

高エネルギー速度加工の基礎的研究

第 1 報

薄板金属の爆発成形について

福 井 伸 二
河 田 幸 三
清 野 次 郎

Fundamental Studies on High Energy Rate Forming—1 st Report. (On Explosive Forming of Thin Sheet Metals)

By

Shinji FUKUI, Kozo KAWATA and Jiro SEINO

Abstract: Underwater explosive forming of various sheet metals is studied with hemispherical, cylindrical dies etc. Work hardening of formed blanks is found in explosive forming as well as in static forming. The strain distribution of formed blanks varies with the diameter of blank, shape of tool, blank holding method and explosion pressure. 18-8 stainless steel and 65/35 brass blanks are largely deformed in explosive forming also, but Ti alloy blank is not necessarily so, probably because the elongation of Ti alloy is rather small. In conclusion, the forming conditions should in all cases be so arranged as to enable deep-drawing to be made as much as possible for effective use of the blank. Kirkwood & Bethe theory to explain the maximum explosion pressure can not be applied in small water tanks. As the material of dies for explosive forming, Kirksite is satisfactory for blanks of aluminium but materials with higher strength than that of mild steel should be used for stainless steel blanks. Deformation speed of blanks in explosive forming is considerably affected by explosion pressure and is found to come up to the extent of 200~300 m/sec in some cases. The strain velocity is calculated from the forming velocity and comes up to the order of $10^2 \sim 10^3$ /sec. But forming will be completed at the strain velocity lower than the above-mentioned value when the degree of working is small.

概 要

半球形、円筒形ダイスを使用し、各種薄板金属の水中における爆発成形にかんする基礎研究を行なった。

成形品の加工硬化は爆発成形においても静的加工と同様にみいだされ、成形品のひずみ分布は、素板直径、工具形状、しわ押え方法、爆発圧力等により変化する。ステンレス鋼と黄

銅素板は、爆発成形においてもまた大きく変形が可能であるが、チタニウム合金素板は比較的その傾向が小さいようである。これらの実験結果から、有効な薄板の成形を行なうにはあらゆる場合において成形条件をできるだけ深絞りになるよう調整する必要があることが知られる。爆発最高圧力を表わす Kirkwood および Bethe の理論は大形水槽中には有効に適用できるが、小形水槽の中では適用できない。成形用型材は、アルミニウム素板に対してはカーサイトで十分であるが、ステンレス鋼素板に対しては軟鋼より強さの大きい材料を用いるべきである。爆発成形での素板変形速度は爆発圧力によりかなり影響されるが、この実験では最高 200~300 m/sec になる。ひずみ速度はこの変形速度から計算され約 $10^2 \sim 10^3$ /sec に達する。しかしもちろん加工度の小さい場合は、上述のひずみ速度以下で成形が完了する。

1. 緒 言

最近の宇宙科学の発達にともない、飛行体材料として軽合金より高温に堪える材料：例えばステンレス鋼をはじめ特殊な鋼、チタニウム合金等の慣用法では成形困難な材料が使用されるようになり、また一方より大形のを精密にしかも安価に加工する必要が生じて来た。これらの要求に対して、加工法の面では火薬類、高圧ガス [1]、放電 [2]~[4]、電磁力 [5] [6] 等を用いる高エネルギー速度加工法が急速に関与されて来た。火薬類の爆発エネルギーを利用して薄板金属に所要の変形を与える爆発成形法 (explosive metal forming) はその中の一つで、ソビエト、アメリカ等では既に広範に実用され、我が国でもここ一二年の間に急速に研究 [7]~[14] [29] が進められ一部実用の域にはいつている。これにかんして外国の相当数の報告 [15]~[24] があるが、個々の製品にかんすることが多く、この方法の原理を確立するに必要な基礎的研究 [25]~[28] が比較的少ないので、この点にかんして研究を行なった。

本加工法のおもな利点として、慣用法では成形困難な材料の加工、大形部品の多種少量生産に適すること、加工硬化とスプリングバックが少なく寸法精度が良好で、型材の費用が安いこと等が挙げられている。

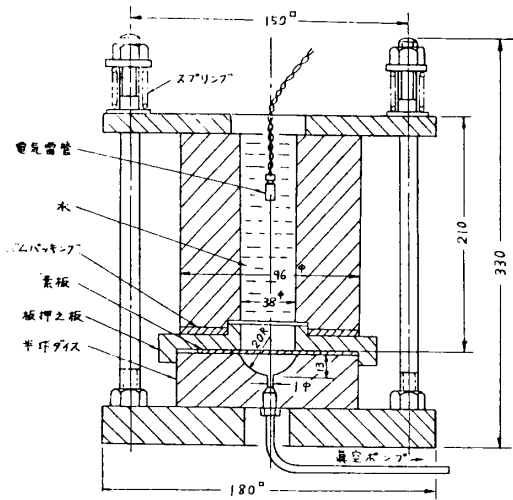
我々は基本的な形状の工具を用い、各種薄板金属を素板として水中において爆発成形を行なった。得られた製品の硬さ、ひずみ分布等を慣用の準静的プレス成形の場合と比較し、また諸種成形条件：爆薬の諸条件、板押え方法と圧力、成形爆発回数、板材の成形の良否、変形速度に対する影響等について検討し、最適成形条件を求めよう努めた。

以上の結果から、爆発成形法の特性を幾らか明らかにすることができたと思われるので、これまでの断片的な発表 [29] をとりまとめ、第1報として報告する。なお水中における爆発圧力を直接測定するためにジルコン酸鉛ピエゾ・ピックアップを作成し、目下衝撃波管による感度および初期立上り特性を検定中である。別にひずみ速度の早い単軸引張試験を行なう必要から、衝撃速度 200~300 m/sec におよぶ高速引張試験機を製作した。この両者にかんする研究結果は続報にゆずる。

2. 実験装置と方法

最初に予備実験をかねて、第1図に示す地上で行なう小形爆発成形装置を作った。この装置では、スプリングにより板押え力をかけ、素板上部に水を貯える。大きい素板の爆発成形

