

平成１９～２１年度戦略的基盤技術高度化支援事業
「燃料電池用金属セパレータのプレス加工技術の開発」

成果報告書

平成２２年３月

委託者 関東経済産業局

委託先 社団法人日本金属プレス工業協会

(目 次)

第1章 概要	1
1-1 研究開発の背景・目的及び目標	2
1-2 研究体制	2
1-3 成果概要	4
1-4 プロジェクト連絡窓口	8
第2章 本論	9
2-1 極薄板プレス加工製品の平坦度保持技術の開発	10
2-1-1 サーボプレスを利用した極薄板のプレス加工製品の平坦度保持技術の開発	10
2-1-2 溝付け加工用超精密金型技術の開発	21
2-2 低周波振動プレス加工技術の開発	27
2-3 金型技術開発課題への対応	36
2-3-1 センサー埋め込み金型の開発	36
2-3-2 センサーの探査	47
2-4 I T技術開発課題への対応	51
2-4-1 材料特性値の測定と測定値をベースとしたFEM 解析	51
2-4-2 最適プレス条件の特定	62
2-4-3 金型・プレスの一体化制御技術の開発	64
2-5 金属セパレータ量産技術の開発	67
2-5-1 順送型による量産技術の開発	67
2-5-2 FB型による量産技術の開発	73
2-5-3 3次元FEMシミュレーションによる金型開発の短期化	77
2-6 セパレータのインライン計測技術の開発	79
2-6-1 加工中の下死点補正	79
2-6-2 インプロセス・リアルタイム計測制御システムの開発	80
2-6-3 完成品形状のインライン計測システム	88
第3章 全体総括	91

第1章 概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

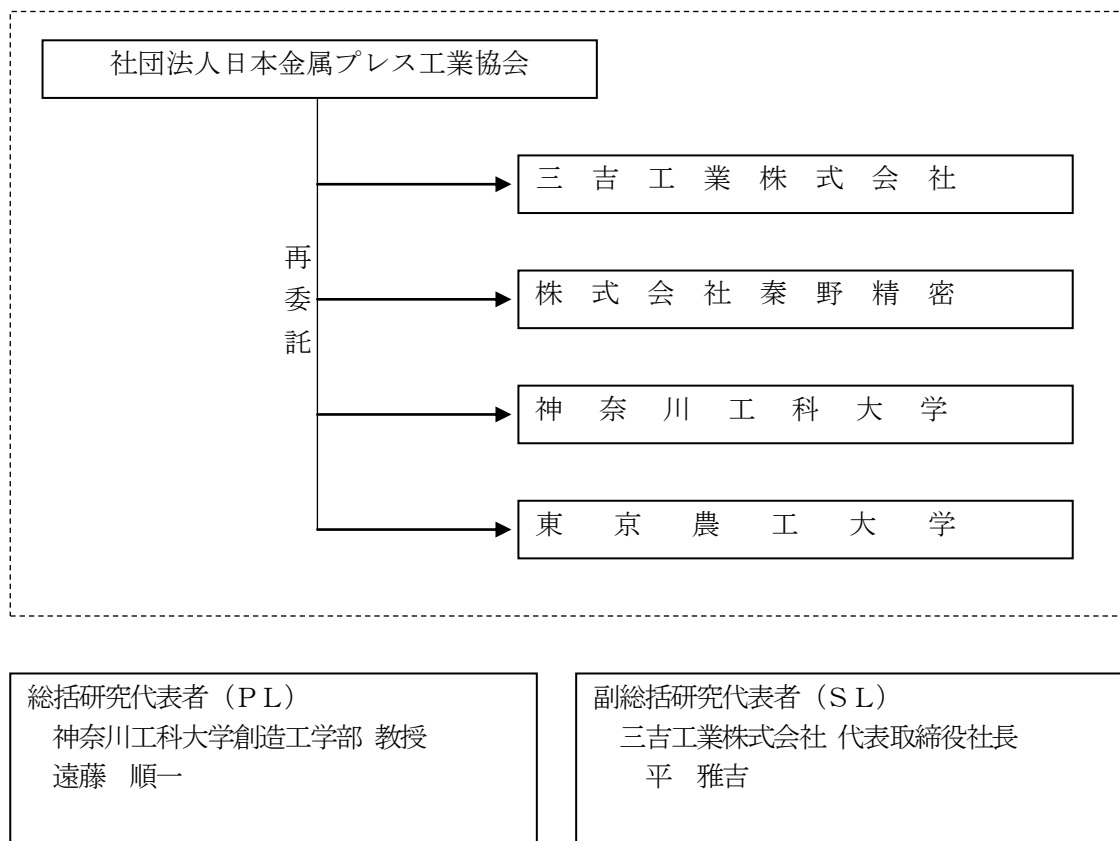
昨昨今の省エネルギーおよび環境負荷低減への要請から、早期の実用化・普及が期待されている燃料電池用の「低コスト」で「軽量」で大量生産が可能な金属セパレータ加工技術の開発を図る。

固体高分子形燃料電池を対象とする金属セパレータにおいて、現在のカーボン製セパレータにくらべ、重量比1/10程度でコスト面も圧倒的に低い金属セパレータ加工技術の実現を目指す。その実現に必要な極薄板を平坦度約5 μm で成形する技術、高速な生産スピードへの対応、難加工材への対応技術等の構築を行う。

固体高分子形燃料電池用の金属セパレータのプレス加工技術を開発し、現在のカーボン製セパレータのコストの約50分の1の実現を目指す。このため、極薄板プレス加工製品の平坦度保持技術の開発、低周波振動プレス加工技術の開発、センサー埋め込み金型技術の開発、金型・プレスの一体化制御技術の開発、加工製品のインプロセス計測技術の開発、極薄板の異方性の評価法とそれを用いたFEMシミュレーション援用技術、さらに量産のための金型技術、プレス技術の開発を行い、目標を達成する。

1-2 研究体制

(1) 全体相関図

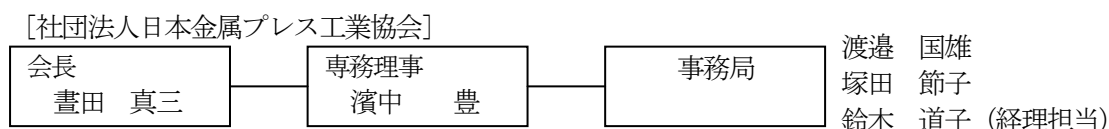


(2) 事業推進体制

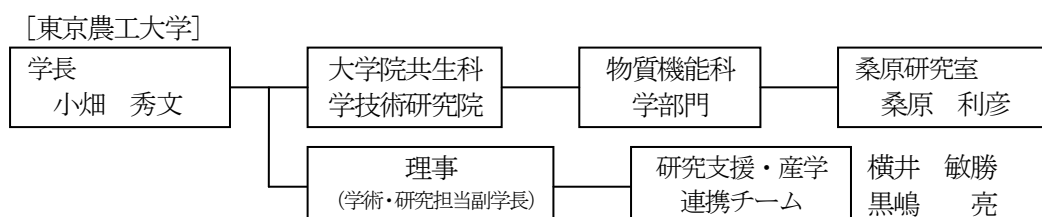
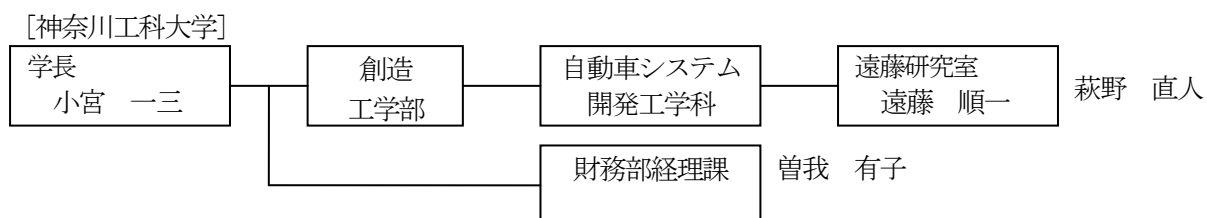
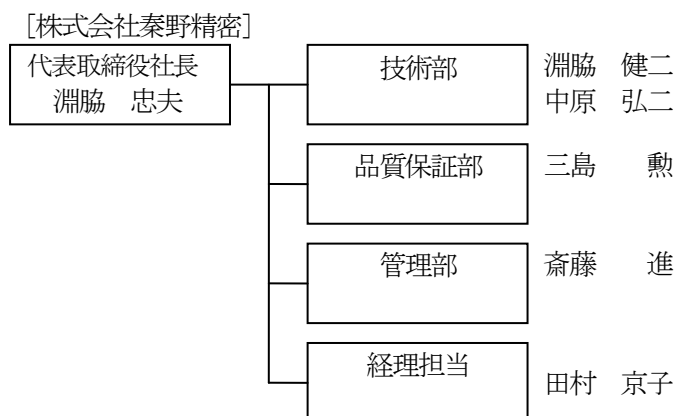
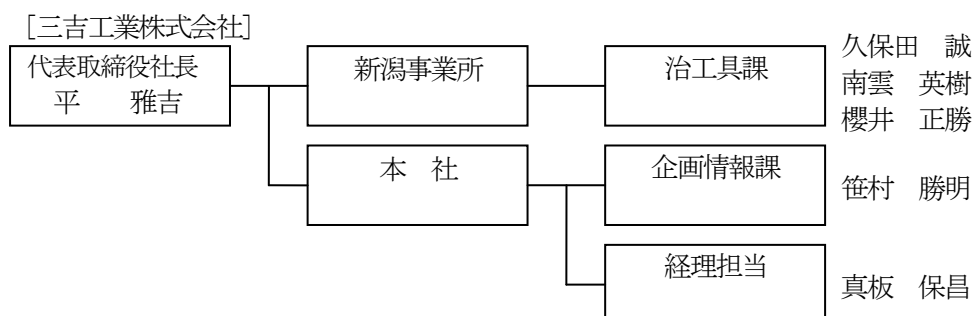
事業管理者主催による「燃料電池用金属セパレータ加工技術委員会」（遠藤順一委員長）を組織し、計4回の会合を開催して研究の経過と進行計画の確認を行った。なお、同委員会には再委託先の他に西村尚氏（東京都立大学名誉教授）及び小松勇氏（小松技術士事務所・技術士）が外部の有識者として参加した。

事業管理者及び再委託先それぞれの体制は次のとおり。

①事業管理者



②再委託先



1-3 成果概要

次世代のエネルギー源として燃料電池が注目され、経済産業省の「特定ものづくり基盤技術高度化指針」において、(三)金属プレスに係る技術に関する事項(3)燃料電池に係る事項及び(2)情報家電に係る事項で取上げられ、いずれにおいても「①川下製造業者の抱える課題及びニーズ」において「低コスト化」が取上げられている。

燃料電池の低コスト化に対し、従来用いられているカーボンセパレータでは、燃料である水素と酸素（あるいは空気）の流路の溝の加工に切削が用いられており、加工時間が長くなり、結果として加工コストが大きくなり対応が難しい。また、カーボンセパレータでは厚さを薄くすることが難しく、自動車用の燃料電池のように、数百枚のセルをスタックすると大きくなりすぎる欠点もある。そこで、材料を金属薄板にし、流路の溝をプレス加工により成形する方法が模索されている。金属材料開発はすでにNEDOにより行われ、一定の成果が得られているが、プレス加工については必ずしも満足な結果となっていない。その理由は、極薄肉の難加工性金属の板に、溝を成形するプレス加工が極めて難しいからである。

金属製セパレータの材料としては、耐食性から、ステンレス系とチタン系が有望とされ、NEDOにおける開発もこの二つの材料が取上げられてきた。どちらの材料も成形性が悪いことが知られている。また、板厚としては0.1mm～0.2mmが主流のようである。

以上のような情勢に鑑み、本研究開発においては以下に示す技術課題を取上げた。

(ア) 硬質ステンレス等の難加工材極薄板の成形技術の向上

すでに0.3mmのステンレス系材料に対し、要求精度を満たす金属セパレータのプレス成形を実現している。しかしながら、板厚が0.1mmでは、0.3mmに比べ曲げ剛性が1/30となり、成形後、セパレータにそりが生じやすくなる。

0.1mm～0.2mmの難加工性極薄板に対し、溝深さ精度 $\pm 5 \mu\text{m}$ のプレス成形技術の開発を目指す。

(イ) プレス機械及び金型技術の向上

従来、プレス加工においては、プレス機械と金型はそれぞれ別個の技術として取扱われていた。金属セパレータのプレス成形技術の開発においては、金型とサーボプレスを一体化した技術を開発し、金型の下死点位置決め精度を $1 \mu\text{m}$ となるよう技術開発を行う。

(ウ) ITを活用した生産技術の向上

金属セパレータのプレス加工による量産技術の開発に当たり、

- ・サーボプレスの制御・ソフト開発：金型に埋め込んだセンサーからの信号を基に、サーボプレスを制御する技術の開発
- ・FEMシミュレーション：材料特性を計測し、これを基にFEM解析を行い、効率的な成形条件の探索を目指す。
- ・インライン計測技術：プレス加工後の金属セパレータの全品計測を行うインライン計測技術の開発が必要である。

これらの技術目標に対し以下の具体的課題を設定し、研究開発を行った。なお、当初（申請時）予定していたチタン系極薄板は特注品であり、入手が困難であることが分かり、ステンレス極薄板（0.1mm）を対象とすることとした。実験材料を一括購入し、分担者に分けて、同じ材料で実験を行うことにより、実験誤差を少なくするなどの工夫を行っている。また、セパレータ溝形状についても標準形を統一し、プレス加工条件の違いが鮮明に現れるようにした。

実施計画とその成果の概要は次の通りである。

[1] 極薄板プレス加工製品の平坦度保持技術の開発

(i) サーボプレスを利用した極薄板のプレス加工（溝付け）製品の平坦度を保持する技術開発（実施：三吉工業（株）、神奈川工科大学）

アイダエンジニアリング（株）製 3000kN (300t) ダイレクトサーボフォーマーを三吉工業（株）新潟事業所に設置し、モデルセパレータ金型を用い、プレス荷重を下死点において 2500kN (250t) で一定となるようにし、保持時間が平坦度に及ぼす影響を調べた。即ち、サーボプレスのスライドモーションを通常の機械プレスと一致させた場合（クランクの運動に伴う、いわゆる正弦曲線を描く）と保持時間を変えた場合と比較した。その結果、サーボプレスの下死点を保持した場合には、溝がより深く形成され（平均で 15 μm ）、かつ溝深さのばらつきは 4 μm におさまり、5 μm という加工目標をクリアすることができた。

一方、神奈川工科大学は、溝断面形状は三吉工業と同じとし、幅、長さを小さくしたモデルセパレータ金型を用い、放電精密加工研究所製 200t サーボプレスを用いて実験を行った。除荷後のスプリングバックを考慮し、溝斜面の角度を 30 度とした金型と、さらに深さを 20 μm 深くした金型を製作し、標準の 45 度の金型での結果と比較した。その結果、角度は 30 度とし、より深くした金型を用いるほうが、成形された溝の頭頂部の長さが長くなることがわかり、金型設計の指針をえることができた。

(ii) 溝付け加工用の超精密金型技術の開発（実施：三吉工業（株）、（株）秦野精密）

金属セパレータのモデル金型形状を決定し、それぞれの分担者が超精密金型を製作し、プレス加工実験を行った。モデル金型は溝深さ 0.3mm、溝ピッチ 3mm、斜面の角度 45° を標準とし、斜面の角度をより小さくした金型を製作し、スプリングバック角を測定した。

これらの技術データは「IT 技術開発課題への対応」における FEM 解析結果と比較し、トライアンドエラーによらない金型設計方法とすることができる。なお切削工具は極細のものを利用し、両分担者共に溝の加工条件を見出すことができ、超精密金型の製造技術が開発できた。さらに溝がストレートではなくうねりを伴う波形形状の金型も製作することができた。

[2] 低周波振動プレス加工技術の開発（実施：三吉工業（株）、神奈川工科大）

サーボプレスのソフトウェア開発を行い、低周波振動をプレス加工に重畳する低周波振動プレス加工の加工特性の把握を行った。

低周波振動プレス加工において、プレス加工パラメータ、振動数、振幅を変えて実験を行い、低周波振動を加えない場合と比較した。三吉工業は下死点において、低周波振動を与える場合と、低周波振動を重畳しながら下死点までスライドを下降させた実験を行い、クランクモーション（通常のプレスの動き）による結果と比較した。

その結果、クランクモーションによるよりも、溝深さはいずれのモーションにおいても、5 μm 程度深くなり、低周波振動の効果が認められた。神奈川工科大は前述の小型モデル金型を用い、下死点において低周波振動を加える実験を行った。その結果、斜面の角度を小さくし、溝を深くした金型を用い、振幅と打数をふやした方が、溝頭頂部の平坦部長さが増加していることがわかった。これは、低周波振動におけるハンマリング効果により、溝の隅に材料がより充填していくためであると考えられた。これらの実験結果から低周波振動プレス加工における加工特性が把握できた。

[3] 金型技術開発課題への対応

(i) センサー埋め込み金型の開発（実施：（株）秦野精密、神奈川工科大）

プレス成形中の材料のひずみを制御した高度な加工を行うため、センサー埋め込み金型を開発した。神奈川工科大学では、まず、センサー探査を行い、その結果をうけ、超音波プローブを金型に埋め込んだ。埋め込みは前述の小型モデル金型とし、放電精密加工研究所製のサーボプレスを借用し、実験を行った。

基礎的な検討を加えるため、別に小型の実験装置も作製した。即ち、金型に斜面がある場合について、斜面での超音波の透過と反射を、V金型を作製して実験を行った。その結果、斜面においては入力角度と反射角度は同じになることがわかり、斜面での反射法の利用に当っては注意が必要であることを見出した。一方、透過法をもちえば斜面は無関係に測定が可能であるが、斜面に空気層がないようにしないと十分な透過強度がえられない。

超音波プローブを埋め込んだ金型で行った実験では、得られた測定波形において、低周波振動がみごとにあらわれており、超音波プローブを埋め込むことにより、金型内部への材料の充填状況が把握できることが確かめられた。これらの結果の一部が日刊工業新聞でも紹介された。また、中間評価を受けた際にも高く評価され、平成22年度には(社)日本塑性加工学会において、金型内部の材料挙動の可視化の研究委員会が発足する契機を与えた。日本のプレス加工技術の新たな展開が見込めることで注目を集めている。

一方、秦野精密は金型の四隅に渦電流式変位センサーを取り付け、加工中の金型の傾きやたわみを測定することに成功した。この測定結果を元に、プレス挙動の検証と金型およびプレス機械のたわみを補正することができる。

(ii) センサーの探査 (実施：神奈川工科大)

