

## 衝撃的油圧による薄板のプレス成形法の研究

深津 鋼次, 鈴木 康弘\*, 桜井 孝昌\*\*

機械工学科

(1998年9月1日受理)

### Press Working of Thin Plates by Impulsive Oil-Hydraulic Pressure

Koji FUKATSU, Yasuhiro SUZUKI\* and Takamasa SAKURAI\*\*

Department of Mechanical Engineering

(Received September 1, 1998)

A high rate press working method by use of impulsive oil-hydraulic pressure, which is generated by high velocity impact of a dry ice cylindrical flier, has been developed. The impulsive oil-hydraulic pressure impacts the aluminum disk workpieces onto the forming die, so that the shape of the die's surface would be copied into the disks. The shape of the used die was a spherical cup. The results of forming by the present press working method were compared with the ones of the traditional static one. The former achieved much better copies of die surface than the latter, because the former were hardly accompanied with the spring-back phenomenon. For the purpose of discussing the reason, the history of the impulsive pressure in the oil chamber and the timing of bringing the workpiece into contact with the forming die were measured. The velocity of the workpiece impacting onto the die was estimated from the measured values of the foregoing timing. The experimental results of the strain distributions of the workpieces were compared with the ones calculated by the finite-element method.

#### 1. 緒 言

薄板の高速成形を目的として、これまでも種々の衝撃的な高圧の発生法が研究されてきた<sup>1),2),3),4),5)</sup>。たとえば、Donaldsonらは、容器内に納められたピストンに重錘を落下させ、発生する液圧で、容器の底部に置かれたアルミニウムの円形素板を絞り加工する研究を行っている<sup>1)</sup>。

本報では、これと類似の方法に基づき、落下重錘の代わりに、大型の高圧窒素ガスガンで加速されたドライアイス円柱飛翔体の大きな運動エネルギー<sup>6)</sup>がプレス加工に利用された。ドライアイス飛翔体は衝突と同時に粉碎され、昇華する性質があるので、高い衝撃力を有するにもかかわらず、成形容器を破損しない有利点がある。また、衝撃的液圧による薄板の高速プレス成形法の優れた点は、スプリングバックが少なく、精密なプレス成形ができることである。その理由は、静的プレス成形では、曲げ変形が主体的であるのに対し、衝撃的プレス成形の場合に

は、衝撃的高液圧がダイスに素板を高速で衝突させ、板厚方向の変形をも与えてプレス成形を行うためと考えられている<sup>2),7)</sup>。しかし、これまでの研究では、成形時の素板のダイスへの衝突速度や成形に要した時間などが計測されていないので、前記の加工特性の理由の直接的裏付けは得られていない。そこで、本報では、素板のダイスへの接触経緯の時間計測を行い、プレス成形時の素板のダイスへの衝突速度が推定された。また、本成形機に静的な液圧を加えて成形する実験も行い、本衝撃的油圧プレス成形の結果と比較し、その優位性が検証された。最後に、対応するプレス成形の問題が有限要素法で計算され、実験値と比較された。

#### 2. 成形法および時間計測法

図1に示す窒素ガスガンは、口径100mm、長さ4mの加速管を持ち、直径100mmの種々の材質の飛翔体を加速できる。本プレス加工では、質量1.2kgの円柱状(直径100mm、長さ100mm)のドライアイスが、50~130m/sの速度で発射され、ガスガンの加工室に設

