

1966年イカ地震(ペルー)前後の土地の異常変動

田 中 豊, 一 戸 時 雄

エルネスト・デサ・M.*, アルベルト・A. ギーセッケ・M.*

ANOMALOUS CHANGES OF THE GROUND TILTS AND STRAINS BEFORE AND AFTER THE OCCURRENCE OF THE ICA EARTHQUAKE ON JUNE 7, 1966, IN PERU

By *Yutaka TANAKA* and *Tokio ICHINOHE* (KYOTO),
Ernesto DEZA M. and *Alberto A. GIESECKE M.* (PERU)

Synopsis

The international cooperative observations of the crustal movements related to seismic activities were commenced in the Ica region, Peru, at the end of 1965. On June 7th in the next year, the earthquake of magnitude around 6 occurred off the coast of Ica, accompanying a foreshock and a large number of aftershocks.

At that time the observations had not got to stable conditions, however, anomalous ground tilts had been observed at the three observation stations for a few months before the occurrence of the series of earthquakes. The vectors of anomalous ground tilts had the same direction as the strike of the faults in the region. At the nearest station, Zamaca, characteristic changes of ground strains, extending in the E-W component and contracting in the N-S component, also began 20 days before the occurrence of main shock and continued to the termination of aftershock activities. It should be noticed that the ground tilts preceded the ground strains there.

Examining these observed facts, in detail, it may be suggested that accumulated energy in the crust is first consumed with block movements or deformation of the ground surface and then concentrates in the focal region, in the case of a mosaic structure as expected from the faulting system in this region.

緒 言

京都大学防災研究所とペルー国公共事業開発省ペルー地球物理研究所, ペルー国サン・アグスチン国立大学地球物理研究所, およびチリ国立チリ大学地球物理学・測地学教室との協力による「地震に伴う地殻変動の国際共同観測」¹⁾は, 1965年末から1966年初頭にかけて, ペルー南部, チリ中部において開始された。とくに, ペルー地球物理研究所担当の Ica (イカ) 地域では, Condor (コンドール), Guadalupe (ガダルーペ), Sarmarica (サラマルカ), Zamaca (サマカ) の4観測所とも, 1965年12月初旬には, すでに常時観測の態勢に入ることができた。翌1966年6月7日 Ica 地域の沖合 20 km の太平洋底に Magnitude 5.5 (U.S.C.G.S.) の地震が起り, 6月20日頃まで多数の余震が, かなり広い地域にわたって続発した。本震の位置は, Zamaca から約 40 km, Sarmarica から約 100 km, Guadalupe から約 110 km, Condor からは約 160 km であるが, 余震発生域は Guadalupe, Sarmarica 両観測所周辺の内陸まで広がり, Zamaca は, この広範囲の破碎地域の中程にあると考えてよいであろう。この地震群発生の前後に, Zamaca ではこれと

* Instituto Geofísico del Perú, Lima

関係ありと考えられる顕著な異常変化が傾斜計 2 成分, 伸縮計 2 成分にあらわれ, また Saramarca, Guadalupe でも, その時期に特異な傾斜変動が認められた。

しかしながら, 一般に器械設置直後数カ月間は, 基礎台や器械が安定せず, なかなか良好な記録が得られないものであり, その上, この 4 観測坑とも, 1965年中に, この観測を目的として掘削された新しい横坑であるから, 掘削の影響もかなり続くものと予想されていた。幸いなことに Condor, Zamaca 両観測所はかなり早く安定な状態に達したようであるが, 一方観測者が未経験のため, 今回解析を行った1966年9月までは, 長期間の地殻変動を詳細に議論できるほど満足な結果は得られていない。とくに傾斜計よりも操作が難しい伸縮計による観測は, Zamaca を除いては, 異常変化を検出できる段階に達していないので, 今回は Zamaca の傾斜変化, 伸縮変化と Saramarca と Guadalupe の傾斜変化についてののみ報告する。また長期間の変動については, この地域全般の長期の地震活動との関連の下に論ずべきであるが, 1966年10月にはペルー沖に Magnitude 7.5 の大地震が発生しているので, 今回は9月で一応解析を打ち切り, イカ地震と直接関係があると思われるところの週または月程度の期間の異常変動だけを対象とした。

なお現在, 坑道や器械も安定し観測者も熟練して記録はきわめて良好であり, この地域の今後の観測成果に期待するところが大きいことを付記しておきたい。

1. Ica 地域で連続観測された土地の傾斜伸縮の永年変化

観測所の位置については, Fig. 6 を, また観測所の詳細に関しては「地震に伴う地殻変動の国際共同観測報告(序報)」¹⁾を参照して頂きたい。ただ, 観測地点選定に際して Condor, Guadalupe と Saramarca, Zamaca は Ica 地域内でもそれぞれ3つの異った Block に属することを予想して配置したことを今一度強調しておきたい。観測所所在地域は, アンデスの西分岐山脈 Cordillera Occidental と海岸山脈 Cordillera de la costa の間の準高原, 標高 500 m から 2000 m の砂漠地帯であり, 年間ほとんど降雨らしいものはなく, 気温の年較差は日較差よりも小さく, 地殻変動の観測に及ぼす気象影響は, 坑の浅い特殊な場合(Guadalupe)にあらわれる日変化以外には皆無であり, 年変化もないと考えてよい。それ故, 記録の解析はきわめて容易である。

Condor

横坑は, 新規掘削にもかかわらず非常に安定していて, 観測業務が順調に行われている場合には, きわめて良好な記録が得られている。しかし, この観測所だけは鉦山技師に記録取替を依頼しており, しかも記録取替者が数カ月で交代したりして, Fig. 1 に見られるように欠測期間が多い。ただCondorは今回のイカ地震群発生地域から 60 km, 本震からは 160 km も離れており, その上構造的にも別の Block に属すると考えられ, 顕著な異常変化が現われた様子は認められない。以後の議論でも, 1週間から数カ月でいどの異常変動に関してはこの観測所では異常変化は検出されなかったものとして取扱っている。

