

平成22年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「割型構造のボルトレス締結方式によるプレス金型製造技術の確立」

## 研究開発成果等報告書

平成23年 3月

委託者 中部経済産業局

再委託先 財団法人岐阜県産業経済振興センター



## 目 次

第1章	研究開発の概要	
(1)	研究開発の背景・研究目的及び目標	1
(2)	研究体制(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)	2
(3)	成果概要	5
(4)	当該プロジェクト連絡窓口	8
第2章	本論	
(1)	金型材料のヤング率測定	9
(2)	金型材料の摩擦摩耗特性測定	15
(3)	金型材料のその他の特性測定	19
(4)	焼入れ鋼加工に対するツール及びホルダーの選定	21
(5)	マシニングセンタを用いた焼入れ鋼加工に対する加工条件の研究	22
(6)	キー構造による金型の自動調芯構造の検討	26
(7)	割型締結に係るキー構造の研究	38
(8)	キー構造による実験用(試作用)金型の作製	47
(9)	ボルトレス金型構造等の評価	60
第3章	全体総括	64

## 第1章 研究開発の概要

### (1) 研究開発の背景・研究目的及び目標

自動車産業界では国際競争が激化する中で、短納期化・低コスト化が最大のポイントとなっている。そのために、部品の切削及び鍛造工程のプレス工程への置き換えや形状の複合化、工程間の短縮等が求められている。プレス金型に関しては、型交換や金型メンテナンス等の時間短縮が最大のポイントとなることから、加工精度を維持しながらボルトを使用せずキー構造による金型（ボルトレス金型）の製造技術を開発し、低コスト化を図るものである。

ボルトレス金型の研究開発に関しては、プレス金型を構成する割型の材料構成（高硬度材料と普通材料の組み合わせ）から、割型の加工精度の向上、割型を組み合わせるキー構造及びプレス加工中に生じる弾性変形や緩み、偏芯等に対する自動調整構造をどのように構築するか等の課題・問題の解決を図る必要がある。また、川下製造業者のニーズに対応するには、加工精度が切削加工や研削加工における精度以上のクリアランスと従来の型寿命以上を達成する必要がある。

これらを踏まえ、本研究開発では、加工精度の維持を図りながら、金型の製造を短期間で可能とし、メンテナンス時間の短縮や、部品点数の減少を図る金型の製造技術の確立を図るものである。

本研究開発では、金型部材（金型部品構成各セグメント）の加工精度の向上を図るために、5軸の高剛性工作機械を活用し、適正工具等の選定を行いながら最適加工条件の実証実験を実施する。また、キー構造による実験用金型を試作し、これを活用しながら自動調芯構造の研究と、プレス工程で生ずる弾性変形や歪み等の評価・分析を通じ、簡易金型構造の確立を図る。

具体的な技術目標値は以下の通りである。

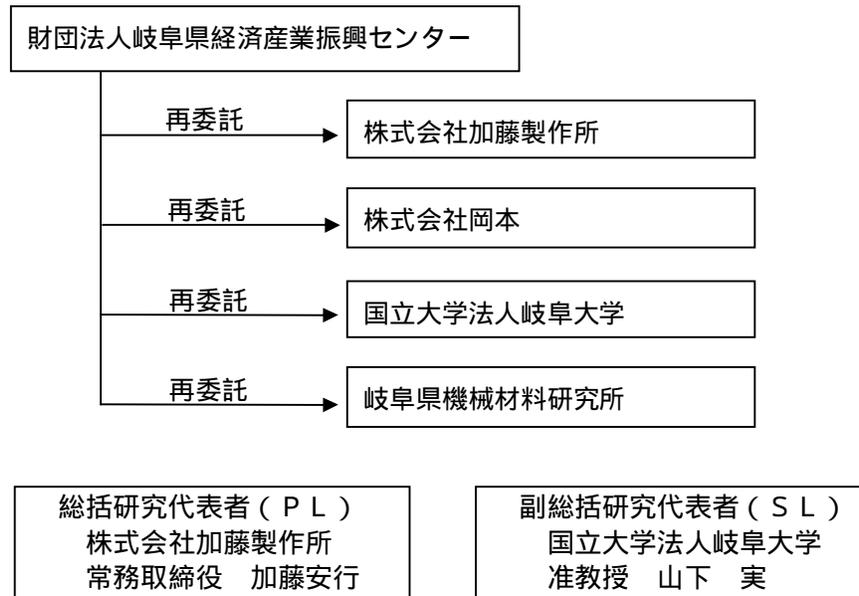
区 分	現 状	目 標 値
加工精度（30°）	20 μm	10 μm以下
加工時間（10cm角加工）	15時間	3時間
金型寿命 （板厚1mm、SUS加工）	20万個	100万個
金型メンテナンス時間	3～4時間	1時間以内

実施した研究項目は以下のとおり。

- 金型材料のヤング率測定
- 金型材料の摩擦摩耗特性測定
- 金型材料のその他の特性測定
- 焼入れ鋼加工に対するツール及びホルダーの選定
- マシニングセンタを用いた焼入れ鋼加工に対する加工条件の研究
- キー構造による金型の自動調芯構造の検討
- 割型締結に係るキー構造の研究
- キー構造による実験用（試作用）金型の作製
- ボルトレス金型構造等の評価

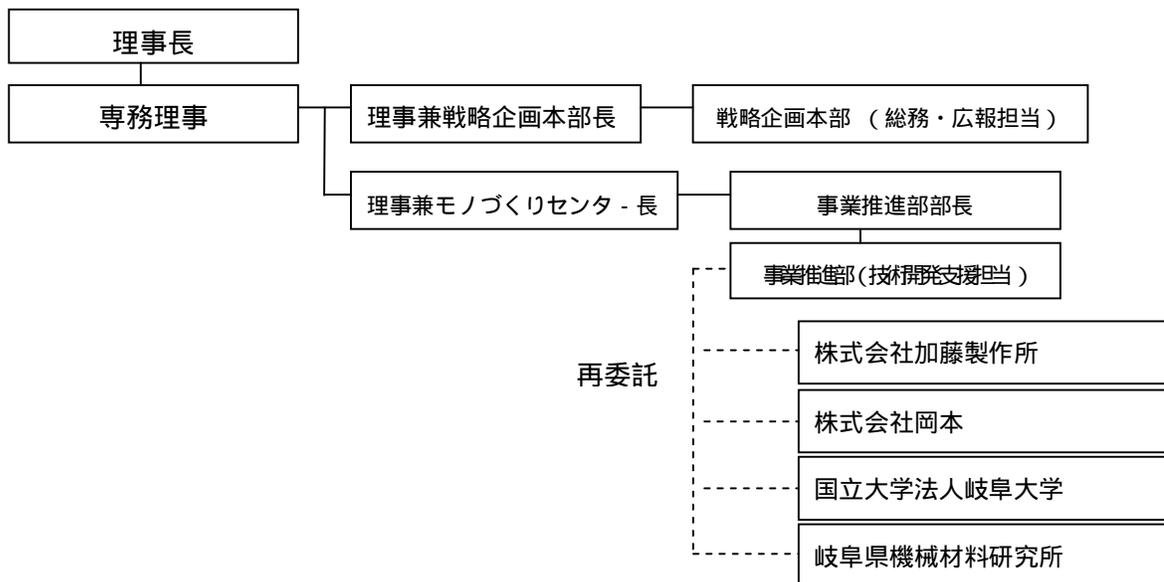
(2) 研究体制 (研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)

(1) 研究組織 (全体)



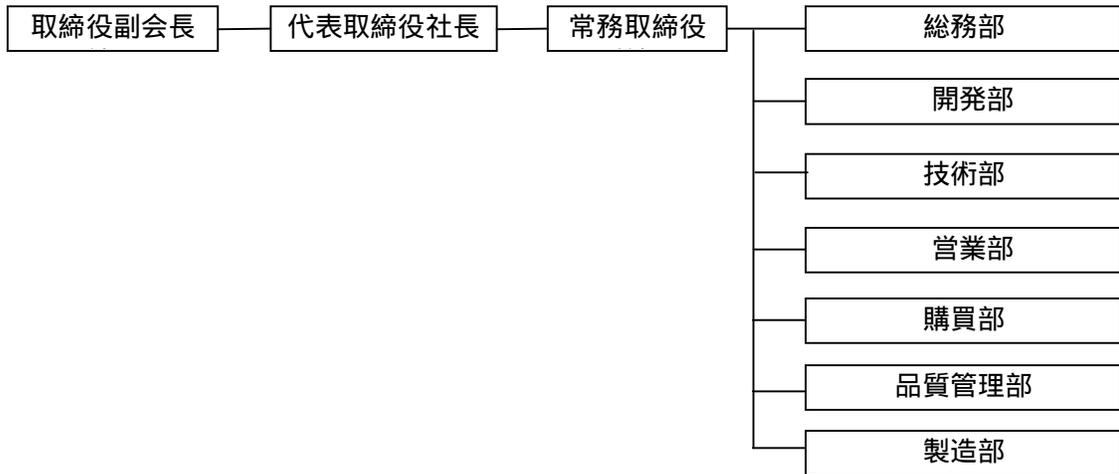
(2) 管理体制

事業管理者 [財団法人岐阜県産業経済振興センター]

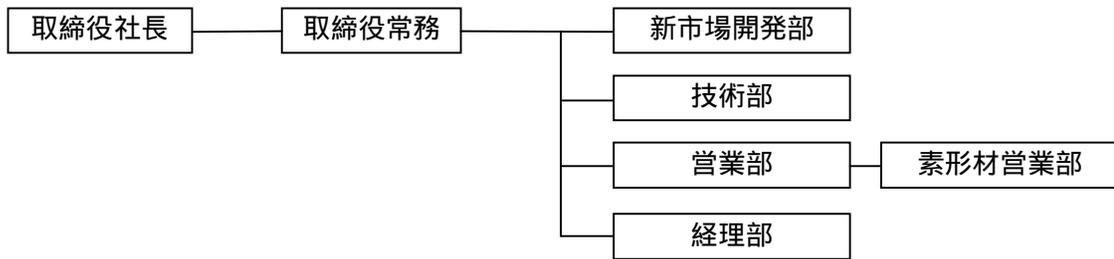


再委託先

[株式会社加藤製作所]



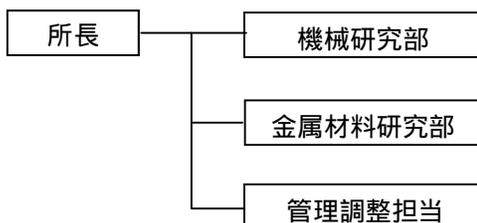
[株式会社岡本]



[国立大学法人岐阜大学]



[岐阜県機械材料研究所]



(3) 管理員及び研究員

【事業管理者】

管理員

財団法人岐阜県産業経済振興センター

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
砂田 博 服部 清 浅井 博次 苅谷 真男	モノづくりセンタ - 長 事業推進部 部長 事業推進部 主査 戦略企画本部 主任	プロジェクトの管理・運営

【再委託先】

研究員

株式会社加藤製作所

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
加藤 博保 加藤 安行 竹腰 秀男 岩田 英司 奥田 智裕 吉田 和弘	副会長 常務取締役 開発部長 技術部長 技術部係長 技術部係長	

株式会社岡本

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
西垣 功一 広瀬 達也	新市場開発部 開発技術課長 素形材営業部 主任	

国立大学法人岐阜大学

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
山下 実	金型創生技術研究センター・准教授	

岐阜県機械材料研究所

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
佐藤 丈士	機械研究部・主任専門研究員	

実施内容番号は第1章(1)記載の研究項目番号による

### (3) 成果概要

#### (a) 金型材料のヤング率測定

短円柱の圧縮試験、四点曲げ試験、振動法による測定結果において、スターク材はSKD11に比べて約10%ヤング率が大きかった。また、超合金のもの約40%強であった。従来SKD11が使われている金型材料をスターク材で代替した場合、より高い工具剛性が期待できることから、成形品の高精度化にとって有利となることがわかった。

#### (b) 金型材料の摩擦摩耗特性測定

砥粒による引掻きに対する耐摩耗性では、スターク材は、SKD11に対して耐摩耗性が大幅によくWCに近い耐摩耗性を有していることがわかった。また、オーステナイト系ステンレス鋼に対する焼付性では、スターク鍛造、SKD11、スターク鍛造、WCの順で焼付きが少なくなることがわかる。材料費などを考慮した総合的判断では、用途によってはスターク材でWCを代替することも可能であることがわかった。

#### (c) 金型材料のその他の特性測定

ロックウェル硬さおよびピッカーズ硬さは、スターク鍛造材はSKD11よりも大きい値を示した。もちろん、超合金の硬度はそれよりやや大きい、超合金の耐衝撃性は鉄系の工具材料のものよりも劣っている。よって、スターク材は高い耐衝撃性や耐摩耗性が要求されるせん断パンチ、ダイなど金型材料への適用性は高いものと言える。一方、スターク鍛造材の硬さはSKD11のものよりもやや小さいものの、適度な硬度を有しており金型材料としての守備範囲は良好であることがわかった。

#### (d) 焼入れ鋼加工に対するツール及びホルダーの選定

切削加工に使用するツールとツールホルダーの選定基準については、通常金型材料の切削に使用するものとの比較で明確に定めることができる。すなわち、ツール材料の機械的特性としては高ヤング率のものを選定し、ツールホルダーについては形状寸法が強固な構造になっているものを選定することにより、金型加工上の精度確保は可能であると結論した。

#### (e) マシニングセンタを用いた焼入れ鋼加工に対する加工条件の研究

##### 1. 焼入れ鋼の加工

キー構造を達成するための要となる穴空け加工実験を行った。穴空け加工を輪郭加工とボーリング加工の2つの方法で実施した。輪郭加工とボーリング加工のいずれの方法でも、内径が30mm、16mm、13mm、10mm、8mmの5種類の穴について、内径誤差は9 $\mu$ m以下、真円度は2.5 $\mu$ m以下、円筒度は5.6 $\mu$ m以下を得ることができ、目標値としている加工精度10 $\mu$ m以下を達成することができた。

##### 2. スターク材の加工

スターク材(炭化バナジウム鋳物)をキー、割型などの金型部品に使用するため、切削加工を試みた。スターク材は熱処理を施した改良材を対象とし、高剛性の工具ホルダーと高硬度皮膜を施したDLCコーティング超硬工具を用いた。結果は、工具刃先の摩耗とチップングが激しいことが判明した。回転精度の高いスピンドルとCBN焼結工具の組み合わせでは、工具の摩耗は少なく切削は可能であるが、穴の円筒度は悪く深い位置ほど径が小さくなってしまった。この結果を受け、加工方法の研削加工への変更が必要であると考えられる。

冷間金型用工具鋼SKD11への斜め穴開加工については、輪郭加工とボーリング加工により最大穴径誤差0.004mm、穴内面の表面粗さ2.2 $\mu$ mを得ることができた。穴径誤差については目標値とする10 $\mu$ m以下を達成できた。

#### ( f ) キー構造による金型の自動調芯構造の検討

キーの本数と配置に関しては、キーが受け持つ荷重のバランスなどを考慮して、3本を金型表面に平行な面内で正三角形になるように配置する方法を採用した。

自動調芯機能の原理は、被成形材がパンチに押出されて円錐状に変形しダイス穴とテーパ一当たりとなることにより発生することを確認した。

キー構造金型の負荷に対する変位挙動は、荷重の増加に対して増え、除荷に対しては減る。この挙動は、金型を構成する各プレート間隔が増減することによって起こるが、成形の可否には直接関係しないことを確認した。

キー構造せん断金型で打抜きを行い、その切り口面性状の観察から、自動調芯機構はせん断加工に対して良好に動作することが明らかになった。

数値計算によりパンチの破壊危険部位はパンチ・ホルダーによる拘束条件が強い部位であることを推定でき、金型設計指針へ反映できる情報を得た。

剛性が大きく耐摩耗性に優れたスターク材を、金型材料として適用しやすくするため、その被削性の改善を試みた。製造工程おける熱処理付加により硬度を制御できることがわかった。

#### ( g ) 割型締結に係るキー構造の研究

金型構造の設計手法に関しては、従来金型に比べて力学的に合理的な設計が一層重要となり、特に横方向の力に対する考慮が必要でパンチ支持部やダイ取付部品には強度と硬度の大きい材料が必要であるとの検討結果を得た。

キー構造金型の静的強度を荷重ひずみ曲線を求めて評価した。曲線はボルト締結金型では2次曲線、キー構造金型では直線となるが、ある荷重に対するひずみは、両者間に大差はなく、生じるひずみはほぼ同じであると判断できる。この結果から、キー構造金型は、成形に十分耐えうるだけの強度を有していることを確認できた。

金型組付時に存在する初期芯ずれが成形により是正される挙動を調査した。初期芯ずれは、成形に伴って金型が微小移動し解消されることを確認できた。

キー構造金型を量産で用いるプレス機に取付けて連続打抜加工を行い、金型の変位挙動計測と打抜切口面の観察から、自動調芯性能の評価を行った。変位は、ボルト締結金型では全く変化がなかった。これは、金型組付時当初の芯出状態が打抜加工によって調整されないことを意味している。当初の芯出しがずれていれば、成形を重ねても芯はずれたままである。キー構造金型では、金型組付時当初に十分な芯出しを行わない状態でも、5ショット程度加工する間に、金型が変位し正しく芯が出た状態へと収束していく挙動を把握できた。打抜切口面の観察でも、加工状態に偏りはなく良好な面が得られた。これらから、キー構造金型の持つ自動調芯機能の裏づけがとれた。

せん断型と絞り型をキー構造とした金型を用いて、実際に成形加工を行い製品の品質を確認した。その結果、成形品にはキズや焼付痕が観察されたが、商品品質上は問題のないレベルであることを確認できた。キズや焼付痕は、金型材質を超硬合金などに替えることにより改善加工であると考えられる。また、この金型を使用して、キーの着脱に係る段取り時間、メンテナンス時間の評価を行い、キー構造の有効性を評価した。金型のばらしと組立を行い、ボルトレス金型とボルト締結金型の組立時間などの比較調査を行った結果、ボルトレス金型の方が、着脱時間、メンテナンス時間ともにボルト金型の半分以下の時間で出来ることがわかった。

## (h) キー構造による実験用(試作用)金型の作製

### 1. トランスファー金型のキー構造化において金型に発生するひずみの評価

金型に発生する応力変動がその寿命に対する主たる影響因子であることから、キー構造ボルトレス金型および比較用に通常のボルト締結構造金型について加工中のひずみ変動データを取り、ボルトレス金型の耐久性を検討した。トランスファー金型で行われる打抜きせん断加工工程を対象とした。パンチの測定結果については、キー構造ボルトレス金型と従来型金型の間に差はなかった。一方、ダイの応力変動については、キー構造ボルトレス金型ではブレークスルー時の急激な変化がより顕著であったものの、有害と言える程の振幅の大きい振動波形は見られないことから、金型のキー構造ボルトレス化が耐久性に及ぼす影響は小さいと結論した。

### 2. キー構造に適したプレス工程に関する考察

キー構造に適したプレス工程に関する考察として、プレスの主要成形である深絞りを対象に、自動調芯が行われる原理について検討した。パンチR中心とダイスR中心を結ぶ線が、垂直線となす角度を $\phi$ として、成形時にパンチの進行によってダイスが水平方向へ押されていくことが可能な $\phi$ を求める計算式を導入した。 $\phi=0^\circ$ はパンチ底面とダイスフランジ部が接触する状況を表す。 $\phi=90^\circ$ は芯ずれが零の状況に対応する。従って $\phi$ は $0^\circ$ から $90^\circ$ の間の値となり、 $0^\circ$ に近い程ダイスを押す力が小さくなり、自動調芯機能が生じにくくなることがわかった。一例として、ダイス肩半径3mm、パンチ肩半径2mmの金型で、厚さ0.5mmの板材を成形する場合の計算で求めた許容芯ずれ量は0.937mmとなった。

上述の原理に基づく自動調芯機能を確認するため、金型軸心に対し0.5mmと1.0mmの芯ずれを与えたダイスを使用して、偏心深絞り成形を行った。できたカップの外観、成形前後でのダイス位置の変化から、芯ずれを与えたダイスが加工中に動き、自動調芯作用が働くことを確認できた。

キー構造をトランスファー金型等へ適用するに際して、キー構造金型がボルト締結金型に対してどのような変形挙動を生じるのか基本特性として把握しておかなければならない。ボルト締結金型とキー構造金型のそれぞれについて、最も単純なせん断について、加工時に金型に生じる成形ひずみの比較を行った。ボルト締結金型ではボルトレス金型と比較して、パンチストロークに対するひずみが小さいことなどがわかった。この原因には、ボルトの締結力によりダイとダイプレートの境界面に作用する摩擦力の影響が大きいと考えられる。また、ボルト締結金型では、初回成形に続く2ショット以降、ひずんだ状態の金型で成形を行うことになり、高精度な成形は望み難いことがわかった。キー構造金型では、成形による引張ひずみは各ショットで零リセットされ、各ショットは金型にひずみのない状態で成形が行なわれるため、高精度な成形が期待できることになる。

### 3. キー構造金型の試作

実験用金型として、打抜き、絞り、成形、トリムの4工程となるトランスファー金型をキー構造にて製作した。評価対象と製品形状は角筒であり、材質はSUS304L、板厚0.8mmを想定した。キーのクリアランスについては、実際の成形での自動調芯作用を検証するため、キーのクリアランスを $\phi 0.01$ と $\phi 0.03$ の2種類を作製した。

#### ( i ) ボルトレス金型構造等の評価

ボルトレス金型が実際のプレス成形で使えるか確認するため、具体的製品としてセンサーカバーを想定し、これを成形するための一連の加工として打抜き、絞り、成形、トリムの4ステージからなるボルトレストランスファー金型を作製した。この金型を使用してオーステナイトステンレス鋼のSUS304L、板厚0.8ミリの成形を行った。実際にできた成形品の出来具合から、ボルトレス金型の有効性を判断した。

成形は途中で破断することなく完結し成形品が得られた。ボルトレス金型が、プレス成形の成形形態のことなる打抜き、絞り、成形、トリム等の種々の工程に適用可能なことが確認できた。成形品については、側壁の一部にわずかに筋状の傷が見られ、またトリム面のせん断状況にわずかに偏りすなわち板厚方向の破断面とせん断面の分布幅が成形品の周方向でばらついている現象が見られたが、成形は完結したと判断できる。商品としても機能上問題は無いと判断できる。これらのことから、ボルトレス金型の実成形への適用は大局的には問題が無いことを確認できた。

#### ( 4 ) 当該プロジェクト連絡窓口

財団法人岐阜県産業経済振興センター

( 最寄り駅： JR東海道旅客鉄道「西岐阜駅」)

