

## 爆発衝撃による金属板の飛翔の研究

恩沢忠男\* 石井勇五郎\* 滝沢 雄\*\* 伊妻猛志\*\*

金属板が火薬の爆発によって飛翔する現象について述べた。金属板は爆轟波面の高圧の衝撃波によって加速され、ある時間たつと平衡速度に達する。

板が加速されている領域は、瞬間X線によって観察したが、板の曲がり角の2乗が飛翔距離に比例することがわかった。この関係は Kowalick<sup>9)</sup> によって提案されている。

平衡速度に達してからの板の速度は半円柱法によって測定した。そして板の最終速度は火薬の重さと板の重さの比 R に関係していることがみだされた。そしてこの関係は Sterne<sup>9)</sup> や Chadwick と Duvall<sup>9)</sup> らによってみだされた半径発則によって説明することができた。

### 1. まえがき

爆発圧接は火薬の爆発によって金属板を高速に加速し、ほかの金属板に衝突させ接合させるのであるが、接合状態の良否は飛翔する金属板の状態にかなり影響されるようである。したがって金属板の飛翔状態を知ることが爆発圧接の研究でかなり重要な要素である。金属板の飛翔速度については今までに多くの研究がされているが、この報告は爆発圧接の研究の一環として、金属板の飛翔についていろいろの測定を行ない、考察を試みたものである。

### 2. 実験方法および供試材料

金属板の飛翔状態の測定方法として、ここでは半円柱法による曲がり角の測定と、瞬間X線による飛翔状態の撮影の2通りを使用した。

#### 2-1 半円柱法

Fig. 1 のように金属半円柱の上に、ある距離をなして金属板を仮定し、その上に火薬をおく。その火薬の一端を起爆すると Fig. 1 に示したように火薬の爆発したところからある角  $\beta$  をなして半円柱方向に飛翔し、接合する。この接合した状態を Photo. 1 に示す。接合界面にはある衝突角度の範囲(左右に2ヶ所ある)に波状模様が見られる。Fig. 1 からわかるように最初に衝突する点Cの両側、対称な位置の衝突角度は等しいため、接合界面の波状模様も対称な位置に生ずる。顕微鏡観察によって左右のそれぞれの波の発生点を求

め、その角度を測定して平均角度を計算すれば、C点と半円柱の頂点との角度が求められる。この角度は Fig. 1 から板の曲がり角  $\beta$  に等しい。このようにしていろいろの金属板について  $\beta$  を求めた。

半円柱としては軟鋼と銅の半径35mmのものを用いた。金属板は Fig. 3 に示した入手可能な純金属板を使用した。板厚は0.5mmから5.0mmまでである。使用した火薬は爆着用の火薬で爆速2,300 m/sec, 単位面積当り1.65 g/cm<sup>2</sup>である。

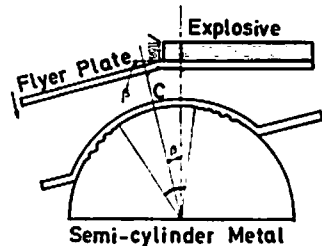


Fig. 1 Process of collision in semi-cylinder method.

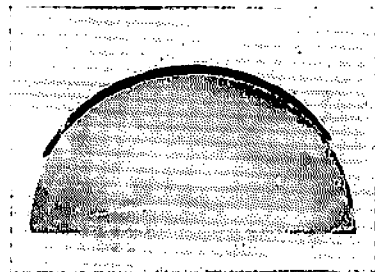


Photo. 1 Macrostructure of bonded boundary.

昭和46年10月9日受理

\* 東京工業大学工学部生産機械工学科 東京都目黒区大岡山2の12の1

\*\* 旭化成工業株式会社東京都千代田区有楽町1の12の1

• Tokyo Institute of Technology

\*\* Asahi chemical industry Co., Ltd.

