

## 熊本大学爆発実験室の強度・騒音・振動に関する実験

清田 堅吉\*, 藤田 昌大\*\*, 河野 通博\*\*  
 松尾 日出男\*\*, 黒羽 啓明\*\*, 奥田 襄介\*\*  
 井上 正康\*\*, 大塚 道男\*\*\*

爆発における各種の物理現象および爆発加工における諸現象の研究のために熊本大学キャンパス内に爆発実験室が設立された。その容量は 8 m 四方の平面積と正味高さ 6 m を有しており、厚さ 55 cm の鉄筋コンクリートで全周が囲われている。

この実験室で行い得る 1 回の爆発許容量を知るために、室内の空気振動、室の構造物としての強度、室から発する爆発騒音および地盤振動に関して一連の実験が実施された。さらに爆発騒音および地盤振動を軽減するために若干の工夫が施され、それらの効果についても検討された。これらの実験から得られた結論は次の通りである。

- (1) 室の強度の面から言えば、SEP 1 kg までの爆発が安全に実施できることが判った。
- (2) 爆発騒音および地盤振動について言えば、防音壁の設立や扉および換気孔の改修によって 25 dB 程度の騒音レベルの低下、床面に約 2 m 四方にわたってタイヤを敷設したことによって地盤振動が元の 1/2 以下となったにかかわらず、最大実施可能薬量は 300 gr であった。

### はじめに

熊本大学工学部キャンパスに衝撃エネルギー実験所が設立されたのは昭和47年2月であった。爆発実験室はその中心施設として実験棟中央に設立された。本実験室は火薬類その他各種の衝撃エネルギー源による爆発を行い、その爆発に伴う諸現象の観測や爆発を利用した各種の加工実験を密閉室内で行うことを目的として設立された。このように密閉室内で爆発を行う場合には開放されている場合に比べて、試片や器材その他の破片が外部に飛散しない、衝撃波を完全に遮断できるなどの点で安全性が確保されており、さらに全周遮蔽によって爆発音が軽減できることも期待される。大学キャンパス内にこのような施設を持ち、実験者あるいは計器数が十分に安全であり、しかも外部（部外者）へも被害の及ばない状態で実験が行えることは爆発現象や爆発加工の研究に携わる研究者達にとって、この上ない安心感を与え、好都合でもある。この種の実験室として他にも類似（公害資源研究所、東京工業試験所、東京大学などの爆発実験室）があるが、いずれも

同様の目的のために利用されている。

実験室を使用するに当たって、実験室建物の強度の面での検討がなされねばならないのは言うまでもない。密閉構造体の耐爆設計に関して、昭和39年に正田教授（東大）を中心とする研究グループが結成され、爆発による衝撃波、壁面からの反射圧力波の形成およびその作用に対する耐爆設計などに関する研究結果が報告された<sup>1)2)</sup>。建物の強度に関する資料として貴重である。

Fig. 1 は衝撃エネルギー実験所の熊本大学工学部キャンパスにおける位置などを示している。爆発実験室は工学部の西北の一角に位置しているが、近くに研究棟や実験棟が立並び、西側境界に接した公共道路を距てて、民家が立並んでいる。このように実験室を大学あるいは研究所の構内に設置する場合には、すぐ近くに研究室などの建物、さらには民家などが立並ぶ環境に置かれることが多いので、それらへの騒音・振動の公害的な影響が問題となって来る。

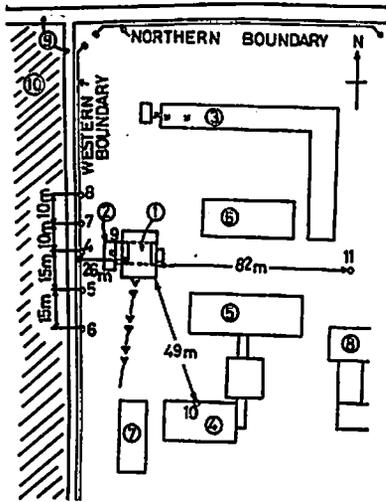
本研究においてはしたがって強度的な面においてばかりでなく、騒音・振動の面においても計測結果が検討され、その上で爆発の使用限度量が決定される。さらに後に述べる結果から明らかなように、強度的な面よりもむしろ騒音・振動の面での制約が大きいので、

昭和51年1月31日受理

\*八代工業高等専門学校 八代市平山新町2627番地

\*\*熊本大学工学部 熊本市黒髪2丁目39番1号

\*\*\*熊本大学理学部 熊本市黒髪2丁目39番1号



- (1) \* explosion test room
- (2) \* new building
- (3), (4), (5) studying building
- (6), (7), (8) experiments building
- (9) public road
- (10) zone of private houses
- \* (1) and (2) belongs to High Energy Rate Laboratory.
- o : measuring points for explosion noises
- x, v : measuring points for ground vibrations and vibration of building floors

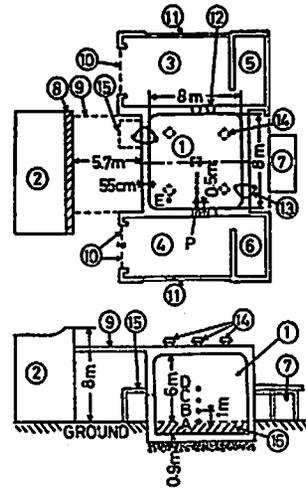
Fig. 1 Position of explosion test room and measuring points of explosion noises and ground vibrations

これらを少しでも軽減するための工夫が実施され、その効果も検討される。

本研究は熊本大学工学部を中心とする専門家による研究グループがそれぞれの分担課題を同時に計測するという方法で行った。分担課題と各課題の研究担当者は次の通りである。

1. 実験の計画および実施、防音・防振対策の実施  
清田, 古閑 (八代高専), 藤田, 河野, 永山, 長野 (衝撃エネルギー実験所および生産機械工学科)
2. 実験室内圧力変動  
松尾, 宮田, 中村 (資源開発工学科)
3. 実験室壁面の振動  
黒羽, 林田 (建築学科), 岩井 (機械工学科)
4. 騒音特性  
奥田, 西村 (電気工学科)
5. 附近の地盤の振動  
大塚 (理学部物理学科)
6. 附近の建物の振動  
井上, 青木 (資源開発工学科)

1. 実験の計画および実施、防音・防振対策の実施  
衝撃エネルギー実験所建物全体の平面図および立面図を Fig. 2 に示す。爆発実験室は縦、横 8 m、天井高さ 6.9 m の内容積を有する、厚さ 55 cm の鉄筋コンクリートで全面を囲われた密閉室である。床面には防振の効果を上げるために、当初より深さ 90 cm の砂が全面に敷設されているので、正味の天井高さは 6 m である。南北の壁面には実験室内における物理現象を観測するために、観測窓がそれぞれ 2 ケ所ずつ設けられており、電気的計測用のコードを室内に導入するための貫通孔が 5 ケ所ずつ設けられている。現象の観測は実験室南北の観測室およびそれらの東側の操作室において行われる。東西の壁面にはそれぞれ 1 ケ所ずつ出入口用の 2 重扉がある。当初 Fig. 3(A) に示されるよ



- (1) explosion test room
- (2) new building
- (3) and (4) observation room
- (5) and (6) operation room
- (7) dark room
- (8) sound-proof wall
- (9) roof
- (10) shutter of steel
- (11) windows
- (12) windows for optical observations
- (13) double-door for enter and exit
- (14) ventilators
- (15) sound-proof walls
- (16) sand
- o : explosion points
- x : measuring positions for shock waves

Fig. 2 Illustration of High Energy Rate Laboratory, explosion points and measuring positions of shock waves in this room

