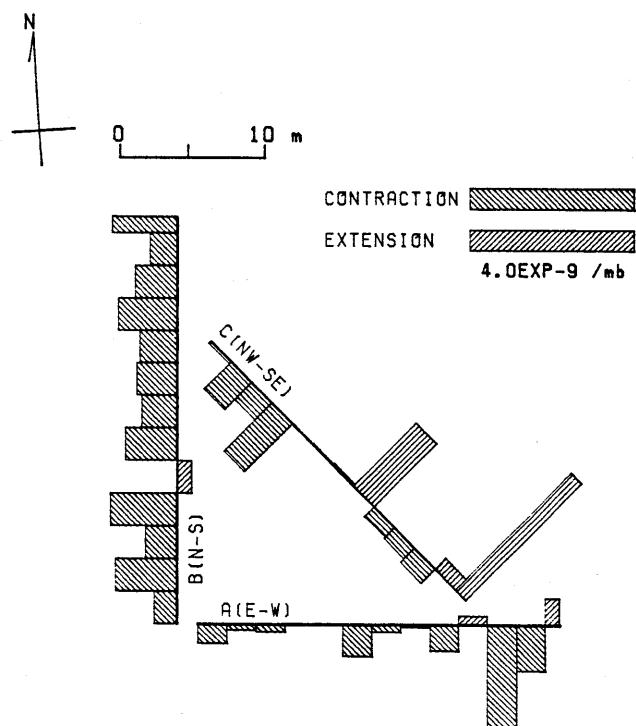


Fig. 7.4. Observed strain responses from atmospheric pressure changes obtained by multi-sensored extensometers.

圧縮歪を受けるのが一般であるが、この図をみると伸張歪を受ける部分も僅かながらあることがわかる。これは Fig. 7.3 のように伸縮計の 3 分割による観測では細かな部分が平均化されて明瞭にならなかったためであると思われる。この Fig. 7.4 によって E-W 成分をみると、中央部分と西端に比較して東端の部分に大きな圧縮歪があることがわかる。この E-W 成分の③-②（観測点③値から観測点②の値を差し引いてその間の距離で除して歪を示す、以下同様）はこの成分の中で最大の歪を示している。また僅かながら伸張歪を示している①-①と④-③のあることもわかった。この④-③の部分はすぐ隣合った NW-SE 成分の①-①との間に何らかの関係があるのではないかと考えられる。

Fig. 7.2(b) からもわかることがあるが、つぎの N-S 成分はほかの E-W と NW-SE 成分に比べて気圧効果が比較的一様で、そのうえ値が大きいことである。Fig. 7.4 をみると、やはりほかの 2 成分に比して N-S 成分は気圧効果が大きく、そのうえ気圧効果歪値もほぼ同じような値を示している。ただ 1 個所⑨-⑧のみが伸張歪を受けているが、この場所は Fig. 6.5 を見るとわかるように、坑道の東側に小部屋が掘削されている所であるが、空洞効果にしては大き過ぎるようと思われる。

同様な観点で Fig. 7.4 の NW-SE 成分をみると、⑨-⑧と⑧-⑦の気圧効果の歪が極めて小さくなっていることがわかり、ここも坑道の東側が広げられ、空洞が大きくなっている場所である。このように、坑道の横幅が拡張されているような場所で気圧効果の歪が大きく変化していることがわかる。しかし、これに続いて気圧効果の小さな場所は⑦-⑥と⑬-⑫にもあり、空洞効果以外の原因の可能性を考えられる。このほかに大きな伸張歪と圧縮歪が隣っている部分があることがわかった。それは⑥-⑤にある大きな伸張歪と⑤-④の圧縮歪が隣あって生じて、互いに補償しあっていると考えられる。

このようにみてくると、鋸山観測所付近の地質は見た目には比較的一様であるが、地殻歪という観点からみると独立した微細なブロックの集合によって成立していると考えてよいと思われる。この点の議論は後の章で述べたいと思う。

7.3.2 潮汐成分

a) 伸縮計

潮汐成分については、最小 2 乗法で式 (6.1) に示したように、BAYTAP-G プログラムを使用することにより、主要分潮のなかの 15 個（プログラムのなかでデータ量より自動的に決まる）の分潮が求められている。ここで、比較のため最も振幅の大きな M_2 分潮を選択することにする。最小 2 乗法により求められた値 (Table 7.1) を Fig. 7.5(a) に、BAYTAP-G プログラムにより求められた値を Fig. 7.5(b) に示す。5 章でも述べたが、解析プログラムの問題として、これら 2 つのプログラムによって解析された伸縮計の値を相互に比較すると、NW-SE 成分の③部分と E-W 成分の③部分を除いて 2 ~ 3 % 程度で両者がよく一致していることがわかる。しかし、E-W 成分の③部分と NW-SE 成分の③部分が大きく異なるが、その理由は不明である。このように 2 つのプログラムの計算結果が一致しない地点は、必ずしも気圧効果の大きな点と同一とは限らない。そして、いずれも BAYTAP-G プログラムによる値のほうが小さな数値を示している。ただ、気になることは E-W 成分③に近いところにある N-S 成分③の気圧効果が最大であることである。また、NW-SE 成分③に近い N-S 成分③の気圧効果も大きいことをあげることがで

きる。このように BAYTAB-G プログラムは気圧効果と潮汐の分離があまりよくないのではないかと思われる。

このほかに Fig. 7.5(a) をみて気がつくことは、E-W 成分に例をとると、一つの成分の 3 個の数値のうち中央が小さく両端の値が大きいことである。同様に NW-SE 成分に

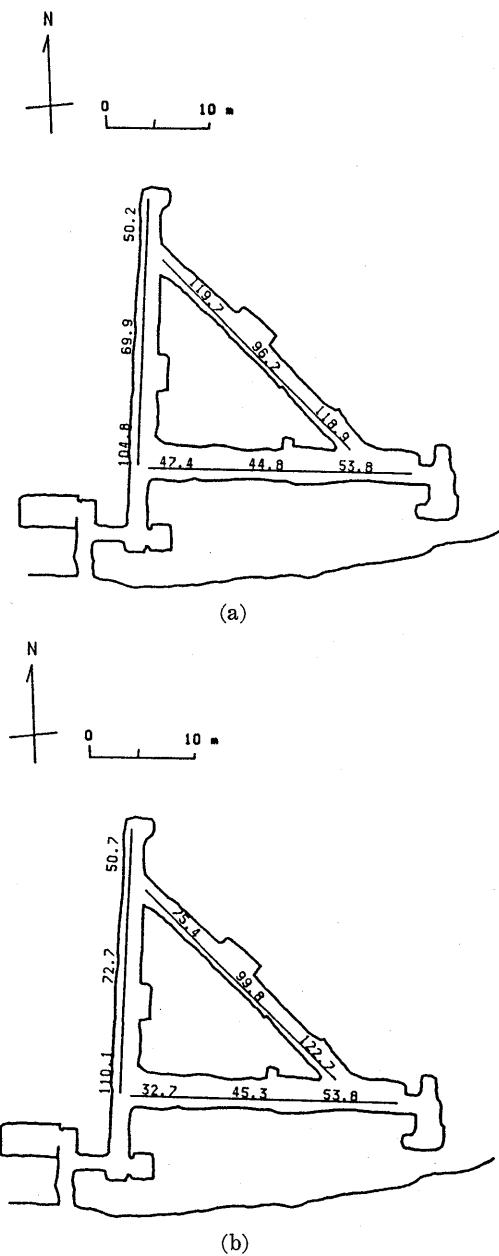


Fig. 7.5. Comparison between results of harmonic analyses of M_2 tide by (a) the least square method and (b) the BAYTAB-G program. The unit is 10^{-10} strain.

おいても同様なことがみられる。N-S 成分のみはこれが適用できないが、中央の値より南端がかなり大きいことがわかる。

b) 多測定点伸縮計

潮汐成分については、気圧効果と同様な方法により Table 7.2 から半日潮のうち最も振幅の大きな M_2 分潮と、一日潮のうち最大振幅である K_1 分潮についてそれぞれ歪値を求めて Fig. 7.6(a) と (b) に示す。Fig. 7.5(a) に示したように、伸縮計の 3 個の成分の

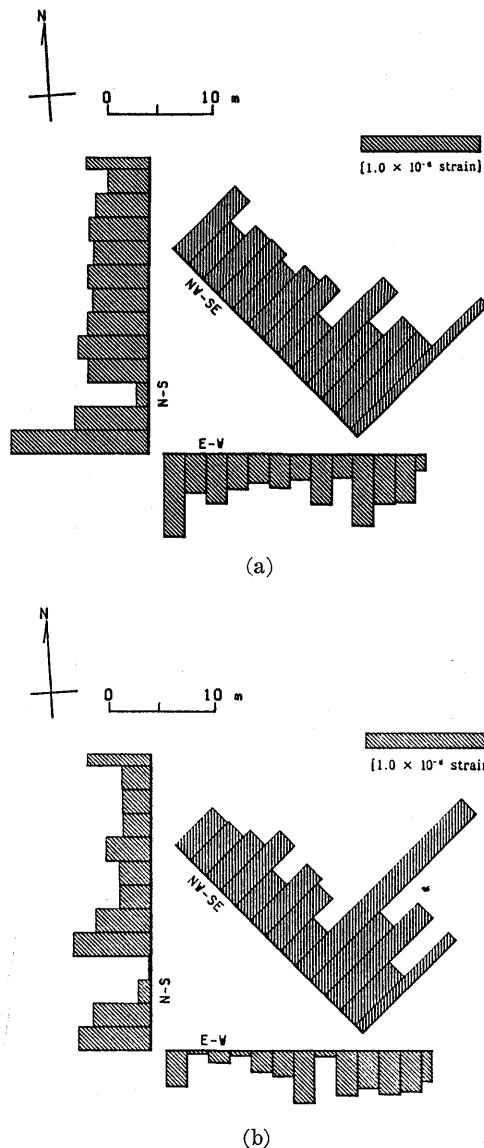


Fig. 7.6. Harmonic analyses of the amplitude of the earth-tide by the multi-sensored extensometers. (a) M_2 and (b) K_1 tidal components.

うち地球潮汐の振幅が最も大きいのは NW-SE 成分で、それは Fig. 7.6 においても同様である。また Fig. 7.5(a) について説明したが、同一の成分の伸縮計に関して 3 個の M_2 分潮の値の間において中央部分に比較して両端部分の値が一般的に大きい傾向がある。Fig. 7.6 においても坑道と坑道とが接する部分の M_2 分潮値が比較的大きいようである。

K_1 分潮については、NW-SE 成分が他の E-W と N-S 成分に比較して大きな振幅を示している。このことは M_2 分潮と同様である。通常は M_2 分潮が K_1 分潮に比較して振幅が大きい値を示すものであるが、この NW-SE 成分のみは M_2 が K_1 分潮と同様な振幅を示している。Fig. 7.6 によれば、E-W 成分の K_1 分潮と M_2 分潮とを比較すると、かなりまちまちであるが、E-W 坑の東端の部分ではこの両者の振幅はあまり差がないことがわかる。しかし、中央と西端では K_1 分潮が M_2 分潮に比較して振幅がかなり小さくなっている。つぎに、N-S 成分では K_1 分潮は幾分振幅が M_2 分潮に比べて小さいものの、その分布の形はよく似ている。とくに、極端に M_2 分潮の振幅の小さな [11]-[10]においては、 K_1 分潮でも小さい振幅を示している。しかし、 K_1 分潮で振幅の小さい [10]-[9]においては M_2 分潮と異なる傾向を示すことがわかる。

7.4 歪ゲージ歪計と伸縮計の観測の比較

7.4.1 気圧効果

a) 伸縮計

歪ゲージ歪計の解析値 (Table 5.2) と伸縮計の気圧効果の解析値 (Table 7.1) をそれぞれ観測地点ごとにまとめて Fig. 7.7 にまとめる。この図から次の解釈がなされる。E-W 成分についてみると、伸縮計の①、②と③の部分が、歪値にして 0.763, 0.208 および 0.326×10^{-10} strain/mb となっている。これに対して、歪ゲージ歪計では、④、⑤、⑧、⑨と⑩の地点の順に、4.87, 1.22, 24.2, 3.59 および 10.2×10^{-10} strain/mb となっている。相互に近接した場所について伸縮計と歪ゲージ歪計の値を比較すると、2~80倍も大きいことがわかる。これらのなかで最も近い値を示す場所は、E-W 成分の①部分と坑道の床に接着した歪ゲージ歪計の⑥地点で、それぞれ 0.763 と 1.22×10^{-10} strain/mb で、かなり似かよった値を示している。

N-S 成分についてみると、伸縮計の①、②と③の部分の歪が 0.692, 0.514 および 0.927×10^{-10} strain/mb を示す。これに対して、歪ゲージ歪計の方は、③、⑤、⑦、⑪と⑫の地点で、3.50, 6.35, 5.78, 4.32 および 4.55×10^{-10} strain/mb の歪量で、伸縮計の値に対して約10倍大きいことがわかる。さらに、NW-SE 成分についてみると、伸縮計の①、②と③の部分が、0.669, 0.135 と 0.267×10^{-10} strain/mb を示すのに対して、歪ゲージ歪計の値は①、②、⑤と⑥地点において 1.95, 3.75, 2.35 および 4.13×10^{-10} strain/mb であり、歪ゲージ歪計の気圧効果の方が 2~8 倍程度大きい。

歪ゲージ歪計と伸縮計の値を方向成分ごとに比較すると、場所により異なるが、歪ゲージ歪計のほうが伸縮計より 2~10 倍以上も大きいことがわかる。このことは、坑道の床の置かれた伸縮計より坑道壁に設置した歪ゲージ歪計の方がはるかに大きい値を示すことである。すなわち、気圧変化による坑道の変形は壁の方が床よりもはるかに大きいことを示すのではないだろうか。

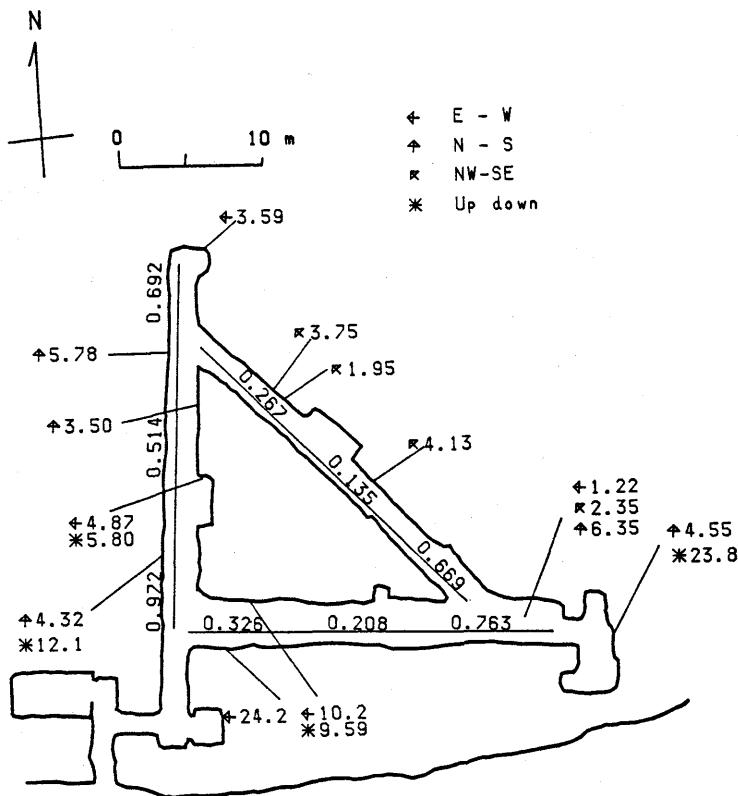


Fig. 7.7. Comparison between observed strain responses from atmospheric pressure changes obtained by the strain-gage strainmeters and the extensometers. The unit is 10^{-10} strain/mb.

b) 多測定点伸縮計

歪ゲージ歪計による気圧効果の観測値を示した Fig. 5.9 と、多測定点石英管伸縮計の気圧効果を示した Fig. 7.4 から、相互に関係があると思われる観測値をまとめて Fig. 7.8 に示すことにする。同様に歪ゲージ歪計と伸縮計による気圧効果の値の比較を行った Fig. 7.7 に比較してみると、多測定点伸縮計の気圧効果の値が 10 倍以上になったことがわかる。歪ゲージ歪計の寸法が僅かに数 cm 程度であるのに対して、従来の伸縮計の長さの寸法比が 160 倍程度であったものが、多測定点伸縮計では長さが 2 m となったから約 30 倍の寸法比と小さくなつたわけである。その結果として両観測法によって得られる歪値が相互に近い値を示すようになることは容易に予想ができる。Fig. 7.8 に記された歪ゲージ歪計による観測地点 9 点と、これと比較することが可能な多測定点伸縮計の 9 個の気圧効果を比較するために、Table 7.3 をまとめた。この Fig. 7.8 と Table 7.3 を照合することによって次のような解釈が可能である。

坑道壁に接着された歪ゲージ歪計と坑床に設置された多測定点伸縮計の各々の気圧効果の比をみると以下に示すようなことがいえる。N-S と NW-SE 坑道における 6 個所のう

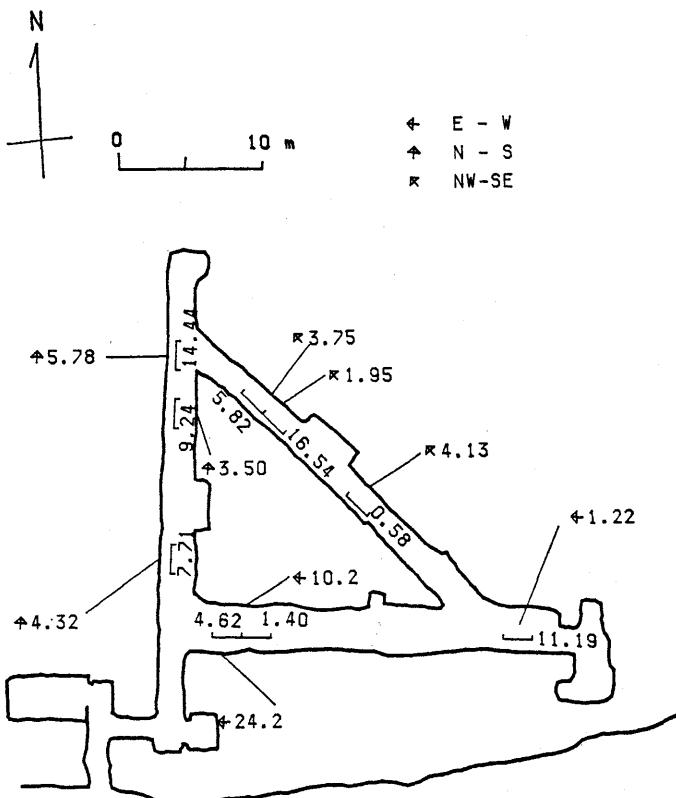


Fig. 7.8. Comparison between observed strain responses from atmospheric pressure changes obtained by the strain-gage strainmeters and the multi-sensored extensometers. The unit is 10^{-10} strain.

