

平成23年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「セラミックスシート(チップ抵抗器基板)への微小ピッチ, 極微細孔
の精密打ち抜き金型の開発」

研究開発成果等報告書概要版

平成24年3月

委託者 中部経済産業局

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
1-1	研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2	研究体制(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)	2
1-3	成果概要	4
1-4	当該プロジェクト連絡窓口	5
第2章	本論	6
2-1	事業化モデルとなる試作順送金型の設計・製作	6
2-1-1	研究の目的及び目標	6
2-1-2	実施内容	6
2-1-3	研究成果	7
2-1-4	今後の方針	7
2-2	試作順送金型の最適なプレス動作条件の究明	8
2-2-1	研究の目的及び目標	8
2-2-2	実施内容	8
2-2-3	まとめ	11
2-2-4	今後の方針	11
2-3	試作順送金型の連続運転加工後のセラミックスシート生材の成形性についての検証	12
2-3-1	研究の目的及び目標	12
2-3-2	実施内容	12
2-3-3	まとめ	12
2-3-4	今後の方針	13
2-4	量産化に向けた試作順送金型の耐久性の検証	15
2-4-1	研究の目的及び目標	15
2-4-2	実施内容	15
2-4-3	まとめ	15
2-4-4	今後の方針	16
第3章	全体総括	17
3-1	研究成果概要	17
3-2	今後の課題と事業化展開	19
3-3	付録	20

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1) 研究開発の背景

携帯電話、デジタルカメラ等を主としたモバイル機器及びノートパソコン等においては、小型・薄型・省エネ化が近年ますます加速されてきたことにもない、これらの電子機器に欠かせないチップ抵抗器用基板の小型化、高精度化が望まれている。

2) 研究開発の目的

従来の製品比で面積：1/3、穴面積：1/4、連結穴数：3 倍等々といったダウンサイジングニーズに応えるべくIT機器には欠かせないチップ抵抗器用基板の量産工法として、微小ピッチ、極微細孔の精密打ち抜き金型の研究開発を推進する。

3) 研究開発の目標

チップ抵抗器用基板への要求事項を解決するため、セラミックスグリーンシート^{*1}に連結角穴サイズ0.36mm×0.23mm、連結穴間ピッチ0.6mm、1シートあたりの連結穴数3,894個（1シートの大きさは59mm×72mm）の微小ピッチで無数に連結された微細孔をV溝と穴間のズレ量^{*2}をすべてのV溝と連結穴について0.03mm以下（表1参照）の精度で打ち抜く金型を開発する。

表1 目標値

評価項目	目標値
V溝と穴間のズレ量	0.03mm 以下

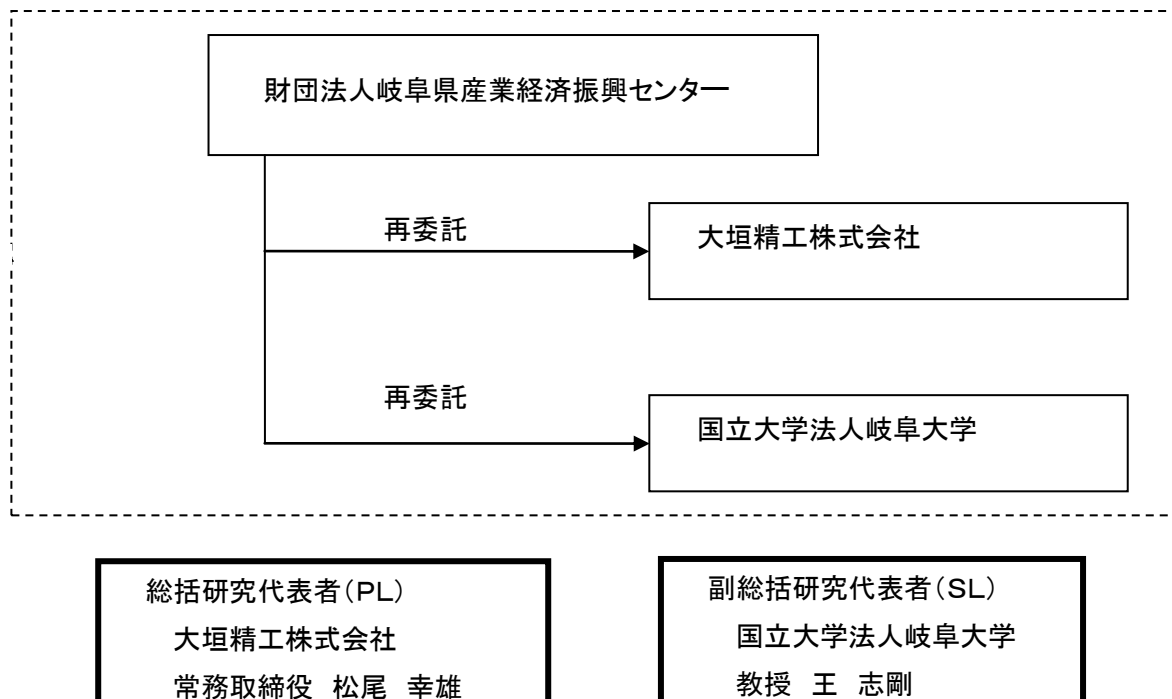
^{*1}セラミックスグリーンシート：ペースト状にしたセラミック粉を0.4~0.6mm厚に圧延したものであり、焼結工程を通過していないため非常に脆弱で、俗に言う“生ハツ橋”を連想させる状態のもの。

^{*2}V溝と穴間のズレ量：個々の製品に分割するためにセラミックシート上に設けられたV溝センターと連結された微細な多数個の穴とのセンタズレを示すものであり、チップ抵抗器の実装構造上非常に重要な寸法。

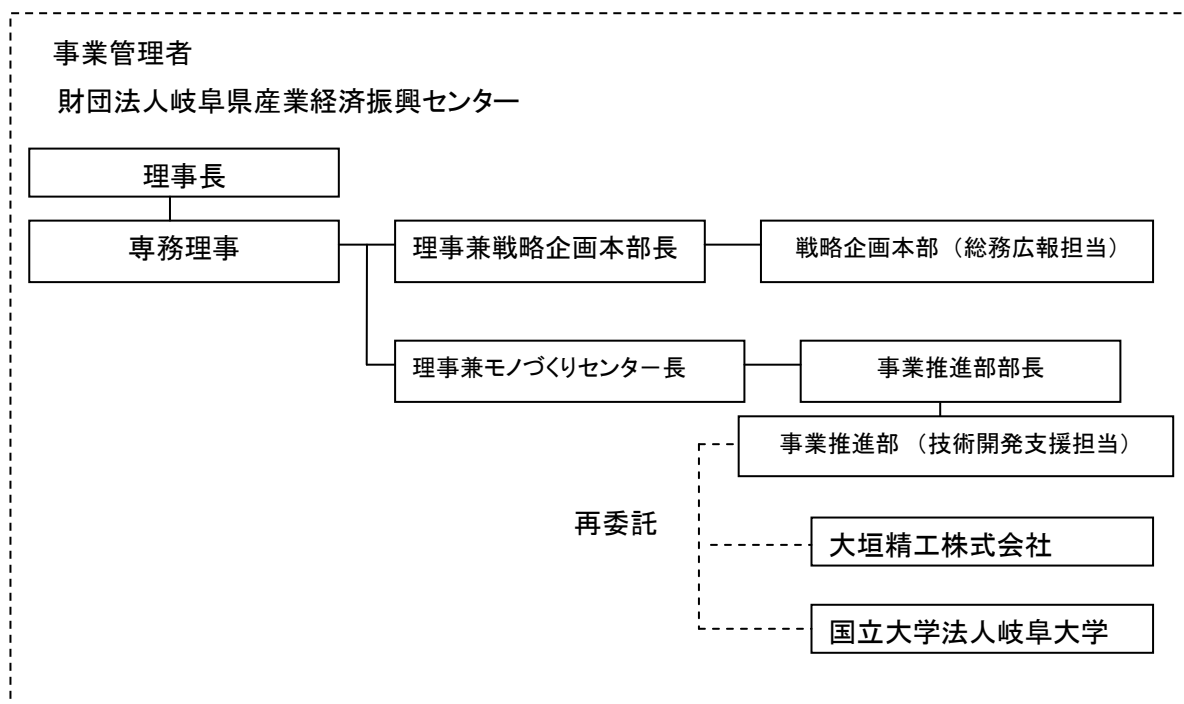
1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）

