

# 地下の収縮を測定する方法

## ～地盤沈下測定技術の開発～

佐野 凌一

### 1. 地盤沈下の観測

地盤沈下と呼ばれている現象には 廃坑の陥没によって家屋や道路に損傷を生ずるような場合も含まれるけれども 広範囲にわたって産業や市民生活に大きな影響を及ぼすのは おもに地下水や原油などの地下流体の汲み上げによって地層が収縮する場合である。

このような地盤沈下は 沖積平野上の都市やその周辺部のいたるところで大きな問題となっているといっても過言ではなく わが国では東京・大阪・新潟などで起きていることはよく知られている。

地盤沈下の研究の終局の目的は沈下機構を解明して対策を確立し 沈下を防止することにあることはいうまでもない。しかし まず第一に どこでどの程度の地盤の変動があるかを明らかにすることが必要である。さらに 地表面下どのくらいの深さの地層がどれだけ収縮しているかを測定して 沈下現象の実態を把握することが望ましい。

地盤の沈下量は 堅固な地層に基礎を置く建物やそのほかの建造物が 軟弱な表層の地盤に相対的に抜け上がる現象や 港湾の岩壁が海面にくらべて低下してゆく現象 あるいは 豪雨などによる浸水地域が拡大する様子などを把えて 計測し推定することができる。しかしもっと組織的な方法で沈下量を調査し 地層の収縮量をなるべく精密に測定することが望ましい。

地盤沈下が地域的にどのように分布しているかを調べるには 水準測量を繰り返し実施することが最も基本的な方法であるといえよう。水準測量をある期間を置いて2回実施すれば 水準点の比高の変化から沈下量の分布が求められ 沈下量の測量を繰り返した期間に対する

比として沈下速度が求められる。この場合 ある地域の水準測量を行なっている間に 沈下の激しい区域では測量の誤差以上に水準点が沈下してしまう場合があることに注意しなければならない。したがって 適当な仮定にもとづいて 問題にしている区域内の測量を 短期間にたとえば 1日で終わってしまったように補正をする必要がある。海岸の地盤と海面との相対的な高さの変化を記録する検潮器の観測結果を整理することも1つの方法である。海面は日々干満を繰り返し 気圧や水温の変化の影響で上下しているが ある長い期間の平均の海面の高さは一定で 地盤の高さの基準となる。水準測量で地盤の変動量を求めるときに どの水準点を動かないとみなしたらよいかを決める参考資料としても使われる。

平均の海面が 海流の変動によっても上下することは 筆者もかつて注意したことがあるし 近年の世界的な温度上昇によって北極圏の氷が融解し 海面が高まりつつあるという説も検討されている。しかし 海岸地帯の地盤沈下の被害は海面の相対的な上昇によっておこることが多いのであるから 海面上昇の原因如何にかかわらず 海面に対する地盤の高さの変化を測ることは重要である。

第2次世界大戦前においても 東京・大阪では著しい地盤沈下がおこった。そこで 地層の収縮状況を連続的に観測するために次のような装置が作られた。長い鉄管を地中に打ち込み 下端が固い地層に固定されるようにする。軟弱な地層が収縮すると 鉄管は地表の地盤に対して抜け上る。そこで 図1のように地表地盤にコンクリート台を置き その上に記録装置をおいて鉄管が台に対して抜け上る量を拡大して記録するようにするのである。このような沈下計は地層の収縮の時間的な変化を微細に記録し 単に一方的な沈下ばかりでなく 海水の潮汐・気圧変化・地下水位の変化などと相関が認められる週期的な変化が観測される。そして このような週期変化の研究は収縮に関係のある地層の物理的性質を研究して 沈下機構を解明する上に非常に役に立つ。

