

試作振動打抜きプレスについて

Development of the Vibration Blanking Press Machine
for Friction Spot Welding and Vibro-Punching

横 井 秀 俊*・中 川 威 雄*

Hidetoshi YOKOI and Takeo NAKAGAWA

せん断圧接法、および振動仕上げ抜き法の実用化を検討する上で、複雑な工具動作の自動化とポンチ振動波形の実現は最も重要なテーマの一つである。予想される実用機の諸方式と問題点を具体的に検討した上で、ここでは一つの試みとして、機械的に振動波形を合成し得る振動打抜きプレスを試作し、上記二種類の加工試験においてこの試作機が十分な性能を発揮することを確認した。

1. は じ め に

せん断加工においてせん断変形部に発生する熱は、断熱的な高速精密せん断を除いては一般に有害なものとされているが、この発生熱を積極的に利用した加工技術に筆者らが開発したせん断圧接法^{1),2)}と振動仕上げ抜き法^{3)~7)}がある。これらはともにせん断の際の熱生成を積極的に行わせるために、短時間内にせん断変形を繰り返し与えることを基本としており、次節に述べるようにその具体的手法も類似している。

せん断圧接法とは接合しようとする薄板二枚を重ね合わせて繰り返しせん断し、重ね継手接合を実現する方法で、スポット溶接の困難な純銅などの接合に適用される。板厚 2 mm のタフピッチ銅板の接合実験では、ポンチ径 $\phi 8$ mm の一点接合による引張せん断強度は 850 kgf 以上に達し、この方法によりかなり高い水準の接合強度が安定して実現できることが示されている。¹⁾

また振動仕上げ抜き法は、繰り返しせん断過程のせん断エネルギーや摩擦熱による、素材の局所的熱軟化現象を利用したせん断加工法で、ガラスエポキシプリント基板のめっき用スルーホール穴あけに適用した結果では、穴のせん断切口面形状、せん断加工面あらさのいずれにおいてもドリル加工以上の $R_{max} 4 \sim 7 \mu m$ の平滑な光沢仕上げ面が得られている。³⁾ この他航空機材料として知られるケブラー/エポキシ、カーボン/エポキシなどの各種複合材料の穴あけ、⁴⁾ 外形打抜き加工⁵⁾ においても、ガラスエポキシ積層板同様のせん断加工面性状と、金属の精密打抜きレベルの高い寸法精度が示された。またアクリル、ポリカーボネイト、ABS 樹脂板のせん断加工において従来の常識を破った、射出成形面に近いせん断加工面が得られる⁷⁾ など、振動仕上げ抜き法はプラスチック材料全般に適用可能な汎用精密せん断加工法としてその発展が大いに期待されている。

しかしながら、以上のような研究成果はいずれも電気-油圧サーボ弁による実験装置(低サイクル疲労試験機を改良したもの)に基づいたものであった。この実験装置は、板のセッティング、抜きかす処理等に手作業を含む極めて原始的なもので、ここでの方式をそのまま実用機へと拡張することは、はなはだ困難とみられた。とくに振動仕上げ抜き法はその工業的有為性に反してかなり複雑な工具動作を必要とするため、その実用性を見極める上で、単純機構による実用機の実現性が非常に重要な鍵を握るものとみられた。

著者らは実験装置段階と実用機段階との間の溝を埋める一つの作業として、簡易な機構を有する、せん断圧接法と振動仕上げ抜き法の両用のプロトタイプ特殊振動打抜きプレスを実際に設計試作し、その過程で現われた諸問題に対して具体的な検討を行った。以下ではまずプレスに要求される基本的な機能を分類整理して、これらを具体化するための諸方式の一般論を展開し、次にそのなかの一方式に基づいて試作した振動打抜きプレスの詳細を報告する。

2. 振動打抜きプレスに求められる基本的な機能

図 1 はせん断圧接法の、また図 2 は振動仕上げ抜き法

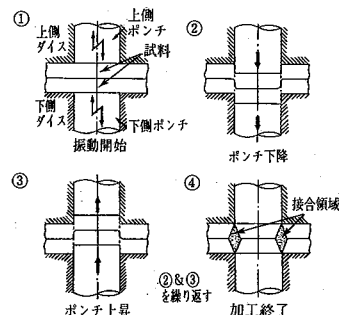


図 1 セン断圧接法の具体的手順

* 東京大学生産技術研究所 第 2 部

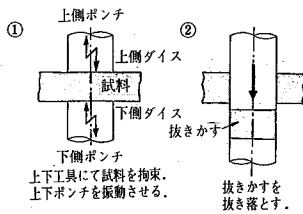


図 2 振動仕上げ抜き法の具体的手順

の具体的手順を表わしたものである。せん断圧接法では図 1 のように接合しようとする二枚の薄板を上下に対向する二対の工具にてクランプし、上下ポンチを同一変位で一定回数振動させる。そして最後にポンチを中立点に戻すとせん断に沿って接合領域が形成される。一方振動仕上げ抜き法では、図 2-①のように途中までせん断圧接法と全く同一の工程をたどり、最終的に図 2-②のようにポンチを板に突込んだ状態で加工を終了する。こうすることにより、①の段階で熱軟化を引き起こしていたせん断線近傍の材料が、②では工具側面によってパニシを受けながら急冷され、工具側面性状が材料の切口面側へと転写される。

振動打抜きプレスはせん断圧接法および振動仕上げ抜き法の両用とするため、上述の具体的手順を具体化し得るそれぞれの基本的な工具動作を兼備したものでなければならない。そのために、ここではそれぞれの加工法について必要不可欠とされる基本的な機能を(I)加工前、(II)加工中、(III)加工後の三段階に分けて列挙してみた。