\*㈱ヤマハ発動機, \*\*豊田工業高等専門学校

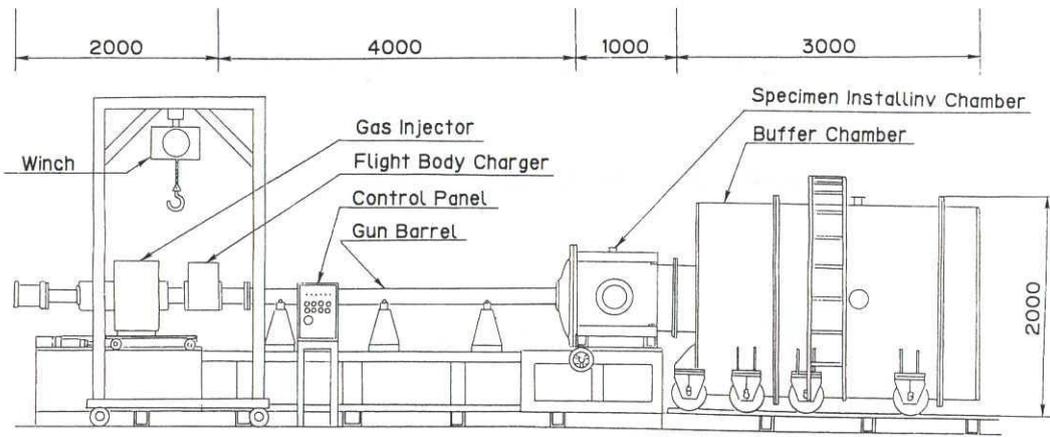
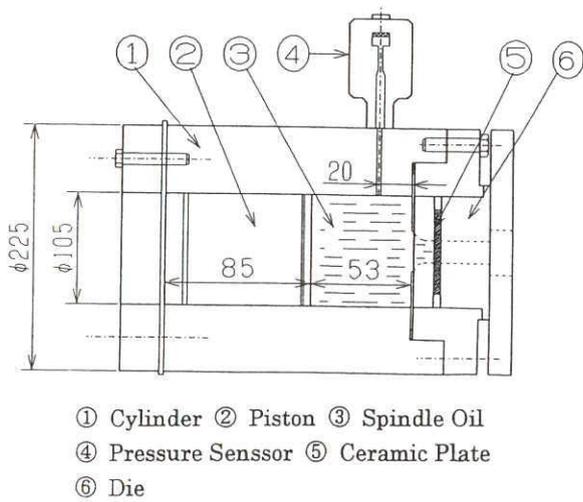


Fig. 1 Nitrogen gas gun



- ① Cylinder ② Piston ③ Spindle Oil
- ④ Pressure Sensor ⑤ Ceramic Plate
- ⑥ Die

Fig. 2 Assembly drawing of forming apparatus

置されたプレス成形機（図2）のピストン（直径105mm、長さ85mm）に衝突して容器内に衝撃的油圧を発生させる。この圧力波が容器の奥に置かれたアルミニウム素板を加速し、ダイス（アルミニウム合金製）に衝突させてプレス成形する。図3は、文献（5）で述べた方法で成形されたドライアイス円柱が、鋼製円柱に衝突した瞬間の写真を示す。写真からわかるように、ドライアイス円柱飛翔体は、衝突と同時に細かい粒子となって半径方向に飛散し、昇華するので、高い衝撃力を有するにもかかわらず、成形容器を破損することがない。成形時に成形容器内に発生する圧力の時間的変化は、高圧圧力変換器（容量200MPa；図2の④）で計測された。ドライアイス円柱の衝突速度は、ピストンの前方10cmと20cmの位置に設置された細いプリント基板材を切断する時間差を測定して算出された。

ダイスの形状は半径40mmの球面カップ状であり、カップの縁部に半径10mmの丸みを有し、中心の最大深さは14mmである。図4は、素板がダイスに接触する時間の計測方法を表す模式図である。図示するように、ダイス