Guadalupe

砂漠地帯に独立した貫入岩体の山腹にあり, 昼間の日射によって草木の全く生えていない山自体が変形するためか, 四重扉を設けた観測室内でも傾斜伸縮の日変化は地球潮汐の半日周潮と同程度にあらわれる。しかし, 日変化以外の周期的および非周期的な気象変化がないため, 地殻変動の解析上大した支障はない。観測は熱心に行われているが, 気温の日較差が大きいため観測記録取替に入室するごとに観測室内の平均気温を大きく乱し, そのため記録に入室時の影響が大きくなるなど, いろいろな面で観測所としてはかなりの悪条件下にある。記録解析上の精度もしたがって低い。傾斜の南北成分と東西成分とで永年変化の様子が非常に異なるのは, 地形的な影響か, 地質構造的な影響か, あるいは計器自体に問題があるのか, あるいは Saramarca の場合もそうであるように, この時の地震に関係した異常変化の方向性によるかは明らかでない。また異常変化量が大きいことは, ある程度地形的な, あるいは貫入岩体という構造上の特殊性が増巾作用の役割りを果しているのかも知れない。傾斜変化速度は, 1966年4月初め, 4月末, 6月中頃, 8月初め

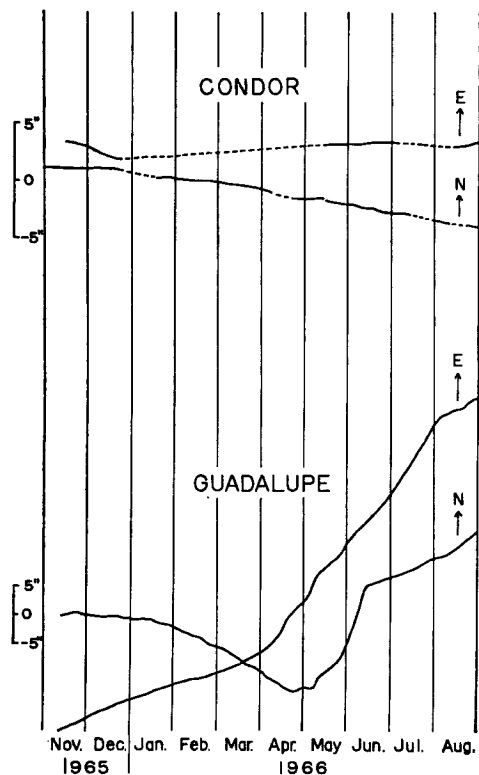


Fig. 1 Secular changes of ground tilts observed at Condor (Upper) and Guadalupe (Lower).

の4時期に変っている。この時期に関するかぎりは、Zamaca, Saramarcaの異常発現時期とよく一致する。

Saramarca

観測所が Ica 市から非常にはなれた辺地にあるにもかかわらず、きわめて熱心に観測が行なわれているが、Fig. 2に見られるように南北成分の drift がなかなかおさまらず、スケールアウトするために観測は困難をきわめていた。しかしスケールアウトをしても毎週の変化量は着実に測定され報告書に記録されているので、欠測があっても図示した永年変化の形は正確なものであり、週単位以上の変動を議論する上に支障はない。明瞭な異常は6月にあらわれているが、南北成分と東西成分では様子がかなり違う。とくに東西成分の6月中旬の方向転換は顕著であり、記録の上にも明瞭にあらわれており、今のところ人為的、器械的なものとは考えられない。これが Guadalupe の南北成分の転換期とその様相も時期も全く等しくすること、また最初に述べたように Guadalupe と Saramarca の2観測所は同一 Block に属するものとして最初に配置されたこと、Ica 地震の本震が Guadalupe の真南にあり、一方 Saramarca に対してはほぼ東にあること、傾斜計の場合2成分の傾斜計の感度の方向性を考えれば、一方の成分にのみ変化があらわれ、一方には全くあらわれない可能性が、現象の発生源の方向によって、現実には3回に1回程度の割合でありうることを考慮すれば、Saramarca のこのような様式の異常傾斜変化は十分ありうる現象と推定される。

Zamaca

Guadalupe と同じく砂漠の中にあり、坑も地下 20m 程度で深くないにもかかわらず日変化が全く現われないのは、Guadalupe と異って坑が周辺の土地に対し同じ高度で地形的な影響がないせいであろうか。伸

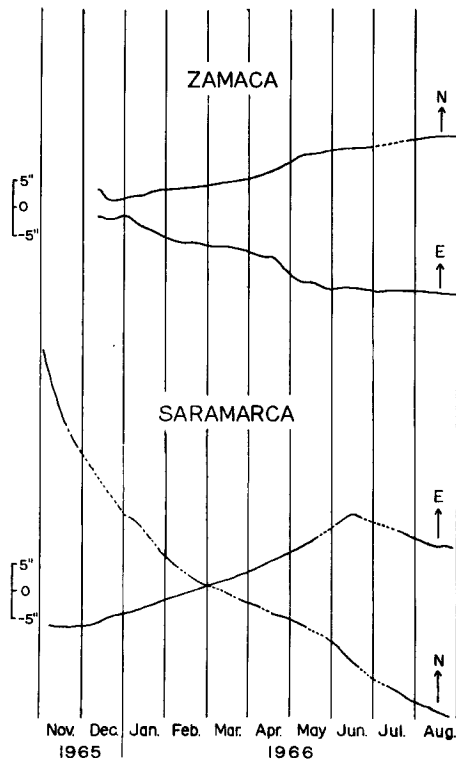


Fig. 2 Secular changes of ground tilts observed at Zamaca (Upper) and Saramarca (Lower).