A. せん断圧接法

- i) 試料をポンチとダイスにてクランプする (I)
- ii) 上下ポンチが同一ストロークで振動する (II)
- iii) ポンチが初期位置に戻って加工を終了する (II)
- iv) 上下工具が開いて試料を開放する (III)

B. 振動仕上げ抜き法

- i), ii) せん断圧接法と共通 (I)
- v) 所定の振動波形により試料を繰り返しせん断する (II)
- vi) ポンチが抜きかすを抜き落とした状態で加工を終了する (II)
- vii) ポンチを試料の穴から引き抜く (III)
- viii) 抜きかす (製品) を工具穴より除去する (III)

以上のように i), ii) ではせん断圧接、振動仕上げ抜きともに同一の機能が要求されるが、前者では接合を果たすため iii) のように抜きかすを元に戻すことが、また後者では vi) のように抜きかすを抜き落とすことがそれぞれ必要となってくる。とくに振動仕上げ抜き法では、抜きかすを抜き落とすための振動波形の実現 v), vi) と、その結果派生する後処理のための工具動作 vii), viii) という二重に複雑な機能が求められ、振動打抜きプレスの設計を

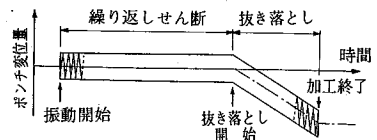


図 3 振動仕上げ抜き法の振動波形例

振動装置の駆動方式 駆動ユニット数 振動プレスの諸方式

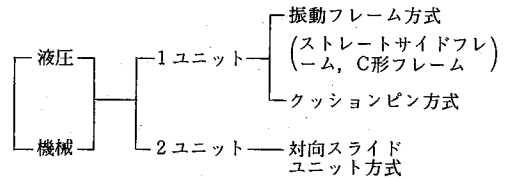


図 4 振動打抜きプレスの諸方式分類

一層難しいものになっている。

振動仕上げ抜きの振動波形パターンは無限にあると言えるが、ここでは最適加工条件の調査結果⁶⁾をもとに図 3 に示す単純波形に限定して、振動打抜きプレスの設計試作を行った。

3. 振動打抜きプレスの設計

3.1 振動打抜きプレスの諸方式

振動打抜きプレスの諸方式はおおむね図 4 のように分類できる。まず振動プレスの主たる駆動方式を液圧式にするか機械式にするかでその後の設計は大きく変わってくる。両者を比較すると、機械式の場合には速度が大きく保守も容易である反面、液圧式に比べてストロークや荷重などの調節が一般に困難になるなど融通性を欠く欠点がある。

また図 5 に示すように駆動ユニット数の違いによってもさまざまな方式が考えられる。駆動ユニットが 1 個の場合には図 5-1), 2) のように C 形フレームやストレートサイドフレームに上下ポンチを取り付けてフレームごと振動させる必要がある (振動フレーム方式)。C 形フレームは作業性がよい反面、懐を深くすると負荷時のひずみが大きくなり、それによって上下ポンチの心ずれを引き起こしやすい。逆にストレートサイドフレームでは作業スペースが両サイドフレームにより制約を受けるが、フレームのひずみによる上下ポンチの心ずれは起こりにくいという利点を持つ。その他 5) のようなクッションピンを片側に設ける方式も一駆動ユニット方式の仲間に数えられるが、クッションピンによる負荷重の限界、振動追従性などの問題があり実現性に乏しいとみられる。図 5-3) のように駆動ユニット数が二つある対向スライドユニット方式は、上下のポンチ位置設定が自在で板クランプの際にも有利となる。また図 5-1), 2) のようにフレームごと振動させる必要がないため慣性によるエネルギー損失

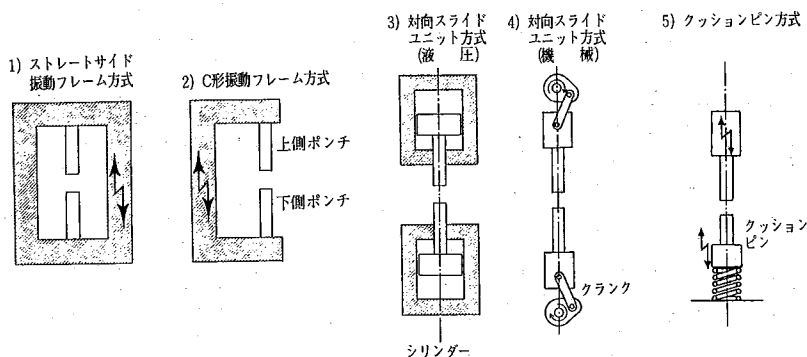


図 5 駆動ユニット数の違いによる振動打抜きプレスの諸方式

は少なく、とくに大容量振動プレスの開発ではこの方式が威力を発揮するものと予想される。しかし 3) の採用には通常サーボ弁の使用が不可欠でコスト面での難点が指摘される。また振動周波数が高くなると上下ポンチストロークの同期がとりにくく、ノイズなどにより上下ポンチ間の製品が破損しやすいなどの問題を残している。

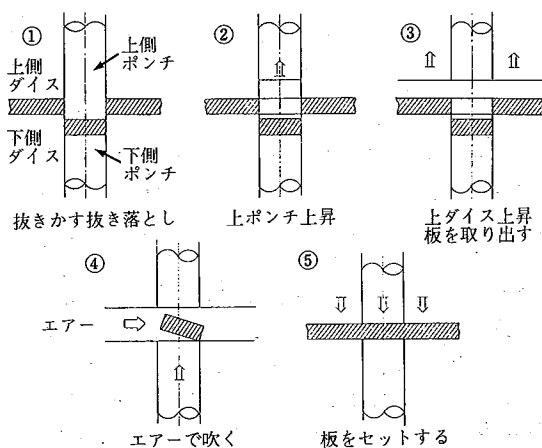
ここでは特殊な振動波形を簡単な機構と低コストで実現するために、油圧による単一の複動シリンダーとストレートサイド振動フレームを組み合わせた方式を採用した。

