

地震に関する調査研究(II)

1986年3月

社団法人 日本鉱業会

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒107 東京都港区赤坂1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団

技術協力部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technical
Evaluation and Patent Office, Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation 9-13, 1-chome, Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation)

昭和 61 年 3 月

地震に関する調査研究(Ⅱ)

社団法人 日本鉱業会

要 旨

日本鉱業会では、59年度に動力炉・核燃料開発事業団からの委託により、委員会を設置して「地震に関する調査研究」を行った。委員会では、地下深部と地表部における地震の影響の大小を比較するための地震計の設置個所として、宮城県・細倉鉱山を選定すると共に、地震観測システムの設計を行った。

60年度は、この研究が電力中央研究所と動力炉・核燃料開発事業団との共同研究となったため、日本鉱業会としては、以下の業務のみを分担した。

- (1) 観測システムの設置のための工事
- (2) 観測地調査計画の作成
- (3) 地層の隔離性能に及ぼす地震の影響評価手法の検討

(1)項の工事は細倉鉱山の感天立坑を中心とした坑内外に於ける現地工事のため、同鉱山に委託して実施した。地震計設置点は工事に先立ち現地委員会を開催して決定した。

本報告書では第1章のまえがきに続き、第2章では細倉鉱山近傍における過去の地震発生状況を述べた。

第3章では、細倉鉱山における観測小屋の建設や地震計基礎コンクリート工事などの、現地工事の内容および、鉱山における地震観測態勢、点検保守方法を示した。

第4章では地震観測システムについて述べ、第5章以下では、得られた地震観測データを解析するのに必要な地域特性の測定方法、測定計画について述べたが、これらは何れも次年度以降に実施される調査である。

まず第5章では、細倉鉱山における調査内容として、地質・坑内構造の調査から、岩盤諸特性の調査計画について述べた。

第6章では、地層の隔離性能に及ぼす地震の影響評価手法として、岩盤挙動と地下水挙動の観測をとりあげ、これらの観測方法の具体例などについて述べた。

第7章では観測データの解析計画にも言及して、データ解析と耐震安定性の検討手法および、地域特性の強い観測データを一般化するための手法について述べてある。

第8章のあとがきでは、次年度以降に行う現地調査に関する提言を述べて結びとした。

本報告書は、社団法人日本鉱業会が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

March 1986

Survey and Research on Earthquake (II)

The Mining and Metallurgical Institute of Japan

Synopsis

Entrusted by the Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, the Mining and Metallurgical Institute of Japan set up a committee and conducted an "Survey and Research on Earthquake" in 1984. The committee selected Hosokura Mine in Miyagi Prefecture as the site for the installation of seismographs in order to carry out a comparative study of the influence of earthquakes at deep underground and surface locations. The committee also endeavored to design seismic observation systems.

As this study developed in 1985 into a cooperative effort between the Central Research Institute of the Electric Power Industry, and the Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, only the following tasks were assigned to the Mining and Metallurgical Institute of Japan:

- (1) Civil work for the set-up of observation systems
- (2) Planning of a survey on the observation site
- (3) Investigation of methods of studying the influence of earthquakes on the performance of geological barriers.

Because the work in (1) was civil work in the mine with Kanten Shaft of Hosokura Mine as the center, the work was carried out in contract with that mine. Prior to the civil work, meetings in the mine were held to select seismograph installation points.

After the introduction in Chapter One, this report describes in Chapter Two past earthquake occurrence in the vicinity of Hosokura Mine.

Chapter Three explains the extent of civil work performed in the mine, such as the construction of observation cottage in Hosokura Mine, the concrete

base work for seismographs, the earthquake observation system, and maintenance methods.

Chapter Four explains the earthquake observation system.

The latter section of this report - encompassing Chapters Five through Eight - describes the method of studies on the local characteristics (which is required for the analysis of earthquake observation data) and the overall plan of the study. These studies will be conducted in the next fiscal year and beyond.

Chapter Five - the first in this section - describes the geological survey plan, and a testing methods to get various rock characteristics in-situ, as the contents of a survey in Hosokura Mine.

Chapter Six takes up the observation of rock mass behavior and underground water behavior as a means of studying the influence of earthquakes on the performance of geological barriers. Actual examples of observation methods are included.

Chapter Seven also refers to the analysis of observation data, and describes methods of analysis of seismic stability and other data, and the method of generalizing observation data deeply influenced by local characteristics.

Chapter Eight yields conclusions and recommendations regarding the next fiscal year's mine survey.

* Work performed by the Mining and Metallurgical Institute of Japan under contract, with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation

目 次

1. まえがき	1
2. 細倉鉱山近傍の地震発生状況	3
2.1 東北地方の過去の地震活動	3
2.2 宮城県周辺の被害地震	4
2.3 東北地方の微少地震活動	4
2.4 宮城県周辺の微少地震活動	6
3. 地震観測システムの設置のための工事	24
3.1 工事計画	24
3.2 設置工事	26
4. 地震観測システム	43
4.1 装置の概要	43
4.2 装置の構成	43
4.3 装置の仕様	45
4.4 壇体外観およびパネル図	49
4.5 記録フォーマット	59
4.6 検査成績結果	67
4.7 地震観測態勢	72
4.8 工事写真	75
5. 観測地点の調査計画	84
5.1 地質・坑内構造の調査計画	84
5.2 弹性波伝播特性調査計画	84
5.3 原位置岩盤特性調査計画	92
5.4 岩石試験計画	93
6. 地層の隔離性能に及ぼす地震の影響評価手法の検討	95
6.1 岩盤挙動観測法	95
6.2 地下水挙動観測計画	111
7. 観測データの解析計画	114
7.1 データ解析計画	114
7.2 観測データの一般化	117
8. あとがき	119

1. まえがき

60年度は、地震および地下水研究の専門委員を増員すると共に、細倉鉱山感天立坑周辺に設置する地震計の配置についての再検討から始めた。その結果、59年度で計画した上1番坑から下10番坑までの7ヶ所の垂直配置に若干の修正を加えて、平面配置を一部取り入れたものとした。すなわち下10番坑に1辺500m程度の三角形を形成するような3点を選定すると共に、下5番坑の観測点を省略して、全体で8ヶ所の観測地点とした。

細倉鉱山に施ける現地工事は、61年2月末までに完了し、3月に入って動力炉・核燃料開発事業団によって地震計の据付および坑外観測小屋内の観測システムの据付、調整が行われた。引続き、細倉鉱山に委託して行う次年度以降の地震観測業務の教育を担当者に施して、観測態勢は確立された。

本年度は研究期間が3ヶ月と短期間であったため、委員会の研究活動としては、次年度以降に実施する調査研究の計画を立案する段階で終了とした。

60年度の研究委員の構成は次頁の通りであり、委員会活動としては、細倉鉱山に於ける現地委員会を含め合計5回開催して検討を重ねた。

地震観測地となった細倉鉱山には、現地委員会の開催や本文第3章に述べてある一連の現地工事の施工を全面的に引受けて戴いた。多大なる御協力に対し、ここに深甚なる謝意を申し述べる。

地震に関する調査研究委員会委員一覧表

	氏名	所属
委員長	佐々宏一	京都大学工学部資源工学科
委員	山口梅太郎	東京大学工学部資源開発工学科
"	川本眺万	名古屋大学工学部土木工学科
"	高木章雄	東北大学地震予知観測センター
"	小林芳正	京都大学理学部地球物理学教室
"	松木浩二	東北大学工学部資源工学科
"	渡辺邦夫	埼玉大学工学部地盤水理実験施設
"	佐藤一彦	室蘭工業大学開発工学科
"	沢田義博	財電力中央研究所耐震研究室
"	駒田広也	財電力中央研究所土質基礎研究室
"	小出仁	地質調査所環境地質部地震物性課
"	楠瀬勤一郎	地質調査所環境地質部地震物性課
"	堀田光	建設企画コンサルタント㈱
"	柏木高明	三菱金属㈱那珂原子力開発センター
"	桜井栄	細倉鉱業㈱鉱山部
"	井上勝義	同和鉱業㈱鉱山部
"	小島康司	日本鉱業㈱鉱物資源調査部
"	小川敬三	日鉄鉱業㈱資源開発部
"	田代淳	石灰石鉱業協会技術部
"	横山威生	住友金属鉱山㈱資源開発部
"	西尾政義	三井金属鉱業㈱資源部

計 21名

研究員	井上瑞城	日本鉱業会
"	萩本正博	日本鉱業会

2. 細倉鉱山近傍の地震発生状況

2.1 東北地方の過去の地震活動

大地震は、数十年ないし数百年の繰り返し時間ではほとんど同じ地域に繰り返し発生している。これらの大地震の発生過程や大地震による被害状況には、地域毎に一定のパターンがあることが、過去の地震資料（古文書等）の解析により明らかになっている。最近、宇佐美（1974）、宇津（1979）などにより、古文書の発掘、古資料の再調査などが積極的に行われ、有史以来の地震資料についてその確実度、統一性を高める努力がなされている。

図2-1は宇佐美、宇津により得られた有史以来の東北地方およびその周辺の被害地震およびM 6.0以上の地震の分布である。宇佐美による震央分布は三角印（有史以来1884年まで）、宇津により再調査された1885年～1925年の期間の震央分布は丸印で示した。黒くぬりつぶしたものは被害を伴った地震であるが、被害の有無は人文的因素に強く関連するものであり、古い時代の地震は全て被害地震である。

図2-2は、気象庁による1926年～1984年の期間の観測資料（地震月報）に基づく震央分布であり、深さ60km以浅、M 6.0以上の地震の震央が示されている。気象庁観測網の地震検知能力から考えて、図2-2には過去59年間の地震活動がもれなく表わされている。図2-1および図2-2に基づいて、東北地方の大地震の活動度の空間分布について考えてみる。もちろん、二つの図は古文書および観測資料に基づいたものであるから、震央位置などの確実度については差があるが、従来の同種のものに比較して信頼性の高い地震活動の分布図になっていると考えられる。

これらの図からわかるように、東北地方の大地震の活動度の空間分布は、有史以来ほとんど同じパターンを示しているものと考えられ、大別すると三つの地震区に分けることができる。それらは、三陸沖からいわき沖に続く海底下の地震区域、内陸の地震区域および日本海沿岸の地震区域である。第一の太平洋海底下の地震区域は、青森県東方沖から三陸東方沖に至る三陸地震区と、宮城県岩手県県境の沿岸から福島県沖に至る海岸線にはば平行した地震区の二つに分けて考えることもできる。この地震区に発生する地震は、沈み込む太平洋プレートとユーラシアプレートの相互作用によって発生するプレート間地震と考えられ、その活動の繰り返し時間は比較的短かい。日本海溝に近い地震区ではM 8.0を越える巨大地震の発生が歴史上何回か知られており、また沿岸に近い地域ではM 7.5前後の大地震が多数発生するなど、この地域は日本でも最も地震活動度の高い地域のひとつとなっている。しかし、図2-2に見られるように岩手県沿岸付近には、気象庁の観測開始以来M 6.0以上の地震が全く発生していない地域が存在していることも特徴的である。

内陸および日本海沿岸の地震区域は、太平洋海底下の地震区域と比較すると、その地震活動度はかなり低いことがわかる。これらの地震区域内の地震の最大のマグニチュードは7.0前後で、その繰り返し時間も数百年の程度であると考えられているが、ほとんどの震源が内陸でありいわゆる直下型地震であるため、地震防災の意味ではその対策は重要であろう。

2.2 宮城県周辺の被害地震

1978年6月12日、宮城県金華山沖約60kmの海底にM 7.4の地震が発生した。1978年宮城県沖地震と名付けられたこの地震は、海底下約30km（東北大学による）の深さに発生したが、仙台市を中心に多くの人命と莫大な被害をもたらした。この地震により仙台、大船渡、石巻、福島、新庄では震度Vを記録した。1936年には、ほぼ同じ地域でM 7.7の地震が発生しているので、この地域では約40年ぶりの大地震である。この地震をも含めて宮城県周辺の地震環境を調べるために、前出の宇佐美、宇津の資料と気象庁のデータを基にして、宮城県内を中心として過去に震度Vを記録した地震に対する震度V地域の分布図を図2-3、図2-4に示す。図2-3は1731年～1933年の期間、図2-4は1938年～1978年の期間の震度V地域分布である。仙台平野、宮城県北部などは、過去に何回も震度Vを経験していることがわかる。ある特定の場所の強震動を決定する重要な要因のひとつとして、その場所の地盤特性があげられる。地盤の良し悪しによって、きわめて局所的な地震動災害の地域差が発生し得ることが、過去の多数のデータにより指摘してきた。その意味で、地盤特性の調査は、地震防災の面で重要であろう。

宮城県に被害をもたらした地震の震央分布図を図2-5に示す。宮城県北部には、1900年M 7.3、1962年M 6.5の被害地震が発生している。前出の宇佐美によるこれらの地震の資料を本文末に記載した。

応用地質調査事務所（1978）は、気象庁の仙台および石巻の気象官署の資料を用いて有感地震回数の年別推移および各震度に対する再来年数を調べた。その結果、仙台、石巻とも震度V以上が期待される再来年数は、平均的に約10年であることがわかった。しかし、震度Vをもたらす地震が規則的に約10年に1回発生しているわけではない。1600年代以降長期的にみると、三陸沖に関しては、1650年～1730年、1760年前後、1850年～1860年、1900年前後、1930年代、1968年などが地震活動の活発期であった。特に、宮城県周辺に関していえば、1900年前後、1930年代に集中して大地震が発生している。

2.3 東北地方の微小地震活動

1975年以来、東北大学理学部では東北地方に展開したテレメーター地震観測網による微

小地震の高精度観測を実施している。この観測網による高精度の観測データを基にして、東北地方の地震活動が詳細に把握できるようになった。図2-6は、1985年1月～6月の期間に発生した深さ60km以浅の浅発地震の震央分布図である。6ヶ月間という比較的短期間の震央分布図であるが、期間を長くしても全体的な震央分布のパターンはあまり変化しない。

図2-1あるいは図2-2に示された過去の大地震の地震活動の空間分布に見られた特徴と、図2-6の微小地震の震央分布の特徴はほぼ一致している。すなわち、図2-6にも太平洋海底下の地震区域、内陸の脊梁山脈沿いの地震区域、および日本海沿岸の地震区域の活動が顕著に現われている。ただし、図2-1および図2-2にみられた、岩手県沿岸の被害地震空白域には、活発な微小地震活動が認められる。東北地方内陸部の脊梁山脈付近には非常に活発な微小地震活動域がほぼ南北に連っており、北上山地の西縁に沿って分布しているように見える。この弧状の微小地震活動域は岩手県西北端から宮城県北部にまで及んでいる。岩手県西北端付近は群発微小地震の発生域と考えられており、大地震と結びつく活動ではないであろう。奥羽脊梁山脈沿いの微小地震活動域のはば中央（39.5°N近傍）付近では1896年の陸羽地震（M7.2）が発生し、その南では1970年の秋田県南東部地震（M6.2）が発生している。また、この脊梁山脈沿いの微小地震活動地域の中ほどから西方に活動が移っている地域（39.4°N, 140.3°E付近）が認められる。この地域付近では、1914年に秋田仙北地震（M7.1）が発生している（図2-1参照）。さらに宮城県北部では、この期間に活発な地震活動がみられるが、この地域では1900年M7.3と1962年M6.5の被害地震が過去に発生している。

日本海沿岸付近では、いまだに1983年日本海中部地震の余震活動が活発に続いていることがわかる。また、この余震域を取り囲むように活発な地震活動が発生しているのが認められる。例えば、秋田市西方沖の活動、男鹿半島周辺の活動、渡島大島南東の活動などである。

このように、東北地方の浅発微小地震（ここでは震源の深さ60km以浅とした）の活動分布は、過去の大地震の活動域と密接な関連を持っていることがわかった。次に、震源の深さ分布を調べてみる。

まず地殻構造と微小地震の震源分布との関連について調べてみる。秋田県男鹿市と宮城県気仙沼市とを結ぶ線（測線）に沿った地域の地殻構造は、人工地震による爆破地震動を用いて比較的正確に推定されている（Research Group for Explosion Seismology, 1977）。その測線を中心とした幅60kmの領域内に発生した微小地震の震源を測線に沿う鉛直断面に投影したものを図2-7に示す（高木、長谷川, 1976）。図は深さ方向を約4倍に拡大してある。東北地方内陸下では地殻の厚さが約30kmで、上部マントルのP波速度は7.5km/secと推定されている。この値は、日本列島の他の地域に比較してやや小さい。地殻は大別

して二層に分けられ、花崗岩層とよばれる上部地殻は 5.9 km/sec 、玄武岩層とよばれる下部地殻は 6.6 km/sec の P 波速度が求められている。図から明らかなように、東北地方内陸下のはとんど全ての浅発地震は上部地殻 (5.9 km/sec 層) 内に限って発生している。プレート運動に起因する広域応力場は上部地殻と同様に下部地殻にも及んでいると考えるべきである。それにもかかわらず、下部地殻内部ではとんど地震が発生していないということは、下部地殻が延性的であり脆性破壊（地震）を発生しにくいことを示唆している。

日本海溝から宮城県沖、宮城県北部、鳥海山付近を通り日本海にまで達する地域（図 2-6 の長方形の枠で示された地域）内に発生した地震の震源分布を鉛直断面図に投影したものが図 2-8 である。この長方形は、日本海溝にはほぼ直交する方向に採ってある。東北地方内陸部の位置を図の上部に太線で示した。VF は火山フロント、TA は日本海溝の位置である。深さ約 60 km 以深の範囲をみると、太平洋側から日本海側に約 25 度の傾斜角で傾斜した二列の地震群が認められる。これらの二列の地震分布は二重深発地震面と呼ばれ、沈み込む太平洋プレート内部で発生している稍深発地震により形成されていると考えられている。火山フロント直下の深発地震面までの距離は約 100 km 程度である。この二重深発地震面の地震も含めて、深さ 100 km を超えた場所で発生した地震で地上に被害をもたらしたような地震は過去にはとんど例を見ない。しかし、浅発地震との関連性、特に太平洋海底下で発生する大地震（プレート間地震）との関連性を考察し、地震発生機構を解明するための手がかりを得るために、深発地震の性質の究明は重要な役割を果すものと考えられる。

2.4. 宮城県周辺の微小地震活動

前節では、東北大大学の微小地震観測網のデータにより、東北地方全域の地震活動の特長を調べた。ここでは、対象領域を宮城県北部を中心とした比較的狭い範囲に限定して、そこで発生した地震活動の特長を詳細に検討してみる。

図 2-9 は、1975 年 4 月～1986 年 1 月の期間に発生した深さ 40 km 以浅、M 2.0 以上の地震の震央分布図である。細倉鉱山の位置を黒星印で示す。図中に記号 A～D で示した各々の地震活動について、以下に述べることにする。

記号 A は 1976 年 7 月 5 日に発生した宮城県鳴子町鬼首付近の地震 (M 4.7) である。図 2-10 は、この地震の本震、余震の震央分布図である。東北大大学微小地震観測網で決定した本震 (⊕印)、余震 (○印) と、臨時余震観測点 3 点で決定した余震 (●印) が示されている。臨時観測で決定した余震の震源は北東～南西方向に拡がっており、震源の深さは $0 \sim 3 \text{ km}$ の範囲内であり、極く浅い。本震の発震機構はほぼ北西～南東の方向に主圧力軸をもつ逆断層型である（東北大大学理学部、1977）。

図2-11は、1985年3月28日宮城県鳴子町周辺に発生したM 4.7の地震の前震、本震および余震の震央分布図である。この活動（図2-9の記号B）は本震発生の約26分前の前震（M 1.7）を伴っていた。マスターイベント法で再決定した余震の深さ分布は10 km 前後に集中している。図(C)に本震の発震機構を示す。やや横ずれ成分が卓越しているが、主圧力軸はほぼ水平で東西方向をむいている。（東北大学理学部、1985）。

図2-12は、1985年6月26日に宮城県北部に発生したM 4.5の地震の震央分布図と発震機構を示したものである。図(A)は気象庁資料による1926年～1975年4月の期間の地震の震央分布図である。前述の1962年4月30日の宮城県北部地震(M 6.5)の本震（黒星印）と余震の震央が示されている。また、秋田県岩手県県境付近には、1970年10月16日の秋田県南東部地震(M 6.2)の震央も黒星印で示されている。図(B)は東北大学微小地震観測網による10年間の浅発地震の震央分布図である。宮城県北部は微小地震活動の極めて活発な地域であることがわかる。図(D)と(E)に6月26日と27日に発生した地震の発震機構を示す。いずれも東西方向に主圧力軸を持つ逆断層型である。（東北大学理学部、1986）。1962年の宮城県北部地震は、南東～北西方向の主圧力軸を持つ逆断層型の発震機構であった。

図2-9中の記号Dは、岩手県一関市本寺付近の地震活動である。この地域では1969年8月30日にM 4クラスの群発地震活動が発生している。高木(1970)によると、この時の活動はM ≈ 4.0の地震を最大とする群発地震で、鳴動を伴うものもあり、その活動は同年9月中旬まで続いた。臨時観測網により決定された震源は極めて局所的に分布しており、活動域は直径5 km程度の範囲である。鳴動有感区域も半径10 km以内である。このことから考えて、この地域は極めて局所的な小地震の群発地域と考えられる。

以上みてきたように、細倉鉱山周辺には微小地震活動の活発な地域が存在していることがわかる。それらは、いずれも過去にM 4～M 6クラスの地震活動が存在していた地域である。

参考文献

気象庁、地震月報、1926年～1984年

応用地質調査事務所、1978、1978年6月12日 宮城県沖地震被害調査報告

Research Group for Explosion Seismology, 1977, Regionality of the Upper Mantle around Northeastern Japan as Derived from Explosion Seismic Observations and its Seismological Implications, Tectonophysics, 37, 117-130.

高木章雄、1970、東北地方に於ける最近の地震活動、地震予知連絡会会報、2, 9-11.

高木章雄、長谷川昭、1976、東北日本弧系における地震活動の特性と予知研究、地震予知研究シンポジウム、15-20.

東北大学理学部, 1977, 東北地方及びその周辺の微小地震活動（1974年1月～1975年6月, 1976年5月～1976年10月）, 地震予知連絡会会報, 17, 16 - 22.

東北大学理学部, 1985, 東北地方およびその周辺の微小地震活動（1984年11月～1985年4月）, 地震予知連絡会会報, 34, 12 - 31.

東北大学理学部, 1986, 東北地方およびその周辺の微小地震活動（1985年5月～10月）地震予知連絡会会報, 35, 16 - 38.

宇佐美龍夫, 1974, 日本被害地震総覧, 東京大学出版会.

宇津徳治, 1979, 1885年～1925年の日本の地震活動, 地震研究所彙報, 54, 253-308.

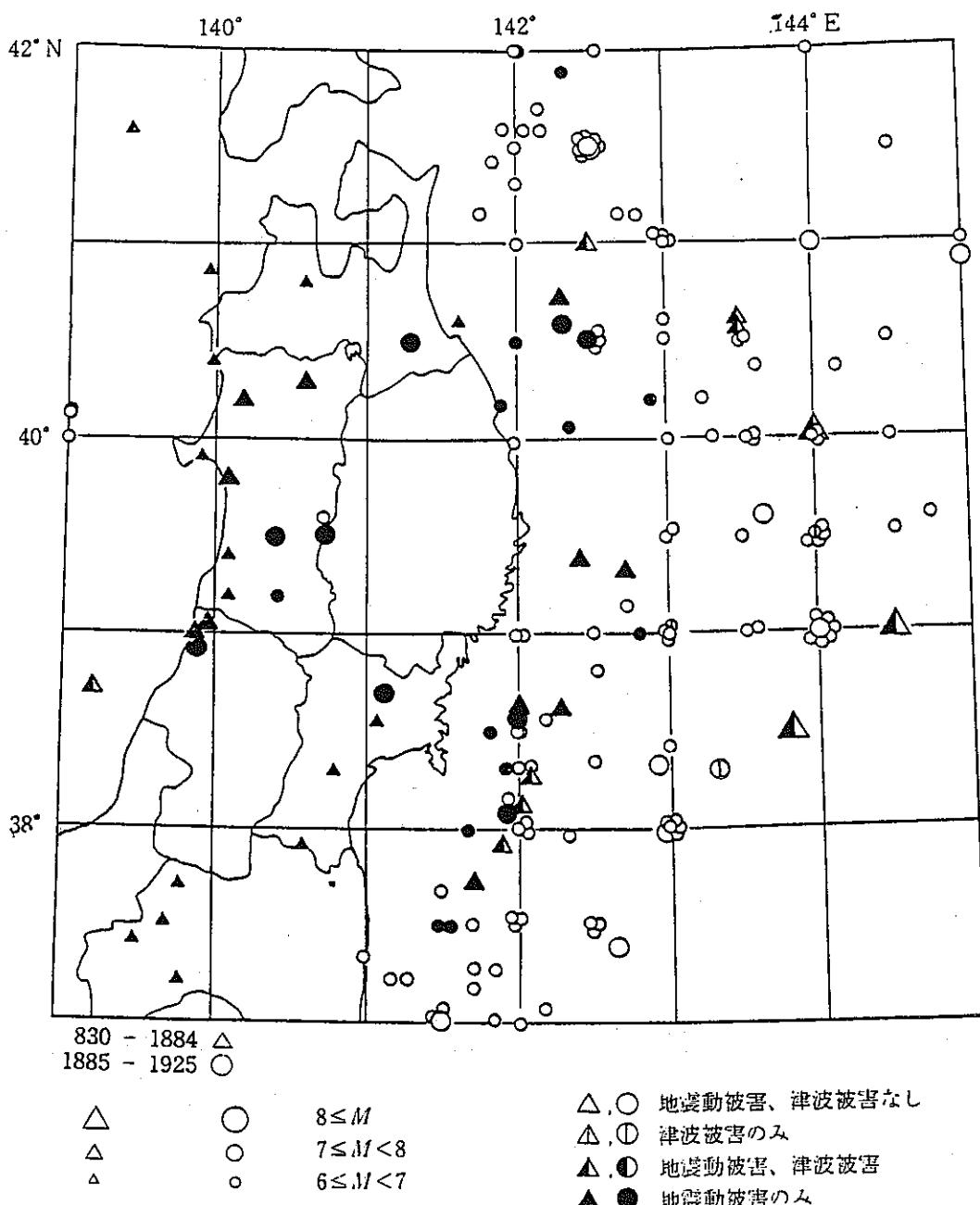


図 2-1 被害地震（830 年 - 1925 年）。宇佐美、宇津による。

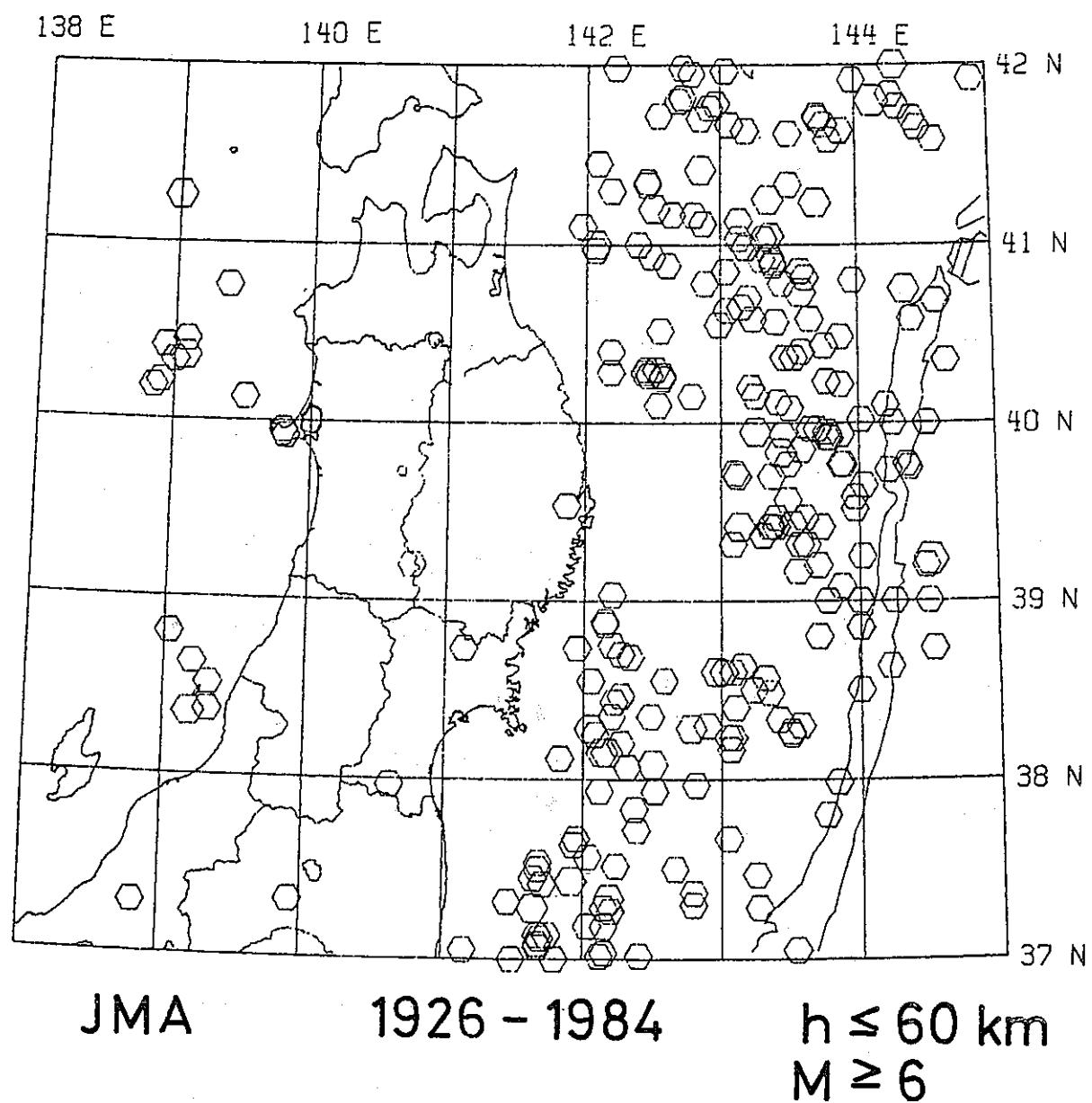


図 2-2 $M \geq 6$ の浅発地震の震央分布（1926年-1984年）。気象庁による。

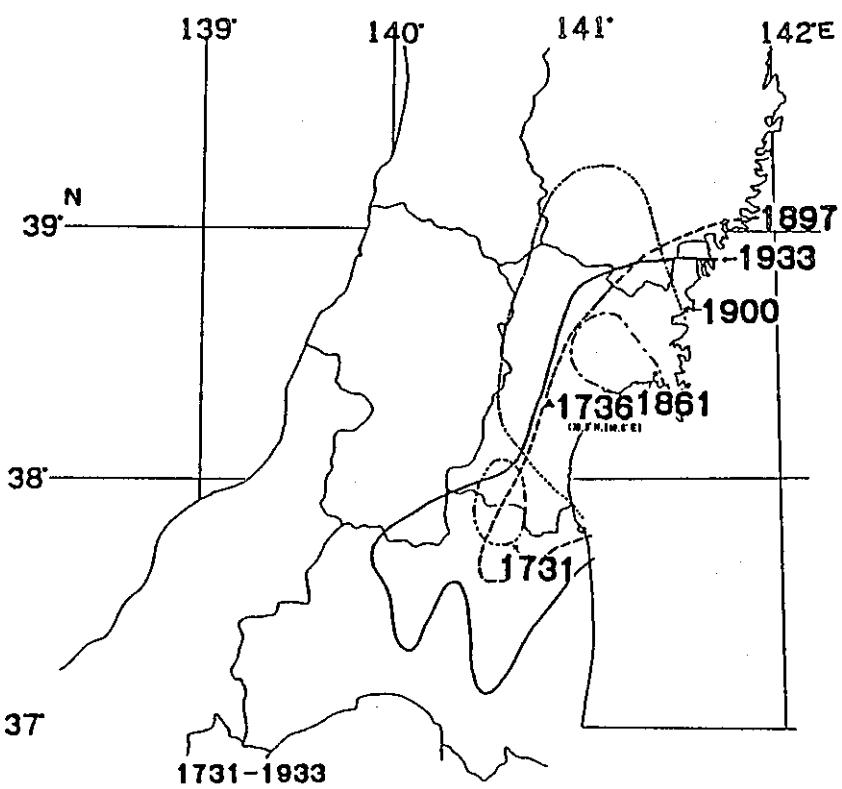


図 2-3 宮城県の被害地震の震度 V 分布図

(1731年—1933年)。

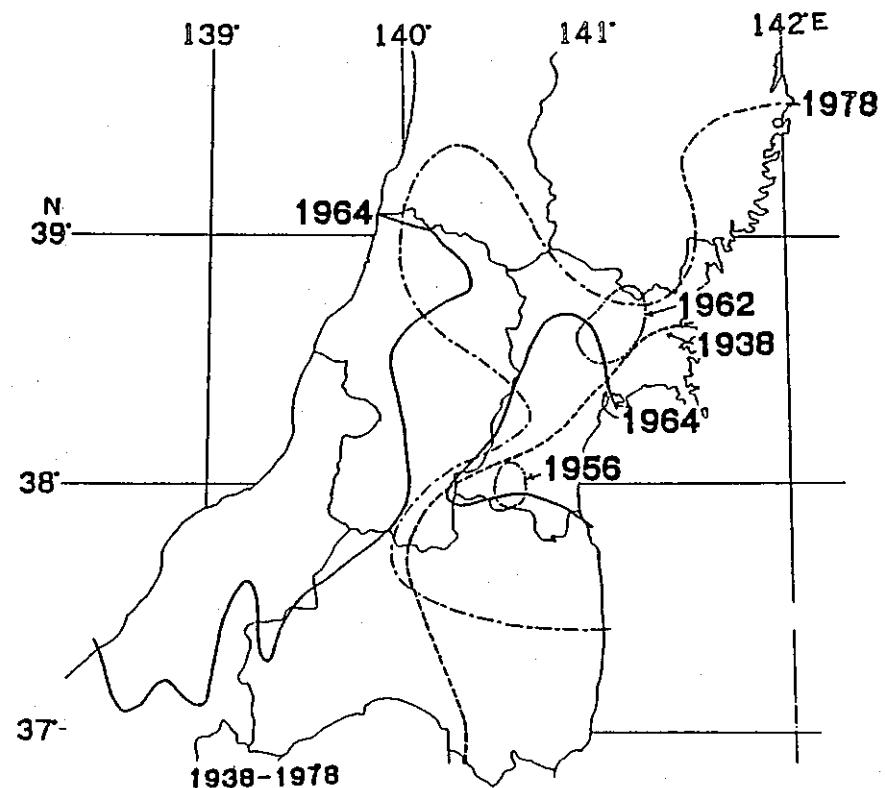


図 2-4 宮城県の被害地震の震度 V 分布図

(1938年—1978年)。

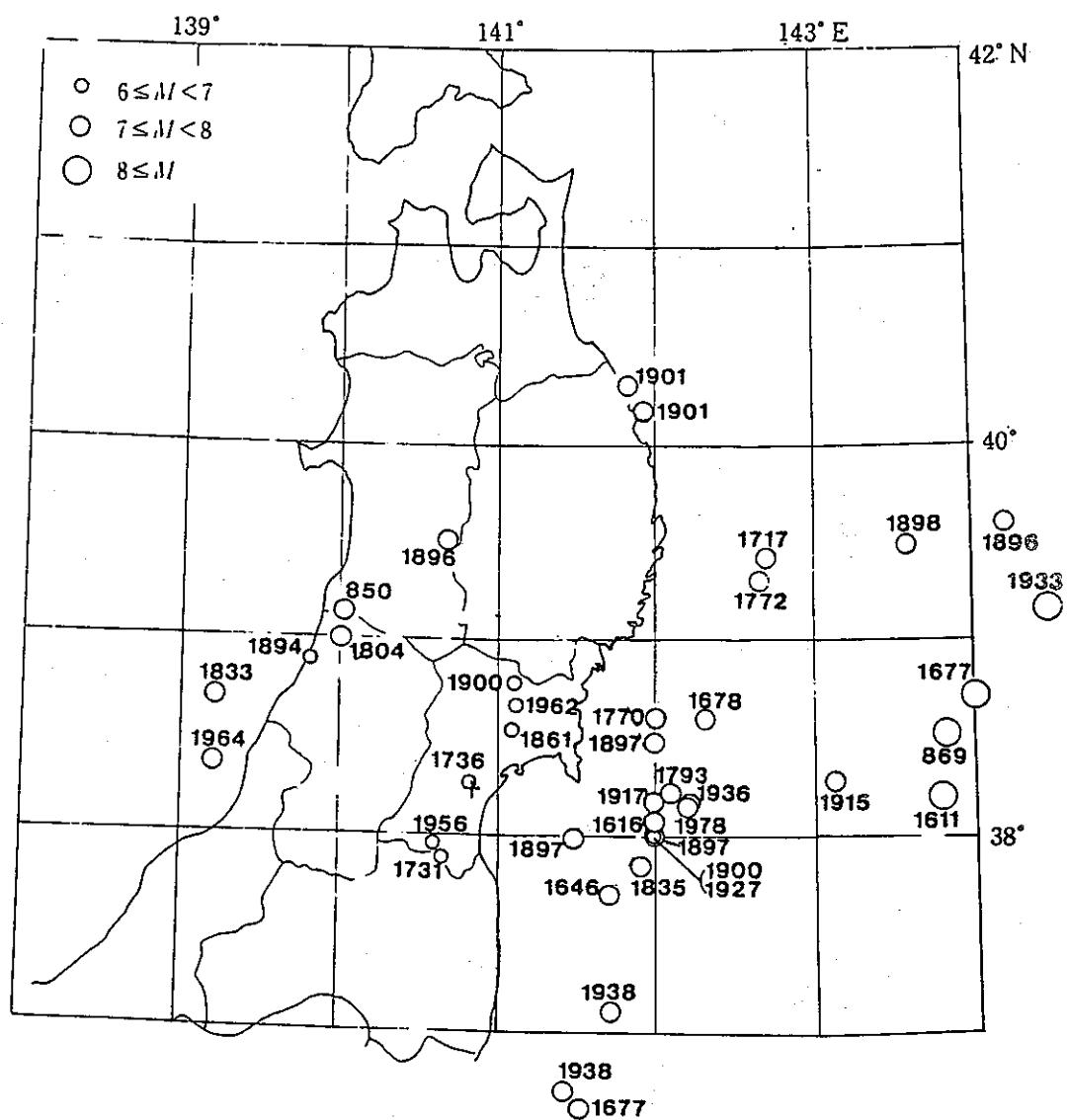


図2-5 宮城県の被害地震

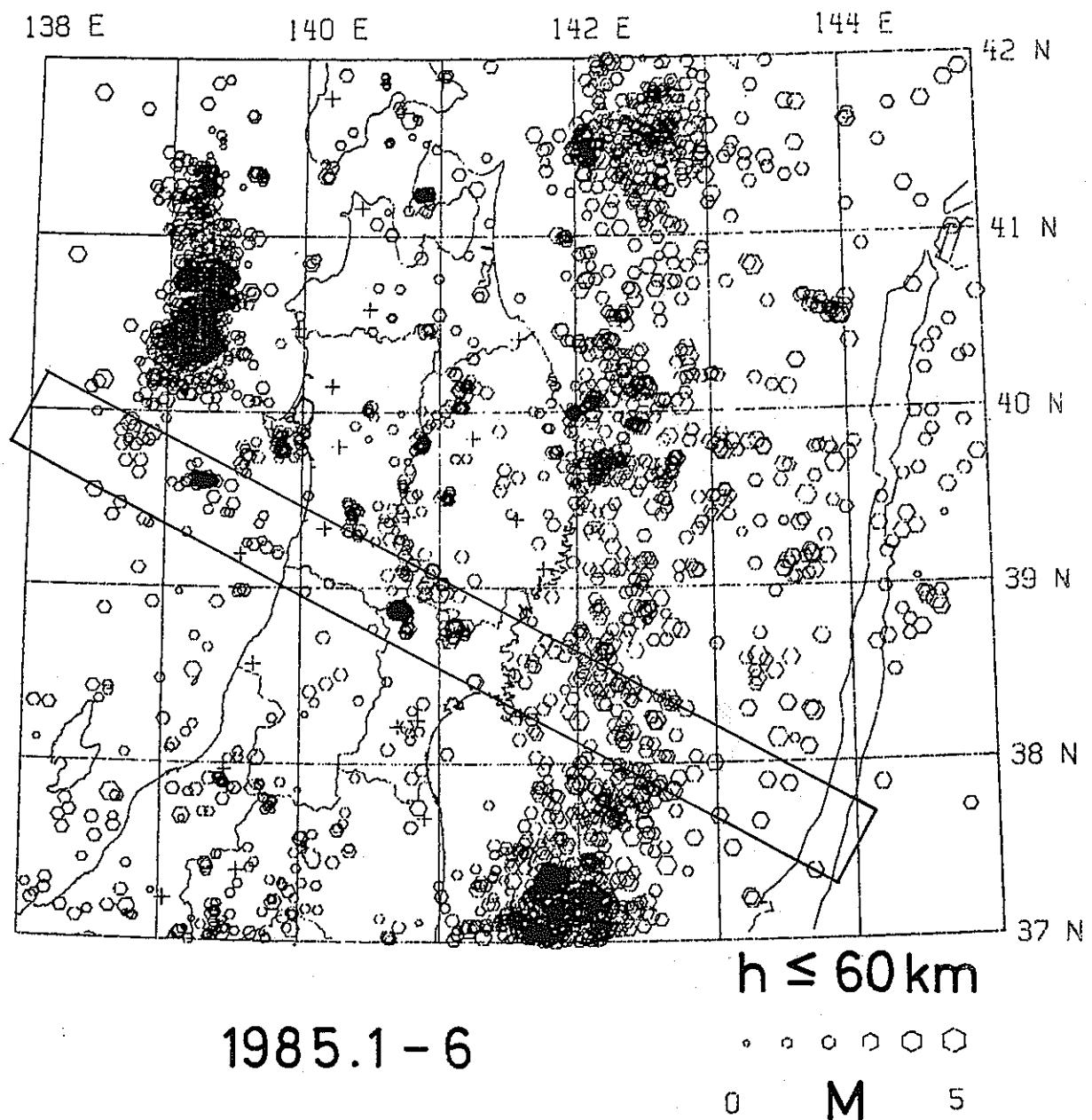


図 2-6 東北大大学微小地震観測網による震央分布図
(1985 年 1 月 - 6 月)。深さ 60 km 以浅
の地震を示す。図中の長方形は、図 2-8
の断面図の領域を表わす。

