

37. 駒場に於ける土地伸縮の観測結果

地震研究所 高橋 龍太郎

(昭和14年4月18日発表—昭和14年6月20日受理)

1. 緒言 破壊的地震は常に種々の地殻變動を伴ふ事は古來周知の事實¹⁾であるが、此等の地殻變動が單に激震区域のみならず、量の差こそあれ相當廣範圍に亘つて観測される事は、1891年の濃尾地震以來、大地震の度毎に爲された水準、三角測量により確かめられた²⁾事柄である。然し此等の地殻變動は多くは地震の數箇年乃至數十箇年前に行はれてゐた測量と、地震の數箇月後に行つた測量との比較によるものであるから、観測された變動が何時起つたかと云ふ問題に對しては明確な解答を與へない。尤も關原地震³⁾の如く水準測量施行の數ヶ月後に地震が發生したので早速再測量を爲した例、又は丹後地震⁴⁾、伊東地震⁵⁾等の後に水準測量を繰返へした如き例があつて、地殻變動の時間と共に如何に發達したかを多少明かにし、又其の發生時刻を可成り狭い時間内に制限する事の出來た例が無いでもない。然し此等の測量でも1~2時間と云ふ様な短い時間の間に起つた變化に就いては其の發達の模様を明かに爲す事は出來ない。

此等破壊的地震に伴ふ地殻變動の大部分は地震動の最中に發達するものと考へられて居る。此は地震後の繰返し測量によつて判明する變動量が地震發生時の變動量に比較して少さい事、斷層の生成状態を目撃した者の言、及び斷層の兩側に於ける肉眼的變動量が測量によつて發見される變動量と同程度なる事等から綜合して眞に近いと思はれる。

1) 例へば 震災豫防調査會報告 26 號 (1896) 日本地震史料目錄; 32 號 (1900) 日本の地震に就いて; 46 號 甲, 乙 (1904) 大日本地震史料; 68 號 (1913) 本邦大地震概説; 理科年表等

2) 陸地測量部報告類

A. IMAMURA, *Publ. Earthq. Inv. Comm.*, 25 (1930), 1~143.

C. TSUBOI, *Jap. Journ. Astr. Geophys.*, 10 (1933), 93~248.

3) A. IMAMURA, *Proc. Imp. Acad.*, 4 (1928), 56, 109.

4) 陸地測量部 地震研究所彙報 3 (1927), 163; 4 (1928), 223~226; 5 (1928), 165; 7 (1929), 587.

陸地測量部 一等水準點檢測成果蒐録

A. IMAMURA, *loc. cit.*

5) 陸地測量部 一等水準點檢測成果蒐録

" 地震研究所彙報 8 (1930), 375; 9 (1931), 109.

然し乍ら地殻變動の一部分は地震發生後、徐々に、餘震發生と共に發達してゆくものと思はれ、又他の一部分は地震發生前に既に起つてゐる場合があると思はれる。地震に前驅して確かに地變が起つたと考へられるものを二三舉げれば、寛政4年(1793)12月28日、陸奥鰯ヶ澤⁶⁾に於ては地震の4~5時間前から汀線の後退が認められ、又享和2年(1802)11月15日、佐渡小木の地震についても同様の汀線後退が地震前2時間から認められてゐる。近年では明治5年(1872)2月26日の濱田大地震⁷⁾に於ては地震前數十分から可成り急速な汀線後退があり、其の量7~8尺、又最近では丹後地震⁸⁾に際して網野東方海岸なる三津、砂方等に於ては地震發生の2時間半位前から1m内外の隆起(海面の低下により判明)があつた。

地震に前驅する地殻變動は其の場所による變化が小さい關係上、内陸に於ては肉眼によつて注意される事はないので、從來の記録は上記の如く悉く海岸に於いてのみ起つた様になつては居るが、此れは海面といふ不動の面があるからで、實際は内陸に於いても海岸と同様、或は其れ以上に起るものと考へられる。

従つて、若し地殻變動の進行状態を不斷に觀測するならば、地震前後に於ける地殻變動の發達状況を詳細に觀測出来る望みがある。地殻變動の不斷觀測には土地の傾斜變化の觀測によるのが最も便利であるが、今一つの方法は基線長の伸縮の測定によるものである。東京府下三鷹村東京天文臺構内に設置されてゐる菱形基線⁹⁾は斯様な目的の爲であるが不斷觀測は行ひ難い。