プレス加工において、曲げ、コイニング等の底突き加工を行うとプレス機械自体が変形(タワミ)を生ずるために、製品端部は強く中央部は弱く当る。そのために製品の中央部における寸法がでない。金型の端部は上金型と下金型の隙間が設計値と同一になるが、中央部は設計値よりも隙間が大きくなる。従来は、熟練技能者が経験と感覚で金型の補正を行っていた。今回の研究では、金型中央部に、隙間を計測するセンサーを配置することにより、金型補正を定量的に決定できるようにすることを目的とした。

渦電流センサー、レーザー変位計、超音波探傷計を選択候補に挙げたが、調査をしたところ、渦電流センサー、レーザー変位計は金型中央部での隙間測定ができないことが判明し、超音波探傷計を採用することとした。

[4] IT技術課題への対応

(i) 材料特性値の測定と測定値をベースとしたFEM解析 (実施：東京農工大)

0.1、0.2mmのステンレス極薄板の材料特性値を詳細に調べた。これをベースにFEM解析を行った。材料特性値を詳細に調べた結果、これらの材料は引張りと圧縮では応力～ひずみ線図が同じではなく、いわゆるバウシinger効果があることが認められた。このような極薄板においてバウシinger効果が認められたのは評価に値する。異方性も認められ、2軸材料試験から、異方性降伏関数としては、次数が4または6のY1d2000-2dが最も材料特性をよく表現できることが分かった。FEMの解析結果は等法性を仮定した計算結果よりも異方性降伏関数を用いた結果の方が実験結果により近いことが明らかになり、材料特性を考慮したFEM解析が必要であることが示された。

(ii) 最適プレス加工条件の特定 (実施：東京農工大)

FEM解析を行い、最適プレス条件を特定することを目標とした。実験結果を踏まえ、斜面の角度を零とし、金型頭頂の隅部の角半径を変えてFEM解析を行い、スプリングバックを調べ、実験と比較し、定量的にも一致していることを見出した。角半径Rを小さくすることで、スプリングバックを抑制する可能性が高いことを明らかにした。

(iii) 金型・プレス一体化制御技術の開発 (実施：神奈川工科大)

[3](i)で開発したセンサー埋め込み金型からの信号をサーボプレスのNCと結合し、金型とプレスを一体として加工制御を行うことを目的としている。計測制御システムの開発を行った。即ち、測定結果の信号を取り出し、これをプレスのNCにつなぐことができるシステムを構築した。開発した計測・制御システムは汎用性をもたしているため、システムとして外販も可能である。

[5] 金属セパレータ量産技術の開発 (実施：三吉工業(株)、(株)秦野精密)

セパレータを量産するための技術開発を行った。三吉工業はサーボプレスを用いた量産体制をとるために、順送金型を検討した。極薄難加工材料のプレス加工技術に向け、超精密ワイヤ放電加工機により高精度なピッチ精

度、抜き精度の金型製作技術、サーボプレスを使用した高精度なプレス加工技術を統合して順送型を設計・製作してプレス加工実験を行った。さらに、金属セパレータにおいて、酸素と水素のガス流路を直交させたいという川下燃料電池メーカーの要求があり、これは極薄板金属セパレータでは対処できない。この要求には、現在、ダイキャストが対応しているが、ダイキャストの代わりに、板鍛造を用いることを提案し、順送型を設計・製造しセパレータを生産した。すでに一部製品をメーカーに納品し、テストを行っている。

一方、秦野精密はファインブランキングプレスを使用しているため、順送型は使用できない。そこで、FB用のセパレータ量産金型を設計・製作し、通常は5mm以上の板を加工するファインブランキングプレスに、0.1mmのSUS304素材を投入し、加工条件を変化させて加工し、溝形状の寸法を評価した。その結果、素材拘束力、加圧速度、加圧保持時間の条件変化に対しての溝形状への変化は認められず、また、溝形状寸法は、金型形状に対してのスプリングバックは認められるものの安定していることがわかり、量産が可能であるとの結論をえた。

[6] セパレータのインライン計測技術の開発（実施：神奈川工科大、三吉工業株）

量産したセパレータはその品質保証を行う必要があり、そのためには

- (1)加工中のプレス加工データを利用する、
- (2)加工後の製品形状を測定する

必要がある。

(1)については研究[3]と[4](iii)の成果を利用できる。さらに、購入したアイダ製サーボプレスはクランクタイプであるため、下死点位置は幾何学的条件（機構）で定まってしまうので制御ができない。そこで、実際の下死点位置よりも少し上方に仮想下死点をソフトウェア上で定め、スライドの位置情報を利用して、スライドの下死点位置を制御することを試み、成功した。このデータも(1)に用いることができる。

研究[3](i)の成果である超音波を用いて、金型と試験片の接触状態を調べるためのルーチンを組み込み、リアルタイム性の確保した計測制御用のソフトウェアを作成した。プログラムの開発では特に操作の単純化に留意をした。

(2)については神奈川工科大学が研究[1][2]において使用したレーザー変位計を用いた形状測定器の原理を応用した。燃料電池用セパレータ溝の形状精度はマイクロメータ・オーダーの精度が要求される。しかしながらその形状はピッチが数mm、深さが0.3~0.5mm程度であり、接触式の形状計測器での計測は困難である。レーザーによる計測に要する時間は、これまでは、センサーの調整等を含めると1枚につき60~90分程度ときわめて長時間であり、生産ラインにおけるインライン形状計測には適していない。そこで、高速・高精度レーザー変位計を2台用いるシステムを構築し、全ての操作を計測制御用コンピュータおよび、コンピュータに接続した汎用コントローラから行えるようにした。さらに、形状計測開始と同時にテーブルの動作を同期させ、自動計測できるように計測プログラムを作成した。計測されたデータはデータレコーダを経由し、コンピュータに保存した。計測装置と作成したインライン形状計測プログラムを用いて、モデルセパレータの計測を行った。セパレータの形状計測は約40秒で終了した。インラインでの抜き取り検査で用いるには十分な速度を確保できたことになる。また、溝深さの算出に特殊な作業を必要せず、計測終了後、速やかに算出できるようになった。

具体的な研究開発成果については後述（第2章）するが、全体として、研究開発は順調にすすみ、当初の目的を達成することができた。

本研究開発課題に対して、参加企業、大学で共同研究を行うに当たり、参加企業・大学メンバーに学識経験者、川下企業技術者を加えた「燃料電池用金属セパレータ加工技術委員会」を組織し、参加メンバー間の意思の疎通を図るとともに、学識経験者や川下企業技術者の意見を取り入れた。この委員会は、毎年度4回程度行い、研究の進捗状況を報告し、併せて意見を交換し、すり合わせを行うなど、研究開発における運営に齟齬をきたさぬよう留意した。研究開発が順調に進み、目的を達成することができたのも、このような運営上の方策が機能したものと考えられる。

1-4 プロジェクト連絡窓口

【所在地】東京都港区芝公園3丁目5番8号 機械振興会館212

【名称】社団法人日本金属プレス工業協会

【代表者】会長 晝田 眞三

【管理者】専務理事 濱中 豊

【連絡先】TEL：03-3433-3730

FAX：03-3433-7505

E-mail：jmsa@nikkin.or.jp

第2章 本論

2-1 極薄板プレス加工製品の平坦度保持技術の開発

2-1-1 サーボプレスを利用した極薄板のプレス加工製品の平坦度保持技術の開発

三吉工業株式会社及び神奈川工科大学が研究を実施した。

[三吉工業株式会社]

(1) 目的・目標

三吉工(株)新潟事業所に設置したアイダエンジニアリング(株)製サーボプレス「3000kN ダイレクトサーボフォーマ(NS1-3000(D))」(図 2.1.1)を使用し、下死点停止時間を変化させ、モデルセパレータに関する平坦度(溝高さ精度)、平面度(ソリ)の加工特性を探索する。

金属セパレータのパラメータ名称は図 2.1.2 のとおりとする。

(2) 研究方法

(a) 人員

久保田 誠：技師長

南雲 英樹：リーダー

桜井 正勝：サブリーダー

(b) 加工条件

金型はFCS0711 金属セパレータモデル金型を使用し、パンチ形状は表 2.1.1 のとおりA=0°とした。

材料は今年度の研究課題の極薄板ステンレス板 0.1mm を使用し、プレス荷重は下死点において 2500 kN で設定し、下死点停止時間での条件変化による実験を行った。

プ レ ス 仕 様		
型 式	NS1-3000(D)	
形 式	マルチモーション1点プレス	
加 圧 力	3000	kN
能 力 負 生 立 置	6	mm
ス ト ロ ッ ク 長 さ	300	mm
作 業 エ ネ ルギ	30000	J
無負荷連続ストローク数	~30	spm
ダ イ ハ イ ト	450	mm
ス ラ イ ド 調 節 量	120	mm
スライド寸法：L・R×F・B	1300×900	mm
ボルスタ寸法：L・R×F・B	1700×1200	mm
ボ ル ス タ 厚 さ	250	mm
床 上 ボ ル ス タ 上 面 高 さ	1026	mm
最 大 上 型 最 大 負 荷	1300	kg
メ イ ン モ ー タ	サーボモータ(アイダ製)	
	連続定格出力 50	kW
供 給 空 気 圧	0.5	MPa
周 囲 温 度	5~40	℃
総 負 荷	約 41	t

図 2.1.1 3000kN ダイレクトサーボフォーマ

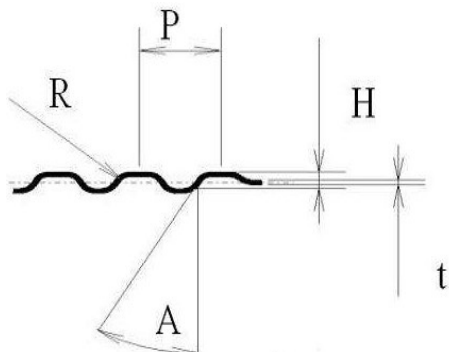


図 2.1.2 金属セパレータのパラメータ名称



図 2.1.3 FCS-0711 金属セパレータモデル金型

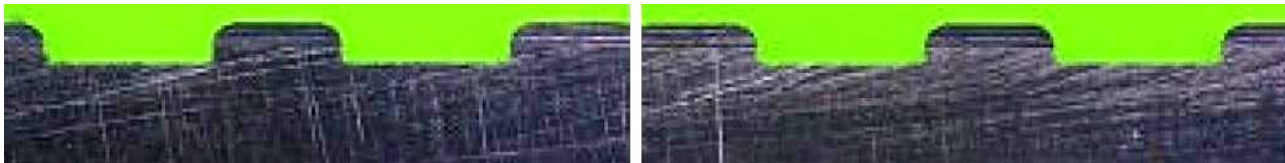


図 2.1.4 発電部パンチ側面写真

(測定器：測定顕微鏡（ニコン製 MM800/L） 対物レンズ×3 使用

表 2.1.1 パンチ測定データ

パンチ	t	P	H	A	R (内R)	山部幅	谷部幅
規格値		3.000	0.400	0.00	0.200	1.300	1.700
実測値 1		2.999	0.401		0.198	1.301	1.698
実測値 2		3.000	0.400		0.195	1.303	1.697
実測値 3		2.999	0.400		0.193	1.303	1.696

(c)測定方法

加工特性を探索するため、金属セパレータの機能上における重要部分を以下の方法で測定し、評価を行った。

①平坦度（溝高さ精度）

発電部における溝高さの差が重要なことから、図 2.1.5 に示すポイント 1～5 についてマイクロメータを使用して測定を行った。

②平面度（ソリ）

金属セパレータが電解膜を押さえる際、図 2.1.6 に示すソリ量が重要なことから、ハイトゲージを使用して測定を行った。

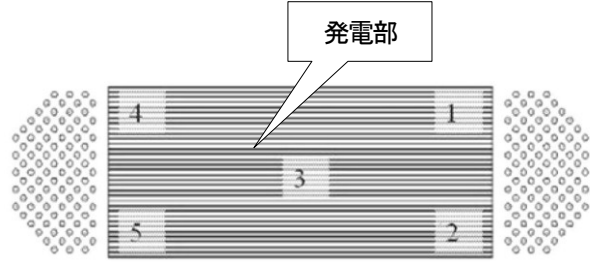


図 2.1.5 溝高さ測定ポイント

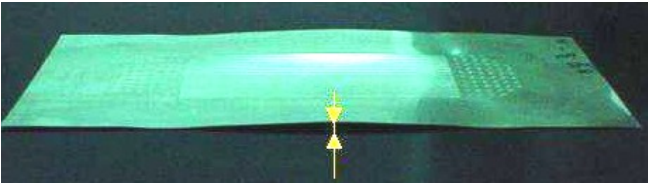


図 2.1.6 ソリ寸法測定

(3)研究成果

下死点における停止保持時間が 0.5 秒・1.0 秒・2.0 秒・5.0 秒の stop-(bend) モーションで実験を行った。

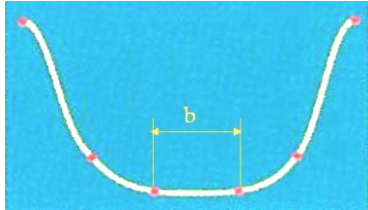


図 2.1.7 stop-(bend) モーション

①平坦度（溝高さ精度）測定結果

stop-bend/クランク 比較

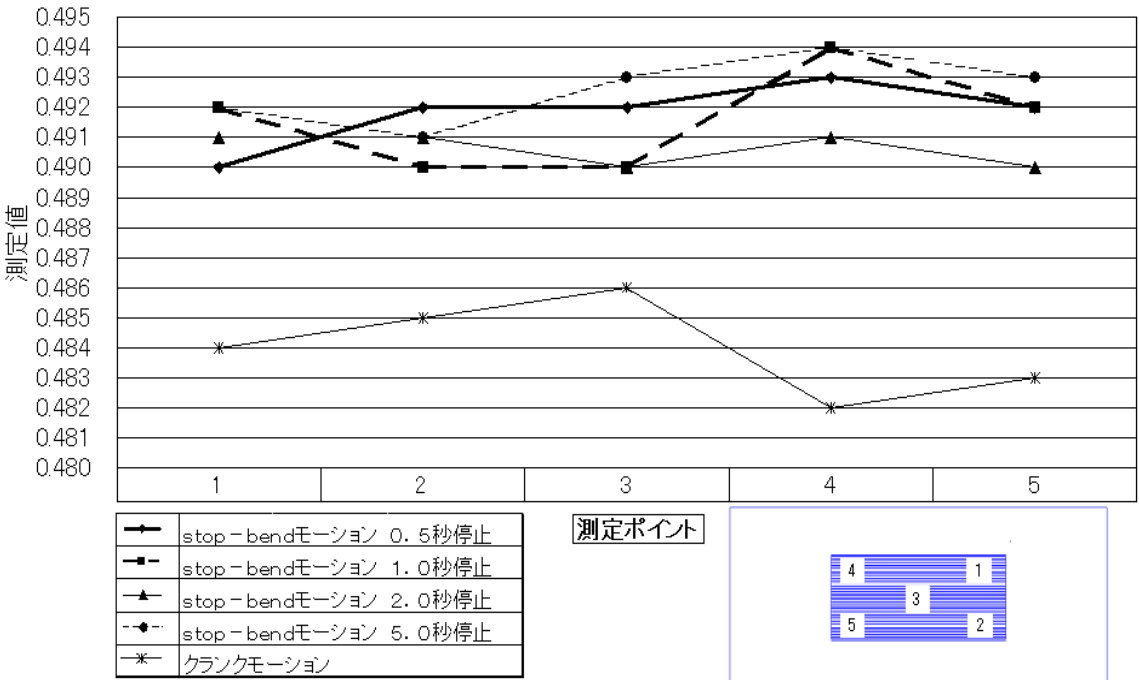
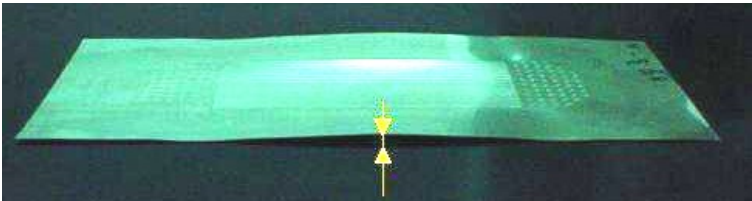


図 2.1.8 平坦度測定値

②平面度（ソリ）測定結果

表 2.1.2 平面度 測定値

停止保持時間	ソリ寸法
0. 5 秒	3. 6 mm
1. 0 秒	3. 4 mm
2. 0 秒	3. 4 mm
5. 0 秒	3. 5 mm



【結論】

通常の加工モーションであるクランクモーションと比較をすると、スプリングバックが減少したと思われることから、溝高さは高くなり、また、溝高さの差においても均一化が図られることが観察できた。

平坦度の均一性は、停止時間 2.0 秒が 1.0 μ と最も効果があると考えられる。

ソリにおいては、停止時間でのソリ量の大きな差はみられなかった。

[神奈川工科大学]

(1) 目的・目標

前年度の研究結果より、下死点停止時間を長くすると平坦度が改善されること、低周波振動を加えることにより平坦度を保持できることがわかっている。

そこで、本年度は、金型の設計指針を得るために溝斜面角度を標準型の 45° および 30° とした金型を製作し、板厚 0.2mm および 0.1mm のモデルセパレータの加工実験を行った。また、これらの金型を用いたとき、溝深さの分布に対する加工モーションの影響を調べた。

(2) 研究方法

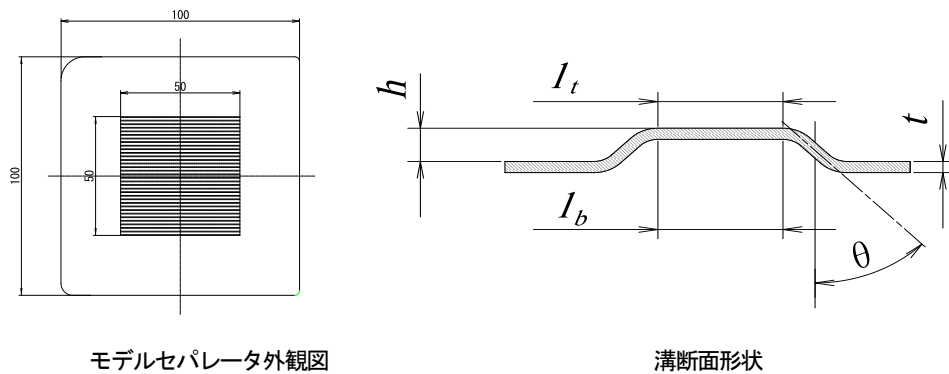
(a) 人員

遠藤 順一：教授／研究総括代表者

萩野 直人：ポストドクター研究員

(b) 試験片および使用金型

図 2.1.9 に加工後の試験片形状を示す。試験片は、板厚 $t=0.2\text{mm}$ および 0.1mm のステンレス SUS304 薄板を使用した。下記の金型を使用した。ここで、図中に示す h は溝深さ、 l_t は頭頂平坦部長さ、 l_b は溝底平坦部長さである。



