水中細線爆発によるアルミニウム板の変形

元 木 幹 雄^{*} 行 村 建^{*}

Electrical Discharge Forming of Al plate by Underwater exploding wires

by Mikio MOTOKI and Ken YUKIMURA

The plastic deformation of an Al plate (0.05 to 1.0 mm-thickness) by an underwater exploding wire was observed by an image converter camera. The initial capacitor energy exploded copper wire (0.08 mm-diam. and 8 mm-long) was 40 J (80 μ F charged 1.0 kV). At the deformation, the plate was placed on the water surface (Method A), between the water surface and electrodes (Method B), between the electrodes and the bottom of the container (Method C) or perpendicularly to the water surface (Method D).

The results obtained show that

(1) deformation of metal plate was effected by the thickness of the plate and stand-off. The thinner the plate and/or the longer the stand-off, the shorter the depth of deformation. In Method B at the condition of short distance between the water surface and the plate, the characteristics on the deformation were similar to those by Method A. As this distance became longer, those characteristics changed to similar ones of Method C.

(2) the typical phenomenon in Method A was the formation of jet in a vapor bubble. The typical phenomenon in Method C was the formation

* 同志社大学工学部

of a lot of cavities on the plate. They were produced and expanded near at the maximum radius of a vapor bubble.

1. ま え が き

水中において金属細線を衝撃電流により爆発させると圧縮波や気泡が生成されるとともに、細線近傍に設けた金属板は塑性変形する。本研究の主たる目的は金属板の変形過程に対する気泡運動の影響を解明することであり、そのために金属板の厚さを薄くして気泡運動と金属板の変形挙動との相関性を求めやすくした。気泡の運動、金属板の変形挙動および気泡内に発生する噴流などの観測を行ない、金属板の厚さやスタンドオフの影響について検討した。

2. 研 究 方 法

金属板としては厚さが0.1 mm～1.0 mmの焼鈍したアルミニウム板を用い、金属板の設置位置と電極の位置の関係は図1に示す様に4種類とした。(a)は金属板を水面に設置したもの(空中向け成形)、(b)は金属板を電極と水面との中間に設置(水中上向け成形)、(c)は金属板を電極と水そう底面との中間に設置(水中下向け成形)した場合であり、(d)は金属板を水面に対し、直角に設置(横向け成形)したものである。電極は(a)～(c)では水そうの底面より約200mmの所に水面に平行に設け、(d)は水面に対し垂直に設置した。金属板は図2に示す様に直径60 mmの穴のあいたアクリル製の押え板で押え、図1の(a)と(c)では現象の観測が容易な様に押え板の中央部に幅が約20 mmの切り込み窓を設けた。細線は長さ8 mm、直径0.08 mmの銅線を用い、容量80 μ F、充電電圧1.0 kVのコンデンサのエネルギーで爆発させた。

金属板の変形や気泡の運動にかかわる写真撮影は図3に示す様にイメージコンバータカメラを用い

図1 金属板変形のための配置図

图 2 押え板

図3 イメージコンバータカメラによる観測回路

1回の放電で1枚の撮影を行なう駒撮り方法を採用した。すなわちコンデンサに蓄積したエネルギーをスイッチの始動により電極 E , E' 間に設けた細線に投入した。図中の太線は放電回路、他は測定回路であり、矢印は信号の流れを示すものである。なお図面のつごう上、金属板の設置位置は明示しなかった。スイッチの始動によりコンデンサのエネルギーを放電させ、分流器の出力によりオシロスコープの時間軸を掃引させた。放電開始後任意の時刻での観測を行なうため、遅延装置を介して半値幅が約 $3 \mu\text{s}$ の光パルスを生じせしめ背光とした。イメージコンバータカメラの動作は背光をフォトダイオードにて検知し、背光と撮影の同期をとった。

研究は各金属板設置位置でのスタンドオフや板厚の変化によるアルミニウム板の変形挙動の差異や気泡の運動との関連性、さらに水中上向け成形については水面と金属板間距離の影響などについて行なった。

3. 研究成果

3.1 空中向け成形と水中上向け成形^{1)~3)}

図4は厚さが0.1 mmのアルミニウム板をスタンドオフが20 mm、押え板の厚さ20 mmとして空気中に向けて塑性変形させた場合の変形過程を写真撮影した一例である。図中 E 、 E' は電極、丸く写っているのが気ほうであって、その上部は押え板およびアルミニウム板である。写真より金属板は気ほうの膨張とともに空気中に向けて変形し、気ほうの収縮につれて、電極方向に逆変形するのがわかる。