3.2 試作振動打抜きプレスの基本設計

振動打抜きプレスの設計にあたっては、上下のポンチ間、および上下のダイス間の相対変位によって工具開閉を自在に行える構造が必要不可欠となる。この際、とくに問題となるのが 2. にて列挙した振動仕上げ抜きの基本機能 vii), viii) の実現と自動化方法である。図 6 はこうした vii), viii) の手順を、抜きかすが上側または下側ダイス穴内に抜き落とされる各場合について具体的に書き表わしたものである。抜きかすを抜き落とす図 6-I の方式では ②～④の作業を順次進めねばならないのに対し、抜きかすを上側ダイス穴内に抜き上げる図 6-II の方式では、一般にこれらの作業を II-②のようにほぼ同時に処理できる。そのため後者では、板のセッティングから加工終了までのサイクルタイムを比較的短くできるものと予想される。

図 7 はストレートサイド振動フレームによる振動打抜きプレスの一般構造を図示したもので、加工前後の工具動作を実現するためのスライドユニットを各所に配している。ここで A_1, A_2 は振動フレーム E に所定の振動波形を付与する加振装置で振動フレームの支持方法によって上下のどちらか一方のみが必要となる。 B_1, B_2 と C_1, C_2 はそれぞれ上下ポンチ、上下ダイスを独立にスライドさせる駆動装置である。これらすべてが備わっている場合には、相互の相対的位置関係も自由に変化させ得るため極めてフレキシブルな使いやすいプレスとなる。し

I. 抜きかすを抜き落とす場合



II. 抜きかすを抜き上げる場合

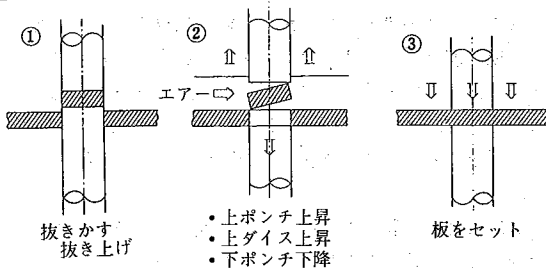


図 6 抜きかすの処理方法と工具動作手順

かし通常は B_1 と B_2 のいずれかと、 C_1 と C_2 のどちらか一方のスライドのみで工具の開閉が充分可能となる。したがって前述のような抜きかすを抜き上げるか抜き落とすかの選択と、プレス構造全体のバランスの配慮のもとで $A_1, A_2, B_1, B_2, C_1, C_2$ を上下どちらに配置するかが決定される。ここでは加振装置 A_2 、ポンチスライド B_1 、ダイススライド C_1 を用いることにし、装置構造の簡略化のため抜きかす抜き落とし方式を用いた。以上で基本的なプレス構造が決定され 2. における必要な工具動作機能のうち i), ii), iv), vii), viii) が保証された。

残る iii), v), vi) は振動波形を実現する加振装置 A_2

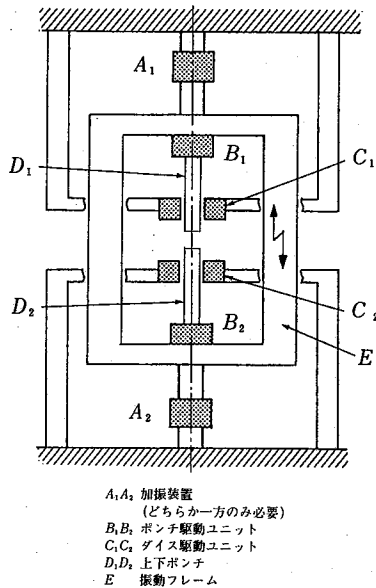
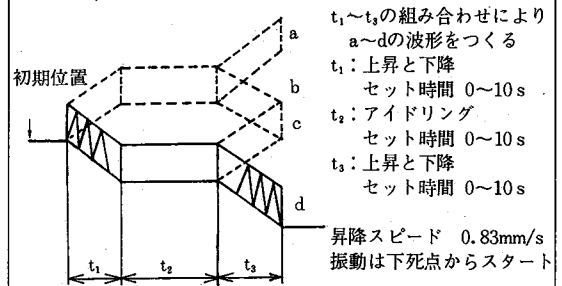


図7 振動フレーム方式による振動打抜きプレスの一般構造と直接関連する部分で、 A_2 をどのような構造とすることでその成否が分かれる。構造的に最も簡単な方法は、変位計を検出器とし、電気-油圧サーボ弁を用いて A_2 を駆動させるもので、これによって制御ユニットにて創成した任意の振動波形の具現化と、2.の基本機能iii)に掲げた中立点への復帰は極めて容易となる。しかしサーボ弁を用いたシステムは融通性が高い反面、サーボ弁の他に専用の制御ユニットを必要とするため、コスト高および保守上の問題を伴っている。本来専用プレスは振動波形の可変性を余り必要としないため、機械的機構にて実現できる振動波形ならばサーボ弁を用いない方が有利と考えられる。すでに実験装置においてフィードバック制御による電気-油圧サーボ系を構成していることもあり、ここでは所要の振動波形を機械的に合成する方法を検討した。