モデルセパレータ外観図

溝断面形状

図 2.1.9 モデルセパレータ

セパレータ加工には、図 2.1.10 のセンサー埋め込み金型を使用。断面は図 2.1.11 に示す形状であり、各寸法は表 2.1.3 および表 2.1.4 の通り。溝斜面の角度 $\theta=45^\circ$ を標準型とし、スプリングバックを考慮して角度 $\theta=30^\circ$ とした型、更に溝深さを 0.2mm 深くした型の 3 パターンで加工実験を行った。

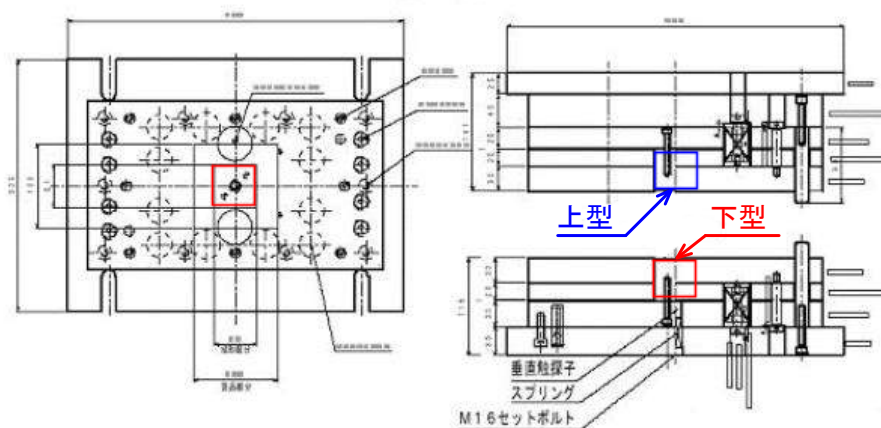


図 2.1.10 センサー埋め込み金型

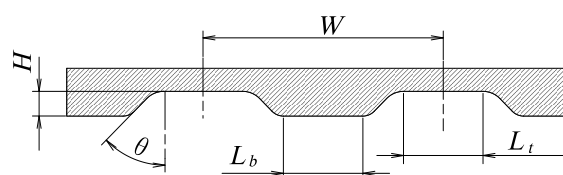


図 2.1.11 金型形状

表 2.1.3 0.2mm セパレータ用金型

金型名	溝深さ H /mm	溝斜面角度 θ / °	ピッチ W /mm	平坦部長さ	
				頭頂部 L_t /mm	溝底部 L_b /mm
0.2mm-A	0.318	45	3.0	0.950	0.853
0.2mm-B	0.318	30	4.5	1.584	1.972
0.2mm-C	0.491	30	6.0	2.192	2.694

表 2.1.4 0.1mm セパレータ用金型

金型名	溝深さ H /mm	溝斜面角度 θ / °	ピッチ W /mm	平坦部長さ	
				頭頂部 L_t /mm	溝底部 L_b /mm
0.1mm-A	0.316	45	3.0	0.936	0.893
0.1mm-B	0.317	30	3.0	0.943	0.945
0.1mm-C	0.518	30	3.0	0.913	0.924

(c) サーボプレス

プレス加工実験には株式会社放電精密加工研究所加工開発センターに設置されているサーボプレス(MPS8300DS)を借用し、プレス加工実験を行った。サーボプレスの外観を図 2.1.12 に示す。このサーボプレスは、図 2.1.13 に示すようにダブルスライド構造となっており、インナ・アウトのプレスモーションおよびストローク量を独立して設定することが可能である。このインナスライドはφ250 の円筒形であり、インナ・アウトともに最大で4回のプレスが可能である。このサーボプレスのおもな仕様を表 2.1.5 に示す。



図 2.1.12 3000kN サーボプレス (MPS8300DS)

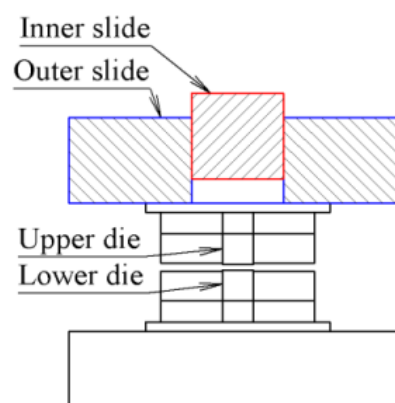


図 2.1.13 ダブルスライド構造

表 2.1.5 サーボプレス仕様 (MPS8300DS)

加圧能力, F /kN		ストローク長さ, S /mm	
インナ	アウト	インナ	アウト
2000	1000	150	150

(d) 計測装置

サーボプレスを用いて加工した試験片の表面形状を図 2.1.14 に示す計測システムを用いて計測を行った。形状の計測には、レーザー変位計を用い、非接触で行った。従来、図 2.1.14 中のステージのコントローラはそれぞれ独立しており、その操作は手動で行っていた。また、形状計測開始と Y 方向のテーブルの動作が同期しておらず、計測精度上の問題があった。そこで、図 2.1.14 に示すようにテーブルのコントロールを、計測制御用コンピュータに接続した汎用コントローラを用いて行うようにした。さらに、形状計測開始と Y 方向のテーブルの動作を同期させ自動計測できるように計測プログラムを作成した。その形状計測用プログラムの実行画面を図 2.1.8 に示す。計測されたデータはデータレコーダを経由し、コンピュータに保存した。レーザー変位計とデータレコーダの仕様を以下に示す。

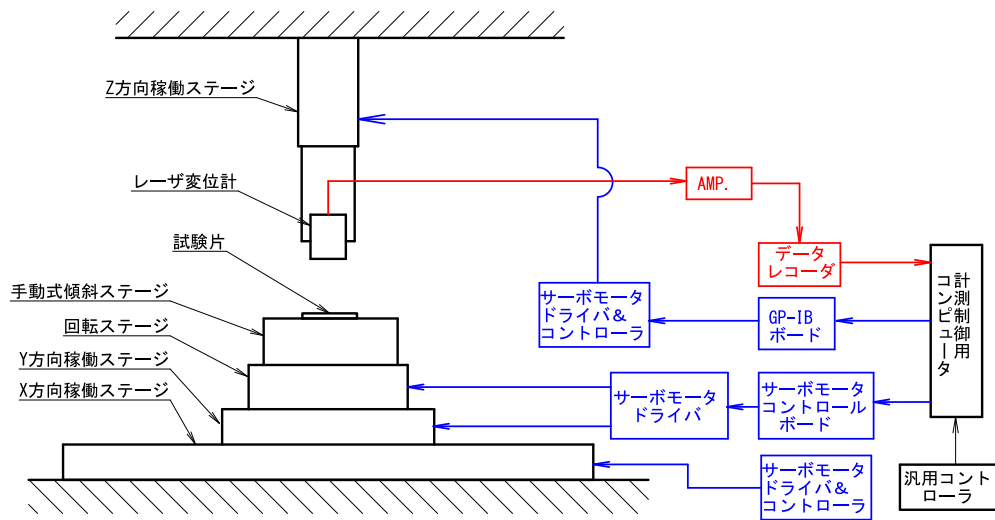


図 2.1.14 形状計測システム

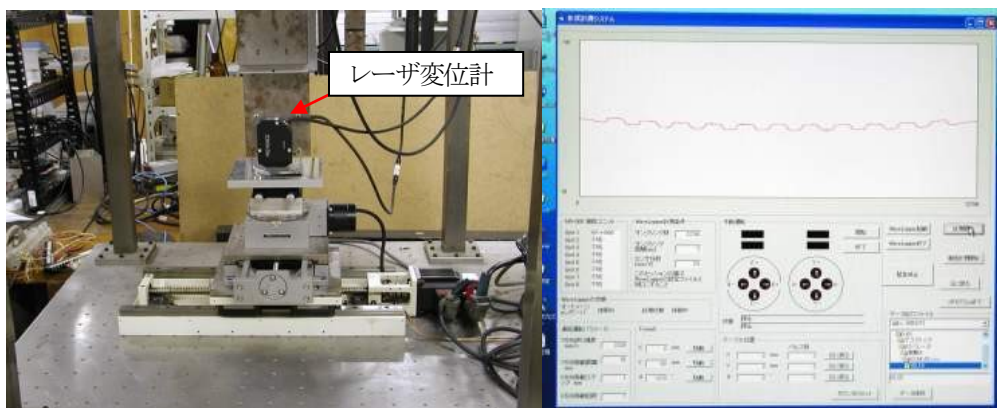


図 2.1.15 形状計測システム外観図

図 2.1.16 形状計測用プログラム

レーザー変位計
(株)キーエンス
LK-G30 (センサーヘッド)
LK-GD500 (アンプ)
基準距離 30mm
計測範囲 $\pm 5\text{mm}$
最小計測単位 $0.01\ \mu\text{m}$

データレコーダ
(株)キーエンス
NR-HA08 高速アナログ計測ユニット
測定周期 $1\ \mu\text{s} \sim 60\text{s}$
AD 分解能 14bit

(e) 実験条件

図 2.1.17 に示すインナスライドのモーションで加工を行った。

加工パラメータは加工打数と振幅とし、表 2.1.6 に示す条件で行った。ここで、表 2.1.6 に示す加工打数 1 は図 2.1.17(a) のノーマルモーションに相当する。

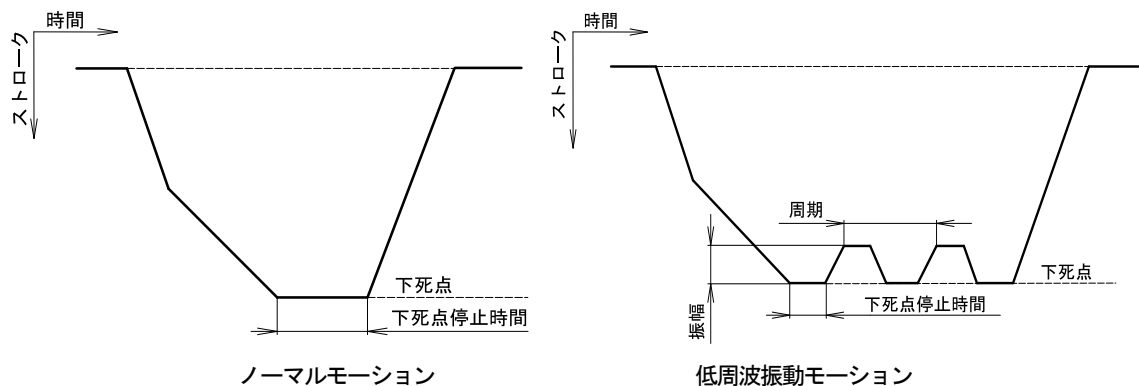


図 2.1.17 加工モーション

表 2.1.6 実験条件（加工速度 5mm/s）

振動周期 T / s	下死点停止時間 t_b / s	振幅 a / mm	加工打数 N			
			1	2	3	4
2.0	1.0	0.1	I	II	III	IV
		0.2	—	—	—	V
		0.3	—	—	—	VI

(3) 研究成果

(a) 0.2mm セパレータ加工実験

板厚 $t=0.2mm$ の試験片において、表 2.1.3 に示す金型を用いて加工実験を行った。

下死点停止時間を $t_b = 1s$ とし、インナスライドのモーションはノーマルモーション、つまり加工打数 1 とした。また、0.2mm-B および 0.2mm-C の場合は上型の裏面に厚さ 0.2mm のシムを挿入している。加工後の試験片の一例を図 2.1.18 に示す。溝が図の横方向に形成される。このとき上型に接触する面を上にして、図中の赤矢印の方向に表面形状の計測を行った。

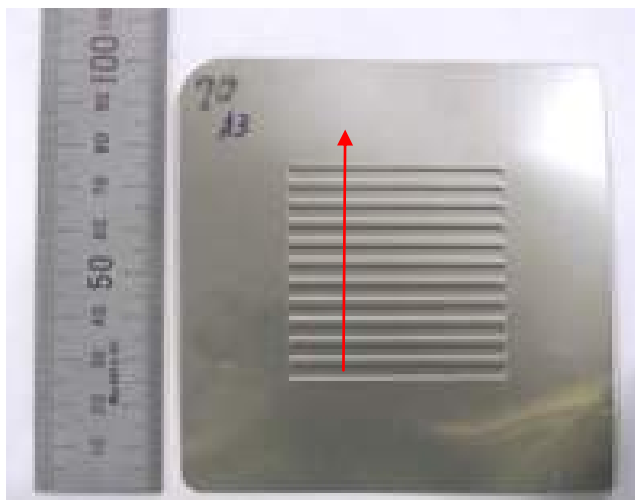


図 2.1.18 加工後の 0.2mm モデルセパレータ

図 2.1.19 には図 2.1.18 中の横方向中央断面における加工後の試験片形状と上型の形状を示す。図中の斜線部分が金型と試験片間に生じる隙間である。金型と製品の間に生じる隙間は、主に角部に生じる。0.2mm-A の金型では、溝の頭頂部に平坦部が十分に成形されておらず、隙間が大きい。図 2.1.11 における溝斜面の角度 θ が小さい、すなわち溝斜面の勾配が大きくなると、溝の頭頂部の平坦となる部分の長さが長くなる。また、溝深さが深くなると、隙間の大きさが小さくなるが分かった。ここで図中の中抜き矢印に示すように、切り欠いた様な形状が見られる箇所があった。金型の側面を顕微鏡で観察したところ、このような形状は見られず、レーザー光の乱反射によるノイズと考えられる。

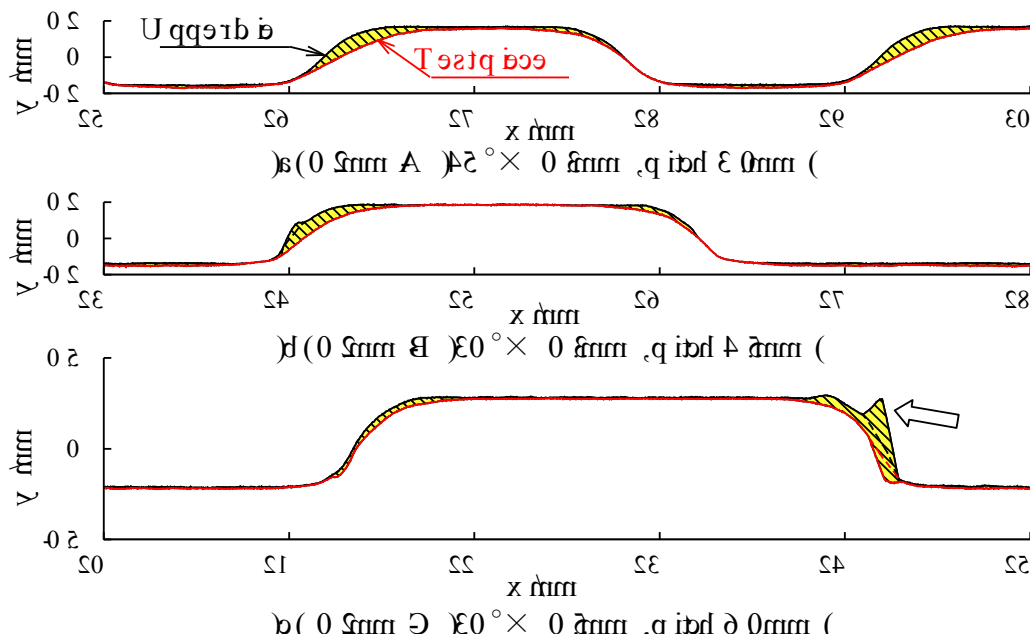


図 2.1.19 0.2mm セパレータと上型の表面形状 (加工打数 1)

溝形状を調べるために、平坦部を抽出し、その値を元に溝深さ平坦部長さを算出した。まず、図 2.2.20 に示すように、試験片の表面形状の勾配 (dy/dx) を中心差分により求めた。次に、その勾配の絶対値が 0.05 以下の部分を抜き出すと図中の赤プロットの様になる。この抽出された部分を平坦部とし、頭頂平坦部長さ l_t と溝底平坦部長さ l_b を図のように求めた。また、頭頂部・溝底部それぞれにおける y 方向位置の平均を求めその差を試験片の溝深さ h とした。

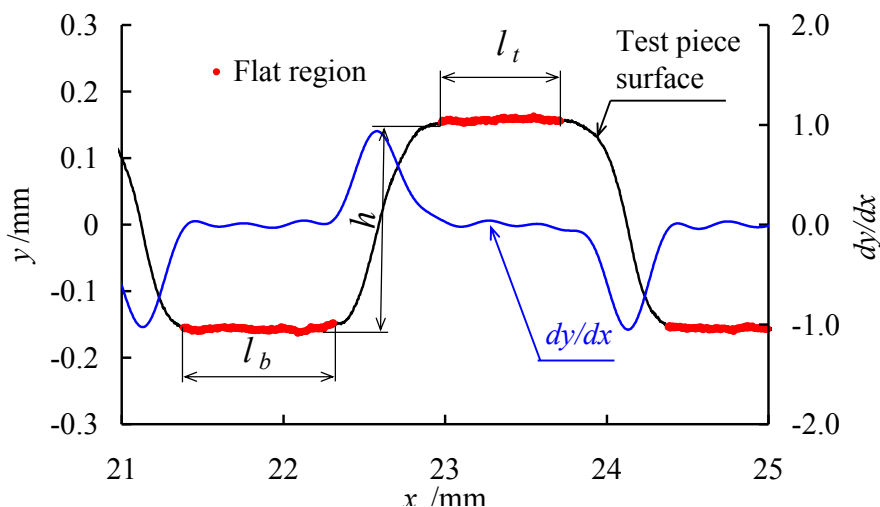


図 2.1.20 溝平坦部と各部長さの定義

溝深さは、金型により鉛直方向の変形が拘束される。そのため、図 2.1.19 に示すように角部に隙間が生じ

ている場合でも、試験片の溝深さは金型の寸法とほとんど同一となる。一方、試験片の頭頂平坦部が形成され、その長さが長くなると、角部に材料が充填していることが分かる。そこで、下式のように金型と試験片の頭頂平坦部長さの比を求め、溝頭頂部における材料の充填率とした。

$$R_t = \frac{l_t}{L_t} \dots\dots\dots (式 2.1.1)$$

ここで、 R_t は溝頭頂部における充填率、 l_t は試験片頭頂平坦部長さ、 L_t は金型の頭頂平坦部長さである。図 2.1.21 には、0.2mm セパレータの充填率に対する金型の形状の影響を示す。ただし、この充填率は、試験片の中央部における値である。金型の溝斜面の勾配が大きくなると、充填率が増加する。また、金型の溝が深くなると、隙間が小さくなり充填率が増加する。これは、金型の溝斜面勾配を大きくし溝を深くすると、試験片の曲げ変形が増大し、試験片の頭頂部が金型の平坦部に早く接触するためであると考えられる。

