

国立公文書館	
分類	
	③ ④
配架番号	3 A
	14
	14-20

10112  
ITEM # 178

# ピエゾ指圧計による火薬圧力測定

第一陸軍技術研究所第一科七班調製

国立公文書館	
分類	
配架番号	14-20

ピエゾ指圧計による火薬圧力の測定

R. H. Kent & A. H. Hodge: The Use of the Piezoelectric Gage in the Measurement of Powder Pressures. (Transactions of the A.S.M.E., Vol. 61, No. 3, April 1939, p. 197)

概説

銃砲によつて生ずる圧力を計算するために、銃砲の腔内に發生する火薬圧力を測定すると云ふ必要は、恐らく中世紀に於て大砲が發明されて間もなく起つたに相違ない。然し實用的な指圧計が作られたのは、ずつと降つて 1887 年米陸軍兵器廠の Rodman を以て嚆矢とする。この指圧計は壓力室から作用を受けるナイフによつて鋼片に凹みを與へ、その凹みの深さを測つて壓力を求めると云ふ方式のものであつた。

その後英國の Noble は現在に至るまで實用されてゐる周知の碎粒指圧計 (Crusher-type pressure gage) を考案した。これは氣體壓力によつてピストンが鋼製圓筒を壓縮して、彈性膜を越えた變形を起させ、その變形量から壓力を測定すると云ふ方式である。これらの指圧計は何れも壓力變化が緩慢な場合と急激な場合とで結果を異にするため、修正係數を採用すると著しい誤差を生ずる缺點がある。

且つ又 Rodman, Noble の指圧計によれば共に最大壓力を知るだけで、火薬の燃焼に關し完全な研究を付ふために必要な壓力の時間的變化に關しては何等解明される處がない。そこで新種の電氣式指圧計 (Recording gage) の必要が痛感されて來たのであるが、先づ簡便な指圧計が實用に供されるために満足せねばならぬ要求を列記してみると、

- 1) 指圧計の固有周期が壓力波の継続時間に比し充分短いこと。この継続時間は 14 吋砲の場合約 0.05 s、12 吋 0.30 吋の小銃では 0.001 s 程度である。
- 2) 指圧計は振動の激しい、後進及びこれに伴ふ振動に耐えるべきこと。
- 3) 壓力測定の精度は彈丸速度測定の精度と同程度なること。

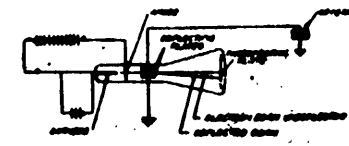
壓力波の時間的變化和記録する指圧計として初めて考案されたのは、1924 年 Vialle の作つたもので、これは電氣式指圧計のピストンの位置を特種ドラムの上に記録せると云ふ極めて原始的な原理によつたものである。

その後機械的に電氣的手段を利用した各種の裝置が相繼いで發見されたが、その中で壓電氣效果を利用するものは、上に列挙した要求を最も多く満足してゐるやうに思はれる。

壓電氣效果 (Piezoelectric effect) は 1880 年 J. Curie 及び P. Curie 兄弟により發見された。これは玻璃の結晶、例へば電氣石、水晶、岩鹽等が特定の軸方向に壓縮されると、加へた壓力に比例した靜電荷を發生すると云ふ現象である。具合の良いことに、これらの結晶は皆固有振動數を極めて高く取れるから、銃砲内で起るやうな短時間内に於ける急激な壓力變化の測定には、壓電氣效果を利用する方が打つてつけと云へるのである。この方法により壓力を測るには結晶に生ずる電荷の量を時間の函数として記録すればよい。新種のピエゾ電氣式指圧計は 1917 年に至り初めて J. J. Thomson<sup>(1)</sup> によりガソリン機関の氣筒内壓力を測定する目的に作られた。その後もなく彼の協力者 D. A. Keys<sup>(2)</sup> はこれを彈丸速度の測定に利用した。Thomson と Keys の裝置は電氣石と電氣石オシログラフとを使用するもので、第 1 圖に示す如き装置から成つて居る。

結晶が壓力により歪を受けると、發生した電荷は電氣石オシログラフの極板を充電し、この間に電位差を作るので、管内の電子線は靜電界により偏向せしめられ、管内の一端に置かれた高眞数板に壓力變化の記録を與へるのである。

