

水中衝撃波を利用したアルミニウム合金の自由張り出し成形に関する研究 (第1報)

—アルミニウム合金板の最適成形法について—

日向 毅*, 井山裕文**, 伊東 繁***

*熊本大学大学院自然科学研究科 〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1
e-mail: hinata@shock.smrc.kumamoto-u.ac.jp

**八代工業高等専門学校 機械電気工学科 〒866-8501 熊本県八代市平山新町2627
e-mail: iyama@as.yatsushiro-nct.ac.jp

***熊本大学衝撃極限環境センター 〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1
e-mail: itoh@mech.kumamoto-u.ac.jp

2005年2月21日 受付 2005年4月22日 受理

要旨

近年、自動車産業では環境問題に配慮するために低燃費の自動車の生産が盛んになってきている。特に車体の軽量化技術が進んできており、さらには大量生産品ではなく、年間1000台ほどの消費者ニーズに合わせた生産体制も整理されてきている。このような自動車生産において、車体にはアルミニウム合金が用いられており、その生産においては成形性の向上が望まれている。しかし、アルミニウム合金は鋼材と比較して伸びが少ない。そのため所定の成形を行う場合、破断が生じやすく不具合が発生する。そこで本研究では、通常の静的なプレス成形法とは異なり、成形時のひずみ速度が極めて大きく、十分な加工硬化を容易に得ることができる爆発成形法により難成形材料とされるアルミニウム合金板の成形性の向上を実験的に試みた。ここでは、基本的な衝撃成形の性能試験として、自由張り出し成形を対象とした。このアルミニウム合金板の衝撃成形における最適条件を求め、一般の静的プレス成形との比較を行った。これらの結果から密閉容器を用いた装置よりも開放型の装置の方が成形量を大きくできた。また、静的なプレス成形法と比較しても、アルミニウム合金板より変形量が大きい鋼板並みの成形量を得ることができた。

1. はじめに

爆発成形法は、圧力容器内部に水を充満させ、その頂上部に配置された爆薬を爆発させた際に生じる水中衝撃波を利用して金属板を所定の形状に成形する方法である^{1),2)}。しかし、実際は水中衝撃波の後に爆薬の爆ごうガスの膨張による圧力波が金属板に作用する³⁾。後者の方は最初の衝撃波の作用と比較して、ピーク圧が低く作用時間が長い圧力パルスとして作用する³⁾。爆発成形法は、静的な成形法であるプレス機を用いた方法や液圧バルジ成形法⁴⁾よりも金属板の変形速度は速く、そのため金属板のひずみ速度が 10^3 から 10^4 まで到達するような高速変形を伴い十分な加工硬化が生じる。これまで、この方法の応用例として1950年代あたりから盛んにロケットの先端部⁵⁾や液体タンク^{6),7)}、最近では美術品の成形^{8),9)}などに利用されている。

その一方で、近年は環境問題に配慮して、自動車の燃費向上のためボディの軽量化としてアルミニウム合金の利用が

盛んに行われており、航空機産業でも機体の材料としてアルミニウム合金が利用されている。しかし、アルミニウム合金は先述の静的な成形法においては従来の主原料である鉄鋼類と比較して伸びが少なく、所定の形状に成形する場合はすぐに破断が生じやすい難成形材料とされる。そこで、爆発成形法を利用して、従来の静的な方法よりも成形量を大きくすることを目的とし、実験的研究を始めた。ここでは、まず基礎的なデータを得るために金型成形ではなく、自由張り出し成形法において、より大きな成形量を得るにはどのような方法を利用すれば良いか、その最適条件を実験的に求めた。

2. 実験方法

2.1 実験装置

Fig. 1(a) および(b)に実験装置の概略図を示す。それぞれタイプ1、タイプ2とする。タイプ1は、従来の爆発成形法である圧力容器を用いた装置である。また、タイプ2