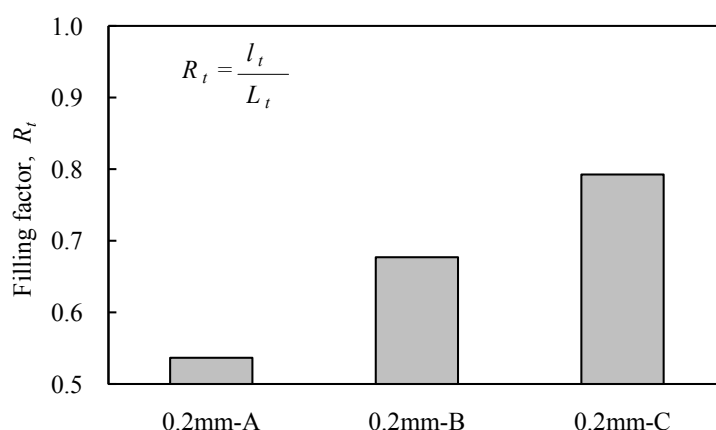


図 2.1.21 充填率に対する金型形状の影響（板厚 $t = 0.2\text{mm}$ ，加工打数 $N = 1$ ）

(b) 0.1mm セパレータ加工実験

次に、板厚 $t = 0.1\text{mm}$ の試験片において、表 2.1.4 に示す金型を用いて加工実験を行った。

加工後の製品の一例を図 2.1.22 に示す。薄肉化したことにより、角部での割れや破断が心配されたが、いずれの金型・加工条件においても破断などはみられなかった。



図 2.1.22 加工後の 0.1mm モデルセパレータ

0.2mm セパレータと同様に、試験片の中央断面形状を、形状計測システムを用いて計測を行った。その結果を図 2.1.23 に示す。ただし、金型は 0.1mm-B である。0.2mm セパレータに比べ、平坦部が形成されており、金型と製品間に生じる隙間が減少しているのがわかる。

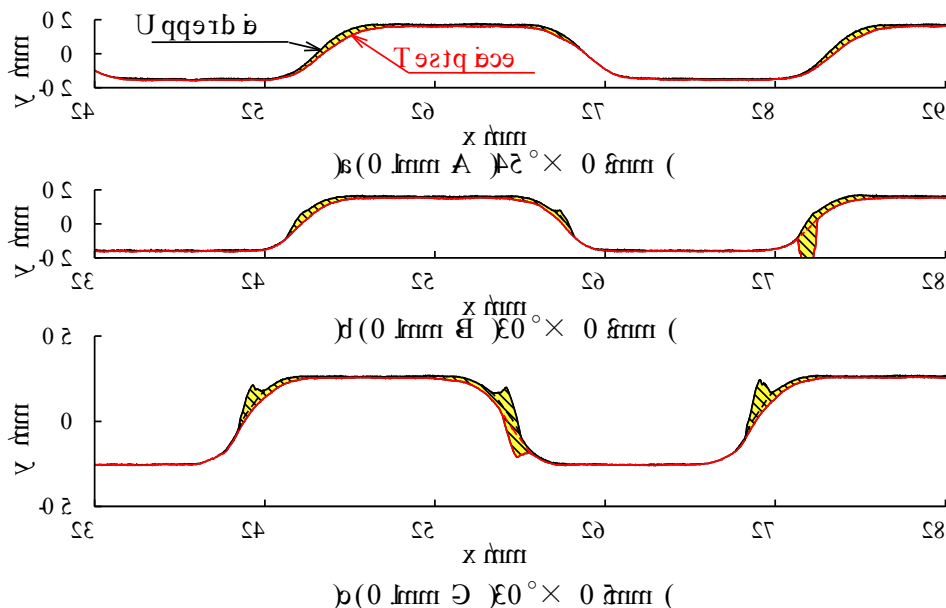


図 2.1.23 0.1mm セパレータと上型の表面形状 (加工打数 $N = 1$)

図 2.1.23 には充填率と金型形状の関係を示す。ただし、0.1mm-C の金型では、計測中にノイズが溝部中央部に発生したため除外している。金型の溝斜面角度が変化しても、充填率の差は小さいことがわかる。また、充填率は 80% 弱の値を示している。このことから、0.1mm では 0.2mm に比べ、溝に対する相対的な厚さが薄いため曲げ変形しやすく、角部への材料の充填も促進されていると考えられる。そのため、平坦部がある程度形成されると、溝斜面角度による影響は小さくなるのではないかと考えられる。

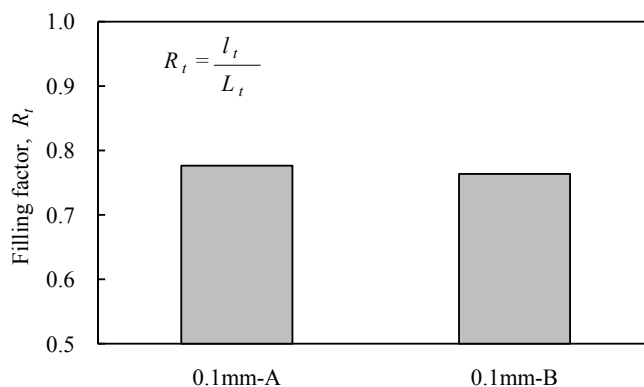


図 2.1.23 充填率に対する金型形状の影響 (板厚 $t = 0.1\text{mm}$, 加工打数 $N = 1$)

次に加工パラメータによる溝平坦度を調べるために、溝部を 19 断面に分割して表面形状を測定し、その値を元に溝深さの分布を調べた。図 2.1.24 には溝深さに対する加工打数の影響を示す。図中の溝深さ比 R_d は下式で与えられる。

$$R_d = \frac{h}{H} \dots \dots \dots \text{(式 2.1.2)}$$

ここで、 h および H は試験片および金型の溝深さである。

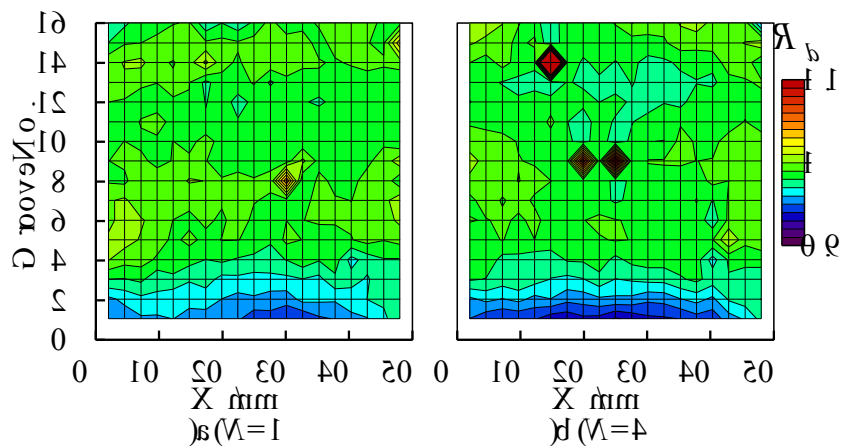

 図 2.1.24 溝深さ分布に対する加工打数の影響 (板厚 $t = 0.1\text{mm}$)

図 2.1.24 において、溝番号が 1 付近の溝深さが浅くなっている。これは、表面形状の勾配 (dy/dx) の算出の際に、ノイズ対策としてフィルタ処理を行っており、最外周の溝の形状算出に影響を及ぼすためである。また、著しく R_d が大きくなっている箇所が複数見られるが、これは図 2.1.19 に示す切り欠きのような計測結果であり、計測時のノイズによる影響と考えられる。

加工打数を増加させた方が、僅かではあるが溝深さが均一となる傾向が見られた。このとき、 $R_d = 0.99 \sim 1.0$ の領域、すなわち金型溝深さとはほぼ同一の領域は、加工打数 1 に比べ加工打数 4 の方が約 13% 増加している

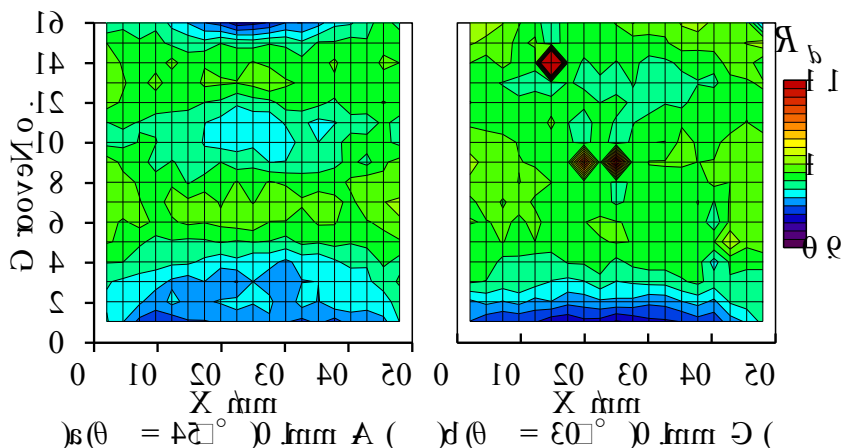

 図 2.1.25 充填率に対する金型形状の影響 (板厚 $t = 0.1\text{mm}$, 加工打数 $N=4$)

図 2.1.25 には溝深さ比分布に対する金型形状の影響を示す。溝斜面角度 $\theta = 45^\circ$ とした金型 0.2mm-A では、溝部中央に溝深さの浅い領域が生じる。それに対し、溝斜面角度が $\theta = 30^\circ$ では、そのような領域はみられず、溝部全体が $R_d = 1.0$ すなわち、製品の溝深さが金型の寸法とほぼ等しくなる。また、その深さは試験片全体で均一化する傾向がある。

(c) 結論

以上の結果より、

- 金型の溝斜面の勾配を大きくすると、隙間が減少し、溝の平坦部が形成されやすくなる。
- 金型の溝斜面の勾配を大きくすると、試験片全体の溝深さが均一になる。
- 同一の金型を用いた場合でも、加工打数を増加させると、溝深さが均一化する傾向がある。

2-1-2 溝付け加工用の超精密金型技術の開発

三吉工業株式会社及び秦野精密株式会社が研究を実施した。

[三吉工業株式会社]

(1) 目的・目標

極薄板がプレス加工されたときのスプリングバックを考慮した超精密金型を開発する。

製作した金型でプレス成形を行い、成形特性を把握し、スプリングバックを測定し、これを補正した金型を製作し、再びスプリングバックを測定する。これを繰返しスプリングバックの補正の技術データを蓄積し、超精密金型技術の開発を図る。

(2) 研究方法

(a) 人員

久保田 誠：技師長

南雲 英樹：リーダー

桜井 正勝：サブリーダー

(b) 金属セパレータモデル

今後多く普及すると思われる固体高分子型燃料電池セパレータを想定し、発電部形状のプレス加工での張出し及び絞りをを用いた形状のモデルを決定した。(図 2.1.26)

また発電部の溝形状詳細図を図 2.1.27 に示す。

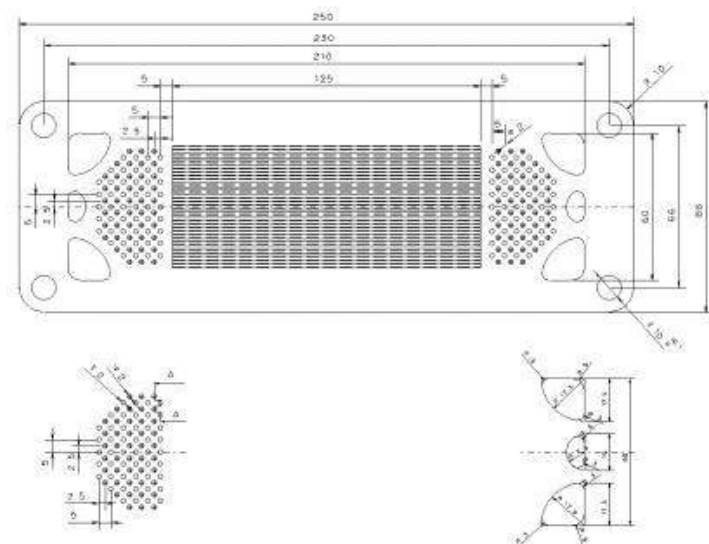


図 2.1.26 金属セパレータモデル全体図

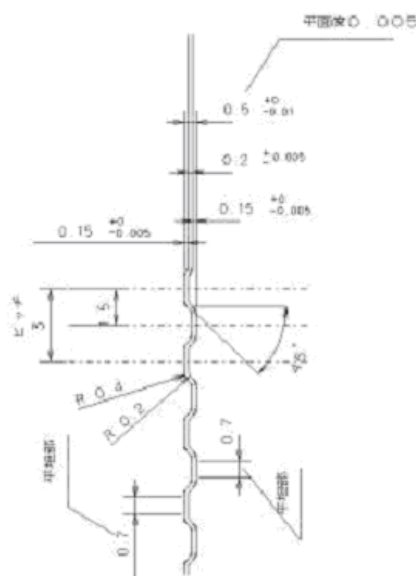


図 2.1.27 溝形状詳細図

(3) スプリングバックの研究成果

スプリングバック加工研究のパンチ製作にあたり、金属セパレータ溝形状の
に決め、SUS304 板厚 $t=0.2\text{mm}$ の目標形状を $P=3.0\text{mm}$ 、 $H=0.3\text{mm}$ 、 $A=$
ングバックを想定したパンチ形状を製作し、スプリングバックの補正の技術

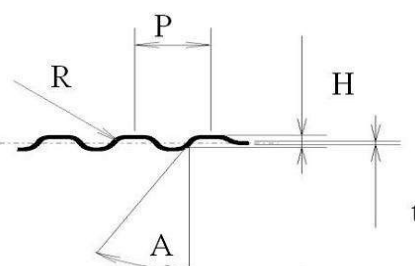


図 2.1.28 溝パラメータ

(a) FCS0711モデル実験

$P=3.0\text{mm}$ $H=0.32\text{mm}$ $A=45^\circ$ $R=0.3\text{mm}$ のパンチ形状実験

研究 1	t	P	H	A	R	備考
金型規格値		3.00	0.32	45.00	0.30	
金型実測値		3.00	0.32	45.00	0.30	
製品測定1	0.20	2.96	0.31	64.00	0.33	
製品測定2	0.20	2.99	0.31	63.50	0.38	
製品測定3	0.20	3.02	0.31	64.20	0.37	

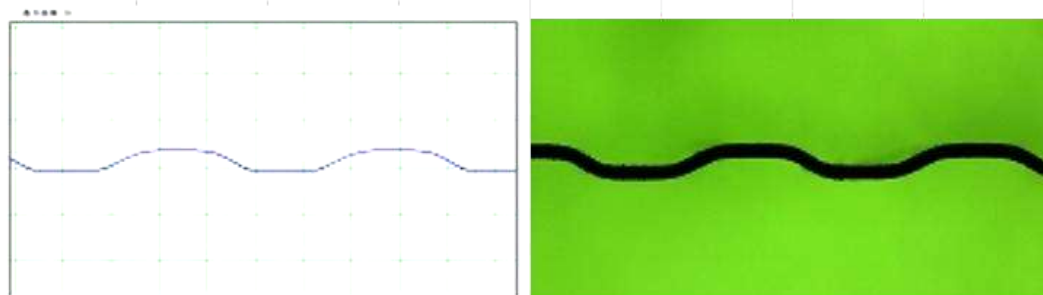


図 2.1.29 パンチ形状 (a) の製品測定データ

【結論】

目標溝形状と同等の形状で金型パンチを製作しスプリングバックの発生を確認した。

明らかに角度A寸法が大きくスプリングバックを起こしており、R寸法も大きくなることが確認できた。

(b) FCS0711モデル実験

$P=3.0\text{mm}$ $H=0.37\text{mm}$ $A=30^\circ$ $R=0.25\text{mm}$ のパンチ形状実験

研究 2	t	P	H	A	R	備考
金型規格値		3.00	0.37	30.00	0.25	
金型実測値		3.00	0.37	30.00	0.25	
製品測定1	0.20	2.97	0.36	49.12	0.28	
製品測定2	0.20	3.01	0.36	49.86	0.26	
製品測定3	0.20	2.99	0.36	47.51	0.29	

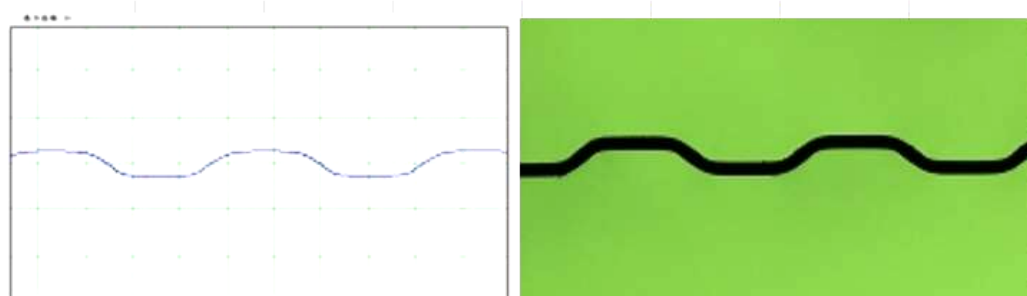


図 2.1.30 パンチ形状 (b) の製品測定データ

【結論】

(a) の FCS0711 モデルの金型パンチ研究をもとに、スプリングバックを考慮して、 $A=30^\circ$ $R=0.25\text{mm}$ でパンチを製作し目標形状への実験を行った。

角度A、角Rとも目標形状には近づいたが、製品角度が 49° とまだ目標の 45° とはなっていないため、金型パンチの角度Aをさらに小さくする必要がある。

(c) FCS0711モデル実験

P=3.0mm H=0.4mm A=0° R=0.2mm のパンチ形状実験

パンチ #3	t	P	H	A	R(内R)
金型規格値		3.000	0.400	0.00	0.200
製品測定1	0.20	3.005	0.393	44.76	0.334
製品測定2	0.20	3.010	0.396	43.57	0.300
製品測定3	0.20	3.007	0.395	42.63	0.347

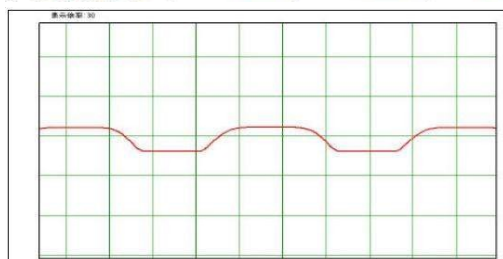


図 2. 1. 31 パンチ形状(c)の製品測定データ

【結論】

スプリングバックを考慮し金型パンチの傾斜角を小さくして実験を行ってきたが、Aの角度を 0° の金型パンチを製作し研究を行った。

この研究により、パンチ形状に角度を設けた形状よりも、製品形状の山部の平坦度が良好であることと、角度のスプリングバックにも効果的であることが明らかとなった。

(d) FCS0711モデル ステンレス板 t0.1mm での実験

P=3.0mm H=0.4mm A=0° R=0.2mm のパンチ形状実験

パンチ #3	t	P	H	A	R(内R)
金型規格値		3.000	0.400	0.00	0.200
製品測定1	0.10	3.008	0.397	44.77	0.205
製品測定2	0.10	3.009	0.398	45.38	0.206
製品測定3	0.10	3.003	0.399	45.13	0.199