(1) 研究組織及び管理体制

1) 研究組織



2) 管理体制



(2) 管理員及び研究員

【事業管理者】 財団法人岐阜県産業経済振興センター

管理員

氏 名	所属・役職
石博 芳直	モノづくりセンター長
宮田 直	事業推進部 部長
山田 博義	事業推進部 総括主査
繁田 栄司	事業推進部 参事
篠田 隆博	事業推進部 主事
綾瀬 まゆみ	戦略企画本部主任

【再委託先】

研究員

大垣精工株式会社

氏 名	所属・役職
松尾 幸雄	常務取締役
菱田 衛	設計課部長代理
安藤 貴弘	設計課課長
藤原 聖波	製造課長
日比 庸之	主任研究員

国立大学法人岐阜大学

氏 名	所属・役職
王 志剛	工学部教授 兼金型創成技術研究センター センター長

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理者)

財団法人岐阜県産業経済振興センター

(経理担当者) 戦略企画本部 主任 綾瀬 まゆみ

(業務管理者) 事業推進部 参事 繁田 栄司

(再委託先)

大垣精工株式会社

(経理担当者) 総務部部長 岡部 正義

(業務管理者) 常務取締役 松尾 幸雄

国立大学法人岐阜大学

(経理担当者) 工学部 会計係 市橋 昂

(業務管理者) 工学部 教授 王 志剛

1-3 成果概要

総括：

平成21年度（補正事業）において、基礎的なCAE解析のデータを収集、それに基づいた実験用金型（実用化の1/10スケール）の設計・製作、金型精密構造の究明、放電加工における最適微細加工条件の究明及び研磨加工における最適微細加工条件の究明を実施した。

平成22年度は、プレス機能の選定、最適なプレス動作条件の究明、最適な成形方法の究明、実験用金型のCAE解析及び試作順送金型^{*3}のCAE解析、砥粒流動加工の最適加工条件の究明を実施し、これらの成果を基に試作順送金型の設計を実施した。

平成23年度は、試作順送金型を製作。実用化に向け、最適なプレス動作条件の究明、試作順送金型の連続運転加工後のセラミックスシート生材の成形性についての検証、量産化に向けた試作順送金型の耐久性の検証を実施し事業化に向けた基盤技術を構築することができた。

^{*3}順送金型： 材料の一部に途中工程の製品を付けた状態で送りながら、順に加工をする金型¹⁾。

¹⁾ 吉田弘美： よくわかる金型のできるまで

1-3-1： 試作順送金型の設計・製作

本研究において取り組んできた、金型の構造設計に係る課題、加工技術の高度化に係る課題及び実験用金型によるプレス成形性向上に係る課題によって修得した技術をもとに、本研究の集大成となる事業化モデルの1シートあたり製品取り数 1,276個、連結穴数 3,894 個の試作順送金型の設計を平成22年度に実施し、平成23年度において、本研究の集大成となる事業化モデルの試作順送金型の製作をおこなった。

1-3-2： 最適なプレス動作条件の究明

事業化モデルである試作順送金型を活用し、プレス成形する際の動作条件を成形速度^{*4}、下死点保持時間等^{*5}をパラメータに脆弱なセラミックスグリーンシートの硬度バラツキに十分対応でき得る最適なプレス動作条件の究明をおこない、目標を概ね達成することができた。

^{*4}成形速度： プレス成形において、パンチがワークを押圧する速度。

^{*5}下死点保持時間： 下死点とは、プレス機のスライドがある調整下で行うストロークの最下点のこと²⁾で、下死点保持時間はその状態を保持する時間。

²⁾ 山口文雄： プレス順送金型の設計

1-3-3： 試作順送金型の連続運転加工後のセラミックスシート生材の成形性についての検証

試作順送金型を使用し、前項で究明された最適なプレス動作条件による連続運転加工をおこない、連続加工によるセラミックスグリーンシートの成形性について検証をおこない、目標を概ね達成することができた。

1-3-4： 量産化に向けた試作順送金型の耐久性の検証

量産化に向け、試作順送金型の連続運転加工による金型耐久性の評価をおこない、目標である金型構成主要部品のチッピング*⁶が無いことを確認することができ、事業化に向けて大きく前進することができた。

*⁶チッピング： スリットの山の部分に、深さ 0.01mm 以上のかけが1ヶ所でもある状態をチッピングと呼ぶ。

1-4 当該プロジェクト連絡窓口

管理団体：財団法人 岐阜県産業経済振興センター

担当、役職：繁田 栄司、事業推進部 参事

住所：岐阜県岐阜市藪田南5丁目14番53号

電話：058-277-1093

FAX：058-273-5961

第2章 本論

2-1 事業化モデルとなる試作順送金型の設計・製作

2-1-1 研究の目的及び目標

平成22年度までにおこなってきた、金型の加工技術に関する研究、実験用金型をもちいたプレス成形性に関する研究、及びCAE解析を活用したセラミックスグリーンシートの塑性流動に関する研究の成果をもとに、本研究の集大成である事業化モデルの試作順送金型の設計をおこない、セラミックスグリーンシートへの連結多数の超微細孔成形を可能にする、微小ピッチ、極微細孔構造を有した試作順送金型の製作を実施する。

2-1-2 実施内容

平成22年度において、事業化モデルとなる連結穴数約4,000個となる試作順送金型の設計を実施した。

平成23年度において、これまでの研究により高度化した金型の超微細加工技術を活用し、試作順送金型の製作を実施した。

試作順送金型は、約4,000本という膨大な数のパンチを必要とする。そのパンチの先端は、0.23mm×0.36mmと極めて微小な形状をしている。超微細な孔抜き成形用パンチを図1に示す。図にあるように「1円硬貨」と比較するとわかるように、通常の見視では縫製に使用する縫い針、または歯の清掃に使用する爪楊枝のように見えるほど微細な形状をしている。