Table 7.3. Comparison between results of strain responses from atmospheric pressure changes obtained by the strain-gage strainmeters and the extensometers.

Component	No. of sensor		Observation result [10^{-10} strain/mb]		Ratio
	Strain gage	Extensometer	Strain gage	Extensometer	
E-W	⑤	②-①	1.22	11.19	0.11
	⑥	⑬-⑫	24.2	4.62	5.24
	⑩	⑫-⑪	10.2	1.40	7.29
N-S	③	⑤-④	3.50	9.24	0.38
	⑦	④-③	5.78	14.44	0.40
	⑩	⑪-⑩	4.32	7.71	0.56
NW-SE	①	⑩-⑨	1.95	16.54	0.12
	②	⑪-⑩	3.75	5.82	0.65
	③	⑦-⑥	4.13	0.58	6.47

ち5個所の観測値の比が $1/4\sim1/2$ と比較的似たような値を示すことがわかった。これに對して、E-Wの坑床に置かれた歪ゲージ歪計と多測定点伸縮計の比のみが $1/9$ となる。しかし、ほかのE-W坑道の2個所とNW-SE成分の中の1個所の坑道壁の歪ゲージ歪計と伸縮計の観測値の間には $6/1$ というような、他の点と逆の関係を示す箇所もあることがわかる。

これらの数値間の関係は観測場所の違い、すなわち側壁と床の違いに起因するものか、あるいはセンサの寸法に關係しているかのいずれかであろう。この問題については9章において論ずる。

7.4.2 潮汐成分

a) 伸縮計

潮汐成分による歪変化の最小2乗法による解析値 (Table 5.2 と Table 7.1) より M_2 分潮を選択して、それぞれ観測地点ごとにまとめて Fig. 7.9 に示す。この図によると、E-W成分は伸縮計が①、②と③の順に歪量が 53.8, 44.8 および 47.4×10^{-10} strain となっている。これに対して、歪ゲージ歪計の場合は④、⑤、⑧、⑨と⑩の観測地点について

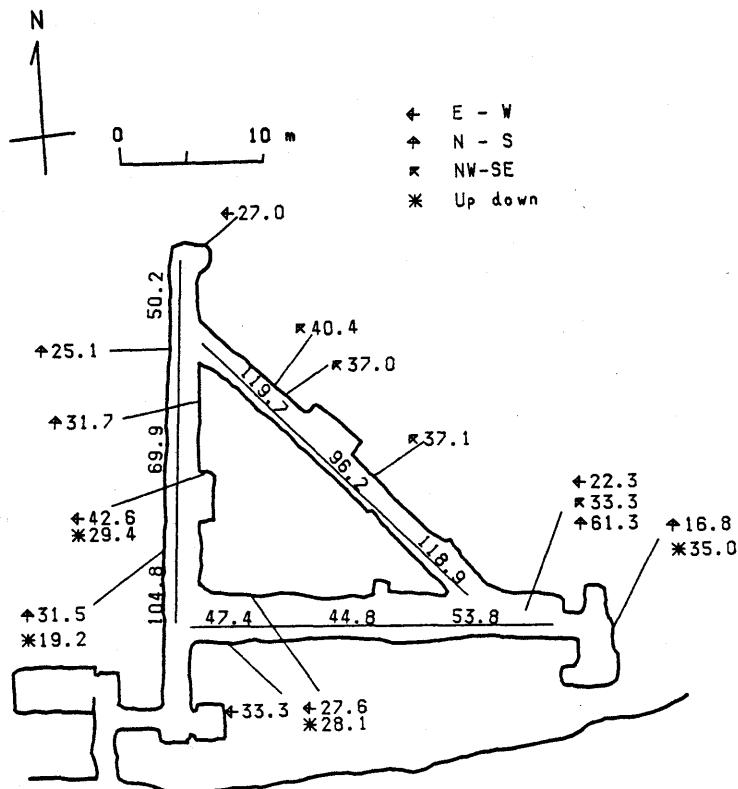


Fig. 7.9. Comparison between results of harmonic analyses of M_2 tide obtained by the strain-gage strainmeters and the extensometers. The unit is 10^{-10} strain.

て、42.6, 22.3, 33.3, 27.0 および 27.6×10^{-10} strain である。すなわち歪ゲージ歪計の方が伸縮計に比較して 0.4~0.6 位の振幅を示すことになる。

N-S 成分については、伸縮計が ①, ② と ③ の順に歪量が 50.2, 69.9 および 104.8×10^{-10} strain である。これに対して、歪ゲージ歪計の歪量は ③, ⑤, ⑦, ⑪ と ⑫ の観測地点について 31.7, 61.3, 25.1, 31.5 および 16.8×10^{-10} strain であり、後者が前者に比較して 0.2~0.5 位の振幅比となっている。これは E-W 成分に比べて土被りが大きいため減衰が大きいと考えられる。

NW-SE 成分については、伸縮計の歪量が ①, ② と ③ の順に 118.9, 96.2 および 119.7×10^{-10} strain となっている。これに対して、歪ゲージ歪計の歪量は ①, ②, ⑤ と ⑥ の観測地点について 37.0, 40.4, 33.3 および 37.1×10^{-10} strain の振幅であり、伸縮計に比較して歪ゲージ歪計の歪量が 0.3 倍位の振幅をもつ。

このように、歪ゲージ歪計と伸縮計の値を各方向成分ごとに M_2 分潮の振幅について比較すると、歪ゲージ歪計によって得られた歪変化の振幅のほうが伸縮計の場合より 0.2~0.3 倍であることがわかる。いま、潮汐成分を信号、気圧変化を雑音と考えると、伸縮計は歪ゲージ歪計より 6~20 倍も有利であるといえる。おそらく観測所付近の山体は多数の

Table 7.4. Comparison between results of strain responses from atmospheric pressure changes obtained by the strain-gage strainmeters and the multi-sensored extensometers.

Component	No. of sensor		M_2 Observation result [10^{-10} strain]		Ratio
	Strain gage	Extensometer	Strain gage	Extensometer	
E-W	⑤	②-①	22.3	62.7	0.36
	③	④-②	33.3	109.3	0.30
	⑪	④-⑩	27.6	51.0	0.54
N-S	③	⑤-④	31.7	74.9	0.42
	⑦	④-⑤	25.1	81.6	0.31
	⑪	④-⑩	31.5	17.9	1.76
NW-SE	①	⑩-⑨	37.5	101.3	0.37
	②	⑪-⑩	40.4	99.4	0.41
	③	⑦-⑥	37.1	120.1	0.37

Component	No. of sensor		K_1 Observation result [10^{-10} strain]		Ratio
	Strain gage	Extensometer	Strain gage	Extensometer	
E-W	⑤	②-①	24.6	54.1	0.45
	③	④-②	69.0	47.7	1.45
	⑪	④-⑩	49.9	4.8	10.4
N-S	③	⑤-④	36.1	60.1	0.60
	⑦	④-⑤	28.3	37.6	0.75
	⑪	④-⑩	55.3	17.3	3.23
NW-SE	①	⑩-⑨	43.1	110.9	0.39
	②	⑪-⑩	53.4	84.8	0.63
	③	⑦-⑥	74.9	98.3	0.76

小ブロックの岩体により構成されていて、単一ブロックは潮汐変化によって弾性的に変形しにくいのに対して、山全体としてはある集合的なブロックがレスポンスを起こしているのであろう。もしかすると、歪ゲージ歪計は単一ブロックの運動を検出するためにレスポンスが小さく、伸縮計は複数のブロックにまたがるために、レスポンスが大きくなるものかもしれない。

b) 多測定点伸縮計

気圧効果と同様に、Table 7.2 から多測定点伸縮計による地球潮汐の半日潮の M_2 分潮と一日潮の K_1 分潮の値を選び出す。また Table 5.2 歪ゲージ歪計による観測を比較を行うために、Table 7.4 をまとめた。

Table 7.4 の M_2 分潮をみると、各成分にあまり区別なく、坑道壁に接着した歪ゲージ歪計による観測値と多測定点伸縮計の値の間に $1/3 \sim 1/2$ 程度の比が成立することがわかる。ただし、N-S 成分の歪ゲージ歪計⑩と伸縮計の観測点⑪-⑭についてのみ、この比が $3/2$ に近い。しかし、その両隣では多測定点伸縮計の歪値も通常の値になるので、坑道の内部でもこの場所はかなり特異な場所ではないかと思われる。

同じく K_1 分潮についてみると、N-S と NW-SE 両成分の K_1 と M_2 分潮の歪ゲージ歪計と多観測点伸縮計の観測値の比はよくあって思われる。しかし、N-S 成分の歪ゲージ歪計⑩と多観測点伸縮計の⑪-⑭の場合は M_2 分潮のときと同じく、この比が $3/1$ と逆である。また、E-W 成分が M_2 分潮と大幅に違う理由は不明であるが、これは K_1 分潮が観測所の土被りが浅いことによる坑内温度変化の影響を受け易いことが原因であるかもしれない。

8 章 坑道変形の境界要素法による解析

8.1 2 次元境界要素法による解析

8.1.1 解析の目的

5 章において歪ゲージ歪計による観測について、7 章において多測定点伸縮計による観測について記述した。これらの観測結果をみると、気圧変化による観測坑の変形と歪変化が極めて大きい値を示していることが知れる。そのうえ観測坑内の歪変化の分布状態が極めて複雑である。これは観測坑道の形状のほか、観測坑の上部および周辺の地形の影響を大きく受けている結果と考えられる。

気圧変化による観測坑道の歪変化の原因を探るための一つの方法として、2 次元境界要素法 (BEM) による解析を試みる (柳沢, 1987a)。このような場合の解析方法としては、従来から有限要素法 (FEM) が用いられてきた。この一例として、小川 (1980) は 2 次元 FEM を用いて鋸山観測所付近の地形断面より歪地震計に対するストレイン・ステップの影響を計算している。しかしここでは FEM によらず、BEM を用いることにする。その理由は半無限空間を用いて坑道の形状をある程度表現できること、および要素データの入力が容易であることなどである。

本章においては、2 次元 BEM を用いて、地表面が水平でかつ平坦である場合と、平坦な地表面が傾斜している場合について、それぞれ観測坑が気圧変化によってどのような

変形を受けるかの計算を行う。続いて、観測坑周辺の地形データを用いて観測坑の気圧効果を求める計算を行うこととする。

これらの理論計算に用いる岩石の力学的性質については3.1において述べている通り、砂岩・泥岩や凝灰岩のヤング率は $0.967\sim 8.18 \times 10^{10}$ Pa、またポアソン比は0.16~0.30の範囲にある。これらの値を参考にして、最も軟らかい岩石のヤング率とポアソン比をそれぞれ 0.967×10^{10} Pa および 0.30、最も硬い岩石については 8.18×10^{10} Pa および 0.16 と仮定し、これら2組の数値を用いて今後の計算をする。なお実際の地形データを採用した計算において Table 3.1 の弾性定数を使用することとする。

これから実施しようとする2次元BEM計算においては、地殻を2次元の等方で均質な弾性体として取り扱っている。したがって、Fig. 8.1において紙面に垂直方向(Z軸方向)の変形は全くないと仮定している。また観測坑の四隅における応力の集中が極めて大きいことが示されている(POULOS and DAVIS, 1974)ので、これを避けるため本研究においては観測坑の天井、床と両側壁の中央部分のみに論議を限ることとする。

8.1.2 境界要素法

数値解析の手法として、微分方程式の直接解法である差分法と変分的解法であるFEMが有力な近似解法として用いられてきた。これと併行して、古典的な積分方程式もあまり使用されなくなった。それは積分方程式による定式化に際して、重要な役割を担うグリーン関数の構成の困難さがあるためである。この困難さの解決の手段としてFEMで用いられた離散化の手法が応用されて、新しい数値計算法としてBEMが誕生したことを紹介している(登坂, 1984)。BREBBIA (1978), BREBBIA and WALKER (1980) はグリーンの公式に基づくことなく、解の重みつき残差表現式という立場から汎用性の高い直接法による近似解法に成功した。

このFEMとBEMを比較してみると、要素分割にあたってFEMが領域をとるのに対して、BEMでは境界をとる。このため要素と節点の数はFEMが極めて多いのに対して、BEMでは少ない。マトリックスでいうならばFEMが対称マトリックスで対角成分より遠い成分は零になるのに対して、BEMでは非対称マトリックスでその上に零になる成分はほとんどない、したがって、入力する境界節点のデータ量が少ないのでかわらず、コンピュータの記憶容量のうえでBEMの利点は少ない。BEMにおいては無限領域を含む問題や境界が移動する問題が適していると思われる。

ここで使用した計算機のプログラムは2次元の弾性問題を取り扱うBEMで、さきのBREBBIA (1978)のプログラムをもとに石井・里(1986)が半無限平板用に改良したものを使用した。実際の計算は地震研究所のコンピュータ HITAC-M280Hを使用し、境界節点数360で一語長をREAL*8 byteとしたとき使用したメモリは約8 Mbyteで計算時間は約90秒であった。

8.2 気圧効果における坑道変形の2次元解析

8.2.1 地表面が平坦なときの坑道変形

鋸山観測所の実際の地形を取り扱う前に、モデルを用いて坑道変形解析を実施する。まず最も単純なモデルとして、地表面を平坦と仮定し、Fig. 8.1に示すような境界条件の

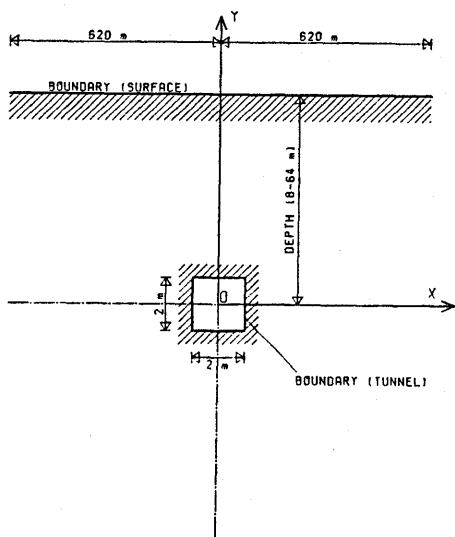


Fig. 8.1. Boundary conditions for a flat horizontal surface model.

