

爆薬の爆発力により駆動された金属板の飛翔状況

滝沢 雄*, 藤田 昌大**

爆薬の爆発によって駆動された金属板が、次第に加速されて最高速度に達するまでの距離について考察し、この距離と、装薬条件によって定まる金属板の最高曲り角との関係を、簡単な式で表わすことができた。また、加速中の曲り角は、飛翔距離と直線関係をもつ増大してゆくことを知った。

1. 結論

爆薬の爆発によって駆動された金属板（以後飛翔板と称する）は次第に加速し、ある距離を飛翔した後、最高の速度に達し、以後しばらくして空気の抵抗などで減速を始める。この結果、飛翔板の飛翔途中の状態は、Fig. 1 に示すように、加速域、定速域および減速域に区分することができる。

従来、加速域については、多くの研究者が検討を加えている。すなわち、Chadwick らは、飛翔板が最高の速度 V_p に達するのに必要な距離 d の計算式(1)を

示している。

$$d = 3tV_p/V_a \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 V_a は飛翔板中の音速で、 t は飛翔板の厚さである。そして彼らは、 $(d/t) > 0.05$ のとき、加速は起きないと言っている¹⁾。

一方、Chudzik は、加速範囲は、飛翔板の厚さに等しい距離にまで達するとしている。すなわち $(d/t) \leq 1$ である²⁾。

Shribman らは、ピンコンタクト法を用いて加速範囲を測定し、薬厚 1 時の Torimonite No.3 を用いたと

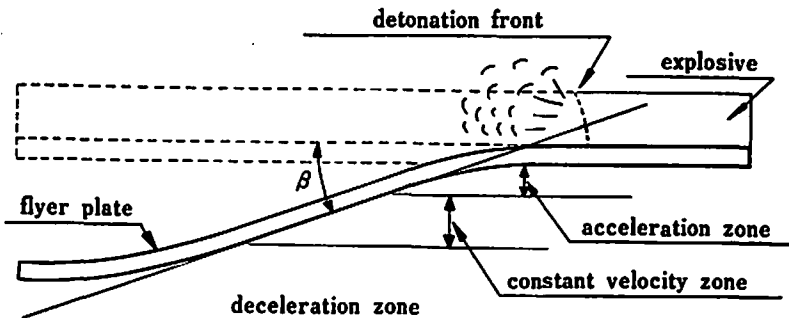


Fig.1 Graphical model of flyer plate

き、厚さ 0.105 吋ないし 0.250 吋の飛翔板は、0.303 吋の距離で最高速度に達し、薬厚 1.5 吋ないし 2 吋を用いたとき、厚さ 0.303 吋の飛翔板は、0.2 吋以内で最高速度に達したが、これは、Deribas らが、0.5 吋の薬厚と 0.5 吋の飛翔板を用いたとき、0.35 吋の距離

で最高速度に達した結果とほぼ一致すると述べている³⁾。

Kowalick らは、半円柱法において、飛翔板と半円柱の距離を変化させて、飛翔板の曲り角の変化を求めており、0.06 吋のステンレス鋼板は、0.085 吋の距離のとき最大の曲り角を示したことを報告している。このときの爆薬は、密度 0.4g/cc のニトログアニジン

昭和49年11月8日受理

* 旭化成工業(株) 〒100 東京都千代田区有楽町 1-1-2

** 熊本大学工学部生産機械科, 〒860 熊本市黒髪2-39-1

で、葉厚は2吋であった⁴⁾。

しかし、以上述べたごとく飛翔板の加速域について、飛翔板の厚さとの関連で把握する試みがなされているか、あるいは単に実験データを提示するにとどまっております、装薬条件との普遍的な関連は求められていない。

二枚の金属板の一方を爆薬の爆発力で駆動し、他方に衝突させて冶金的な結合を行なわせる爆発圧接においては、飛翔板（爆発圧接では合せ材と称する）と他方の金属板（母材と称する）との当初の間隔は、重要な圧接因子である。

爆発圧接を行なう場合、合せ材の加速域や減速域で母材と衝突する条件を選ぶことも可能であるが、これら領域での圧接は爆薬エネルギーを有効に利用することにならない。最もエネルギー効率の良いのは定速域での圧接である。したがって実用上、合せ材が加速されて最高速度に達するまでの距離と装薬条件との関連を把