〒500-8505 岐阜県岐阜市藪田南5丁目14番53号

担当：モノづくりセンター 事業推進部 浅井 博次

TEL: 058-277-1093 FAX 058-273-5961 E-mail: asai@gpc-gifu.or.jp

## 第2章 本論

### (1) 金型材料のヤング率測定

#### (目的)

金型の使用材料に要求される機械的性能は、剛性、降伏強度が高く、摩耗特性、被加工性が良好なことである。一方、材料の製造および加工コストもその選定に際して考慮される。適正材料の選定を目的として、まずは各種金属材料について短円柱の圧縮、四点曲げ試験、振動法により剛性の代替特性であるヤング率を測定し、機械的特性の剛性を調査・検討した。本章では、測定原理、試験装置および試験方法、各試験条件下で測定されたヤング率について述べる。

#### (実験方法)

##### (a) 使用材料

供試材には、本事業における技術開発材料であるスターク材（鍛造、鋳造品）また、比較材料として超硬合金（サンアロイDA60）、SKD11（焼入れ焼戻し材）を用意した。スターク材（鍛造、鋳造品）は、砂型による鋳造工程で得られるものとともに、さらなる特性の向上を目的とし、鍛造工程を付加した材料も製造することとした。今回の研究開発におけるスターク材の寸法を下表1-1に示す。

表1-1 ヤング率測定用試験片

試験項目	スターク材種類	主な形状
ヤング率測定		
4点曲げ試験	鋳造品、鋳造品+鍛造品	10 X 100 L
圧縮試験		20 X 30 L
振動法		1.5 t X 60 L

上記項目に対応させた試験片の形状を製作するために、下記の工程に従い製作を実施した。

#### 《鋳造品スターク》

木型製作 鋳型造型  
材料成分調整 溶解 鋳造 ショット ワイヤークット  
研磨加工

#### 《鋳造品+鍛造品スターク》

木型製作 鋳型造型  
材料成分調整 溶解 鋳造 ショット ワイヤークット  
鍛造加工 ワイヤークット 研磨加工

(b) 短円柱の圧縮試験によるヤング率の測定

短円柱材料に作用する軸方向応力とひずみをそれぞれ $\sigma$ 、 $\varepsilon$ とすれば、ヤング率 $E$ との関係は、 $\sigma = E\varepsilon$  で表される。

また、図1-1のように圧縮荷重を、試験片の横断面積をとすれば、 $F = -\sigma A$  である。試験片側面にひずみゲージをその格子方向を試験片の軸方向に合わせて貼り、軸方向のひずみを検出する。

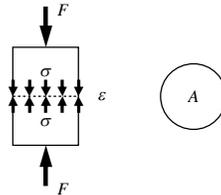


図1-1 短円柱の圧縮試験

試験装置全体を図1-2示す。試験荷重は、森試験機製の100 KN万能材料試験機を用いて試験片に与えた。ダイセットの上下プレート間にロードセルを取り付けて圧縮荷重を測定した。短円柱の圧縮試験では、荷重と2箇所に貼られたひずみゲージから応力および試験片のひずみの時間変動を計測した。図1-3に示すように、ひずみゲージはブリッジユニットに接続され、データの記録はパソコンを利用した。なお、印加電圧は2Vである。



図1-2 試験装置(100 KN 万能材料試験機および試験部分)

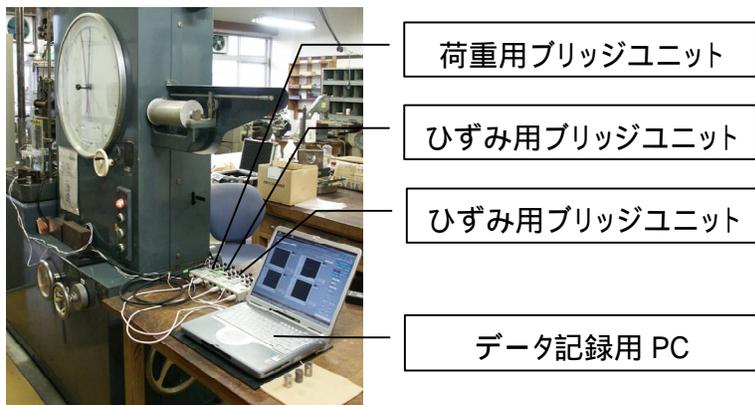


図1-3 荷重、ひずみの時間変動計測記録

(c) 四点曲げ試験によるヤング率の測定

四点曲げ試験の原理を以下に述べる。矩形断面の試験片を用いた四点曲げ試験およびせん断力図、曲げモーメント図を図1 - 4に示す。上側の支点間隔 $l_1$ が下側の支点間隔 $l_2$ より狭い場合については、曲げモーメントの分布は狭い支点間隔に渡って一定最大値を取り、せん断力は0の純曲げ状態となる。

試験片断面の幅 $b$ 、高さ $h$ の時、中立軸に関する断面2次モーメント $I$ は、 $I = \frac{bh^2}{12}$

となる。また、支点間隔 $l_1$ の試験片の下面および上面に生じる最大応力 $\sigma_{\max}$  および最小応力 $\sigma_{\min}$  は、曲げモーメント $M$  を用いて次式で表される。

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{Z}, \quad \sigma_{\min} = -\frac{M}{Z}$$

ここで、断面係数 $Z = \frac{I}{0.5h}$  から、最大応力 $\sigma_{\max}$  と最小応力 $\sigma_{\min}$  は、 $\sigma_{\max} = \frac{6M}{bh^2} = -\sigma_{\min}$

で表される。曲げモーメント $M$  は、支点にかかる力を $f$  とすれば、 $M = 0.5f(l_2 - l_1)$  となる。なお、試験荷重 $F$  は $F = 2f$  となる。

試験片の高さ方向に渡って、長手方向の応力は上側表面で最大圧縮ひずみまたは応力（最小値）、下側表面で最大引張ひずみまたは応力（最大値）と取るが、絶対値は同じとなる。上下表面にひずみゲージをその格子方向を試験片長手方向に合わせ貼っておき、ひずみを検出する。

本試験では、試験片中央部の上下表面で圧縮ひずみと引張ひずみを検出した。圧縮ひずみは負となるため、符号を逆にして引張ひずみと平均し、ひずみ $\varepsilon$ を得た。

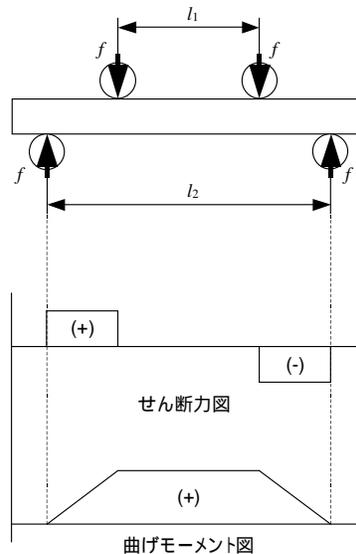


図1 - 4 四点曲げ試験

試験装置全体を図1 - 2示す。試験荷重は、森試験機製の100 KN万能材料試験機を用いて試験片に与えた。ダイセットの上下プレート間にロードセルを取り付けて圧縮荷重を測定した。四点曲げ試験では、荷重と2箇所に貼られたひずみゲージから応力および試験片のひずみの時間変動を計測した。図1 - 3に示すように、ひずみゲージはブリッジユニットに接続され、データの記録はパソコンを利用した。なお、印加電圧は2 Vである。

(d) 振動法によるヤング率の測定

測定に使用した振動式(自由共振式)ヤング率測定装置を図1 - 5に示す。図中の最も手前にあるプラスチック製の箱が測定部である。箱内には細いワイヤが2本、間隔を空けて同一高さに張られており、この上に図1 - 6に示す寸法の試験片を据える。試験片設置後、試験片の振動による変位を検出するセンサーの位置決めを行う。図中奥のキャビネットは制御部で、ヤング率の計算に必要な試験片寸法などの入力、試験片与えるに曲げ振動周波数の設定、測定結果の解析などの操作を行う。



図1 - 5 ヤング率測定装置

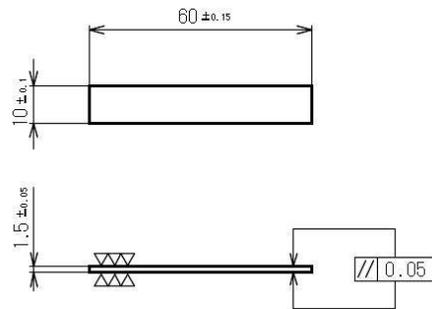


図1 - 6 試験片

振動法によるヤング率の測定は、短冊状試験片に曲げ振動を与え固有振動数を求めることにより行う。試験片の寸法を測定し、図1 - 7の機器で密度を測定した。後は固有振動数を求めれば、梁の曲げ振動を表す次式からヤング率を計算することができる。

$$f = \frac{a}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho S}}$$

ここで、 $f$  : 固有振動数、 $a$  : 試験片支持方法などによって決まる定数、 $L$  : 試験片長、 $E$  : ヤング率、 $I$  : 断面二次モーメント、 $\rho$  : 密度、 $S$  : 断面積である。

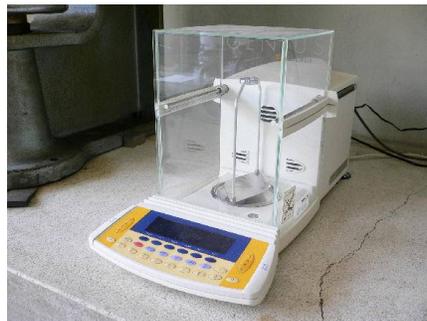


図1 - 7 密度測定機

(結果および考察)

(a) 短円柱の圧縮試験によるヤング率の測定結果

圧縮試験は図1-8に示すように直径20 mm高さ30 mmの短円柱を試験片とし、軸方向に荷重を加え、短円柱の側面に貼られた2枚のひずみゲージからひずみを検出した。なお、試験片と接する工具の平行度精度の影響を排除するため、短円柱の上面は鋼球を介して荷重を加え、圧縮荷重4~10 KNの範囲でヤング率を定めた。

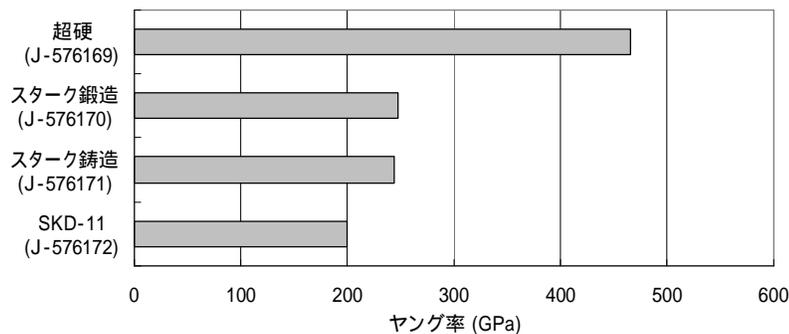


図1-8 球を介して試験荷重を加えた短円柱の圧縮試験

各材料について得られたヤング率を表1-2および図1-9に示す。スターク材は、SKD11に比べて約20%ヤング率が大きかった。また、超硬合金のもの約50%強の値であった。スターク鍛造材および鋳造材の間に有意差は見られなかった。

表1-2 短円柱の圧縮試験で得られたヤング率

試験材料	ヤング率(GPa)
超硬(J-576169)	465.7
スターク鍛造(J-576170)	247.9
スターク鋳造(J-576171)	244.3
SKD11(J-576172)	200.3



(b) 四点曲げ試験によるヤング率の測定結果

試験片は、一辺10 mmの正方形断面を持つ長さ100 mmの直方体である。図1-7における上側の支点間隔は40 mm、下側の支点間隔は80 mmで、徐々に荷重を加え上下表面にひずみゲージ用接着剤で貼られた2枚のひずみゲージからひずみを検出した。試験中の写真を図1-13に示す。荷重4~8 KNの範囲でヤング率を定めた。

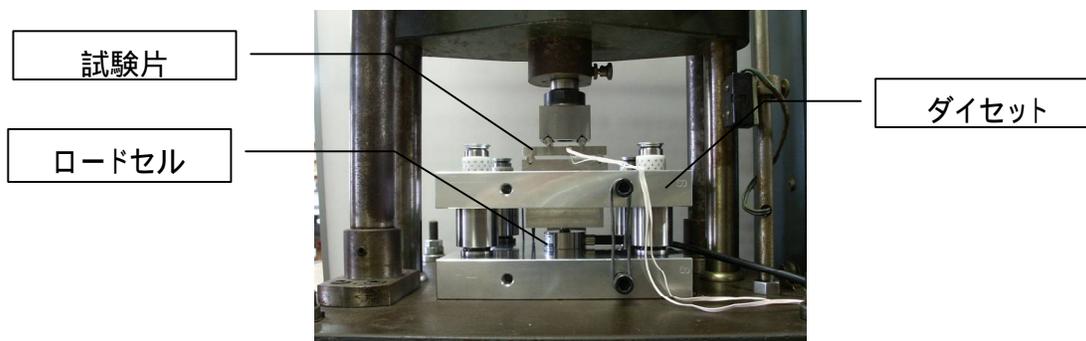


図 1 - 9 四点曲げ試験

各材料について得られたヤング率を表 1 - 3 と図 1 - 10 に示す。スターク材は、SKD11 に比べて約 10 % ヤング率が大きかった。また、超硬合金のものの 50% 弱の値であった。スターク鍛造材および鋳造材の間に有意差は見られなかった。

表 1 - 3 四点曲げ試験で得られたヤング率

試験材料	ヤング率(GPa)
超硬(J-576162)	528.5
スターク鍛造(J-576163)	223.3
スターク鋳造(J-576164)	227.0
SKD11(J-576165)	202.5

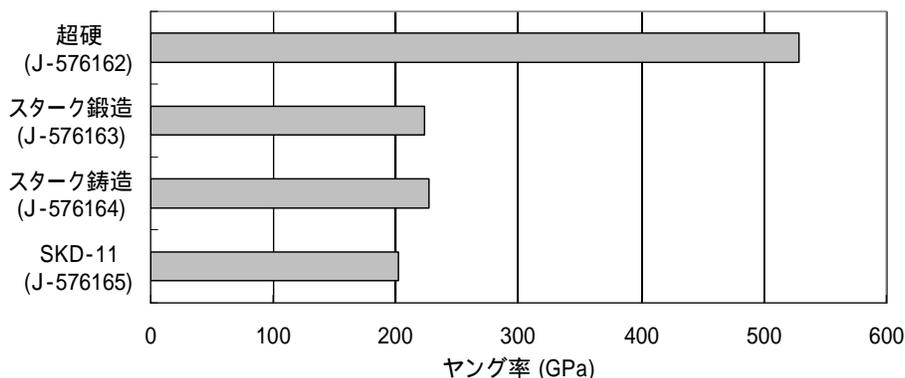


図 1 - 10 四点曲げ試験で得られたヤング率

(c) 振動法によるヤング率の測定結果

測定結果を図 1 - 11 にまとめて示す。圧縮法、曲げ法で求めた値と同等のヤング率を得ることができた。SKD11、スターク鋳造、スターク鍛造の 3 つはほぼ同じ数値となり、WC が倍以上の数値となっている。ヤング率は単位ひずみが生じるのに要する応力を意味しており、剛性という点では WC が特に優れている。ただし、金型材料としては、材料費、加工性、耐摩耗性、耐衝撃特性などを総合的に判断して決めなければならない。

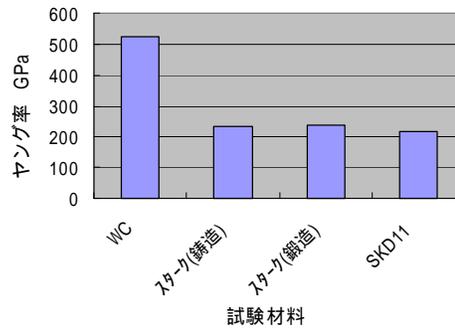


図 1 - 1 1 振動法によるヤング率測定結果

(d) 金型材料のヤング率測定のまとめ

スターク材は、SKD11に比べて約10 %ヤング率が大きかった。また、超硬合金のもの約40 %強であった。前述した短円柱の圧縮試験で得られたものと異なるが、短円柱の場合ひずみが小さい領域で計測したことの影響があるものと考えられる。通常、ヤング率の測定については四点曲げ試験がよく用いられており、データの信頼性は四点曲げ試験のものの方が高いものと考えてよい。従来SKD11が使われている金型材料をスターク材で代替した場合、より高い工具剛性が期待できることから、成形品の高精度化に有利となると言える。

(2) 金型材料の摩擦摩耗特性測定

(目的)

適正材料の選定を目的として、ここでは各種金属材料についてスガ式摩耗試験法とピンオンディスク試験法により摩耗特性を調査・検討した。本章では、測定原理、試験装置および試験方法、各試験条件下で測定された摩耗特性について述べる。

(実験方法)

(a) 使用材料

前述の使用材料の項目で述べたものと同じ材料を使用した。摺動摩耗特性は振動式(自由共振式)ヤング率測定装置用の短冊試験片を流用した。ピンオンディスク試験用のディスクには下表2-1の試験片を作製した。この試験片の製造方法は、前述したヤング率測定用試験片の製造方法と同じであるので、ここで詳細を述べることは省略する。

表 2 - 1 ピンオンディスク試験片

試験項目	スターク材種類	主な形状
ピンオンディスク試験	鑄造品、鑄造品+鍛造品	50 X 10 t

(b) 摺動摩耗特性の測定方法

摺動摩耗特性はJIS H8503に規定があるスガ式摩耗試験法により求めた。用いる試験片は別に作製せず、前述の振動式ヤング率測定装置用の試験片(図1-6)を流用した。ただし、振動式ヤング率測定装置用の試験片をそのままスガ式摩耗試験に設置することはできなかったため、試験片保持用の専用治具を作製して対応した。

測定に使用したスガ式摩耗試験機を図2-1に示す。図中央の4本の柱で支えられた水平板が試験片取付台となっている。台は図左のモータとクランク機構を介して繋がっており、水

平方方向に往復運動をする。試験片取付台の下には外周にサンドペーパーを貼付けた摩耗輪があり、おもりを用いたリンク機構により一定荷重で下から試験片に負荷を与えるようになっている。図右のボックスは制御部で、試験片取付台の往復回数設定などの操作を行う。



図 2 - 1 スガ式摩耗試験機

実際の試験条件を図 2 - 2 に示す。摩耗輪の外周に粒径320番の炭化ケイ素 (SiC) からなるサンドペーパーを貼付け、3Kgの荷重で試験片に当たるようにした。試験片取付台すなわち試験片のストロークは30mm ( 摺動距離は往復で60mm ) である。なお、摩耗輪は1往復するたびに0.9度回転し、試験片は1往復ごとに常にサンドペーパーの新しい部分で擦られるような機構になっている。

試験片が往復で400回擦られるたびにその質量を測り、摩耗輪の摺動往復回数と試験片の摩耗減量の関連を求めた。

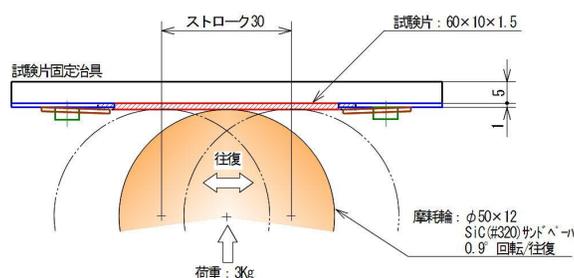


図 2 - 2 摺動摩耗特性測定法

### (c) ピンオンディスク試験方法

摺動摩耗特性を評価するもう一つの方法として、ピンオンディスク試験を実施した。この試験はディスクにピンを押しつけ相対運動を与えて互いに摩耗を行わせる方法である。試験のイメージを図 2 - 3 に示す。試験片の作製 ( ディスク分担分SKD11とピンSUS304 )、試験条件の確定に係る予備試験などを経て試験を行った。

測定に使用した摩擦摩耗試験機を図 2 - 4 に示す。図右下の網付扉内が試験部で、上下に対向する器状器具の中央に試験片を設置する。下側にピン、上側にディスクを取り付ける。ピンとディスクの寸法をそれぞれ図 2 - 5 と図 2 - 6 に示す。操作は試験部に続く奥のパネルとパソコンで行う。

プレス成形における金型材料と被成形材の摩耗状況を実験的に再現するため、ディスクは金型とみなして各金型材料で作製し、ピンは被成形材とみなしてオーステナイト系ステンレス鋼 ( SUS304 ) で作製した。なお各材料の基本特性値として、各金型材料の硬さは後述する。オーステナイト系ステンレス鋼の硬さはロックウェル硬さ ( HRB ) で72.3であり、通常プレス加工に使用する焼鈍材であることを確認した。

なお、試験は潤滑剤を使用せず、試験前にピンとディスクをエタノールで脱脂した状態で行った。

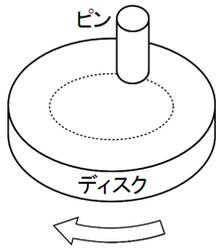


図 2 - 3 ピンオンディスク試験



図 2 - 4 摩擦摩耗試験機

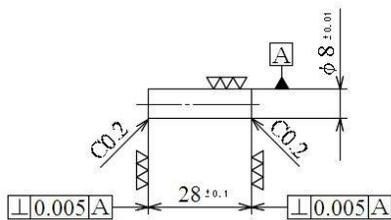


図 2 - 5 試験片 (ピン)

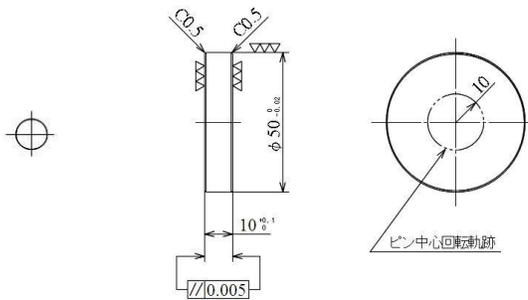


図 2 - 6 試験片 (ディスク)

(結果および考察)

(a) 摺動摩耗特性の測定

測定結果を図 2 - 7 にまとめて示す。スターク材は、SKD11 に対して摩耗体積が大幅に小さく、また WC に近い耐摩耗性を有していることがわかった。材料費などを考慮した総合的な判断では、用途によっては WC を代替することも可能である。