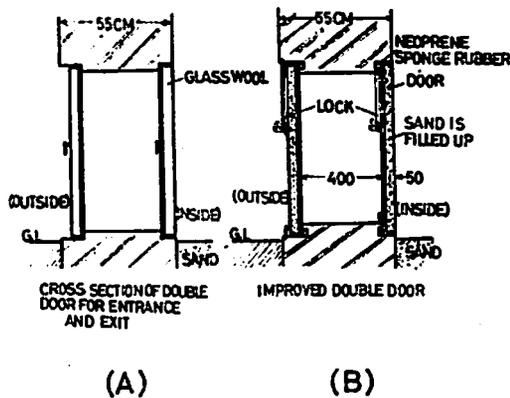


Fig. 3 Improvement of double door for entrance and exit

うに、防音に対して配慮されていない通常の2重扉が用いられたが、実験途中で扉から洩れる音量が無視できないことが指摘されたので、同図(B)に示すように砂を充填した防音用の2重扉に改良され、強度上および気密を高めるためにロックも改良された。後に示す Table 1 においては前者を扉(A)、後者を扉(B)と記述している。天井には爆発後の燃焼ガスを排出するために換気孔が5ヶ所に設けられている。その断面図を Fig. 4 (A) に示す。この換気孔より洩れる音量も無視できないので、実験当初より、中央の1ヶ所のみ稼働状態にして、他の4ヶ所は同図(B)に示す要領で密閉された。実験途中においてさらに音量軽減を行う必要が指摘されたので、同図(C)に示すように消音器を取付けた。しかしその機能は十分でなく、しかもこれを用いることによって換気扇の働きが不十分になり、換気に時間を要するので、最終的には全部(B)の要領で密閉した。Table 1 では最初の状態(1ヶ所だけ稼働状態、他は密閉)を換気孔(A)、

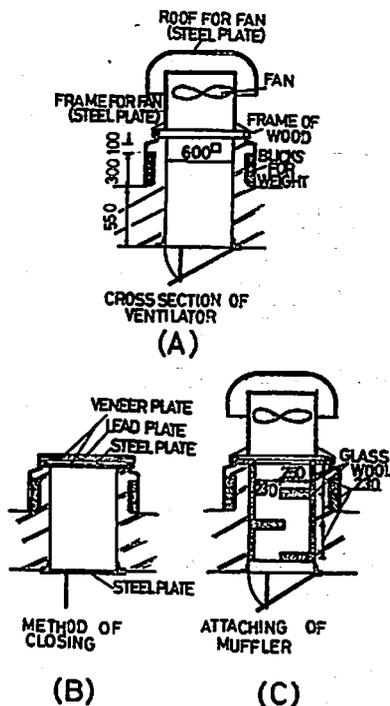


Fig. 4 Devices for the proof sound from ventilator

全部密閉した状態を(B)、稼働状態の換気孔に消音器を取付けた状態を(C)と示している。床面には当初より全面に砂が敷設されていたが、さらに防振効果を上げることが必要とされたので、Fig. 5 に示す要領で室中央部において2m×2.4mの面積にわたってトラック用タイヤを砂中に埋設した。Table 1 ではタイヤ埋設前の状態を床(A)、埋設後の状態を床(B)と示している。Fig. 2 中に示す②の建物は防音壁を兼ねて昭和48年3月に設立された。実験はその前および後に行われたので、その効果も検討された。

Table 1 Conditions of explosion and of sound and vibration prevention

Experiment		Explosion condition			Conditions for sound and vibration prevention			
No.	Date	Explosive	Points	Weight (g)	Door	Ventilator	Sound-proof wall	Tires on floor
1	1973. 2. 23 -2. 25	SEP	B	40, 80, 160, 320, 500	(A)	(A)×1+(B)×4	Before construction	Not paved
2	1973. 8. 20 -8. 25	SEP	A, B, C, D, E	10, 40, 160, 320	(A)	(A)×1+(B)×4 (C)×1+(B)×4	After construction	Not paved Paved
3	1974. 7. 22 -7. 25	SEP, PETN LEP	B	40, 160, 320, 500, 640	(B)	(B)×5	After construction	Paved

Marks, A, B, ..., and (A), (B), (C) in this Table are those as shown in Fig. 1-5.

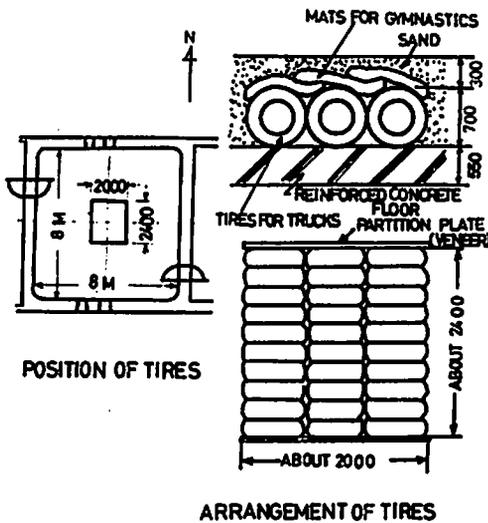


Fig. 5 Devices for reduction of ground vibrations

実験は3回にわたって行われた。Table 1 は3回の実験について、爆発条件および防音・防振の条件の欄に分けて記述したものである。爆薬は主として SEP を使用し、第3回の実験においてのみ、LEP, PETN (粉状) も使用した (SEP, は PETN を主成分とし、グリシ、パラフィン、樹脂を配合して可塑性をもたせたもの)。爆発薬量は 10, 40, 80, 160, 320, 500, 640 gr. の7段階に変化させた。爆発位置は第1回および第3回の実験では実験室中央で高さ砂上面より 1 m の空中 (Table 1 において (B) と記述) としたが、第2回の実験では室中央において、爆薬を砂上面に直接置いた場合 (A), 砂上面より 1 m (B), 2 m (C), 3 m (D) の空中で爆発させた場合および平面位置が Fig. 2 中の E で示すように偏心した点で砂上 1 m の空間で爆発させた場合 (E) の5通りの爆発位置で実験を行った。第1回の実験では爆発実験室の強度・騒音・振動に関して基礎的なデータが得られた。第2回の実験では防音壁の効果、消音器の効果、タイヤ埋設による防振効果などのデータおよび爆発位置の変化によるデータの変化が得られた。第3回の実験では出入口扉改良および換気孔密閉による防音効果および爆薬の種類の変化に対する各計測波形の変化に関するデータが得られた。各データについての計測方法は2節以下の節で述べることにする。

## 2. 爆発室内の圧力変動

爆発実験にともなう騒音、建物、地盤等の諸振動は火薬の爆発によって発生する圧力波の室内壁面、床面等における往復反射によってひき起こされる。(ただ

し騒音については、実験室の開口を通して直接圧力波が外部へ伝播することによって発生する部分もある)。本節においてはこれら諸振動に対する起振力としての室内空気の圧力変動についてべる。なお本計測の主目的は起振力としての変動圧力の計測にあり、そのような圧力変動をひき起こす室内での圧力波の反射機構を詳細に解明することは今回の計測方法では不十分でもあるので、これに関しては極く特長的な現象についての推測を行うにとどめた。

### 2.1 実験方法

爆発直後の大きい圧力波、すなわち、衝撃波の伝播および波面圧力を測ることを主眼とし Fig. 6 に示すようなクサビ板を作成した。すなわち木製クサビ板の長さ方向に 50 cm の間隔で歪ゲージ式圧力計をとりつけこれを爆心と同じ高さで板の長さ方向が衝撃波の伝播方向だと思われる方向に一致するように設置し変