第一次世界大戦後、米陸軍の兵器廠は Thomson



第 1 圖 Thomson 及び Keys の裝置と Keys の實驗結果に當り、大砲内の壓力を測定するに用いたピエゾ電氣式指圧計の原理を傳へた。し

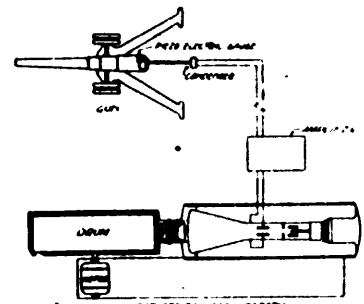
(15)

めくられず

かし當時としては、除極線オシログラフは著しく取扱の面倒な器具であつて、写真撮影を行ふのに、乾板やフィルムを管内に挿入した上排気せねばならなかつたので、この不便を避けるべく、部内の G. F. Hull, Karcher<sup>3)</sup>, Eckhardt 及び著者の一人 (Kent)<sup>4)</sup> は細線検流計や Duddell の電磁オシログラフを用ひる方式に就ても実験を進めて居た

1932 年になつて獨逸の Joachlin と Illgen<sup>5)</sup> は Zeiss-Ikon 会社のために螢光板を有する密封形除極線管、即ち所謂ブラウン管を外部撮影する方式のピエゾ指壓計を考案したので、除極線オシログラフは取扱が比較的簡単となり、これに力を得て 1934 年以後は著者の下に於ても、その他の點に就て種々の改良が試みられた。その結果現在最も多く使用されるやうになつた装置は第 3 圖の如き構成を持つものである。

受壓器は水晶板を堆状に積重ねて容器内に納めたもので、これを測定すべき火器の砲腔にねぢ止めする。受壓器の端子は近接して置かれた蓄電器に結ばれ、此處から架空線又は地下ケーブルによつて、相當の距離を隔てた直結合増幅器の入力に導かれる。増幅器の出力は除極線オシログラフの偏向板に與へられ、その電位差は受壓器の受ける壓力に正比例する。オシログラフの螢光板上の輝點の運動はレンズによつて凹面ドラムに巻かれたフィルム或は感光紙の表面に記録され



第 3 圖 ピエゾ指壓計の構成圖

る。感光紙上には符號によつて得られるタイミングの線が同時に記録される。

第 4 圖は新標にして得られた記録の一例で、口径 0.30" Springfield 小銃の銃腔内壓力變化を示すものである。時間は右より左に向つて進んで居り、壓力曲線の最初の切目は小銃弾が銃口に到達した時刻、第二の切目は弾丸が銃口の前方に置かれた鋼立を貫通した時刻を示す。タイミングの間隔は 1/1000 秒であるから、壓力が上り初めてから弾丸が銃口を飛出すまでに要す

る時間は、この小銃にあつては 0.001 秒である。



第 3 圖 Springfield 小銃の壓力記録

装置各部の説明

1) ピエゾ受壓器

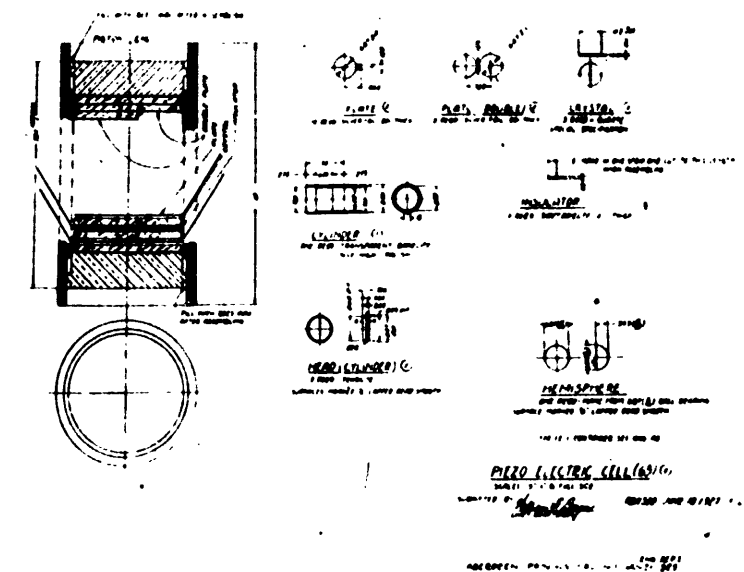
これは水晶堆とその腔體より成る。水晶堆は負極側を圓めて接地し、正極側を圓めて絶縁した引出線に結んである。第 4 圖は水晶堆の構造寸法、第 5 圖は水晶堆と腔體との組立圖面を示す。構造に就き特記すべき點は、水晶堆の正極側から電荷を取出す絶縁されたステムの組立方と、壓力を受けた場合に、腔體とピストンの弾性から水晶堆の微小変位が起つても、水晶堆と腔體との間の反作用が一定に保たれるやうに配置した Belleville 發條の使ひ方である。受壓器部分品の寫眞は第 6 圖に示した。