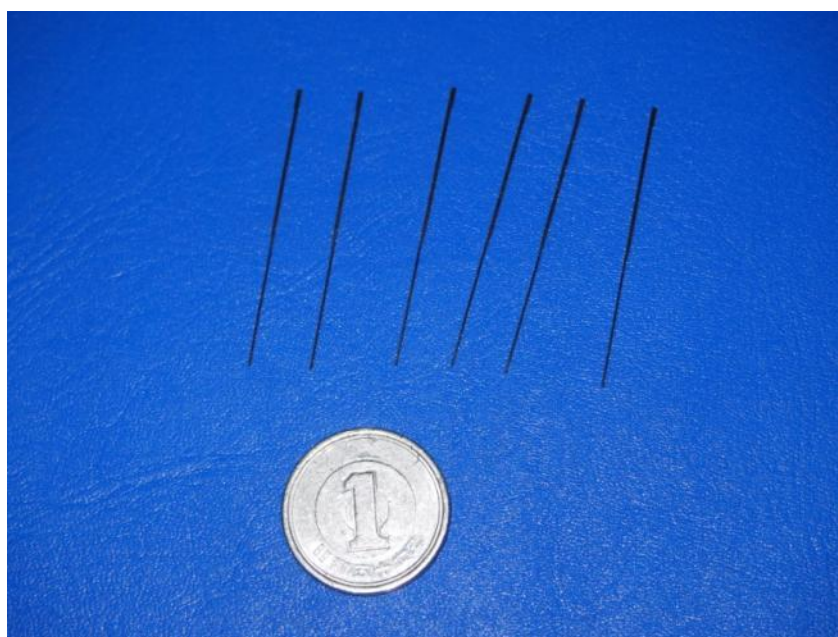


図1 孔抜き成形用パンチ

また、V溝形状を成形するための金型部品である刃立て工具は、高さ約 0.2mm、刃角度 25 度の三角形の山形状と極めて微細なものが、1.1mmピッチで正確に配置されていなければならない。そのすべての刃部分にチッピングがあってはならない。

超微細な金型部品である、孔抜き成形用パンチ、および刃立て工具の加工を超高精度CNC成形研削盤をもちいておこなった。平成22年度までの研究成果を活かし、超微細な金型部品を高精度に加工することができた。

試作順送金型の約 4,000 本という膨大な数の微細孔を成形するダイ、および刃立て工具兼パンチケースは、その一個一個の孔の大きさが 0.23mm×0.36mm程度ととても微細な形状をしている。このように微細な孔加工を平成22年度までの研究成果を活かし、金型部品への超微細孔加工を高精度に実施することができた。

さらに、刃立て工具兼パンチケースにいたっては、微細孔内のパンチ導入部への R 形状を付与し、かつ、パンチ摺動部の表面性状の向上のため、砥粒流動加工機をもちいて、流動研磨加工を施す。

これらの総合的な技術を活用することで、セラミックスグリーンシートへの連結多数の超微細孔成形を可能とする試作順送金型を完成することに成功した。

2-1-3 研究成果

本研究の集大成となる1シートあたりの製品取り数 1,276 個、連結穴数 3,894 個（1シートの大きさ：約 72mm×約 59mm）の試作順送金型の設計・製作に成功した。

2-1-4 今後の方針

事業化モデルとなる試作順送金型の完成後、試作順送金型を活用した実証実験を実施することで、実用化に向けてセラミックスグリーンシートの超精密成形を可能とする金型技術を確立すべく研究を推進する。

2-2 試作順送金型の最適なプレス動作条件の究明

2-2-1 研究の目的及び目標

実験用金型で得られた技術を活用し、前項で完成した事業化モデルである試作順送金型を用いて、プレス成形する際の加工動作条件を成形速度、下死点保持時間等をパラメータに脆弱なセラミックスグリーンシートの硬度バラツキに十分対応でき得る最適なプレス加工の動作条件を究明する。

試作する製品は、約 72mm×約 59mm の四角形で、板厚 0.46mm のセラミックスグリーンシートに約 4,000 個もの 0.23mm×0.36mm の極微細孔、23 本の X スリット^{*7}、および 59 本の Y スリットを成形した形状をする。

評価項目を V 溝の最大ズレ量^{*8}・不良箇所数^{*9}・X スリット溝平行度として、最適なプレス動作条件を 1 種類に絞り込むことを目標とした。

^{*7}X スリット： 試作品には 2 方向にスリット（V 溝）を成形する。そのうち送り方向のスリットを X スリット、X スリットに直行するスリットを Y スリットと便宜上定義した。

^{*8}V 溝の最大ズレ量： 実験サンプル 1 シート中のすべての V 溝と穴間のズレ量のうち、最大の値を「V 溝の最大ズレ量」と定義した。

^{*9}不良箇所数： 実験サンプル 1 シート中には、1,276 箇所という膨大な数の測定箇所が存在する。そのうち、目標値である「V 溝と穴間のズレ量 0.03mm 以下」を達成できなかった箇所を不良箇所とし、実験サンプル 1 シートあたりに存在した不良箇所の総数を「不良箇所数」と定義した。

2-2-2 実施内容

(1) 実験

セラミックスグリーンシートへの精密打ち抜きは、セラミックス生材に超硬製の Y スリット刃立て工具が最初に接触し、ばね圧により刃立て工具先端部分がセラミックス生材にわずかに刺さり、その直後、孔抜き成形パンチがセラミックス生材の表面に接触することにより孔抜きが開始される。その後、孔抜き成形パンチがセラミックス生材を押し込んでいく。押し込まれた材料は、ダイ表面の孔の中に侵入するような塑性変形をするが、一部は孔抜き成形パンチの周囲にある材料を平面方向に押し出すような塑性変形をする。平面方向への塑性変形によって、事前に成形されている X スリットがその成形当初の位置から移動することになる。この平面方向に変形する量が「V 溝と穴間のズレ量」に大きく関わってくる。

プレスの動作の違いによって、Y スリット刃立て工具とセラミックス生材との接触の仕方や最初に刺さる量、および下死点での材料との接触状態が違ってくると推測できる。また、孔抜き成形パンチの材料との接触状態、および孔抜き中の材料の変形状態にも変化を及ぼすと推測できる。

本実験では、試作順送金型を用いたセラミックスグリーンシートへのプレススタンピングにおける加工動作条件について、成形速度および下死点保持時間をそれぞれ違う条件で成形する実験をおこなった。昨年度に実施された実験用金型をもちいた研究成果より、本年度は、成形条件を9種類に絞り込んで実験をおこなった。

(2) 実験結果

実験サンプルのすべての穴とV溝の位置等を測定。ミットヨ社製、CNC画像測定機をもちいて、精度よく、効率的に計測することができた。

V溝の深さについて。CNC画像測定器は深さを測定することができないことから、ミタカ社製、レーザー三次元測定機をもちいて深さを測定した。

これらによって計測したデータを分析し、事業化モデルである試作順送金型を使い、様々なプレス動作条件によるセラミックスグリーンシートの塑性変形を観察した。

縦軸にV溝の最大ズレ量をプロットしたグラフを図2に、V溝のズレ量が目標値0.03mmを超えたものを不良箇所として、縦軸に実験サンプル1シートあたりの不良箇所数をプロットしたグラフを図3に、縦軸に実験サンプル1シートあたりのXスリット溝平行度をプロットしたグラフを図4に示した。

