

新潟市における地層収縮量の深度分布の測定

佐野 俊一* 金谷 弘*

Observation of Partial Shrinkage of Strata at Niigata City

by

Shun-ichi Sano & Hiroshi Kanaya

Abstract

In order to investigate the ground sinking caused by shrinkage of strata due to discharge of the ground water, a method for measuring partial shrinkages was developed. The method is applied to the thick alluvial formation at Niigata city, which contains several aquifers producing water-soluble natural gas.

Radioactive source sealing metallic ^{60}Co is shot into stratum by gun-perforator and used as the depth mark of the stratum. The vertical displacement of the source is obtained by repeating the measurements of the depth by a special radioactivity well logging system. The observation well and the instruments are designed so as to reduce the error of measurement to several millimeters.

In order to locate precisely the vertical position of the source, a horizontally directional scintillation detector was constructed by attaching a slit made of walfrom alloy and the optimum conditions were discussed for measuring sharp variation of counting rates. A winch designed specially is free from slips of cable, which is a cause of error, and keeps cable speed invariably regardless of the loading weight, however cable speed is continuously changeable.

Since the precise measurement of depth is difficult by conventional well logging system, the depth of the source held in stratum is obtained by the combination of measurements of the two types. The one is the measurement of vertical interval between the source held in stratum and the reference source fixed to casing pipe. The other is the measurement of vertical interval of the reference source distributed by the equal interval, which is made by comparison with the interval of the two detectors connected vertically. Since the detector system scans by only a few meters in a measurement, the elongation of cable due to loading weight and self-weight is negligible.

The two actual observation wells of which the depths are respectively 650 and 950 meters were constructed and the observation is now in progress by the measurement at time intervals of more than a half year. The partial shrinkage was remarkable at the lower part of the alluvial formation from the summer of 1961 to the spring of 1962, while the upper part shrank considerably in the latter half of 1962.

要 旨

地盤沈下を研究する1つの方法として、地層収縮量の深度分布を1つの観測井で測定するために、放射性同位元素を放射線源として地層中に固定させ、その変位を追跡する方法を開発し、新潟市山ノ下地区および内野地区で観測を行なっている。

放射線源の位置を正確に測定するために、水平方向に鋭い指向性をもつ検出器や放射線強度の急激な変化の測定に適した記録方法や捲上機などが開発された。相対的

な深さを精密に、特にケーブルの伸びに無関係に測定するために、ケーシング管を相対的な深さの基準として利用する方法が考案された。

山ノ下地区について昭和36年7月、昭和37年5月および12月に、内野地区について昭和36年10月および昭和37年7月に測定が行なわれた。一般に深い方、すなわち G_4' および G_5 帯水層およびその付近で収縮が大きいことが認められたが、山ノ下地区についての昭和37年後半の変化には逆の傾向がみられた。

* 物理探査部

1. 緒言

地盤沈下の観測として、水準測量の繰返しによつて沈下量の空間的分布を求めると、および堅固な地層に達するまで掘下げた孔井の中に鉄管を立て、地層の収縮に伴なつて鉄管の上端が地表面に対して抜上る量を記録して沈下量の時間的変化を連続的に測ることなどが行なわれている。

新潟市では昭和31年頃から信濃川河口を中心として著しい地盤沈下が認められた。この地域では軟かい堆積層が数百mの厚さで分布しているため、非常に深い抜上がり観測井を作る必要があつた。そのためいわゆる二重管構造が考えられた。最も沈下の著しかった山ノ下においては深さ20mから1,200mまでの間に深さの異なつた幾本かの観測井を設け、測定が続けられている。その結果地層収縮の深度分布についての知識が得られるようになった。井島信五郎(当時地質調査所石油課長)は昭和33年9月の新潟地盤沈下対策委員会および同年11月の新潟地区地盤沈下調査委員会において、地層の収縮量の深度分布を1つの観測井で測定するために放射性同位元素(以下RIという)を放射線源として地層の変動を追跡するという構想を発表し、関係者の間で検討された。

二重管式観測井では、地層の収縮がそのまま内管の抜上がりとなるよう意図されているが、抜上る理由について別の考え方が提出されたので、構造を変えた観測井が作られたが顕著な差異は認められなかつた。RIを利用する観測井では、地層中に貫入させた小さな放射線源の変位を測定するので、抜上がり式観測井とは全く異なつた構造であつて、抜上がり式観測井の構造について検討する資料が得られる可能性があると考えられた。また、抜上がり式観測井では内管が砂礫層中に設置されるので、砂礫層に挟まれた粘土層などの中の収縮の分布を測定することができない。RIを利用する観測井によれば収縮の分布を細かく測ることができるので、沈下機構の解明に対しても有力な手がかりを与えるであろうという見地からも、RIを利用する観測法の開発が期待された。

筆者らは昭和33年末から技術的な問題点について、検討を重ね、新しい観測法が実施できるという見透しを得た。通商産業省鉱山局では昭和34年度に予定していた抜上がり観測井の増設をRI利用観測井に変更して、山ノ下地区(新潟市桃山町)に設置することにし、昭和35年3月に完成した。さらに昭和35年度には内野(新潟市新柴町)にRI利用観測井を増設し、昭和36年3月に完成した。地質調査所では観測井の設置に協力するとともに、測定装置を製作し実際の観測井について測定装置の検討を重ねた。測定装置全体の完成がかなり遅れたの

で、本格的な測定は昭和36年度から始まり、観測結果が求められるようになったのは昭和37年度に入つてからであつた。

観測井の設置および管理には通商産業省鉱山局開発課およびその依頼を受けた新潟県商工労働部企業振興課があつている。放射線源の選択や取扱いなどについては小山誠太郎(新潟大学教授・地質調査所研究員)および関根節郎(技術部)の協力を得た。測定については筆者らのほか故畑瀬安彦(物理探査部)が参加し、帝国石油株式会社新潟鉱業所の応援を得た。山ノ下地区観測井および内野地区観測井の施工はそれぞれ日本さく泉探鉱株式会社および北陸さく泉株式会社が担当した。測定装置の製作は(株)日本無線医理学研究所および(株)塚本精機製作所が担当した。

2. 観測方法の原理

地層収縮量の分布を測定するこの新しい方法では、孔井中でガンパーフオレータによつて地層中に打込まれた放射線源(以下線源という)が地層に固定された深さのマークとして用いられ、線源の鉛直変位が放射能検層器を使つて線源の深さの測定を繰返すことによつて求められる。線源の鉛直間隔の変化は線源が打込まれた深さの間の地層の収縮を示し、したがつて、厚い地層中における収縮の分布がいろいろな深さに線源を分布させることによつて求められる。鉛直変位の誤差は数カ月ごとに測定が行なわれるとしても数mm以下でなければならない。

線源の位置は水平方向に指向性をもつ検出器によつてみだされる。検出器によつて測定される放射線強度は地層中の放射線の減衰によつて線源からの距離が増すとともに減少し、検出器に著しい指向性を与える遮へい物質で作られたスリットの中を拡げるとともに増加する。しかし、線源が掘さくによつて乱されていない部分に固定されるように、線源はできるだけ深く地層中に浸入させなければならない。放射線強度のピークは線源からの距離やスリットの中への増加に伴なつて急激に拡がるので、線源の上下位置をなんらかの直接的な方法で——例えばリレーを働かせることによつて——精密に検出できるほど鋭い変化を期待することは不可能である。しかし、位置の決定は注意深く記録された検層図上でピークを中心を求めることによつて正確に行なわれるであろう。

この地域では数百mの観測井を必要とするので、普通の検層装置によつて数mmの誤差で深さを測定することは全く困難である。たとえ数百mの長さが孔口で精密に測られるとしても、孔内に吊されたケーブルの長さは自重と先端に付けられた荷重とによる伸びのために孔口で測られた長さとは異なる。それゆゑ、地層に打込まれた線

源の位置が表面からの深さとしてでなく、ケーシングに取付けた基準線源からの鉛直距離として測定される。この間隔は線源のピークが重ならない程度で近いほどよく、実際には1ないし2mぐらいである。基準線源はケーシングの変形によつて移動することがあるから、相隣る基準線源間の鉛直距離の変化を調べることができるように、基準線源を等しい間隔で分布させておき、1個の検出器をもう1つの同様な検出器の下に基準線源の間隔とほとんど同じ間隔で吊した装置によつて測定を行なう。この2つの検出器の組合せを二段検出器系と呼んでいる。二段検出器系によつて放射線強度を示す2つの曲線が同時に記録され、第1図に示すようにピークの差は基準線源間の間隔と検出器間のそれとの差を示す。