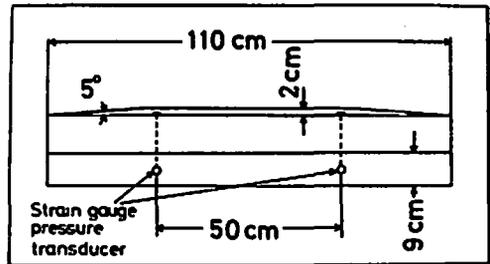


Fig. 6 Wedge-shaped plate and pressure transducer

動圧力をシンクロスコープ管面上に記録することによって2点における衝撃波の到達時刻および波面圧力を計測した。また2点間の衝撃波到達時刻の時間差から平均伝播速度を計算した。なお、爆薬およびクサビ板の設置場所は Fig. 2 に示すとおりである。すなわち各薬量毎にクサビ板の設置位置を伝播方向に沿って3回移動させることによって Fig. 2 の×印で示す合計6点での計測をおこなった。なお歪ゲージによる圧力の計測値についてはゲージの応答特性を考慮すると精度上の不安があるため、壁面上 Fig. 2 の P 点に歪ゲージ式圧力計と、より優れた応答特性を有すると思われる半導体型圧力計とをあわせ設置してよどみ点圧力を計測することによって計測値の比較をおこない両者の比を用いてクサビ板による計測値を修正することとした。なおシンクロスコープと爆発との同期は、フォトトランジスターによって爆発時の発光を感知し、これをトリガー入力として用いることによっておこなった。

## 2.2 計測結果および考察

本節では SEP を地上 1 m の点に設置した場合について述べるが他の場合についても以下の記述はなりたつ。

### 2.2.1 壁面圧力

歪ゲージ圧力計による壁面のよどみ点圧力の計測結果の一例（薬量 200 g の場合）を Fig. 7 に示す。最初のピーク A は約 0.9 気圧（ゲージ圧）に相当するがその後、時間々隔を若干縮めながら減衰を伴って B, C, D, … のピークが表われる。この時間々隔を振動数に換算すると約 70~100 Hz となる。また小さなピーク a, b, c, … は勢力は弱いが減衰の割合は小さい。最も優勢なピーク A, B, C, … は壁面と爆心附近との間の衝撃波の往復反射によるものと思われるがピーク時の圧力（したがって伝播速度）が時間とともに減少しているにもかかわらず、時間々隔がむしろ減少していることを考えると、爆心附近での反射位置が時々刻々壁面の方へ近づいているものと考えねばならない。

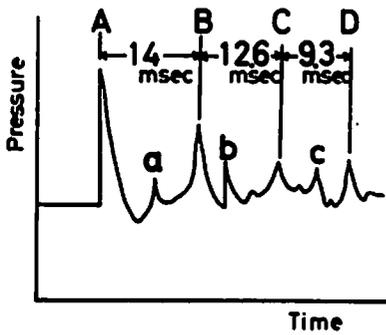


Fig. 7 Typical record of stagnation pressure on the wall

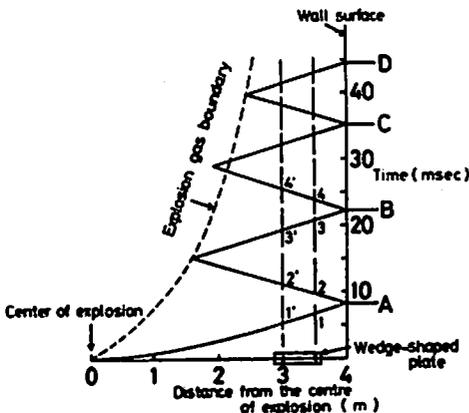


Fig. 8 Reflection of a shock wave between the wall and the explosion gas boundary

このような反射面として爆発ガスと空気との境界面が考えられる。簡単のため衝撃波が最初に壁面へ入射した時の伝播速度を保持したまま減衰せずに Fig. 7 に示す時間々隔で反射を繰り返したものと考えて反射面の軌跡を計算してみると、Fig. 8 のようになり、B, C, D 附近で爆発ガス界面は約 30 m/s の速度をもち壁面から 2~2.5 m の位置に到達していることになる。実際には衝撃波の伝播速度は時間とともに減少するので、界面は Fig. 8 の結果よりさらに壁面側に到達していることになる。なお Fig. 8 の計算において用いた衝撃波の壁面への最初の入射速度としては、クサビ板を壁面に最も近く置いた時の最初の入射衝撃波の平均速度をもちいた。なお、爆発室内では上に述べた壁面と爆心附近との間での衝撃波の往復反射の他、壁面、床面、天井等のおこなわれる様々な形式の反射機構が考えられるが、今回の計測によってこれらについての考察をおこなうことはできなかった。Fig. 7 の a, b, c, … のピークはこの様な 2 次的な反射機構によって生じたものと思われる。

### 2.2.2 波面圧力と伝播速度との関係

クサビ板上の 2 ケの圧力計によって記録される圧力波形を定性的に示したものが Fig. 9 である。図中のピーク 1, 1', 2, 2', … は例えばクサビ板を Fig. 8 の位置においた場合には同図中の 1, 1', 2, 2', … の点に対応するものである。Fig. 9 に表われる最初のピーク（すなわち、壁面へ向う最初の入射波による圧力上昇）1, 1' およびその時間差から求めた 2 点間での平均圧力  $P$ （絶対圧）と平均伝播速度  $U$  との関係のプロットしたものが Fig. 10 である。（図中  $P_0$  は大気圧を示す）なお壁面のよどみ点圧力の計測より、歪ゲージによる計測値は半導体型圧力計による値の 1.2 倍の値を示すことが分かったので、歪ゲージによる計測値に対しては全て、この分の修正を行った。Fig. 10 にはまた比熱比 1.4 の理想気体として計算した Rankine-Hugoniot 曲線を記入しているが、計測値はほぼこの

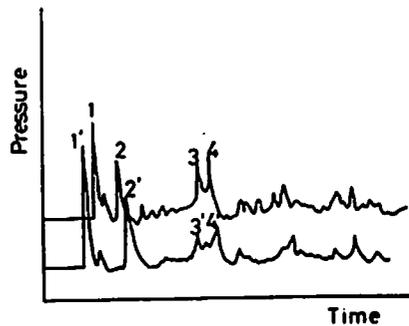


Fig. 9 Typical record of the pressure by strain gauge transducer

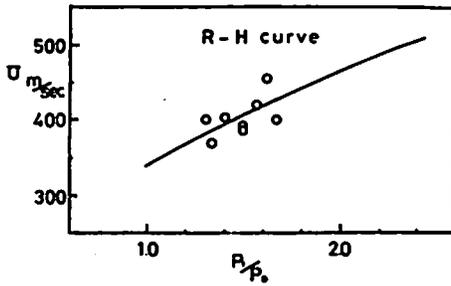


Fig. 10 Propagation velocity of the shock front and the pressure at the wave front

曲線附近にあり、圧力の計測精度も実用上は許容しうる程度にあるものと思われる。なお Fig. 9 には 1, 1' のピークの後方に 2, 2' のピークがあるが、これは Fig. 8 から分るように壁面からの最初の反射をとらえたものであり、その時間々隔は 1~1' 間の平均伝播速度を用いて計算した 1~A~2 および 2~A~2' 間の時間々隔とはほぼ一致する。

### 2.2.3 波面圧力と薬量および波面位置との関係

波面位置の爆心からの距離を  $R$ 、波面圧力（ゲージ圧力）を  $P_0$ 、爆薬の有するエネルギーを  $E$  とする。比熱比一定の理想気体を考えエネルギーの放出が瞬間的だと仮定すると一般に次式がなりたつ<sup>5)</sup>。

$$P_0 = f\left(\frac{R}{R_0}\right), \quad R_0 = \left(\frac{E}{4\pi P_0}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