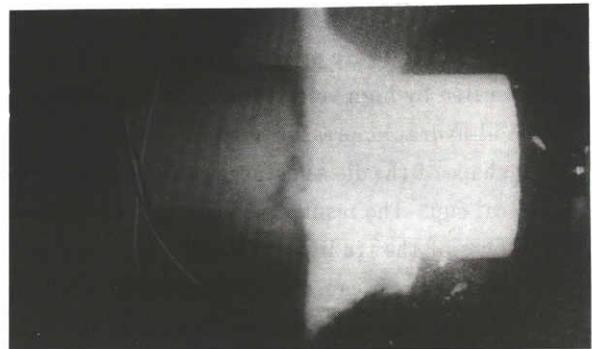


Fig. 3 Comminution view of dry ice by impact against steel cylinder

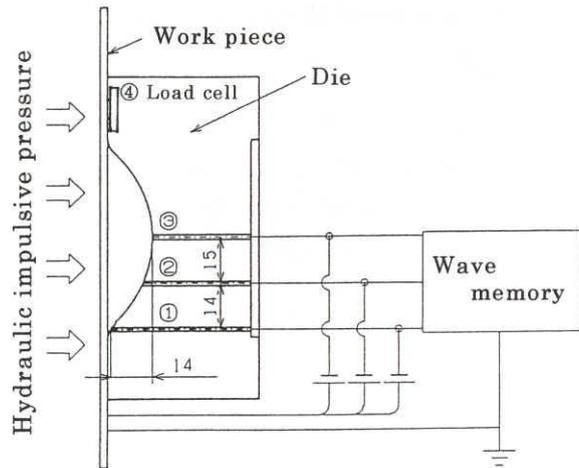


Fig. 4 Schematic diagram of how to catch instant of contact between blank and die

カップの3箇所（図中の①②③）に誘電接点を設け、素板との間に直流回路を形成する。成形の進行に伴い、素板が各接点に接触した時の電圧変化が計測される。素板が接点①と③と接触する時間差でカップ深さを割った商を、素板のダイスへの平均的衝突速度とみなす。また、ダイスカップのプラトー部に小型ロードセル④（定格1kN、直径14mm）を荷重測定部と素板が接するように

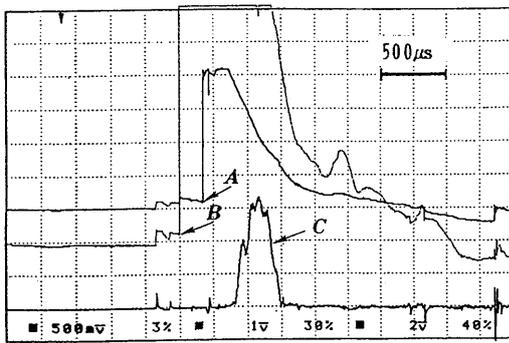


Fig. 5 An example of measured timing of contact between blank and die, and history of hydraulic pressure

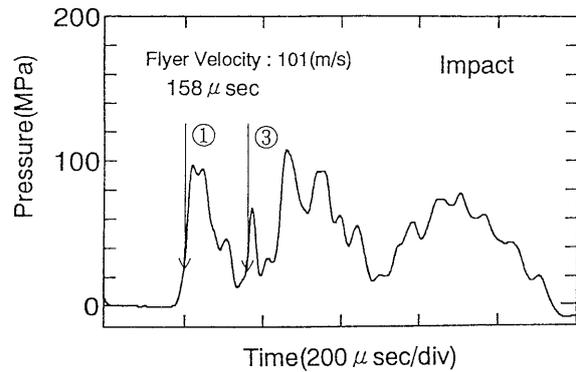


Fig. 6 History of dynamic load generated between blank and die

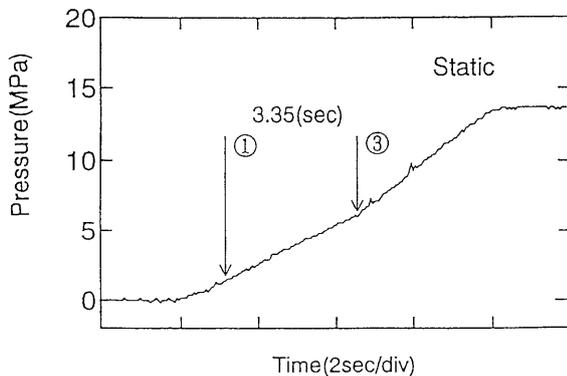


Fig. 7 History of quasi-static hydraulic pressure

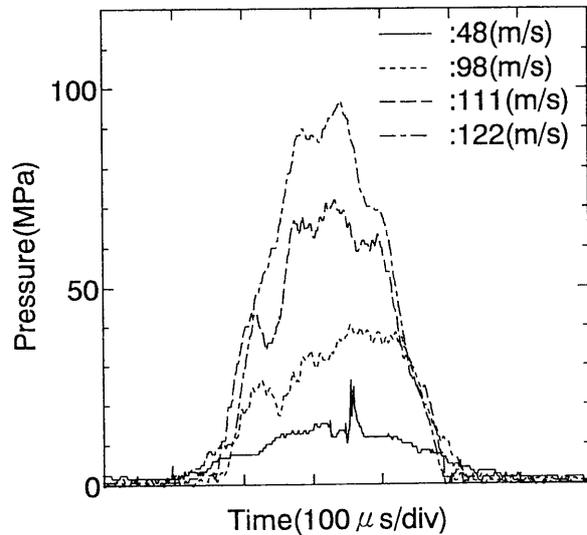


Fig. 8 History of hydraulic pressure under different impact velocities of dry ice flier

