地殻歪の観測に及ぼす降雨の影響の 地下水浸透モデル

京都大学防災研究所 竹 本 修 三

(昭和 59 年 4 月 11 日受理)

A Hydrological Model of Rainfall Effect on Ground-Strain Measurements

Shuzo TAKEMOTO

Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

(Received April 11, 1984)

The relation between strain changes and amounts of precipitation has been investigated using data obtained from twenty-one crustal movement observatories in Japan. As a possible mechanism to explain this relation, a hydrological model of ground-water flow in a porous medium is considered.

Observation tunnels, in which extensometers are installed, are generally excavated in rocks containing many cracks or fissures. These rocks near the surface are assumed to be a porous medium. The water level in the medium shows rapid drawdown toward the tunnel because of drainage of ground-water into the tunnel. And the fluid pressure is predominant in the direction perpendicular to the axis of tunnel. Local strains under the action of fluid pressure around the tunnel are calculated with the finite element method.

Based on this model, observational results obtained from extensometers at Ide, Amagase and Iwakura observatories are explained well.

§1. はじめに

伸縮計を用いた地殻歪の連続観測を行っている多くの観測所(室)に於て、降雨の歪変化への影響が極めて大きいことがしばしば報告されている。これ等の内で地表面からの深さが比較的浅い観測坑道に計器が設置されている観測所(室)の場合、例えば岩倉観測室に於ける降雨の際の歪変化を見ると、20~30 mm/day を越える降雨に伴つて雨の降り始めから 6~10 時間遅れて坑内湧水量が急激に増加し、それと同時に伸縮計記録には 10^{-8} オーダーに達する顕著な歪変化があらわれる [竹本 (1967); 高田・他 (1981)]。他の観測室でもほぼこれと同様の変化が数多く見い出されている。また、天ヶ瀬観測室のように地表面からの深さが比較的深い観測坑道内に計器が設置されている場合には個々の降雨に対応する急激な歪変化は見られないが、年間を通じての歪変化を見ると雨期にはやはり降雨の影響が認められる [高田・他 (1974); TAKEMOTO (1983)]。しかし一方では屯鶴峯観測所 [高田・他 (1975)] のように地表面から比較的浅い観測坑道に計器が設置されているにもかかわらず、降雨の歪変化への影響が殆んど認

昭和 59 年 4 月 6 日発表

められない観測所(室)も一部にはある。

このように地殻歪の観測に及ぼす降雨の影響のあらわれ方の程度は各観測所毎にかなり異つていように見えるが、本研究ではまず国内各地の観測所(室)における降雨に伴う歪変化の観測例を調べてそれ等に共通する性質、即ち地形・地質構造等の固有の立地条件にあまり関係しない一般的な性質を見出し、それを統一的に説明し得るような地表面近くの地下水浸透モデルを考えた。次にこのモデルから推定される観測坑道周辺での地下水浸透圧変化によつて生じる坑道内の歪変化を1本の直線状坑道で代表される単純な形状の水平坑道の場合について計算し、ほぼこのような坑道で近似し得る観測室に於ける実際の観測例と比較した。

§ 2. 国内各地の観測所に於ける降雨と歪変化の関係

Fig. 1 は降雨に伴う歪変化の一般的性質を明らかにする目的で、国内各地の観測所(室)で報告された降雨と歪変化の関係を調べた結果を1つにまとめたものである。引用した文献に降雨と歪変化の量的関係が示されているものについてはその中の降雨量 100 mm に対する歪変化量をそのまま示してあり、その他についてはそれぞれの文献中の図から相当する歪変化量を推定して示した。

Fig. 1 で歪変化量を実線で示してある観測所(室)の殆んどは地表面からの深さが数 m ～ 数 10 m の比較的浅い坑道内で観測が行われており、降雨に伴う歪変化の一般的なパターンとしては、20～30 mm を越える降雨の際に雨の降り始めから数時間～1 日程度遅れて伸縮計記録上に顕著な歪変化が始まり、1～数日後にピークに達した後は徐々に減衰し、2～4 週間後にはほぼ 8 割方降雨の影響がなくなるといふ経過をたどる。この際、地下水湧水量或いは地下水位の変化を測定している観測室ではそれ等の記録上にも大きな変化が見られる(例えば宮崎 [高田・他 (1979)]; 逢坂山 [重富・他 (1981)]).