筆者は土地の伸縮の不斷觀測を行ふ目的を以て、1934年夏、東京市目黒區駒場に於ける地震研究所支所に特種の伸長記録装置を設置した¹⁰⁾。本論文は該装置によつて爲された1935~1938年の4年間の觀測結果を取扱つてゐる。

2. 觀測された見掛けの土地伸縮 伸縮計は上屋根を有する塹壕内に設置されてゐる。塹壕は東西及南北の方向に、壘母中に掘られたもので、其の深さは約2.5mである。壕の東端及西端に近い所の側面に相互に25mの距離を距て、二箇の大きなコンクリート塊が埋め込んである。此のコンクリート塊は土地の自然状態をなるべく攪亂しない様にし且つ周囲の土と密着する爲に、最初に壘母中に穴を掘り其れにコンクリートを流し込んで作られた。

此のコンクリート塊間の距離を、其れと略同長の熔融水晶製の標尺と比較し、其の

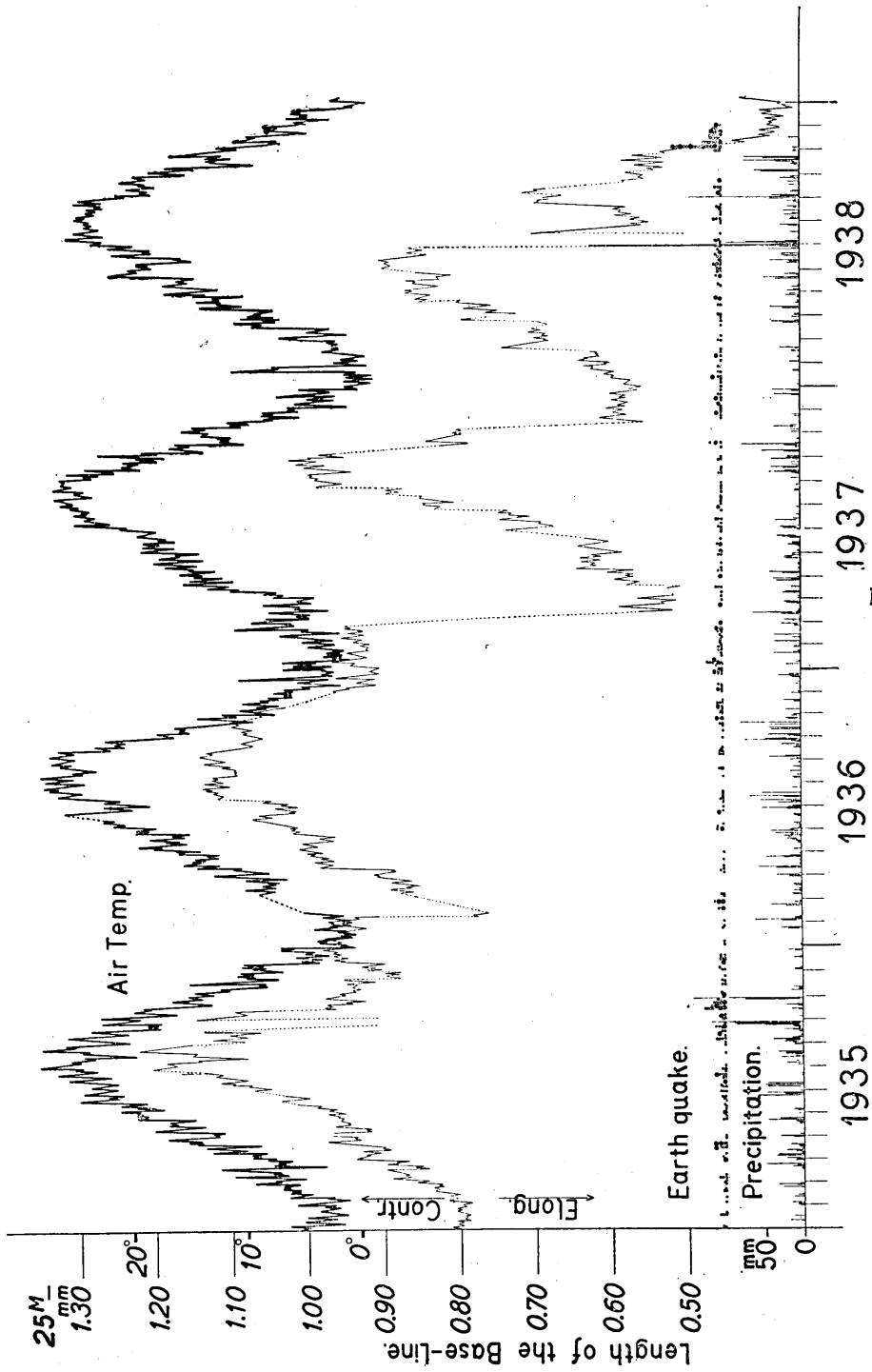
6) 松澤武雄“地震”