2) 蓄電器及び接続ケーブル

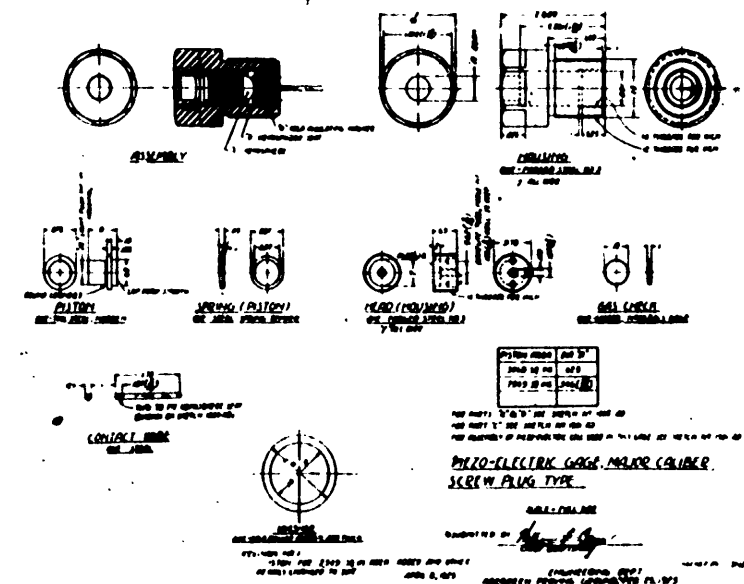
受壓器の出力端子は被試験火器の近くに置かれた良質の雲母蓄電器に結ばれる。蓄電器の容量は使用する受壓器のピストン面積と測定すべき壓力の大きさにより適當に調整を要するが、普通の場合 2-3 μF の値が必要である。蓄電器を増幅器に接続するには、通常架空線か地下ケーブルによるが、その長さは壓力の低い小銃を測定する場合を除き 2000 ft 乃至 8000 ft まで延長することか左迄困難でない。しかし更にこれ以上隔つた場處で記録を行ふ必要がある場合は、火器の近傍に補助増幅器を置いて一旦増幅した後線路に送り、遠方の建物内にある記録所ではこれを受けて更に増幅を行ひ、除極線オシログラフに掛ける。

3) 増幅器

増幅器として最も屢々用ひられたのは第 7 圖に示す如き被覆のものである。この設計に於て注意された點は、壓力波形式を與へる原因となるリアクタンスを極力小ならしめたこと、0-0.2 V の範圍に互り直線的な電壓増幅を行ひ得る如くしたこと、點である。結線方式としては格別目新しいものではない。入力真空管には多數の 6C6 型五極管の中から格子電流の出来るだけ小なるものを厳選して使用し、電荷漏洩の影響を避けた。又陰極及び陽極の電源として使用する蓄



第 4 圖 壓電水晶堆の構造圖



第 5 圖 受壓器の構造圖

電池は、増幅器の使用電壓が変動することのないやうに大量のものを使用したので、一日中連続して用ひた位では銃正曲線に於て變化を認めなかつた。

4) 除極線オシログラフ及び撮影装置

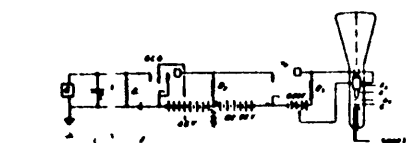
除極線オシログラフに使用せるブラウン管は青色の螢光を發し發光時間の短い特殊螢光物質を塗附せるものである。第 7 圖の結線圖を見ると、ブラウン管の第二極は増幅器の陽極電源電池に結ばれてゐるが、

めくられず

受圧器と増幅器とが長い接続ケーブルで隔離されてある場合には、第二極極を大地電位から浮かすのに別個の電池を用いた方が結果が良い。



第6図 受圧器部分品の写真  
撮影装置は f1.8, 口径1時のレンズを備へ、16mmドラムの上に感光紙を巻付たるものである。タイミングの線は音叉と真空管を用ひて記入する。



