論文および報告

爆発圧接における金属ジェット現象の研究*

石井 勇五郎** 恩沢 忠 男**
関 誠 夫*** 柳 沢 剛****

A Study on the Metal Jet Occurred in Explosive Bonding*

by Yugoro Ishii**, Tadao Onzawa**, Nobuo Seki*** and
Tuyoshi Yanagisawa****

Abstract

This paper describes an experiment concerning the process of explosive bonding. The process of collision of two metal plates and the metal jet in the space ahead of region of collision point was directly observed by high speed photographs using a flash X-ray and a streak camera.

A metal jet emits brilliant light in the air, but in case of Al-Al, dark spherical portions are observed in the metal jet; they are considered to be drops of aluminum (Photo. 6, 7).

In the symmetric collision of same materials, the jet velocity v_j is decreasing monotonously with the set angle α . However, since the velocity of collision point v_c decreases more rapidly than the jet velocity v_j , the ratio v_j/v_c increases.

In the case of $\alpha = \text{const.}$, the jet velocity v_j decreases with the increase of the plate thickness and its density (Fig. 9, 11).

In the case of dissimilar metal bond, the direction of jet flow shows a tendency to be declined to the side of heavy density metal. This tendency of declination and velocity of jet seem to be introduced by light density metal (Photo. 10, Fig. 13).

In the case of the asymmetric bond, when the difference of density between two metals is small, jet flows along the flyer plate (Photo. 13, 14).

1. ま え が き

金属を火薬によって接着する現象がみいだされて以来、その圧接機構に関する多くの理論が提出された。それらの研究で比較的多く論じられるのが、衝突点の前方に噴流する金属ジェット現象と、圧接界面に生成される波状模様に関するものである。

金属が高速で衝突したとき、金属ジェットが、衝突点から発生することが、Birkhoff らによってみいだされた¹⁾。彼らは金属の衝突の過程を、非圧縮性完全流体の衝突として扱い、金属ジェットの発生を理論的に解析した。その後金属を圧縮性流体として扱うと、流体(金属)が超音速で衝突点に流れ込む時、衝突点に衝撃波が発生し、ジェットの生じない場合のあることが、Walsh

らによって理論的および実験的に確かめられた²⁾。また爆発圧接における金属ジェットの発生については、Cowan らが非対称衝突の場合も含めて詳しく論じた³⁾。

筆者らは本研究で爆発圧接における衝突の過程、金属ジェットの噴流の状態などを瞬間X線装置、超高速流しカメラにより観測し、金属板の衝突の状態や、金属ジェットの速度、形状などいくつかの点について明らかにした。Bergmann らの爆発圧接過程を撮影した超高速写真によって⁴⁾、金属ジェットは衝突点の前方に霧状をなし、かなりの広がりを持しているのがみられるが、本研究ではこのほかに霧状のジェットの中に液滴をなした部分が存在していること、また同種金属の両面圧接(圧接する金属の両方の板に火薬を設定した場合)では、ジェットは両金属板のなす角の2等分線上をかなり正確に噴流するが、片面圧接(圧接する金属の一方の板のみに火薬を設定した場合)や異種金属の圧接などでは、ジェットの噴流方向が大きく片寄っていることなどを明らかにした。特に片面圧接の場合、ジェットは上板(火薬をと

* 原稿受付 昭和45年7月30日(昭和44年度秋季全国大会に発表)

** 正 員 東京工業大学 Member, Tokyo Institute of Technology

*** 東京工業大学 Tokyo Institute of Technology

**** 東京大学 Tokyo University

りつけた方の金属板)に沿って噴流しやすいことなどもわかった。

2. 実験方法

2.1 供試材料

金属板は Al, Cu, Fe, Mo, Ni, Pb, Sn, Ta, Ti, Zr のそれぞれ市販されている純金属を使用した。板の形状は幅 30 mm で長さ、厚さはそれぞれ Al 200 mm, 5 mm, Fe, Cu 200 mm, 4 mm, Ti, Ni 200 mm, 2 mm, Zr, Pb, Sn 150 mm, 2 mm, Mo, Ta 100 mm, 0.5 mm である。

使用した火薬はシート爆薬(爆速 4700 m/sec, 超高速流しカメラにより測定), ブースター用およびアルゴンフラッシュ用ペンスリット(爆速 7500 m/sec), 導爆線(爆速 6200 m/sec), 電気雷管である。使用したシート爆薬は一部を除き一定の厚さとした。

2.2 試料設定法

金属板を Fig. 1 (a) のように間隙 6 mm で平行に設定した平行法と, (b) のように角度 2α (異種金属組合せの場合は α') に設定した有角法で行なった。火薬の設定は両金属につけた場合(両面圧接)と一方の金属のみにつけた場合(片面圧接)について行なった。Photo. 1 にジェット形状の撮影に用いた試料を示す。

Fig. 1 Setups of explosive bonding.

Photo. 1 Explosive bonding specimen.