ここで  $R/R_0 \rightarrow \infty$  のとき  $f \rightarrow 0$  となる。対象とする圧力範囲を狭い範囲に限定すると上の(1)式は

$$P_0 \propto (R/R_0)^{\alpha} \quad (2)$$

で近似することができる。ここで  $\alpha$  は考えている圧力範囲に対応して定まる定数である。Fig. 11 には種々の薬量（したがって  $E$ ）と  $R$  についての計測結果から  $P_0$  と  $R/R_0$  との関係をプロットしている。これより  $\alpha = -1.9$  となることが分る。この結果からまた薬量一定の時には  $P_0$  は  $R^{-1.9}$  に比例することが分るが、この様子を Fig. 12 に示す。薬量が一定の時、圧力が 0.5~1 atü の範囲では  $P_0 \propto R^{-1.9}$  なる関係がなりたつという事実はすでに文献 6), 7) において指摘されていることであるが今回の計測によって、 $P_0$  が 0.3~2.0 atü の範囲では薬量  $W$  の影響も含めて

$$P_0 \propto R^{-1.9} \cdot W^{0.63} \quad (3)$$

なることが知られる。

## 3. 壁面の振動

### 3.1 実験方法

爆発実験室のコンクリート壁面の振動を、抵抗線ひずみゲージで実測した。測定位置は実験室の南および

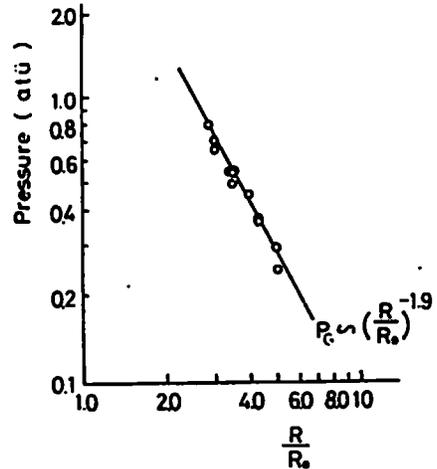


Fig. 11 Pressure at the shock front vs. a non-dimensional distance from the center of explosion

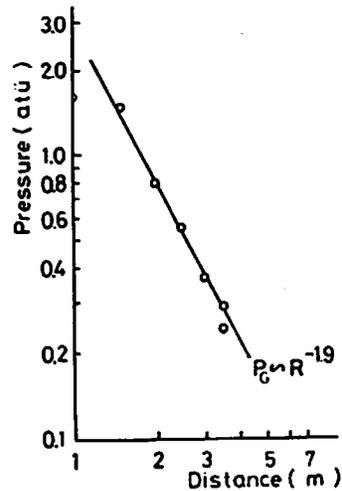


Fig. 12 Pressure at the shock front vs. distance from the center of explosion

西側壁面（室外側のみ）で、ひずみゲージの位置の詳細およびゲージ番号は Fig. 13 に示すとおりである。さらに、南側壁面の変位（壁面に法線方向の）を加速度型ピックアップで測定した。

シュミットハンマー試験により、壁体およびひさしのコンクリートの圧縮強さ  $F_c$  を推定すると、壁体： $F_c = 450 \text{ kg/cm}^2$ 、ひさし： $F_c = 380 \text{ kg/cm}^2$  であった。コンクリートの最大応力時のひずみを 0.2% と仮定して、コンクリートの応力・ひずみ曲線を  $\epsilon$  関数で表わすと<sup>8)</sup>、Fig. 14 の曲線が得られた。

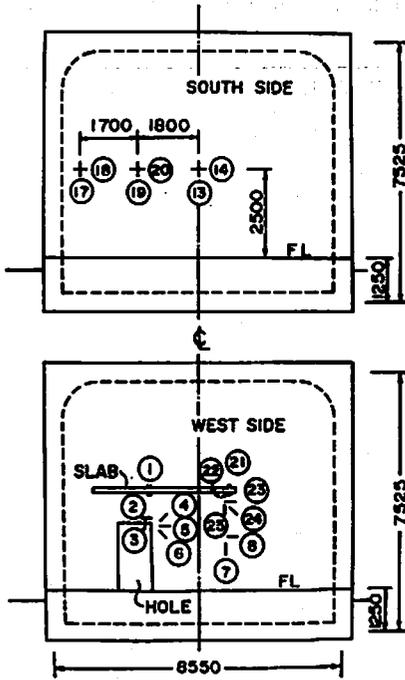


Fig. 13 Gage location and numbers

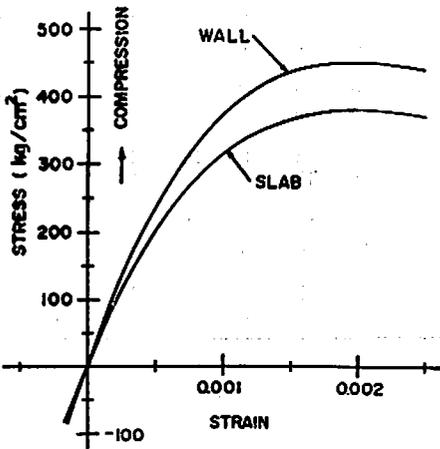


Fig. 14 Stress-strain curves of concrete

### 3.2 整体振動の周期特性とモード

ひずみの記録結果の一例を示す Fig. 15 との通りである。この図で分るように、ひずみの周期特性（ピークの位置）は、各測定点とも大たい同じである。ひさしの振動波形も壁の振動と大たい一致するが、ひさしには少し高い振動数の波が重畳しているようである。

壁の変位（たわみ）の振動波形も、ひずみの波形と大たい一致している。

壁面の振動を不規則な定常振動とみなして、測定結果のスペクトル解析を行うと、Fig. 16 のようなパワ

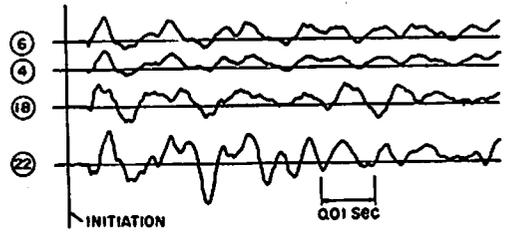


Fig. 15 Ultraviolet ray records of strains

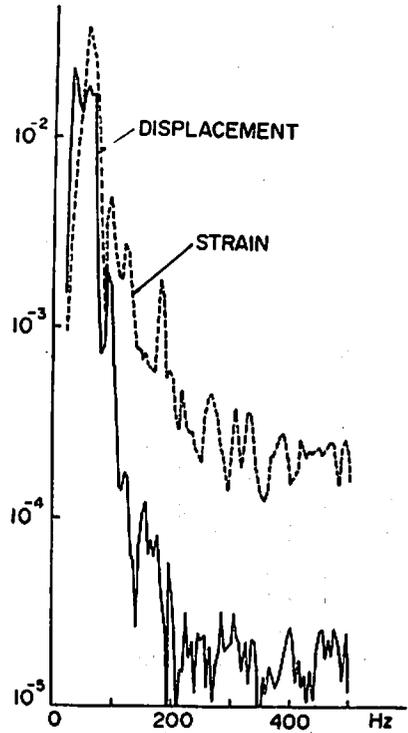


Fig. 16 Power spectrum of vibration

ースペクトルが得られる。これらの図から、壁面のひずみ、変位ともに、55 Hz、95 Hz 近傍で卓越した振動がみられる。

壁体および屋根スラブを周辺固定の平板とした場合と、周辺支持の平板とした場合の1次固有振動数の計算値は次のとおりである。

	周辺固定	周辺支持
壁 体	78 Hz	39 Hz
屋根スラブ	61 Hz	33 Hz

なお、コンクリートの弾性係数は、Fig. 14 の応力ひずみ曲線より推定して、 $5.86 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$  と仮定した。

実際の壁体、屋根スラブの周辺条件は、上に用いた2条件の中間と考えられる。上の計算結果から、壁体、

屋根スラブの平面板としての曲げ振動が、爆発時の壁の振動に大きい影響を与えていることが推定される。

Fig. 17 は爆発直後のひずみ波形のピーク時のひずみをプロットしたもので、南側壁面のひずみ分布図を示している。壁面の振動のモードは、周辺固定の板の曲げ振動の1次のモードに近いことが分る。これは、実測の振動数が、壁または屋根スラブの固有振動数に近い事実とも合致する。