## 2-2 瞬間X線装置による撮影方法

X線管、試料、X線フィルムのはいつたカセットの順序で配列した。X線管と試料の間は20~30cmで、それらの間に3mm厚のアルミニウム板1枚と数枚のベニヤ板を入れてX線管球およびカセットを保護した。X線の発生は試料の爆薬にトリガーをつけ、爆発がその点まで進むと、トリガーが働きX線を発生する。この装置の仕様は最大放電電圧300KV、放電時間0.1 $\mu$ secである。撮影に用いたX線フィルムはDu Pont社の医療用X線フィルムCRONEX III六つ切と、サクラSタイプ六つ切である。また蛍光増感紙には次のものを使用した。増感度300~500倍のDu Pont HISPEEDWB、極光SSである。

撮影時の試料の設定はFig. 2(a)に示す方法で行なった。用いた金属板は半円柱法と同じである。火薬は爆着用の火薬のほかにシート爆薬(爆速4,700m/sec)も用いた。

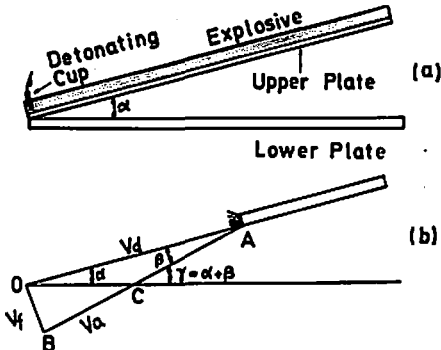


Fig. 2 (a) Setups of angular method,  
(b) Diagram showing the geometrical relation of the each parameter.

## 3. 実験結果および考察

### 3-1 爆接過程の各因子の関係

Fig. 2(a)の設定を行なった試料を、火薬の一端から起爆し爆発がある距離進んだときの状態を瞬間X線により撮影した写真をPhoto. 2に示す。この写真に



Photo. 2 The flash X-ray photograph of explosive bonding.

みられるように金属板は爆発点で強い衝撃を受けて、ある角度 $\beta$ の曲がりを生じ、下板に衝突していく。この衝突の過程は簡単な幾何学的配置をなしていることから各因子の間の関係は簡単な式によつて求められる。

本報告で必要な関係式は金属板の飛翔速度と曲がり角の関係であるが、その際金属板の飛翔方向が問題となる。CowanらはFig. 2(b)のAOBが2等辺三角形を保つOB方向に金属板は飛翔すると考えて次式のように求めている<sup>1)</sup>。

$$V_j = 2V_d \sin \frac{\beta}{2} \quad (1)$$

ここで $V_d$ は火薬の爆速である。

BahraniやCrosslandらは、金属板がその面に直角方向に飛翔していくと求めて次式を求めている<sup>2)</sup>。

$$V'_j = V_d \sin \beta \quad (2)$$

(2)式は(1)式の飛翔方向成分と考えることができる。

### 3-2 曲がり角 $\beta$ と金属板物性値との関係

火薬が爆発によつて金属板を曲げていく様子をPhoto. 3に示す。この写真にみられるように、火薬の爆着面直下の金属板部分からすぐ曲がらず、いくらか時間をへてから曲がつていく。このように金属板は爆発力によつてある時間加速を受け、そして平衡速度に達していく。今まで述べた飛翔速度そして曲がり角は平衡に達したときの速度であり、角度である。金属板が加速を受けているときの状態はPhoto. 3のように瞬間X線写真のみによつて明らかになり、半円柱法によつて、測定した角 $\beta$ は平衡速度に達してからの値である。ここでは平衡速度に達してからの角 $\beta$ について、火薬そして金属板の物性などとの関係を述べる。

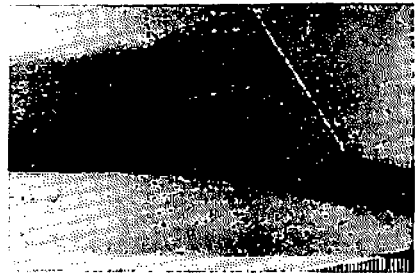


Photo. 3 The deflection of plate on detonation of explosive charge.

Fig. 3に示した10種類の金属板の曲がり角 $\beta$ を半円柱法によつて測定した。測定した曲がり角 $\beta$ と金属板の物性値との関係を種々求めてみると、金属板の単位面積当りの重さ $ph$ ( $\rho$ :密度、 $h$ :板厚)との間に点のばらつきが比較的小さく、それらの点を結ぶ線がな

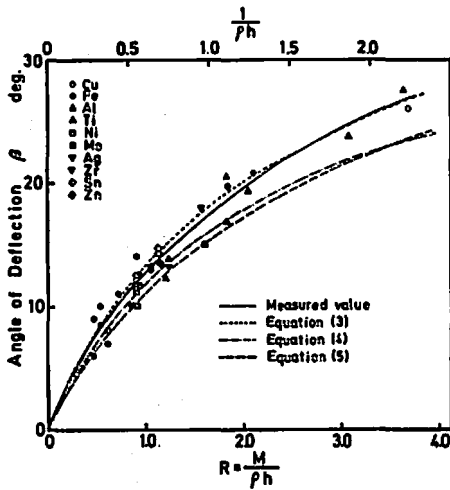


Fig. 3 Angle of deflection  $\beta$  vs. the ratio  $R$  using to the powdered explosive charge.