もとで2次元の解析を行った。まず、地表面から8~64mの深さに断面 $2\text{m} \times 2\text{m}$ の坑道があるものとする。このとき、地表面と坑道の2つの境界節点にそれぞれ1次元の境界節点を設定する。そして、気圧はすべてこの境界節点に働くものと考える。このときに地表面の境界節点の数は、観測坑の直上を中心として両側にそれぞれ620mの範囲に100個ずつ合計200個配置した。また地表面における境界節点間の距離は坑の直上の中心から±20mまでは1m, ±20~±60mまでは2m, ±60~±140mまでは4m, ±140~±320mまでは8m, および±320~±640mまでは16mにとった。そして坑道についてはその表面に0.1m間隔ですべての境界節点を配置したので、この合計は80個となる。このように境界節点の総合計は280個にのぼる。

Fig. 8.1の場合、気圧の影響は地表面に加わると同時に観測坑内面にも同じ圧力が加わることとなる。気圧によって観測坑がどの様な変位と変形を起こすかをFig. 8.2に示す。Fig. 8.2(a)には32mの土被りのとき、岩石が軟らかな場合(ヤング率 0.967×10^{10} Pa, ポアソン比0.30)と、Fig. 8.2(b)に岩石が硬い場合(ヤング率 8.18×10^{10} Pa, ポアソン比0.16)のそれぞれの観測坑の変位と変形が示されている。なお、これらの図に示した変形は坑道内に配置された80個の節点の変位の平均を求め、この値を各節点の変位から差し引いて求めたものであり、以下においても変形を求めるときは同じ操作をする。図中の(A)は地表面のみに圧力が働いている場合、(B)は観測坑の内面のみに圧力が働く場合であり、(C)は地表面と観測坑の両者に圧力が働く場合である。この図で特徴的なことは、地表面に働く力は坑道の天井と床を押す上下の応力よりも、坑道の側面を押す水平の応力となって現われることである。この様子を明らかにするためFig. 8.3(a)に軟らかな岩石とFig. 8.3(b)に硬い岩石の両者の主応力図を示す。主応力の方向について云えば、坑道の付近を除いて水平の応力が垂直な応力よりかなり大きいことがわかる。このとき軟らかい岩石と硬い岩石の差は水平応力の大きさの差となって現われる。

次に、観測坑の地表面よりの深さ(土被り)とともに、坑道の変位と変形がどの様に変化するかをFig. 8.4に示す。この図からわることは、坑道の深さが8mから64mでは8倍も変化しているのにもかかわらず、観測坑の変位と変形は深さによってほとんど変化しないことである。

また、観測坑の地表面からの深さと歪の関係を明瞭にするためFig. 8.5を示す。この図において天井(CEILING)、床(FLOOR)と両壁(WALL)はそれぞれ中央の部分における値を示している。土被りが増加すると歪量の絶対値は極めて僅かながら減少する。

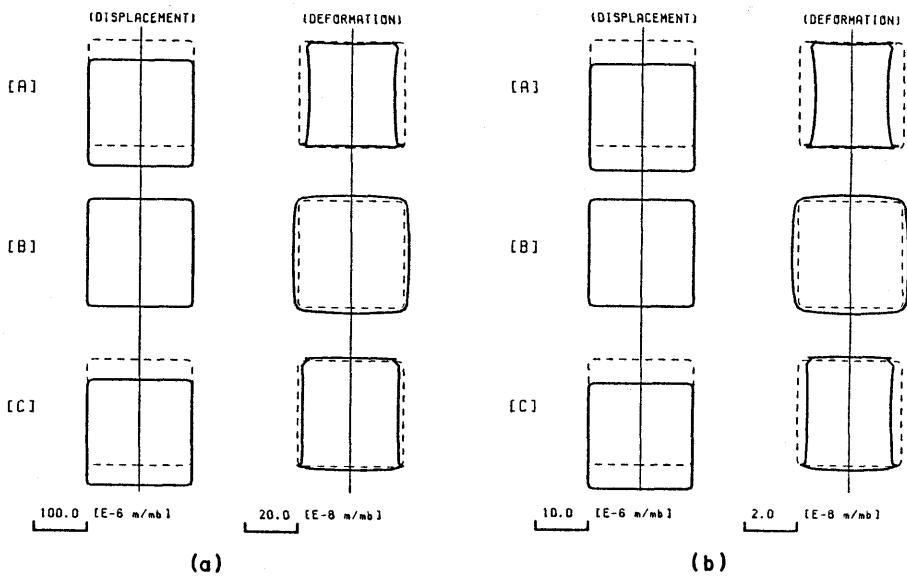


Fig. 8.2. Displacement and deformation induced by an atmospheric pressure change acting on the flat horizontal surface model (Fig. 8.1). The depth to the tunnel is 32 meters. (a) Young's modulus: 9.67×10^9 Pascal, Poisson's ratio: 0.30. (b) Young's modulus: 8.18×10^{10} Pascal, Poisson's ratio: 0.16.

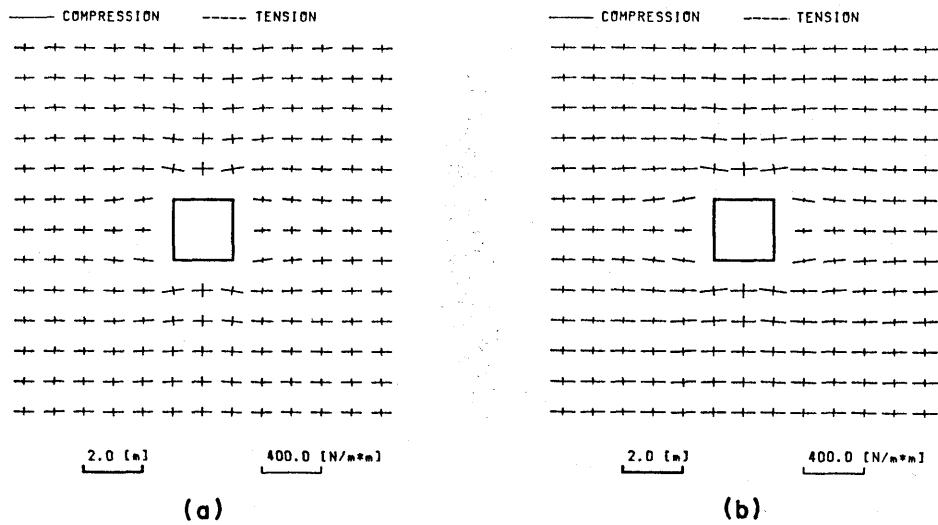


Fig. 8.3. Principal stress induced by atmospheric pressure changes acting on the flat horizontal surface model (Fig. 8.1). (a) Young's modulus: 9.67×10^9 Pascal, Poisson's ratio: 0.30. (b) Young's modulus: 8.18×10^{10} Pascal, Poisson's ratio: 0.16.

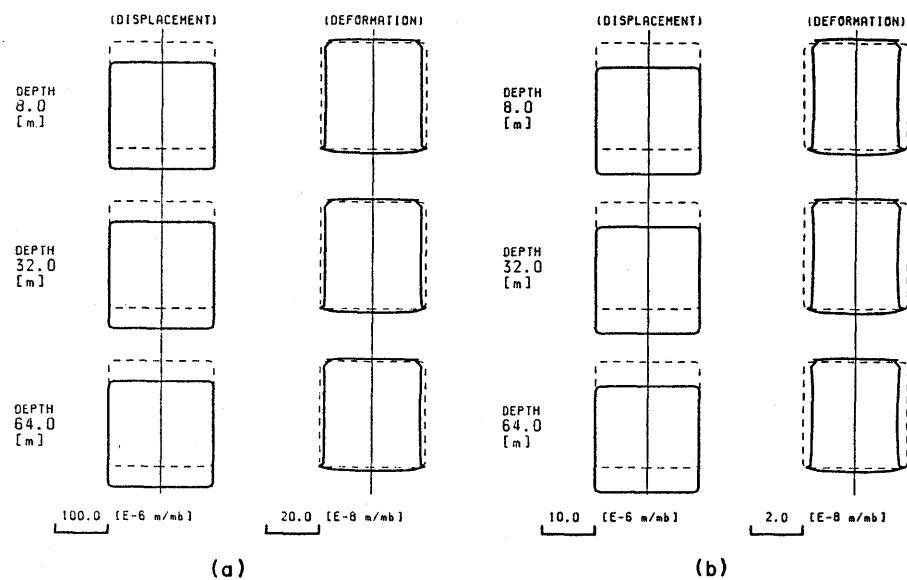


Fig. 8.4. Pressure-induced displacement and deformation varying with depth. (a) Young's modulus: 9.67×10^9 Pascal, Poisson's ratio: 0.30. (b) Young's modulus: 8.18×10^{10} Pascal, Poisson's ratio: 0.16.

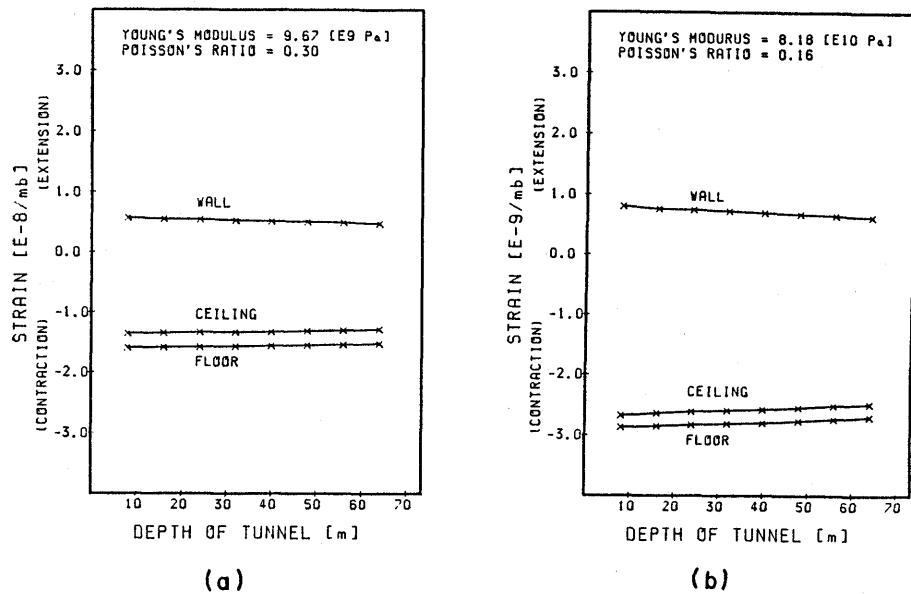


Fig. 8.5. Strain change with the depth of the tunnel. (a) Young's modulus: 9.67×10^9 Pascal, Poisson's ratio: 0.30. (b) Young's modulus: 8.18×10^{10} Pascal, Poisson's ratio: 0.16.

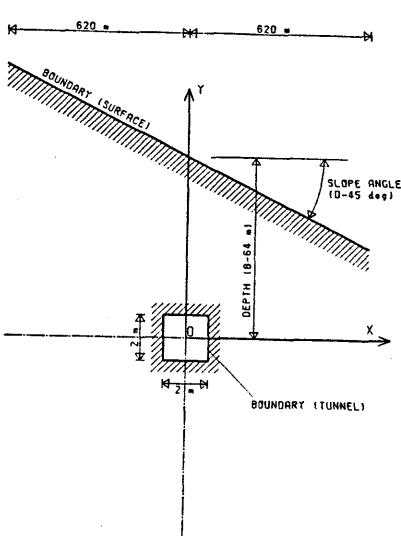


Fig. 8.6. Boundary conditions for a sloping surface model.

斜させていったときに、大気圧によって観測坑道がどのような変位と変形を起こすかを調べることにする。その計算結果のうちから、傾斜角が 0° （地表面が水平な場合）、 20° と 40° の場合をFig. 8.7に示す。Fig. 8.7を見ると、変位については平面に直角な方向で地表面から遠くなる方向に移動することがわかる。このように地表面が一様に傾斜しているときの観測坑道の変位は、Fig. 8.7で云えば、右上の方向から気圧によって押されるから、左下の方向に移動することになる。傾斜角が増加するに従って坑道は左方向の変位が大きくなることがわかる。同じくFig. 8.7における変形については、傾斜角によってかなり変化の様子が異なってくる。地表面の傾斜角が 0° （即ち水平）のとき坑道の変形はほぼ矩形であったが、傾斜角が大きくなると天井の右上隅と床の左下隅を結ぶ線を中心にしてこの方向に延びた菱形となる。この状況を詳しくみるために主応力図をFig. 8.8に示す。この図を地表面が水平な場合（Fig. 8.8）と比較してみると、観測坑の周辺を除いて、主応力が地表面に平行に傾いていることがわかる。

これらの観測坑道内の歪変化を示すため傾斜角と歪の関係をFig. 8.9に示す。この図を見ると、観測坑の形が正方形のため、傾斜角が 45° になると壁の右側と床および壁の左側と天井のそれぞれの歪が同じ量になることがわかる。深さ16 mの場合について同様な計算を行ってみても結果に大きい変化はみられない。このようにみると観測坑道の変形を大きく支配しているのは地形であると云うことができる。

このように2次元の境界要素法を用いて気圧変化による坑道の変位、変形と歪についての解析を行った。その結果、変位と変形について次のことが結論できる。

- a) 坑道の地表面よりの深さ、すなわち土被りによってほとんど影響されない。
- b) 坑道付近の地形が非常に大きく影響する。

そして気圧が増加するとき天井と床は縮小し、反対に両壁は伸長することがわかる。軟らかな岩石と硬い岩石の歪量の大きさの差となって現われる。以上のことから地表面が平坦であるとき、気圧変化によって起こされる坑道の変位、変形および歪は坑道の深さ（土被り）にほとんど関係しないことがわかる。

8.2.2 地表面が傾斜しているときの坑道変形

Fig. 8.6 のように地表面が一様に傾斜している場合に、坑道が地表面の傾斜角によつていかなる変位と変形を生ずるかについて計算する。このときの境界条件はFig. 8.1の場合の地表面を一様に傾けた場合に相当する。このときの地表面の境界節点間の水平の距離は前述の場合と同じである。

いま観測坑道が深さ32 mにあるとき、地表面の傾斜角を 5° ～ 45° の範囲で 5° 毎に順次傾

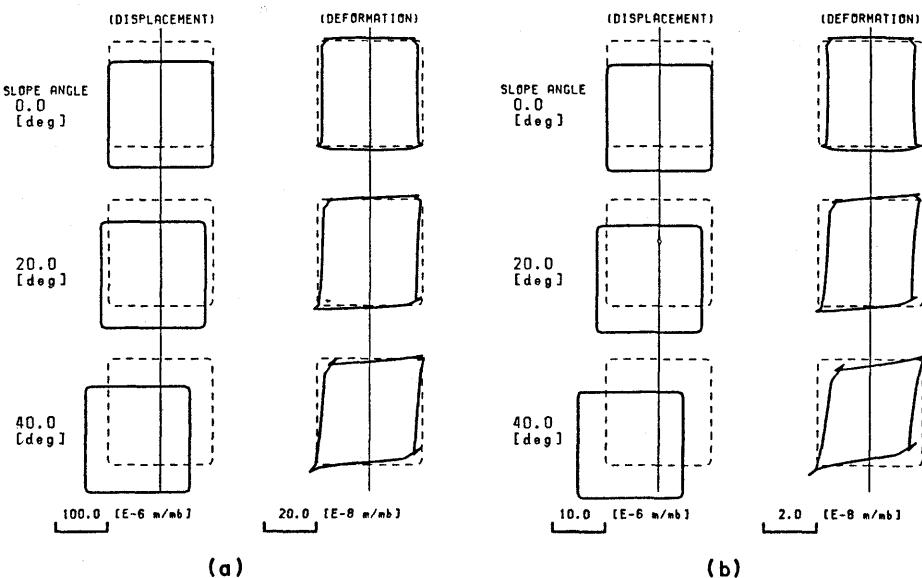


Fig. 8.7. Displacement and deformation induced by an atmospheric pressure change for the sloping surface model (Fig. 8.6). The depth to the tunnel is 32 meters.
 (a) Young's modulus: 9.67×10^9 Pascal, Poisson's ratio: 0.30. (b) Young's modulus: 8.18×10^{10} Pascal, Poisson's ratio: 0.16.

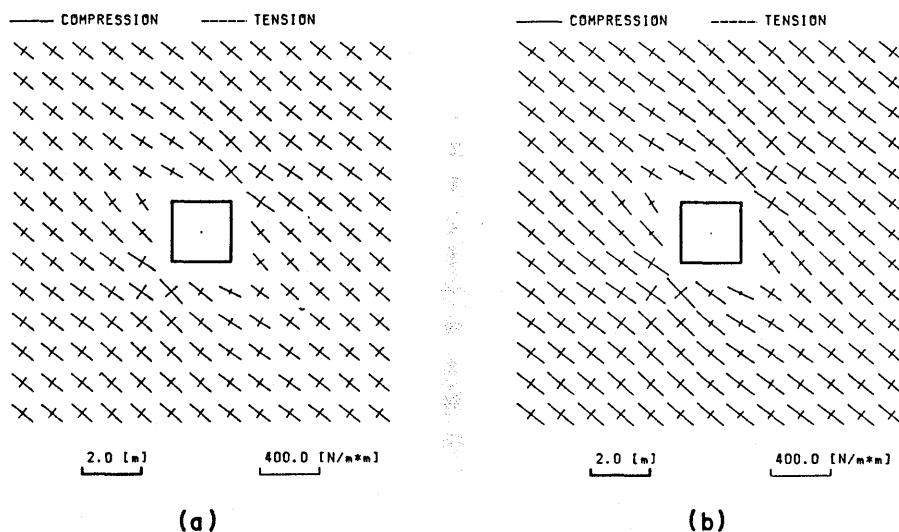


Fig. 8.8. Principal stress induced by atmospheric pressure changes for the sloping surface model (Fig. 8.6). The depth to the tunnel is 32 meters and sloping angle of surface is 40 degrees. (a) Young's modulus: 9.67×10^9 Pascal, Poisson's ratio: 0.30. (b) Young's modulus: 8.18×10^{10} Pascal, Poisson's ratio: 0.16.