ひさしの振動は、ひさしの表裏のひずみの符号が逆になるので、曲げ振動が支配的である。

### 3.3 最大ひずみ

振動の波形における、最も高いピークでのひずみを読みとった。この結果の一部を Table 2 に示す。

ひずみの大きさの順序をゲージ番号で示すと、㉔、㉖、㉔、㉒、㉑となり、ひさし固定端、開口部入隅部が応力集中点となることが判る。

これらの最大ひずみと薬量との関係を両対数座標上

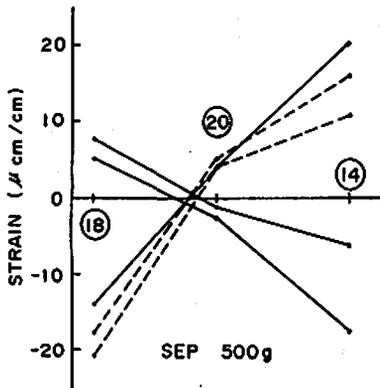


Fig. 17 Strain distributions on wall surface

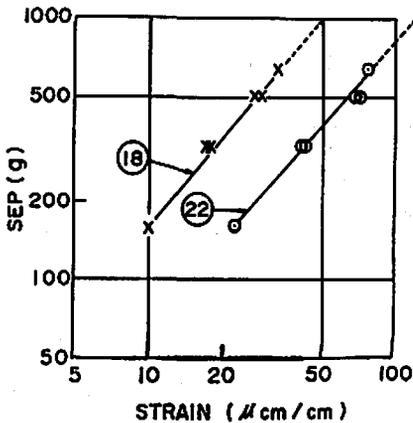


Fig. 18 Maximum strain compared with weight of explosive

Table 2 Maximum strains at measured points ( $\times 10^{-6}$ )\*

Gage Nos.	Explosive charge weight (in grammes)						
	500	320	160	320	500	640	1000**
④	35 -13	24 -11	15 -8	27 -10	35 -12	47 -17	62
⑤	18 -12	14 -10	10 -8	15 -10	20 -16	20 -20	27
⑥	41 -17	32 -13	21 -11	33 -13	43 -17	47 -19	62
㉑	12 -17	10 -13	4 -7	9 -13	11 -15	11 -19	-25
㉒	56 -67	43 -43	28 -22	44 -42	57 -71	72 -78	-123
㉓	12 -15	10 -15	6 -6	12 -10	12 -16	12 -20	-31
㉔	7 -7	6 -6	5 -5	7 -7	10 -9	9 -10	-11
㉕	14 -14	9 -9	5 -7	8 -10	12 -13	12 -18	-22
㉖	20 -10	16 -8	10 -8	14 -6	20 -12	22 -14	30
㉗	14 -9	7 -7	7 -7	9 -4	12 -12	15 -12	19
㉘	8 -3	5 -3	3 -2	5 -3	7 -3	9 -3	12
㉙	20 -28	15 -17	8 -10	16 -18	19 -29	25 -33	-45
㉚	15 -10	10 -5	7 -4	11 -7	15 -10	17 -10	23
㉛	10 -10	7 -5	3 -3	7 -5	10 -7	10 -7	16

\*Tensile strains are defined to be positive.

\*\*See Fig. 18 for derivation.

に図示すると、両者は大体直線関係となる (Fig. 18)。この直線を用いて薬量 SEP 1 kg のときの最大ひずみを予想すると Table 2 の通りになる。薬量が 1 kg のときの最大ひずみ量はせいぜい  $123 \times 10^{-6}$  で、これは圧縮応力で約  $60 \text{ kg/cm}^2$  に相当する (Fig. 14 参照)。この応力はコンクリートの圧縮強さに比べて十分小さいと言える。コンクリートが引張りひずみを受ける場合には、引張力は補強鉄筋で負担されるので、コンクリートの局所的な応力集中は構造物の耐力に余り影響しない。実験室内の爆発位置を変化させて実験を行ったが、これが最大ひずみに及ぼす影響は明らかでなかった。

以上の実験は主として SEP の爆発によるものであるが、爆薬を PETN とすると、最大ひずみが約10%増加し、LEP とすると約40%減少することが判った。

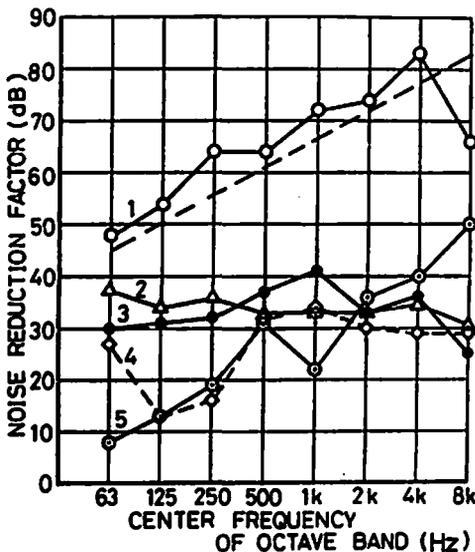
#### 4. 騒音特性

##### 4.1 騒音の計測

Fig. 1 に番号で示した位置に 1.2 m の高さ (10 番のみ窓枠上) 指示騒音計を配置し、その出力をデータレコーダに集録、研究室で再生し A 特性回路を通してレベルレコーダ (ペン速度 140 mm/s) に記録、ピーク値を読みとった。ただし一部は騒音計 A 特性の振れの最大値を直接目測したので、レベルレコーダ記録と比較し、1 dB (デシベル) 加えて補正し、統一したデータとした。また爆発音の周波数分析は、データレコーダ出力をオクターブフィルタを通してレベルレコーダに記録しそのピーク値を読みとった。

##### 4.2 予備実験

薬量 1 g の爆発音およびスピーカより出した白色雑音を用いて予備実験を行ったが、各部の遮音については Fig. 19 のようであった。爆発実験室の壁の遮音度は質量則 ( $TL=18 \log fM-44$  (dB),  $f$ : 周波数 (Hz),  $M$ : 面密度 ( $\text{kg/m}^2$ )) による計算値に近い値になっており、観測室が遮音に有効に働いている。視察



- 1: Wall of the explosion test room (concrete 55 cm)
- 2: Window for optical observation
- 3: Entrance (double doors and "tatami")
- 4: Cover of Ventilator
- 5: Window of the souly observation room

Fig. 19 Noise reduction factor

によっても推察されたように、弱点は入口ドアと換気孔であることが明らかになった。

##### 4.3 対策と結果

Fig. 20 は各実験における測定結果を示す。同一条件でも時に 1~2 dB のばらつきがあったので平均して示してある。遮音壁を兼ねた研究棟 (A) は西側に対してかなり効果を示したが (実験 2 B), 反対側たとえば研究棟 (D) ではかえって音が大きくなったと報告された。換気孔の消音器によりある程度改善されたが (実験 2 C, 10 番), 消音器の効果は壁の遮音に比しはるかに小さく不充分である上、実験室内の換気に長時間を要することとなり、換気孔は実験時には閉閉できる構造にすべきであると結論された。防振対策 (実験 2 D) や爆発位置は騒音に関するかぎりほとん

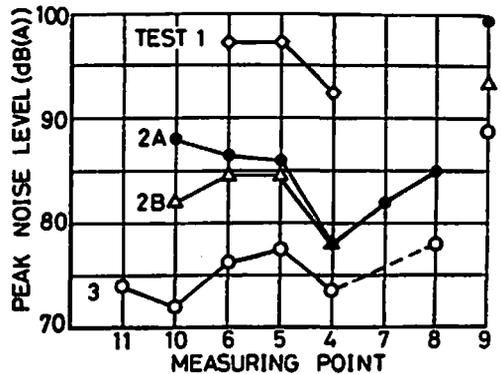


Fig. 20 Peak noise level and its reduction

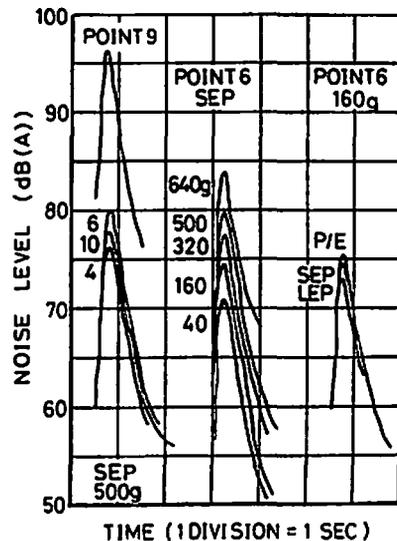


Fig. 21 Shapes of noise level of explosive sound

ど影響なかった。

ドアを改善し、屋上に砂利を置き換気孔にふたをした結果、不十分ながらも当初に比しかなりの改善が得られた(実験3)。なお南側観測室のシャッターを半分ほどあけるとその向いている方向(5, 6番)で約3 dB騒音が上昇した。実験時にはシャッターはしめておかなければならない。