2.3 実験装置

実験装置として下記の性能のものを用いた。
瞬間X線装置*; 放電電圧 300 kV, 放電時間 0.1 μsec

超高速流しカメラ**; 日立 SP-1 型, 最大掃引速度 4 mm/μsec

2.4 撮影方法

瞬間X線装置による撮影; X線管, 試料, X線フィルムのはいったカセットの順序で配列し, X線管と試料の間は約 2 m, 試料とカセット間は 20~30 cm で, それらの間に 3 mm 厚のアルミ板と数枚のベニヤ板を入れてX線管球とカセットを保護した。X線の発生は試料のシート爆薬にトリガーをつけ, そこまで爆発が進むと, トリガーが働きX線を発生する。撮影に使用したX線フィルムは DuPont 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。また次の螢光増感紙を使用した。増感度 300~500 倍の, DuPont HI-SPEED WB, 極光 SS である。

超高速流しカメラによる撮影; Fig. 2 に示すようにカメラと試料を配置して行なった。試料をとりつけた状態を Photo. 2 に示す。これは試料に背後から光をあてるためアルゴンフラッシュ*をとりつけた場合である。アルゴンフラッシュはジェットの形状撮影などにおいて, ジェットの光が弱いときに, その形状を影絵写真として撮影するために使用した。この場合の試料の爆発はアルゴンフラッシュと試料を導爆線で結び, その導爆線

Fig. 2 Direct observation of explosive bonding with the streak camera.

Photo. 2 Experimental arrangement for explosive bonding specimen and argon flash.

* 通産省資源技術試験所吉田正氏の厚意による。

** 旭化成工業株式会社福山郁生氏の厚意による。

* アルゴンフラッシュはアルゴン中で火薬を爆発させると, その衝撃面が強く光る現象を使ったフラッシュ装置である。

の中間部に雷管をとりつけて爆発の位相を合わせた。撮影は流しカメラの回転鏡が一定回転速度に達したときに、火薬を爆発させて行なった。圧接を行なった室は暗い室であるため、圧接過程に発生する光以外は写らない。使用したフィルムはコダック 4X(ASA 400) 35 m/m フィルムで、ASA 600~800 に増感現像を行なった。一部の試料ではカラーフィルムによる撮影を行なった。フィルムはコダックハイスピードエクタクロームで ASA 640 に増感現像を行なった。

3. 実験結果および考察

3. 1 爆発圧接過程における各因子の関係

Fig. 3 (a) のように2枚の金属板をある角度 α で設定し、上板に火薬をとりつける。この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. 3 に示す。この写真にみられるように金属板は爆発点で強い衝撃力を受けて、ある角度 β (Fig. 3) の曲がりを生じ、下板に衝突している。

Fig. 3 Diagram showing the geometrical relation of the each parameters.

Photo. 3 The flash X-ray photograph of explosive bonding of titanium-copper.

同種金属を両面圧接する場合は、その設定角を 2α とすれば、その中心線からの半分は設定角 α の片面圧接と同等とみなせる。

圧接過程におけるそれぞれの速度、角度を Fig. 3 (b)

のように定めると、それらの因子の間の幾何学的な関係から次の関係式が求まる。なお爆発衝撃による板の飛翔方向を Cowan ら³⁾と同じく OAB が2等辺3角形をなす方向 OB とする。

$$v_c = D \cdot \frac{\sin \beta}{\sin \gamma} = D \cdot \frac{\sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$v_f = 2D \cdot \sin \frac{\beta}{2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$v_d = v_c \cdot \frac{\cos \frac{1}{2}(\alpha + \gamma)}{\cos \frac{\beta}{2}} = v_c \cdot \frac{\cos(\alpha + \frac{1}{2}\beta)}{\cos \frac{\beta}{2}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで α ; 圧接前の設定角, β ; 爆発衝撃力による金属板の曲がり角, γ ; 衝突角, D ; 火薬の爆速, v_f ; 金属板の飛翔速度, v_c ; 金属板の衝突点移動速度, v_d ; 衝突点への流入速度

6 mm の間隙で平行設定した試料は $\alpha=0^\circ$ である。異種金属の両面圧接は両方の金属板の曲がり角が等しくないため、衝突点は両金属のなす角の2等分線上を移動せず、したがって(1)~(3)式は使用できない。この場合は Fig. 4 のように考えて計算を行なった。金属板①, ②を角 α' で設定し、①, ②の外側に火薬をとりつける。O点で起爆し、AおよびBまで爆発が進み、それらの点で金属板が角 β_1, β_2 で曲がり、C点で衝突する。このC点の移動速度の x, y 成分 v_{cx}, v_{cy} は Fig. 4 から次式のように求められる。

Fig. 4 The geometrical relation of dissimilar metal bonding.

$$v_{cx} = D \frac{\cos \alpha' \tan(\alpha' + \beta_1) - \sin \alpha' + \tan \beta_2}{\tan(\alpha' + \beta_1) + \tan \beta_2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$v_{cy} = D \frac{\sin \alpha' \tan \beta_2 - \cos \alpha' \tan(\alpha' + \beta_1) + \beta_1 \tan \beta_2 + \tan(\alpha' + \beta_1) \tan \beta_2}{\tan(\alpha' + \beta_1) + \tan \beta_2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

衝突点Cの移動方向OCと x 軸のなす角を δ とすると、 δ は(4), (5)式から次式のようにして計算できる。また衝突点移動速度 v_c も計算できる。

$$\tan \delta = \frac{v_{cy}}{v_{cx}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$v_c = \sqrt{v_{cx}^2 + v_{cy}^2} \quad \dots\dots\dots (7)$$