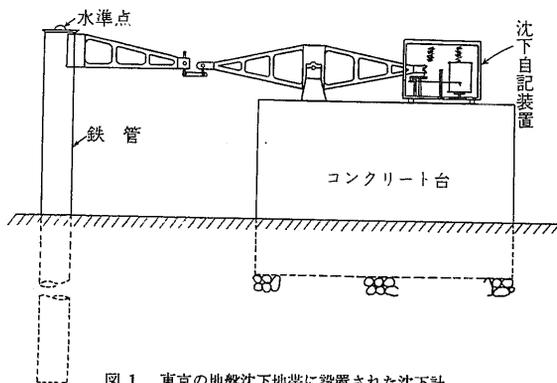


図1 東京の地盤沈下地帯に設置された沈下計

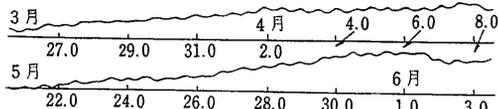


図2 沈下計の記録(東京深川 昭和14年)。

## 2. 二重管式観測井

昭和30年頃から新潟市において急激な地盤沈下が注目され、昭和32年から組織的に調査が行なわれた。新潟市の場合には地下水に溶解している天然ガスを分離するために帯水層から多量の揚水を行なうことが沈下の原因であろうと考えられた。このような帯水層は幾層にもわかれて分布し、深いものは数百メートルから千メートル以上の深さに存在しているので、東京・大阪の地盤沈下と異なって、収縮する地層が幾つにもわかれていて、非常に深いところでも収縮が起きている可能性がある。したがって、地層の収縮量を連続的に記録するために単に鉄管を打ち込むだけでは不十分で、いろいろな工夫が必要であろうということは誰でも考えるところである。一方、もし東京や大阪で作られたような地層の収縮観測装置をうまく設置することができて、これを1個所でいろいろな厚さの地層に適用することができれば、深さによって収縮量が変化するようすもわかることが期待される。そこで、どのような観測装置を作ったらよいかということが新潟市の地盤沈下の調査研究を調整する委員会でも十分討議された。

まず第1に、せいぜい3～40mの深さに鉄管を挿入する場合と異なり、地下数100mまで鉄管を入れると、鉄管のまわりに働く地層の圧力が大きくなり、鉄管は地層の収縮にともなって変形し、抜け上らなくなる。そこで鉄管を二重とし、外側の鉄管は観測のために掘った孔井の崩壊を防ぐケーシングとし、その内側に細い鉄管を立てて、内管の抜け上りを測定することにする。外管が地層の圧力のため押下げられ、内管がのっている地層を押下げてしまつては困るので、外管の下端の部分には自由に動くことができるスライド装置を取付ける。細い内管といつても数100mでは何トンという重さになるから、どんな地層の上においてもよいとはいえない。そこで帯水層である礫層の中に鉄管の下端を置くこととし、沈下量と帯水層の水位との相関が予想されることから、外管の下端の帯水層にかこまれている部分にストレーナを切つて、外管の中の水位が帯水層の水頭を示すようにする。こうして、内管の表層地盤に対する抜け上りと外管の中の水位とを連続的に記録する。抜け上り量の倍率は20倍である。

このような観測装置は“二重管式観測井”または“抜け上り式観測井”と呼ばれ、昭和33年以降おもに運輸省や通商産業省によって何本も設置された。とくに沈下の最も激しかった山ノ下地区では20mから1200mまで6本の異なった深さの観測井が作られ、これらの観測に

よつて求められた収縮量の差をとることによつて、ある深さから別のある深さまでの地層の部分的収縮量も求められ、地下のどこで収縮がおこっているかということも大体わかるようになったのである。

二重管式観測井は戦前から大阪や東京の地盤沈下の研究を行なつてきた和達博士や宮部博士の指導によつて衆知を集めて討議して作つたものであるが、それでも観測結果について疑問をもつ人がかなりあつた。したがつて、観測井を新しく増設するときに構造を幾分変えてみるというような試みもなされた。しかし、大きな問題点は、地層に観測井という孔をあけたことの影響がどのようであるかということ、また非常に重く長い鉄管の抜上りが地層の収縮を正確に表わすかどうかということで、全く異なつた方法で観測を行なうことも提案された。われわれは地層の収縮量の深度分布を測定することを主眼として異なつた方法を考え、“アイソトープ観測井”というものを開発した。この方法を説明する前にアメリカで行なわれている観測について紹介してみよう。

## 3. カラーカウント調査法

アメリカでも各所に地盤沈下が起つたことが報告されている。なかでもロングビーチ(Long Beach)市の地盤沈下はその規模が大きかつたこと、沈下が市街地でおこつたことなどにより、大きな問題となつた。そればかりでなく、調査および対策が適切に行なわれ、水圧入などによつてほとんど防止されるに至つたことなどで、わが国から見学に訪れた人も少なくない。ロングビーチはロサンゼルス南に続いている人口約34万の都市で、世界有数の港湾施設を有する。ところが1936年から港湾地区で石油の採取がはじまり、このウェリントン(Wellington)油田が全米第2位の産出量を記録する