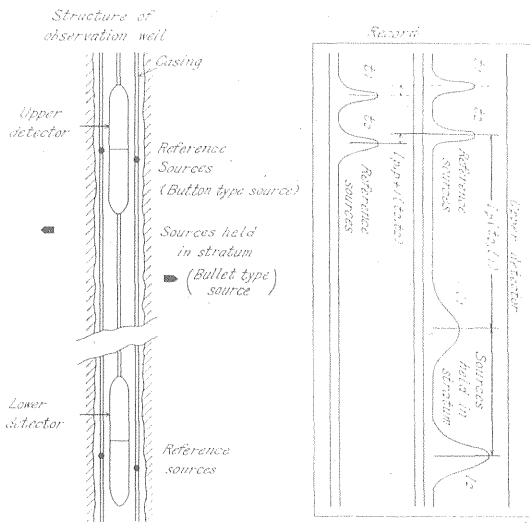


Fig. 1 Principle of observation

したがつて、二段検出器系はケーシング管に沿つて深さを測るための一種のものさしを構成している。線源の変位の測定に関するかぎり、このものさしの長さの絶対値を知る必要はないが、長さの変化がないことをしばしば確かめておかなければならない。観測井内の温度分布は一定であるから、深さの増加に伴つて地温が上昇してもものさしが伸びても、その補正をする必要はない。観測井の傾斜の影響は、非常に多くの場合が考えられるので誤差を評価することが容易ではないが、無視できる程度であろうと思われる。

検出器は孔井の僅かな傾斜に伴つてケーシングと接触しながら上下し、もし検出器が線源に対して鉄管の反対側に沿つて動くと、直径が太い鉄管においては放射線強度が弱くなつて線源の検出が困難になるおそれがある。したがつて、普通1つの測定箇所において一対の線源が用いられている。すなわち、2つの基準線源が10cmの鉛直間隔で鉄管の互いに反対側に取付けられ、2つの線源が互いに反対方向に約50cmの鉛直間隔で地層

中に打込まれている。

線源として用いられるRIは高エネルギーの γ 線を放射する核種で、長い半減期を持ち比 γ 線放射率も高い核種であることが望ましい。また、化学的に定安でそのうへ水に溶解したとき水中許容濃度が大きいものがよい。したがつて、金属状の ^{60}Co が適当であると考えられる。線源は地下水などに対する汚染を完全にさけるために鋼製カプセルに封入されている。基準線源および地層に打込まれる線源のカプセルはそれぞれ鉛型で外側面にねじを切つて鉄管に取付けるようにしたもの、およびガンパーフオレータ用弾丸にRI封入用の空室を開けたものである。これらの線源はカプセルの形に従つて簡単にそれぞれ鉛型線源および弾丸型線源と呼ばれる。線源の強さは検出器の応答特性に基づいて決定されなければならない。現在の観測井では、鉛型線源として3あるいは6 μc のペレットが、弾丸型線源として1mcの小さなワイヤが用いられている。

3. 観測井の構造

実際のR1観測井は山ノ下地区(注1)と内野地区とに設けられた。前者は運輸省山ノ下地盤沈下観測井群から約1km東北に、臨港圧入基地から約1km南にあり、後者は新掘圧入井(現在廃坑)から約2km北西にあり、最も近い圧入井(P61)から約300m離れている。いずれもG5層の下の難帯水層まで掘り抜かれている。鉛型線源の間隔は20mであつて、弾丸型線源の間隔は原則として40mである。しかし、礫で作られた空隙中で弾丸が勝手に動くために生ずる誤差や弾丸によつて鉄管に開けられた穴から遊離ガスが逃げ出していることが原因で起きる事故などがないように、礫層には弾丸型線源を打込まないことにした。帯水層は砂層や砂層と礫層との互層で構成されている場合もあるので、帯水層に弾丸型線源が打込まれている場合もある。

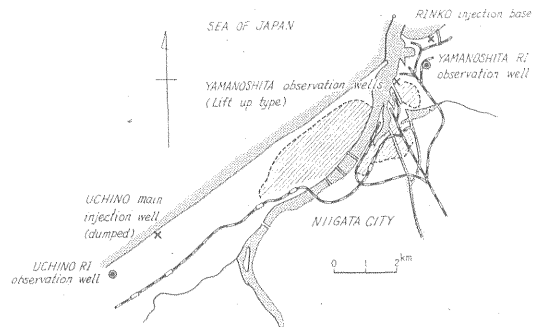


Fig. 2 Location of the observation wells

注1) 山ノ下地区と通称しているが、臨港地区と呼んだ方が正確であろう。

山ノ下地区観測井では前節に述べた弾丸型線源式構造とともに多重鉄管式構造が採用されている。この構造においては、異なった直径の幾つかのケーシング管が下端をセメンティングで地層に固定され、それらが重なる部分で互いにスライドできるように作られている。したがって、これらの重なる部分の変動は、鉄管の変形が無視されるならば、下の鉄管が挿入されている地層の収縮を示す。スライド部分における相対鉛直変位をはかるために鉛型線源が鉄管の上下端に付けられている。鉄管の最上端の地表に対する変位は観測井の傍らに設けられた水準点からの通常の水準測量によって測定される。

観測井の深さは650mで、ケーシング・プログラムの大要は、13.3/8"鉄管—地表から128mまで、9.5/8"鉄管—127mから299mまで、7"鉄管—298mから506mまで、および4.1/2"鉄管—505mから650mまで、となっている。

内野地区観測井は弾丸型線源式構造だけになっている。観測井の深さは950mで、直径5.1/2"の鉄管が、その上端において100mの長さ全体にわたってセメンティングで地層に固定されている直径10.3/4"の鉄管(コンダクタ)によって、孔井中に吊されている。2つの観測井における線源の分布、電気検層図、および帯水層の分布が第3図に示されている。

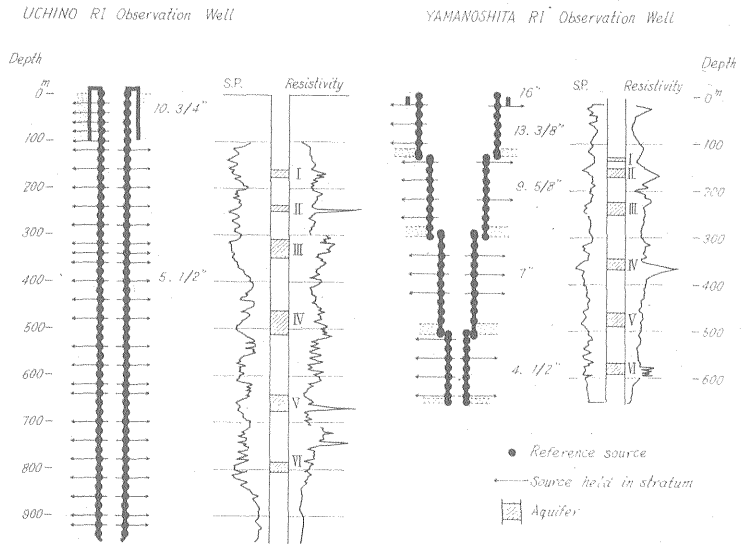


Fig. 3 Structure of the observation wells

4. 測定装置

測定装置は、第4図のプロック・ダイアグラムに示すように、基本的には放射能検層装置を構成する。小さな有効体積で高い感度を得るようにシンチレーション・カウンタが採用されている。案内輪、測深用滑車およびウインチは、これらの相対的な移動が誤差の原因となるので、強固な枠に取付けられている。測深用滑車は記録計の紙送り用歯車系に機械的に結合されている。二段検出器系を形作る2つの検出器の間隔は20mである。ウインチをできるだけ小さくするため単一の共軸ケーブルが用いられ、2つの検出器による応答は出力パルスの極性

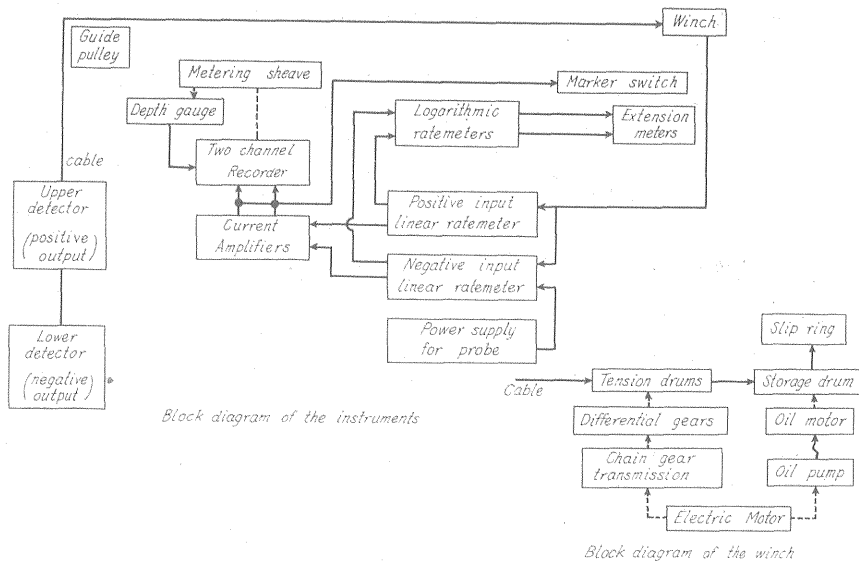


Fig. 4 Constitution of apparatus

によつて区別されて別々に測定される。ウインチは検出器の速度を連続的に変化でき、ケーブルのすべりがないように設計され、したがつて、正確な放射能検層図を能率的に記録することができる。二段式検出器系を孔内に吊り降ろしたり引上げたりするために特別な吊手が考案された。また、検出器間隔の検定はコンダクタによつて囲まれたケーシング管は変形しないという仮定に基づいて行なわれている。