また、同図で — — — で示した六甲(鶴甲) [大塚・他 (1982)] 及び天ヶ瀬は地表面から計器設置地点の坑道までの深さが 100 m 以上ある比較的深い観測室であり、上記の例のような個々の降雨に直接対応する歪変化の場合とは異なり、年間を通じての変化の中で雨期に見られるやや長期間の歪変化をあらわしている。さらに………で示した屯鶴峯、鎌田山 [足立(1976)], 江刺 [佐藤・他 (1980)] については降雨に伴う歪変化が殆んど認められない観測所(室)である。

Fig. 1 から降雨に伴う歪変化の全般的な傾向を見ると、いくつか気の付く点がある。まず、図で □ で囲つてあるのはいわゆる“基準観測所”であり、地殻変動観測を目的として新たに水平面内3方向に延 100 m 以上の観測用坑道を掘削し、それぞれの坑道に沿う方向に 25～40 m の長さの伸縮計を配置したものである。観測所を取り巻く地質構造、地形等は当然まちまちであるにもかかわらず、坑道の長さ、形状の似かよつたこれ等の観測所に於ける降雨の際の歪変化は、江刺を除いていずれも 10^{-7} オーダーであることは極めて興味深い。これに対して降雨に伴う歪変化が 10^{-6} を越える観測室は既存の比較的短い坑道を利用したものが多く、坑道の長さ、形状の制約から伸縮計設置の方向は必ずしも坑道に沿う方向のみとは限らず、極端な場合は岩倉、井手 [高田 (1958)] のように坑道と直交する成分もある。また、坑道に沿う方向の成分であつても坑道奥の壁面のすぐ近くにまで伸縮計の基礎が延びているものも多く、これ等の伸縮計の基準尺の長さは“基準観測所”のものに比べて一般に短い。いずれにしても上記のように降雨の際に $10^{-6} \sim 10^{-7}$ オーダーの歪変化が見られる観測所(室)の内の大多数で

Fig. 1. Strain changes in relation to rainfall of about 100 mm.

は、常時坑内からの地下水湧出があり、降雨の際には地下水湧出量にも著しい増加が見られる。これに対して降雨の影響が殆んど認められないか、あつても 10^{-7} に達しない観測所(室)の内、江刺を除く、屯鶴峯、鎌田山、松代【浜田・柏原 (1981)】では坑内から坑外への定常的な地下水湧出は無く、坑内は比較的乾燥している。

以上のことから、地殻歪の観測に及ぼす降雨の影響を明らかにする上で考慮しなければならない基本的な点としては① 観測坑道内の地下水湧出の有無、② 坑道の長さ、形状と計器配列

の位置関係, ③ 坑道内計器設置場所の地表面からの深さ, が挙げられる. これ等の点を考慮に入れた観測坑道周辺の地下水浸透の一般的なモデルを次に考えた.

§ 3. 観測坑道周囲の地下水浸透モデル

地殻変動観測が行われている観測坑道の多くは地表面下数 $m \sim 100 m$ 程度の深さの岩盤内に存在する. この範囲での岩盤は一般に多くの割れ目・裂け目を含み, 巨視的に見れば Darcy の法則が適用される透水層と考えることができる. この中で岩石の割れ目・裂け目が集中している部分が帯水層となる. この帯水層が比較的浅ければ, そこでの地下水は自由 (不圧) 地下水であり, 深ければ被圧地下水である. また, 局所的に閉じた系を構成している割れ目に存在する地下水は宙水となる.

地表面に降った雨の一部は表層の土壌, 粘土, シルト, 砂等の層を通過して下部の帯水層にはいるが, 岡・角屋 (1975, 1976) によれば, 雨水が土壌中を通過する過程には2通りあり, 1つは土壌中をゆつくりと浸潤降下するものであり, 他は表層の亀裂内を速い速度で降下するものである. 我々の観測で地表面下 $10 m$ 程度の坑道内に於ける降雨の際の歪変化が比較的早く, 雨の降り始めから数時間~1日後にはもう始まることから見て, 表層をゆつくり浸潤降下し帯水層へ透過する地下水よりも, 亀裂中を急速に降下する地下水の方が地殻歪の観測に及ぼす影響は大きいと考えられる.