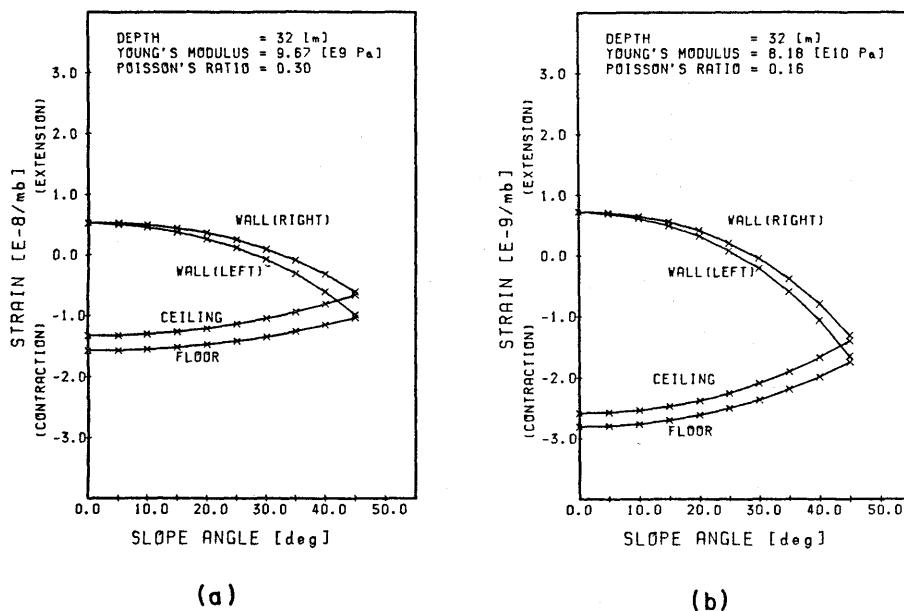


Fig. 8.9. Strain change with slope angle. The depth to the tunnel is 32 meters.
(a) Young's modulus: 9.67×10^9 Pascal, Poisson's ratio: 0.30. (b) Young's modulus: 8.18×10^{10} Pascal, Poisson's ratio: 0.16.

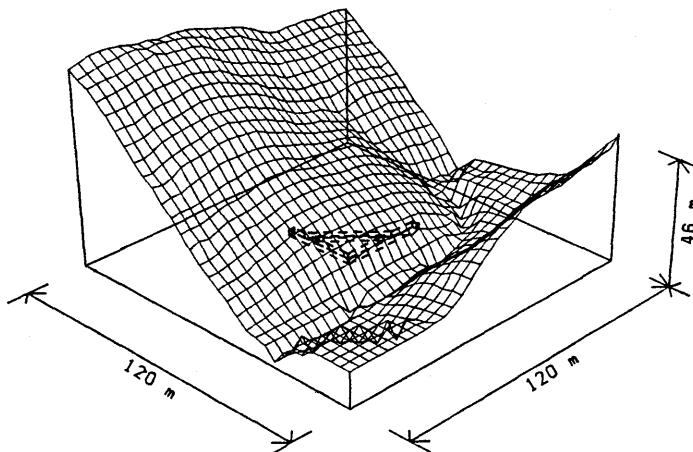


Fig. 8.10. Perspective view of the topography around the Nokogiriyama Crustal Movement Observatory.

8.3 地形データによる坑内歪の計算

8.3.1 歪ゲージ歪計の観測地点に対応する坑内歪の計算

鋸山観測所の坑道とその周辺の地形 (Fig. 2.3) の特徴をさらに詳しく把握するために透視図 Fig. 8.10 を作る。観測坑と周辺の地形をみると、E-W 坑道と平行して谷川があ

り、坑道の東端を過ぎたあたりから北に屈曲することがわかる。このため E-W 坑道の東の部分は土被りがかなり浅くなる。N-S 坑道は東西に走る尾根にはほぼ直角に掘削されているため、北端は土被りがこの観測所としてはかなり深くなる。これに対して、NW-SE 坑道は土被りの深い N-S 坑と浅い E-W 坑の両者の特徴を併せて持つことになる。

観測坑内の歪ゲージ歪計の配置地点 (Fig. 5.1, 参照) ごとに、実際の地形を用いて 2 次元 BEM による解析を試みる (柳沢, 1988)。解析の方法およびコンピュータの計算プログラムは 8.2 と全く同じものを使用する。観測坑道の断面の寸法はすべて実測し、地形表面の高さのデータは 1/5,000 の地形図 (富津市発行) より観測坑道に直角な方向に読み取った。地形データの高さの精度は約 $\pm 1\text{ m}$ であると思われる。このようなことから、

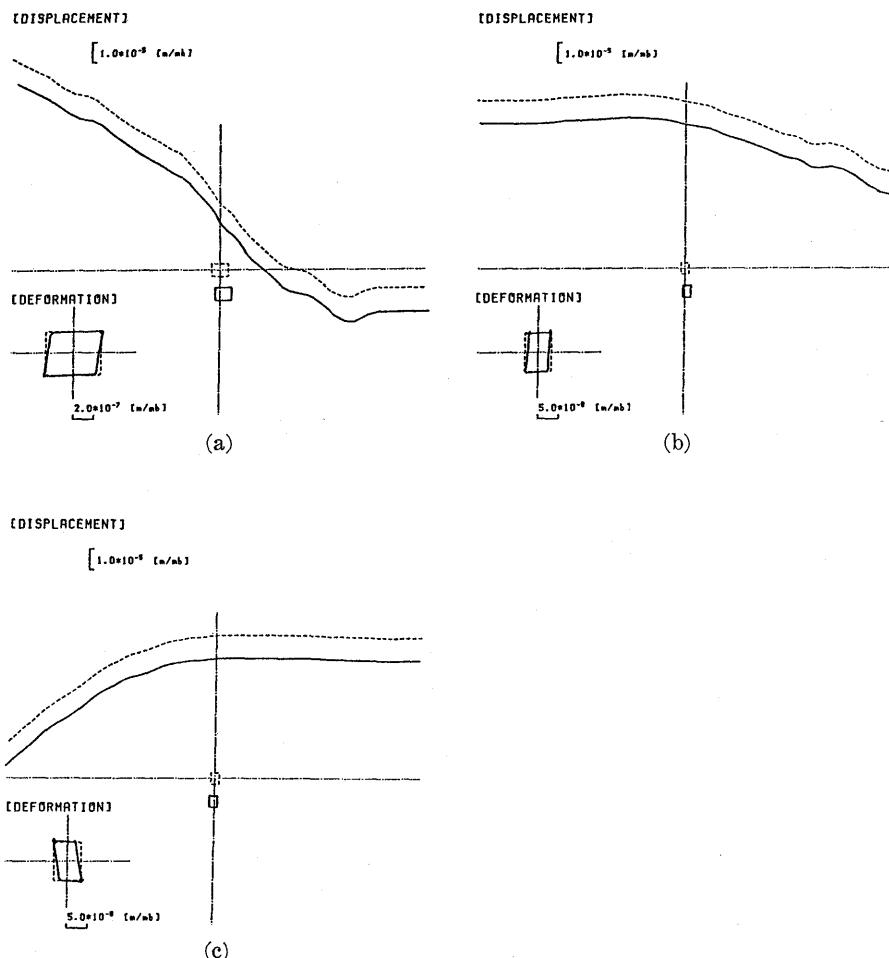


Fig. 8.11. Displacement and deformation induced by an atmospheric pressure change of (a) E-W component at Point ⑪, (b) N-S component at Points ③ and ⑦, and (c) NW-SE component at Points ① and ②. Young's modulus: 4.64×10^{10} Pascal, Poisson's ratio: 0.205.

実際の地形と異なって、観測点のおかれた観測坑と平行な方向は同じ地形が無限に続くと考えなければならない。

理論計算に用いる岩石の力学的性質は3章において記述したように、鋸山観測所の坑内から採取された凝灰質砂岩の実測値を使用する。Table 3.1においては、ヤング率が $0.337\sim4.90\times10^{10}$ Pa、ポアソン比が $0.191\sim0.263$ の範囲内であることを示している。ここでは最も軟らかい岩石としてサンプル No. 1 と 2 の平均をとり、ヤング率 0.383×10^{10} Pa、ポアソン比 0.263、中間の硬さの岩石としてはサンプル No. 3 と 4 の平均を取り、ヤング率 2.94×10^{10} Pa、ポアソン比 0.191、および最も硬い岩石としてはサンプル No. 5 と 6 の平均を取り、ヤング率 4.64×10^{10} Pa、ポアソン比 0.205 を仮定し、これらの数値を用いて今後の計算を行う。

岩石の弾性定数は計算の範囲内すべて一様であるとして、前記の Table 3.1 の実測値 3 種類を採用する。境界条件は前節において紹介したように地形が平坦で水平および傾斜している場合とほとんど同じである。地表面の境界節点の数も同じく 200 個配置し、境界節点間の水平距離も同じである。高さデータは地形図より読みとったデータを用いている。観測坑も境界節点の数は同じく 80 個で、天井、床と両側壁の配置数は各々 20 個であり、その間隔のみ実測値を採用している。

Fig. 8.11(a) に示すのは E-W 坑道の計算例として、坑道壁の観測地点⑪を断面の西側から東方向にみた場合である。計算に使用した地形の範囲 ± 640 m すべてを示すと観測坑が小さくなり過ぎるため、ここでは観測坑を中心として ± 30 m の範囲の断面のみを示す。気圧の影響は地表面に加わると同時に観測坑内にも同じ圧力が加わることとなる。このとき、気圧変化によって地表面と観測坑が変位を起こすが、このようすを変位(DISPLACEMENT)として示している。この図において気圧変化前を点線で、変化後を実線で表わしている。この Fig. 8.11(a) に示していない範囲の地形をみると、計算に使用した ± 640 m の範囲の地形は圧倒的に南が高くなっている。このような場合 Fig. 8.7 に

Table 8.1. Atmospheric pressure changes calculated by the boundary element method at observation points by strain-gage strainmeters.

Sample number of rock Young's modulus [Pa] Poisson's ratio		1 and 2 3.83×10^9 0.263	3 and 4 2.94×10^{10} 0.191	5 and 6 4.64×10^{10} Pa 0.205
Observation point	Component	[10^{-10} strain/m]	[10^{-10} strain/m]	[10^{-10} strain/m]
①	'Up-Down'	77.3	14.7	8.69
②	'	77.3	14.7	8.69
③	'	33.0	5.47	3.32
④	'	1713.	38.6	25.4
⑤	N - S	462.	21.6	13.6
⑥	Up-Down	77.1	14.5	8.59
⑦	'	36.1	5.84	3.55
⑧	'	1788.	44.9	28.0
⑨	'	1477.	29.4	19.7
⑩	'	37.5	5.59	2.66
⑪	'	1717.	42.0	27.3
⑫	'	46.8	7.70	4.77

も示したように、気圧が加わると観測坑は地形の高い方に変位する。Fig. 8.11(a)においても南に少し変位していることがわかる。また同図中の左下に観測坑道の変形(DEFORMATION)の様子もやはり実線で示してある。この変形をみると変位と異なって、ここに表示したような比較的近い部分の地形に支配されていることがわかる。

同様に、N-S 坑道の例として坑道断面におかれた③と⑦の観測地点を断面の南側から北方向を見る場合を Fig. 8.11(b) に示す。この坑道は東西にのびる尾根にはほぼ直角に掘られているため、大きな地形としては尾根に平行で変位は上下のみであることがわかる。変形はこの図からわかるようにやはり地形の小さな部分に支配されている。Fig. 8.11(c) は NW-SE 坑道の例として坑道断面に設置された観測地点①と②を断面の東南側から北西方向に見たものである。観測坑道の変位と変形についてはやはりこれまでに説明してきたことと同じ傾向があることがわかる。

Fig. 5.1 に示した歪ゲージの 12箇所の観測地点について、それぞれ坑道の切断面を作り BEM による計算を行い、その結果を Table 8.1 に示す。次章において詳しく論議するが、Table 5.2 に示した歪ゲージ歪計による観測値と 3種類の弾性定数をもとにした BEM による計算値のうち、最も硬い岩石に相当するヤング率 $E=4.64 \times 10^{10} \text{ Pa}$ とポアソン比 $\nu=0.205$ が観測値と比較的よく合うようである。

8.3.2 多測定点伸縮計に対応する坑内歪の計算

多測定点伸縮計の観測結果と比較を行うため、上記の歪ゲージ歪計の観測地点に相当する場合と同様に実際の地形を用いて 2 次元 BEM による解析を試みる。解析の方法およびコンピュータの計算プログラムは上記したものと全く同じである。しかし、前項までの観測坑道断面の寸法は約 $2\text{m} \times 2\text{m}$ であったが、今回の場合の坑道断面の寸法は高さは同じく約 2m であるが横幅が約 30m にも達する。したがって、地表面の境界節点の範囲は前回までが $\pm 640\text{m}$ であったが、今回はその坑道断面の横幅の比 $30/2=15$ 倍は比例的に大きくする必要があることから、 $\pm 10\text{km}$ まで地表面に境界節点を設定した。観測坑道の断面の寸法はすべて実測し観測坑道と同一方向に沿った地形表面の高さのデータは $1/5,000$ と $1/25,000$ (国土地理院発行) の地形図より読みとった。地形データの高さの精度は読み取り精度を含めて、 $1/5,000$ の地形図の場合に $\pm 1\text{m}$ 、 $1/25,000$ の地形図の場合に $\pm 10\text{m}$ 程度であると思われる。

岩石の弾性定数は上記と同じように、計算の範囲内はすべて一様であるとし、前記の Table 3.1 の実測値 3種類を採用する。境界条件として、地表面の境界節点の数は 180 個配置し、境界節点の水平距離は $\pm 20\text{m}$ までは 2m 、 $\pm 20 \sim \pm 60\text{m}$ までは 4m 、 $\pm 60\text{m} \sim \pm 200\text{m}$ までは 10m 、 $\pm 200 \sim \pm 400\text{m}$ までは 20m 、 $\pm 400 \sim \pm 800\text{m}$ までは 40m 、 $\pm 800\text{m} \sim \pm 1800\text{m}$ までは 100m 、 $\pm 1800 \sim \pm 4000\text{m}$ では 200m 、および $\pm 4 \sim \pm 10\text{km}$ までは 1km にとった。そして坑道断面の境界節点については坑道の床と天井で 0.5m 間隔とし、両側壁では $0.15 \sim 0.2\text{m}$ 間隔に配置し、床に段差がある場合その分増加するので、境界節点の合計は 144 ～ 146 個である。このように境界節点の総合計は 324 ～ 326 個になる。

Fig. 8.12(a) に示すのは E-W 坑道を断面の北側から南方向に見たもので、計算に使用した地表面の節点の範囲は $\pm 10\text{km}$ あるが、これをすべて表示すると観測坑が小さくな

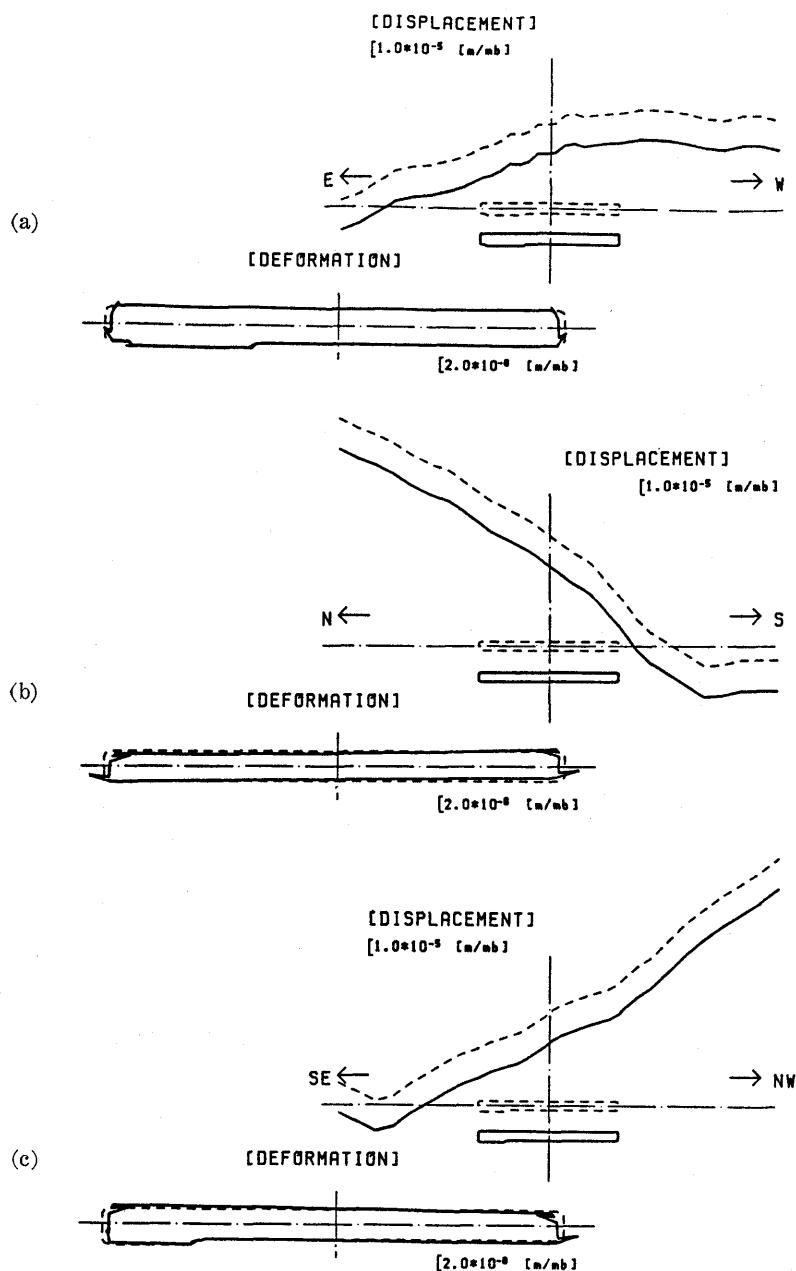


Fig. 8.12. Displacement and deformation induced by atmospheric pressure changes of (a) E-W component, (b) N-S component and (c) NW-SE component of the multi-sensored extensometers. Young's modulus: 4.64×10^{10} Pascal, Poisson's ratio: 0.205.

