

雷管による爆薬起爆の研究

〔第1報：雷管の衝撃による起爆（その1）〕

井 田 一 夫*

序

雷管は常に爆薬と組合せて使用され、爆薬を起爆させることを目的とする道具である以上、雷管の威力（爆薬を起爆させる能力、即ち起爆力）は雷管の性能の中で最も重要なものの一つである。又実用上から見ても、爆薬の燃焼や半爆による鉄砲、後ガス不良の問題、爆薬の爆力と使用雷管号数の関係、等を解決することは極めて重要な意味を有すると考えられる。

然し乍ら、雷管威力（起爆力）の本質が何であるかについては現在までに系統的な研究がなく、雷管による爆薬の起爆は、雷管の爆発衝撃によるのか、管体破片の投射によるのか、雷管爆発の際の熱作用によるのか、ということが明確でなかつた。従つて雷管の起爆力を向上させるには製造上どの点に留意すべきか、即ち装薬量か圧搾圧力が管体材質かということが必ずしも判然としていながつた。

又一方工業爆薬の感度はニトログリセリンを含む爆薬と含まない爆薬とでは、落槌、摩擦、殉爆等の試験で相当差異があることは知られているが、工業爆薬は常に雷管と組み合わせて使用されるので、雷管による起爆機構を明らかにすることによつて初めて実用上の感度の意味が明らかとなる。

筆者は本研究に於て、雷管威力の本質を検討することによつて雷管の合理的設計に対する指針を与え、又各種工業爆薬の雷管による起爆現象を比較することにより、爆薬感度の実用上の意義を明らかにすることを期した。

本研究は日本化薬K K折尾作業所火工品研究課長木下四郎氏の御指導御鞭撻により行われたものであり、又日本化薬K K厚狭作業所研究課長日野熊雄氏には原稿を閲読して誠に有益な御助言を賜つた。両氏に深甚の謝意を表する次第である。又実験を手伝つて戴いた有村武人氏、勝原幾生氏、工藤隆義氏に対して厚く御礼を申上げる次第である。

1 緒 言

雷管による爆薬の起爆作用を検討するに先立つて、雷管の爆発現象及び爆薬の起爆伝爆の理論等についての知見が必要と思われるので、主として従来発表され

た報文によつてこれ等についての概略を述べることにする。

1-1 雷管の爆発現象

雷管の爆発経過を時間的・空間的に解析することは、雷管起爆力の本質を究明する第一歩である。

雷管爆発の方向性、特に爆発火焰の方向性は、暗所で雷管を発火させた場合の静止写真によつても概略知り得る。写真1は底上げ雷管を底部を下方に向けて空

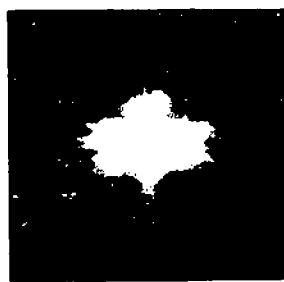


Photo. 1. Explosion flame of a detonator

中に吊して爆発させたもので、爆発火焰は主として横方向に噴出しているが、底方向には先端の尖つた jet が噴出していることが認められる。

然し乍らこれでは時間的な経過がわからないので、雷管の爆発火焰の光量の変化をシンクロスコープに掛引させると写真2が得られる。写真2を図1の如く



Photo. 2. Duration of explosion flame of a detonator (by Kato)

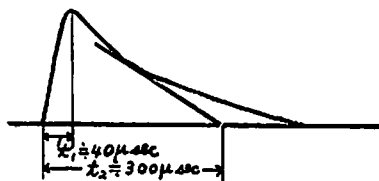


Fig. 1. Explanation of Photo 2
 t_1 : Explosion period
 t_2 : Flame duration period

昭和35年5月2日受理

* 日本化薬株式会社折尾作業所火工品研究課

解析すると、火焰の立上り時間 $t_1 \approx 40 \mu\text{sec}$ 、火焰持続時間 $t_2 \approx 300 \mu\text{sec}$ が得られる。雷管の爆発は火焰の立上り時間 t_1 以内に完了していると考えられるから、雷管の爆発は極めて短時間即ち $40 \mu\text{sec}$ 以内に終了すると考えるべきであろう。水島氏²⁾は雷管の方向を種々変えて爆発火焰を撮影し、上記の事柄とほぼ同様の結果を得ている。

次に雷管の爆発過程を直接観察したものとして、古くは W. Payman 氏等の報告³⁾がある。彼等は1コマ取りのシュリーレン写真によつて雷管爆発後一定時間に於ける雷管の爆発状態を観察し、生成ガス及び衝撃波共に雷管横方向が縦方向よりも高速度であること、雷管が爆発すると先づ横方向に生成ガスが噴出し次で衝撃波が生ずるが、爆轟生成ガスの方が衝撃波より減衰がはげしいので、衝撃波の膨脹が生成ガスの膨脹を追い越すこと、底上げ管体の場合には雷管底方向より高速の破片が突出することを認めた。

日下部、井田⁴⁾は8コマ取りのシュリーレン写真によつて雷管の爆発過程を $4 \mu\text{sec}$ 間隔で観察した。その一例を写真3に示す。この結果、雷管爆発現象の時

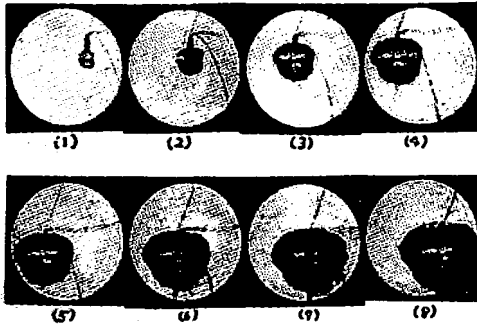


Photo. 3. Development of explosion of detonators, time interval = $4 \mu\text{sec}$. (by Kusakabe)

