

# 薄板成形に関する研究補遺

—極薄板の成形とモアレ縞の利用—

福井伸二・清野次郎\*  
高田信宏・清水進\*\*

## Supplement for Sheet Metal Forming

—Forming of Fine Sheet and Utilization of Moiré Fringes—

By

Shinji FUKUI, Jiro SEINO, Nobuhiro TAKADA  
and Susumu SHIMIZU

**Abstract:** Sheet metal forming for fine sheet of nearly 0.3mm thickness is commonly believed to be difficult. Some problems for such cases are dealt with in this paper.

So called double action hydro-forming is useful for fine sheets of Pt, Ag, Al, Cu and Mild Steel and formings for the deep-drawing ratio of 2.4 and 2.6 are possible for punch diameter of 25mm. Also, triple action rigid-flexible (rubber) forming by conventional double action press with cushion is essentially similar with the double action hydro-forming and the forming for the deep-drawing ratio of 2.4 is possible, so it is considered to be very hopeful for mass-production.

So called conical cup test, developed by the authors, is also possible for fine sheet under suitable dimensions of tools and such dimensions are shown.

Measurement of surface shape is possible by using reflecting moiré fringes without mechanical contact and accurate measurement of surface shape of fine sheet product, distribution of thickness for sheet and calculated plastic strain ratio are shown.

### 概 要

厚み 0.3mm 前後の通称極薄板は一般に成形加工は困難と考えられているが、剛軟成形の一つである複動液圧成形は有利であって、Pt, Ag, Al, Cu, M. S. については、ポンチ径 25mm について深絞り比 2.4, 2.6 まで加工は可能である。慣用クッション付複動プレスで行なえる三動剛軟成形は、複動液圧成形とは本質的の差はなく、深絞り比 2.4 まで加工可能で、量産的に有望である。

極薄板についても、工具寸法を適当にえらべば、著者らによるコニカルカップ試験は可能であって、板厚に対し適当な寸法組み合わせをしめた。

---

\* 協同研究員，信州大学助教授

\*\* 受託研究員，田中貴金属社員

反射モアレ縞を利用すると、機械的接触なしに表面形状の測定が可能で、薄板成形品の表面形状精度、薄板試片の厚み分布測定と塑性ひずみ比の算出に便利である例を示した。

## 1. ま え が き

著者らは永年にわたり、薄板成形について多くの研究を発表してきた。その際、薄板とは、厚み 0.5~1.6mm のものが大部分であった。それより薄い 0.3mm 前後のものは通常、極薄板とよばれ、深絞りとか複合成形は一般に困難であるが、最近この分野についての要求が増してきて、特にわれわれは Pt の極薄板の成形に関心をもったのがきっかけで、工業的に使われる各種極薄板材料について深絞りとか複合成形をやりやすくする方法として、複動液圧成形、ならびに、特に慣用複動プレスを使い、量産性を満足させ得る三動剛軟成形 [1] 等について実験研究を行ない、またいわゆるコニカルカップ試験 [2]、あるいは Fukui Test と呼ばれる著者らの方法を極薄板の範囲にまで拡張することを試み、また Theocariss らによる反射モアレ縞による測定法が便利であるのに着目し、薄板成形後の形状精度、板厚分布の測定や、塑性ひずみ比の算出に利用した結果などを示したいと思う。

## 2. 極薄板の剛軟成形

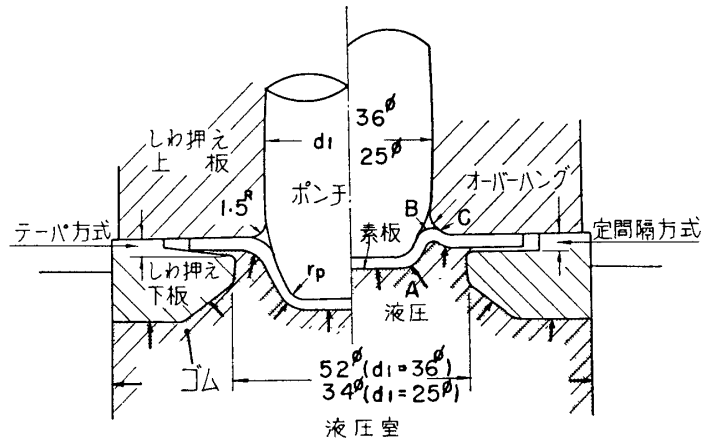
### 2.1 極薄板の複動液圧成形

極薄板は曲げ加工は容易であるが、一般に深絞り加工では、しわができやすく、フランジしわを防止するために大きなしわ押え力を必要とし、摩擦抵抗が増し、またボディしわを防ぐために一層の注意を要し、加工は困難になる。Hydroform 法、Marform 法 [4] によって代表される剛軟成形法は、深絞り加工に有利な特性があるが、特に素板が薄くなると、しわ押え力と共に摩擦抵抗が大きくなり不利 [5] になる。したがって著者らは複動液圧成形法 [6] を提案し、この種のもは西ドイツにおいては Hydromechanische Tiefziehen [7] として実用化され、またスウェーデン [8]、イギリスなどにおいても重用されてきた。しかし、これらにおいては、厚み 0.3mm 前後の、いわゆる極薄板は取り扱われていないので、このような場合についての結果をのべる。

#### 2.1.1 実験装置 および 方法

第1図は実験装置の略図であって、かつて液圧成形 [5] の研究に使用した液圧室の内部に、剛体しわ押え装置をそう入した。これは上板と下板とからなり、下板には素板をおく凹みと、中央に絞り込まれる穴があり、穴径は大きすぎると普通の液圧成形に近づいて不利であるし、小さすぎれば慣用法に近づき、加工の終りに穴の縁角で大きな摩擦が働き、共に不具合であるから、図中に記入した値を採用した。またしわ押え力が過大にならないためには、上下板の間隔が素板の厚み  $t_0$  より少し大きい必要があり、 $(1.2\sim 1.3)t_0 \pm 0.02\text{mm}$  に一定にしたのを定間隔方式とよび、G. Sachs [9] が発表しているように、素板の外周厚みは、絞り込まれると共に厚くなるので、中央に向かって間隔が直線的に大きくなるようなテーパで、最大間隔を  $(1.3\sim 1.4)t_0$  としたのをテーパ方式とよぶこととする。

このような下板を使うと、この上にある素板のフランジ部には液圧は直接作用せず、慣用の複動プレスと同様な経過をたどる。この装置を 10 Ton 圧縮試験機に取り付け、液圧室内



第 1 図 複動液圧成形

のゴム袋には、最高圧  $1000 \text{ kg/cm}^2$  の水圧テストポンプで適当な液圧を送りこみ、開口部には合成ゴムである柔軟板を介し、これに接するしわ押え下板および素板の中央部分に逆液圧を作用させながら、試験機を駆動してポンチを押し、素板を液圧室内に絞りこむ。

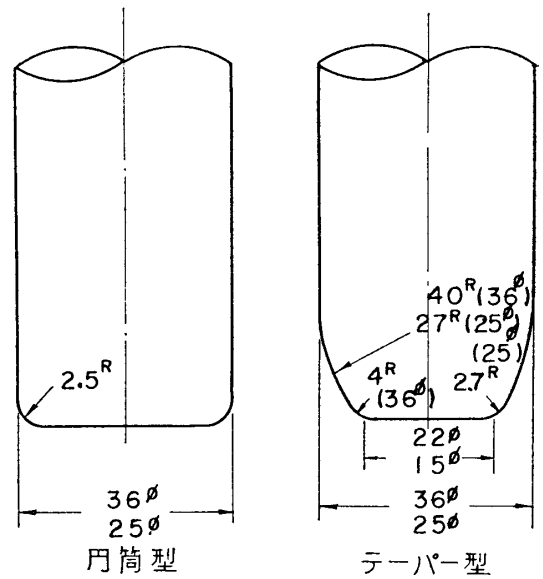
第 2 図は、使用したポンチの形と寸法で、平行部径  $25 \text{ mm}$ 、 $36 \text{ mm}$  の円筒型 2 種、テーパ型 2 種の計 4 種で、頭部角丸み半径  $r_p$  は、円筒型ではいずれも  $2.5 \text{ mm}$ 、テーパ型では  $4$ 、 $2.7 \text{ mm}$  である。

第 1 表は実験に使用した素板の種類、寸法および慣用機械的性質であって、種類は工業用 Pt, Ag, Al, Cu, M. S. (軟鋼) の焼鈍板で、厚みは約  $0.3$ 、 $0.2 \text{ mm}$ 、外径は  $d_0$ 、絞り比は  $d_0/d_1$  で、抗張力、全伸び、塑性ひずみ比  $r$  [10]、( $r'$ ) はいずれも圧延方向に平行： $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、直角： $90^\circ$  の方向に引張り試験して求めた値を示し、塑性ひずみ比はある程度異方性を示しているが、耳の程度はたいして大きくなかった。

Pt は衆知のように化学的に不活発で、潤滑材については問題があるが、経験的に他の材料と同様、ジョンソンワックス 122 # を使用した。

### 2.1.2 実験結果と考察

第 3 図は、Pt, Ag, Al, Cu, M. S. 板についての実験結果で、縦軸は逆液圧  $\text{kg/cm}^2$ 、横軸はポンチの押し込み行程  $S \text{ mm}$  をとった、いわゆる特性曲線で、上部は破線で示した破断限界線の群があり、これより液圧が高ければ素板はどこかで破断し、下部にはしわ発生限界線の群が鎖線で示されており、これより液圧が低くければしわが発生し、いずれも加工は不成功で、両種の曲線の間が加工成功範囲で、この中に 1 本の直線、または 2 本以上の直線をつ