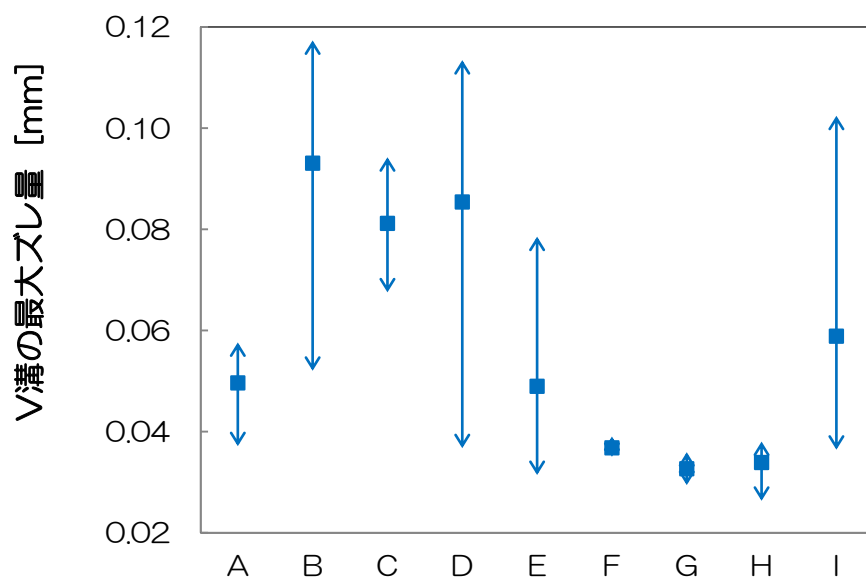


図2 V溝の最大ズレ量

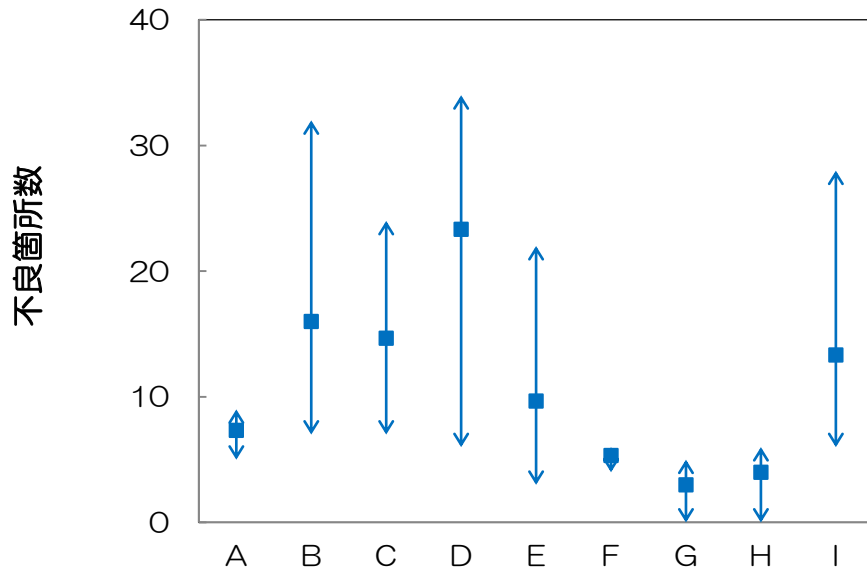


図3 不良箇所数

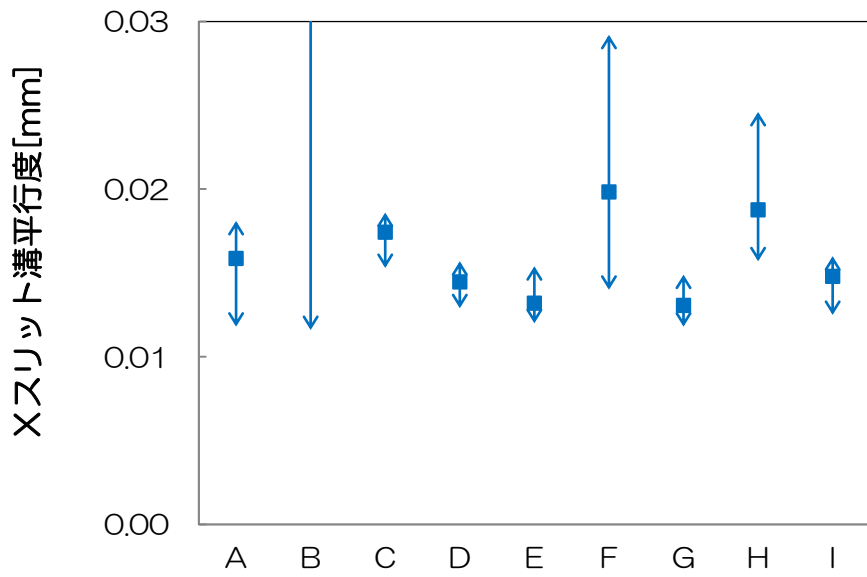


図4 Xスリット平行度

2-2-3 まとめ

実験の結果、最重要評価項目である V 溝の最大ズレ量は条件 G が最も良く、次いで条件 H が良く、次いで条件 F が良い値となった。

不良箇所数についても、同様の結果であった。

X スリット溝平行度は、条件 G が最も良く、次いで条件 E が良く、次いで条件 D が良い値となった。

これらの結果を総合的に判断すると、V 溝の最大ズレ量・不良箇所数・X スリット溝平行度のすべての評価項目について、条件 G が最も良い値をとっていること。V 溝の最大ズレ量及び不良箇所数について、条件 H が2番目に良い値をとっているものの、X スリット溝平行度については、条件 E が2番目に良い値をとっており、かつ、その値が条件 H は条件 E のそれよりもかなり大きな値であったことから、最適なプレス動作条件を条件 G であると決定した。

この実験においては、成形速度の速いものほど良く、下死点保持時間の短いものほど良い傾向がみられた。この結果からは、孔抜きパンチがセラミックスグリーンシートを打抜く際に、パンチの近傍で発生する塑性変形ができるだけはやい速度で進行するほど、そこから離れた位置にある X スリットまでに存在するセラミックス生材の塑性変形が抑制されるのではないかと推測できる。もし、そうであるならば、さらに速い動作が可能になるプレス機をもちいることによって、セラミックス生材の塑性流動を抑制できる可能性があることになる。

しかし、昨年度までの研究成果では、サーボプレス機のモーション動作が有効であることが確認されており、今回の結果をもって、塑性変形ができるだけはやい速度で進行するほど、パンチ近傍以外の部位の塑性変形を抑制できると断定することは、時期尚早である。パンチ近傍の塑性変形の数値と、その周囲の塑性変形との相関については、今後の重要な研究課題である。

本研究の目標値である V 溝と穴間のズレ量 0.03mm 以下を今回の実験ではわずかに達成することができなかった。しかし、本研究項目で目標としていた最適なプレス動作条件を1種類に絞り込むことに成功した。