に及んで、急速に地盤沈下が進み、1950年12月から1年間に72.2cmの沈下が測定された。沈下があまり急激におこつたので、ガス・上下水道管の破壊まで起つたという。市当局は沈下

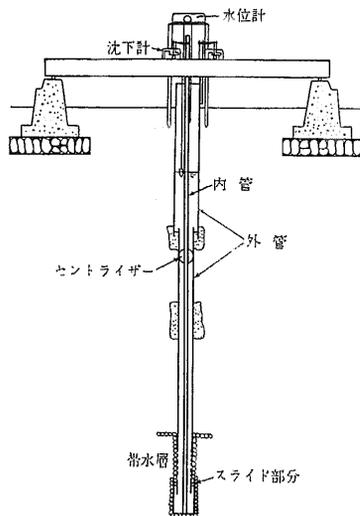


図3 二重管式観測井

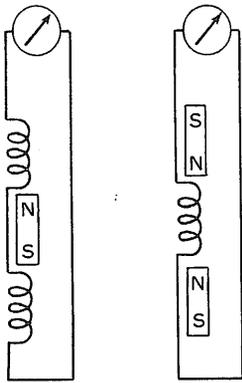


図4 ケーシングカラーロケーター  
にわけられ タール ゾーン (Tar zone)・レイインジャーゾーン (Ranger zone) などという名前では呼ばれている。これらの地層の収縮の状況を調べるために “カラーカウント (Collor Count) 調査法” という測定法が実施されている。この方法はケーシング ジョイント 測定とも呼ばれ コンサルタントのジャン ロー (Jan Law) 氏によって開発された。

さて 石油孔井 とくに試掘井では 採油のためにあらかじめストレーナを切った鉄管 (ケーシング) を挿入しないで 穴のあいていない鉄管を入れ 地層と鉄管との間に水止めセメントを注入固化してから ガンパーを油層の深さに下ろし 弾丸を発射して鉄管に穴をあけるのである。ガンパーの深度はなるべく正確でなければならないから 深度を正確にきめる一つの手段として 深度の基準として鉄管のつぎ目を利用するケーシング カラー ロケーターというものが使われる。

この構造は図4に示すように 巻方向反対の2つのコイルと中間に1つの磁石 または同極を向き合わせた2つの磁石とその中間に1つのコイルを組合わせた 簡単なものである。これを鉄管内で動かすと磁石の磁束が鉄管によって切られ 回路に電流が流れるが 一様な鉄管の中であれば 方向反対で強さの等しい電流が流れるため打消し合ってしまう。鉄管のつぎ目では ケーシングカラーのため厚さが増すため 電流の平衡がくずれ電流計がふれる。ケーシング カラー ロケーターは鉄管内でも測定できる放射能検層や温度検層と併用して深度基準として同時記録をすることもある。

深い孔井のケーシングは 前にも述べたように 地盤沈下地帯でも抜け上らない。これは鉄管が地層と同じように変形し 地層が収縮するところでは鉄管も収縮し鉄管のつぎ目の間隔は 短くなると考えられる。したがって カラー ロケーターを使って鉄管のつぎ目の深度をできるだけ正確に測定しておき ある期間において

再び測定を行なえば 2回の深度の測定値の差から鉄管の伸縮が求められ 地層収縮の深度分布もわかる筈である。そこで 長さ40フィートの鉄管を単位としてこの長さを正確にはかり 40フィート毎にケーシング カラーでつないで挿入し 水止めセメントを施す。既存のカラー ロケーターをガンパー用ケーブルにつけ カラーの位置をなるべく精密に求めるために ケーブルにすべらないように接触してケーブルの捲下ろしまたは捲上げと共に回転する測深用滑車の回転を セルシン モーターで電氣的に特別の測定装置に伝え カラーの深度を 0.01フィート (約3ミリメートル) の単位で自動的にタイプする。毎分10ないし15フィートの速度でケーブルを捲上げて測定し 測定結果が0.04フィート (約1.2cm) 以内で一致するまで繰り返す。