りすぎるので、ここで表示したのは観測坑を中心として ±48 m の範囲のみである。気圧変化によって地表面と観測坑が変位を生ずるが、Fig. 8.11(a)～(c) と同様に気圧変化前の変位を点線で、変化後の変位を実線で表わしている。観測坑の東寄りの部分の土被りがかなり浅いことがわかる。観測坑道の床は東部に一段と低い部分があることがわかり、Table 8.2 の解析の結果は多測定点伸縮計の測定点 (Fig. 7.1) に合わせて歪値を示しているが、E-W 坑道の観測点④-③が唯一の負符号 (気圧が増加したとき伸張歪) 値の場所であり、その反面⑤-④の計算値がほかの場所と比べて正符号 (気圧が増加したとき圧縮

Table 8.2. Atmospheric pressure change calculated by the boundary element method at observation sites by multi-sensored extensometers.

Sample number of rock Young's modulus [Pa] Poisson's ratio		1 and 2 3.83×10^9 0.263	3 and 4 2.94×10^{10} 0.191	5 and 6 4.64×10^{10} 0.205
Component	Segment	[10^{-10} strain/mb]	[10^{-10} strain/mb]	[10^{-10} strain/mb]
E-W	①-①	59.9	8.94	5.51
	②-①	56.3	8.69	5.32
	③-②	53.9	8.51	5.20
	④-③	-23.4	-1.11	-0.93
	⑤-④	153.0	21.1	13.16
	⑥-⑤	40.7	6.80	4.12
	⑦-⑥	48.8	7.91	4.81
	⑧-⑦	51.1	8.24	5.02
	⑨-⑧	52.6	8.47	5.16
	⑩-⑨	54.2	8.70	5.30
	⑪-⑩	56.4	9.04	5.49
	⑫-⑪	60.2	9.50	5.81
	⑬-⑫	69.4	10.7	6.56
N-S	①-①	93.8	13.5	8.36
	②-①	74.0	11.1	6.81
	③-②	63.7	9.70	5.96
	④-③	58.7	9.01	5.53
	⑤-④	55.6	8.56	5.25
	⑥-⑤	53.5	8.22	5.04
	⑦-⑥	51.8	7.94	4.46
	⑧-⑦	50.5	7.69	4.72
	⑨-⑧	49.4	7.46	4.59
	⑩-⑨	48.5	7.24	4.46
	⑪-⑩	48.1	7.03	4.34
	⑫-⑪	48.7	6.89	4.29
	⑬-⑫	54.3	7.19	4.51
NW-SE	①-①	65.5	9.39	5.82
	②-①	58.0	8.59	5.30
	③-②	56.9	9.00	5.50
	④-③	50.0	7.74	4.74
	⑤-④	53.6	8.31	5.09
	⑥-⑤	54.8	8.53	5.22
	⑦-⑥	55.8	8.70	5.32
	⑧-⑦	56.8	8.87	5.42
	⑨-⑧	57.7	9.08	5.55
	⑩-⑨	60.4	9.35	5.72
	⑪-⑩	62.9	9.76	5.98
	⑫-⑪	68.1	10.5	6.41
	⑬-⑫	80.6	12.0	7.41

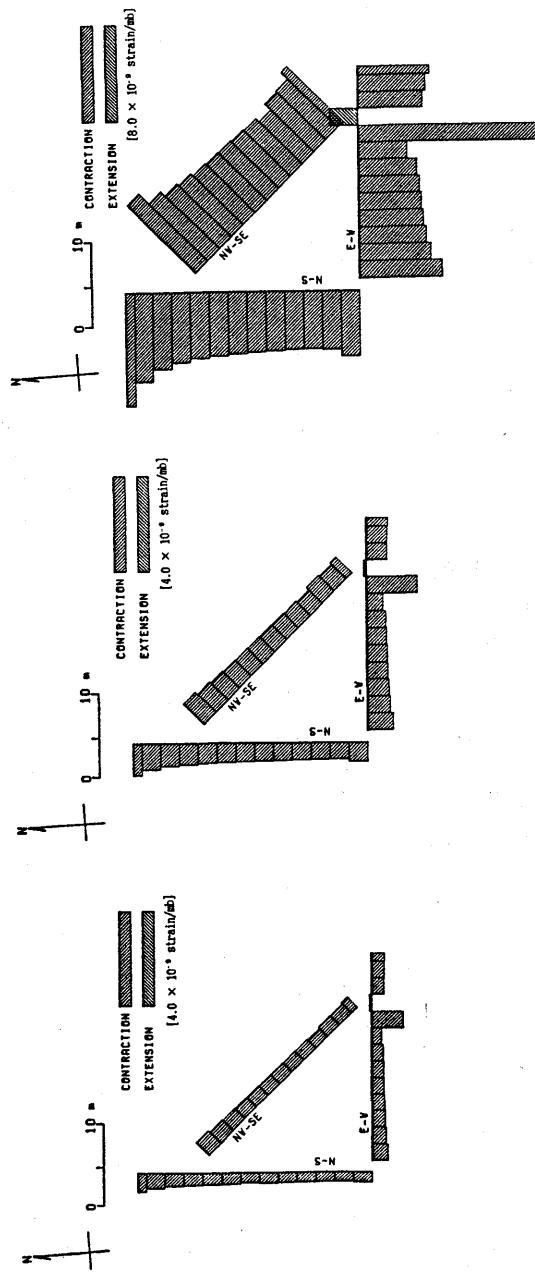


Fig. 8.13. Distribution of atmospheric pressure change calculated by the boundary element method.
 (a) Young's modulus: 4.64×10^9 Pascal, Poisson's ratio: 0.205. (b) Young's modulus: 2.94×10^{10} Pascal, Poisson's ratio: 0.191. (c) Young's modulus: 3.83×10^9 Pascal, Poisson's ratio: 0.233.

歪) 値が非常に大きいことがみられる。

同様に、N-S 坑道を断面の西側から東方向を見る場合を Fig. 8.12(b) に示す。この坑道は東西に発達している尾根にはほぼ直角に掘られているため、坑口から最奥までの間において土被りの変化が大きいことがわかる。それに対応して歪値の振幅が変化しているが、坑口と最奥を比較して最奥がかなり大きいことがわかる。この原因は伸縮計の N-S 成分の固定端が最奥にある北側の側壁近くに設置されており、このため端の影響であると思われる。

Fig. 8.12(c) は NW-SE 坑道を断面の北東側から南西方向を見たものである。坑道上部の地形は比較的一様な傾斜が谷川まで続いているように見える。この坑は E-W 坑と同じように坑床に段差があるが NW-SE 成分の観測点④-③が僅かに小さい数値をとり、その影響は軽微であることが認められる。この様に段差がありながら、E-W 坑道と NW-SE 坑道との間に応答差のが生じた原因はおもに観測坑上の地形の差にあるものと思われる。

この Table 8.2 の計算結果をまとめて図示したものが Fig. 8.13 である。この図の(a)と(b)と(c)の差異は弾性定数の差によるものである。この3つの図からわかることがあるが、弾性定数の差は歪値を変化させるだけで、その分布状況にはほとんど無関係なことがわかる。各伸縮計の両端の部分の観測値がほかの部分に比べて大きいが、この原因是観測坑の両端が圧縮されているためである。

9 章 気圧効果の観測値と計算値の比較および潮汐成分の異常

9.1 歪ゲージ歪計による観測値と計算値の比較

歪ゲージ歪計、伸縮計と多測定点伸縮計による地殻の歪観測は5章と7章においてすでに述べてきた。これらの観測値の物理学的意味を知るために2次元BEMによる理論計算を実施し、理論値と観測値との比較を8章において行った。しかし、すでに行つた一部の比較(柳沢, 1988)をみても観測値と計算値の一一致性はよくない場合があり、観測個所により多様な差異が認められる。この章においては、まず各観測に用いた歪計の種別ごとに観測値と計算値の比を求め、その後に各観測値と計算値の差異を生ずる原因をまとめて論議したい。このとき一応の目安として観測値/計算値が 0.5~2.0 の範囲を観測値と計算値の比が正常な値をとる範囲と仮定し、この範囲外を異常な場合として論議を進めて行くこととする。

歪ゲージ歪計による観測値には12個所の観測地点における24個の歪計による結果があり、このうち気圧効果を Table 5.2 にまとめた。このうち2次元BEMによる計算結果、すなわち Table 8.1 の数値と比較が可能なものは以下のものである。観測坑道の側壁に接着された歪ゲージ歪計のうちの上下の成分で、観測点④, ⑩, ⑪および⑫(Fig. 5.1 参照)の各地点である。このほか坑床に接着された観測地点⑤の N-S 成分もこの範囲に属する。さらにこれらとは別に、多測定点伸縮計に対応させるため計算された坑内歪値、すなわち Table 8.2 において歪ゲージ歪計の観測地点⑥に極めて近い距離にある E-W 成分の観測点②-①の値が比較可能である。このようにして以上6個のデータを比較の対象

Table 9.1. Atmospheric pressure effects observed by strain-gage strain-meters and ones calculated by the boundary element method.

Observation point and component	Observation (Strain gage) [10^{-12} strain/mb]	Calculation [10^{-12} strain/mb]	Ratio(Obs./Cal.)
④ Up-down	5.80	25.4	0.228
⑤ N - S	6.35	13.6	0.467
⑩ Up-down	12.1	2.66	4.55
⑪ ·	9.59	27.3	0.351
⑫ ·	23.8	4.77	4.99
Observation point and component	Observation (Extensometer) [10^{-12} strain/mb]	Calculation [10^{-12} strain/mb]	Ratio(Obs./Cal.)
⑤ E - W	1.22	5.32	0.229

とする。この6個の観測点の観測値とBEMによる計算値をまとめてTable 9.1として示すこととする。この表の中の観測値/計算値の比を見ると、観測値が計算値を上まわっているのは⑩と⑫の地点で、その他の地点においてはいずれも下まわっている。これらの原因として考えられることは以下のことと思われる。

観測値が計算値を下回っている場合、歪ゲージ歪計の観測地点④、⑤と⑪の各地点である。その各観測地点ごとの観測値/計算値の比は0.23～0.47の範囲である。このように観測値/計算値が小さい原因として考えられることは

- a) 実際には3次元的に変化する地形および坑道を2次元モデルにより近似しているため,
- b) 地形データに誤差が含まれているため,
- c) 弹性定数がTable 3.1より硬い岩石が存在するため,
- d) 地質構造が一様でないため,

などが考えられる。まず、a)複雑な地形および坑道を2次元モデルにより解析を行ったことは、観測値/計算値が小さい原因の一部になっていると考えられるが、このような大きな差異を説明するには不足であると思われる。例えば、橋本・重富(1981)は3次元FEMにより逢坂山観測所の周辺の地形による影響を解析したが、解析に用いた要素数が400個と少ないので、坑道の歪のように細部にわたって議論することはできない。しかし、彼等の成果を利用して推定しても、上記の観測値/計算値の比0.23～0.47を説明することは少々無理であると考えられる。b)地形データに誤差があるとの考えは、地形データの誤差が±1m程度であることから、このように大きい差異を説明することができない。c)弹性定数がTable 3.1より硬い岩石が存在する可能性を考えて、観測坑の周辺を調査したが、Table 3.1の岩石サンプルNo.5と6より硬いものは見あたらなかった。d)地質構造の非一様性に関する問題については後節においてまとめて論議したい。

観測値が計算値を上回っている場合は歪ゲージ歪計の観測地点⑩と⑫の各地点において認められる。この2地点の観測値/計算値の比は4.5～5である。このように大きい比をと

る原因として考えられることは、Table 9.1 の値が岩石サンプル No. 5 と 6 でヤング率 $E=4.64 \times 10^{10}$ Pa, ポアソン比 $\nu=0.205$ を採用して BEM の計算により求めたものであるからである。他の岩石サンプルの場合について見るため Table 8.1 のデータを再び採用することにする。この表によると歪ゲージ歪計の観測地点⑩の観測値は 12.1×10^{-10} strain/mb となっている。BEM による計算値が岩石サンプル No. 3 と 4 は 5.59 strain/mb であり、No. 1 と 2 は 37.5 strain/mb となっている。これからみると、観測地点⑩の弾性係数は岩石サンプル No. 1 と 2 および No. 3 と 4 の中間の値が都合よいことになる。さらに観測地点⑫についても同様で、観測値が 23.8 strain/mb に対して、計算値は岩石サンプル No. 3 と 4 が 7.70 strain/mb, No. 1 と 2 が 46.8 strain/mb となっている。この地点に対しても両サンプルの中間の弾性定数が都合がよいことがわかる。中間の弾性定数が適当であると云うことは、さきの 3 種類あるいは 2 種類の岩石が層構造をなしていると考えれば、この問題の解釈として一応納得できよう。実際に観測坑の上部一帯の露頭を調査すると、ほとんどが Table 3.1 のサンプル No. 3 と 4 に相当する岩石である。観測地点⑩と⑫のある側壁の岩石は④, ⑤ と⑪と異なり、サンプル No. 1 と 2 の最も軟らかな岩石に対応している。

9.2 多測定点伸縮計による観測値と計算値の比較

9.2.1 気圧効果

多測定点伸縮計による気圧効果の観測値は Table 7.1 のように、3 個の成分を併せて 39 個のデータとして示してある。これらすべてと、上記の $2\text{m} \times 30\text{m}$ の長大な観測坑断面の 2 次元 BEM による計算値をまとめた Table 8.2 の数値との比較が可能である。この両表を合わせて新たに Table 9.2 を作成する。同時にこの表の右端欄に観測値/計算値の比を加えることとする。また観測値に最も近い計算値に“網掛け”をするが、これは各伸縮計の観測点別に見やすさを考慮したものである。さらに、特別な根拠がないけれど一応の目安として、右端欄の観測値/計算値の値が 0.5~2.0 の範囲内にあるとき観測値にも網掛けをしてある。そのほか観測値/計算値の値が負となる場合は****の記号を用いている。

まず計算値と観測値の関係が良好な N-S 成分について検討してみることにする。観測値に網掛けをしてあるものが 13 点のうち 10 点もあることがわかる。この N-S 成分については岩石サンプル No. 3 と 4 の弾性定数はヤング率 $E=2.94 \times 10^{10}$ Pa, ポアソン比 $\nu=0.191$ が最もよく適合することが明瞭である。この岩石は極めて多湿な観測坑内にあるときは暗赤色を呈していて(3.2 参照)、観測坑のある山体のほとんどの露頭はこの岩石である。この事柄を考慮すると、この弾性定数が適合していることも理解できる。このほか観測坑の横断面の地形は Fig. 8.12(b) で見るように約 30° のほぼ一様な傾斜で谷川に落ち込んでいることがわかる。それにもかかわらず、ただ一個所 ⑩-⑧ のみ負の値(気圧が増加したとき伸張歪)であり、隣接した ⑪-⑨ が大きな正の値(気圧が増加したとき圧縮歪)を示している。この原因として考えられることは、9.1 において前述した 4 項目のほかに、

- 坑道の空洞効果が含まれていること;
- 地形の影響であること;

Table 9.2. Atmospheric pressure effects observed by the multi-sensored extensometers and ones calculated by the boundary element method.