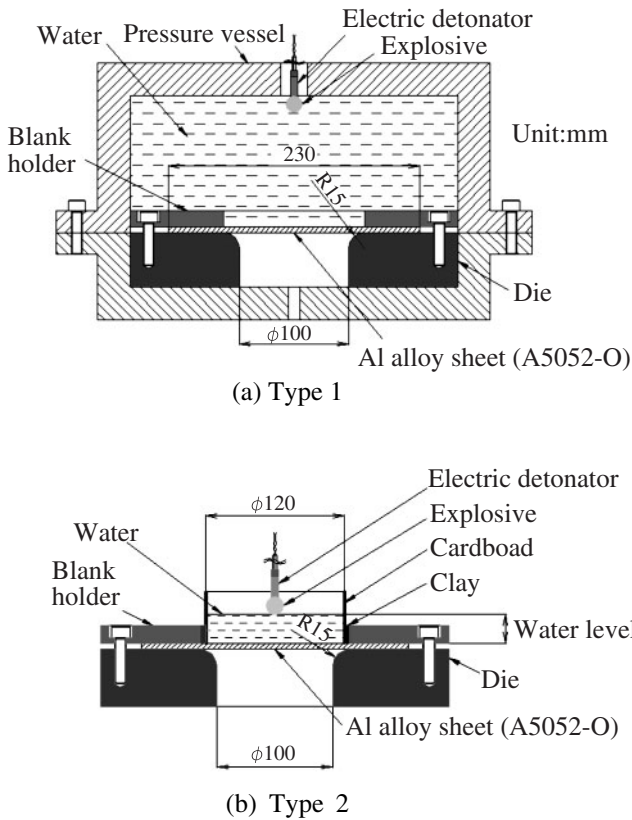


Fig. 1 Schematic diagrams of explosive forming equipment.

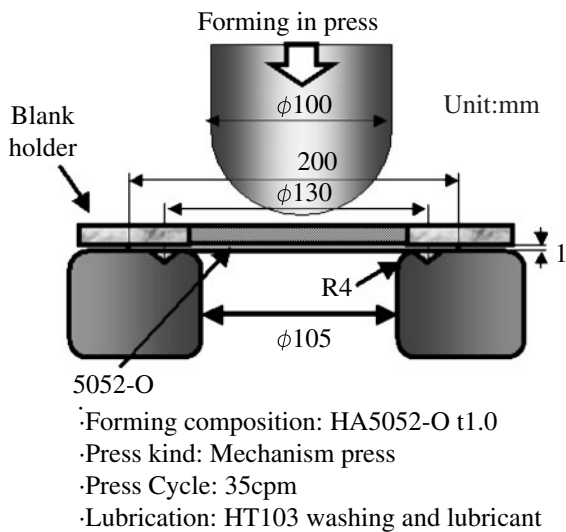


Fig. 2 Schematic diagram of press forming.

は厚紙を利用して容器を製作し、水を充満した上に爆薬をセットする方法である。ただし、容器上部は蓋がなく爆薬は水面上に配置してある。このねらいは、爆ごうガスの膨張圧による圧力作用の影響を極力排除しようと考えたものである。密閉容器では、爆ごうガスの膨張による圧力作用が静水圧的にアルミニウム板に作用すると考え、この場合ではその作用を省くことができる。いずれの場合もアルミニウム合金板はA5052-O材であり板厚1 mm、1辺230 mmの正方形板である。容器および自由張り出し成形用の金型は円筒状である。爆薬は旭化成ケミカルズ(株)製のSEPを利用した。爆薬の底面からこの爆薬の爆ごう圧力、爆ごう速度、充填密度はそれぞれ、15.9 GPa, 6980 m/s, 1.31 kg/m³である。薬量はFig. 1(a)において、25 gと3 gとした。同図(b)の方法では10 gと11 gとした。発破方法においては6号電気雷管を用いた。アルミニウム板は板押しえと開口部直径100 mmおよび開口部の丸み半径15 mmを有する支持型にはさまれている。また静的な加工法と比較するため、通常のプレス成形法による成形も実施した。Fig. 2は同様の材料を用いて、最適な成形量を得られる場合のポンチと成形板および金型の関係を概略的に示したものである。