縮計が1月末に切断したのは残念であるが2月中旬に修復された。伸縮計は約3カ月、傾斜計は約2カ月でほとんど設置直後の影響はなくなっており、一方的変形は年間を通じて傾斜で $10''$ 以下、伸縮で 5×10^{-6} 以下で、擾乱もほとんどなくなり安定していて、観測は十分満足な状態で続けられている。異常変化は、傾斜計では4月初め頃から起り、伸縮計は東西成分では2月9日の地震前後と、6月9日の地震の20日程前から7月末までの2回にわたって顕著にあらわれてその様式もよく似ているが、2月の地震では回復しているように見える。南北成分は2月の地震前に切断し、吊直し直後のため2月の地震の時の変化は明瞭ではないが、6月の地震の時は東西成分の伸びと同時にこの南北成分は縮みの変化を示している。伸縮計が2成分しか設置されていないため、最大歪量と方向は算出できない。なお、後に述べるように、異常な傾斜変化と伸縮変化の現われはじめた時期が異なるのは特筆すべきである。もちろん長期間の平常な状態というものがあるから、異常傾斜変化や伸縮変化が厳密にいつから現われたかということは、現在ではまだあまり正確に言える段階ではない。しかしながら、顕著に現われた時期というものには確実にズれているのであって、傾斜計にも伸縮計にも地球潮汐はかなり大きな振巾で観測されているのであるから、一方の感度が低いために現われなかったというものでは決してない。地球潮汐の振巾以下までも議論するならば別であるが、異常変動を潮汐の振巾以上の変動量とするならば、伸縮変化が傾斜変化に先行したのは事実である。少なくとも Zamaca における傾斜の異常変化と伸縮の異常変化はきわめて信頼するに足るものと考えている。なお Zamaca は Saramarca, Guadalupe とは異った Block に所在していると当初から考えていたが、異常変化の様式がこれら両観測所と異なるのは、本震にもっとも近く Block が異なるという

この他に観測所が海岸山脈の東縁にあり、付近は断層地帯であってその影響を多分にうけているということも理由として考えられる。

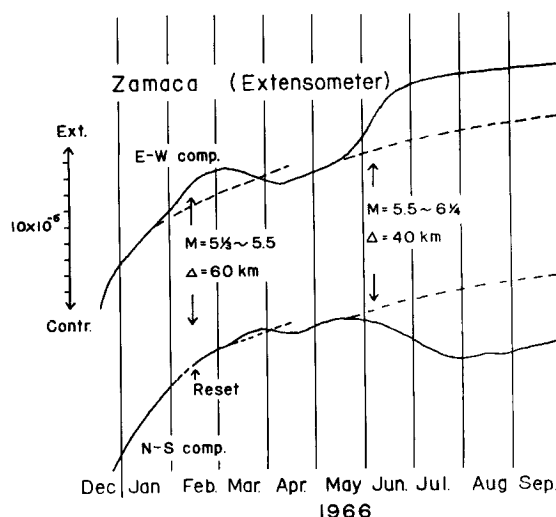


Fig. 3 Secular changes of ground strains observed at Zamaca.

2. Ica 地域の地震活動

南米アンデス地帯が世界でも有数の大地震多発地域であることは、よく知られているところであるが、中でもアンデス山脈が北西—南東の走向から南北の走向にかわって、山脈の中がもっとも広がるペルー南部からチリ中部にかけては、地震活動が極大で、種々の点で地殻物理学的に興味深い地域である。Ica 地域はその北端部を占め、この地域の北限の南緯 $13^{\circ}\sim 14^{\circ}$ の線を境として、その北側の Lima 地域とは地形構造的な差異がある。一方、地震活動度から見て、ペルー全土は北、中、南部の3つの地震区域にわかれ、同様に南緯 $13^{\circ}\sim 14^{\circ}$ 線がほぼ中部と南部の境界にあたり (Fig. 4 参照)、Ica 地域も Arequipa 地域も南部地震区域に入る。この南部地震区の南限は中部との境ほど明瞭ではないが、南緯 $18^{\circ}\sim 19^{\circ}$ の線で地震活動がやや低くなり、Gajardo-Lomnitz²⁾ が4つに分けたチリの地震区のうち北辺チリ地震区に続くものと考えられる。著者の一人 Deza は、わずか3年間の資料ではあるが、magnitude 3.8 以上7までの地震を用いて Gutenberg-Richter の式の b の値を求め、ペルー北中南3地震区の平均として0.882という値を得ている。用いた資料が少ないのでどの程度の信頼度があるかは別として、Richter³⁾ が Andes 地域全体について計算した0.45という値よりもかなり大きく、もしこの値がペルー・アンデス地区を代表するものとなれば宮村⁴⁾ のいう造山帯型地震帯の分類 ($b=1.0\sim 0.7$) の中に入る。たしかにこの地域はいろいろな面で日本の三陸沖と似通っていると思われるが、大型地震の発生頻度はきわめて高く、Ica 地域だけを見ても今回の Ica 地震の本震とほぼ同じ地点に1942年 magnitude 8.1 の地震が、また1950年には現 Guadalupe 観測所に近い Ica 市のすぐ南方に magnitude 7.0 の地震が発生している。

震源の深度分布は計測上の誤差を考慮しても、ペルー南部沖合のアタカマ海溝付近から 30° 位の傾斜でアンデスの下部に向う面より上部の全般に広がって発生していると考えてよさそうである (Fig. 5 参照)。確かにアンデス東部では浅い地震は少ないが、Ica 地域とそれに東隣するアンデスの西分岐山脈の真下では 50 km から 200 km の深度にほぼ一様に発生している。今回報告の期間にも、Ica 地域に 100 km を越え