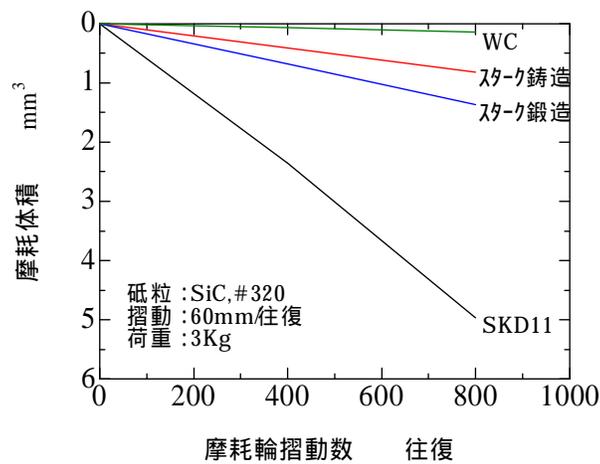


図 2 - 7 摺動摩耗測定結果

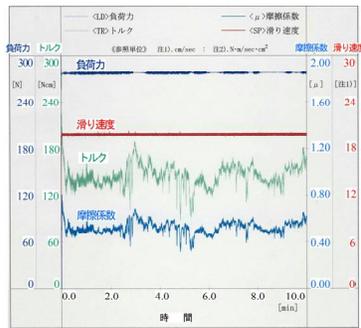
( b ) ピンオンディスク試験

測定結果を図 2 - 8 にまとめて示す。各図は、負荷力、すべり速度、トルク、摩擦係数の 4 項目を示しているが、負荷力とすべり速度は設定条件で、しかも一定に設定しているので、トルクと摩擦係数の変化に注目する。( a ) のディスクがSKD11の場合、トルクと摩擦係数は試験開始後しばらくは比較的安定しているが、30秒経過後に乱れが生じピンとディスク間に焼付が発生したことがわかる。( b ) のWCの場合、試験開始当初から上下動が多いが際立つ変化は無く、試験片の目視観察からも焼付きの発生は軽微である。( c ) のスターク鋳造は全体的にフラットであるが、試験片の目視観察では比較的強い焼付きが発生している。( d ) ディスクのスターク鍛造は全体的にフラットで試験片の目視観察でも焼付きの発生は少なめである。試験片の焼付痕から判断すると、オーステナイト系ステンレス鋼に対して、スターク鋳造、SKD11、スターク鍛造、WCの順で焼付きが少なくなることがわかる。

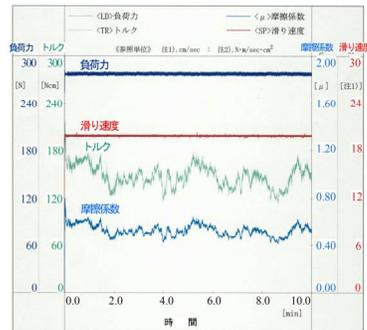
( c ) 金型材料の摩擦摩耗特性測定のまとめ

砥粒による引掻きに対する耐摩耗性では、スターク材は、SKD11に対して耐摩耗性が大幅によくWCに近い耐摩耗性を有していることがわかった。また、オーステナイト系ステンレス鋼に対する焼付きでは、スターク鋳造、SKD11、スターク鍛造、WCの順で焼付きが少なくなることがわかる。

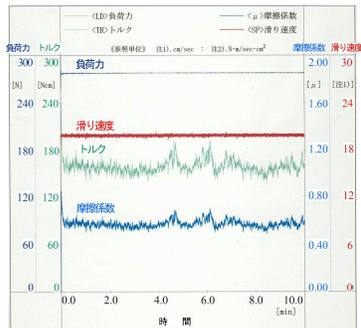
材料費などを考慮した総合的判断では、用途によってはスターク材でWCを代替することも可能である。



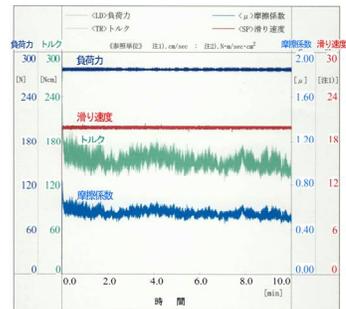
( a ) ディスク SKD11



( b ) ディスク WC



( c ) ディスク スターク鋳造



( d ) ディスク スターク鍛造

図 2 - 8 ピンオンディスク摩耗試験結果

### (3) 金型材料のその他の特性測定

#### (目的)

適正材料の選定を目的として、ここでは各種金属材料について基本的な物理特性である硬さ測定を実施した。また、衝撃を受けるプレス金型用の材料の選定に必要なデータとして減衰特性も調査した。本章では、これらの測定原理、試験装置および試験方法、測定結果について述べる。

#### (実験方法)

##### (a) 使用材料

前述の使用材料の項目で述べたものと同じ材料を使用した。硬さ試験は、圧縮試験によるヤング率の測定用の短円柱試験片を使用して測定した。減衰特性は、振動式(自由共振式)ヤング率測定装置用の短冊試験片を流用した。

##### (b) 硬さ試験方法

硬さはダイヤモンド圧子で圧痕をつける押込式で測定した。押込式測定法のうち、硬さを圧痕の深さで表すロックウェル硬さと単位面積当たりの荷重で表すビッカース硬さの2つを実施した。

ロックウェル硬度計および測定原理について、使用した硬度計を図3-1に示す。試験台の上に被測定物を載せ、圧子を押し付けた後、規定の荷重まで除荷して、押し込み深さ $h$ からロックウェル硬HRCさを求める。押し込み深さが浅いほど、硬さは高い値となるように、 $HRC = 100 - 500h$ で定義される。

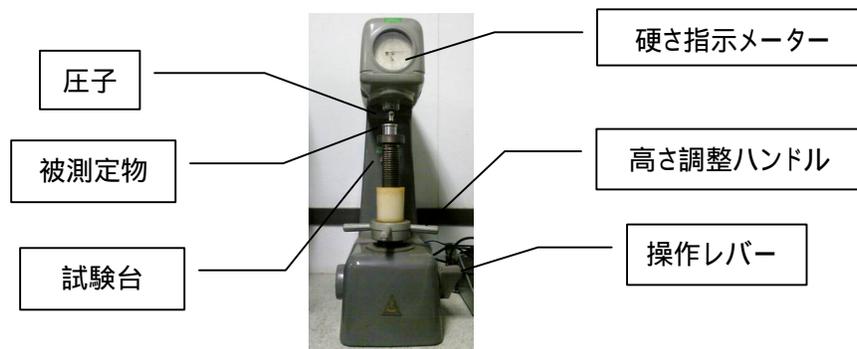


図3-1 ロックウェル硬度計

ビッカース硬さ試験機を図3-2に示す。ビッカース硬さは、四角錐形のダイヤモンド圧子を所定の荷重で試験片に押しつけ、押し込み荷重をできた圧痕の表面積で割って求める数値である。すなわち硬さを単位面積当たりの荷重で表す方法である。



図3-2 ビッカース硬さ試験機

(c) 減衰特性試験方法

金型はプレス成形時に衝撃的な負荷を受ける。それに対する特性を金型材料の減衰特性を求めることにより評価した。減衰特性は、振動式(自由共振式)ヤング率測定装置によるヤング率測定時に、特別な操作をすることなく付随して得られる特性値である。従って、実験方法は前述のヤング率測定法と同じである。

減衰特性は、減衰率(内部摩擦)という数値として求めた。減衰率(内部摩擦)は次式によって算出した。

$$\text{減衰率(内部摩擦)} = \ln \frac{V_n}{V_{n+1}}$$

(結果および考察)

(a) 硬さ試験

各材料について得られた硬さ(HRC)を表3-1に示す。スターク鑄造材の硬さは、通常金型材料であるSKD11よりもかなり硬く、超硬合金にほとんど匹敵する硬さを示した。一方、スターク鍛造材は、SKD11よりも硬さは小さい結果となった。

ビッカース硬さについては図3-4にまとめて示す。スターク鑄造はWCに次いで硬いことがわかった。

表3-1 ロックウェル硬さ測定結果

試験材料	ロックウェル硬さ HRC
超硬(J-576162)	69
スターク鍛造(J-576163)	50
スターク鑄造(J-576164)	66
SKD11(J-576165)	60

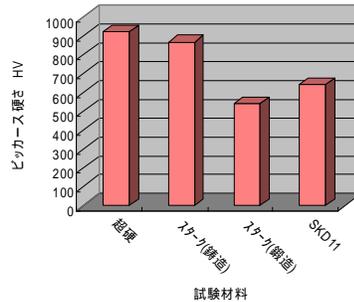


図3-4 ビッカース硬さ測定結果

(b) 減衰特性試験

測定結果を図3-5にまとめて示す。スターク鑄造品の減衰率は他の3つの材料と比較して大きいことがわかった。減衰率が大きいことは、共振、騒音の発生や振動の伝達を抑える効果が大きいことを意味している。加工性などを別にして単に減衰率からいえば、スターク鑄造品は衝撃的な負荷を受けるプレス金型用の材料として適していることになる。

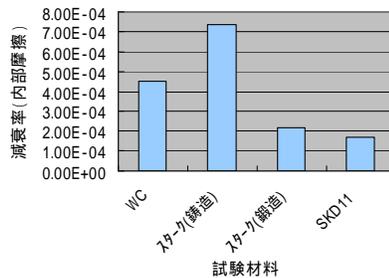


図3-5 減衰率の測定結果

(c) 金型材料のその他の特性測定のとめ

スターク鑄造は、WCに次いで硬く、高価格のWCの代替になりうることがわかった。減衰特性に関しては、スターク鑄造品の減衰率は他の3つの材料と比較して大きく、衝撃的な負荷を受けるプレス金型用の材料として適していることがわかった。

(4) 焼入れ鋼加工に対するツール及びホルダーの選定

(目的)

金属材料の切削に使用するツールやツールホルダーは、被加工物に要求される加工精度、切削速度、工具寿命などが考慮され選択される。本研究では、スターク材の機械的特性を考慮して硬質金属材料に対する適切なツールおよびツールホルダーの選定基準を定め、それらを特定した。

(実験方法)

硬質金属材料である焼入れ鋼の切削に対するツール及びホルダーの選定基準としては、ツール表面が極めて硬質であることが不可欠である。さらに、被加工物の加工精度に合わせてツールやツールホルダーの剛性などが考慮されなければならない。

スターク材は、ロックウェル硬さの値がSKD11以上に大きく、ツールやツールホルダーに対する負荷条件は、SKD11などの焼入れ鋼の場合よりも厳しいものとなることが予想される。また、耐熱性や耐摩耗性も十分考慮しなければならないと考える。

よって、ツールの選定基準としては、通常金型材料切削用ツールよりも表面硬度や耐摩耗性が良好でなければならないと考える。また、ツールの剛性は加工精度に影響することから、ツール材料の機械的特性としては高ヤング率のものが、その選定基準となる。さらに、ツールホルダーについても、その剛性が被切削物の加工精度に影響することから、強固な構造になっていることがその選定基準となる。

(結果および考察)

(a) 選定結果

上述の選定基準、過去の経験値、各研究員とアドバイザーからの情報などを基に、穴内径は輪郭加工とボーリング加工で仕上げることができるように、ツールとしてはエンドミルとボーリングツールを中心に選択した。ツールホルダーは高精度な加工を実現するため2面拘束タイプのBBTシャンクを選択した

## (5) マシニングセンタを用いた焼入れ鋼加工に対する加工条件の研究

### 5 - 1 焼入れ鋼およびスターク材の加工

#### (目的)

焼入れ鋼は非常に硬度が高い為、加工条件である回転数、送り速度、切込量などの選定が非常に重要となる。ここでは、キー構造を達成するための要となる穴空け加工を対象に焼入れ鋼の加工実験を行い、被加工材の真円度などから得られる加工精度を評価した。

また、スターク材は、昨年度の研究の結果から、ハイス鋼と同等の高い剛性や超硬合金と同等の高い耐摩耗性を持つことがわかっている。これらの特性は、スターク材がプレス金型用材料にも適していることを示している。一方、切削加工性は悪いこともわかっており、キー構造金型への利用を図るには、その加工技術の確立が不可欠である。

#### (実験方法)

##### (a) 焼入れ鋼の加工

ボルトプレス金型に使用する高硬度焼入れ材の加工には、高剛性・高精度加工が可能な工作機械が必要であり、安田工業製マシニングセンタ YBM8120V を使用して実験を行った。下の図 5 - 1 にこのマシニングセンタの特徴を示す。加工としては穴空けを行い、穴の真円度と円筒度を測定することにより加工精度を評価した。

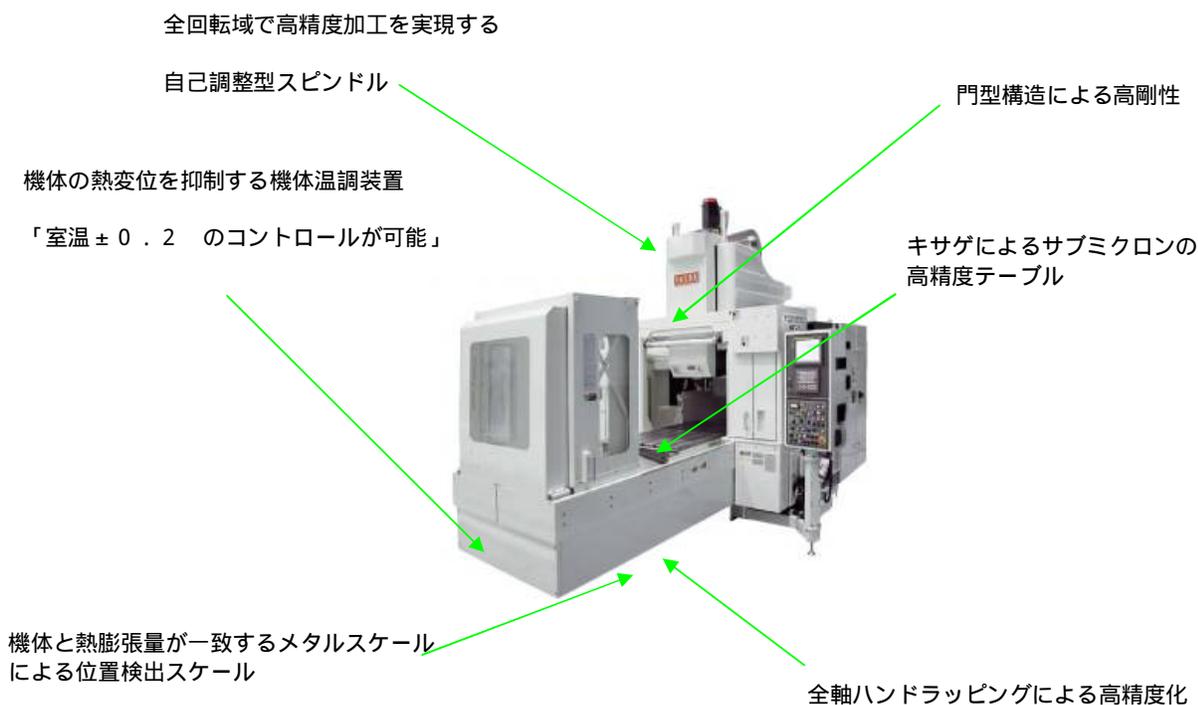


図 5 - 1 導入したマシニングセンタの特徴

(b) スターク材の加工

選定した工具と工具ホルダーを、この事業で導入した安田工業製のマシニングセンタ YBM8120に取り付けて加工実験を行った。比較のため、より高速回転が可能な社内既設のマシニングセンタも使用した。加工条件を表5 - 1に示す。加工方法としては、コンタリング(輪郭)加工および、ボーリング加工を用いた。スターク材は、鑄造の焼入焼戻し、鑄造 + 鍛造の焼入焼戻し、鑄造の軟化焼鈍の3種類を使用した。

表5 - 1 スターク材の加工条件

加工	材質	熱処理	機械	硬度(HRC)	ツール	加工条件		
						刃具	回転数	送り速度
加工1	スタークA	鑄造 焼入・焼戻し	YBM8120	55	BBT40-MEGA13E	EPBTS2080-TH	7200/min	1510mm/min
加工2	スタークB	鍛造 焼入・焼戻し	VL30	50	MST-SLRA4	SSB200 CBN	50,000/min	30,000mm/min
加工3	スタークC	鑄造 軟化焼鈍	VL30	35	MST-SLRA4	SSB200 CBN	50,000/min	30,000mm/min

(結果および考察)

(a) 焼入れ鋼の加工

選定したツーリングを使用し、高硬度材(SKD11 HRC60)の穴空け加工を行った。各穴の真円度と円筒度を測定した結果を表5 - 2に示す。輪郭加工とボーリング加工では、内径と円筒度において、若干輪郭加工の方が優れている結果が得られたが、すべての穴に対し、内径誤差は9 $\mu$ m以下、真円度は2.5 $\mu$ m以下、円筒度は5.6 $\mu$ m以下となり、目標値としている加工精度10 $\mu$ m以下を達成できた。

表5 - 2 加工穴の真円度と円筒度の測定結果

焼入れ鋼加工測定結果	コンタリング(輪郭) ( $\mu$ m)					ボーリング( $\mu$ m)				
	30	16	13	10	8	30	16	13	10	8
内径(中心値からのズレ)	7	3	8	5	5	6	7	9	4	2
真円度	2.1	1.6	1.4	2.5	1.3	2.2	1.6	1.2	1.3	1.3
円筒度	3.5	2.6	3.6	3.7	-	3.8	4.4	3.7	5.6	-

8穴の円筒度は、真円度径のプロープが干渉

(b) スターク材の加工

図5 - 4にスターク材の組織を示す。スターク材は、高靱性、高硬度の炭化バナジウムが球状になっていることにより応力集中を 방지高靱性を、また炭化バナジウムが均一に分散することにより高耐摩耗性を得ていることがわかる。

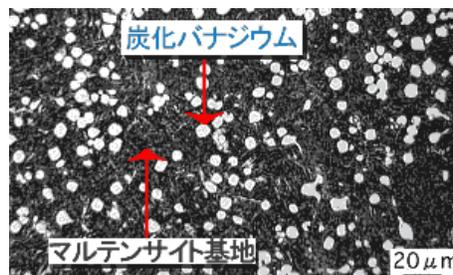


図5 - 4 スターク組織写真

対策として、切削速度を上げることを試みた。安田工業製のマシニングセンタYBM8120に高速スピンドルを取り付け切削加工実験を行った。加工は表5-3の条件で行った。実験状況を図5-5に示す。評価は加工穴の3断面で直径と表面粗さの測定を行った。

結果として、刃先状態を図5-6に、穴径と表面粗さの測定結果を表5-4に示す。図5-6に示すように刃先の摩耗は少なくなった。しかし表3からわかるように穴の円筒度は悪く、径は表面から深くなるほど小さくなっていることがわかる。原因は切削抵抗が大きく、刃物が逃げているからである。表面粗さについては1.5 $\mu$ m程度と許容できる状態を得ることができた。

高速スピンドルによる加工でも、精度の高い穴を加工できないことを受け、今後は電着砥石を用いた研削加工を試みる予定である。

表5-3 スターク材の高速加工条件

材質	熱処理	機械	硬度(HRC)	ツール	加工条件		
					刃具	回転数	送り速度
スターク	鑄造 軟化焼鈍	YBM8120	35	ナカニ HSE510-BT40	SSB200 CBN	30,000/min	1,800mm/min

表5-4 スターク材の高速加工による寸法と表面粗さ

狙い値(mm)	穴位置	穴径(mm)	円筒度(mm)	面粗さ( $\mu$ m)
10+0.01/0	上	19.926	0.015	1.321
	中	19.872		1.502
	下	19.865		1.601



図5-5 高速スピンドル加工風景

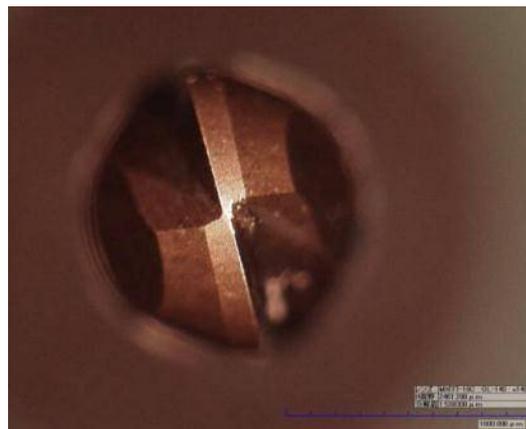


図5-6 刃物の刃先の状態

## 5 - 2 斜め穴加工

### (目的)

キー構造金型締結に不可欠となる超精密斜め穴加工の適正な加工条件の確立に向けた研究を行う。

### (試験方法)

使用した工作機械は、この事業で導入した安田工業製マシニングセンタYBM8120である。この機械に、同じくこの事業で導入した津田駒製の傾斜円テーブルを取付け、斜め穴加工を行った。

図5 - 7にワークを示す。ワークの材質は冷間金型用工具鋼のSKD11で、寸法は100×100×20である。AからCの3箇所加工を行った。工具は、BIG社製のボーリング加工ツール「CKボーリングシステム」を使用した。

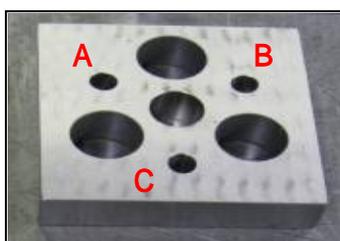


図5 - 7 SKD11材 100×100×T2

### (結果)

加工した斜め穴の内径と表面粗さの測定結果を表5 - 5に示す。穴径はプラス3 $\mu$ mの誤差で加工でき、表面粗さ面も2 $\mu$ m程度といずれも十分高精度に加工することができた。

表5 - 5 斜め穴加工結果

穴位置 3箇所	斜め穴直径		目標粗さ5 $\mu$ m以下
	入り口	出口	面粗度(Rz) $\mu$ m
A	+0.003	+0.003	2.164
B	+0.004	+0.003	2.158
C	+0.004	+0.003	2.185

### (考察)

素材がSKD11の場合には、斜め穴の加工の加工条件を確立でき、目標値を達成できることがわかった。

## (6) キー構造による金型の自動調芯構造の検討

### 6 - 1 キーの本数と配置

#### (目的)

金型構造において、従来のボルト締結を単純にキーによる保持に置き換えても自動調芯機能は発揮されない。自動調芯機能を発揮させるためのアイデアとしてキーの斜め配置を考えるが、ここではその本数、配置などの設計諸元を確定する。

#### (試験方法)

複数本のキーが、その各軸が一点で交わるように斜め配置される場合、キー構造全体は幾何学的にテーパをなすと考えてさしつかえない。従って、テーパに関する幾何学および力学的な考察に基づいて、キーの本数、配置などの要因を決める。

#### (結果)

図6 - 1 に示すように、キーを3本とし、金型表面に平行な面内で正三角形になるように配置する場合、キー間に作用する相互作用力が均一となり、最もバランスがよいと考えられる。これに従い、キーの本数は3本とし、配置は金型表面に平行な面内で正三角形を採用する。

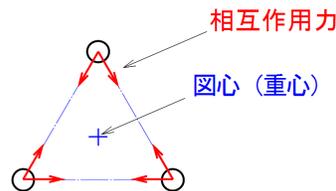


図6 - 1 キーの正三角形配置とバランス

#### (考察)

複数本のキーの軸が一点で交わるように斜め配置される場合、キー全体で円錐形状をなすと考えられる。この場合、円錐軸に垂直な任意面において、この面とキー軸の交点は、一つの円周上になければならない。しかし、3点を通る円は幾何学的に一つに定まるが、4点以上の場合には1点が過剰となるかまたは4点に対する最小自乗近似円を定めることになる。結局、キーの挿入穴として3つの穴を高精度に加工することができれば、最も少ない加工数でキー全体の機能として高精度を得ることが可能になると考えられる。このことによってここではキーを3本とした。