第 2 図 ポンチ形状、寸法

第1表 実験用素板 (厚み公差  $+10\mu$ ,  $-5\mu$ )

結晶系	材料	最初厚み $t_0$ mm	外径 $d_0$ mm (絞り比) $d_0/d_1$	抗張力 kg/mm <sup>2</sup>			全伸び %			$r(r')$ 値				ビス 硬さ	潤滑材	備考
				0°	45°	90°	0°	45°	90°	0°	45°	90°	平均			
面 心 立 方	Pt	0.3	80(2.22)	18.0	18.8	16.6	48.1	40.2	29.2	(1.36)	(0.73)	(0.76)	(0.90)	50.9	ジョンソ ンワック ス 122#	750°C ×1hr 焼鈍
		0.2*	55(2.20)													
	Ag	0.3	80(2.22)											32.3	"	400°C ×1hr
	Al	0.3	60(2.40)	8.9	8.9	7.8	41.3	41.7	36.5	1.23	0.77	0.67	0.89	21.9	"	400°C ×2hr
	Cu	0.3	55(2.20)													400°C× 30min 水素雰 囲気 焼鈍
			60(2.40)	26.8	25.8	26.1	39.6	45.6	37.8	0.81	1.04	0.91	0.92	54.3	"	
体 心 立 方	M.S.	0.3	55(2.20)													930°C ×1hr 真空 焼鈍 JIS 呼 称 SPC
			60(2.40)	31.1	34.1	30.6	37.7	39.3	34.9	1.06	1.27	1.14	1.16	72.3	"	
			65(2.60)													

(\* は 55 のみ)

ないだ実線が加工成功である経路, 成功線であり, 破断限としわ発生限が交われば, そこが加工限界となる。

(a) は Pt の  $t_0=0.3, 0.2$  mm の板で, ポンチは  $d_1=25$  mm の円筒型, テーパ型, 素板径  $d_0=55$  mm, 絞り比=2.20, しわ押えは定間隔方式の結果であって, 定間隔の数値はそれぞれの板厚について図中に記入してある。破断限界はいずれの板厚についても, 行程の初期に逆液圧の高いところに現れ, ついで下降し, 次に多小上昇する傾向がある。これはまず第1図のA点付近で, ポンチ頭部の丸み  $r_p$  に接触する部分が曲げにより薄くなると共にせん断に近い破断をし, 次に逆液圧が高いと, ポンチとしわ押え上板との隙間に, いわゆるオーバーハングといわれるように逆方向に張り出され, その頂点B付近は引張り曲げで薄くなり, 引張り破断がおこりやすくなり限界は下降する。この部分の破断が起らずに過ぎると, 次はCの部分およびそれより外周に近い個所で破断がおきるようになり, 限界圧力も上昇する, A, B, C点では曲げ, 曲げ戻しをうけ, 板厚減少がおこり, 早い時期に破断がおこらなくても, 製品に円周状の凹線を生ずることがあるので, 初期に逆液圧をあまり高くしないように注意を要する。しわ発生限界は, いずれの板厚に対してもほぼ同様にポンチ行程と共に漸増する傾向を示し, 成功範囲は相当広く, 0.3 mm について 200 kg/cm<sup>2</sup> から出発する成功線を例示したが, 絞り比 2.22 までは円筒型, テーパ型の両形状とも 0.3, 0.2 mm の板について成功した。

(b) 図は Pt の  $t_0=0.3$  mm の板で, ポンチは  $d_1=36$  mm の円筒型, テーパ型の両種について, 素板は  $d_0=80$  mm, 絞り比=2.22, 定間隔方式の結果であって, 径厚比が前者より大きいので, 困難になるはずで, 破断限が低く, 成功範囲が狭いが, 例示したように 100 kg/cm<sup>2</sup> 辺から出発し, 後期には逆圧上昇を急にするようにすれば, いずれの場合も成功した。

(c) 図は Al の  $t_0=0.3$  mm の板で, ポンチは  $d_1=25$  mm のテーパ型, 素板は  $d_0=$



60 mm, 絞り比=2.40, 定間隔方式の結果であって, 破断限が低く, 成功範囲が狭く注意を要したが,  $80 \text{ kg/cm}^2$  くらいから出発し, 3本の直線で示されるような経路をとって成功している.

(d) 図は Ag,  $t_0=0.3 \text{ mm}$  の板で, ポンチは  $d_1=36 \text{ mm}$  のテーパ型, 素板は  $d_0=80 \text{ mm}$ , 絞り比=2.22, しわ押えは最大間隔 0.42 mm, テーパ: 0.1/14 のテーパ型で, 破断限は Al より高く, Pt と同程度で,  $100 \text{ kg/cm}^2$  から出発した1本の直線経路で, 割合簡単に成功している.

(e) 図は Cu,  $t_0=0.3 \text{ mm}$  の板で, ポンチは  $d_1=25 \text{ mm}$  の円筒, テーパ型の両種で, 素板は  $d_0=55, 65 \text{ mm}$ , 絞り比=2.2, 2.6, しわ押えは, 2.2 に対しては, 間隔 0.39 mm の定間隔方式, 2.6 に対しては最大間隔 0.48 mm, テーパ: 0.11/15.5 のテーパ方式であって, いずれも成功し, 特に絞り比 2.6 では例示するように  $100 \text{ kg/cm}^2$  から出発し, ほぼ1本の直線状で  $S=30 \text{ mm}$  まで進み, その後は計器の都合上  $500 \text{ kg/cm}^2$  に一定として成功した.

(f) 図は Cu,  $t_0=0.3 \text{ mm}$  の板で, ポンチは  $d_1=36 \text{ mm}$  の円筒, テーパ型の両種, 素板は  $d_0=80 \text{ mm}$ , 絞り比=2.22, しわ押えは円筒ポンチの場合は, 最大間隔 0.42 mm, テーパ: 0.1/14 のテーパ方式, テーパポンチの場合は 0.41 mm の定間隔方式を用い,  $150 \text{ kg/cm}^2$  辺から出発し, 2本の直線で示されるような経路をとって, いずれも成功した.

(g) 図は M.S.,  $t_0=0.3 \text{ mm}$  の板で, ポンチは  $d_1=25 \text{ mm}$  の円筒, テーパ型の両種, 素板は  $d_0=55, 65 \text{ mm}$ , 絞り比=2.2, 2.6, しわ押えは 2.2 については 0.39 mm の定間隔方式, 2.6 については最大間隔 0.43 mm, テーパ: 0.11/15.5 のテーパ方式を用い, いずれの場合も成功した.

結局, ポンチ形状は円筒でもテーパ型でも, 絞り比=2.2程度は容易で, 2.4, 2.6程度まで成功し, まだ加工限界に達しなかった. 慣用法ではテーパ型は特に困難で, 円筒型でも 2.2 を越えることはほとんど不可能であり, 複動液圧成形の優秀さが実証されたわけである.

材 質	Pt		Cu			M.S.	
$t_0, \text{mm}$	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
$d_1, \text{mm}$	36.0	25.0	36.0	25.0	25.0	25.0	25.0
ポンチ形状	テーパ	テーパ	テーパ	テーパ	円筒	テーパ	円筒
絞り比	2.22	2.20	2.22	2.60	2.60	2.60	2.60

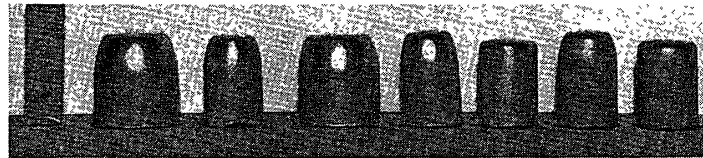


写真 4 複動液圧成形品

第4図は, この方法による代表的な製品を示した写真であって, Pt の  $0.3 \text{ mm}$  板を  $d_1=36, 25 \text{ mm}$  のテーパポンチで, 絞り比=2.22, 2.20 で加工した結果は Pt ルツボに類似の形であって,  $25 \text{ mm}$  の場合, 最後に多小耳, 谷が出たのがわかる. Cu, M.S. については

耳、谷はほとんど現われず、両者共、25mmについて絞り比2.60の高度の加工に成功している。

以上のような成形の際、素板の表面積が、ポンチの断面積以下であれば加工はおこなない。そこで素板の表面積からポンチの断面積を差引いた残りが、成形に寄与する程度の目安となる。そこで

$$\text{成形寄与率} = (\text{絞り比})^2 - 1$$

と名づけ、実際に使われる絞り比の範囲について示したのが第2表であって、慣用法では実

第2表 成形寄与率

絞り比 $d_0/d_1$	慣用成形		剛軟成形	
	1.8	2.0	2.4	2.6
$(\text{絞り比})^2 - 1$	2.24	3.00	4.76	5.76