2.2 アルミニウム合金について

Fig. 3は各種アルミニウム合金の伸びとひずみ速度の関係を示したものである¹⁰⁾。それぞれA1050, A3003, A3004, A5182材の常温で行われた衝撃引張り試験の結果である。この番号が低いほど純アルミに近い。番号の大きさが大きくなるほど伸びが低い。つまり純アルミよりも3000番台、5000番台となるほど伸びが小さくなることわかる。しかし、いずれのアルミニウム合金においても、ひずみ速度が10²以上になると伸びが急激に増加することがわかる。よって、爆発成形法のように高速変形を伴うような方法であれば、ひずみ速度が10²以上の変形が得られるため、通常の静的な成形法よりもより大きな成形量を得ることができる。Table 1にA5052-O材の組成を示す。Table 2は静的な引

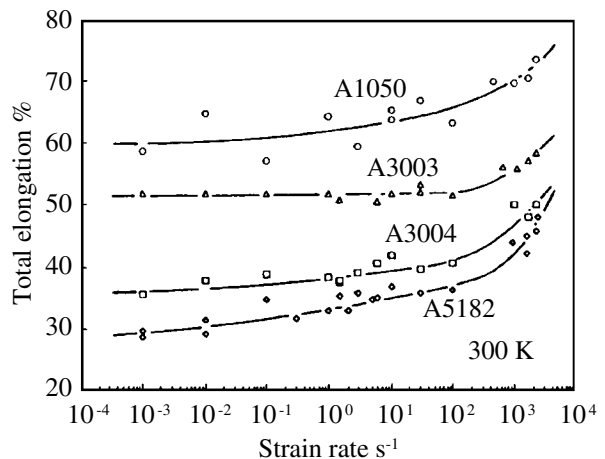


Fig. 3 Total elongation versus strain rate of aluminum alloys.

Table 1 Chemical composition of A5052-O (wt%).

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	T
0.09	0.27	0.02	0.02	2.40	0.19	0.01	0.02

張り試験(ひずみ速度 10^3)をした場合の引張り強さ, 初期降伏応力および破断伸びを示す。

3. 実験結果

3.1 爆ごうガスの膨張圧の影響

Fig. 4 (a)および(b)はタイプ1の圧力容器を用いた場合において, それぞれ2.5 gおよび3 gの薬量を使用したときの成形結果を示している。同図(a)におけるアルミニウム合金板の最大成形量は中央部であり, 25 mmである。これ以上薬量を増加すると, 同図(b)のように成形板の中央部から破断が生じた。これは最初の水中衝撃圧による変形のあと爆ごうガスの膨張圧が作用すると考えられる。

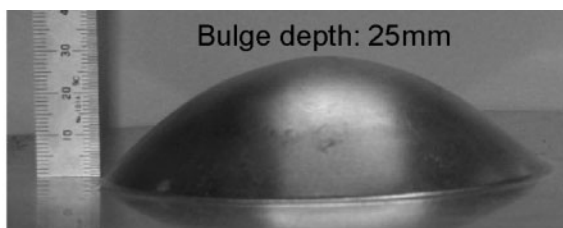
Iyamaら¹¹⁾は同様の圧力容器の特性について数値解析を行っている。ここでは, 爆薬SEPの薬量を10 gとして, 開放型と密閉容器を用いた場合の圧力履歴を比較している。前者の場合, 金属板の中央部に作用する圧力において, 第一波の最大圧力は約1.4 GPaであり, 第二波の圧力はほとんど見られなかった。後者の場合は第一波の圧力は約1.4 GPaの圧力が生じており, 第二波の圧力として, およそ0.8 GPaの

Table 2 Result of static tensile test of A5052-O.