7) 今村明恒 震災豫防調査會報告 77 (1913).

8) A. IMAMURA, *Publ. Earthq. Inv. Comm.*, 25 (1930), 113.

9) 陸地測量部 菱形基線之測量, 昭和6年12月; 三鷹村基線測量報告, 昭和9年2月, 等測地學委員會昭和12年11月三鷹村基線測量等.

10) R. TAKAHASHI, *Eull. Earthq. Res. Inst.*, 12 (1934), 760.



第 1 圖
土地伸縮計の記録，太線……気温，曲線……土地の伸縮

長さの差が光挺によつて 1000 倍されて記録される様になつてゐる。装置は各コンクリート塊の重心附近に取付けてあるから、測定されるものはコンクリート塊の重心間の間隔である。此等装置の詳細は前記論文に記載してある。熔融水晶製標尺は屈曲を防ぐ爲に最初は水に浮かせたが、1934 年冬重油に浮かす様に改良した。水は冬期凍結する慮れがあつたからである。

現在は東西向の塹壕中にのみ此の装置が設備されてゐる。

第 1 圖は 1935~1938 年の 4 年間の観測結果で、太線は塹壕内の気温を示し、細線は記録されたまゝの土地の伸縮を示してゐる。尤も振幅約 30μ の日変化があるが便宜上、圖には其の日平均を示してある。又同圖には此の観測期間中に起つた顯著地震(黒丸)、稍顯著地震及び小區域地震(白丸)が示してある。此等の地震は氣象要覽に示された全國の凡てのものを取つてある。又雨量をも示した。此は天氣圖に據つた。

圖によつて明らかな如く、土地の見掛けの伸縮は気温の変化と略々並行で、小さい変化に於ては特に著しい。細線が上方に移動する事は土地が見掛け上収縮した事に當るので、土地の見掛けの膨脹係数は負である。此れは熔融水晶製標尺の膨脹に因るもので別に不思議はない。

所々に土地が急激に非常に伸びて、又舊に復してゐる所がある。此は豪雨の後約 2~4 時間で初まり 1~3 日位で回復するので、明かに地中に吸収された雨水の影響である。然し雨量が餘り大きくない場合には上記の現象は著しくない。此の地中の含水量と土地の伸縮との關係については別に記し度い。