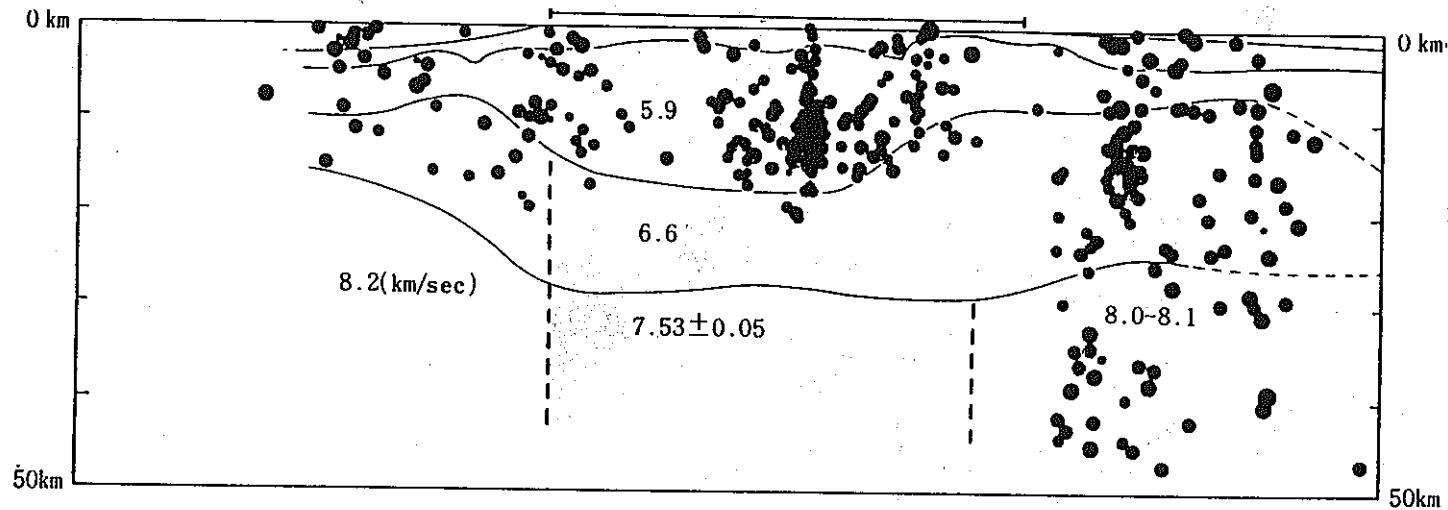


図 2-7 男鹿—気仙沼測線に沿う鉛直断面における地殻構造と微小地震の震源分布。図中の数字は、地震波 P 波速度の値を示す。内陸の地震は、花崗岩層 (5.9 km/sec 層) 内に発生している。図は縦方向に約 4 倍に拡大してある。

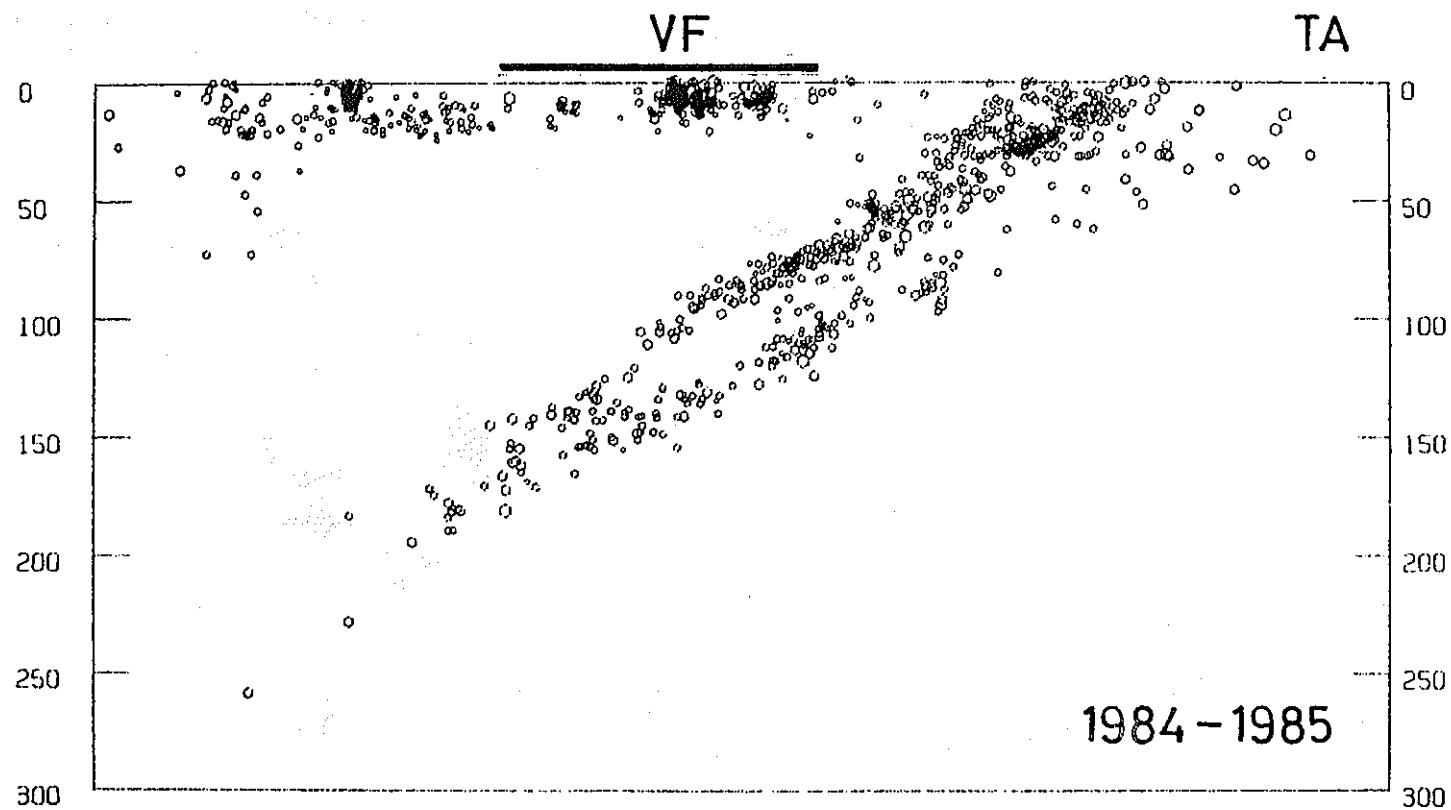


図 2-8 微小地震の震源分布図。図 2-6 中に示された長方形の領域内の
深さ分布を表わす。東北地方内陸部の範囲を図上部の太実線で示
した。VF, TA は、火山フロント、日本海溝の位置を表わす。

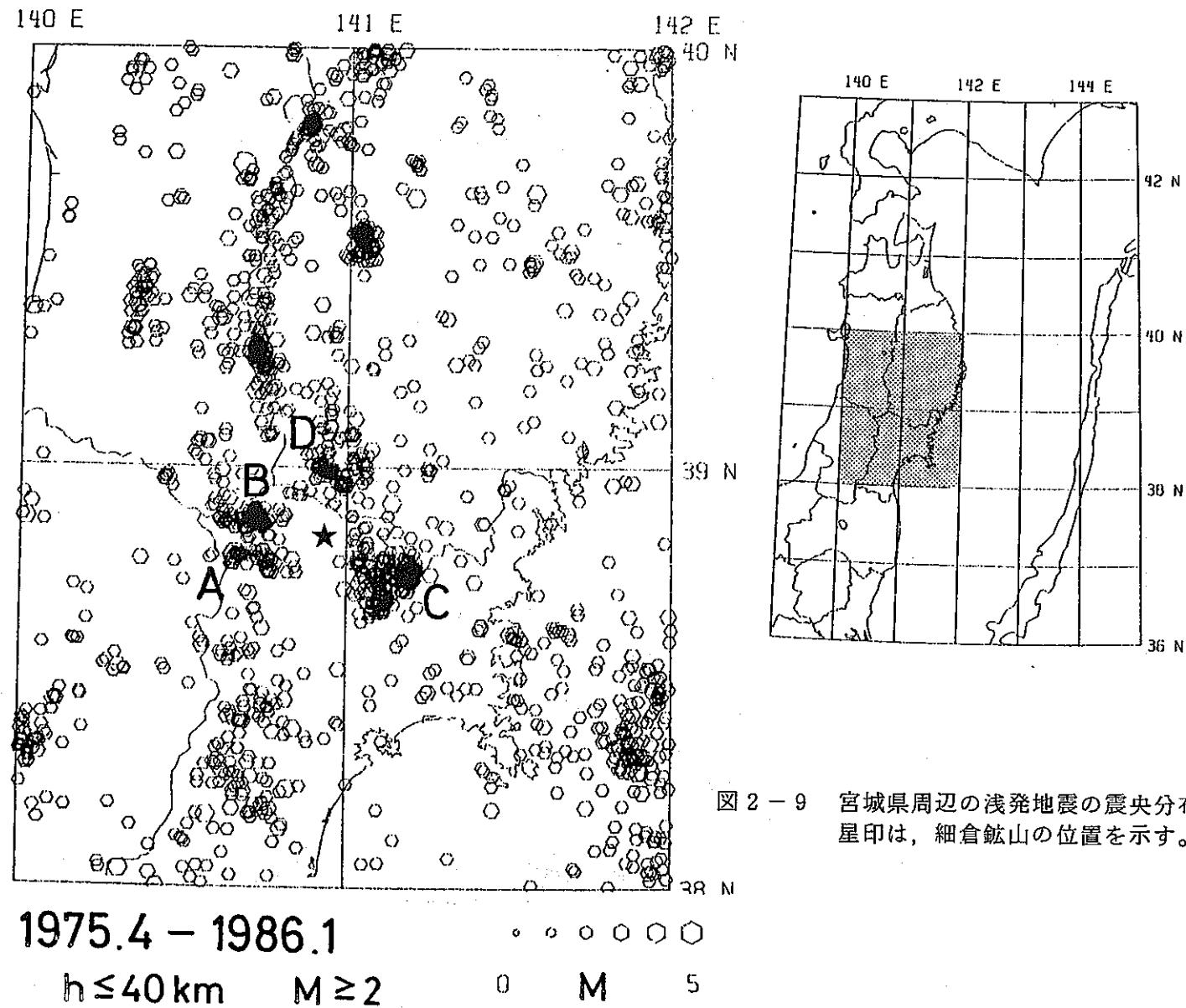


図 2-9 宮城県周辺の浅発地震の震央分布図。
星印は、細倉鉱山の位置を示す。

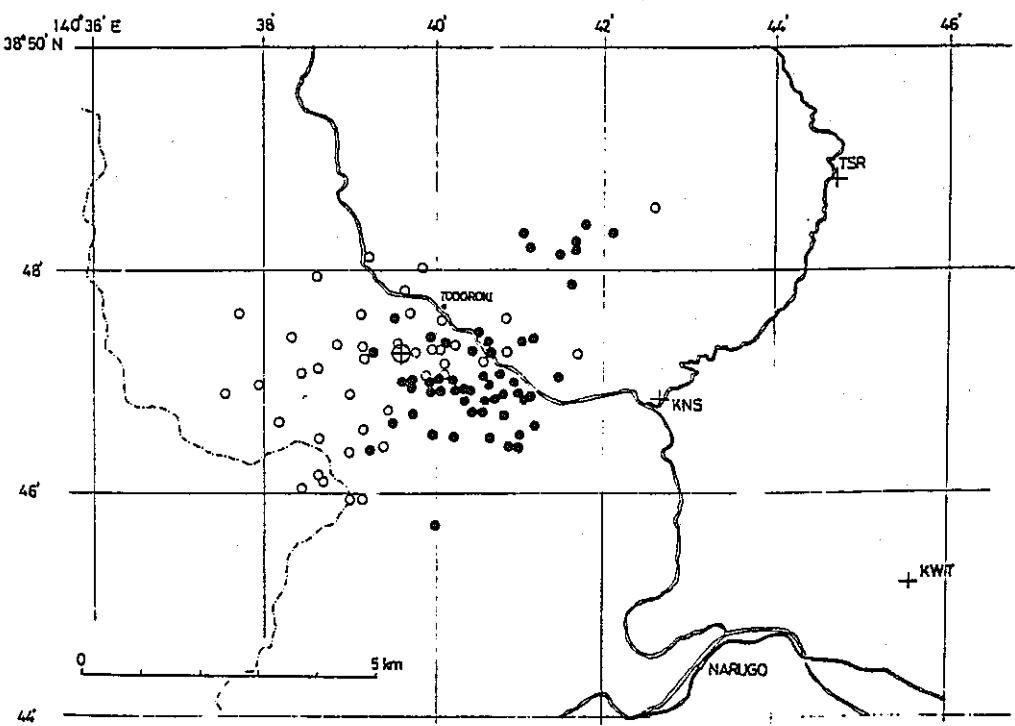


図 2-10 1976年7月5日に宮城県鳴子町鬼首付近に発生した地震(M 4.7)。本震(+)、余震(○)、臨時観測で決定された余震(●)の震央分布を示す。

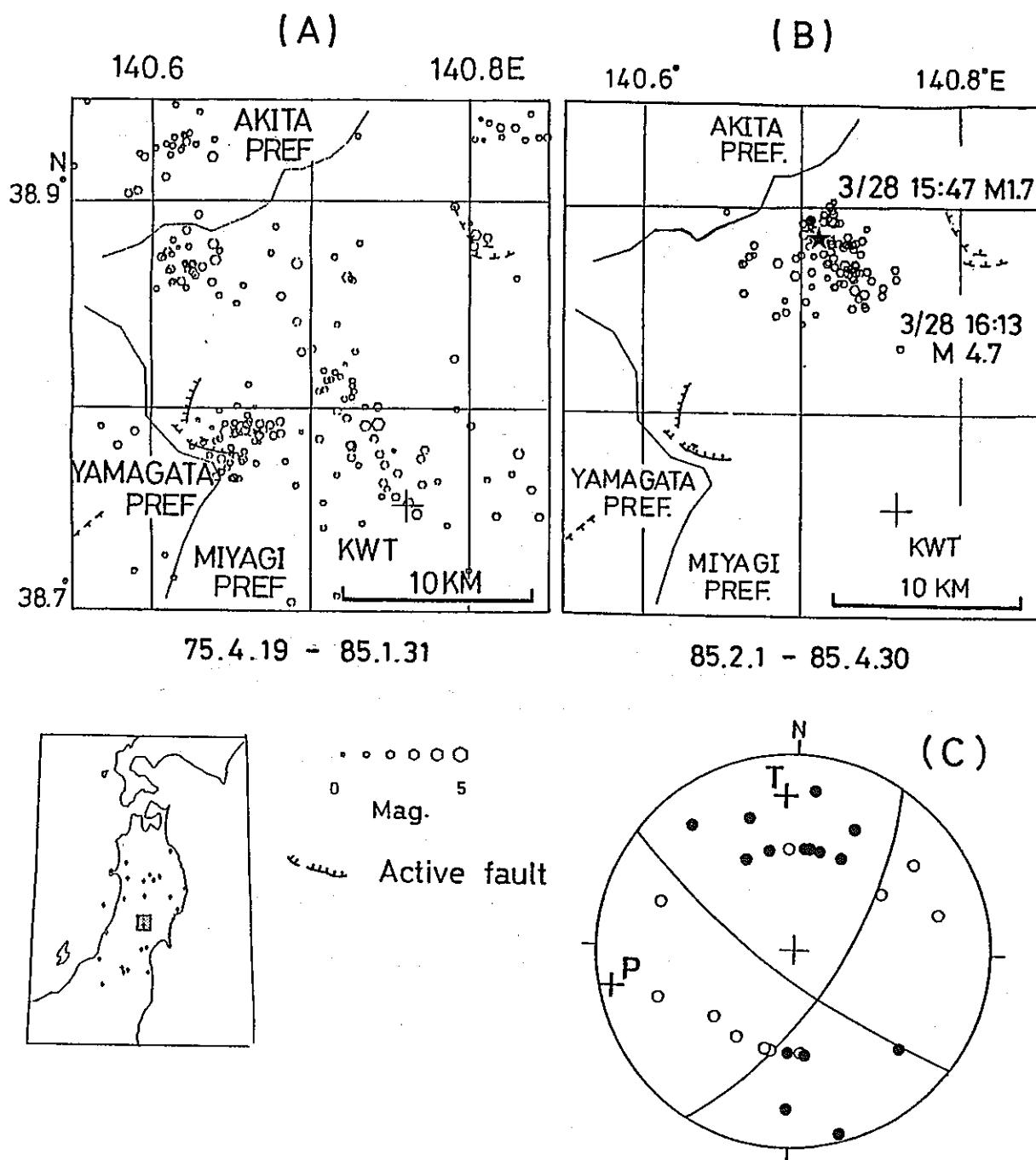


図 2-11 1985年3月28日に宮城県鳴子町周辺に発生した地震(M 4.7)。(A)1975年4月～1985年1月の震央分布。(B)1985年2月～4月の震央分布、前震(黒丸)、本震(星印)、余震(白丸)を示す。(C)本震の発震機構(下半球等積投影)。

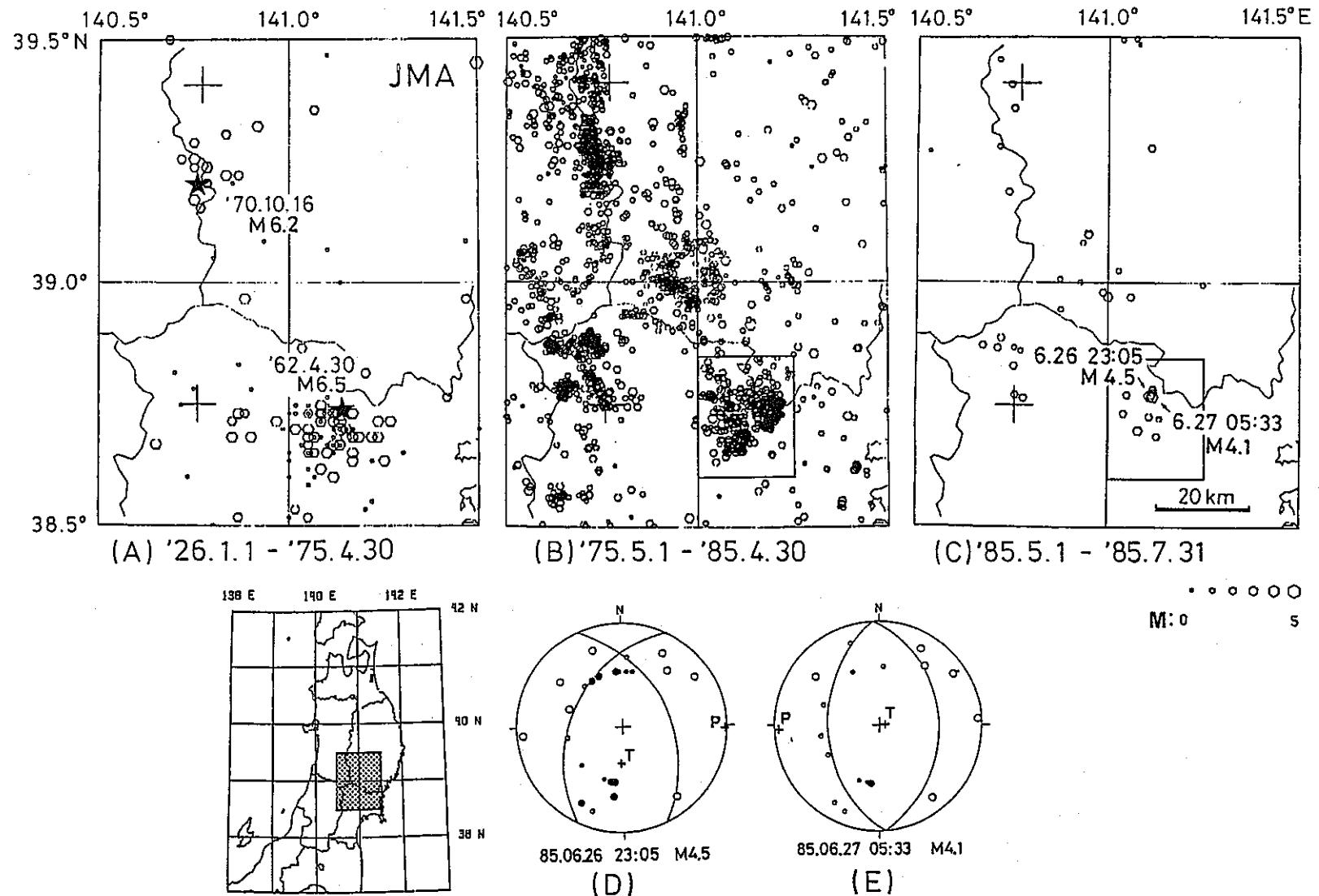


図 2-12 1985年6月26日に宮城県北部に発生した地震(M 4.5)。(A)1926年-1975年4月の震央分布(気象庁による)。(B)1975年5月-1985年4月の震央分布。(C)1985年5月-7月の震央分布。(D), (E)6月26日(M 4.5), 6月27日(M 4.1)の地震の発震機構(下半球等積投影)。

資料

「日本被害地震総覧」 宇佐美龍夫著

1900 V 12 (明治33) 02時23分

宮城県北部 $\lambda = 141.0^\circ\text{E}$ $\phi = 39.0^\circ\text{N}$ $M = 7.3(6.8)$ 震央は $\lambda = 141.1^\circ\text{E}$, $\phi = 38.8^\circ\text{N}$ か? 遠田郡で被害最大、桃生・登米・志田の各郡も強かった。被害は文献により異なる。警察による統計は表(b)のようになっている。遠田郡南小牛田村は64戸のうち45戸が大破・転倒した。

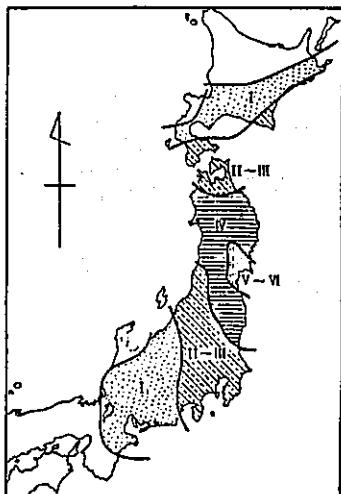
柱が折れ、傾いた家が多かった。栗原郡若柳町で家屋全潰5、半潰2、破損27、土蔵崩壊20があった。仙台では壁の小亀裂にとどまり、塩釜で煙突倒れ、石垣が崩れた。地震前(?)に地鳴りがあった。範囲は盛岡と平を端とする楕円形の中で西は新庄まで聞こえた。

表(b) 被害状況

郡名	死傷	家屋			道路堤防決壊	橋梁破損
		全潰	半潰	破損		
桃生	1	6	5	257	18	5
登米	2	7	4	190		
遠田	11	21	33	570		2
志田	2	7	4	400		
その他	1	3	2	57	2	

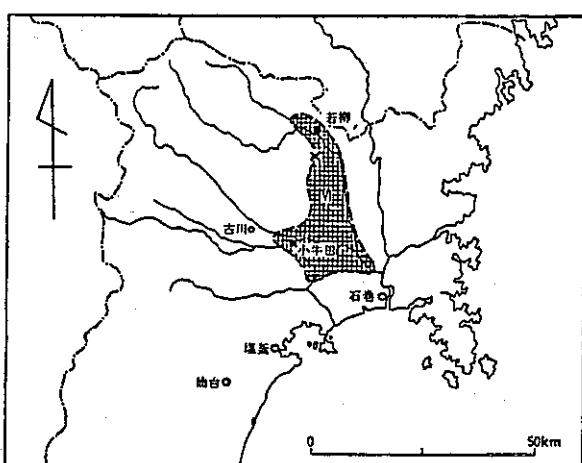
* 黒川・名取・伊具・牡鹿・玉造・栗原の各郡

図(c) 震度分布



(気象庁による)

図(d) 烈震域(点線)



1962 IV 30 (昭和37) 11時26分

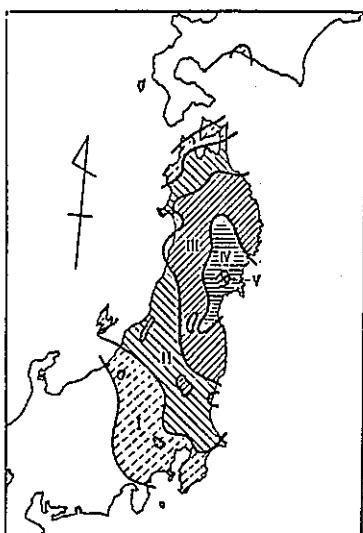
宮城県北部 $\lambda = 141^{\circ}08'E$ $\varphi = 38^{\circ}44'N$ $M = 6.5$ $h = 0\text{km}$ 宮城県北部地震 被害の大きかったのは田尻町・南方村で詳細は表(f)のとおり。国道・鉄道ともに盛土部分の被害多く、瀬峯駅の南で貨車脱線転覆。振動によるものと考えられる。古川市の北の江合橋は桁が水平15cm、上下5cmのズレを示した。南方村大袋・野谷地で水田中に軽石状の小石を噴出した。井水はふえたものが多かった。図(o)は建物の倒壊率((全潰+半潰)/住宅数)で、この他部落別にみると南方村一の曲で90%，同野谷地69%，若柳村大林88%，田尻町田尻29%である。震後の測量の結果、築館付近が約4cm隆起した。図(n)は詳しい震度分布。図(m)は余震の減衰を示す。

表(f) 被害状況

市町村名	死	傷	家屋被害			非住家 損	苗代岬	河川	道路	橋梁
			全壊	半壊	一部被害					
古川市	2	91	18	23	9,836	9,093	15,900	1	12	4
涌谷町		11	5	5	3,440	1,600	3,900	6	7	
○田尻町	1	19	105	317	660	405	21,900	9	6	2
○小牛田町		22	21	177	3,000	380	26,400	3	1	
南郷町		1		2	31	15	1,800		2	4
松山町					300	55	900			
三本木町					176	35	1,200		1	
築館町		12	3	16	1,000	2,144	5,000	10	24	
○若柳町		41	35	149	2,874	3,798	5,000	6	5	
栗駒町		3			200	90		2	6	1
高清水町		6	2	13	957	682	1,500		4	2
瀬峰町		5	3	18	900	535	6,000	4	14	6
一迫町		36			95	103	3,000		20	
○金成町		8	49	155	519	1,046	3,000	4	1	1
志波姫町		5	2	2	824	1,261	8,000	1	2	3
○迫町		2	21	76	3,983	12,212	30,000	13	23	6
豊里町		1				1	4,000			
○米山町		1	23	84	370	452	6,400	1		1
石越町		4			1,000	172	3,000	6	2	
○南方村		4	53	77		279	6,000	4	6	1
その他							20,600	3	17	4
計	3	272 (276)	340 (369)戸	1,114 (1,542)戸	30,165 (25,575)戸	34,358 (37,003)棟	173,500 (390)	73 (283)	153 (187)	35

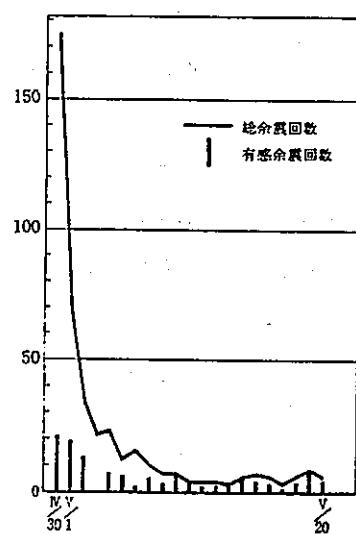
○は災害救助法適用。かっこ内の数字は別の資料による。

図(1) 震度分布

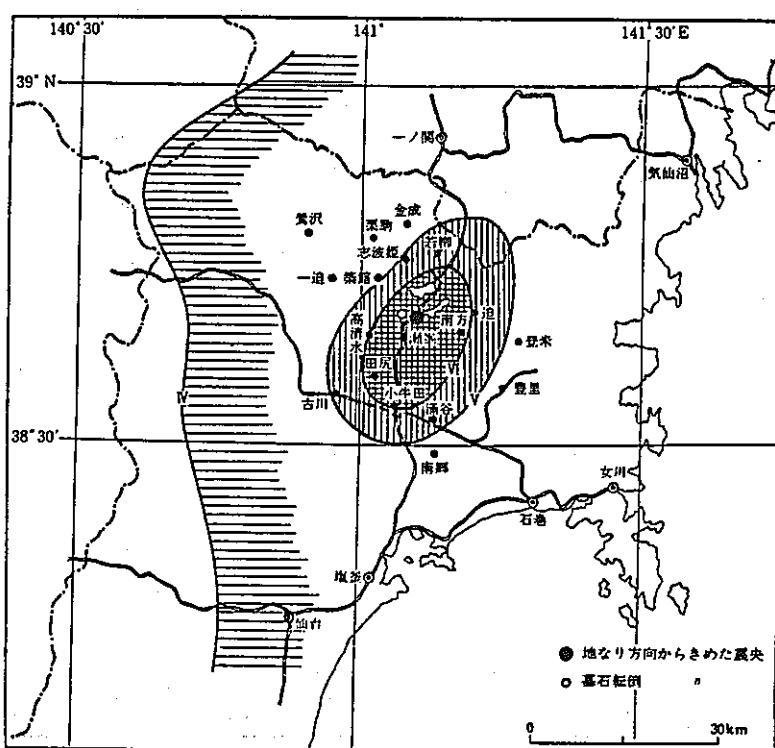


(気象庁による)

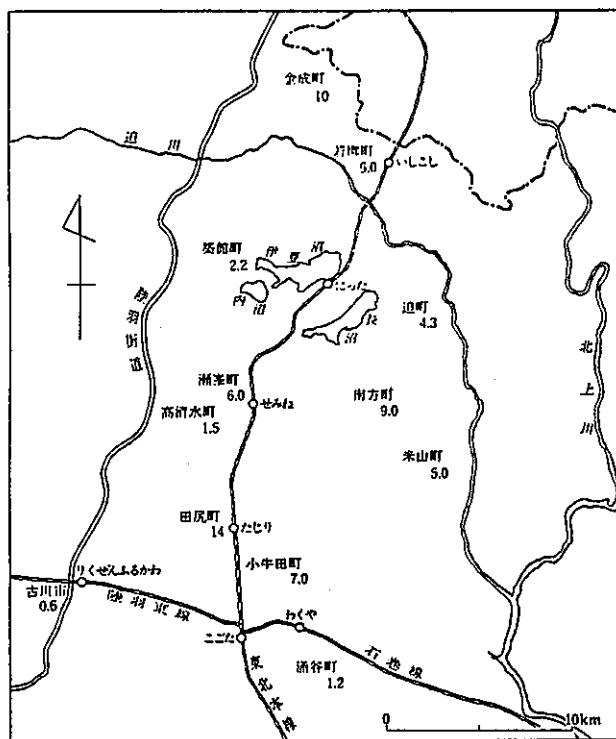
図(m) 日別余震回数



図(n) 震央付近の震度分布



図(o) 家屋被害分布



(大沢ほかによる, 1962)

3. 地震観測システム設置のための工事

3.1 工事計画

1) 現地調査（現地委員会）

地震に関する調査研究委員会では第1回委員会で地震観測点の仕様を以下のように決定した。

測点の仕様

測点	海抜	測定成分	備考
1	+155.3m	3成分	上1番坑、土被り5m
2	+155.3m	3〃	上1番坑、土被り40m
3	+15.1m	3〃	下3番坑、測点4と採掘跡空洞（充填済）を挟む
4	+15.1m	3〃	下3番坑
5	-102.6m	3〃	下7番坑
6	-188.6m	3〃	下10番坑、測点7,8と水平平面アレイを構成
7	-188.6m	1成分（上下）	下10番坑、入射特性解析
8	-188.6m	1〃	下10番坑、入射特性解析

これらの測点の仕様に基づき、現地委員会を細倉鉱山で開催し現地調査を行い次のような対策をとった。

細倉鉱山は海拔106m、北緯38°48'、東経140°54'に位置し気候は比較的温和であり、積雪量も奥羽山脈にさえぎられ多くはない。

観測小屋に収納する機器はデータ収録装置、遅延装置、トリガー装置、デジタルデータレコーダー、較正機、刻時装置、デジタルプリンター、モニター記録機、安定化電源装置、作動状況表示盤である。これらの機器は温度変化、湿度に弱くこれらを保護するために以下の処置をとることにした。

温度変化と湿度が観測機器に及ぼす影響を最小限にするため観測小屋は内外壁間および天井に断熱材を入れ、窓は二重ガラスとした断熱構造とし、室内には冷暖房兼用空調機を備え室内温度を一定に保つようにしている。また観測小屋の床は10cm厚さのコンクリート床とし、設置した観測機器への雑振動を抑えるようにしている。

この観測小屋から坑内の各測点へのケーブル配線は感天立坑を通じて布設している。感天立坑は通常人員、資材昇降に使用されておりその使用頻度は比較的高い。このため立坑の点検は毎日実施されておりケーブルの保守点検も同時に行うことができる。通気系統上、感天

地区は排気側であり坑内温度、湿度はそれぞれ 26°C 、98%と高い。このため地震計は密閉防湿型を採用している。

60年2月の予備観測で常時微動、卓越振動数、坑道でのP波、S波速度測定、電圧変動測定を行った。その結果を考慮し今回の設置工事では次のような対策をとっている。

常時微動………鉱山稼動中で片振幅は約0.1 gal、最大加速度は水平約0.4 gal、鉛直約0.3 gal、最大加速度となるノイズのパルス間隔は0.1~1.0 secである。

また発破による振動は、その振動数が測定対象としている地震の振動数よりかなり高い為、測定器には検出されないため特に対策はとっていない。

卓越振動数………ノイズには顕著な卓越振動数はない為、地震波の解析に大きな障害は無い。

地震計基礎………地震波は、地面にズリがある場合ズリの為に波動が減衰する。

これを防ぐために地震計の基礎は坑道ズリを取り除き堅岩を露出させその上に打設した。

電圧変動………各種装置の起動、停止に連動した電圧変動が生じるため、設備に安定化電源装置を備えた。

次に、細倉鉱山に於ける観測システム設置のために実施した工事を示す。

2) 観測システムの設置のための工事一覧表

	工事名	工事量
イ	立坑内ケーブル配線工事	ケーブル総延長 18芯 3312m, 6芯 1404m
ロ	観測室設置工事	1式
ハ	配電所工事	1式
ニ	地震計据付台の作成	8箇所

3) 地震計設置箇所

感天立坑、観測小屋および地震計設置箇所の位置を図3-1から図3-6に、また設置箇所模式図を図3-7に示す。地震計は測点1から測点8まで合計8箇所に設置し、その範囲は平面的には東西800m、南北500m、鉛直方向には地表から上1番坑、下3番坑、下7番坑、下10番坑の4坑道、深度350m間にわたっている。

地震波の平面アレイ観測網として、下10番坑にそれぞれ400m、600m、700mの各辺をもつ三角形を形成するよう測点を配置し、さらにこの平面上の3点と上位の坑道の測点によって三角錐状の観測網を形成している。

また、地下空洞周辺での地震波挙動を観測する為下3番坑に採掘跡空洞を挟んでそれぞれ測点3、測点4を配置している。

感天地区は過去、感天本鎌、東光鎌、大竹鎌、東三番鎌等の大型鉱脈を採掘しており採掘跡空洞が多数ある。現在これらの空洞は掘進ズリまたは選鉱スライム充填を行ってあるが、充填物の圧密度は岩盤に比較してはるかに低いため、これらの採掘跡切羽は地震波の伝搬に何らかの影響を及ぼすものと考えられる。

現在の細倉鉱山の採掘の主力は富士地区に移っており、観測地周辺には稼動中の切羽は少く発破飛石、浮石落下等観測装置、配線への支障はないものと考えられる。

地震計およびケーブルはその定期点検あるいは故障時の修理が容易かつ迅速に行えるよう、現在使用している坑道またはその近傍に設置してある。また地震計据付台の基礎コンクリート（50 cm×50 cm×50 cm）は列車の通行その他の操業に支障をきたさないような位置に設置してある。

3.2 設置工事

1) 立坑内ケーブル配線工事

今回設置した地震計は1箇所で水平方向2成分、鉛直方向1成分の3成分を測定するものが主である。地震情報の伝達には1成分につき信号用2芯、フィードバック機能用2芯、テストコイル用2芯合計6芯が必要であり、3成分観測用の地震計1台に対し18芯のケーブルが必要となる。

今回の工事に使用したケーブルは軟銅撲線（20本／0.18mm²）の複合ケーブルで耐静電気、磁気シールドを施してある。複合ケーブルの仕様を表3-1、構造図（断面図）を図3-8に示す。

坑外観測小屋から各測点へのケーブル配線のうち感天立坑を通るのは18芯複合ケーブル5本になる。このうち測点7、8への配線ケーブルは感天立坑下10番坑プラットまで18芯ケーブルを布設、下10番坑で6芯ケーブル2本に分岐しそれぞれの測点に連絡している。観測小屋・各測点間のケーブル配線を図3-12に示す。

感天立坑は人員、材料運搬に使用されており、複合ケーブルはこの立坑の人道枠を利用して布設した。複合ケーブルの重量は425g/mであり、立坑内の350m間を布設すると重量は150kg近くなる。このため複合ケーブルを2.6mm² I V線でねじ結びし2.0m～6.0m間隔で横枠（アンドン枠）に固定した。

また坑外部は、坑口・観測小屋間に2本の鉄製支柱を建て22mmSQメッシュジャーワイヤーを張り、7本の複合ケーブル線を50m間隔に1.6mm²銅ビニール線で東ねメッシュジャーワイヤーに固定した。上1番坑坑内水平部は、岩盤に打込んだフックにメッシュジャーワイヤーを張り同様に布設した。各測点のレベルでは既設の配線系統に沿って布設した。

複合ケーブルの立坑枠への固定方法および水平坑道での布設方法を図3-9に示す。

2) 観測小屋設置工事

観測小屋は上1番坑坑口から約60m離れた山腹に設置している。建屋は床面積18m²のプレハブ構造で、屋根は着色亜鉛鉄板瓦棒ぶき、床はコンクリート床である。

室内には観測装置用分電盤および室内照明を設ける外、観測装置を温度変化、湿気から保護するため壁・天井には石膏ボードを張り、内外壁間および天井にグラスウール保温材(50mm厚)を入れ、窓は2重ガラスにし冷暖房兼用空調機を設置している。

観測小屋設計図を図3-10に、また観測室内配線図を図3-11、冷暖房空調機仕様を表3-2に示す。

3) 配電所工事

観測小屋の電源は上1番坑坑口横の坑内スライム充填設備用配電盤から分岐している。観測装置の総使用電力は起動ピーク時が最大で約2kW、待機時約750Wである。昨年の予備調査で各種装置の起動、停止に連動した電圧変動が生じるため、安定化電源装置(AVR+絶縁トランス)を組み入れている。

4) 地震計据付台の作成

地震計据付台は縦、横、高さそれぞれ50cmのコンクリート製で地震計を固定するために上面に3本のボルトを埋め込んだものである。

地震計設置箇所は上1番坑旧巻上機室、下3番坑旧ポンプ室、および各坑道床面である。これらの工事箇所のうち旧ポンプ室はポンプ据付台座コンクリートが岩盤と密着しており、その上に直接据付台を設けることができた。床コンクリートと岩盤が密着していなかった旧巻上機室と、岩盤をズリが覆っている坑道床面は約1m四方の範囲で床コンクリートあるいは坑道床面のズリを掘り下げて地山岩盤を露出させた後、岩盤上に型枠を組み据付用基礎コンクリートを打設した。