埋め込み、成形時に素板にかかる荷重を測定した。

また、本プレス成形機のピストンにベンチプレス（出力200kN）により準静的荷重を30秒間加え、静的プレス成形も行い、衝撃的成形における成形速度の違いを具体的に検証した。

### 3. 成形結果と考察

図5は、質量1.2kgのドライアイス円柱が速度110m/sで衝突する衝撃力で、アルミニウム素板（厚さ1mm）がプレス成形されたときの素板のダイスへの接触時間および容器内の圧力波（曲線C）の測定値の一例を示す。容器内の圧力の最大値は約70MPa、圧力波の持続時間は約300μsである。図4に示すダイスカップの中心の接点③へ素板が接触する時間（図中の記号A）と、ダイスカップの縁の接点①へ接触する時間（同B）との差Tは約170μsである。接点①と③との深度差Hは13.3mmであるので、素板がダイスへ衝突する速度は概略 $H/T = 80\text{m/s}$ である。図4によれば、圧力波の到達する時間が、ダイスカップの縁の接点①へ接触する時間より遅れているが、これは、圧力変換器のセンサー設置位置がシリンダー壁からかなり離れているためと思われる。

る。

図6は、ダイスに設置されたロードセル（図4の④）で測定された荷重（素板の受ける圧力）の時間的変化と素板のダイス接点への接触時間を示す。この圧力の立ち上がり時間は、素板のダイスカップの縁の接点への接触する時間①と一致する。この圧力の最大値は約100MPaであり、成形時間は、素板がダイス接点①に接触して158μ秒後に、ダイス接点③に接触した後もかなり長く持続する。

一方、ベンチプレスを用いた静的プレス成形における成形容器内圧力の時間的変化および素板がダイス接点①と③に接触する時間を図7に示す。圧力の上昇速度はほぼ一定であり、素板のダイス接点①と③への接触時間差は3.35秒（衝撃的プレス成形時の約20,000倍）であった。

図8は、種々の飛翔体衝突速度の場合について、成形容器内の油圧力の時間的変化の測定値を示す。飛翔体衝突速度が大きいほど、油圧力は大きくなるが、その持続時間はわずかに短くなるもののその差は小さい。