#### 4.4 騒音の性状、薬種薬量との関係

爆発音は Fig. 21 に示すように急激に立上って後、約 2.5 秒/60 dB の割合で減衰し、その形状は薬種薬量位置によってほとんど変わらない。周波数分析の結果は Fig. 22~24 のようになり、一般に数十 Hz の低周波成分が多く、周波数が高いほど少くなっている。低周波成分の割合は西側地点で多く、また薬量が多いほど多い。薬種については、薬量位置によって ±1 dB 程度のちがいはあるが、PETN と SEP とはほとんど等しく、LEP はそれより 1~2 dB 小さい。ピーク騒音レベル  $L_A$  と薬量  $Q$  との関係は Fig. 25 のようになり、大よそ

$$L_A = 10 \log Q + \text{const} \quad (\text{dB(A)}) \quad (4)$$

の関係がある。

#### 4.5 騒音の推定と評価

Fig. 25 より西側境界線上のピーク騒音レベル  $L_A$  を推定すると Fig. 26 に示すようになり、これらを特定工場とみなしたときのこの地域(第2種)の騒音規制値昼間60ホン(ホン=dB(A))と比較すると問題

にならないほど大きい。しかしこの実験室のように衝撃性の音がきわめてまれに聞える場合、規制については現在この種の音の規制は決っていない。また評価法についても明らかでない。

適用することには疑問があるが、仮り ISO (国際標準化機構) の推奨規格<sup>9)</sup>に従って、衝撃性や継続時間による補正を行って評価騒音レベル (rating sound level)  $L_r$  を求めてみると Fig. 26 に示すようになり、この地域(A地域)の環境規準昼間50ホンと比較

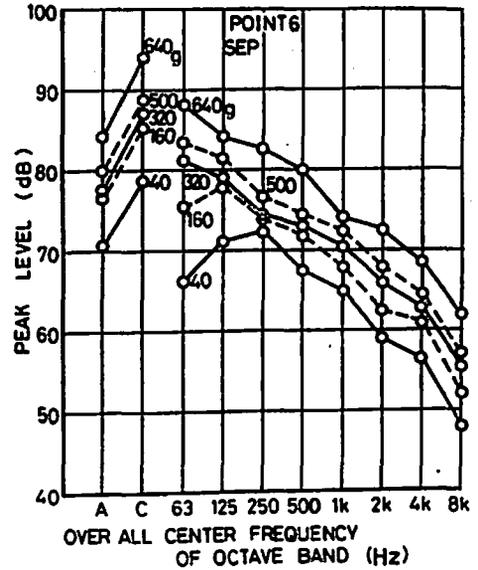


Fig. 23 Frequency characteristics of explosive sound (2)

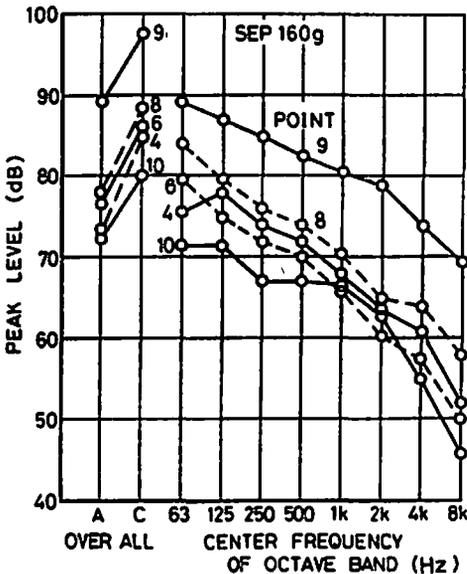


Fig. 22 Frequency characteristics of explosive sound (1)

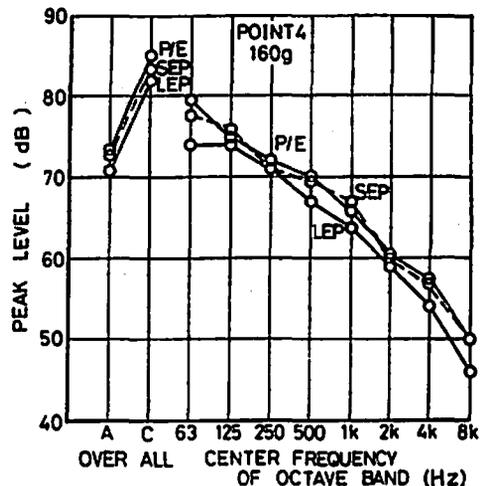


Fig. 24 Frequency characteristics of explosive sound (3)

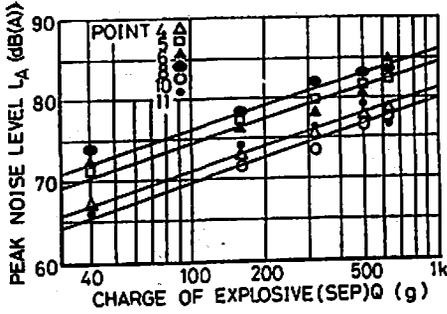
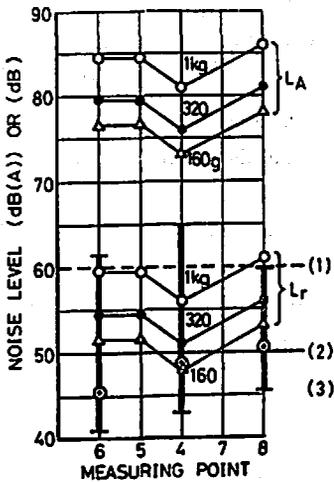


Fig. 25 Relation between the charge of explosive and the peak noise level



- $L_A$ : presumed peak level (dB(A))
- $L_r$ : rating sound level (dB)
- (1): enforcement standard for industrial noise emission (dB(A))
- (2): environmental quality standard (dB(A))
- (3): measured back-ground noise, 90% range and medium (dB(A))

Fig. 26 Presumption and Assessment of the explosive noise

して 160 g ではほとんど問題はないが、320 g では少し、1 kg ではかなり苦情が出るものと判断される。なおこの地域の環境騒音の実測値(週日、13~14時、90%レンジおよび中央値)も同図に示してあるが、トラック通過時のピークレベルは 75~80 dB (A) に達する。

振動を伴っていること、火薬爆発であるという心理的影響を考えると、大学の研究という安心感やトラック通過時の音や振動がかなり大きい点を考慮してももっときびしく判断すべきかも知れない。現在の所は薬

量、回数を制限していることもあって苦情は出ていない。

#### 4.6 今後の対策

爆発実験室については一般にドア、換気孔に対する対策が第一に重要で、また 55 cm のコンクリート壁でも遮音は十分でない。人里離れた場所に設けることができないとすると、理想的には大きな建屋の中に入れて防振ゴムで支えることが考えられる。また内壁にマットなどを取りつけ、壁への衝撃波を吸収することも必要であろう。

本実験室に関しては、差し当り換気孔のふたをもっとしっかりしたものとし電動式とすること、実験室と研究棟(A)との間の開口部をふさぐことなどの対策を考えており、また内壁へのマット取りつけも検討中である。

### 5. 爆発実験に伴う土地の振動について

#### 5.1 実験目的

爆発実験室は熊本大学のキャンパス内にあり、研究施設や住宅に近いので、実験時に発生する土地振動に細心の注意を払うことが必要である。

この節では、土地の上下振動が

- (1) 距離に対してどの様に減衰するか。
  - (2) 使用薬量とどの様に関係しているか。
  - (3) 防振対策によって、どれくらい軽減されるか。
- などを中心にして実験・考察をおこなった。