握することは、爆発圧接の研究や実用化にとって、極めて肝要なことである。

本報告は爆発圧接条件の選定に有用な知見を得ることを目的とし、主として瞬間X線写真を、また補助的に半円柱を用いて、飛翔板の加速域について解明を試みたものである。

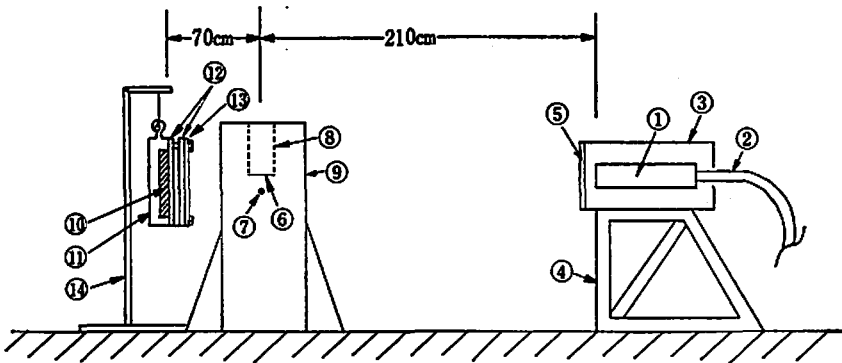
2. 実験

2.1 瞬間X線写真による測定法

使用した瞬間X線装置は、Field Emission Corp. 製の Fexitron Pulsed Xray System, model 730/2710、で放電電圧 300KV で使用した。また、X線フィルムは、KODAK RP Royal の四ツ切で、増感紙には KYOKKO HS を使用した。

飛翔板は、鋼棒で組んだわくからナイロン紐で吊下げた。また、飛翔板の中心位置は、X線管球面より 210cm、フィルムカセット面から 70cm とした。

これらの関係配置の説明図を Fig.2 に示した。



- ① pulsed X-ray tube head ② cable ③ tube protector
- ④ tube stand ⑤ Al plate ⑥ flyerplate ⑦ trigger wire
- ⑧ nylon string ⑨ steel frame ⑩ film cassette ⑪ cassette folder
- ⑫ Al plate ⑬ veneer ⑭ steel stand

Fig.2 Arrangement of flyer plate, X-ray tubehead and film.

飛翔板の曲り角、加速域、定速域の計測は、撮影後のX線フィルム上で直接行なった。

2.2 半円柱による最大曲り角の測定法

半円柱による曲り角を測定する原理は、従来の報文に述べられている⁵⁾ので、ここでは省略するが、今回実施した配置は Fig.3 に示した。

今回とくに留意した点は、X線写真による測定結果を参考にし、飛翔板の長さを長くしたこと、および半円柱の位置を起爆点から遠く離れたことである。

2.3 使用した爆薬と装薬法

実験に使用した爆薬は、旭化成工業㈱が爆発圧接用

に開発した低比重爆薬（略称 LEP-R）である。

その特性値を Table 1 に示した。

この爆薬を、飛翔板の周辺にブリキ板（半円柱の場合）またはベニヤ板（X線写真の場合）で所定の高さの枠をとりつけて箱とした中に装薬し、葉厚をコントロールする方法をとった。装薬した爆薬の重量は装薬前後の飛翔板の重量を計量して求めた。

2.4 飛翔板および半円柱諸元

実験に使用した飛翔板は、厚さ 3mm、幅 100mm のステンレス鋼板（JIS G 4305, SUS 304）およびアルミニウム板（JIS H 4000, A 1050）で、長さは、

L	l
350	200
500	350

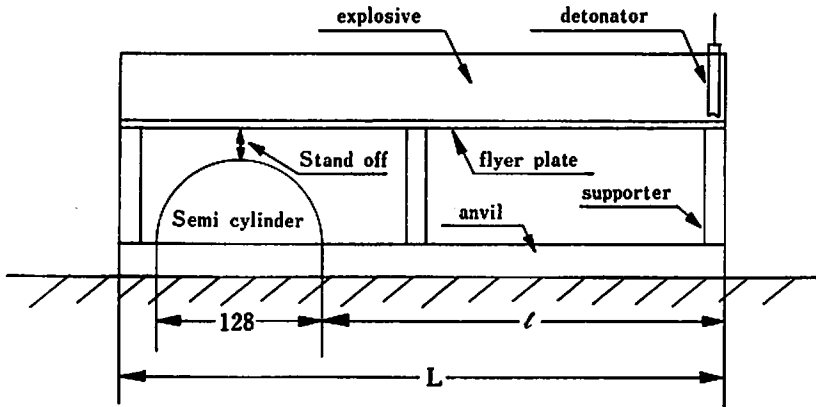


Fig.3 Arrangement of semi-cylinder and flyer plate.