以上のことから地表面下数 $m \sim 100 m$ 程度の範囲内での地下水の状態は, 基本的には Fig. 2

Fig. 2. Schematic model of ground-water storage in rocks near the surface (left), and ground-water conditions around tunnels excavated in various depths of A~D (right).

(左)のようにあらわされる。いま、観測坑道が自由水面より浅い場合、付近に割れ目がなければ Fig. 2 (右) の ㉔ の状態であるから、そこでの降雨影響は少ない。前述の屯鶴峯、鎌田山の場合はこれに相当すると考えられる。一方観測坑道が浅くとも付近に割れ目が多ければ ㉔' の状態で、定常的な地下水湧出はなくとも降雨の際には坑内の漏水が増え、歪変化もかなり大きくなる。大浦 [TANAKA (1964)] 等がこの場合に於てはまる可能性がある。次に、常時坑内に湧水が見られる大多数の観測室は ㉕ ないし ㉖ の状態にあると考えられる。㉕ の場合は自由水面、㉖ の場合は圧力水頭が観測坑道に向けて急激に落ち込むために、降雨に伴って地下水面が上昇すると坑道の軸と直交する方向の地下水浸透力も増加する。これにより坑内では大きな歪変化が生じる。一方、観測坑道が深い場合は ㉗ に相当する。この場合も圧力水頭の等ポ

Fig. 3. Idealized distributions of water table around tunnels having different shapes.

テンシアル線が周囲から坑道に向けて 落込むことになり ⑧, ⑨ の場合と同様に坑道の軸と直交方向に浸透力が働く. ただし, この深さまでは個々の降雨の影響は直接伝わりにくく, そこで得られる歪変化はより長期間の地下水面の変動を反映しているものと言える.

次に, ⑧, ⑨ の場合について坑道の形状の違いによつて周囲の地下水位分布がどのように変り得るかをさらに詳しく調べたのが Fig. 3 である. まず, 坑道がない状態での地表付近の地下水位の分布は, 平均的にはほぼ地表の標高に比例していると考えられる. ここでは単純に地表面の勾配に等しい勾配の地下水面を考えた (Fig. 3(a)). ここに 1 本の水平な直線状坑道が掘削されたと同図 (b) のように, 地下水面は坑道周囲に向けて落ち込んでくる. 同様に (c) は直線状坑道の奥がつままっている場合であり, (d) は T 型の坑道の場合である. また, (e), (f) は “基準観測所” の坑道の一般的な形状である. いずれの場合でも坑道周囲で水位分布のコンターが混んでくるが, このコンターに直交する方向に浸透力が働くので, 坑道の変形は坑道を横切る方向に大きく縮み, 垂直方向に伸びることになる. また, 坑道の軸方向の変形は, 坑道の長さが直径に比して長い場合はその中心付近で伸びを示すが, 奥がつままっている壁面に近づくと逆に大きな縮みを示す.

以上の簡単な考察から, 地下水湧出が常時見られる観測所 (室) で観測される降雨に伴う歪変化の全般的傾向を説明することができる. そこで次に坑道の形状が一番簡単な直線状坑道の場合について, 周囲から圧縮力を受けた坑道の弾性的な変形のパターンを計算し, ほぼこのモデルで近似される井手, 天ヶ瀬, 岩倉の観測例と比較した.