#### 5.2 使用した測定器

1. 換振器: 上下動線輪型電磁式換振器  
固有周波数 1 c/s, 電圧感度 3.2 volt/kine, インパルス入力に対して共振が心配されたが目的の測定範囲内に共振点は存在しないことが確かめられた。
2. 記録方式: 熱ペン式直視記録計  
固有周波数 80 c/s
3. 総合特性: 換振器の固有周期が現象速度に較べて充分長く、記録器の固有周期が充分短い(現象の周波数は 30~50 c/s)ことを考えると記録された波は地動速度に比例していると言うことが出来る。

3.に従って、ここで地動の大きさは上下動速度の最大値をさすものとして了解していただきたい。

#### 5.3 距離による波の減衰

Fig. 27 は、地震動が距離と共に減衰の様子を示したものである。地震動の大きさ  $V$  を爆心よりの直線距離を  $D$  で表わすと充分

$$V \propto D^{-1} \quad (5)$$

の関係が成り立っていることを示している。ただし実験室から長い測線をとれる方位は一方位に限られ、

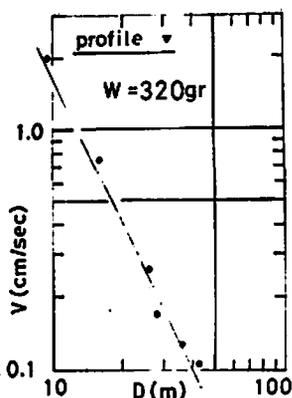


Fig. 27 Attenuation of the maximum particle velocity of the ground with distance  
Measuring points: ▼ points in Fig. 1.

(Fig. 1 参照) 振動の大きさの方位に対する依存性についての疑問が残るが、爆源の対称性から考えて、ここでの議論を大幅に変える様な差異は考えられない。

#### 5.4 薬量と振動の大きさ

Fig. 28 は、次に述べる種々の爆発条件をパラメータとし薬量と振動の大きさの関係を示したものである。直線の位置は爆発の条件に左右されるが、勾配は安定しており、薬量を  $W$  で表わせば

$$V \propto W^{0.6} \quad (6)$$

と表わされる。式(5)、(6)を考え併せると

$$V = kD^{-2}W^{0.6} \quad (7)$$

となるが、ここに  $k$  は爆発の条件に支配される常数である。

#### 5.5 防震対策の効果

Fig. 28 には、4本の直線が書き入れられているが、それらはそれぞれ次の爆発条件に対応する。

- 1 何等対策を施さない場合……地上1mで爆発
  - 2 防震対策を施した場合………地上1mで爆発
  - 3 防震対策を施した場合………地表面で爆発
  - 4 防震対策換気口閉鎖………地上1mで爆発
- 防震対策の実際については Fig. 5 を参照されたい。

2、3の場合を1の場合と比較すると、この方法が振動防止に卓効を有し  $k$  の値を約1/2に引き下げることがわかる。地表面で爆発をおこなうときには更に効果が増大することが認められる。このことは、防震工事が実験室内の床下全面におこなわれておらず、中央部にかざられていることによるのかも知れない。

2の場合と比べ、4の場合の方が高くなっているのは、注意すべき事実である。4に於いて換気口を閉鎖

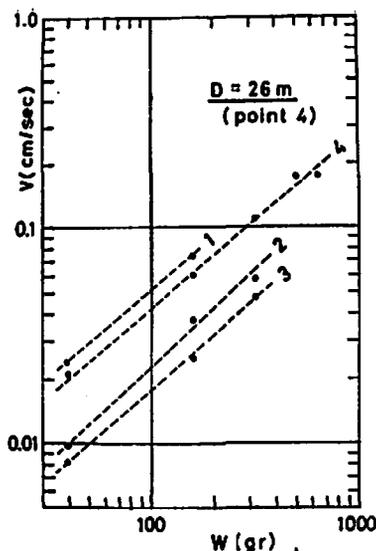


Fig. 28 Relation between the charge weight and the maximum particle velocity of the ground  
Measured in the point 4 in Fig. 1.  
Labeled number in each profile corresponds to four explosion conditions explained in Sec. 1.

したのは防音の目的からである。そのことによって振動が大きくなるとすれば重大な問題であり、物理的に考えられないことではない。然し、一つ疑問に思われる点は、4の測定だけは他のものと一年経過してからおこなわれており、この間に床の砂がしめ固まったとする考えである。これは  $k$  の値が経年変化し、次第に大きくなることを意味する。これが原因とすれば、床の砂は実験の度に掘り返さねばならないであろう。上に述べた二つの可能性のいずれかについての実験は近い将来におこないたい考えである。4の条件で実験をおこなうとし、且つ  $k$  の経年変化がないとすると、 $V$  (cm/sec) は  $D$  (メートル) と  $W$  (kg) で

$$V = 180W^{0.6}D^{-2} \quad (8)$$

で計算出来る。

#### 5.6 結論

冒頭に述べた様に実験室は研究施設や民家に近いため、それらに及ぼす影響を出来るだけ減少することが研究の目的である。現在全国で震動に対する基準を設けている所は少ないが、仮りに地動速度 1 mm/sec を震動が大きく感じられる上限とし、民家までの最短距離を 30 m とすると  $W$  の許容量は 400 g 程度となる。

## 6. 附近の建物の振動

### 6.1 測定方法

爆発による附近の建物の影響を明らかにするため、薬量と建物、地面 (Fig. 1, 実験棟③の×印) の振動との関係、地面、1階、2階の振動の比較、爆発床面が砂だけの場合とゴムタイヤを埋設した防振対策の効果について調べた。

測定は上下動、水平動3成分偏位地震計 (周波数 1 Hz) と増幅器 (1000~9000 倍) と電磁オシログラフの組合せ (国際機械振動研究所製) で行なった。爆発点から建物の基礎地面までの距離約 50m, 近くを流れる白川の沖積層である。建物は南北幅 10m, 東西長さ 80m, の細長いコンクリート3階建て、爆発点が南にあたるため東西方向の水平動は非常に小さく、水平動はいずれも南北方向をとらえるように地震計を設置した。薬種は SEP, 薬量は回数多く行なわれた 40, 160, 320 gr. の3種を主とし、床面はタイヤ埋設前とタイヤ埋設後、爆発は地上 1m と砂面上、測定は地面と1階と2階でこれらの組合せでの測定である。

### 6.2 結果および考察

種々の条件下で記録されたオシログラフの波形をみると上下動 (V) が水平動 (H) より整った正弦波形を示すこと、地面・1階、2階とも振動数 32~31 Hz (計算には 31 Hz を使用)、同一条件では上下動が水平動よりやや大きいことが認められた。

#### 6.2.1 地面の振動

薬量と地面振動との関係を Table 3 に示す。また前節で求めた速度振幅 (V) と薬量 (W) と距離 (D) との関係式  $V=180D^{-1}W^{0.8}$  から計算した値を併記した。前節の測定とは測定方向、測定機械、上下動と水平動のちがいがあってもかかわらず、よい一致を示している。

#### 6.2.2 測定条件

薬量は 40, 160, 320 gr. の3種砂面での爆発 (Fig.