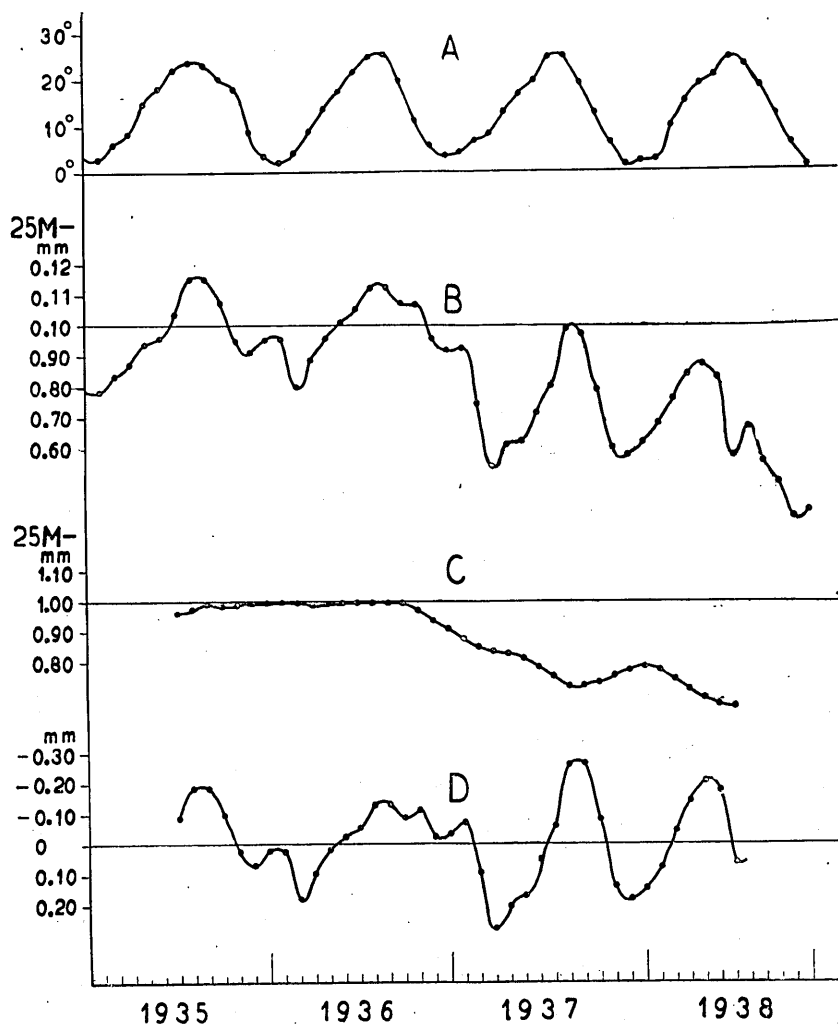
唯茲に注意して置く事は、斯様に雨の爲に記録が外れたり、又屢々あつた欠測の爲に記象が続かなくても、次の記象が前の記象に對して如何なる位置に来る可きかは、此の装置の性質上疑なく決定しうる事である。第 1 圖の伸縮曲線の變化に不連続的である所が 2~3 あるが、此は記録の續け方の誤りではない。

土地の見掛けの伸縮の年變化は気温の年變化に比較して著しく遅れて居り、其の形も亦気温變化とは餘り似て居ない。猶此の外に 1936 年冬から 1937 年春にかけて著しい積年變化があつた。

此等の事柄は第 2 圖により明瞭に示されてゐる。同圖 A は気温の月平均値の變化、B は見掛けの土地伸縮の月平均値、C は B の値の 12 箇月宛の重複平均で積年變化を示してゐる。D は積年變化を除いた基線長の見掛けの年變化を示してゐる。

3. 積年變化 第 2 圖 A の気温には著しい積年變化は認められず、従つて熔融水晶製標尺の長さにも積年變化があつたとは考へられないから、C に示した基線長の積年變化は基線長の眞の變化であると見做して差支へない。同圖に於て著しい事は 1935

～36年の2年間は基線長には殆んど變化が認められなかつたにもかかわらず、1937年初めに著しい變化があり、其後も小變化を繰返してゐる事である。同圖は重複平均を取つた結果であるので1937年初めの變化は其の前後に亘る割合緩やかな變化として現れてゐる。