§ 4. 圧縮力を受けた直線状坑道周囲の変形モデルと観測例との比較

まずはじめに, 内部に中空の坑道を含む弾性体に圧縮力が働いている場合の坑道周囲の変形を三次元有限要素法を用いて計算した. 計算の方法, 手順は天ヶ瀬観測室に於ける地形影響を調べた時のもの [TAKEMOTO (1981)] と同じである. 用いたモデルは Fig. 4 に示されているように, $y-z$ 面についての断面が ABCD であらわされる立方体の内部に, やはり断面が正方形であらわされる坑道が x 軸方向に沿つて延びているものである. MODEL-1 は坑道が突き抜けている場合に相当し, MODEL-2 は坑道の奥がつままっている場合である. いずれの場合も坑道断面の一辺の長さ (ab) は $\overline{AB} (= \overline{AD})$ の $1/4$ にとつてある. これ等のモデルは上下, 左右に対称であるから, 実際の計算はもとの立方体の $1/4$ にあたる領域, 即ち $y-z$ 平面についての断面が EBFO であらわされる領域についてのみ行つた. この領域を x, y, z 軸に沿つて $10 \times 5 \times 5$ 個のレンガ型要素に分割した後, 坑道部分に相当する要素を取り除いた. MODEL-1 の場合の境界条件は坑道の軸に直交する方向 (y 方向) の応力 (σ_y) が坑道奥の方向に進むにつれて (x 方向に沿つて) 単調に増大するような境界での節点力と等価な節点変位 EB を含む $x-z$ 平面内の各節点に与え, OF を含む $x-z$ 平面内の各節点の y 方向の変位を零とした. MODEL-2 の場合の境界条件は, EB を含む $x-z$ 平面内の各節点には一様な y 方向の応力 (σ_y) を受けているのと等価な節点変位を与え, OF を含む $x-z$ 平面内の各節点の y 方向の変位を零としたのに加えて, 坑道奥側の境界の $y-z$ 平面内の各節点には一様な x 方向の応力 (σ_x) を受けているのと等価な節点変位を与え, 坑道手前側の EBFO 面の各節点の x 方向の変位を零とした. この最後の条件から, MODEL-2 は ABCD 面についても対称で, 反対方向にも奥のつまつた坑道が存在するというモデルになつている.

Fig. 4. Finite element models used for calculating local strains in square tunnels existing in elastic media subjected to compressional forces (upper), and boundary conditions and calculated local strains (lower) (Model-1; free-end tunnel, Model-2; dead-end tunnel).

上記の 2 つのモデルについて、ポアソン比を 0.25 とした場合に得られる“LOCAL STRAIN”の坑道内の場所、方位の違いによる相対変化を Fig. 4 の下側にそれぞれ示してある。ここで言う“LOCAL STRAIN”とは、水平成分 (e_{xx} , e_{yy}) については坑道床面上の隣り合う 2 つの節点の水平変位の差を節点間の距離で割ったものであり、垂直成分 (e_{zz}) については坑道床面と天井の垂直変位の差を坑道の高さで割ったものである。

いずれのモデルでも坑道の軸と直交する成分 (e_{yy}) は大きな“縮み”を示し、垂直成分 (e_{zz}) は“伸び”を示すが、坑道の軸に沿う方向の成分 (e_{xx}) については、MODEL-1 ではわずかな“伸び”なのに対して、MODEL-2 では“縮み”となる。これ等の関係をさらにわかり易く示したのが Fig. 5 である。即ち、一定量以上の降雨があった場合の平均的な水位変化が、タンクモデル等を用いることにより、Fig. 5 の上側のように求められたとすると、それに伴う坑道中心付近の“LOCAL STRAIN”の時間的変化は同図下側ようになる。そこで次に、これ等の結果を、上記モデルにほぼ近い形状の坑道内で観測が行なわれている井手、天ヶ瀬、岩倉観測室に於ける実際の観測例と比較してみる。

Fig. 6 は高田 (1958) によつて報告された井手観測室に於ける降雨の際の歪変化の観測例を引用したものである。図から明らかなように 1956 年 9 月 26 日～28 日にかけて総雨量 180 mm にも達する降雨があり、これに伴つて坑道に直交する方向の水平成分のスーパーインヴァール棒伸縮計 (3) は 1.3×10^{-6} に達する急激な“縮み”を示し、坑道に沿う方向の水平成分 (2) は 0.2×10^{-6} の“縮み”，垂直成分 (1) は 0.7×10^{-6} の“伸び”を示している。高田

Fig. 5. Expected responses of local strains to change of water level around the tunnel.