Flyer Plate (Dimension,mm)	Explosive thickness (Mass ratio:R)	Near initia- tion point	Middle point of detonation passage	Near end of detonation	Just after detonation finished
SUS 304 3x100x250	(mm) te : 15 (R : 0.31)	Ex. No. 9 	Ex. No. 5 	Ex. No. 7 	Ex. No. 8 **
	te : 30 (R : 0.65)	Ex. No. 17 	Ex. No. 10 	Ex. No. 12 	Ex. No. 11 **
	te : 60 (R : 1.35)		Ex. No. 13 	Ex. No. 18 ** 	
A 1050 3x100x250	te : 15 (R : 0.92)	Ex. No. 4 	Ex. No. 1 	Ex. No. 2 	Ex. No. 6 **

* Magnification was changed by 1.07, because of arrangement change.

** These photographs show both positions before and after shooting together.

Photo 1 Pulsed X-ray photographs of flyer plate at several points of detonation passage.

Table 1. Properties of explosive used

name	Density (g/cc)	Heat of explosion (kcal/kg)	Detonation velocity (m/sec)
LEP-R	0.5	1, 100	2, 100 ~2, 700

X線撮影の場合は 250mm, 半円柱の場合は350mmおよび 500mmとした。半円柱は、直径 128mm の軟鋼

棒 (SS41) を半割りした。なお幅は 60mm とした。

3. 実験結果

3.1. 瞬間X線写真による測定結果

装薬条件および撮影時期で整理して並べた瞬間X線写真を photo.1 に示した。

曲り角, 加速域および定速域の測定は, Fig.4 に示す諸点について行ない, その結果を Table 2 に示した。

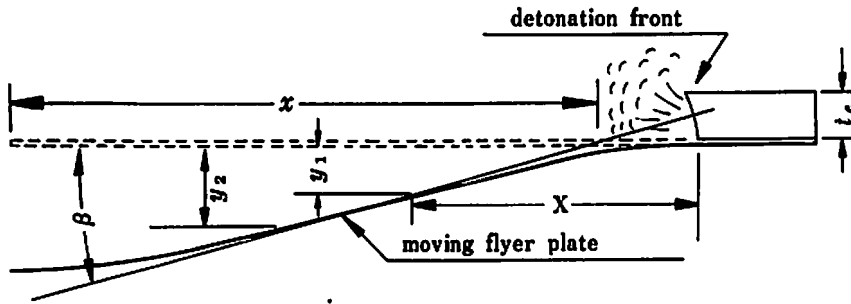


Fig.4 Measured points of moving flyer plate.

x : nominal length of detonation, y_1 : acceleration distance, y_2 : deceleration beginning distance, β : dynamic bend angle, t_e : thickness of explosive, X : horizontal distance between acceleration and detonation front.

Table 2 Results of the measurement (pulsed X-ray method)

No. of expt.	flyer plate	t_e (mm)	R [※]	y_1 (mm)	y_2 (mm)	β (deg)	x (mm)	X (mm)
9	SUS, 3mmt	15	0.31	3	5.3	7	76.5	41
5				5.6	9.8	8.8	148	47
7				9	18	10.5	222	65
8				9.8	18	10.5	266	—
17		30	0.65	4.1	7	8.9	92.3	37
10				4.9	9.4	9.5	118	49
12				9.8	19.5	12.3	213	70
11		60	1.35	—	25	13.8	291	—
13				5	9	10.3	109	49
18				10	19	13.8	210	68
4	Al 3mmt	15	0.92	5.3	10.5	17.3	73	31
1				9.4	16.9	19.3	125	39
2				15.4	29.6	21.3	189	52
6				18.8	34.5	22.8	258	—

※ R=mass ratio of explosive and flyer plate.