適当な応答特性を得るよ
うに検出器を設計すること
は、線源が検出器からかなり
広い範囲の距離にわたつて
分布しているので、容易
ではない。現在の観測井では
線源の強さが弱いので、
ピークの鋭さよりも感度の
増加が望まれる。しかし、
検出器の寸法はおもに最も
細いケーシングの内径によつて
決められる。現在の装置
では、第6図に示すように、
検出器のプロープの直径は
95mmでスリットを構成する
タングステン合金の厚さは
約35mm (鉛に換算して約50mm)
である。検出素子は6467光
電子増倍管と厚さ6mm およ
び直径1/2"のNaI(Tl)蛍
光体とからなる。スリットの
巾は、それが蛍光体の厚さ
以上になると感度があまり
増加しないということ
を考へて、5mmにしてある。

前置増巾器と高圧発生回路とは
検出器のプロープに收容され、
必要な電力は直流として地上
から供給される。検出器系を
吊すケーブルは単一の共軸ケ
ーブルでそのシールド部を構
成する鉄線が張力を受持ち、
ケーブルの破断強度は1t以上
である。同様なケーブルが2
つの検出器を結ぶためにも使
われている。上部および下部
の検出器の前置増巾器からの
出力パルスはそれぞれ極性が
正および負であつて、入力極
性以外については全く同様
である2つの増巾器一計数率
計に送られ、計数率が2チャ
ネルの記録計で同時に記録さ
れる。これらの電子回路は記
録計用の電流増巾器以外はト
ランジスタ化されている。ケ
ーブルを伝わるパルスの反対
極性へのフレをできるだけ
小さくするように、増巾器や
波高弁別器が調整さ

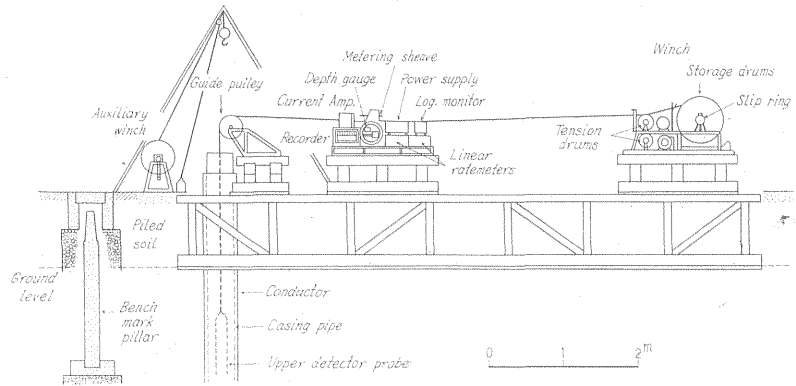


Fig. 5 Arrangement of apparatus

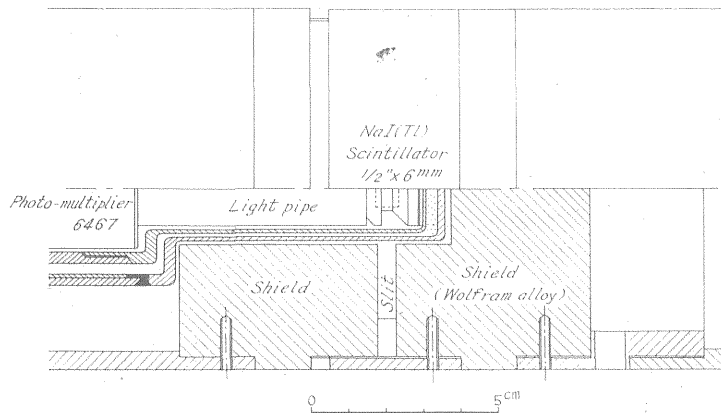


Fig. 6 Scintillation detector with slit

れなければならない。前置増巾器の出力のケーブルに対するインピーダンス整合は重要な調整の1つであろう。2チャンネルの対数計数率計が監視用に用いられている。

記録計の紙送り速度はケーブルの速度とほとんど同じである。すなわち、記録紙上で長さを容易にはかることができるように、計数率の変化がほぼ原寸で記録される。概査のためには歯車の交換によつて他の縮尺、すなわち、1/2, 1/5, 1/10, および1/20も使うことができる。

ウインチはこの測定のために特別に設計された。普通のウインチのドラムの機能が2種類のドラム、すなわち、ケーブルを捲上げる張力ドラムとケーブルを捲取る貯蔵ドラムとに分けられている。特に捲上げ方向と反対のすべりは紙送りの誤差となるが、張力ドラムにはケーブルが並行に5回捲付けられ摩擦によつてすべりが止められている。張力ドラムは無段変速機および差動歯車系を通して電動機によつて駆動され、検出器速度は1cm/minから1m/min以上まで連続的に変化できるようになっている。差動歯車系の歯車の交換によつてもつと速い捲上速度も得られる。貯蔵ドラムは電動機に結合された

オイルポンプとオイルモータによって油圧で駆動される。

模型実験と実際の観測井における資料とから決められた現在の検層装置の応答特性は計数率曲線のピークの極大値の計数率およびピークの3/4極大値幅と線源および検出器間の距離との関係として第7図に示されている。これらの2つの量は検出器の応答特性を表わすものとして選ばれ、次節の測定方法の議論においても使われる。応答特性は地層や泥水の吸収係数などによっても変化するので、ここに示された図は現在の観測

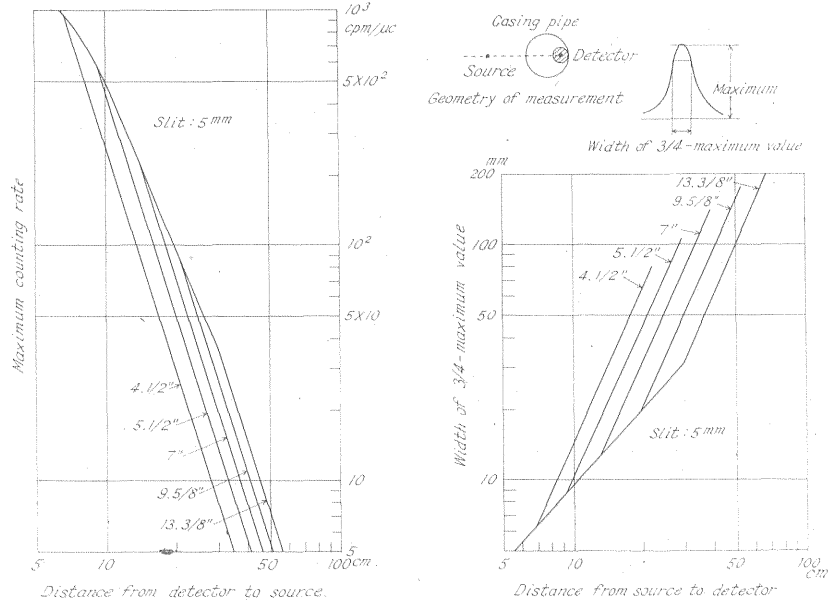


Fig. 7 Response characteristics of detector

井について一種の平均として適用されるにすぎないであろう。なお、この図の関係は図の上部に示されているような特別な幾何学的条件の場合にだけ成立つ。

5. 測定方法

二段検出器系による測定は20m間隔のすべての測定箇所について表面から孔底までにわたって行なわれる。相隣る2対の釧型線源およびそれらの線源に近接する弾丸型線源の位置が1回の連続走査によって第1図に示すように1枚の記録紙上に記録される。2つの計数率計の時定数と検出器速度とは計数率曲線のピークの特性格に従って選ばれる。記録の正確な縮尺は線源間の距離を計算するために必要であるから、ケーブルの表面に10cmの間隔でつけられたマークが固定された目標を通過すごとに、それらに対応するマークが記録紙上に入れられる。縮尺はケーブルや滑車の磨耗や交換によつて変化するかも知れないので、縮尺の測定は各走査ごとに行なわれる。現在の装置では、補正係数、すなわち縮尺の逆数は1.020でずつと一定であつた。

深さ20mごとに分布している幾つかの線源を1まとめにして測定箇所と呼び、地表を0番として深い方へ順に番号をつけると、第1図のように、1枚の記録にはp番とp+1番の測定箇所の線源のピークが画かれている。間隔を測定しようとする2つの線源の組合せを測定区間と呼ぶ。釧型線源またはそれによるピークを l 、弾丸型線源またはそれによるピークを l' で表わし、1つの測定箇所内で上にあるものには添字1、下にあるものには添字2をつけて区別する。

ある測定区間の記録紙上での間隔の測定値を一般に l で表わし、測定箇所を添字で、線源を括弧をつけて示すことにする。相隣る測定箇所の対応する釧型線源の間隔 $l_p, p+1(l_1, l_2)$ (λ は1あるいは2)が記録紙上で測定される。測定は検出器を捲上げながら行なわれるので、下の検出器によつてピークが先に記録されたとき、 $l_p, p+1(l_1, l_2) > 0$ となるように符号をつけると、実際の間隔の長さは $\alpha l_p, p+1(l_1, l_2) + D$ である。ここで、 α は補正係数(縮尺の逆数)、および D は検出器の間隔である。