3. 2 曲がり角 β の測定および板の形状との関係
火薬の爆速 D と設定角 α あるいは α' のほかに、曲り角 β あるいは衝突角 γ が求められれば、(1)~(7)式からは

かの因子はすべて計算できる。曲り角 β は Photo. 1 に示したような瞬間 X 線写真から測定を行なった。また瞬間 X 線写真と別に半円柱金属に金属板を衝突させ、その衝突した点から曲がり角 β を測定した。Fig. 5 のように半円柱金属の上方に、ある間隔をなして金属板を設定する。この金属板上に火薬をのせて一端から起爆させると、ある角度で金属板は曲がり半円柱金属に衝突し接合する。その接合界面には、ある衝突角度の範囲に波状模様が見られる。Fig. 5 からわかるように衝突点 C の両側、対称な位置の衝突角度は等しいため、波状模様も対称な位置に生ずる。顕微鏡観察により波の発生点を求め、その角度を測定し、その平均値をとれば、衝突点 C と半円柱の頂点からの角度が求められる。この角度は Fig. 5 により板の曲り角 β に等しい。

Fig. 5 Process of collision in semicylinder method.

この2方法により曲がり角 β をいくつかの金属について求めた。火薬の量が一定であれば、爆発による衝撃力は一定と考えられるから、曲がり角 β の大きさはそれぞれの金属板の形状と物性に依存しているといえる。Carpenter らは経験的に、 L を火薬の単位面積当りの質量とすると金属板の物性値および曲がり角 β は次の関係があることをみいだした。 $L \propto \sigma \rho h \beta^2 / d^5$ また Kowalick らは次元解析により $L \propto \sigma \rho h^2 \beta^2 / E d$ と求めている⁶⁾。ここで σ ; 降伏応力, E ; ヤング率, d ; 間隙, ρ ; 金属の密度, h ; 金属板の厚さを示す。 L を一定とすれば β^2 は $\sigma \rho h / d$ か $\sigma \rho h^2 / E d$ に反比例することになるが、筆者らはデータ量が少ないため、これらの関係を十分に確かめることはできない。しかし σ, E, d を無視して β と ρh および ρh^2 との関係を求めてみた。その結果 β と ρh のグラフの各点はなめらかな曲線上にのらないが、 β と ρh^2 のグラフは各点が比較的なめらかな曲線上に乗った。Fig. 6 に β^2 と $1/\rho h^2$ の関係を示す。各点に金属名と () で厚さ (mm) を示した。

これによるとグラフは Cu(4) から Sn(2) までわずかわん曲しているが、ほぼ直線とみなせ、Kowalick らの結果に合っているといえる。しかし Ti(2), Mo(0.5) になるとグラフの直線性は失われてくる。なお Mo(0.5)

Fig. 6 The relation between β^2 and $(\rho h^2)^{-1}$

は Fig. 6 に示していないが、この点は $1/\rho h^2$ が 40, β^2 が 169 にくる。 β の測定を行っていない金属については Fig. 6 の関係が成り立つとして $1/\rho h^2$ を計算してグラフ上から β の値を求めた。このような近似を行っても大きな違いはないと思われる。

Photo. 4 は半径 35 mm の軟鋼半円柱に 5 mm 厚のアルミニウム板 (飛翔速度 550 m/sec) が衝突している瞬間 X 線写真である。アルミニウム板の半円柱に衝突した部分は円弧状に曲げられているが、衝突していない部分は飛翔の状態を保っている。4 mm 厚の銅板についても行なったが、同じ状態を示した。

Photo. 4 The flash X-ray photograph that aluminum metal plate collides against semicylindrical metal of mild steel.

3. 3 金属ジェット現象

3. 3. 1 同種金属両面圧接のジェット形状および速度

アルミニウムを暗い室で両面圧接すると試料前方に非常に強い光が発生する。この状態をシャッターを開放して写した写真を Photo. 5 に示す。写真中に示したのが初めの試料のあった位置で長さ 200 mm である。この光は火薬の発する光よりもはるかに強く、明らかに衝突点から前方に噴き出すアルミニウムのジェットが空気と衝突することによって発する光である。このアルミニウ

Photo. 5 The luminous metal jet.

ムのジェットが衝突点の前方に噴流している様子を流しカメラによって撮影した。これを Photo. 6 に示す。この試料は Fig. 7 に示す形状で流しカメラのスリットを XX' の位置に合わせた。したがって Photo. 6 に示した像は、Fig. 7 の XX' で示した線状の位置の時間変化を示していることになる。写真の右側上下2点で光っているのは、両金属板の外側の火薬の爆発による光で、その点から $6\mu\text{sec}$ おくれて中心線上に先端が空気との衝突によって輝いているジェットの先端が現われる (Photo. 6 に矢印で示した)。このジェットをカラーフィルムで撮影すると先端部は青白い輝きを示している。

Photo. 6 The streak camera photograph of metal jet form of Al-Al symmetric collision (slit position $X-X'$)

Fig. 7 Slit direction of streak camera photograph.