Sample number of rock Young's modulus [Pa] Poisson's ratio		Calculation by BEM			Observation by Extensometer	Ratio (Obs./Cal.)
		1 and 2 3.83×10^9	3 and 4 2.94×10^{10}	5 and 6 4.64×10^{10}		
		[10^{-10} /mb]	[10^{-10} /mb]	[10^{-10} /mb]		
Component	Segment					
E-W	① - ①	59.9	8.94	5.51	-6.47	****
"	② - ①	56.3	8.69	5.32	11.2	1.29
"	③ - ②	53.9	8.51	5.20	24.6	2.84
"	④ - ⑤	-23.4	1.11	-0.93	2.16	1.95
"	⑤ - ④	153.0	21.1	13.16	6.31	0.479
"	⑥ - ⑤	40.7	6.80	4.12	0.56	0.136
"	⑦ - ⑥	48.8	7.91	4.81	1.82	0.378
"	⑧ - ⑦	51.1	8.24	5.02	7.69	0.933
"	⑨ - ⑧	52.6	8.47	5.16	0.14	0.027
"	⑩ - ⑨	54.2	8.70	5.30	0.11	0.021
"	⑪ - ⑩	56.4	9.04	5.49	1.74	0.317
"	⑫ - ⑪	60.2	9.50	5.81	1.40	0.241
"	⑬ - ⑫	69.4	10.7	6.56	4.62	0.704
N-S	① - ①	93.8	13.5	8.36	15.8	1.17
"	② - ①	74.0	11.1	6.81	6.73	0.988
"	③ - ②	63.7	9.70	5.96	10.3	1.06
"	④ - ③	58.7	9.01	5.53	14.4	1.60
"	⑤ - ④	55.6	8.56	5.25	9.24	1.08
"	⑥ - ⑤	53.5	8.22	5.04	9.85	1.20
"	⑦ - ⑥	51.8	7.94	4.46	8.56	1.08
"	⑧ - ⑦	50.5	7.69	4.72	12.6	1.64
"	⑨ - ⑧	49.4	7.46	4.59	-3.64	****
"	⑩ - ⑨	48.5	7.24	4.46	16.2	2.24
"	⑪ - ⑩	48.1	7.03	4.34	7.71	1.10
"	⑫ - ⑪	48.7	6.89	4.29	15.1	2.19
"	⑬ - ⑫	54.3	7.19	4.51	5.51	1.22
NW-SE	① - ①	65.5	9.39	5.82	-39.9	****
"	② - ①	58.0	8.59	5.30	-3.82	****
"	③ - ②	56.9	9.00	5.50	4.91	0.893
"	④ - ③	50.0	7.74	4.74	3.84	0.810
"	⑤ - ④	53.6	8.31	5.09	32.5	0.606
"	⑥ - ⑤	54.8	8.53	5.22	-21.6	****
"	⑦ - ⑥	55.8	8.70	5.32	0.58	0.109
"	⑧ - ⑦	56.8	8.87	5.42	0.28	0.052
"	⑨ - ⑧	57.7	9.08	5.55	0.24	0.043
"	⑩ - ⑨	60.4	9.35	5.72	16.5	1.76
"	⑪ - ⑩	62.9	9.76	5.98	5.82	0.973
"	⑫ - ⑪	68.1	10.5	6.41	9.41	0.876
"	⑬ - ⑫	80.6	12.0	7.41	0.77	0.104

c) 岩石側になんらかの異常があること,
 などが考慮できる。まず、a) 坑道の空洞効果についての文献を調査してみる。HARISON (1976)によれば地殻に応力が働く場合の坑道の空洞効果を地表面の地形や不均質な弾性定数に対する傾斜と歪について求めている。いずれも2次元の簡単なモデルを用い、傾斜と歪との関係をFEMにより計算している。BLAIR (1977)は地球潮汐に対する地形、地質と坑道の空洞効果をやはり2次元モデルにより求めている。竹本 (1980)は馬蹄形の断面を持つトンネルに対して、2次元FEMにより求めた平面歪と観測値がよく一致すると報告している。しかし、これらの論文からは気圧効果による歪が伸張となるような結果を

見いだすことはできない。

このように容易に坑道の空洞効果を見いだすことはできそうにないが、今回得られたデータに基づいて推論を進めてみることにする。Fig. 7.1 を見るとわかるようにこの異常を示す場所に隣接して坑道内の小部屋がある。この存在がもし坑道の空洞効果に関係しているとすると、この N-S 成分の ⑪-⑩ と ⑫-⑪ に E-W 坑道の影響が加わってもよいはずであり、このほかに NW-SE 坑道の近くにある N-S 成分の ③-② と ④-③ および E-W 坑道の近くにある ⑫-⑪ にも同様な影響がみられるはずである。しかし実際には Table 9.2 をみてもその影響は顕著でないようである。このようなことからこの異常を坑道の空洞効果により説明することはできない。

b) 地形の影響について次のように考えられる。地表面はほぼ平坦であり、縦断面も一様な傾斜面に近く、Table 9.2 の N-S 成分の計算結果によっても、観測値/計算値の比は全体的になめらかな変化をしている。したがってこのような大きな異常の原因として地形の影響は考えられないようである。c) 岩石側になんらかの弾性的な異常があるとすると、どのような物理的な岩石の状態を考えればよいのであろうか。この問題については次節において論議する。

次に、NW-SE 成分について調べることにする。この観測坑の横断面を Fig. 8.11(c) に、縦断面を Fig. 8.12(c) に与える。地形の変化としては上記した N-S 成分と、以下に示す E-W 成分の中間に位置している。Fig. 8.11(c) をみると、北東から観測坑の真上までほとんど水平であった地形が、坑道の真上を過ぎるあたりから次第に高度を下げて谷川に至っている。また Fig. 8.12(c) によると坑上の地形は平均傾斜 33° と云うような急傾斜で北西から南東に下り、それと共に観測坑の北東部分はかなり土被りが浅くなっている。このような地形の特徴を知りながら、Table 9.2 の NW-SE 成分の計算値を見ることがある。

観測点 ③-② と ④-③ の部分に坑床の段差の影響が僅かにみられ、これに対応する観測値にも段差がみられる。計算値と観測値の対応をこの成分全体からみると岩石サンプル No. 5 と 6 が比較的適合するようである。しかし、観測値/計算値の比が 0.5~2.0 の範囲に納まるもの、すなわち Table 9.2 において観測値に網掛けしたものは半数以下の 6 個所に過ぎない。その上観測値に負符号のものが 2 個所にある。負符号は観測点 ①-① と ②-① が続いているし、このほか ⑥-⑤ にもある。また、観測値/計算値の比 0.04~0.11 の範囲は観測点 ⑨-⑧, ⑧-⑦ と ⑦-⑥, さらに少し離れて観測点 ⑬-⑫ と続いている。このような計算値と観測値の比の整合が悪い原因はいかなる理由であるかを考える必要がある。坑道の空洞効果と地形の影響は上記と同じ理由により考えにくい。したがって、岩石が、なんらかの弾性的性質に不均質があると考えるのが適当であるように思われる。

さらに、観測値/計算値の比の一致が最もよくない E-W 成分について比較することにする。Fig. 8.11(a) をみると観測坑の横断面は西側から見たものであるが、地表面は 40° の急傾斜で谷川に至っている。この谷川にはほぼ平行してその縁辺近くに坑道が掘削されている。このため坑道上の土被りが特に薄いことがわかる。また坑道上部の地形もかなり変化に富んでいるように見える。このような地形の特徴を考えながら Table 9.2 をみると、N-S と NW-SE 両成分と異なって E-W 成分の観測値と計算値の比の整合性はさら

によくないようである。負符号の場所が2個所あるが、この内④-③の負と⑤-④の正の歪は④の支持台の所にみられる段差の反映であろう。同様の理由により、①-②の負符号の歪は①の支持台の東側にある④の支持台の段差と逆向きの段差の反映であると考えることができる。一方、観測点③-②の観測値/計算値の比が大きく2.84であり、これに対して0.5以下の値は⑥-⑤, ⑦-⑥, ⑪-⑩と⑫-⑪の観測点においてみられ、なかでも⑨-⑧と⑩-⑨においては0.2~0.3と非常に小さな歪値が混在している。この様な不均質の原因はやはり岩石側に責任を負わせるより他に方法がないものであろうか。この問題はさらに次節においてまとめて論議をしたい。

9.2.2 観測による気圧効果と潮汐成分の異常

ここで潮汐成分について気圧効果と同様に、歪の応答に不均一性があるかを調べてみるとする。この場合に、これまで使用してきたBEMを計算に適用することはできない。何故ならばこのプログラムの境界節点は1次元であり、内部に力を加えるようにしていなかったため潮汐のように地殻のすべてに力が加わる場合の計算には適当でない。また、2次元BEMと同じ無限領域を2次元FEMによる計算で行うことも記憶メモリの点で困難である。この様な理由から潮汐成分に対する理論計算はここでは特にしない。

多測定点伸縮計による潮汐成分(Fig. 7.6(a))を M_2 の分潮について、それぞれの成分ごとに平均値を計算し、各観測点の観測値からこの平均値を減じてその残差を平均残差値とよぶことにし、Fig. 7.6(a)と同様な図にしてFig. 9.1(b)に示す。これと比較のため、気圧効果の観測値を示したFig. 7.6を再びFig. 9.1(a)として再録する。この両図を比較すると、かなり類似した点があることがわかる。気圧効果は大気圧が地表面と観測坑の両方に同じ静水圧の形で加わっている。これに対して地球潮汐は山体全体に同じ応力で加わっている。このように気圧効果と地球潮汐は山体一帯に異なる応力が働いているのにもかかわらず、その応答がかなりよく似ているということはこの一帯の弾性定数の分布に原因があるのでないかと考える。とくにNW-SE成分において、この類似性が高いことがわかる。

9.3 観測値と計算値の不一致性の解釈

これまでに示してきた観測値と計算値の不均一性を観測地点について整理することにしたい。

歪ゲージ歪計による観測値と計算値の比較から

観測地点 ④, ⑤と⑪	観測値/計算値が 0.23~0.48,
" ⑩と⑫	" 4.5~5,

多測定点伸縮計による観測値と計算値の比較から

E-W 成分の観測点③-②	観測値/計算値の比が 2.8,
" " ⑤-④, ⑨-⑧,	
" ⑩-⑨と⑫-⑪	" 0.02~0.24,
N-S 成分の観測点⑨-⑧	観測値/計算値の比が負値
" " ⑧-⑦と⑩-⑨	" 1.6~2.2,
NW-SE 成分の観測点①-②, ②-①と⑥-⑤	
観測値/計算値の比が負値	

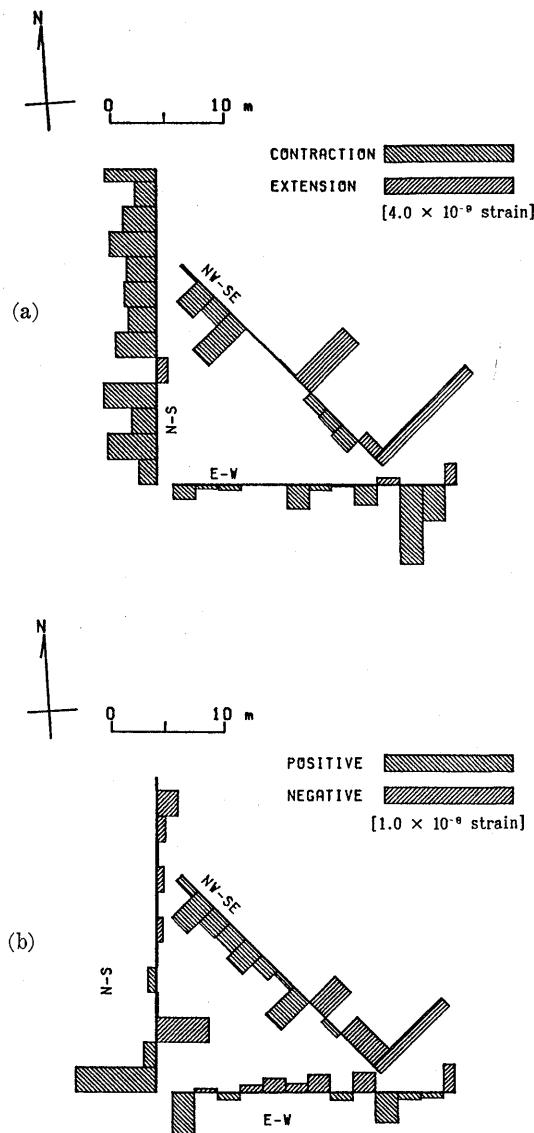


Fig. 9.1. Comparison between (a) atmospheric pressure effects and (b) M_2 -tide effects.

NW-SE 成分の観測点 ⑦-⑥, ⑧-⑦ と ⑨-⑧ 観測値/計算値の比が 0.04~0.11, の各点である。これをみると 3 種類の値に分類が可能であることがわかる。すなわち、観測値/計算値の比がその観測場所の周囲の比に比べて、正の大きな値、正の小さな値と負値である。観測値/計算値の比が正の大きな正值を示す場所は上述のように、硬軟の 2 ~ 3 種の岩石が多層構造になっている場合と考えられる。このように考えると、観測値と計算値の不均一性の問題は比較的容易に理解できそうである。

観測値/計算値の比が正であるが極めて小さい値である 0.02~0.24 を示す部分がかなり広範囲にあることが次にあげられる。この部分について計算値をみると、いずれの成分もあまり問題になるような地形的な特徴を持っているわけではない。すると、この場合に考えられることは岩石の硬さがさらに硬いこと、あるいは地表面への気圧変化の伝達が良くない何らかの原因が存在することの 2 つの事柄が考えられる。前者に関して観測所周辺を調査しても岩石サンプル No. 5 と 6 より硬い岩石が発見されないことより、考慮する必要はない。後者に関しては、硬い岩石と軟らかい岩石がある大きさでブロック状に混在していると考えれば説明がつくかも知れない。その理由として、観測値が極めて小さい部分の隣の部分はかなり大きな値を示している事実に注目して頂きたい。例えば、E-W 成分の ⑨-⑧ と ⑩-⑨ が 0.02~0.03 の比を得ているが、その両隣の ⑧-⑦ は 0.9 と ⑪-⑩ は 0.3 で 1 衍も大きいことがわかる。つまり硬い岩石ブロックの間に軟らかい岩石ブロックが挟まれて存在するのではなかろうか。

観測値/計算値の比が負の値を示す場合、この値が負符号であると云うことは気圧が増加したとき伸張歪が観測されると云うことを示している。これは上記の観測値/計算値の比が正で小さな場合がさらに極端になっているとも考えられる。例えば、N-S 成分の ⑨-⑧ が -1.26 (Table 9.2において負符号の値は **** の記号で示している) であり、その

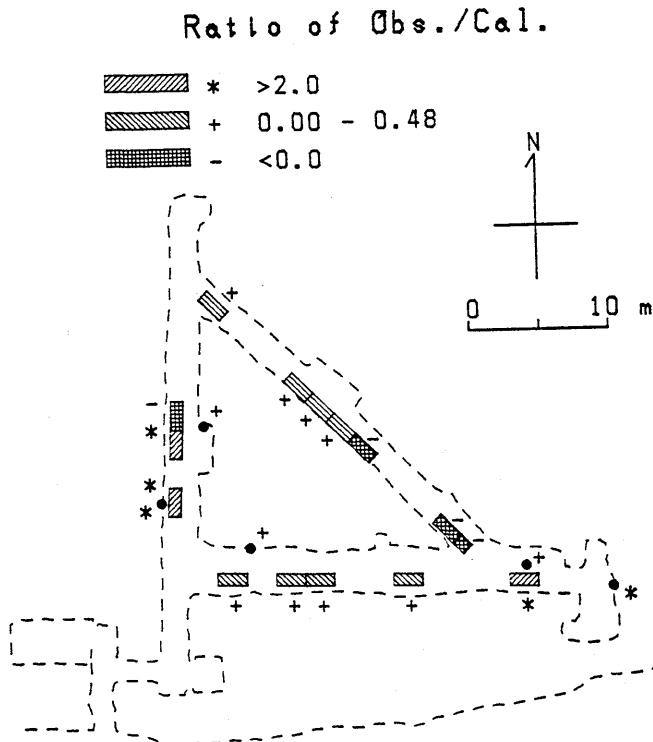


Fig. 9.2. Strain anomaly distribution obtained by strain-gage strainmeter and multi-sensored extensometer observations.