数カ月ないしそれ以上の期間を置いて2回の測定を行ない、その期間の線源間隔の変化を一般に Δl で、第2回目の測定量はダツシユをつけて区別することにする。釧型線源の間隔の変化 $\Delta l_p, p+1(l_1, l_2)$ は

$$\Delta l_p, p+1(l_1, l_2) = \alpha l_p, p+1(l_1, l_2) - \alpha' l'_p, p+1(l_1, l_2) + D - D' \quad (1)$$

である。これは1つの釧型線源が動かないとしたときの他の釧型線源の変位を示し、収縮の場合に正になるようにしてある。一番深い釧型線源が動かないとしてそれより上の釧型線源の変位を表わすには、間隔の変化を積算してゆけばよい。すなわち、 m 番の釧型線源 l_2 の積算変位 $\Delta L_m(l_2)$ は一番深い測定箇所を n 番とすると

$$\Delta L_m(l_2) = \sum_{p=m}^{n-1} \Delta l_p, p+1(l_1, l_2) \quad (2)$$

である。

1対の釧型線源の変位の平均 $\Delta l_p, p+1(t)$ および $\Delta \bar{L}_m(t)$ は

$$\Delta \bar{L}_m(t) = \sum_{\lambda=1, 2} \Delta l_p, p+1(l_\lambda, l_\lambda) / 2 \quad (3)$$

$$\Delta \bar{L}_m(t) = \sum_{\lambda=1,2} \Delta L_m(t_\lambda) / 2 \quad (4)$$

である。1つの測定箇所内の1対の鉛型線源の間隔は変化は無視できるはずで、実際の測定値も誤差範囲内で一致しているから、

$$\Delta \bar{L}_{p,p+1}(t) \doteq \Delta l_{p,p+1}(t_1, t_2) / 2$$

$$\Delta \bar{L}_m(t) \doteq \Delta L_m(t_\lambda)$$

であつて、これらはケーシングの変形を示している。

山ノ下地区観測井の上部では、ケーシングの直径が太いため、1対の鉛型線源のうち1個しか位置の決定ができないことが多い。したがつて、 $l_{p,p+1}(t_1, t_2)$ および $l_{p,p+1}(t_2, t_1)$ のいずれかあるいは $l_{p,p+1}(t_1, t_2)$ または $l_{p,p+1}(t_2, t_1)$ だけしか測定できないことが多い。そこで、全測定箇所について、各2個の鉛型線源のうち位置決定の誤差の少ない方だけについて間隔を測定している。したがつて、積算変位は

$$\Delta L_m(t_\lambda) = \sum_{p=m}^{m-1} \Delta l_{p,p+1}(t_\lambda, t_\mu) (\lambda, \mu=1 \text{ あるいは } 2) \quad (5)$$

で、 $\Delta l_{p-1,p}(t_\lambda, t_\lambda)$ の μ と $\Delta l_{p,p+1}(t_\lambda, t_\mu)$ の λ とは常に等しい。もしすべての鉛型線源の位置が決定できて平均の積算変位が求められたとすれば、この場合でも $\Delta L_m(t_\lambda) \doteq \Delta \bar{L}_m(t)$ である。

次に、弾丸型線源と同じ測定箇所内の鉛型線源の間隔 $l_p(t_\lambda, l_\mu)$ (λ は 1 あるいは 2) が記録紙上で測定できる。ある期間をおいて2回の測定を行なつたときの間隔の変化 $\Delta l_p(t_\lambda, l_\mu)$ は、

$$\Delta l_p(t_\lambda, l_\mu) = \alpha' l_p(t_\lambda, l_\mu) - \alpha' l_p(t_\lambda, l) \quad (6)$$

であり、これは鉛型線源が動かないとしたときの弾丸型線源の変位を表わし、弾丸型線源が鉛型線源の下にあるとき、 $\alpha' |l_p(t_\lambda, t_\mu)| < \alpha' |l_p(t_\lambda, l_\mu)|$ のとき $\Delta l_p(t_\lambda, l_\mu) > 0$ となるように符号を決めれば、収縮の場合が正となる。

最も深い鉛型線源が動かないとしたときの m 番目の測定箇所の弾丸型線源 l_μ の変位は、同じ測定箇所の t_λ を基準としたとき、

$$\Delta L_m(t_\lambda, l_\mu) = \Delta l_m(t_\lambda, l_\mu) + \Delta L_m(t_\lambda) \quad (7)$$

であるが、鉛型線源の位置決定の、したがつて、間隔の変化の誤差は一般に小さいので、 t_1 を基準としても t_2 を基準としても積算変位はほとんど等しい。したがつて、平均変位 $\Delta L_m(t_\mu)$ は

$$\begin{aligned} \Delta L_m(t_\mu) &\equiv \sum_{\lambda=1,2} \Delta l_m(t_\lambda, l_\mu) / 2 + \Delta \bar{L}_m(t) \\ &\doteq \Delta L_m(t_\lambda, l_\mu) \end{aligned} \quad (8)$$

である。実際には、内野地区観測井では弾丸型線源に近い方の鉛型線源を基準にとり、山ノ下地区観測井では位置決定の誤差の小さい方の鉛型線源を基準としている。

弾丸型線源の変位は地層の変位を表わすはずである。弾丸型線源が1つの測定箇所に2つないしそれ以上打込まれているときは平均をとることにすると、

$$\Delta \bar{L}_m(t) = \sum_{\mu=1}^q \Delta L_m(t_\mu) / q \quad (9)$$

によつて一番下の測定箇所の鉛型線源の深さを不動とした地層の変位が求められる。弾丸型線源が分布している間隔は一定でないから、地層収縮量の分布はある厚さの地層の上限と下限における地層の相対変位と地層の厚さとの比 S によつて表わすのが便利である。これを歪と呼ぶことにする。歪 S は弾丸型線源の平均変位によつて求められる。すなわち、

$$S = \{ \Delta \bar{L}_m(t) - \Delta \bar{L}_{m+r}(t) \} / T \quad (10)$$

で、 T は地層の厚さである。この式は次のように書きかえることができる。

$$S = \{ \Delta \bar{L}_r(t, l) + \sum_{p=m}^{m+r-1} \Delta l_{p,p+1}(t) + \Delta \bar{L}_{m+r}(t, l) \} / T \quad (11)$$

ただし

$$\Delta \bar{L}_m(t, l) = \sum_{\lambda=1}^2 \sum_{\mu=1}^q \Delta l_m(t_\lambda, t_\mu) / 2q \quad (12)$$

である。なお、測定箇所の間隔が約20mであるから

$$T \doteq r \times 20 \text{ m}$$

である。

積算変位や歪はある期間についての値であるから、その期間の日数で割つた値、すなわち、収縮率や歪の変化率で表わす方が適切であろう。2回の測定の期間を観測期間と呼ぶことにする。1つの観測井の完全な測定には、後に述べるように、1週間ぐらいかかるので、この期間を観測期間に対して測定期間と呼ぶことにする。観測期間は測定期間に対して長いから、平均観測期間、例えば測定期間の中心間の日数であらわすことができる。

なお、ここでは測定期間中には線源が動かないと仮定しているが、現在の新潟市における地盤沈下の状況では、この仮定は充分成立つ。最も沈下が激しく、地表で1.4 mm/day 程度の沈下率が観測されたような状態では、この仮定は成立たないであろう。

線源の位置は記録紙上でピークの中心によつて表わされる。計数率曲線は統計的変動によつて乱れているので、それを平滑して中心を求める。計数率曲線の下部はおもに速へい物質を透過する放射線の影響を受けているが、上部はおもにスリットを通過する放射線によつて寄与されているから、線源の位置を求めるためには、上部のピークだけについて平滑曲線を引くべきである。したがつて、特性を表わす量として広く用いられている半極大値幅の代りに、3/4 極大値幅 d が採用されているのである。ピークはすその方を除いて正規分布曲線で近似されるから、中心を求める誤差が放射線の統計的変動による、極大値の3/4付近における平滑曲線の変動によつて導かれると仮定すれば、位置の標準偏差 σ は n_0 および τ をそれぞれピークの極大計数率および計数率計の時定数とすると、

$$\sigma = 0.71d/\sqrt{n_0 \tau} \quad (13)$$

である(付録参照)。 σ は τ が大きいほど小さいが、記録されたピークが変形しないように τ を小さくしなければならない。この条件を直接表わすと面倒な式になるので、記録された極大値の減少が5%以下であればよいということにすると、

$$v\tau \leq d/3 \quad (14)$$

である。ここで v は検出器の速度、すなわち捲上速度である。

これらの式から v および τ の適当な値が求められる。実際の観測井について検討してみると、多くのピークに対して $v = 1 \sim 2 \text{ cm/min}$ 、 n_0 が大きくて τ を小さくすることができるピークに対して $v = 5 \sim 10 \text{ cm/min}$ で測定しなければならない。したがって、ピークの出ないところでは $v = 10 \sim 20 \text{ cm/min}$ で記録紙を送つても、1回の走査に20min から2hr かかるから、1つの観測井の完全な測定には5日から7日ぐらいかかる。

