ドライアイス飛翔体による薄板の衝撃絞り* (第2報, ドライアイス飛翔体の剛壁衝突および薄板深絞りのシミュレーション)

田中 皓一^{*1}, 前川 慎司^{*2}, 大河内 禎一^{*1}

Shock Drawing of Thin Plates by Use of Dry-ice Projectiles (2nd Report, Impact of Dry-ice Projectiles on a Solid Target and Numerical Simulation of Shock Drawing of Thin Plates)

Koichi TANAKA, Shinji MAEKAWA and Teiichi OOKOUCHI

For shock drawing of thin plates using high-speed dry-ice projectiles, it is very important to understand the dynamical deformation process of the dry-ice projectiles and plates. In the present report, high-speed photographs are taken to visualize the direct impact sequence of circular cylindrical dry-ice projectiles on a rigid wall, and the hydrodynamical pressure generated at the impact surface is measured simultaneously. Also, the shock drawing of thin plates is simulated by means of the computer code AUTODYN-2D for the same configurations as in the experiments. In the simulations, paraffin projectiles are successfully used instead of dry-ice projectiles, although the effect of sublimation of the dry-ice on the impact phenomena cannot be taken into account.

Key Words: Impact, Dry-ice Projectiles, Shock Drawing, Plastic Deformation, High-Speed Photograph, Numerical Simulation

1. 緒 言

前報では、ノズルを有するダイにセットした円形ステンレス薄板にドライアイス飛翔体を直接に高速衝突させることによる衝撃絞りの提案とその加工特性を、主としてドライアイスの初期運動エネルギーに着目して詳細に調べた⁽¹⁾。固体のドライアイス飛翔体は試料に高速衝突した直後から容易に破砕し、変形する試料に沿って昇華を起こしながら流動してゆくとともに、昇華した炭酸ガスは急激に圧縮されて高圧化して試料を押し広げる効果を与えられと考えられるが、絞り加工の進展、絞り過程でのドライアイスの挙動、高圧ガス圧力の影響などを直接に観測することは困難である。

本報では、まず円柱状ドライアイスが剛壁に衝突する際の変形挙動を高速度カメラで観察するとともに、剛壁に明けた細い圧力孔を介した圧力センサによってガス圧力波形を測定した結果を述べる。次いで、有限差分法による衝撃解析コード AUTODYN-2D を用いて、ドライアイスが剛壁に衝突する際の変形と、前

報と同じ条件での薄板の絞りの計算機シミュレーションを行った。

2. 実験装置および実験方法

本実験で用いたガスガンは、加速管長 1800 mm, 加速管内径 75 mm, 最大加速圧力 5 MPa である。ドライアイス飛翔体の形状は、直径が 75 mm, 長さが約 80 mm の円柱形である。飛翔体速度は、前報で用いたものと同様に二つの誘導コイルを通過する時間差から求めた。

ドライアイスの衝突時における圧力波形を測定するために、図1に示すように二段の円柱形状の標的を真

図1 圧力測定用標的

* 原稿受付 平成5年3月19日。

^{*1} 正員, 名古屋工業大学工学部 (〒466 名古屋市昭和区御器所町)。

^{*2} 学生員, 名古屋工業大学大学院。

空引きされた試料チャンバ内で十分な質量をもつホルダ①によって保持した。前部円板②には $\phi 2\text{ mm}$ の細い圧力孔があけられ、その背面に圧力センサ③(キスラー製 601 A)が付けられている。チャージアンプ(キスラー製 5011)を含めた周波数帯域は $50\text{ kHz}(-3\text{ dB})$ である。一方、ドライアイスの衝突時における変形挙動を知るため、2台のゲートタイマーインテンシファイア(浜松フォトニクス製 C 4273 S)による高速写真撮影を行った。剛壁に貼った2本の細い導線がドライアイスの衝突時に短絡するときの信号を一次トリガとしてディレイパルス・ジェネレータに導き、二つのディレイトリガを作って2台のカメラのゲートトリガとする。カメラのゲート開放時間(シャッター開放時間)は $5\text{ }\mu\text{s}$ である。