図4 空中向け成形の観測例

一方、気ほうは膨張過程でアルミニウム板の影響を受けて上半球にゆがみを生じ、約 1.5 ms より気ほうの上部が陥没して先端の鋭い噴流となって気ほうの内部を進展して行く。約 3.0 ms で噴流は気ほうの下部を突き抜け、水中に出ると水の抵抗のためにその先端は丸くなる。気ほうの収縮期において、気ほうは電極の影響を受けながら再膨張をして霧状となって崩壊する。

図 5 は空中向け成形の時のスタンドオフの影響について図 4 の写真観測より求めた結果である。図中破線はスタンドオフが 20 mm の場合の気ほうの径の相対的な時間変化である。気ほうの径は気ほうのゆがみのため直接的な測定が困難であるので、図 4 より気ほうの面積を測定し、その平方根より求めたものである。他のスタンドオフの場合も気ほうの径の時間的な変化は 20 mm の場合とほぼ同じであり、気ほうの運動はスタンドオフの影響を余り受けない。図よりアルミニウム板の変形過程は気ほうの運動と異なり、スタンドオフが小さい程アルミニウム板の変形深さが最大になる時刻が早く、アルミニウム板の最大変形深さが大きくなることがわかる。従って板の変形速度はスタンドオフが小さい程速くなる。またスタンドオフが大きい程、気ほうの運動と金属板の挙動とはほぼ一致する。図中スタンドオフが 10 mm の場合、金属板が最大変形に達する以前に電極方向に吸い込まれる現象が発生し、約 0.5 ms 以降の測定が困難であった。

図 6 はスタンドオフを 20 mm 一定として、アルミニウム板の厚さを変化せしめた場合の結果である。図よりアルミニウム板の変形過程は図 5 の場合と同様に気ほうの運動と異なり、アルミニウム板が厚い程変形が最大に達する時刻は早く、最大変形深さが小さくなることがわかる。厚さが 0.2 mm と 0.5 mm の場合には最大変形に達した後吸い込まれる現象は見られず、最大変形時の変形深さを保っている。板の変形速度は 0.3 ms と 0.8 ms の間では板の厚さに関係なく約 18 m/s である。また気ほうの崩壊などにもとづく第 2 期変形は観測されなかった。

前述の噴流についてスタンドオフおよびアルミニウム板の厚さによる影響について検討した。図 7 は

図 5 変形のスタンドオフによる影響
(空中向け成形)

図 6 変形の板厚による影響
(空中向け成形)

図7 噴流の進展距離のスタンドオフによる影響（空中向け成形）

図8 噴流の進展距離の板厚による影響（空中向け成形）

アルミニウム板の厚さを 0.1 mm 一定としてスタンドオフが噴流に与える影響を示したもので、図中の縦軸の“0”は電極の位置であり、“-”は電極より上方、“+”は電極より下方に噴流の先端があることを示している。図より噴流の発生時刻はスタンドオフの影響を受けるが、進展速度は余り影響を受けないことがわかる。すなわち、噴流の発生時刻はスタンドオフが 20 mm の場合が速く約 1.5 ms であり、30 mm の場合は約 2.8 ms である。進展速度は 2 ms と 3 ms の間で約 24 m/s である。なお、噴流の発生はスタンドオフが 40 mm 以上では認められなかった。この結果、噴流は金属板の作用を強く受ける範囲においてのみ発生する様である。

同様に図8はアルミニウム板の厚さによる影響でスタンドオフは 20 mm とした。噴流の発生時刻は板厚に余り関係なく、気泡の最大膨張時付近であり、進展速度はアルミニウム板が厚くなる程遅くなる。なお被成形体として塑性変形が起らない程度の厚い板を設置した場合、噴流の発生は見られず、気泡は再膨張の過程において金属板の方向に進展して行き、板上で崩壊する現象が観測された。

水中上向け成形の場合の写真撮影の一例を図9に示す。金属板の変形過程に対するスタンドオフおよび板厚による影響は水面と金属板間距離が 15 mm 程度までは空中向けの場合とほぼ同じであり、噴流の発生も若干見られた。し

図9 水中上向け成形の観測例

かし、厚さが0.05 mm の場合、空中向け成形では急激な逆くぼみ現象が認められたが水中上向け成形では連続的な変形過程を示した。図10は水面と金属板間の距離の影響であって、スタンドオフは20 mm, アルミニウム板は厚さを0.1 mm 一定とし、水面と金属板間の距離を15~50に変化させた場合の変形深さの時間変化であり、この距離が15 mmの時では30~50 mmの場合に比べてアルミニウム板の変形深さが最大に達する時刻が早く、最大変形深さは大きい。また30~50 mm では水面と金属板間の距離に余り関係なく、変形過程はほとんど同じである。

図10 変形の水面と金属板間の距離の影響(水中上向け成形)