また、記録されたピークは積分回路の影響によって真の位置から幾分おくれる。ピークの変形が著しくなく、 v が一定であれば、おくれ δ は

$$\delta = v\tau \quad (15)$$

である(付録参照)。もし1回の走査中で δ が一定でなければ、おくれの相対的な差を補正しなければならない。

さて、2つの線源の位置の標準偏差を σ_1 および σ_2 とすると、これらの2つの線源の記録紙上での間隔 l の標準偏差 σ_l は、正規分布則が適用できるから

$$\sigma_l = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (16)$$

で与えられる。

次に、記録縮尺の誤差や記録紙の送りの不均一による誤差の影響を考える。この種の誤差は測定する間隔の長さ按比例すると考えられるから、縮尺の逆数、すなわち補正係数 α の標準偏差 σ_α として表わすことができる。 α の実測値の分布から σ_α を求めると、現在の装置では α の平均値1.020に対して $\sigma_\alpha = 0.001$ 程度となる。真の間隔の標準偏差 σ_d は

$$\sigma_d \leq \sigma_\alpha \cdot |l| + \sigma_l \cdot |\alpha| \quad (17)$$

で、 $\alpha \approx 1$ であるから、 σ_d の値を

$$\sigma_d = \sigma_\alpha \cdot |l| + \sigma_l \quad (18)$$

によつて求めることができる。

変位は2つの線源の間隔の変化として求められるから、変位の標準偏差 σ_{dl} は観測期間の前後の間隔の標準偏差をそれぞれ σ_d および σ_d' とすると、

$$\sigma_{dl} = \sqrt{\sigma_d^2 + \sigma_d'^2} \quad (19)$$

である。いくつかの基準線源を媒介として求められた間隔や変位の標準偏差も同様にして求めることができる。

二段検出器系の2つの検出器の間隔、すなわち基準間

隔が、ケーブル・コネクタの交換やケーブルの非可逆的な伸びによつて変化することがある。もし基準間隔が変化してその補正值に1mmの誤差があるとすれば、隣合っている鉋型線源の間隔の変位の測定値に1mmの誤差を生ずるから、積算された変位の誤差は積算した間隔の数に比例して大きくなる。しかし、歪に対する影響は地層の厚さに無関係に一定で 5×10^{-5} であつて、歪の変化率の誤差は基準間隔の変化1mmにつき、観測期間を D day とすると、 $5 \times 10^{-5}/D$ (day⁻¹)である。したがつて、歪または歪の変化率の深度分布は零線、すなわち収縮と膨脹との境界線が移動するだけである。もし測定期間中に基準間隔が変化し、その補正值に誤差があるとすれば、その誤差は積算された変位や歪の分布に影響を及ぼす。

6. 測定結果

現在までに行なわれた完全な測定は、山ノ下地区観測井において昭和36年7月、昭和37年5月および12月の3回、内野地区観測井において昭和36年10月および昭和37

第1表 山ノ下地区観測井における基準線源(ケーシング)の積算変位

Integrated displacement of reference source (casing pipe) from 600 meters deep

Depth 深度 (m)	Source 線源	May, 1962- Dec., 1962 (cm)	July, 1961- May, 1962 (cm)	July, 1961- Dec., 1962 (cm)
0	Bt ₂	+5.2±2.2	+8.8±2.3	+14.0±2.1
20	Bt ₂	+4.6±2.2	+8.2±2.2	+12.9±2.0
40	Bt ₂	+3.8±2.1	+8.8±2.2	+12.5±2.0
60	Bt ₁	+3.4±2.1	+9.3±2.1	+12.7±2.0
80	Bt ₁	+3.1±2.0	+9.1±2.1	+12.2±1.9
100	Bt ₁	+2.4±1.8	+9.8±1.8	+12.2±1.8
120	Bt ₂	+1.5±1.6	+9.8±1.6	+11.3±1.6
140	Bt ₂	+0.9±1.6	+9.5±1.6	+10.4±1.5
160	Bt ₁	+0.9±1.5	+9.6±1.5	+10.4±1.5
180	Bt ₂	+0.7±1.4	+9.1±1.5	+9.8±1.4
200	Bt ₂	+0.9±1.3	+8.9±1.4	+9.8±1.3
220	Bt ₂	+0.8±1.3	+8.3±1.3	+9.1±1.2
240	Bt ₂	+0.6±1.3	+8.2±1.3	+8.8±1.2
260	Bt ₂	+0.3±1.2	+8.0±1.3	+8.4±1.2
280	Bt ₂	+0.3±1.2	+8.0±1.2	+8.3±1.1
300	Bt ₂	+0.8±0.9	+6.9±0.9	+7.7±0.9
320	Bt ₂	-1.1±0.7	+5.4±0.7	+4.3±0.7
340	Bt ₂	-1.1±0.6	+5.0±0.6	+4.0±0.6
360	Bt ₂	-1.3±0.6	+5.2±0.5	+3.9±0.6
380	Bt ₁	-1.4±0.5	+4.7±0.5	+3.3±0.5
400	Bt ₁	-1.2±0.5	+4.4±0.5	+3.2±0.5
420	Bt ₁	-1.1±0.5	+4.1±0.4	+3.0±0.5
440	Bt ₁	-0.9±0.4	+3.8±0.4	+3.0±0.5
460	Bt ₁	-0.8±0.4	+3.6±0.4	+2.7±0.4
480	Bt ₁	-0.8±0.4	+3.2±0.3	+2.5±0.4
500	Bt ₁	-0.6±0.3	+2.8±0.3	+2.2±0.4
520	Bt ₁	-0.3±0.2	+1.4±0.3	+1.1±0.3
540	Bt ₁	-0.2±0.2	+1.4±0.2	+1.2±0.2
560	Bt ₁	-0.2±0.2	+1.0±0.2	+0.9±0.2
580	Bt ₁	-0.0±0.1	+0.6±0.1	+0.6±0.1
600	Bt ₁	0.0*	0.0*	0.0*

*assumed
477.1
days

Average
Time interval
観測期間

168.5
days

308.6
days

新潟市における地層収縮量の深度分布の測定 (佐野凌一・金谷弘)

第2表 山ノ下地区観測井における地層中の線源の積算変位

Integrated displacement of source held in stratum from 600 meters deep

Depth 深度 (m)	Source 線源	May, 1962- Dec., 1962 (cm)	July, 1961- May, 1962 (cm)	July, 1961- Dec., 1962 (cm)
20	Bl ₁	+4.1±2.4	+8.0±2.4	+12.2±2.2
	Bl ₂	+4.9±2.3	+11.2±2.3	+16.2±2.1
60	Bl ₁	+3.5±2.2	+8.7±2.2	+12.2±2.1
100	Bl ₁	+2.4±2.1	+8.9±2.2	+11.6±2.0
140	Bl ₁	+1.4±1.9	+9.0±2.1	+10.5±1.9
	Bl ₂	+0.9±1.7	+9.8±1.7	+10.7±1.7
180	Bl ₁	+0.7±1.8	+9.5±1.7	+10.2±1.7
220	Bl ₁	+1.5±1.8	+7.6±1.9	+9.2±1.9
	Bl ₂	+0.7±1.8	+7.0±1.7	+7.8±1.6
260	Bl ₁	+1.0±1.3	+6.7±1.3	+7.7±1.3
340	Bl ₁	-0.4±0.7	+6.3±0.8	+5.9±0.8
	Bl ₂	-0.3±0.8	+5.9±0.8	+5.6±0.8
380	Bl ₁ '	-1.0±0.6	+5.2±0.5	+4.2±0.6
	Bl ₁	-1.1±0.7	+5.2±0.7	+4.0±0.6
	Bl ₂	-1.3±0.7	+5.3±0.6	+4.0±0.7
420	Bl ₁	-0.9±0.5	+4.3±0.5	+3.4±0.5
	Bl ₂	-1.1±0.5	+4.7±0.5	+3.6±0.5
520	Bl ₂	+0.4±0.4	+1.8±0.5	+2.2±0.5
560	Bl ₁	+1.1±0.3	+1.0±0.3	+2.1±0.3
	Bl ₂ '	+1.1±0.3	+1.0±0.3	+2.1±0.3
	Bl ₂	+2.4±0.3	+0.3±0.4	+2.6±0.4
600	Bl ₁	+0.2±0.3	+0.5±0.4	+0.7±0.3

Average Time interval 観測期間
 Positive sign: shrinkage

第3表 山ノ下地区観測井における歪の変化率
Rate of strain

Depth interval 深度区間 (地層) (m)	May, 1962- Dec., 1962 (×10 ⁻⁹ /day)	July, 1961- May, 1962 (×10 ⁻⁹ /day)	July, 1961- Dec., 1962 (×10 ⁻⁹ /day)
20-60	+1.5±1.3	+0.7±0.7	+1.0±0.4
60-100	+1.6±2.4	-0.2±1.3	+0.3±0.8
100-140	+1.8±1.7	-0.4±1.0	+0.5±0.6
140-180	+0.7±1.4	-0.1±0.8	+0.2±0.5
180-220	-0.6±1.8	+1.8±1.0	+0.9±0.6
220-260	+0.2±1.5	+0.5±0.8	+0.4±0.5
260-340	+1.0±0.7	+0.3±0.4	+0.5±0.2
340-380	+1.2±0.4	+0.7±0.2	+0.9±0.1
380-420	-0.2±0.3	+0.6±0.2	+0.3±0.1
420-520	-0.8±0.2	+0.9±0.1	+0.3±0.1
520-560	-1.7±0.4	+0.9±0.2	-0.0±0.2
560-600	+1.9±0.4	+0.2±0.2	+0.8±0.1