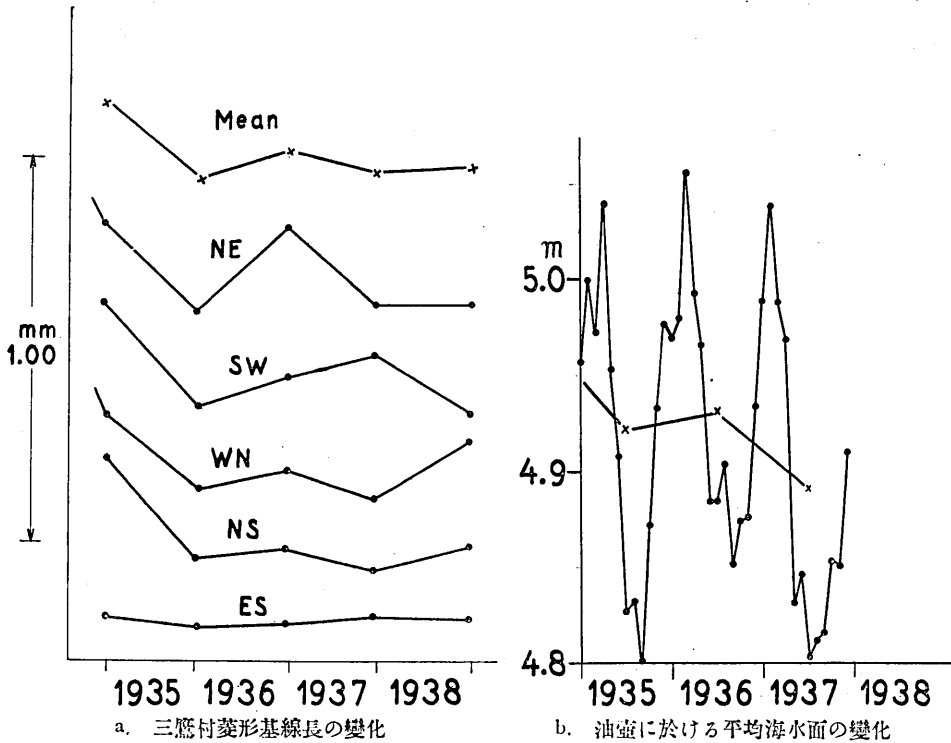


第 2 圖

A.....氣 温
 B.....基線長の見掛けの變化
 C.....基線長の積年變化
 D.....年變化 (B - C)

第3圖には同一期間に於ける東京天文臺構内の菱形基線の各邊長の變化並に其の平均値の變化と油壺檢潮場に於ける潮位の年變化及び月變化を示した。圖に於ては潮位は下向に測定してゐるから、實際の海面の昇降の有様は圖と逆の關係にある。坪井博

士¹¹⁾に據れば菱形基線の面積變化は油壺に於ける潮位の年變化と相似な關係があると



第 3 圖

云ふ事である。菱形基線の面積變化と各邊長の平均値の變化とは比例する事を注意して見れば、坪井博士の指摘した如き關係は今問題にしてゐる期間内でも略々成立つてゐるかに見える。今駒場で觀測された積年變化を此等變化と比較するに、菱形基線では各邊は大體年と共に收縮の傾向にあるに反し、駒場では年と共に伸長する傾向にあり其の形も殆んど似て居ない。然し乍ら此の兩者は並行の變化をせねばならぬ理由もなく、又比較の期間も短かすぎるので此を以て直ちに駒場に於て觀測された土地の伸縮が地殻變動の一斑を示すものではないと速斷する事は出来ない。然し乍ら積年變化が1937年以來起つた事及び此れと時を同じくして駒場支所に隣接して東京農業教育専門學校の建物が建築された事、其の建物の一部は塹壕から僅かに十數米を隔てゝゐるに過ぎない事等を考へ合すれば、此の變化の原因は主として上記建築にあるものと思はれる。地震の發生と駒場基線長の變化との間にも上記期間には著しい關係は見出し得ない様である。

11) C. Tsuboi, *Proc. Imp. Acad.*, 6 (1930), 367.

4. 年變化及び半年變化 第2圖Dに示した見掛けの基線長の年變化の平均を取り共れを調和解折する時は

$$\text{伸び} = 124\mu \cos(t - 57.9^\circ) + 30\mu \cos(2t - 300.0^\circ) + \dots$$

となる。又最初の2年間は殆んど積年變化が無いから第2圖Bの最初の2年間につき調和解折する時は

$$\text{伸び} = 140\mu \cos(t - 47.0^\circ) + 22\mu \cos(2t - 295.0^\circ) + \dots$$

となり何れも殆んど同様の結果を得る。

一方に於て、気温の年變化は第2圖Aより

$$T = 12.9 \cos(t - 207.0^\circ) + 2.8 \cos(2t - 186.8^\circ) + \dots$$

を得られる。即ち年變化については

伸び $9.6\mu/1^\circ\text{C}$;

位相 149.1° (5.97月) 進み

であり、半年變化については

伸び $10.7\mu/1^\circ\text{C}$;