3. 実験結果

図2は、飛翔体速度が 50 m/s のときの高速写真で、4コマはそれぞれ、 $t=0\text{ }\mu\text{s}$ (衝突瞬間)、 $t=300\text{ }\mu\text{s}$ 、 $t=600\text{ }\mu\text{s}$ 、 $t=900\text{ }\mu\text{s}$ である。初め円柱状であったドライアイスは、衝突面に向かって滑らかに拡大し、やがて全体は粉体状に破碎するとともに径方向に飛散して

ゆく様相がわかる。さらに、よく観察すると接触面の近く(写真に矢印で示す)には鉢巻状のしわも見られる。通常の弾塑性材料の円柱が剛壁に衝突する際に、衝突面が縁となるように碗を伏せた形に変形することと比べるとかなり様相が異なる。また、写真が等時間間隔に撮影されているにもかかわらず、ドライアイスの後方端面の移動量は時間経過とともに次第に小さくなっている。いまだ十分な根拠はないが、ドライアイスは圧縮性をもつ脆性材料のように振る舞うと考えられる。

図3は、三つの異なる衝突速度での圧力波形を示す。いずれの場合にも、ドライアイスが衝突した瞬間から圧力は急峻な増加と減少を示すが、その後は長時間一定圧力を維持している。すなわち、ドライアイスは衝突面で高い圧縮応力と熱により昇華が行われ、薄い層内で炭酸ガスが高圧化されていると推定できる。速度が遅くなるにつれ衝突時の圧力は低くなるが、圧力の持続時間はほとんど変わっていない。本実験では、平面をもつ飛翔体と平面壁との衝突であるために、高圧ガスは半径方向に容易に流出できるので比較的低いガス圧に留まっているが、前報の実験のようなカップ形紋りではガスは狭い空間にほぼ密閉されるので極め

図2 ドライアイス衝突時の高速度写真

て高い圧力と成り得る。すなわち、本方式による深絞り、通常の金属性ポンチおよびダイによる方法と爆薬成形法とを兼ねた絞り形式と考えられる。

4. 計算機シミュレーション

高速で行われる衝撃深絞りにおける試料とドライアイスの変形過程を定性的に知るため、衝撃計算コードAUTODYN-2D⁽²⁾を用いてシミュレーションを行った。ただし、静的荷重下でのドライアイスの基本的な材料力学的特性については著者らにより調べられたが⁽³⁾、その構成方程式やウゴニオ関係など高速衝撃時

の挙動はほとんどわかっていないために、ここではドライアイスの代わりにパラフィンを用いた。このために昇華性の効果を全く考慮できないが、流動性をもつ固体の衝突という観点から、ドライアイスの剛壁への衝突挙動や本方式での薄板と飛翔体の変形挙動を定性

表 1 ステンレス鋼の物性値

Density	7930 [kg/m ³]
Bulk Modulus	167 [GPa]
Shear Modulus	77 [GPa]
Yield Stress	0.32 [GPa]

表 2 パラフィンの物性値

Reference Density	913 [kg/m ³]
Parameter C ₀ (*)	2910 [m/s]
Parameter S (*)	1.56
Grunisen Coef. (*)	1.18

(*) see Ref.(4),(5)

(a)

(b)

(c)

図 3 ドライアイス衝突時の圧力波形

(a)

(b)

(c)

(d)

図 4 円柱状パラフィン飛翔体の衝突シミュレーション

図 5 衝撃紋り過程のシミュレーション

図 6 衝撃紋りの最終形状のシミュレーション

的に知ることができると思われる。なお、計算に当たって、試料はステンレス鋼、絞りジグおよび標的は軟鋼としてともにラグランジュ要素とし、パラフィンをオイラー要素とする混合要素を用いた。計算に用いた物性値を表1と表2に示す⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

4・1 ドライアイス飛翔体の剛壁への衝突 図4には、円柱状パラフィンが速度50 m/sで剛壁に衝突するときの変形過程を示す。昇華やそれに伴う質量欠損は再現できないが、衝突面付近の形状変化などは前掲の高速度写真(図2、衝突からの経過時間も同じ)と極めてよく似ている。