加振装置 A_2 部分の基本設計は各種加工因子の影響を調査する研究過程で二度の変更を迫られた。すなわち、当初せん断圧接、振動仕上げ抜きともに10~20 Hzの周波数領域を想定していたが、研究過程で示された最適な周波数はいずれもさらに高い領域にあり、^{2),6)}とくに振動仕上げ抜きでは40~80 Hzを必要とすることが明らかとなった。このため高周波数と高出力を同時に得られるロータリー式方向切換弁(SIREX IMPULSE GENERATOR, 帝人エンジニアリング)の採用に踏み切り、同時にこの方向切換弁の特性を生かして、復動シリンダーへの油量を調節し、図3の振動波形を実現することを試みた。しかし試作振動プレスでは変位量の検出によるフィードバック制御機構がないために供試材の打抜き抵抗の増減によって振幅が変動したり、抜きかす抜き落としし

表1 試作振動打抜きプレスの主な仕様

- 1) 振動シリンダー A_3
容 量: 5 ton (両圧)
ストローク: 4 mm
- 2) 中立位置昇降装置 A_4
昇降速度: 0.83 mm/s
ストローク: 6.0 mm
寸動・タイマーにて1)と連動可
- 3) ポンチクランプ用シリンダー B_1
容 量: 3 ton (片圧)
ストローク: 20 mm
- 4) ダイスクランプ用シリンダー C_1 (2個)
容 量: 4.5 ton (片圧)
ストローク: 50 mm
- 5) 中立ストッパー用シリンダー F (2個)
容 量: 3.4 ton (片圧)
ストローク: 2 mm
- 6) 振動特性
周波数 0~80 Hz
振動振幅 最大 ± 2.0 mm
(60 Hzで0.3 mm, 10 Hzで2.0 mm)
- 7) 振動波形



量までもが一定しないという不都合を生じた。そこで最終的に次節のような基本構造によりプレスの設計を行った。

4. 試作振動打抜きプレス

図8に試作振動打抜きプレスの基本構造と油圧配管系統図を、表1にその主な仕様を掲げる。振動波形は復動シリンダーの振動装置 A_3 と振動の中心位置を変位させる昇降装置 A_4 との合成によって実現する。ここで A_4 はネジ式の昇降装置でモーター②の回転により H を上下動させる。周波数はロータリー式方向切換弁③のロータ回転数により制御し、また振幅は⑦による A_3 シリンダー内への油量調整と、 G_1 面および G_2 面のメカニカルストッパーによりその振れ幅を規制するものとした。その振動幅(すなわち G_1 面と G_2 面の間隔)は A_4 を寸動にて回転させることにより設定できる。図9は A_3, A_4 により振動波形が合成される様子を具体的に表わしたものである。ここで中立ストッパー F はメカニカルストッパーによらない振動波形の中立点確保に重要な役割を果たすシリンダーであるが、最終的な試作機での使用は一般に少ないものとみられる。