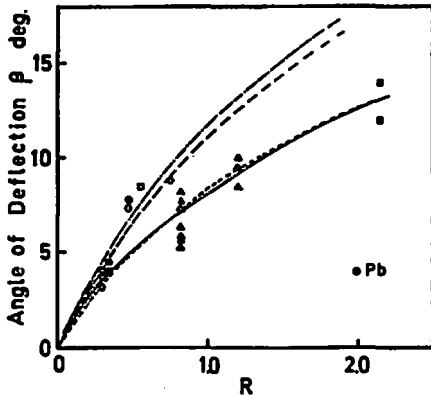


Fig. 4 Angle of deflection  $\beta$  vs. the ratio  $R$  using to the sheet explosive charge.

めらかな曲線を示す関係があることが判明した。Fig. 3に  $1/ph$  (上側横軸) と  $\beta$  の関係を示す。実線は測定点をなめらかに結んだものである。Fig. 4はシート爆薬を用いた場合を示す。この場合の  $\beta$  の測定は、半円柱法と瞬間X線の両方から求めた。各測定点のばらつきは Fig. 3 に比較して大きい。

火薬の爆発の衝撃力による物体の飛行速度については今まで多くの研究がされている。ここで論じている平衡に達してからの速度の解析には火薬と物体の単位面積当りの重さの比  $R$  を1つの因子として使用している。 $V_f'$  と  $R$  の関係式は多くの研究者によって求められているが、それらの関係式の中で筆者らの測定結果に近い傾向を示す式に次の3つがある。

$$V_f' = \sqrt{2U} \sqrt{\frac{0.6R}{1+0.2R+0.8/R}} \quad (3)$$

$$V_f' = V_d \frac{0.612R}{2+R} \quad (4)$$

$$V_f' = V_d \left\{ 1 + \frac{27}{16} \frac{1}{R} \left( 1 - \sqrt{1 + \frac{32}{27} R} \right) \right\} \quad (5)$$

ここで  $R = \frac{M}{\rho h}$

$M$ : 火薬の単位面積当りの重さ

これらの式はいずれも理論を加味した実験式である。(3)式は Sterne によつて爆発したガスと加速された金属板の簡単なエネルギー授受関係から求められた式である<sup>9)</sup>。 $U$  は火薬から金属板に伝えられる単位面積当りのエネルギー量を示す定数で、設定条件によつてその値は異なるので、実験値に合わせて決定される。(4)式は運動量保存則に基づいて Chadwick によつて求められた式で<sup>10)</sup> 係数 0.612 は彼が実験から求めた値である。(5)式は Duvall が爆発ガスと加速される金属板の間の流体力学的流れを考慮して求めた式である<sup>9)</sup>。Deribas もこの式を実験式として求めている<sup>11)</sup>。

(3)~(5)式の飛行速度は飛行方向の速度であるから、 $V_f'$  とし、曲がり角  $\beta$  との関係は (2) 式から求められる。(3)~(5)式を(2)式によつて  $\beta$  に変え、その曲線を Fig. 3, Fig. 4 に示した。 $R$  の値はそれぞれの図の下側横軸に示した。(3)式の定数  $\sqrt{2U}$  は Fig. 3 では  $R=4$  のとき、 $\beta=27.3^\circ$  として求め、 $\sqrt{2U}=960$  m/sec を使用した。Fig. 4 では  $R=2$  のとき  $\beta=12.6^\circ$  として求め  $\sqrt{2U}=1,250$  m/sec を使用した。