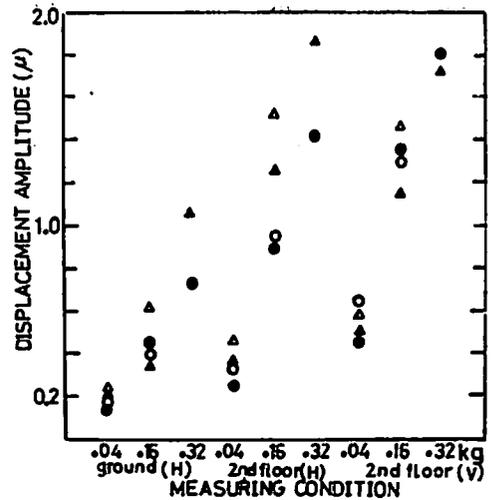


Fig. 29 Relation between displacement amplitude and measuring conditions

29 ○印) と地上 1m での爆発 (△印), タイヤ埋設前 (白) とタイヤ埋設後 (黒) の場合について地面と2階での測定結果を Fig. 29 に示した。この結果 (1) 薬量の増加とともに変位振幅も大きくなる。(2)同一薬量では地面より2階の振動が大きい。(3)地上 1m での爆発が砂面での爆発より振動が大きい例が多い。(4)防振対策の効果が認められた例が多い。(5)上下動が水平動よりやや大きいことなどが認められる。

#### 6.2.3 地面と建物の振動

Fig. 29 での同一条件下の地面と2階とを比べると2階の方が 1.5~2.4 倍大きく、また 160 gr の薬量で再度行なった結果は Table 4 に示す通りで2階の方が地面より 2.5 倍大きくなっている。騒音の場合は屋内では小さくなるのでこの点著しく異なっている。

#### 6.2.4 薬量と振幅

6.2.2 の一部でも述べたが、薬量の範囲を拡げての

Table 3 Comparison between measuring and calculation value of the ground.

Charge Weights (gramme)	40	160	320
Max. Velocity Amplitude (mm/sec) (measured)	0.03~0.05	0.07~0.13	0.15~0.21
Max. Velocity Amplitude (mm/sec) (calculated)	0.05	0.14	0.24

Table 4 Comparison between the ground and building vibration.

	ground	1st Floor	2nd Floor
Max. Displacement Amplitude (μ)	0.6	1.2	1.5
Frequency Hz	32	31.5	31

Table 5 Displacement velocity and acceleration for various charge<sup>+</sup>

Charge Weights (kg)	0.16	0.32	0.50	0.64
Displacement Amplitude ( $\mu$ )	1.4	2.1	2.6	2.9
Velocity Amplitude (mm/sec)	0.27	0.41	0.51	0.56
Acceleration Amplitude (g)	5.3	7.9	9.9	11.0

Table 6 Estimation value at the nearest house from the blasting point.

Charge Weights (kg)	0.2	0.3	0.5	1.0	Allowable limit
Velocity Amplitude (mm/sec)	0.2	0.4	0.65	1.0	0.3 to 0.6
Acceleration Amplitude (g)	5.5	7.5	12	19	3.5

測定結果(上下動, 2階)は Table 5 に示す通りで両者を対数方眼紙上にプロットするとほぼ直線の関係がえられる。振動公害の規定は速度振幅 ( $x=2\pi fx$ , 大阪, 兵庫, 愛知, 神奈川), 加速度振幅 ( $\ddot{x}=(2\pi x)^2 \cdot x$ , 東京, 新潟) で示されている。爆発点に最も近い民家約 40 m 地点についての振動を計算すると Table 6 がえられる。

人間は 2~12 Hz の範囲で加速度に最も敏感であり速度・加速度の大きさが周波数に大きく左右されることからみて, また近くを走るバスやトラック(約 10 Hz)の振動の方が時折り生ずる瞬間的な爆発実験の振動よりも実感として大きく感じられる点からみても, Table 6 の許容限界と同一視することには問題があるが, やはり平常の実験では 400 gr. 程度にとどめるべきと思われる。

なお防音対策の有無によつての地面, 建物の振動の影響は認められなかった。

#### まとめ

以上に熊本大学爆発実験室を対象として強度・騒音振動に関して行った実験結果を述べた。実験結果を総合的に述べると次の通りである。

- (1) 実験室内の空気振動(衝撃波の壁面による反射の繰返し)の周波数は 70~100 Hz. であったが, この値は壁面振動の周波数 55~95 Hz. に近い値であった。
- (2) 実験室建物の強度の点から言えば, SEP 1 kg の爆発に対しても, まだ余裕のあることが実験結果の外挿によつて判った。
- (3) 実験中になされた防音対策に関して言えば, 防音壁の設立によつてその背後では約 15 dB 程騒音レベルが低下し, さらに防音扉の取付, 換気孔閉鎖方法の改良などによつて約 10 dB 騒音レベルが低下した。防振対策に関して言えば, 実験室床面の砂中

に約 2 m×2.4 m の面積にわたつてトラック用タイヤを敷きつめることによつて地面振動が 1/2 以下に軽減された。

- (4) このような防音・防振対策を施したにもかかわらず, 騒音あるいは振動の点から言えば, この実験室において 1 回の爆発において使用できる最大薬量は 300~400 gr. にした方がよいとの結論が得られた。
- (5) 附近の建物の振動に関する計測結果によれば, 地盤の振動より建物内部の振動の方が大きいこと, そして建物内部では 1 階より 2 階の方が振動が大きいことが判った。

以上の結果から知られるように, 爆発実験室を大学構内などに設置するような場合には, 防音・防振に関する配慮が非常に重要である。強度面からの制限よりも騒音振動の面からの制限の方が大きな比重を占めることは本実験室に限らず, 起こり得ると思われる。本研究グループでは防音・防振に関してさらに強化する方策を現在検討しており, 今後もそのための努力を推進して行かなければならないと考えている。

#### おわりに

本研究は日本産業火薬会より学術奨励金を得て行ったものである。本研究を行うに当つて旭化成より火薬類の提供を受けた。さらに実験の遂行に当つては当時の大学院学生, 卒業研究生膳君および熊本大学職員福山, 浜津, 伊元各技官の熱心な協力を得た。ここに, 深甚なる謝意を表する。

#### 文 献

- 1) 正田: 工業火薬, Vol. 26, No. 6, P. 330.
- 2) 岡崎, 柳沢, 須藤, 大久保, 田中, 飯島: 工業火薬, Vol. 26, No. 6, P. 338.
- 3) 正田: 工業火薬, Vol. 26, No. 6, P. 347.
- 4) 梅村: 工業火薬, Vol. 26, No. 6, P. 318.
- 5) A. Sakurai: J. Phys. Soc. Japan, Vol. 8, No.

5. P. 662.
- 6) G. Taylor : Proc. Roy. Soc. A. Vol, 201 A, P. 159.
- 7) 田中 : 工業火薬, Vol. 28, No. 6, P. 472.
- 8) 日本建築学会 : 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説
- 9) ISO/R 1996 Assessment of noise with respect to community response.

注) 本論文は投稿規定の頁数を大巾に超過しておりますが, 内容上分割は不適当と考えとくに編集委員会が認めたものであります。

---

### Experiments on strength, explosion noises and ground vibration of explosion test room in Kumamoto university

K. Kiyota\*, M. Fujita\*\*, M. Kono\*\*,  
H. Matsuo\*\*, Y. Kurobane\*\*, J. Okuda\*\*,  
M. Inoue\*\* and M. Otsuka\*\*

The explosion test room was constructed in the campus of Kumamoto University for the studies of several physical phenomena by explosion and explosive working. It is of 8 meters square and 6 meters in height and has the reinforced concrete wall of 55 cm in thickness.

To know the allowable charge weight in a shot, a series of experiments were made on the pressure variation in this room, the structural strength of this room and on the explosion noises and ground vibration generated from this room. Further some devices were used in the efforts for reducing the explosion noises and ground vibration, and their effects were examined.

The following conclusions were obtained from the experiments.

1) For the viewpoint of structural strength of this room, the explosive up to 1 kg of SEP can safely be used in a shot.

2) Concerning to the explosion noises, its level was reduced by 10~15 dB by constructing a new building. A further reduction 10 dB was attained owing to closing the ventilators installed on the ceiling of this room. For the effective reduction of ground vibrations, automobile tires were paved in the area of about 2 meters square beneath the sand. The particle velocity of ground vibrations was reduced to less than half of original value owing to its effect.

3) The maximum permissible charge weight in a shot should preferably be less than 300 g of SEP due to the explosion noises and ground vibration in spite of some devices for reducing them, which indicates the necessity of further efforts on this subject.

(\* Yashiro Technical College, \*\* Kumamoto University)