間的経過が Payman 氏等の場合よりも一層明瞭に観察出来た。即ち爆発は先づ横方向への生成ガスの噴出で始まり、次で管体の破片が生成ガスの中から突出して周囲に飛散する。このことは破片速度がガスの膨脹速度より速いことを示す。又底上げ管体の場合には3コマ目即ち $12 \mu\text{sec}$ 後には底方向に高速度の大きな破片が生成ガス中より飛出し始めているのが認められるが、このことは $12 \mu\text{sec}$ 後には爆轟が終つていることを意味する。そして5コマ目即ち $20 \mu\text{sec}$ 後には横に平たい楕円形の衝撃波が生成ガスを追越して拡がつてゆくのがわかる。これ等の写真より雷管の生成ガスの初期膨脹速度は横方向には約 $3,000 \text{m/sec}$ 、底方向には約 $2,000 \text{m/sec}$ であることが計算された。衝撃波の初期速度はこれより若干速いが大差はないと思われる。

最近 Giltair 氏等⁵⁾は6コマ取りのシュリーレン写真によつて $20 \mu\text{sec}$ 間隔で一連の雷管爆発現象を観察している。この場合は日下部氏等の報告に比べて各コマの時間間隔が長いので、管体破片や衝撃波が生成ガスを追越してゆく過程がより明瞭に観察出来る。

1-2 爆薬の起爆伝播の理論

爆薬の起爆、伝播に関して纏まつた理論が発表されるようになったのは1930年以降であるが、その中で代表的なものについての概略を述べることにする。

Muraour 氏⁶⁾は火薬類分解の三様式について次の如く説明した。即ち火薬の分解には活性化エネルギーが必要であるが、分解様式別に言えば、

①熱分解の場合には活性化エネルギーは Maxwell-Boltzmann の分配法則に従つて分子間に分配され、隔離した一個の分子の分解は連鎖 (Chain) を形成することなく $K = Be^{-A/RT}$ なる速度によつてゆるやかに分解する。連鎖を生ずるためには多致分子の同時分解が必要である。

②燃焼は分解によつて生じたガス分子の衝突によつて起る。

③爆轟は Perrin の分子感応現象 (大きな速度即ち運動のエネルギーを有する二つの分子が接近すると一つの分子の運動エネルギーが他の分子の内部エネルギーとなる) によつて活性化エネルギーが直接隣接分子に移ることによつて生ずる。

これが火薬類の分解に関する Muraour 氏の考え方である。彼は又空气中に於ける火薬の燃焼は高温ガス分子の衝突によつて、爆轟は衝撃波によつて伝達され、爆轟が生ずるためには連鎖反応によつて分解する分子が急激に増大し高压が生ずることが必要であるとした。即ち彼は起爆薬については連鎖反応が主反応であり、二次爆薬に於てはエネルギーはガス分子の衝突によつて伝播すると考えた。

Taylor 及び Weale 氏⁷⁾は、結晶が摩擦されるときに摩擦面にある分子が活性化される。即ち起爆は結晶表面の活性化機構によるという摩擦化学説 (Tribochemical theory) を述べた。そして爆薬の起爆は機械的衝撃、熱、放電等によつて起り得るが、機械的衝撃のみによつても爆薬を分解させるに充分であるとした。又薬包内の爆発の伝播は熱的なものでなく、衝撃的な圧力波によつて粒子の剪断や分子間の結合の破壊を生じ、反応帯の中で活性化の集中を起すことによると考えた。

Garner 氏等⁸⁾は Semenoff 氏⁹⁾と同じく、火薬類の爆轟のように伝播速度の大きな反応は連鎖反応によらなければ説明出来ないとしたが、Garner 氏等の特徴は起爆薬の起爆現象に初めて結晶構造論的な考え

方を導入したことである。即ち雷汞の結晶にスメカールクラック及びブロックが存在すると仮定したが、このことは後に鈴木氏¹⁰⁾によつて実験的に証明された。又起爆薬の結晶がその欠陥からモザイク状に分解してゆくことは Evans 及び Yoffe 氏¹¹⁾によつて高速度顕微鏡写真で確証された。

Andreev 氏¹²⁾は、爆薬分子一個の分解によつて生ずるエネルギーがより多数の分子を活性化し得る程、換言すれば連鎖分枝の起り易いもの程爆発し易いと考へた。彼は又爆薬の燃焼を系統的に研究し、gasdynamic theory、即ちガスの発生速度が逸散速度より大きくなつたときに爆轟が起り、逆の場合には燃焼となると考へた。そしてこの理論に基いて固体爆薬の燃焼から爆轟への転移現象を説明した¹³⁾。Belyaev 氏¹⁴⁾、Apin 氏¹⁵⁾等も Andreev 氏とほぼ同様な考へ方である。従来の理論では分子の活性化及び分解は凝縮相に於て起ると仮定されていたが、Belyaev 氏の考へ方では二次爆薬にエネルギーを与えると分解の前に蒸発が起るとした。従つて揮発性の大きいもの程発火し易い。そして燃焼が気相から凝縮相へ侵入したときに燃焼から爆轟への転移が起る。起爆薬は揮発性がないので燃焼することなく爆轟するが、二次爆薬は揮発性が大きい程爆轟し難いというのである。

以上が戦前に於ける主な起爆伝爆の理論であるが、新美氏の報告¹⁶⁾にはこれ以外に M. Berthelot の断熱圧縮説、F. Abel の共鳴振動説、J. Eggert の機械的作用説、A. Schmidt の分子運動論説等が紹介されている。