3.2 半円柱による測定結果

半円柱で得られた曲り角の測定結果をTable 3に示した。なお、この表には、筆者が以前の実験⁹⁾で求め

た値も一緒に示しておいた。

4. 考 察

4.1 定常状態に到達するまでの爆轟進行長

Table 3 Results of the measurement. (semi cylinder method)

flyer plate	dimension of flyer plate (mm)	te=15mm				te=30mm				te=60mm			
		l (mm)	S/O* (mm)	R	β (deg)	l (mm)	S/O* (mm)	R	β (deg)	l (mm)	S/O* (mm)	R	β (deg)
SUS 304	3×100×250	100	10	0.32	9.4	100	10	0.67	11.9	100	25	1.19	15.5
		''	''	0.32	9.8	''	''	0.64	12.2	''	''	1.24	15.3
	3×100×350	—	—	—	—	200	20	0.65	14	200	15	1.3	16
	3×100×500	—	—	—	—	350	20	0.66	14	350	20	1.36	16
	3×200×250	—	—	—	—	100	20	0.62	13.3	100	20	1.26	13.6
		—	—	—	—	''	30	0.62	13.1	''	''	1.25	13.6
A1050	3×100×250	100	10	0.89	20.5	100	10	1.83	22.4	—	—	—	—
		''	''	0.89	20.5	''	''	1.78	21.5	—	—	—	—
	3×100×350	200	20	0.93	22.3	200	20	1.84	25	—	—	—	—
	3×100×500	350	''	0.95	22.8	350	20	1.88	26.8	—	—	—	—

* : S/O : stand off.

Table 2 およびの Table 3 結果から明らかにわかることは、飛翔板の曲り角や加速距離が、装薬条件で定まった値になる、いわゆる定常状態に達するのは、爆轟が、かなり進行した後であることである。

Fig. 5 は、Table 2 および Table 3 の結果を併せて一つの図にまとめたものである。

曲り角 β は、Fig.1 および Fig.4 に示したように、飛翔板の最高速度に達した部分が、元の位置に対してなす角度である。したがって β は装薬条件が定まれば一定の筈であるが、爆轟長が短い間は見かけ上一定であって与えられた装薬条件において達し得る最大の曲り角ではない。したがってここでは、この見かけの最大角度を示す区域を見かけの定常域と称することにし、爆轟長が十分に長く定常に達した真の定常域と区別する。

従来の文献で報告された飛翔板の飛翔速度 V_p や曲り角 β の値は、測定に使用された飛翔板の長さが、長いもので300mm⁴⁾、短いものでは75mm⁵⁾であって、見かけの定常域での測定値であるおそれがあり、したがって測定値もまちまちであったものと思われる。

今回の場合、厚さ3mmのステンレス鋼板を、厚さ

15mmの爆薬で駆動した場合、見かけの爆轟長 x が222mm進行した後、はじめて定常状態に達し、薬厚60mmの場合は更に長く、約280mm進行して後到達している。よって定常状態で論ずべき曲り角や飛翔速度を測定するためには、それに見合った長さの飛翔板を使用しなければならない。この結果、筆者の以前の実験結果も多少の誤差が考えられるので、いづれ再検討を加える予定である。

4.2 加速距離について

加速距離は、飛翔板が最高速度に達する迄の距離であり、加速域の幅でもある。

ところで、Table 2 に示した実験結果では、真の定常域における加速距離は、実験した装薬条件の一部についてのみ得られているに過ぎない。

そこで、Fig. 6 に示したようにして真の定常域における加速距離を求めた。

まず、Table 2 から、加速距離を求めようとする装薬条件のグループをえらび、その各測定点 A, B, D における x, β, y_1, y_2 すなわち、測定点 A においては x_A, β_A, A', A'' 、測定点 B においては x_B, β_B, B', B'' 、測定点 D においては x_D, β_D, D', D'' を Fig. 6 に図示し、図上で A'B'D' を通る直線を引け