(3)~(5)式によつて計算した曲線と実験値を比較してみる。Fig. 3 の場合 (4), (5)式は全体に実験値より低い値になつている。 $R=2$  位までは実験値のばらつきの中にはいつている。(3)式は全体によく合っているが、定数  $\sqrt{2U}$  を  $R=1$  のときの実験値の  $\beta=12.6^\circ$  として求めると、 $R=4$  のとき  $\beta$  の値が  $25.7^\circ$  になり、実験値よりいくらか低くなる。なお (4) 式を  $R=1$  のときの実験値に合わせるように定数 0.612 を補正すると 0.654 になる。Fig. 4 の場合 (3) 式による曲線は合うが、(4), (5) 式による曲線は実験値よりかなり高い値になる。この原因は次のように考えられる。用いたシート爆薬はペンスリット爆薬の中に鉛丹が爆速を下げる目的で入れてあり、そのためふつうの火薬と比較して単位重量当りの放出エネルギーはかなり低いものになつたためと考えられる。Fig. 3, Fig. 4 から爆着用爆薬とシート爆薬の  $\sqrt{U/v_d}$  を比較してみると、後者は前者の約 1/2.5 になつている。

以上火薬の爆発力によつて金属板が飛行し、平衡に

達したときの速度および曲がり角と  $R$  の関係について述べたが、実際工業的にクラッド板を生産しているときの  $R$  の値は 1 位であり大きくない。したがって (3)~(5) 式を用いればふつうの爆発圧接の曲がり角は計算できることになる。

### 3-3 飛翔開始直後の金属板の挙動

火薬の爆発によって金属板はある距離加速される。これは Photo. 3 に示した。爆轟面から  $x$  の距離にある金属板の飛翔距離を  $y$  とすれば、金属板の飛翔の状態は座標  $(x, y)$  で表わされる。Fig. 5, 6 にこのようにして求めた  $(x, y)$  の関係を示す。Fig. 5 に用いた火薬は爆着用の火薬で  $M=1.1 \text{ g/cm}^2$  である。Fig. 6 はシート爆薬で  $M=1.1 \text{ g/cm}^2$  である。なお Fig. 5, 6 共にたて軸は横軸の 5 倍に拡大されている。これらのグラフによると爆轟面近くでは金属板は加速されているが、ある距離はなれると一定速度で飛翔している。それを確かめるために Fig. 7, 8 に曲線の傾き ( $dy/dx$ ) と  $x$  の関係を示した\*。明らかに金属板はある距離加速され、そのあと一定速度になることを示して

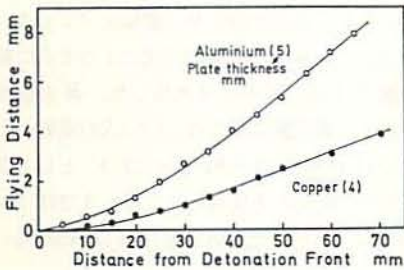


Fig. 5 Flying distance  $y$  vs. distance  $x$  from detonation front using to the powdered explosive charge.

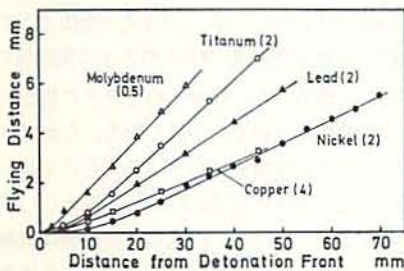


Fig. 6 Flying distance  $y$  vs. distance  $x$  from detonation front using to the sheet explosive charge.

\* 加速されている領域から、一定速度の領域に移るときは Fig. 7, Fig. 8 のように急に移らないで、徐々に移っていくものと思われるが、ここでは簡単のため 2 つの領域に分けて、それぞれ直線で結んだ。

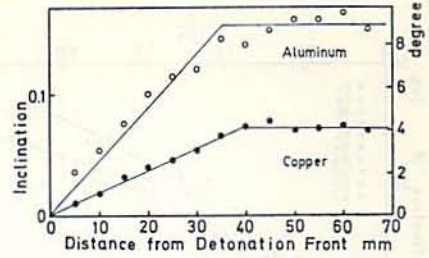


Fig. 7 Inclination of the curves shown in Fig. 5.

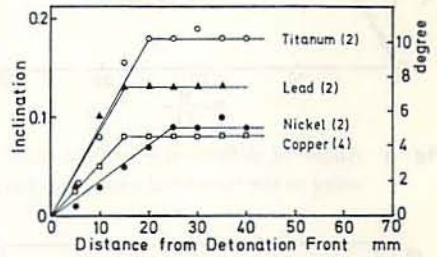


Fig. 8 Inclination of the curves shown in Fig. 6, except molybdenum plate.