### 6 - 2 自動調芯機能の発生原理

#### (目的)

自動調芯機能が、どのような機構により発揮されるのかについて考察した。続いてモデル化した金型を作製し、この考察の真偽を実験的に確かめた。

#### (試験方法)

##### (a) 自動調芯が行われる原理に関する考察

自動調芯が行われる原理については、せん断について考察を行った。この考察では成形前に芯ずれがある状態を想定し、被成形材の変形が進むにつれてこの芯ずれが是正されていく課程、すなわち芯が出た状態へと変わっていく課程を考えた。

##### (b) 自動調芯が行われる原理の実験による確認

上記の考察が正しいことを明らかにするため、実際にこの課程を再現できる実験用モデルせん断金型を作製し加工実験を行った。作製した金型はダイスの構造に特徴がある。固定のパンチと板押さえに対しダイスは固定されておらず、バックングプレート上を滑って水平方向に自由に動くことができるようになっている。動く範囲に制限を与えるため、ダイスホルダーの内径はダイスの外径より大きく作ってある。今回はダイスの外径を32mm、ダイスホルダーの内径を33mmとしたので、ダイスはその中心が金型の芯を中心とする半径1mmの円内で移動できることになる。

このモデルせん断金型による成形方法の説明を図6-2(a)と(b)に示す。図6-2(a)はダイスとパンチの芯が合った状態を示し、クリアランスは0.1mmである。図に示すように、ダイスはせん断用の切刃を有しているが、パンチには切刃はなく半径2mmのラウンドとした。これは、被成形材がパンチに押出されて円錐状に変形しやすくするためである。図6-2(b)はダイスに0.5mmの芯ずれを与えた場合である。この結果、クリアランスは周方向で不均一となる。図に示すように、クリアランスの最小は-0.4mm、最大は0.6mmとなる。クリアランスの-0.4mmとは、パンチとダイスが干渉を起こし、成形を行うことが不可能な状態であることを意味している。この状態で板厚2mmの純銅板のせん断を試みた。もし、せん断が行われればダイスが動いて調芯されたと判断できる。

実験に使用したプレス機械を図6-3に示す。この試験機は深絞試験機と呼ばれる油圧を駆動源とする装置である。試験速度は低速とし0.3mm/secで行った。深絞試験機に取り付けた偏心打抜実験用金型の状況を図6-4に示す。下型がパンチと板押さえ、上型がダイスである。上型であるダイスの拡大写真を図6-5に示す。前述のように、ダイスには0.5mmの芯ずれが与えられている。なお、ダイスがバックングプレート上を滑らかに移動できるように、ダイスのバックングプレーに接する面には潤滑剤を塗布した。実験では、被打抜材として純銅板を用いた。これを1KNの板押力で保持し、パンチを押込んでせん断加工を行った。

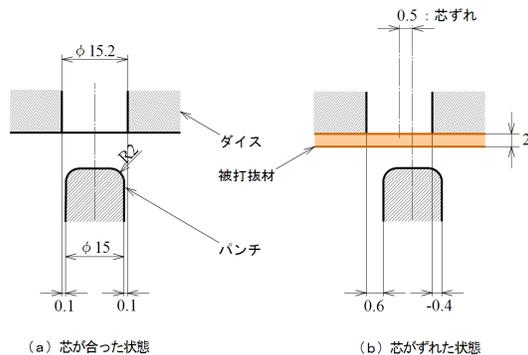


図6-2 モデルせん断金型による加工実験



図6-3 深絞試験機



図6-4 偏心打抜実験用金型の全景

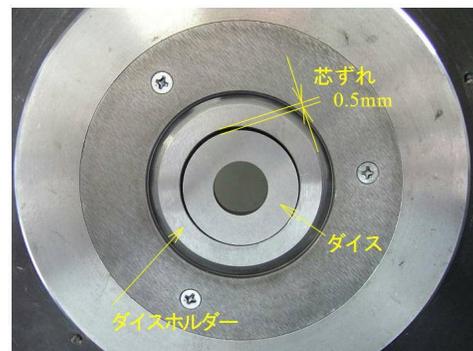


図6-5 偏心ダイス

(結果)

(a) 自動調芯が行われる原理に関する考察

パンチとダイスが芯ずれを起こしていても、何らかの方法で相互に接触がなければ、自動調芯機能は発揮されない。自動調芯機能の発揮には、被成形材の存在が大きな意味を持っていると考えられる。そしてここでの考察の要点は、被成形材がパンチに押出されて円錐状に変形し、ダイス穴とテーパ当たりとなることにより芯出しの効果が生まれると考えることである。このような考えに基づいて、自動調芯が行われる原理を図6-6のように考えた。

(b) 自動調芯が行われる原理の実験による確認

パンチに対し0.5mmの芯ずれを与えたダイスを使用して偏心打抜実験を行った。打抜きは行われ、ダイスが加工中に動いたこと、すなわち後述する図6-6に示すような原理に基づいて自動調芯作用が働くことを確認できた。

(考察)

(a) 自動調芯が行われる原理に関する考察

図6-6は自動調芯機能が発生する原理について考察したものである。図6-6(a)はここで開発している自動調芯機能の動作範囲について考えている。せん断金型におけるクリアランス

(図中の $c$ )は、通常、被打抜材の板厚の10%程度である。芯ずれ(図中の $x$ )が生じるとクリアランスに不均一が生じるが、この結果生じる最も狭くなるクリアランス(図中の $c-x$ )は、パンチとダイスの干渉を回避しなければならないので、零より大きくなければならない(図中の $c-x > 0$ )。すなわち、芯ずれはクリアランスより小さくなければならない( $x < c$ )。例えば、板厚が0.4mmの場合、クリアランスはその10%として0.04mmとなり、許容できる芯ずれとしては0.03mm程度である。図6-6(b)は、このオーダーの芯ずれがせん断加工時に是正される状況を示している。自動調芯の機構を考える上で、被打抜材の存在が重要な要因になっている。加工開始直後、被打抜材はパンチに押出され、被打抜材表面のパンチ底部外縁近傍はテーパ状に変形すると考えられる。この変形部はダイス縁とテーパ当たりとなり、この結果パンチあるいはダイスには横方向から図に示したような調芯力が作用すると考えられる。以上の結果、図6-6(c)に示すように、成形工程初期段階に自動調芯が行われ芯が出た状態になると考えられる。

このような自動調芯機構は、パンチのダイス穴に対する進入量が板厚程度と少ないせん断よりは、パンチがダイス穴を貫通するほど入り込む深絞りにおいてより効果的に発揮されると考えられる。

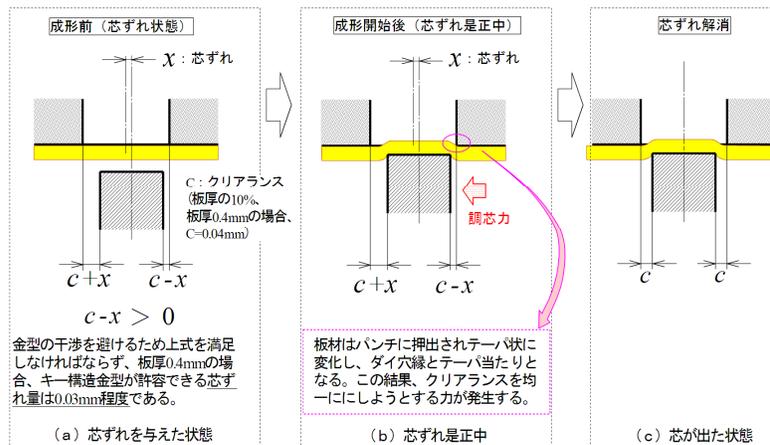


図6-6 自動調芯機能の発生原理

(b) 自動調芯が行われる原理の実験による確認

パンチストロークの3段階における銅板打抜き状況を図6-7(a)から(c)に示す。図6-7(a)はせん断初期の状態、図6-7(b)のせん断中期を経て、最終的に図6-7(c)でせん断が完了していることがわかる。前述の図6-2に示すように、この実験ではパンチとダイスは明らかに干渉を起こす配置となっている。にもかかわらず、せん断加工が行われたことはパンチと板押さえは深絞試験機に固定なので、0.5mm芯ずれを与えたダイスが成形中に動いたことを示している。すなわち自動調芯作用が働いたことを意味している。

ただし、特に図6-7(c)で明らかのように、加工面におけるせん断面と破断面の分布割合は円周方向で変化しており、せん断自体は円周方向で均一に行われていない。つまり自動調芯作用が完全には発揮されていないことになる。しかしこれは、この実験では芯ずれは板厚に対して大きく25%程にもなり、自動調芯機構を確認するためにクリアランスを誇張して設定したことに起因する現象である。すなわち、芯ずれが大きいため調芯しきれず、せん断は当初から円周方向で均一に行われていないからである。実際の金型では許容できる芯ずれは、図6-6(a)に示すように板厚のおよそ10%である。これは自動で十分に調芯できる範囲にあり、せん断が円周方向で著しく不均一になることはないと考えられる。板厚の厚い材料のせん断では、許容できる芯ずれを板厚のおよそ10%としてもその絶対値は大きくなり、自動調芯が十分に効果を発揮しない状況も考えられる。キー構造金型の自動調芯作用が、キーとキー穴のはめ合い公差に基づく柔軟構造から生ずることを考えると、キー構造せん断金型は板厚が1mm以下の比較的薄い材料の加工に適用しやすいということが推察できる。

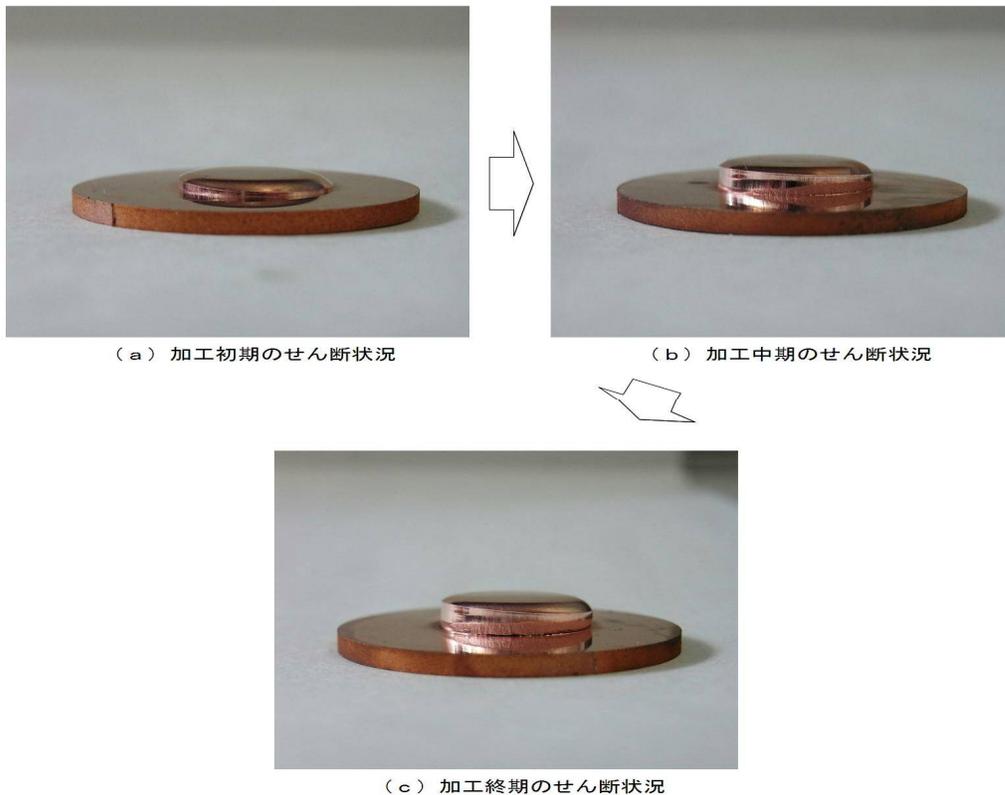


図6-7 偏心打抜き実験におけるパンチストロークと打抜きの状況

### 6 - 3 キー構造の実験用金型の作製

#### (目的)

キー構造の自動調芯機能を評価するための実験用にキー構造せん断金型を作製した。単に実験用金型を得ることが目的ではなく、製造工程の確認、出来具合の評価、製造上の注意点の抽出などキー構造金型の製造に係る各種の技術情報を収集することも目的である。

#### (試験方法)

金型の構造を図6 - 8に示す。キーは3本を使用し、金型表面に平行な面内で正三角形となるような配置とした。キー穴の加工には、この事業で導入した安田工業製のマシニングセンタYBM8120を使用した。

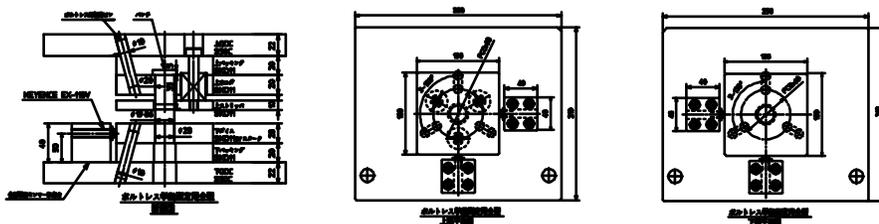


図6 - 8 ボルトレス金型図面

#### (結果)

金型の寸法精度としては、十分に満足いくレベルのものができる。パンチ直径は19.86mmで、クリアランスは被打抜材の板厚を0.7mmに想定し0.07mmとした。主に冷間金型用鋼のSKD11を使用して作製した。

#### (考察)

複数枚のプレートに斜め穴を開ける方法など製造工程を工夫した。金型の寸法精度としては、十分に満足いくレベルのものができる。

### 6 - 4 キー構造金型の変位挙動

#### (目的)

パンチを上型になるように設置した場合、キー構造には金型の自重と成形時のストリッパ力(打抜き後、パンチに食らいついた素材を押し外すのに必要な力)が作用する。これらの力により、キー構造をなす各プレートは開こうとする挙動を示す。この挙動を実験的に再現し、キー構造の特性を把握するための実験を行った。

#### (試験方法)

自重とストリッパ力により各プレートが開こうとする挙動調査は図6 - 9に示す実験により行った。すなわちパンチホルダー裏側から荷重を加え、金型に生じる変位を計測した。負荷した荷重は最大40KNである。今回用意した金型は、被打抜材の板厚として1mmを想定したものであり、この場合に必要な打抜荷重は、もちろん被成形材の種類に依存して変わるが、概算では50KN程度であると考えられる。ストリッパ力は、経験として最大でもこの打抜荷重の20%程度で10KNと見積もられることから、実験で負荷した荷重の40KNはストリッパ力として十分大きく、実験は過負荷を考慮した十分な安全側で行ったことになる。

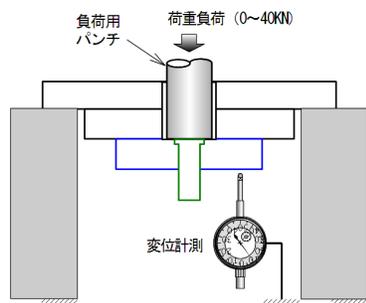


図6 - 9 変位測定方法

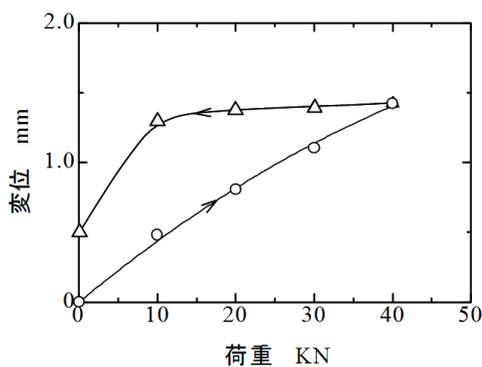
(結果)

計測結果を図6 - 10に示す。図中の△印が荷重増加、○印が荷重減少を表している。金型の変位は、荷重の増加に対してほぼ比例して大きくなり、除荷に対しては小さくなることわかる。ただし除荷に対する変化は、荷重が比較的大きい範囲ではほとんど変化せず、荷重が10KN以下となる段階で急激に小さくなる。

(考察)

金型の変位は、荷重の増加に対してほぼ比例して大きくなり、除荷に対しては小さくなる。除荷に対する変位変化は、荷重は比較的大きい間はほとんど変化せず、荷重が10KN以下となる段階で急激に小さくなる。この一連の変化は、上型を構成する各プレートが、打抜き後にストリッパ力の作用により開いても、素材がパンチから押し外されストリッパ力がなくなれば元に戻ることを示している。この挙動はストリッパの作用と連動して起こるため、実成形では金型の振動等が誘発される可能性がある。実成形用金型では、これが起こらないよう何らかの構造的工夫が必要になると考えられる。

変位が除荷では元に戻る原因には、キーの弾性変形とキー穴内面との摩擦が関係していると考えられる。ただし、完全には零まで戻ることはなく、このまま実成形に供するとプレート間に剥離したバリなどのいわゆるゴミの介在が問題となる。このことを防止するためにも、実成形用金型では前述のように各プレートが開く挙動が起こらないようにする構造的工夫が必要になると考えられる。



荷重-変位線図

図6 - 10 変位測定結果

## 6 - 5 せん断金型へ適用したキー構造の自動調芯性能

### (目的)

ここでは、せん断加工実験による自動調芯機構の動作検証を行った。キーによる金型組付け構造の場合、そのはめ合いの種類は隙間ばめになっているため、パンチとダイは水平方向に移動が可能となっている。使用した工作機械は高精度に金型部品を加工しているため、その距離はおよそ百分の2、3 mm程度と見積もっている。加工中に生じる周囲の半径方向の力のつり合いによって自動調芯されることを確認するため、円形のせん断加工を行いその切り口面の観察を行った。

図6 - 1 1 にせん断切り口形状をモデル化して示す。切り口は主に平坦なせん断面と粗い破断面で構成され、これらの面積割合はパンチとダイのクリアランスに影響される。普通、クリアランスが小さいとせん断面の割合は増加する。この割合を観察すればクリアランスが全周にわたって適正になっているかどうか確認できることになる。また、せん断切り口面からせん断加工性能の確認も併せて行った。

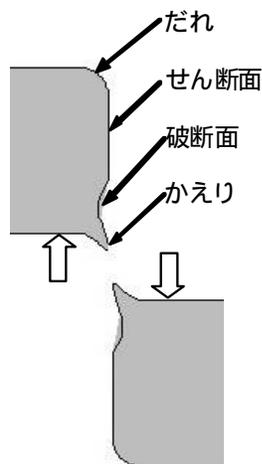


図6 - 1 1 せん断切り口の一般的形状

### (試験方法)

キー構造せん断金型の作性において、使用するキーの最低必要本数は上型の自重に対する安定した分担を考えると3本であることからキーは3本とした。キーは傾斜角度 $15^\circ$ 、PCD60で120度間隔に配置して金型を製作した。

図6 - 1 2 に示すように300kN油圧式万能試験機にせん断加工金型を取り付けて実験を行った。金型の組付け時には、プレス加工用油を薄く塗布した。また、図6 - 1 3 に示すようにストロークと金型変位計測用のセンサーを取付け、せん断加工中の圧縮ストローク - 荷重線図を記録した。金型の微小移動距離も変位計(小野測器、センサーGS-1513A、カウンターDG-4120)で測定した。

せん断加工条件を図6 - 1 4 および表6 - 1 に示す。使用した材料は、ステンレス鋼板( $t=0.4$ 、 $t=0.7$ )、純アルミニウム( $t=1.0$ )、アルミニウム合金( $t=1.0$ )、マグネシウム合金( $t=0.8$ )である。また、材料のひずみ速度敏感性が現れないように低速で金型を加圧した。一般に材料の拘束条件が大きいほど、せん断加工では加工精度が向上することがわかっている。そこで、厳しい加工条件下でキー構造金型がうまく動作するかどうかを併せて確認しておくこととした。そのため、板押さえは使用していない。

せん断加工品の切り口面性状については、変倍式顕微鏡(TRUSCO、TDB-SP2)と顕微鏡デジタルシステム(島津製作所、Mot icam1000)で観察した。

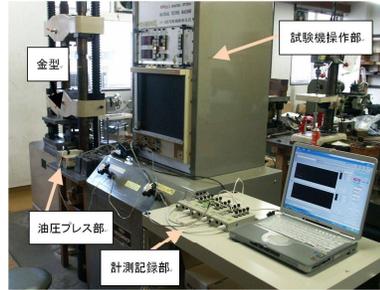


図 6 - 1 2 300kN 油圧式万能試験機と計測系



図 6 - 1 3 ストロークと金型変位計測用のセンサー取付部

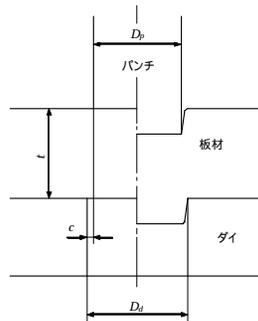


図 6 - 1 4 せん断加工用工具の寸法設定

表 6 - 1 加工条件

工具寸法	パンチ直径 $D_p$	19.86 mm
	ダイス穴直径 $D_d$	20.00 mm
	クリアランス $c$	0.07 mm
板押え	使用しない	
パンチ速度	0.1 mm/s	

(結果)

キー構造金型でせん断加工した円板について、切り口面の写真を図 6 - 1 5 に示す。各材料に毎に写真は 4 つあり、打抜いた円板の 90 度間隔 4 方向の切り口面を撮影してある。

(考察)

ステンレス鋼板 SUS304 の板厚 0.4 mm の場合、板押さえを用いないことに起因して断面にだれが顕著に現れたものの、切り口面性状は周囲にわたってほぼ均一で、自動調芯機能の動作は良好であったと考える。また、SUS304 の板厚 0.7 mm の場合、だれはやや抑えられ切り口面性状もほぼ均一であった。

一方、A1050-H24 および A5052-H34 の板厚 1.0 mm の場合、加工硬化指数が SUS304 よりも小さいため塑性ひずみの伝播性が SUS304 ほど大きくなく、だれはほとんど見られなかった。これらの材料についても切り口面性状はほぼ均一で、自動調芯は良好な動作状況であったといえる。また、AZ31B-0 の破断面は粗くなっており、せん断面において二次せん断が生じている。こうした材料に対しても切り口面は全周にわたってほぼ均一で自動調芯は十分機能したことが確認できた。もちろん、以上述べたせん断切り口面性状は、通常のボルト締結金型で加工したものと差異はわからないことから、ボルトレス金型の加工性能に問題はない。

ここで、キーの本数と配置について検討しておく。キー構造金型は隙間ばめの金型保持によって金型部品の微小移動を可能とするものであるので、下型ではキーの本数が加工精度に及ぼす影響についてはほとんどないものと考ええる。一方、上型については、加工前、重力によりキーに力がかかっている状態であるが、型の自重を支持することになり、均等な負荷をキーに与えるような配置が望ましいことがわかる。

延性の小さい材料のせん断加工のように、加工終了付近で加工荷重が急激に下がり加工反力オーダーの衝撃的な応力が工具を介してホルダーに作用する場合があります、この場合についてはホルダーを保持するキーの本数は加工力に応じて決める必要がある。