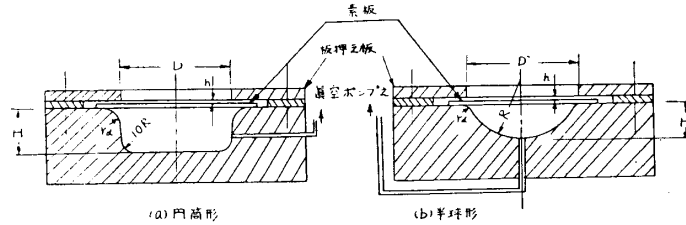
を行なうには大形水槽が必要なので、初め直径 2 m で深さ 3 m の鋼製タンクを帝国火工品川越工場内に設けた。次に航空研究所構内に直径 4 m で深さ 3 m の鋼製水槽を設置し、その後の爆発成形実験に供した(写真 1)。水槽内で使用した型は半球形および円筒形に成形するためのもので、形状、寸法をそれぞれ第 2 図, 第 1 表に示す。型材には特別なもの以外は軟鋼を用いた。型には真空にひくための小孔を設け、成形を容易にするため約 12mm



第1図 陸上における小型爆発成形装置



写真1 爆発成形実験場（航空研究所内）



第2図 爆発成形用型

第1表 爆発成形に使用した型寸法

寸法	D mm	H mm	R mm	rd mm
半球形	38	13	20	2
	75	25	40	5
	100	50	50	3
	100	50	50	15
円筒形	75	30		10

Hg 程度の真空にした。もっとも張出し加工の時は第1図, 第4図の装置で張出し用型を用い、別段真空にしなかった。

大形水槽内の実験では、第3図に示すように爆薬が水面下1mの所にくるよう装置全体を水中に吊し、爆薬と素板間距離は成形条件によって変化させた。爆薬には、適当なペレット

に成形したテトリル（比重 1.5, 熱量 1120 cal/gr）を用い、6号電気雷管によって起

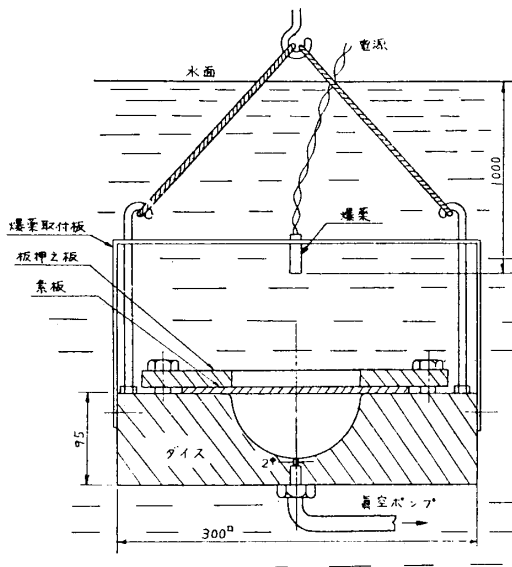
第2表 小形爆発成形に使用した各種雷管

	管体寸法 (mm)	装薬量 (gr)		薬高 (mm)
		起爆薬	添・装薬	
アルミ特殊電気雷管	7φ×12	アジ化鉛 0.10	ペンスリット0.16	6
3号銅工業雷管	6.5φ×30	DDNP 0.30	テトリル 0.35	15
6号アルミ電気雷管	6.5φ×35	アジ化鉛 0.42	RDX 0.45	20
6号銅電気雷管	〃	DDNP 0.42	テトリル 0.45	20

爆を行なった。なお爆発張出し予備実験の場合には、第2表に示す各種薬量の電気雷管のみを使用した。

素板には成形後の半径方向ひずみ分布を測定するために、あらかじめ素板半径にそい1~2mm間隔のケイ線をいれておいた。大形ダイスの場合には、素板を板押え板でしめつけるか、または板押え板を用いず外周を油粘土で止めるのみにするかいずれかの固定法を用いた。素板として使用した薄板の材質、板厚、引張強さ、伸び、硬さ等を第3表に示す。

一方変形速度測定用に使用したタンクおよび装置を第4図に示す。すなわちダイスは張出し加工用に製作し、素板下方に6本のピンを植込んだ上下できる台が取り付けられている。素板の変形速度測定用の pin-contactor 回路は、文献[30]に用いられたものを参考にし、それを第5図に示す。張出し過程で各ピン先端が逐次素板に接触するに伴い、発生された正負の信号はシンクロスコープ(岩崎通信機製, SS5302, 周波数帯域: 0~30 Mc/s, 感度 50mVp-p/cm)とカメラの組合せで記録され、変形速度が算出される。これからひずみ速度を概算することができる。



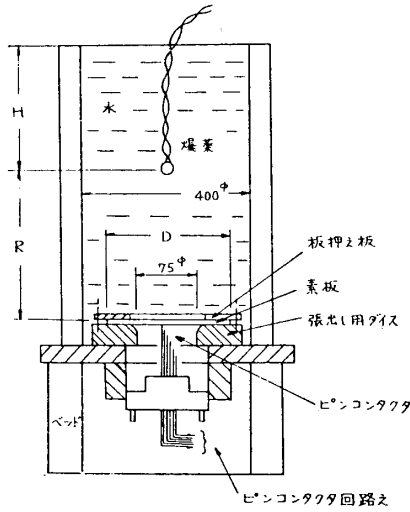
第3図 大型水槽内の爆発成形

第3表 実験に使用した材料の各種機械的性質

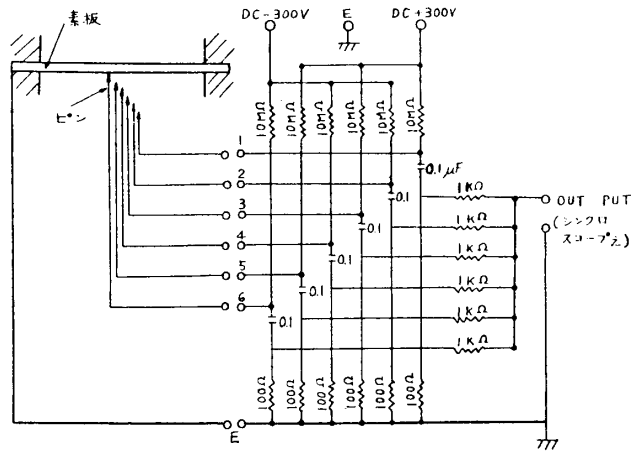
材質	アルミニウム (2S)	黄銅 (65/35)	ステンレス鋼 (18-8)	チタニウム (ST-40, 99.7%)	チタニウム (ST-60, 99.4%)	チタニウム合金 (AT-A120, Mn 8%)
引張強さ (kg/mm ²)	10.0	33.1	67.0 (0.8)* 72.1 (1.0)	38.7 (0.5)* 40.6 (1.0)	46.7 (0.5)* 51.6 (1.0)	89
伸び率 (%)	8.1	75.2	59.5 (0.8) 51.3 (1.0)	31.3 (0.5) 32.9 (1.0)	27.4 (0.5) 29.0 (1.0)	14.1
素板硬さ V.H.N.(5kg)	35.0	67.1	203 (0.8) 193 (1.0)	168 (0.5) 155 (1.0)	227 (0.5) 210 (1.0)	358

* 括弧内は板厚 mm.