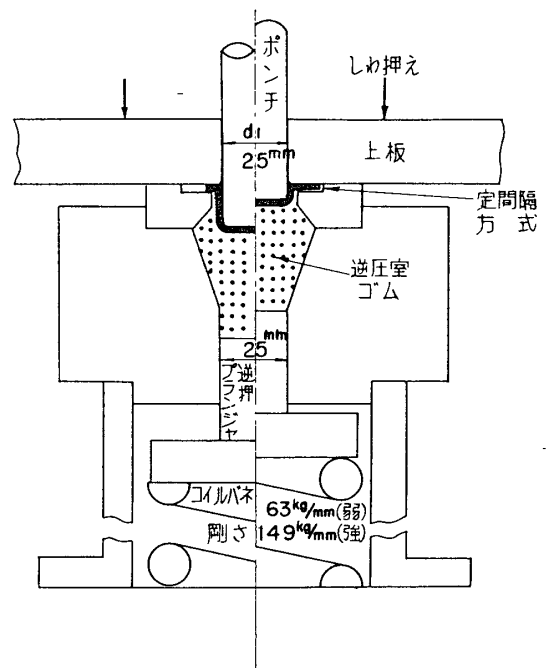
用絞り比は1.8くらいまでで、2.0を越えるのはまれである。そこで、複動液圧法により2.4, 2.6まで成形すれば、慣用法で処理できる素板の約2倍まで一度に処理され、従来2工程以上を要した仕事が1工程で処理できる場合が多く、能率の向上ならびに設備費の低減に寄与できる場合が多いと予測される。

## 2.2 三動剛軟成形

前述のように、複動液圧成形では逆液圧を、しわ限より大きく、ほぼそれと平行に、ポンチ行程の増すと共に増大する必要があるので、たとえば、しわ限曲線の傾きより少しこわさの大きいバネにより、パンチ行程が大きくなると共に逆圧力が増大する機構を用い、逆圧力一行程曲線が、しわ限と破断限の間にある経路をたどれば、成形加工が行なえるはずである。

### 2.2.1 実験装置および方法

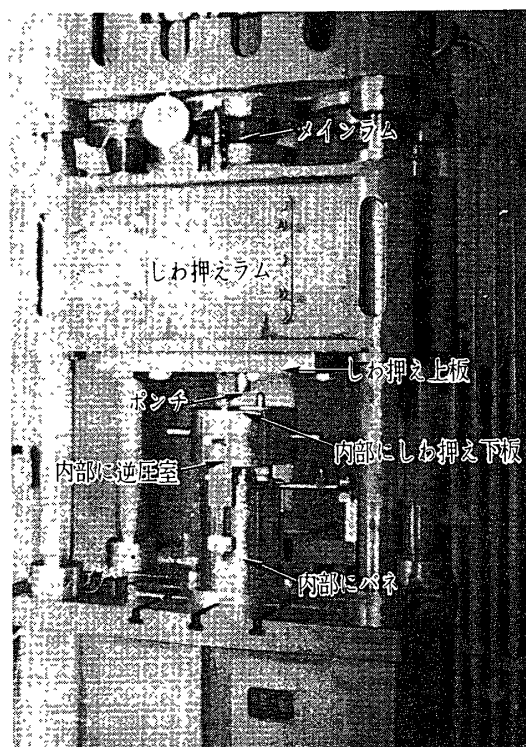
第5図は実験装置の略図で、第1図と類似の構成で、素板はしわ押え上下板の間にはさまれており、中央部の上面はポンチに、下面は柔軟物質に接触している。この場合、柔軟物質は合成ゴム“ハイカー”ショア硬さ40~50、を逆圧室の中につめた。このゴムの中に液圧袋をいれておけば、前述の液圧法と類似になるが、いわゆる“Marform”法に相当するようにゴムだけとしたが、本質的には変りはない。ゴムの下部には図で上下動できる逆押しプランジャがあり、これは下のバネでささえられているので、プランジャの動きに比例した逆押し力がゴムを通じて素板に逆圧力



第5図 三動剛軟(ゴム)成形

を及ぼす。ゴムが圧力を受けた場合の容積変化は非常に小さいので、ポンチの径とプランジャの径を等しくしておけば、パンチの行程量とプランジャの移動量はほぼ等しいので、ポンチの下降量にほぼ比例して増大する力がゴムを通じて素板にかかり、前述の意図に合う状況がつくり出されるわけである。プランジャの径をポンチ径より小さくすれば、プランジャの移動量はポンチ行程より大きくなり、同一のバネでは圧力上昇が急激になり、径の関係を逆にすれば圧力変化も逆になり、圧力変化を調節できる。

第6図は、この装置を慣用複動液圧プレスに取り付けた状態の写真であって、まず、しわ



第6図 剛軟成形実験装置

押えラムでしわ押え上下板を圧着し、素板は両者の間のすきまにおかれており、中央部にはゴムとバネにより  $200\sim 250\text{ kg/cm}^2$  程度の初逆圧をかけておき、次にメインラムによりポンチに力をかけて絞りこむと、逆押しプランジャは下降し、バネを圧縮して逆押し力が増大してゆくの、逆押し力はバネのたわみから算出される。

バネの作用は、慣用のバネクッションと類似であるから、クッション付複動プレスによる三動成形と同様であって、プレスは機動プレスでもさしつかえなく、この場合は量産性が十分満たされる。

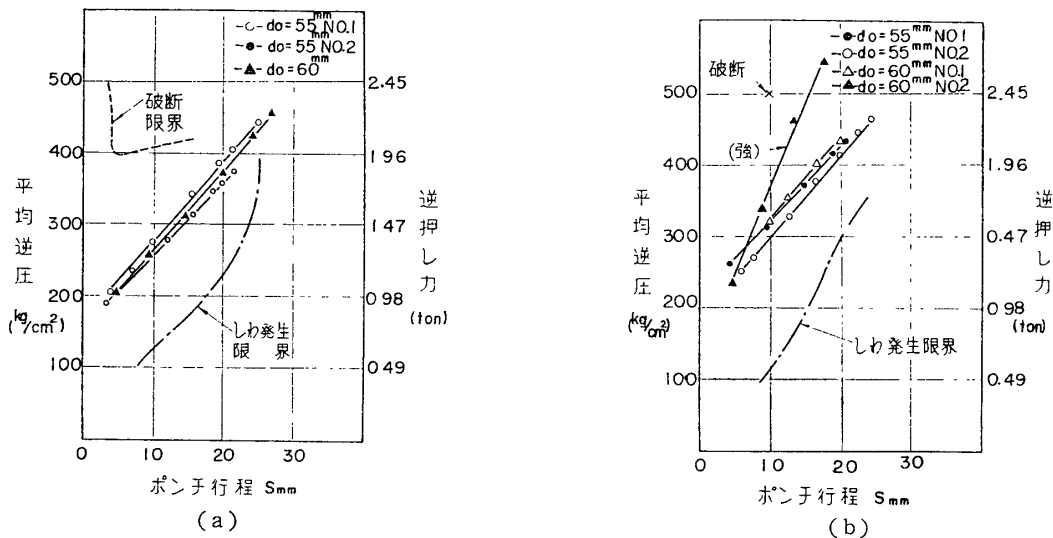
ポンチは、第2図の径  $d_1=25\text{ mm}$  の円筒型で、しわ押えは、板厚の約140%の定間隔方式で、 $0.01\text{ mm}$  程度の調節を要した。バネは、こわさ約  $63\text{ kg/mm}$  (弱) と  $149\text{ kg/mm}$  (強) の2種を使い、素板は第1表の厚み約  $0.3\text{ mm}$  の Cu と M.S. で、 $d_0$  は 60, 55 mm で、絞り比は 2.40, 2.20 である。



### 2.2.2 実験結果と考察

この際、ゴムによる逆圧力分布は液圧によるほど均一ではなく、その決定は現在不可能であるので、プランジャの断面積を用いた平均逆圧力を目安とした。

第7図(a)はCuについての結果で、バネはこわさの弱の方を用い、横軸はポンチ行程  $S$  mm、縦軸は平均逆圧およびバネによる逆押し力で、 $d_0=60, 55$  mmの双方について、実験のばらつきの範囲内で平行な直線的経過で示され、加工は全部成功した。



第7図 三動剛軟(ゴム)成形

(b)は軟鋼の場合であって、 $d_0=55$  mmはいずれも弱バネを使い、60 mmは弱バネと強バネを用いた。弱バネはいずれもほぼ平行の直線で示され、強バネでは当然大きい逆圧で行なわれたのがわかる。60 mmでは加工の最後に多小逆圧不足で、小さなしわができたが、いずれも成形は成功とみてよしい。さらに62.5 mmを試みたが成功しなかった。なお、類似の液圧成形の際の破断限、しわ限を参考に記入してあるので、バネのこわさを更に調整する余地があると考えられるが、いずれも絞り比2.40まで加工は成功しているので、第2表の成形寄与率を参照しても、この方法は機構的にも、慣用プレスをそのまま使えるので、有用性は十分であるといえる。

### 3. 極薄板のコニカルカップ試験

著者らは薄板の深絞り、および複合成形性を比較、評価するために、簡単で、再現性の良好な方法として、いわゆるコニカルカップ試験を発表し、0.5~1.6 mm厚の板について、JIS Z 2249 (1963年)として規格化され、またI. D. D. R. G. [11]の国際協力研究として6か国、12研究室に、10種の同一試片を分配して試験した結果を総合[12]し、上述のことがたしかめられている。最近0.5 mmより薄い、0.3 mm前後の厚みの板についても要望があるので、それらに関する結果をのべる。

#### 3.1 極薄板用の工具

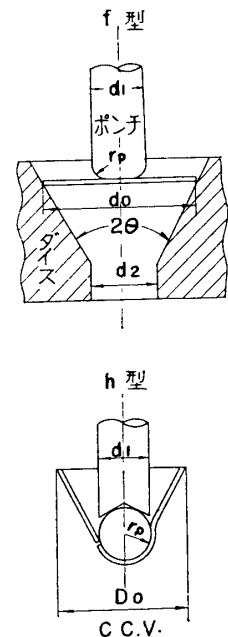
いわゆる、縮フランジ変形を伴う加工では、おもにしわ防止のために、板が薄ければ薄い