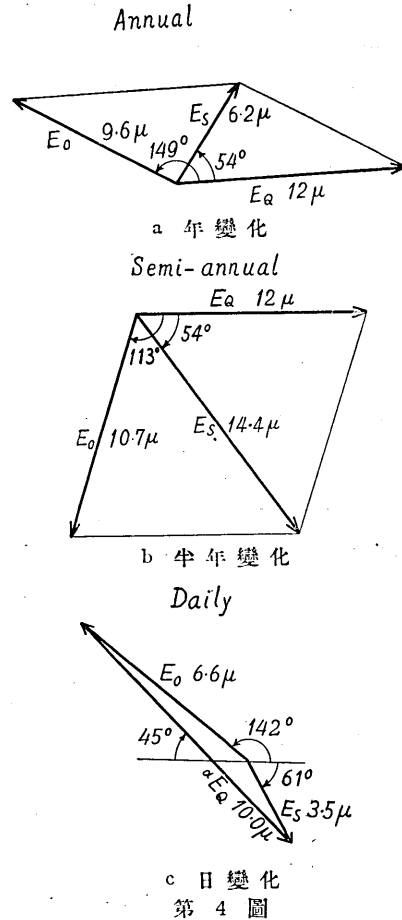
位相 113.2° (1.89月) 遅れ

となつた。然し乍ら此等の見掛けの伸び E_0 は基線長の變化と熔融水晶標尺の長さの變化との差であるから、基線長の眞の變化は此に標尺の伸びを加へなければならぬ。熔融水晶の線膨脹係数を $4.75 \times 10^{-7} \text{ cm}/1^\circ\text{C}$ ¹²⁾ とすれば標尺の伸び E_Q は $12.0\mu/1^\circ\text{C}$ で、年變化、半年變化の様な長周期の溫度變化に就いては位相の遅れは無いものと考へられる。従つて基線長の眞の伸び E_S は

年變化 $6.2\mu/1^\circ\text{C}$; $+54^\circ$
 半年變化 $14.4\mu/1^\circ\text{C}$; -54°

となり、気温に對し夫々 54° 進み及び 54° 遅れとなる。

此等の關係は第4圖に示すベクトル圖によつて容易に了解し得る。第4圖には上記



12) R. TAKAHASHI, loc. cit.

の變化の外に日變化をも加へてある。此の場合には標尺の伸びは氣温變化に對し約 3 時間遅れ、又其の温度變化も氣温變化の 0.85 になる事は前記論文に示した通りである。

5. 地中温度と基線長の變化との關係 基線長に年變化、半年變化を起さしめ

る原因は種々考へられるが其の主たるものは地中温度の變化と土の含水率の變化とであらう。先づ地中温度が基線長に如何なる變化を與へるかを考へて見る。伸縮計の設置してある塹壕の斷面の形は第 5 圖 (a) に示した通りで地中等温線は大體圖示の様になると考へられる。塹壕の長さの方向の型狀は同圖 (b) に模型的に示した様になつてゐる。今氣温を $\theta_0(t) = Ae^{i\omega t}$ とし坐標を圖示の様に取ればコンクリート塊間 (圖の A なる部分) に於ける地中温度の分布は

$$\theta_A(z) = \theta_0 e^{-m(1+i)Cz},$$

但し $m = \sqrt{\omega c / 2k}$, $k/c =$ 擴散率

となり、B なる部分に於ける地中温度は

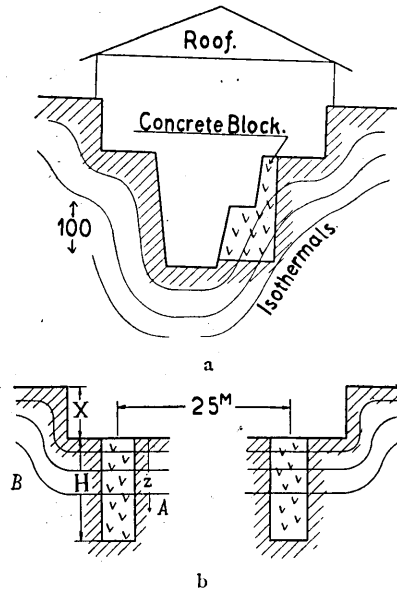
$$\theta_B(z) = \theta_0 e^{-m(1+i)C(z+X)}$$

となる。此の地中温度の爲に土が膨脹してコンクリート塊を移動及び傾斜せしめると考へ、其の中點の移動量を D 、傾斜角を ϕ とする。又塹壕の形及びコンクリート塊の配置は全く左右對稱であるから、凡ての事柄は塹壕の中央線について對稱であると考へる。然る時は圖の左のコンクリート塊に力を及ぼす土は塹壕の中央より左側の土であると考へられる。勿論此の場合にもコンクリート塊より左側にある土もコンクリート塊に力を及ぼすのであるが、コンクリート塊から如何程の距離までにあるものが此れに與かるかは不明であるから、今此の距離を U として置く。然る時はコンクリート塊に及ぼされる土の壓力は其の右側より

$$P_A dz = E \frac{2}{L} \left\{ \frac{\alpha L}{2} \theta_A(z) - D - \phi \left(z - \frac{H}{2} \right) \right\} dz,$$