然し戦後に於ける最も支配的な起爆理論は Bowden 氏一派の熱起爆説¹⁷⁾である。即ち起爆現象は、衝撃や摩擦等が直接に分子の切断や破壊を起すという様な機械的作用によるものではなく、飽迄も熱的なものであつて、衝撃や摩擦などの機械的エネルギーは一旦熱エネルギーに変えられ、或る有限の大きさの分子集団 (10^{-2} ~ 10^{-3} cm) が殆んど同時 (10^{-12} sec 以内) に熱分解を起すこと (これを hot spot という) によつて生ずる。Bowden 氏等の理論は何れも実験的事実に基いたものであることが興味であると思はれる。又彼等は hot spot の生起から爆発への成長 (伝爆) についても種々の実験を行い¹⁸⁾、Patry 氏の研究結果¹⁹⁾とほぼ同様の結論を得ている。即ち二次爆薬については hot spot の生成後反応は比較的ゆるやかな燃焼課程で始まり、次第に加速されて或る短い距離を通過した後には低速爆轟が起り、更に高速爆轟へと進む、このことは程度の差はあつても起爆薬についても認められ、従来唯一の例外と考へられていたアジ化物についても周囲の気圧が非常に低い場合には燃焼過程を経過した

後に爆轟が起るといわれている。

然し乍らアジ化鉛の結晶が成長中に突然爆発する様な現象は熱起爆説によつても説明出来ず、すべての起爆現象を熱に起因すると考へることは出来ない。1957年5月 Cambridge に於ける起爆伝爆の国際討論会で Bowden 氏は起爆エネルギーには次の7種類の様式があると述べた。²⁰⁾

- ①加熱による方法
- ②衝撃、摩擦等による機械的方法
- ③超音波による方法
- ④電子、 α 粒子、中性子、核分裂物質の照射
- ⑤充分強力な光の照射
- ⑥放電による直接的方法
- ⑦成長する結晶の突然の起爆

そして同じ討論会で Johanson 氏²¹⁾は断熱圧縮された内部気泡による起爆問題を更に前進させた。即ち Bowden 氏等によれば二次爆薬の起爆は 500~700°C のガス温度で生ずるとされていたが、Johanson 氏は気泡の単なる断熱圧縮によつては爆薬はこの温度とならず、高いガス温度が生ずるためには爆薬が微小な断片となつて高温ガスの中に飛び込むことが加わらねばならないとした。

又 Zippermayr 氏²²⁾は現在尚 Bowden 氏等の熱起爆説を否定して居り、之に対して Schmidt 氏が反論し、両者の論争は未だに続けられている。²³⁾

即ち Bowden 氏等の熱起爆説も現在更に修正されつつある段階であり、起爆過程の複雑性を単一の理論で理解することは現在尚困難である。又以上述べた起爆伝爆の研究に使用された爆薬はすべて単体爆薬であり、工業爆薬のような混合爆薬の起爆に関する研究は、理論的にも実験的にも殆んど行われていない。然し最近日野氏によつて提出された可変反応帯爆轟論に於ける critical mass (起爆するための) という概念は工業爆薬 (混合爆薬) の起爆理論についての一つの指針となることと思われる。²⁴⁾

1.3 雷管による爆薬の起爆現象

爆薬の中に雷管を挿入し発火させたときに、爆薬がどの部分からどの様に起爆してゆくかという現象を知ることが、雷管による起爆作用を検討する上で参考となるので、この点について従来の報告を概括する。

Weibull 氏²⁵⁾は雷管による爆薬の起爆及びその周囲への爆轟の伝達について、爆轟は雷管のあらゆる方向に最初から一様な速度で伝達されると報告したのに対し、Shepherd 氏²⁶⁾は6号雷管で起爆した場合には薬包の $\frac{1}{2}$ 位にわたつて予備爆轟相 (predetonation phase) があり、それ以後真の爆轟が起り、雷管が強力であれば予備爆轟相は減少すると反論した。又

Mitchel 氏等²⁷⁾は起爆初期に於ては起爆点周囲の爆速はあらゆる方向に一様ではなく凹凸があるが、それは漸次消え失せて球状となること、起爆点は雷管の位置から或る距離離れたものであること、等を述べ、Herzberg 氏²⁸⁾に雷管によつて起爆された爆薬は最初は低速爆轟であり次に高速爆轟へと移行すること、爆轟波の中心即ち起爆点は雷管の底から或る程度離れた

点であること、等を示した。

以上は雷管近傍の爆薬爆速の変化を論じたものであるが、有村氏はイオン探針法により雷管を挿入した薬包の各点に於ける爆速変化を測定した。²⁹⁾ 薬包は空中で開放状態に置き、6号雷管で起爆した場合に表1の如き値を示している。

即ち新桐ダイナマイトの場合には薬包内で爆速が漸

Table1. Gradual increase of detonation velocity in primer cartridge (by Arimura)

Kind of explosives	"Shinkiri dynamite" (ammonia gelatine dynamite)			"Shin D shōan bakuyaku" (Permitted ammonium nitrate explosives)		
	2.0cm	4.0cm	6.0cm	2.5cm	5.5cm	8.5cm
Distance from end of detonator						
Detonation velocity (mean value of five expts)	3,270m/sec	4,220	6,170	2,310	2,830	3,050

次大きくなり、新D硝爆の場合には新桐程大きくはないがやはり薬包内で爆速は漸増している。即ち何れにせよ雷管を挿入した薬包内では雷管から離れるに従つて爆速は徐々に大きくなるが、然し乍ら薬包内の爆速の上昇は連続的であり、低速爆轟より突然高速爆轟へ移行するという事は認められない。

雷管によつて起爆された薬包内の爆轟がどの様に拡がつかを直接観察したものとして、Giltaire 氏等の報告³⁰⁾がある。彼等は6コマ取りのシュリーレン写真によつて、雷管の起爆により爆薬の爆轟生成ガスや衝撃波が周囲に拡がつかを状態を観察しているが、写真4に見る如く雷管装薬部の側面方向に於て最