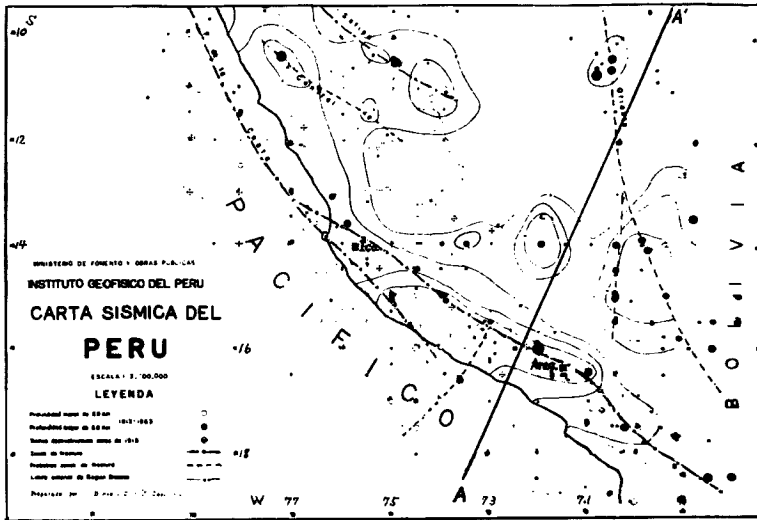


Fig. 4 Seismic chart of Peru.

- : fracture zone
 - - - : probable zone of fracture
 - - - : contour : exterior limit of seismic region
 - } : epicenters { 1913-1963 { depth < 60 km
 - } : epicenters { 1913-1963 { depth > 60 km
 - ⊕ : destructive earthquakes before 1913
- (prepared by D. Huaco O. and J. Castillo V., Instituto Geofisico del Perú)

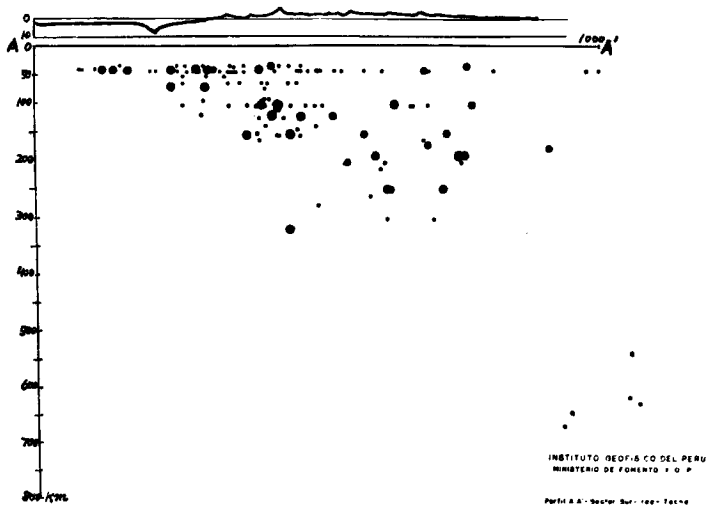


Fig. 5 Profiles of the same to Fig. 4 (see Fig. 4 for the location of projecting plane).

る地震3つ（そのうち1つは余震活動期間中）が発生しているが、この地域では震源が深さに対して連続的に分布していること、地殻の厚さが日本よりも厚いことを考慮するならば深さ 100 km を越えるものが 50 km の深さの本震の余震でないとはいきれないように思える。

Fig. 4 は Huaco, Castillo⁵⁾ (Instituto Geofísico del Perú) の作成したペルー全土の震央分布図の南半分であるが、地質構造との関係を考慮しながら、大地震の頻発地帯を破砕帯 (Zonas de fractura) と名づけて鎖線で結んであって、歴史上の大地震といわれるものもまたほとんどこの線上にあるとしている。内陸の深発地震をも予想される破砕帯として結んであることには疑問があるが、とくに海岸地域に注目すると、南緯 13°以北の、海岸より約100 km の沖合を連ねた線 (Fractura de la costa), および南緯16°以南の内陸の海岸沿いの線は確かに妥当なものである。その接点にあたる Ica 地域では震央の分布域の中が明らかに広がっているようである。あえて、ここを2つの破砕帯に分岐させたのは、主として地質構造を考慮したからと考えられる。すなわち、南西の海岸側の一本の破砕帯は北にのびて Fractura de la costa となって続いているが、これは貫入岩から成る断層隆起帯の低い海岸山脈が北に延びて、海中に没した海底山脈となって続いていることが海底地形からも知られているからであって、あきらかに震央は南緯 16°あたりまではこの線に集中していると言える。一方、分岐した北東側の破砕帯は、海拔 5000 m から 2000 m までの準高原と 3000 m を越える西コルディリエラとの境界をつらねた線に当り、破砕帯の西側は主として第三紀および第四紀の堆積岩から成っている。このような問題を考慮して、観測所の設置に当っては、Condor は東の破砕帯の東側に、Guadalupe と Saramarca は両破砕帯の中間地帯に、Zamaca は西破砕帯の西側に、すなわち3つの別の Block に配置した。後に述べるように、今回はこの配置にかなり意味があったと考えられる。