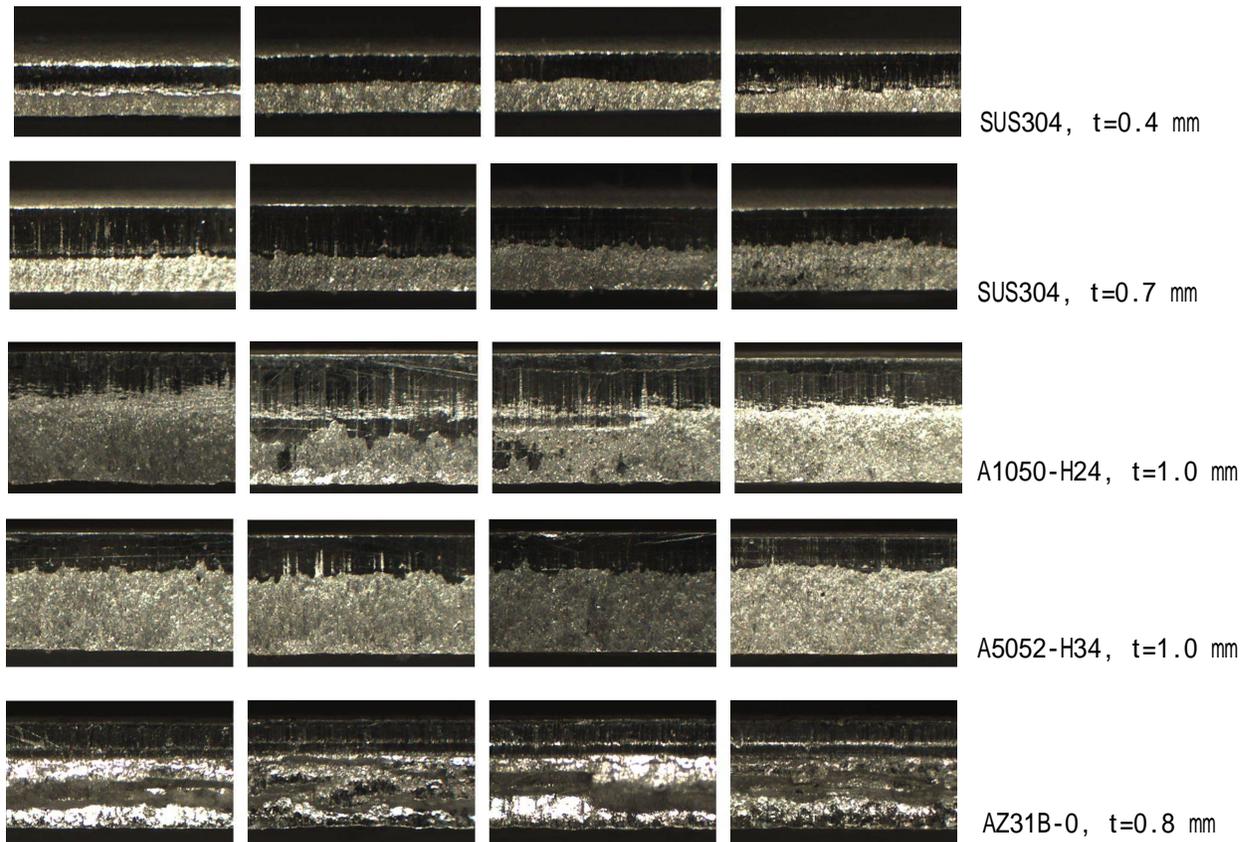


図 6 - 15 各種金属材料のせん断切り口面性状

## 6 - 6 従来金型を用いたせん断加工における金型と板材の弾塑性有限要素解析

### (目的)

ここでは従来のボルト締結金型におけるパンチ破壊問題について、弾塑性有限要素法による数値シミュレーションを行った。これにより芯ずれによるパンチ破壊の危険箇所を推測し、金型設計のための指針を得ることを目指した。

### (試験方法)

普通、プレス成形中、プレス機械と金型の弾性変形によって上型と下型の芯は、無負荷時のものからずれてしまう。また、金型の製作精度に起因して加工開始時においても、大小は別にしてすでに芯ずれは存在する。

そこでパンチに芯ずれがある場合、パンチ内部の応力分布は不均一性を示すことを確認し、危険部位を把握することを目的に行った。その手法としては、実験誤差の影響を排除でき、また、各加工パラメータの影響がはっきり現れる数値計算法を採用した。なお、後述のとおり計算条件として厳しいせん断打抜き加工条件を用いて、危険部位が明瞭に現れるよう条件を工夫した。

ソルバーには、動的陽解有限要素法コード DYNA3D(Public domain version)を用いた。表 6 - 2 に計算モデルの寸法設定を示す。板厚は 2.3mm、パンチ直径 1.8 mm とし、打抜きせん断加工としては厳しい加工条件である。クリアランスは板厚の 4.3 %(0.1 mm)とした。芯ずれ量は 0.1 mm とし、不均一性が現れやすいように設定した。

表 6 - 3 に工具および板材料に仮定した機械的特性を示す。パンチ、ダイスおよびパンチホルダーは、鉄鋼材料相当の弾性材料を仮定した。また、板材料は初期降伏応力 300 MPa の弾 - 線形硬化を仮定した。工具同士また板と工具の境界面においては、静止摩擦係数、動摩擦係数とも 0 を仮定した。

表 6 - 2 計算モデルの寸法設定

板材料の板厚	2.3 mm
パンチ直径	1.8 mm
ダイス穴径	2.0 mm
パンチとダイス間のクリアランス	0.1 mm
パンチとダイスの芯ずれ	0.1 mm

表 6 - 3 工具および板材料に仮定した機械的特性

パンチ ダイス パンチ・ホルダー	線形弾性、縦弾性係数：210 GPa、ポアソン比：0.29
板材料	弾 - 線形硬化、初期降伏応力：300 MPa、硬化係数：100 MPa

### (結果)

計算で得られた変形パターンと内部応力分布を図 6 - 16 と図 6 - 17 に示す。図 6 - 16 は、板材料の変形パターンで上の図はすべての有限要素を表示したもので、下の図は相当ひずみが 4 を超える有限要素を表示していないものである。

(考察)

図6-16の下の図によって、パンチ先端の材料破断が進行する様子がわかる。また、図6-17は、パンチ、ダイス、パンチ・ホルダー、板材料のすべてを表示したものである。従来構造の金型における芯ずれによるパンチ内部の応力分布の不均一性が確認できた。また、パンチとダイスの芯ずれに起因してパンチ・ホルダーの根元付近の拘束条件が大きい個所で曲げによる破壊が生じやすいことが示唆される。

以上の計算結果より、キー締結構造ボルトレス金型では上型と下型の芯ずれが抑制されるためパンチ破壊問題を生じにくいといえる。

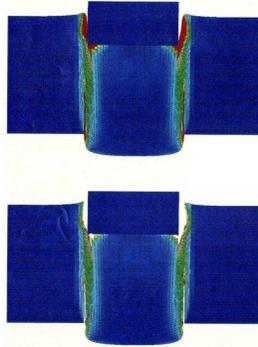


図6-16 板材料の変形パターン

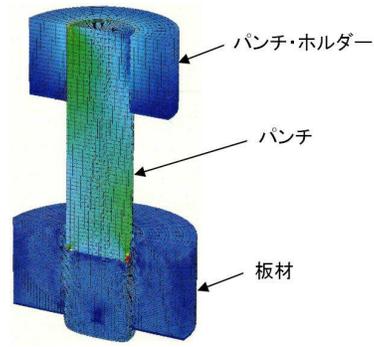


図6-17 工具内部の応力分布

#### 6-7 キー構造用の高耐摩耗材料の製造

(目的)

スターク材は高剛性で耐摩耗性に優れており、当研究に用いられる金型などの部材として有用であることが昨年度の研究で明らかとなった。しかし反面では、非常に硬度が高いため、通常の工具では加工が困難であることもわかってきた。今回はこの材料を金型本体に適用しやすくするよう加工性の改善を目的に、その製造法の改良について実験を実施した。

(試験方法)

実験に使用した素材は、鋳造し鍛造を付加したものの、鋳造のままのもの2つである。鋳造品は従来品であるが、鍛造を付加したものは昨年度の研究で見つけ出したクラック発生を抑制する方法により作製した改良品である。

上記素材に対し、焼入焼戻し処理と軟化焼鈍を施した。素材と施した熱処理の関係を表6-4に示す。

表6-4 素材と熱処理

材料	素材	サイズ	適用した熱処理
No.1	鋳造+鍛造品	40×20×150L	焼入焼戻し
No.2	鋳造+鍛造品	40×20×150L	軟化焼鈍
No.3	鋳造	40×20×200L	焼入焼戻し
No.4	鋳造	40×20×200L	軟化焼鈍

素材の製造から熱処理に至る全体の工程を以下に示す。また、熱処理における温度と保持時間の条件を焼入焼戻しについて図6-18、軟化焼鈍について図6-19に示す。

鋳造品 + 鍛造品スターク：材料 1, 2  
 木型製作 鋳型造型  
 材料成分調整 溶解 鋳造 ショット ワイヤーカット  
 鍛造加工 ワイヤーカット (材料 1) 焼入れ 焼戻し 研磨加工  
 (材料 2) 軟化焼鈍 研磨加工

鋳造品スターク：材料 3, 4  
 木型製作 鋳型造型  
 材料成分調整 溶解 鋳造 ショット  
 ワイヤーカット (材料 3) 焼入れ 焼戻し 研磨加工  
 (材料 4) 軟化焼鈍 研磨加工

材料 1, 3

材料 2, 4

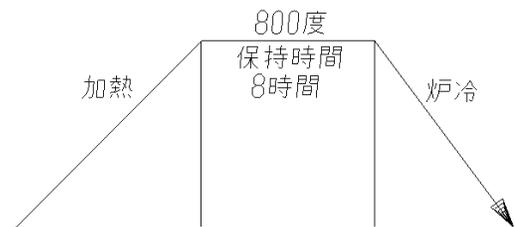
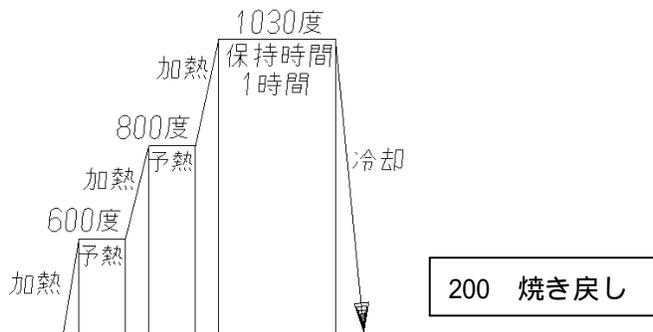


図 6 - 1 8 焼入れ焼戻しチャート図

図 6 - 1 9 軟化焼鈍チャート図

以上のような方法により作製した材料に対し、硬さ測定を実施した。使用した方法はロックウェル硬さ試験法で、Cスケールを用いた。使用したロックウェル硬さ試験機を図 6 - 2 0 に示す。各材料で 5 箇所を測定して平均値を算出した。



図 6 - 2 0 ロックウェル硬さ試験機

(結果)

ロックウェル硬さ試験の結果を表6-5に示す。

表6-5 硬さ測定結果

	硬さ HRC					平均
	1	2	3	4	5	
材料 1	50.2	49.7	50.6	49.5	50.3	50.1
材料 2	35.4	34.2	35.7	35.4	34.8	35.1
材料 3	54.6	55.2	55.7	55.4	54.2	55.0
材料 4	35.1	34.6	35.2	34.6	35.2	35.0

(考察)

本年度は、焼入焼戻し処理を施し所定の硬さにした材料と、軟化焼鈍を施し硬度を低くした材料を製作した。硬さ測定結果から、安定した硬さを得ることができ、熱処理の工程が正常に行われたことが確認できた。

素材としての硬さは昨年度の研究から、鋳造+鍛造がHRC50、スターク鋳造がHRC66である。熱処理の結果、素材の硬度は、鋳造+鍛造の焼入焼戻しでは変化なし(100%)、鋳造+鍛造の軟化焼鈍では70%、鋳造の焼入焼戻しでは83%、鋳造の軟化焼鈍では53%へ下がったことになる。焼入焼戻しより軟化焼鈍で硬度が下がりやすいことがわかる。以上のような硬度低下により加工性はよくなったと考えられるが、耐摩耗性などの特性とのチューニングが必要である。

## (7) 割型締結に係るキー構造の研究

### 7-1 キー構造の設計法案

(目的)

ダイス、パンチは通常、割型構造とする場合が多い。もちろん、割型構造ボルトレス金型においては、キー構造に関連して金型設計指針は従来のボルト締結構造のものとは異なる。本研究では、キー構造が金型設計における型部品寸法や材料の選択に及ぼす影響を検討し、設計上、注意を要する基本的事項の抽出を目的とした。

(試験方法)

金型設計の基本的要素は、金型の材質、形状、寸法である。これらの設計法案について検討する。

(結果)

図7-1に割型構造のボルト締結構造金型の一例を示す。パンチ、ダイス・ホルダーは各ホルダー取付金型部品にボルト締結され、その位置決めはロックピンによって行われる。割型となっているパンチ、ダイスの交換は各ホルダーを取り外して行う。ボルト穴もロック穴も打抜方向と平行であるため、各ボルト軸力の和を金型の締結力と考えることができる。そのため、ボルトの選択は、ボルト材料の降伏強度または耐力と横断面積を基に決定すればよい。割型取付穴やロック穴とボルト穴の距離は、締結力により割型の取付穴寸法に影響を及ぼさないようにとればよい。

キー構造の割型金型の模式図を図7-2示す。キー構造の場合、キー穴は打抜方向に平行

でないため、キーの傾斜角度、ホルダー高さ  $H$  を考慮して設計する必要があることがわかる。もちろん、ホルダー取付部品の  $L$  寸法については一定寸法が必要なため、ホルダー取付部品の寸法はボルト締結のものより大きくとることになる。

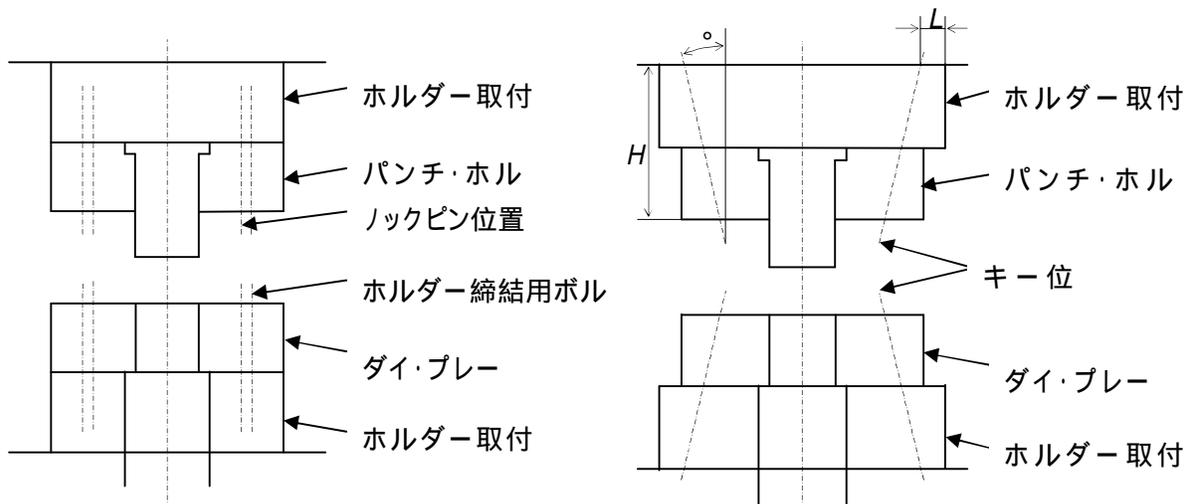


図 7 - 1 割型構造のボルト締結金型

図 7 - 2 割型構造のキー締結金型

(考察)

キー構造の特徴として、金型の締結力は重力によるものを別とすれば構造上生じない。このため、金型組付けによるパンチ、ダイス取付穴の弾性変形は考慮しなくてもよいことになる。しかし、せん断加工のように衝撃反力が生じたり、深絞加工製品をパンチから離脱させる時にはキーに引張りとし側面(斜め横方向)から力がかかる。こうした力、特に横方向の力に対する考慮がホルダーおよびホルダー取付部品を設計する際には必要である。

以上のことから、パンチ・ホルダーやダイスの取付部品の材料選択としては、従来のものよりも硬いものが必要である。たとえば、SKD11 の焼入材などが適当であると考えられる。ダイス部を割型構造にした場合においても、同様な設計手法が適用できる。

7 - 2 キー構造金型の静的強度

(目的)

キー構造金型はいわゆる柔軟構造であり、基本的特性としてプレス成形に耐えうるだけの強度を有しているのかわかっていない。ここでは、金型に実際の成形に相当する荷重を荷し、金型に生じるひずみを計測した。ボルト締結金型に生じるひずみをベンチマークとし、これとキー構造金型に生じるひずみを比較することにより強度の評価を行った。

(試験方法)

ボルト締結金型とキー構造金型についてひずみ計測のために行った実験方法を図 7 - 5 に示す。せん断金型のダイス側を図のように支え、ダイス裏側から荷重を加えダイス表面に生じるひずみをひずみゲージを用いて計測した。ひずみゲージの貼付位置は、ボルト締結金型については図 7 - 5 ( a ) に示すように 2 つの締結ボルト間(ピッチ 70mm) の中央である。キー構造金型については、ボルト締結金型に対しキー配置に係る穴の数と位置が異なっているが、金型の外形寸法は同じであり、ひずみゲージは図 7 - 5 ( b ) のようにボルト締結金型と同じ位置に貼り付けた。

(結果)

実験により得られた荷重とひずみの関係を図7 - 6に示す。荷重ひずみ曲線は、ボルト締結金型では上に凹形状を示す2次曲線、キー構造金型では直線となるが、荷重に対するひずみは両者間に大差がないことがわかった。

(考察)

実験により得られた荷重ひずみ曲線は、ボルト締結金型では上に凹形状の2次曲線、キー構造金型では直線となるが、ある荷重に対するひずみは両者間に大差はなく、生じるひずみはほぼ同じであると判断できる。この結果からキー構造金は、成形に十分耐えうるだけの強度を有していることがわかった。

金型に加わる荷重は、ボルト締結金型ではボルトの引張強さで支えられ、キー構造金型では主にキーの曲げ強さで支えられると考えられる。曲げ変形は結局、作用する応力としては引張と圧縮に他ならないから、金型構造におけるボルトとキーの作用は力学的には同じであると考えられる。よってボルト締結金型とキー構造金型の強度は、もちろん使用するボルトやキーの本数や材質に依存するが、本質的には大きくは変わらないと考えられる。

ただし、キー構造金型においてキーの使用本数を3本として固定するならば、金型の強度を上げる方法としてはキーの寸法を大きくする以外にない。しかし、プレス機械の大きさから金型寸法は制約を受けるから、キー寸法をむやみに大きくすることはできない。従って、キー構造は比較的小型の金型、例えばトランスファー金型の各ステージ用金型などへの使用が適していると考えられる。

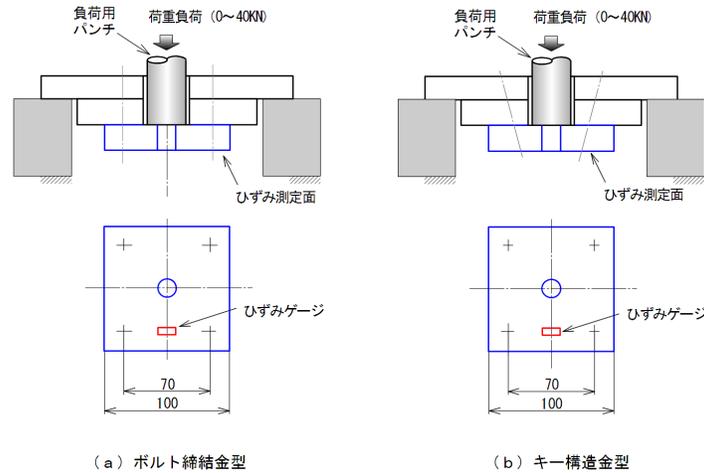


図7 - 5 ボルト締結金型とキー構造金型のひずみ測定方法

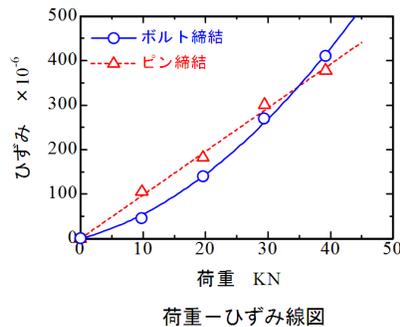


図7 - 6 ひずみ測定結果

### 7 - 3 金型の初期芯ずれの成形による是正挙動

#### (目的)

キー構造金型は、熟練を必要とする初期芯だし作業を行うことなく使用することを想定している。すなわち、成形の1ショット目は芯がずれた状態で行うことになる。この芯ずれが成形によりどのような変化を示すか実験的に検証する。

#### (試験方法)

既を示した図6 - 13の方法を用いた。図に示したストロークと金型変位計測用のセンサーにより、せん断加工中の圧縮ストローク - 荷重線図を記録した。また、金型の微小移動距離は変位計(小野測器、センサーGS-1513A、カウンターDG-4120)で測定した。

初期芯ずれとしてパンチホルダーに所定の横方向変位を与え、打抜きを行ってストロークに対する金型の横方向変位を計測した。被打抜材にはステンレス鋼SUS304Lを使用した。板厚は0.7mmである。

#### (結果)

図7 - 7に金型変位を示す。板がせん断により分離するのは、ストローク 0.45 mm 付近である。この図により、ストロークに対して、与えた初期変位が減少していく挙動を把握できた。

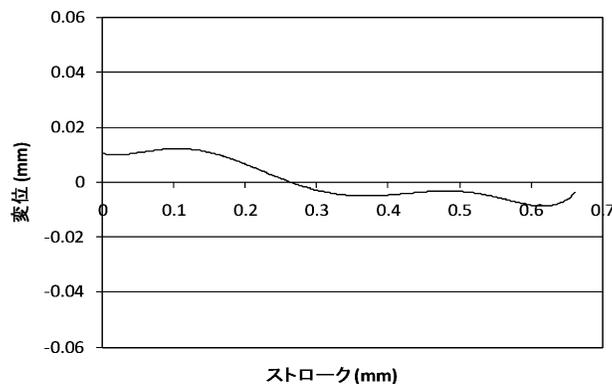


図7 - 7 ダイスの水平方向微小変位

#### (考察)

加工中に金型が水平方向に微小距離移動していることがわかる。板が分離するのは、図では0.45 mm付近である。分離後は0.6 mm付近でやや急激な変化が観察されるが、最終的には破断直前の位置に収まっている。この急激な変化は、破断挙動自体は衝撃的挙動であり金型に生じる力に振動成分を含むことによるものと考えられる。