第7図 増幅器の結線図

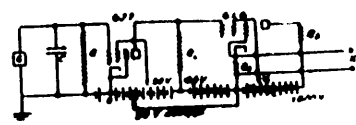
6) 遠隔測定用増幅器

第2図の如き指圧計の構成に第7図の増幅回路を使用する方式は、実験室から程遠くない場處で小銃又は密閉室の試験を行ふ場合や、電力線その他から来る妨害が著しくない場處で、半哩位までの距離を隔てた大口徑火砲の測定を行ふ場合には充分満足な結果を與へる。しかし乍ら、実験室から火器が置いてある現場までの距離が数哩も離れて来ると、途中から誘導される妨害電圧が著しく大となるため、どうしても測定電圧を伝送する前に一旦増幅して置く必要が生ずる。

第8圖は斯様な遠距離測定に用ひて好結果を挙げた増幅回路の結線図である。この増幅器は2部から成つて居て、最初の部分を火器の近傍に置き、後の部分は記録装置のある建物内に設置する。第一増幅器は高格子抵抗を持つた入力真空管を使用し、これと直結された次の真空管の陰極電流が線路を流れて、その末端に接続された600Ω抵抗の両端に圧力に比例した電圧を發生する。第二増幅器はストレート回路とブッシュ回路の混血兒のやうな接続を有して居り、その入力抵抗は圖に見る通り約600Ωである。

第7圖及び第8圖の結線圖に於ける符號の意味及び回路定数は次の如し。

- C=0.1-6μF 蓄電器,
- G=ピエゾ電氣式受圧器,
- R<sub>1</sub>=5MΩ 抵抗
- R<sub>2</sub>=0.115MΩ 抵抗
- R<sub>3</sub>=0.1MΩ 抵抗



第8圖 遠隔測定用増幅器の結線圖

- R<sub>4</sub>=600Ω 抵抗,
- R<sub>5</sub>=5000Ω 抵抗,
- G<sub>1</sub>, G<sub>2</sub>, A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, K= 夫々ブラウン管の第一格子, 第二格子, 第一陽極, 第二陽極及び陰極,
- V<sub>1</sub>=6L6 真空管の陰極接続線に對し +225V のタップ,
- X= 傳送線路.

この回路の主たる利點は比較的大きな(400-500V)出力電壓を取出し得ること、ブラウン管の輝點のボケが少ないことである。

線路の両端に接続した600Ωの抵抗は、壓力波電壓の反射現象を避けるために必要なもので、この値を變化すると、記録された壓力波形が反射波のため著しく歪むことが實驗により確められた。この増幅器の組合せでは、實用範圍で直線的な増幅特性を得ることが稍々困難であるから、較正は注意深く行ふ必要がある。

較正の方法

記録されたオシログラムの上で振れをpsi(吋度/平方吋)單位の壓力で置むためには、指圧計の裝置を壓力に就て較正する必要がある。これは次の如くして行はれる。

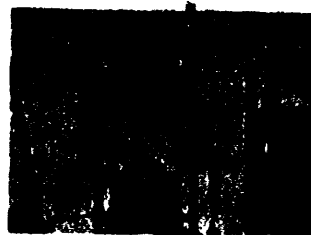
- 1) 受圧器のみを單獨に較正し、壓力と靜電氣量との關係を求めらる。
- 2) 蓄電器、増幅器及び陰極線オシログラフを含む瘦りの裝置に就き、蓄電器に與へた電氣量と陰極線オシログラフの振れとの關係を求めらる。

この二種の較正結果を綜合したものが、指圧計全體の壓力較正曲線となるのである。無難な手間を省き壓力とオシログラフの振れとの關係を求めらることは勿論不可能ではないが、實際には死荷重壓力ゲージを火器に

取付けねばならぬ不便を生ずる。又受圧器の較正結果は相當の長時間

信用を置くことが出来るが、増幅器の方はこれに較べて一般に不安定であるため、記録を取る度に較正する必要がある。この意味から云つても上記の如く分較正を行ふよりは、却つて實際の操作を簡便ならしめる利點がある。

受圧器自身を較正する裝置は第9圖に示す如き手押噴筒と死荷重を使用する油壓ゲージであつて、これだけで最大15,000psi, 壓力倍率器 (pressure intensifier) を併用すれば最大50,000psi までの壓力を受圧器に加へることが出来る。この裝置には急速減壓が附屬してゐて、50,000psi の壓力は0.003乃至0.010s の短時間内に大氣壓まで落すことが出来る(第10圖参照)。この壓力を緩く減らす際に受圧器に生ずる電荷が較正に利用されるのである。第11圖は受圧器較正結果の一例を示す。