流しカメラのスリットを Fig. 7 の YY' の位置に合わせると、衝突点から噴流するジェットのみの形状が撮影できる。これを Photo. 7 に示す。横方向は時間を表わしているが、これに速度を乗ずるとその距離が求められる。このようにして求めた距離を Photo. 7 に図示し

Photo. 7 The streak camera photograph of metal jet form of Al-Al symmetric collision (slit position $Y-Y'$)

た。白く輝くジェットの中に点々と黒い斑点が存在している。この部分はジェットの輝いていないところと考えるよりも、何かによって輝いた部分がかくされていると考える方が妥当と思われる。これらの斑点の形状はジェットの飛翔方向数 mm、それと直角方向 $2\sim 3\text{mm}$ のやや細長い形である。明らかに液滴状であると考えられる。この点からジェットは輝いた気体状の部分のほかに液滴状をなしたもののから成り立っているといえる。

同種金属の両面圧接はすべてのジェットが両金属板のなす角の2等分線方向に正確に現われている。また鉄や銅のジェットはアルミニウムのジェットに比較し、その輝きはかなり淡く、これがあとで述べる衝撃波によると思われる輝きとの区別を難しくしている。

Fig. 7 の ZZ' 方向に流しカメラのスリットをおけば、その中心線状を噴流するジェットの速度が測定できる。スリット方向にジェットがある速度で進んでいくとジェット先端の強い輝きが、その像が掃引されるフィルム上に、傾斜した輝線として撮影される。Al-Al (5mm 厚) で間隙 6mm の平行設定のもの ($\alpha=0^\circ$) と設定角 $\alpha=5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ の有角設定の試料について撮影した写真を Photo. 8 に示す。この写真にはジェットの先端の強い輝きが傾斜した直線として写っている。この写真を説明した図を Fig. 8 に示した。ジェットの進む方向に一定間隔で光をささぎった部分があるのは、試料の外側に一定間隔で黒いテープをはりつけて、ジェットの進む距離の基準とし、また試料の内側で輝いているのを確かめるためのものである。そのためジェットによってテープが吹き飛ばされるとその部分は消失する。これは Photo 8 でみられる。

ジェットの速度はスリット方向を x だけ進むに要した

Fig. 8 The sketch of Photo. 8.

Photo. 8 The streak camera photograph of jet velocity measurement of Al-Al symmetric collision.

時間 t から次式で求められる。

$$v_j = \frac{x}{t} \quad \dots\dots\dots (8)$$

またジェットの速度は Photo. 6 から求められる。火薬の光った時刻とジェットの先端がスリットに現われる時刻との時間差 Δt を求め、試料の端からスリットに合せた位置までの距離を x とすれば次式で求められる。

$$\left| \frac{x \cos \alpha}{D} - \frac{x}{v_j} \right| = \Delta t \quad \dots\dots\dots (9)$$

(8), (9) 式から同種金属の両面圧接のジェット速度を求め、設定角 α との関係を図. 9 に示した。 $\alpha = 0^\circ$ は間隙 6 mm の平行設定の場合である。点線で示したのは(1)式から求めた衝突点移動速度である。この図からジェットの速度が設定角 α の増加と共に減少していることがわかる。圧接過程が完全流体の流れで、空気抵抗などが作用しなければ、衝突点から噴き出すジェットの相対速度は流入速度に等しい¹⁾³⁾。したがって α が小さい場合は(3)式から $v_d \approx v_c$ であるから $v_j \approx 2v_c$ になる。本実験による測定では $\alpha = 0^\circ$ の場合すなわち平行設定の場合 Cu 4 mm 厚で $v_j \approx 1.06v_c$ 、Ti 2 mm 厚で $v_j \approx 1.32v_c$ になり、ジェットの速度は理想状態に比較しかなり遅い。しかし α が 5° になると $v_j \approx 1.8v_c$ 位になり、 v_j が $2v_c$ に近づく。この α が小さいとき v_j が $2v_c$ よりかな

Fig. 9 The relation between jet velocity v_j and set angle α .

り小さくなる事実は、 α が 0° のときは狭い間隙をジェットが高速で飛翔するため空気の抵抗が特に大きくなるためと考えられる。

Al 5 mm 厚で $\alpha = 10^\circ$ のとき $v_j = 2.0v_c$ であり、Photo. 8 に、明らかにジェットの先端の強い光の部分が写っている。しかし $\alpha = 15^\circ$ になると v_j は $2.3v_c$ ほどになり、Photo. 8 でも $\alpha = 10^\circ$ のときと異なり、ジェット先端の強い光が写っていない。Cu 4 mm 厚、F 4 mm 厚で、 $\alpha = 10^\circ, 15^\circ$ ではフィルム上のジェットの輝きが弱くなり、解析が困難になる。この像がジェットによる輝きでなく、火薬の爆発によって生じた衝撃波の波面の輝きではないかということが考えられる。衝撃波がアルゴン中を通過するとその波面は強く輝く、(この現象をアルゴンフラッシュでは使用している)したがって空气中にわずかに存在しているアルゴンによって衝撃波面が淡い光をはなつことはじゅうぶん考えられる。もし衝撃波による光を撮影していたら、衝撃波がスリットを横切る点の移動速度(両金属板の2等分線に沿った方向の速度)が Fig. 9 に示したジェットの速度にほぼ等しくなるはずである。この速度を計算するため、衝撃波の速度を測定した。Fig. 10 のように火薬と金属板を設定し、流しカメラのスリットの位置を XX' に合わせて撮影を行なった。衝撃波を影絵写真として撮影するためアルゴンフラッシュを使用した。このようにして撮影した写真を Photo. 9 に示す。C 点で金属板の表面から出た衝撃波は表面からはなれるにしたがって速度が減

Fig. 10 The measurement of shock wave.