Positive sign: shrinkage

第4表 山ノ下地区観測井のケーシング上端の水準点に対する高さ

Relative height of upper end of casing pipe from bench mark

Date 測定日	Height 比高 (cm)	Displacement 変位 (cm)
18th Feb., 1961	+69.4	
25th July, 1962	+70.3	+0.9
16th Dec., 1962	+70.3	0.0

第5表 山ノ下地区観測井における孔内温度
Temperature (7th Dec., 1962)

Depth 深度 (m)	(°C)	Depth 深度 (m)	(°C)
20	15.0	314	23.7
39	15.4	323	24.0
59	16.1	353	24.5
78	17.1	372	25.2
98	18.0	392	26.0
118	18.6	412	26.3
137	19.5	432	26.6
157	20.5	451	27.0
176	20.6	470	28.9
196	21.0	490	28.7
216	21.1	510	29.7
235	21.5	529	30.0
255	22.0	549	30.0
274	22.5	568	30.0
294	22.8	588	30.0

第6表 内野地区観測井における基準線源(ケーシング)の積算変位

Integrated displacement of reference source (casing pipe) from 840 meters deep
Oct., 1961-July, 1962

Depth 深度 (m)	Bt ₁ (cm)	Bt ₂ (cm)	Mean 平均 (cm)
0	+15.0±1.1	+13.1±1.0	+14.0±0.7
20	+15.0±1.1	+13.0±1.0	+14.0±0.7
40	+14.9±1.1	+13.1±0.9	+14.0±0.7
60	+14.5±1.0	+13.3±0.9	+13.9±0.7
80	+14.7±1.0	+13.4±0.9	+14.1±0.7
100	+14.4±1.0	+13.2±0.9	+13.8±0.7
120	+14.6±1.0	+13.1±0.9	+13.8±0.7
140	+14.7±1.0	+13.1±0.9	+13.9±0.7
160	+14.4±1.0	+12.9±0.9	+13.7±0.6
180	+14.1±0.9	+12.7±0.8	+13.4±0.6
200	+14.0±0.9	+12.6±0.8	+13.3±0.6
220	+13.7±0.9	+12.4±0.8	+13.1±0.6
240	+13.6±0.9	+12.4±0.8	+13.0±0.6

Depth 深度 (m)	Bt ₁ (cm)	Bt ₂ (cm)	Mean 平均 (cm)
260	+13.7±0.8	+12.4±0.8	+13.1±0.6
280	+13.6±0.8	+12.1±0.8	+12.9±0.6
300	+13.5±0.8	+12.0±0.8	+12.8±0.6
320	+13.2±0.8	+11.5±0.7	+12.4±0.5
340	+12.8±0.7	+11.3±0.7	+12.0±0.5
360	+12.4±0.7	+10.9±0.7	+11.6±0.5
380	+12.2±0.7	+10.7±0.7	+11.5±0.5
400	+12.0±0.7	+10.6±0.7	+11.3±0.5
420	+11.9±0.7	+10.5±0.7	+11.2±0.5
440	+11.6±0.6	+10.3±0.6	+11.0±0.5
460	+11.3±0.6	+10.1±0.6	+10.7±0.4
480	+10.9±0.6	+9.8±0.6	+10.3±0.4
500	+10.7±0.5	+9.7±0.6	+10.2±0.4
520	+10.6±0.5	+9.5±0.5	+10.1±0.4
540	+10.3±0.5	+8.9±0.5	+9.6±0.4
560	+9.6±0.5	+8.4±0.5	+9.0±0.4
580	+8.7±0.5	+7.6±0.5	+8.1±0.3
600	+7.9±0.5	+6.8±0.4	+7.4±0.3
620	+7.2±0.5	+6.0±0.4	+6.6±0.3
640	+6.3±0.5	+5.4±0.4	+5.8±0.3
660	+5.8±0.4	+4.9±0.4	+5.3±0.3
680	+5.1±0.4	+4.3±0.4	+4.7±0.3
700	+4.3±0.4	+3.6±0.4	+4.0±0.3
720	+3.6±0.4	+2.8±0.3	+3.2±0.3
740	+2.9±0.4	+2.4±0.3	+2.6±0.2
760	+2.2±0.3	+1.9±0.3	+2.0±0.2
780	+1.6±0.3	+1.4±0.2	+1.5±0.2
800	+1.2±0.3	+0.9±0.2	+1.1±0.2
820	+0.7±0.1	+0.5±0.1	+0.6±0.1
840	0.0*	0.0*	0.0*

* assumed
 Positive sign: shrinkage
 Average time interval: 282.5 days
 観測期間

第7表 内野地区観測井における地層中の線源の積算変位

Integrated displacement of source held in stratum from 840 meters deep Oct., 1961 - July, 1962

Depth 深度 (m)	Source 線源	(cm)
20	Bl ₁	+14.0±0.8
40	Bl ₁	+13.3±2.3*
60	Bl ₁	+14.0±0.8
80	Bl ₁	+14.3±1.3
100	Bl ₁	+13.5±0.8*
120	Bl ₂	+14.4±1.1
160	Bl ₁	+14.4±2.8*
	Bl ₂	+15.6±2.1*
200	Bl ₂	+14.9±1.6

Depth 深度 (m)	Source 線源	(cm)
240	Bl ₂	+11.7±2.3*
280	Bl ₁	+13.6±0.9
	Bl ₂	+13.9±0.9
320	Bl ₁	+12.4±0.9
	Bl ₂	+12.1±0.9
340	Bl ₁	+10.9±1.3
	Bl ₂	+11.3±1.2
360	Bl ₁	+12.6±1.7*
400	Bl ₁	+11.0±2.1*
	Bl ₂	+12.5±1.2
440	Bl ₂	+11.7±0.9
480	Bl ₁	+10.9±1.2
540	Bl ₁	+9.5±1.2
580	Bl ₁	+8.2±0.8
	Bl ₂	+8.7±0.9
620	Bl ₁	+7.3±0.5
	Bl ₂	+6.7±0.5
640	Bl ₁	+5.0±0.8
	Bl ₂	+6.7±0.5
700	Bl ₁	+3.9±1.7*
740	Bl ₁	+3.2±0.8
780	Bl ₂	+0.6±0.6
820	Bl ₁	+0.8±1.1

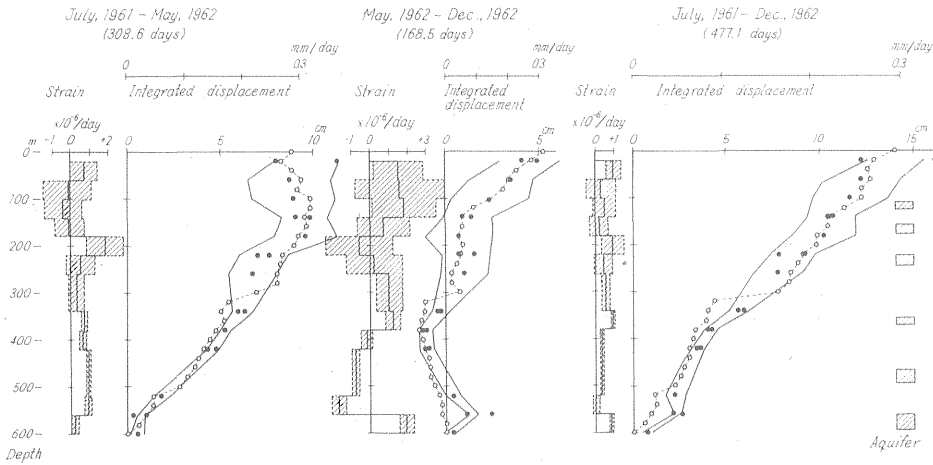
* Omitted in calculating strain

第8表 内野地区観測井における歪の変化率
Rate of strain

Depth interval 深度区間 (地層) (m)	(×10 ⁻⁶ /day)
20-60	-0.0±0.4
60-80	-0.6±2.1
80-120	-0.1±1.3
120-200	-0.2±0.8
200-280	+0.5±0.7
280-320	+1.3±1.1
320-340	+1.8±1.7
340-400	-0.7±0.8
400-440	+0.7±1.2
440-480	+0.7±1.7
480-540	+0.8±1.1
540-580	+1.0±1.2
580-620	+1.3±0.8
620-640	+2.1±1.4
640-740	+0.9±0.2
740-780	+2.3±0.9
780-820	-0.1±1.2