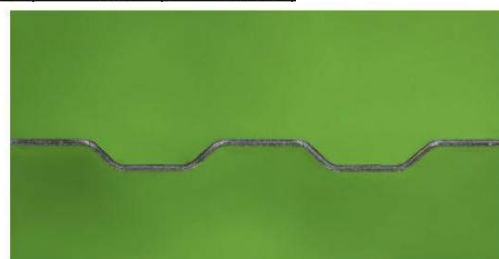
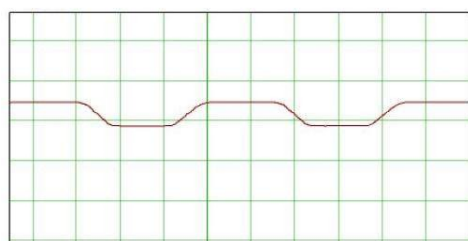


図 2. 1. 32 パンチ形状(d)の製品測定データ

【結論】

(c) で研究した金型パンチを使用して、今年度の課題であるステンレス板 0.1mm のプレス加工実験を行った。

板厚 0.2mm を想定しての金型パンチであったが、角度Aが 0° であることから金型パンチの上・下のR部で材料を成形することになり、目標形状に近い形状となった。

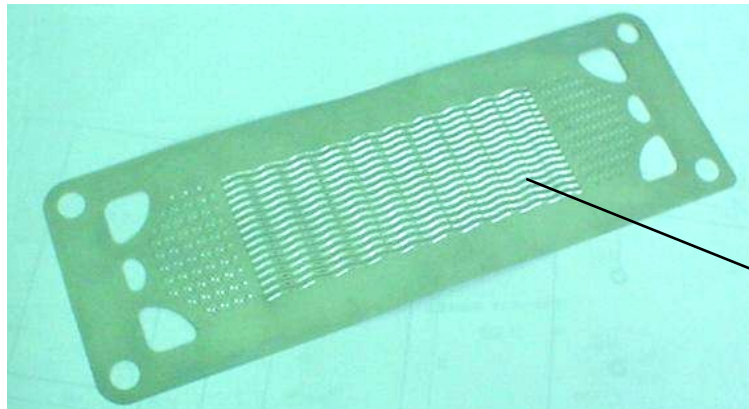
この実験により傾斜部の製作方法をシンプルな直角形状で製作することでも良好な溝形状となることが明らかとなり、今後の金属セパレータ量産技術の開発に取り入れることで大きく貢献できると判断した。

また、この金型パンチ形状を採用した場合、上下の金型パンチRの寸法と成形するR位置が溝寸法形状には重要となるが、溝山部の平坦部はプレス加工での矯正加工が傾斜部にじゃまされことなくプレス加工ができることからより良好な溝形状の平坦が加工できると判断した。

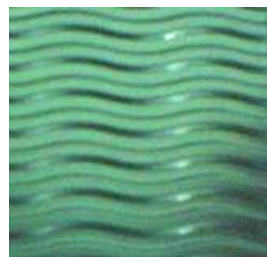
(e) FCS0711-Hモデル

P=3.0mm H=0.4mm A=0° R=0.2mm 流路R=12 のパンチ形状実験

FCS0711 (A=0°) の形状をもとに溝形状の溝に R12 程度のうねりを付け発電に対しての流量を拘束した場合の形状モデルの金型パンチを製作しステンレス板 0.1mm、0.2mm での実験を行った。



全体写真



拡大写真

図 2.1.33 0711-H セパレータモデル

【結論】

高速ジグボーラでの加工研究においても、良好に加工できることを確認できた。またプレス加工実験においても溝部の形状もステンレス板 0.1mm、0.2mm とともに良好であることが確認できた。これにより金型パンチ製作研究での高速ジグボーラ加工の技術蓄積が大きく図れた。

(f) FCS0712モデル

P=3.0mm H=0.72mm A=30° R=0.4mm のパンチ形状実験

研究 3	t	P	H	A	R	備考
金型規格値		3.00	0.72	30.00	0.40	
金型実測値		3.00	0.72	30.00	0.40	
製品測定1	0.20	3.02	0.69	37.75	0.45	
製品測定2	0.20	2.95	0.69	40.02	0.44	
製品測定3	0.20	2.98	0.68	39.15	0.48	

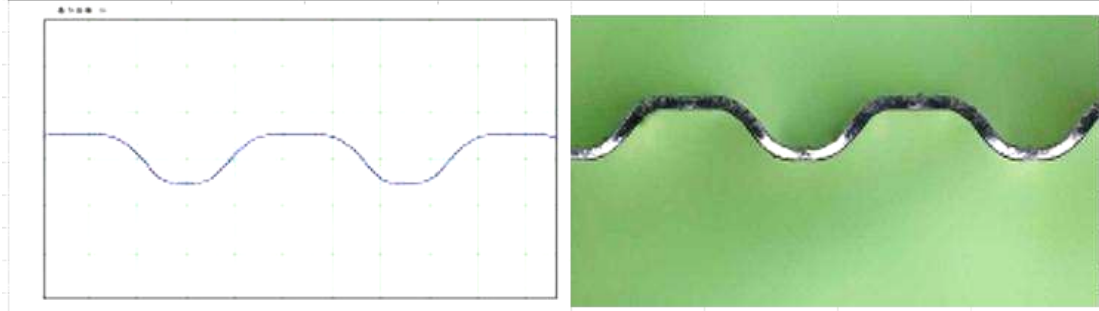


図 2.1.34 パンチ形状(f)の製品測定データ

【結論】

金属セパレータの他社の例では、ピッチ 3.0mm、溝深さ 0.7mm、傾斜角度 30° にて金属セパレータ形状の開発を行っている例があり、本研究においても研究テーマとして取上げ、実験を行った。FCS0711 より更に難加工形状と予想しての実験であった。

まず、P=3.0mm H=0.7mm A=30° R=0.4mm の金型パンチを製作し実験を行い、その結果、FCS0711 と同様にスプリングバックにより高さH、角度A、角Rが変化していることが解った。また、FCS0

7 1 1 より難加工形状と予想していたが、溝形状は問題なくプレス加工ができることが明らかとなった。

(g) F C S 0 7 1 2 モデル

P=3.0mm H=0.8mm A=20° R=0.3mm のパンチ形状実験

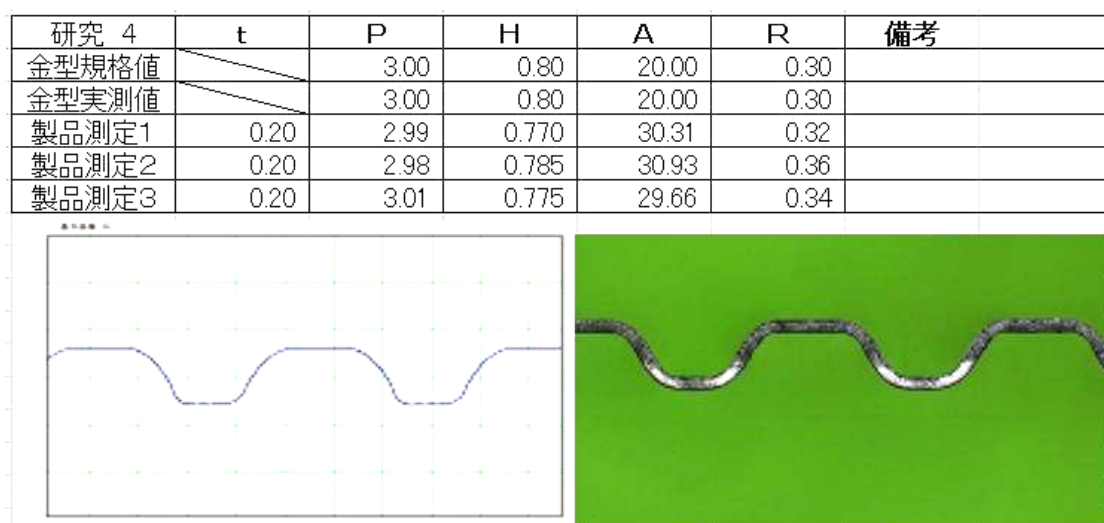


図 2. 1. 35 パンチ形状 (g) の製品測定データ

【結論】

(f) での実験結果をもとに、スプリングバック量を考慮して金型パンチA=20° R=0.3mm で製作しプレス加工実験を行った。

目標形状P=3.0mm H=0.7mm A=30° R=0.4 に対して満足できる溝形状がプレス加工化できたと判断する。

【株式会社秦野精密】

(1) 目的・目標

スプリングバック量を補正した金型（二番型と言う）を製作し補正に関するデータを蓄積するとともに金型加工技術の確立を図る。

(2) 研究方法

(a) 人員

淵脇 健二：技術部長

三島 勲：品質保証部長

中原 弘二：技術部

(b) 二番型加工

スプリングバックを補正するために肩部のコーナーアール部分と傾斜角度について修正し型を作成した。

(3) 研究成果

図 2. 1. 36 に示すスプリングバック量補正金型を製作した。

この金型に渦電流式変位センサーを取り付けて金型たわみに関する研究につなげていくことができた、

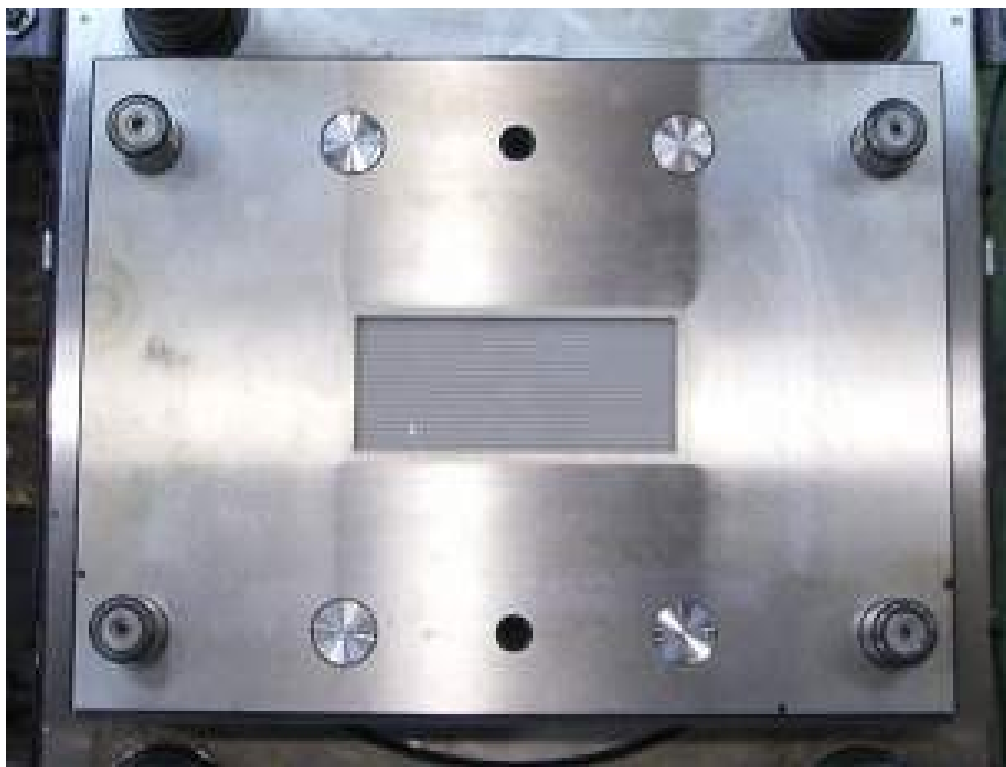


図 2.1.36 スプリングバック量を補正した金型

2-2 低周波振動プレス加工技術の開発]

この研究は三吉工業株式会社と神奈川工科大学が実施した。

[三吉工業株式会社]

(1) 目的・目標

三吉工業(株)新潟事業所に設置したアイダエンジニアリング(株)製 3000kN ダイレクトサーボフォーマ(3000kN サーボプレス)を使用し、低周波振動を変化させ、モデルセパレータに関する平坦度（溝高さ精度）、平面度（ソリ）の加工特性を探索する。

(2) 研究方法

(a) 人員

久保田 誠：技師長

南雲 英樹：リーダー

桜井 正勝：サブリーダー

(b) 加工条件

実験の加工条件として、FCS0711 金属セパレータモデル金型を用いて、パンチ形状は、図 2.1.4 の $A=0^\circ$ 形状を使用し、材料は極薄板ステンレス板 0.1mm を使用し、プレス荷重は下死点において 2500kN で設定し、下死点停止時間での条件変化による実験を行った。

(c) 測定方法

加工特性を探索するために、金属セパレータの機能上における重要部分について、測定し評価を行った。

① 平坦度（溝高さ精度）

発電部における溝高さの差が重要なことから、図 2.1.5 に示すポイント 1～5 についてマイクロメータを使用し測定を行った。

② 平面度（ソリ）

金属セパレータが電解膜を押さえる際、図 2.1.6 に示すソリ量が重要なことから、ハイトゲージを使用し測定を行った。

(3) 研究成果

(a) Coining モーションの加工実験

下死点における加圧回数を 2 回・3 回・4 回・5 回の Coining モーションについて実験を行った。

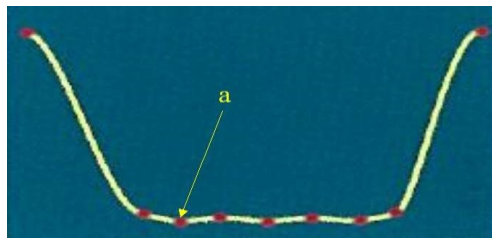


図 2.2.1 Coining モーション

①平坦度（溝高さ精度）測定結果

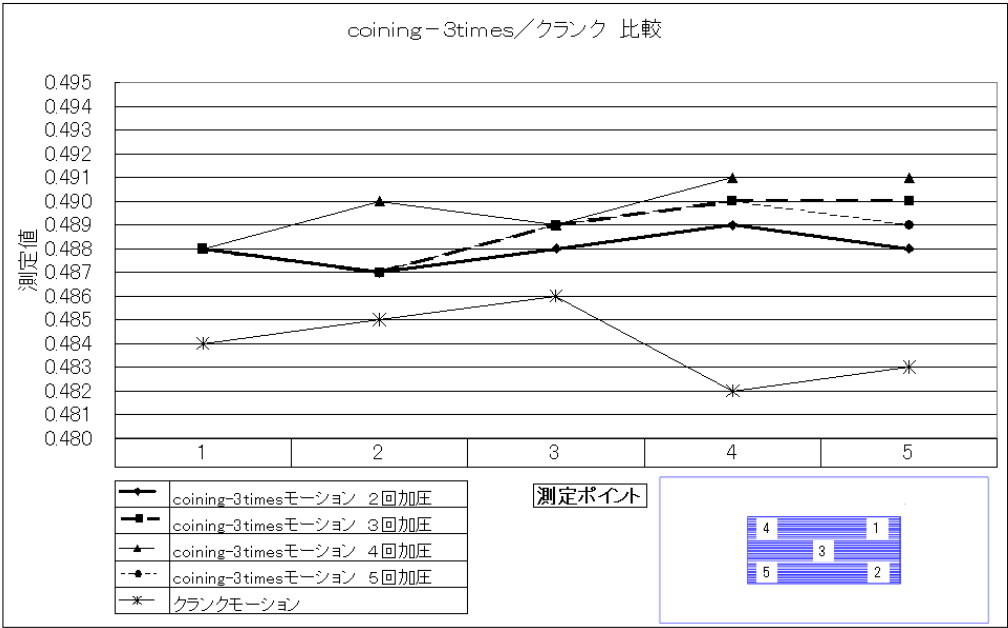
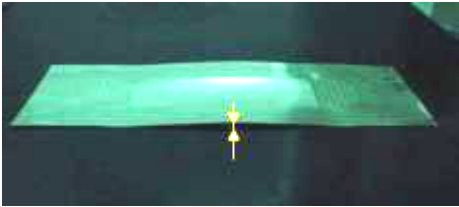


図 2.2.2 Coining モーションの測定値

②平面度（ソリ）測定結果

表 2.2.1 平面度 測定値

加圧回数	ソリ寸法
2 回	3. 3mm
3 回	3. 2mm
4 回	3. 2mm
5 回	3. 2mm



【結論】

通常の加工モーションであるクランクモーションと比較をするとスプリングバックが、減少したと思われることから、溝高さは高くなり、また溝高さの差においても均一化が図られることが観察できた。

平坦度の均一性は、Coining 回数が多くなるほど効果があると思われる。

ソリにおいては、Coining 回数でのソリ量の差は見付からなかった。

(b) draw-repeat モーションの加工実験

下死点加工上方ポイントから下降(IN)、上昇(OUT)を繰り返しながら行う draw-repeat モーションについて実験を行った。

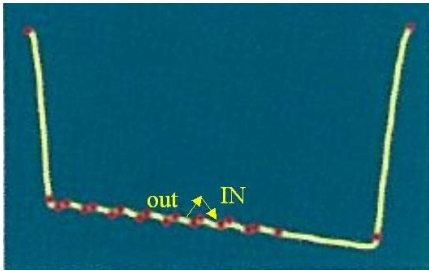


図 2. 2. 3 draw-repeat モーション

①平坦度（溝高さ精度）測定結果

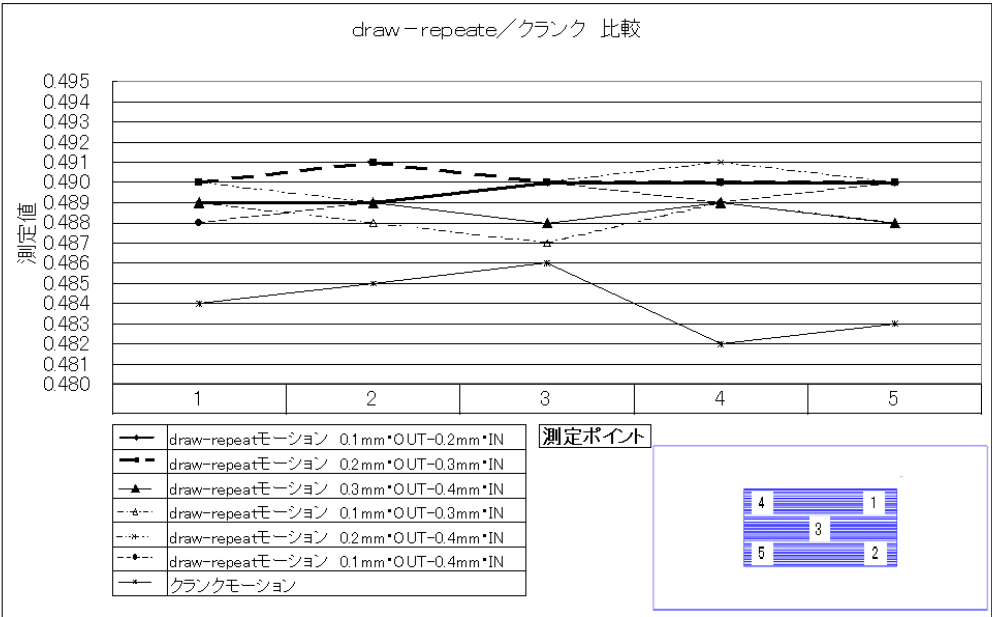
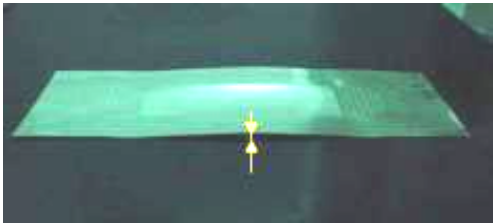