1966年10月18日にリマ市の北西 250 km の海岸破砕帯中に magnitude 7.5 の大地震が発生し、ペルー海

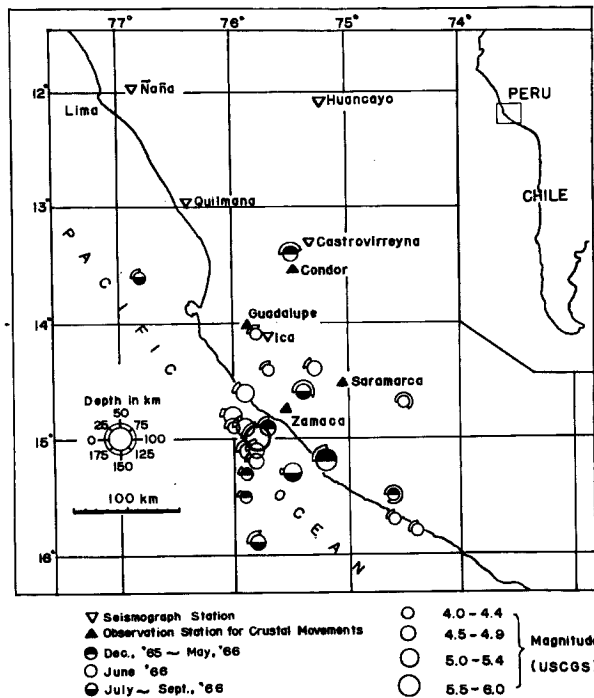


Fig. 6 Distribution of epicenters of the earthquakes occurred in the Ica region (Dec., '65-Sept., '66).

岸で 3 m 50 cm, 日本の八戸でも最大波高 42 cm に達する津波をもたらした。今回の Ica 地震はその 4 カ月前に同じ破碎帯の南部に起ったわけである。先の北, 中, 南の 3 地震区域という分け方と Fracture de la Costa という地震帯とは矛盾するようであるが, 南緯 13° から分岐が生ずるという点では中部と南部の地震区の境界線が南緯 13°—14° であることと一致する。この点に関しては今後の地震活動の相関性を詳しく調べる必要があるし, 地殻変動とこれら地震活動の関係を調べることも今後の重要な問題である。

過去の Ica 地域の地震活動状況から見れば, 今回の地震はこの地域では特別なものではない。Fig. 6 は南緯 13° から 16°, 西経 74° から 77° の範囲内に 1965 年 12 月から 1966 年の 9 月までに起った magnitude 4 以上の地震の震央分布図である。U.S.C.G.S. による位置と magnitude は Table 1 に示してある。これらの地震による energy の放出状況は \sqrt{E} の累積をもって Fig. 7 に示した。

さて, この 10 カ月間に Ica 地域では 24 個の地震が発生しており, 1965 年 12 月から 5 月までに 6 個 (ただし 2 月中に 4 個), 6 月中に 14 個, 7, 8 月 4 個で, このうち 70 km より深いものは 12 月, 2 月, 6 月, 8 月に各 1 個である。すなわち, 活動期は 2 月と 6 月であり, その間の 3, 4, 5 月が異常に静穏であった。

Table 1 List of the Earthquakes occurred in the Ica region

Period: Dec., 1965~Sept., 1966
Region: 13°S~16°S, 74°W~77°W
Magnitude: U.S.C.G.S. Scale

Date	Lat.°S	Long.°W	Depth km	Mag.	Remarks
1965 Dec. 8	15.5	74.7	170	4.3	
1966 Jan. 20	14.9	75.7	45	4.9	
Feb. 9	15.2	75.2	55	5.5	{ (5 ¹ / ₃ PAL) { (5 ³ / ₄ ARK)
Feb. 14	13.4	75.5	90	4.7	
Feb. 27	15.5	75.9	35	4.3	
Feb. 27	15.3	75.9	35	4.1	
June 2	14.1	75.8	60	4.3	Foreshock
June 4	15.7	74.6	50	4.3	
June 4	15.8	74.4	40	4.3	
June 7	15.0	75.8	50	5.5	{ Main shock { (6 ¹ / ₄ PAL) { (6 ¹ / ₄ BRK)
June 7	14.9	76.0	70	4.3	
June 7	15.1	75.9	40	4.9	Aftershock
June 7	15.1	75.8	50	4.8	
June 8	15.2	75.8	40	4.4	
June 10	14.8	76.0	20	5.0	
June 10	14.4	75.3	40	4.6	
June 11	14.6	75.9	40	5.3	
June 18	14.7	74.5	135	4.0	
June 19	14.9	75.9	30	5.1	
June 20	14.4	75.7	55	4.3	
July 5	15.9	75.8	55	4.9	
July 6	15.3	75.5	5	5.1	
Aug. 26	13.6	76.8	50	4.4	
Aug. 31	14.6	75.4	115	4.5	

2月9日には $m(\text{U.S.C.G.S. で決められた Magnitude})=5.5$ の地震 (Palisade, $M=5\frac{1}{4}$, Berkeley, $M=5\frac{3}{4}$) が Zamaca の南東 60 km に発生している。その後2月中に3個の地震が起っているが、余震とはいえないであろう。以後6月2日までの3カ月間この地域に $m=4$ 以上の地震は発生していない。このように静穏な期間はこの地域ではめずらしいことであるが、6月2日になって Guadalupe の南東わずか 10 km に $m=4.3$ の地震が発生した。その5日後、Zamaca の南西 40 km に $m=5.5$ (Palisades, Berkeley Scale ではないずれも $6\frac{1}{4}$) の地震が発生し、6月20日までに $m=4.0$ 以上の10個の余震を伴った。その発生地域は Zamaca をほぼ中心とした長径 140 km, 短径約 90 km の楕円となるが、magnitude $6\frac{1}{4}$ の地震の余震面積は宇津の式から計算すればせいぜい $(30\text{km})^2$ であって、もし10個のうち集中して発生している7個だけを含む余震域をとれば、本震から北西に広がる長径 40 km 程度の楕円になる。しかし、後の3個の地震の発生時期や前後の状況から考えて、残りの3個が本震の発生と無関係であるとは考えられず、余震域とはいえないまでも、この地震系列で径 140 km にわたって破壊が行なわれたと考えるべきであろう。そうすれば、6月2日の Guadalupe の南東 10 km に発生した地震はこの領域の中に含まれ、一種の前震と考えてもよいのではないと思われる。要するに問題は、この一つの地震系列を考えると、Zamaca は破壊領域の中心付近に位置し、Guadalupe, Sarmarica も本震からはそれぞれ 100 km, 110 km も離れているが、破壊域からはせいぜい 10 km から 20 km しか離れていないと考えても良いということである。なおこの地震群は、本震と最大余震の magnitude の差が小さく三陸はるか沖の地震と似ており群発型である。