Positive sign: shrinkage
 Average time interval: 282.5 days
 観測期間

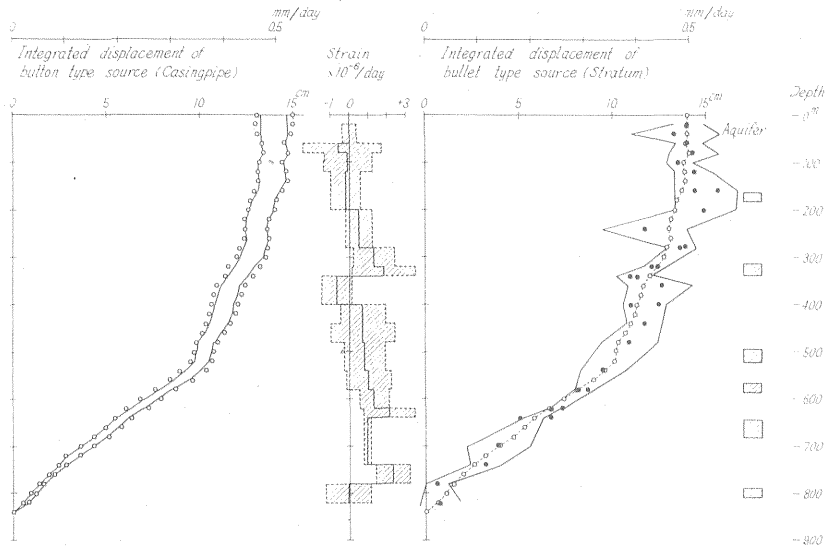
YAMANOSHITA R1 Observation Well (July, 1961-May-Dec., 1962)



Open circle: Button type source (casing pipe)
 Closed circle: Bullet type source (stratum)
 Segments connect the limits of error of mean integrated displacement of bullet type source

Fig. 8 Results of observations (Yamanoshita)

UCHINO R1 Observation Well, Oct., 1961-July, 1962 (282.5 days)



Open circle: Mean displacement of button source Segments connect the limits of error of mean integrated displacement of button type source (left) and of bullet type source (right)

Fig. 9 Results of observations (Uchino)

年7月の2回である。これらの測定から得られた観測結果は第1～8表および第8, 9図に示してある。

ここでは測定箇所を、浅い方からの番号でなく、概略の深度で示した。また、鉋型線源を Bt で、弾丸型線源を BI で示したが、それらの添字については前節と同様である。山ノ下地区観測井は BI' で表わされている弾丸型線源は鉋型線源との間隔から考えて打込み予定深度を誤つたとみなされるものである。

変位や歪の計算方法は前節に述べたとおりである。読

取りおよび計算はすべて 0.1mm の桁まで行ない、表示するとき四捨五入した。ただし、内野地区観測井についての歪の計算では、最も近い鉋型線源を不動としたときの弾丸型線源の変位 ($\Delta l_p(t_1, l_p)$) の誤差が 1.6cm を超す場合を除いた。また、深さ 100m の弾丸型線源による計数率が非常に大きく、線源がケーシングとコンダクタの間に入っている可能性が強いため、歪の計算から除いた。

二段検出器系の2つの検出器の間隔、すなわち基準間

隔の観測期間の前後における変化は、内野地区観測井ではコンダクタの深さが100mであるから、それに囲まれているケーシングの部分は長さに変化しないという仮定によつて検定された。山ノ下地区観測井ではコンダクタが20mでそれに囲まれるケーシングの部分が地温の季節的变化の影響をうけるので、原則としてケーブルやコネクタの交換を行なわないうが基準間隔の変化はないと考えた。測定期間中での基準間隔の変化は、ある特定の測定区間(おもに0m-20m)を1日1回以上測定し、その結果に基づいて補正した。

各表に示されている測定誤差は、統計的変動による位置の誤差と記録縮尺の補正係数の誤差とについて、前節に述べた式によつて計算した標準偏差によつて表わされている。山ノ下地区観測井についていえば、上部のケーシングの直径が太い方ほど誤差が大きい。第10図は山ノ下地区観測井における記録の例であつて、ケーシングの直径が太くなるほどピークの極大値が減り幅が広がることが示されている。内野地区観測井では、鉤型線源のピークは第10図の下の方のように鋭く、弾丸型線源のピークは上の方のようにゆるやかになつている。これは、山ノ下地区観測井で弾丸を打込んだとき鉄管を貫通しないものがあつたので、火薬の効果を増すように弾丸に鏢をつけ葉量を最大にした結果、地層内に深く貫入し、検出器からの距離が大きくなったためである。逆に、山ノ下地区観測井では弾丸の一部は地層中に深く貫入しないで掘さくによつて乱された部分に止まつていて、地層の変動を忠実に表わさないおそれがある。

1つの測定箇所には打込まれたいくつかの弾丸型線源の変位は同じでなければならない。しかし、変位の違いが誤差範囲に較べて大きいところがある。それは山ノ下地区観測井の深度20mおよび560mと内野地区観測井で深度640mとであるが、とくに山ノ下地区観測井の深度20

mで著しい。現在のところその原因は不明である。第3表、第8表、第8図、および第9図に示した積算変位、歪、およびそれらの誤差はこのような事情にかかわらず形式的に計算された。また、内野地区観測井で Bt_1 の積算変位は Bt_2 の積算変位より常に大きく、1測定区間(20m)につき0.045の系統的な差があることになるが、その原因は現在のところ明瞭でない。

山ノ下地区観測井での昭和36年7月から翌年5月までの約10カ月間の観測結果によると、 G_4 - G_5 層間の収縮が大きく、 G_2 層以上ではほとんど収縮が認められない。しかし、 G_2 、 G_3 層の中間の深度180~220mで歪が最大であつた。次の昭和37年5月から12月までの約6カ月間の観測結果では、期間が短いため誤差が相対的に大きくはつきりした結論を出すことができないが、深い地層の収縮がほとんどなくなり、浅い地層の収縮が大きくなり、歪の分布が逆の傾向になつている。

内野地区観測井での昭和36年10月から翌年7月までの約9カ月間の観測結果はほぼ同じ期間での山ノ下地区観測井での変位と同じ傾向を示し、 G_3 層以下で地層の収縮が大きく浅い地層はほとんど収縮していない。時に、 G_4' および G_5 層の直上で歪が大きく、また G_2 層でも歪が大きい。

孔底から地表までの積算変位は、特に山ノ下地区観測井において、水準測量による沈下量に較べてかなり大きいようである。第4表に水準儀によつて山ノ下地区観測井敷地内の水準点に対するケーシングの上端の抜上りを測定した結果を示してあるが、著しい変化は見られない。内野地区観測井では、構造上、ケーシングの上端は地表と同一の変位を示すはずである。

運輸省山ノ下観測井による同じ期間の層間収縮量の分布をアイソトープ観測井による結果と比較すると第9表のようになる。ただしアイソトープ観測井については、

G_3 、 G_4 および G_5 層の変位をそれぞれ深度220m、340mおよび600mの積算変位の平均値で表わす。また C_4' 層の変位として深度420mおよび520mの弾丸型線源の積算変位の平均値によつて深度470mの変位を一次補間で求めた値を用い、地表の変位は最も上部の鉤型線源の変位で表わされるとする。これらの変位の値から層間収縮量を求めた。収縮量の比率は、測定誤差や両観測井間の距離を考えると、ある程度似ている。

第5表は山ノ下地区観測井における昭和37年12月の孔内温度であ

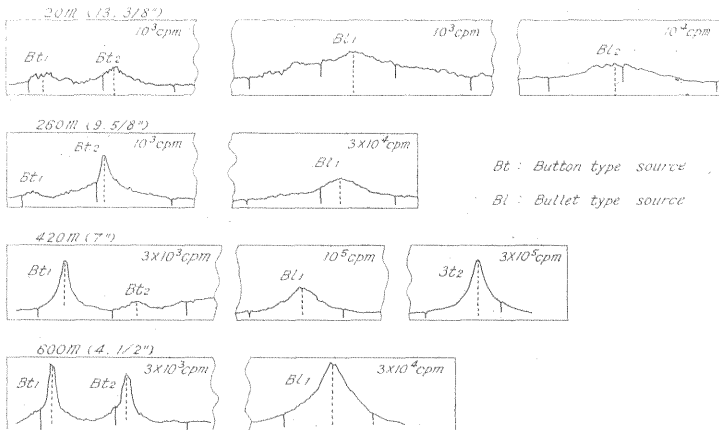


Fig. 10 Examples of counting rate curve recorded at Yamano-shita observation well

第9表 山ノ下地区における層間収縮量
Comparison of partial shrinkage at Yamanoshita
July, 1961-May, 1962

Aquifer 帯水層	Lift up type 二重管式観測井		RI type アイソトープ観測井	
	Depth 深度 (m)	Shrinkage 層間収縮量 (mm) (%)	Depth 深度 (m)	Shrinkage 層間収縮量 (mm) (%)
G ₅ -G ₄ '	610-490	16.21 (24.4)	600-470	27 (32.5)
G ₄ '-G ₄	490-380	13.91 (21.0)	470-340	29 (35.0)
G ₄ -G ₃	380-260	6.30 (9.6)	340-220	12 (14.4)
G ₃ -Surface	260-	0.30.04 (45.0)	220-	0 15 (18.1)
Total	610-	0.66.45 (100.0)	600-	0 83 (100.0)