となる。茲に E, α, L, H は夫々土の彈性率、線膨脹係數、コンクリート塊間の距離及びコンクリート塊の高さを示す。同様コンクリート塊の左側より働く壓力は

$$P_B dz = E \frac{1}{U} \left\{ \alpha U \theta_B(z) + D + \phi \left(z - \frac{H}{2} \right) \right\} dz.$$



第 5 圖

而してコンクリート塊が静止状態にある爲には

$$\int_0^H (P_A - P_B) dz = 0,$$

並に

$$\int_0^H \left(z - \frac{H}{2}\right) (P_A - P_B) dz = 0,$$

でなければならぬ。従つて此から

$$D = \frac{\alpha}{\left(\frac{2}{L} + \frac{1}{U}\right)} \phi_1,$$

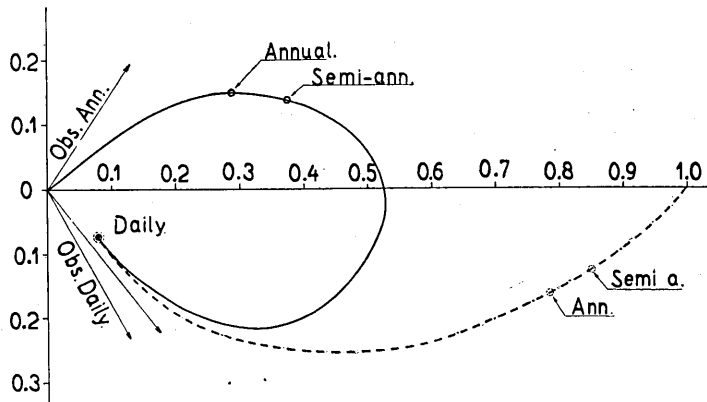
$$\phi = \frac{6\alpha}{H\left(\frac{2}{L} + \frac{1}{U}\right)} (\phi_2 - \phi_1),$$

但し

$$\phi_1 = \frac{1}{H} \int_0^H \{\theta_A(z) - \theta_B(z)\} dz,$$

$$\phi_2 = \frac{2}{H^2} \int_0^H z \{\theta_A(z) - \theta_B(z)\} dz,$$

となる。従つてコンクリート塊の形の重心間の距離の變化は、單に ϕ_1 なる地中温度の分布狀況の簡単な函數のみより定まり、コンクリート塊の傾斜には無關係である。而して現在の伸縮計で測定してゐるものはコンクリート塊の略々中央の點間の距離で、之の點は又形の重心と略々一致してゐるから上に求められた基線長の變化には傾斜の影響は無いと考へてよい。地中温度の分布狀況以外の原因から左右のコンクリート塊が不等傾斜を爲す場合は又問題が別である。



第 6 圖

今傾斜については観測がないから D のみを問題とする。 ϕ_1/θ_0 を求めて見ると第 6 圖實線にて示す如きものとなる。 ϕ_1/θ_0 は一般に複素數で、 m をパラメーターとした

時の ϕ_1/θ_0 の軌跡が圖の實線である。圖の原点から ϕ_1/θ_0 の實線上の一點まで引いたベクトルの長さが ϕ_1/θ_0 の大きさを表し實軸と成す角が位相角を示す。

圖の點線は $\frac{1}{\theta_0} \int_0^{\pi} \theta_1 z$ を示してゐる。

此の計算に於ては便宜の爲 $H=100$ cm, $X=100$ cm と取つた。壙母, 砂混り土, 砂混り粘土等の擴散率は大凡 $0.015 \sim 0.003$ C.G.S. 位の範圍内にある¹³⁾。駒場の壙母に對する本當の値は不明であるが, 今此を假に 0.01 とすれば

年變化に對する	$m=0.00315$
半年變化 "	" = 0.00446
日變化 "	" = 0.0604

となり之に相當する點は夫々圖に示した所に来る。

從つて以上の計算によれば

年變化	$\frac{2\alpha}{\left(\frac{2}{L} + \frac{1}{U}\right)} \times 0.32$	/1°C	位相	27° 進み
半年變化	"	$\times 0.40$	/1°C	位相 20° 進み
日變化	"	$\times 0.12$	/1°C	位相 45° 遅れ