はこの変化を付近にある砂防ダムの満水・貯砂による荷重変化と関連づけて論じているが、井手観測室に於ける降雨の際の歪変化がこの例以外の場合でも坑道と直交する水平成分は大きく縮み、垂直成分は伸び、坑道に沿う方向の水平成分はやや縮むというパターンを示すことから見て、これ等の変化は、先に述べた **MODEL-2** に相当する奥のつまつた坑道の場合の、降雨に伴う坑道周辺の浸透圧変化によつて生じた歪変化と解釈することも可能であろう。

次に **Fig. 7** は天ヶ瀬観測室における例である。同図下側に示されているように、天ヶ瀬観測室は全長 1830 m の直線状坑道の入口から 400~500 m の間を仕切つて観測室としたものであり、地表面から観測室までの深さは約 140 m である。ここに設置されている 4 成分のレーザー干渉計を用いた伸縮計で得られた約 1 年間の記録を降雨量と共に同図上側に示してある。先の井手観測室の場合と異なり、天ヶ瀬観測室は地表面からの深さが深いために、個々の降雨に対応する急激な歪変化は見られないが、図で 1979 年 6 月末から 7 月初旬にかけての 11 日間に総計 216 mm の雨が降り続いた後の約半月の間に、坑道と直交する方向の水平成分 (**L-2**) は 0.9×10^{-6} の“縮み”，垂直成分 (**EL-V**) は 0.5×10^{-6} の“伸び”を示している。これに対して坑道に沿う方向の水平成分 (**L-1, EL-1**) には 10^{-7} を越える変化は見られない。このような変化は、先に述べた **MODEL-1** の場合にほぼあてはまるが、**MODEL-1** の計算では σ_y が坑道奥に進むにつれて増大するという境界条件であつたものを σ_y が観測点付近では一定であるという条件に変え、さらに坑道の長さが直径に比べて極めて長いことから平面歪の仮定が成り立つと考えると、天ヶ瀬観測室に於ける観測結果をうまく説明することができる。

IDE

Fig. 6. An example of strain changes observed at Ide after heavy rainfall of 180 mm (upper), and arrangement of extensometers in the observation tunnel (lower) [After TAKADA (1958)].

岩倉観測室に於ける降雨の際の歪変化の一般的特徴は既に報告した [竹本 (1967); 高田・他 (1981)]. この内、前者の論文では“伸び”と“縮み”の記述が逆になっていた。ここに改めて岩倉観測室に於ける最近の観測例を、坑道内の計器の配置と共に Fig. 8 に示す。同観測室に

AMAGASE

Fig. 7. Seasonal variations of ground-strains together with precipitation at Amagase (upper), and arrangement of extensometers in the observation tunnel (lower).

は 3 成分のスーパーインヴァール棒伸縮計が Fig. 8 (下側) に示されている方向にそれぞれ設置されているが、いずれも水平成分であり、先の井手、天ヶ瀬観測室のような垂直成分はここには無い。図の上側で、1983 年 6 月 20 日～21 日にかけての 118 mm の降雨の際に、坑道と直交する成分 (E-1) には 3 日間で 4.4×10^{-6} に達する大きな“縮み”の変化が見られる。これに対して、坑道の軸に沿う方向の成分 (E-2) とこれに近い方向の成分 (E-3) の変化は量的に小さく、それぞれ 1×10^{-6} 前後であり、最初の半日程は、わずかに“縮み”を示すがその

Fig. 8. An example of strain changes observed at Iwakura after heavy rainfall of 118 mm (upper), and arrangement of extensometers in the observation tunnel (lower).