Photo. 9 The streak camera photograph of shock wave propagated copper plate.

少している。これにより板の飛翔の形、衝撃波の状態を図示すると Fig. 10 に示したようになる。この衝撃波の平均速度は Al 5 mm 厚で 1750 m/sec, Fe 4 mm 厚で 1600 m/sec, Cu 4 mm 厚で 1500 m/sec となる。これらの速度は各金属板の飛翔速度の約 3 倍である。この値により衝撃波が両金属板の 2 等分線上を移動する速度は, Cu, Fe で $\alpha=10^\circ$ のとき約 3200 m/sec, $\alpha=15^\circ$ のとき約 2700 m/sec となる。この値は Cu, Fe のジェット速度として測定した Fig. 9 の値にほぼ一致する。この事実はジェット速度とみなした Fig. 9 の Al 5 mm 厚の $\alpha=15^\circ$ の値および Fe, Cu 4 mm 厚の $\alpha=10^\circ$, 15° の値が, 実際は衝撃波がスリット上を移動した速度であるかもしれない, ということがじゅうぶんに考えられることになる。しかしフィルムに写った光がジェットの発する光であるとしても, 衝撃波の衝突による光としても, それを区別することは事実上不可能である。

Fig. 11 にそれぞれの設定角のときの v_j と板厚 h , 密度 ρ との関係を示す。 h および ρ が大きくなるにしたがい v_j は減少している。 Fig. 9 では設定角 α とジェット速度 v_j の関係を示したが, Fig. 12 に衝突角 $\gamma (= \alpha + \beta)$ と v_j の関係を求めた。 Fig. 12 によると同種金属でも, 衝突角 γ が等しいとき, 板厚が異なれば, v_j にかなり開きが生じ, Fig. 9 の設定角が等しいときに生ずる差よりも大きい。しかしこれは板厚が変わると γ が等しくても曲がり角が異なるため (1) 式からわかるとおり, 衝突点移動速度 v_c がそれぞれ異なってくるためである。したがって衝突角 γ のみで v_j の大きさの比較は

Fig. 11 The relation between jet velocity v_j and plate thickness h and density ρ . Fig. 12 The relation between jet velocity v_j and collision angle γ .

できない。

3. 3. 2 異種金属両面圧接のジェット形状と速度

Photo. 10 に Al-Zr, Cu-Fe, Fe-Mo, Fe-Ti, Mo-Ni の両面圧接によるジェット形状を示す。(設定角 $\alpha=10^\circ$) 撮影方法は Photo 6 の方法と同じである。ここでジェットはアルゴンフラッシュの影絵となって写っている。Al-Zr, Fe-Mo のジェットの先端は Photo. 10 の写真の上では, ほぼ両金属の中央部にみられるが, ほかの組合せでは, どちらかの金属の方へ傾いている。この写真上のジェット先端の位置と (4)~(7) 式から計算した衝突点の移動方向, および Fig. 6 に示した金属板の曲がり角などから, 火薬の爆発がある位置まで進んだときの金属板の形状, ジェットの噴流方向を求めた。 Fig. 13 にこれを示す。この図の中で接合した部分の金属が設定位置からずれているが, これは両金属が衝突後, 運動量保存則にしたがって動くと考えて計算から求めた。(付録参照) Photo. 10 では両金属の中央部にみられる Al-Zr,

Photo. 10 The streak camera photograph of explosive bonding of dissimilar metal.

Fe-Mo のジェットも Fig. 13 では Zr, Mo 側に傾いている。ここであげた金属組合せ以外に Ti-Ni などの組合せでは、ジェットの片寄りが大きく、金属板に沿ってジェットが噴流する場合もある。Ti-Ni の例を Photo 11 に示す。ジェットが Ni 母材に沿って噴流している。このようなジェットはあとで述べる片面圧接でもみられる。また間隙いっぱいにはジェットの広がりを示す場合もある。Photo. 12 に Al-Ni の例を示す。Photo. 12 の原板はカラーフィルムであるが、ジェットの色はいくらか緑色がかった白色をしている。

Photo. 12 のようにジェットの噴流方向がはっきりしないものもあるが、大部分の組合せでは、ジェットの噴流方向は一定の指向性を示している。このジェットの片寄りの程度を Table 1 にジェットの偏向指数として示

Fig. 13 Schematic bonding pattern in Photo. 10.

Photo. 11 The streak camera photograph of explosive bonding of Ti-Ni.

Photo. 12 The streak camera photograph of explosive bonding of Al-Ni.