深度を精密に求めるためには ある単位の長さのケーブルの動きに対応する測深用滑車の回転数を正確に求めておくことが大切である。そこで 三角測量の基線の長さを測定する場合と同様な手続きで 100フィートの長さを出し この長さに対応する滑車の回転数を求めるようにしている。測定の誤差は 実際の測定値の再現性から 0.04フィート以内と考えられている。測定結果はパー グラフという図で表わされる。これは40フィートの鉄管が最初の長さからどれだけ収縮したかを深度に対してプロットしたものである。ある期間における地層収縮の深度分布を示すものである。図5はその1例で横軸でプラスは収縮を マイナスは膨脹を示す。1952年に作られたA-78という孔井の測定結果で 最初のころはタール ゾーン および レインジャー ゾーンで収縮が認められたが 1960年以降はむしろ膨脹していることがわかる。これは水圧入の効果であって 水準測量によっても 水圧入を十分行なった地域では地盤の上昇が認められている。

このようなカラー カウント調査は 1949年以来 数年おきに繰り返され 地盤沈下の調査研究に貴重な資料を提供してきた。ロング ビーチの水圧入についてはすでに詳しく紹介されているが この技術についてはわが国では知られていなかった。最近 地盤沈下の調査研究に従事しているロング ビーチ市の石油施設局 (Department of Oil Properties) の技術者達が筆者が開発した地層収縮の測定法に興味を示し 文献の交換が始まったので カラー カウント調査のあらましを知ることができたのである。

#### 4. アイソトープ観測法

新潟市の地盤沈下を調査するために組織された委員会の席上 地質調査所の井島委員は ラジオアイソトープ

を位置決定用の目じるしとして 地層の収縮の状況が深さによってどのように変わるかを測定してはどうかという提案をして 反響を呼んだ。筆者はその提案や委員会で交された議論を検討して アイソトープを利用する特別な観測井と測定装置を開発した。そして 鉱山局によって市内の2カ所にアイソトープ観測井が設置され観測を行なっている。

この観測井はケーシングを入れた単なる孔井であるがその周囲の地層に 小銃弾と同じようなガンパー弾丸のなかにラジオアイソトープ——コバルト60を封入した放射線源を40m間隔で打ち込み 地層の深さの目じるしにしてある。コバルト60は地層を透過することができる高いエネルギーのガンマ線を放射し このガンマ線を検出することによって “アイソトープ弾丸” (または単に“弾丸”) の位置を求めることができる。このアイソトープは 半減期が5.2年で長期間観測に使うことができ金属体であれば化学的に安定で 万一弾丸が破壊しても地層や地下水を汚染するおそれがほとんどない。

さて アイソトープ弾丸から放射されるガンマ線を測定するために シンチレーション・カウンターを鉛より遮蔽能力の大きいタングステン合金でおおって 水平の細いすきま——スリットだけから放射線を入射させるようにした。この検出器を観測井のなかでゆっくりと引上げてゆくと 弾丸に近づくにつれてカウント数が増加しスリットが弾丸と水平のところになるとカウント数が最大となり その後は再び減少するから 検出器と同じように移動する記録紙上にカウント数の変化を描かせるとピーク状のカーブが得られる。このピークの中心が線源の位置に対応する。

アイソトープ弾丸は観測井のケーシングからある程度離れたところまで地層に貫入しているから 非常に鋭いピークを記録させることは困難である。もし検出器のすぐ近くに弾丸があれば ピークは鋭くなりカウント数

も多くなって 正確な位置の測定が容易になるのだが 観測井の掘さくによって破壊された地層の部分に弾丸が入っていたのでは 地層の本当の動きを表わさない。測定に関係する条件が多いので 放射線源の強さ すなわちアイソトープの量・検出器の構造・測定のやり方などをどうきめるかはなかなかむずかしい問題である。

現在測定を行なっている観測井では コバルト60 1ミリキュリーを使い 5mmの幅をもつスリットを毎分1ないし5cmの速度で引上げている。こうして 弾丸の位置は数mm から1cm ぐらいの誤差で求められる。観測井を作るときのラジオアイソトープの安全取り扱いを容易にするためにコバルト60の量を少なくしたのだがもし30ミリキュリーぐらいを使えば 同じ測定条件で誤差を1mm程度にすることができる。

観測井の深さは数100m以上であるから 常に毎分1cmという速度で検出器を捲上げるわけにはゆかない。そこで検出器の近くに弾丸がないときは毎分mの速度でも捲上げられ 速度の変化が連続的に円滑に行なわれるように また測定中にケーブルがすべて逆方向に動いたりしないよう 特別なウインチが作られた。ケーブルのすべりをなくするために ケーブルを捲上げ用ドラムに何回も捲付けるようにした。この捲上げ用ドラムの回転速度を広範囲に変えるために スクーターの変速装置と同じような無段変速機を使っている。こうすると捲上げたケーブルを捲取って貯めておくドラムが別に必要で このドラムは油圧によって 捲上げられたケーブルの長さに応じて回転するようになっている。