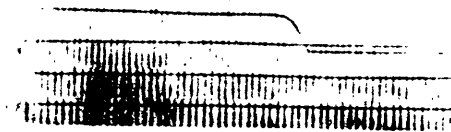


第9圖 較正に使用する死荷重油壓力ゲージ

前記述べた如く、本指圧計に用ひられる受圧器は高い固有振動数を持ち、砲身が後退する際の激動に不感で、充分なる精度を有して居らねばならぬ。固有振動数は代表的な受圧器では約50,000cpsで、この程度ならば大抵の火器に對しては充分である。しかし更に固有振動数の高いものが必要とあれば、水晶板の枚数を減じ、ピストンの直徑を小にしたものを作ればよい。激動に對する感度も實用上問題にならない程度で、3吋或は更に大口徑の火砲に取付けても何等支障を來さなかつた。唯小銃の場合に受圧器を内部に挿入すると、銃の平衡が取れないために多少の困難を生ずることがあつた。現在の處、測定に際して起り得る誤差は1%

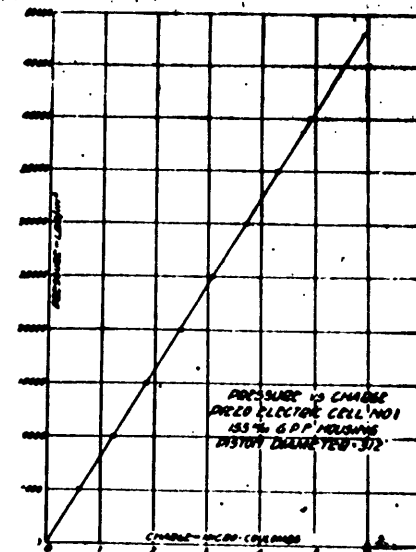
指圧計の特性

前記述べた如く、本指圧計に用ひられる受圧器は高い固有振動数を持ち、砲身が後退する際の激動に不感で、充分なる精度を有して居らねばならぬ。固有振動数は代表的な受圧器では約50,000cpsで、この程度ならば大抵の火器に對しては充分である。しかし更に固有振動数の高いものが必要とあれば、水晶板の枚数を減じ、ピストンの直徑を小にしたものを作ればよい。激動に對する感度も實用上問題にならない程度で、3吋或は更に大口徑の火砲に取付けても何等支障を來さなかつた。唯小銃の場合に受圧器を内部に挿入すると、銃の平衡が取れないために多少の困難を生ずることがあつた。現在の處、測定に際して起り得る誤差は1%



第10圖 ゲージの減壓時と開火時の壓力變化記録

内外である。



第11圖 受圧器に加ふる壓力と發生する電氣量との關係

本裝置の蓄電器の容量を減じて行くと、測定の感度は次第に高まつて来る。斯様にして壓力の測定範圍は最大50,000psi から500psi 以下まで容易且つ速に切換へることが出来る。但し容量を減少するにつれて、電荷漏洩の影響や妨害電壓の大きさが増し、増幅器の動作が次第に不安定に傾くのは見れない處である。

この指圧計は壓力自身(p)を測る代りに、壓力の變化率(dp/dt)を直接測るやうにすることも出来る。そのためには第2圖中の蓄電器を取去り、この場處を抵抗によつて置換へればよい。然るときは受圧器に發生する電荷はすべてこの抵抗を通して電流として流れて去り、接続ケーブルを充電する電荷は無視し得る程度に小となる。従つてqを發生する電荷とすれば、抵抗Rには dp/dt なる電流が流れ、その両端に R \* dq/dt なる電位差を生ずる。然るにqは加へられた壓力に比例するから、増幅器に導かれフィルム上に記録される電壓波形は壓力の變化率 dp/dt に比例する譯である。斯様な指圧計の使用法は du Pont 會社の B. S. Macky 博士の提案に基くものである。

増幅器の入力真空管は電荷の漏洩を少なくするために、出来るだけ格子電流の小なるものを選ぶべきであることは前述した。しかし漏洩は更に受圧器の内部、蓄電器、接続ケーブル等に於ても起る。而して受圧器