以上要するに、空中向け成形の場合、気ほうの運動とアルミニウム板の変形過程は余り一致しない。水面と金属板間の距離が15 mm 程度までの水中上向け成形は空中向け成形とほぼ同じ特性を有するが、これ以上の距離ではほぼ気ほうの運動に追随することがわかった。また空中向け成形の時気ほう内に発生する噴流はスタンドオフを変化させた場合進展速度は余り変わらないが、発生時刻が変化する。一方、板厚を変えた時は逆に進展速度に影響を受け、発生時刻は余り変わらなかった。

3.2 水中下向け成形と水中横向け成形^{4)~6)}

図11は水中下向け成形の写真撮影した一例である。スタンドオフは20 mm, アルミニウム板の厚さは1.0 mm で写真の中央部に丸く写っているのが気ほうであり、その下にあるのが押え板で厚さは10 mm である。気ほうはアルミニウム板に近接する所にゆがみを生ずる。図中(a)の気ほうは最大膨張時付近であって、この時刻以降、電極側の金属板上にキャビティが生成され、次第に膨張して行き、(d)に示す様に収縮期の気ほう内に入り込む過程を経る。これは水中下向け成形に特有の現象である。

図12はスタンドオフに対する影響であって、板の変形と気ほうの運動はほとんど追随している。最大変形量はスタンドオフが大きい程小さくなる。こ

図11 水中下向け成形の観測例

の効果は電極の位置が水そう底面より約 200 mm と一定のため、水中上向け成形の水面と金属板間の距離を変化させた場合と同じものと推測される。すなわち、スタンドオフが 20～40 mm の場合はこの距離が 150～170 mm に相当し、最大変形に達する時刻は図 10 の 30～50 mm の場合とほとんど同じであるが、明らかに変形量は小さくなる。スタンドオフが 10 mm の場合は水面と金属板間距離の効果よりも圧力源の効果が大きく作用するものと考えられ、最大変形量は図 10 の 30～50 mm の場合より大きくなる。板厚を変えた場

合の効果は空中向けなどの場合と同じく板厚が厚い程最大変形に達する時刻は早い、変形量は空中向けの場合よりも小さかった。

気ほうの浮力の影響を調べるために水中横向け成形を行なった。スタンドオフおよび板厚の影響のいずれも変形過程は水中下向けの場合と余り変わらなかった。その結果、浮力の影響は余りないものと推測される。

以上要するに、水中下向け成形と横向け成形の場合、特性の差異は余りなく、気ほうの浮力の影響は余りない様である。また水中下向け成形の場合、特性はおもに水中上向け成形の場合の水面と金属板間の距離の影響を示すものと考えられる。

4. む す び

薄いアルミニウム板を種々の位置に設置し、金属板の厚さやスタンドオフを変化せしめ、気ほうの運動と金属板の変形挙動との相関性について研究した。得られた成果は次の通りである。

(1) 金属板の変形過程の観測より、水面と金属板間の距離が比較的小さい場合の水中上向け成形は空中向け成形の場合の特性に類似しているが、この距離が大きくなると次第に水中下向け成形の特性に近くなる。すなわち、水中下向け成形は水中上向け成形の金属板の上に十分な水量がある場合と解釈される。またいずれの成形法においてもアルミニウム板は厚さが 0.1 mm より薄い場合、最大変形に達した後気ほうの影響を受けて逆くぼみ現象を呈すると共に、アルミニウム板が厚くなる程最大変形に達する時刻は早くなる。また、スタンドオフを変化させた場合、空中向け成形の 10～30 mm まではスタンドオフの影響よりも空中へ塑性変形させるための効果が顕著であり、変形過程は気ほうの運動に追随しない。

(2) 空中向け成形の場合、気ほう内に噴流の発生が見られる。また水中下向け成形の場合、金属板上

図 12 変形のスタンドオフによる影響 (水中下向け成形)

に多数のキャビティが生成され、次第に膨張して行く現象が観測された。

(1976. 8. 12受付)

文 献

- 1) 元木, 行村, 田中, 徳野: 昭和48年度精機学会秋季大会学術講演前刷, 277 (1973)
- 2) 元木, 行村, 田中, 徳野: 昭和48年度電気関係学会関西支部連合大会, G 30 (1973)
- 3) 元木, 行村, 田中, 徳野: 同上, G 31 (1973)
- 4) 元木, 行村, 久須本, 田中: 昭和48年電気学会全国大会, 201 (1973)
- 5) 元木, 行村, 田中, 徳野: 昭和49年電気学会全国大会, 131 (1974)
- 6) 元木, 行村, 田中, 徳野: 昭和49年度精機学会春季大会学術講演前刷, 109 (1974)