4・2 薄板の変形過程 図5(a)～(f)は、ブランク径100 mm、板厚2.0 mmの試料の変形過程を時刻を追って示す。各キャプションに示されている数値 T は衝突後の経過時間である。(a)は、実験と同様に配置されたダイ・ノズル・試料に対して飛翔体が左から120 m/sで運動を開始した瞬間である。やがて飛翔体は(b)のようにノズル曲面に沿って流動して試料に衝突して、板は変形を開始する。このとき、板内部で中心部と衝突部の背面で引張応力、フランジ部と衝突端面では圧縮応力が作用している。(c)では、飛翔体は試料全体に衝突し、試料の中心から側壁部にかけて引張応力を受ける。その後(d)で試料は中心からダイに接触をはじめ、(e)のように径方向に押し広げられる形でダイにならっていく。(f)では、飛翔体は試料から離れ、残留応力をもったまま試料は完全に形になった形状となっている。また、変形が進むにつれてフランジ部の引込みも大きくなっていることが注目できる。以上の結果は前報で述べた変形過程と同じような挙動を示しているといえる。

4・3 絞り比・板厚の違いによるエネルギーとの関係 図6(a)～(e)は飛翔体速度を100 m/sに固定して、衝撃絞りを受けた試料の最終形状を示す。なお、以下で絞り比とはブランク径のダイ内径に対する比を指す。(a)～(c)には、板厚一定(2 mm)で絞り比が異なる場合[(a):1.83, (b):1.75, (c):1.67]について衝突開始からほぼ同じ時刻での形状を比較しているが、絞り比が小さくなるにつれてより良好に形ならないことがわかる。この後の時刻でも形状がほとんど変わらずに飛翔体が試料から離れてしまうことから、この形状がほぼ最終的な形状である。(d)は板厚1.4 mm、絞り比1.83の試料について計算したものである。この場合、飛翔体の運動エネルギーが大きすぎるために、径方向の引張りとは飛翔体運動方向の圧縮に耐えきれず、中心部で板厚が薄くなりすぎて計算の続

行が不可能となった。これは実験でも生じた試料底部での円形破断および肉厚減少に対応している。(e)は板厚1.0 mm、絞り比1.83の試料に対するものであるが、板厚1.4 mmの試料に比べてより早い時刻で計算が中断されている。これは、前報で説明したように、試料の板厚が薄すぎることが原因となっている。(f)には、飛翔体速度を落として70 m/sとしたときの板厚1.4 mm、絞り比1.83の試料についての計算結果を示すが、最終段階でも試料中心部はダイ底部にわずかに届かない。したがって、板厚1.4 mm、絞り比1.83の試料の場合には、破断を起こさずにかつダイに十分形ならいするには、70 m/sから100 m/sの範囲の飛翔体速度が必要となることを示している。実験で用いた種々のサイズの試料について同様の計算を行うことにより、正確な深絞りとなされるためのそれぞれの適正な衝突速度の範囲を見積もることができる。また、実験と比較すると、昇華に伴うガス高圧化の効果は本計算値よりも低い衝突速度でもよい深絞りが可能であることを示す。以上のことから、ドライアイスの代わりにパラフィンをを用いたシミュレーションが、昇華の影響を取り入れることはできないものの、前報で述べた飛翔体の初期運動エネルギーと絞り形状の関係および衝撃成形の過程を定性的に説明できると考えられる。

5. 結 言

円柱状ドライアイス飛翔体を剛壁に衝突させたときの興味ある変形過程と、その際に衝突面で昇華に伴って発生するガス圧力波形を観測できた。また、ドライアイスの代わりにパラフィンをを用いた計算機シミュレーションを行ったが、剛壁への衝突実験と酷似したドライアイスの変形過程や、深絞りにおける試料の成形過程など実験結果を定性的に説明できることがわかった。ただし、ドライアイスの昇華に伴う動的な材料特性を把握する興味ある課題が残っている。

最後に、本研究の一部に対して平成3年度および4年度の文部省科学研究費「重点領域研究(衝撃波)」の補助を受けたことに謝意を表す。

文 献

- (1) 田中・ほか2名, 機論, 59-565, A(1993), 2176.
- (2) Zukas, J. A., *High Velocity Impact Dynamics*, (1990), 593, Wiley Interscience.
- (3) Tanaka, K. and Ookouchi, T., *Shock Compression of Condensed Matter-1991*, (1992), 1003, North-Holland.
- (4) CRC 総合研究所編, AUTODYN-2D マニュアル/物性値ライブラリー, (1992), 33, CRC 総研.
- (5) 林・田中, 衝撃工学, (1988), 203, 日刊工業.