3. 観測された土地傾斜伸縮の異常変化の様式と地体構造

永年変化の曲線はそれが台石や坑道の変形であるにしろ、器械の drift であるにしろ、設置後外部から何らの擾乱も受けない限りは、器械固有の滑らかな曲線をたどって安定化するものと考え、その推定曲線からはずれた分だけを取り出したのが Fig. 7 である。すなわち Zamaca の伸縮変化、傾斜変化、Sarmarica, Guadalupe の傾斜変化のうち異常変化と考えられる分を取り出した図であるが、そのためには本来は、正常な状態というものが十分に判っていなければならない。設置後半年では正常な状態というものは推定が困難であるが、Zamaca, Sarmarica については結果にそれ程大きな誤差はないと考えられる。ただ Guadalupe の、とくに傾斜計の南北成分については推定することが全く不可能なので Fig. 7 には観測曲線をそのまま再掲した。

先に述べたように、Zamaca の東西成分の伸縮計には2月9日の地震と関係があると考えられる伸びの変化があらわれており、変化速度の最も大きいところで地震が発生しているが、この2月の地震活動が終った頃から伸びの変化が縮みに転じ、1カ月後に回復している。異常変化は1月末に始まったように見えるが、設置直後であるため開始時期は断定できない。この地震と6月7日の Ica 地震との関係については今のところ明らかではない。ただ2月の地震の規模は6月7日の地震と大して変らないのにほとんど余震が起っていないことと、60 km という距離が、発生時の異常変化が似ているにもかかわらず、6月の地震の場合の塑性的変形に対し、弾性的変形を行なった理由ではないかと考えることができる。南北成分の伸縮計は1月末に切断して観測を休止していたため、異常変化があったかどうかは全くわからない。傾斜変化については最も近い Zamaca でさえもほとんど大きな異常は認められない。これは震央に対する観測所の方向性によるものかもしれない。以上のように2月の地震については、東西方向の異常な伸びが少なくとも10日前にあらわれ、変化速度が最大のところで地震が発生し、発生後も約半月同じ伸びの変化を続けた点が、6月7日の地震の場合ときわめてよく似ており、設置直後であることも考え合わせるとこの異常伸縮の信頼性を相互に高めるものであることを指適するに止めたい。以後3,4,5月の3カ月間 Ica 地域では異常に地震活動の静穏期が続いた。しかし4月の初めには Zamaca の南北、東西両成分の傾斜計と Guadalupe の東西成分の傾斜計が異常な変化を示しはじめ、それにやや遅れて4月下旬から Sarmarica の2成分の傾斜計と Guadalupe の南北成分に異常変化が起りはじめた。そして6月2日、Guadalupe の南東約 10 km に前震と考えられる地震が発

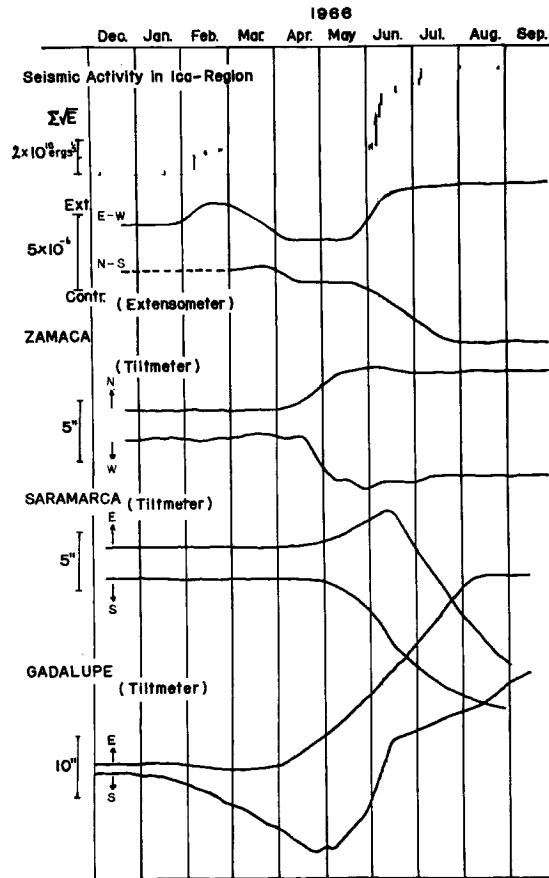


Fig. 7 Anomalous ground tilts and strains deviating from the smooth curve of secular changes and states of energy release by the earthquakes occurred in the Ica region