第1図の小形装置による静的な加工の際は、素板の上におかれたゴムのブロックを介して材料試験機より素板に圧力をかけ半球形に成形した。



第4図 変形速度測定用タンク
および装置

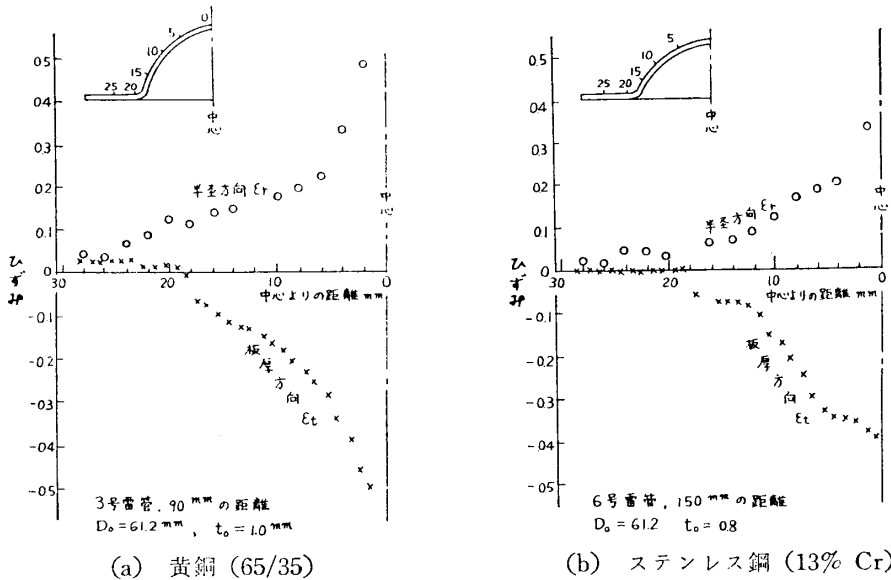


第5図 ピンコンタクト回路

3. 実験結果とその検討

(1) 予備実験

最初予備実験として、各種雷管のみを爆源とした張出し加工を、第1図の装置に張出し用ダイスを取付けて行なった。この場合の標準板押え圧力は約 4 kg/cm^2 である。雷管より素板までの距離と薬量、すなわち爆発圧力がどの程度素板の張出し高さに影響するかを調べたのが第4表である。これによれば、同一の雷管ならば距離を近づけると張出し高さが増大する。またチタニウムでは、同じ爆発圧力（3号雷管，距離 150 mm）に対して破断はしてい



第6図 小形素板の張出しにおけるひずみ分布

第4表 爆発成形予備実験結果

材 料	板 厚 mm	使用雷管	雷管より試片ま での距離 mm	張出し高さ mm	板押え圧力 kg/cm ²	備 考
アルミニウム (2S)	1.0	特	190	11	4	破*
	1.0	//	180	11	//	破
超ジュラルミン	1.0	特	180	10.5	4	
	1.0	//	160	13	//	破
	1.0	//	110	15	//	破
黄 銅 (65/35)	1.0	特	100	8	4	
	1.0	//	70	13.7	//	
	1.0	//	65	14.3	//	
	1.0	//	50	14	//	
	1.0	3号	130	14.6	//	
	1.0	//	90	17	7	
	1.0	//	90	16.8	4	
	1.0	//	90	17.6	1	
	1.0	6号	130	19	4	
	1.0	//	90	20	//	破
ステンレス鋼 (13% Cr)	0.82	特	50	9.8	4	
	0.82	6号	150	11.8	//	
	0.82	//	90	13.2	//	破
ステンレス鋼 (18-8)	0.75	特	50	11	4	
	0.75	6号	140	12	//	
	0.75	//	90	13	//	
チタニウム (ST-40)	0.5	3号	150	11	4	破
	0.5	//	50	12.5	//	破
チタニウム (ST-60)	0.5	3号	180	11.5	6.5	破
	0.5	//	150	11.5	4	破
チタニウム合金 (AT-A-120)	0.5	3号	150	6.5	4	破

* 破: 張出し部先端が破れた。

るが、合金の方が純チタニウムの約半分位の張出し高さになっている。すなわち、静的伸びの違いと同様なことが爆発成形の時にも生ずることがわかる。また静的伸びの大きい黄銅、ステンレス鋼は、爆発成形においても張出し高さがやはり大きくなっている。

この張出し加工における素板のひずみ分布を示したのが、第6図である。13% Cr ステンレス鋼や黄銅のような伸び率の高い材料は、大きな張出しを行なうと中心のひずみが大きい分布を示している。張出し後の形状が円錐状となっていることも静的な張出しとは異なるところで、植村等 [14] の結果もこれと一致する。

加工硬化についても、張出し部先端を硬さ試験すると、すべての材料においてかなりの硬

さ上昇がみられた。爆発成形において、板押え力がどの程度張出しに影響するか、黄銅板を

第5表 しわ押え圧力と張出し高さ(予備実験)

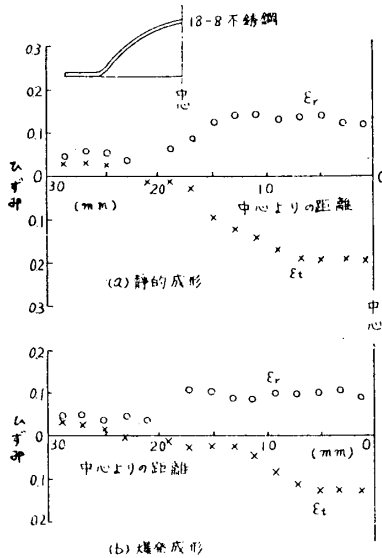
しわ押え圧力	kg/cm ²	1	4	7
張出し高さ	mm	17.6	16.7	17.0
最外周円周方向ひずみ	%	-6.7	-5.4	-5.7