Tensile strength [MPa]	Yield-strength [MPa]	Elongation [%]
197.3	89.7	26.7

圧力が生じていることが示されている。この様に最初の衝撃荷重と比較して第二波の圧力値は低い。このため, 十分なひずみ速度効果が得られず, アルミニウムの伸びも少なくなり破断に至ることになる。

Fig. 5 (a)および(b)は, タイプ2の成形装置において薬量をそれぞれ10 gおよび11 gとした成形結果を示している。同図(a)の最大成形量は39 mmとなり, これはタイプ1の場合よりも大きな成形量となる。タイプ2の装置では爆薬から発生する圧力が空気中に開放され, 成形板に作用する圧力荷重はタイプ1の方法と比較して低いいため, 薬量も多く必要である。また爆ごうガスの膨張圧の減衰も大きくなり, 成形板にはほとんど到達しないものと考えられる。これより薬量を1 gだけ増加させた場合では, ちょうど金型の開口部の周辺部付近から破断され, 同図(b)のような結果となる。よって本研究で実施した方法では, 最適な成形量を得るための方法としてはタイプ2の装置および薬量10 gの場合が適した条件である。

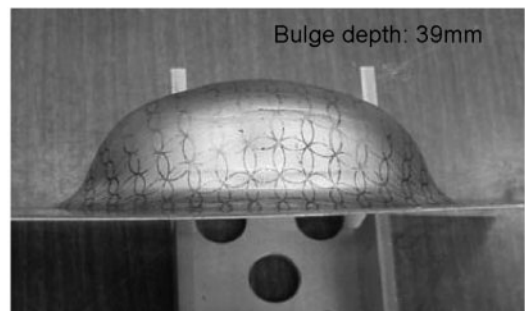


(a) Explosive mass: 2.5g



(b) Explosive mass: 3g

Fig. 4 Deformation result in case of type 1.



(a) Explosive mass: 10g



(b) Explosive mass: 11g

Fig. 5 Deformation result in case of type 2.

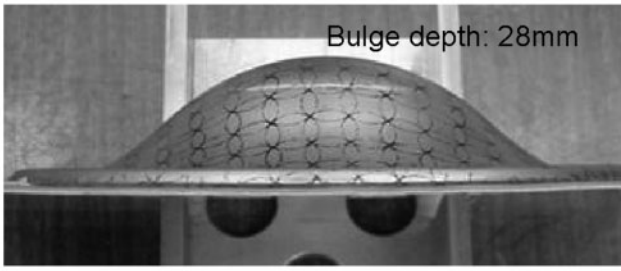


Fig. 6 Deformation result of static press forming.

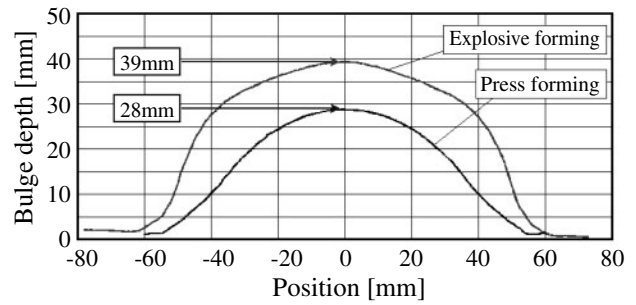


Fig. 7 Sectional form.

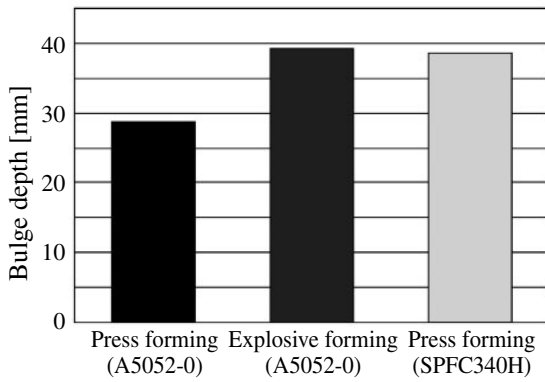


Fig. 8 Comparison of bulge depth with press forming.