ほど、加工は一般に困難になり、厚みの異なる板の成形性を直接比較するのは、特別の場合を除いては、一般に無意味であり、また同一の性質をもち、厚みの異なる板をつくることも、判定することもすこぶる困難であるので、従来のように厚みごとにポンチ、ダイス穴の寸法組み合わせを変えた。この試みの根本は、しわ押え力をかけるには機構的に複雑になるし、しわ押え力のはたらき方、またこれによる摩擦力が、実験結果のばらつきのおもな原因になるので、ダイス面が円錐面である時、板厚の 50~70 倍程度の外径の素板までは、しわ押えなしに簡単に深絞り加工ができ、摩擦の影響も少なく、結果のばらつきも少ないことである。

ダイス面の頂角  $2\theta$  は普通  $60^\circ$  であるが、今回は  $60^\circ$ 、 $40^\circ$  の 2 種とし比較し、一方ポンチ先端が平面の平頭型の f と、半球型の h 群の 2 種とし、半球状を容易に得るために、球軸受用の上級ボールを用いたので、外径はインチ寸法である。

第 3 表 極薄板用工具寸法

板厚 $t_0$ mm	呼称	ポンチ径 $d_1$ mm (")	$r_p$ mm	ダイス穴径 $d_2$ mm	ダイス面角 $2\theta^\circ$
0.5	Af 6	12.70	2.5	14.60	60
	Ah 6	(1/2)		"	60
0.5~0.4	Ef 4	9.52	2.0	10.98	40
	Ef 6	"	2.0	"	60
	Eh 4	(3/8)		"	40
	Eh 6	"		"	60
0.4~0.3	Ff 4	7.93	1.5	9.16	40
	Ff 6	"	1.5	"	60
	Fh 4	(5/16)		"	40
	Fh 6	"		"	60
0.3~0.2	Gf 4	6.35	1.0	7.23	40
	Gf 6	"	1.0	"	60
	Gh 4	(1/4)		"	40
	Gh 6	"		"	60
0.2	Hf 4	4.77	0.5	5.35	40
	Hf 6	"	0.5	"	60
	Hh 4	(3/16)		"	40
	Hh 6	"		"	60



第 3 表は製作した工具の寸法表であって、A は従来の最小の型で、E は 0.5~0.4mm 厚、F は 0.4~0.3mm、G は 0.3~0.2mm、H は 0.2mm 用とし、半球型の h 群のポンチ径はインチで示し、他は一応 mm 寸法で示してある。

### 3.2 実験結果と考察

これらの工具によって、焼鈍した 2S-Al と、スキンプスをかけたままの軟鋼板 M.S. について深絞り加工を行なった結果、でき上りカップの外縁の谷の部分に、加工過程の最後に

ダイス穴に絞りこまれる段階にできたと思われる、小さなしわが肉眼で認められる物もあったが、これらはしごき加工を行なえば消滅する程度であって、深絞り限界を求めるにはさしつかえないと判断できた。同一の厚みにたいして、すなわち 0.5mm 厚には A と E, 0.4mm 厚には E と F, 0.3mm 厚には F と G を用意したのは、しわができてこまる時は小さい方の寸法を用いるためであったが、上述の 2 種の材料ではその必要がなかった。もし他の材料で、小さい寸法を用いても、結果を絞り比、直径比、あるいは直径変化率で示せば、この程度の寸法差による違いは、従来 [13] の経験によれば、実験誤差の範囲内とみてさしつかえないと考えられるし、またダイス面頂角は  $40^\circ$  と  $60^\circ$  とでは、現在のところ差は認められていない。

第 4 表 極薄板の C. C. V. 値

板厚 mm	工具型式	$d_0$ mm	絞り率 $d_1/d_0$	$D_0$ mm	変化率 $D_0/d_0$	材質
0.5	Ah 6	36.0	0.353	27.9	0.78	Al
	"	"	"	27.1	0.75	M. S.
	Eh 6	27.0	0.353	20.9	0.78	Al
	"	"	"	20.4	0.75	M. S.
0.4	Eh 6	27.0	0.352	21.6	0.80	Al
	"	"	"	20.7	0.77	M. S.
	"	28.0	0.340	21.6	"	"
	Fh 6	22.0	0.361	17.2	0.78	Al
"	"	"	16.8	0.77	M. S.	
0.3	Fh 6	22.0	0.361	17.4	0.79	Al
	"	20.0	0.377	14.9	0.75	M. S.
	Gh 6	18.0	0.353	14.2	0.79	Al
	"	"	"	14.0	0.78	M. S.
	"	"	"	13.2	0.73	Pt
0.2	Hh 6	12.0	0.397	9.8	0.82	M. S.

第 4 表はいわゆる C. C. V. 値であって、当然、底が破断するであろう大きな外径  $d_0$  の素板を、半球ポンチ h 群で加工し、破断後の外径  $D_0$  および直径変化率  $D_0/d_0$  を求めて比較する方法の例である。材質は焼鈍 2S-Al の厚み 0.5, 0.4, 0.3mm, スキンパス後の軟鋼 (M. S.) の厚み 0.5, 0.4, 0.3mm, および  $750^\circ\text{C}$  で 1 時間焼鈍した Pt の厚み 0.3mm の板である。工具は Ah6, Eh6, Fh6, Gh6, Hh6 の 5 種で、 $d_0$  は厚みによってそれぞれ異なり、絞り率  $d_1/d_0$  にすると 0.35 前後が多いが、薄い方では 0.36, 0.38, 0.40 付近を使って、 $D_0, D_0/d_0$  を示してある。一見してわかることは、0.5mm 板では Al, M. S. 共に Ah6 でも Eh6 でも絞り率が等しくて、 $D_0/d_0$  も等しい。0.4mm では Eh6 と Fh6 で、寸法の小さい Fh6 の方が絞り率が少し大きく、加工度が低いが、 $D_0/d_0$  ではたいした差はない。

すなわち前述のように、工具寸法にこの程度の差があっても、加工度を絞り率で合わせ、結果も直径変化率で示せば差しつかえないのがわかる。0.3mm板ではFh6とGh6を使ったが、Alで差しつかえないが、M.S.のFh6の場合は絞り率が大きすぎ、加工度が低いため、 $D_0/d_0$ は低く出て、比較には不適當であるのがわかる。潤滑材はすべてマシン油を使用した。

なお $D_0/d_0$ が小さければ、複合成形性、深絞り性がよいと一応判断されるので、これらの材料では、Ptが最良、M.S.が2位、Alが3位ということになる。M.S. 0.2mmはスキンプスの影響のためか、良好ではない。

第5表 Cu, M.S. の限界深絞り比

板厚 mm	工具型式	Cu (焼鈍)		M.S. (焼鈍)	
		$d_0$ mm	絞り比	$d_0$ mm	絞り比
0.3	Ff 6	19.58	2.47	20.30	2.56
	Gf 6	15.46	2.44	15.77	2.49
	複動液圧	65.0	2.60	65.0	2.60

第5表は複動液圧成形を行なった、焼鈍Cu, 焼鈍M.S.の0.3mm板についてコニカルカップ限界深絞り比を求めて比較した結果で、工具は平頭ポンチを用いるFf6, Gf6を使い、破断しないで加工できる最大の $d_0$ を求めて、絞り比に換算すると、いずれも2.50前後である。潤滑材はマシン油で良好ではないが、剛体ポンチ、ダイスを使う普通の方法では、Ff, Gfは最良のものと考えられるが、複動液圧法によれば、より径が大きくて、径厚比の大きい困難な場合でも、2.60以上という高度の成形限界が得られて、より優秀であるのは注目すべき事からである。

#### 4. 反射モアレ法の応用

P. S. Theocaris によって、表面の微小変位を反射モアレ法で調べる実験方法が始められた。この方法は、測定面に測定子を機械的に接触させる必要がないので、接触圧力や、測定子先端形状の影響を除く苦勞がなく、またある広さ範囲の状況が一目してわかる利点があり、特に薄板に関する測定には便利である場合が多い。そこで二つの例を述べたいと思う。

##### 4.1 深絞り製品底の弯曲

深絞り加工では、素板がポンチ表面形状になじむように加工されるが、成形終了後、外力と工具を除くと、素板の弾性回復により形状が多小変化するのが通常である。前述のいろいろな場合でも同様で、先端に平面部分のある平頭ポンチを用いても、製品の底は必ずしも平面ではない。そこで、この程度を二つの例で示したいと思う。

##### 4.1.1 実験装置と方法

第8図は実験装置の写真であって、試料台上に光学格子と試料の組み合わせを固定し、この台の軸のまわりに回転し得る2本の取り付棒があり、それぞれに光源とカメラを取り付け、光源からの入射光、試料面からの反射光の角度を適当にとることができる。光源は超高

圧水銀灯であって、フィルタにより  $5461 \text{ \AA}$  の単色平行光線を光学格子面の法線方向と  $i$  の傾きに入射させ、格子を通して試料の面から反射した光と、格子面での反射光とが干渉し、モアレ縞を生ずるので、これをカメラで撮影して解析する。格子面と試料面との間の法線距離を  $h$  とすれば、モアレ縞の次数が一つ異なる場所間での距離差  $\Delta h$  は

$$\Delta h = p \cot i = 0.01732 \text{ mm} = 17.32 \mu$$

$$p = \text{格子線のピッチで } 0.01 \text{ mm} = 10 \mu,$$

$$i = 30^\circ$$

が現在の場合の数値である。

#### 4.1.2 実験結果と考察

第 9 図は結果の写真の例であって、(a) は複動液圧成形した M. S. 板の製品の底を格子面にはほぼ平行においた結果で、ほとんど縞 1 本程度の変化しか認めがたいので、(b) は同じ試料を故意に少し傾けた結果で、中心はポンチの空気穴のために少し凹んで縞が曲っている