基礎コンクリートは地震計に一定の方向性(N向き)を持たせるため、その取り付け用ボルトの配置を考慮してある。

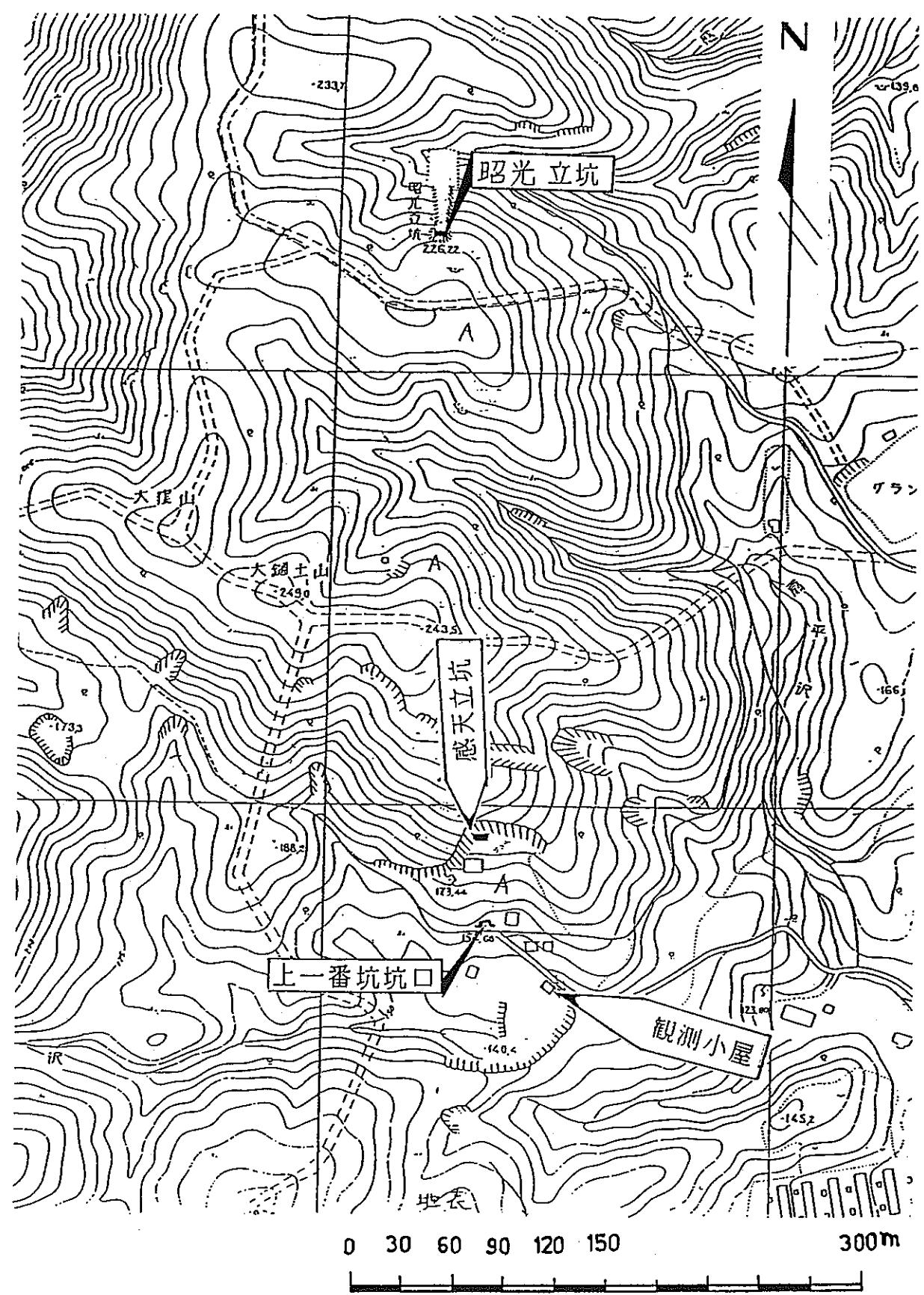


図3-1 細倉鉱山地表図

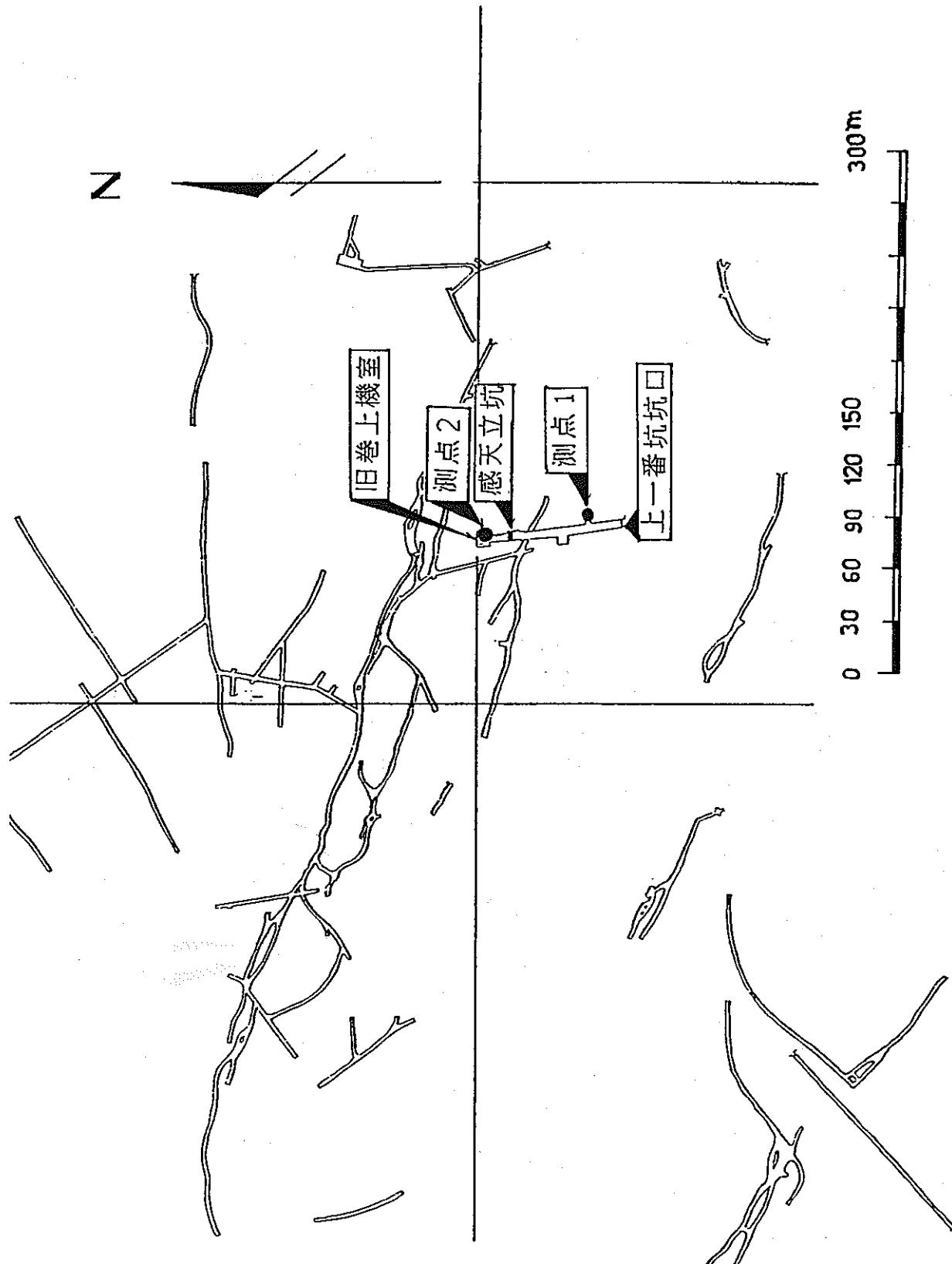


図3-2 上一番坑坑道図

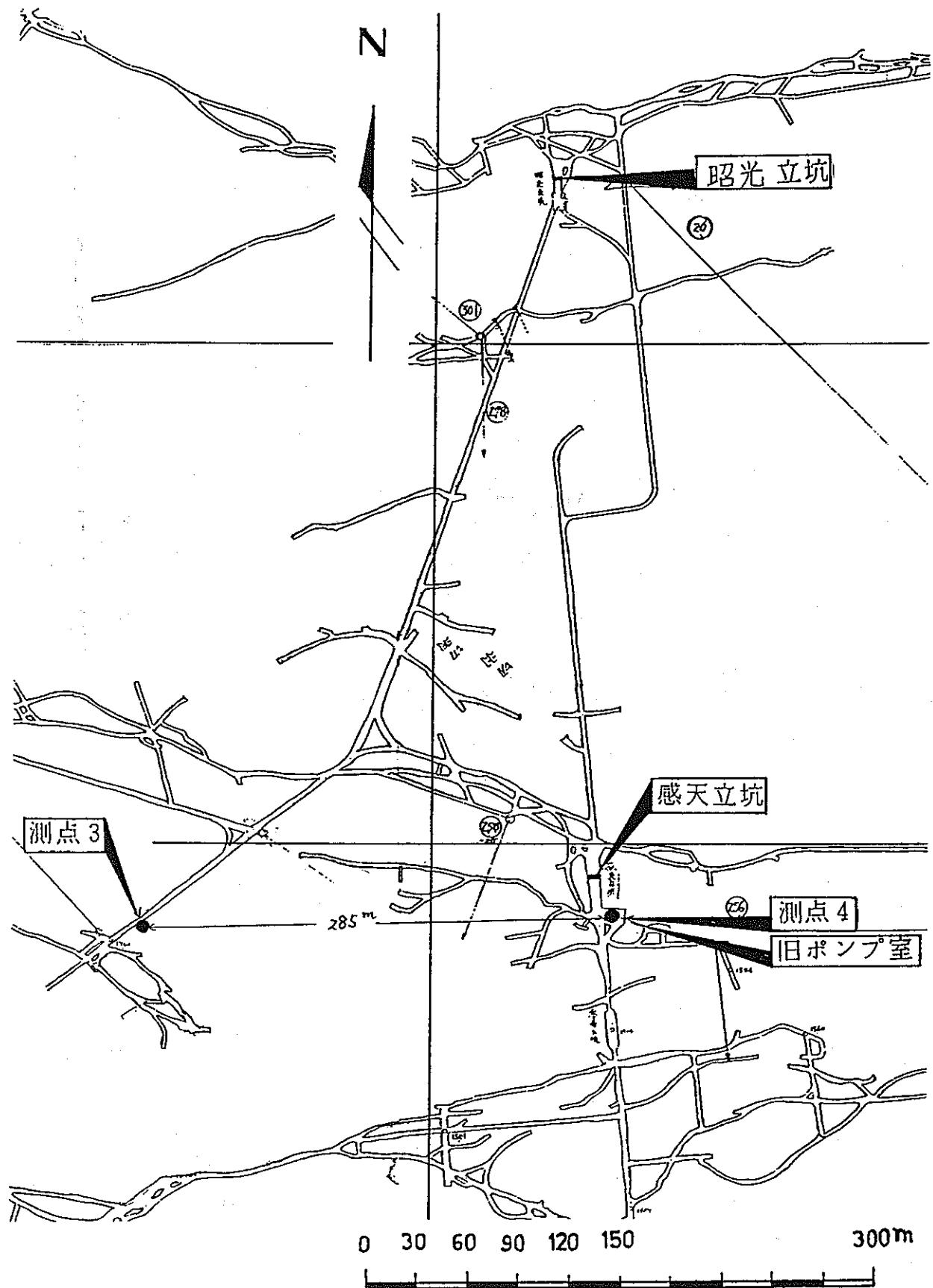


図3-3 下3番坑坑道図

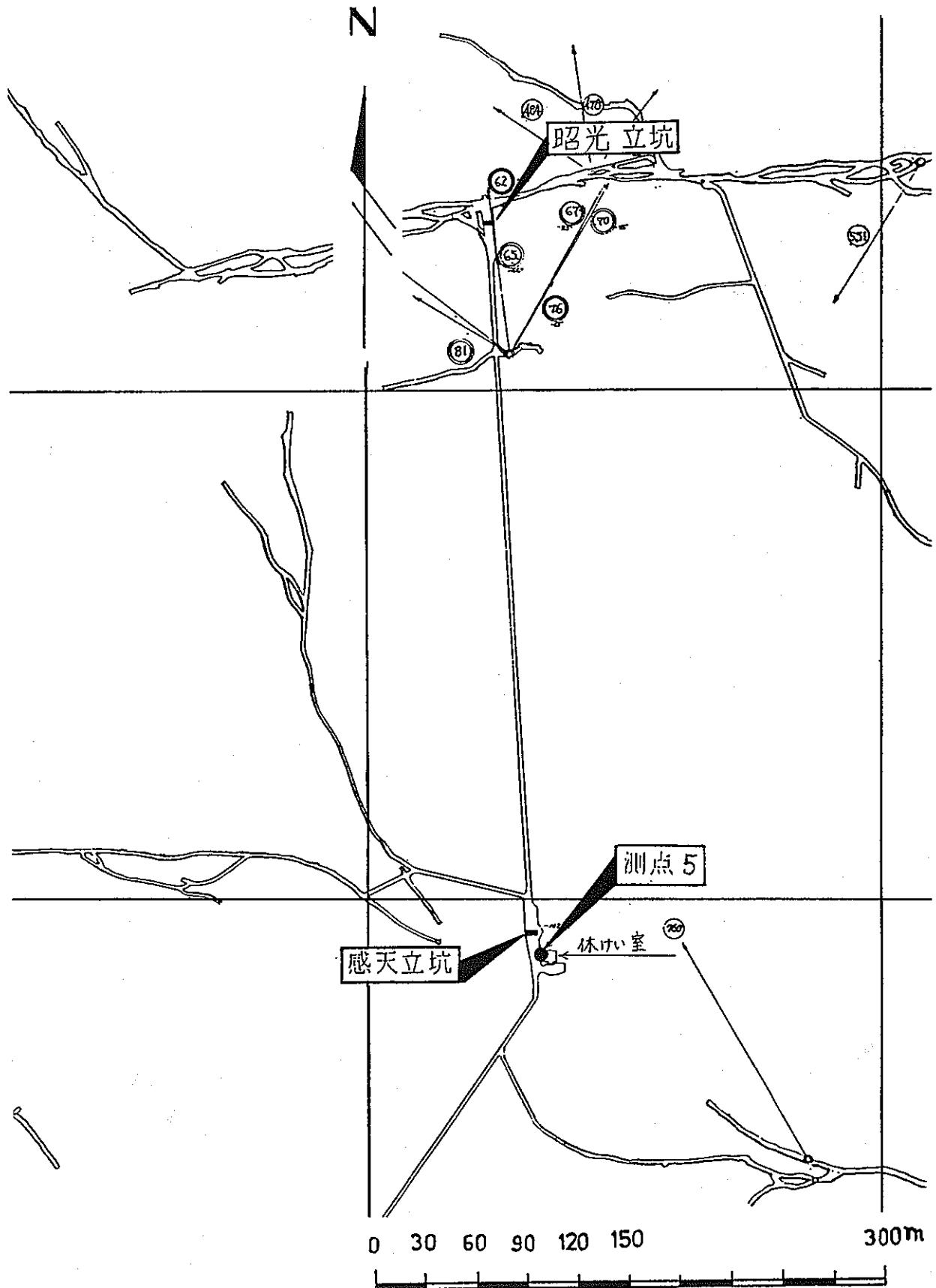


図3-4 下7番坑坑道図

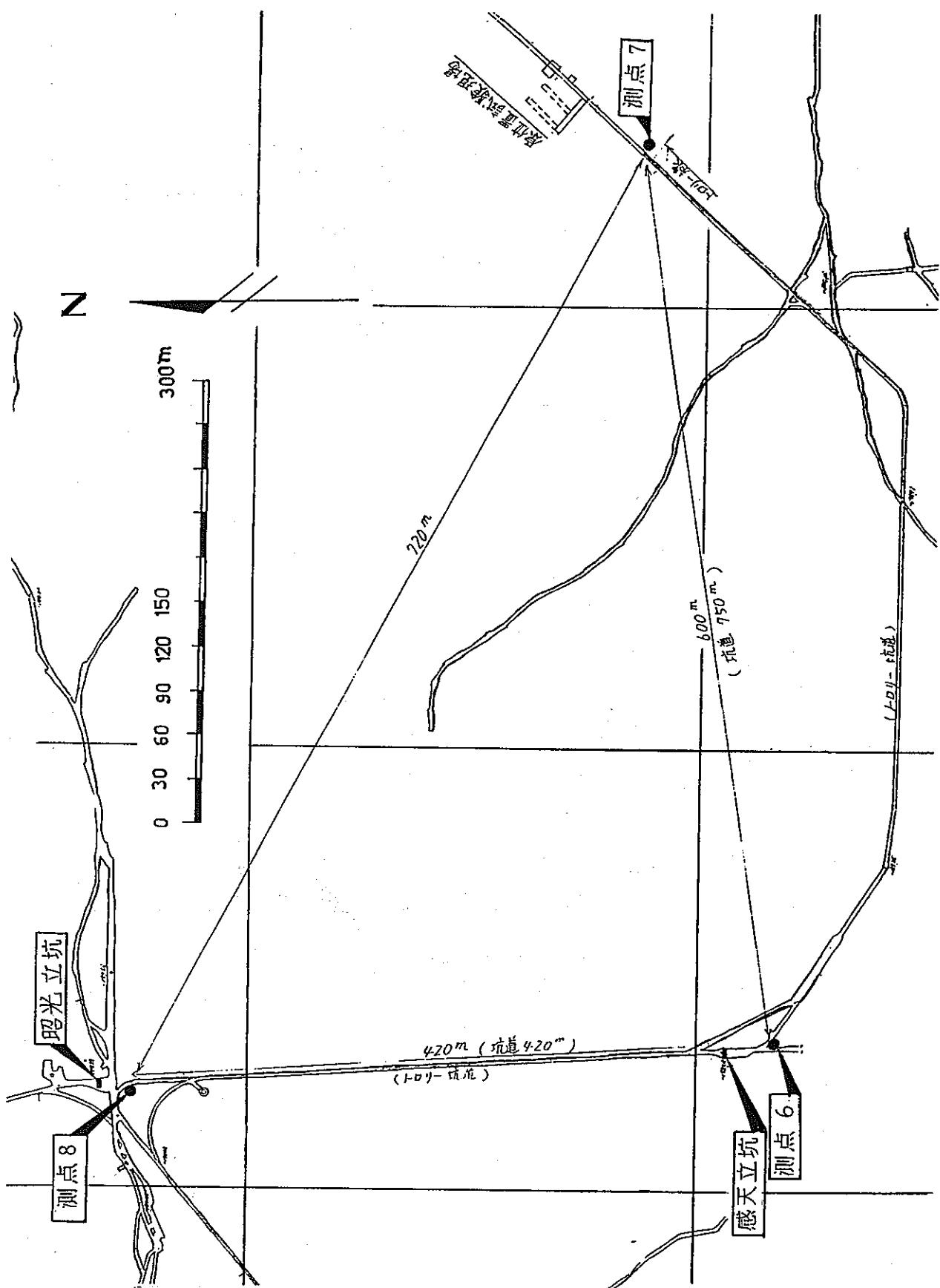
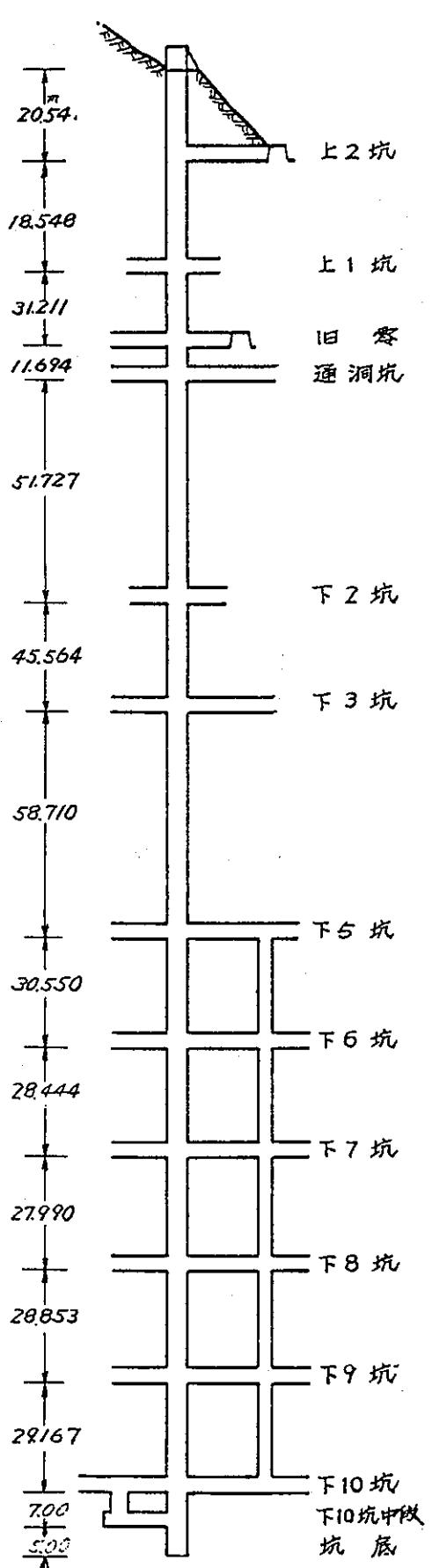


図 3-5 下 10 番 坑 坑 道 図



海抜標高	測量高	立坑杆地並
		194.40
		173.860
		155.312
		124.101
		112.407
(1) C	64.126	60.680
(1) C	18.410	15.116
I	-40.486	-43.594
C	-71.214	-74.144
C	-100.474	-102.588
C	-128.126	-130.578
C	-157.345	-159.431
C	-186.137	-188.598
		-195.598
		-205.598

図3-6 感天立坑深度図

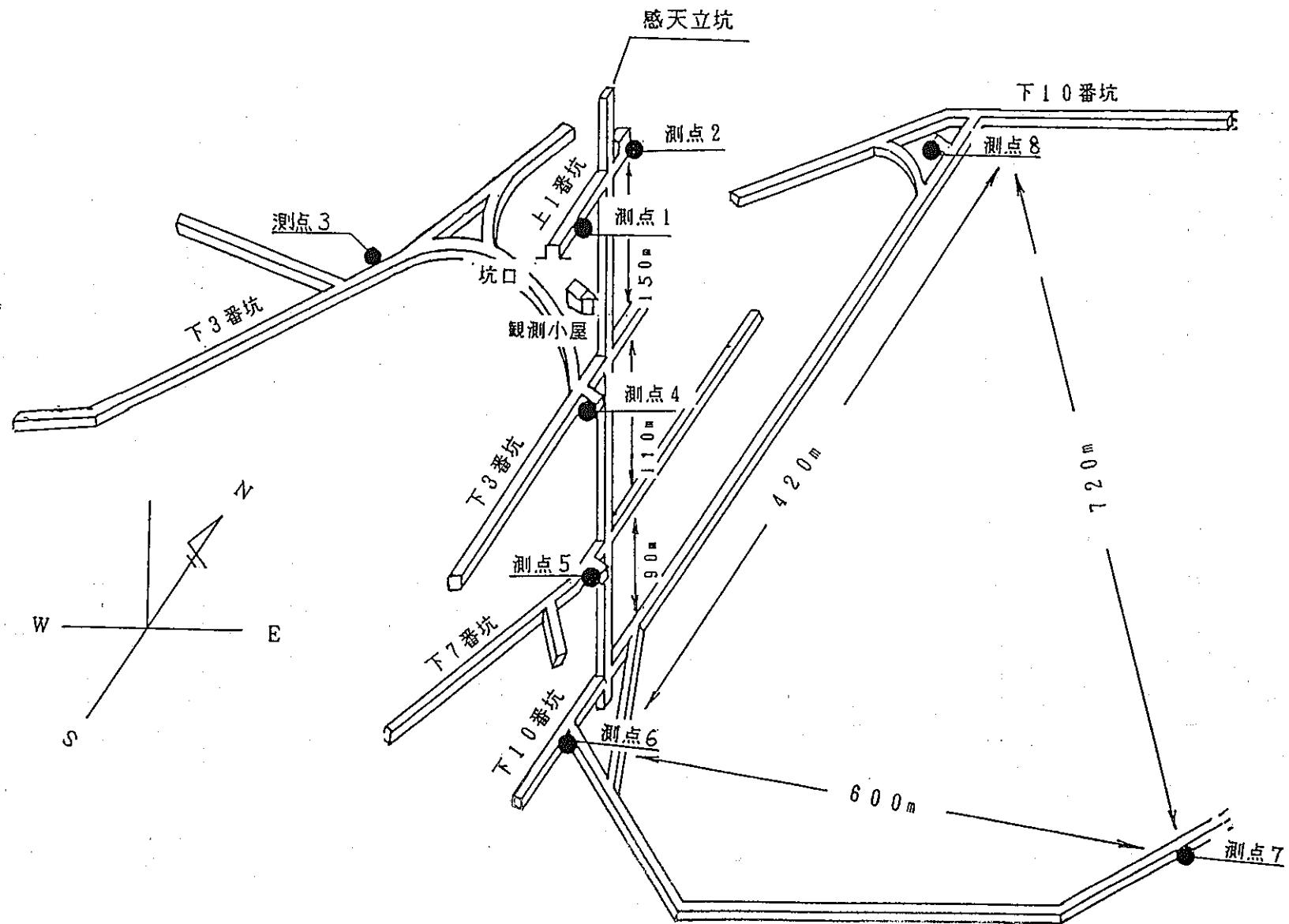
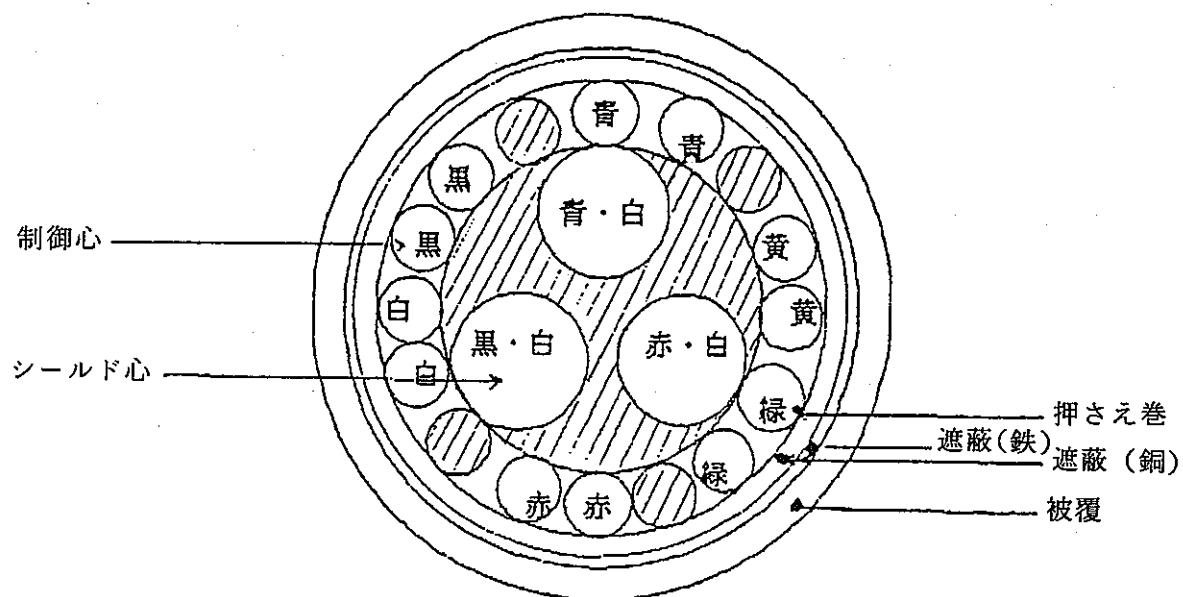


図3-7 地震計設置箇所模式図（細倉鉱山鉱内）

表 3 - 1 様複合ケーブル仕様

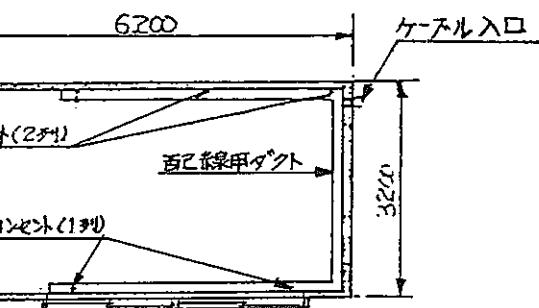
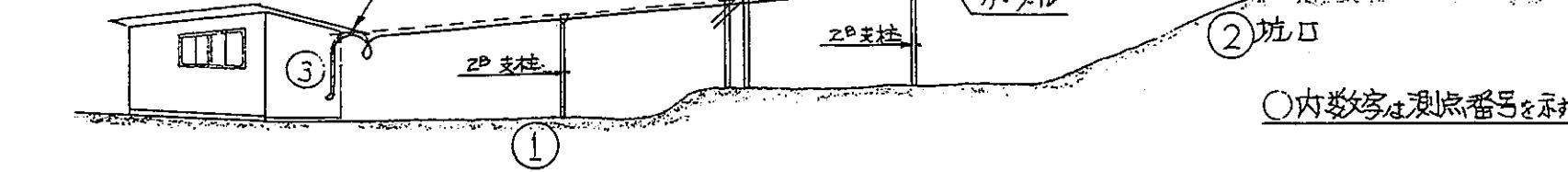
項目		仕様	
		シールド心 (3対)	制御心 (12心)
導体	材質・構成 (本/mm)	軟銅撚線 20/0.18	
	外径 (mm)	0.95	
絶縁体	材質	ポリエチレン	
	色別	配列図参照	
	標準厚 (mm)	0.4	
対撚		絶縁済 2心を撚合せる	
(各対) 押え巻		プラスチックテープ重ね巻	
(各対) シールド		スズメッキ軟銅線編組	
集合撚 (1)		シールド心3対を撚合せる	
押え巻		プラスチックテープ重ね巻	
集合撚 (2)		シールド3対の上に制御心12心を撚合せる	
押え巻		プラスチックテープ重ね巻	
遮蔽		銅テープ重ね巻	
遮蔽		2枚鉄テープ間隙巻	
押え巻		プラスチックテープ重ね巻	
被覆	材質・色別	ポリエチレン (黒)	
	標準厚 (mm)	2.1	
仕上外径 (mm)		18.8 ± 0.5	
概算重量 (kg/km)		425	

項目	規格
導体抵抗 (Ω/km)	37.8以下
絶縁抵抗 ($KM\Omega \cdot km$)	10以上
絶縁耐圧 AC (V・分)	1000

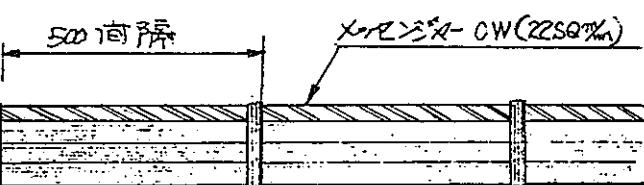


※円内の色は、絶縁体色を示す。
斜線部は、介在を示す。

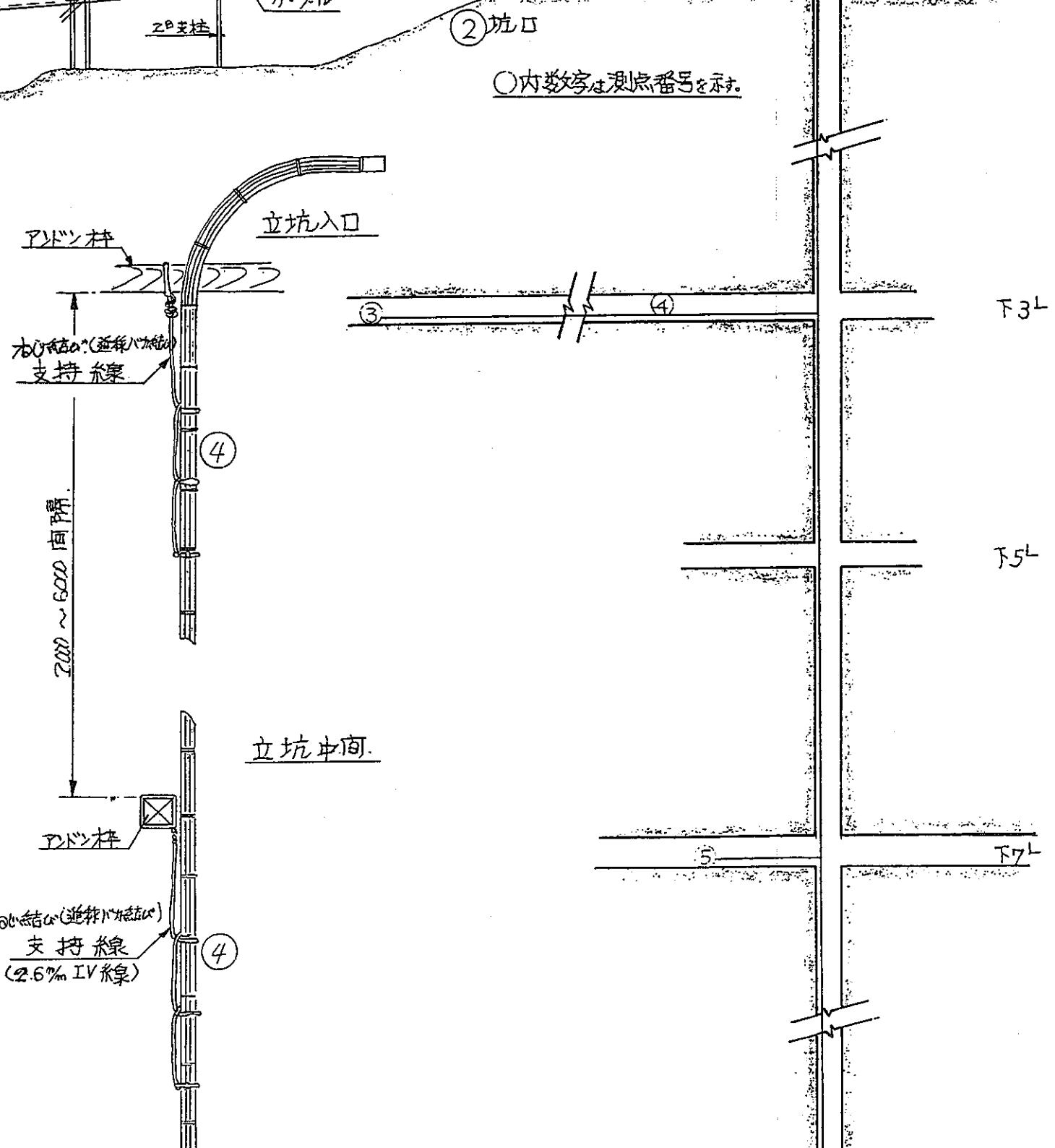
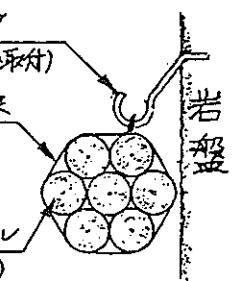
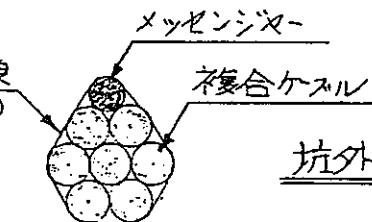
図3-8 複合ケーブル構造(断面)図

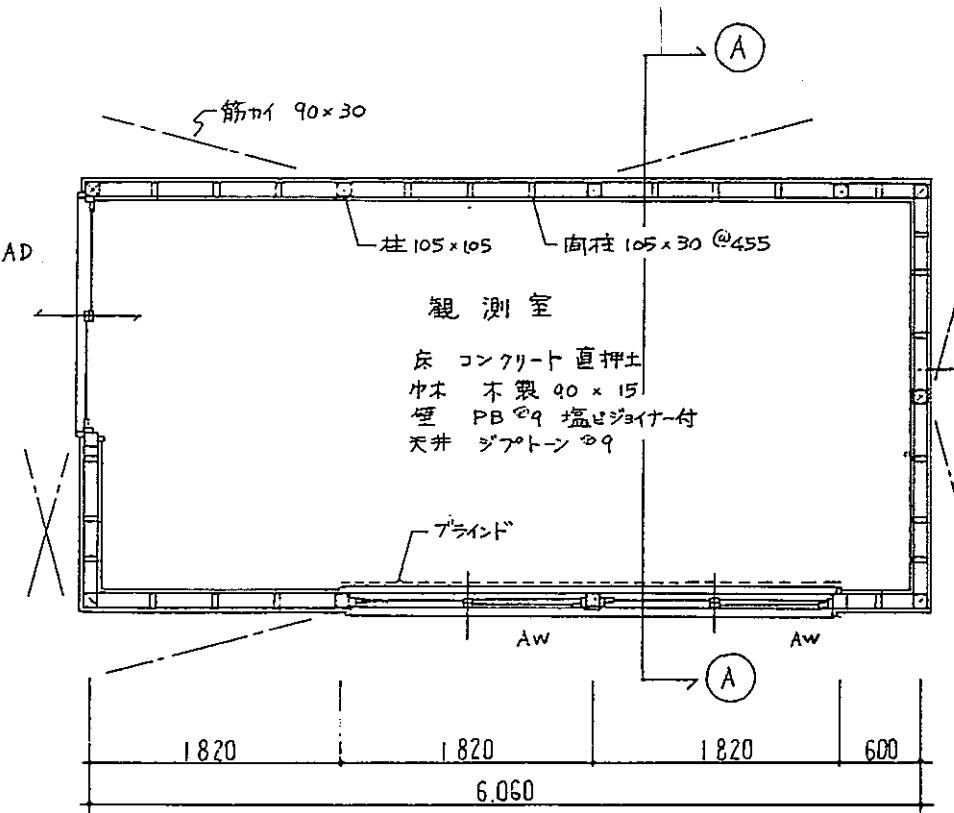


計器室 平面

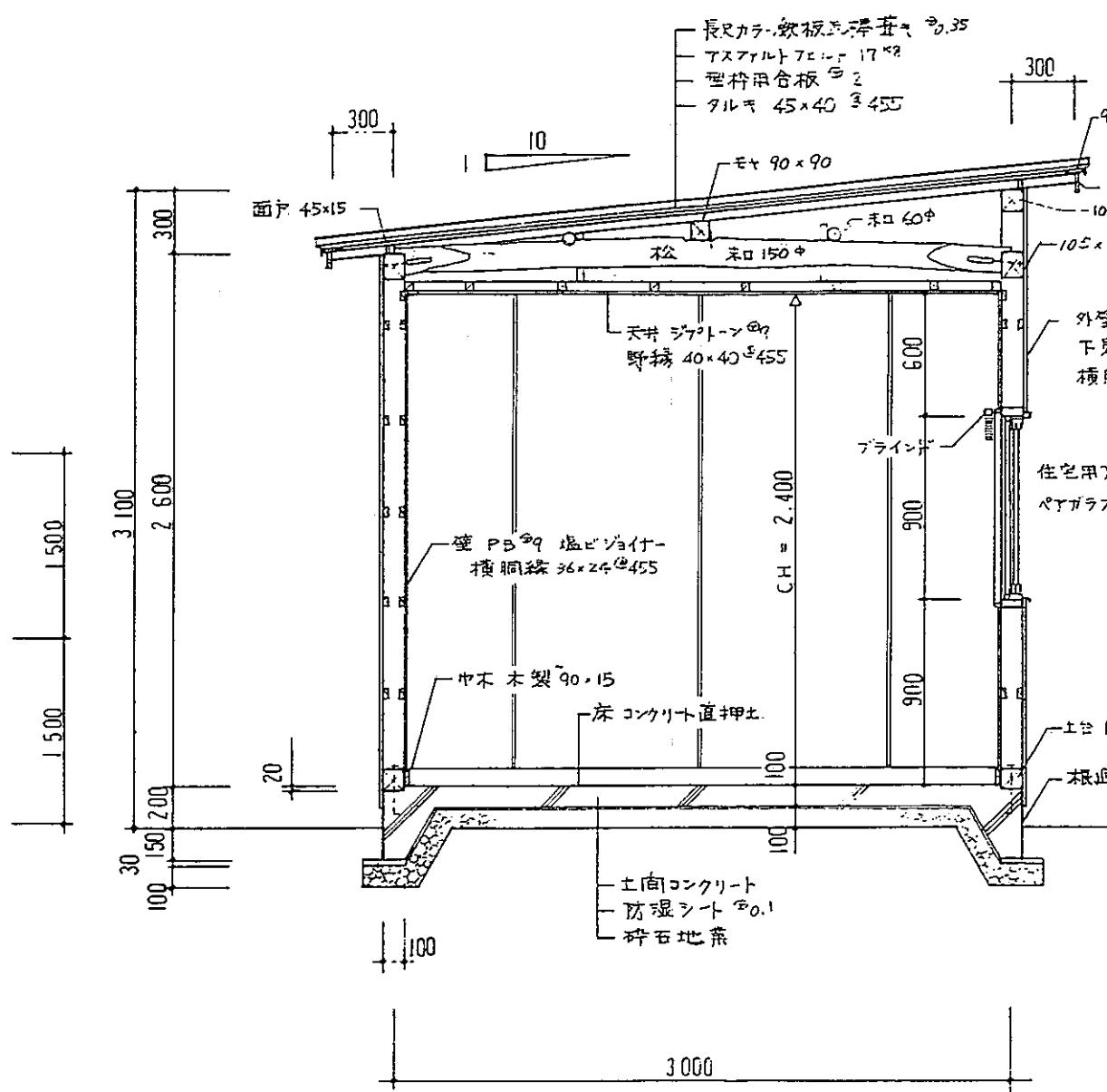


1.6% ニール鋼ハンド線
結束線
複合ケーブル



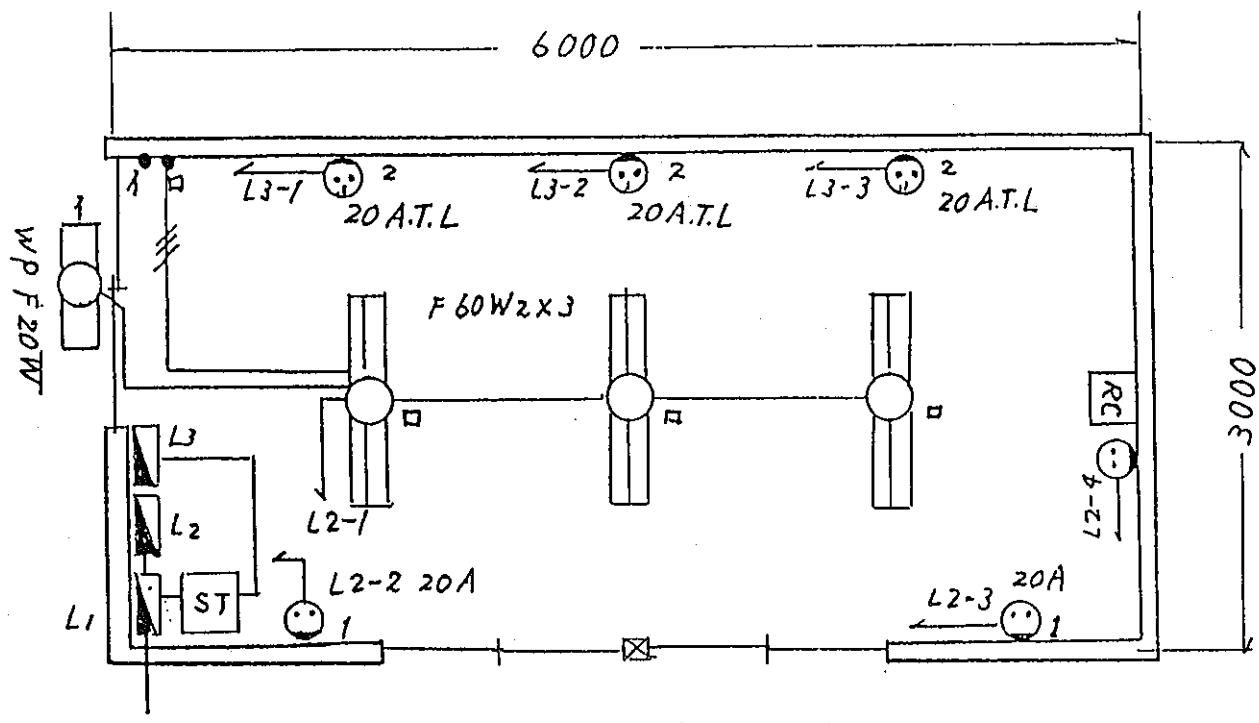


平面图



(A) 部分断面詳細図

図 3-10 観測小屋設計図



縮 尺 1/50

F 20 W	直付型防水20W
F 60W 2	逆富士型 2灯用60W 2
R. C	1 φ 100 V 1500 kcal
20A.T.C	20A用ツイストロックコンセント
S T	スタビライザ 100V-100V

図3-11 観測室内配線図

表3-2 冷暖房空調機仕様

仕 様		
型 式		
能 力	冷 房 時	2,240 kcal/Hr
	暖 房 時	3,400 kcal/Hr
電 源		单相交流 100 V

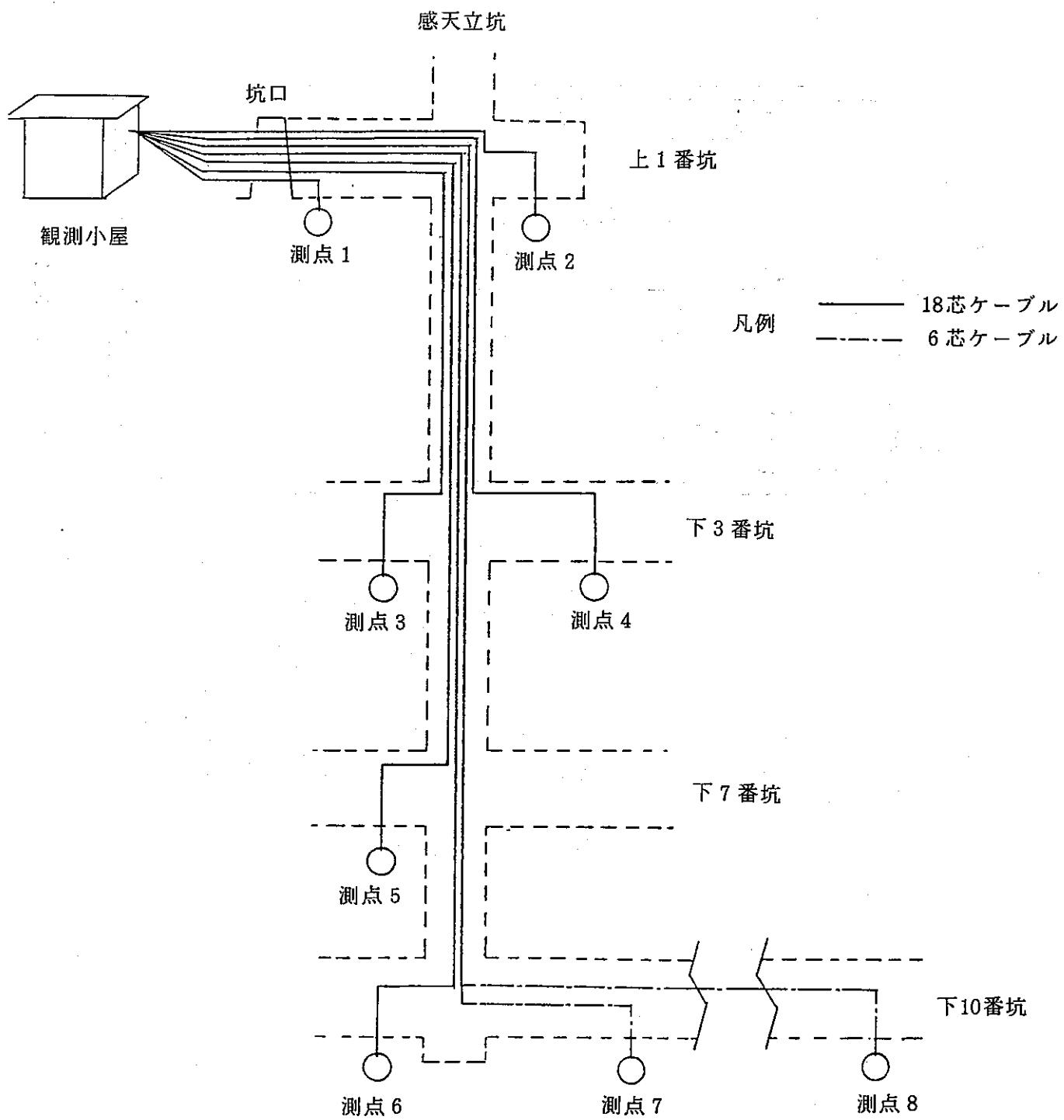


図 3-12 ケーブル配線図

4. 地震観測システム

4.1 装置の概要

本装置は検出器、制御装置、記録装置等から構成されていて、任意に設定されたスタートレベル以上の地震動を検出した時、その信号をケーブルで計測装置へ搬送する。

搬送された信号は、増幅器、A/D変換器、遅延メモリ、CPUを経てデジタルデータレコーダに地震のデジタル波形を一定時間収録し地震終了後自動停止して、波形記録の終了時に当該地震の地震動の最大振幅値を印字部でプリントアウトする。