3.2 通常のプレス成形法との比較

Fig. 6に通常のプレス成形で得られた最適条件での実験結果を示す。この場合の最大成形量は28mmとなり、明らかに成形板の伸びが小さい。成形されたアルミニウム合金板の形状測定を行い、爆発成形との最適条件での結果と比較したものをFig. 7に示す。同図より爆発成形法を用いた場合の成形量が静的プレス成形法の場合よりも、アルミニウム成形板の全般に亘って成形量が多いことが言える。

Fig. 8はアルミニウム合金板よりも伸びが大きいSPFC340H鋼の静的なプレス成形法の結果と衝撃成形法の最大成形量を比較したものである。この図よりSPFC340H鋼の最大成形量と同等の成形量がアルミニウム板の衝撃成形においても得られることが分かる。

Fig. 9は横軸に成形板の位置、縦軸に最大主ひずみととり、爆発成形法と通常のプレス成形法の結果を比較したものである。LとCはアルミニウム合金板の中央を通る子午線方向とそれと直角に交わる子午線方向を表している。両者

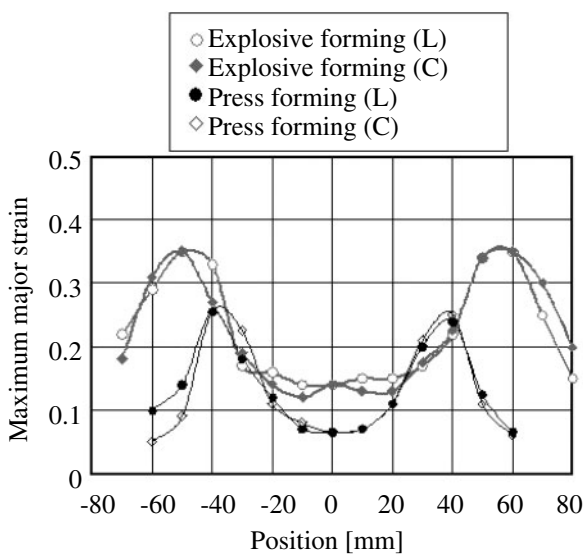


Fig. 9 Comparison of strain distribution.

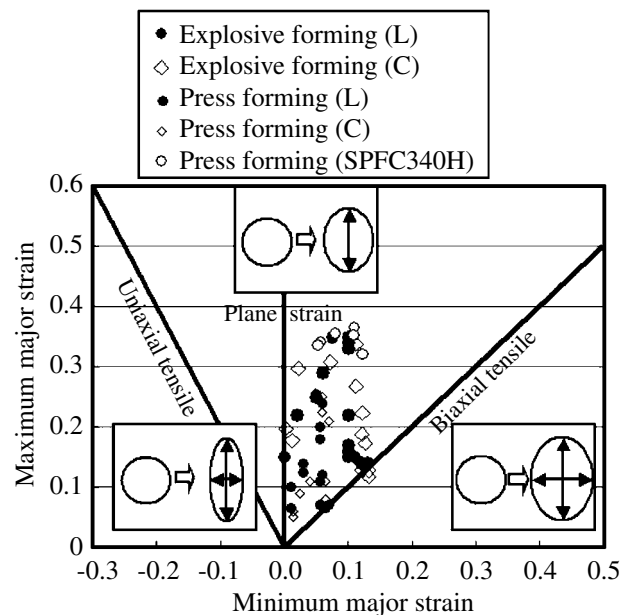
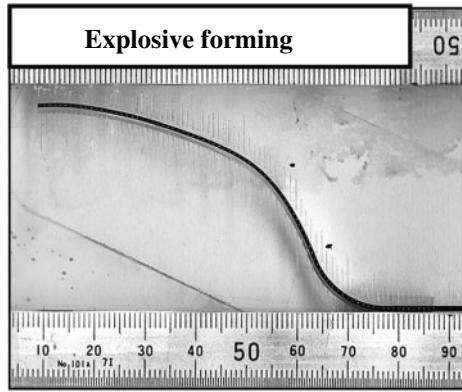
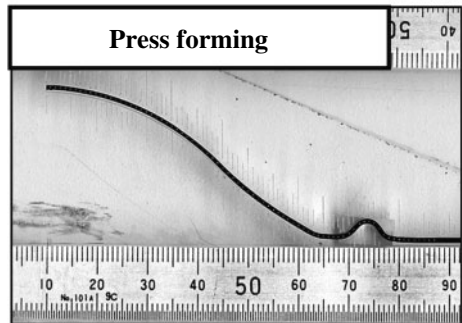


Fig. 10 FLD chart of aluminum alloy forming.