2-2-4 今後の方針

最適なプレス動作条件を1種類に絞り込むことができたが、ある一定の傾向が確認されたことから、さらに他の条件を検討する必要があると考えられ、さらに高速でシャープな成形条件による実験等を実施することにより、セラミックス生材の塑性変形に関する研究をさらに深く追求することで、本研究の目標値である V 溝と穴間のズレ量 0.03mm 以下を達成するため本研究を強力に推進する。

2-3 試作順送金型の連続運転加工後のセラミックスシート生材の成形性

についての検証

2-3-1 研究の目的及び目標

量産化における製品品質は、事業化を考えたときに製品寸法等の要求を満たすことが最重要であるが、同じレベルの製品を供給できることも生産を考えたときには無視できない。

そうしたことから、連続運転加工といった量産に近い状態を再現し、このような状況におけるセラミックス生材の成形性を検証することで、セラミックスグリーンシートの超精密打ち抜き順送金型の量産化における信頼性を高める。

事業化モデルである試作順送金型を用いて、連続運転加工を実施し、超微細な連結多数穴のセラミックスグリーンシート（チップ抵抗器基板）の量産化に向け、製品バラツキが少ない連続運転加工が可能であることを検証する。

2-3-2 実施内容

(1) 実験

試作順送金型をサーボプレス機^{*10}に搭載し、前項で決定したプレス動作条件でプレス機を運転する。その際、プレス機本体側に簡易的な材料送り装置等を設置して、連続運転加工が可能な環境を整えた。

セラミックスグリーンシートの連続運転加工によるプレススタンピングを実施し、セラミックス生材の連続運転加工による成形性を検証した。

^{*10}サーボプレス機：サーボモーターの駆動によりスライドの速度やモーション設定が自由にでき、部品精度、難加工材の成形、金型寿命、生産性の向上が図れるプレス機。

(2) 実験結果

試作順送金型をもちいて、連続運転加工し実験サンプルを作成した。そのすべての穴とV溝の位置等を測定。実験サンプル1シート中のV溝と穴間の最大ズレ量および不良箇所数について、連続加工運転によるセラミックス生材の成形性を検証した。

2-3-3 まとめ

実験の結果、連続加工した実験サンプルのおよそ7割程度が、目標であるV溝の最大ズレ量0.03mm以下にすることができなかった。しかし、V溝の最大ズレ量が多いものでも0.032mmであり、目標値を0.002mm程度で割合にして6.7%程度と、わずかに超えた結果であること。1シートあたりの不良箇所数が多いものでも、1,276箇所のうち11箇所であり、割合にして0.9%程度と、それほど多くないこ

と。および、すべての実験サンプルにおいて、V溝と穴間のズレ量が大きい値を示した部位が、一定の部分に集中的に発生していることから、目標を達成でき得る可能性は十分にある。

V溝と穴間のズレ量が大きい値を示した部位が集中したことについて。本実験に使用したプレス機の構造がCフレームであることが原因にあるのではないかとこの仮説をたてた。

Cフレーム構造^{*11}のプレス機は口開き防止のため、このプレス機で一般的に使用すると想定される荷重がかかったときに、プレス機の弾性変形^{*12}によって、スライドとボルスターが平行になるように設計されている。それに対して、本研究で実施しているセラミックスグリーンシートへの精密打ち抜き成形においては、2～3 t程度の荷重である。このことから、このようにプレス機的能力80 tに対して極めて少ない荷重においては、スライドとボルスターの平行がプレス機の正面側に口塞ぎのような状態になっていることが予測される。

今回の実験においては、目標であるV溝の最大ズレ量0.03mm以下にすることができなかったが、連続運転加工による製品バラツキについて。連続運転加工の実験サンプルは、V溝の最大ズレ量の最小が0.0289mm、最大が0.0324mmで、バラツキは0.0035mmであった。

このことから、V溝と穴間のズレ量を0.026mm以下にすることを目標にすれば、量産に十分な信頼性があると推測した。事業化における量産を考慮したとき、バラツキが少ないこと、および、その量がわかったことは大きな成果である。

*11 Cフレーム構造： プレス機械の主要構成要素であるフレーム形態の一種。形状がC文字に似たフレームで、作業域の前と左右の三方が連続した空間をもつフレーム構造。

*12 弾性変形： 物体に外力が作用すると、物体はなにがしかの変形が生ずる。外力を除去すると変形が完全に消滅し、物体が元の形に復する場合、これを弾性変形という³⁾。

3) 清家政一郎： 材料力学

2-3-4 今後の方針

今回の実験の不具合についての仮説である、プレス機のCフレーム構造による問題点について。この仮説が正しいか否かを証明する必要があると考えられることから。第一段階として、スライド面とボルスター面の平行維持が弾性変形によって変化しないような構造のプレス機、例えば、ストレートサイドフレーム構造^{*13}のプレス機にてプレススタンピングを実施し、成形したセラミックスグリーンシートの塑性変形がプレス機の正面側と奥側の違いの有無を検証する。違いが無かった場合には、第二段階として、従来から実験に使用しているCフレーム構造のサーボプレス機にて、プレ

ススタンピングを下死点で停止させ、そのときの試作順送金型のプレス機正面側およびプレス機奥側の位置のスライドからボルスターまでの距離を正確に計測し、それらの距離の違いを確認する。第三段階として、計測によって確認された距離の違いだけのシムプレートのスライドからボルスターまでの距離の大きい部分に設置し、プレススタンピングを実施する。成形したセラミックスグリーンシートの塑性変形がプレス機の正面側と奥側の違いが改善されるかを試みる。

もし、この仮説が証明され、その改善策も解明することができれば、セラミックスグリーンシートの精密打ち抜き以外の成形形態にも応用できると考えられる。

今回の実験では、目標値である、すべてのサンプルのV溝の最大ズレ量が 0.03mm以下であることを達成できなかったことから、目標値を達成するべく研究開発を進める。

本研究の目標値を達成した後、量産した場合にも十分な信頼が得られると考えられる値である、V溝の最大ズレ量を 0.025mm以下にすることを次の目標に研究を推進する。

*¹³ストレートサイドフレーム構造： ストレートサイドフレーム構造とは、プレス機械の主要構成要素であるフレーム形態がストレートサイド形で、プレス機のフレーム構造の一種。

2-4 量産化に向けた試作順送金型の耐久性の検証

2-4-1 研究の目的及び目標

セラミックスグリーンシートは脆弱であるが、その成分には研磨剤に使われるような、アルミナ^{*14}やジルコニア^{*15}等の高硬度の物質が多く含有されている。セラミックス押し出し成形等に使われるようなセラミックス生材は本研究対象の材料よりはるかに軟らかいが、それに用いられる金型等では、セラミックスに含有される高硬度の物質による金型表面への摩耗損傷が大きな懸念事項になっている。

このことから、セラミックス生材を成形する金型のパンチ・ダイ等の耐久性が懸念事項になることが想定されることから、事業化モデルである試作順送金型を用いて、セラミックスグリーンシートの連続運転加工を実施し、金型の耐久性を検証する。

連続運転加工をおこない、試作順送金型のパンチ、ダイおよび刃立て工具にチッピングのないことを目標とした。

^{*14}アルミナ： アルミニウムの酸化物。白色の粉末で、化学式は Al_2O_3 。セラミックス材料の一種で、Hv2,000 と高硬度で、研削材等によく利用される。別名、酸化アルミニウム。