### 7 - 4 量産用自動プレス機を用いた自動調芯性能

#### (目的)

キー構造のモデル金型(ボルトレス金型)を作製し、実際の量産で使用している自動プレス(図7 - 8)に取付けてせん断加工を行った。金型の変位挙動の把握とプレス品の切り口面の観察から、金型の自動調芯性能の評価を行った。

(試験方法)

(a) デジタル変位装置による金型の変位挙動の調査

図7-9に示すように、製作したキー構造のモデル金型の下型にデジタル変位センサーを取付けてXとY方向の変位を測定した。成形時、金型が意図的に偏心状態となるように、プレスへの金型の取付位置は、プレスの左側、右側、中心の3つの場合について測定を行った。ボルトレス金型との比較データとして、ボルト締結金型についても同様の実験を行った。被打抜材には、オーステナイトステンレス鋼SUS304の板厚0.4mmと0.8mmを用いた。



図7-8 容量20kNの自動プレス

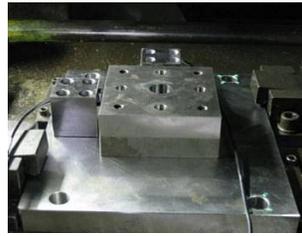


図7-9 ボルトレス金型とデジタル変位センサー

(b) プレス品の打抜き断面評価

プレス品(図7-10)の断面を、デジタルマイクロスコープ(図7-11)を使用して評価する。断面の評価位置は90°間隔で4箇所撮影した。また、変位挙動の試験と同様にプレスラムの傾きも考えて、プレス左右と中央での測定を行った。



図7-10 プレス品



図7-11 デジタルマイクロスコープ

(結果)

(a) デジタル変位装置による金型の変位挙動の調査

キー構造金型(ボルトレス金型)では、キーのはめ合いによる柔軟構造が自動調芯機能を発揮する。当初キーのクリアランスを2 $\mu$ mとした金型で実験を行ったが、金型に変位が生じなかったため、クリアランスを5 $\mu$ mにした金型で同様の実験を行った。

ボルト締結金型とクリアランス5 $\mu$ mのキー構造金型(ボルトレス金型)による変位測定結果を表7-1に示す。ボルト締結金型では金型をプレスのどの位置に取り付けても、金型の変位挙動を確認できなかった。キー構造金型(ボルトレス金型)は、はじめの5ショットまで

は、数値に揺らぎがあるが、次第に収束し変位センサーの読み値が安定した。これは、5ショットを行う間に金型が動き調芯が行われたことを示していると考えられる。このことは次に述べる打抜切口面の観察結果からも明らかである。

なお、キーとキー穴のクリアランスが2 $\mu$ mの場合には変位挙動が確認できなかったが、このことは、クリアランスが2 $\mu$ m程度では、金型に柔軟性がなく自動調芯機能が生じないことを意味している。また、前項のマシニングセンタを用いて加工した斜め穴の角度が高精度であることを示していると考えられる。

表 7 - 1 金型の挙動結果

		ボルト金型						ボルトレス金型					
		プレス左		プレス中央		プレス右		プレス左		プレス中央		プレス右	
被加工材	サンプルNo.	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
SUS304 t=0.4	1	-1	0	-2	-1	-1	-5	-2	5	8	12	0	16
	2	-1	0	-2	-1	-1	-5	-11	11	4	20	4	18
	3	-1	0	-2	-1	-1	-5	-14	9	-1	26	6	18
	4	-1	1	-2	-1	-1	-5	-13	7	-4	29	19	2
	5	-1	0	-2	-1	-1	-5	-13	11	-6	31	19	2
	6	-1	0	-2	-1	-1	-5	-12	13	-5	30	13	-2
	7	-1	0	-2	-1	-1	-5	-10	12	-6	31	12	3
	8	-1	0	-2	-1	-1	-5	-12	13	-6	31	13	6
	9	-1	0	-2	-1	-1	-5	-12	13	-6	31	15	8
	10	-1	0	-2	-1	-1	-5	-13	12	-7	31	17	8
SUS304 t=0.8	1	0	-4	-1	-6	-1	-6	6	5	0	3	-5	1
	2	0	-4	-1	-6	-1	-6	6	9	-4	7	-12	5
	3	0	-4	-1	-6	-1	-6	8	7	-6	10	-9	12
	4	0	-4	-1	-6	-1	-6	3	22	-3	10	-9	12
	5	0	-3	-1	-6	-1	-6	-1	21	-3	14	-13	12
	6	0	-4	-1	-6	-1	-6	-3	20	-1	16	-13	10
	7	0	-4	-1	-6	-1	-6	-4	18	-2	18	-15	10
	8	0	-4	-1	-6	-1	-6	-7	13	-1	18	-12	10
	9	0	-4	-1	-6	-1	-6	-4	18	-2	18	-12	11
	10	0	-4	-1	-6	-1	-6	-7	15	-1	18	-12	10

(b) プレス品の打抜き断面評価

打抜切口面の様子を図 7 - 1 2 に示す。ボルト締結金型では位置によって切口面の状態が不均一になっており、プレスの傾きの影響がでている。

キー構造金型（ボルトレス金型）では、どの板厚、位置においても均一な打抜き面が観察できた。これは、キー構造による自己調芯機能の効果であると考えられる。

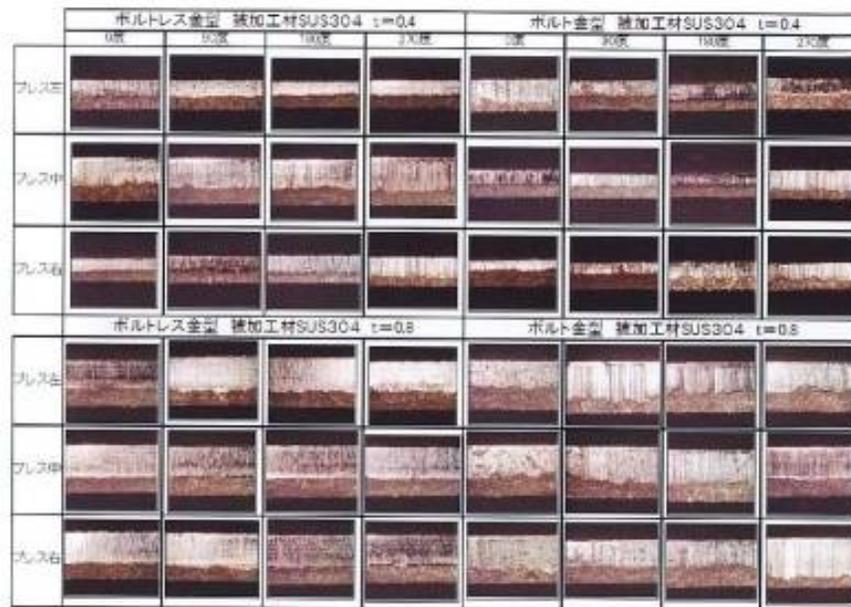


図 7 - 1 2 プレス打抜き断面評価写真

(考察)

ボルトレス金型にて、自動調芯性能の確認ができた。今回はプレス品が左右前後対称形状であり、打抜き荷重のバランスも均一であったことも、結果の大きな要因である。プレス品は、左右前後の打抜き荷重バランスが崩れるような形状のものもあり、今後は、製品の形状を変更したものや、曲げ加工および絞り加工などでも研究を来年度の課題として取り組む。

7 - 5 割型用の高耐摩耗材料の製造

割型には、はめ合い公差はもちろんのこと、いんろう、テーパなどの構造も必要となる。従って、適用する材料には良好な加工性が求められる。現状のスターク材は、剛性が大きく耐摩耗性に優れており割型に適しているが、被削性が悪いことが最大の欠点である。ここではスターク材を金型の割型の部分に適用できるよう、製造工程における熱処理付加による加工性の改善を目的に実験を行った。研究内容は既に述べたものと同様であるのでここでの細述は割愛する。

7 - 6 キー構造金型に係る段取り及びメンテナンス時間の評価

(目的)

せん断型と絞り型をキー構造とした金型を用いて、実際に成形加工を行い製品の品質を確認する。また、キーの着脱に係る段取り時間、メンテナンス時間の評価を行い、キー構造の有効性を評価する。

(試験方法)

下記図面(図7-13)の製品を製作する金型のせん断型(ブランク金型、トリム金型)と絞り型(ドロー金型、リスト金型)を図7-14の様に製作し、製品品質とキー構造金型に係る段取り及びメンテナンス時間の評価を行った

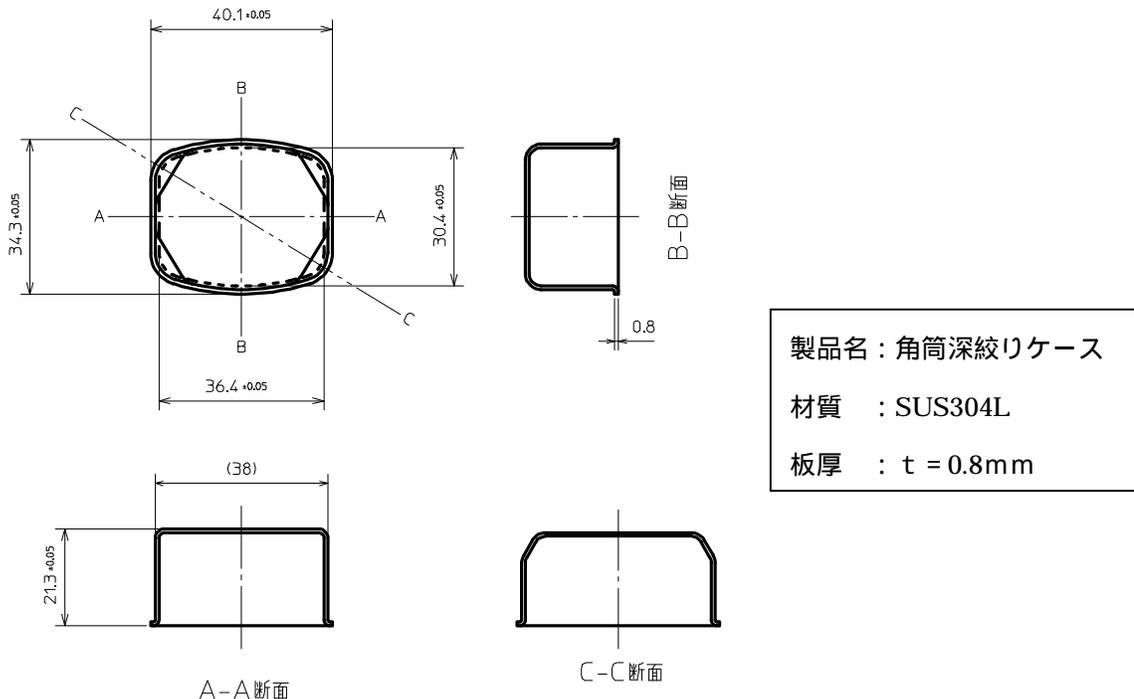


図7-13 製品図面

図7-14のように、全4工程のボルトレス金型を製作した。左から1.ブランク工程、2.ドロ工程 3.リスト工程 4.トリム工程となる。全工程共、キー構造金型となっている。また、キー穴に関してはボーリング加工の穴と、穴の精度向上と耐摩耗性を考慮したホーニング穴を加工してある。さらに、ボルト金型との比較調査の為、ボルト締結できるように製作してある。

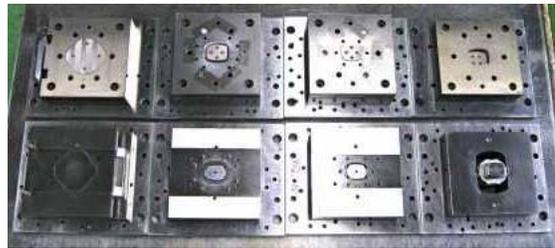


図7-14 剪断金型とドロ-金型

(結果および考察)

(a) 成形品のキズ等の評価

得られた成形品を図7-15に示す。成形品の外観および寸法からその出来具合を評価し表7-2に示す。表7-2のように、図面規格(図7-13)に対して良好な結果を得られた。n=100での焼付きは、金型パンチおよびダイスに焼付き防止のコーティングや、耐摩耗性に優れる超硬素材などを使用していないからであり、それらを施せば全く問題ないレベルである。



図7-15 成形品の外見

表7-2 製品品質評価結果

	34.3 ± 0.05	40.1 ± 0.05	30.4 ± 0.05	36.4 ± 0.05	21.3 ± 0.05	外観
n=1	34.29	40.12	30.41	36.39	21.28	
n=3	34.29	40.12	30.40	36.39	21.26	
n=5	34.28	40.12	30.39	36.38	21.28	
n=10	34.28	40.11	30.40	36.38	21.27	
n=100	34.27	40.11	30.39	36.38	21.29	

外観判定基準 : 良好 : 焼付等がみられる x : 製品不良(割れ等、機能不良)

(b) キーの着脱時間および、メンテナンス時間

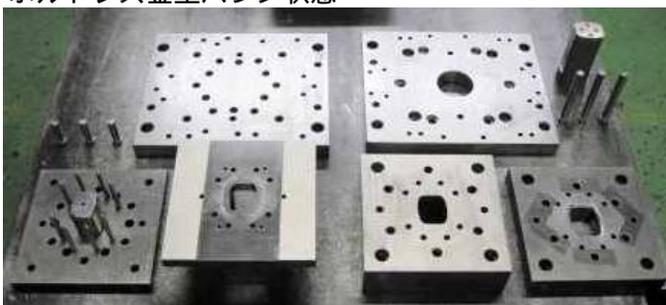
図7-16のように、金型のばらしと組立てを行い、ボルトレス金型とボルト金型の比較調査を行った。一番上の写真はボルトレス金型のバラシ後の状態、真中はボルト金型のバラシ後の状態、一番下は、組立て後のボルトレス金型である。着脱に係る段取り時間、メンテナンス時間の評価(表7-3)については、ボルトレス金型の方が、着脱時間、メンテナンス時間ともにボルト金型の半分以下の時間で出来ることがわかった。

ボルトレス金型組立て状態



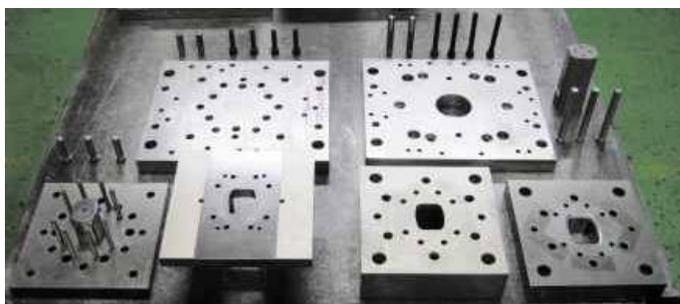
(a) ボルトレス金型組立て状態

ボルトレス金型バラシ状態



(b) ボルトレス金型バラシ状態

ボルト金型バラシ状態



(c) ボルト金型バラシ状態

図7-16 金型の組立て

表7 - 3 金型の着脱とメンテナンス時間の評価

	組立時間(min.)	ばらし時間(min.)	メンテナンス時間(min.)
ボルトレス金型	2	1.5	10
ボルト金型	7	5	30

## (8) キー構造による実験用(試作用)金型の作製

### 8 - 1 トランスファー金型のキー構造化において金型に発生するひずみの評価

#### (目的)

摩耗以外の要因による金型寿命に関しては、金型に生じる衝撃応力などが挙げられ、せん断打抜き加工ではそれが支配因子となる場合が多い。特にキー構造のボルトレス金型では、ボルト締結による剛体的な構造になっていないため、金型部品どうしの境界面などで有害な振動を生じる恐れがある。この種の振動は金型内の応力振動で評価できるが、寿命に影響するものかどうかについて実験で確認しておく必要がある。

本研究では、実機用トランスファー金型で行われる一般的な加工工程を対象として、金型に発生する応力変動に注目した。各種金属板の打抜きせん断加工について金型のひずみデータを調査・検討し、キー構造のボルトレス金型の耐久性を明らかにすることを目的とした。加工部の形状寸法を同じくする通常のボルト締結構造金型についても同様のデータを採取して、比較評価した。

#### (実験方法)

##### (a) 実験装置

図8 - 1 に試験機と計測器類を示す。プレス機として、加圧能力 300kN の油圧式万能試験機(同図 a)を使用した。ステージ上にダイセットを置き加圧した(同図 b)。ラムストロークについては、接触型変位計により計測した(同図 c)。荷重は試験機からのアナログ出力を利用した。金型表面のひずみ検出には、ひずみゲージ(共和電業、半導体ひずみゲージ KSN-2-120-E4-11)を使用した。接着前には貼付位置をペーパー掛けして粗さを調整しておき脱脂した。ひずみゲージ用の接着剤(共和電業 CC-33A)で金型に接着した。ひずみゲージのゲージリードに平行ビニル線をハンダ付けして延長し計測器に接続した。

ひずみ計測器(共和電業 DBU-120A)は計測用コンピュータに接続されており、ひずみゲージからの電気信号をひずみに変換(数値化)し記録した。また、ラムのストロークと荷重も同装置で AD 変換して記録した。ストロークについては、ハイトゲージを用いて校正した接触式変位計を使用した。

##### (b) 実験条件

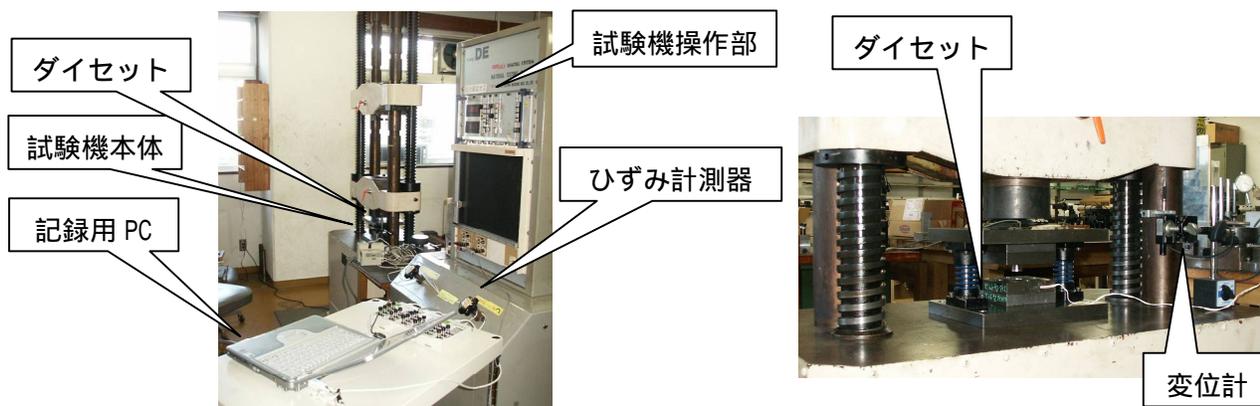
図8 - 2 にボルトレス金型の外観を示す。キー構造ボルトレス金型とボルト締結金型について、ダイセットとパンチ、ダイ保持構造は形状寸法とも同じである。加工条件について表8 - 1 と図8 - 3 に示す。パンチ直径 19.86 mm でダイ穴径は 20.00 mm である。

図8 - 4 にパンチとダイ、各ホルダーを示す。ダイは 100 mm × 100 mm × 20 mm のプレートに穴加工されたものである。このプレートが、3 本のピン(ボルトレス金型)、または、4 本の M10 ボルト(通常のボルト締結金型)でホルダープレート(100 mm × 100 mm × 20 mm)に連結されている。パンチについても同様である。

金型のひずみを計測するため、金型表面に貼付したひずみゲージを図8 - 5 に示す、同図

(a)はハイトゲージを用いて位置決めしてダイに貼付したひずみゲージで、打抜き方向に対して垂直方向のひずみ(応力)を検出する。一方、同図(b)はパンチに貼付したもので、打抜き方向のひずみ、すなわちパンチ軸方向のひずみ(応力)変動を検出する。

ダイのひずみゲージの添付位置はその側壁中央部である。添付位置の決定については、いくつかの部位に添付してその出力を調査した後、比較的高出力が得られるダイ側壁中央部に決定した。一方、パンチについてもひずみゲージによる軸方向と円周方向に関する応力の検出感度を検討した。円周方向は出力が小さくゲージ部の曲げ半径も小さくなりすぎて補正困難なため、軸方向に沿って貼付することとした。



(a) 油圧式試験機と計測器類

(b) 加工試験部(ダイセットと変位計)



(c) 変位アンプと表示部

図 8 - 1 試験機と計測器類

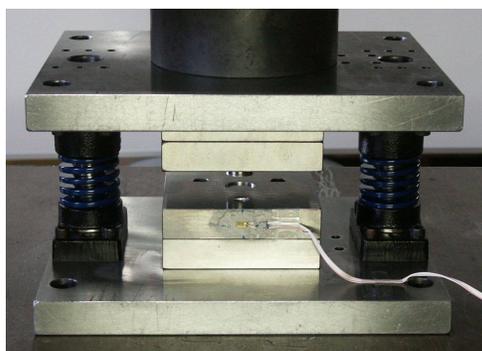


図 8 - 2 ボルトレス金型外観

表 8 - 1 加工条件

パンチ直径 $D_p$	19.86 mm
ダイス穴直径 $D_d$	20.00 mm
クリアランス $c$	0.07 mm
潤滑	プレス加工油を薄く塗布

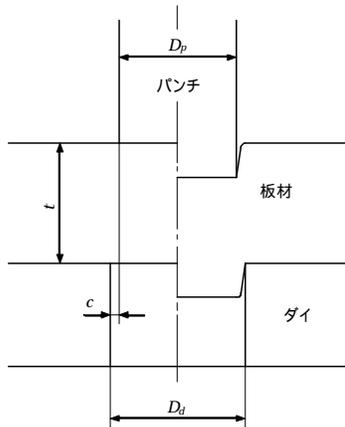


図 8 - 3 せん断加工工具寸法設定

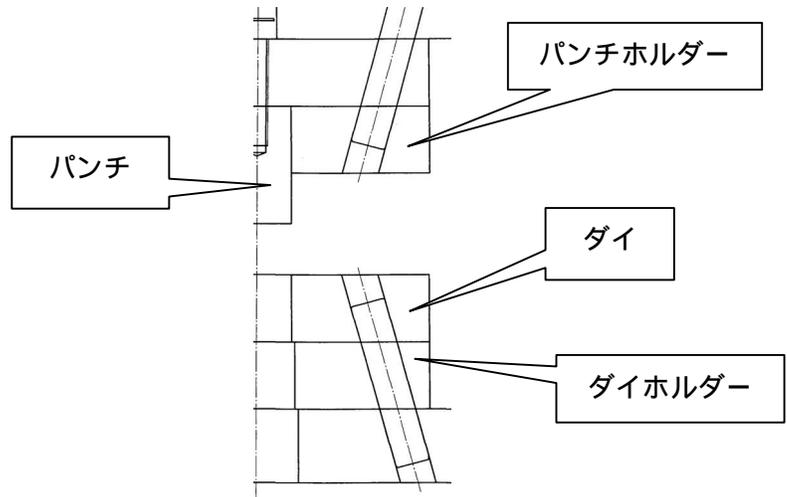
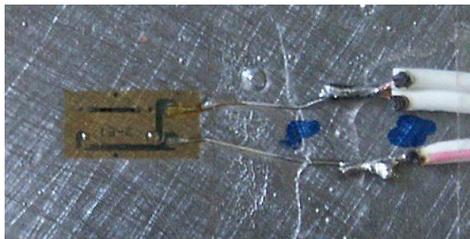