(a) Explosive forming



(b) Press forming

Fig. 11 Cross sectional shape of each forming.

とも金型の開口部周辺付近の伸びが大きいことがわかる。このため、薬量が多い場合のタイプ2の爆発成形法ではこの近傍で破断したことがわかる。またそのひずみの値は爆発成形法の方が大きく、両者の最大ひずみの値を比較するとその差はおおよそ0.1となる。

金属板の成形性能を比較するために成形限界図(Forming Limit Diagram)¹²⁾がよく用いられている。Fig. 10は横軸に最小主ひずみ、縦軸に最大主ひずみを取り、これに爆発成形法およびプレス成形法、SPHC340H鋼のプレス成形の結果をプロットした成形限界図を示している。線①上は平面ひずみ状態であり、これより左側の線②上は単軸引っ張り成形、右側の線③上は等二軸引っ張り成形を表す。これらの結果は、スクライブドサークル法を用いて得られた。平面ひずみから等二軸引っ張り変形の間にかけて全ての点がプロットされているが、アルミニウム合金板の成形性がSPFC340H鋼のプレス成形法と同等の結果が得られている。

Fig. 11は爆発成形法で得られた成形板の断面写真(同図(a))とプレス成形で得られた成形板の断面写真(同図(b))を示す。またこれに合わせて横軸に中心から半径方向にxの位置をとり、縦軸にビッカース硬度をとったものをFig. 12に示す。図より爆発成形法の場合は十分に加工硬化されているために、静的なプレス成形に比べて、アルミニウム板全般に亘って硬度が大きいことがわかる。

通常の静的なプレス成形の場合は、速くてもポンチスピードが数十 m/sであるのに対し、爆発成形法では金属板材の

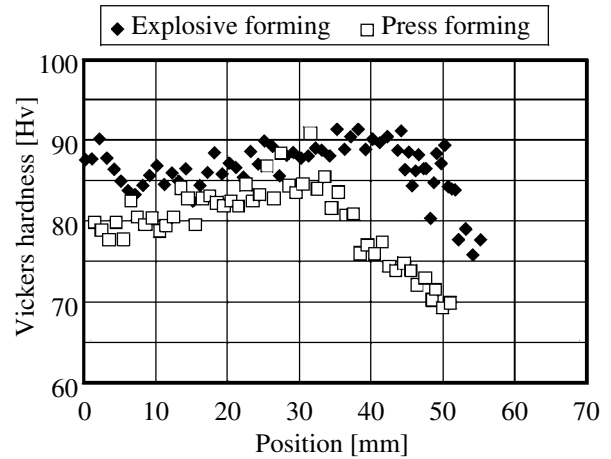


Fig. 12 Result of Vickers hardness test.

変形時の最大速度は150~200 m/s以上に達する¹¹⁾。このため材料に十分なひずみ速度が生じ、静的なプレス成形よりも加工硬化が大きくなる。また、本研究で取り上げた自由張り出し成形においては、成形板の変形は金型の肩部近傍から塑性曲げ変形波が生じ、それが成形板の中央部へと伝播しながら変形が進む。その後、最終的には成形板の中央部が突出した形状となる。これらの成形メカニズムの詳細については、第二報において数値シミュレーションを用いて説明する。

4. まとめ

本研究では、アルミニウム合金A5052-O材の自由張り出し成形において、爆発成形法を利用した場合の最適条件を実験的に求めた。その結果を以下にまとめる。

1. 爆薬を水面上に配置するだけの方法を用いた方が、密閉容器を用いた場合よりも成形量が大きくなる事が確認された。
2. 静的なプレス成形法よりも爆発成形法で得られたアルミニウム合金板の成形量が大きく、最大成形量は39 mmであった。
3. 爆発成形法で得られたアルミニウム合金板の成形性はSPHC340H鋼のプレス成形と同等の結果を得ることが確認された。