した。これは Fig. 13 の Zr-Al のところに示したように両金属の衝突角 $\gamma' (= \alpha' + \beta_1 + \beta_2)$ と、ジェットと密度の大きい方の金属板のなす角 η を測定して、その比 η/γ' をジェットの偏向指数とした。この値が 0.5 のとき両金属のなす角の 2 等分線方向にジェットは飛翔し、0 あるいは 1 に近いほどジェットは片寄って飛翔しているといえる。Table 1 から Ni-Cu を除いて、大部分のジェットの偏向指数は 0.5 より小さい、すなわちジェットは密度の大きい金属の方に傾いていることが明らかであ

Table 1 Metal jet velocity and jet declining index of dissimilar metal combination.

Metal combinations	Velocity of collision point v_c m/sec	Direction of collision point δ degree	Jet Velocity v_j m/sec	$\frac{v_j}{v_c}$	Inclination ratio of jet flow
Al-Cu	2300	3 5° (Cu)	3630	1 58	0 17 (Cu)
Al-Fe	2500	4 0 (Fe)	3600	1 44	0 31 (Fe)
Al-Ni	2790	4 2 (Al)	3800	1 36	0 45 (Ni)
Al-Ti	2920	4 0 (Al)	3660	1 24	0 42 (Ti)
Al-Zr	2870	4 1 (Al)	3760	1 31	0 30 (Zr)
Cu-Fe	2120	4 5 (Cu)	4530	2 14	0 18 (Cu)
Cu-Mo	2960	2 1 (Cu)	5220	1 77	0 30 (Mo)
Cu-Ni	2590	3 0 (Cu)	~4500	~1 73	0 95 (Ni)
Cu-Sn	2630	3 0 (Cu)	~3550	~1 35	0 37 (Cu)
Cu-Ta	2870	2 2 (Cu)	5800	2 02	0 31 (Ta)
Cu-Ti	2630	2 7 (Cu)	3300	1 25	0 30 (Cu)
Fe-Mo	2960	2 3 (Fe)	~3500	~1 19	0 19 (Mo)
Fe-Ni	2590	3 2 (Fe)	~3700	~1 45	0 11 (Ni)
Fe-Pb	2500	3 4 (Fe)	3700	1 48	0 18 (Pb)
Fe-Ta	2920	2 5 (Fe)	5370	1 84	0 26 (Ta)
Fe-Ti	2730	3 0 (Fe)	3800	1 39	0 21 (Fe)
Mo-Ni	3150	3 7 (Ni)	4700	1 49	0 28 (Mo)
Ni-Ti	3060	4 5 (Ti)	4400	1 44	0 07 (Ni)
Ni-Zr	3010	4 7 (Zr)	5350	1 78	0 26 (Ni)
Pb-Sn	3010	4 5 (Sn)	~3700	1 23	0 33 (Pb)
Ti-Zr	3150	4 7 (Ti)	~4300	1 35	0 11 (Zr)

る。例外となった Ni-Cu はその密度差が非常に小さい。このノェットの偏向指数を両金属の密度比および融点比などと比較をした Fig. 14 に偏向指数と密度比 ρ_1/ρ_2 ($\rho_2 > \rho_1$) の関係を示した。Ni-Cu 以外、偏向指数は 0.5 より小さいか、そのほかには密度比との間には規則的な関係はみいだせない。また融点比との比較を行なったが規則的な関係はみいだせなかった。しかし組合せてある金属のどちらか一方に、たとえば Al-Cu の組合せのときは密度の小さい方の Al か、あるいは密度の大きい方の Cu に、着目して偏向指数との関係を求めるといくらか規則的な関係がみいだされる。密度の小さい方の金属、たとえば Al-Cu では Al によって偏向指数を分類すると Al, Cu, Sn は偏向指数の平均が 0.30~0.35 になり、Fe, Ti は 0.17 位になる。ところか密度の大きい方の金属で分類すると、それぞれの金属の平均の

偏向指数はすべて 0.20~0.28 にはいる。これらのことからノェットの片寄りの程度は組合せてある 2 つの金属の密度の小さい方の金属の方に大きい方の金属よりもいくらか影響されているのでないかといえる。

Table 1 には (6) 式で計算した衝突点の傾き δ を、(7) 式で計算した衝突点移動速度 v_c を示した。また (9) 式で計算したノェット速度 v_j と v_j/v_c も示した。ノェット速度は大部分 3600~4500 m/sec で v_j/v_c もほぼ 1.3~1.6 になる。この値は Fig. 9 に示した設定角 α が 5° ($2\alpha=10^\circ$) の同種金属組合せで v_j/v_c が 1.4~1.8 であったのに比較していくらか小さい。この比 v_j/v_c と両金属の密度比とはあまり関係しないようであるか、ノェットの偏向指数と同じように、密度の小さい方の金属に着目して考えると、Fe, Cu の v_j/v_c の値が Al, Ti, Sn に比較していくらか大きいといえる。

3.3.3 両面圧接のジェット偏向に対する考察

爆発圧接において、金属が衝突し接合する状態を、Cowan らは完全流体の衝突とみなして解析を行ない、同種金属の対称衝突の流れの状態を Fig. 15 (a) のように示している。³⁾ ノェットは衝突点のまっすぐ前方に、両方の流れから噴き出している。これは Al-Al の対称衝突のノェット形状を撮影した Photo 6 でも明らかである。また板厚、密度の異なった場合の流れの状態についても Cowan らはジェットが傾いて発生するであろうことを指適している³⁾。筆者らは Cowan らの考えに基づき爆発圧接過程を非粘性、非圧縮性流体の衝突と考え、密度の異なった流体の衝突過程についての考察を行なっ

Fig. 14 The relation between density ratio ρ_1/ρ_2 and inclination ratio of jet flow.