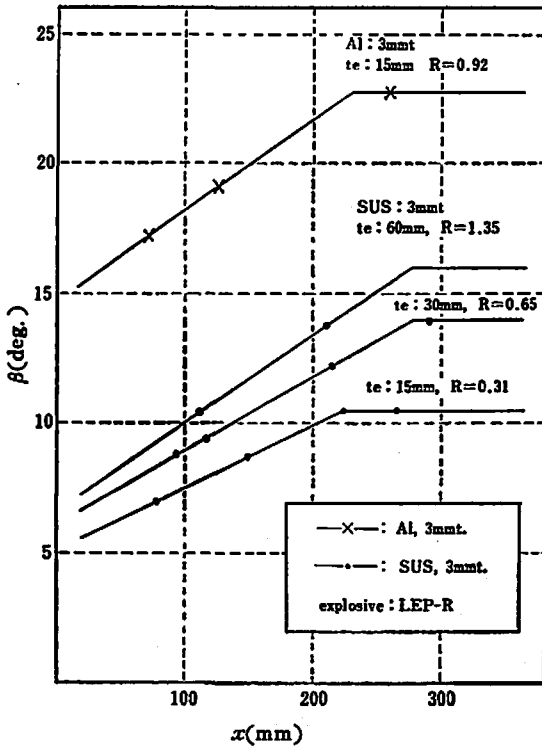


Fig. 5 Relations of dynamic bend angle β to nominal length of detonation x .

ば、これは見掛けの定常域における加速範囲を示し、A''B''D''を通る直線を引けば、これは定速域と減速域の境界を示す。一方、定常状態における曲り角 β_c と、その角度に達した見かけの爆轟長 x を求め、この点をEとして、これを Fig. 6 に、直線 EE'E''として図示すると、この直線と、直線 A'B'D'との交点 E' が定常状態における加速終了点を示し、直線 A'B'D''との交点 E'' が同じく定速域と減速域の境界を示す。

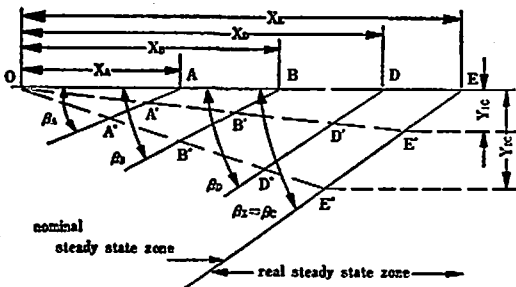


Fig. 6 Nominal and real steady state zone of flyer plate.

このようにして求めた各装薬条件ごとの定常状態到達点の x , β , y_1 , y_2 を、それぞれ x_c , β_c , y_{1c} , y_{2c}

とし、これらの値を Table 4 に示した。

また、 β_c と y_{1c} との関係を図.7 に示したが、この関係は、式(2)または式(3)で表わすことができた。これらの式は、今回の実験の範囲内で適用できるものであって、すべての条件に適用できるとは限らない。しかし、 β_c そのものは、装薬条件によって定まるものであり、 y_{1c} は β_c のみと関数関係を示しているため、これらの式は、装薬条件がかなり広く変化しても、適用できる可能性があると思われる。

$$\beta_c = 1.085 y_{1c}^{1.036} \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{または } \beta_c = 1.17 y_{1c} \dots\dots\dots (3)$$

Table 4 Dynamic bend angle β_c , acceleration distance y_{1c} and deceleration beginning distance y_{2c} in the steady state zone of the each loading conditions. (explosive: LEP-R, t_e : thickness of explosive, R: mass ratio of explosive to flyerplate)

flyer plate	t_e (mm)	R	β_c (deg)	y_{1c} (mm)	y_{2c} (mm)
SUS, 3mmt	15	0.31	10.5	9	19
	30	0.65	14	12	25
	60	1.35	16	13.5	29
Al, 3mmt	15	0.92	22.8	19	35

4.3 加速域内での曲り角について

爆轟圧接においては、合せ材と母材との衝突は、必ずしも合せ材が最高速度に達してから行なわれるとは限らず、加速域で衝突する条件が選ばれる場合もありうる。したがって、加速域内で曲り角が、どのように変化して行くかを把握することが、爆轟圧接条件の選択に際して必要になる。そこで、今回の実験結果から、これを求めることを試みた。

そのために、まず、加速域においては、曲り角は飛翔板の飛翔距離で定まり、飛翔距離が同じなら曲り角も同じと仮定し、具体的には次のようにして距離と角度の関係を求めた。

Fig. 5 から、ある装薬条件における x と β の組合せをいくつか選び、これを、対応する Fig. 6 に記入すると、それぞれの β に対応する y_1 の値が図上で得られる。このようにして求めた β と y_1 の関係をプロットしたのが Fig. 7 における点線である。