また、本装置は校正部により、装置全体を校正、監視して常に正常動作状態であることを確認する機能を有している。

4.2 装置の構成

装置の構成を図4-1に示す地震観測装置ブロック図に示し、装置各部の数量を以下に示す。

1) 検出器

- | | |
|-------------------|----|
| 1. 加速度検出器（3成分）地上用 | 6台 |
| 2. 加速度検出器（1成分）地上用 | 2台 |

2) 地震計測装置（AJE-8000B）

サーボ増幅器 21台

直流電源装置 1台

地震波収録装置 1台

収録・処理・遅延装置

刻時信号発生器

デジタルデータレコーダ

アンシューター 1台

起動・停止・校正装置

最大値プリンタ・表示器

可視記録計（8K13-LM） 1台

プリンタ 1台

筐体 2台

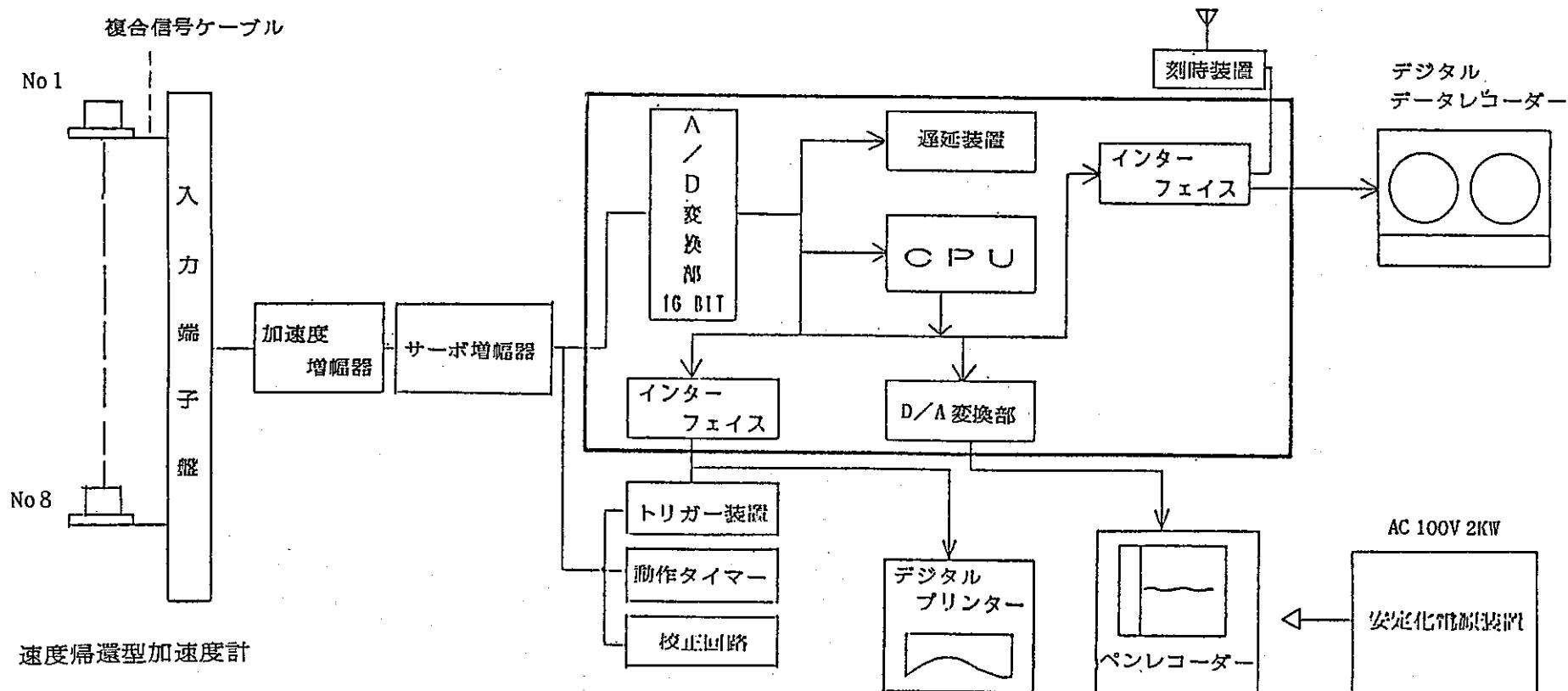


図 4-1 地震観測装置ブロック図

4.3 装置の仕様

主なる装置の総合仕様および各部仕様はつぎのとおりである。

1) 総合仕様

a) 測定成分	加速度3成分(水平, 上下) 1成分(上下)
b) 測定方式	速度帰還形加速度計 (検定コイル付)
c) 加速度測定範囲	±1000 Gal
d) 周波数範囲	加速度計 0.05～30 Hz ±10% 35 Hz で -15% ±5% の範囲で保証
e) A/D 変換	16 bit
f) サンプリング周波数	100 Hz 又は 200 Hz
g) 総合ダイナミックレンジ	絶対ダイナミックレンジ 86 dB以上
h) 水晶時計	年, 月, 日, 時, 分, 秒 自動校正により常時誤差 0.01 秒以下
i) 起動回路	レベル判定 任意設定 3 ch - or 又は and
j) 記録計動作時間	0.1～9.9 分 (0.1 分 STEP) 精度 設定値の ±10%
k) 校正信号発生器	検出器を含めた総合校正 地震終了後又は定時 1 回 / 1 日
l) 信号遅延時間	10.24 秒 (サンプリング 100 Hz の時) 5.12 秒 (サンプリング 200 Hz の時)
m) 記録部	デジタルデータレコーダ オーブンリール型磁気テープ記憶装置
n) 可視記録計	8 ch 毎同時にモニタ可能
o) 環境条件	500Gal (水平, 上下とも) 振動下においても全システムが正常に動作 温度 0～40°C 湿度 30～90%
p) 最大値プリンタ	エアコンによりバックアップ 地震発生時刻及び全CHの最大加速度値の印字 停電, 復電時刻の印字

4 柄印字 (***, *Gal)

精度 ± 5 % 又は ± 1 Gal

2) 各部仕様

a) 加速度検出器（検定コイル付）

測 定 範 囲	± 1000 Gal (水平, 上下)
感 度	3 V/G ± 3 %
分 解 能	5 × 10 ⁻⁶ G
周 波 数 範 囲	0.05 ~ 35 Hz
検定コイル電流感度	約 30 mA/G
耐 水 圧	25気圧以内
耐 衝 撃 性	50 G (10 mSec パルス)

検出器外観を図 4 - 2 に示す。

b) 地震計測装置

b) - 1. 加速度増幅器

測 定 範 囲	± 1000 Gal (水平, 上下)
周 波 数 範 囲	0.05 ~ 35 Hz
ハイカットフィルター	F ₀ = 50 Hz - 12 dB/oct

b) - 2. 地震波集録装置

(i) A/D 変換及び遅延装置

記 録 方 式	デジタル方式
分 解 能	16 ビット
サンプリング周波数	100 Hz / 200 Hz
サンプリング方式	全チャンネル同時サンプリング
遅 延 時 間	10.24 秒 (100 Hz 時)
ダイナミックレンジ	86 dB 以上

(ii) 刻時信号発生部

常 時 誤 差	0.01 秒以下
自動修正時刻	NHK の時報による (FM 又は AM)
校正可能範囲	± 20 秒以内
表 示	年, 月, 日, 時, 分, 秒

(iii) 起動回路

レ ベ ル 判 定	3 ch - or 又は and
-----------	------------------

レ ベ ル 設 定 $100\% = 1 \text{ V}$ 又は $0.1, 0.3, 1, 3, 10, 30 \text{ Gal}$ の各レンジで
フルスケール
100 %任意可変

(IV) 自動校正信号発生器

検出器を含めた総合校正 5 Hz 又は 15 Hz の正弦波

(V) 記録時間設定器

スタートレベル以下より $0.1 \sim 9.9$ 分 (0.1 分 STEP) 設定可能

(VI) 記録計部

デジタルデーターレコーダ (オープンリールMT)

記 録 方 式 デジタル方式

記 録 チャンネル 64 ch. max

記 録 密 度 1600 BPI

テープスピード 45 IPS

収 録 時 間 約2時間 (入力16ch, 100Hzサンプリング時)

再 生 起 録 8 ch

磁気テープの変形防止のため待機時に定期一定量の自動テープ送り操作を行う。

(VII) 可視記録計 (熱ペン式)

モニタ用 D/A 変換により 8 ch 同時にアナログモニタが可能

記録チャンネル 8 ch

(VIII) 最大値プリンタ

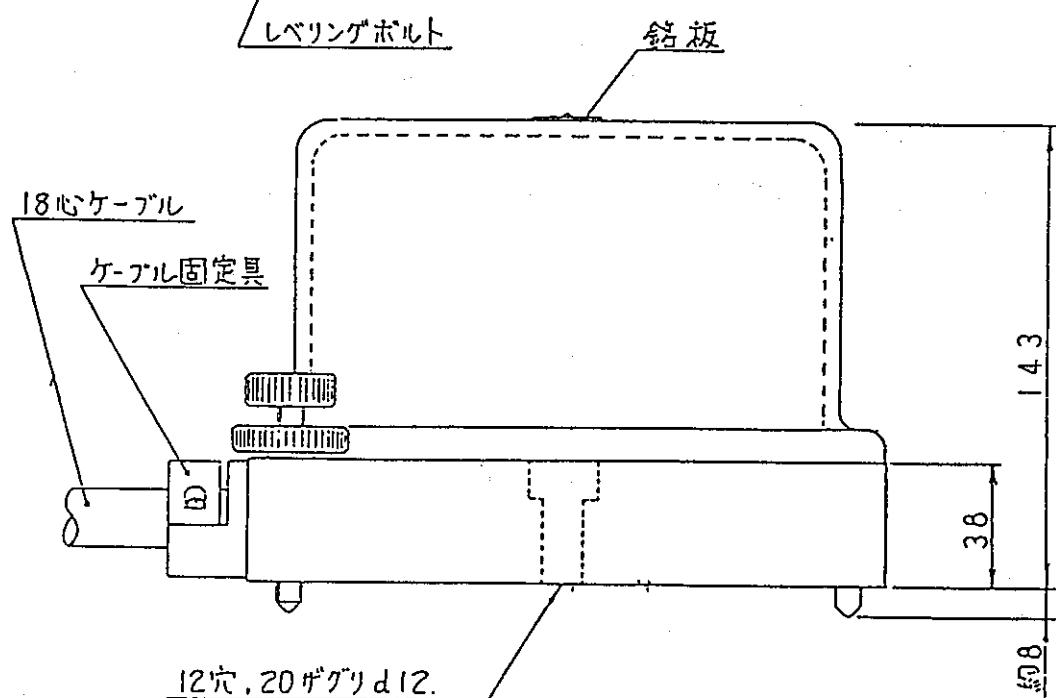
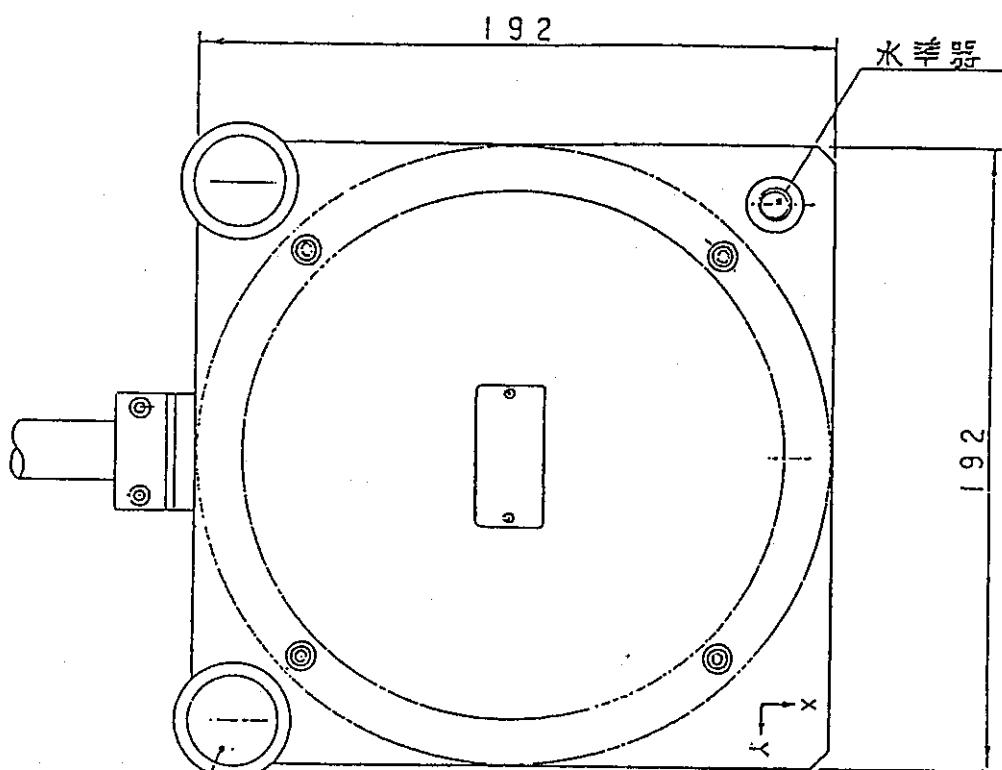
地震発生時刻, 全CHの最大加速値及び停電, 復電時刻の印字

最 大 値 印 字 入力全成分

プリンタ有効数字 4桁 ***.* Gal

(IX) 筐 体

地震波集録装置 約 1130 (W) × 680 (D) × 1650 (H)



材質 アルミ
重量 5.4 kg

図4-2 速度帰還型加速度検出器

4.4 筐体外観およびパネル図

筐体外観を図4-3に示し、各部のパネル図を示した。各部パネル図と図面番号を以下に示す。

- A／D制御部（前面パネル） 図4-4
- A／D制御部（背面パネル） 図4-5
- A／D変換部（前面、背面パネル） 図4-6
- 印字部（前面、背面パネル） 図4-7
- サーボ増幅器部（前面、背面パネル） 図4-8
- 較正部（前面、背面パネル） 図4-9
- 直流電源装置部（前面、背面パネル） 図4-10
- 磁気テープ記録装置部（前面） 図4-11

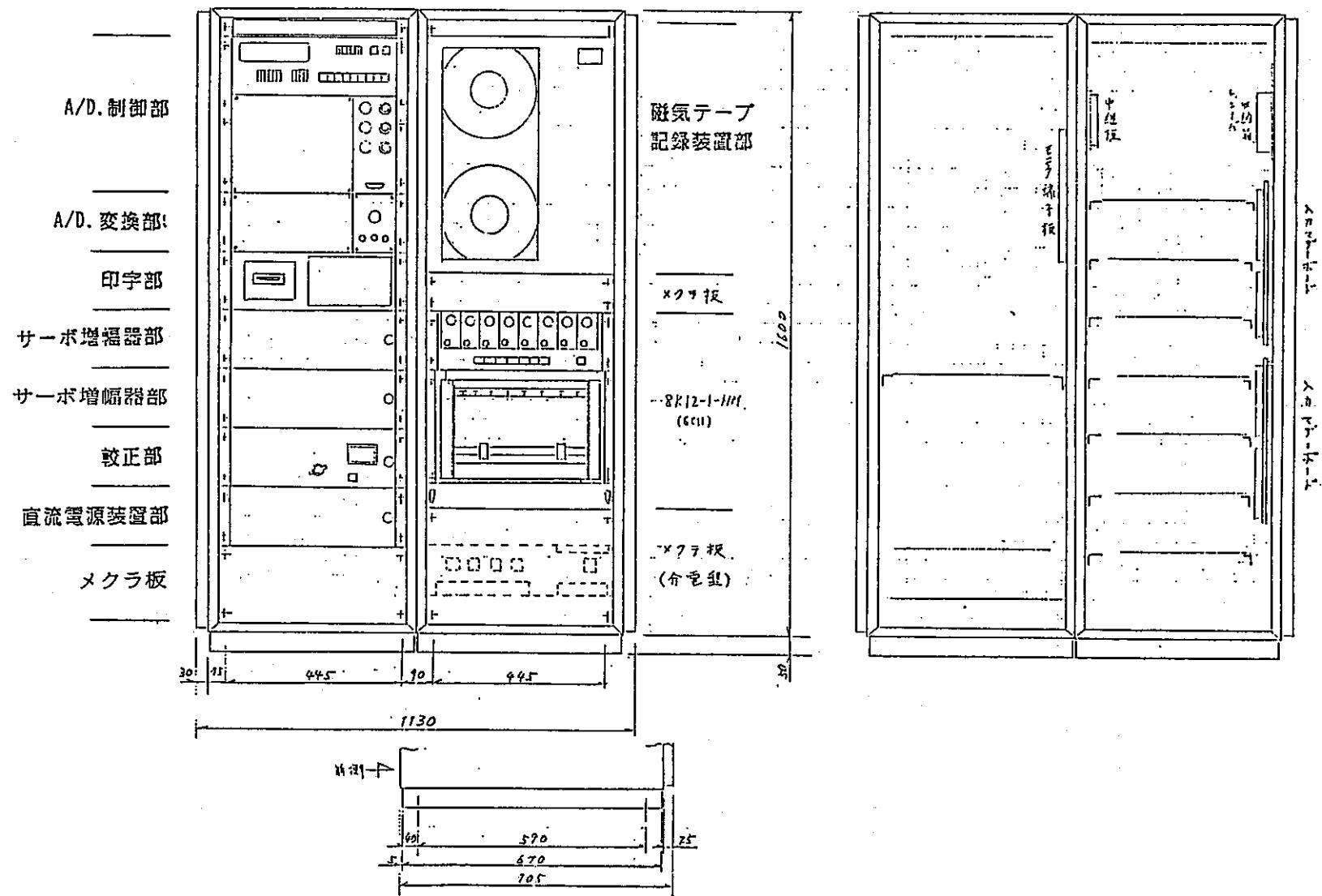


図4-3 構体外観図

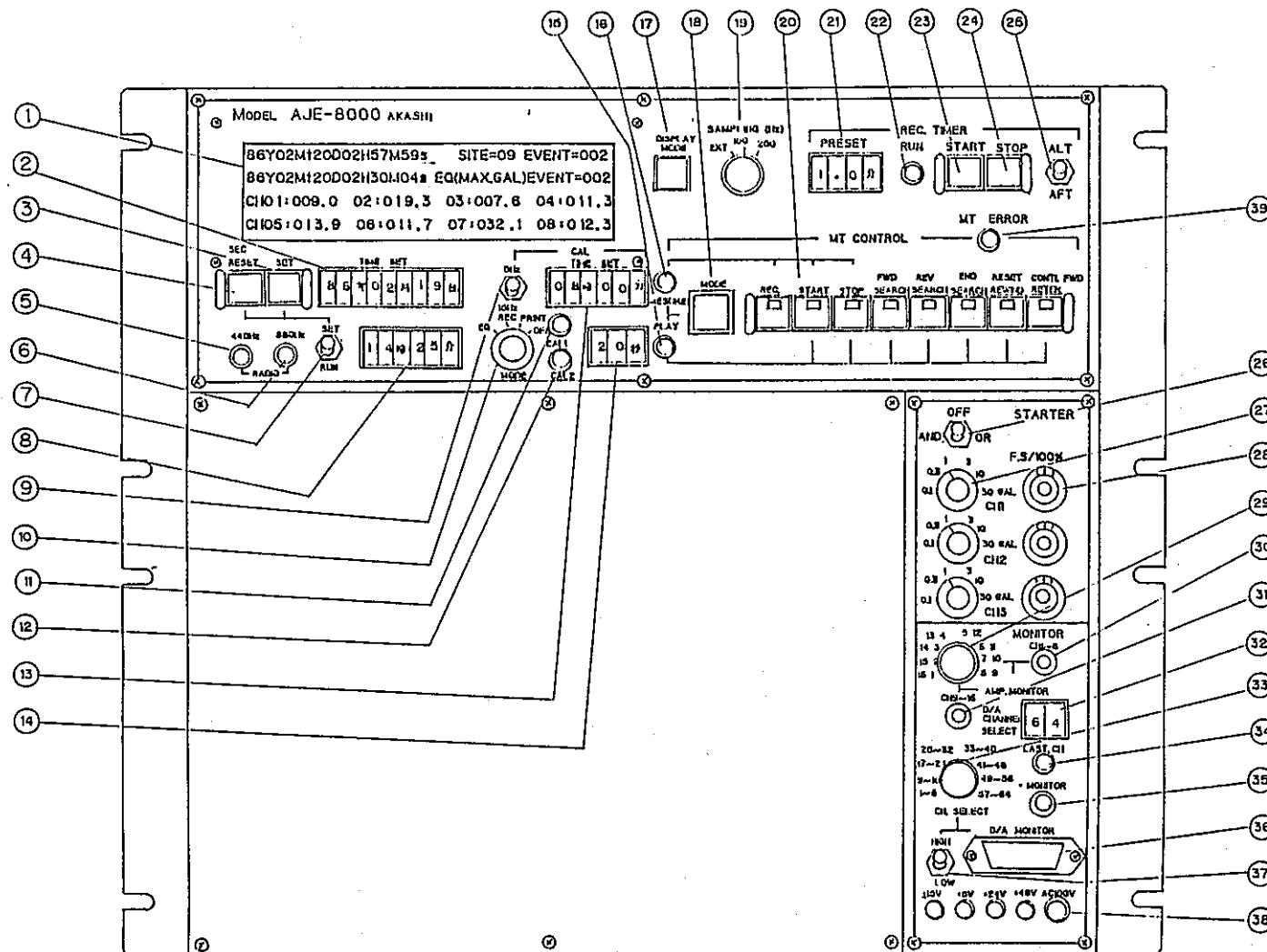


図 4-4 A/D 制御部（前面パネル図）

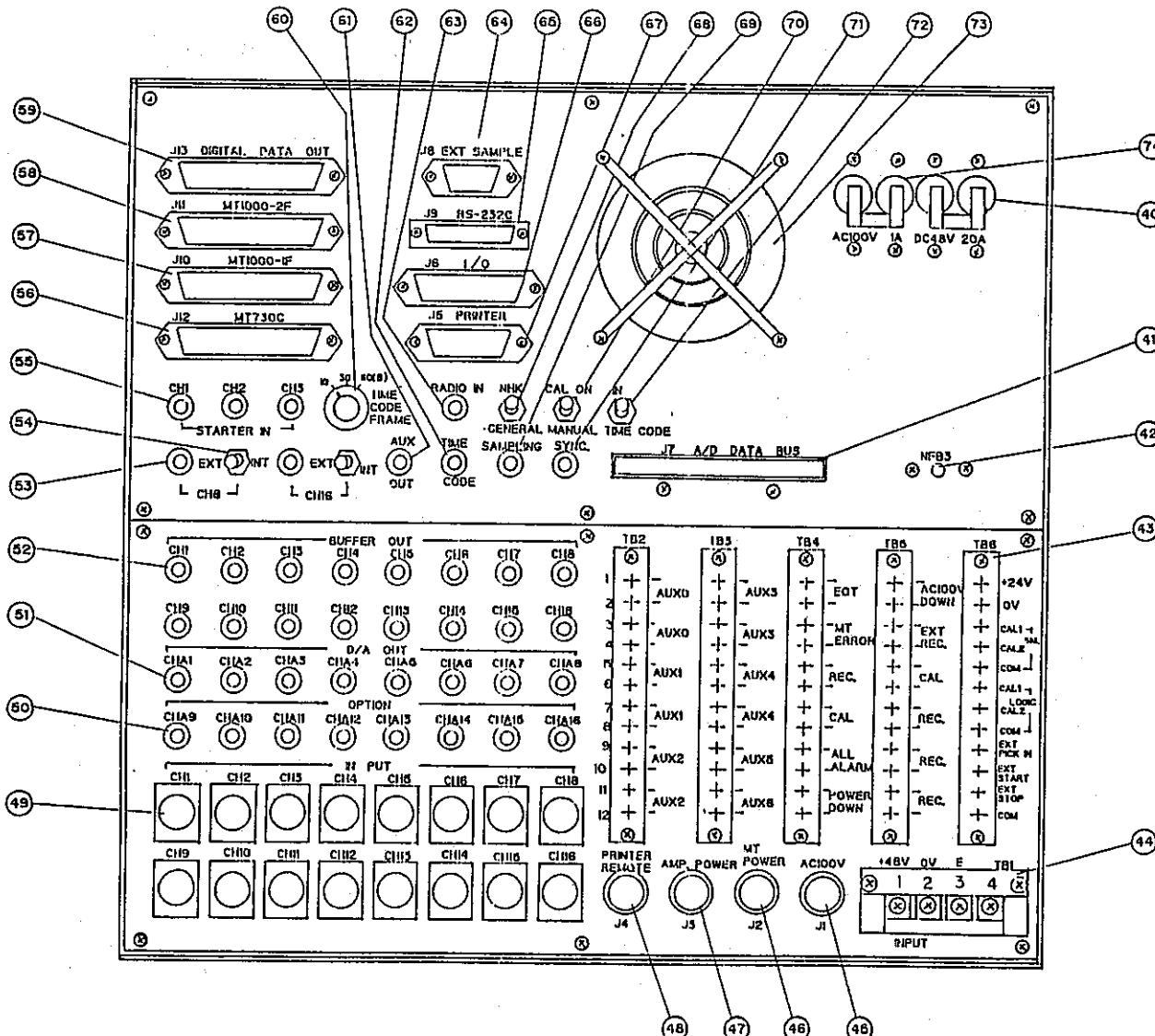
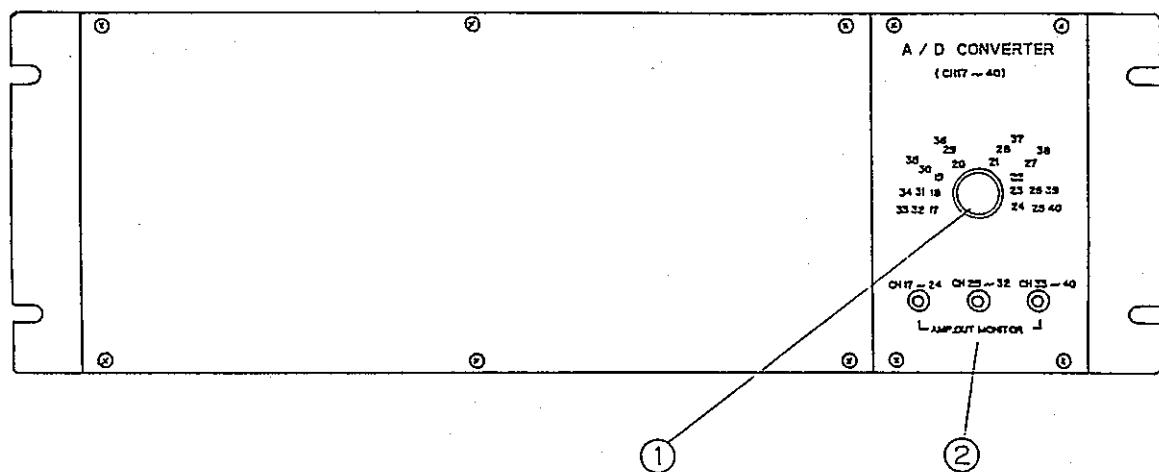


図 4-5 A / D 制御部 (背面パネル図)

前面パネル図



背面パネル図

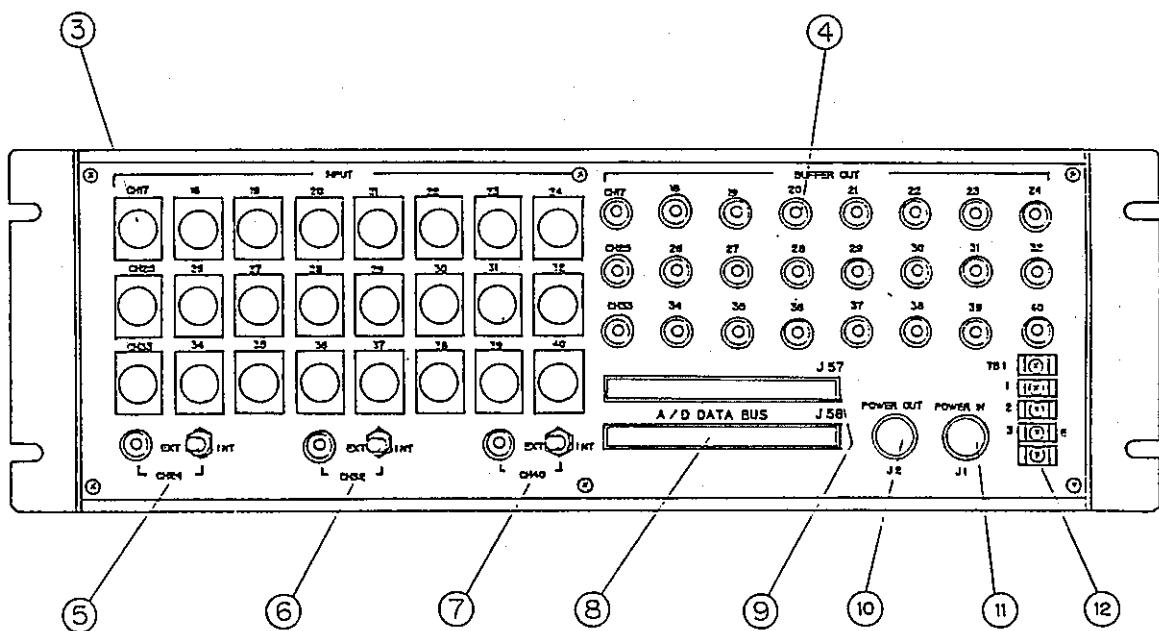
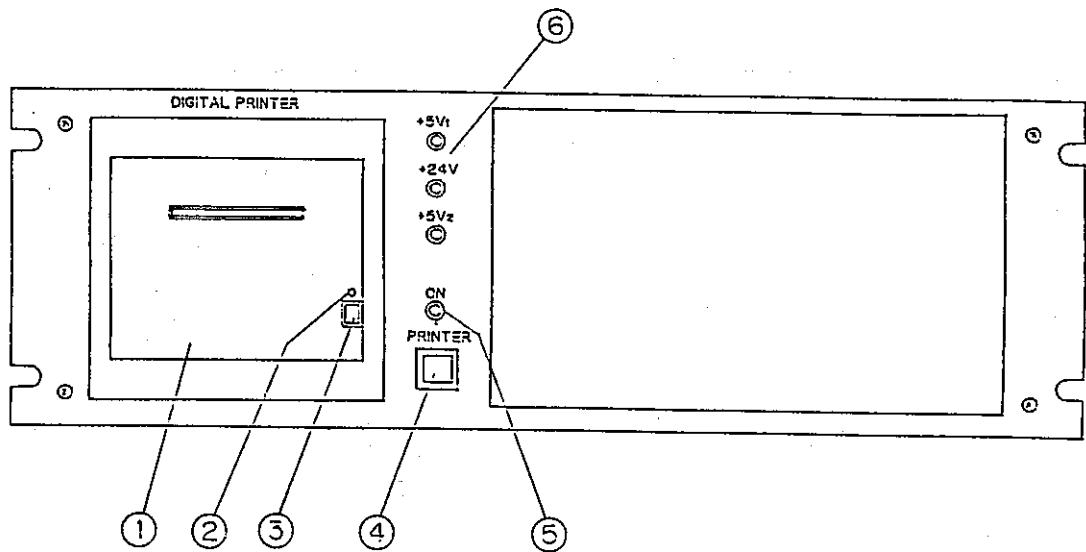


図 4 - 6 A / D (ANALOG TO DIGITAL) 変換部

前面パネル図



背面パネル図

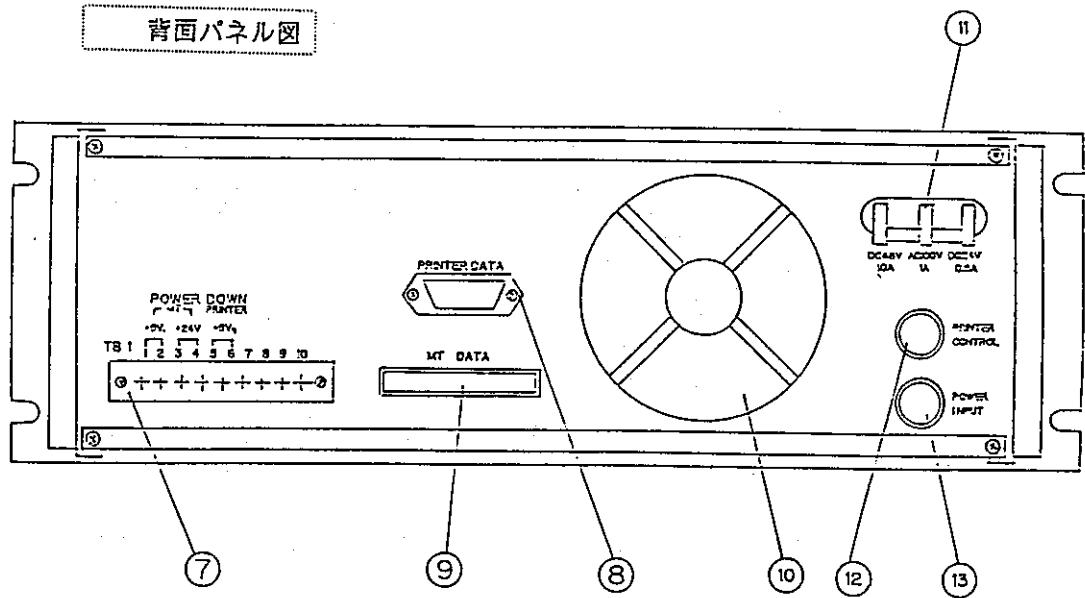
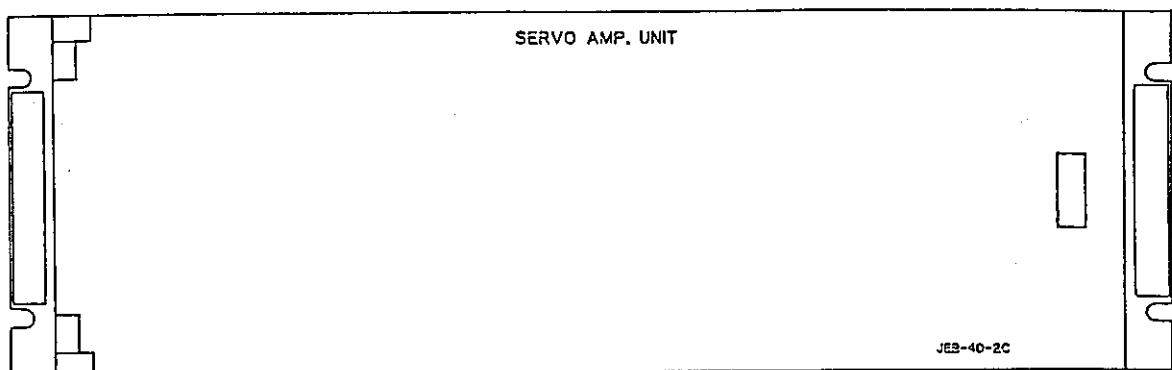
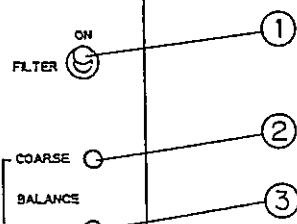


図 4 - 7 印字部

前面パネル図



SERVO AMPLIFIER



背面パネル図

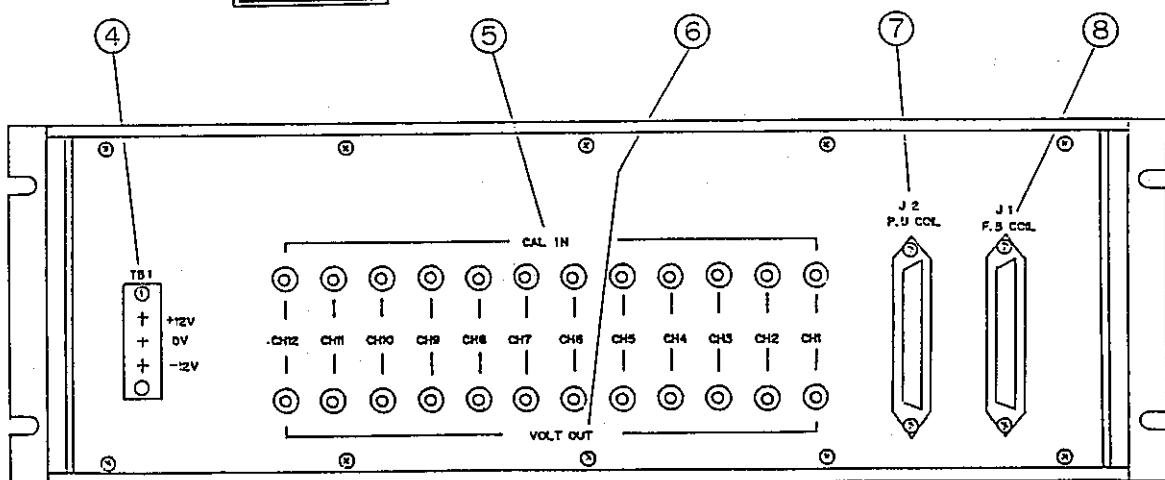
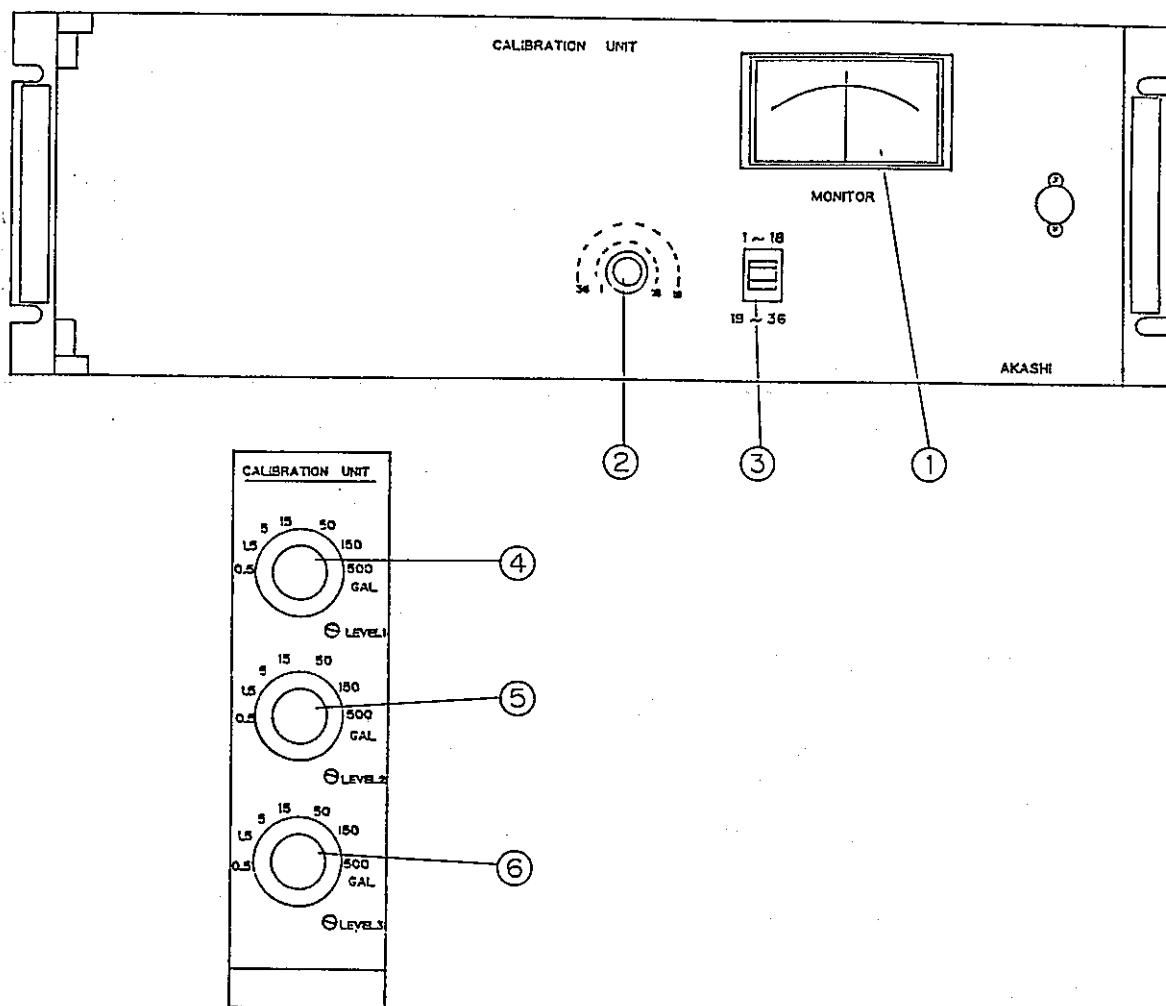


図 4 - 8 サ 一 ボ 增 幅 器 部

前面パネル図



背面パネル図

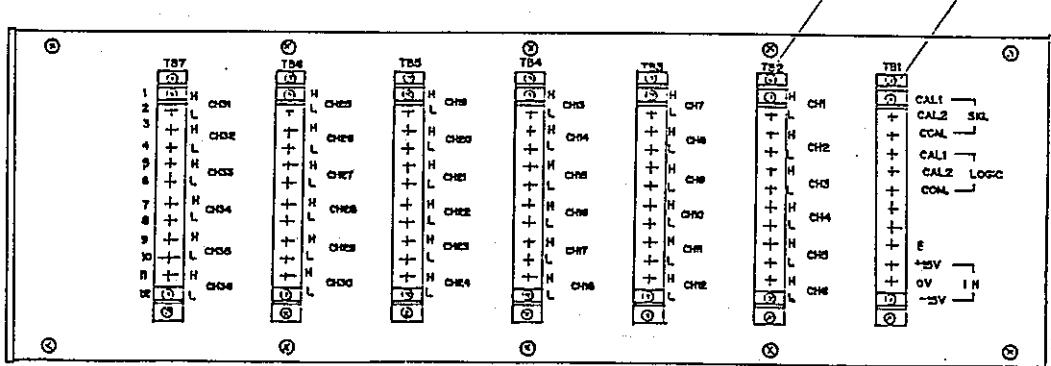
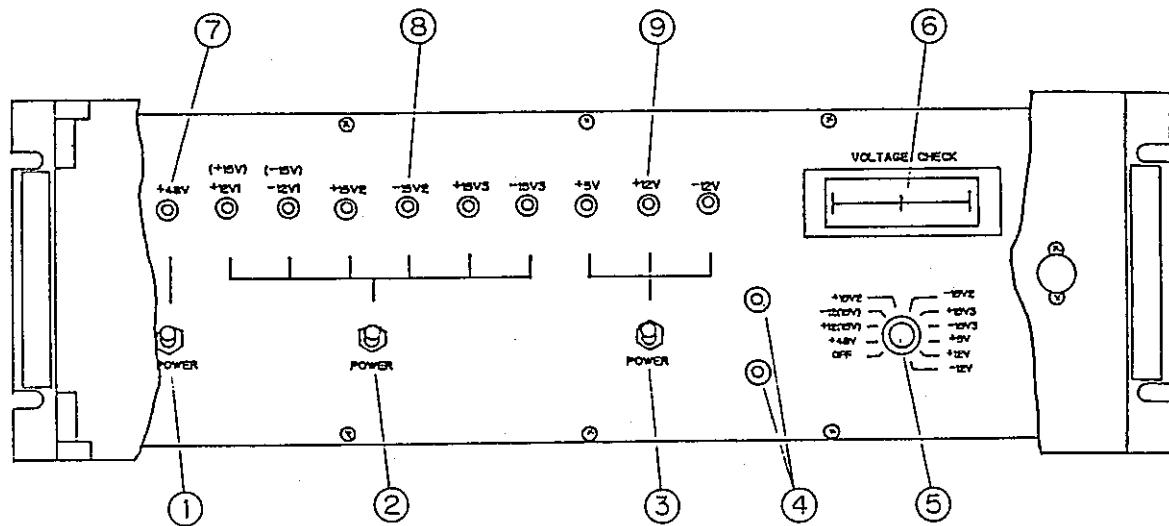