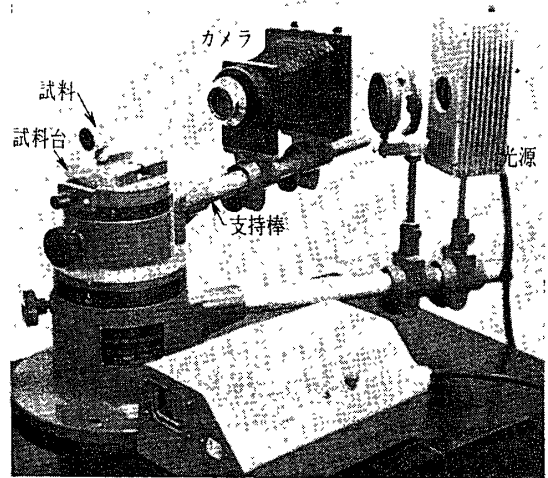
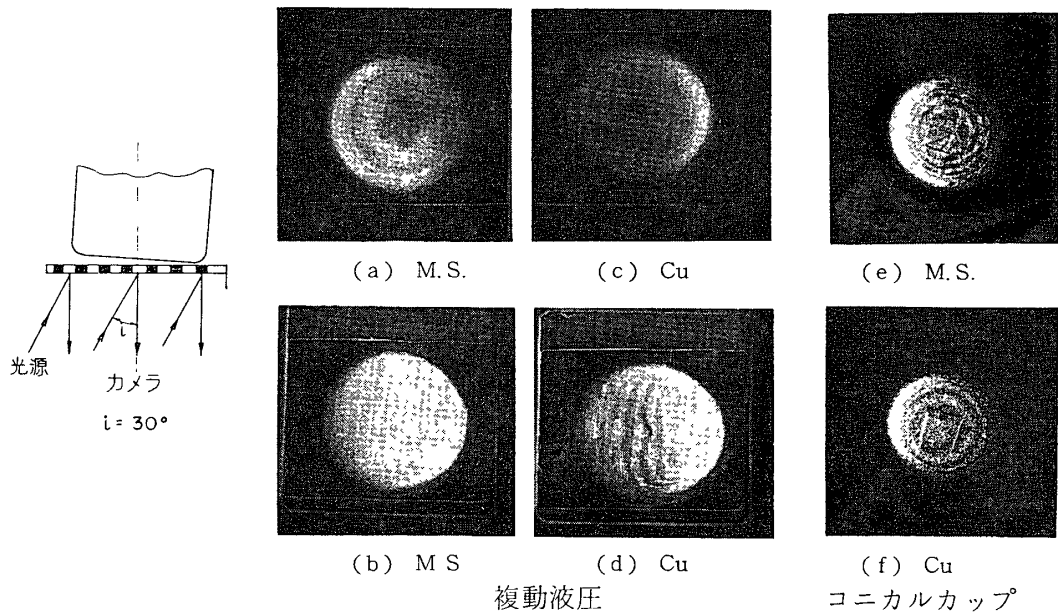


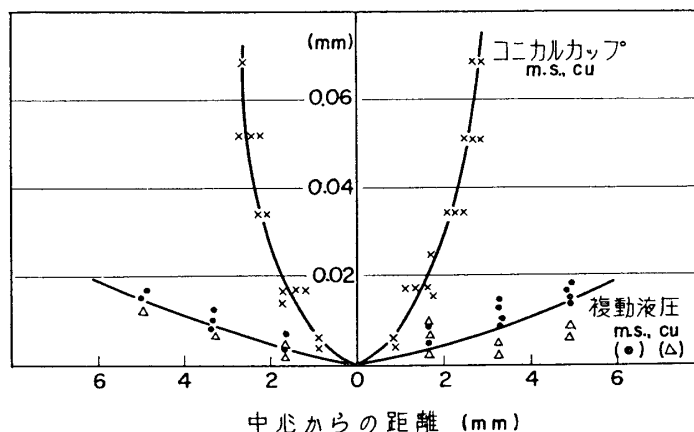
写真 8 モアレ縞写真撮影装置



第 9 図 底面の弯曲測定例

が、数本の縞がほぼ平行に現われ、平面性がすこぶる良好であるのがわかる。(c) は複動液圧成形した Cu の底を格子面にはほぼ平行においた結果で、(d) は故意に傾けた場合で、M. S. と同様なのがわかる。比較のために (e) は平頭ポンチとコニカルダイスの組み合わせの Ff6 で加工した M. S. 板製品の底の結果で、(f) は同じく Cu の場合の写真であって、いずれも数本の縞が同心状に現れ、底の平面度は悪く、相当弯曲しているのが一見明らかである。

この写真をマイクロフォトメータにかけ、縞間隔を決定し、横軸に中心からの距離として縞の位置を mm で示し、縦軸には前式で示す縞次数の違いごとの  $\Delta h$  から表面の凹凸を 0.01 mm 単位で示したのが第 10 図であって、これらが底面のある範囲について、中心付近の軸断面の形状を示すわけであって、複動液圧成形によれば、M.S. も Cu も中心付近で直径 10mm ぐらいの範囲の凹凸は  $0.01\text{ mm} = 10\mu$  程度であり、他方コニカルカップ成形では直径 5mm ぐらいの範囲で  $0.07\text{ mm} = 70\mu$  程度の彎曲があり、平面性はよくないのがわかる。



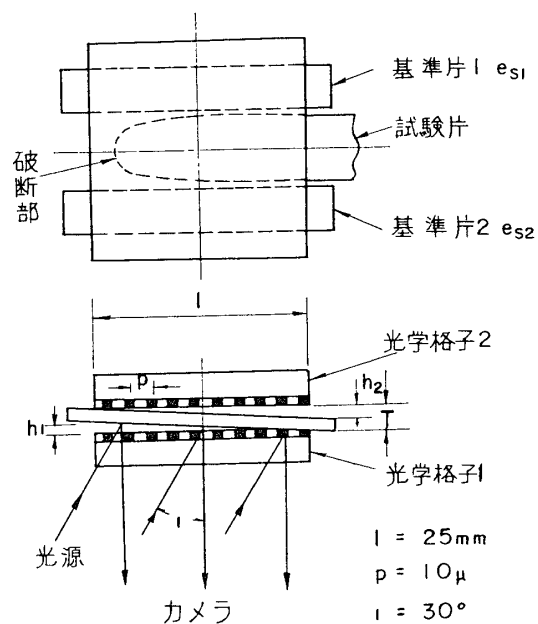
第 10 図 底面の形状

#### 4.2 板厚分布の測定と塑性ひずみ比 $r$ 値の算出

0.3~1.6 mm 厚の板を取り扱い、ひずみ、ひずみ比  $r$  を問題にする関係上、厚みの値として  $1\sim 2\mu$  までの数値が必要な場合が多く、慣用の測定器では、機械的接触子の先端形状や、接触圧に関連して解決困難な問題が多いので、これらにわずらわされないよう、2枚の光学格子を使って、表裏2面のモアレ縞から処理する方法を考案し、実験した。

##### 4.2.1 実験装置と方法

第 11 図に示すように、互に向合った2枚の光学格子 1, 2 をおき、その間隔は、測定しようとする試験片の板厚よりわずかに大きくしておき、この間隙に、試験片の平均板厚にはほぼ近い板厚  $e_{s1}$ ,  $e_{s2}$  のわかった2枚の基準片と、それらに破断した引張り試験片をはさんでそう入し、これら3枚は故意に傾け、図でわかるように、光学格子の縁にいずれかの面が接触するようにする。これらの組み合わせセットを第 8 図の実験装置の資料台に取り付け、光学格子 1 を通して、試験片

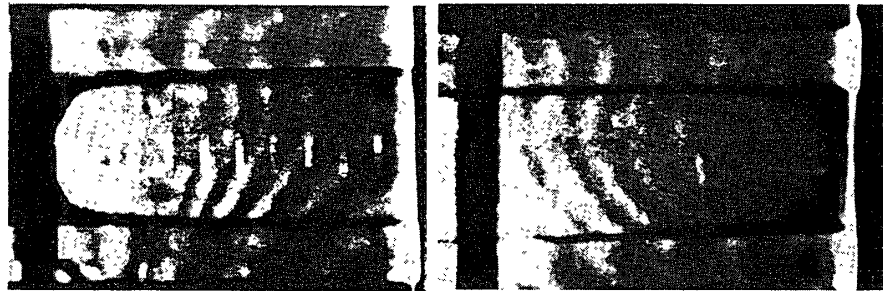


第 11 図 引張り試片の板厚測定セット

と基準片の表面に光源から  $5461 \text{ \AA}$  の単色平行光を斜めに投射し，試料面と光学格子面からの反射光の干渉により，光学格子にモアレ縞が現れ，カメラによってその写真を撮影することができる。

#### 4.2.2 実験結果と考察

第 12 図は撮影した写真の例であって，(a) は光学格子 1 についてのもので，(b) はセッ



(a) (b)