### 5. 二段検出器系

この観測法は 要するに アイソトープ弾丸の位置をどこかある基準からの深さとして測定し 深さの変化を求めることである。カラーカウント調査法では深さを正確に測るために測深装置を厳密に検定するという方法をとっている。これはなかなか面倒なことである。

その上 検出器が観測井の中へ深く下りてゆくほど ケ

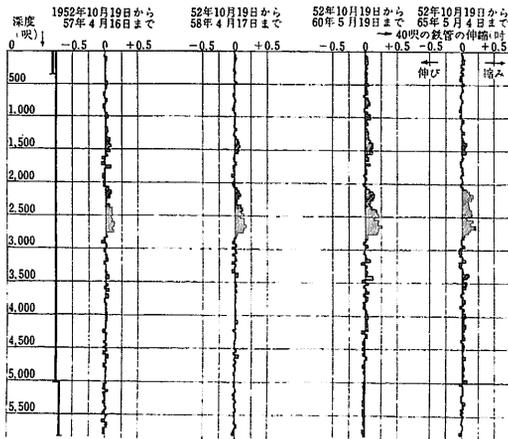


図5 カラーカウント調査法のバーグラフ

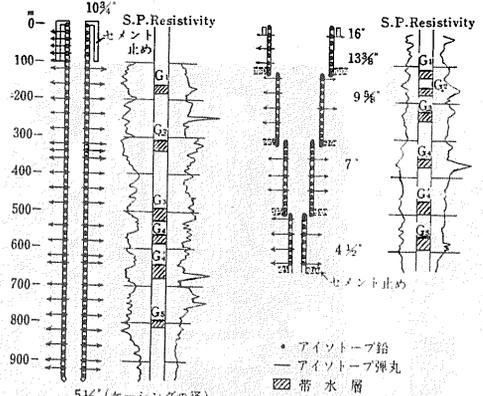


図6 実際のアイソトープ観測井の構造

ープルはそれ自身の重量と先端につけた検出器の重量とのために伸びる。したがって地上でどんなに精密に測定しても実際の深度は求められない。実験や計算で伸びを補正することも大へん厄介である。もちろん正確な深度の値そのものは必要がないのだから同じケーブルあるいは同じ構造材質のケーブルを使って測定すれば正確に深度の変化が求められるだろう。しかし長期間観測を続ける必要があるのだから違ったケーブルを使ってもよいような方法を考えてみよう。

まず弾丸の深さをケーシングにつけた放射線源から測ることにする。ケーシングにつける放射線源は釘型のカプセルに封入されているので“アイソトープ釘”または単に“釘”と呼ぶ。釘は弾丸の深さから約1m離しておく。ところがカラーカウント調査法の原理からもわかるようにケーシングは地層と共に変形するから地層が収縮しても釘からの弾丸の深さはほとんど変わらないことになる。そこで釘はケーシングに20m毎にほぼ等間隔に取付けることにする。一方2つの検出器をやはり20mの間隔で鉛直につなぎ“二段検出器系”を作る。この検出器系によって釘の付近のカウント数の変化を上下並行して記録させると図8のようになる。横に並んでいるピークの中心のわずかなずれは上下の検出器の間隔と釘の間隔との差を示しているから地層の収縮にもなると鉄管が変形したがって釘の間隔が変化しピークのずれの変化となって地上で記録される。つまり二段検出器系を一種の“ものさし”として釘の間隔を測るのであってケーブルの伸びに無関係に測定ができる。これがアイソトープ観測法の最も重要な点である。ただし実際にはなお問題がある。たとえば1000mの観測井では孔内の温度が孔口付近で15度孔底で40度と約25度も上昇するから上下の検出器がスチール製のケーブルでつながれていればその間隔が観測井の底では数cmも伸びることになる。しかし観測井の孔内温度が長期にわたって時間的に数度以上変化することはないと考えられるので検出器系は比較のた

めのものさしとしては十分役に立つ。もちろん膨張係数の小さい材料で検出器をつなぐにこしたことはないが現在では検出器系を吊すケーブルと同じケーブルで上下の検出器をつないでいる。