めくられず

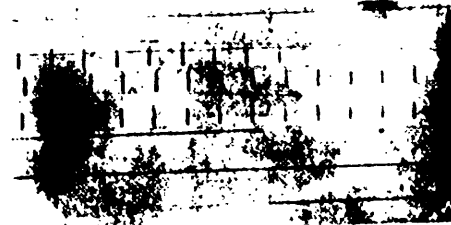
に作用する圧力が 25,000 乃至 60,000 psi ともなれど、発生電荷の量は 0.6  $\mu$  coulomb にも達するので、記録時間 1000 分の数秒に過ぎぬ圧力波を測定する場合でも、漏洩する電気量は相當の多量に及ぶ。従つて漏洩が問題となる部品の絶縁に関しては、神経質過ぎるほどの注意を拂ふことが無駄とはならないのである。

現在の装置で尙缺點と考へられるところは、

- 1) 半哩以上長い線路を使用すると、誘導妨害の頻度が増加すること。
- 2) 第7圖の回路ではブラウン管の偏向板が非対称状態になつてゐるため、輝點の集束が螢光板の隅に行く和外れること。プッシュプル増幅にすればこの缺點が除去されると同時に、線路から来る誘導妨害もある程度減小し得る筈であると思ふ。何故ならば誘導作用は線路の不平衡に起因するものであり、従つて受電器の正負兩極を共に絶縁して取出し、平衡入力回路を作れば障害の大部分は除去されるからである。以下は斯様な見込みのもとに、この方面に研究を進めてゐる。

**實驗結果**

實驗により先づ第一に最高壓力の測定に對して從來の鋼柱圧計よりもビエツ圧計の方が誤差が少ないことがわかつた。第二に銃砲の推進火薬の設計に當つてビエツ圧計の記録結果は有用なデータを供給するものであることを知つた。Vielie の時代から砲腔内で相當振幅の大きい壓力振動波が発生する可能性のあることは既に知られて居たが、米國式の火薬を用ひた場合に對する實測例は從來全く見られなかつた。砲腔内の壓力振動波は、現象の性質こそ違ふ、カノラン機關の氣筒内に起るノッキングに對し比較出来るもので、後者が適當な燃料の種類と燃焼室の形状とを選択



第12圖 增幅器軌跡のインシログラム

することにより除去されると同様、銃砲に於ても砲腔の構造、裝藥、擊火方法等を適當に設計すれば、振動波の発生を防止して、平滑な壓力對時間曲線を得られる筈である。事實、本装置を用ひてこれを試験した

結果、同一の銃薬でも銃薬の際の配置を變へただけで上記の結果を得られることが確められた。第13圖は斯様なオシログラムの比較を示すものである。



第13圖 185 mm 口径の  $dp/dt$  を測定する装置は砲の壓力對時間曲線  $P$  を測定する装置よりも高振動數の壓力波に對して感度が高いから、後者による記録では見落してしまふほど小さな振幅の壓力波でも明瞭に検出することが出来る。第14圖は密閉室内に於ける爆發壓力のオシログラムを示すものであるが、これから測定した壓力波の振動數と燃焼室の寸法とによつて、火藥瓦斯内の音波速度が決定される。而してこの音波速度から更に進んで、壓力及び密度既知なる條件の下に、比熱  $\gamma$  が求められる。斯様にして火藥の  $\gamma$  値を求めた結果は、成分氣體の比熱から離子力學に從つて計算した値とかなり一致を示した。(岡 修一郎)



第14圖 密閉室内の壓力變化率  $dp/dt$  を示すオシログラム

結果、同一の銃薬でも銃薬の際の配置を變へただけで上記の結果を得られることが確められた。第13圖は斯様なオシログラムの比較を示すものである。

**引用文献**

- (1) "Piezo-Electricity and its Applications," abstract of paper by J. J. Thomson, *Engineering* Vol. 107, April 25, 1919, p. 543.
- (2) "A Piezoelectric Method of Measuring Explosion Pressures," by David A. Keys, *Philosophical Magazine*, Series 6, Vol. 42, October, 1921, p. 473.
- (3) "Piezo-Electric Method for the Instantaneous Measurement of High Pressures," by J. C. Karcher, *U. S. Bureau of Standards, Scientific Paper No. 445*, August 4, 1922, p. 257.
- (4) "The Piezo-Electric Gauge," by R. H. Kent, *Army Ordnance*, Vol. 18, March-April, 1938, p. 281.
- (5) "Gasdruckmessungen mit Piezo-Indikator," by H. Joachim and H. Hagen, *Zeitschrift für das gesamte Schieß- und Sprengstoffwesen*, Vol. 27, 1933, pp. 76-79, 121-125.

めくられず