図 2. 2. 4 draw-repeat モーションの測定値

②平面度（ソリ）測定結果

表 2. 2. 2 平面度 測定値

振幅長さ	ソリ寸法
0.10OUT0.2IN	3. 4mm
0.20OUT0.3IN	3. 3mm
0.30OUT0.4IN	3. 4mm
0.10OUT0.3IN	3. 4mm
0.20OUT0.4IN	3. 3mm
0.10OUT0.4IN	3. 2mm



【結論】

通常の加工モーションであるクランクモーションと比較をするとスプリングバックが、減少したと思われることから、溝高さは高くなり、また溝高さの差においても均一化が図られることが観察できた。ソリにおいては、振幅長さでのソリ量の差は見付からなかった。

(c) 平面度（ソリ）の追加実験

サーボプレスを利用した平坦度保持技術の開発及び低周波振動プレス加工技術の開発の実験結果から、平面度（ソリ）の加工特性に変化が発見できなかったことから、追加実験として、プレスストローク量を変化させ図 2. 2. 5 に示す H 寸法を変化させた場合の平面度（ソリ）の実験を行った。

①平面度（ソリ）測定結果

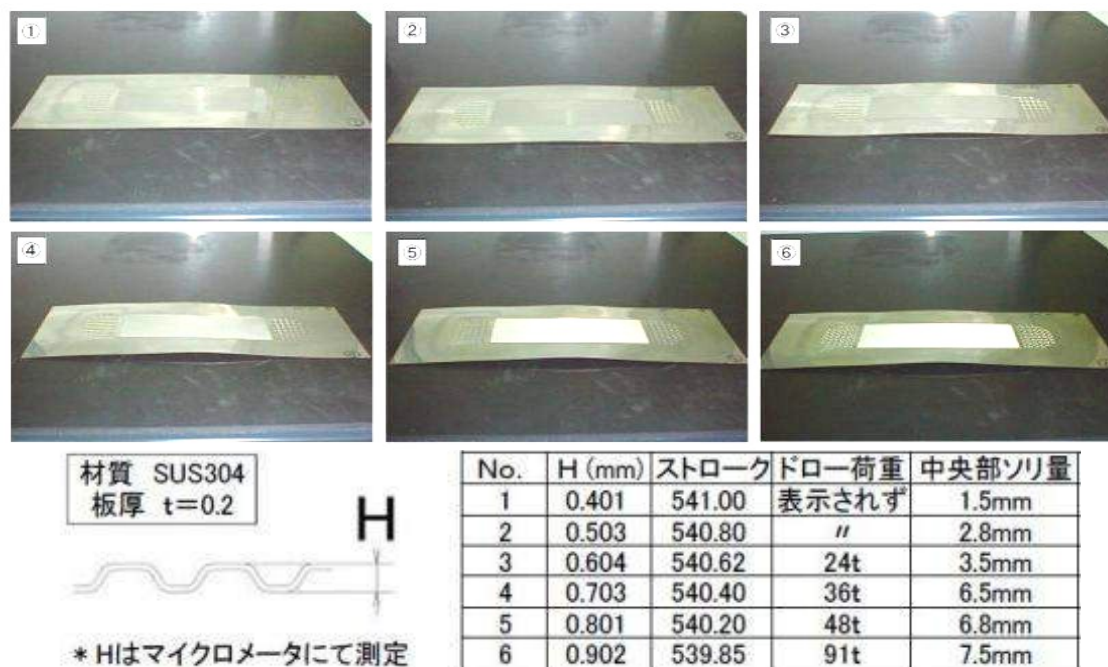


図 2. 2. 5 溝高さ寸法と全体的な平面度（ソリ）の関係

【結論】

溝高さが、ソリに大きく影響することが観察できた。

[神奈川工科大学]

(1) 目的・目標

0.3mm および 0.2mm セパレータの加工に関して下記のことが判明している。

- ・溝平坦部が形成されていない場合、低周波振動を加えると溝が深く形成される。
- ・平坦部が形成されると溝深さに対する低周波振動の影響は小さくなる。

しかし、更に薄い板厚 0.1mm のセパレータに対する低周波振動加工の効果は明らかでない。そこで、板厚 0.2mm および 0.1mm のセパレータの低周波振動加工実験を行い、その加工特性を把握することを目的とした。

(2) 研究方法

(a) 人員

遠藤 順一：教授／総括研究代表者

萩野 直人：ポストドクター研究員

(b) 金型および試験片

図 2.1.10 に示すセンサー埋め込み金型および図 2.1.11 試験片を使用した。

(c) サーボプレス

(株)放電精密加工研究所加工開発センターに設置されている 3000kN のサーボプレス (MPS8300DS) を借用し加工実験を行った。

(d) 計測装置

図 2.1.14 に示す形状計測システムを使用した。

(e) 実験条件

図 2.2.6 で示す加工モーションを用いた。加工モーションを使用した。

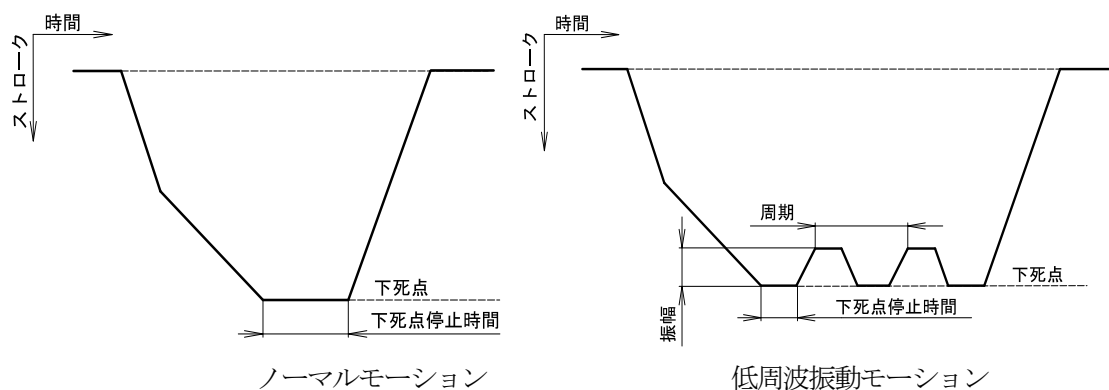


図 2.2.6 加工モーション

表 2.2.3 実験条件（加工速度 5mm/s）

振動周期 T / s	下死点停止時間 t_b / s	振幅 a / mm	加工打数 N			
			1	2	3	4
2	1.0	0.1	I	II	III	IV
		0.2	—	—	—	V
		0.3	—	—	—	VI

(3) 研究成果

(a) 0.2mm セパレータ加工実験

まず、0.2mm セパレータの溝形状に対する低周波振動の効果を調べた。このとき、2-1-1 で示した溝頭頂部

の充填率 R_t および溝深さ比 R_d とともに、下記に示す値を用いて低周波振動加工の影響を評価した。

$$R_b = \frac{l_b}{L_b} \dots\dots\dots \text{(式 2.2.1)}$$

ここで、 R_b は溝底部の充填率を示し、その値は試験片の溝底平坦部長さ l_b と金型の溝底平坦部長さ L_b の比により表される。

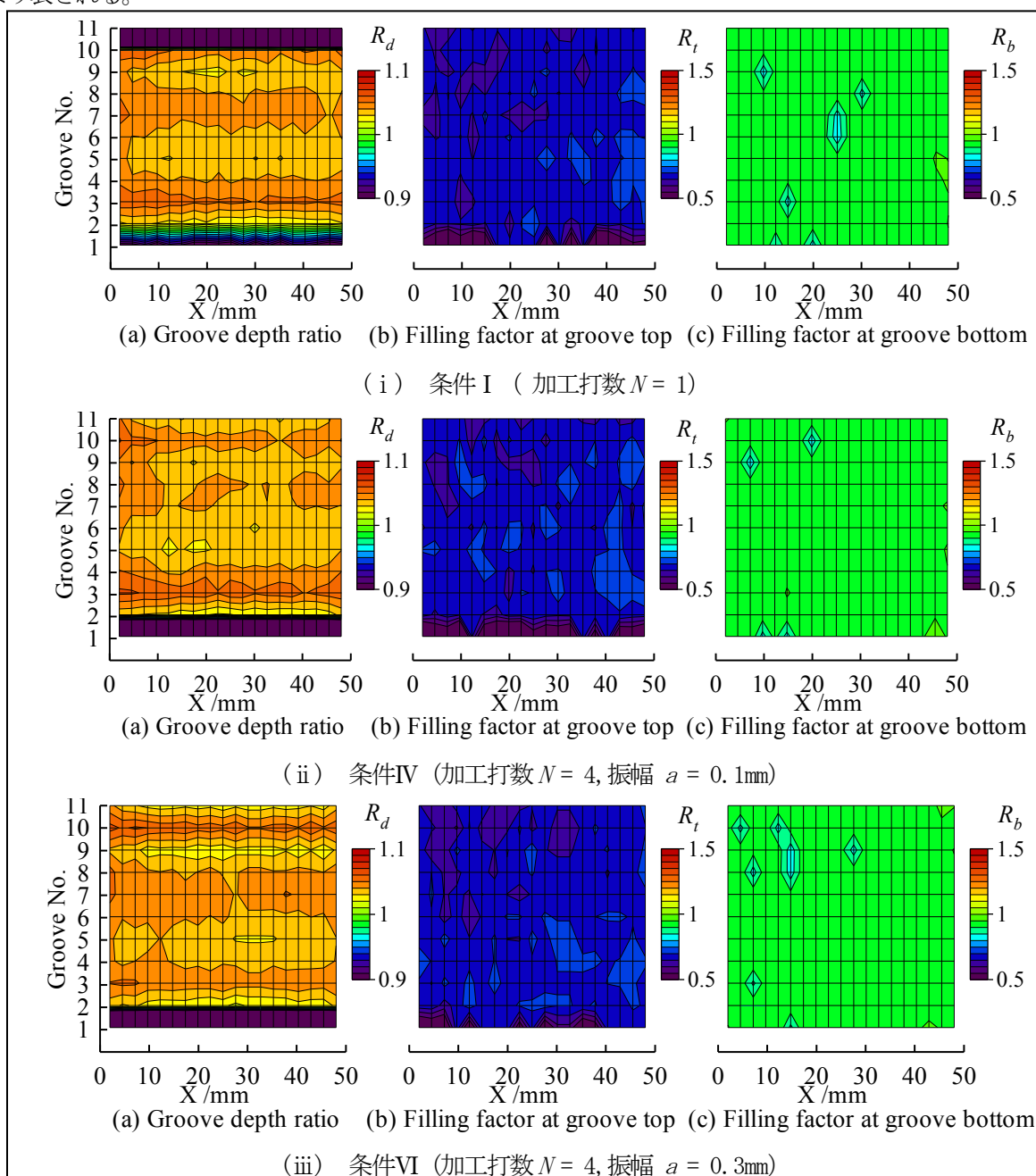
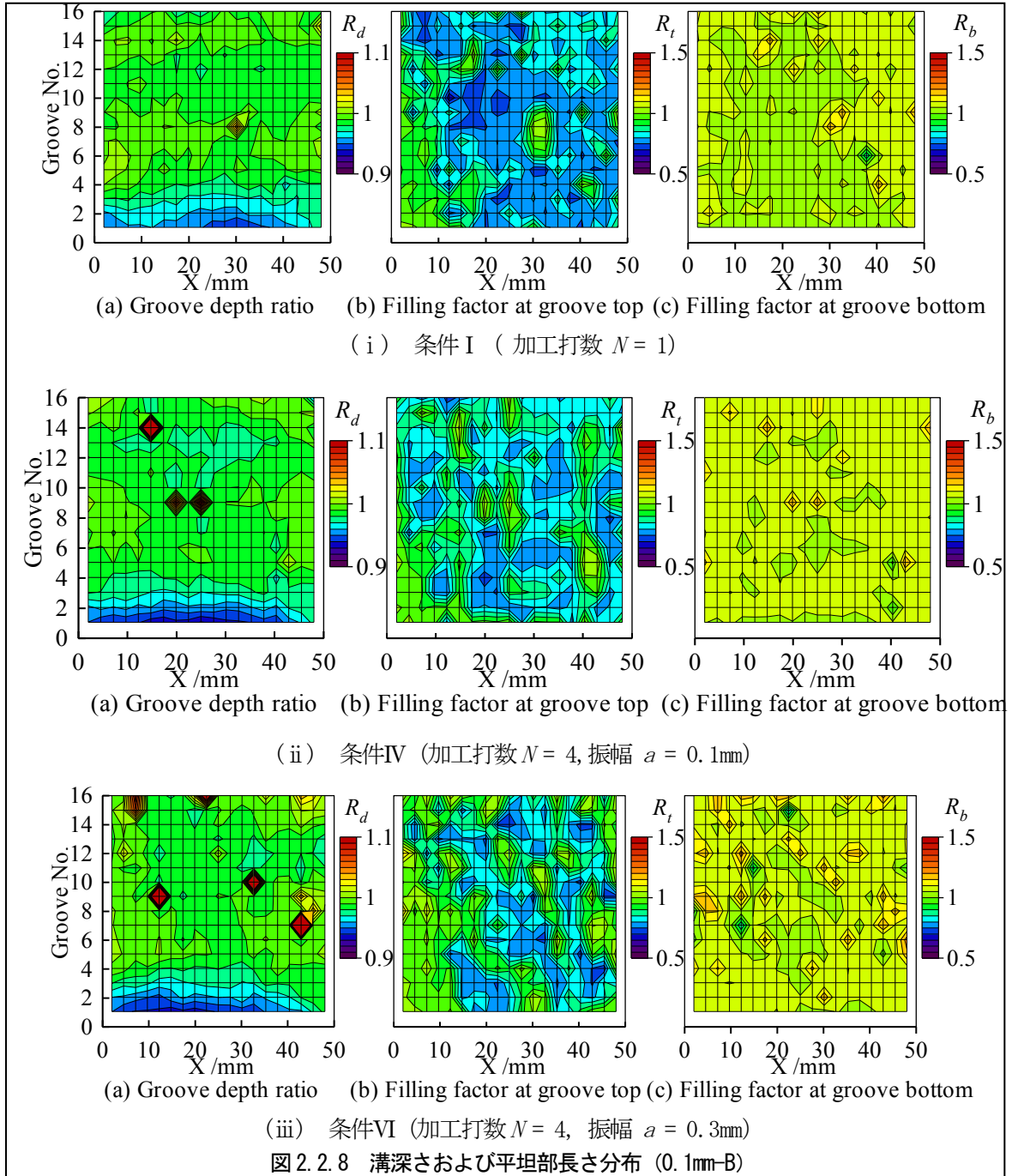


図 2.2.7 溝深さおよび平坦部長さ分布 (0.2mm-B)

溝深さは、金型の寸法よりわずかに長くなっている。このとき、溝頭頂部の充填率が非常に小さいことがわかる。これは、平坦部が十分に形成されていないため、平坦部にわずかに曲げが残留しているためと考えられる。各条件において溝深さ比および充填率はあまり変化が見られず、0.2mm セパレータでは、低周波振動の効果は小さいことが分かる。

(b) 0.1mm セパレータ加工実験

次に板厚 $t = 0.1\text{mm}$ の試験片を使用し、0.1mm-B の金型 ($\theta = 30^\circ$) の金型を用いて加工を行った。0.2mm セパレータの場合と同様に溝深さ比および充填率の分布図を作成した。その結果を図 2.2.8 に示す。条件 I および IV より、加工打数が増加すると、溝深さの変化は少ないが、平坦部長さが増加する傾向が見られた。また、条件 IV および VI より、同一加工打数で振幅を増加させると、平坦部長さが更に長くなる傾向が見られた。これは、低周波振動を加えることにより、金型角部により材料が充填し、平坦部の長さが長くなったと考えられる。溝深さは、低周波振動の影響が少なかった。これは、平坦部が十分に形成されているためである。従って、低周波振動を加えることにより金型角部への材料の充填が促進されることが考えられる。



頭頂部の充填率は溝部の外周側から大きくなる傾向がある。そのため、溝中心部のみで比較をすると、低周

波振動の影響が明確に表すことができない場合がある。そこで、図 2.2.8 に示すような頭頂部充填率の分布図より溝部全体の平均充填率を求めた。このとき、各条件 3 枚の試験片全ての充填率を求めた。図 2.2.9 には平均充填率に対する加工打数の影響を示す。いずれの条件においても 80%以上の充填率があることがわかる。加工打数を増加させると平均充填率が増加する、つまり平坦部が形成されやすくなることがわかる。

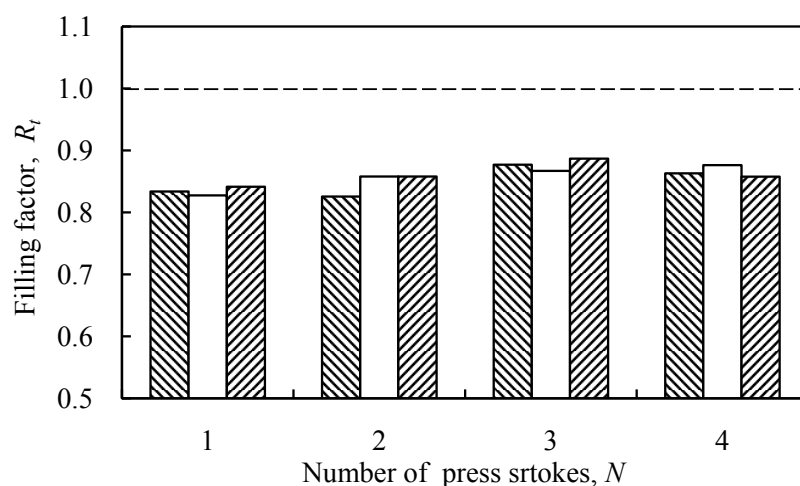


図 2.2.9 平均充填率に対する加工打数の影響 (0.1mm-B)

図 2.2.10 には平均充填率に対する振幅の影響を示す。いずれの条件においても 80%以上の充填率があり、振幅が 0.3mm では平均充填率 90%近くとなることが分かった。加工打数を増加させると平均充填率が増加する、つまり平坦部が形成されやすくなることがわかる。