図 8 - 4 パンチ、ダイ、各ホルダー



(a) ダイに貼付したひずみゲージ



(b) パンチに貼付したひずみゲージ

図 8 - 5 半導体ひずみゲージ(KSN-2-120-E4-11)  
(ゲージ抵抗：約 120 Ω、ゲージ率：約-100)

(c) 供試材

打抜きせん断加工に使用した板材料は、公称板厚 0.7 mm のステンレス鋼板(SUS304L)、公称板厚 1 mm の純チタン板(TP340C)およびアルミニウム合金(A5052-H34)である。

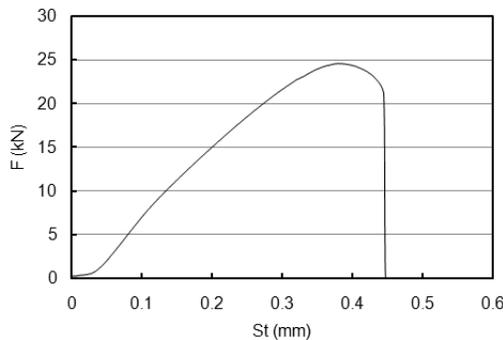
(結果)

ボルトレス金型を用いた時のせん断加工ストロークに対する、荷重、ダイ側面およびパンチのひずみ変動の代表例としてボルトレス金型の SUS 材加工結果を図 8 - 6 に示す。一方、ボルト締結金型の SUS 材加工結果を図 8 - 7 に示す。

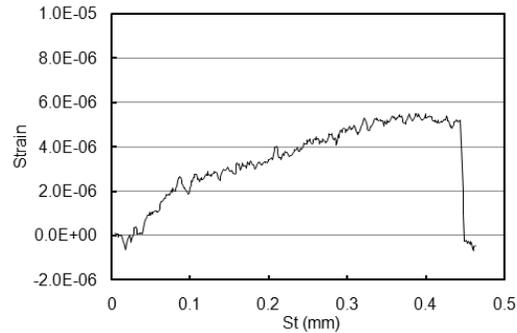
(考察)

まず、ボルトレス金型について述べる。いずれの材料についてもパンチ荷重はせん断面の形成が終わると破断領域に移行するため無負荷になり急激に0に戻っている。ダイの打抜き方向に垂直なひずみとパンチ軸方向のひずみについても同様の傾向があり、その時、急激な応力変化が金型に生じていることが分かる。その程度は、ブレークスルー時の荷重が大きさで正の相関が見られる。一方、ボルト締結金型では、パンチ荷重とパンチ軸方向のひずみに関しては、加工メカニズム自体は同じなのでボルトレス金型のもと同様である。しかし、ダイの打抜き方向に垂直なひずみに関しては、特に SUS304L と TP340C ではひずみ変化はボルトレス金型のものより小さかった。これは、ボルト金型では締結力により金型部品の境界面に摩擦力が働き、金型の弾性変形に対する拘束条件が大きかったことによるものと考えられる。また、加工後、ひずみが元に戻らないのは金型同士の微小な相対移動を生じるためヒステリシスループを描くためと推測する。

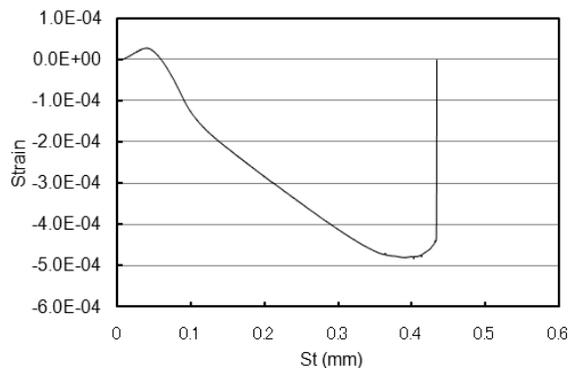
パンチについては、ボルトレス金型と従来型金型の違いはない。一方、ダイのひずみ(応力)変動については、ボルトレス金型ではブレークスルー時の急激な変化がより顕著である。しかし、有害と言える程の振幅の大きい振動波形は見られないことから、金型のボルトレス化が耐久性に及ぼす影響は小さいと言える。



パンチ荷重 - ストローク線図

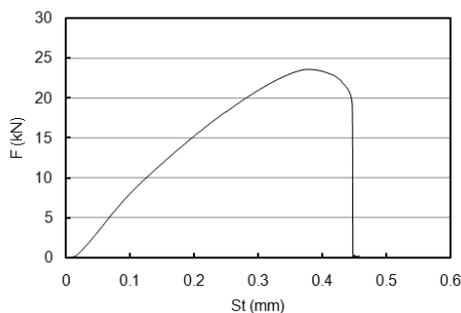


ダイの打抜き方向に垂直なひずみ - ストローク線図

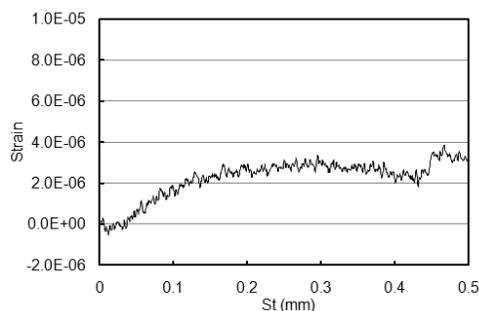


パンチ(垂直方向)ひずみ - ストローク線図

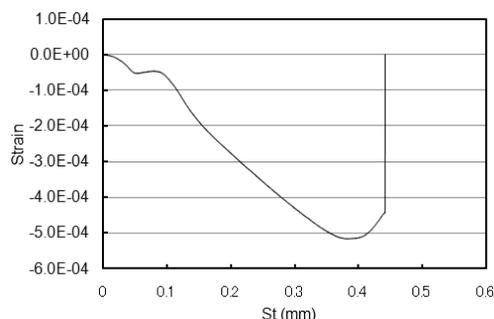
図8 - 6 ボルトレス金型：材料 SUS304L(0.7t)



パンチ荷重 - ストローク線図



ダイの打抜き方向に垂直なひずみ - ストローク線図



パンチ(垂直方向)ひずみ - ストローク線図

図 8 - 7 ボルト締結金型：材料 SUS304L(0.7t)

## 8 - 2 キー構造に適したプレス工程に関する考察

### (目的)

トランスファー金型では、複数のステージで、せん断、深絞りなど成形原理の異なる板材成形が行われる。最終的には、トランスファー金型の全ステージをキー構造化したい。しかし、キー構造がどのような板材成形に適しているか解明できていない。キー構造が有する柔軟性は実成形では芯ずれとなって表れる。キー構造は単純な考察から、せん断のように上下それぞれの金型にあるエッジ(切り刃)が交錯する成形よりは、深絞りのように上下それぞれの金型にあるR部が交錯する成形により適合しやすいことは容易に想像できる。ここでは、深絞り成形を対象に、上下の金型の芯ずれが解消される機構すなわち自動調芯の機構を考察すると共に、具体的にどの程度の芯ずれを許容できるか調べた。これらの解明は、キー構造金型の治具などへの適用範囲拡大にも有効であると考えられる。

この試験を実施するにあたり、切削チップ(内径)、ホルダ(内径)、切削チップ(外径)、金型部品(絞りダイ、R3)、金型部品(絞りダイ、R2)、金型部品(絞りダイ、Rなし)、エタノール、ダイヤモンドシート、エンドミルを使用した。

### (試験方法)

#### (a) 自動調芯が行われる原理に関する考察

深絞り成形において自動調芯が行われる原理を考える。図 8 - 8 に示す深絞り成形において、ダイスは水平方向に移動できる構造であると考えられる。これは、キー構造金型において、自重による調芯が行われる上型と自重による調芯が行われない下型の状態を上下を反転してモデル化していることに相当する。芯ずれによりパンチR部とダイスR部が接触することで、深絞り成形中に自動調芯作用が発生するとして考察を行った。

(b) 深絞り成形における自動調芯が行われる原理の実験による確認

上記の考察が正しいことを明らかにするため、実際にこの課程を再現できるモデル深絞り金型を作製し成形実験を行った。作製した金型はダイスの構造に特徴がある。本来ダイスはバックリングプレートを通じてダイセットに固定されるべきものであるが、ここで用いたダイスは固定されておらず、バックリングプレート上を滑って水平方向に自由に動くことができるようになっている。動く範囲を制限するため、ダイスホルダーの内径はダイスの外径より大きく作ってある。今回はダイスの外径を32mm、ダイスホルダーの内径を33mmと34mmの2つとしたので、ダイスはその中心が金型の芯を中心とする半径0.5mmと1.0mmの円内で移動できることになる。ダイスの外面をダイスホルダーの内面に接触させた状態で、最大芯ずれ0.5mmと1.0mmを与えることができる。

実験に使用したプレス機械を図8-9に示す。この機械は深絞り試験機と呼ばれる油圧を駆動源とする装置である。この深絞り試験機に金型をセットした状況を図8-10に示す。図8-12に示す配置と同様に、下型がパンチとしわ押さえ、上型がダイスである。金型の主要寸法は、パンチ直径15mm、パンチ肩半径2mm、ダイス内径16.4mm、ダイス肩半径3mmである。成形条件は、パンチ速度0.3mm/sec、しわ押さえ力200Kgである。ダイスの芯ずれ量は、0.5mmの場合と1.0mmの場合の2種類を試した。ブランクは、板厚0.5mm、直径30mm（絞り比2）のオーステナイトステンレス鋼（SUS304）板とした。潤滑剤として、牛脂黒鉛（重量比3:1）をブランクに塗布した。また、ダイスとバックリングプレートの接触面にも塗布した。

水平方向に移動できるダイスに0.5mmあるいは1.0mmの芯ずれを与えておき、SUS304板の成形を行ない、成形品の出来具合と成形後のダイスの移動状況から調芯性の発揮度合いを判断した。成形品が完成し、成形後のダイスが同芯位置へ動いていれば、調芯作用が十分に発揮されたと判断できる。

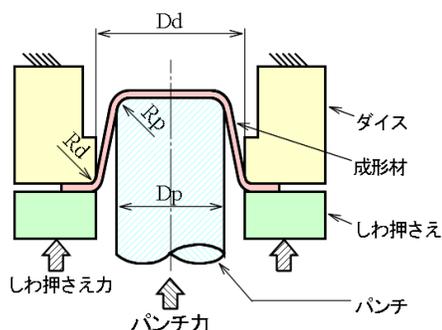


図8-8 深絞り成形



図8-9 深絞り試験機

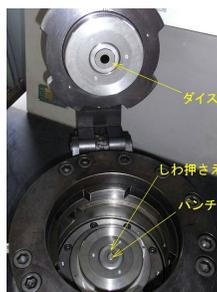


図8-10 深絞り試験機にセットした実験用金型

(結果)

(a) 自動調芯が行われる原理に関する考察

パンチR中心とダイスR中心を結ぶ線が、垂直線となす角度を $\phi$ として、成形時にパンチの進行によってダイスが水平方向へ押されていくことが可能な $\phi$ を求める計算式を導入した。 $\phi=0^\circ$ はパンチ底面とダイスフランジ部が接触する状況を表す。 $\phi=90^\circ$ は芯ずれが零の状況に対応する。従って $\phi$ は $0^\circ$ から $90^\circ$ の間の値となり、 $0^\circ$ に近い程ダイスを押す力が小さくなり、自動調芯機能が生じにくくなることがわかった。

一例として、ダイス肩半径3mm、パンチ肩半径2mmの金型で、厚さ0.5mmの板材を成形する場合の計算で求めた許容芯ずれ量は0.937mmとなった。

(b) 自動調芯が行われる原理の実験による確認

成形前に金型軸心に対し0.5mmと1.0mmの芯ずれを与えたダイスを使用して、厚さ0.5mmの板材の偏心深絞り成形を行った。破断等は発生せず、カップ形状となった成形品が得られた。成形されたカップの外観を図8-11に示す。

また、0.5mmの芯ずれを与えた深絞り成形における成形前後のダイス位置関係を図8-12に、1.0mmの芯ずれを与えた深絞り成形における成形前後のダイス位置関係を図8-13に示す。これらの図から、成形前に与えた芯ずれは、成形後には解消されていることがわかる。後述する自動調芯が行われる原理に従って、芯ずれを与えたダイスが加工中にパンチに押されて調芯位置へと徐々に動き、自動調芯作用が働くことを確認できた。深絞りでは、成形当初に芯ずれがあっても、最終的には芯ずれが無い状態とほぼ同じ成形品が得られることがわかった。

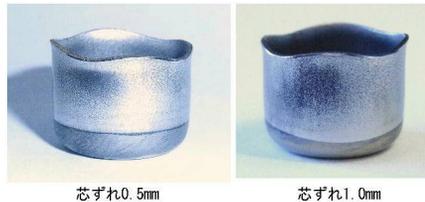
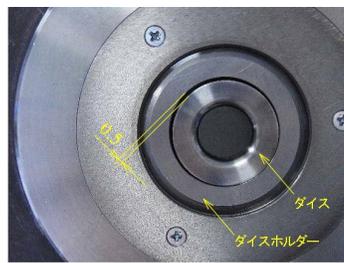
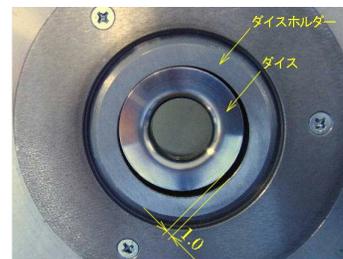


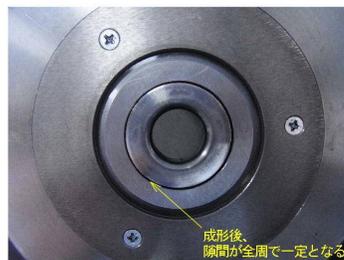
図8-11 芯ずれ成形によって得られたカップ



成形前 (ダイスの芯が0.5mmずれた状態)



成形前 (ダイスの芯が1.0mmずれた状態)



成形後 (成形によりダイスがセンターリングされた状態)



成形後 (成形によりダイスがセンターリングされた状態)

図8-12 0.5mmの芯ずれ成形

図8-13 1.0mmの芯ずれ成

(考察)

(a) 自動調芯が行われる原理に関する考察

深絞り成形において、ダイスとパンチの芯がずれていた場合、そのずれ量がおおむね板厚の1.4倍より大きければ、図8-14に示すように板材を介してパンチ肩部とダイス肩部が深絞り成形の初期段階から干渉を起こすと考えられる。この時、ダイスが水平方向に動くことができれば、パンチの進入に従ってダイスが芯が出る方向へ押しやられて移動し、結果として成形前に与えた芯ずれの影響がほとんどない成形になると考えられる。この現象の要点は、パンチ肩部とダイス肩部という円弧同士が接触し、パンチは半径方向には固定であるのでダイスが押されて移動することにある。この作用はもちろん接触する円弧の大きさなどの影響を受け、底面同士が接触するような状態では成形が不可能なことは明白である。試しに深絞りにおいて、ダイスが水平方向に移動できるとした時、半径方向には固定のパンチとの芯ずれがどの程度までなら成形が行われるかを算出する式を求める。

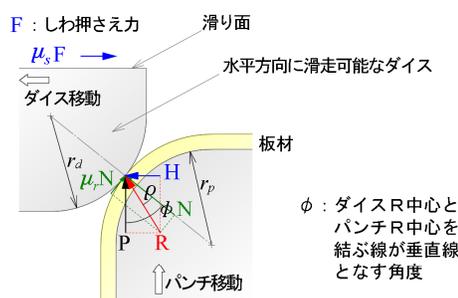


図8-14 水平方向に滑るダイスによる成形  
(R部同士が接触する場合、パンチに押されて、ダイスが芯出し位置へ移動する状況を示す)

ダイス底面(図8-18では上面)は滑り面で、水平方向に移動できるとする。被成形材はパンチと一体と考え、パンチR部が板材を介してダイスR部に接触し、パンチ力Pで押しているとする。接触点には法線力Nと摩擦力 $\mu_s N$ が作用する。これらの合力をRとすれば、パンチ力Pはその垂直分力であり、次の式が成り立つ

$$P = R \cos(\phi - \rho)$$

$$\therefore R = \frac{P}{\cos(\phi - \rho)}$$

一方、合力Rの水平分力Hは、次のようになる。

$$H = R \cos\{90 - (\phi - \rho)\}$$

$$= P \frac{\sin(\phi - \rho)}{\cos(\phi - \rho)} = P \tan(\phi - \rho)$$

ダイスにはしわ押さえ力Fが作用しており、底面の摩擦係数を $\mu_s$ とするとその摩擦力は $\mu_s F$ である。ダイスがパンチに押されて水平方向に移動するためには $\phi$ は、次に条件を満足しなければならない。

$$H > \mu_s F$$

$$P \tan(\phi - \rho) > \mu_s F$$

$$\therefore \phi > \tan^{-1} \frac{\mu_s F}{P} + \rho \quad \rho = \tan^{-1} \mu_r \quad (\text{摩擦角})$$

$\phi=0^\circ$ はパンチ底面とダイスフランジ部が接触する状況を表す。 $\phi=90^\circ$ は芯ずれが零の状況に対応する。従って $\phi$ は $0^\circ$ から $90^\circ$ の間の値となるが、 $0^\circ$ に近い程水平分力 $H$ が小さくなるので、ダイスを押す力が小さくなり、成形に伴うダイスの移動がしにくくなる。

上述した式により、 $\phi$ が算出できれば図8-15に示す許容芯ずれ量を計算することができる。しかし、現実には $\phi$ の算出は難しいので、 $\phi$ を仮定して許容芯ずれ量の算出を試みた。パンチ上昇がダイスを周方向に押していくことが可能な接触角度を $\phi=60^\circ$ とした時、 $\phi=60^\circ$ の芯ずれ状態と芯ずれなしの状態のパンチとダイスの位置関係は図8のようになり、許容芯ずれ量を計算することができる。なお、ダイス肩半径( $r_d$ )とパンチ肩半径( $r_p$ )は等しく( $r_d=r_p=r$ ) また $r$ は板厚の6倍として( $r=6t$ ) 計算を試みた。

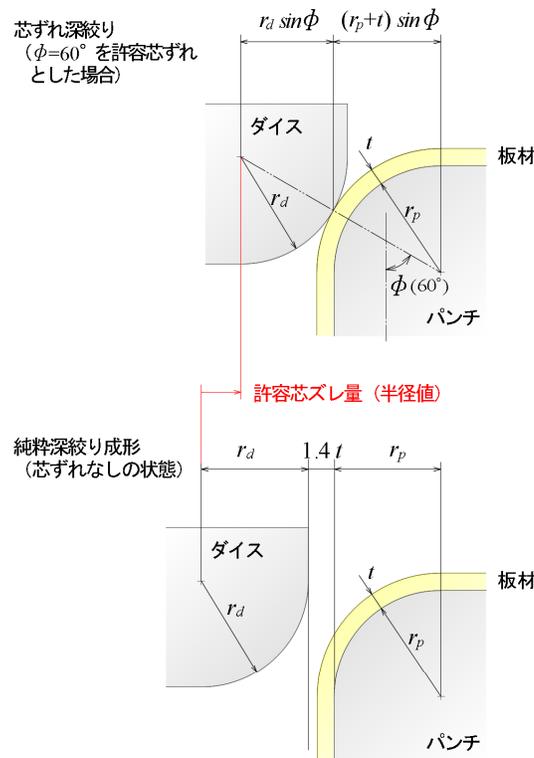


図8-15 許容芯ずれ量の計算 ( $\phi=60^\circ$ の場合)

肩半径が互いに等しく ( $rd = rp = r$ )、 $r = 6t$  で、  
 $t = 0.5 \text{ mm}$  とすると、 $r = 3 \text{ mm}$ 。

$$\begin{aligned} \therefore r_d \sin\phi + (r_p+t) \sin\phi \\ &= 3 \sin 60^\circ + 3.5 \sin 60^\circ \\ &= 2.598 + 3.031 \\ &= 5.629 \end{aligned}$$

一方、通常の深絞りでは、次のようになる。

$$\begin{aligned} 2r + 1.4t &= 6 + 0.7 \\ &= 6.7 \end{aligned}$$

よって、許容芯ズレ量は、次のようになる。

$$6.7 - 5.629 = 1.071 \text{ (mm)}$$

この場合の許容芯ズレ量は1.071mmとなった。さらに具体的にモデル深絞り金型の寸法（パンチ直径15mm、パンチ肩半径2mm、被成形材板厚0.5mm）から許容芯ズレ量を求めた。

モデル深絞り金型の寸法による計算：

$rd = 3 \text{ mm}$ 、 $rp = 2 \text{ mm}$ 、 $t = 0.5 \text{ mm}$  とすると、  
次のようになる。

$$\begin{aligned} r_d \sin\phi + (r_p+t) \sin\phi \\ &= 3 \sin 60^\circ + 2.5 \sin 60^\circ \\ &= 2.598 + 2.165 \\ &= 4.763 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} rd + rp + 1.4t &= 3 + 2 + 0.7 \\ &= 5.7 \end{aligned}$$

$$\therefore 5.7 - 4.763 = 0.937 \text{ (mm)}$$

以上のようにこの場合の許容芯ズレ量は0.937mmである。このことを確認するため、0.5mmと1.0mmの芯ズレについて実際に深絞り成形を行い、自動調芯機能の発生状況を確認した。

#### (b) 自動調芯が行われる原理の実験による確認

芯ズレ量0.5mmの場合の成形前後のダイスの状況を示す図8-16、同じく芯ズレ量1.0mmの場合の図8-17から、成形前には芯ズレ位置にあったダイスが、成形後には芯が出た位置へ移動しており、自動調芯が行われたことは明らかである。また図8-15に示すように、成形品が正常に得られていることから、このことは明らかである。

キー構造金型では、上型には自重が作用するためキー構造が精密に加工できていれば自然

と調芯が行われると考えられる。これに対し下型は自重による調芯が行われず、キー構造のクリアランス分に相当する芯ずれが常時生じると考えられる。しかしこの芯ずれは、深絞り成形においては、成形を行うことにより自動的に解消されることがわかった。キー構造は、深絞りに対して、適用しやすいことがわかった。

### 8 - 3 キー構造金型の試作

(目的)

実際のプレス部品製造現場の量産設備に取り付けて金型と製品の品質評価を行うための実験用金型を製作する。特に、キーと穴のクリアランスを精密に設定する為、ホーニング加工機を用いて穴径仕上げを行い、キー締結の最適クリアランス評価と、耐摩耗性の評価を行う。