用いてしらべたのが第5表である。板押え圧力は素板を押えている4本のバネのたわみから求めた。張出し高さと素板最外周の円周方向ひずみは、板押え圧力によって影響されないこと、フランジしわについては、

0.5 mm 板厚のチタニウム合金においてのみ幾分みとめられるが、他の素板では全然みられないことが知られた。

(2) 静的、爆発両成形法の素板ひずみ分布および加工硬化についての比較

静的と爆発の両成形法が、素板のひずみ分布、加工硬化におよぼす影響を小形半球形ダイ



第7図 静的と爆発両成形法によるひずみ分布

スを用いて調べた。第7図が両成形法による半径方向および板厚方向ひずみ分布の一例である。これで見ると、両者ともフランジ部はひずみが少なく、全般的に格別な違いは認められなかった。また加工硬化の方は、半球形頂点の硬さを測定したところ、予備実験における爆発張出し加工の場合と同様に、爆発成形の場合もかなり硬くなっていた(第6表)。

この時の成形に必要な爆発圧力は測定していないが、その代り成形中の6号雷管から素板までの距離と、静的成形における最大ゴム圧力を共に第6表に示す。素板の板押え圧力は、5および1.2 kg/cm²を用いて成形を行なった。その場合、爆発成形においてはフランジしわはチタニウム合金をのぞき発生しなかった(写真2)。しかし静的成形では5 kg/cm²の圧力にしてもチタニウムとステンレス鋼に大きなしわが発生した(写真3)。

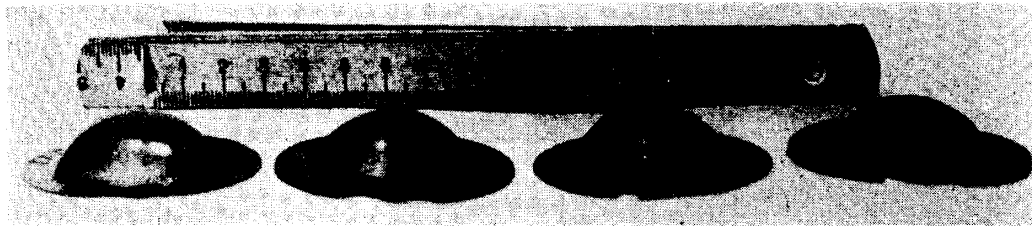
第6表 静的と爆発両成形法による実験結果

材質	アルミニウム (2S)	黄銅 (65/35)	ステンレス鋼 (18-8)	チタニウム (ST-40)	チタニウム (ST-60)	チタニウム合金 (AT-A-120)	
板厚 mm	1.0	1.02	0.79	0.49	0.49	0.42	
最外周円周方向ひずみ%	E	-3.5	-5.7	-5.6	-7.0	-7.8	-6.5
	S	-2.0	-5.6	-5.4	-6.7	-7.3	-7.7
成形後硬さ V.H.N.(5kg)	E	38	196	352	206	241	391
	S	36	164	321	210	234	353
雷管からの距離 mm	150	105	70	125	70	80	
静的ゴム圧力 kg/cm ²	70	210	300	220	250	310	

E: 爆発成形, S: 静的成形



ステンレス鋼 (18-8) ステンレス鋼 (13% Cr) 黄銅 アルミニウム



チタニウム (ST-40) 0.5 mm チタニウム (ST-40) 1.0 mm チタニウム (ST-60) チタニウム合金 (AT-A-120)

写真2 爆発成形による小形半球製品



ステンレス鋼 (18-8) 黄銅 アルミニウム



チタニウム (ST-40), 0.5 mm チタニウム (ST-60) チタニウム合金 (AT-A-120)

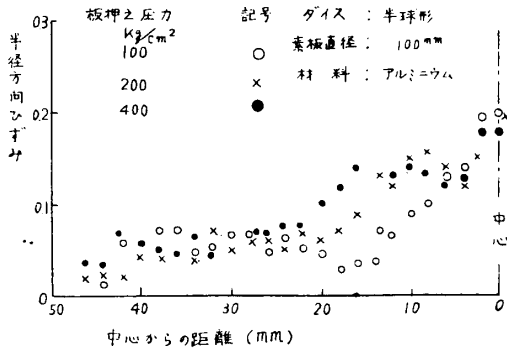
写真3 静的成形による小形半球製品

(3) 板押えの方法

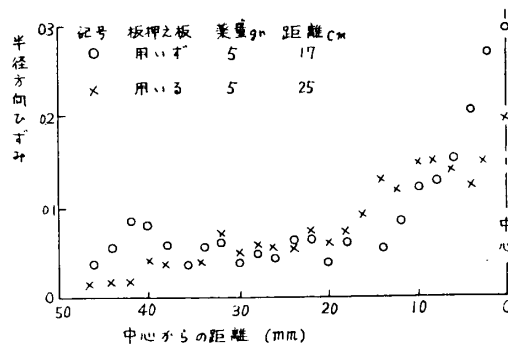
予備実験の後に、水槽中で第2図の大形半球ダイスを用い板押え圧力のひずみ分布におよぼす影響をしらべた(第8図)。この場合の板押え圧力は締付ボルトのトルクより算出し、素板には100mm径のアルミニウムを使用した。その結果この範囲内では、やはり半径方向ひずみ分布には板押え圧力がそれほど影響しないことが認められた。

この板押え板は、素板直径がダイス孔径に近くて絞りこみになるような加工では、使用し

なくても成形することができる。しかしその際は、板押えを利用した時より強力な爆発圧力を必要とする。すなわち 100 mm 直径のアルミニウム素板から、75 mm 径の半球形に成形



第8図 板押え圧力がひずみ分布におよぼす影響



第9図 爆発力の強さがひずみ分布におよぼす影響

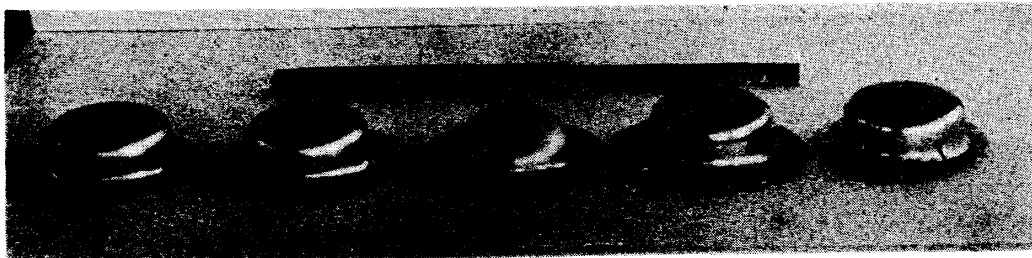
する場合、薬量 5 gr で 25 cm から 17 cm にまで近づけなければ完全な成形ができなかつ