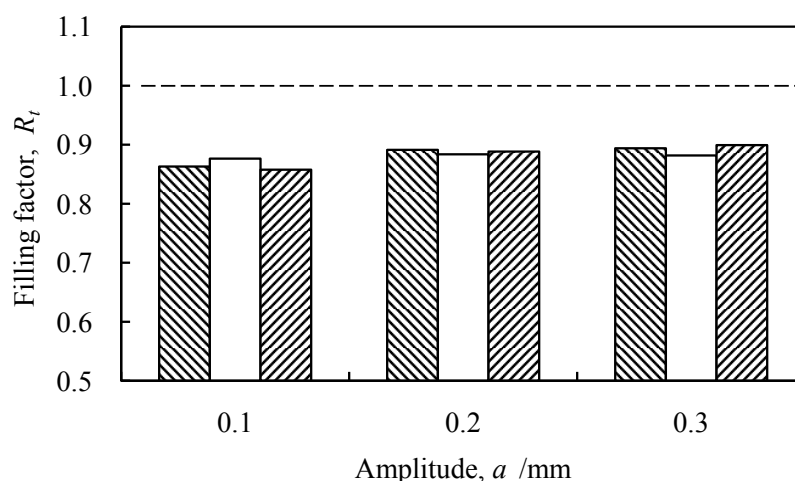


図 2.2.10 平均充填率に対する振幅の影響 (0.1mm-B)

以上の結果より、低周波振動を付加すると平坦部が形成され、角部に材料が充填しやすくなると考えられる。そこで、試験片角部の形状を調べた。図 2.2.11 には、試験片の角部形状に対する加工打数の影響を示す。加工打数が増大すると、頭頂部の角部において水平方向に突き出す様な形状となり、角部に材料が充填していることが分かる。

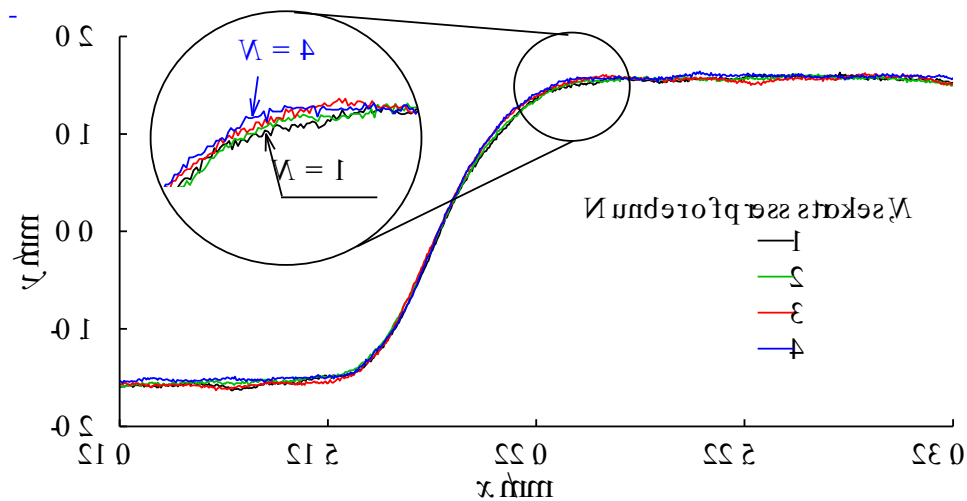


図 2.2.11 溝形状に対する加工打数の影響 (0.1mm-B)

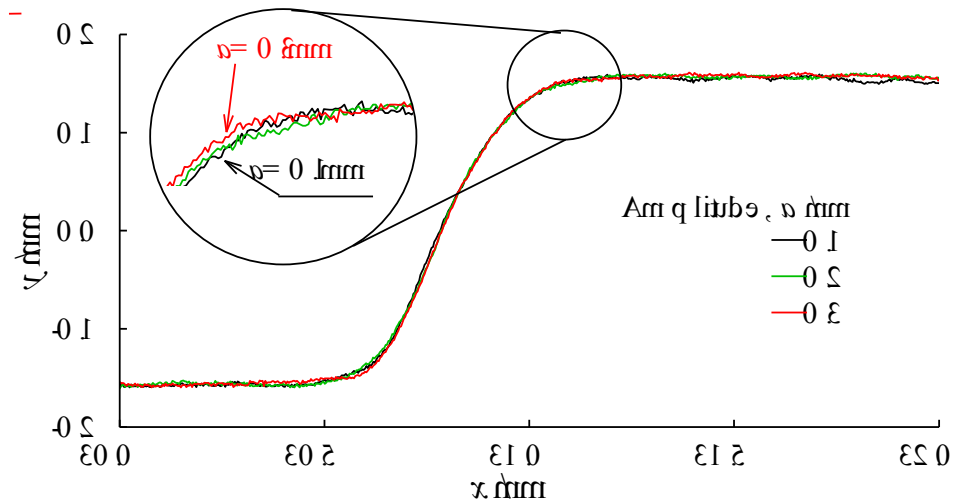


図 2.2.12 溝形状に対する振幅の影響 (0.1mm-B)

図 2.2.12 には、試験片の角部形状に対する振幅の影響を示す。振幅が増大すると、同一の加工打数でも、頭頂部の角部において水平方向に突き出す様な形状をしている。

従って、低周波振動モーションの影響は角部に現れ、加工打数、振幅を増加させると角部に材料が充填しやすくなると考えられる。

【結論】

- ・試験片の平坦部が成形されると、低周波振動モーションの影響は角部に現れる。
- ・試験片の板厚が薄くなると、低周波振動モーションの影響が大きくなる。この原因は、試験片の曲げ剛性が低くなったため、金型が材料を角部に移動させて金型に充填しやすくなったからだと考えられる。

0.2mm セパレータにおいて、低周波振動モーションの影響があまり現れなかったのは、板厚が溝形状に対して相対的に厚いため、荷重に対する曲げ剛性が高かったからであると推測できる。従って、加工荷重を増加させることができれば、0.2mm セパレータでも低周波振動モーションの影響が現れ、角部に材料をより充填させることができると考えられる。

2-3 金型技術開発課題への対応

神奈川工科大学及び秦野精密株式会社および三吉工業株式会社が研究を実施した

2-3-1 センサー埋め込み金型の開発

[神奈川工科大学、三吉工業株式会社]

(1) 目的・目標

精密部品をプレス加工する場合、金型形状が製品に高い精度で転写される必要がある。しかし、プレス加工中において、図 2.3.1 に示すようにプレス機のベッド・スライド中央部がたわみ、金型中央部にわずかな隙間が生じる可能性がある。従来は、熟練技能者が経験と感覚で金型の補正を行っていた。今回の研究では、金型中央部に隙間を計測するセンサーを配置することにより、金型補正を定量的に決定できるようにすることを目的とした。

九図 2.3.2 に示すような、超音波探触子をセンサーとして埋め込んだ金型を用い、隙間の計測を試みた。

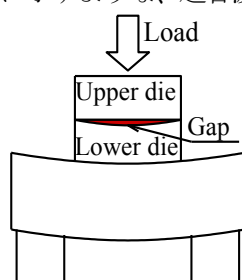


図 2.3.1 プレス機械概略図

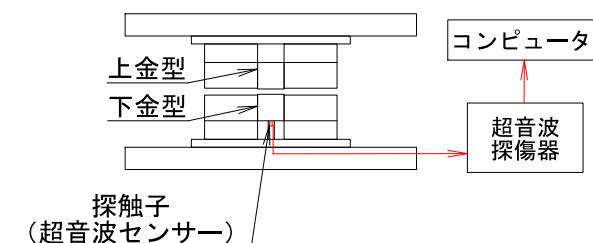


図 2.3.2 インプロセス計測概略図

(2) 研究方法

(a) 人員

遠藤 順一：教授／総括研究代表者

萩野 直人：ポストドクター研究員

(b) 金型および試験片

溝斜面での超音波の反射透過特性の調査には図 2.3.3 に示す様なモデル金型を使用した。また、インプロセス計測では、図 2.3.4 に示すセンサー埋め込み金型を使用し、後に示す探触子をセンサーとして下型の裏面に設置した。このとき、探触子の振動子面には超音波の伝達を良くするためにグリセリンを塗布した。プレス加工実験には試験片として板厚 $t=0.1\text{mm}$ の SUS304 を用いた。



図 2.3.3 モデル金型

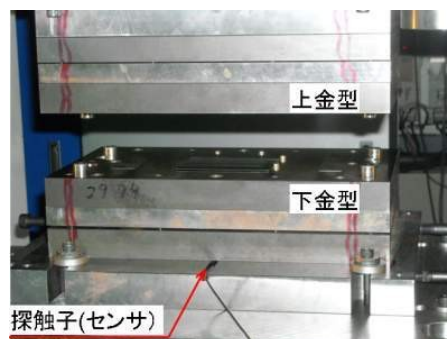


図 2.3.4 センサー組み込み金型

(c) 実験装置

傾斜面での超音波の反射透過特性には、図 2.3.5 に示す実験装置を用いた。また、図 2.3.6 に示すサーボプレスによって試験片を加工し、セパレータ加工中における隙間のインプロセス計測を行った。

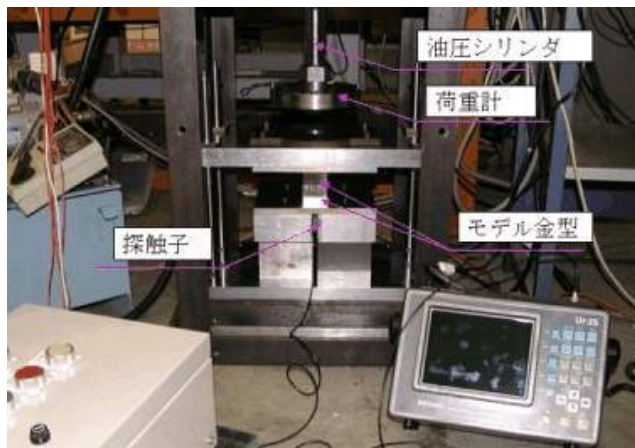


図 2.3.5 実験装置



図 2.3.6 サーボプレス

(d) 計測装置

インプロセス計測システムの接続図を図 2.3.7 に示す。センサー組み込み金型に組み込んだ探触子からの信号を超音波探傷器へ入力し、エコー強さとエコー位置をアナログで外部出力させる。そのアナログデータを計測用コンピュータに入力させてデータを保存する。

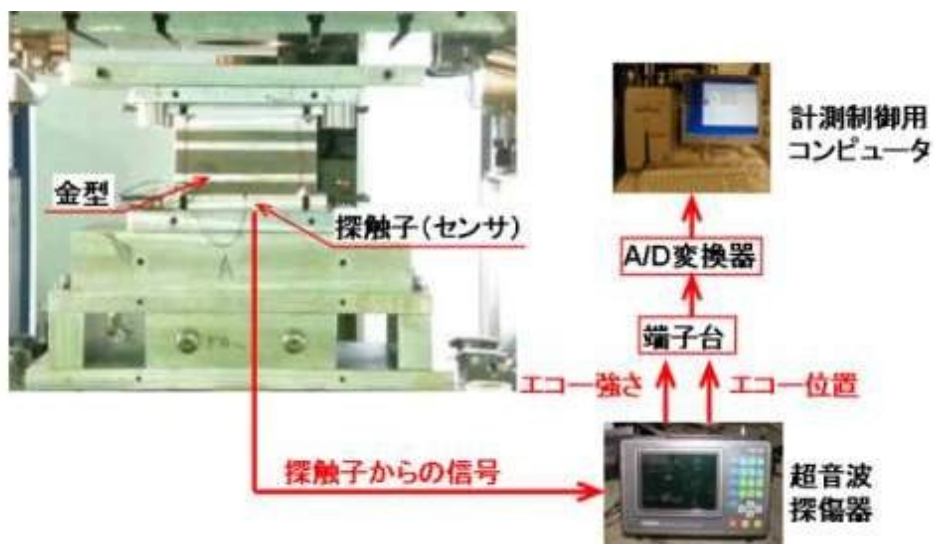


図 2.3.7 インプロセス計測システム接続図



図 2.3.8 超音波探傷器 (UI-25)



図 2.3.9 探触子 (PN10C10N)

計測用コンピュータはデスクトップ型を使用し、PCI 拡張スロットに A/D・D/A 変換器を組み込んだ。A/D・D/A 変換機は(株)Interface 製 PCI-3521 を使用した。主な仕様を表 2.3.1 に示す。

表 2.3.1 A/D・D/A 変換器の仕様

A/D 変換部	D/A 変換部
入力チャンネル数: シングルエンド 8ch 差動 4ch	出力チャンネル数: 4ch 差動 4ch
分解能 : 12bit	分解能 : 12bit
入力レンジ: $\pm 2.5V$, $\pm 5V$, $\pm 10V$	出力レンジ: $\pm 5V$, $0 \sim 10V$
誤差 : $\pm 0.15\%$ ($\pm 5V$, $\pm 10V$) $\pm 0.15\%$ ($\pm 2.5V$)	誤差 : $\pm 0.4\%$



図 2.3.10 データ出力中の探傷器画面



図 2.3.11 計測用プログラム画面

探傷器において、図 2.3.10 に示すように予め設定されたゲート範囲内のエコー位置とその超音波エコーピーク高さをアナログ電圧として出力する機能がある。そこで、その電圧出力をリアルタイムに計測するプログラムを作成した。そのプログラムの画面を図 2.3.11 に示す。このプログラムは外部トリガを有し、外部から+5Vの入力を受信し計測を開始することができる。

(3) 研究成果

(a) 傾斜面での超音波の反射透過特性

図 2.3.12 に示すようなモデル金型を使用し、傾斜面での超音波反射特性を調べた。このとき加圧は行っていない。そのため、傾斜面で超音波が全反射すると考えられる。超音波探触子を 2 つ使用し、一方を送波器として、残りを受信器として使用した。超音波のビームが傾斜面から外れないように、水平面と傾斜面の境界から 10mm だけ振動子の中心をずらして設置した。計測の際は、図中の送波器中心から受信器までの距離 x を変更して計測を行った。

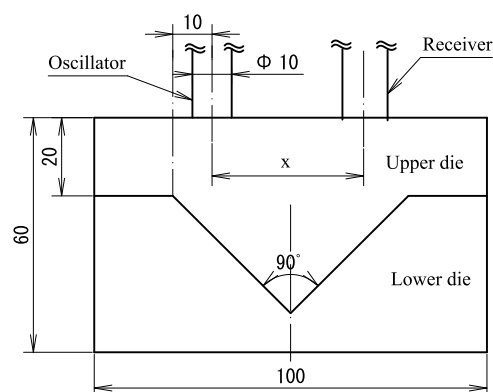


図 2.3.12 モデル金型の寸法と送波器・受信器の位置

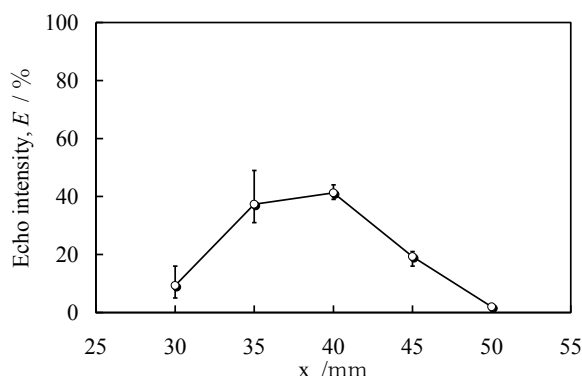


図 2.3.13 実験結果

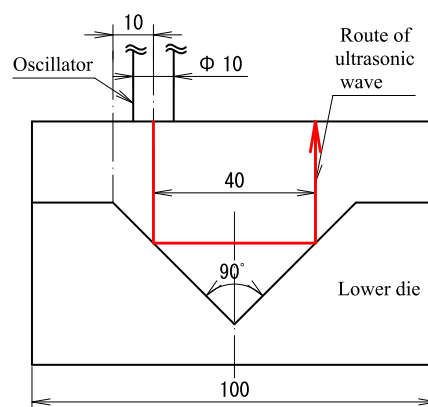


図 2.3.14 超音波反射経路

計測結果を図 2.3.13 に示す。各点における超音波エコー強さを計測し、各点 3 回の計測を行った。プロットは各計測位置での平均値を、エラーバーは最大最小を示す。送波器中心から 40mm の位置でエコー強さが最大となる。この結果より図 2.3.14 に示すような経路を通過していると考えられる。よって、光の鏡面での反射と同様に入射角と反射角が等しく、幾何学的に超音波経路を求めることができる。また、超音波エコーが観測される領域は 40mm 付近に集中しており、傾斜面での超音波はほとんど散乱していないと考えられる。

次に、図 2.3.15 に示すようなモデル金型を使用し、傾斜面での超音波透過特性を調べた。このとき加圧は行っていない。図中の送波器中心から受信器までの距離 x を変更して計測を行った。傾斜面に超音波が伝達しやすいようにグリセリンを塗布している。

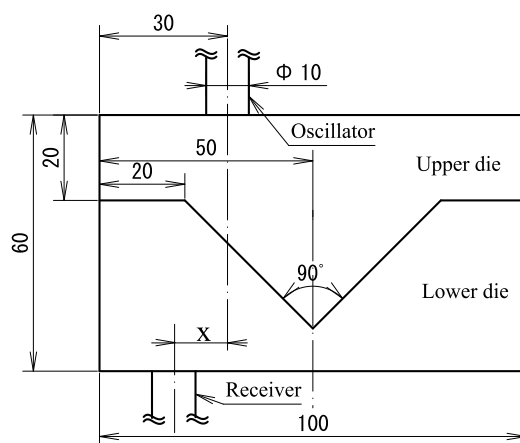


図 2.3.15 モデル金型の寸法と送波器・受信器の位置

計測結果を図 2.3.16 に示す。各点における超音波エコー強さを計測し、各点 3 回の計測を行った。図 2.3.17 には計測されたデータからエコーピークを抜き出し、そのデータと図 2.3.15 中の金型左側面からの距離 x との関係を表した物である。プロットは各計測位置での平均値をエラーバーは最大と最小値を示す。 $x = -10\text{mm}$ でエコー強さが大きくなり始め、 $x = 0\text{mm}$ で最大となる。その後、エコー強さは減少し、 $x = 20\text{mm}$ ではほぼ 0 となる。超音波振動子の直径は 10mm であるため、探触子中心が $x = -10\text{mm}$ 付近では、超音波経路の中に水平面と傾斜面のエッジ部分が含まれる。この場合エッジ部分では超音波の乱反射が著しく大きくなるので、エコー強さが低くなったと考えられる。 $x = 0\text{mm}$ では、超音波振動子が傾斜面の領域に全て入っており、乱反射は少なく、ピークが増加したと考えられる。ここで対向した探触子で計測が可能なることから、傾斜面での超音波はほとんど偏向していないと考えられる。