両隣の⑧-⑦は 1.64 と ⑩-⑨は 2.24 と大変大きな値となっている。

このような観測値/計算値の比異常な場所を観測坑の平面図に記入すると Fig. 9.2 のようになる。図中で四角の中にハッチングをほどこしたものは多測定点伸縮計で、*, +, - の記号は歪ゲージ歪計の観測である。歪ゲージ歪計により観測される歪は測定点における歪量であり、これに対して多測定点伸縮計のそれは 2 m の区間における平均的歪量である。つまり両者により得られる歪値は厳密には等しくない。しかし、一部を除いて他のすべての部分において両者の一致はよい。この図は観測坑内の歪分布の異常と思われる部分を表示し、一応の目安として、測定値/計算値の比が正でかなり大きい場所、極めて小さい場所、および負値をとる場所を示している。この様に、地質的にほとんど一様な地層 (Fig. 3.1 参照) であっても、それを構成する岩石の弾性率はかなり多様であり、それが複雑に重なり合っていれば、歪量の場所による差異は当然のことと云わなければならぬであろう。KING and BILMAN (1973) は計測される歪量が地殻の不均一な弾性定数のためにその測定結果に大きな誤差を含む事実を指摘している。同様のことが今回の実験についても云えるのではなかろうか。

以上をまとめると、気圧効果による歪観測について次のことが結論できる。

- 歪ゲージ歪計による 5 地点の観測値と 2 次元 BEM の計算値を比較すると、その観測値/計算値の比が 0.23~0.47 の範囲の小さい値をとるものと、4.5~5 のように大きい値をとるものとに二分された。
- 多測定点伸縮計による 39 個の観測値と 2 次元 BEM の計算値を比較すると、その観測値/計算値の比は 0.02~0.48 の範囲の小さい値をとるもの、0.5~2.0 の範囲の中間的な値をとるもの、2.2~2.8 のように大きい値をとるもの、および負値 (観測値/計算値の比の符号が異なる) をとるものに分けられる。
- 以上 a) と b) に与えられた 2 種類の比を観測坑平面図に記入し (Fig. 9.2)，それぞれの方向の成分について比較すると、E-W 成分の ②-① と歪ゲージ歪計の ⑤ 地点を除いて、他のすべての部分において両者の一致はよい。このことから、歪ゲージ歪計の観測と多測定点伸縮計の観測はともに気圧変化による岩石歪を等しく観測していると云える。つまり歪ゲージ歪計観測の有効性が多測定点伸縮計によって確認されたのである。
- 従来の伸縮計データと歪ゲージ歪計との不一致は歪ゲージ歪計が地殻歪の変化を正常に拾わなかったのではなく、むしろ後者が岩石の非一様性をよく拾い出したと云える。

10 章 結 論

地殻歪および傾斜変化は、横坑式の地殻変動観測所において、石英管伸縮計と水管傾斜計とにより観測されている。千葉県富津市にある鋸山地殻変動観測所では、伸縮計を E-W, N-S および NW-SE 方向に、傾斜計を E-W, および N-S 方向にそれぞれ 25 m 長で設置し、連続観測を実施している。一方測地測量からも、地殻歪変化や地殻の上下変動が求められている。連続観測と測地測量データを比較すると、松山地殻変動観測所の連続観測と四国地方の測地測量のデータのようによい一致をする場合もある。しかし、すでに萩原ほか (1986) が報告したように、この房総半島では連続観測の結果は測地測量データ

タと必ずしも一致していない。このことは測地測量の成果が房総半島の広域地殻変動を示しているのに対して、連続観測データは広域変動だけでなく鋸山観測所付近のかなり局的な変動も観測していることを示すと考えられる。また、近年の報告では、歪変化量が観測坑内においても必ずしも全体にわたって一様ではないことが示されている。以上の結果を考慮して、地殻歪に関して次のように詳細な研究を行った。

(1) 歪ゲージによる地殻歪観測法を開発し、横坑内において地球潮汐歪や気圧変化による歪応答の多点連続観測を実施した。

(2) 既存の伸縮計に多数の中間観測点を増設して、上記の歪ゲージ歪計データとの比較を行った。

本格的な観測に入る前に、先ず予備的な観測として、観測坑内の温度変化を測定することにした。観測坑内の温度変化は精密で高密度の歪観測のための観測機器に対して最大の誤差の原因となる。温度変化を測定するためにサーミスタを用いた高感度温度計（感度は記録紙上で $3.3 \sim 5.6 \times 10^{-3}^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ ）を作成し、約2年間の連続観測を実施した。データ解析の結果、外気温の振幅が 7.9°C の変化をしているにもかかわらず、坑内の温度年周変化の振幅として 0.13 と 0.057°C を得た。このような振幅巾の差異はおもに土被りの厚さに原因があることが判明した。

また、坑内の12地点にこの高感度サーミスタ温度計を分布させて配置し、坑内における年間温度差（最高温度と最低温度の差）を測定しその分布状態を明らかにした。観測機材に最も大きな影響を与える坑内の空気中の年間温度差の分布状態は、ほぼ E-W 坑道に沿って 0.55°C で、観測坑内で最奥の N-S 坑道の N 端において 0.21°C となっている。このほか観測や作業のための入坑は例え短時間であっても、伸縮計などの計測器に極めて大きな影響を与えることがわかった。

温度変化の次に確定しておかなくてはならない問題は坑道付近の岩石の弾性定数である。弾性定数が異なれば、地殻歪の状態も変わるので、この測定は予備的実験として最も基本かつ重要なものである。坑道の周辺の地質は第三紀鮮新生古期の豊岡群の稻子沢（いなござわ）泥岩層に属していて、広範囲にわたってその層は地学的に比較的均質である。弾性定数測定のためのサンプルとしては、坑道内より経験的に相互に硬さの異なる3種類の岩石サンプル各2個を採取し、静的方法により弾性定数の測定を行った。その結果、軟かな岩石がヤング率 $E=3.83 \times 10^9 \text{ Pa}$, ポアソン比 $\nu=0.263$, 中間の岩石が $E=2.94 \times 10^{10} \text{ Pa}$, $\nu=0.191$, 硬い岩石が $E=4.64 \times 10^{10} \text{ Pa}$, $\nu=0.205$ であった。

以上のような準備の後、いよいよ本格的な地殻歪の微細で高密度の観測を行うため、観測設備の小型化を目指して新たに歪ゲージを利用した歪ゲージ歪計を開発することにした。地殻歪観測用の歪ゲージ歪計のセンサ部は4個の歪ゲージを電橋接続し、防湿用として2枚の薄い金属板（銅またはステンレス）またはプラスチック板（テフロン）を用意し、その板上に歪ゲージを各2個ずつ接着したものからできている。2枚の防湿用の板のうち1枚は測定目的の岩石上に接着し、ほかの1枚は温度補償の目的で岩石表面に釘などで軽く止めて使用する。実際に使用している歪ゲージは防水型の箔ゲージで、KFW-5（共和電業社）と N11-FA-5-W1（日本電気三栄社）とし、接着剤はアラルダイト AV-138（固化剤は HV-988, CIBA-GEIGY 社）、およびボンド E セット R（コニシ社）を用い

た。防湿用板としては厚さ $100\text{ }\mu\text{m}$ の銅板、銅板が腐食するような場合は厚さ $50\text{ }\mu\text{m}$ のステンレス板、プラスチックの場合は厚さ 1.0 mm のテフロンを使用した。実際の防湿方法は、防湿板の上に接着された歪ゲージの上を覆うように $0.1\text{ }\mu\text{m}$ の放電加工ずみのテフロンシートを接着し、その上全体に防湿処理剤の AK-22 (HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK 社) を指で押しつけて固着させた。歪ゲージ歪計のセンサ部とロックイン型交流増幅器を併せた総合感度は $1 \sim 10 \times 10^{-10}\text{ strain}/\mu\text{V}$ である。データの収録は 16 bit 32 ch の A-D コンバータ (分解能 $1\text{ }\mu\text{V}/\text{digit}$) とパーソナルコンピュータ PC-9801E によって 4 分間隔に連続して行うこととし、これと並行して 12 ch の打点式記録計によりモニタ記録も行うことにした。

この歪ゲージ歪計のセンサ部と增幅器を 24 組製作し、鋸山観測所の坑道内の 12 地点に接着した。実際に使用状況は、歪計として感度の時間変化はあまり見られず、感度変化の少ない歪ゲージ歪計ほどドリフトも小さい傾向がある。感度検定方法は歪ゲージ歪計のセンサ部と增幅器の総合感度を求ることとし、歪ゲージ歪計のセンサ部を構成している電橋の比例辺 (岩石に接着していない歪ゲージ) に並列に高抵抗を入れ、これを既知量だけ僅かに変化させて増幅器の出力変化を計測することにより求めることができる。さらに、歪ゲージの製作社から提示される K 値 (抵抗変化/歪変化の比) を使用して歪量に換算する。この時に加える補正のうち最大のものは、歪ゲージと測定対象の岩石の間に挿入された金属板またはプラスチック板などによる歪量の減衰である。実験の結果 $100\text{ }\mu\text{m}$ の厚さの銅板で 16% であった。

歪ゲージ歪計による観測データは 1986 年 1 月～1987 年 3 月のものを採用した。データにステップがある場合は補正をし、最小自乗法を利用して、大気圧変化に対する歪変化と地球潮汐成分の半日潮が M_2 と S_2 、一日潮が O_1 と K_1 の各分潮成分を求めた。歪ゲージ歪計による気圧効果の観測坑内分布状況は、E-W 坑道のように土被りの浅いところはその影響が大きく、N-S 坑道のように S 端から最奥の N 端に向かって順次土被りが増加する場合に、その土被りの増加とともに値が減少している。E-W 坑道床に接着した唯一の地点では側壁に比べて気圧効果が小さく、気圧効果は観測坑上および周辺の地形が大きく支配していることがわかった。

このほか、歪ゲージ歪計の記録の中に、小形低気圧が房総半島上を通過した折りのデータ (1987 年 3 月 19 日 12 時～20 日 12 時) がある。この 24 時間のデータから求めた気圧効果と、上記の 1 年余の長期データから求めた気圧効果を比較すると、N-S 成分を除いて良く一致していることがわかった。さらに、歪ゲージ歪計の特殊な記録例として、1984 年 9 月 19 日 2 時 2 分房総半島沖に $M6.6$ の地震が発生したときのデータもある。このとき、鋸山観測所の定常観測設備の水管傾斜計と伸縮計で合計 10 個のセンサが動作していたが、この 10 個のセンサすべてが地震時のステップを起こした。これに対して当時動作を開始していた歪ゲージ歪計は 4 個あったが、いずれのデータにもステップは見られなかった。平行している伸縮計の NW-SE 成分からみると、かなり大きなステップが記録されるはずであるが、歪ゲージ歪計にはステップが現われないという事実は、ステップが岩石中のクラック間の相互運動によって生じた可能性が考えられる。

歪ゲージ歪計とデータの比較を行うため、鋸山観測所の伸縮計のデータを使用した。こ

の伸縮計は1977年に全面的に改修されたものであり、標準尺は外径 25 mm で長さ 25 m の溶融石英管製で、E-W, N-S と NW-SE の 3 成分がある。標準尺の保持は 2 重倒立振子型を使用して、変位のトランスデューサとして磁気センサが使用されている。まずテスト的に、測定端と固定点より 9 m と 17 m の距離の位置に中間測定点をおき、一つの成分で合計 3 個のセンサとした。記録はカセット・テープに毎正時と 30 分ごとに記録し、12 ch の打点記録計でモニタ記録も行った。

伸縮計の観測データの中から、歪ゲージ歪計と同じ期間を取り出して歪ゲージ歪計と同様の方法で解析した。このようなテスト観測の成果として、気圧効果は一つの成分について 3 個の数値が与えられるが、3 成分ともそれぞれの中央部の値が両端の値より小さいことがわかった。歪ゲージ歪計と伸縮計の気圧効果の比較を行うと、ほとんどの歪ゲージ歪計の気圧効果が伸縮計に比べて 2~80 倍も大きいことがわかった。この原因の一つとして歪ゲージ歪計は動き易い側壁に接着されているが、伸縮計は坑床にあるためと思われる。潮汐成分の M_2 分潮について調べると、反対に歪ゲージ歪計は伸縮計に比べて、0.2~0.6 倍大きい。このようになる原因として考えられることはつぎのようなことである。おそらく山体は多数の小ブロックの岩体より構成されていて、單一小ブロックは潮汐変化によって弾性的に変形しにくい。これに対して、潮汐変化は山体としてブロック運動を起こさせる。歪ゲージ歪計は單一ブロックの運動を検出するためにレスポンスが小さく、伸縮計は複数のブロックにまたがるために、レスポンスが大きくなるものと考えられる。

上記の歪ゲージ歪計と伸縮計の観測による気圧効果をみると、鋸山観測所の坑内と云うようなかなり狭い地域において、実効寸法が小さな歪ゲージ歪計とそれが大きな伸縮計のデータの数値がかなり異なっている。この原因がセンサの寸法に起因するものか、この地域特有のものであるか見極めたいと考え、伸縮計に多数の測定点(多測定点伸縮計と呼ぶ)を加えることにした。上述のように一つの伸縮計には 3 個の既設の測定点があった、これに 10 個の中間測定点を増設し合計 13 個の測定点があることになる。したがって、3 成分合計で 39 個ものデータが得られることになった。後のデータ処理を考慮し、データは 16 bit 16 ch の A-D コンバータを 3 台使用し、パーソナル・コンピュータに収録し、別に打点記録計によるモニタもすることにした。この多測定点伸縮計の問題点は感度検定である。従来から行われている年 1 回の感度検定だけではその精度の維持が難しい。そこで感度の相対的な検定を 2 ヶ月に 1 回の割合で行うこととした。これによって感度検定値は $\pm 1\%$ 程度は十分に保持された。

多測定点伸縮計の観測データは 1988 年 7 月より約半年のものを使用することにした。データの取扱と解析の方法は今までの歪ゲージ歪計および伸縮計のときと全く同様である。この新しく測定点を増設した伸縮計の記録をみると、これまでの伸縮計とはかなり異なった様相をみせている。例えば、伸縮計のごく一部分の動きが気圧変化に特に敏感であること、甚だしい場合には気圧変化が増加したときに圧縮歪を受けずに伸縮歪の所もあることがわかった。このようなことは以前の伸縮計を 3 分割しただけのデータでは判明しなかった事実である。気圧効果について、E-W 成分の東寄り部分に大きな圧縮歪が、またそのすぐ隣に伸張歪が観測され、成分全体に歪が小さい事などが見られた。N-S 成分は比較的一様な気圧効果を受けたが、NW-SE 成分は E-W 成分に近いあたりに大きな伸張歪

が見られた。逆に N-S 成分に近い部分には大きな圧縮歪が見られた。一方潮汐 M_2 分潮とそれに加えて K_1 分潮について調べると、両分潮の 3 成分における分布は比較的似ていることがわかる。興味深いことには、各分潮の振幅に異常が見られる様な場所、あるいはその近くで気圧効果にも異常が見られることである。

次に、歪ゲージ歪計と多測定点伸縮計のそれぞれの気圧効果と潮汐成分を比較した。各センサの寸法が歪ゲージ歪計の数 cm に対して、多測定点伸縮計になって 2 m となってその比が約 1:40 となった。坑道壁に接着された歪ゲージ歪計とその近くの坑床に設置された多測定点伸縮計の気圧効果を比較すると、N-S と NW-SE 成分は 1/4~1/2 と比較的似たような値を示すことがわかった。E-W 成分は歪ゲージ歪計と多測定点伸縮計とともに坑床にあるが、その比が 1/9 となっている。しかし、そのほかの E-W と NW-SE 成分に 6/1 というような、他の点と逆の関係を示す箇所もあることがわかった。このように、みてくるとセンサの有効寸法がかなり観測値に響いていることがわかる。

観測坑内の気圧効果の理論的な数値を求めるため、2 次元の境界要素法 (BEM) を使用して理論計算をした。計算に用いる電子計算機のプログラムは無限平面用のものを用了。まずモデルは、地形表面が平坦でかつ水平の場合に地中に 2 m × 2 m の断面を持つものとする。地表と観測坑に 1 次元の境界節点を設定し、観測坑の地中の深さを増加して観測坑の側壁中央付近の歪を計算した。この結果、坑の歪はほんの僅かしか減少しないことがわかった。次に、地表面が一様に傾斜している場合について計算した。地表面が一様に傾斜した場合には、坑の天井の上隅と床の下隅を結ぶ対角線を中心にして坑道変形はこの方向に延びた菱形となる。さらに鋸山観測所の実際の地形と観測坑の断面の実測値、および 3 章において測定した弾性定数を用いて 2 次元の BEM により観測坑の歪を求めた。計算に用いた坑道の断面は、高さ約 2 m × 幅約 2 m の横断面と、高さ約 2 m × 幅約 30 m の横断面の 2 種の計算をする。前者は歪ゲージ歪計の上下成分、後者は多測定点伸縮計の測定に対応している。

気圧効果について、歪ゲージ歪計の測定と 2 次元 BEM による計算を比較する場合、両者の対比ができる場合は 6 地点が該当する。この 6 地点のうち 4 地点で観測値/計算値の比が 0.2~0.5、他の 2 地点で 4.5~5 であった。この場合に使用した弾性定数は岩石サンプル No. 5 と 6 の最も硬い岩石の値を用いる。観測値/計算値の比が 4.5~5 ということはもっと軟かな岩石の弾性定数を加えた層構造を考えれば一応の解釈は成立する。しかし観測値/計算値の比が 0.2~0.5 の場合は付近にこれ以上の硬い岩石が見あたらないので解釈に困ることになる。

気圧効果について、多測定点伸縮計の測定と 2 次元 BEM による計算を比較する場合、両者の対比ができる場合は 39 の測定点すべてが該当する。観測値/計算値の比の関係が良好な N-S 成分は岩石サンプル No. 3 と 4 の弾性定数 ヤング率 $E=2.94 \times 10^{10}$ Pa、ボアソン比 $\nu=0.191$ が最もよく適合する。この岩石は観測坑の上と周辺の露頭のほとんどすべてを占めている。しかしながら、唯一個所観測値/計算値の比が負になる（気圧が増加したとき伸張歪）ところがある。NW-SE 成分は伸縮計の置かれた坑床の一部に段差がありこの影響を考慮しなければならない。観測値/計算値の比が負符号になる場所が 2 個所、また観測値/計算値の比が 0.04~0.1 と正ではあるが小さな場所が 2 個所あることが

発見された。E-W 成分は観測値/計算値の比の値が 3 成分の中で最も変化が大きい。負符号の場所は坑床の段差の影響と見ることができる。その他に観測値/計算値の比が 2.84 というような正の非常に大きい場所がみられ、あるいは 0.02~0.03 というような極端に硬いと思われる場所もある。また気圧効果のみでなく潮汐成分を見てもこれと似たような状況である。以上の歪ゲージ歪計と多観測点伸縮計の観測をまとめて Fig. 9.2 に異常と思われる地点や場所を記入した。