これは岡崎氏等³¹⁾が雷管から爆薬への爆轟の伝達時間の遅れを測定して数 μ sec 以内で殆んど認められないと報告したことと一致する。

1.4 雷管の衝撃作用と爆薬の起爆

雷管の爆発は、1.1 項で述べた如く、先ず横方向への爆轟生成ガスの膨脹を以て始まり、次で破片の飛散と衝撃波の拡がりが生ずる。従つて雷管の爆発による爆薬の起爆原因としては、

- ① 衝撃波による衝撃作用
- ② 管体破片の飛散による固体投射作用
- ③ 爆轟生成ガスによる熱作用

の三つが考えられるが、この中で先ず衝撃作用について検討する。

雷管の衝撃によつて生ずる圧力の大きさについては植竹氏の実験³²⁾があるが、6号~10号の雷管の場合約 30,000kg/cm² である。長谷部氏の実験³³⁾では 100~300kg/cm² となつていて甚だ小さいが、この圧力は銅柱の圧縮値を静圧に換算していることと、数本の電気雷管を束にしてこれが完全に同時に発火したと仮定していることに疑問がある。又伊藤氏等の報告³⁴⁾では雷の衝撃によつて岩石内に生ずる最大応力は、6号~8号雷管で約 1,000~2,000kg/cm² である。然し乍ら火薬類の爆轟圧力を実験的に測定することは、それに耐え得る材質がないので不可能であり、Noddack 氏³⁵⁾等は種々の起爆薬の爆圧を 10,000~15,000kg/cm² と計算しているし、Majridi 氏³⁷⁾は Becker の猛度式 $P = JWD$ を基礎として爆轟圧力を計算し、テトリール、PETN の場合、爆薬の進行方向では夫々 64,000kg/cm² 及び 78,000kg/cm²、横方向では 37,000kg/cm² 及び 47,000kg/cm² の値を得ている。

次に雷管内の添装薬の爆速は、木下氏³⁶⁾によると銅管体にテトリールを填充した場合に 6,300m/sec (廻

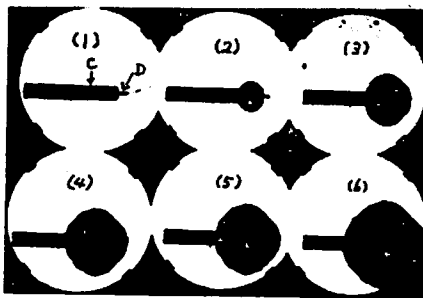


Photo. 4. Initiation process of cartridges by detonators (by Giltaire & Cocu)

C : cartridge D : detonator

も早く爆轟ガスを生じている。このことより雷管による起爆源は雷管装薬部のすぐ周辺であると思われる。これはかつて E. Jones 氏³¹⁾が回転カメラによる写真の解析によつて推定した起爆源の位置と同じであつて Herzberg 氏²⁸⁾の如く雷管底方向から一定距離隔つた点ではない。

又雷管から爆薬への爆轟伝達の時間的遅れは Giltaire 氏等のシュリーレン写真では殆んど認められず、

転カメラによる実測)であるが、雷管の爆発による衝撃波の空中への伝達速度は、既述の如く日下部氏等の実測⁹⁾では爆発初期に於て横方向へ約 3,000m/sec 底方向へ約 2,000m/sec であつた。

一方、爆薬がどの程度の衝撃力で起爆するかを見ると、Bowden 氏等の報告¹⁷⁾ではニトログリセリンの場合約 600 気圧、PETN の場合約 20,000 気圧である。

又図 2 の如く、ガラス板或は金属板の如き不活性な

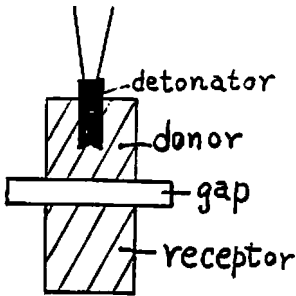


Fig. 2. SPHF Method

材質を Gap として殉爆試験を行うと、Gap は第一薬包の衝撃のみを通して熱や固体粒子を遮断するので、第二薬包は第一薬包の衝撃のみによつて起爆されるが (この Gap を Shock Pass Heat Filter 略して SPHF と云う) 最近はこの方法により第二薬包の衝撃感度が測定されている。Cachia 氏等¹⁸⁾は Gap として真鍮板を使用し、ヘキソゲン/TNT (60/40) 混合爆薬 ($\lambda=1.7$) に対しては臨界衝撃圧力として 90,000 気圧を得ている。又 Cook 氏等¹⁹⁾はガラス板を Gap として使用し、ヘキソゲン/TNT (60/40) 混合物の臨界衝撃速度として 3,000m/sec の値を得ている。之等の臨界衝撃値は雷管の爆発によつて生ずる最大衝撃値に近い。

ニトログリセリンを含む工業爆薬の場合にはヘキソゲン/TNT 混合爆薬よりも鋭敏であるから、臨界衝撃値は上記の値より若干低いと思われるが、以上の報告を総合すると、雷管による衝撃力は二次爆薬を起爆させるための臨界衝撃力附近にあると判断され、雷管の衝撃作用のみによつて工業爆薬特にニトログリセリンを含まない爆薬が起爆出来るかどうかは不明である。

以下この点について実験的に検討を加えることとする。

II 衝撃振子による雷管衝撃力の測定

2.1 測定の原理

雷管衝撃力の表わし方としては既に述べた衝撃波の速度や爆轟圧力などがあるが、管体内の衝撃波の速度

は、薬長が短いこと及び管体が不透明で煙転カメラが使用出来ないことのために測定が困難であり、又爆轟圧力は実測が不可能である。然し実測の容易な衝撃力の表わし方として衝動量 impulse (運動量) を考えることが出来る。即ち J. F. Poth 氏の報告²⁰⁾によれば、爆薬の猛度とは爆薬単位面積当りの衝動量であると定義され、図の如く装置した場合、爆薬の爆轟によつて