Fig. 15 Flow pattern for jetting collision of (a) similar metal combination and (b) dissimilar metal.

た。

Fig. 15 (b) のように ρ_1, ρ_2 の密度 ($\rho_2 > \rho_1$) を持つ流体が流入速度 v_0 で流れ込み衝突して、ジェット流と本流とに分かれる。各流線についてはベルヌーイの式が成り立つから、 ρ_1, ρ_2 の流れについて、それぞれ次式のようになる。

$$\frac{1}{2} \rho_1 v_1^2 + P_1 = \frac{1}{2} \rho_1 v_0^2 = \text{const.} \quad (10)$$

$$\frac{1}{2} \rho_2 v_2^2 + P_2 = \frac{1}{2} \rho_2 v_0^2 = \text{const.} \quad (11)$$

P_1, P_2 : 圧力

停留点 (S) 付近の両方の流体の流れについては、境界条件として、 $P_1 = P_2$ が存在する。この境界条件を (10), (11) 式に代入すると、界面の最も高い圧力は $\rho_2 > \rho_1$ から $P_1 = P_2 = \frac{1}{2} \rho_1 v_0^2$ になる。この圧力が停留点 (S) の圧力である。したがって停留点では ρ_1 の流れは $v_1 = 0$ になるが、 ρ_2 の流れは $v_2 = v_0 \sqrt{1 - \rho_1 / \rho_2}$ になり、 $\rho_2 > \rho_1$ から $v_2 > 0$ である。Cowan らは ρ_2 の流れが停留点で 0 にならなくても、ジェット流に分かれる場合があることを示しているが³⁾、筆者らはジェットの大部分は ρ_1 の流れから出て、 ρ_2 の流れはほとんどジェット流に分れないとして、衝突点付近の流れの状態を考えた。これを Fig. 15 (b) に示す。このときジェットの方向は ρ_2 の流れに沿うか、それに近い位置になると考えられる。このように考えるとジェットは密度の大きい方の金属に偏向している Table 1 の実験事実と一致する。またジェットを形成している金属は密度の小さい方の金属よりなるといえる。

次にこのようなジェット方向を示す場合の停留点付近

の等圧力面分布 (この圧力分布を圧力ポテンシャルと定義する) を考えてみる。同種金属の対称衝突の場合、Fig. 15 (a) に示した圧力ポテンシャルとなる。この圧力によってジェットが噴き出していると考えれば、その方向は Fig. 15 (a) に示したような流入角の 2 等分線方向となる。Fig. 15 (b) のような密度の異なる流体の衝突では当然圧力ポテンシャルは異なってくる。その形は Fig. 15 (b) に描いたように密度の小さい流体の方の圧力ポテンシャルがより広い範囲に及び、その圧力によってジェットが発生すると仮定すれば、ジェットは密度の大きい流体の方に傾くといえる。

以上衝突の過程を完全流体の様な流れとして考えたが、Photo. 7 の Al-Al のジェットから明らかのようにジェットは一樣でなく断続的な液滴を含む不均一性を示し、また接合した試料の界面には波形がみられるなど、ジェットの発生する界面はかなり動的な状態になっていると思われる。したがって圧力ポテンシャルはたえず変動していると思われ、それが接合界面の波形成になんらかの関連があるのであろう。

3. 3. 4 片面圧接のジェット形状

同種、異種金属組合せの片面圧接を行ない、流しカメラによってジェット形状を撮影した。圧接するとき下板に約 10 mm 厚さの鋼板を接触させ、圧接後の試料の飛翔を防いだ。このようにして撮影した例を Photo. 13, 14 に示した。いずれもジェットは上板に沿っているのがみられる。Cu-Ni, Cu-Ti について、上板、下板を互いに逆にしてジェットを観察した結果、Cu-Ni では Cu を上板にしても (Photo. 13 に示した)、Ni を上板にしてもジェットは上板に沿った方向に噴流している。Cu-Ti では Cu を上板にしたときはジェットが上板に沿って出ているのが明りように認められるが、Ti を上板にすると下板の Cu に沿ってジェットが噴流しているの

Photo. 13 The streak camera photograph of asymmetric collision of dissimilar metal combination.

Photo. 14 The streak camera photograph of asymmetric collision of Cu-Cu.

が、不鮮明であるが認められた。ジェットは噴流方向は Cu-Ti の場合、Cu の方向に出る両面圧接と同じとみられるが、密度のほとんど同じ Cu-Ni では明らかに上板に沿って出やすいことを示している。これは Photo. 13 に示した Fe-Cu でも明らかになっている。Photo. 10 の両面圧接ではジェットは Cu の方向に沿って現われているが、この Photo. 13 では上板の Fe に沿っている。Photo. 14 に示した同種金属の Cu-Cu でもこの傾向はみられる。実験数が少ないのではっきりした結論は出せないが、片面圧接のジェットは同種金属あるいは密度差の小さい異種金属組合せの場合、上板すなわち火薬のつけた方の板に沿って出やすく、Cu-Ti のように密度差の大きい組合せでは、密度の小さい Ti を上板にしたときにジェットは下板に沿って噴流するといえる。

Photo. 15 は Mo-Fe の Mo を上板にしたときの圧接途中の瞬間 X 線写真である。衝突点前方にジェットが噴流しているのがみられる。流しカメラで撮影した Photo. 10 の Mo-Fe のジェットのように先端ははっきり写っていない。

Photo. 15 The flash X-ray photograph of metal jet of Mo-Fe.