後すぐに“伸び”に転じている。変化の始まりからほぼ3日後のピークを過ぎた後は全成分共に次第に回復に向う。E-2、E-3成分の初期に見られるわずかな“縮み”を無視すれば、岩倉観測室に於ける降雨の際の歪変化は、坑道と直交する方向に大きく“縮み”，坑道に沿う方向に若干の“伸び”を示すというパターンではほぼあらわされる。この変化は先のMODEL-1の坑道が突き抜けている場合に相当する。同観測室は石灰岩の鉱山廃坑を利用したものであり、入口から約30 m奥をコンクリート壁で塞ぎ観測室としているが、もともとあつた坑道はもつと奥まで延びている。従つて観測室としては約30 m奥で止つているものの、突き抜けた坑道の場合と考えた方がより自然である。なお、初期に見られる3成分共に“縮み”の変化には観

測室奥のコンクリート壁の存在が影響を及ぼしているかもしれない。

§5. ま と め

地殻歪の観測に及ぼす降雨の影響の一般的性質を明らかにする目的で、国内各地の観測所(室)で報告された降雨と歪変化の関係を調べた。その結果、水平坑道内に設置されている伸縮計を用いた地殻歪の観測に及ぼす降雨の影響は、①観測坑内に於ける地下水湧出の有無、②坑道の長さ、形状とその中での計器配列の方位及び壁面からの位置関係、③計器設置地点の地表面からの深さ、の3点に着目してほぼ分類できることが明らかになった。そこで次に、これ等を説明し得る地表面近くの地下水浸透流モデルを考え、坑道周辺の地下水浸透圧変化によつて生じる坑道変形を、簡単な形状の直線状坑道の場合について3次元有限要素法によりモデル計算し、得られた値を、ほぼこのような形状の坑道で近似できる井手、天ヶ瀬、岩倉観測室の場合の実際の観測例と比較した。その結果、3ヶ所の観測室で得られた観測結果は上記モデルで定性的にはうまく説明できた。さらに進めて、個々の観測室についての定量的な議論を行うためには、観測室周辺の地下水位の変化及びその地域の弾性定数についてより詳しいデータが必要である。また、飯田・他(1969)、梅田・山崎(1978)、中村・尾池(1980)、大塚・他(1982)が犬山、阿武山、山崎、六甲(鶴甲)の各観測所(室)についてそれぞれ述べているように、観測坑道を横切つて顕著な破碎帯が存在する場合には、上記の一般的なモデルに加えて、破碎帯近傍での局所的な地下水浸透流の影響を考慮しなければならないであろう。

今回の研究では傾斜計による観測結果には触れなかつたが、Fig. 4 に示したモデル計算の結果から考えて、降雨の際の傾斜変化は坑道壁面近くでは大きくなることが予想される。従つて、水平振子型傾斜計のように計器の基礎が短い場合は、坑道内のどの場所にこれを置くかによつて降雨の影響のあらわれ方は大幅に違つてくると思われる。また、同一の傾斜計であつても長期の観測を続けていると降雨に対するレスポンスに差が見られることがあるが、観測点付近の岩盤に多数の割れ目が存在するとすれば、降雨が地下水となる過程でどの割れ目を伝わるかは任意性があり、たまたま計器付近の割れ目を伝わる量が多いか少ないによつてこのような差がでてくる可能性が考えられる。

おわりに、本研究を行うにあつて有益な御意見、御助力を下さつた京都大学防災研究所高田理夫教授ならびに地殻変動部門の各位に深く感謝致します。また、雨水の地表面付近の浸入・流出過程については同研究所、内水災害部門の岡 太郎助教授に多くの御教示をいただいた。同氏に厚く御礼申し上げます。

なお、計算は京都大学防災研究所防災科学資料センターの FACOM-M150 によつて行つた。

文 献

- 足立 昭, 1976, 観測坑近傍で実施されたトンネル工事の伸縮計記録への影響について, 測地学会誌, **22**, 40-48.
- 土居 光・加藤正明・和田安男・三雲 健, 1976, 上室における地殻変動の連続観測, 測地学会誌, **22**, 149-159.
- 浜田信生・柏原静雄, 1981, 松代における地殻変動観測に関する諸問題について, 験震時報, **45**, 49-83.
- 飯田没事・志知竜一・松浦 宏, 1969, 犬山における地殻変動の連続観測, 測地学会誌, **14**, 144-155.
- 石井 紘・佐藤俊也・立花憲司, 1973, 秋田地殻変動観測所における地殻変動観測 (2)——降雨による