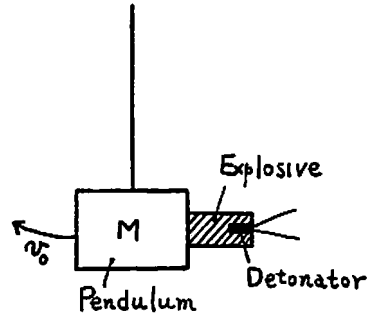


Fig. 3. Principle of "Stoss-pendel" test by J. F. Roth

M: mass of pendulum

v_0 : initial velocity of pendulum

質量 M の振子が初速 v_0 を以て動き始めたとすれば、爆薬の断面積を A とした場合、猛度 B は次式によつて表わされる。即ち

$$B = Mv_0/A [g \cdot cm^{-1} \cdot sec^{-1}] \dots \dots \dots (1)$$

上式中、 Mv_0 (衝動量 i) は振子の振れの角度から測定出来るので猛度 B は実測が容易である。雷管の場合は断面積 A は一定であるから Mv_0 を測定することによつて衝撃力を比較することが出来る。

さて、単振子の場合には振子の初速 v_0 と振れの角 α との関係は

$$v_0 = w \cdot l_0 \cdot 2 \sin(\alpha/2) \dots \dots \dots (2)$$

w : 角速度, l_0 : 振子の長さ

で表わすことが出来るが、複振子の場合には次式の如くなる。

$$v_0 = a/b \cdot g/w \cdot 2 \sin(\alpha/2) \dots \dots \dots (3)$$

a : 支点より重心までの長さ, b : 支点より衝撃点までの長さ, w : 角速度 α : 振れの角, g : 重力の加速度

支点よりの距離が相当単振子の長さ l_0 の点に衝撃力が作用すると、即ち $b=l_0$ の場合には式は (3) 次の如く簡単になる。

$$v_0 = a \cdot w \cdot 2 \sin(\alpha/2) \dots \dots \dots (4)$$

即ち a, w, α を測定すれば v_0 が計算出来る。この中 α と w とは一定の衝撃振子装置については一定であるから、振れの角 α を測定することによって直ちに初速 v_0 を求めることが出来る。

初速 v_0 が求めれば衝動量 i 及び猛度 B は次式によって計算することが出来る。

$$i = Mv_0 \dots \dots \dots (5)$$

$$B = Mv_0/A \dots \dots \dots (6)$$

M : 振子の質量, A : 薬包又は雷管の断面積

尚実際には α と v_0 の関係, α と i の関係, α と B の関係は装置さえ一定であれば予めグラフにして置くことが出来るので, 計算しなくても α から v_0, i 或は B を求めることが出来る。

2.2 測定装置

使用した装置は雷管用に設計した写真5の如きもの

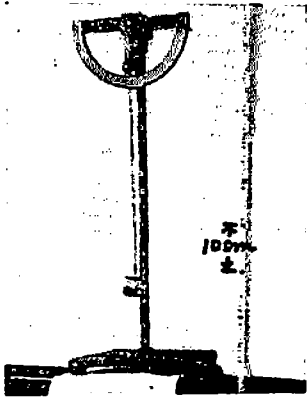


Photo. 5. "Stoss-pendel" for detonators

である。雷管は振子の中央右側に位置させるが、雷管の爆発により振子の衝撃面が傷むので、厚さ 4mm 直径 40mm の銅板をグリースで振子に貼りつけてこの銅板は一回毎に取り替えるようにする。

雷管の爆発により振子は左側へ移動するが、その時の振れの角 α は上部目盛板にとりつけた指針によって読みとることが出来る。この指針は振子が一度左側へ移動すると右側へ戻つても指針のみは戻らないようになっている。又振子が振れる際の摩擦を極力少くするために振子の軸受にはボールベアリングを使用した。

尚、計算の基礎となるこの装置の諸元は次の如くである。

- 支点より衝撃点までの距離 $b = 49.4$ [cm]
- 支点より振子の重心までの距離 $a = 45.4$ [cm]
- 振子の角速度 $w = 2\pi/T = 4.33$ [sec⁻¹]
- 振子の質量 $M = 442.5$ [g]
- 雷管の断面積 $A = 0.302$ [cm²]

これ等の値を式 (4), (5) に代入すれば、振れの角 α と振子の初速 v_0 , 衝動量 i との関係を、更に振子の運動のエネルギー E ($= \frac{1}{2} Mv_0^2$) との関係をグラフにすることが出来る (図4)。これによつて振れの角 α から直ちに v_0, i 或は E を求めることが出来る。

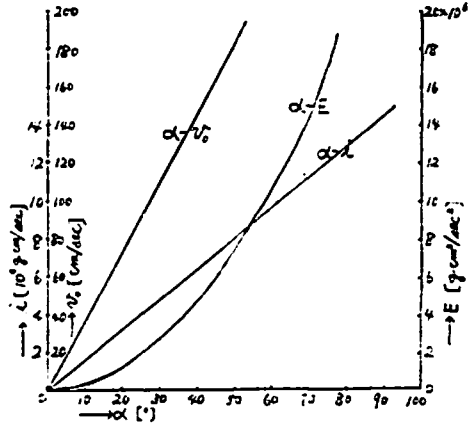


Fig. 4. $\left\{ \begin{matrix} \alpha-v_0 \\ \alpha-i \\ \alpha-E \end{matrix} \right\}$ relation in "Stoss-pendel" test

- with pendulum mass $M = 442.5$ g
- α : swing of pendulum (corrected value),
- v_0 : initial velocity of pendulum
- $i (= Mv_0)$: impulse of pendulum,
- $E (= \frac{1}{2} Mv_0^2)$: kinetic energy of pendulum

尚式 (4) を利用するためには、支点よりの距離が相当単振子の長さ l_0 の点に衝撃を加えなければならないが、実測の結果 $l_0 = 49.4$ [cm] となり、これは支点より振子の中心軸までの距離と一致するので、振子の中心軸上で雷管を爆発させれば $l_0 = b$ となり、式 (4) 即ち図のグラフが利用出来る。