振動前には油圧配管系統図の電磁バルブ⑪が閉じ⑬が

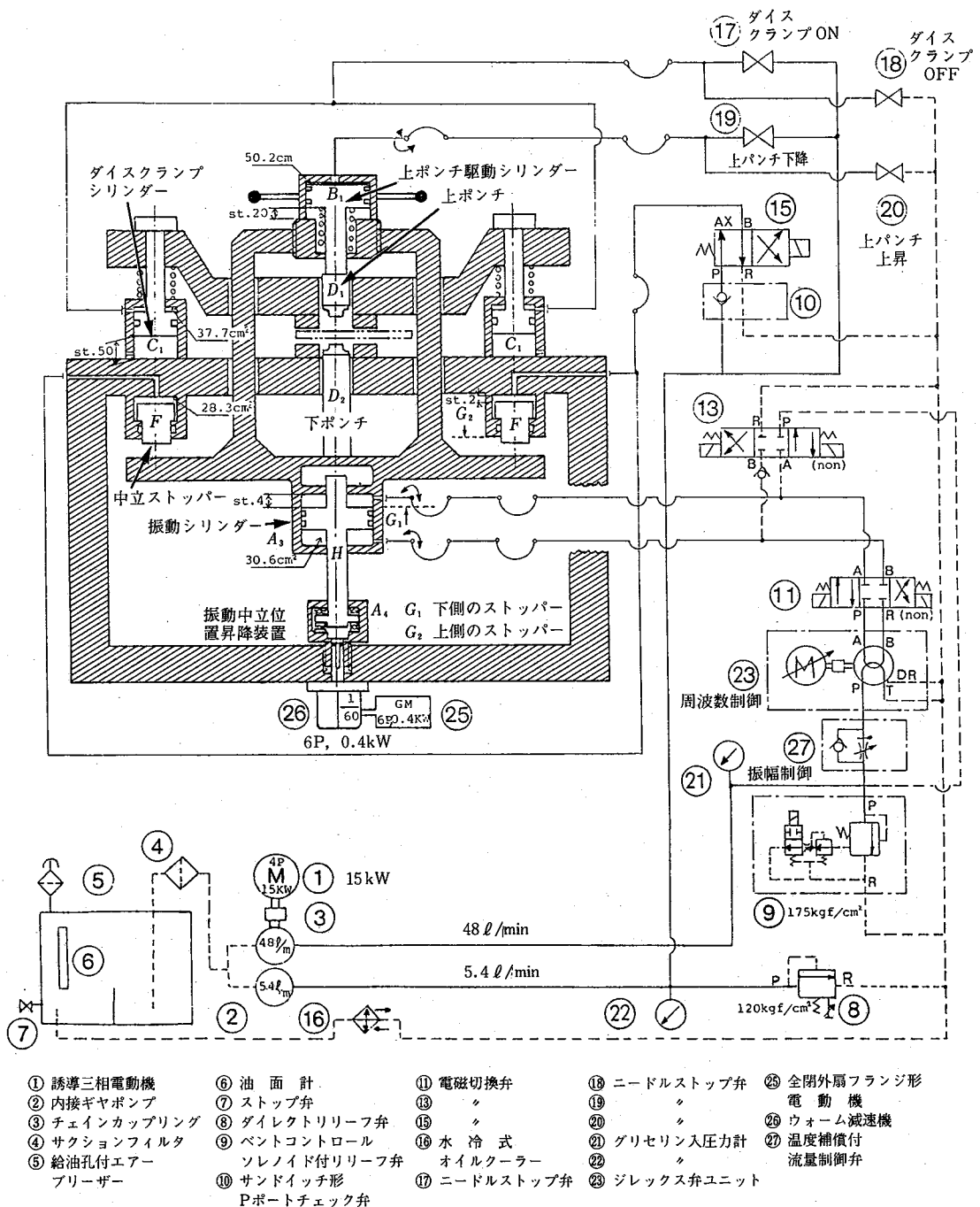


図 8 試作振動打抜きプレスの基本構造と油圧配管系統図

開いているため、 A_3 の下側シリンダー内に圧油が入って、フレームは振動の下死点に留まった状態になっている。次に①⑦～②⑩のバルブを操作して板をクランプし、ロータリーバルブ②③のロータを回転させる。この状態で②③を閉じ①⑪を開くと、プレスの振動開始とともにタイマーが連動し A_3 と A_4 による合成振動波形が実現される。

さらにタイムアップと同時に①⑪と②③のバルブが切り換わり②③によって一定時間圧力が保持されるため、加工終了時に振動フレームは必ず下死点に復帰する。図 10 にプレス本体の組立図を、また図 11 に全体の外観写真を示す。振動打抜きプレスは振動フレームがプレス本体に繰り返し当たって方向を切り換えるため、加工中は杭打機

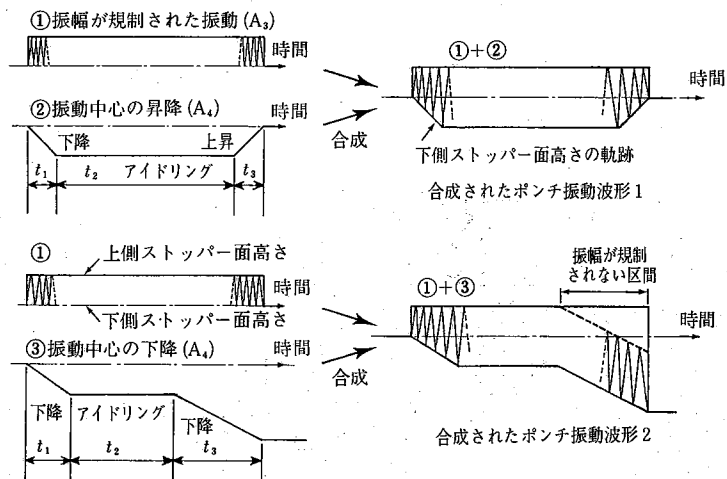
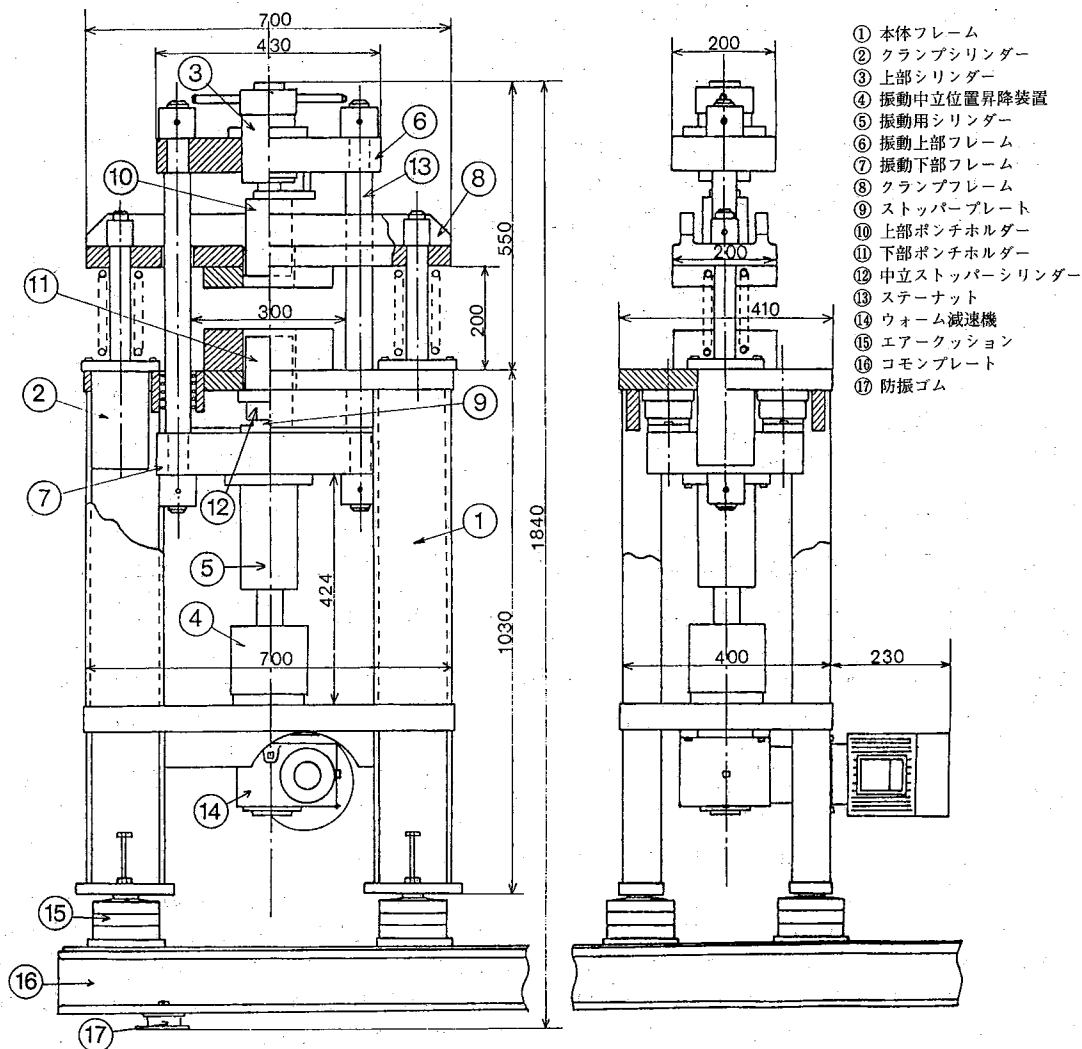
図 9 振動シリンダー A_3 と昇降装置 A_4 によるポンチ振動波形の合成例