(試験方法)

(a) 金型設計

1) で製作した角筒深絞り製品の実験用金型を製作した。製品レイアウト(図8 - 16)のように、全4工程となる。全工程とも金型設計図(図8 - 17)のように、比較評価を目的として、キー構造および、ボルト構造対応型である。

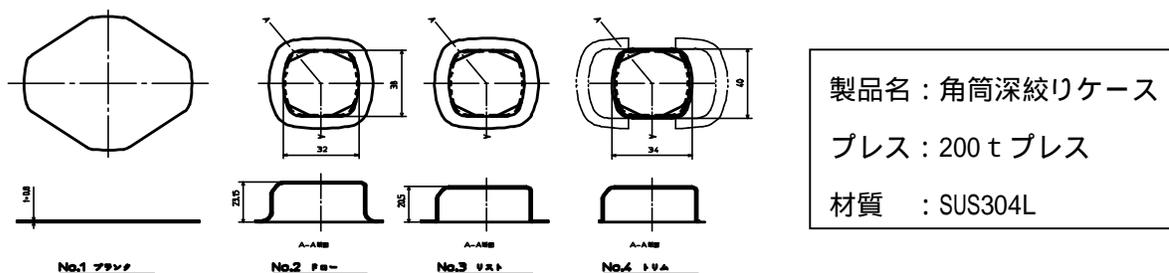


図8 - 16 製品レイアウト

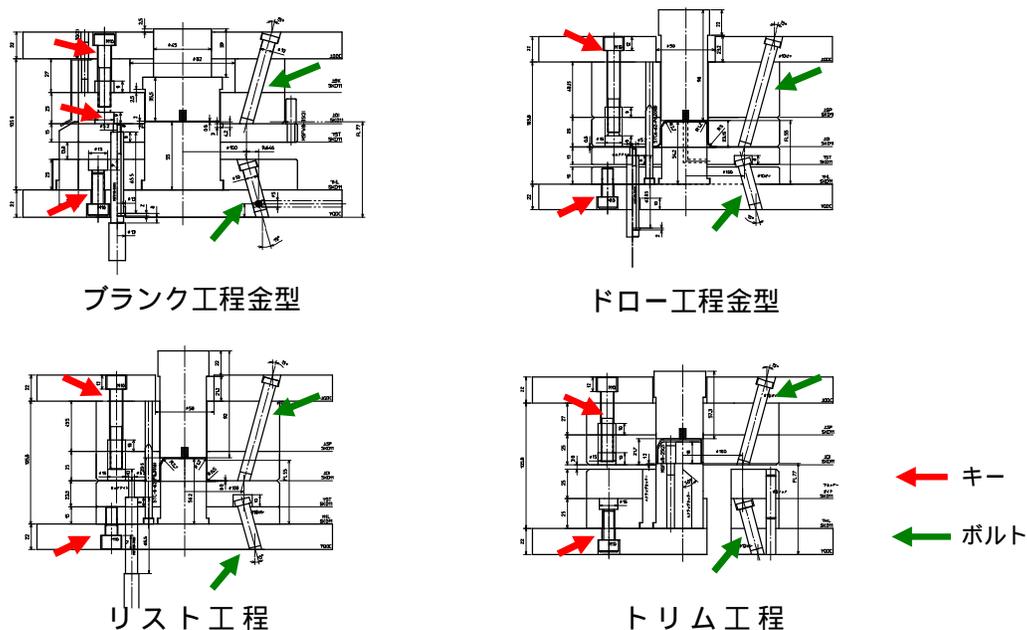
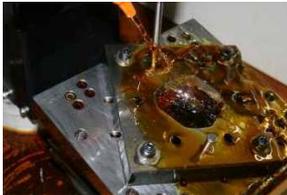


図8 - 17 金型設計図

(b) 金型製作

下図の様に、安田工業製マシニングセンタ、システム3R 製マクロ回転装置、(株)トーヨー製ホーニング加工機、平面研削盤、成形研削盤、ワイヤーカット放電加工機を使用して実験用金型を製作した。使用した工作機械を図8-18と図8-19に示す。また、製作した金型のプレス機械への取付状況を図8-20に示す。



システム3R(株)  
マクロ回転装置  
(キーの抜け止め加工)

(株)トーヨー  
スーパーラッパー  
(ホーニングマシ

安田工業(株)  
マシニングセンタ  
(キー穴加工、他)



(株)日興  
成形研削盤  
(金型成形研削)

(株)ナガセインテグレックス  
平面研削盤  
(金型研削)

図8-18 金型製作に使用した機器(1)



(株)森精機製作所  
CNC 旋盤



三菱電機(株)  
ワイヤー放電加工機

図 8 - 1 9 金型製作に使用した機器 ( 2 )

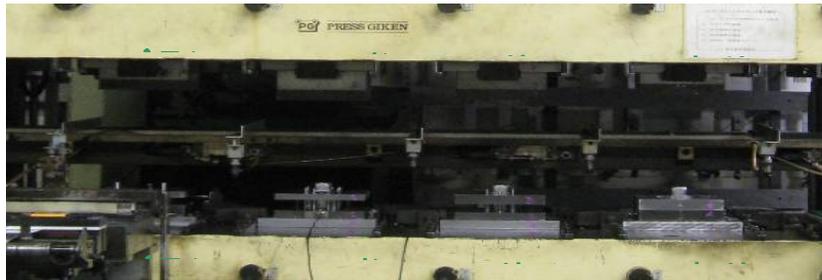


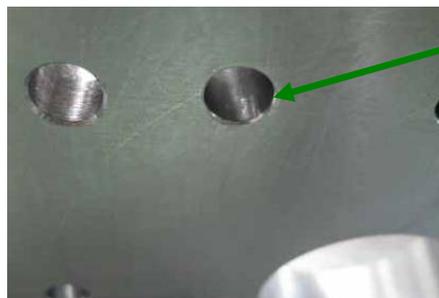
図 8 - 2 0 実験用金型

( 考察 )

ボルトレス金型の品質を決定付けるキー穴加工精度の結果を表 8 - 2 に示す。特に製品品質に影響するリスト金型の評価を行った。 穴径について、ボーリング加工での に対して、ホーニング加工では 3 倍程度の数値となった。また、面粗度については、ホーニング加工の方が、1 桁良い結果を得られた。

今回、ボーリング加工したキー穴とホーニング加工したキー穴の両方を、耐摩耗性評価として行う予定であったが、ホーニング加工穴の面粗度はよいものの、キー穴の寸法精度のバラツキが大きいことと、キー穴入り口部が偏芯している ( 図 8 - 2 1 ) ため、キーのクリアランスが大きく変わってしまうことが想定さる。

この原因は、マンドレルが加工ワークに接触するとき、ワークが傾いていることから、型あたりとなり、逃げる力が働き、寸法精度のばらつきや、入り口部の偏芯につながったと考えられる。対策として、マンドレルがワークに接触するとき曲げの力が働かないように、加工用の座面を作ることで対応できると考える。



偏芯による異常

図 8 - 2 1 キー穴入り口部の偏芯異常

表 8 - 2 キー穴の加工精度評価

	ボーリング加工寸法(mm)			ホーニング加工寸法(mm)			ボーリング加工面粗度(μm)			ホーニング面粗度(μm)		
上 QDC	10.010	10.008	10.006	10.008	10.008	10.019	6.385	6.677	5.900	0.268	0.274	0.230
上 SP	10.010	10.007	10.007	10.008	10.009	10.030	1.891	1.697	2.051	0.552	0.627	0.850
上 DI	10.005	10.006	10.004	10.003	10.004	10.020	1.229	1.332	1.139	0.416	0.423	0.416
下 HL	10.013	10.012	10.016	10.010	10.006	10.004	1.253	1.285	1.299	0.459	0.366	0.311
下 QDC	10.009	10.009	10.008	10.006	10.004	10.008	11.191	9.231	9.704	1.167	0.898	0.303
評価	Max 値	10.016		Max 値	10.030		Max 値	11.191		Max 値	1.167	
	Min 値	10.004		Min 値	10.003		Min 値	1.139		Min 値	0.230	
	Ave.	10.009		Ave.	10.010		Ave.	4.151		Ave.	0.504	
		0.003			0.008			3.650			0.272	

( 9 ) ボルトレス金型構造等の評価

( 目的 )

ボルトレス金型が実際のプレス成形で使用できるか確認するため、具体的製品をイメージし、それを成形するためのトランスファー方式のボルトレス金型を作製した。実際にできた成形品の出来具合から、ボルトレス金型の有効性を判断した。

( 試験方法 )

( a ) ボルトレストランスファー金型の変位挙動

金型の具体的製品としてセンサーカバーを想定し、これを成形するための一連の加工として打抜き、絞り、成形、トリム(せん断)の4ステージからなるボルトレストランスファー金型を作製した。この金型では4ステージの全てにおいてボルト締結は行っていない。キーのクリアランスは、φ0.01mmとφ0.03mmの2種類位を試した。金型の材質はSKD11である。この4ステージの内、絞り型とトリム型には、図32に示すように変位センサーを取り付け成形中の金型変位を計測できるようにした。この金型を図9-1のように、量産プレス機に取り付けて、自動運転できる状態として連続成形を行った。なお、被成材はオーステナイトステンレス鋼のSUS304L、板厚0.8ミリとした。



200t自動プレス

デジタル変位センサー

デジタル変位センサー

図9-1 量産プレス機での実機テスト

(b) 製品品質評価 (絞り評価とせん断打抜き面の評価)

トリム型の加工品質評価は、成形品の加工該当箇所をデジタルマイクログラフで観察することにより実施した。使用したデジタルマイクログラフを図9 - 2に示す。



図9 - 2 デジタルマイクログラフ

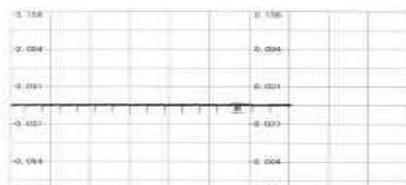
(結果)

キーのクリアランスφ0.01mmの場合の変位挙動を図9 - 3に、φ0.03mmの場合の変位挙動を図9 - 4に示す。また、得られた成形品の外観を図9 - 5及び図9 - 8に示す。

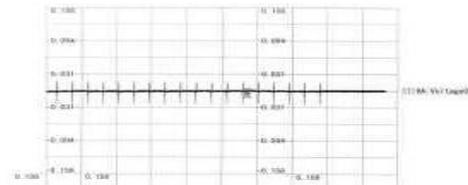
(考察)

(a) ボルトレストランスファー金型の変位挙動

キーのクリアランスφ0.01mmの場合の絞り型とトリム型の変位挙動を図9 - 3に示す。横軸は経過時間、縦軸は変位である。横軸に沿って等間隔に並ぶ変位の変化は、変位センサーがプレス成形時の振動を感知したもののいわゆるノイズである。絞り型とせん断型共に、成形当初から変位は零で、時間経過に対しても変化していないことがわかる。この変化は、自動調芯が機能していないことを示している。キーのクリアランスがφ0.01mmでは、嵌合いがきつすぎて、金型に変位の余地が無いことが原因であると考えられる。原因は特定できていないが、クリアランス0.003mmのキーを準備して次に評価を行う。



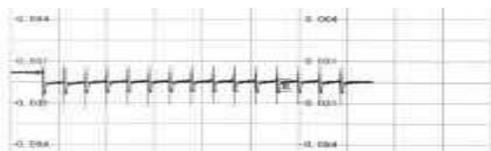
a) 絞り型



(b) せん断型

図9 - 3 クリアランスφ0.01mmの場合の金型変位挙動

クリアランスがφ0.03mmのキーに差し替えて、成形を行った倍委の変位挙動を図9 - 4に示す。絞り型においては、1ショット目で金型が変位し、2ショット目から変位がない挙動が得られた。トリム型では、10ショットまで徐々に変位が変化し、それ以後は変位が安定する挙動となった。プレス成形当初は金型の芯がずれていたが、成形を行うことにより金型が変位し芯が出た状態になることがわかった。



(a) 絞り型



(b) せん断型

図9 - 4 クリアランスφ0.03mmの場合の金型変位挙動

(b) 製品品質評価 (絞り評価とせん断打抜き面の評価)

金型拳動の評価と同様、キークリアランス $\phi 0.01\text{mm}$ と $\phi 0.03\text{mm}$ の製品打抜き面の評価を行った。下図の打抜き破面は $n = 1, 3, 5, 100$ ショット目のものをプレス正面に向かって、手前側と右側側面 (図9 - 5) の破面を撮影したものである。キークリアランス $\phi 0.01\text{mm}$  (図9 - 6) の場合、全体的に打抜き面の状態が悪く、プレスの偏芯荷重などの外乱に影響されたと考えられる。キークリアランス $\phi 0.03\text{mm}$  (図9 - 7) の場合は、自動調芯してような剪断面と破断面の境界の変化は確認できないが、クリアランス $\phi 0.01\text{mm}$ と比較して、良好な打抜き面を得られている。これは、クリアランス $\phi 0.01\text{mm}$ とは異なり、プレスの偏芯などの外乱を吸収していると考えられる。



図9 - 5 得られた成形品の外観

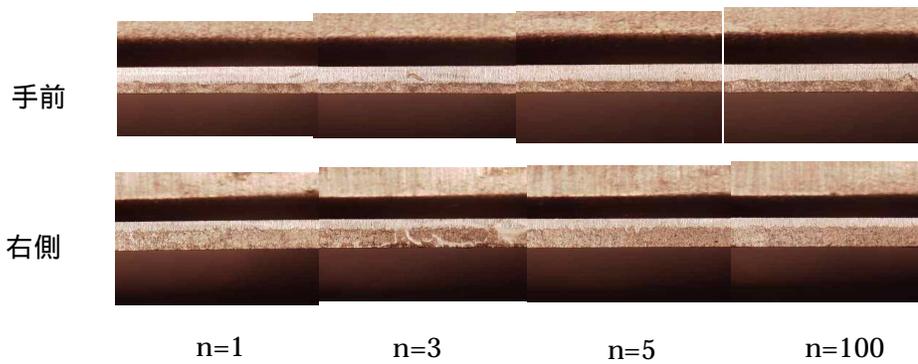


図9 - 6 キークリアランス $\phi 0.01\text{mm}$

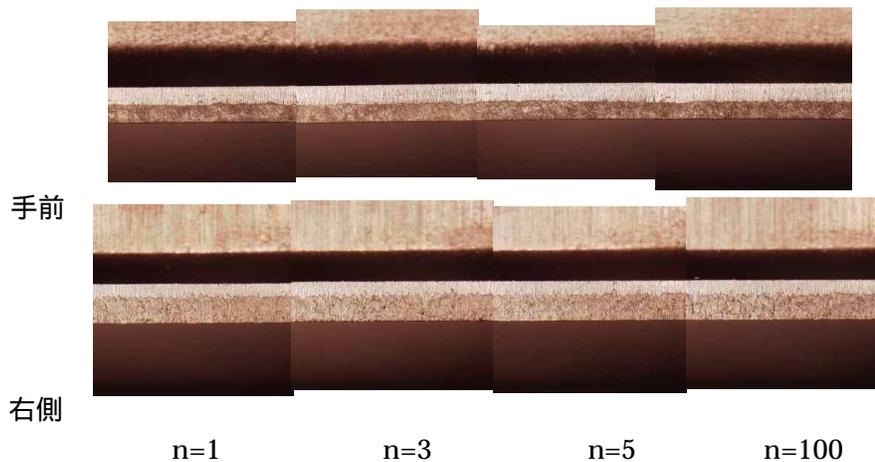


図9 - 7 キークリアランス  $\phi 0.03\text{mm}$

一般に成形品が良品かそうでないかの判断は、その寸法、幾何形状、外観、内部欠陥の有無を考慮してなされるものである。本研究対象のボルトレス金型が通常金型と異なる点は、金型部品の締結方法のみである。ダイ、パンチといった板材料または成形品に接触する主要金型部品については、寸法および形状精度は通常金型と変わらない。したがって、金型部品同士のアライメントが成形品に及ぼす影響を確認すれば目的は十分達成できると言える。すなわち、はじめに外観品質を確認し、もし問題が見つければ寸法や幾何形状の評価を行えばよいことになる。

図9 - 8 に示す成形品の側壁、トリム面を中心に目視観察を行い、傷、焼付痕、形状の対称性、トリム面せん断状況等の確認、評価を行った。その結果、側壁の一部にわずかに筋状の傷が見られ、またトリム面のせん断状況にわずかに偏りすなわち板厚方向の破断面とせん断面の分布幅が成形品の周方向でばらついている現象が見られたが、成形は完結したと判断できる。商品としても機能上問題は無いと判断できる。これらのことから、ボルトレス金型の実成形への適用は大局的には問題が無いことを確認できた。

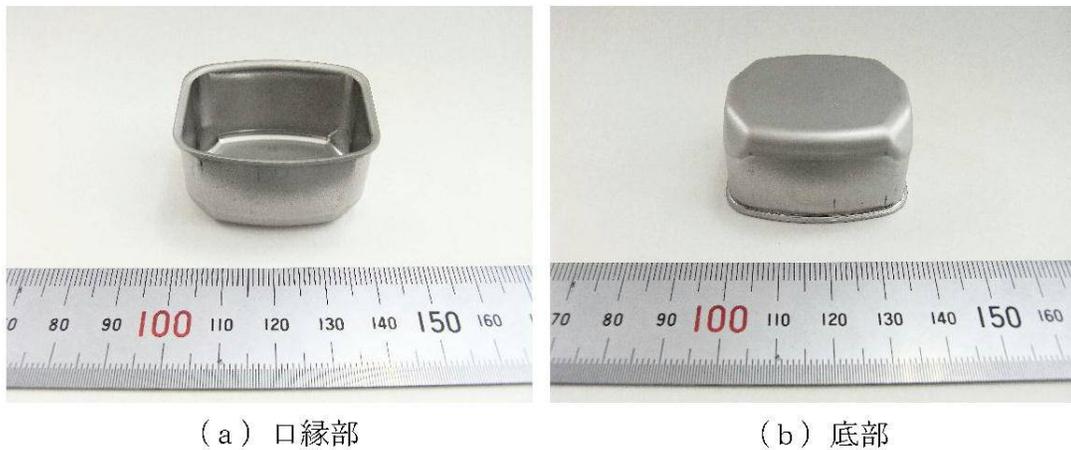


図9 - 8 ボルトレストランスファー金型による成形品の外観

### 第3章 全体総括

初年度は、まず、ボルトレス金型を実現させるための課題である金型の適正材料の選定として、材料の機械的特性評価を行った。その材料の高精度加工を実現するため、5軸マシニングセンターによる高精度・高能率加工技術の研究を行い、適正工具等の選定、最適加工条件の実証実験を行った。この研究により、剛性、耐摩耗性、減衰特性などから、金型材料としてもスターク材が優れていることがわかった。また、平板に直角な穴に対しては、精度よく加工できる条件を把握できた。ボルトレス金型では斜め穴の加工が必要となるが、工具や工具ホルダーに曲げモーメントが働くことにより加工精度の悪化が予想され、次年度への課題とした。

2年度目は、キー構造金型の要となる金型構造に関する技術的要因の確立と検証について研究を行った。過年度から引き継いだキーを挿入するための斜め穴加工は、コーティングを施した工具とテーパシャンクで2面拘束タイプの工具ホルダーを選定し、加工条件を吟味することにより高精度に加工できることがわかった。また、キー構造金型が成形に対しどのような変形挙動を示すか、キー構造は成形荷重に耐えうるだけの強度があるのかなどを解明し、ボルトレス金型の実用化に不可欠なデータを把握した。この中では、キー構造に対する幾何学的な考察から、キーの本数と配置についても確定した。さらに自動調芯機能の原理に関しても考察を行った。以上は、プレス成形の中で最も簡単な、1ステージのせん断加工を対象に行った。実際のプレス成形は、複数のステージから成るトランスファー金型で行われ、トランスファー金型のボルトレス化、すなわちボルトレス金型の実用化に向けた研究開発は次年度への課題とした。

3年度目である今年は、キー構造金型をトランスファー金型で商品成形に適用するために把握、解決していかなければならない技術的項目について研究を行った。具体的には、キー構造に適したプレス工程に関する考察、成形中にキー構造金型が受ける変形（ひずみ）挙動について研究を行った。また、キー構造が実査に使えるかどうかの最終確認として、キー構造金型で商品と成りうる形状の成形を行い出来具合の評価を行った。

キー構造に適したプレス工程に関しては、キー構造は従来のボルト締結構造に対し柔軟性を有しており、柔軟性があるが故に自動調芯機能を有している。ここでは、成形形態として最もキー構造化に適していると考えられる深絞りを対象に、自動調芯性がどのような機構により発生するのか、芯ずれを有する金型が成形に対しどのような調芯挙動を示すのかについて、理論的な考察および検証のための実験を行った。半径方向には固定のパンチと半径方向に移動可能なダイスの組み合わせによる成形実験から、芯ずれがパンチ肩部とダイス肩部が被成形材を介して互いに接触するような範囲にあるなら、パンチの進行に従ってパンチ肩部が被成形材を介してダイス肩部を押しいき、最終的には芯が出た状態の成形が行われることがわかった。

キー構をトランスファー金型等へ適用していくに際し、従来ボルト締結金型とキー構造金型で金型に生じるひずみがどの程度違うのか把握するため、最も単純なせん断加工を対象に成形中に金型に生じるひずみの計測と比較を行った。ボルト締結金型では、ブレークスルーによって金型のひずみは開放されず、次のショットは金型がひずんだ状態で始まることになるという挙動を把握した。この場合、金型はひずんでいるので、金型は精度よく加工されていたとしても、その精度は成形品に転写され難いことになることがわかった。一方、キー構造金型では、被成形材が打抜かれる瞬間（ブレークスルー）にそれまで金型に作用していたひずみは開放され、ひずみが零の状態に戻るといった挙動を示す。次のショットは、金型にひずみが生じていない状態で始まることになり、キー構造金型がプレス成形品の精度向上の観点から有利な成形挙動を示すことがわかった。プレス成形は1ショットのみで成形を終わる製品はほとんど無く、トランスファー金型等でフープ材からせん断、絞り、トリミングなどの工程を順次経て製品となるものがほとんどである。従って、キー構造をトランスファー金型への適用した場合にはトランスファー金型全体の精度向上が期待できと考えられる。

打抜き、絞り、成形、トリムの4ステージを全てキー構造の金型としたトランスファー金型を作製し、実際にステンレス鋼の成形を行って、成形品の出来具合等からキー構造金型の実成形への適用性の評価を行った。その結果、側壁の一部にわずかに筋状の傷が見られ、またトリム面のせん断状況にわずかに偏りすなわち板厚方向の破断面とせん断面の分布幅が成形品の周方向でばらついている現象が見られたが、成形は完結しており商品品質上問題は無いレベルのプレス成形が行われていることを確認できた。

以上の一連の研究開発により、キー構造金型の実成形への適用についての検証でき、実用化への基本的な技術開発は終了できたと判断する。