図 4-9 較正部

1) 前面内部パネル図



2) 背面パネル図

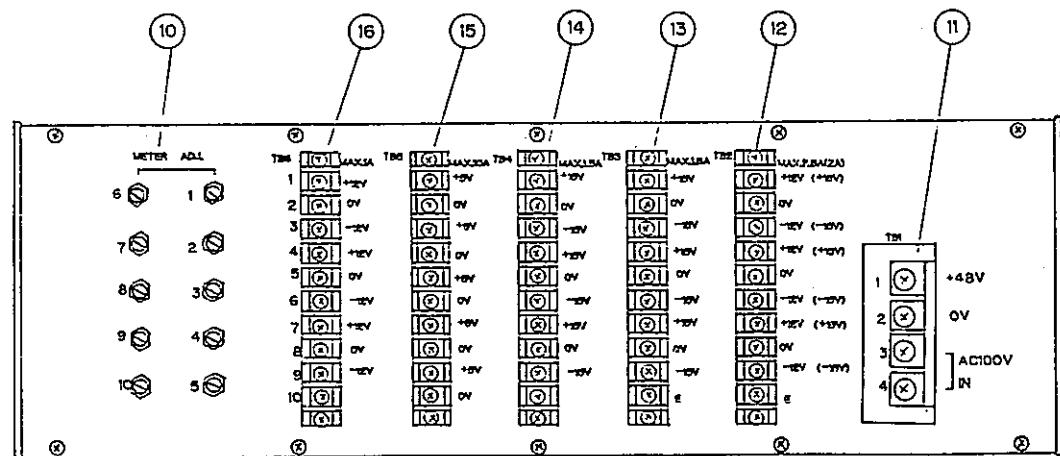
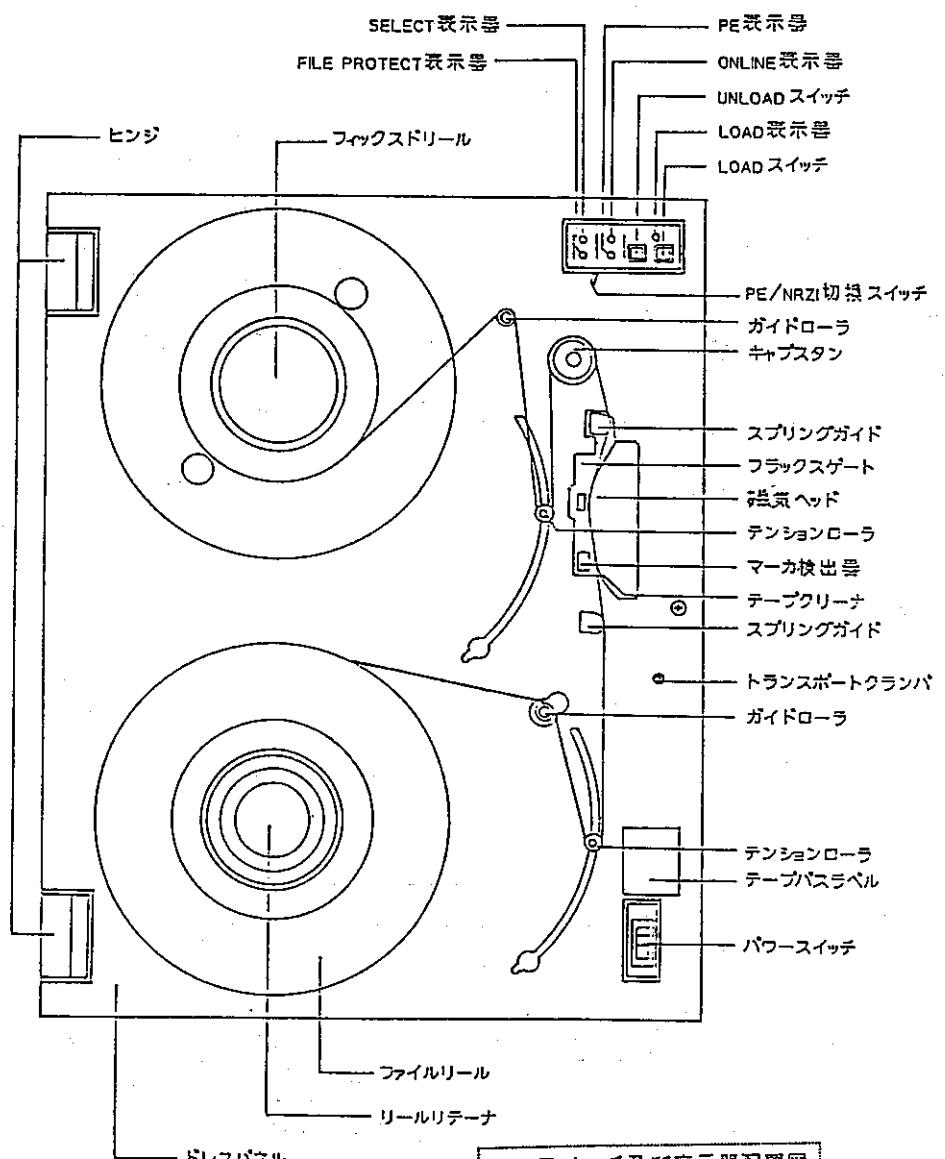


図 4-10 直流電源装置部

前面パネル図



スイッチ及び表示器配置図

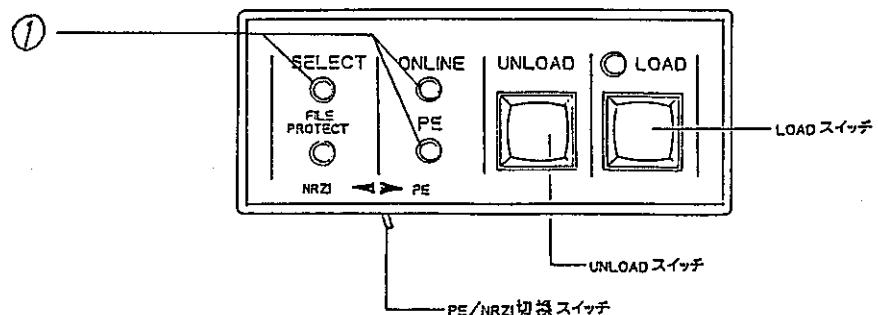


図4-11 磁気テープ記録装置部

4.5 記録フォーマット

記録動作および各部記録フォーマットを図と表で示す。

- (1) 記録動作タイムチャート (図 4-12)
- (2) 磁気テープ記録チャンネル表 (表 4-1)
- (3) アナログ記録フォーマット
 - a) 再生およびアナログ記録フォーマット
 - b) タイムコードのフレーム (図 4-13)
- (4) プリンター印字フォーマット
- (5) 表示フォーマット
- (6) MT 記録フォーマット
 - 1) 記録動作タイムチャート

記録動作タイムチャートを図 4-12 に示す。

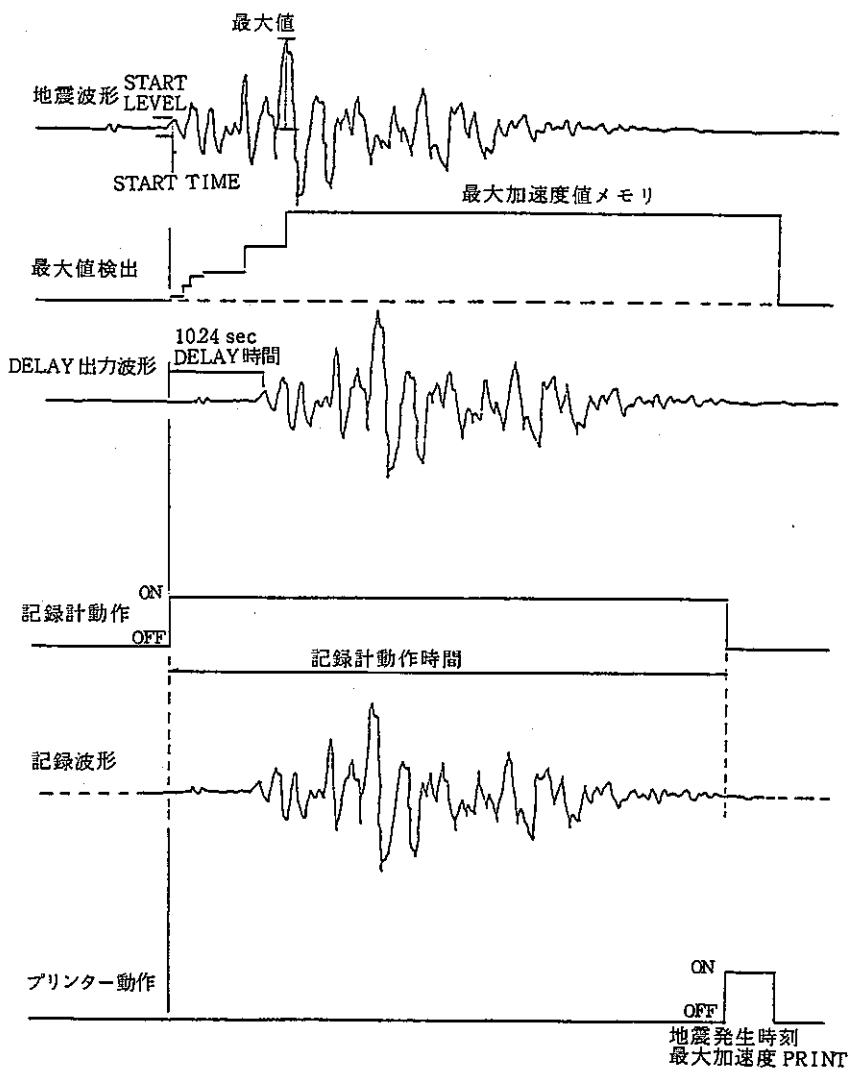


図 4-12 記録動作タイムチャート

2) 磁気テープ記録チャンネル表

表 4 - 1 磁気テープ記録チャンネル表

記録チャンネル (A/D CHANNEL)	地 点	成 分	スター タ チャンネル	可視記録計 記録チャンネル	CAL1 /CAL2	変位 極性
1	No. 1	Z	2	1	CAL-1	⊖
2	No. 5	Z	3	2	-1	⊖
3	No. 6	Z	1	3	CAL-2	⊖
4	No. 1	X		4	CAL-1	⊕
5	No. 1	Y		5	-1	⊕
6	No. 2	X		6	-1	⊕
7	No. 2	Y		7	-1	⊕
8	No. 2	Z		注 ① タイムコード	-1	⊖
9	No. 3	X		1	-1	⊕
10	No. 3	Y		2	-1	⊕
11	No. 3	Z		3	-1	⊖
12	No. 4	X		4	-1	⊕
13	No. 4	Y		5	-1	⊕
14	No. 4	Z		6	-1	⊖
15	No. 5	X		7	-1	⊕
16	No. 5	Y		8	-1	⊕
17	No. 6	X		1	-1	⊕
18	No. 6	Y		2	-1	⊕
19	No. 7	Z		3	-1	⊖
20	No. 8	Z		4	-1	⊖
21	-	-		5	-	
22	-	-		6	-	
23	-	-		7	-	
24	Time Code	-		タイムコード	-	

極性は地動 S→N の時

注) 加速度 : 50/1000 Gal

W→E

U→D

1) 増巾器出力に変更可能

可視記録計モニターチャンネルは、 A/D. 制御部 (AJE-8000) の D/A CHANNEL SELECTスイッチで選択 (8 チャンネル単位)。

3) アナログ記録フォーマット

a) 再生およびアナログ記録フォーマットを以下に示す。

チャンネル	1	2	3	4	5	6	7	8
記 録 方 向	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
成分	D-U	D-U	D-U	S-N	W-E	S-N	W-E	TIME
地 点	No 1.	No 5.	No 6	No 1	No 1	No 2	No 2	CODE

注)

S → N

W → E の方向に加速度が検出器に加わった時に、全て + 方向を示す。
D → U

N, S, E, は方位を示し、矢印は加速度方向を示す。

U は地表、D は地中を示し、矢印は加速度方向を示す。

b) タイムコードのフレームを図 4-13 に示す。

4) プリンター印字フォーマット

プリンターの印字内容はつぎに示す 4 項目であり、印字例を以下に示す。

a) AC 100 V 停電時及び復帰時

AC 100 V 停電時及び復帰

85Y04MT13D09H09M04S
AC100V POWER DOWN
85Y04MT13D11H00H09S
AC100V POWER RECOVERY

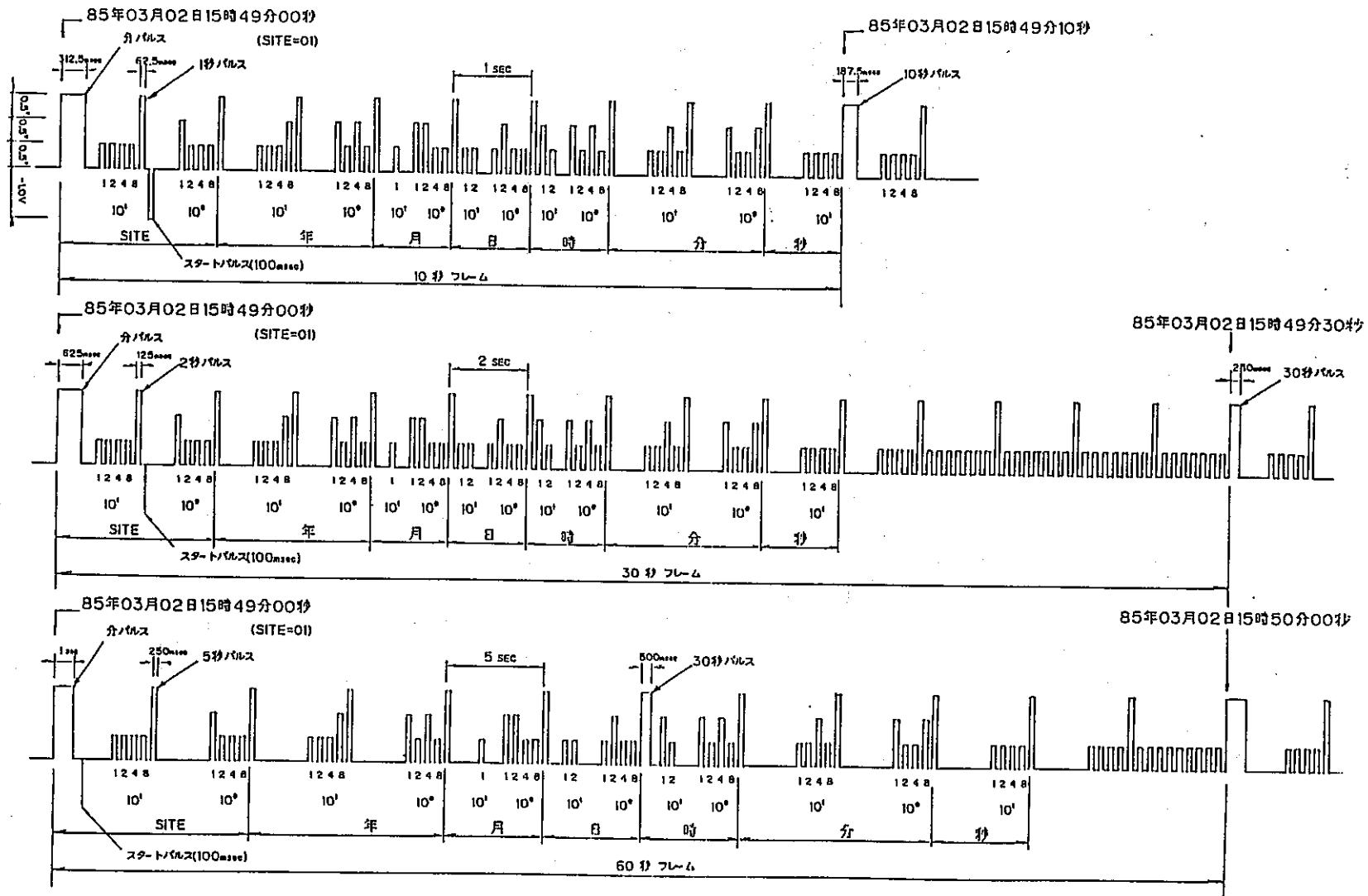


図 4-13 タイムコードフレーム図

b) 外部起動時

外部起動時

```
85Y04HT13D10H28M03S
SITE=02 EXT START
MAX. VALUE(UNIT=GAL)
CH01:085.4 CH02:069.4
CH03:030.9 CH04:029.3
CH05:027.3 CH06:025.1
*** EXT START OVER ***
```

c) 地震時

地震時

```
85Y04HT13D10H29M19S
SITE=02 EARTH QUAKE
MAX. VALUE(UNIT=GAL)

CH01:085.4 CH02:069.4
CH03:030.9 CH04:029.3
CH05:027.3 CH06:025.1

*** EARTH QUAKE OVER ***
```

d) 較正時

C A L 時 (例)

```
85Y04HT14D00H00M00S
SITE=02 CALIBRATION
(UNIT=GAL)

CH01:500.0 CH02:500.9
CH03:501.5 CH04:502.5
CH05:499.1 CH06:498.7

*** CALIBRATION OVER ***
```

5) 表示フォーマット

表示器は最大値、較正值およびMESSAGEを表示する。以下に表示例を示す。

a) 最大値表示

時 刻 →
地震発生時刻 →
最大値表示 →

85Y04Mt28D23H11M09s	SITE=03	EVENT=009	
85Y04Mt28D22H00M17s	EQ(MAX.GAL)	EVENT=009	
CH01:009.0	02:019.3	03:007.6	04:011.3
CH05:013.9	06:011.1		

85Y04Mt28D23H11M09s	SITE=03	EVENT=010	
85Y04Mt28D22H00M17s	EXT (GAL)	EVENT=010	
CH01:009.0	02:019.3	03:007.6	04:011.3
CH05:013.9	06:011.1		

記号の内容

SITE= 地点番号 EVENT=地震及びCAL 記録回数
EQ : 地震起動 (MAX.GAL): 最大値加速度単位(Gal)
CAL: 較正起動 EXT:外部起動
Y:年 Mt:月 D:日 H:時 M:分 S:秒

b) C A L 値表示

85Y04Mt27D23H00M00s	SITE=03	EVENT=011	
85Y04Mt27D22H00M00s	CAL (GAL)	EVENT=011	
CH01:502.5	02:501.7	03:500.9	04:500.3
CH05:498.9	06:501.1		

c) MESSAGE 表示

i) PLAY MODE

MESURE/PLAY MODE を PLAY MODE にした時、時刻と共に表示する。

ii) MT ERROR (MESURE MODE 時)

磁気テープ記録装置がERRORを起した時、時刻と共に表示する。

iii) MT END OF TAPE (MESURE MODE 時)

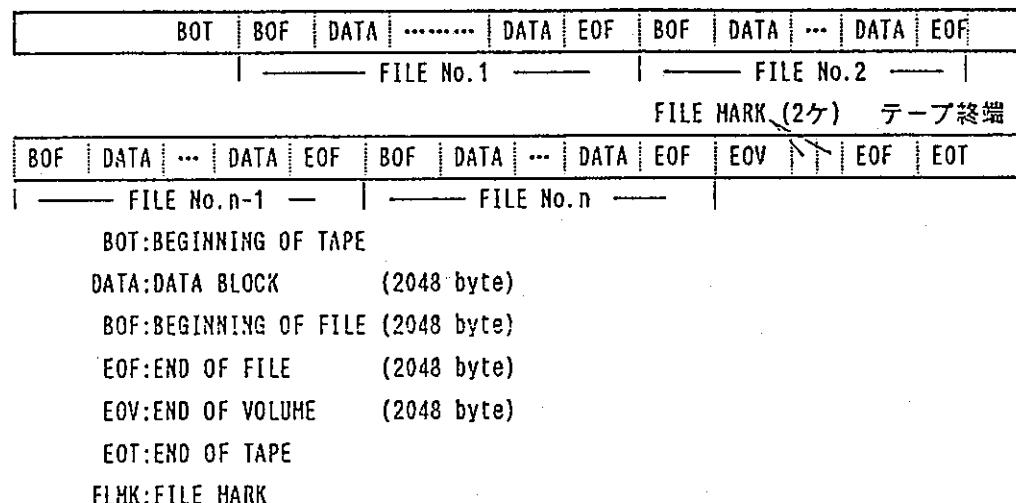
磁気テープ記録装置が終端まで書き込まれた時、時刻共に表示する。

6) MT記録フォーマット

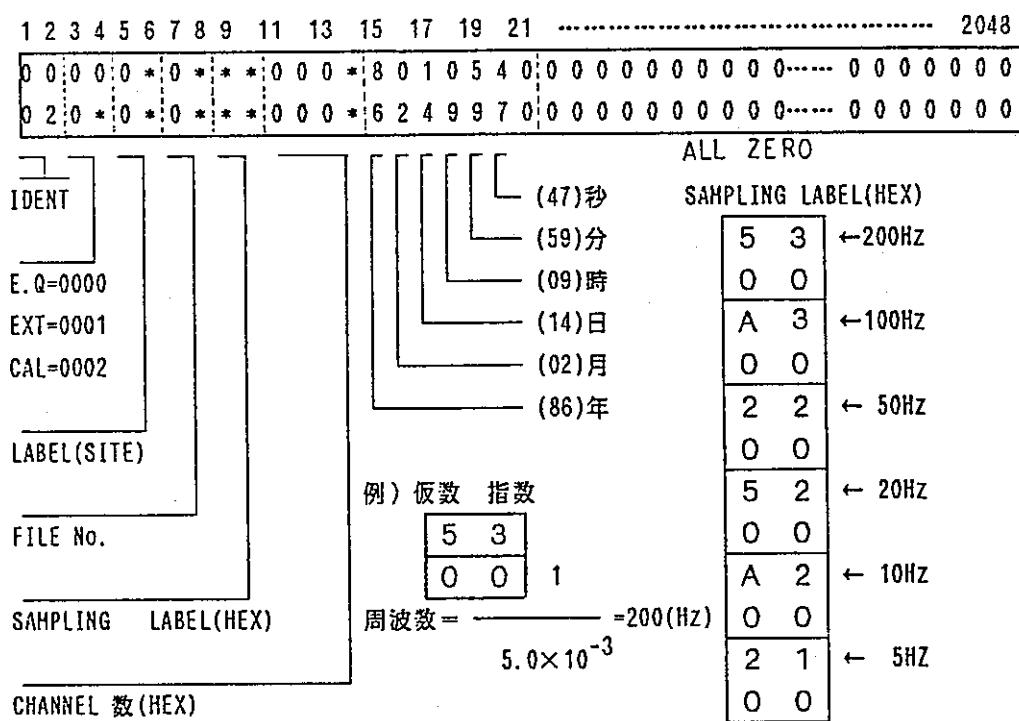
M T 記録フォーマットを以下に示す。

a) 1 volume の構成 (1 ブロック 2048 バイト)

テープ始端



b) BOFの構成 (BEGINNING OF FILE)



0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 A B C D E F

c) DATA の構成 (例 : 記録チャンネル 24 (18 HEX))

DATA:2'COMPLEMENT

FIRST DATA

1	2	3	4	5	6	.....	.....	.....	.....	2047	2048
MSB *	MSB *	MSB *	.....	MSB *	MSB *	.....	MSB *	MSB *	MSB *		
* LSB *	LSB *	LSB *	.....*	LSB *	LSB *	.....*	LSB *	LSB *	LSB *		

CH1 CH2 CH3 CH24 CH1 CH14 CH15 CH16

SECOND DATA

1	2	3	4	5	6	.....	.....	.....	.....	2047	2048
MSB *	MSB *	MSB *	.....	MSB *	MSB *	.....	MSB *	MSB *	MSB *		
* LSB *	LSB *	LSB *	.....*	LSB *	LSB *	.....*	LSB *	LSB *	LSB *		

CH17 CH18 CH19 CH24 CH1 CH6 CH7 CH8

d) EOF の構成 (END OF FILE)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	.....	1024	.....	2048
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.....	0	0	0
0	3	0	3	0	3	0	3	0	3	.....	3	0	3

e) EO V の構成 (END OF VOLUME)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	.....	1024	.....	2048
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.....	0	0	0
0	4	0	4	0	4	0	4	0	4	.....	4	0	4

4.6 検査成績結果

1) 総合性能		判 定
a) 加速度判定範囲	± 1 0 0 0 Gal	良 否
b) 記録周波数範囲	0.01 ~ 30 Hz ± 10% 以内	良 否
c) 起動 レベル		
0.1, 0.3, 1, 3, 10, 30 Gal	設定値の±10% 以内	良 否
100% 連続可変目盛 10.0	又は ± 1 Gal 以内	
d) 記録時間設定		
0.1 ~ 9.9 分 (0.1 分 STEP)	設定可能の事	良 否
e) 信号遅延時間		
サンプリング周波数 100 Hz で 10.24 秒 ± 0.03 秒 以内		良 否
f) プリンター印字及び最大値表示		
地震発生時刻及び全チャンネル 印字, 表示可能の事		良 否

2) 各部性能

a) 加速度増幅器				
(i) 測定範囲	± 1 0 0 0 Gal	良	否	
(ii) 出力感度	1000Gal / 5V ± 3% 以内	良	否	
(iii) 周波数特性	0.01 ~ 30 Hz ± 10% 以内	良	否	
(iv) ハイカットフィルター	FO = 50 Hz ± 5% 以内	良	否	
b) 制御器				
(i) 起動レベル (連続可変目盛 10.0)				

設定レンジ (Gal)	精 度	判 定		
		CH 1	CH 2	CH 3
30	設定レンジ ± 10% 以内			
10	又は ± 1 Gal 以内	良 否	良 否	良 否
3				
1				
0.3				
0.1				

(ii) 起動周波数特性 (別紙参照) ± 20% 以内 判 定
良 否

		判定
(iii) 起動方法	1 : 3 H の OR 動作 2 : 2 OUT OF (AND) 動作 3 : OFF 動作	良 否 良 否 良 否
(iv) 記録時間設定	1 : 0.1 ~ 9.9 分 (0.1 分 STEP) 動作 2 : 3 分設定時精度 ± 2 秒以内 (測定値 3 分 00 秒) 3 : START, STOP 動作 4 : ALT, AFT 動作	良 否 良 否 良 否 良 否
(v) CAL (自動校正)	(ALT: AFTER LAST TRIGGER AFT: AFTERTER FAST TRIGGER)	
1 : 校正周波数精度	± 5 % 以内	良 否
測定値 (15 Hz) 15 Hz	測定値 (5 Hz) 5 Hz	
2 : CAL, MODE 動作		良 否
c) 刻時信号発生器		
(i) ラジオによる自動修正		良 否
(ii) 自動修正範囲		良 否
0 ~ 29 秒進み : 00 秒に修正		
0 ~ 30 秒遅れ : 00 秒に修正後, 分切り上げ		
(iii) SEC, RES, TIME SET 動作		良 否
TIME CODE		
d) 遅延部		
(i) SAMPLING 周波数精度 ± 1 Hz 以内		良 否
100 Hz 設定 測定値 100 Hz		
200 Hz 設定 測定値 100 Hz		
(ii) 遅延時間		
SAMPLING 100 Hz 設定	10.24 秒 ± 0.03 秒 以内	良 否
	測定値 10.24 秒	
(iii) D/A 変換器出力		
LOW 選択 (再生時)	62.5 Gal / 5 V ± 3 % 以内	良 否
HIGH 選択	1000 Gal / 5 V ± 3 % 以内	良 否

e) 記 録 部

		判 定
(i) MT コントロール動作		良 否
(ii) 記録チャンネル 24 - CH		良 否
(iii) プリンター印字動作		良 否

3) 地震計周波数特性

地震計周波数特性を図 4 - 14 に示す。

4) 増幅器周波数特性

増幅器周波数特性を図 4 - 15 に示す。

5) 起動周波数特性

起動周波数特性を図 4 - 16 に示す。

6) 検出器感度

検出器の感度を表 4 - 2 に示す。

7) 可視記録器の記録紙上の感度を表 4 - 3 に示す。

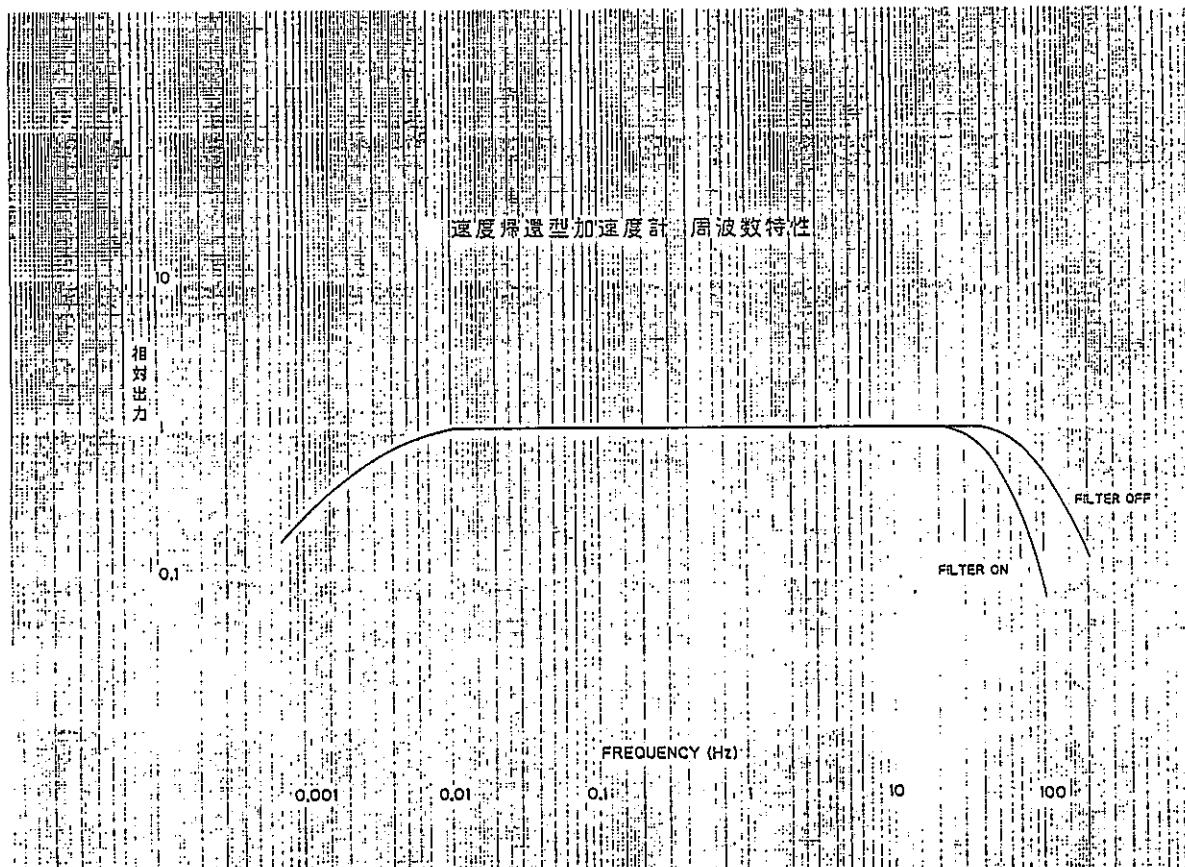


図 4 - 14 速度帰還型加速度計周波数特性

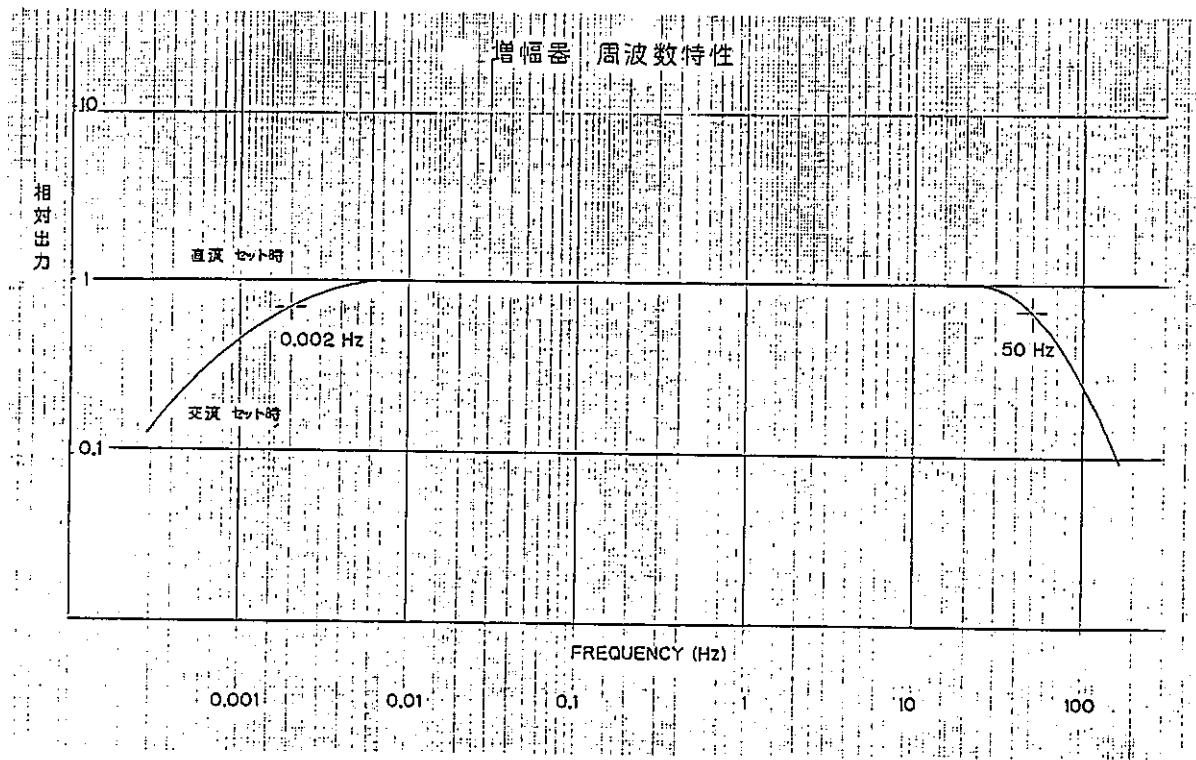


図 4-15 増幅器周波数特性

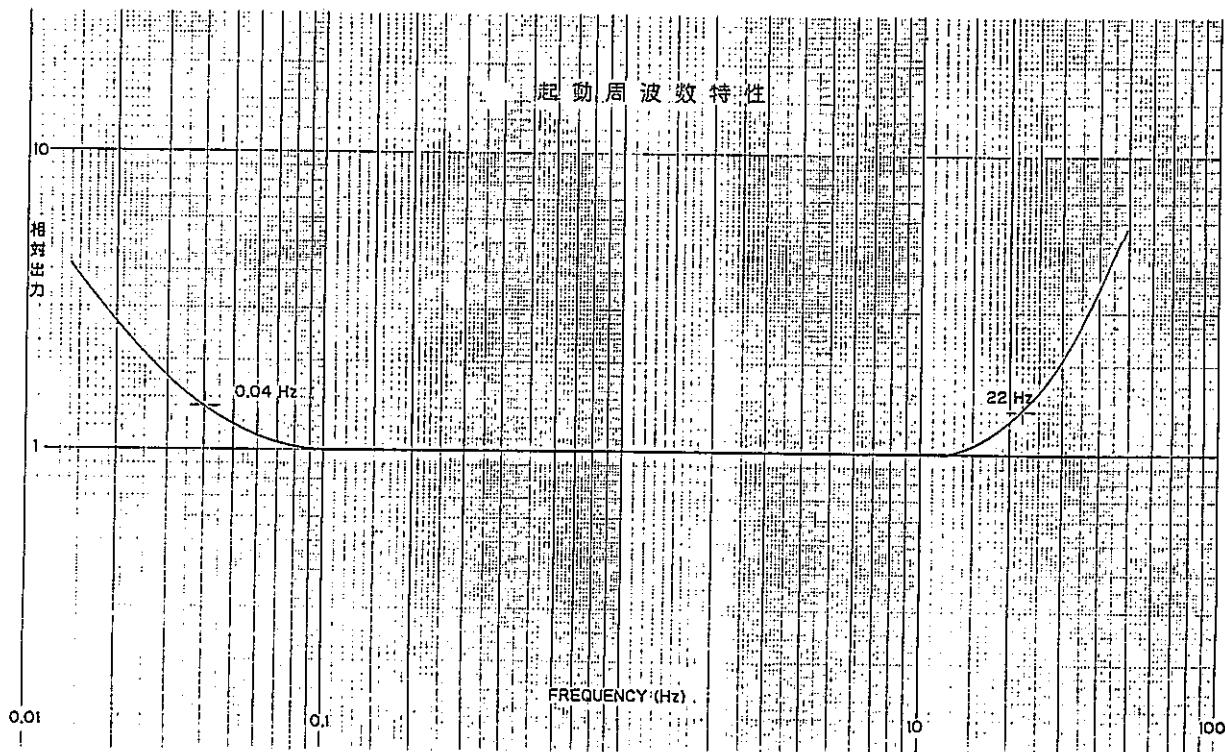


図 4-16 起動周波数特性

表 4 - 2 検出器感度表

地点番号	成 分	検出器番号	感 度 (V/1000 gal)	電 流 (mA/1000 gal)	Amp No.	Amp Ch
No. 1 上 1 L 坑口	N-S	po 90314	3.06 °-p	31.1	1	1
	E-W	po 90315	3.06	31.9	2	2
	U-D	po 80316	3.06	31.5	13	3
No. 2 上 1 L 旧巻上機室	N-S	po 90317	3.06	31.9	3	4
	E-W	po 90318	3.06	32.5	4	5
	U-D	po 80319	3.06	31.8	14	6
No. 3 下 3 L	N-S	po 90320	3.06	32.4	5	7
	E-W	po 90321	3.06	31.9	6	8
	U-D	po 80322	3.06	31.2	15	9
No. 4 下 3 L	N-S	po 90323	3.06	32.1	7	10
	E-W	po 90324	3.06	32.7	8	11
	U-D	po 80325	3.06	31.8	16	12
No. 5 下 7 L	N-S	po 90326	3.06	33.2	9	13
	E-W	po 90327	3.06	32.1	10	14
	U-D	po 80328	3.06	32.7	17	15
No. 6 下 10 L	N-S	po 90329	3.06	31.2	11	16
	E-W	po 90330	3.06	32.1	12	17
	U-D	po 80331	3.06	31.9	18	18
No. 7 下 10 L	U-D	po 90332	3.06	31.8	19	19
No. 8 下 10 L	U-D	po 90333	3.06	32.1	20	20

表 4 - 3 可視記録 感度一覧表

設定感度 (V/cm)	100	50	20	10	5	2	1
HIGH12BIT (Gal/cm)	20000	10000	4000	2000	1000	400	200
LOW12BIT (Gal/cm)	1250	625	250	125	62.5	25	12.5

設定感度 (mV/cm)	500	250	100	50	25	10	5
HIGH12BIT (Gal/cm)	100	50	20	10	5	2	1
LOW12BIT (Gal/cm)	6.25	3.12	1.25	0.625	0.312	0.125	0.062

4.7 地震観測態勢

現地での観測は細倉鉱山に委託する。通常の点検、地震発生時の処置は当鉱山係員（電気係員）が行う。

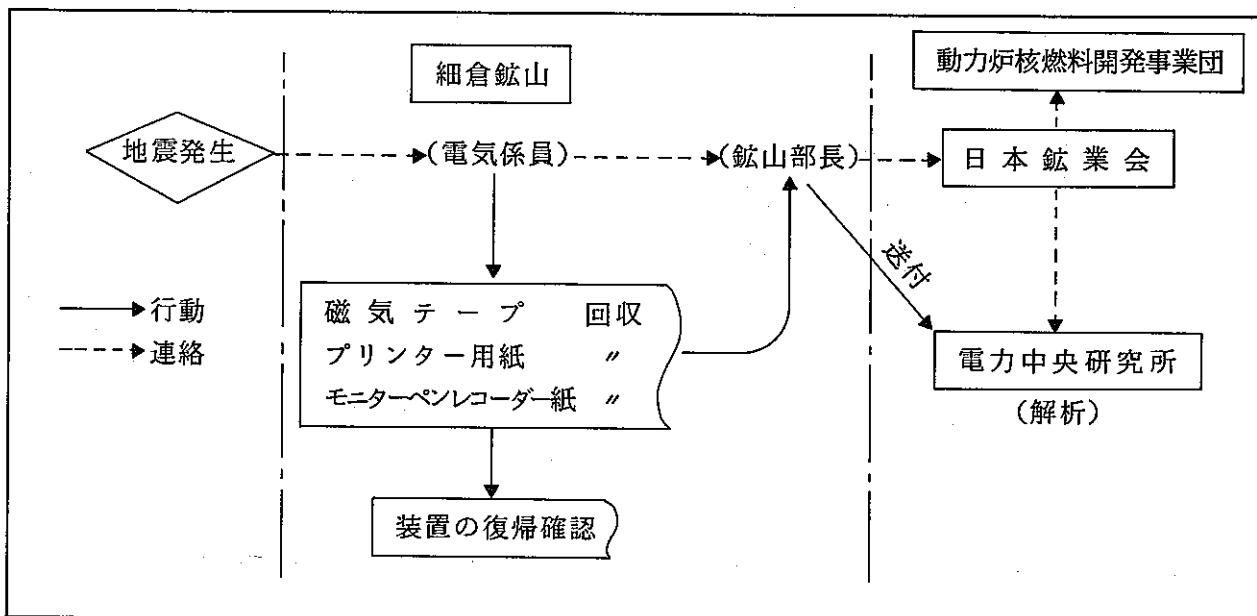
1) 地震発生時の処置

地震情報はデジタルデーターレコーダーに収録され、同時にその時の地震動の最大振幅値をデジタルプリンターに打出し、モニター用ペンレコーダー紙に測点の波動が記録されて出てくる。地震発生後以下の処置をとる。

- ① デジタルデーターレコーダーの磁気テープを回収し、予備の磁気テープを装着する。
- ② デジタルプリンター紙を回収する。
- ③ モニター用ペンレコーダー紙を回収する。

観測装置は起動以降一定時間収録後自動停止し、待機状態に戻る。

地震発生時の連絡態勢を以下に示す。



2) 通常の点検

(1) 点検項目

ア. 地震計、ケーブル

地震計は密閉防湿型で据付後は通常特に手入れをする必要はないが、設置箇所が坑内であるため、地震計、ケーブルが浮石の落下等で破損されないよう岩盤の点検を行う。

イ. 観測機器

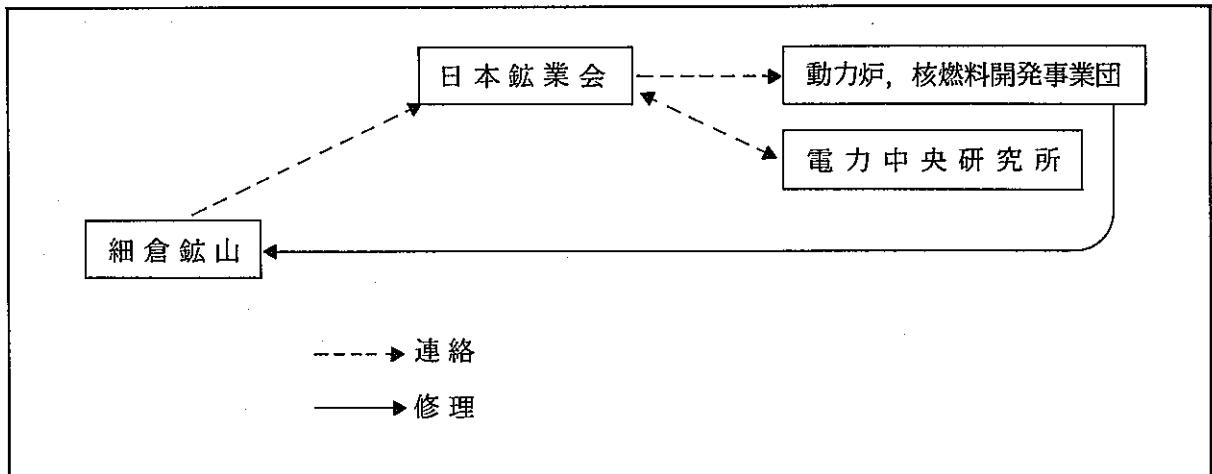
観測機器は待機状態、起動状態および正常状態を表示するパイロットランプ、ディスプレイを備えており、通常の