図 10 試作振動打抜きプレス本体の組立図

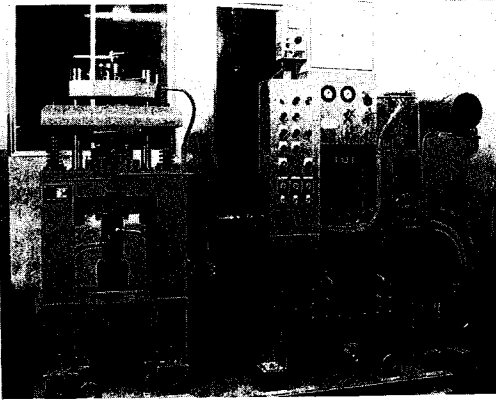


図 11 試作振動打抜きプレスの外観

のような衝撃が続く。そのためプレス本体と接地面との間には⑮、⑰に示すように二重のダンパーを設けている。

5. 実用金型の試作

図 12 に試作した実用金型 (工具径 8 mm) の組立図を、図 13 にその外観写真を示す。通常打抜き用の金型は一組のポンチとダイスをダイセットに固定したものであるが、ここでは二組を上下に対向させて組み入れるところに大きな相違点がある。ポンチとダイスのクリアランスは片側 0.01 mm としたため、金型設計の上で上下工具の心合わせに最も注意を払った。すなわち、上下のダイスの心合わせを確実なものとするために図 12 ⑧のように 4 本のガイドポストとボールガイドを使用し、ガイド