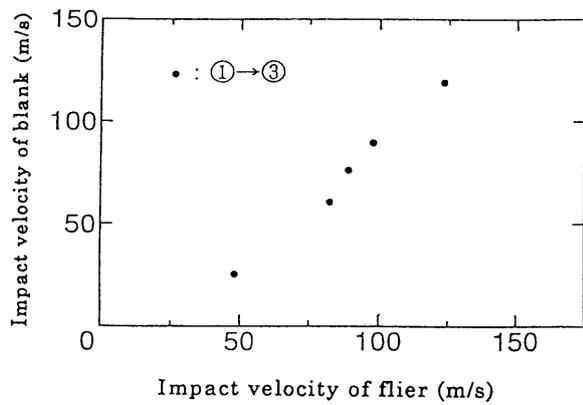


Fig. 9 Relationship between impact velocity of blank and one of dry ice flier

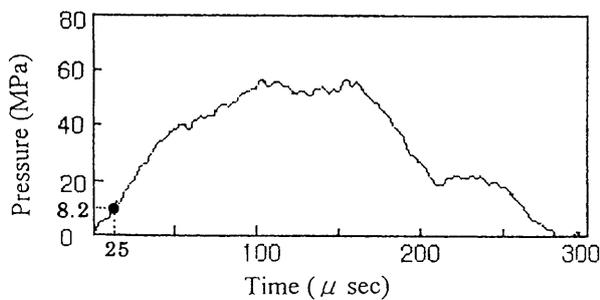


Fig. 10 History of oil pressure used for forming

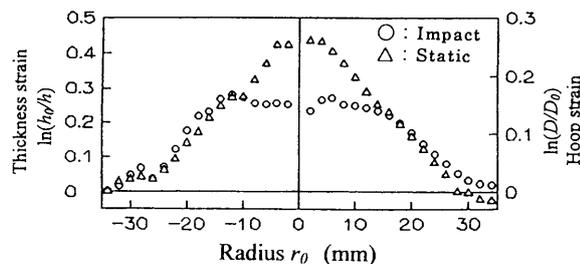
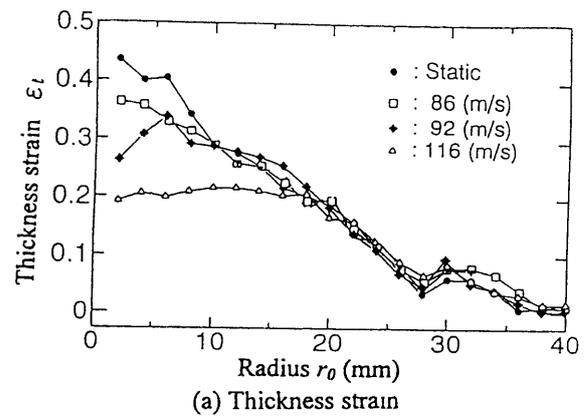


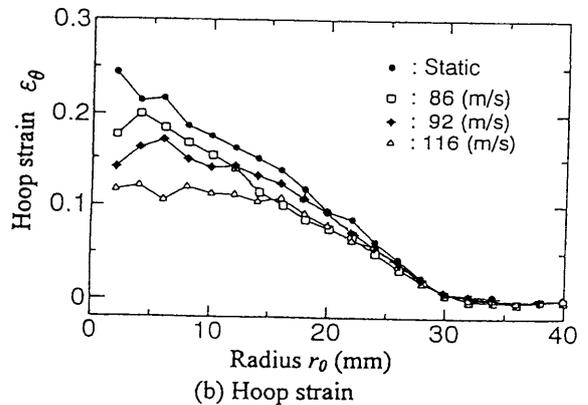
Fig. 12 Effect of impact velocity of dry ice flier on strain distributions

図9は、種々の飛翔体衝突速度に対して、前記の方法で測定・算出された素板のダイスへの衝突速度を示す。多少のばらつきはあるが、素板のダイスへの衝突速度は飛翔体の衝突速度に比例し、飛翔体の衝突速度と同程度の速度で、素板がダイスへ衝突してプレスされることがわかる。

次に、衝撃的プレス成形と静的プレス成形における素板の変形特性の違いを検討するため、成形後の素板のひずみ分布が次の方法で測定された。円周ひずみ  $\epsilon_\theta$  は、成形前に予め素板の直径上の中心から2mm間隔で細いけがき線を描き、成形前の直径  $D_0$  と成形工後の直径  $D$  を測定し、また、板厚ひずみ  $\epsilon_t$  は、成形前の板厚  $h_0$  は一様であると、成形後の各けがき線上の板厚  $h$  を測定し、次式から求められた。



(a) Thickness strain



(b) Hoop strain

Fig. 11 Comparison of strain distribution for impact forming and static one

$$\epsilon_\theta = \ln(D/D_0) \quad (1)$$

$$\epsilon_t = \ln(h_0/h) \quad (2)$$

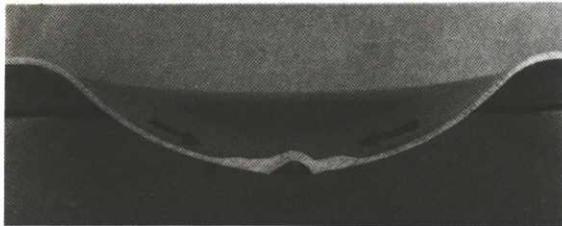
図10に示す油圧力がアルミニウム素板(板厚1mm)の表面に加えられたときの成形後の板の厚さ方向のひずみ  $\epsilon_t$  (図の左側) と円周方向のひずみ  $\epsilon_\theta$  (図の右側) の分布について、衝撃的プレス(○印)の結果と静的プレス(△印)の結果を比較して図11に示す。図11によれば、素板の半径13mm以内における板厚ひずみと円周ひずみは、静的プレスの場合、両ひずみとも中心ほど増加するが、衝撃的プレスの場合、両ひずみの大きさはほぼ一様となることわかる。