写真 12 表裏面のモアレ縞

トをのせたまま資料台を  $180^\circ$  回転して光学格子 2 について撮影した例である。上下には基準片，中央には試験片があって，基準片の面上では，ほぼ平行な直線的モアレ縞が数本見え，試験片の面上では弯曲した数本のモアレ縞と，面上にあらかじめ野書いておいた位置の基準となる標点マークがあり，また破断部の輪郭もはっきりわかる。入射角  $i$  は  $30^\circ$ ，格子のピッチ  $p$  は  $10 \mu$  であるから，縞 1 本違う場所では格子面との距離の差  $\Delta h = 0.01732 \text{ mm} = 17.32 \mu$  である。モアレ縞は眼で見ると，その名の示すようにあまりはっきりしないが，マイクロフォトメータにかけると，肉眼よりも明らかに濃淡の差がわかり，しかも肉眼で場所を見ながら濃淡曲線を書かすことができるので，縞の位置，標点マークの位置は数量的に決

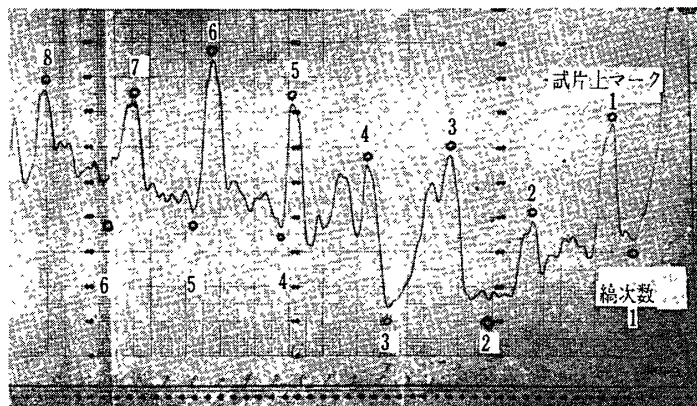
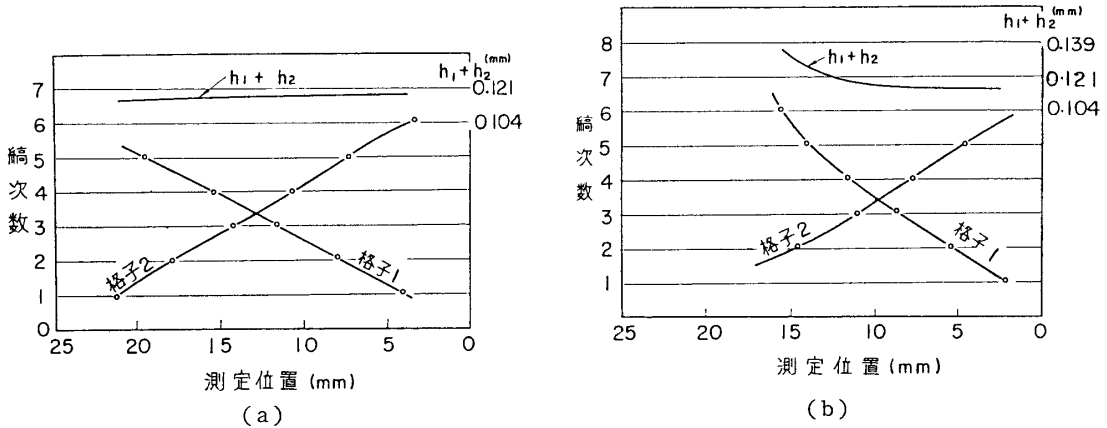


写真 13 ミクロフォトメータ記録例

定するのが容易になり，第 13 図はその記録の一例であって，縞次数一つの違いは間隙として約  $20 \mu$  の差であるから， $1 \sim 2 \mu$  まで読みとるには十分である。

光学格子 1 と試料の面との間の間隔  $h_1$  の分布は，縞次数の分布から  $h_1 = \sum \Delta h$  として求められ，光学格子 2 と試料面との間隔分布は  $h_2 = \sum \Delta h$  として求められる。

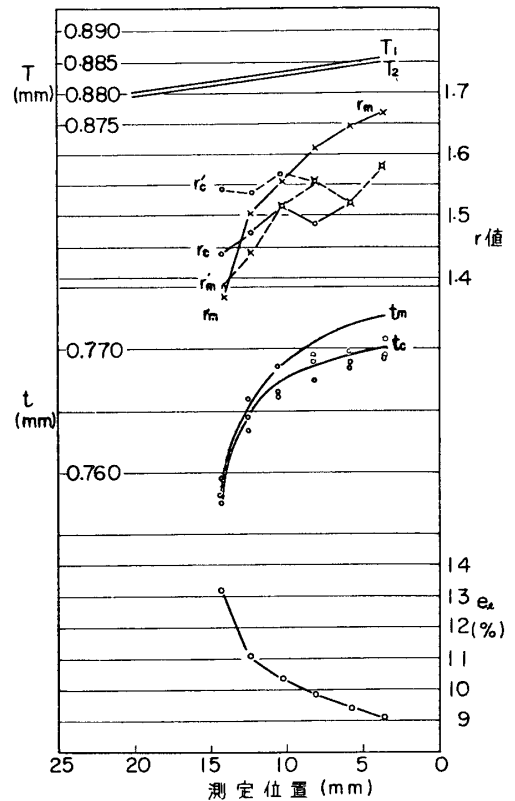


第14図 縞の位置と  $h_1+h_2$

第14図(a)は、基準片1の位置で縞次数の分布と、それを合成して  $h_1+h_2$  を求めた例であり、(b)図は試験片の幅方向のほぼ中央断面に求めてそれぞれの縞次数の分布と  $h_1+h_2$  である。

前述のように基準片の厚み  $e_{s1}, e_{s2}$  は既知であるから、それらをおいてある位置で、2枚の光学格子間の距離  $T_1, T_2$  は  $T_1=h_1+h_2+e_{s1}$ ,  $T_2=h_1+h_2+e_{s2}$  として求められ、これらから光学格子は平面と考えて、試験片をおいた場所の距離  $T$  は比例配分で算出され、その場所の  $h_1+h_2$  がわかれば、板厚  $t$  は  $t=T-(h_1+h_2)$  で算出されるし、もし格子間の距離があらかじめわかっているならば、基準片は必要でなく、特に平行であれば手続は簡単である。

第15図は冷延軟鋼の引張り試験片について得た結果の例であって、最初厚み  $t_0=0.800$  mm, 幅  $w_0=10.02$  mm のもので、 $T_1, T_2$  は  $0.880 \sim 0.885$  mm の間で少し傾いており、格子間隙は平行ではない。第14図(b)のようにして求めた中央断面の厚み分布は  $t_c$  であって、数回の独立に求めた結果のばらつきは  $\pm 1.5 \mu$  程度であって、再現性は十分である。また12図から見てわかるように、縞の分布は試片上では曲がっており、間隙の分布、ひいては板厚の分布は一様ではなく、中央部では間隙が大きく、板厚は薄く、破断部に向っては薄くなっているのが予測される。それで、中央断面に平行に4断面について板厚分布をもとめ、中央断面も含めて5か所の平均をとったのが  $t_m$  であって、破断部から離れた場所では  $t_m > t_c$  で中央断面がより薄くなっているのがわかる。



第15図 板厚,  $r$ , 伸びひずみ分布

それで、中央断面に平行に4断面について板厚分布をもとめ、中央断面も含めて5か所の平均をとったのが  $t_m$  であって、破断部から離れた場所では  $t_m > t_c$  で中央断面がより薄くなっているのがわかる。



更に通常、塑性ひずみ比  $r$  はきまった伸びひずみについて求められるが、写真からいろいろな場所で  $t_c$ ,  $t_m$  から、

$$r_c = \ln(w_0/w) / \ln(t_0/t_c), \quad r_m = \ln(w_0/w) / \ln(t_0/t_m)$$

を算出し、他方、標点マークから中央断面の伸びひずみ  $e_l$  を算出して、これらを図示してある。 $r_c$ ,  $r_m$  とも一定ではなく、この場合のような寸法試片で引張ると、伸びひずみの大きい所では小さい値、すなわち厚み変化が大きくなる傾向が示される。参考のために、厚みを理研測微指示計で  $1\mu$  まで読んだものから算出したのを  $r_c'$ ,  $r_m'$  として図示してあるが、 $r_m'$  についてはほぼ同様な傾向がみられる。

結局、薄板の厚み測定を機械的接触なしに行なうのは可能であって、手続を簡略化するのは、今後の課題であると考えられる。

## 5. む す び

以上を要約すると

1) 厚み 0.3mm 前後の極薄板についても、剛軟成形の一つである複動液圧成形は有利であって、Pt, Ag, Al, Cu, M. S. 等について、ポンチ径 25mm 程度では、深絞り比 2.4, 2.6 まで加工は可能である。

2) 慣用クッション付複動プレスで行なえる三動剛軟成形は、複動液圧成形とは本質的の差はなく、深絞り比 2.4 まで加工可能で、量産的に有利である。

3) 極薄板についても、工具寸法を適当にえらべばコニカルカップ試験は可能であって、板厚に対し適当な寸法組み合わせを示した。

4) 反射モアレ縞を利用すると、機械的接触なしに表面形状の測定が可能で、薄板成形品の表面形状精度、薄板試片の厚み分布測定と塑性ひずみ比の算出の例を示した。

以上の研究を行なうにあたり、終始多大の助力を与えられた、当所の河田幸三教授、小林昭助教授、小原嗣朗助教授、それぞれの研究室員の諸君、ならびに東大物性研究所井村徹助教授と研究室員、また実験の遂行に当り、効果的な援助と協力を与えられた田中貴金属工業、宮部技術研究所に深甚なる謝意を表す。