^{*15}ジルコニア： ジルコニウムの酸化物。白色の固体で、化学式は ZrO_2 。耐熱性セラミックス材料によく利用される。Hv1,200 と高硬度で、靱性が高く、耐摩耗性に優れている。

2-4-2 実施内容

事業化モデルである試作順送金型を用いて、セラミックスグリーンシートを連続運転加工し、サンプルを成形した。連続運転加工の後、当該金型を分解し、パンチ、ダイおよび刃立て工具をすべて顕微鏡等で外観検査し、チッピングの有無を確認した。

外観を観察した結果、連続運転加工後の試作順送金型のパンチ、ダイおよび刃立て工具にチッピングは確認されなかった。パンチ等が超微細であることから、SEM^{*16}をもちいて高倍率、かつ、詳細に外観を観察した。

^{*16}SEM： 走査型電子顕微鏡のことで、Scanning Electron Microscopeの略。光学式でないため、高倍率でも高深度で試料を観察することができる。

^{*17}nm： 長さの単位。1 mの10億分の1。

2-4-3 まとめ

事業化を前提として、セラミックス製のチップ抵抗器基板の量産に耐えることが可能であるかを本研究で検証した。また、パンチ等の金型部品の摩耗および損傷の具合を観察するためにSEMを利用したことによって、外観の観察を高倍率でおこなうことができたことで、0.001mm以下の非常に微細な損傷まで観察することができた。

このため、完全にチップング等の損傷が確認されなければ、セラミックス製のチップ抵抗器基板の量産に十分に耐えることが可能であると結論づけても差し支えないと考えた。

連続運転加工を実施した後の試作順送金型のパンチ、ダイおよび刃立て工具について、SEMによって1,000倍にまで拡大して、パンチ等において機能する部位となるシャープなエッジになっている部分を観察し、すべてにおいてチップング等の破損がないことを確認した。

目標である、連続運転加工による試作順送金型のパンチ、ダイおよび刃立て工具のすべてにチップングがないことが確認されたことで、微細孔の精密打ち抜き金型の耐久性が証明された。

2-4-4 今後の方針

目標を達成したが、何十万個といったような本格的な連続運転加工はしていないことから、今後も引続き多数個の連続運転加工をおこない、パンチ、ダイ等の耐久性を検証していく。

第3章 全体総括

3-1 研究成果概要

- 平成21年度において、セラミックスグリーンシートの塑性流動を予測するべく。材料特性を導出するための極めて簡素な試験装置を考案した。この試験装置をもちいることにより、効率よく、かつ、精度よくCAE解析に必要である材料特性の導出に成功した。
- セラミックスグリーンシートといった極めて特殊な材料の材料特性を導出が可能になったことから、基礎的なCAE解析を実施し、セラミックスグリーンシートの精密打ち抜き成形による塑性流動を最小限に抑制できる成形方法、および金型構造を研究し、連結微細多数穴加工を実現するための金型構造設計の支援ツールの確立にむけて大きく前進することができた。
- 連結多数の微小ピッチ、かつ、 $0.23 \times 0.36\text{mm}$ といった極微細孔の精密打ち抜きを可能とする超微細金型の加工技術を確認するため。形彫り放電加工技術の研究をおこない、形彫り放電加工に適した電気特性に優れた金型材料及び最適な加工条件を究明することに成功し、極微細孔の形彫り放電加工技術が大きく向上した。
- 超微細金型の加工技術を確認するため。ワイヤー放電加工技術の研究をおこない、ワイヤー放電加工に適した電気特性に優れた金型材料及び最適な加工条件を究明することに成功し、 $0.23 \times 0.36\text{mm}$ という極微細孔のワイヤー放電加工技術が大きく向上した。
- セラミックスグリーンシートにV溝成形をする刃立て工具は、その先端が極めて鋭利な形状の山を 1.1mm ピッチで造形される。このような超微細な刃立て工具を研磨加工する技術の研究をおこない、極めて鋭角な刃立て工具を加工することに成功し、その最適な加工条件を究明することができた。
- 多種多様な基礎実験を可能とする事業化モデルの約 $1/10$ の取り数となる、連結穴数が1シートあたり約400個の実験用金型を完成することができた。
- 平成22年度において。実験用金型を活用し、一般的なプレススタンピングで使用するクランクプレス機、及びサーボプレス機のそれぞれにおいて、成形性に関する基礎的な評価・検証を行い、サーボプレス機のモーション動作が脆弱なセラミックスグリーンシートの成形加工に適していることがわかった。
- 脆弱なセラミックスグリーンシートへの連結多数微細孔のプレス成形技術を確認するため。実験用金型をもちいて、プレススタンピングする際のプレス動作条件等を究明するべく、種々の実験を実施し、最適なプレス動作条件を2種類に絞り込み、V溝深さによる成形性の違いのないこと、および外形抜きタイミングを決定することができた。

- 最新のCAE解析システムを平成22年度に導入したことにより、CAE解析をさらに精度のよい方法で実施することが可能になった。基礎的なCAE解析では、部分的に成形するCAE解析しかできなかったため、それぞれの解析結果を総合的に分析する手法でセラミックスの成形予測をおこなっていたが、最新のCAE解析システムでは、部分的ではなくフルモデルによるCAE解析をおこなうことができた。これにより、基礎的なCAE解析で最適と考えられた成形方法等では、目標が達成できないことが判明し、さらに最適な成形方法等を解明することに成功した。
- 事業化する製品は、連結穴数が1シートあたり約4,000個といった膨大な数であるが、最新のCAE解析システムによって、1シートあたり約4,000個の連結多数微細孔のCAE解析に成功し、実験用金型で実証された成形方法等が約4,000個の連結多数微細孔の成形にも有効であることを検証できたことから、事業化モデルとなる試作順送金型の金型構造を決定することができた。
- 実験用金型を製作した際に、刃立て工具の微細孔入口へのパンチ挿入が困難であることが問題として顕在化した。このことから、砥粒流動加工の研究を実施し、刃立て工具の微細孔のパンチ挿入部へのコーナーR、および微細孔内壁の面粗度向上を実現することに成功した。砥粒流動加工の研究により、刃立て工具へのパンチ挿入を問題なくおこなうことを可能とし、かつ、パンチの損傷を格段に軽減できた。
- 平成23年度において、事業化モデルの連結穴数が1シートあたり約4,000個の試作順送金型を製作し、完成することができた。
- 実験用金型における研究成果をベースに、事業化モデルである試作順送金型をもちいて、最適なプレス動作条件等の研究を実施した。最適なプレス動作条件を究明することに成功し、目標を概ね達成することができた。
- 事業化を考慮し量産に近い状態での実験として、プレス機による連続運転加工を実施した。連続生産による、セラミックスグリーンシートへの連結多数微細孔の成形性を検証、製品バラツキが少なく、量産化が十分可能であることを確信した。
- 連続運転加工実験の後、試作順送金型の耐久性を検証するため、パンチ、ダイ、および刃立て工具をSEMで観察し、金型にまったく損傷のないことを確認し、開発した金型が量産化に十分耐え得ることが立証された。