図12は飛翔体の衝突速度によるひずみ分布の変化を示す。飛翔体の衝突速度が大きいほど、板厚ひずみ分布および円周ひずみ分布の偏りは小さくなり、衝突速度が116m/sのときの素板の中心のひずみ値は、静的プレス成形の場合の値の約50%である。

静的成形の場合、ダイスと素板との接触面に静摩擦力が働いて変形が拘束され、早く接触する場所(縁付近)ではひずみは小さく、接触の遅い中心付近ではひずみが大きくなる。一方、衝撃的成形の場合、素板のダイスへの接触速度が速いため、接触面には動摩擦力が働き、成形時間も大変短いので、静的成形の場合に比べ、塑性変



(a) Photograph of inside surface of blank



(b) Cutting plane along diameter of above photograph

Fig. 13 Photograph of blank formed unsuccessfully by huge pressure

形の局所化が起こりにくいため、ひずみ分布の偏りが減少すると考えられる。

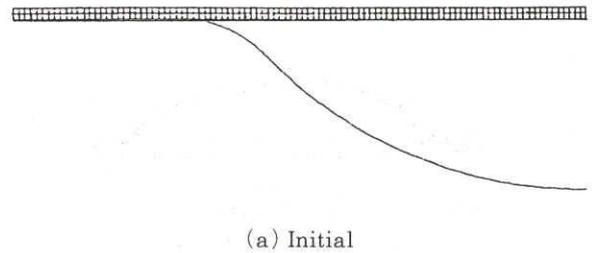
図13は、図10の場合よりかなり高い油圧力で衝撃的に成形されたカップの内表面(a)、およびカップの直径上での切断面(b)の写真である。具合の悪いことに、カップの中心部には隆起したリングが形成され、板厚が増加している。これは素板のダイスへの衝突速度が高すぎたため、面内に粒子の流動が中心方向(矢印)に発生したためと思われる。このことが、衝撃的加工の場合に中心部での板厚ひずみの増大を抑制するもう一つの要因となったと考えられる。

#### 4. FEM解析結果との比較

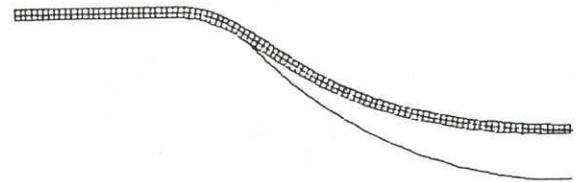
図10に示す油圧力が、アルミニウム素板(板厚1mm)の表面に加えられたときの成形過程が有限要素法により解析された。アルミニウムの縦弾性係数は69MPaであり、塑性域における変形特性として、次のひずみ速度に依存しない構成式(3)が仮定された。

$$\sigma = 156.6 - 0.0887/\dot{\epsilon} \quad [\text{MPa}] \quad (3)$$

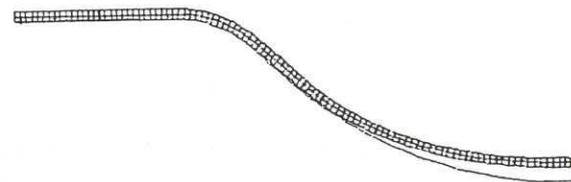
本計算にはMARC/MENTAT動的構造解析プログラムが用いられた。素板の1/2部分の要素分割(4辺形軸対象要素数50×2)を図14(a)に示す。油圧力が7.4MPaのとき(図14(b))、素板はダイスカップの縁部に接触し、図14(c)に示す油圧力8.2MPaのときには、素板はカップの中心部にはまだ接触していないが、カッ