1968年3月27日 材料部

## 参 考 文 献

- [1] 仮称である。
- [2] たとえば、福井伸二、三国英男、工藤英明：東大理工研報告，1—2 (1947)，27。  
福井伸二，工藤英明，吉田清太，大川陽康：東大理工研報告，6—6 (1952)，351。
- [3] P. S. Theocaris: Exp. Mech. (1964—6)，153。
- [4] たとえば，G. B. Lewis: Machinery (E) 80 (1952)，160， R. B. Schulz: Machinery (A) (1950)，172。
- [5] S. Fukui, K. Yoshida, K. Abe: Rep. Aero. Res. Inst. Univ. Tokyo: 24—333(1958)，77。
- [6] 福井伸二，吉田清太，阿部邦雄，河村忠治：日本機械学会誌，62—489 (1959)，93。
- [7] たとえば，E. Buerk: I. D. D. R. G. 4th Biennial Colloquium, Liège (Belgium) (1966)。
- [8] D. J. Campion: Sheet Metal Industry, 42—459 (1965)，507, S. Johnsson: ibid., 43—474 (1966)，772。
- [9] G. Sachs: H. B. d. Met. Phys. III 143。

- [10]  $r = \ln(w_0/w) / \ln(t_0/t)$ ,  $r' = \ln(w_0/w) / \ln(wl/w_0l_0)$   $w_0, t_0, l_0$ : 最初幅, 厚, 長さ,  $w, t, l$ : 変形後幅, 厚, 長さ.
- [11] I. D. D. R. G.: International Deep Drawing Research Group.
- [12] G. Pomey: Rev. Métallurgie (1966—10), 823.
- [13] 福井伸二, 吉田清太, 阿部邦雄, 尾崎康二: 理研報告, 38—5 (1962—9), 539.

## 福井教授 発表論文リスト

論文題目	著者	発表誌	巻・号(年)・頁
○平削工具の切削作用に関する研究	大越 諄・福井伸二	火兵学会誌	26— 4(1932) 93
○Researches on the Cutting Action of Planing Tool by Microcinematographic, Photoelastic and Piezoelectric Methods	"	Sci. Pap. Inst. Phys. Chem. Res.	22—455(1933) 97
○偏光弾性現象における光学的流れに就て	湯浅亀一・福井伸二・大西 正	機械学会誌	36—195(1933)447
○顕微鏡活動写真的方法による Planing Tool の Cutting Action の研究 (第1報)	大越 諄・福井伸二	精密機械	1— 9(1934)332
" (第2報)	"	"	1— 10(1934)381
○光弾性学的方法による切削作用の研究	大越 諄, 福井伸二	精密機械	I— 15(1934) 6
○深絞り工作法に関する研究(第1報)	福井伸二	機械学会誌	38—221(1935)635
○深絞り工作法に就いて (第2報)	"	"	40—241(1937)326
○電熱式直接還元によるマグネシウム製造法の研究	尾間一彦・福井伸二	旭化学工業奨励会研究報告	2(1936) 1
○金属板の深絞りに関する研究	福井伸二	応用物理	6— 12(1937)565
○Researches on the Deep-Drawing Process	"	Sci. Pap. Inst. Phys. Chem. Res.	34—849(1938)1422
○ " (Appendix)	"	"	35—885(1939)373
○深絞り工作法に関する研究(第1報)	"	理研彙報	17— 12(1938)1145
○ " (第2報)	"	"	20— 9(1941)641
○設計及び工作に必要な応力集中の知識に就いて	福井伸二	日本機械学会誌	46—317(1943)588
○軽合金薄板の被加工性試験(第1報) —深絞り加工	福井伸二・三国英男・工藤英明	東大理工研報告	1— 2(1947) 27
○軽合金薄板の被加工性試験について(第2報) —剪断加工の場合	福井伸二・三国英男・三木 教	"	1—3・4(1947) 44
○二円孔を対称にもつ平板の応力分布に関する偏光弾性学的研究	福井伸二・伊藤勝彦	理研彙報	24— 3(1948) 95
○熱間加工域に於ける深絞り加工	福井伸二	科研報告	24—10・12(1948)465
○軽合金薄板のプレス加工	"	日本機械学会	(1948)914
○加工硬化した鋼材の疲労 (第1報)	福井伸二・佐藤四郎	東大理工研報告	3—11・12(1949)311
" (第2報)	"	"	4—7・8(1950)210
" (第3報)	"	"	5— 6(1951)259
" (第4報)	"	"	6— 4(1952)259
" (第5報)	福井伸二・佐藤四郎・北川義雄	"	6— 6(1952)359
" (第6報)	"	"	7— 1(1953) 53
" (第7報)	"	"	7— 3(1953)135
" (第8報)	"	"	7— 6(1953)245
" (第9報)	"	"	8— 9(1954)265
○薄板の剪断加工の研究 (第1報)	福井伸二・前田禎三	精密機械	16— 3(1950) 70
" (第2報)	"	"	16— 8(1950)216
○深絞り加工に於ける耳と引張試験に於ける一異方性	福井伸二・工藤英明	東大理工研報告	4—1・2(1950) 33

論文題目	著者	発表誌	巻・号(年)・頁
○金属薄板の引張試験に於ける試験片形状の影響	福井伸二・工藤英明・吉田清太	"	4—3・4(1950)107
○小荷重によるビッカース硬度について	福井伸二・工藤英明・清野次郎	東大理工研報告	4—7・8(1950)204
○中央線の片側に円孔のある板、梁の曲げ応力分布について	福井伸二・三木 教・久能木真人	"	5—3・4(1951)113
○尿素樹脂石膏の二、三の特性	福井伸二・伊藤勝彦	高分子化学	8— 79(1951)396
○打抜歯車の試作について	福井伸二・前田禎三	学振第95委「時計生産技術の研究」	(1951)174
○時計用歯車の機械切りと打抜き	福井伸二・前田禎三・中山日出雄	"	(1951)179
○四角筒容器の深絞り加工(第1報)	福井伸二・竹山寿夫・吉田清太	東大理工研報告	5—3・4(1951)121
○ " (第2報)	"	"	8— 1(1954) 13
○18—8 不銹鋼の剪断加工	福井伸二・久能木真人	科研報告	28— 3(1952)139
○アルミニウム軽合金板の深絞り加工について	福井伸二・伊藤勝彦	科研報告	28— 3(1952)171
○深絞り加工の限界	福井伸二・竹山寿夫・吉田清太	日本機械学会誌	55—405(1952)640
○深絞り性試験についての試み	福井伸二・工藤英明・吉田清太・大川陽康	東大理工研報告	6— 6(1952)351
○円筒容器の深絞り加工における寸法効果(第1報)	福井伸二・吉田清太・阿部邦雄	"	6— 2(1952)101
○ " (第2報)	"	"	8— 1(1954) 23
○薄肉管の冷間引抜加工の研究(第1報) 芯金引き加工の実験	福井伸二・谷口和雄・菊地健夫	精密機械	19— 8(1952)
○不銹鋼の深絞り加工	福井伸二・久能木真人	科研報告	29— 2(1953) 88
○単純引張或は圧縮加工材の引張、圧縮及び曲げについて	福井伸二・佐藤四郎	東大理工研報告	7— 6(1953)237
○高分子の摩擦及び摩耗	福井伸二・伊藤勝彦	高分子	2— 9(1953)426
○塑性加工機械	福井伸二	日本機械学会誌	57—420(1954) 17
○薄肉管の引抜加工 (第1報)	福井伸二・佐田登志夫・福田重穂	科研報告	29—5・6(1954)317
○電気抵抗線を利用した荷重計及びトルク計	福井伸二・久能木真人・重松友道	"	29—5・6(1954)329
○構造用特殊鋼の疲労並びに静的強度	井口常雄・福井伸二・三木 教	東大理工研報告	8— 2(1954) 79
○延性金属の大きな歪範囲にわたる応力—歪曲線の求め方について	福井伸二・工藤英明・吉田清太・阿部邦雄	"	8— 3(1954)135
○薄板の円筒深絞り加工の全歪説による解析	福井伸二・由利裕三・吉田清太	"	8— 4(1954)179
○自転車部品等工業材料の塑性加工法に関する研究	福井伸二	科研委託研究報告	(1954) 43
○放電加工による鍛圧型の製造法に関する研究	"	"	(1954) 60
○プレス・引抜、鍛造、圧延等の塑性加工	"	"	(1955) 18
○材料の機械的強度及び被加工性の研究	福井伸二	科研委託研究報告	(1955)152
○自転車の変速歯車の引抜法	"	"	(1955)305