- 地殻ひずみについて——, 測地学会誌, **19**, 135-144.
- 笠原 稔・田中安守・横山 泉, 1972, えりもにおける地殻変動連続観測——1971——, 北海道大学地球物理学研究報告, **28**, 83-95.
- 中村佳重郎・尾池和夫, 1980, 山崎断層における伸縮変化と降雨との関係について, 京都大学防災研究所年報, **23** B-1, 77-85.
- 岡 太郎・角屋 睦, 1975, 丘陵地斜面域における雨水の浸入・流出過程, 京都大学防災研究所年報, **18** B, 469-482.
- 岡 太郎・角屋 睦, 1976, 丘陵地斜面域における雨水の浸入・流出過程 (2), 京都大学防災研究所年報, **19** B-2, 153-165.
- 岡田義光・渡辺 茂, 1976, 富士川観測所における地殻変動連続観測 (2), 測地学会誌, **22**, 77-93.
- 岡野健之助・梅田康弘, 1974, 阿武山地震観測所における地殻変動連続観測, 地震, **2**, **27**, 262-269.
- 大塚成昭・田村良明・藤森邦夫・田中 豊, 1982, 六甲鶴甲観測室における地殻変動観測 (I), 測地学会誌, **28**, 134-151.
- 佐藤忠弘・大江昌嗣・佐藤範雄, 1980, 江刺地球観測施設における潮汐歪の観測, 測地学会誌, **26**, 35-49.
- 志知龍一・松浦 宏・飯田汲事, 1970, 犬山における地殻変動の連続観測 (II), 測地学会誌, **16**, 177-189.
- 重富國宏・橋田匡邦・藤井伸蔵, 1981, 逢坂山地殻変動観測所における地殻変動連続観測——伸縮変化と地下水位変化について——, 日本測地学会第 56 回講演会要旨, 76-77.
- TAKADA, M., 1958, On the Observation of the Crustal Deformation and Meteorological Effect on It at Ide Observatory, and on the Crustal Deformation Due to Full Water and Accumulating Sand in the Sabo-Dam, Bull. Disast. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., **8**, 23, 1-29.
- 高田理夫・古沢 保・竹本修三・山田 勝, 1974, 天ヶ瀬地殻変動観測所における地殻変動観測 (第 2 報), 京都大学防災研究所年報, **17** B, 47-56.
- 高田理夫・尾上謙介・藤田安良, 1975, 屯鶴峯地殻変動観測所における地殻変動観測 (第 7 報), 京都大学防災研究所年報, **18** B, 47-51.
- 高田理夫・古沢 保・竹本修三・尾上謙介・寺石真弘・園田保美, 1979, 宮崎地殻変動観測所における地殻変動観測 (第 1 報), 京都大学防災研究所年報, **22** B-1, 61-77.
- 高田理夫・古沢 保・竹本修三・山田 勝, 1981, 降雨及び湧水量変化の地殻ひずみの観測に及ぼす影響について——岩倉観測室の場合——, 京都大学防災研究所年報, **24** B-1, 71-76.
- 竹本修三, 1967, 京都岩倉における地殻変動観測 (I)——降雨の伸縮計, 傾斜計に及ぼす影響について——, 京都大学防災研究所年報, **10** A, 157-164.
- TAKEMOTO, S., 1981, Effects of Local Inhomogeneities on Tidal Strain Measurements, Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., **31**, 211-237.
- TAKEMOTO, S., 1983, Effects of Meteorological and Hydrological Changes on Ground-Strain Measurements, Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., **33**, 15-46.
- TANAKA, T., 1964, Study on the Relation between Local Earthquakes and Minute Ground Deformation, Part 1. On Some Statistical Results from Local Earthquakes Occurred in the Wakayama District, Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., **14**, 55-75.
- 田中寅夫・細 善信・加藤正明, 1979, 和歌山県由良における傾斜, ひずみと降雨について, 測地学会誌, **25**, 302-312.
- 梅田康弘・山崎純一, 1978, 阿武山における地殻変動の連続観測 (1972-1977), 測地学会誌, **24**, 153-162.
- 山内常生, 1981, 降雨に対する地殻歪レスポンスのシミュレーション, 測地学会誌, **27**, 40-49.