点検ではこれらのランプの点灯を確認する。

また人為的な地震情報を作り装置を起動し、試験することも出来る。通常の点検項目を表4-4に示す。

3) 故障時の処置

装置故障時には次のような連絡、修理態勢をとる。



4) 消耗品の補充

ア、磁気テープ　　巻取側リールのテープ量が1600フィートを超えたら予備と交換する。

イ、プリンター用紙　　残量をチェックし少なければ補充する。

ウ、モニター用紙　　同　　上

5) 点検スケジュール

地震計、ケーブル　　2回／月

観測機器　　2回／月

6) 記録の発送

(1) 巡視時点検項目をチェックし点検記録に記載し、定期的に電力中央研究所へ送る。

(2) 地震発生後磁気テープ、プリンター紙、モニター紙を回収し、点検記録とともに電力中央研究所へ送る。

送付先 〒270-11 千葉県我孫子市我孫子1646番地

財団法人 電力中央研究所 土木研究所、地震観測担当

電話 0471-82-1181

表 4 - 4

点検記録 昭和 年 月 日 点検者

1) 正常ランプ点灯

ランプ種類	正常時	点検結果	記事
1. P L A Y	点灯		図4-4 ⑯
2. M E S U R E	"		図4-4 ⑰
3. S T O P	"		図4-4 ⑱
4. 電 源	"		図4-4 ⑲
5. 印 字	"		図4-7 ⑳
6. 磁 気 記 録 器	"		図4-11 ㉑

2) 消耗品の補充、交換

品 名	処置	実行 ○で囲む
1. 磁 気 テ ー プ	1600 Ftに達したら予備と交換	そのまま、交換
2. プリント用紙	残量チェックと補充	チェック、補充
3. モニター用紙	同 上	チェック、補充

3) 地震計、ケーブル

測点番号	外観異常の有無		記事
	地震計	ケーブル	
測点 1			
" 2			
" 3			
" 4			
" 5			
" 6			
" 7			
" 8			

4.8 工事写真

- 写真 4-1 立坑内ケーブル布設状況
- " 4-2 立坑内ケーブル固定状況
- " 4-3 ねじ結び
- " 4-4 坑外ケーブル布設状況
- " 4-5 坑外ケーブル布設状況（上1番坑坑口前）
- " 4-6 坑外ケーブル布設状況（上1番坑坑口）
- " 4-7 坑内ケーブル布設状況
- " 4-8 観測小屋（正面）
- " 4-9 観測小屋（横）
- " 4-10 ケーブル引出し状況
- " 4-11 空調機設置状況
- " 4-12 信号ケーブル
- " 4-13 地震計設置箇所（床掘状態）
- " 4-14 地震計設置箇所（床掘状態）
- " 4-15 地震計据付台（測点1）
- " 4-16 地震計据付台（測点2）
- " 4-17 地震計据付台（測点3）
- " 4-18 地震計据付台（測点4）
- " 4-19 地震計据付台（測点5）
- " 4-20 地震計据付台（測点6）
- " 4-21 地震計据付台（測点7）
- " 4-22 地震計据付台（測点8）
- " 4-23 地震観測装置

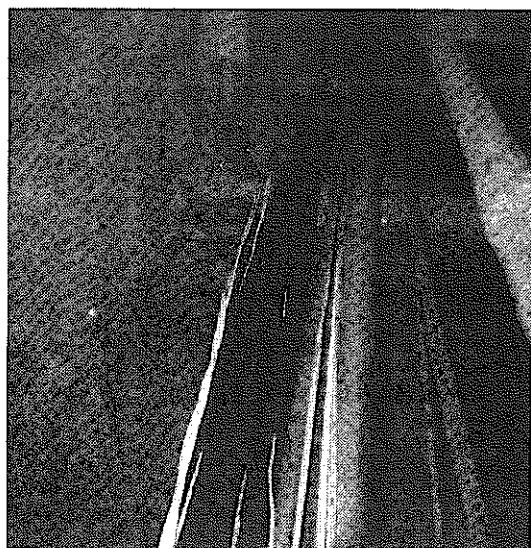


写真 4-1 立坑内ケーブル布設状況

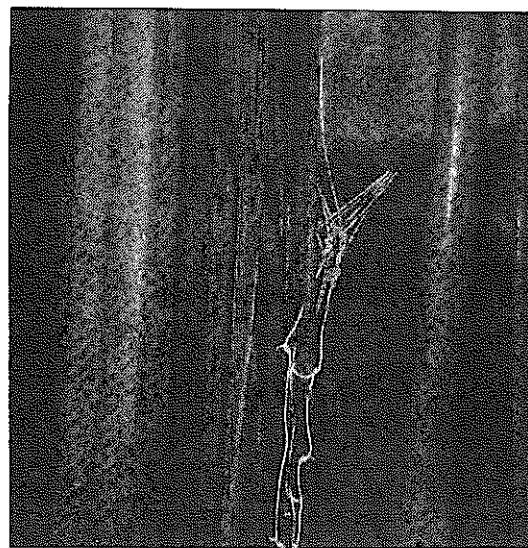


写真 4-2 立坑内ケーブル固定状況

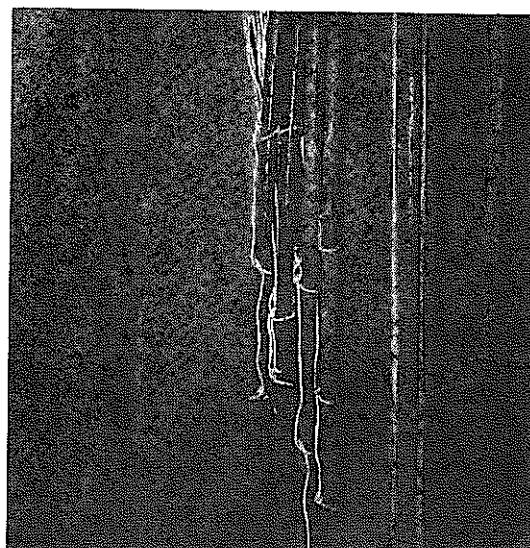
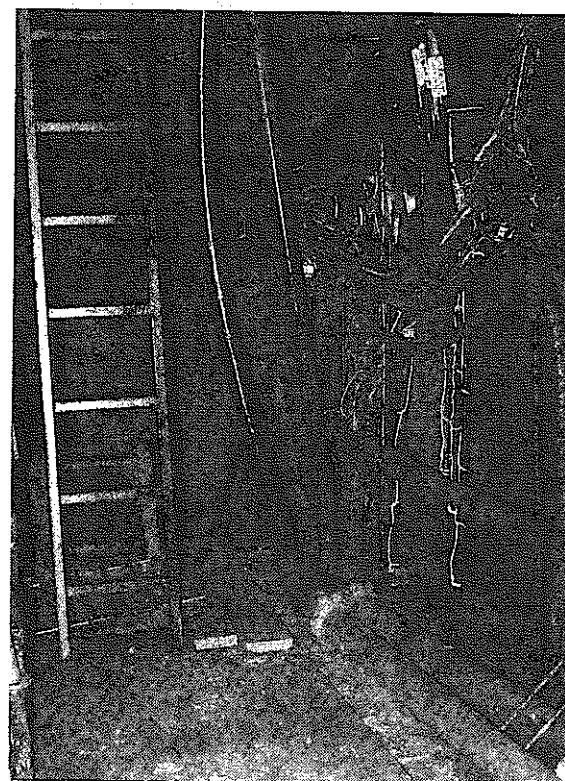


写真 4-3 ねじ結び



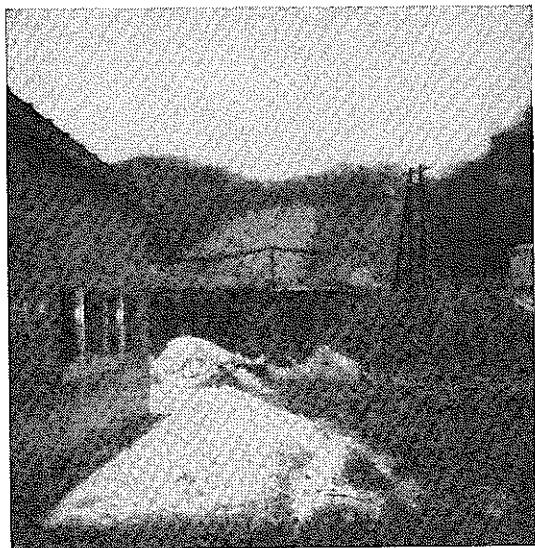


写真 4-4 坑外ケーブル布設状況

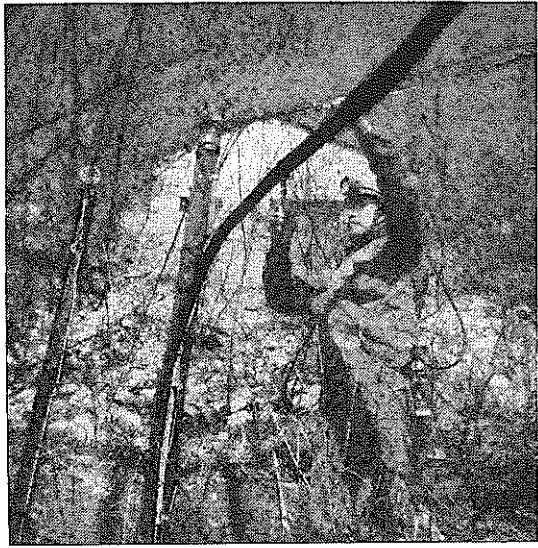


写真 4-5 坑外ケーブル布設状況
(上1番坑坑口前)

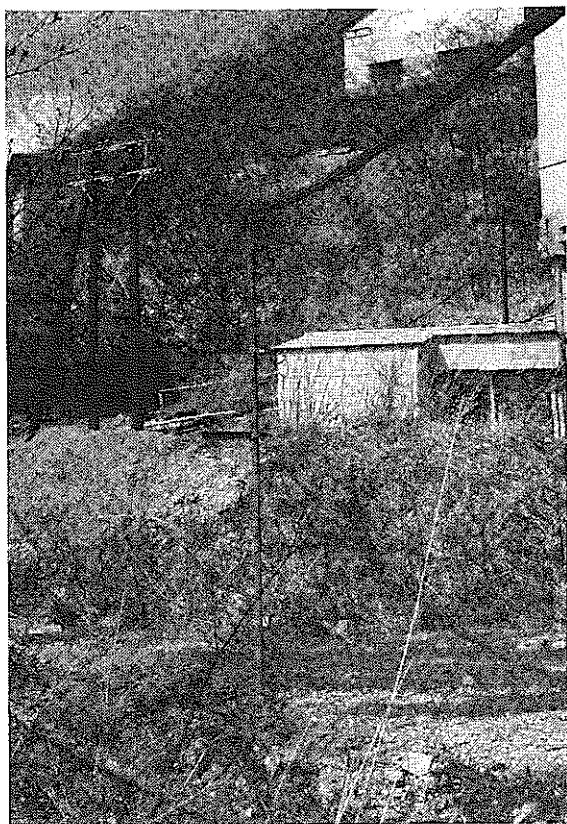


写真 4-6 坑外ケーブル布設状況
(上1番坑坑口)

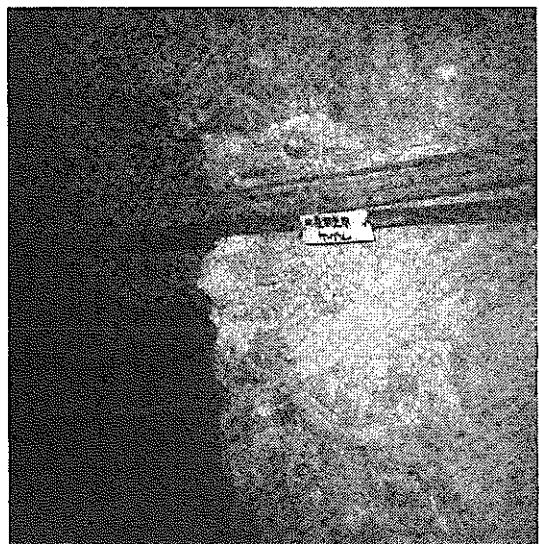


写真 4-7 坑内ケーブル布設状況

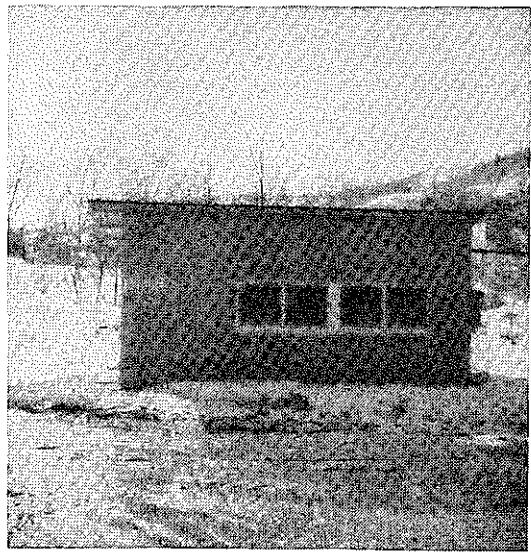


写真 4-8 観測小屋（正面）

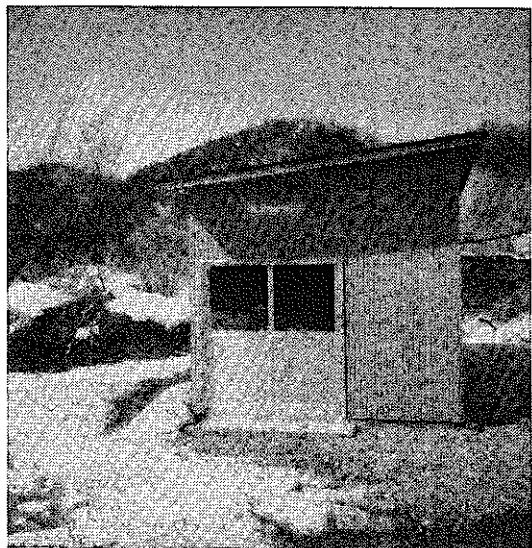


写真 4-9 観測小屋（横）



写真 4-10 ケーブル引出し状況

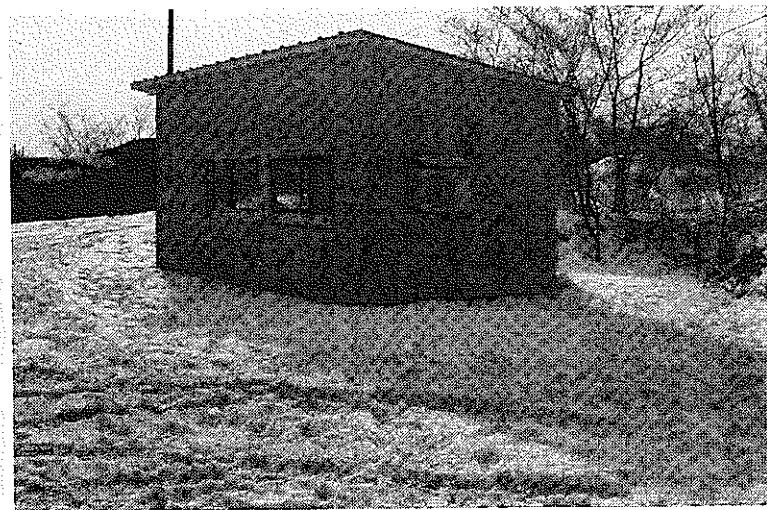


写真 4-11 空調機設置状況

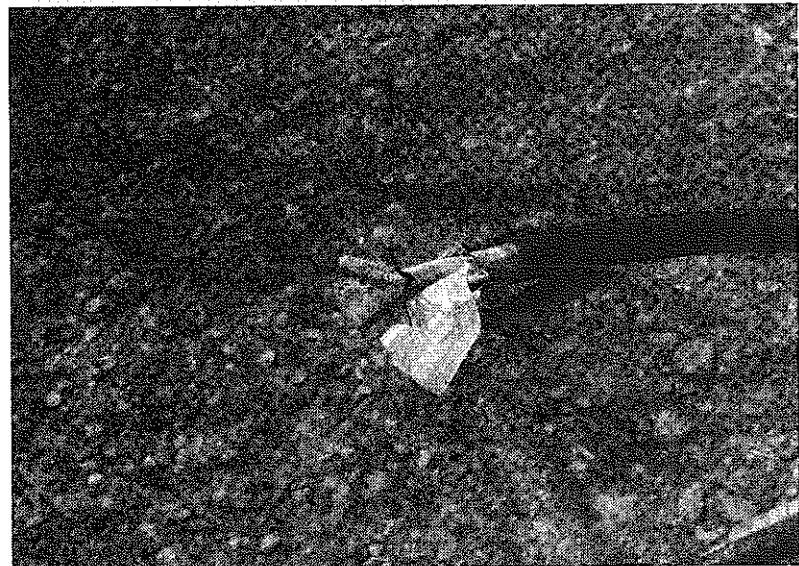


写真 4-12 信号ケーブル

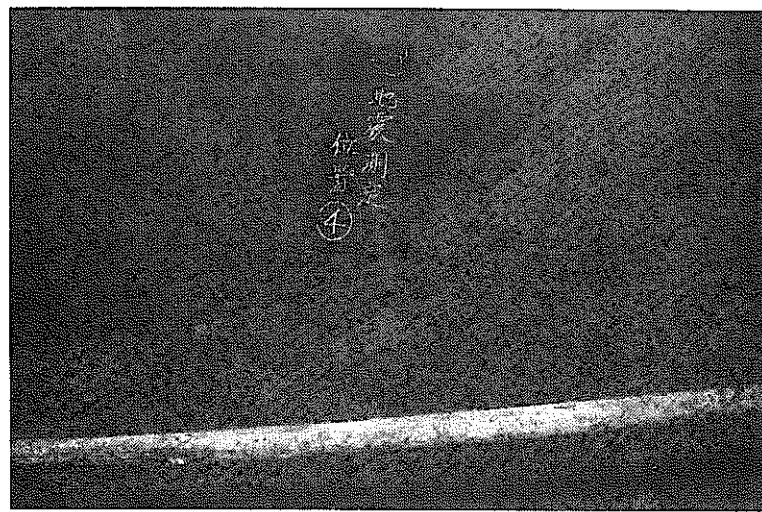


写真 4-13 地震計設置箇所（床掘状態）



写真 4-14 地震計設置箇所（床掘状態）

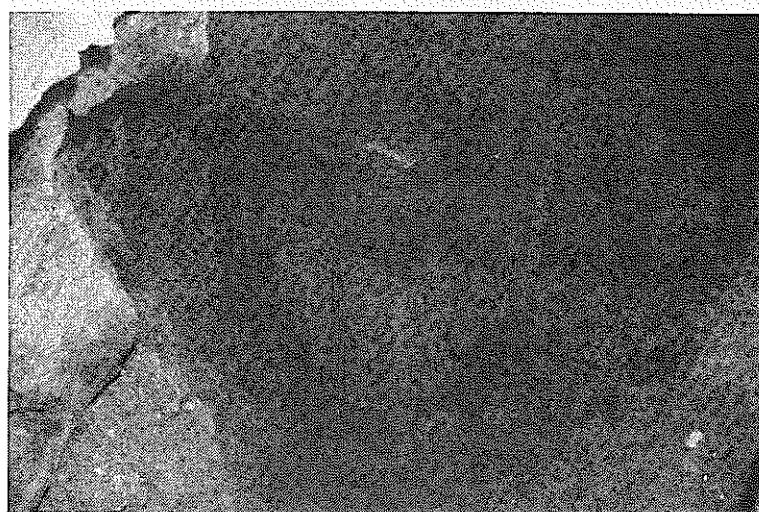


写真 4-15 地震計据付台（測点 1）

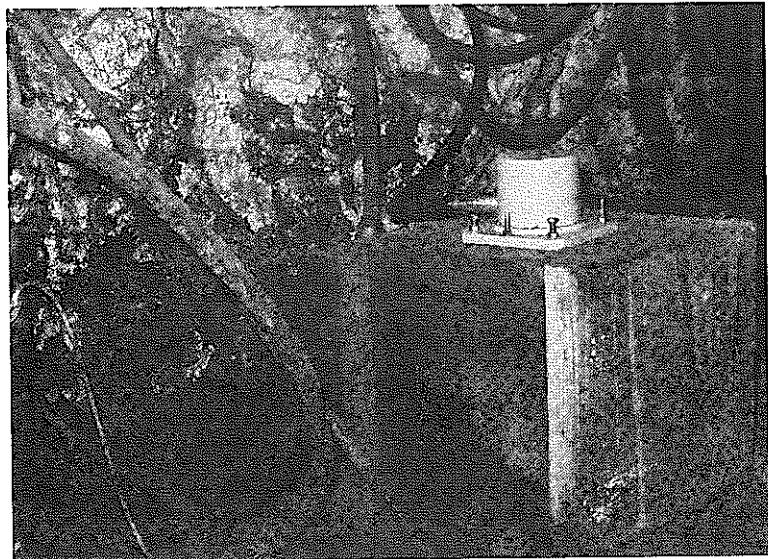


写真 4-16 地震計据付台（測点 2）

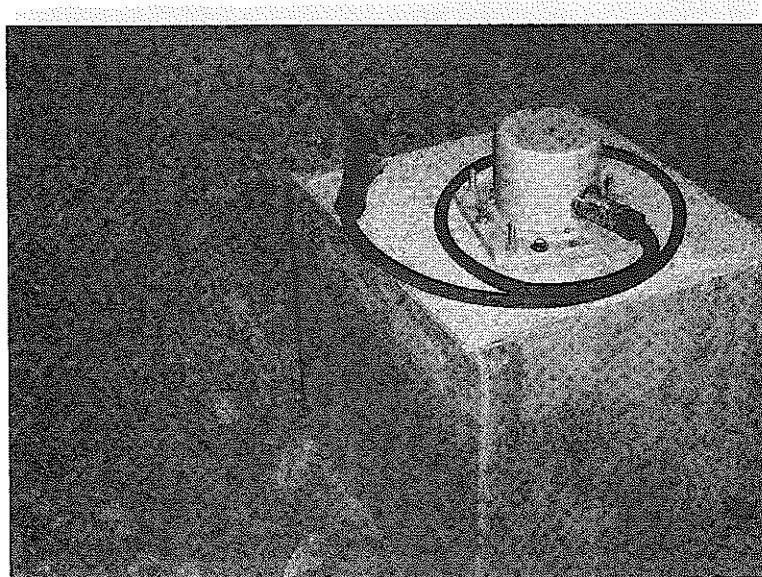


写真 4-17 地震計据付台（測点 3）

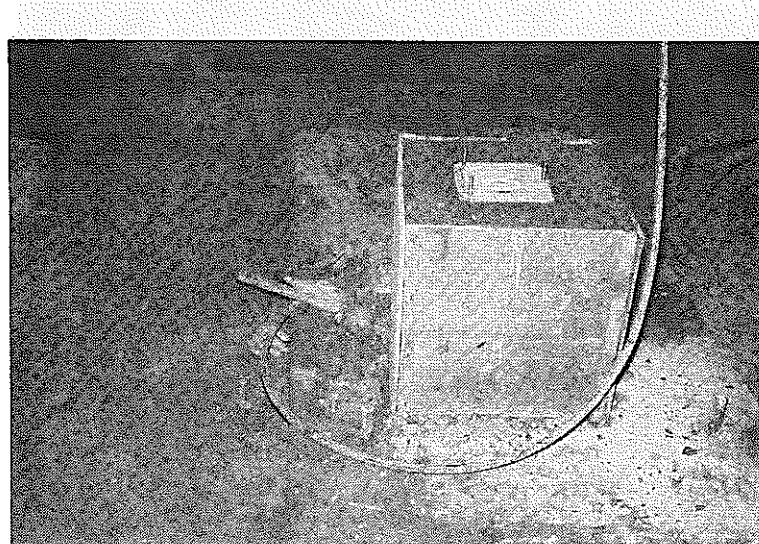


写真 4-18 地震計据付台（測点 4）

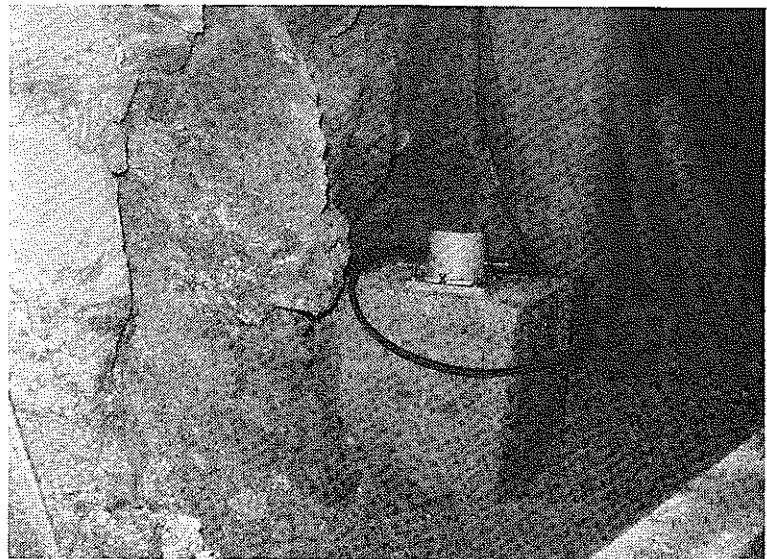


写真 4-19 地震計据付台（測点 5）

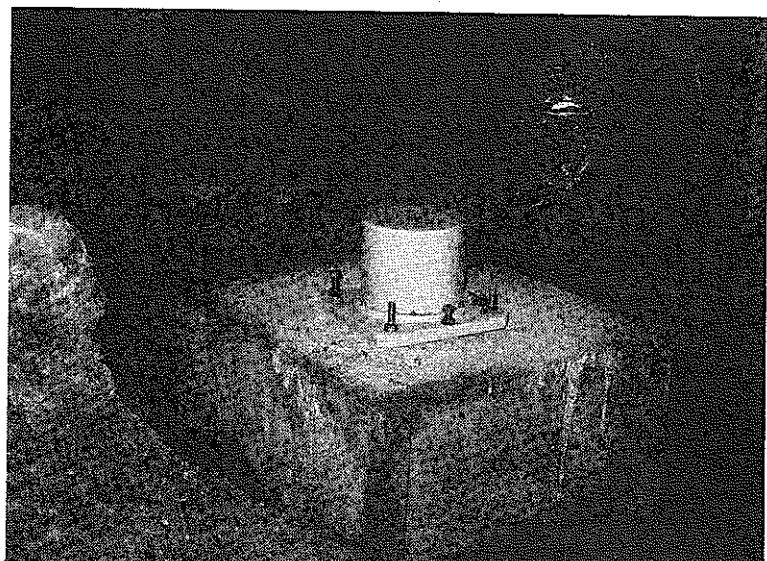


写真 4-20 地震計据付台（測点 6）



写真 4-21 地震計据付台（測点 7）

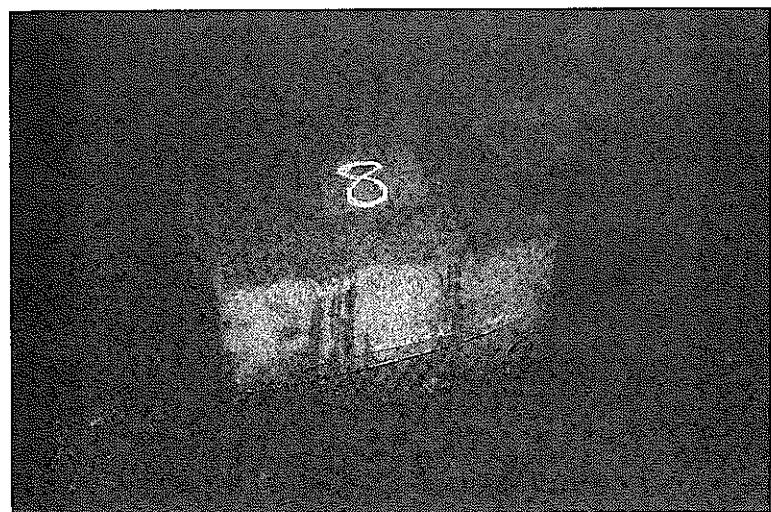


写真 4-22 地震計据付台（測点 8）

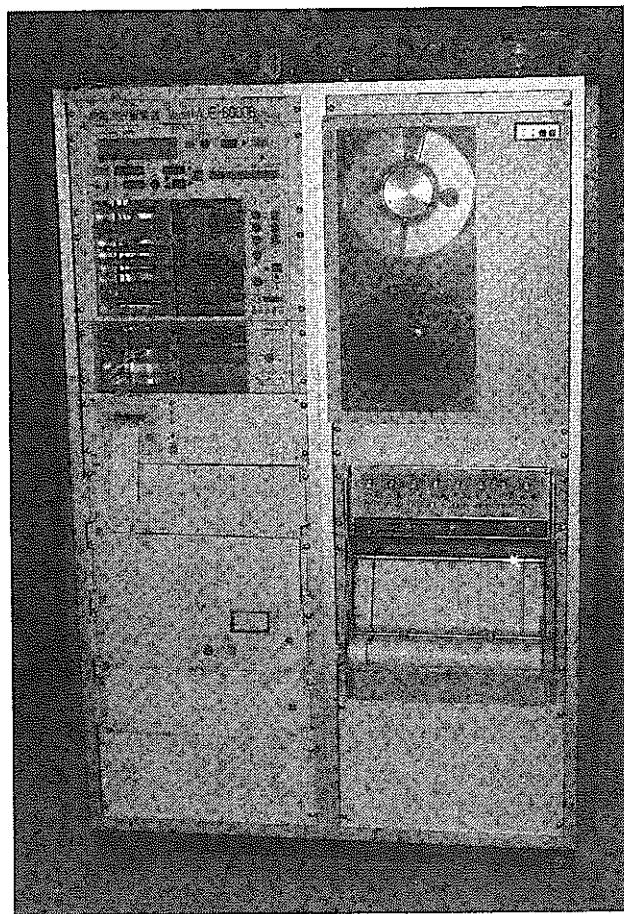


写真 4-23 地震観測装置

5. 観測地点の調査計画

5.1 地質・坑内構造調査計画

(1) 地質図の作成

地震計が設置されている各レベル（上1番坑、下3番坑、下7番坑、下10番坑）および地表の感天立坑を中心とした半径約300mの地域の調査を行い、詳細地質図を作成する（ただし、下10番坑は更に広い範囲の地震計設置場所をカバーするものとする）。また、縮尺は、 $1/1,000 \sim 1/3,000$ とする。

なお、採掘跡の判明している個所は坑道上を斜線をもって区別し、明記する。

(2) 地質断面図の作成

感天立坑を中心とし半径約300mの範囲の地域の地質断面図を作成する。断面は、南-北、東-西、東北-西南、西北-東南の4方向とし、縮尺は上記地質図と同一とする。

なお、採掘跡の位置・大きさ等は出来るだけ正確に調査し、明記することとする。

(3) 坑内構造図の作成

地震計が設置されている感天立坑を中心とし、約300mの範囲の坑道配置図を作成する。なお、必要に応じて坑道内の断層・亀裂等の分布図を作成する。

5.2 弹性波伝播特性調査計画

(1) 概説

地震観測地点の感天立坑周辺岩盤は、凝灰岩、石英安山岩、安山岩（変朽安山岩）より成るが、場所によってはこれらが入り組んで分布し、また、下6番坑々準付近には昭光断層が通っているほか、本鍾、東三番鍾などの採掘跡が多数存在するなど、比較的複雑な地盤構造をしている。

このため、こうした地盤の不均一性、亀裂の存在などが地震波の伝播に及ぼす影響を明らかにすることが不可欠であるが、これには観測点周辺の岩盤の弾性波速度分布を出来るだけ詳細に把握するとともに、地震波の振幅に大きな影響を及ぼす岩盤の減衰特性も調査する必要がある。

以上の様な観点から、当該地点における弾性波伝播特性に関する調査を以下のとく計画した。但し、ここに計画した調査はまだ概念的なものであるため、これらの実施にあたっては、実施方法や実施時期およびその効果などを再検討して、計画の具体化を図るものとする。

(2) 弹性波速度分布調査計画

弾性波速度分布の調査を行うには次の方法が考えられる。

1) 地表弾性波調査, 2) 坑道内弾性波調査, 3) 坑道間弾性波調査, 4) その他の調査これらの各調査について次に述べる。なお、調査の範囲は各調査の目的により異なるので一概には言えないが、5.1節で求めた観測点近傍の地質および坑内構造の作成断面図の範囲（地震計設置位置の両側へほぼ300m程度）と同程度の範囲の弾性波速度分布を把握することが望ましい。

1) 地表弾性波調査

目的； 観測点近傍の地表付近の地形が地震波に及ぼす影響を調べるための基礎資料として、表土層の厚さや地表付近の速度構造を把握する。

方法； 主として、屈折法による地表弾性波調査。震源としてP波探査には発破、S波探査には板叩き法などを用いる。P波探査の測線は観測点近傍の地表を中心に長さ1km程度の測線を十字形に交叉させることが考えられる。S波探査では長い測線はあまりとれないでの、表土層のS波速度を知ることを主体として、適当な測線を設けて調査する。

期待される成果；

- ① 表土層のP, S速度値および厚さ分布
- ② 岩盤浅部の（P波）速度構造

2) 坑道内弾性波調査

目的； 当該地点の各種岩盤の弾性波速度値を把握するため、坑道内で弾性波調査を行う。各坑道は掘削してから相当年月を経ており、坑道周辺に緩み領域が生じていることも考えられるため、これらの緩み領域の調査も同時に行う必要がある。

方法； 原理的には地表の屈折法探査と同様である。坑道の延長方向に測線を配置し、測線の両端又は中間でP, S波を発震して波の伝播性状を観測する。P波震源としては、小量の火薬、ハンマリング、S波震源としては板叩き法、火薬（震源に若干の工夫がいる）等を用いる。

本調査は観測地点近傍の各坑道について出来るだけ数多く行うことが望ましいが、次に述べる坑間弾性波調査結果の解析にも本調査データが必要となるので、岩種、岩質、観測点配置を考慮して適切な実施計画をたてることが肝要である。

期待される成果；

- ① 岩種、岩級に応じたP, S速度値の分布
- ② 坑道周辺のゆるみ領域の把握

3) 坑道間弾性波調査

目的； 観測点近傍の岩盤は一様ではなく、比較的複雑な速度構造をしていると考えられる。この様な地盤では、既述の坑道内の弾性波調査のみでは、全体の詳細構造を適確に知るこ

とは困難のため、坑道間での弾性波調査を行って、解析的に速度構造を推定する必要がある。

方法； 本方法はいわゆるジオトモグラフィと呼ばれる手法で、P. Bois 等 (1971)が石油井を利用したクロスホール計測を行って以来、各所で種々の角度から検討が加えられてきている。原理的には二本の坑間を伝播する弾性波の伝播時間を計測し、これから岩盤内部の速度分布を推定するもので、医学の分野におけるCT再成像に似た方法である。図5-1に坑間弾性波試験の一例を示す。

本方法はまだ研究開発中の要素が多いため、当該地点への適用には次のことを検討し、適切な計画とすることが必要である。

(震源)

震源としてはP波用として火薬が一般的であるが、分解能を上げるために出来るだけ小量の水中発破とし、可能ならば数KHzの超音波素子を用いることも考えられる。S波用には板叩き震源などが考えられるが、これまで例が少いため有効なS波震源を検討する。

(地震計配列)

精密な二次元または三次元断面の構造決定には全方向スキャンが必要であるが、これを完全に満たすことは不可能であるため、当該地点の坑道配置を考慮して地震計の幾何学的配列による像再成の精度を検討する。

(解析法)

観測データから構造を決定する方法には、逐次法(ART法、SIRT法)や解析的方法(コンボリューション法、フーリエ変換法)など多くの方法が提案されているが、いずれも直線パスを仮定している。しかし速度変化が大きい所では波線のベンディングを考慮する必要があり、R.J. Lytle(1979)によるRay tracing法を用いることも検討する必要がある。

なお、本調査は5.1節で述べた当該地点の詳細地質断面図と出来るだけ対応した断面において実施することが望ましい。

期待される成果；

- ① 当該地点の詳細速度構造断面図の作成
- ② ジオトモグラフィー法の検証
- ④ その他の調査

上記の調査以外に、採掘跡の充填物のPS波計測、断層のPS計測および設置した地震計間の平均速度計測等が考えられるので、これらについて簡単に記す。

- ① 採掘跡充填物のPS波計測

採掘跡にはスライムを主体とした充填物が詰められている。このため、採掘跡を横切る測線を設置したり、出来れば充填物そのものに小規模の測線を設けて、充填物のP.S波速度を計測する。

② 断層のP.S波計測

感天立坑の下6番坑々準付近には昭光断層が通っているため、断層を横切る測線又は断層上に測線を設けて、断層のP.S波速度を計測する。

③ 地震計設置点間の平均速度計測

各観測点に設置した速度帰還方式加速度計は、感度平坦範囲は30Hzまでであるが、100Hz位までは感度は低下するものの応答が可能である。このため、採掘切羽等に火薬による震源を設け、これよりの波動を各地震計で計測することにより、地震計設置点間の平均速度を計測することができる。

以上の各計測は、前述の坑道間弾性波調査による速度構造断面図の作成の際の参考資料となるものである。

なお、近年電磁波を用いた探査が各方面で実用化されつつあり、その適用について次にふれておく。

④ ジオレーダーによる岩盤の詳細調査

ジオレーダーは、電波の反射現象を利用して地下浅部を連続的にかつ簡単に調べる手法で、用いる波長（通常用いられる電磁波の周波数は80MHz～1GHz程度の超短波）が短かいため弾性波による方法に比べ分解能が格段に優れている（図5-2参照）。

このため、岩盤の微小クラックや小断層などの詳細なマッピングとこれらに関連した岩盤の力学的挙動や地下水挙動の把握に有効と考えられる。また、発信アンテナと受信アンテナを別個に設置することにより、坑道間を伝わる電磁波を検出し、既述のトモグラフィーの方法を適用することも考えられる（図5-3）。

従って、本調査を当該地点に適用する場合坑道周辺の詳細調査と坑道間のトモグラフィーのはか、特に岩盤挙動観測や地下水挙動観測の実施箇所において本方法による調査を行うことが有効であろう。

ジオレーダーの現場への適用性に関してはまだ研究要素が多いのが現状であるが、将来の処分場における調査法の一つとして有望であるため、当該地点でその有効性を検討することも有益と考えられる。

⑤ 減衰特性調査計画

地盤の減衰性は地震波の増巾、応答解析に大きな影響を及ぼすため、その特性を何らかの方法で把握しておく必要がある。

地盤の減衰特性の推定には種々の方法があるが、主なものを挙げると、

- 1) ボアホールによる P.S 波検層の波形や屈折法の波形から求めるもの
- 2) 地震波の直達 P.S 波より求めるもの
- 3) 地震波の地中と地表間の伝達関数（スペクトル比）の最適化法によるもの
- 4) 岩石試料の三軸試験、超音波試験、共振法などの室内試験から求めるもの

などがある。このうち、2), 3) の地震波から求める方法は地震観測データが得られてから検討することができる。また、4) の室内試験による場合は岩石試料が得られれば可能である。

従って、ここでは 1) の原位置測定による方法について検討することとする。

図 5-4 はこれまで各地で得られた地盤の減衰定数と S 波速度 (V_s) の関係を示すものである。図の減衰定数には S 波の速度検層の波形から求めたもの、地震動の直達 S 波によるもの等、各種のデータ、方法によるものが示されている。これからわかるように、地盤の減衰定数 (Q 値で見たとき) は大極的には V_s と比例的関係にあり、個々のデータのバラツキは非常に大きいが、当該地点の V_s が $1 \sim 2 \text{ km/sec}$ とすると、 Q 値は数十～数百の範囲にあると考えられる。

1) 測定方法

原位置の弾性波試験から Q 値を推定するには通常ボアホールが用いられるが、当該地点ではこうしたボーリング孔を改めて掘削するのは不経済であるため、これに代るものとして感天立坑を利用する。

すなわち、感天立坑の坑壁に深さ方向にピックアップを設置し、坑口又は坑の最下端付近で発震し、鉛直方向に伝播する波動を観測して、その振巾より Q 値を求める。ピックアップの間隔は $5 \sim 10 \text{ m}$ 程度とし、震源は P 波用として火薬又はハンマリング、S 波用は板叩き震源などを用いる。本計測は振幅を扱うため使用するピックアップは特性のそろった精度の良いものとすることが必要である。

2) 解析方法

観測データの解析は最大振幅を用いるほか、波形のフーリエ解析から周波数毎の Q 値を求める方法が一般的である。

以上の Q 値計測は出来れば各岩種毎に行うのが望ましいが、これまで他地点での計測結果から見ると、種々の要因からデータにかなりのバラツキが生ずるのはある程度避けられないため、岩種又は岩級毎に Q 値を特定することはかなり困難と思われる。しかし、この調査により当該地点の岩盤の代表的 Q 値を知ることが出来れば、地震観測データの解析に非常に役立つと考えられる。