写真4 板押え方法の不良による片寄りの例

た。この場合もし爆発圧力が弱いと、フランジしわが発生する。このようにして成形した製品のひずみ分布を比較すると、第9図のごとく距離の近い方が中央部に大きなひずみを生じていることがわかる。すなわち爆発圧力が大となると、素板中央が大きく変形するようになる。一方このような小さい素板直径の場合に、板押え圧力をかけると、かえって成形が軸対称でなくなり、写真4のように片寄る場合もある。

フランジ部の残る成形において、あらかじめ素板と板押え板との間に、第2図hのごとき隙間を設け爆発を数回に分けて成形を行なった方が深い加工を行なうことができた。その一例として 130 mm 直径のステンレス鋼素板を、円筒形ダイスで成形した場合、隙間と薬量、距離等がどのように成形に影響するかを写真5に示す。ここで完全に成形できたものは (e) で、他は (c) をのぞきフランジしわ、破かいが生じている。これより、フランジしわを生じ



h mm	0.3	0.3	0.3	2.5	47
W gr	3rd 5	2nd 5	1st 25	25	25
R cm	10	10	14	12	15
	(e)	(d)	(c)	(b)	(a)

写真5 板押え隙間と爆発回数との関係 (ステンレス鋼)

ないでなるべく深く成形するには、隙間を小さくし爆発を何回かに分けて絞り込みを大にするような条件がよいと思われる。

大きな加工度を 1 回の爆発で完了させることが困難なことは上に述べた通りである。しかし回数も多くしてもダイス肩半径が小さいと成形困難なこともある。その例として、100 mm 直径で深さ 50 mm の半球ダイスで 190 mm 径ステンレス素板を成形する場合を考えてみる。ダイス肩半径が 3 mm だと 3 回の爆発でも成形できず破れたが、15 mm にすると 2 回で成形ができた (写真 6)。この時の製品最外周円周方向ひずみを測ってみると、肩半径 3 mm の方は 5%，15 mm の方は 6% であった。すなわち、爆発回数を多くしてもダイス肩半径が小さいと材料は型内に絞りこまれにくいことを示している。

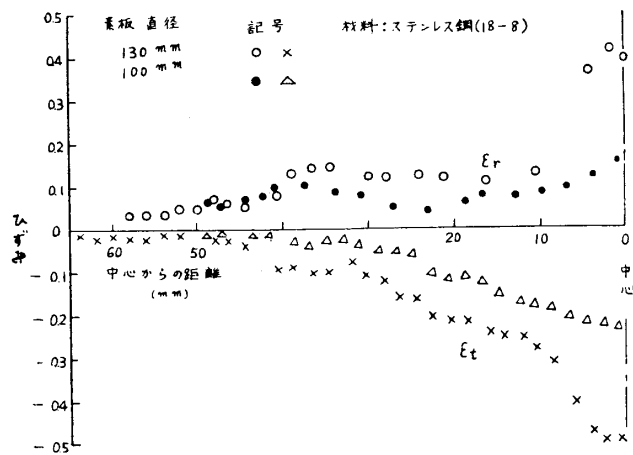


ダイス肩半径	mm	3			15	
ダイス直径	mm	100			100	
ダイス深さ	mm	50			50	
爆発回数		1回	2回	3回	1回	2回
薬量	gr	15	15	15	20	15
距離	cm	15	15	15	15	15

写真 6 ダイス肩半径と爆発回数 (ステンレス鋼)

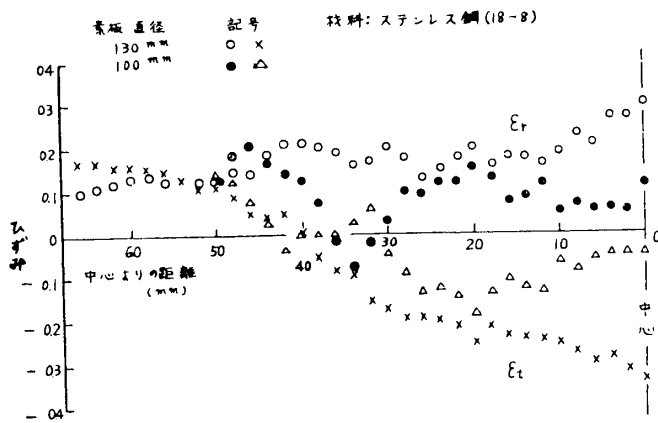
(4) 工具形状とひずみ分布

工具形状と素板直径が、ひずみ分布におよぼ影響を 75φ×25 mm の半球形と、75φ×30mm の円筒形ダイスでステンレス鋼素板を使用して求めた (第 10 図, 第 11 図)。素板直径が 100 mm であると深絞り近く、130 mm になると張出しの傾向が強くなるようである。すなわち、半球形では中央にひずみの大きいところが起きやすいが、円筒形だと中央部、底隅部、容器最外周にもひずみの大きいところがみられた。写真 7 にステンレス鋼の円筒形に成形した例を示す。この場合の素板直径はそれぞれ 100 mm, 110 mm であった。



第 10 図 半球形成形品のひずみ分布

直径にそい、板厚に直角な全断面にわたる微小硬さ分布 (V.H.N.) を荷重 200 gr で測定した結果が第 12 図である。半球と円筒両形状の硬さ分布はひずみ分布と関連しているようにみられ、塚田等 [10] [11] と一致する。このステンレス鋼素板の硬さは