2.3 振れの角度の補正

一般には図5に示す振れの角 β を直接測定するので

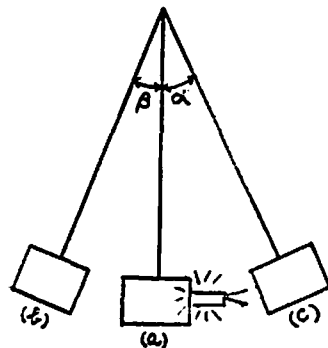


Fig. 5. Correction method of swing of pendulum
 α : corrected swing
 β : measured swing

あるが、振子には軸受部分や指針による摩擦があり、又重力による減衰もあるので、振れの角 β は(a)に於ける真の衝撃力よりも若干小さく表われる。この補正を行う一つの方法として、振子を(a)の位置から(b)と反対方向の(c)の位置まで移動させ、(c)から自然落下させると減衰がなければ振れの角 $\alpha=\beta$ となる筈であるが、実際には $\alpha>\beta$ となる。即ちこの方法で β が測定値に等しいとすればそのときの α の値が減衰を補正した β の値となる。従つて前もつて α と β との関係を求めて置けば、測定値 β を α に換算することによつて減衰を補正した振れの角を知ることが出来る。

実測の結果 α と β との関係は次の如くであつた。

α° :	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
β° :	13.5	17	22	27	32	37	42	47.5	52.5	57.5	62.5

Table 2. Swing of pendulum by detonators

kind of detonator	fulminate	tetryl	measured value (β)					$\bar{\beta}$	R	
fulminate detonator	No. 3	0.54 g	-	20°	26°		23.0°	6.0°		
	No. 6	1.0 g	-	30	27		28.5	3.1		
	No. 8	2.0 g	-	33	34		33.5	1.0		
fulminate/tetryl detonator	No. 3	0.3 g	0.35	29	29.5	29	28.5	29	28.8	1.5
	No. 6	0.40 g	0.45	31	30	32	34	32	31.8	4.0
	No. 8	0.50 g	0.90	34	35	37	38.5	35	35.9	4.5

Table 3. Initial velocity (v_0), impulse (i) and brisance (B) by Fig. 4

kind of detonator	swing of pendulum		initial vel. of pendulum (v_0)	impulse ($i=Mv_0$)	brisance ($B=Mv_0/A$)	
	expt. value (β)	corrected value (α)				
fulminate detonator	No. 3	23.0°	26°	64	4.3 × 10 ⁴	1.42 × 10 ⁵
	No. 6	28.5	31.5	116	5.2 × 10 ⁴	1.75 × 10 ⁵
	No. 8	33.5	36.5	134	6.0 × 10 ⁴	1.99 × 10 ⁵
fulminate/tetryl detonator	No. 3	28.8	32	118	5.2 × 10 ⁴	1.75 × 10 ⁵
	No. 6	31.8	35	129	5.7 × 10 ⁴	1.89 × 10 ⁵
	No. 8	35.9	39	143	6.4 × 10 ⁴	2.12 × 10 ⁵

即ち表3によれば、雷管底方向の衝動量 Mv_0 はcgs単位で10⁴のオーダーであり、猛度 B は10⁵のオーダーであつて、これはRoth氏の報告⁽¹⁾に見られる爆薬の猛度1.6~2 × 10⁵[g/cm.sec]とよく一致している。又雷管号数が大きくなるにつれて、即ち雷管装薬量が多くなるにつれて、衝動量従つて猛度も大きくなること、又同じ号数なら雷管標準雷管より混成雷管の方が衝動量が大きいことがわかる。

2.5 空中に於ける雷管衝撃力の減衰傾向の測定

即ち実用範囲20~45°の間では $\alpha=\beta+3^\circ$ であるから、測定値 β に3°を加えたものが減衰を補正した値と考えてよい。

2.4 標準雷管及び混成雷管の猛度測定

雷管試料としてはなるべく基準となるものがよいので、国際規格による3,6,8号雷管標準雷管、及び現行JISによるテトリール混成雷管を使用した。標準雷管に使用した雷薬は塩素酸カリを含まないものであり、装薬の損失圧力は添装薬100kg本、起爆薬40kg本である。管体、内管の材質はすべて銅である。

振れの角の測定結果は表2の如くであつた。実測値 β を補正値 α に換算し、グラフ(図4)によつて v_0, i を求め、 i を雷管底部の断面積で除することによつて猛度 B を計算すれば表3の如くである。

図6に示す如く、衝撃振子と雷管との距離 d を種々変えて雷管衝撃力を測定すると、雷管から空気中へ伝わつてゆく衝撃波の減衰傾向を底方向及び横方向について測定することが出来る。

JISによるテトリール混成雷管を試料として振れの角を測定し、平均値を図4のグラフによつて衝動量に換算した結果は表4の如くである。表4をグラフにすれば図7の如くである。

表3及び図7より次のことが言える。

Table 4. Decrease of impulse of detonators in air

distance between pendulum and detonator (d) cm	base direction			Impulse ($i = Mv_0$) g.cm/sec	side direction			Impulse ($i = Mv_0$) g.cm/sec
	swing of pendulum		(mean)		swing of pendulum		(mean)	
	expt value	(mean)			expt value	(mean)		
0	34°	32°	(33°)	5.4×10^4	100	104	(102°)	16.6×10^4
1	30	26	(28°)	4.6×10^4	72	78	(75)	12.3×10^4
2	19	22	(20.5)	3.35×10^4	53	57	(55)	9.0×10^4
3	16	18	(17)	2.8×10^4	38	41	(39.5)	6.5×10^4
4	16	15	(15.5)	2.5×10^4	-	-	-	-
5	13	14	(13.5)	2.2×10^4	25	23	(24)	3.9×10^4
10	11	11	(11)	1.8×10^4	6	7	(6.5)	1.1×10^4
15	-	-	-	-	2	1	(1.5)	0.2×10^4
20	11	11	(11)	1.6×10^4	0	0	(0)	0