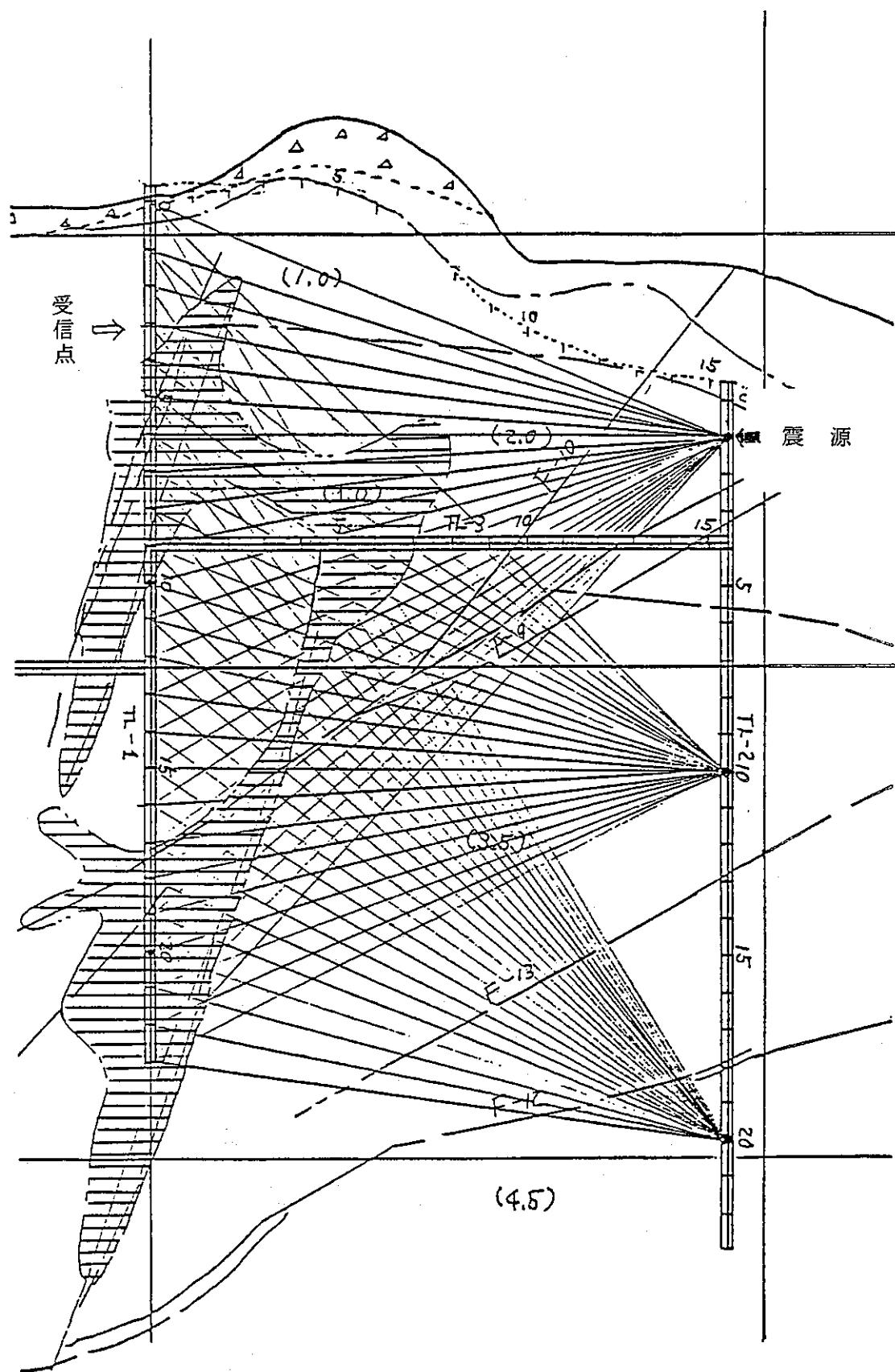


図 5 - 1 坑道間弾性波試験の一例

図中の直線は波が直進するとした時の波線

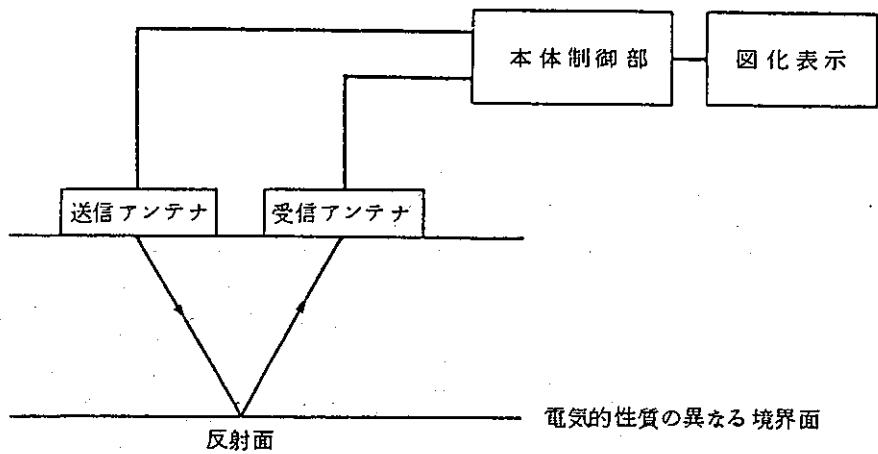


図 5-2 ジオレーダーの概要

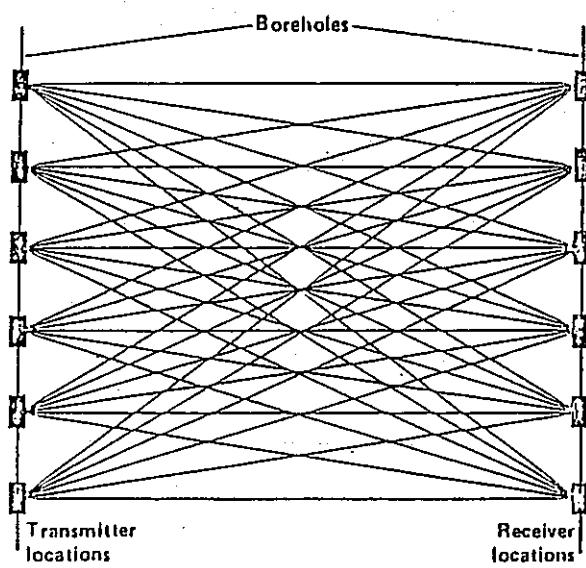
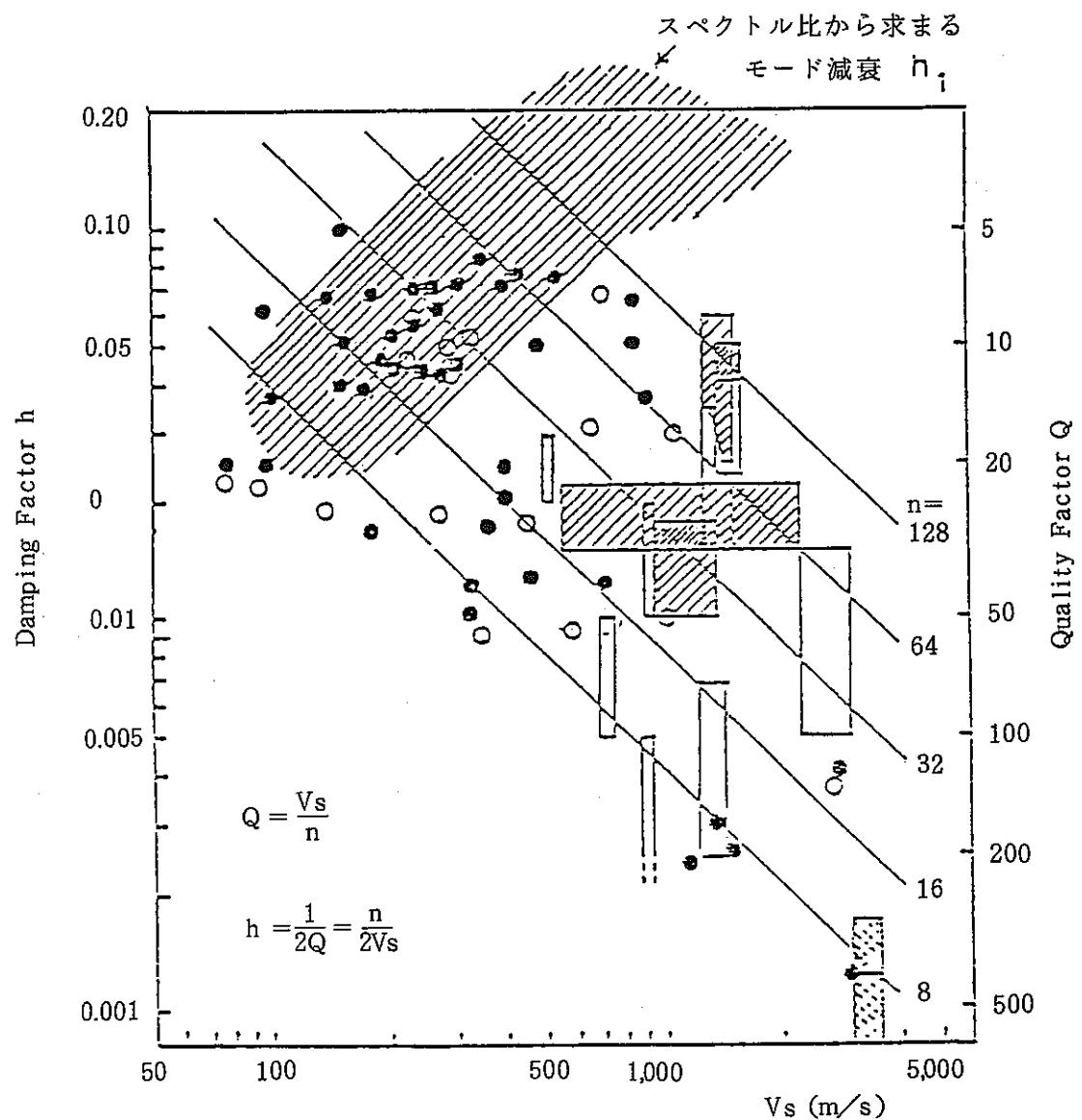


図 5-3 ジオレーダーによるクロスホール測定



- : 「地震動と地盤」より（工藤に加筆）
 - : S 波検層の直達波による } いわき・富岡（嶋、太田他）
 - ▨ : 地震動の直達 S 波による } いわき・富岡（嶋、太田他）
 - ▨ : 地殻の Q 値による（海野、長谷川）
 - ▨ : 地震動の平均增幅スペクトルによるモード減衰 hi (太田)
 - : 地表と地中地震動記録のスペクトル最適化法による（石田ほか）

図 5-4 弹性波探査または地震波の分析による減衰定数と Vs の関係とスペクトル比から求まる減衰

5.3 原位置岩盤特性調査計画

地下における地震動特性とその空洞への影響を解析するためには、地下の岩盤の力学特性を知らなければならない。特に、地震計設置箇所付近の岩盤の動的力学特性を知る必要がある。空洞の安定性解析のためには、岩盤の強度特性や地山応力を知る必要がある。また、地層の隔離性能の検証のためには透水性も重要なファクターである。

地震波の伝播や安定性および水の挙動に、岩盤中の鉱脈や断層等の割れ目の影響が大きい。これらの割れ目については、現地における精密な割れ目分布調査や原位置岩盤試験のデータが必要である。原位置岩盤試験法としては、通常、大規模な平板載荷試験、原位置せん断試験、原位置三軸試験、動的繰返し載荷試験、水室試験、断層せん断試験、スリットジャッキ試験などが行なわれている。現実の岩盤の性質を可能な限り正確に知るために、大規模な試験が必要であるが、今回は、スケールは小さくなるが、多様なデータが比較的手軽に取得できるボーリング孔を利用した原位置試験を実施し、観測データ解析のためのデータを得る計画を提案する。

自然地震の波動は、ほぼ下方から到達すると見てよいので、測点1から測点5までは、測点付近から鉛直下方に40mのボーリングを実施し、また測点6から8までは鉛直下方に200mのボーリングを実施して、下記のような試験を実施する。

1. 物理検層

密度（ガンマ）検層（密度・空隙率）

P S 検層（弾性波速度）

キャリパー検層（応力方向、孔壁の強弱）

電気検層（破碎帶）

マイクロ比抵抗検層（透水性）

S P 検層（自然電位）

反射検層（割れ目）

中性子検層（含水率）

温度検層（温度分布）

自然放射能検層（放射能強度）

ボアホールレビューア（割れ目分布、方向）

2. コア観察

岩 質

割れ目頻度

割れ目方向

(コアは室内試験用試料として使用する)

3. ボーリング孔内試験

静弾性係数

破壊強度

クリープ

異方性

応力(2次元)

4. ボーリング孔内透水試験

透水係数

地震波の伝播に、断層帯および鉱脈採掘跡が大きな影響を及ぼすと考えられる。そのため、坑内の主要断層である昭光断層及び主要採掘充填跡を横ぎるように、50～100mのボーリングを実施し、上記と同じ試験を実施する。

坑内の採掘跡や坑道の影響の少ない地点を選び3方向のボーリング(各孔長さ40m)を実施し、水圧破壊法等複数の手法により3次元応力測定を実施する。

5.4 岩石試験計画

地震波伝播の解析及び地震の影響評価のために、各種物性値が基礎データとして必要である。このため、岩石試料を採取して、各種室内試験を実施する。室内試験試料は、やむをえない場合を除き、坑道掘削時の爆破の影響のない部分から採取する。

試料は、各地震観測点付近8個所、割れ目の少ない代表的岩石5個所以上、昭光断層等の断層破碎帶5個所以上、採掘跡充填物3個所以上から採取する。

試験項目は以下の通りとする。

密度

間隙率

含水比

吸水率

一軸圧縮試験(圧縮強度、静ヤング率、静ポアソン比)

圧裂試験(圧裂引張強度)

三軸圧縮試験(三軸破壊規準)

クリープ試験

P波速度・S波速度(動弾性係数)

振動三軸試験(動弾性係数、減衰定数)

透水試験

透気試験

岩石化学成分分析

岩石テクスチャー観察

6. 地層の隔離性能に及ぼす地震の影響評価手法の検討

地震によって発生する可能性がある岩盤の静的相対変位、とくに伸縮・傾斜の測定及びそれによって発生する地下水挙動の変化を観測することは、地層の隔離性能を検討するための重要な事項である。

また岩盤内あるいは坑道周辺のかなり微細なクラックや弱層の分布を何等かの方法で詳細に調べる手法を確立することも必要となろう。

この章ではこれらの手法の中から、岩盤の歪と傾斜の観測および地下水の水量・水質の観測をとりあげ、前者については6-1岩盤挙動観測法として、地震予知のために使用されている観測設備とそれから得られた成果について述べた。後者については、6-2地下水挙動観測計画として、直ちに坑内で適用可能な具体策を提案した。

6.1 岩盤挙動観測法

岩盤挙動の観測の中で歪・傾斜の連続観測は、固体地球物理学及び地震予知研究において重要な研究・観測対象になっている。これらの観測は時間的に連続したデータが得られるために、固体地球潮汐による歪・傾斜変化及び地震前後の歪・傾斜変化の観測を主たる目的とする。また高精度・高密度の観測網を広域にわたって展開することにより、サイズモテクトニクスを議論する上で重要なデータソースとなり得ると考えられており、既に全国のいくつかの大学では地震予知計画のもとで地殻活動総合観測線が設置され、その実現を目指している。さらに時間的には数年のオーダーの極めて離散的なデータしか得られない測地測量（三辺測量、水準測量等）の相補的なデータを提供するものとしても重要であると考えられる。以下では歪・傾斜変動の観測方法、実際の観測におけるノイズ源、及びこれまでに得られた成果について述べる。

6.1.1. 歪観測

歪観測の方法として現在よく用いられている方法には2通りの方法がある。それは山腹に掘った横坑に棒形式の伸縮計（歪計）を設置する方法と坑井（ボアホール）に体積歪計や3成分歪計を埋設する方法である。

横坑は気温や降雨等の気象変化の影響を極力避けるために、なるべく急傾斜の山腹に深く掘り山体のかぶりを厚くする必要がある。実際の観測専用の横坑の平面図の例を図6-1に示す。このように工事費用との兼ね合いから100m前後の奥行きをもつ観測坑が多い。

図6-2に棒形式の伸縮計（歪計）の原理を示す。横坑内の数m～数10m離れた2点A、Bの岩盤上に固定台を設置し、標準尺となる棒をわたし一端を固定する（図ではB側）。応

力場の変化に伴い観測坑付近の岩盤が変形すると A B 間の距離、既ち固定台 A と標準尺の相対的位置が変化する。この微小な変位を変位センサで電気信号に変換するものである。標準尺は、固定台 A B 間の途中数ヶ所で支持されるため、それらと標準尺の間に摩擦力が生ずる。従って標準尺の材質には弾性定数の大きいもの、即ち剛性の大きいものが要求される。また坑内の温度変化による影響を避けるため、線膨張率が小さいことも必要である。以上のことから標準尺には溶融水晶又はスーパーインバー合金が用いられる。変位センサとしては非接触の測定が可能な差動トランジスタや磁気信号検出器（商品名：マグネセンサ）等が用いられ、測定限界は $10^{-2} \sim 10^{-3} \mu\text{m}$ である。従って A B 間の長さを 10 m とすれば $10^{-9} \sim 10^{-10}$ strain の歪変化が検出できる。

3 次元の歪場は 9 個のテンソル成分で記述され、さらに媒質（ここでは岩盤）の等方性を仮定すると 6 個のテンソル成分で記述される。従って独立な 6 成分の歪の観測により 3 次元の歪場が求まるが、通常は図 6-1 に示したような横坑内において水平面内の 3 成分の歪観測を行い、水平面内での 2 次元歪場を求めることが多い。場合によっては、さらに鉛直成分の 1 成分を観測し後述する水管傾斜計のデータと組み合わせて 3 次元の歪場の議論を可能にすることもある。固定台 A B 間に断層や破碎帯等の不均質性が存在する場合には外部応力に対して A B 間が一様には変形しないことが予想される。このような場合には途中の数ヶ所に別の固定台を設置して標準尺との相対変位を観測し、その変形挙動を明らかにする試みがなされている。

標準尺として溶融水晶等の固体の棒を用いるかわりにレーザー光の干渉を利用したものもあるが、コストや長期間の保守の面で難しい点があり、あまり実用化されていない。

坑井型の体積歪計の原理を図 6-3 に示す。図のような断面をもち、内部にシリコン油を満たした直径約 11 cm、長さ約 4 m、肉厚 3 mm のステンレス製の円筒状の容器（受感部）を 50~200 m のボーリング坑内に埋設する。この際容器と周囲の岩盤とのカップリングをよくするために膨張セメントで固着させる。周囲の岩盤が収縮すると体積 V の受感部は図のように ΔV だけ体積が減少する。この体積変化は容器上部のベローズを Δx だけ押し上げる。この Δx を変位センサで検出し体積歪 $e = \Delta V / V = C \cdot \Delta x$ を求める（C は容器、ベローズ、シリコン油の弾性定数等に依存する比例定数）。この型式の体積歪計の測定限界は 3×10^{-11} strain である。この歪計では 1 成分（体積歪）のみしか観測できないが、図 6-4 で示すように受感部を 3 つの部分に分割し、各部分の体積変化を観測する。こうすることにより 3 成分の伸縮計による観測と同様に水平面内の 2 次元歪場が計算により求められる。

6.1.2 傾斜観測

傾斜観測の方法にも横坑式と坑井式の 2 通りがある。横坑式では水管傾斜計が用いられる。

図 6-5 にその原理を示す。横坑内の距離しだけ離れた 2 点に各々円筒形容器をおき、その間を連通管で結んで容器に水を満たし、両方の容器間で水が自由に行来できるようにする。2 つの容器内の水面は常に水平面を形成するから地盤が傾斜すると容器内の水位が変化する。この変化を検出して傾斜量に変換する。水位の変化は従来は人間が坑内に入り直接読み取っていたが、最近では容器内にフロートを浮べフロートと容器の相対位置の変化を変位センサで検出する方法がとられることが多い。伸縮計の場合と同様に $L = 10\text{ m}$ とすれば傾斜量の測定限界は $10^{-9} \sim 10^{-10}\text{ rad}$ である。実際の観測は図 6-1 で示したような横坑内に 2 成分又はそれ以上の成分の水管傾斜計を設置し傾動ベクトルが決定できるようにする。その他の横坑式の傾斜計としては水平振子傾斜計等があるが現在ではあまり用いられていない。

坑井式の傾斜計には鉛直振子を用い振子の変位を直接測定したり、容器に固定したコイルに流す電流を制御し振子に取り付けた永久磁石との間に磁力を作用させて振子に働く重力とつりあうようにし振子の容器に対する位置を常に一定に保つようにフィードバックをかけて（ゼロ位法）、その電流の変化を傾斜量に変換する方法（図 6-6）等がある。

6.1.3 歪・傾斜観測におけるノイズ源

歪・傾斜観測におけるノイズ源としては以下のものが考えられる。

- (1) 温度・気圧の影響
- (2) 降雨の影響
- (3) 測定器のドリフト
- (4) 地震時における測定器の機械的なガタ

(1)については測定器そのものが受ける影響と観測坑周辺の岩盤の変形によるものとがある。(2)は岩盤の地下水位或いは含水率を変化させ変形をひきおこすものと考えられている。これらについてはノイズ源となる現象の歪・傾斜変化に対する影響関数を理論的或いは経験的に求めることによりかなりの程度までノイズの除去が可能になっている。また(2)については地震の前後でその影響関数が変化するとの研究結果が得られており（山内他, 1981），地震予知研究の立場からは逆に重要な信号源となり得る可能性もある。

(3)については歪・傾斜観測の周波数帯域が 0 Hz (DC) からであるために極力おさえる必要がある。そのためドリフトの小さい計器・電子回路の開発・選択と共に定期的に感度検定を行うことが必要である。(4)は地震に伴って観測される永久歪・傾斜 (strain step, tilt step) を議論する際には重大な語差を生じる。坑井用の歪計ではガタが少く、特に 3 成分歪計では strain step の解析においても理論計算から期待されるものとよく一致している（島田他, 1984, 後述）という結果が得られている。

固体地球潮汐による歪・傾斜変化は地殻変動の研究又は地震の前兆現象を検知しようとす

るときはノイズ源となるが、これについては理論的に予測がほぼ完全に可能である。海洋潮汐による荷重変化の影響についても最近では有効なソフトウェアが開発されており（佐藤・花田, 1983），そのシミュレーションが可能である。また、地球潮汐の振幅が地震前後に変化したとの観測結果が報告されており（Mikumo et al., 1977），この点についても注目していく必要があろう。

6. 1. 4 これまでに得られた主な成果

図 6-7 は東北大学の 5 つの地殻変動観測所で観測された 1977 年までのデータの解析結果から最大せん断歪の変化に見出された移動性地殻変動といわれる現象である（Ishii et al., 1978）。同図(b), (c)のように各観測点の最大せん断歪変化には顕著な位相の対応が見られる。移動性地殻変動の伝播方向を N 50 °W, 位相速度を太平洋側の 3 観測点（SNR, MYK, HMK）については 38 km/yr, 日本海側の NIB, OGA については 19 km/yr を仮定すると観測データの位相差を最もよく説明できること（同図(a)）が明らかになった。特に伝播方向が太平洋プレートの運動方向にはば一致していることが注目される。このような現象の発生機構については現在までのところ解明されてはいないが太平洋プレートと東北日本弧が属しているユーラシアプレート（北米プレートとの説もある）の相対的な運動及び相互作用との関連や大地震発生のトリガーとなる可能性等が考えられており、非常に興味深い現象である。またこのように非常にゆっくりした移相速度をもつ波動の存在は弾性論だけでは説明できず、弾性一非弾性のカップリング等による説明が試みられており、波動論の見地からも注目すべき問題である。

図 6-8 は東北大学の地殻変動観測網で観測された日本海中部地震（1983 年 5 月 26 日, M = 7.7）に伴った strain step から計算された主歪の分布(a)と地震のデータ解析から得られた断層モデルから期待される主歪の分布(b)である。6. 1. 3 で述べたように機械的なガタがあると考えられるため(a)はかなりばらついているが、大局的には(b)で見られる震央方向に沿った伸びのセンスを示しており、ある程度地震に伴った静的な永久歪変化を反映しているものと考えられる。

断層モデルから歪変化を計算する際には均質な媒質を仮定しているが実際の岩盤は深さ方向のみならず、横方向にも不均質性があると考えられる。また岩盤中には場所によっては多くの割れ目や多量の水も存在しており、単純な弾性論的な扱いでは現象をうまく説明できない場合もありうる。従って地震に伴う真の永久歪は(b)のような単純なパターンにならない可能性がある。特に地震に伴って地下水位の変化が観測された例が多いが、その原因として地震による応力の再配分によって地下水の流路が変わってしまうということが考えられており、上のことを示唆している。

図6-9は国立防災科学技術センターの茨城県八郷の抗井式3成分歪計により観測された地震に伴うstrain step (No.1, No.2は各々1号機, 2号機)と発震機構からの計算値($c/a/c$)である。図から明らかなように三者は、非常によく一致しており、この計器には器差がほとんどなく、また、Strain Stepを観測するには非常に優れた計器であることを示している。

地震前の歪・傾斜の異常変化については数く報告されているが、その中で最近の2例について述べる。図6-10は名古屋大学の三河地殻変動観測所において地震前の伸縮計による歪変化に見出された、降雨のレスポンス(影響関数)の異常の様子を示したものである(山内, 1985)。図中の最上部のデータ(Out put)は、最下部の降水量のデータをもとにして、長期間のデータから経験的に得られている降雨の影響関数(タンクモデル)を使って計算した予測される歪変化である。観測点近傍のある地域内で地震が発生しないときは、この予測とデータとはよく一致している(同図(a))が図のように、 $M = 3.4$ ($\Delta = 21\text{km}$)と $M = 3.5$ ($\Delta = 16\text{km}$)が発生した際には地震の数日前から、Out putと歪変化(N E 20, N S 20)は大きくくい違っている。このような現象についての物理的な解釈としては以下のようなことが考えられている。即ち地震に先駆した震源域での応力レベルの増加が観測坑付近の岩盤にまで波及し、透水率の変化をきたし、降雨レスポンスが変化する、というものである。このような例は1973年から1983年までの10年間に24例が報告されている。

図6-11は、東北大学の秋田地殻変動観測所男鹿観測点(OGA)の水管傾斜計による観測から得られた傾斜ベクトル図及び、この期間にOGA周辺で起こった地球物理学的なeventの分布図である。これをみると1970年後半の傾動方向の変化(北東から南東へ)や、1974年から1980年までの傾動速度の減速および方向の変化(南東から西へ)が顕著であるがそれと時を同じくして、前者については秋田駒ヶ岳の噴火(1970年9月)と秋田県南東部地震(1970年10月)、後者については鳥海山の噴気活動(1974年3月)、宮城県沖地震(1978年6月)、青森県岩崎の群発地震活動(1978年9月)が各々対応して起っている。従ってOGAにおける傾動はこういった地球物理学的なeventを何らかの物理的な機構により反映している可能性がある。図6-12は、同じくOGAの1975年9月から1985年7月までの傾斜変動を示している。1983年5月26日に、日本海側に起こる地震としては最大規模の日本海中部地震($M = 7.7$)が発生した。この地震の前の1975年から1980年にかけては上でも述べたように傾動速度は小さく、方向を南東から西へと変化していった。1981年から1982年末までの期間は、それ以前の2倍前後の速い傾動速度で西側へ傾動し、1982年から地震直前までは反転して東~北東への傾動を示し、地震に到っている。そして、地震後の2年間はそれまで顕著だった経年的な変化が完全に止まり年周変化のみを示している。

このように地震発生を境にして、OGAの傾斜変動の特性は著しく変化した。こういった現象は地震に先行した震源域近傍での応力集中に伴う大きな経年的傾斜変動と地震発生に伴った応力降下による経年変動速度の低下ということで、定性的な説明は可能であるが、今後の検討が必要である。

6.1.5 東北日本における地殻変動連続観測

図6-13は、現在、東北大学が東北日本に展開している地殻変動観測網の観測点分布を示している。東北日本を北西-南東に横断している帯状の地域は、地震予知計画により過去の歴史地震の震央や2つの特定観測地域、プレートの相対運動等を考慮して設置された東北日本地殻活動総合観測線である。約250成分にのぼる大量のデータは、NTTの電話回線を用いて仙台の地震予知観測センターに実時間で送られ統一的なデータ処理が行なわれている。これらの観測点では、計器のはほとんど同一規格の計器を用いており、長さの違いを除けばほぼ均質のデータが得られている。従って、観測点間・成分間の比較により、より多くの情報が得られると考えられる。

[参考文献]

- Ishii, H., T. Sato and A. Takagi, 1978, Characteristics of strain migration in the Northeastern Japan arc(I)- Propagation Characteristics -. Sci Rep. Tohoku Univ. Ser. 5, 25, 83 - 90.
- 坂田正治, 1985, ポアホール式計器による地殻変動連続観測, 測地学会誌, 31, 34 - 45.
- 佐藤忠弘・花田英夫, 1983, 海洋潮汐補正プログラム“GOTIC”, 日本測地学会第60回講演会要旨, 30 - 31.
- 佐藤春夫・高橋 博・山本英二・福尾信平・上原正義・寺沢康夫, 1980, 孔井用傾斜計による地殻傾斜観測方式の開発, 地震 2, 33, 348 - 368.
- 島田誠一・坂田正治・野口伸一, 1984, 3成分ひずみ計において観測された歪ステップと計器の精度, 地震学会講演予稿集(昭和59年度秋季大会), 227.
- 末広重二, 1979, 地殻変動連続観測と埋込式歪計(I), 測候時報, 46, 9 - 25.
- 友田好文・鈴木弘道・土屋 淳, 1985, 地球観測ハンドブック, 東京大学出版会, pp. 830.
- Mikumo, K., M. Kato, H. Doi, Y. Wada, T. Tanaka, R. Shichi and A. Yamamoto, 1977, Possibility of Temporal Variations in Earth Tidal Amplitudes Associated with Major Earthquakes, J. Phy. Earth, 25, 123 - 136.
- 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 2, 34, 301-310.
- 山内常生, 1985, 地殻変動連続観測による地震予知, 測地学会誌, 31, 59 - 72.

KITA-ABUKUMA (KTA)

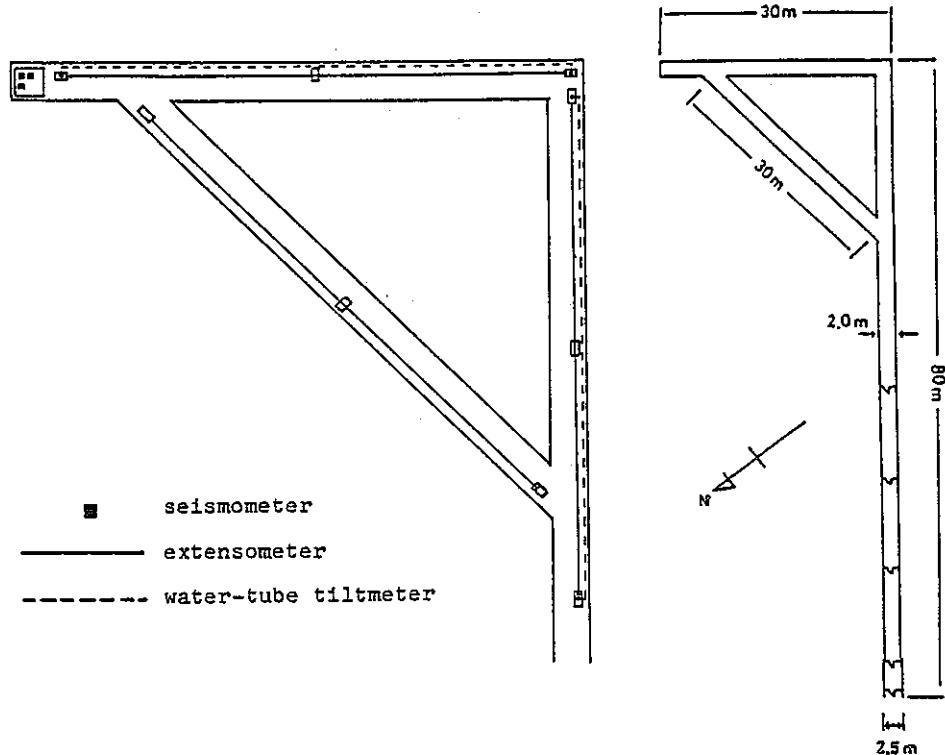


図 6-1 典型的な地殻変動観測用の横坑

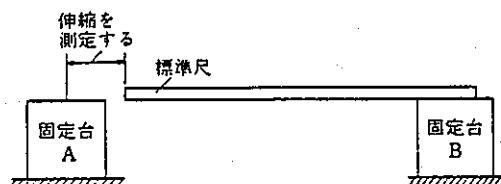


図 6-2 棒形式の歪計（伸縮計）の原理
〔友田・他, 1985〕

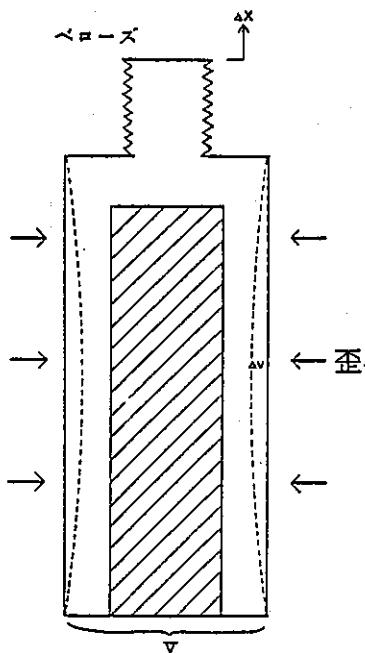


図 6-3 体積歪計の原理 (末広, 1979)

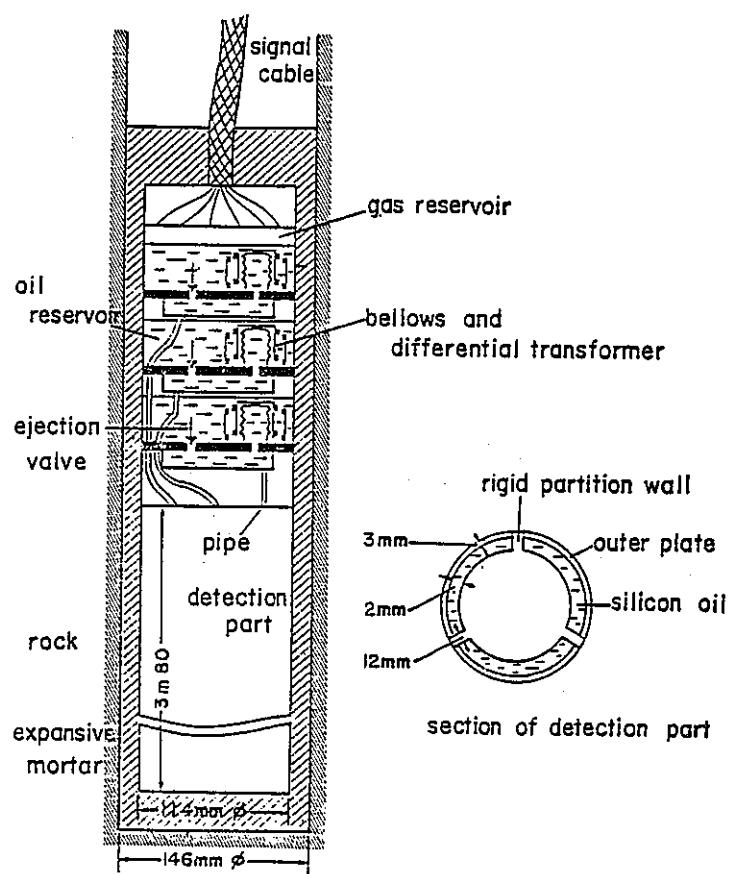


図 6-4 坑井型 3 成分歪計の原理 (坂田, 1985)

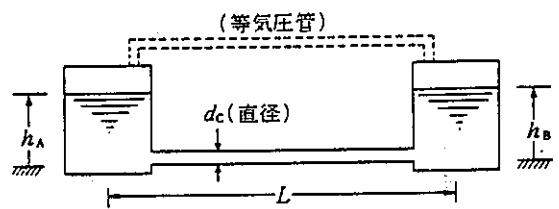


図 6-5 水管傾斜計の原理 [友田・他, 1985]

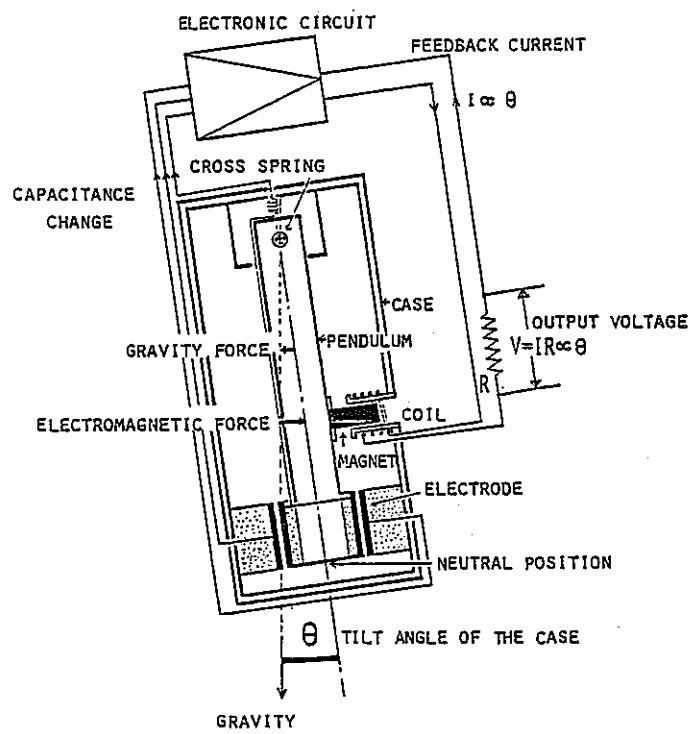
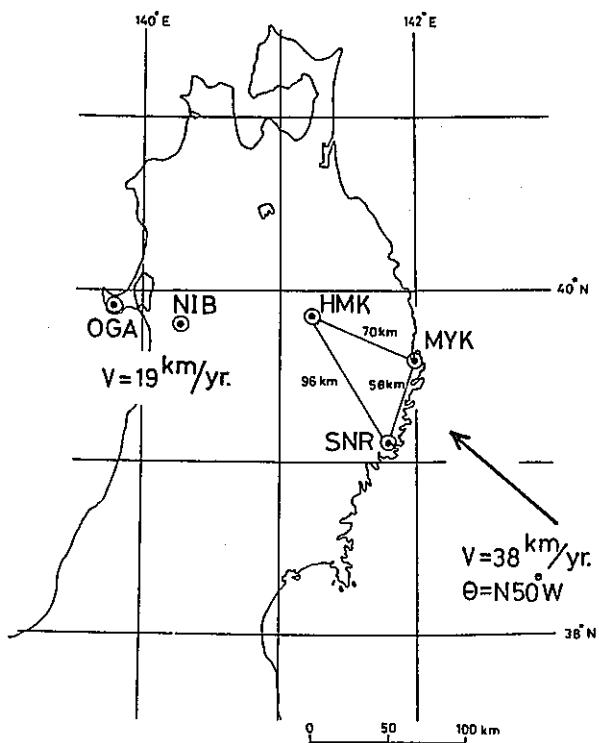
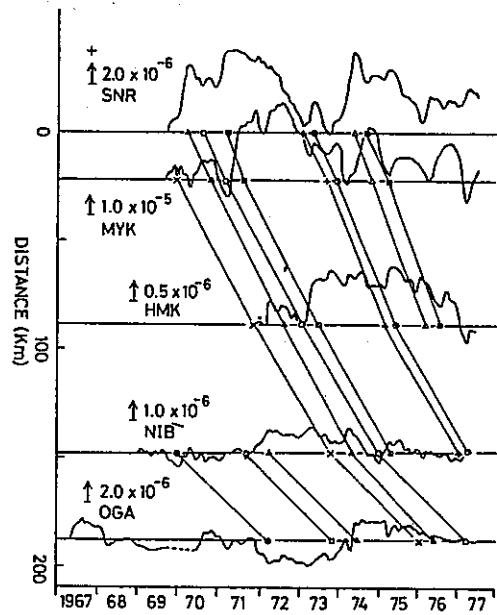


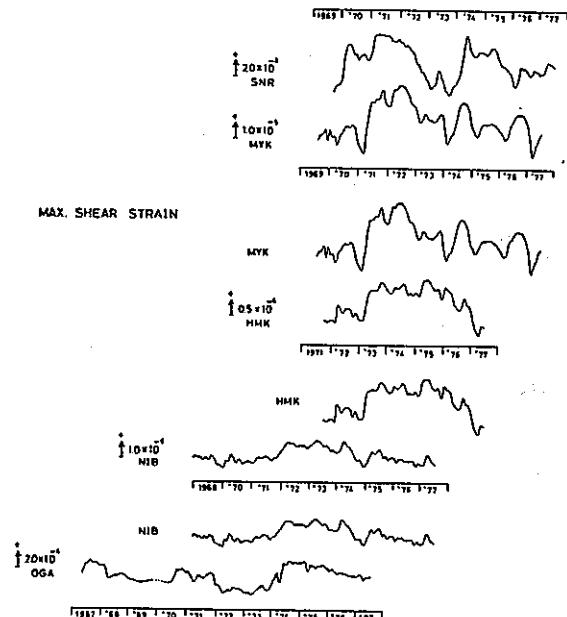
図 6-6 力平衡型振子式傾斜計の原理
[佐藤・他, 1980]



(a)



(b)



(c)

図 6 - 7

- (a) 伝播する最大せん断ひずみの速度と方向
- (b) 最大せん断ひずみの距離と時間の関係
- (c) 各観測点における最大せん断ひずみの比較 (時間軸は任意に移動してある)。

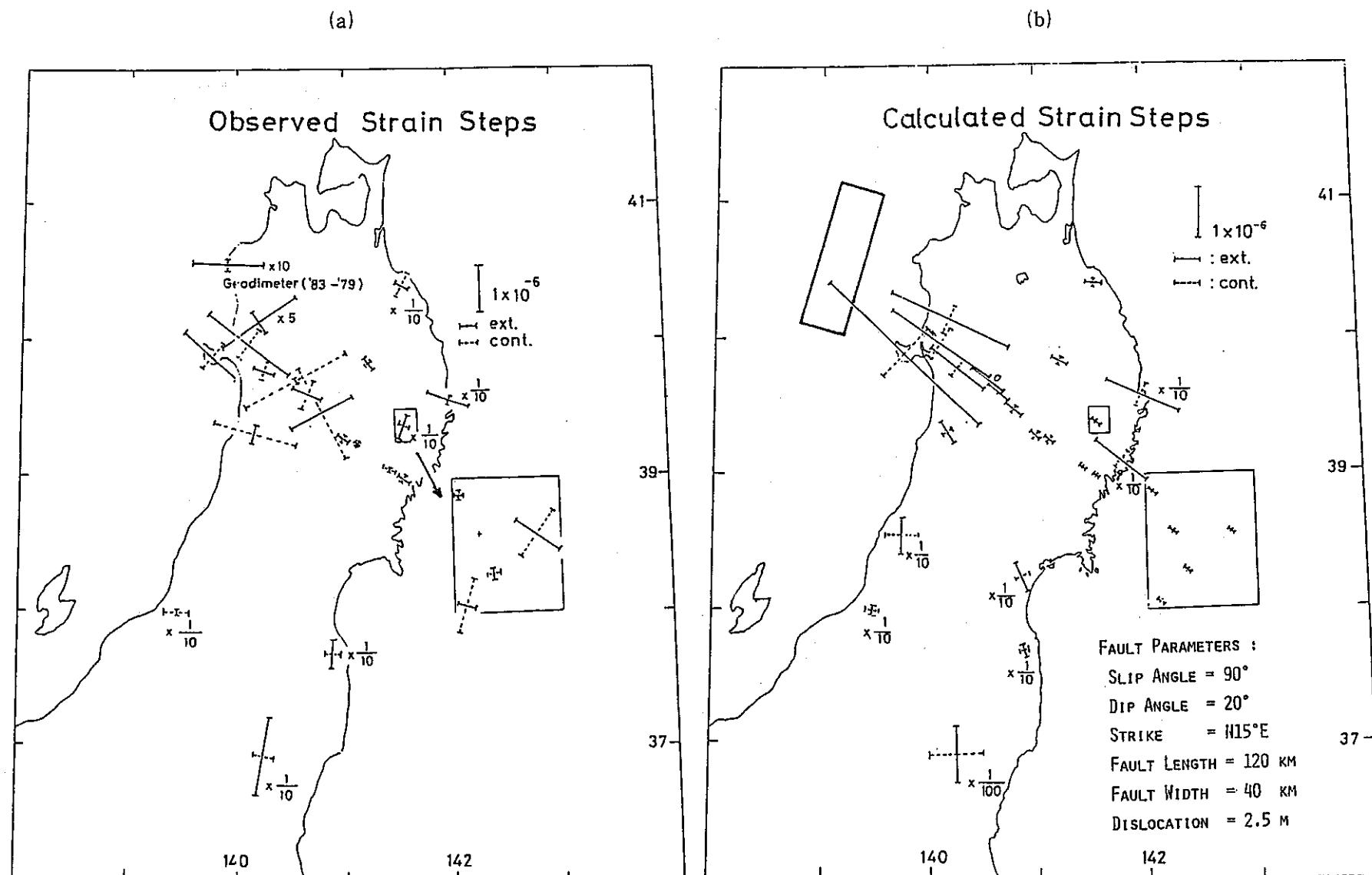


図 6-8 日本海中部地震に伴って観測された strain step から計算された主歪(a)と
断層モデルから期待される主歪(b)