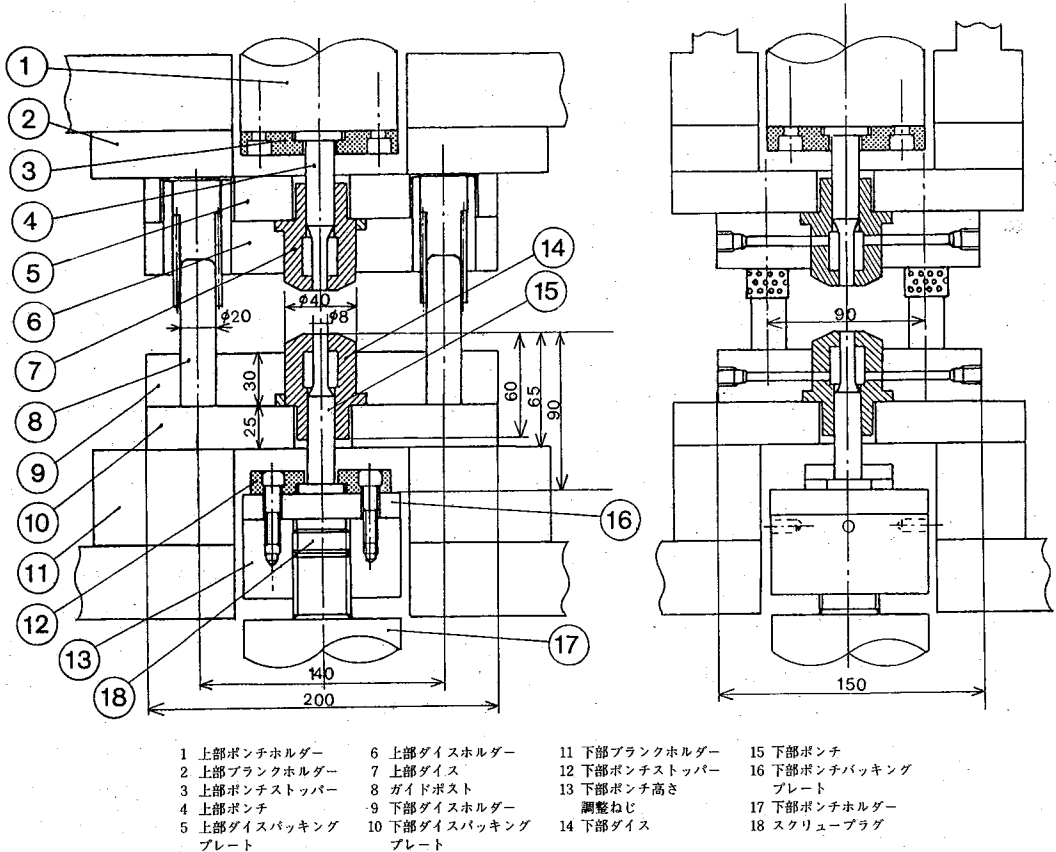


図 12 試作実用金型の組立図

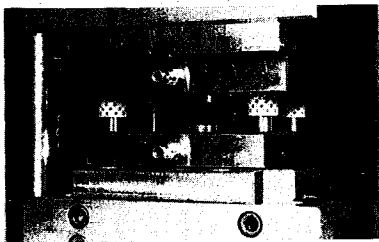


図 13 試作実用金型の外観写真

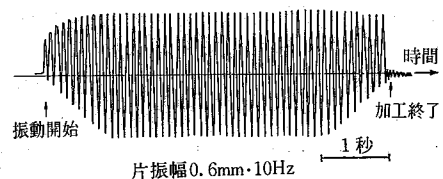


図 14 無負荷運転における振動波形の例

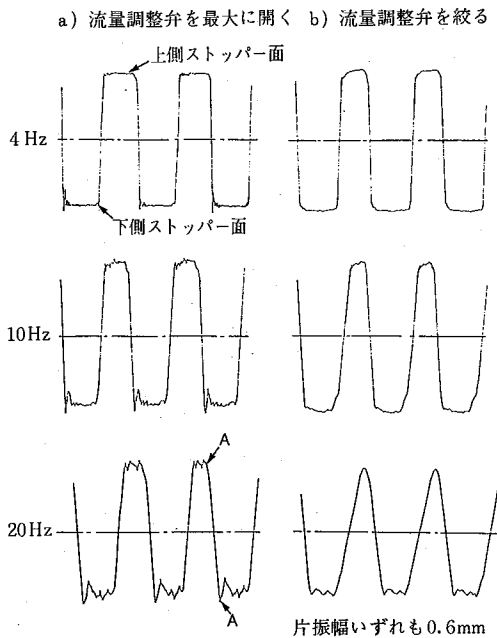


図 15 無負荷運転における振動波形形状の観察

ブッシュはデブコン固定方式とした。またポンチとダイスの心合わせは他の部品の加工精度の影響を直接受けるため、ここではツバ状の押さえ③、⑫によりポンチの軸方向変位を拘束し、同時に半径方向の変位に対しては若干の自由度を持たせた。振動振幅の変更に伴って下側のポンチ、ダイスの高さ合わせが必要となるが、下ポンチ駆動ユニットの不備を補うために、下ポンチとポンチホルダー間に高さ調節ネジ⑬を介在させた。さらにダイス側面には打抜きクズ排出用の穴を設け、連続加工に備えている。

6. 試作振動打抜きプレス性能試験

6.1 無負荷運転における振動波形検査

図 14 は無負荷運転時のせん断圧接用ポンチ振動波形の一例を、また図 15 は各周波数における振動波形形状の比較を示したものである。図 14 により振動シリンダーと振動中立位置昇降装置とによってほぼ所期の設計どおりの振動波形を合成できることが確認される。また図 15 では周波数が低く、かつ振動シリンダーへの流量調整弁を開いた方が矩形波に近い波形形状となり、逆に周波数が高く流量調整弁を絞り過ぎるとフレームは振動の中心位置より下側に比較的に長くどまる傾向を示す。極端な場合には 20 Hz で流量不足となった b) のようにフレームが上側のストッパーにまで達しないで下降することもあり、これらはいずれも振動フレームの自重に起因した現象と考えられる。ここで図 15 の A で示される微小振動はその大半が変位計自身の振動によるものと推定さ

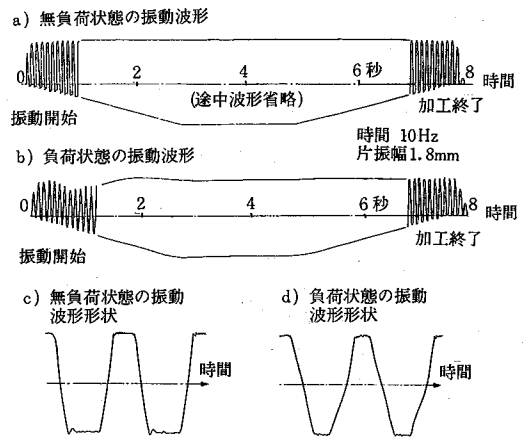


図 16 せん断圧接実験におけるポンチ振動波形の観察

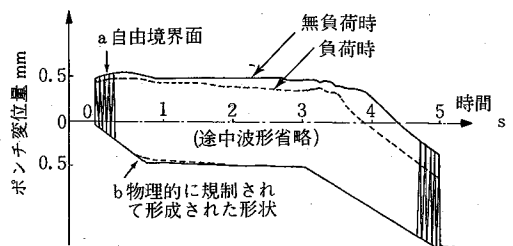


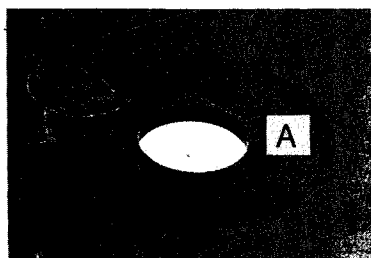
図 17 振動仕上げ抜き実験におけるポンチ振動波形の観察

6.2 試作振動打抜きプレスによるせん断圧接実験

板厚 2 mm のタフピッチ銅板 (1/2 H 材) を 10 Hz、片振幅 1.8 mm、ポンチ面圧 50 kgf/mm²、ダイス面圧 10 kgf/mm² のもとでせん断圧接した。図 16 は接合に用いた振動波形である。振動初期には無負荷状態に比べてわずかに振幅の減少がみられたが、2 秒後以降はほとんど両者に差が認められなかった。しかし、その波形形状を観察すると負荷が加わるとフレームがストッパーに接している時間が短くなり、それに伴って矩形から正弦波の波形に近づく傾向を示している。また接合試験片の引張せん断強度試験では、片振幅 1.8 mm の正弦波による接合試験片強度のおよそ 80% に相当する 635 kgf が得られ、こうした合成波形によるせん断圧接によっても、充分な接合強度を実現できることが確認された。