第 11 図 円筒形成形品のひずみ分布

200 gr の荷重で V.H.N. 192 であったので全体としてかなり加工硬化していることになる。

このようなひずみと硬さ分布の違いは板押え方法，素板直径，工具形状，爆発圧力等により変ることが以上のことより知られる。

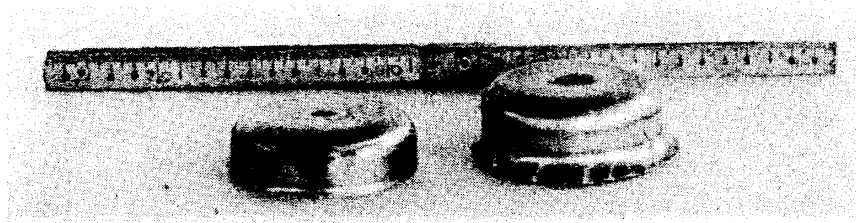
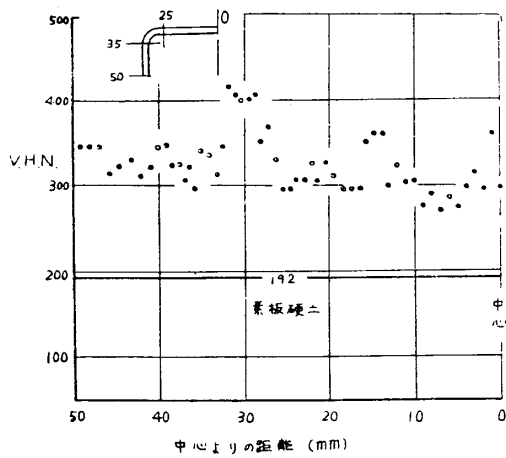
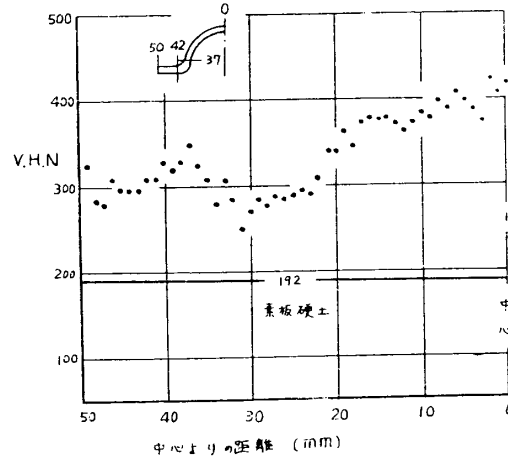


写真 7 円筒形に爆発成形した 18-8 ステンレス鋼の一例



(a) 円筒形



(b) 半球形

第 12 図 円筒, 半球両形状成形品硬さ分布

(5) 爆発圧力

成形に必要な爆薬の量と距離は，素板材質，板厚，加工度を考慮して適当に選ばねばならぬ。ここに水中における爆発最高圧力を示す Kirkwood および Bethe の理論を検討してみる。

すなわち，自由水中での爆発最高圧力 $P(\text{lb}/\text{in}^2)$ は

$$P=k(W^{1/3}/R)^x \dots\dots\dots(1)$$

で与えられる。ここで W は薬量 (lb), R は爆薬からの距離 (ft), x, k は爆薬固有の常数である。いま、爆薬にテトリルを使用すると x, k はそれぞれ 1.15, 2.14×10^{-4} となる。(1) 式を使い我々の行なった実験での適当な成形の行なわれる成形圧力範囲を示すと、ステンレス鋼では $1,500 \sim 2,000 \text{ kg/cm}^2$, アルミニウムでは $400 \sim 500 \text{ kg/cm}^2$ となる。これ以上強力な爆発圧力を一度に加えると、素板に割れ等の損傷が起る。大形水槽の中では、素板の成形具合から薬量と距離の関係が(1)式によって大体成立することが実験によって確かめられた。なお(1)式は自由水中での式であるから、第1図の装置のような制限された空間の中には適用し難い。附図1には、(1)式を用いてテトリルの場合の各種薬量 (gr) と距離 (cm) における爆発最高圧力 (kg/cm^2) を計算したのを参考のために示す。

(6) 型材料

型の材料にかんしては、軟鋼以外にカークサイト、エポキシ等を用いてみた。その結果エポキシだけの型は脆く、アルミニウムにわずか使用できる程度で、カークサイトならば十分耐えられた。ステンレス鋼、チタニウム等の加工で爆発圧力を強くすると、軟鋼の型でも幾分変形することもある。これから考えて高張力鋼等の薄板成形には、軟鋼よりも強度の高い材料を型に使用した方がよいと思われる。

(7) 爆発成形速度

爆発成形における素板のひずみ速度を知ることは、基礎的な研究にとって重要なことである。しかしこれを直接測定することは困難なので、素板中央部の変形速度を測定した。その時の標準試験条件は次のごとくである。すなわち爆薬と水面の距離 37 cm, 素板との距離 20 cm, 薬量 2 gr, 素板は黄銅 (65/35), 素板直径は 140 mm, 板厚は 1 mm, ピンの間隔 4 または 5 mm. 平均変形速度 $V \text{ m/sec}$ は、素板下面が各ピン先端を通過する時間から求められた。写真8は、成形中に pin-contactor が素板下面と逐次接触することにより発生された6個の正負信号を示すオッシログラムの一例である。

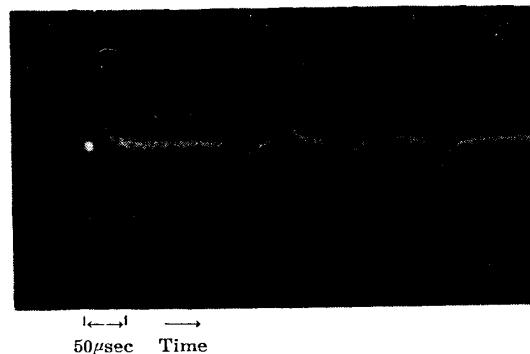
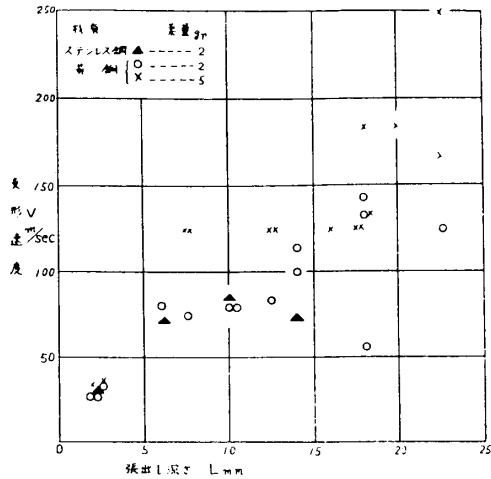
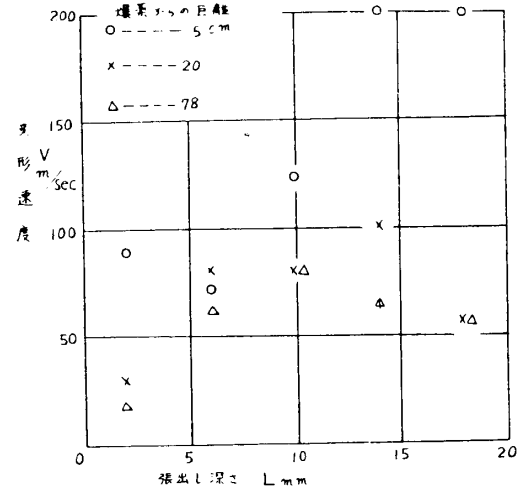