以上片面圧接におけるジェットの挙動について述べたが、このジェット現象を両面圧接の場合のように理論的に説明できない。今後の検討が必要である。

ここでジェットの噴流方向について整理すると、

両面圧接；同種金属組合せではジェットは両金属板のなす角の2等分線方向、異種金属組合せではジェットは密度の大きい金属側に傾く。

片面圧接；同種金属組合せおよび密度差の小さい異種金属組合せでは、ジェットは火薬をつけた金属（上板）に沿って出やすい。しかし密度差が大きく、上板の金属の密度が小さいときは密度の大きい金属（下板）側に出る傾向がみられる。

4. 結 論

爆発圧接の基本的な現象である爆発力による金属板の挙動と、金属ジェットの現象を瞬間 X 線装置、超高速流しカメラによって直接撮影を行ない、その観察から次の点が明らかになった。

1. 爆発力による金属板の曲がり角 β は、 ρh より ρh^2 と比較的よい関係を示すようである。

2. 同種金属両面圧接において、ジェットはかなりの広がりを出す、比較的直線的に進み、先端が強く発光している。そのジェット中には霧状の発光している部分のほかに発光しない液滴状の部分が混じって飛翔している。

3. ジェット速度 v_j は設定角 α と共に減少するが、衝突点移動速度 v_c はそれ以上に減少するために、 v_j/v_c は逆に α と共に大きくなる。また α が一定の場合、板厚が厚くなるにしたがい、また密度が大きくなるにしたがい v_j は減少する。

4. 異種金属両面圧接ではジェットは間隙いっぱい飛翔するものもあるが、大部分の場合は先端が存在し、それは密度の大きい金属側に片寄り示している。このジェットの片寄りの大きさや速度は、密度の小さい方の金属によって影響されているようである。このジェットの噴流方向は、密度の異なる完全流体の衝突と考えることによって理論的に説明される。

5. 片面圧接において、上板と下板の密度差が小さい場合や、上板の密度が下板にくらべ大であると、ジェットは上板に沿って噴流しやすい。しかし上板の密度が下板に比較し、かなり小さいと下板に沿って出る。

5. 謝 辞

この実験を行なうにあたり協力いただきました通産省資源技術試験所吉田正氏、旭化成工業株式会社福山郁生氏、庭月野亭氏に心から感謝の意を表したいと思います。

文 献

- 1) G. Birkhoff et al; J. Appl. Phys. 19 (1948) 563
- 2) J.M. Walsh et al; J. Appl. Phys. 24 (1953) 349
- 3) G.R. Cowan et al; J. Appl. Phys. 34 (1963) 928
- 4) O.R. Bergmann et al; Trans. Met. Soc. of AIME 236 (1966) 646
- 5) S. Carpenter et al; Proc. First International Conf. of

Center for High Energy Forming, Denver Research Institute, June 19-23, 1967

- 6) J.F. Kowalick and D.R. Hay; Proc. Second International Conf. of Center for High Energy Forming, Estes Park, June 23-27, 1969

付 録

衝突後の両板の挙動

板が衝突し接合したあとは特に外力が働かないので, 運動量保存則が成り立つと考えると, Fig. 4 の y 方向における板の運動は次式で与えられる.

$$v_j = \frac{1}{m_1 + m_2} [m_1 \{\sin \alpha' - \sin(\alpha' + \beta_1)\} + m_2 \sin \beta_2]$$

ここで m_1, m_2 は板①②の単位面積当りの質量. Fig. 13の衝突後の板の動きはこれによって計算した.

次 号 予 告

資 料

デルファイ法による溶接法の未来予測.....溶接学会編集委員会 (執筆者・寺井 清)

論文および報告

・水中におけるプラズマ溶接.....	{蓮井初淳	猪又初淳
・調質高張力鋼潜弧溶接熱影響部の切欠靱性と溶接軟化に関する研究 (第4報)	{佐藤瑞誠	本原瑞誠
・後熱処理による固相接合過程の研究.....	{橋本達哉	大橋本達哉
・低サイクル疲れ荷重制御・ひずみ制御に関する研究 (第1報)	{渡松正紀	吉田正紀
・鋼材の破壊応力と限界 COD におよぼす切欠形状と板厚の効果.....	{三宮波健	佐藤波健
・アルミニウム合金の溶接法に関する二, 三の検討.....	{益本功	篠田本功
・ルート割れ発生機構に関する一実験.....	{内木虎蔵	岡本木虎蔵
・水中溶接に関する研究 (第1報)	{益本功	近藤本功
	{中松義一	松島中義一

Transactions of the JWS 概要

文 献 紹 介