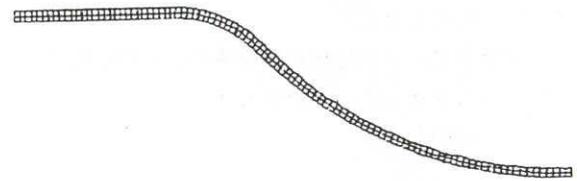
(a) Initial



(b) Pressure 7.4MPa



(c) Pressure 8.2MPa



(d) Final stage

Fig. 14 Process of forming blank predicted by FEM

プの成形が完了に近づいている。この圧力8.2MPaに達するに要す時間は、図10からわかるように、加圧開始からわずか25μ秒であるが、素板の全面がカップに接触するには35MPaの圧力が必要であった。図14(d)は、圧力が零に戻った後、カップから取り外された素板の形状であり、スプリングバックはほとんど無かった。なお、静圧力による同様のカップのプレス成形に対する有限要素解析の結果によれば、素板の全面がダイスに接触するためには、約50MPaの圧力が必要であった。

図15(a)は、図14(d)に対応する板厚ひずみ分布と円周ひずみ分布(●印)を、実験値(○印)と比較して示す。同様に、静的プレス成形の結果を図15(b)に示す。有限要素法による計算結果においても、静的プレス成形の場合には、素板の中心部にひずみが集中するのに対し、衝撃的プレス成形の場合には、ひずみ分布の偏りが比較的少ない傾向を示した。

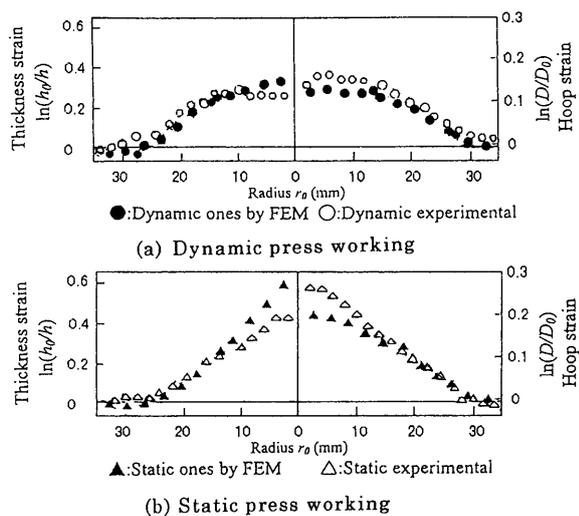


Fig. 15 Comparison of strain distribution for calculated and experimental results

## 5. 結 言

ガスガンで加速されたドライアイス円柱飛翔体の衝突エネルギーを利用した薄板の衝撃的油圧プレス成形法を開発し、その優位性とそれをもたらす要因を解明するため、成形時間と素板のダイスへの衝突速度の計測を行った結果、次の所見を得た。

(1)ドライアイス円柱飛翔体は衝突と同時に粉碎れ、昇華する性質があるので、衝撃力が大きいにもかかわらず、成形機を破損しない。

(2)静的油圧によるプレス加工よりもスプリングバックが小さく、精密なプレス加工ができる。

(3)ひずみ分布の偏りが小さいので、薄い板の場合にも破断することなく成形できる。

(4)衝撃プレス成形の成形時間は静的プレス成形のそれの約2万分の1であり、塑性変形の局所化を抑制し、ひずみ分布の偏りが小さくなる。

(5)素板のダイスへ衝突速度は、飛翔体速度と同程度(50~120m/s)であり、この高速衝突が素板面に塑性流動を発生させ、スプリングバックを抑制する。

## 文 献

- (1) Donaldson, I. S. And Johnson, W. *Pro. 3<sup>rd</sup> Int. Confer. Machine Tool Design and Research* (1963), 385.
- (2) Hudson, G. E., *J. Appl. Phys.*, **22** (1963), 1.
- (3) Cristescu, N., *Dynamic Plasticity* (1997), 295, North-Holland.
- (4) 藤田昌大・清田堅吉・高浜逸郎・藤本孝・片山泰, *塑性と加工*, **15-156** (1974), 19.
- (5) 山田敏郎・可児弘毅, *塑性と加工*, **18-192** (1977), 35.
- (6) 深津鋼次・井上匠・堀哲也・竹中弘・新開修, *機論*, **59-565, C** (1993), 156.
- (7) 林卓夫・田中吉之助, *衝撃工学*, (1988), 315, 日刊工業新聞社.