6.3 試作振動打抜きプレスによる振動仕上げ抜き実験

板厚 1.6 mm の両面銅張のガラスエポキシ積層板を用いて試作振動打抜きプレスによる振動仕上げ抜きの実験を行った。打抜き条件は周波数 50 Hz、片振幅 0.5 mm、ポンチ面圧 40 kgf/mm²、ダイス面圧 10 kgf/mm² である。図 17 に示される無負荷時と振動打抜き加工時のポンチ振動波形より、振動波形の合成によってもサーボ弁を用いた実験装置とほぼ同様の振動波形を実現し得る



A: ダイスイ圧痕

図 18 試作振動打抜きプレスによるガラスエポキシ積層板打抜きサンプル

ことが確認される。振動ストロークの上死点は物理的な規制を受けていないため、図 17 における加工時のポンチ振動幅は空運転時のそれより、0~3 秒までの平行波形部で 5~10%、3~5 秒までの抜き落とし部で 20~30% それぞれ減少している。すなわち図 17 の b ラインはメカニカルストッパーにより規制される面であるのに対し、a ラインはシリンダー内の流入油量によって決められる自由境界面であるため、負荷の増減に応じて振動の上死点も変動するのである。したがって平行波形部分では上下のストッパー間隔を狭くすることで振幅はコントロールできるが、抜き落とし部分では流量調整弁による以外に振動の上死点を規制する方法はない。しかしながら抜き落とし部分の振幅を厳しく規制する意味は少なく、本方式のままで実用上全く支障はないものと考えられる。こうした振動波形によって打抜いたサンプルの外観写真を図 18 に示す。これより本試作振動打抜きプレスを用いて、実験装置の場合と全く同等の光沢仕上げ面を実現できることが明らかとなった。

7. 試作振動打抜きプレスの今後の課題

前節までで、試作振動打抜きプレスが、工具動作の自動化と振動波形の合成という所期の性能を充分に発揮していることが確かめられた。しかし製作段階での設計変更や試作一号機という事情もあり、さらに改善を要する箇所がいくつか指摘される。以下に今後の課題を拾い上げてみた。

- ① 振動仕上げ抜きにおいて、抜きかす抜き落とし過程の振幅規制を可能とする方式を検討する。
- ② 下部ポンチ側にもシリンダーを配し、振幅変更時の高さ調節時間を大幅に短縮する。
- ③ 上部ポンチ駆動ユニットの戻りを現行のスプリング方式から両圧の複動シリンダー方式とし、作業能率の向上とその円滑化をはかる。
- ④ 昇降装置のギャ比を変えて昇降速度を現行の 2~3 倍に高め、波形合成の効率改善と全加工時間の短縮をはかる。
- ⑤ 将来的には抜きかす抜き上げ方式を検討する。

本試作プレスでは、振動フレームのメカニカルストッパーの片面をプレス本体側(図 8 の G_2 面)に設置していた。これを図 8 の主軸 H 上に設け、振幅設定時にはストッパーをネジ式にスライドできる構造にすれば、①②の問題を一挙に解決できよう。またこの方式に下部ポンチスライドを加えると⑤も容易に実現できるものと考えられる。

8. お わ り に

本研究では、一つの試みとして機械的に振動波形を合成する方式により振動打抜きプレスの試作を行った。その結果単に振動中心を昇降させるだけの単純波形においては、おおむねこの方式を適用できるという見通しが得られた。しかしながら今以上の複雑な特殊振動波形を要求された場合には、恐らくフィードバック制御による電気-油圧サーボ弁方式の独壇場になるものと予想される。加振装置がサーボ弁方式、機械的な波形合成方式のいずれの場合にも、本試作機において試された工具動作の実現方法やプレスの基本構造は、振動フレーム方式全般に普遍化し得るものであった。したがって、本試作振動打抜きプレスは、単に専用加工機の試作課題に対する一解答の枠を越えて、広く今後の実用機開発における具体的指針を提示しているものと思われる。今回は検討できなかった工具動作の制御問題と、対向スライドユニット方式における技術上の諸問題は今後の研究課題としたい。

最後に、本振動打抜きプレスの試作にあたってご協力をいただいた株式会社網野鉄工所、帝人エンジニアリング株式会社の各社、ならびに株式会社日立製作所旭工場、木下素男氏に深く感謝いたします。また実験等に協力して頂いた元芝浦工大学生佐々木宏、上野俊幸の両君にお礼を申し上げます。なお本研究の一部は、昭和 55 年、56 年度文部省科学研究費補助金により遂行されたもので、ここに記して謝意を表わします。

(1982 年 4 月 12 日受理)

参 考 文 献

- 1) 中川, 横井: 日本機械学会論文集(C編), 47 巻 422 号 (1981), p. 1391~1400
- 2) 横井, 中川: 日本機械学会講演論文集, No. 814-10 (1981) p. 9~16
- 3) 中川, 横井: 昭和 56 年度精機学会春季大会学術講演会論文集, (1981) p. 877~879
- 4) 中川, 横井: 第 7 回複合材料シンポジウム講演要旨集, (1981) p. 60~63
- 5) 横井, 中川: 第 32 回塑性加工連合講演会論文集, (1981) p. 389~394
- 6) 横井, 中川: 昭和 56 年度精機学会秋季大会学術講演会論文集, (1981) p. 709~711
- 7) 横井, 中川: 昭和 57 年度塑性加工春季講演会論文集, (1982) p. 487~496