生した頃、Guadalupe では傾斜変化速度が極大に達している。それに対し Zamaca ではこの時期に傾斜の異常変化はほとんど終了し、それに代って5月20日頃から現われた東西方向の伸びと南北方向の縮みの変化速度が極大に達している。本震発生時も Zamaca の傾斜計を除いてはいずれも地震前の傾向を続け、特に Saramarca では本震発生後傾斜変化速度が最高に達し、6月10日には Saramarca の西北西30 km 余りのところに $m=4.6$ の地震が発生している。その直後 Saramarca の東西成分と Guadalupe の南北成分が同時に大きな傾斜速度の変化を示している。この一連の地震活動は7月の初旬頃にほぼ終了するのであるが、Zamaca の伸縮変化と Guadalupe の異常傾斜は8月初めまで続き、Saramarca では6月20日頃傾斜方向が転換して以後8月になってもなおその傾向を変えていない。Guadalupe の観測結果については信頼度の低い面もあり、局所的な異常変化である可能性もあるが、Guadalupe と Saramarca という相互に100 km以上離れた2地点で4月の終りと6月の中頃の2回にわたって全く同時に異常変化があらわれていること、Saramarca の東西成分と Guadalupe の南北成分、Saramarca の南北成分と Guadalupe の東西成分の変化の様式が非常によく似ていることは、両観測所が二本の破砕帯または構造線にはさまれた同じ地塊にあるらしいこと、破砕地域の中心部が Guadalupe のほぼ南、Saramarca のほぼ西にあること、別の Block に属する Zamaca

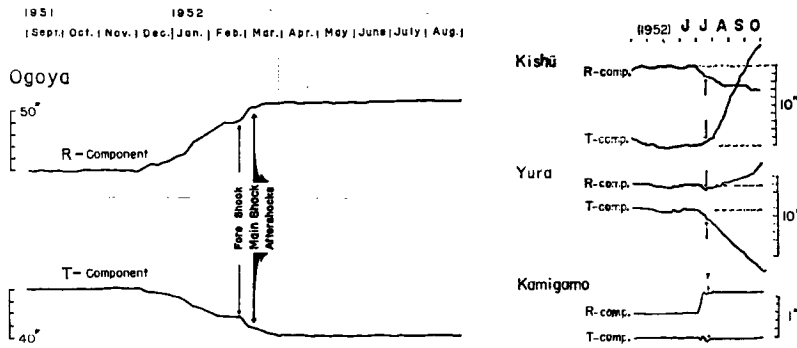


Fig. 8 Anomalous ground tilts before and after the occurrence of the Daishoji-oki Earthquake ($M=6.8$, depth=20 km) observed at Ogoya ($d=35$ km), and that of the Yoshino Earthquake ($M=7.0$, depth=70 km) observed at Kishu ($d=60$ km), Yura ($d=80$ km) and Kamigamo ($d=70$ km).

と全く変化の様式を異にしていることなどを考え合わせれば、必ずしも局所的な、地震に無関係なものとして無視することはできない。Samarca の場合のように地震後傾斜方向を転換したような例は、1952年7月18日の吉野地震⁶⁾ ($M=7.0$) の時に由良観測所、紀州観測所の傾斜変化にも起こり、翌年9月1日、同じ吉野地方に発生したほぼ同じ深さ (70 km) で同じ規模 ($M=6.5$) の地震まで続いたことが観測されている。この場合、構造上別の地域に属する上賀茂では、震央距離がほぼ同じ程度であるにもかかわらず、今回の Zamaca の場合と同じように異種の変動が認められている。これはいずれも深さ 70 km のやや深い地震であるが、たまたま6月18日に Samarca の東南東 60 km に深さ 135 km の地震が発生している。こうなると Guadalupe, Samarca の異常変動が2日の Guadalupe に近い前震によるものか、本震によるものか、6月10日の Samarca に近い余震によるものか、あるいは 135 km のやや深い地震によるものか、または、このような地震活動全般に関係があって、個々の地震とは直接に結びつかないものなのか、今のところは判定は困難である。ただ全体として Samarca と Guadalupe の変動の様式に似たところがあり、Zamaca だけは様式が違い、Condor では大した異常変化はあらわれなかったとしか云えないであろう。

Zamaca の傾斜変化の様式は、1952年3月7日の大聖寺沖地震⁶⁾ の際、尾小屋で観測された傾斜変化と非常によく似ている。この場合は Zamaca の2カ月前に対し、ほぼ3カ月前から異常変化が起っている。震源の深さは大聖寺沖地震の方が 20 km で浅く、magnitude は6.8で Ica 地震よりやや大きい、震央距離はいずれの場合も 40 km である。Zamaca の観測で特筆すべき点は、傾斜計2成分、伸縮計2成分のいずれにも異常変化が認められたにもかかわらず、明らかに傾斜変化の方が1カ月半先に現われたことである。もし地殻が全く均質な状態ならば、傾斜変化と伸縮変化は全く同時に起るべきものであると考えられる。しかし、もしモザイク構造であった場合供給される energy は、歪として蓄積される前に地塊運動に消費されるのではなからうか、あるいは上下方向には自由表面である地表面の変形に消費され、それが限界に達して、もはやかなりの抵抗なしには変形や地塊運動を起さなくなるに到って、はじめて歪 energy として蓄積され、やがて地殻のもっとも弱い部分に集中して地震が発生し、余震の活動中は破壊が進行するが、Block 的な運動をするために、昇降変動はあっても傾斜変化は少ないのではないかという想像もなしうるわけである。

確かに Zamaca 付近は断層地帯であって、貫入岩体が海岸山脈を形成し、断層は海岸線およびこの山脈に平行なものが支配的であって、Fig. 9 に示すように、山脈の東側では東落ち、西側では西落ち、すなわち、山脈の中央部が隆起した形を示している。それ故もし、この断層が地塊運動の境界であるか少なくとも影響を与えているとすれば、傾斜方向は断層線に平行であるか直角であるかのいずれかの様式を示すと考え