写真8 成形速度測定のためのピンコンタクト法による発生した信号

各種成形条件中、薬量と素板材料が速度におよぼす影響を、横軸に張出し深さ $L \text{ mm}$ をとって示したのが第13図である。すなわち薬量が多くなると速度は増加することがわかる。一方材質の方は、黄銅でもステンレス鋼でも他の条件が同一ならば、速度に変化のないことがわかる。爆薬と素板間距離が、速度におよぼす影響は第14図に示される。近距離になると速度もかなり増加するが、20 cm と 78 cm では違いがほとんど認められなかった。成形された製品の形状をみても、この両者の間には張出し高さに違いはないが、5 cm に近づけた時の製品はかなり大きな変形をしていた。(1)式から考えると、爆薬からの距離はか

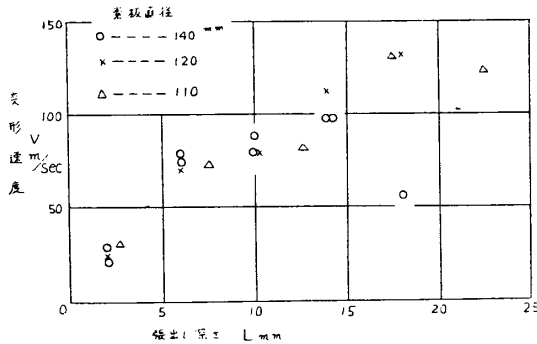


第 13 図 薬量と材料の変形速度におよぼす影響

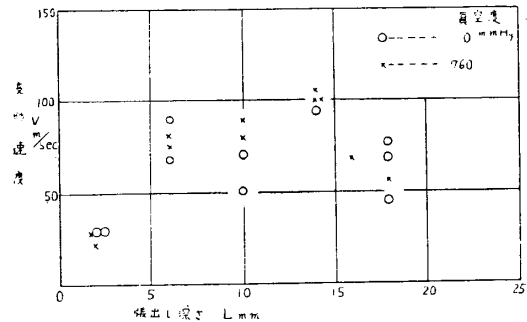


第 14 図 爆薬からの距離が変形速度におよぼす影響

なり最高爆発圧力に影響するはずである。しかしこの場合には、20 と 78 cm ではほぼ同一の効果を示した。このことは装置の鋼製タンクが狭く、空間が制限されているため 20 cm でも 78 cm でもほとんど変らぬ圧力が伝達されること、5 cm 位になってはじめてやや自由空間的な効果がでるものと考えられる。素板直径の違いは第 15 図に示すように、ほとんど影響していない。また型内部の真空にかんしては、第 16 図にみられるように余り問題はなさそうである。



第 15 図 素板直径の変形速度におよぼす影響



第 16 図 真空度が変形速度におよぼす影響

以上各種条件下の変形速度の測定から、薬量と距離がかなり速度に影響し、最高 200~300 m/sec になっていることがわかった。簡単な仮定をおいて変形速度からひずみ速度を概算すると、少なくとも $10^2 \sim 10^3 / \text{sec}$ になっていることになる。

4. 結 論

薄板の爆発成形にかんする各種実験結果より、次のことが結論としていえる。

(1) 爆発成形によった製品の加工硬化は、ここに実験したどのような材料においてもその加工の程度に応じて認められた。

(2) 製品のひずみ分布は、素板直径、工具形状、板押え方法、爆発圧力等によりかなり

異なってくる。しかし半球形では中央に、円筒形では中央以外に円筒底隅部と容器外縁にひずみの大きなところがあった。静的と爆発成形がひずみ分布におよぼす影響は、この実験の範囲では著しい差はないように思われた。

(3) ステンレス鋼のような静的伸びの大きな材料は、爆発成形においても大きな加工を与えることが可能である。しかし爆発成形においては、できるだけフランジ部材料を型内に絞りこむように各種条件を考慮する必要がある。

(4) 成形に必要な薬量と素板との距離の間には、大形水槽中では Kirkwood および Bethe の理論が成立つが、狭い水槽中だと周囲の影響がはいり成立ちににくい。

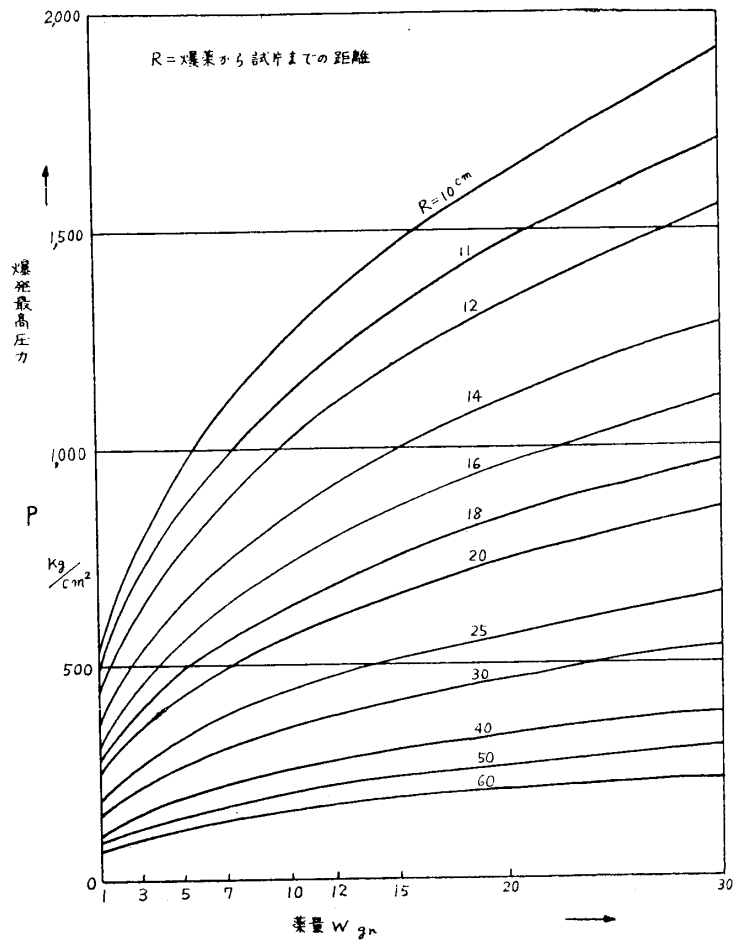
(5) 成形用の型材は、アルミニウム系統を加工するならばカークサイトでもよいが、ステンレス鋼のような高張力鋼に対しては、軟鋼より強い材料を使用するのが適している。