3-2 今後の課題と事業化展開

事業化モデルである試作順送金型による実証実験において、目標値のV溝と穴間のズレ量0.03mm以下をわずかに達成できなかった。このことから、平成24年度にセラミックスグリーンシートの塑性流動に関する研究、およびプレス成形性向上に関する研究を推進し、目標値の0.03mm以下を達成し、さらに量産性を考慮した次の目標値を0.026mm以下と設定し、技術的課題に関する研究を推進する計画である。

平成24年度において、本研究開発により製作した事業化モデルの試作順送金型で成形したセラミックス製超小型チップ抵抗器基板を川下事業者サンプル提供し、製品の目標値0.03mm以下をわずかに達成できなかったものにおける事業化を模索するとともに補完研究を進め、当初の目標達成をめざす。

平成25年度において、当初の目標値0.03mm以下を達成しただけでなく、量産性を見込んで設定した目標値0.026mm以下を達成した製品サンプルを提供し、さらに上の品質を備えたセラミックス基板生産用金型を広く国内外のセラミックスメーカーに売り込むことにより、セラミックス基板生産用金型の受注額1億円を目標に販促活動を強力に推進する。

本研究により高度化した技術は、主に金型の超精密加工技術、セラミックスグリーンシートへの0.23×0.36mmという超微細な連結多数孔の成形技術、およびセラミックスグリーンシートのCAE解析を活用した予測技術である。

金型の超精密加工技術について。本技術の成果は様々な金型工作に関して活用することができ、広く金型事業全般についての事業効果が多大に見込める。特に形彫り放電加工技術においては、極微細な孔を超硬材に貫通させる技術は、他に類を見ないほどのすばらしい技術であり、本研究の大きな成果である。この超精密加工技術を必要とする機械メーカー、および金型メーカーへの事業展開を精力的におこなう。

セラミックスグリーンシートへの0.23×0.36mmという超微細な連結多数孔の成形技術について。本技術の成果はセラミックスのみにとどまらず、脆弱軟材全般に転用できるものと考えられ、多種多様な分野に本研究成果を広く活用できる可能性が十分に高いことから、フィルム・ゴム・医療分野等々の新しい分野に事業展開をはかり、脆弱軟材の超精密成形等に技術展開をはかることにより、幅広い分野に営業活動をおこない、本研究成果の事業化を強力に推進する。

セラミックスグリーンシートのCAE解析を活用した予測技術について。本技術の成果はセラミックスのみにとどまらず、多種多様な脆弱軟材の成形予測に展開が可能であると考えられる。特に、新しい材料試験方法を考案したことにより、脆弱軟材のCAE解析の活用には大きな可能性を与えた。今後は、脆弱軟材のCAE解析技術を広く事業展開するため、展示会等に参加するなど、本技術の広報活動にも注力し、本研究成果の事業化を進めてまいりたい。

3-3 付録

専門用語の解説

*¹セラミックグリーンシート： ペースト状にしたセラミック粉を0.4～0.6mm厚に圧延したものであり、焼結工程を通過していないため非常に脆弱で、俗に言う“生ハツ橋”を連想させる状態のもの。

*²V溝と角穴間のズレ量： 個々の製品に分割するためにセラミックシート上に設けられたV溝センターと連結された微細な多数個の穴とのセンタズレを示すものであり、チップ抵抗器の実装構造上非常に重要な寸法。

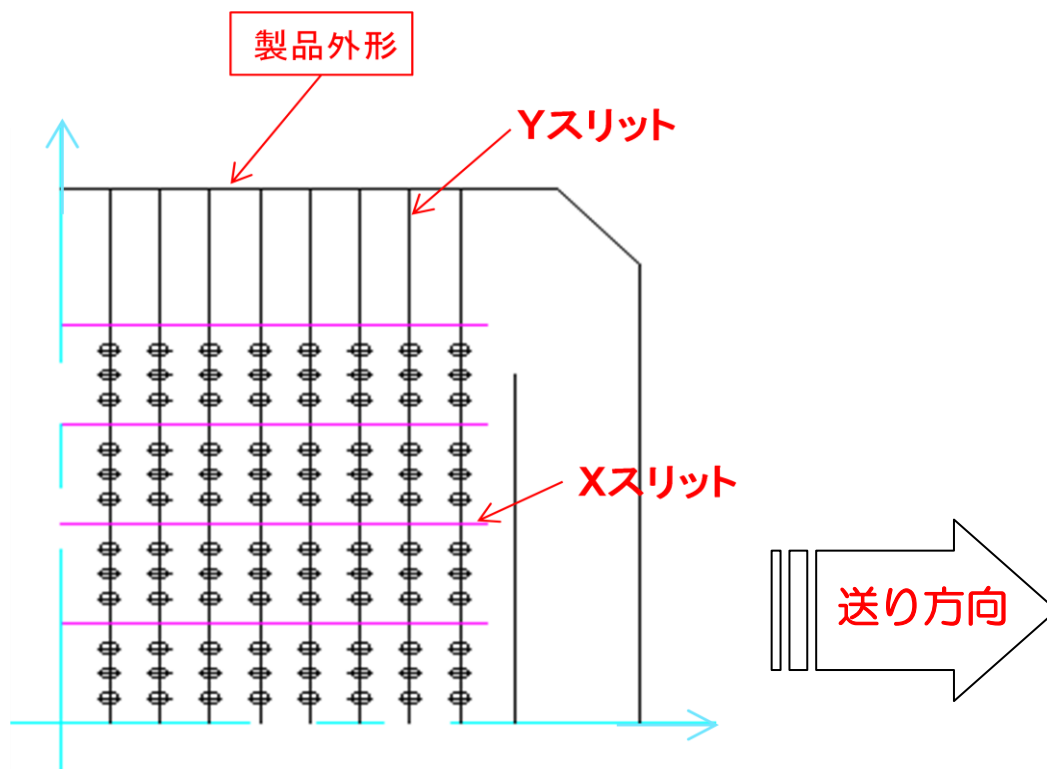
*³順送金型： 材料の一部に途中工程の製品を付けた状態で送りながら、順に加工をする金型。

*⁴成形速度： プレス成形において、パンチがワークを押圧する速度。

*⁵下死点保持時間： 下死点とは、プレス機のスライドがある調整下で行うストロークの最下点のことで、下死点保持時間はその状態を保持する時間。

*⁶チッピング： スリットの山の部分に、深さ0.01mm以上のかけが1ヶ所でもある状態をチッピングと呼ぶ。

*⁷Xスリット： 試作品には2方向にスリット（V溝）を成形する。そのうち送り方向のスリットをXスリット、Xスリットに直行するスリットをYスリットと便宜上定義した。試作品の概略を下図に示した。