と云ふ事になり, 年變化, 及び日變化の大きさ及び位相は α の値を適當に定める事により大體説明出来るが, 半年變化は以上の理論から出したものでは, 其の大きさに於ても, 又位相角に於ても實際に觀測された半年變化を説明する事は出来ない。此は恐らくは溫度以外の氣象條件, 譬へば地中の含水量の半年變化によつて説明する可きものであらう。之については別の機會に於て其の説明を試み度いと思ふ。

從つて只今は年變化及び日變化のみを考へ, 且つ其れが單に地中溫度のみによつて起されてゐるものと假定した上で, $\alpha L/2$ の値を適當に定め, 觀測値と計算値との差を示すベクトルの長さの自乗の和が最小である様にする, $2\alpha \left/ \left(\frac{2}{L} + \frac{1}{U} \right) \right. = 18 \mu$ となる。

U の値は實際は不明なので, 此から α を定める事は出来ないが假りに $\frac{L}{2}$ とすれば, 土の線膨脹係數として $\alpha = 1.44 \times 10^{-6}$ cm/1°C を得る。此の値は或種の陶磁器の膨脹係數に近い。 U を大きくする程の値は小さくなる。然し乍ら土が可塑性を持つてゐる事や, 其の體積の一部を押された場合に其れが歪を受ける部分は力の作用點附近の極めて小部分に限られる事等を考ふるならば U は寧ろ小さく取る可きであらう。從つ

13) 例へば, 海さ空 10 (1930), 59; *Geophys. Mag.* 6 (1932), 177; 氣象集誌 4 (1926), 42; 6 (1928), 172; 35年, 1; 36年, 24; *Encycl. Brit.* 13th. ed. Vol. 6, 894, 等々。

て今 U をコンクリート塊の長さ程度であると考へ、假に 2 m とすれば $\alpha=49 \times 10^{-6} \text{cm}/1^\circ\text{C}$ となり普通の岩石の 5~6 倍、エポナイト等と同程度のものとなり、尤もらしい値を得る。

以上の議論により、基線長の年変化及日変化の大部分は地中温度の変化によつて説明しうるものであると思はれる。半年変化は地中温度の変化によつては容易に説明出来ない。

6. 結言 以上によつて 1935~1938 年に亘る 4 年間に爲された駒場の基線長変化を説明し、其の積年変化、年変化、半年変化、日変化につき論議したが、此の観測の本來の目的たる地殻變動と地震發生との關係については何等かの纏まつた議論をする可く未だ観測期間が短か過ぎると考へられる。これについては更に観測の集積を俟つて研究を進め度い。

摺筆に當り長岡博士、藤原博士、坪井博士の御討論、御教示に對し感謝の意を表す。

37. *Results of Continuous Observations on the Length of a Base-line at Komaba, Tokyo.*

By Ryûtarô TAKAHASI,

Earthquake Research Institute.

In the summer of 1934, a base-line, 25 m long, was established in the compound of a branch station of this Institute at Komaba, the western quarter of Tokyo. Since then continuous observations of the length of the base-line have been made by the writer by means of a recording extensometer specially designed for this purpose. The results of the observation obtained during the period 1935~1938 are given in Fig. 1, in which the thick line shows the daily mean of the air temperature, the thin line the apparent daily change in the length of the base-line as recorded by the extensometer. In Fig. 2 are given (A) the monthly mean of the air temperature, (B) the monthly mean, (C) the secular variation, and (D) the annual variation of the length of the base-line.

The remarkable secular changes observed in 1937 and 1938 are attributed to disturbance caused by the erection of a school house in a ground adjoining the base-line. For comparison, the changes in the length of the rhombic base-lines at Mitaka and the changes in height of the annual mean sea level at Aburatubo are shown in Fig. 3.

The apparent change E_0 in the base-line length as recorded by the extensometer is the true change E_s minus the elongation of the silica etalon of the extensometer, the latter being parallel with the rise in the air temperature in the case of long period variations, annual and semi-annual. The phase and amplitude (Elongation / $^\circ\text{C}$ in the rise of the air temperature) relations between these quantities are given in Fig. 4 a, b, and c. In conclusion, it was found that the annual and daily variations in the length of the base line are mainly due to temperature variations in the ground, while the semi-annual variation cannot be explained by the same cause, but is probably due to variations in the water content of the ground.