(6) 爆発張出し実験の一例での素板中央の変形速度は、最高 200~300 m/sec で、ひずみ速度に換算すると大略 $10^2 \sim 10^3/\text{sec}$ になっている。しかしこの速度も爆発圧力により変化するし、変形が少なければこの速度に達せぬうちに成形が完了する場合も考えられる。

研究費について特別の御配慮をわずらわした文部省ならびに東洋レーヨン科学振興会、火薬類使用にかんし種々御協力ならびに御援助をいただいた帝国火工品株式会社川越工場吉原功工場長、竹中康課長、今福重高係長その他研究課の方々、ならびに日本油脂株式会社笠間憲治武豊工場長、桜井武尚本社課長補佐、爆発による音響について御教示頂いた東大航空研究所五十嵐寿一教授に御礼申し上げます。

材料については住友軽金属株式会社、富士重工業株式会社宇都宮航空機製作所の援助をうけ、実験にかんしては三菱造船株式会社本社研究部柳下小太郎、中尾好昭両技師、富山大学工学部市田和夫君、千葉工大学生氏家道雄君、当研究室の高田信宏、橋本彰三両君の協力をうけたことに対し深甚の謝意を表する。

1962 年 2 月 6 日 材 料 部



附図 1 爆発最高圧力と爆発量との関係

参 考 文 献

- [1] D. Peckner: *Material in Design Engineering*, Vol. 52, No. 1 (1960), p. 89.
- [2] H. J. Wagner & J. G. Dunleavy: *Tool Engineer*, Vol. 44, No. 3 (1960), p. 81.
- [3] J. Frederick: *Tool Engineer*, Vol. 44, No. 3 (1960), p. 83.
- [4] R. Le Grand: *American Machinist*, Vol. 103, No. 20 (1959), p. 123.
- [5] D. H. Birdsall, F.C. Ford, H. P. Furth and R. E. Riley: *American Machinist*, Vol. 105, No. 6 (1961).
- [6] A. P. Langlois: *Tool & Manufacturing Engineer*, Vol. 46, No. 6 (1961) p. 105.
- [7] 村井三郎, 岡崎 登, 石井 満: 塑性と加工, Vol. 1, No. 3 (1960), p. 216.
- [8] 植田精一, 小林 隆, 常田頼史, 岡崎 登: 塑性と加工, Vol. 1, No. 4 (1960), p. 338.
- [9] 平山 明, 関 泉: 新三菱重工技報, Vol. 2, No. 2 (1960), p. 26.
- [10] 塚田晴一, 井上 稔, 中村 清: 新三菱重工技報, Vol. 2, No. 3 (1960), p. 74.
- [11] 塚田晴一, 井上 稔, 楼井武尚: 塑性と加工, Vol. 2, No. 7 (1961), p. 123.
- [12] 西山卯二郎, 井上 卓, 田中 示: 精密機械, Vol. 26, No. 11 (1960), p. 667.
- [13] 同 上 : 同 上, Vol. 27, No. 4 (1961), p. 199.
- [14] 植村恒義, 山本芳孝: 生産研究, Vol. 14, No. 1 (1962), p. 5.
- [15] D. W. Cole: *American Machinist*, Vol. 102, No. 8 (1958), p. 137.
- [16] P. J. Wolf: *Tool Engineer*, Vol. 41, No. 6 (1958), p. 78.
- [17] T. C. Du Mond: *Metal Progress*, Vol. 74, No. 5 (1958), p. 68.
- [18] H. P. Tardif: *Material in Design Engineering*, Vol. 49, No. 2 (1959), p. 82.
- [19] P. F. Lambert: *Machinery (E)*, Vol. 95, No. 2437 (1959), p. 131.
- [20] A. F. Watts & G.N. Rardin: *Metal Progress*, Vol. 76, No. 5 (1959), p. 140.
- [21] B.J. Bryan: *Tool Engineer*, Vol. 44, No. 2 (1960), p. 97.
- [22] L. Zernow: *Sheet Metal Industries*, Vol. 37, No. 404 (1960), p. 897.
- [23] L. C. Stuckenbruck & C.H. Martine: *Machinery (E)*, Vol. 98, No. 2520 (1961), p. 486.
- [24] G. C. Throner & I. Lieberman: *Tool and Manufacturing Engineer*, Vol. 46, No. 6 (1961) p. 123.
- [25] E. W. Feddersen & A.H. Petersen: Preprint for American Society for Metals, (1958).
- [26] H. P. Tardif: *Metal Progress*, Vol. 76, No. 3 (1959), p. 84.
- [27] Special Report No. 474: *American Machinist*, Vol. 103, No. 12 (1959), p. 127.
- [28] G. W. Papen, A.H. Petersen & G. N. Rardin: Interim Engineering Report No. 1 (1958).
- [29] 例えば福井仲二, 河田幸三, 清野次郎: 宇宙科学技術シンポジウム前刷, (1960/2), p. 45.
 福井仲二, 河田幸三, 清野次郎, 竹中 康: 同 上 , (1960/8), p. 1.
 同 上 : 同 上 , (1961/2), p. 33.
 同 上 : 第 11 回塑性加工講演会前刷集, (1960/11), p. 53, p. 59.
 同 上 : 第 12 回 同 上 , (1961/11), p. 127, p. 131.
- [30] R.E. Duff & E. Houston: *Journal of Chemical Physics*, Vol. 23, No. 7 (1955), p. 1268.