May, 1962-Dec., 1962

Aquifer 帯水層	Lift up type 二重管式観測井		RI type アイソトープ観測井	
	Depth 深度 (m)	Shrinkage 層間収縮量 (mm) (%)	Depth 深度 (m)	Shrinkage 層間収縮量 (mm) (%)
G ₅ -G ₄ '	610-490	6.37 (24.5)	600-470	-12 (-24.0)
G ₄ '-G ₄	490-380	4.87 (18.8)	470-340	6 (12.0)
G ₄ -G ₃	380-260	2.10 (7.8)	340-220	15 (30.0)
G ₃ -Surface	260-	0.12.70 (48.9)	220-	0 41 (82.0)
Total	610-	0.26.04 (100.0)	600-	0 50 (100.0)

つて、検出素子にサーミスタを用い各温度において検出器を5分間放置してから測定した。このほか、山ノ下地区観測井において昭和37年5月に、内野地区観測井において昭和37年7月に測定を行なつたが、サーミスタを収容する耐水容器の熱容量が大きいにもかかわらず5m/minで捲上げながら、完全に熱平衡に達していないまま測定したので、表には示さなかつた。しかし、山ノ下地区観測井における2回の測定値の差は約1°Cであつて、二段検出器系の基準間隔に影響を及ぼすような温度の時間的変化はないであろうと考えられる。---

7. 結 語

RIを利用して地層収縮量の深度分布を測定する方法を開発し、一応実際に観測を行なう段階に達した。しかし、観測井の設置を急いだためまたそのほかいろいろな制約から、観測井の施工法や測定装置に充分でないところや改良すべきところも少なくない。

現在の観測井の構造が地層の変動を忠実に測定できるようになつていないと断言することはできないであろう。線源が打込まれている地層の部分に、地層に孔をあけて水で置換えたことの影響、すなわち観測井が存在することの影響、掘さくにより地層が乱されたことの影響、あるいは地層の変動によるケーシングの収縮や膨脹が逆に地層に及ぼす影響が及んでいるかどうかという問題が考えられる。これらの問題については、観測結果が集積さ

れ水準測量や拔上がり式観測井による観測結果と比較することによつてある程度解決されるであろう。

今回の観測井で基準線源の間隔を比較的大きく20mにとつた理由は積算変位の誤差を大きくしないようにしたためである。しかし、弾丸型線源を打込むことができる箇所が少なくなり、二段検出器系の取扱いも容易でないので、5m程度にまで短縮する方がよいように思われる。検出器の間隔を変えることは困難ではないから、基準線源の間隔を短かくしておけば、長い間隔による測定と短い間隔による測定とを併用することもできる。

現在の観測井の構造の考え方によれば、弾丸型線源を等間隔に打込みケーシングに付ける鉤型線源を省略することもできる。こうすれば既存の孔井を利用して観測井を作ることでもできるが、基準線源の位置の測定精度をできるだけよくするように検出器と線源との距離を近づけておくという点からいえばあまり望ましいことではない。

放射線測定回路についていえば、現在の装置では検出器の出力をパルスの形で地上の回路へ送る形式をとっているが、計数率に比例する直流として地上へ伝送する方法を開発し、両者の安定度や故障率などを比較してみることも必要であろう。

この観測方法を計画した当初は、線源の間隔の変化を1~2mmの誤差で測定することを目標とした。しかし、この目標に達していない部分がかなりある。その原因やそれに対する対策をまとめると次のようになる。

(1) 山ノ下地区観測井の上部ではケーシングの直径が太いために誤差が大きい。この部分では太い検出器を用い線源から検出器までの距離を近くすればよい。線源の強さがRIの半減期に従つて減衰してゆくので、今後は特にこのような措置が必要となるであろう。

(2) 内野地区観測井では弾丸型線源が地層に深く貫入しているために誤差が大きい。その深さは孔壁から50cm以上であろうと推定される。ガンパーフオレータの弾丸が地層に貫入する。また位置の計測ができないほど計数率が低いものもある。深さについては実際的な資料があまりなかつたので、貫入深度を制御するようなことは全然できなかつたが、今回の経験は将来の参考となるであろう。

(3) 線源として用いたRIの量は施工の際に特殊な器具や大がかりな遮へいによつて放射線障害を防ぐ必要がほとんどない程度にしたが^{注2)}、放射線の統計的変動の少ないよい記録をうるには弱すぎたようである。

(4) 記録紙の送りが不均一になることがあるため誤差

注2) トング(65cm)を用い、弾丸型線源50箇を抜つて被ばく線量が最大1mremであつた。

を生ずる。これは記録計の改良によつて無視できるようになるであろう。またこの種類の誤差は1回の測定で検出器の移動する距離が長いほど大きくなる確率が大きい。今回の観測井では打込み深度をテープによる検尺で決めたため予定深度から外れ、検出器を2m以上も移動させないと1回の走査が終らない場合がある。ガンパー用ケーブルに取付けられるカラーロケータまたは放射線検出器を使つて打込み位置をできるだけ正確に決めるべきである。

また、記録の縮尺を決定するために、ケーブルにスチールテープを当てて一定間隔のマークをつけそれらに対応する記録紙上のマークの間隔を計つて計算するという方法をとつているが、この方法ではあまり精度のよい値が得られないので、縮尺を決定する方法を精密化および自動化すべきである。

(5) 検出器の間隔を検定する手段が不充分なため誤差を生ずる可能性がある。観測井中に地層の変動や地温の季節的变化に影響されないような構造の鉄管を挿入しておくか、別にそのような構造をもつ検定用の浅い孔井を作るかすることが望ましい。

これまでの観測結果によつて、観測井のケーシングが地層とともに収縮すること、および帯水層においても難帯水層においても同程度の歪が生じることが認められた。歪の分布について細かく議論するには、注意深い測定を繰返し観測結果を集積する必要がある。したがつて、観測結果の解析は今後に残された問題である。沈下機構の検討に寄与するためには、従来考えられた機構によつてどのような収縮の分布が期待されるかを調べておくことも必要であろう。

(昭和38年5月稿)

文 献

- 1) 佐野俊一：RI 利用による地層収縮量の深度分布の測定法，応用物理，Vol. 30, No. 8, p. 598 ~607, 1961
- 2) 佐野俊一・金谷弘：新潟市における地盤沈下の測定について，第5回日本アイソトープ会議報文集（第4分冊），丸善，p. 64 ~66, 1963

付録1 放射線の統計的変動による誤差

第11図の左のように、線源の位置をあらわすピークの中心を原点として鉛直方向にZ軸をとり、計数率の変化をn(z)，その極大値をn₀(=n(0))とする。この曲線の3/4極大値幅をd，すなわちn(d/2)=3n₀/4とする。ある量fがnの関数であるとき、fおよびnの標準偏差をそれぞれσ_fおよびσ_nとすると、

$$\sigma_f = \sigma_n \cdot \frac{df}{dn}$$

であるから、f=zとすれば

$$\sigma_z = \sigma_n / \left(\frac{dn}{dz} \right)$$

である。

線源の位置、すなわちピークの中心は計数率曲線の極大値の3/4付近を平滑してその中心として求められるから、線源の位置の標準偏差σが3/4極大値の位置の標準偏差σ_zで表わすことができると考える。

σ_n=√3n₀/(4×2τ)であるから、

$$\sigma = \sqrt{3n_0/(8\tau)} / \left(\frac{dn}{dz} \right) = 3n_0/4$$

となる。n(z)は正規分布曲線で近似されるので

$$n(z) = n_0 \exp\{\log_e(3/4) \cdot z^2/d^2\}$$

であるから、

$$\sigma = 0.71d/\sqrt{n_0\tau} \tag{13}$$

が導かれる。

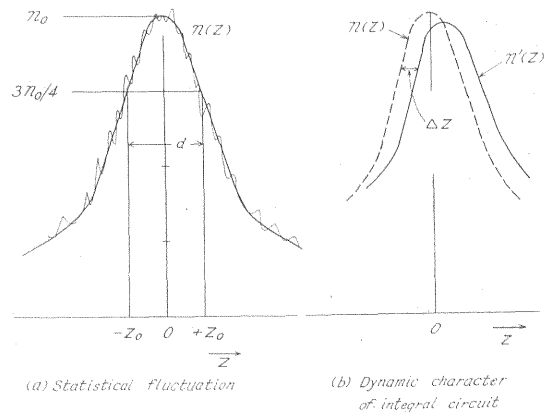


Fig. 11 Derivation of errors of measurement

付録2 計数率計の記録のおくれ

第11図の右のように、線源の位置をあらわす曲線n(z)が計数率計の積分回路の動特性によつてn'(z)に変形し、そのおくれがΔzであるとする。動特性はいわゆる一階形で、

$$n(z) = n'(z) + v\tau \frac{dn'}{dz}$$

である。一方、n'(z+Δz)を展開して、

$$n'(z+\Delta z) = n'(z) + \Delta z \frac{dn'}{dz} + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{(\Delta z)^n}{n!} \frac{d^n n'}{dz^n}$$

となる。変形が著しくなく、すなわちn'(z+Δz)=n(z)でならば、n(z)がピークを表わすとき上式の右辺の第三項は省略することができるから、2つの式を比較して

$$\Delta z = v\tau \tag{15}$$

を得る。