釘の位置の測定では検出器がすぐ近くを通ることができガンマ線が地層によって減衰しないので6マイクロキュリーという少量のコバルト60を使っているが誤差が数mm以下で1mmぐらいの場合が多い。地表または観測井の孔底が動かないものとして鉄管の変形を求めるには孔口または孔底から釘の間隔の変化を加えてゆかなければならないから誤差が加算される。加算された誤差があまり大きくならないように釘の間隔を20mとしたのであるが釘や弾丸の間隔は収縮する地層の状況に応じて適当にきめればよい。

現在行なっている観測では検出器の間隔すなわち20m毎に記録をとる。図8に示したような1枚の記録をとるのに30分から2時間近くかかるから1つの観測井全体を測定するのに5日から10日間ぐらいかかる。この測定は原則として毎年1回宛行ない前年の測定と比較して釘の動きを求めそれから弾丸の動きを求める。観測結果は測定された一番下の釘が動かなかったものとして測定された放射線源の変位を加算して求めた釘すなわち鉄管や弾丸すなわち地層の変位で示される。これを積算変位と呼んでいる。また弾丸を打ち込まれた深さの中間の地層の収縮率でも表わす。すなわちとなり合っている弾丸の相対的な変位とその間の地層の厚さとの比をさらに2回の測定の期間で割ったもので“歪の変化率”と呼んでいる。これは積算変位を深度に対してプロットした直線の傾斜に比例する。図9は内野地区観測井の測定結果である。