いる。加速されている範囲内では傾きと  $x$  は比例している。したがって次のようにして  $y$  と  $\beta$  の関係が求められる。

傾きと  $x$  は比例していて、 $x=0$  のとき  $y=0$  であるから  $y \propto x^2$  となる。また  $dy/dx = \tan \beta \approx \beta$  とおくと、 $y$  と  $\beta$  の関係は次のようになる。

$$y \propto \beta^2 \quad (6)$$

(6) 式によつて  $y$  と  $\beta$  の 2 乗が比例することが求められたが、この関係は Carpenter や Kowalick によつても求められている。Carpenter は実験から  $y$  と  $\beta$  はほぼ次の関係があることを示している<sup>7)</sup>。

$$\frac{\rho h a}{y} \beta^2 \propto M \quad (7)$$

ここで  $a$  は金属板の降伏応力である。この (7) 式は実際の実験値とはかなり誤差が生ずるようである。Kowalick は次元解析によつて同様の式を求めている<sup>8)</sup>。

$$\frac{\rho h^2 a}{E y} \beta^2 \propto M \quad (8)$$

ここで  $E$  は金属板のヤング率である。この (8) 式は実験値とどの程度合うかについて今まで十分な検討がされていない。筆者らは実験数が少ないので、実験の結果と (7) 式、(8) 式の関連性を詳細に調べられないが、試みとして行なつてみた。その結果 (8) 式の方がいくらか実験値に近い値を与えるようである。附録 1 に (8) 式を使用して計算した例



を示す。

じゅうらい  $R$  を変数として使用した (3)~(5) 式などの関係式と (7) 式、(8) 式などの関連性は全く論じられていなかったが、筆者らは今までに述べた実験結果と考察からこれらの関係式は全く別の状態を示すものであることがわかった。次にこれらの式を組合わせて金属板が加速される範囲について求めてみた。

(8) 式によると  $y$  が増すと  $\beta$  も大きくなるが、実際はある限界距離  $y_0$  のところから  $\beta$  は一定になる。この  $y_0$  を (8) 式と (3) 式、(4) 式を使って計算してみる。なおここでは  $\sin \beta$  と  $\tan \beta$  はいずれも  $\beta$  に近似させて計算した。

(8) 式と (3) 式を組合せた場合  $y_0$  は次のようになる。

$$y_0 = \frac{\rho h^2 \sigma}{CME} \cdot \frac{2U}{V_d^2} \cdot \frac{0.6R}{1+0.2R+0.8/R} \quad (9)$$

ここで  $C$  は (8) 式の左辺と右辺を等号で結んだとき、右辺に入れた比例定数である。

(8) 式と (4) 式からは次のようになる。

$$y_0 = \frac{\rho h^2 \sigma}{CME} \left( \frac{0.612R}{R+2} \right)^2 \quad (10)$$

この (9) 式、(10) 式を使用して  $y_0$  を求めた例を附録 2 に示す。これによると (9) 式 (10) 式によって求めた  $y_0$  は実験値とあまり誤差はないようである。

#### 4. 結 論

火薬の爆発衝撃によって金属板が飛翔する状態については、いままでに多くの研究がされているが、それらの求められた関係式のうち、どれが爆発圧接に適用できるかなどについてはあまり研究されていなかった。筆者らは金属板の飛翔について、爆発圧接の見地から実験を行ない、考察を行なった。その結果次のようなことが知られた。

爆発衝撃によって金属板は始め加速をうけているが、ある距離はなれると、加速されずに飛翔する。

金属板の速度が一定になった領域の、速度あるいは曲がり角は、火薬と金属板の単位面積当りの重さの比  $R$  と密接に関係しており、いままでに爆発圧接の場合と無関係に求められていた飛翔速度と  $R$  の関係式のうち、いくつかのものが適用できることが明らかになった。

金属板速度が平衡に達する前の加速をうけている領域での、速度あるいは曲がり角の 2 乗は飛翔距離に比例していることが明らかになった。この時の速度などは  $R$  の値とあまり関係なく、金属板の物性値を加味した Kowalick の求めた式によく合うことがわかった。