アルミニウム板の変形メカニズムの詳細については、数値シミュレーションと実験結果と比較しながら第二報において説明する。

文 献

- 1) 日本塑性加工学会編,「高エネルギー速度加工」, p. 95 (1993), コロナ社.
- 2) 高山和喜編,「衝撃波ハンドブック」, p. 844 (1995), シュプリンガー・フェアラーク株式会社.
- 3) H. M. Schauer, 1st International Conference of the Center for High Energy Forming, pp. 5.1.1-5.1.17 (1967), Estes Park.
- 4) 川並高雄, 関口秀夫, 齊藤正美, 廣井徹磨編著,

- 「基礎塑性加工学」, p. 56 (1995), 森北出版株式会社.
- 5) J. S. Rinherth and J. Person, "Explosive Working of Metals", pp. 243-247 (1963), Pergamon Press.
- 6) Rui Zhang, Hirofumi Iyama, Masahiro Fujita, Tie-Sheng Zhang, Shigeru Itoh and Kazuyuki Hokamoto, ASME Pressure Vessels and Piping Conference, Vol. 96, pp. 207-211 (1996), ASME Pressure Vessel and Piping Division.
- 7) Rui Zhang, Masahiro Fujita, Hirofumi Iyama, Yasuo Ishigori, Hiroo Osaka, Kazuyuki Hokamoto and Xiu-Zhen Zhao, Advances in Engineering Plasticity and Its Applications, pp. 389-393 (1996), AEPA '96.
- 8) 藤田昌大, 塑性と加工, 37, 682 (1996).
- 9) 藤田昌大, まてりあ, 36, 464 (1997).
- 10) S. Tanimura, The International Symposium on Impact Engineering, 1, pp. 17-26 (1992), Elsevier Science.
- 11) Hirofumi Iyama, K. Raghukandan, Siro Nagano and Shigeru Itoh, Emerging Technology in Fluids, Structures and Fluid-Structure Interactions, Vol. 460, pp. 307-312 (2003), ASME Pressure Vessel and Piping Division.
- 12) 吉田総仁, 「弾塑性力学の基礎」, p. 199 (1997), 共立出版株式会社.

Study of free forming of aluminum alloy using underwater shock wave (I) —Optimum conditions of aluminum alloy forming—

Takeshi Hinata*, Hirofumi Iyama**, and Shigeru Itoh***

Recently, some automotive performance improvements are requested. Fuel expenses of the automotive greatly depend on the weight of the car. The body material of the car is being replaced from iron with the aluminum alloy. However the forming of the aluminum alloy is very difficult due to the limit of the forced restrictions. In this research, the explosive forming of the aluminum alloy was carried out to improve their deformability. In this paper, a very high performance of the explosive forming of the aluminum alloy is reported. Two methods of the explosive forming and conventional static press forming test were carried out on the aluminum plate, A5052-O. As the result, the maximum bulge depth was 28 mm in case of the static press forming method, while the maximum bulge depth was 39 mm when the explosive forming method with open type. In case of the explosive forming method, the strain and the bulge depth of the aluminum base alloy plate were almost same as the steel plate experimental results obtained by the static press method.

*Graduate School of science and Technology, Kumamoto University, 2-39-1 Kurokami, Kumamoto, Kumamoto 860-8555, JAPAN
e-mail: hinata@shock.smrc.kumamoto-u.ac.jp

**Dept. of Mechanical and Electrical Engineering, Yatsushiro National College of Technology, 2627 Hirayama-shinmachi, Yatsushiro, Kumamoto 866-8501, JAPAN
e-mail: iyama@as.yatsushiro-nct.ac.jp

***Shock Wave and Condensed Matter Research Center, Kumamoto University, 2-39-1 Kurokami, Kumamoto City, Kumamoto 860-8555, JAPAN
e-mail: itoh@mech.kumamoto-u.ac.jp