現在の観測井では弾丸をかならずしも等間隔に打込んでないが全部等間隔に配置すれば鉄管に取付けた釘

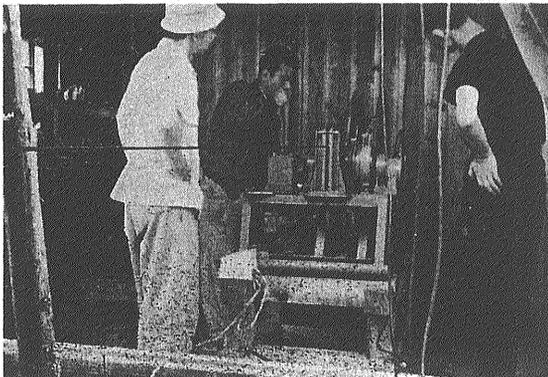


図7 観測用 ウィンチ

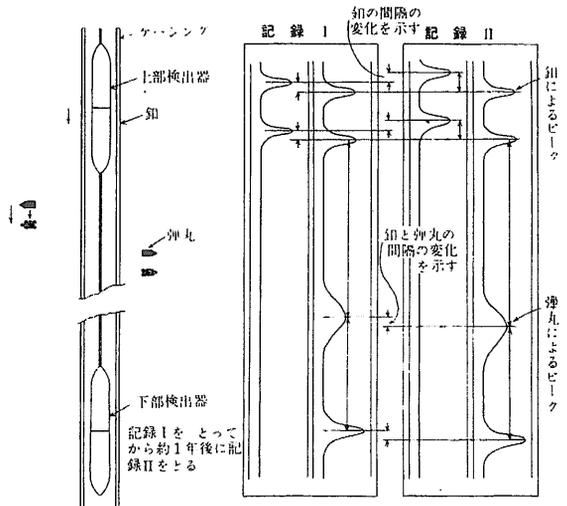


図8 アイソトープ観測法の原理

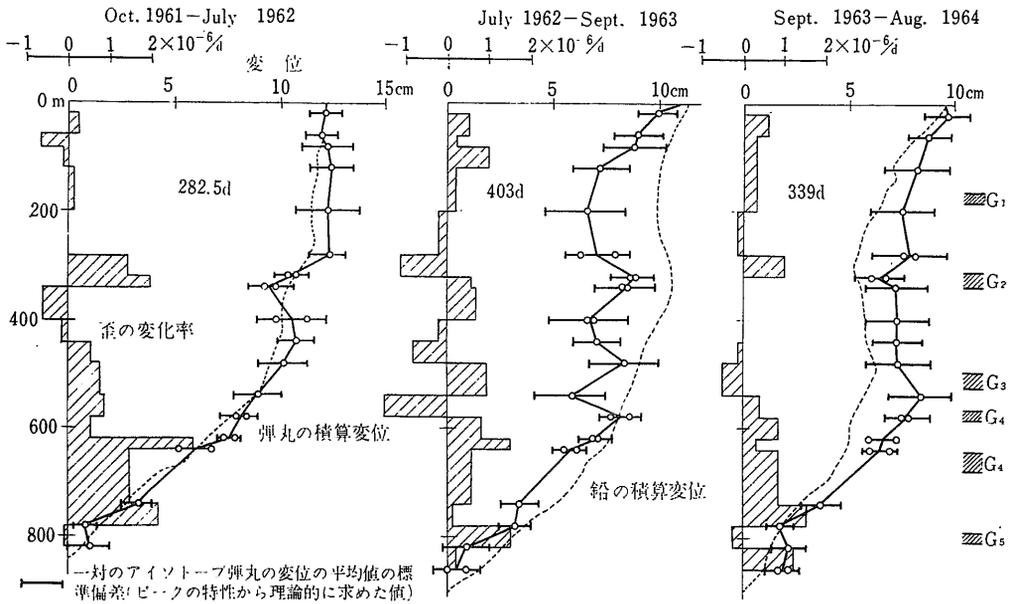


図9 内野地区アイソトープ観測井の観測結果

を仲介としないで二段検出器系によって測定ができる。また ケーシングが端で地層に固定してあるだけなので弾丸と釘の動きは必ずしも一致していないが もっとセメント止めの個所を多くするとかすれば 鉄管の変位だけを測定してもよい。これはカラーカウント調査法の考え方と一致するが 二段検出器系を使うことによって精度を向上することができる。二段式のカラーロケータを使ってもよいわけである。

この方法を開発し さらに実施するに当って 多くの方々々に協力していただいた。これらの方々や機関の名前は今回は省略させていただくことにするが 孔井に関する測定技術 とくに物理検層技術の応用であるとはいえ 全く新しい試みばかりであったので 観測法の趣旨・原理を理解して筆者の無理な注文を承知して下さった方々にはいろいろご迷惑なことや 苦心されたことが多かったであろうと 深く感謝している。

実際の観測は昭和36年以降継続しているので 観測結

果がまとめられる段階になってきた。しかし観測結果とその考察は別の機会にゆずることにする。

ロングビーチでは沈下問題はほとんど解消されたと伝えられていたが 新しい油田の開発に伴い 地盤沈下が別の地域で起こることを防止するため 鉄管の変形とは無関係に地層の収縮を調べようとアイソトープを使う実験を始めたところである。したがって 筆者の開発した方法が一応の成功を収めていることは 非常に刺激となったようである。ロングビーチ市の技術者たちはテープレコーダーを使った新しいデジタル技術の導入をも試みているので アイソトープ観測法が成功しさらに発展することを期待したい。それにしても 石油開発と沈下防止対策とを両立させ さらに おそらくこの国であれば技術開発的なプロジェクトは終わったとみなされる段階において 基礎的な観測技術の開発を始めようとしていることは うらやましい限りである。

(筆者は 物理探査部)

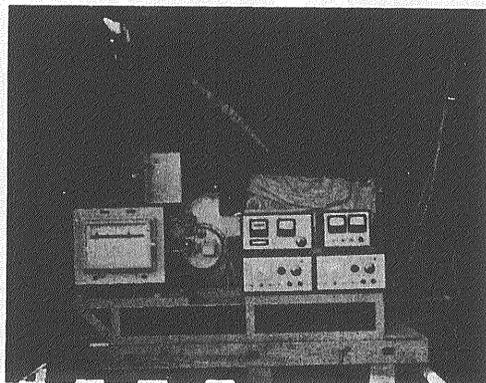


図10 地上の測定器械

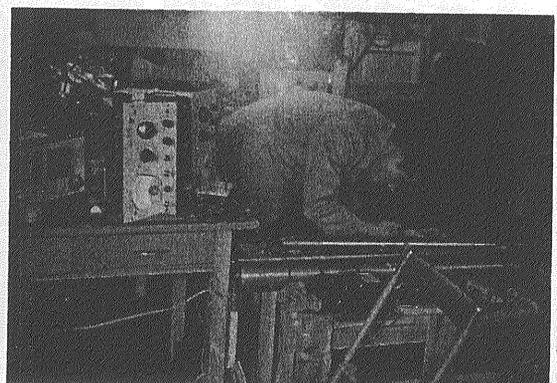


図11 検出器の調整