試作品概略図（1/4図）

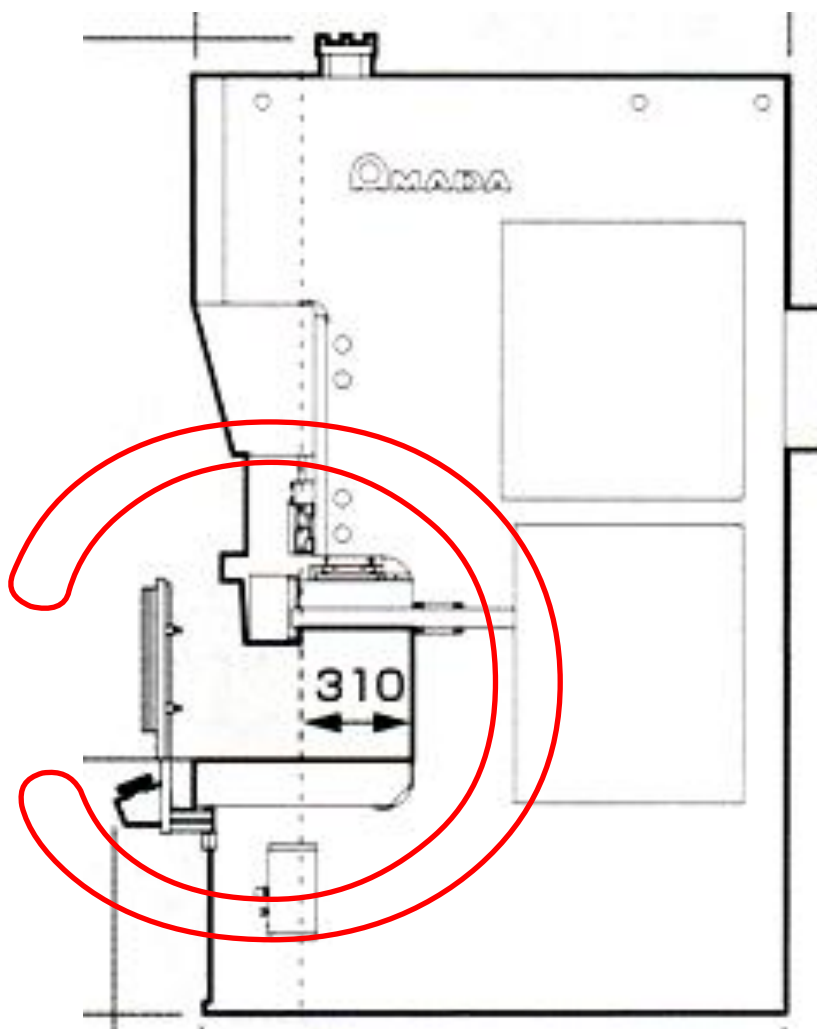
*⁸V溝の最大ズレ量： 実験サンプル1シート中のすべてのV溝と穴間のズレ量の

うち、最大の値を「V溝の最大ズレ量」と定義した。

*⁹不良箇所数： 実験サンプル1シート中には、1,276箇所という膨大な数の測定箇所が存在する。そのうち、目標値である「V溝と穴間のズレ量 0.03mm以下」を達成できなかった箇所を不良箇所とし、実験サンプル1シートあたりに存在した不良箇所の総数を「不良箇所数」と定義した。

*¹⁰サーボプレス機： サーボモーターの駆動によりスライドの速度やモーション設定が自由にでき、部品精度、難加工材の成形、金型寿命、生産性の向上が図れるプレス機。

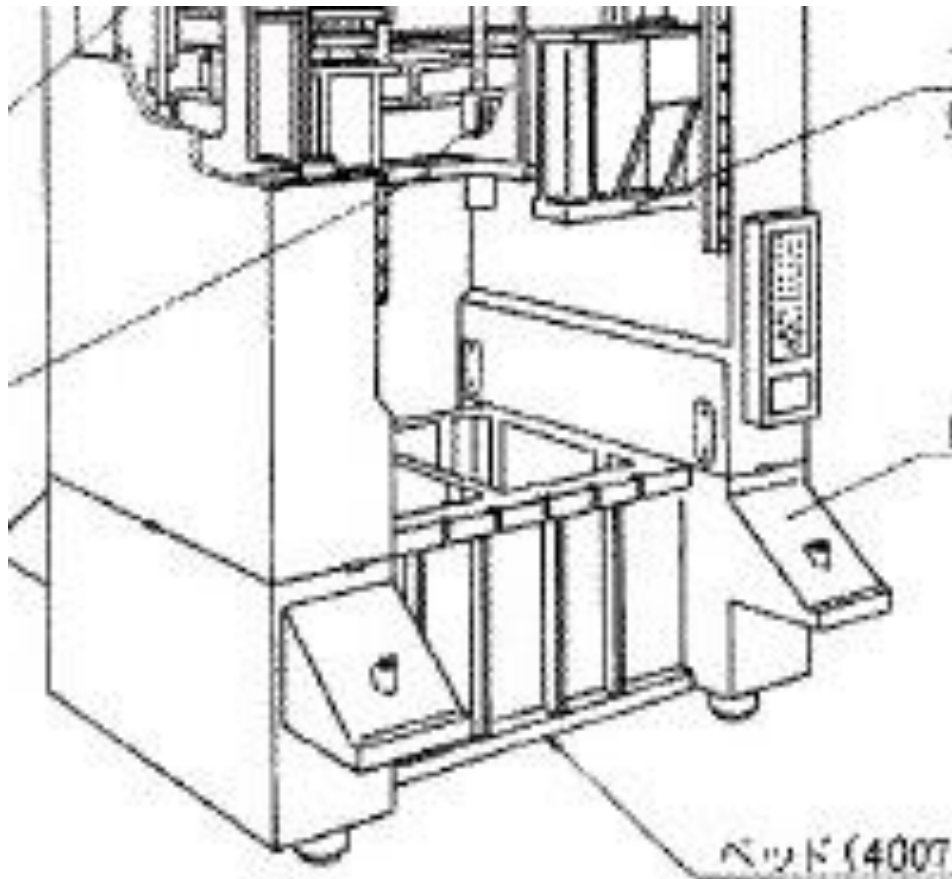
*¹¹Cフレーム構造： プレス機械の主要構成要素であるフレーム形態の一種。形状がC文字に似たフレームで、作業域の前と左右の三方が連続した空間をもつフレーム構造。下図参照。



Cフレーム構造プレス機の概略図

*¹²弾性変形： 物体に外力が作用すると、物体はなにがしかの変形が生ずる。外力を除去すると変形が完全に消滅し、物体が元の形に復する場合、これを弾性変形という。

*¹³ストレートサイドフレーム構造： ストレートサイドフレーム構造とは、プレス機械の主要構成要素であるフレーム形態がストレートサイド形で、プレス機のフレーム構造の一種。下図参照。



ストレートサイドフレーム構造プレス機の概略図

*¹⁴アルミナ： アルミニウムの酸化物。白色の粉末で、化学式は Al_2O_3 。セラミックス材料の一種で、Hv2,000 と高硬度で、研削材等によく利用される。別名、酸化アルミニウム。

*¹⁵ジルコニア： ジルコニウムの酸化物。白色の固体で、化学式は ZrO_2 。耐熱性セラミックス材料によく利用される。Hv1,200 と高硬度で、靱性が高く、耐摩耗性に優れている。

*¹⁶SEM： 走査型電子顕微鏡のことで、Scanning Electron Microscopeの略。光学式でないため、高倍率でも高深度で試料を観察することができる。

*¹⁷nm： 長さの単位。1 mの10億分の1。

参考文献

- 1) 吉田弘美： よくわかる金型のできるまで
- 2) 山口文雄： プレス順送金型の設計
- 3) 清家政一郎： 材料力学