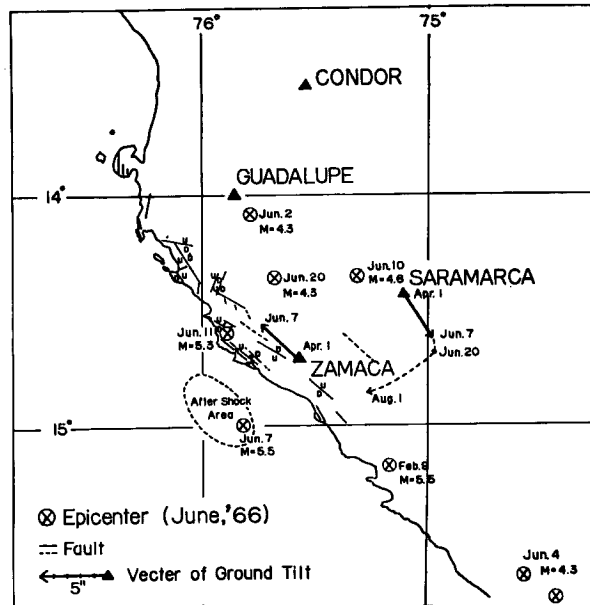


Fig. 9 Vector diagram of anomalous ground tilts at Zamaca and Saramarca related to the earthquake on June 7, 1966, and distribution of faults in the Ica region.

てよい。Zamaca の異常傾斜の方向は全くこの断層線に平行で、北西方向の Vector を示すことは、Fig. 9 に明らかな通りであり、また Saramarca では余震活動がほぼ終了する6月20日頃までは、やはり断層線に平行ではあるが逆の南東の方向に傾斜を続けている。Zamaca から Saramarca にいたる間は第3紀、第4紀の堆積層が厚く、明瞭な断層は見出されないが、両観測所のほぼ中間に海岸線とほぼ同じ走向の断層が推定されている。この地域では、すべての構造線の方向が海岸線ならびに山脈の方向と一致しているので、傾斜 Vector の方向が南東あるいは北西に向くということが必ずしも断層の影響とは断定できないが、異常傾斜の方向が Block ごとにそのような方向性を持つことは当然考えられると思う。

結 語

Ica 地震発生時までの観測は、未だ完全な状態に到っていないが、解析期間も短いので、Ica 地震あるいはこの地震系列に関係した地殻変動の全貌を明らかにすることは不可能であるが、観測状況が良好で、しかも本震に一番近い Zamaca 観測所では、少なくとも2カ月前から異常傾斜が、20日前から急激な異常伸縮の変化があったことは、間違いないところである。その異常傾斜の方向性とまたそれが伸縮変化より先に現われたということは、Zamaca 付近が海岸山地の断層隆起地帯に位置して、その地殻浅所のモザイク的構造が関係しているものと解釈できるが、この推測を積極的に支持するような証拠はない。ペルー地球物理研究所では、この付近の三角測量と水準測量を計画しているので、その結果が期待される。Zamaca とは地体構造を異にすると考えられる Guadalupe, Saramarca の観測結果は、異常変化の発現時期や様式の点で、Zamaca とは異なるが、相互に非常に似通ったところがあり、その様式を解釈することは困難だが何らかの異常があったらしいという十分な可能性がある。とくに地震発生域からもっとも遠くまた別の Block に属すると考えられる Condor 観測所では、顕著な異常変化は認められなかった。変化量については、Zamaca の 10^{-6} 程度の伸縮量はきわめて妥当であるし、 $5''$ の傾斜量も傾斜が2次の変形であり、また Block

運動として必ずしも広範囲にまでこの傾斜が続いているわけではないと考えられるから、大きすぎるとは考えていない。Guadalupe の異常変化は、それが距離 10 km に発生した地震に関係があり、また地形的あるいは構造的な増巾作用も十分考えられるから、量が大きい故に原因が局所的なものであると断定するのは早計である。Saramarca についても、吉野地震のような例もあるので、今後この地域の地震活動と比較して検討する必要がある。とくに本震の規模に対し、余震と考えられるものの発生面積が異常に広く、しかも本震に匹敵する程度の規模の余震が多いことから、地殻変動は本震の規模に比してかなり広範囲で大きい可能性は十分ある。

なお、1週間から数カ月程度の期間の異常変化が同じ観測所で傾斜計にも伸縮計にも十分な信頼度で観測された例はきわめて少なく、ペルーの観測開始半年後の成果としては予想外に大きなもので今後の観測成果が期待される。

今回の結果は、Guadalupe, Saramarca, Zamaca の相互に数 10 km 以上離れた砂漠地域の観測所を毎週巡回して記録の取替、器械の調整に努力しておられる Ica 市の Garcia 氏に負うところが多い、こゝに厚く御礼申し上げる次第である。また本論文作成に御助力を賜った地球物理学教室の加藤正明、中村佳重郎、林守孝、間宮清の諸氏に合わせて感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- 1) Research Section of Crustal Movement: Report on the International Cooperative Observations of the Crustal Movements related to Seismic Activities (Preliminary Report), Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Ann., No. 10A, 1967, pp. 77-111.
- 2) Lomnitz, C.: On Andean Structure, Journ. Geophys. Res., Vol. 67, No. 1, 1962, pp. 351-363.
- 3) Gutenberg, B. and Richter, C.F.: Seismicity of the Earth, Princeton Univ. Press, 1949.
- 4) Miyamura, S.: Seismicity and Geotectonics, Zisin (Journ. Seis. Soc. Japan), Vol. 15, No. 1, 1962, pp. 23-52.
- 5) Huaco O., D. y Castillo V., J.: Zonas de Fractura y Regionalización Sismica del Perú, Publicación del Instituto Geofísico del Perú, 1963.
- 6) Nishimura, E. and Tanaka, Y.: On Peculiar Mode of Secular Ground-Tilting connected with a Sequence of Earthquakes in some Restricted Areas, Special Contrib., Geophys. Inst., Kyoto Univ., No. 2, 1963, pp. 173-186.