Fig. 7 で、 β_c と y_{1c} の関係を示す線の左側の部分は加速域での曲り角の変化を示し、右側は定速域および減速域を示している。

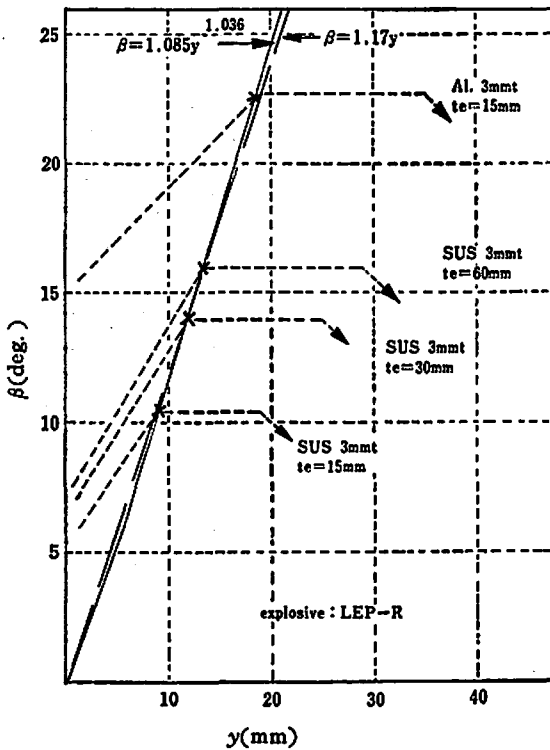


Fig.7 Relation dynamic bend angle (β) to flown distance of flyer plate(y).

すなわち、加速域での曲り角変化は、加速され始めの直後は不明であるが、少なくとも定速に達する前のかんりの距離においては、直線的に変化することがわかる。また、この直線の勾配および位置が、装薬条件によって異なっていることからみて、直線の式を(4)式で表わした場合、定数 a および b は、飛翔板の種類、厚さ、爆薬の厚さなどの装薬条件で変化する数と考えられる。

$$\beta = ay + b \quad \dots\dots\dots(4)$$

なお、この式から、爆轟の経過と飛翔板の飛翔距離との関係式を導くことができる。すなわち、いま、座標原点を真の爆轟波頭におき、飛翔板の元の位置に沿って、爆轟と逆方向にとった距離を X とし、そこから下方に飛翔中の板までの距離を y とすると

$$\frac{dy}{dX} = \tan \beta = \beta$$

であるから、(4)式から

$$\frac{dy}{dX} = ay + b$$

$$dX = \frac{dy}{ay + b}$$

$$X = \frac{1}{a} \ln(ay + b) + C$$

$$y = \frac{1}{a} [e^{a(X-C)} - b]$$

ここで、 $X=0$ のとき、 $y=0$ の条件を入れると、 $b=e^{-ac}$ となるので、結局(5)式を得る。

$$y = \frac{b}{a} (e^{ax} - 1) \quad \dots\dots\dots(5)$$

この式で、 a および b は、飛翔板や爆薬の厚さや種類、装薬比など、装薬条件で定まる定数で、Fig. 7 から求めることができる。

いま、Fig. 7 から、SUS 3 mm、薬厚 15mm のときの a 、 b を定めると、 $a=0.103$ (Rad/cm)、 $b=0.091$ (Rad) を得る。このときの y_c は 0.9cm であるので、このときの X を式(4)から求めると、 $X=6.8$ (cm) が得られた。この値は、Fig. 2 に示した実測値、 $X=6.5$ (cm) と良い一致を示している。

また、この条件における飛翔板の加速中の各位置を式(5)によって求め、実際の X 線写真から測定した y の値と比較したところ、Table 5 に示したように、かなり良く合致する結果を得た。

Table 5 Comparison of flying distance between calculated values and observed ones. (SUS 3mm, $t_e=15$ mm) (cm)

X	0	2	4	6	6.5
$y_{calc.}$	0	0.20	0.45	0.76	0.84
$y_{obs.}$	0	0.20	0.46	0.80	0.90

5. 結 論

爆薬の爆発力で駆動された金属板が、飛翔を開始して最高速度に達するまでの運動について実験と考察を行ない、次の知見を得た。

(1) 金属板の飛翔状態は、爆薬の爆轟が、かなり進んだ後になってはじめて定常状態に達する。

したがって、飛翔状態を観察するには、この点に十分留意する必要がある。

(2) 金属板が駆動され始めた後、最高速度に達するまでの距離 y_c は、金属板の最大曲り角 β_c と関係があり、次式で表わすことができた。

$$\beta_c = 1.086 y_c^{1.036}$$

$$\text{または } \beta_c = 1.17 y_c$$

(3) 加速域における曲り角 β と飛翔距離 y との間に直線関係 $\beta = ay + b$ を認め、爆轟波頭からの水平距離 X と飛翔距離 y との関係を表わすことができた。