歪ゲージ歪計開発のための基礎実験は約 4 年にわたって実施し、坑内歪測定の信頼性は十分に検証した。しかし、それにも拘らず坑内に多数設置した歪ゲージ歪計と多測定点伸縮計データとを比較してみると、両者の一致はかなり見られるものの、微妙な食い違いがあることが発見された。例えば、坑道の歪変化が一様でなく、場所により異なることがわかった。また、多測定点伸縮計のなかでも、気圧変化の影響を強く受ける部分と殆ど受けない部分とに分かれていることがわかる。ましてや歪ゲージ歪計のように、岩石上的一点の歪となると坑道全体の歪変化を代表するとは考えられない。

以上の事実から得られた結論として云えることは次の諸点である。

- (1) 歪ゲージを用いて小型で高感度の地殻歪計を開発した。地殻変動観測坑における連続観測の結果、これは十分な精度・安定性を有し、地殻歪の観測に利用可能なことが明らかになった。
- (2) 歪ゲージ歪計を用いると多点多成分の歪観測が容易に実施できることが確かめられた。その結果、鋸山地殻変動観測所の観測坑内における、地球潮汐歪、気圧変化による歪応答などに新たな観測データが蓄積された。
- (3) 歪ゲージ歪計と多測定点伸縮計を併用し、それらのデータを比較解析した結果、地球潮汐歪と気圧変化による歪の時間変化および空間分布が明らかになった。
- (4) 多測定点伸縮計および歪ゲージ歪計のデータと数値実験を比較して研究した結果、観測坑内においても歪変化が一様でなく、周囲の岩体の弾性率の不均一性、坑道上部の地形あるいは坑道の形が歪変化に影響していることが明らかになり、歪変化の分布状況が明かになった。

謝 詞

本論文が成立することができたのは、多くの方々の永年にわたるご指導とお力添えの賜である。

東京大学地震研究所の萩原幸男教授（現防災科学研究所長）には 20 年余にわたる測地学、特に地殻変動、地球潮汐、およびこれらの計測分野についてご指導にあずかった。萩原教授には全編の通覧の労をとっていただき多くのご教示にあずかった。先生に深く感謝の意を表する。

潮汐解析プログラムについてのご指導をいただいた国立天文台の佐藤忠弘助教授、鋸山地殻変動観測所の観測にご協力していただいた島津 孝元講師、伸縮計の整備と観測に協力していただいた地震研究所油壺地殻変動観測所の高橋辰利技官、岩石の弾性定数の測定と歪ゲージの取扱に関するご指導をいただいた東京大学地震研究所の大中康誉教授、境界

要素法による計算と伸縮計の観測についてのご指導をいただいた石井紘教授、本論文を執筆するにあたって助言をいただいた村田一郎教授、長沢工講師、大久保修平博士、これらの方々に心よりの感謝の意を表する。

また、この研究にあたって、歪ゲージに関する技術情報を提供して下さった共和電業株式会社の金野政治氏、防湿剤についての情報を提供して下さった日本電気三栄株式会社の佐藤恒雄氏に感謝の意を表したい。

本論文は東京大学に提出した審査学位論文である。

参考文献

- 伴一成, 1974, 溶融石英とその応用, 応用物理, 43, 168-170.
- BILHAM, R. G., 1973, Strain measurement instrumentation and technique, *Phil. Trans. R. Soc. London, A*, 274, 209-217.
- BLAIR, D., 1977, Topographic, geologic and cavity effects on the harmonic constant of tidal strain, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 48, 393-405.
- BLAYNEY, J. L. and R. GILMAN, 1965, A portable strain meter with continuous interferometric calibration, *Bull. Seis. Soc. Am.*, 55, 955-970.
- BREBBIA, C. A., 1978, The boundary element method for engineers, Pentech Press, London, pp. 189.
- BREBBIA, C. A. and S. WALKER, 1980, Boundary element techniques in engineering, Butterworth, London, pp. 210.
- CAGLE, C. V. ed., 1982, Handbook of adhesive bonding, McGraw-Hill Co., New York, pp. 1917.
- CIBA-GEIGY, 1982, アラルダイト接着剤—金属および非金属の予備処理, 日本チバ・ガイギー社.
- , 1984, Araldite insulation, 日本チバ・ガイギー社, 50-51.
- 地質調査所, 1980, 丹沢山地における応力解放法による現場応力測定, 予知連会報, 24, 99-103.
- 地質調査所, 1981, 丹沢山地における応力解放法による現場応力測定(2), 予知連会報, 25, 72-76.
- GUTENBERG, B., 1951, Internal Constitution of the Earth, Dover, New York, pp 439.
- 萩原幸男・柳澤道夫・大久保修平, 1986, 鋸山地殻変動観測所における最近の傾斜変動, 測地学会誌, 32, 131-139.
- HAGIWARA, T., T. RIKITAKE and J. YAMADA, 1948, Observation of the deformation of the Earth's surface at Aburatsubo, Miura peninsula, Part I, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 26, 23-27.
- 萩原尊礼・力武常次・山田重平・笠原慶一, 1949, 油壺における地殻変動の研究, 地震研究所速報, 6, 1-61.
- HARRISON, J. C., 1976, Cavity and topographic effects in tilt and strain measurement, *J. G. R.*, 81, 319-328.
- 橋本匡邦・重富国宏, 1981, 逢坂山地殻変動観測所における潮汐ひずみの地形による影響, 測地学会誌, 27, 11-22.
- 堀 健二, 1973, マグネスケールとマグネセンサの応用, 自動化機器ソフトブック73年版, 200-210.
- 林田精郎, 1968, 堆積岩の粘弾性的性質, 応用地質, 9, 105-112.
- 星野 寛・根岸正充, 1970, 岩石の力学的性質に関する一実験, 応用地質, 11, 91-96.
- 飯田汲事・志知竜一・松浦 宏, 1969, 犬山における地殻変動の連続観測, 測地学会誌, 14, 144-155.
- 石外 宏・柏谷憲司・斎藤和雄, 1964, 岩石の物理的性質についての一考察, 応用地質, 5, 92-100.
- ISHIGURO, M. and Y. TAMURA, 1985, Baysiad tidal analysis procedure by grouping model (BAYTAP-G), *Computer Science Monographs*, No. 22, 56-226.
- 石黒真木雄・佐藤忠弘・田村良明・大江昌嗣, 1984, 地球潮汐データの解析, 統計数理研究所彙報, 32, 71-85.
- 石井 紘・里嘉千茂, 1986, プレート会合部に関する数値実験(1), 宇宙新技術の天文学・地球物理学

- への応用シンポジウム収録, 180-184.
- 地震研究所・油壺・鋸山地殻変動観測所, 1980, 油壺・鋸山における地殻変動の観測(その9), 地震予知連絡会会報, 24, 87-89.
- 地震研究所・地殻変動研究室, 1986, 地殻変動資料集(1)―Progress Report (1) (1976-1985)―, 地震研究所地殻変動研究室, pp. 547.
- 地震研究所・技術部, 1973, フロート型自記水管計斜計の試作, 地震研究所速報, 10, No. 9, 1-8.
- 笠原慶一, 1972, 地殻変動連続観測―地震予知における役割と進路, 地震予知シンポジウム, 45-53.
- KING, G. C. P. and R. G. BILHAM, 1973, Strain measurement instrumentation and technique, *Phil. Trans. R. Soc. London, A*, 274, 209-217.
- 気象庁, 1985, 地震月報1984年9月, 気象庁, 208-210.
- 小池 清, 1949, 房総半島中部の地質(II) (武藏野累層群下半の層序), 立地自然科学研究所報告, 3, 1-6.
- _____, 1950, 錐山附近的地質, 教育見学会.
- 小池 清・村井 勇, 1950, 関東地方南部における凝灰岩の基礎的研究(I)―Tephrozoneについて, 立地自然科学研究所報告, 5, 22-26.
- LATYNINAY, L. A., E. YA. STARKOVA, B. A. PODGORNYKH and R. M. KARMALYEVA, 1968, Deformations of the Earth's crust at the Kondara station of the Tadzhik Socialist Soviet Republic, *Izv. Earth. Physics*, 3, 184-189.
- 松井頤雄・本間純男・龜谷秀生, 1973, 高温水中におけるひずみゲージの防湿, 高温および低温におけるシンポジウム(第5回), 65-70.
- 村井 勇, 1962, 凝灰岩層の粒度組成と鉱物組成の均一性について, 地震研究所彙報, 40, 333-355.
- 西日本地殻応力調査班, 1980, 応力解放法による地殻応力測定(1)四国・佐々連鉱山, 予知連会報, 23, 155-159.
- 小川卓司, 1980, Strain-stepに対する地形と地層構造の影響―有限要素法による数値実験―, 地震学会講演予稿集, No. 1, 185.
- 岡田義光, 1975, 八丈島東方沖地震―1972年2月29日, 12月4日―に伴った strain-step について, 地震, II, 28, 387-413.
- 岡田義光・渡辺 茂・笠原慶一, 1975, 富士川観測所における地殻変動連続観測(1), 測地学会誌, 21, 179-190.
- POULOS, N. G. and E. H. DAVIS, 1974, Elastic solutions for and rock mechanics, John Wiley and Sons, New York, pp. 441.
- 斎藤正徳, 1978, 漸化式ディジタル・フィルタの自動設計, 物理探鉱, 31, 240-263.
- 志知龍一, 1972, 地殻変動連続観測の研究の進展と改善の方向, 地震予知シンポジウム, 26-34.
- 鷲田義一・藤 英雄, 1959, 露場における接地層の気温鉛直分布について, 気象庁研究時報, 11, 792-794.
- 竹本修三, 1980, 潮汐ひずみの観測に及ぼす Cavity Effect について, 測地学会誌, 26, 113-123.
- 田中 豊・林 守孝・加藤正明・小泉 誠・藤田和夫, 1972, 六甲断層破碎帯における地殻変動の連続観測(序報), 京大防災研究所年報, 15B, 15-41.
- 登坂宣好, 1984, 境界要素法―新しい数値計算法―, 建築雑誌, 99, No. 1219, 5-6.
- 坪井忠二・和達清夫・萩原尊礼, 1962, 地震予知―現状とその推進計画―, 地震予知研究グループ, pp. 32.
- 坪川家恒・長沢 工・柳沢道夫・村田一郎・田島広一・佐藤忠弘, 1970, 電磁型傾斜計とそれによる観測, 測地学会誌, 16, 209-231.
- 若杉忠雄・柳沢道夫, 1985, 間瀬・弥彦地殻変動観測所とその周辺における観測(1952~1983年)―観測データ種目と永年傾斜変化―, 地震研究所彙報, 60, 105-134.
- 渡辺 理, 1981, ひずみゲージとその応用, 日刊工業新聞社, 東京, pp. 362.
- 山田重平, 1973, 水管傾斜計によって観測された地殻変動, 地震研究所速報, 10, No. 1, 1-147.
- 山田重平・柳沢道夫・島津 孝, 1974, 地殻変動観測坑の温度分布, 地震研究所速報, 13, 33-42.
- 山岸要吉・泉 末雄・相原奎二, 1976, 松代における地殻変動の連続観測について, 駿震時報, 41, 13-20.
- 山内常生, 1987, 豊橋におけるひずみ変化の比較観測―コンクリートの床面の変動―, 測地学会誌, 33, 329-336.

- 山内常生・山田守・奥田隆, 1981, 降雨に対する地殻歪レスポンスの異常と地震発生, 地震, II, 34, 301-310.
- 柳沢道夫, 1971, TEM 傾斜計の電子回路とその信頼性, 測地学会誌, 17, 160-169.
- _____, 1973, 鋸山地殻変動観測所における坑内温度の計測, 測地学会誌, 19, 225-232.
- _____, 1980, 宇佐美臨時観測点における降水量と傾斜変化観測の関係, 測地学会誌, 26, 187-199.
- _____, 1982, 油壺観測所周辺の海洋潮汐による傾斜変化の観測(1979年1月～1980年6月), 測地学会誌, 28, 73-81.
- _____, 1983a, 鋸山地殻変動観測所とその周辺における観測データ目録(1959～1981年), 地震研究所彙報, 58, 243-264.
- _____, 1983b, 松山地殻変動観測所における観測(1949～1982年)一観測データと永年傾斜変化一, 地震研究所彙報, 58, 439-464.
- _____, 1984, 歪ゲージによる地殻歪の測定—室内実験と鋸山観測所における観測一, 測地学会誌, 30, 274-286.
- _____, 1986, 歪ゲージによる地殻歪の測定 [II]—ディジタルフィルタの適用一, 測地学会誌, 32, 81-82.
- _____, 1987a, 観測坑歪の気圧効果—境界要素法(2次元)による解析一, 測地学会誌, 33, 41-48.
- _____, 1987b, 歪ゲージによる地殻歪の測定 [III]—観測結果と伸縮計との比較一, 測地学会誌, 33, 245-256.
- _____, 1988, 歪ゲージによる地殻歪の測定 [IV]—気圧効果の観測と境界要素法による解析との比較一, 測地学会誌, 34, 75-84.
- 柳沢道夫・若杉忠雄, 1984, 弥彦において観測された日本海中部地震津波による地殻の傾斜・伸縮, 測地学会誌, 30, 204-212.

*A study of crustal strain observed by extensometers
and resistive strain-gages*

*—Development of multi-sensored silica-extensometer
and strain-gage strainmeter and observations in
the Nokogiriyama Crustal Movement Observatory—*

Michio YANAGISAWA

Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

The Nokogiriyama Crustal Movement Observatory is located about 50 km south of the Tokyo Metropolis, continuously measuring ground tilt and strain by 25 m-long water-tube tiltmeters and silica-extensometers installed in the observation vault. The data are telemetered by telephone cables to the Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, for detecting tilt and strain changes associated with earthquakes occurring in Tokyo Bay and the Boso Peninsula. The accuracies of the data are 0.02 μ rad and 0.0001 μ strain respectively, which are satisfactory for studies of tidal effects and of crustal responses to atmospheric pressure changes.

Before the present study, we conducted preliminary strain measurements by short length extensometers to compare them with the 25 m-long ones, and confirmed that both the strain results are different from each other even in the same observation vault. This fact may possibly imply that the rock surrounding the vault does not have uniform physical properties, say elastic constants, and is separated into blocks by fine fractures. The elastic behavior of these blocks is somewhat independent of each other in ground strain field. If so, the conventional extensometric data reflect cumulative strains of such small-sized block motions. It may be very interesting to investigate the fine strain structure of the Nokogiriyama observation station by comparing the conventional 25 m-long extensometric data with short length extensometric data.

In the present study, the first step is to clarify both daily and annual temperature changes in the observation vault, these are very fundamental for high-accuracy strain measurements. Our results indicate the daily temperature change to be less than 10^{-3} °C and the annual one to be 0.26°C at maximum. The second preliminary test is on elastic constants (Young's modulus and Poisson's ratio) of rock specimens sampled from the observation vault. From a geological point of view, the tuffaceous sandstone covers the observation vault uniformly. The results obtained here are 0.38 to 4.6×10^{10} Pascal for Young's modulus and 0.19 to 0.26 for Poisson's ratio.

Next, we manufacture small-sized strainmeters by using strain-gages, which we intend to attach to the walls and floors of the observation vault. One of the most difficult matters in this experiment is how to fix a strain-gage to the rock surface under waterproof conditions. After many trials, we found the following method derived the best result. We glued strain-gages on a thin copper plate. Next, we glued thin copper plate on the rock surface with moisture-proof butyl rubber. 24 sets of strain-gages sensors were installed on the walls and floors of the observation vault and then connected to lock-in type A-C amplifiers with the sensitivity of 10^{-9} to 10^{-10} strain/microvolt.

On the other hand, we add sensing spots on the conventional 25 m-long extensometer at intervals of 2 m; it is called a "multi-sensored extensometer" hereafter. Comparisons between results of the strain-gage strainmeter and the multi-sensored extensometer and between results of the latter and the conventional 25 m-long extensometer can clarify

the fine elastic behavior of the Nokogiriyama strain field. Our comparisons are made on the basis of the data obtained during the period from July to December, 1988.

Data processings for extracting principal tidal constituents from the original strain data was done by the least square method and the BAYTAP-G program. We conclude that the amplitude of M_2 tidal strain obtained by the strain-gage strainmeter method is generally proportional to that obtained by the multi-sensored extensometer method, but the proportionality is not so good, especially at the corner points of the observation vault. This fact can be explained by the cavity effect on the tidal strain change field. It is also proved that the anomalous behavior of K_1 tidal strain depends on the thickness of overburden above observation points.

The strain field is frequently disturbed by atmospheric pressure changes. The corresponding deformation of the observation vault changes the strain field considerably. The ratio of such deformation to atmospheric pressure change ranges from 1.25 to 23.8×10^{-10} strain/mb. In this case, the shape of the vault crucial to the strain change. Both the strain-gage strainmeters and the multi-sensored extensometers observe successfully such effects at the corner points of the vault, although the conventional extensometer overlooks them.

The observational results mentioned above lead us to the conclusion that the ground strain field depends strongly on the shape of the observation vault. A theoretical three-dimensional strain field analysis will be necessary to reconfirm our present conclusions. If the block structure as suggested here is true, a much more complicated model with fine fractures will be necessary. We should like to recommend multi-sensored observations in order to investigate the fine behavior of the strain field in the vault. Such method of observation can improve the reliability of the data for strain field observation data.