なお瞬間 X 線装置は通産省公害資源研究所吉田正氏の厚意により使用させていただきました。ここに厚く

感謝の意を表します。

#### 文 献

- 1) G.R. Cowan and A.H. Holtzman, J. Appl. phys., 34 (1963) p. 928
- 2) A.S. Bahrani, T.J. Black and B. Crossland, Proc. R.Soc. A., 296 (1967) p. 123
- 3) T.E. Sterne, Ballistic Research Laboratories Report No. 648 Aberdeen Proving Ground, Maryland 1947
- 4) M.D. Chadwick, Proceeding of the Select Conference of Explosive Welding, the Welding Institute, 1968
- 5) G.E. Duvall and J.O. Erkman, S.R.I. Report No. 1 Project No. GU 2426
- 6) A.A. Deribas, et al, Combustion, Explosion and Shock Waves 1967 2, p. 291
- 7) S. Carpenter, R.H. Wittman and R.T. Carlson, First International Conference of the Center for H.E.F., Denver 1967
- 8) J.F. Kowalick and D.R. Hay, Second International Conference of the Center for H.E.F., Denver 1969 p. 7.2.1
- 9) 飯田修一他共編, 物理定数, 朝倉書店

#### 附 録

1. 爆着用の火薬を使ったアルミニウム 5 mm 厚と銅 4 mm 厚の試料について (8) 式との関連を計算してみる。

(8) 式の比例定数  $C$  をアルミニウム 5 mm 厚の実験結果から求めてみる。それぞれの物性値は次のとおりである。 $\rho = 2.7 \text{ g/cm}^3$ ,  $h = 0.5 \text{ cm}$ ,  $E = 6.9 \times 10^{11} \text{ dyne/cm}^2$ ,  $\sigma = 3.5 \times 10^8 \text{ dyne/cm}^2$ ,  $M = 1.1 \text{ g/cm}^2$ , Fig. 5, Fig. 7 から  $y = 0.32 \text{ cm}$  のとき  $dy/dx$  はほぼ 0.156 であるから  $\beta = 0.156$  として  $C$  を求めると、

$$C = \frac{2.7 \times 0.5^2 \times 3.5 \times 10^8 \times 0.156^2}{1.1 \times 6.9 \times 10^{11} \times 0.32} = 2.4 \times 10^{-5}$$

この定数  $C$  を用いて銅 4 mm 厚の  $\beta$  と  $y$  の関係を求めると次のようになる。ただし、 $\rho = 8.96 \text{ g/cm}^3$ ,  $h = 0.4 \text{ cm}$ ,  $E = 11.7 \times 10^{11} \text{ dyne/cm}^2$ ,  $\sigma = 6.9 \times 10^8 \text{ dyne/cm}^2$ ,  $M = 1.1 \text{ g/cm}^2$  とする。

$$\beta^2 = \frac{2.4 \times 10^{-5} \times 1.1 \times 11.7 \times 10^{11}}{8.96 \times 0.4^2 \times 6.9 \times 10^8} y = 0.031 y$$

$y = 0.1$  のとき  $\beta = 0.056$ ,  $y = 0.2$  のとき  $\beta = 0.068$  になる。実験値は Fig. 5, Fig. 7 からそれぞれ  $\beta = 0.056, 0.068$  でよく一致する。シート爆薬について求めると上に求めた程度には合わないが、50%位の誤差範囲内で合う。(7)式による計算では、どちらの火薬も

実験値と2倍位の違いがある。

## 2. 限界距離 $y_0$ の計算例

爆着用の火薬のアルミニウム5mm厚と銅4mm厚の計算を示す。各物性値は本文および附録1に示した値を使用した。

アルミニウム5mm厚 実験値  $y_0$  は 0.47 cm

(9) 式の時  $y_0=0.47$  cm

(10) 式の時  $y_0=0.40$  cm

銅4mm厚 実験値  $y_0$  は 0.20 cm

(9) 式の時  $y_0=0.26$  cm

(10) 式の時  $y_0=0.21$  cm

---

## On the Flyer Plate by the Detonation of Explosive

Tadao Onzawa, Yugoro Ishii, Yu Takizawa  
and Takeshi Izuma.

A metal plate moved on detonation of explosive charge was described. The plate was accelerated by high pressure shock wave at detonation front and after a finite time passed the plate achieved the terminal velocity.

In the region which the plate was accelerated, the state of flyer plate was observed by using the flash X-ray, it was found the square of deflection angle of plate was in proportion to the flying distance from original position. This relation had been established by Kowalick.<sup>8)</sup>

When the terminal velocity was achieved, the velocity of plate was measured by semi-cylinder method. Consequently, it was found that the terminal velocity of plate was related to the ratio,  $R$ , of the mass of explosive charge to that of the plate and was able to be expressed by semi-empirical formulas developed by Sterne<sup>3)</sup> and Chadwick and Duvall.<sup>4)</sup>

(Tokyo Institute of Technology and Asahi Chemical Industry Co., Ltd.)