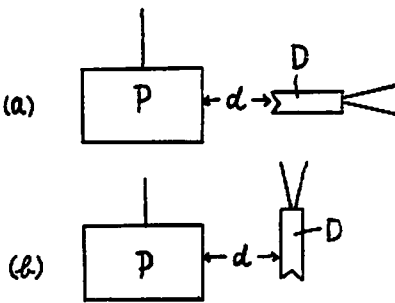


Fig. 6. Measurement of decrease of impulse in air
 (a) : base direction
 (b) : side direction
 P : Pendulum, D : Detonator
 d : distance (variable)

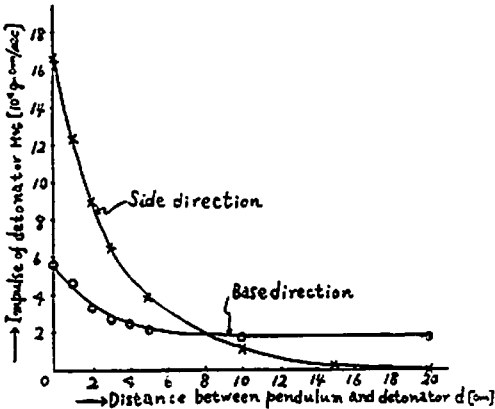


Fig. 7. Decrease of impulse in air

- ① 雷管から 8cm 以内では横方向の方が底方向よりも衝撃力が強くなっている。管体に接した部分 ($d=0$ の点) では横方向は底方向の約 3 倍の衝動量を有する。
- ② 然し乍ら雷管の装薬は縦に長いので、管体横方向

では振子に接する装薬部分の面積が底方向よりも大きく、従つて単位面積当りに換算すると、即ち程度を比べると横方向が大きいとはいえないであろう。

- ③ 雷管からの距離が 8cm 以上になると底方向が横方向よりも衝動量が大きくなるが、即ち底方向は横方向より衝撃波の減衰が少いように思われるが底方向の場合には約 0.1g 程度の破片が高速度で振子に衝突するために、破片の衝突により振子が振れるものと思われる (実際に破片が振子に衝突し、中に喰い込んで附着している)。
 - ④ 又底方向のみ衝撃波が減衰しないということは、1.1 項で述べたシュリーレン写真による雷管爆発現象の観察でも認められないので (底方向にのみ強大な破片の突出は認められるが)、実際には底方向でも横方向と同様に衝撃力は減衰していると思われる。
 - ⑤ 従つて雷管衝撃力は一般に横方向が底方向より大きいと言えるであろう。このことは 1.1 項で述べた雷管の爆発現象の観察から推定される結果と一致する。
- 以上の結果より、雷管の衝撃力が減衰してゆく傾向

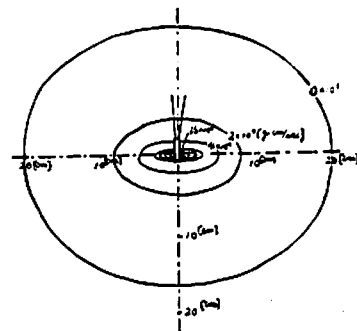


Fig. 8. Distribution of impulse of detonator in air

を横方向と底方向とが等しいと仮定してその分布図を示せば、図8の如くなる。図に於ける円周は等衝動量線であり、その上の数字は [g.cm/sec] を単位とした場合の衝動量である。これにより雷管の衝撃力は雷管近傍の横方向が最も強く、雷管から離れると急激に減衰して約 20cm でゼロとなると思われる（但しこれは雷管破片の投射効果を全然考慮しない場合のことであり、破片効果を考慮に入れば後述する如く雷管から 20cm の点でも十分に起爆力を持つている）。

要 約

(1) 実験に先立つて、従来の文献によつて基礎的な問題について調査し、次の知見を得た。

①雷管の爆発現象を時間的空間的に観察すると、雷管の爆発は先づ横方向への爆轟生成ガスの膨脹を以て始まり、次で破片の飛散と衝撃波の周囲への拡がりが生ずるが、これ等は何れも生成ガスより速度が大きいためガスを追越す、又雷管の爆発は 10 μ sec 以内に終つていられると思われ、爆発火焰の光量は約 40 μ sec 後が最大で約 300 μ sec 持続する。

②爆薬の起爆伝爆の理論は Muraour 氏等のエネルギー論に基づく連鎖反応説、Taylor 及び Weale 氏による摩碎化学説、Belyaev 氏 Andreev 氏等の気相発火伝達説等があつたが、戦後に於ては Bowden 氏等の熱起爆説が支配的であつた。現在は熱起爆説が更に修正されつつある段階であるが、すべての起爆現象を唯一つの考え方で説明し得る理論は未だ存在しない。

③雷管から爆薬への爆轟の伝達は殆んど時間の遅れなしに雷管装薬部のすぐ周辺に於て起り、起爆当初の爆薬の爆速は 2,000~3,000m/sec 程度であるが、それは漸次爆薬固有の爆速まで増大してゆくと考えられる。

④雷管の爆発による衝撃圧力、衝撃波の速度等は二次爆薬を起爆させるための臨界衝撃値に近いと思われ、雷管の衝撃作用のみで爆薬が起爆出来るかどうかは不明であつた。

(2) J. F. Roth 氏が爆薬の猛度測定のために提案した衝撃振子の小型のものを雷管用に設計製作し、これによつて爆管の衝撃力を底方向及び横方向について測定した。その結果、雷管の底方向の衝動量は cgs 単位で 10⁴ のオーダーであること、又横方向の衝動量は底方向よりも大きく約 3 倍であること、空気中に於ける雷管衝撃力の減衰は著しく、飛散する管体破片の運動量を別にすれば、衝撃力は雷管から 15~20cm の距離で殆んどなくなること、等が判明した。