論文題目	著者	発表誌	巻・号(年)・頁
○深絞り加工研究の近況	福井伸二・吉田清太	日本機械学会誌	58—433(1955)200
○プラスチックの塑性加工	福井伸二・伊藤勝彦	"	58—433(1955)227
○塑性加工用の減摩材料	福井伸二・久能木真人	"	58—434(1955)181
○冷間押出加工	福井伸二・工藤英明・清野次郎	日本機械学会誌	58—434(1955)248
○新しい深絞り加工	福井伸二・吉田清太	日本金属学会誌	20— 10(1956)A243
○長方形筒容器の深絞り加工	福井伸二・吉田清太・阿部邦雄・堀田雄次郎	日本機械学会誌	59—455(1956)898
○Study on Impact Extrusion Method for Non-Ferrous Metals	福井伸二・工藤英明・清野次郎	東大理工研報告	11— 9(1957) 91
○固定絞りビードについて	福井伸二・吉田清太	科研報告	33— 5(1957)279
○Analysis for Deep-Drawing of Cylindrical Shell based on Total Strain Theory and Some Formability Tests	福井伸二・由利裕三・吉田清太	Rep. Aero. Res. Inst., Tokyo Univ.	24—332(1958) 43
○Deep-Drawing of Cylindrical Shell according to the So-called Hydroform Method	福井伸二・吉田清太・阿部邦雄	"	24—333(1958) 77
○The Conical Cup Test as a Method of Testing the Drawing and Forming Qualities of Sheet Steel	コニカルカップテスト研究会	—	(1958) 1
○高張力鋼を中心とした金属材料の冷間加工性の研究	福井伸二・吉田清太	科研委託研究報告	(1958) 1
○東大理工学研究所の水素液化機	福井伸二・大島恵一・永野 弘, 外6名	東大理工研報告	12— 8(1958)121
○薄板のプレス成形技術に関する研究	福井伸二・吉田清太・阿部邦雄	科研委託研究報告	(1959) 1
○複動式液圧成形法	福井伸二・吉田清太・阿部邦雄・河村忠治	日本機械学会誌	62—489(1959)1445
○薄板のプレス成形用潤滑剤の選定と二, 三の特性	福井伸二・吉田清太・今岡経雄	"	62—489(1959)1563
○薄板のプレス成形性とコニカルカップテスト	福井伸二・吉田清太	"	62—489(1959)1579
○Double-action Hydroforming Process	Shinji FUKUI, Kiyota YOSHIDA, and Kunio ABE	Sci. Pap., I. P. C. R.	54— 2(1960)206
○On the Correlation among Experimental Values obtained in Various Forming Tests	"	"	54— 2(1960)199
○冷間に於ける開放型ダイス押出し加工	福井伸二・清野次郎	東大航研集報	2— 2(1960) 82
○プラズマジェットによる材料のアブレーション特性の研究 (第1報)	福井伸二・河田幸三・北川義雄	"	2— 6(1961)296
○薄板のプレス成形における潤滑と潤滑油に関する研究	吉田清太・今岡経雄・福井伸二	理研報告	37— 5(1961)
○金属薄板の深絞り研究の回顧	福井伸二	塑性と加工	2— 10(1961)539
○液圧成形法による薄板の深絞り	福井伸二・吉田清太・阿部邦雄	"	" 715
○薄板の各種成形性試験値間の相関	福井伸二・吉田清太・阿部邦雄	"	" 665
○冷間における二, 三のすえ込み加工について	清野次郎・福井伸二	塑性と加工	2— 10(1961)749

論文題目	著者	発表誌	巻・号(年)・頁
○薄板の深絞り一張出し複合成形性試験法(重合的複合成形性の場合)	吉田清太・吉井康一・阿部邦雄・福井伸二	理研報告	37— 6(1961)
○Measurement of the Mean Friction Coefficient in Sheet Drawing	Sinji FUKUI and Kiyota YOSHIDA	Int. J. Mach. Tool, Des. Res.	2(1962) 19
○鋼板の深絞り試験法	福井伸二・吉田清太・阿部邦雄	日本金属学会報	1— 5(1962)
○The Effect of Roughness of Sheet Metal and Tool Surface on Deep Drawability	Shinji FUKUI, Kiyota YOSHIDA, Kunio ABE and Koji OZAKI	Sci. Pap. I. P. C. R.	56— 1(1962)
○高エネルギー速度加工の基礎的研究(第1報)	福井伸二・河田幸三・清野次郎	東大航研集報	3— 1(1962) 22
○金属薄板の高速引張りでの伸びについて(高エネルギー速度加工の研究)(第2報)	福井伸二・河田幸三・清野次郎	東大航研集報	3— 6(1963)361
○深絞り性に及ぼす工具と薄板の表面あらさの影響	福井伸二・吉田清太・阿部邦雄・尾崎康二	塑性と加工	3— 14(1962)
○コニカルカップテストの試験寸法, ならびに試験値に対する検討	福井伸二・吉田清太・阿部邦雄・尾崎康二	理研報告	38— 5(1962)
○Some Aspects of Friction in Metal Strip Drawing	Shinji FUKUI, Kiyota YOSHIDA and Kunio ABE	Int. J. Mech. Sci.	4 (1962)297
○ひずみの凍結によるストレッチャーストレインの発生の予知試験	尾崎康二・吉田清太・阿部邦雄・福井伸二	塑性と加工	4— 33(1963)624
○薄鋼板引張試験片のつかみ部肩半径が引張特性に及ぼす影響	吉田清太・津山義人・錦織勝三・林 豊・宮内邦雄・福井伸二	理研報告	39— 6(1963)
○薄鋼板引張試験片のつかみ幅が引張特性に及ぼす影響	吉田清太・林 豊・津山義人・錦織勝三・吉田和夫・宮内邦雄・阿部邦雄・福井伸二	理研報告	39— 6(1963)
○薄鋼板引張試験片のつかみ位置が引張特性に及ぼす影響	吉田清太・錦織勝三・津山義人・林 豊・吉田和夫・宮内邦雄・阿部邦雄・福井伸二	"	"
○アルミニウム合金の冷間押し出し加工	福井伸二・清野次郎・箕箸俊一	塑性と加工	4— 25(1963) 74
○The Effect of Surface Roughness of Sheets and Tools on Deep-Drawability	Shinji FUKUI Kiyota YOSHIDA and Kunio ABE	Sheet Metal Indust.	oct(1963)739
○薄鋼板引張試験片平行部の寸法効果	吉田清太・宮内邦雄・布施敏夫・矢能 彰・阿部邦雄・福井伸二	理研報告	40— 1(1964)
○Studies on Tensile Test and New Recording Apparatus for Sheet Metal	Shinji FUKUI Kiyota YOSHIDA Katsuzo NISHIKIORI Yutaka HAYASHI Yoshito TSUYAMA Kazuo YOSHIDA Kunio ABE Akira YANO and Toshio FUSE	Sci. Pap. I. P. C. R.	58— 1(1964)
○Analysis of the Plastic Wave Propagation in High Velocity Tension of a Bar of Finite Length (Linearly Work Hardening Material)	Kozo KAWATA, Shinji FUKUI, Jiro SEINO	Inst. of space and Aero. Sci., Univ. of Tokyo, Report	29— 3(1964)

論文題目	著者	発表誌	巻・号(年)・頁
○高速引張りおよび爆発成形による伸び	福井伸二・河田幸三・清野次郎	日本機械学会誌	67—542(1964)498
○高速張りにおける有限長試験片の挙動の理論的解析	河田幸三・福井伸二・清野次郎	東大宇宙研報告	1—4・A (1965)390
○各種金属薄板の引張試験片の寸法効果	宮内邦雄・吉田清太・福井伸二	理研報告	41—1 (1965)101
○非金属介在物を含む低炭素鋼の疲労強度におよぼすあらかじめ引張り加工の影響	佐藤四郎・角井正義・福井伸二・清野次郎	材料	14—140(1965)389
○Sheet Metal Forming Research in Japan	Shinji FUKUI Kiyota YOSHIDA and Shiro KOBAYASHI	Trans. ASME Jour. Fngg. Industry	88・B-1(1966)101
○Stretch-Expand Forming	Shinji FUKUI Kiyota YOSHIDA and Kunio ABE	Sci. Pap. I. P. C. R.	60— 1(1966)
○F/W FRP の力学的特性と測定法について(F/W 円筒の弾性係数の決定)(1)	福井伸二・河田幸三・小林 昭・橋本彰三	東大宇宙研報告	2—2・A (1966)497
○F/W FRP の力学的特性と測定法について(2) (F/W円筒の ISAS リングテスト及びバーストテストによる円周方向強度の評価)	河田幸三・福井伸二・小林 昭・橋本彰三	東大宇宙研報告	2—2・A (1966)507
○貴金属の底付円筒容器押し加工	福井伸二・清野次郎・松本喜八郎	塑性と加工	8— 76(1967)232
○Evaluation of Hoop Strength of Filament-Wound Cylinders by Newly-Proposed ISAS Ring Test and Burst Test	Kozo KAWATA Shinji FUKUI Akira KOBAYASHI and Shozo HASHIMOTO	ISAS Univ. Tokyo, Report	No. 409 (1967)
○Some Theoretical and Experimental Studies on the Width Variation Effects for the Filament-Wound Cylinders	Shinji FUKUI Kozo KAWATA Akira KOBAYASHI Nobuhiro TAKADA Shozo HASHIMOTO Nobuo OTANI and Akira Hondo.	Proc. 6th ISTS	(1967)
○Some Analytical and Experimental Investigations on High Velocity Elongation of Sheet Materials by Tensile Shock	Kozo KAWATA Shinji FUKUI Jiro SEINO and Nobuhiro TAKADA	Preprint for IUTAM Behaviour of Dense Media under High Dynamic Pressure Symposium	(Sept., 1967, Paris)
○Effects of Tensile Speed on the Deformability of Sheet Metals	Shinji FUKUI Kozo KAWATA Nobuhiro TAKADA and Jiro SEINO	Proc. Int. Conf. on Manufacturing Technology	(Sept., 1967, Michigan) 1157
○薄板成形に関する研究補遺 (極薄板の成形とモアレ縞の利用)	福井伸二・清野次郎・高田信宏・清水 進	東大宇宙研報告	4— 2(1968)201