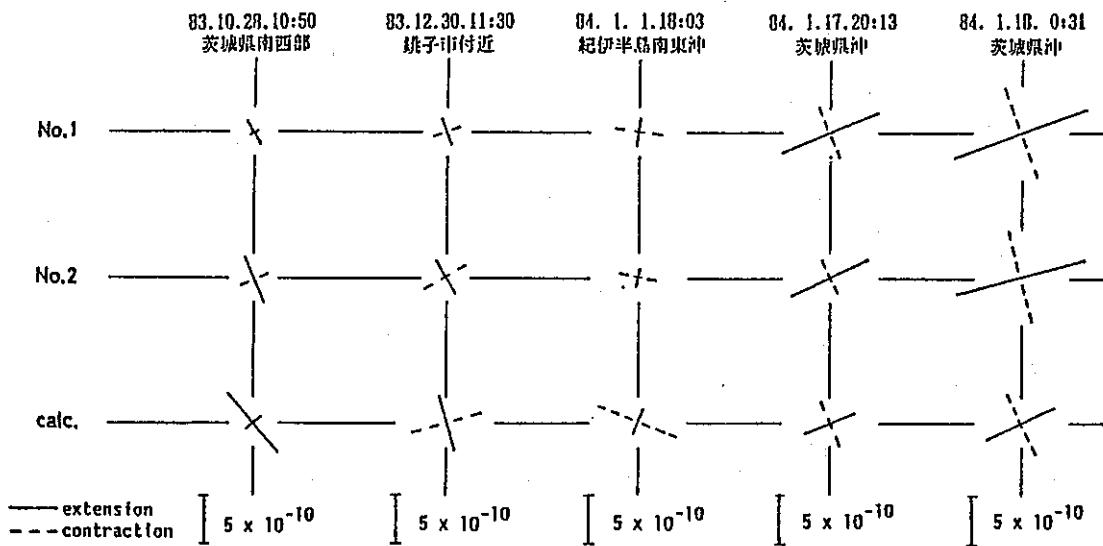
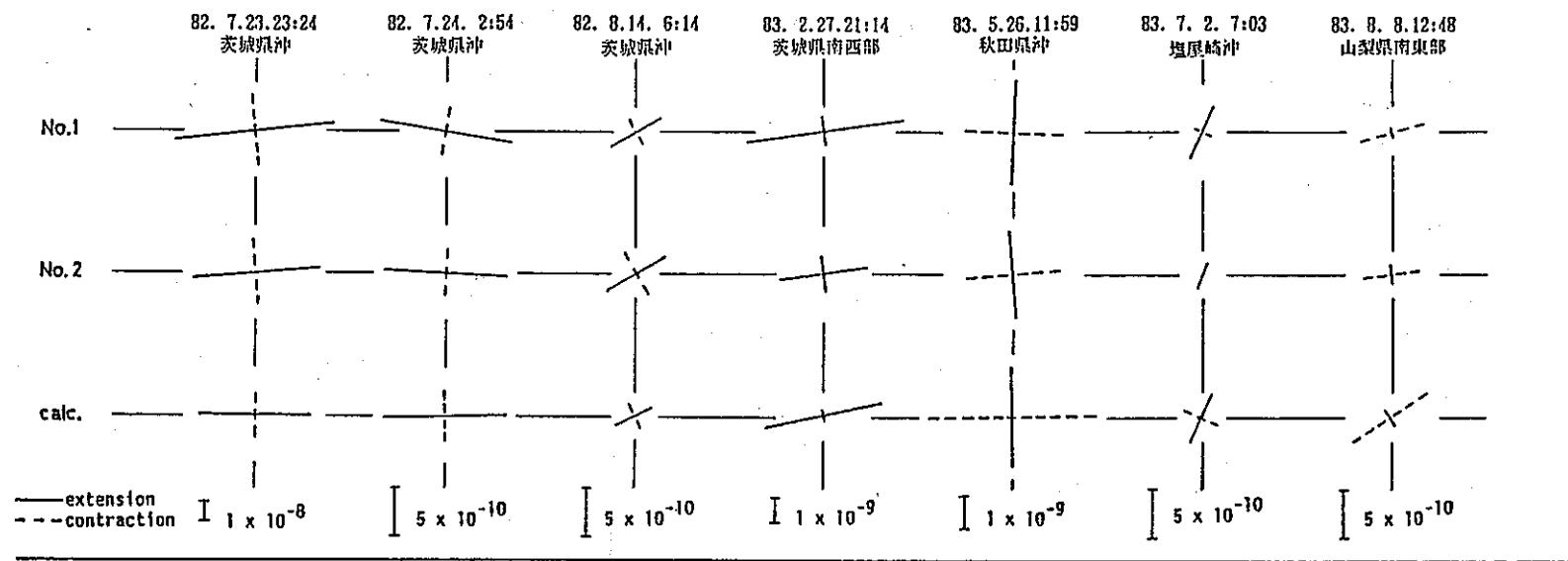
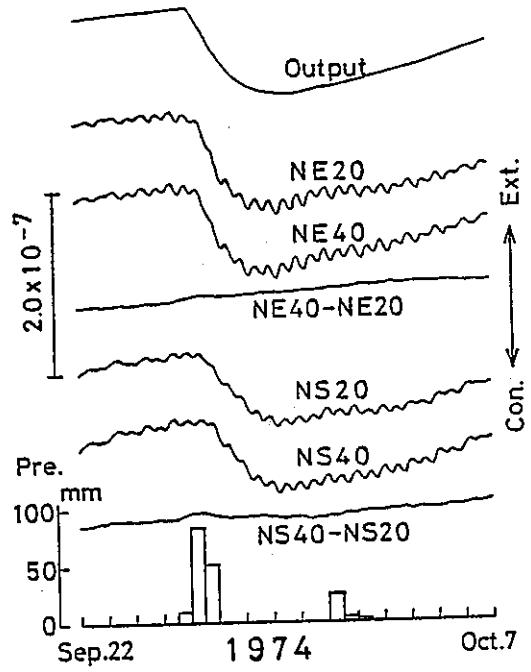
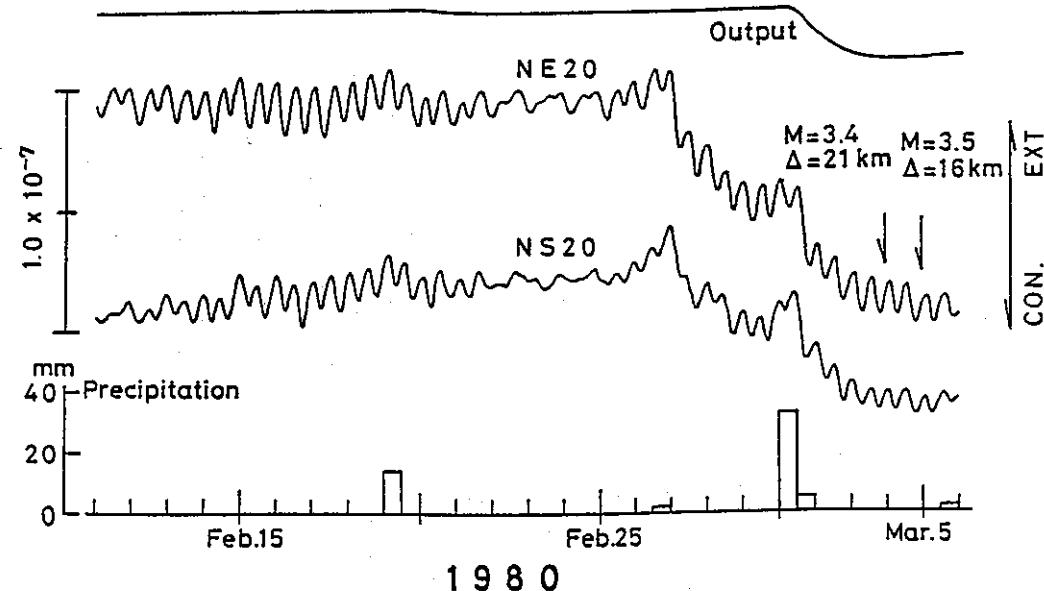


図 6-9 歪ステップの観測値と発震機構からの計算値



(a)



(b)

図 6-10 地震に先行した降雨レスポンスの異常
(a) 地震がない場合 (b) 地震前の異常
〔山内, 1985〕

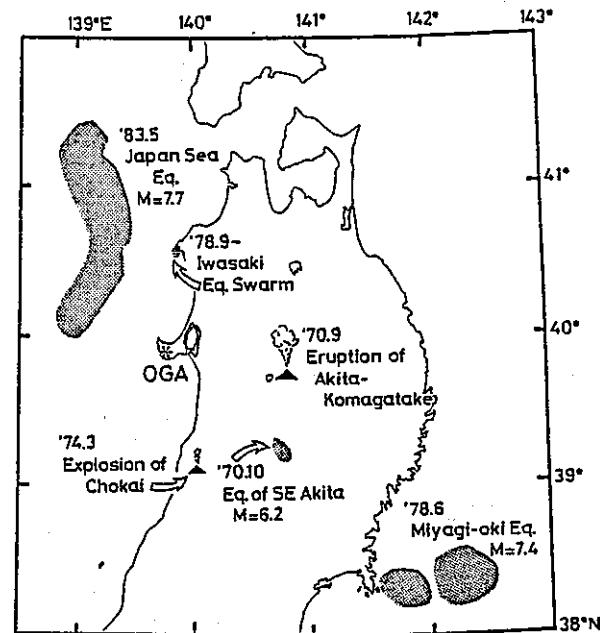
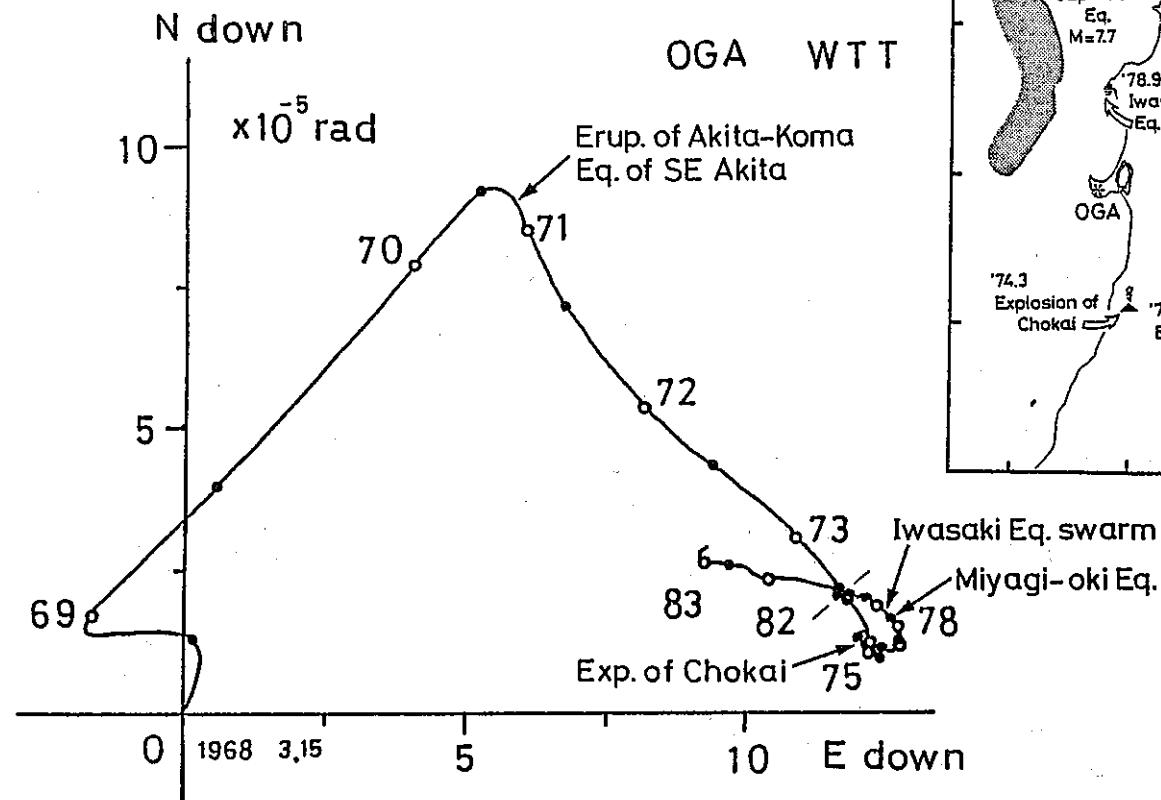


図 6-11 男鹿（OGA）における傾動ベクトルとその周辺に起きた地球物理学的イベント

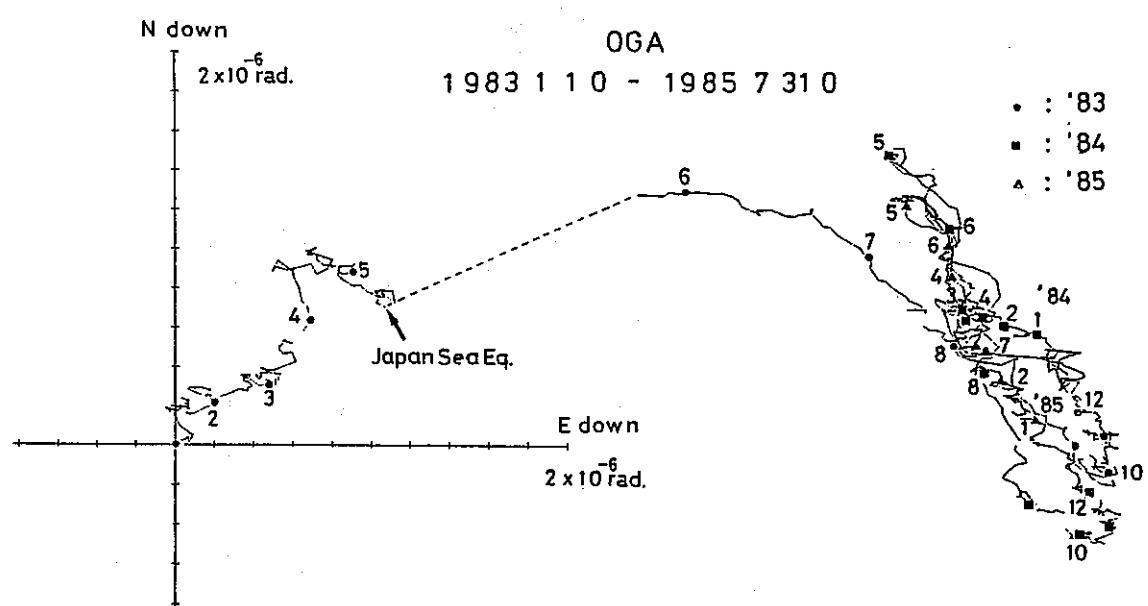
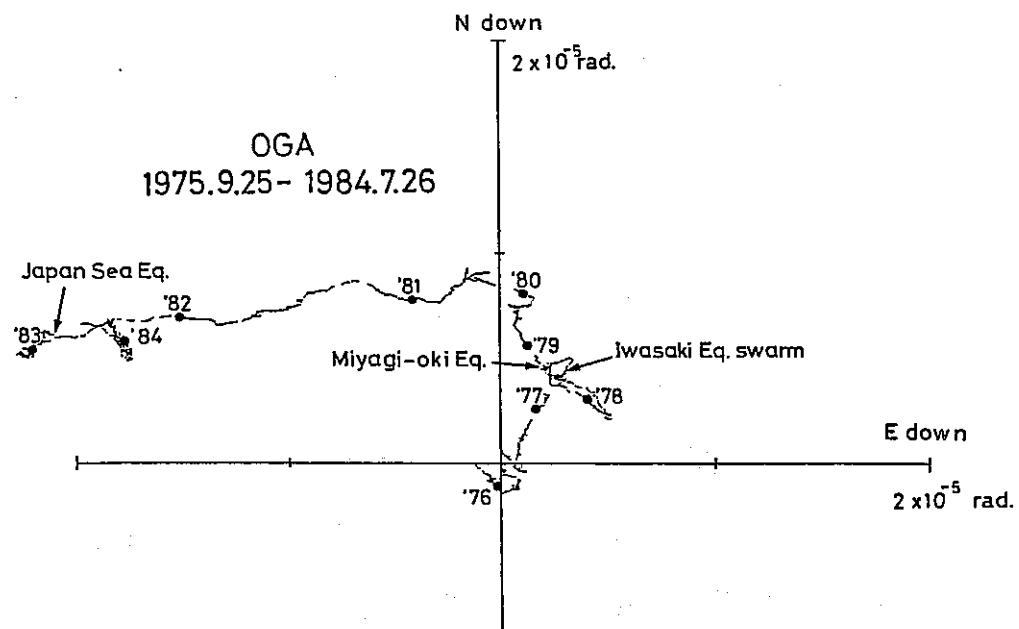


図 6-12 男鹿（OGA）における傾動ベクトル

Crustal Movement Observatory

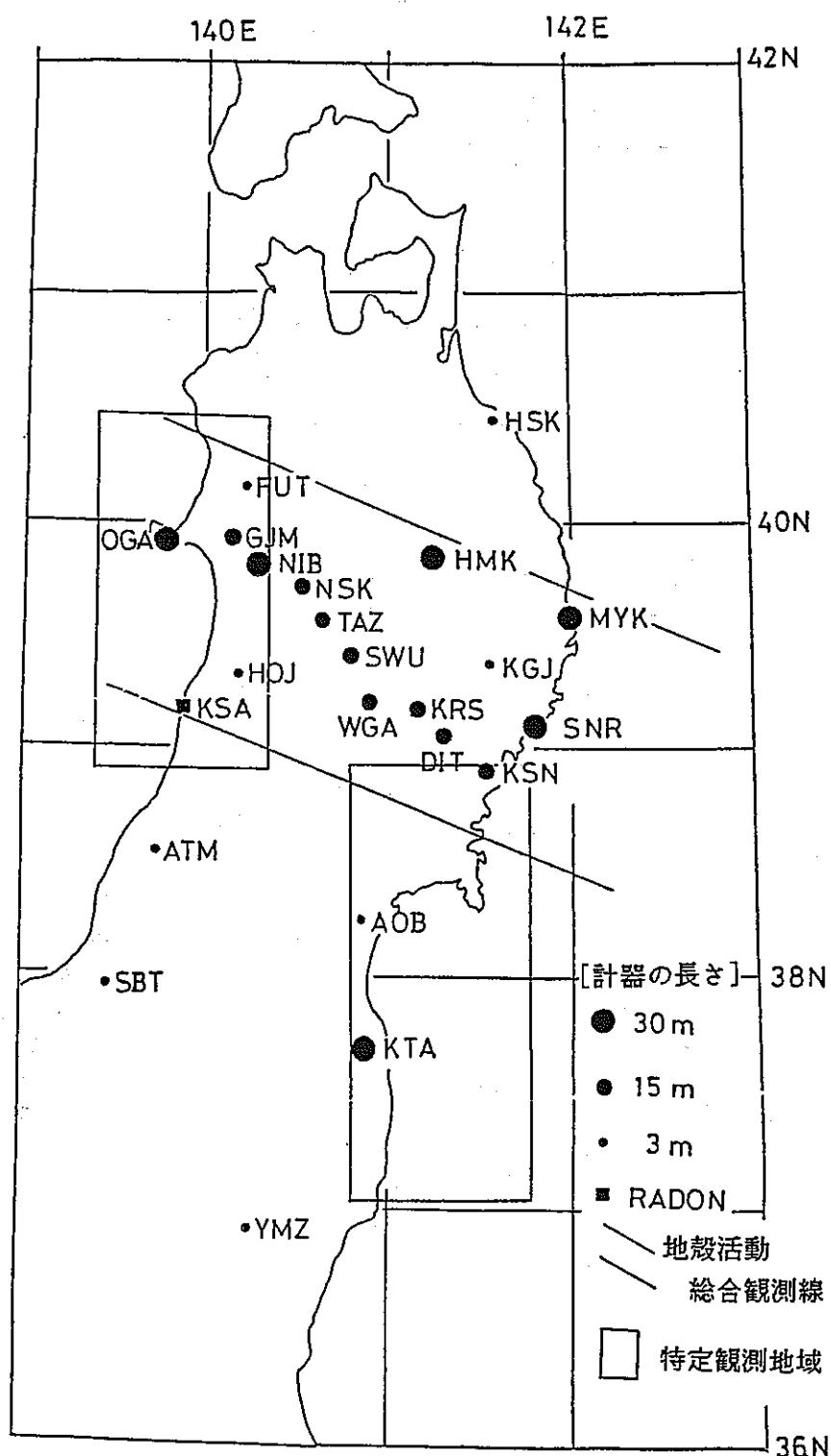


図 6-13 東北日本における地殻変動観測網

6.2 地下水挙動観測計画

6.2.1 はじめに

岩盤中の物質輸送は、地下水流れに乗って移動する、いわゆる移流と拡散によって行われる。一般にいって、拡散による輸送は、移流による輸送に比べてはるかに小さいと考えることができる。実際、拡散が移流より大きくなるような低透水岩盤では、ほとんど物質輸送は行らないといって良い。そのため、地震に伴う、岩盤深部貯蔵所の安全性変化の研究では、地震によって貯蔵空洞周辺の地下水流れの状態がどのように変るかを調べることに重点がおかねばならない。地下水流れの変化をとらえる方法として最も基本的なものは、空洞中への湧水量と水質を測定することである。ここでいう水質とは、一般的な各種イオン濃度の他に、濁度（SS）や溶存ガスなども含んでいる。地下水水質は、地下水供給場所、岩盤中の滞留時間等と評価する上で、極めて必要性が高い基本量である。さらにまた、従来から、地震に伴なって、SSやラドン（Rn²²²）、水素ガス、炭酸ガス濃度などが変化することが報告されている。たしかに、このような物質の濃度変化が、地下水の流れの変化とどのように結びついているかなどメカニズム的なことについては、まだわからないことが多い。しかしながら、報告されているように、活断層付近で種々のガス濃度の変化がみられることなどを考慮すると、流れ経路の変化をもある程度表現していると考えられる。そのため、本研究のためには、測定すべき基礎的な量といえる。

つぎに、湧水量の測定および測定量の評価にあたっての、一般的な注意点を示す。まず問題となるのは、空洞周辺の地下水が飽和状態であるか、不飽和状態であるかである。実際に想定されている貯蔵空洞周辺では、空洞が数百メートルの深部の岩盤中であることもあり、飽和している可能性が高い。しかしながら、今回対象とする細倉鉱山坑道では、過去、多数の坑道が掘られていることもあって、とくに坑道上部に大きく不飽和帯が広がっていると考えられる。岩盤中の地下水流れは、割れ目系に影響され、水みち的な流れが形成される。不飽和帯中では、空気の存在により、飽和帯以上にこの水みち的性格が顕著になる。また、地震という外力により、岩中の空気塊がどのように動くかの評価が大事となる。空気塊の形状は外力により極めて変化しやすく、結果として水みち形状を変える。したがって、その取扱いも2相流としての考察が必要となる。したがって、湧水量測定結果の評価、現状の地下水流れの性状評価にあたって、飽和帯とは異なった検討が必要である。この点、十分注意すべきである。

以下、湧水量測定、水質測定について具体的な提案を行う。

6.2.2 湧水量の測定

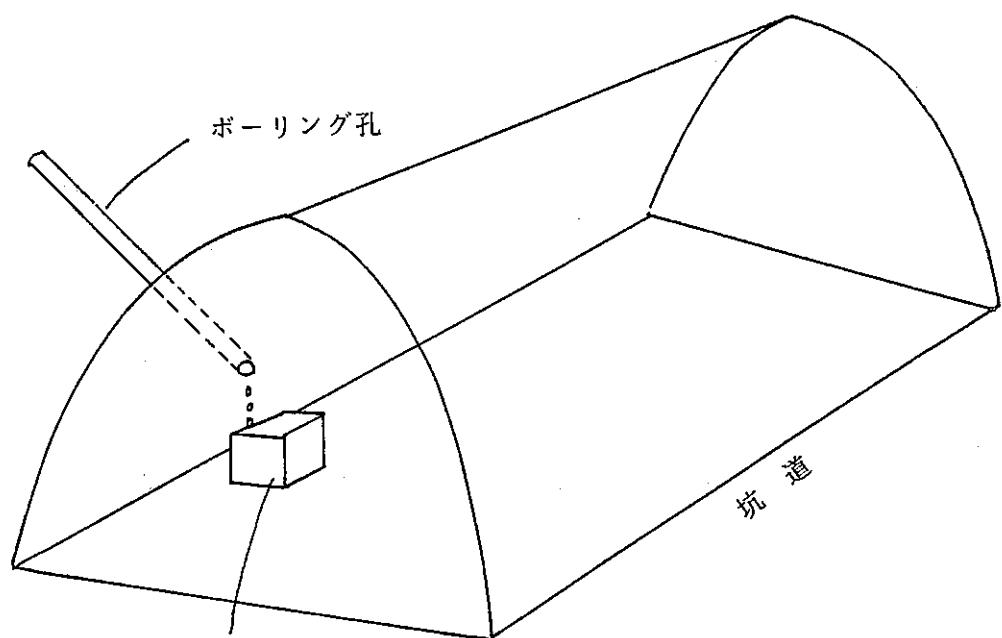
前述したように、岩盤中の地下水は割れ目系を主要経路として水みち的な浸透を行う。従

って、空洞中の湧水（滴水）は、通過してきた割れ目系の性質に強く依存する。地震のように外力に対して、割れ目系が変形するとそれに伴って、湧水量も変化する。この時、割れ目系の変形は一様ではなく、局所的に集中するなど場所的にかなり異なる。したがって、湧水（滴水）量変化も、場所的にかなり異なることが考えられる。実際、土被り2～300mの調査横坑各所からの数cm³/s程度の滴水量を連続測定した所、場所により地球潮汐の影響のうけ方にかなり大きな差異がみられた。地震によっても同様なことが考えられ、1つ1つの場所、あるいは割れ目からの湧水（滴水）をたんねんに連続測定することが重要である。

このため、湧水量測定は、坑壁に数m～10m程度のボーリング孔を多数あけ、それから流下する流量、あるいは、坑壁から滴水する水を桶などでうけ、各々について観測する必要がある。具体的な観測法を図6-14、図6-15に示す。

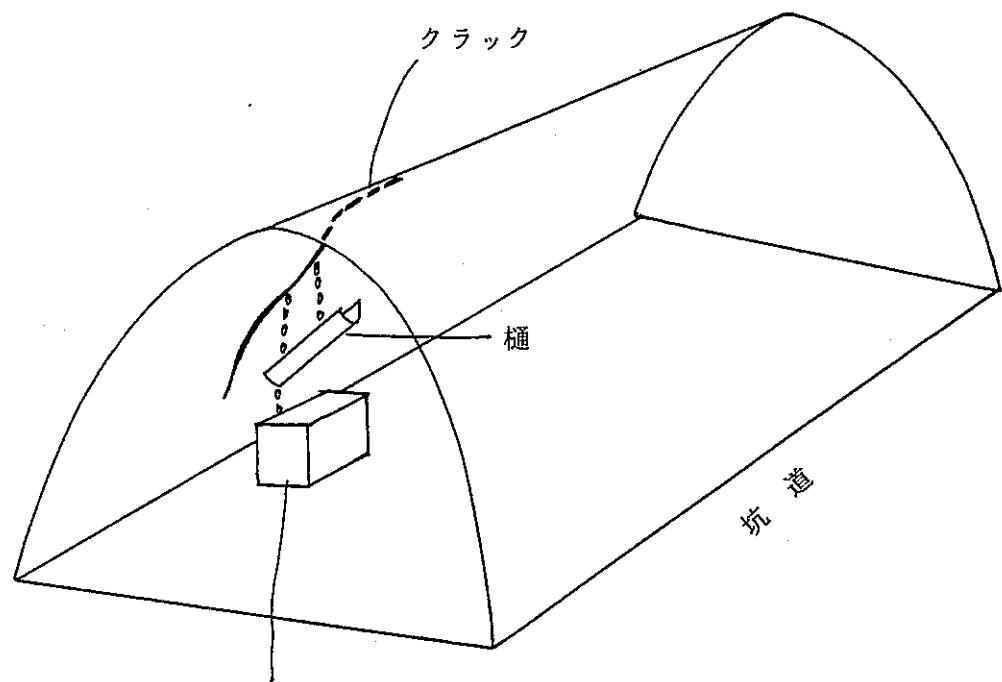
6.2.3 水質測定

水質調査項目は大きく分け、2つに大別しうる。その1つは、電導度、pH、濁度（SS）など、水質の全体的な性質を表現するものである。他は、ラドン、水素、炭酸ガスなど最近地震予知との関連で注目されてきているものである。電導度、pH、濁度、およびCa⁺⁺、Mg⁺⁺、Na⁺、K⁺、HCO₃⁻、などいわゆるメジャーイオンについては、6.2.2で述べた各湧水測定点ごとに明らかにしておくことが必要である。また、電導度は降雨の影響と判定するのに使うことができ、一方、濁度は、地震に伴って地下水が濁ったなどの報告と考慮すると、連続、少なくとも定期的に測定しつづけることが必要である。



転倒マス型湧水量測定器

図 6-14 ボーリング孔による計測模式図



転倒マス型湧水量測定器

図 6-15 桶による計測模式図

7. 観測データの解析計画

7.1 データ解析計画

地震観測の目的は、観測された地震波によって、地下深部の地震挙動を把握し、地下深部構造物の耐震安定性検討に資することである。観測された記録の解析ならびに耐震安定性的概略フローは、図7-1のようになる。

以下に図7-1のフローに従って概略の内容を記述する。

(1) 地震諸元の確認

観測された地震について、以下の地震諸元を気象庁資料、東北大学の地震予知連絡会資料にもとづいて確認する。

- (1) 発震時刻
- (2) 震央位置
- (3) 震源深さ
- (4) マグニチュード
- (5) 各地の震度
- (2) 観測記録の整理

地震波記録を以下の項目で整理、編集する。

- (1) 記録波形の再生
- (2) 必要に応じて各種フィルタリングによるノイズ除去の処理
- (3) 最大加速度の分布
- (3) 周波数解析

観測された地震波記録の内、解析精度が良好な波形について、以下に示す周波数解析を実施する。

- (1) フーリエスペクトル解析
- (2) パワースペクトル解析
- (3) 応答スペクトル解析（スペクトル強度算出）
- (4) 自己相関・相互相関解析
- (5) 各測点毎の振動特性解析（orbit、波形の合成等）

また、観測された波形は、加速度記録であることより、積分を行ない、速度・変位・波形に変換する。

以上の解析結果をもとに、各測点毎での增幅特性・位相特性および振動数特性について検討し、各地震毎の地震動特性を把握する。

(4) 地震動の伝播特性

観測地点における各測点間の振動特性に着目して以下に示す解析を実施し、地震動の伝播特性について検討する。

① 波動種別毎の分離

実体波、表面波成分の分離および各々の伝播特性を調べる。一般に、表面波は実体波と比べて次のような特徴をもっている。

- 1) 地表面に沿って伝播するので、地下深部に行くに従って振幅が減少する。
- 2) 一般に分散性を示す。
- 3) 一般に実体波成分よりやや遅れて到着する。
- 4) 実体波と比べ長周期成分が卓越し、継続時間が長い。
- 5) 粒子が梢円運動する。

ここで、地震動表面波を得るために、本観測地点内の多測点での同時記録より波動種別毎に分離を試み、実体波・表面波の各々の要因分析を行なう。

② 地震波の入射角、方位等の検討

①にて分離した実体波及び表面波を用いて入射角、方位、見かけの伝播速度等を求め、地殻構造・局所構造との関連性を検討する。

③ 地中地震動の特性把握

③にて求めた地中観測地点での各種スペクトル解析結果と地表観測地点でのこれらとを比較検討し、地下深部での地震動の挙動をさぐる。

(5) 最適地盤構造の同定

① 採掘跡、破碎帯の観測地震波への影響

地震観測を実施する細倉鉱山には、採掘跡、破碎帯が存在している。したがって、その影響を検討しておかなければ、細倉鉱山における地震観測結果を一般化することができない。そこで、地震観測地点近傍の地盤モデルを作成し、観測地震動に対する数値シミュレーションによって、採掘跡、破碎帯が地震動に及ぼす影響を検討する。なお、シミュレーションには、任意形状の不均質媒体内に発生する波動現象のシミュレーションプログラムである D A Y S - 2 コードを利用する。

② 地形の観測地震波への影響

観測結果を一般化するために、細倉鉱山近傍の地形が観測地震動に及ぼす影響を観測地震動に対する数値シミュレーションによって検討する。

(6) 地下深部構造物の耐震安定性の検討

地震観測より得られた地震動と観測地点付近の地盤特性、ならびに他の計測諸量との関連

性を把握し、地下深部構造物の耐震性安定性を検討する。

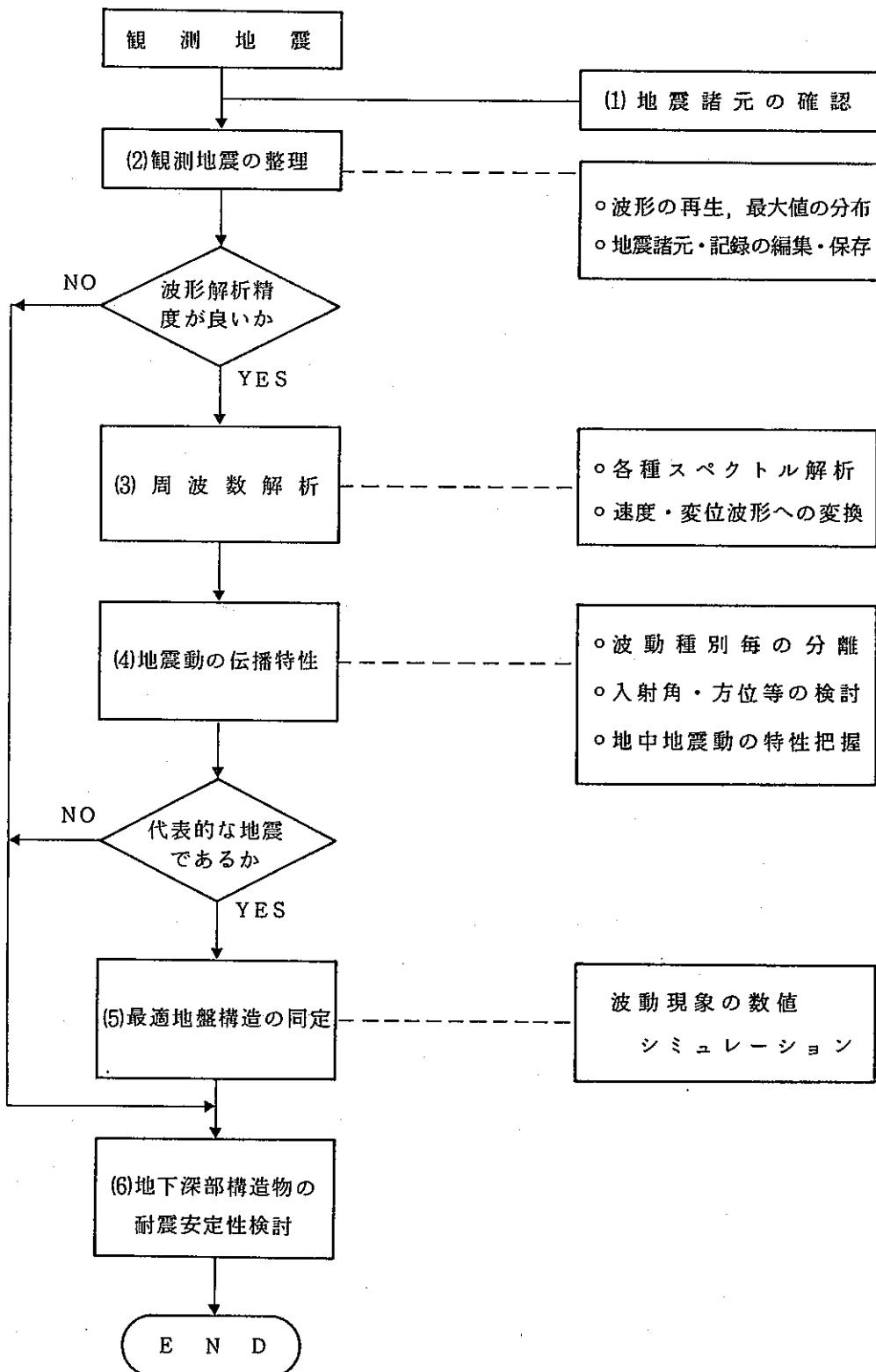


図 7-1 観測記録の解析ならびに耐震安定性の検討フロー

7.2 観測データの一般化

細倉鉱山の感天立坑を中心にして実施される地震観測によって得られるデータはその現場でのデータであるから、当然その現場の特性を含んだデータである。したがって、観測データを、その現場の特性が観測データに及ぼしている影響を検討すること無しに、他の現場の地震影響評価に利用するのであれば、その予測結果にはかなりの誤差が含まれてしまう。したがって、今回実施する地震観測で得られるデータに、どの程度の地域特性の影響が含まれているかについて検討し、必要であればその影響を除外して、データの一般化を行わねばならない。

観測データに影響を及ぼしている地域特性の検討は、モデル実験や電子計算機によるモデルシミュレーションによって行いうる。観測現場の模型を作成して実験的に検討するモデル実験は、そのためにかなりの費用が予測される。したがってまず、計算機によるシミュレーションを最初に行うのが順当であろう。

さて、観測データに影響を及ぼす地域特性としては、地形と地質構造（採掘跡を含む）をあげることができる。まず、地形の影響であるが、これはかなりの影響を及ぼすので、今回の地震観測地の選定に際しても、「できるだけ地表が平坦な場所」ということを念頭に置いて候補地の選定を行った。幸い、細倉鉱山周辺にはそれほど急峻な山は無いが、それでも平坦な地表の場合に比して、その地形がどの程度の影響を及ぼしているかについて検討しておく必要がある。

地形の影響を検討するためには、細倉鉱山周辺の地形をモデル化したモデルと地表が平坦な場合のモデルとについて行ったシミュレーション結果を対比すればよい。この場合には、地下は等方均質な弾性体と考えて差し支えない。地形の影響を検討するためのシミュレーションの方法としては、境界要素法（積分方程式法）、有限要素法、Dynamic relaxation 法などが考えられるが、どの手法がこの問題のシミュレーション手法として最も適しているかについてまず検討し、ついでその手法を用いて地形の影響についてのシミュレーションを実施するという手順が好ましい。

次に、地下構造の影響であるが、観測地域には昭光断層と呼ばれている断層が存在しており、さらに、観測地域内に存在している採掘跡は、この断層よりも大きな影響を及ぼす可能性もある。また、この現場近傍の速度分布特性の測定結果から、かなりの不均質性が確認された場合には、その影響についても検討する必要がある。採掘跡は厚さが 2 ~ 3 m ではほぼ垂直な板状をしており、その拡がりはかなり拡く、その内部にはスライム（細砂）が水力を用いて充填されているものが大部分であるが、厚さが薄くかつ上下盤が良好な場所では、砕（碎石）を投入して充填されているものもある。したがって、岩盤はこの採掘跡によって断

層破碎帯の存在以上に乱されているものと推定しうる。したがって、採掘跡が地震観測データに及ぼす影響の検討は、地形の影響の検討とともに、データの一般化のためにはどうしても必要となる事項である。この影響を検討するために実施する計算機シミュレーションは、問題が不均質媒体内の波動現象のシミュレーションとなるから、有限要素法か差分近似を用いる Dynamic relaxation 法が適当であろう。Dynamic relaxation 法を用いて不均質軸対称モデル内の波動現象のシミュレーションを行うプログラムとしては、我が国においては、D A Y S - 2 コードという計算機プログラムが作成されており、種々の条件の波動現象のシミュレーションがすでに多数実施されている。したがって、地下構造の影響の検討はこのプログラムを用いて実施しうる可能性がある。

第 5 章の観測地点の調査計画、に示されている各種の調査はいずれも観測データに及ぼしている地域特性の影響を検討するための基礎資料を得るために実施するものであり、上記の観測データの一般化の検討無くしては、観測データの価値は半減する。したがって、データの一般化手法の検討は必要不可欠な事項である。

8. あとがき

高レベル放射性廃棄物を地層処分する地下深部空洞、及びその周辺岩盤の長期耐震性を検討する目的で昨年度より調査研究を開始し、多くの有益な成果が得られた。本年度は昨年度に引きつづき、(1)地震観測地点の決定、(2)地震観測システムの設置、(3)観測地近傍の地震発生状況調査、(4)観測地調査計画の作成、(5)地層の隔離性能に及ぼす地震の影響評価手法の検討、(6)観測データの解析計画、の各項について調査研究を行った。得られた主な成果は下記の通りである。

(1) 地震観測地点の決定

昨年度の調査・研究の成果を踏まえ、細倉鉱山の感天立坑周辺を地震観測区域と決定し、その区域内の上1番坑の坑口に1測点(3成分)と坑内に1測点(3成分)、下3番坑に2測点(3成分)、下7番坑に1測点(3成分)、下10番坑に3成分測点1個所と上下動1成分測点を2個所、合計8個所の地震観測測点を決定した。なお、これらの測点は、3次元トライパタイトアレー観測が可能となるように配置されている。

(2) 地震観測システムの設置

上記の各測点に地震計据付台を建設し、その上に地震計をボルトを用いて固定するとともに、各地震計からの信号ケーブルを立坑内を経由して上1番坑坑口まで配線した。上1番坑には地震観測集録装置を設置するための観測小屋を建設し、その内部に観測装置一式を格納するとともに地震計と観測集録装置とを接続し、地震観測が実施しうるよう調整し、観測態勢が完成した。

(3) 観測地近傍の地震発生状況調査

昨年度は観測地を選定するために、日本列島近辺の地震発生状況の調査を行ったが、本年度は観測地が決定したので、細倉鉱山近傍の地震発生状況の調査を行い、将来どの程度の地震が発生する可能性があるかを検討する資料が得られた。

(4) 観測地調査計画の作成

観測データを汎用化するためには、観測データに含まれている地域特性の影響について検討し、地域特性を除去してデータを一般化する必要がある。そのためには地域特性を十分に把握しなければならない。そこで、観測地域の坑内構造、地質特性、速度構造を求めるための調査計画を作成するとともに、地震波の增幅、応答解析に大きな影響を及ぼす地盤の減衰特性の調査計画についても述べた。

さらに原位置岩盤の特性調査計画として、坑内ボーリングを利用して、物理検層などを行う計画および岩石試料の実験室におけるテスト計画についても立案した。

以上に述べた種々の調査計画は、概念的なものであり、調査を実施する場合は、より詳細かつ具体的な実施計画を作成する必要がある。

(5) 地層の隔離性能に及ぼす地震の影響評価手法の検討

地層処分における岩盤の隔離性能を評価するには、地震による岩盤の静的相対変位やそれに伴う岩盤の微細なクラックや弱層の変化等の所謂岩盤挙動を観測することや、深部処分空洞周辺の物質輸送を司る地下水流の変化すなわち地下水挙動の観測が重要である。そこでこれらの観測方法・観測計画について検討した。

(6) 観測データの解析計画

観測データの処理・解析法について検討するとともに、観測データを汎用化するための一般化手法について検討し、解析計画を作成した。

以上に今年度の研究成果を示したが、これらの成果を踏まえ、次年度以降には以下に示す研究業務を行うことを提案する。

- 1) 地震観測データの集積。
- 2) 地震観測データの処理と解析
- 3) 観測地域の地質特性、坑内構造調査
- 4) 観測地域の速度構造調査
- 5) 地層の隔離性能に及ぼす地震の影響評価を行うための調査地点の選定及び調査方法の具体案の作成。
- 6) 観測データの一般化手法の検討。

なお、岩石特性試験等は、予算を勘案して第4年度から開始する計画であるが、上記各種の調査についての優先順位、具体的な実施計画等については、61年度に開催する委員会の冒頭で検討する計画である。