文 献

- 1) 加藤清視外：日化折火研A第59-133号 (1959).
- 2) 水島容二郎：工火協 18, 157 (1957).
- 3) W. Payman, W. Woodhead & H. Tit: Proc. Roy. Soc. 148, 604 (1935).
- 4) 日下部正夫, 井田一夫：工火協 19, 353 (1958).
- 5) M. Giltaire & J. Cocu: Rev. Ind. minerale 41, [3], 237 (1959).
- 6) H. Muraour: Comptes rendus, 194, 280 (1932)., Bull. Soc. Chim. Franç, 51, 1152 (1932)., 火兵, 30, 593 (1936)., Mém. artill. Franç. 17, 595 (1938)., Trans. Farad. Soc. 34, No. 8, 989 (1938).
- 7) W. Taylor & A. Weale: Proc. Roy. Soc. 138A, 92 (1932)., Trans. Farad. Soc. 34, No. 8, 995 (1938).
- 8) W. E. Garner: Trans. Farad. Soc. 26, 590 (1930).
W. E. Garner & H. R. Hailes: Proc. Roy. Soc. 139, 576 (1933).
Garner, Gomm & Hailes: J. Chem. Soc. 1939 (1933).
W. E. Garner: Trans. Farad. Soc. 34, 987 (1938).
- 9) N. Semenov: "Chemical Kinetics and Chemical Reactions" (1935).
- 10) 鈴木明：工火協, 14, 142 (1953).
- 11) B. L. Evans & A. D. Yoffe: Proc. Roy. Soc. A283, 325 (1957).
- 12) K. K. Andreev: Bull. Soc. Chim 2, 2126 (1935).
- 13) K. K. Andreev: Proc. Roy. Soc. A246, 257 (1958).
- 14) A. F. Belyaev: Acta. Physicochimica URSS, 8, 763 (1938), CRURSS, 30, 632 (1941).
- 15) A. Ya. Apin: J. Phys. Chem. USSR 20, 1367 (1946).
- 16) 新美政義：火兵, 32, 396 (1939).
- 17) F. P. Bowden & A. D. Yoffe: "The Initiation and Growth of Explosion in Liquid and Solid" (1952) Cambridge University Press.
F. P. Bowden, M. A. Stone and G. K. Tudor: Proc. Roy. Soc. A188, 329 (1947).
- 18) F. P. Bowden & O. A. Gurton: Proc. Roy. Soc. A198, 350 (1949).
- 19) M. Patry: "Combustion et Detonation des Substances Explosives" (1933); 火協, 4, 224

- (1943).
- 20) F. P. Bowden : Proc. Roy. Soc. 特別号, 146 (July, 1958).
- 21) C. H. Johanson & others : Proc. Roy. Soc. 特別号, 160 (July, 1958).
- 22) M. Zippermayr : Explosivstoffe, **3**, 25 (1955), *Chimia*, **13**, 56 (1956).
- 23) A. Schmidt : Explosivstoffe, **5**, 194 (1957).
M. Zippermayr : 同上 **7**, 141 (1959).
A. Schmidt : 同上 **7**, 142 (1959).
- 24) 日野熊雄 : 工火協演会 (1959年10月)
- 25) W. Weibull : *Nature*, **159**, 402 (1947).
- 26) W. Shepherd : *Nature*, **160**, 92 (1947).
- 27) D. Mitchel & S. Paterson : *Nature*, **160**, 438 (1947).
- 28) G. Herzberg & G. Walker : *Nature*, **161**, 647 (1948).
- 29) 有村武人 : 工火協演会 (1958年11月)
- 30) M. Giltairé & J. Cocu : *Rev. Ind. minerale*, **41**, [3], 237 (1959).
- 31) E. Jones : Proc. Roy. Soc., **A120**, 603 (1925).
- 32) 岡崎一正他 : 工火協演会 (1957年4月)
- 33) 植竹万太郎 : 東大工学部火薬学科卒業論文(1936).
- 34) 長谷部富彦 : 雷管の猛度測定 (1943). 日化厚研 D第60 (1946).
- 35) 伊藤一郎, 寺田孚 : 日本銃業会誌, 昭和33年2月号, 75頁 (1958).
- 36) W. Noddack & E. Grosch : Explosivstoffe **4**, 69 (1956).
- 37) Majridi : *Z.S.S.* **31**, 357 (1936); 火協 **5**, 139 (1943).
- 38) 木下四郎 : 工火協演会 (1958年11月)
- 39) G. P. Cachia & E. G. Whitebread : Proc. Roy. Soc., 特別号, 268 (July, 1958).
- 40) M. A. Cook, D. H. Pack & W. A. Gay : Proc. Roy. Soc., 特別号, 281 (July, 1958).
- 41) J. F. Roth : Explosivstoffe, **5**, 161 (1957).

Studies on the Initiation of Explosives by the Detonator

Part I. The impulsive effect of a detonator in the initiation of explosives. (1)

by Kazuo Ida

When an explosive is initiated by a detonator the following effects seem to be realized :

- a. the impulsive effect by the shock wave produced by a detonator.
- b. the impact effect by fragments produced from a detonator shell.
- c. the heat effect by gaseous products at high temperature produced by a detonator.

The present paper describes the initiation of industrial explosives by the impulsive effect of a detonator.

The impulsive force of a detonator was measured in the axial direction near the base and in the side direction by a small

"Stoss-pendel" which had been proposed by J. F. Roth to determine the brisance of explosives.

By this method it was found that the impulse in the axial direction of a detonator was on the order of 10 in c.g.s. unit and the brisance was on the order of 10⁵ in c.g.s. unit, and that the impulse in the side direction of a detonator was three times larger than that in the axial direction and the decrease of the impulse due to the distance from a detonator in air was remarkable and the impulse became zero at the distance of 15~20cm from a detonator.