$$y = \frac{b}{a} (e^{ax} - 1)$$

ここで a , b は、装薬条件によって定まる定数である。

なお、今回の実験において、瞬間X線撮影は熊本大学工学部衝撃エネルギー実験所において、河野先生、永山先生、長野先生のほか、上田文英君など大学院学生の絶大なご協力をいただいて実施したものである。また、X線撮影について、東京工業大学生産機械工学科恩沢先生に有益なご助言をいただいたほか補足実験も含め、本実験の全般にわたり、旭化成工業㈱、あいばの工場の伊妻猛志君、亀山竜一郎君はじめ、工場の方々に援助していただいた。ここに記して感謝の意を表する次第である。

最後に、本研究を進めるに当り、ご指導いただいた東京大学工学部疋田教授および、八代工業高等専門学

校校長清田教授に深甚な謝意を表するものである。

文 献

- 1) M. D. Chadwick, D. Howd, Wildsmith, J. H. Cairns; British welding Journal, oct. 1968.
- 2) B. Chudzik; U. S. P. No. 3, 264, 731
- 3) V. Shribman and B. Crossland; 2nd Int. Conf. of C. H. E. F., Estes Park. 1969
- 4) J. F. Kowalick and D. R. Hay; 2nd Int. Conf. of C. H. E. F., Estes Park 1969
- 5) たとえば、恩沢忠男、石井勇五郎、滝沢雄、伊妻猛志; 工火誌. 33 17 (1972)
- 6) 滝沢雄、伊妻猛志、恩沢忠男; 工火誌 34 148 (1974)

Study acceleration zone of flyer plate driven by explosion

Yu Takizawa*, Masahiro Fujita**

The flying speed, bend angle and flown distance of a metal plate driven by the explosive force were measured by X-ray photography.

The flown distance y_{1c} where the maximum speed is attained was formulated by the next relation with the maximum bend angle β_c .

$$\beta_c = 1.085 y_{1c}^{1.036}$$

$$\text{or } \beta_c = 1.17 y_{1c}$$

And it was also found that the bend angle β during the acceleration stage increased linearly as the flown distance y increased and hence the horizontal distance (X) from the detonation front was related to the vertical distance (y) to the flying plate from the point X as follows,

$$y = \frac{b}{a}(e^{ax} - 1)$$

where a and b are constants depending on the condition of explosive loading.

(* Asahi Chemical Industry : 1. 1-Chyome, Yuraku-cho, Chiyoda-ku Tokyo 〒 100

**Faculty of Engineering, Kumamoto University : 39. 2-Chyome, Kurokami, Kumamoto-City 〒 860)

〔ミスプリント訂正〕

本誌 Vol. 35(4), 184頁「爆薬の爆発により駆動された金属板の飛翔速度」のミスプリントを下記の通り訂正します。

頁	誤	正
p. 184 右, Fig.1.	\overline{BP}	\overline{BD}
p. 185 左, Fig.2.	β :flies plate	β :flyer plate
p. 185 左, photo 1semi-cylindr.....semi-cylinder.....
p. 187 右, 式(4)	$V_p = 1.3V_D \frac{\sqrt{1 + \frac{32}{27}R - 1}}{\sqrt{1 + \frac{32}{27}R + 1}}$	$V_p = 1.2V_D \frac{\sqrt{1 + \frac{32}{27}R - 1}}{\sqrt{1 + \frac{32}{27}R + 1}}$
p. 187 右, 式(5)	$V_p = V_D \frac{0.6/2R}{2+R}$	$V_p = V_D \frac{0.612R}{2+R}$
p. 189 右, L.I.	calculated form dynamic bend angle whith by.....	calculated from dynamic bend angle which was measured by.....
p. 190 右, Table 5, *1.	$F(R) = \sqrt{0.6R / (1 + 0.2R - 0.8/R)}$	$*1. F(R) = \sqrt{0.6R / (1 + 0.2R + 0.8/R)}$
p. 191 左, L25	$(1/V_D \delta)$	$(1/V_D \delta)$