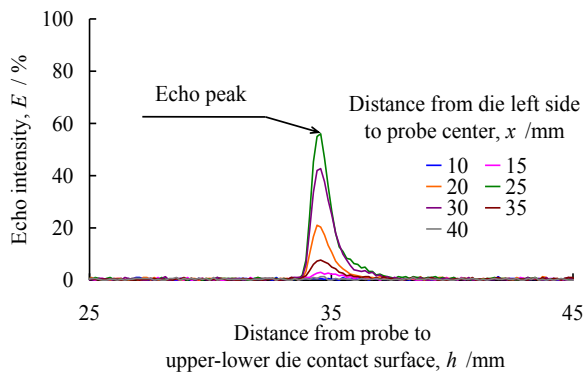


図 2.3.16 実験結果

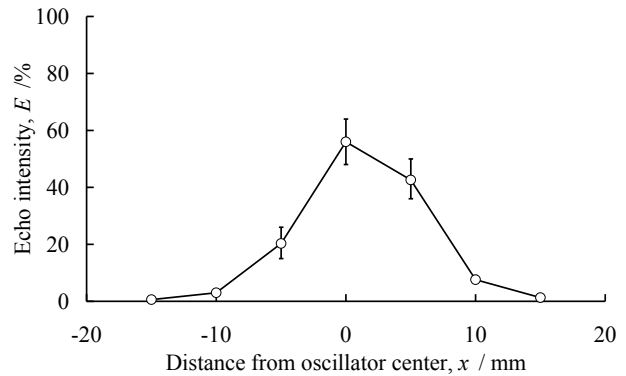


図 2.3.17 金型左側面からの距離とエコー強さの関係

次に、上下金型間ステンレスの薄板を挟み、超音波透過を調べた。図中の赤い線の部分に 0.2mm のステンレス板を挟み計測を行った。荷重の中心点は V 字の頂点とし、傾斜面に超音波が伝達しやすいようにグリセリンを塗布した場合と、実際のプレスを模擬し金型およびステンレス板を脱脂した場合の計測を行った。

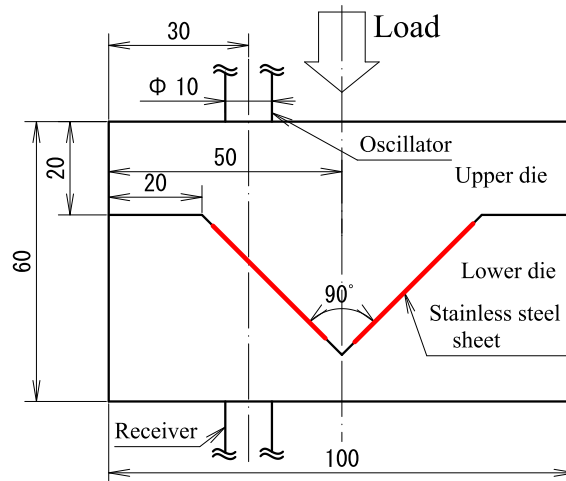


図 2.3.18 モデル金型の寸法と送波器・受信器の位置

表面にグリセリンを塗布したステンレス板を挟んだ場合の計測結果を図 2.3.19 に示す。ただし、探傷器のゲインは 36dB とした。荷重をかけて面圧が増大すると、エコーピークが高くなることが分かる。

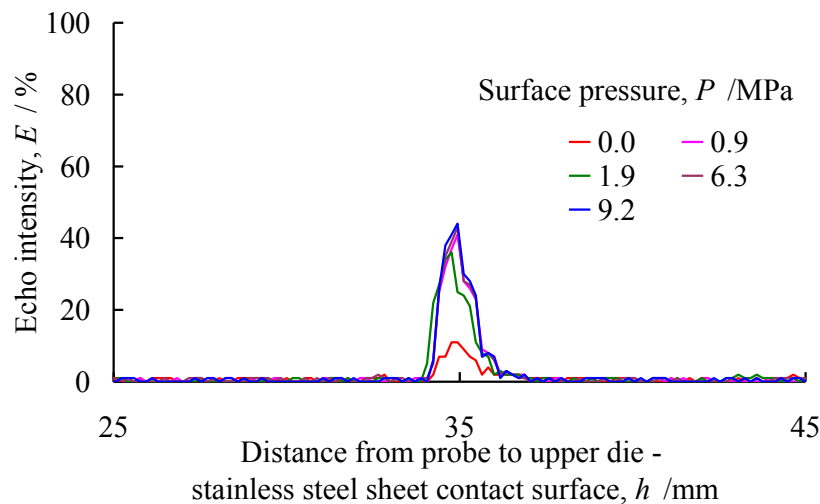


図 2.3.19 傾斜面における透過波の計測結果（グリセリンを塗布した場合）

次に、ステンレス板を挟み境界面を脱脂した場合の計測結果を図 2.3.20 に示す。ただし、探傷器のゲインは 80dB とした。傾斜面による超音波エコーが観測されたが、その大きさは極めて小さい。また、グリセリンを塗布した場合と同様に、荷重を増加させ面圧が増大するとエコーピークが高くなるが、その量は非常に小さいことが分かった。

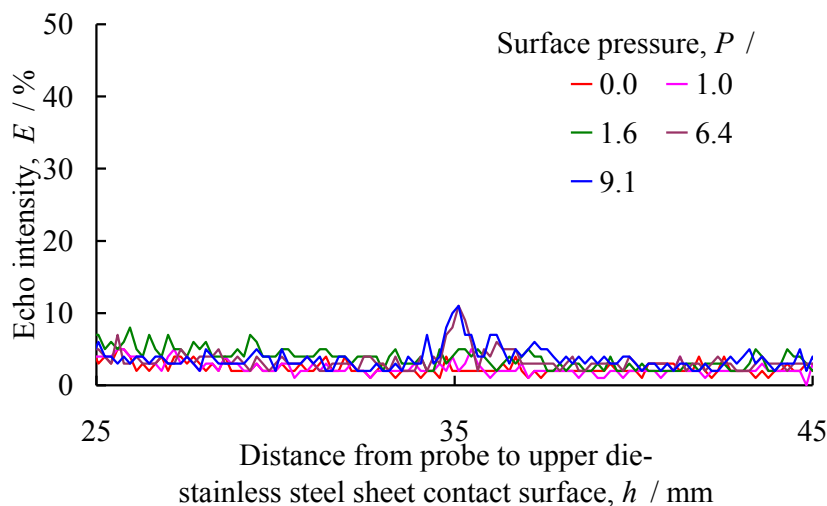


図 2.3.20 傾斜面における透過波の計測結果（グリセリンを塗布しない場合）

上記の実験結果を元に、エコーピーク高さと金型と製品の境界における面圧の関係を調べた。その結果を図 2.3.21 に示す。グリセリンを塗布した場合、3MPa 以上においてエコーピークはほぼ一定値を示す。脱脂した場合も同様の傾向を示すが、そのエコーピークの大きさは小さい。また脱脂した場合は、エコーピークを検出するために探傷器のゲインを増大させる必要がある。従って、透過法によって透過波を計測することは可能であるが、探傷器のゲインを大きくする必要がある。これは、上型とステンレス板の境界および、ステンレス板と下型の境界において、超音波の減衰が大きいことに起因すると考えられる。

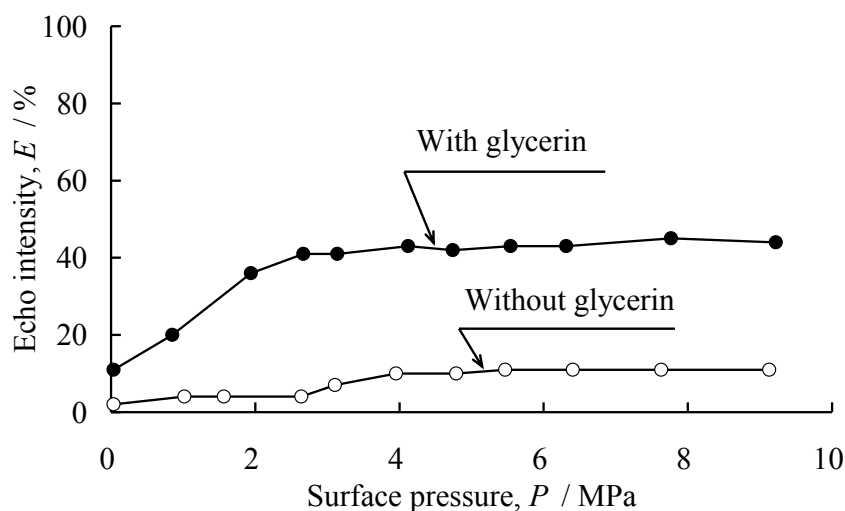


図 2.3.21 エコー強さと面圧の関係

以上の結果より、傾斜面での隙間の計測に関して、

- ・超音波は斜面に入射する角度と同一の角度で反射するため、同一の探触子では反射波を検出できない。そのため金型の同一面上に 2 個のセンサーを配置する必要がある。
- ・透過波は傾斜角度に偏向せず、そのまま透過するので、透過法により計測することができる。

- ・金型と製品間の接触状態により透過量は異なり、金型と製品が密着すると透過量はほぼ一定になる。

(b) インプロセス計測結果

金型-製品の境界における超音波の反射エコーのピークを計測した。その結果とサーボプレススライドのトレースデータを図 2.3.22 に示す。ただし、縦軸のエコー強さ比 E/E_0 は、プレス加工中の超音波エコー強さ E を、金型が開いている場合に計測された超音波エコー強さの平均 E_0 で除した物である。超音波エコーのピーク高さをリアルタイムで計測することが可能となった。このとき、隙間が減少すれば、金型-製品間に残存する空気層が減少し、超音波は境界面を透過する。そのためエコー強さが減少する。

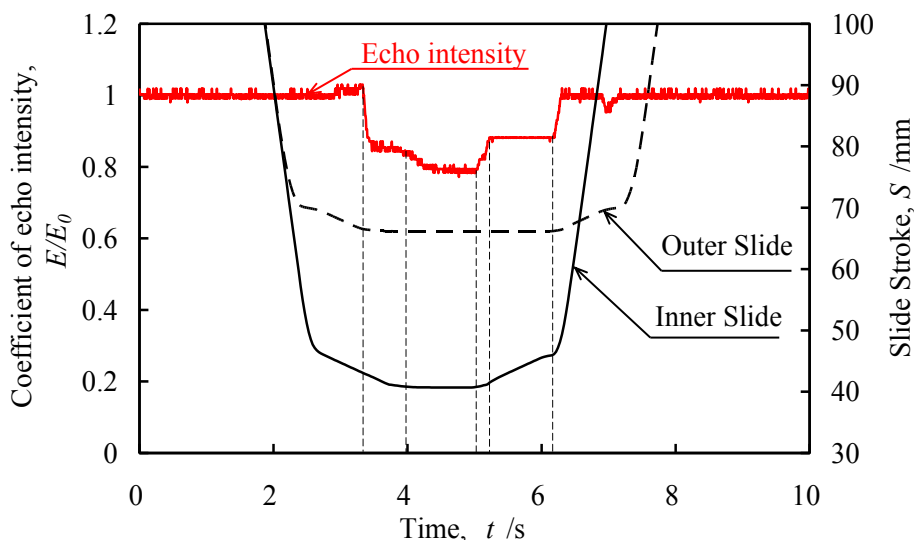


図 2.3.22 インプロセス計測結果

次に、加工打数を変更した場合のインプロセス計測結果を図 2.3.23 に示す。センサーと金型の境界面にグリセリンを塗布すると、加工打数等を変更しても超音波エコーが安定して得られることが分かる。

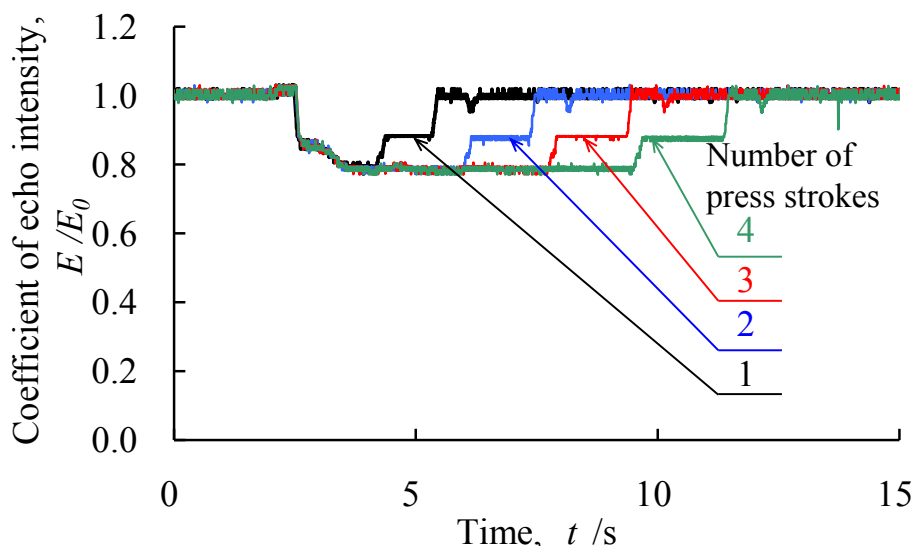


図 2.3.23 加工打数を変更した場合のインプロセス計測結果

更に、振幅を変更した場合のインプロセス計測結果を図 2.3.24 に示す。低周波振動を加えたとき、インナ

スライドの振幅を大きくすると、超音波エコーの変動幅も大きくなことが分かった。これは、荷重の変動に伴い、隙間の大きさが変化したと考えられる。また、4 打目において、振幅が増加するとエコー強さが低下しているのが分かる。これは、低周波振動の効果により金型-試験片間の隙間が減少し、それにより超音波の透過量が増加したためと考えられる。

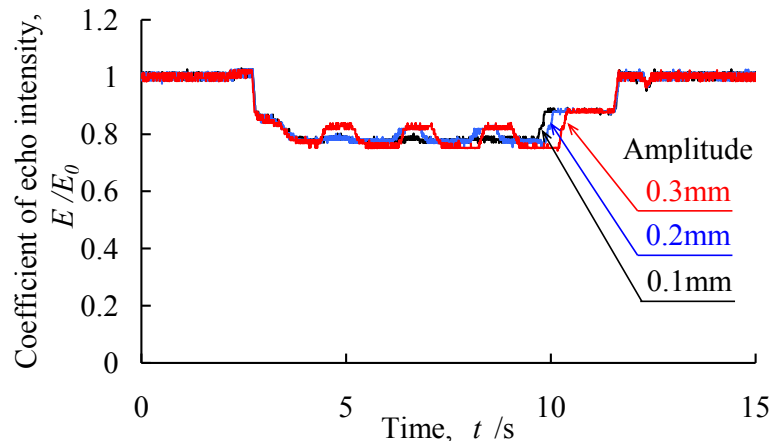


図 2.3.24 振幅を変更した場合のインプロセス計測結果

この計測では反射法を用いているため、平坦部の隙間が計測されていると考えられる。エコー強さが減少すると平坦部において隙間が減少しているといえる。特に、隙間は溝頭頂部に生じやすい。そこで、4 打目のエコー強さと、加工した試験片より求めた溝頭頂部の充填率 R_t の関係を調べた。その結果を図 2.3.25 に示す。振幅が増加すると充填率が増加し、それに伴い、エコー強さが小さくなっていることが分かる。このことから、頭頂部の隙間のわずかな変化を、超音波探傷法を用いて検出が可能であると考えられる。

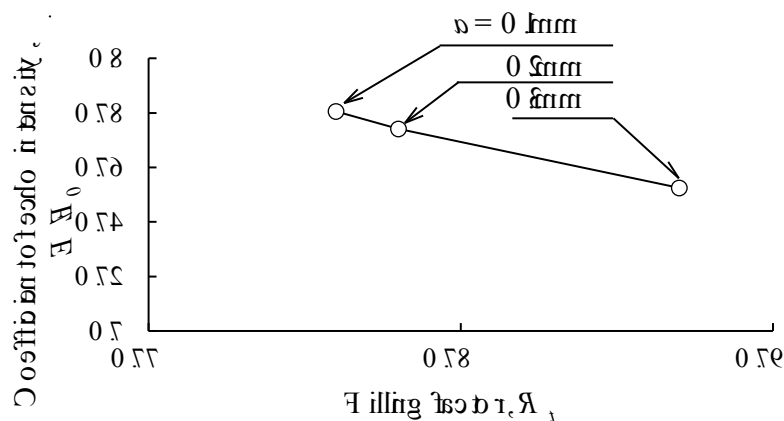


図 2.3.25 溝頭頂部における材料の充填率と超音波エコー強さの関係

以上の結果より、

- ・インプロセス計測システムを構築し、センサーからのデータをリアルタイムに計測することができるようになった。
- ・センサーの設置方法を見直し、金型-センサー間にグリセリンを塗布することにより安定した出力を得られるようになった。
- ・上記の改善点により、低周波振動を加えた場合に生じるわずかな隙間の変化を検出した。

【結論】

まず、傾斜面における超音波の反射・透過特性に関しては、以下のようなことが分かった。

- ・超音波は斜面に入射する角度と同一の角度で反射するため、同一の探触子では反射波を検出できない。そのため金型の同一面上に2個のセンサーを配置する必要がある。
- ・透過波は傾斜角度に偏向せず、そのまま透過するので、透過法により計測することができる。
- ・金型と製品間の接触状態により透過量は異なり、金型と製品が密着すると透過量はほぼ一定になる。

よって、傾斜面の隙間に関しては、透過法を用いた方が良いと考えられる。ただし透過法による隙間の計測では、金型と製品の境界面において透過波が大きく減衰する。そのため、ゲインを大きく設定する必要がある。

加工中のインプロセス計測に関して、

- ・インプロセス計測システムを構築し、センサーからのデータをリアルタイムに計測することができるようになった。
- ・センサーの設置方法を見直し、金型-センサー間にグリセリンを塗布することにより安定した出力を得られるようになった。
- ・上記の改善点により、低周波振動を加えた場合に生じるわずかな隙間の変化を検出した。

よって、加工中のわずかな隙間の変化を、センサー組み込み金型を用いて計測が可能であると考ええる。

[株式会社秦野精密]

(1) 目的・目標

製品寸法精度及び金型にも悪影響を及ぼすと考えられる金型のたわみを数値で測定するためのセンサーの取り付け可能な金型構造を開発し、たわみを測定する。

(2) 研究方法

(a) 人員

- 淵脇 健二：技術部長
- 三島 勲：品質保証部長
- 中原 弘二：技術部

(b) センサー取り付け金型

図 2.3.28 に示すスプリングバック量補正金型に渦電流式変位センサーを4個取り付け、金型のたわみを測定した。センサーはキーエンス製の渦電流式変位センサーEX 4 1 6 Vで分解能は1 μ mである。
主な仕様は表 2.3.2 のとおり。センサーの取り付け位置は図 3.2.28 のように型の外面4箇所とした。



図 2.3.26 スプリングバック補正金型

表 2.3.2 センサーの概要

選定基準	分解能力：2 μ m 以下 測定範囲：5 mm 以上
選定機種	Keyence 渦電流式変位センサーEX-416V
取付位置	金型外部4隅に取付ける



図 2.3.27 センサー外観

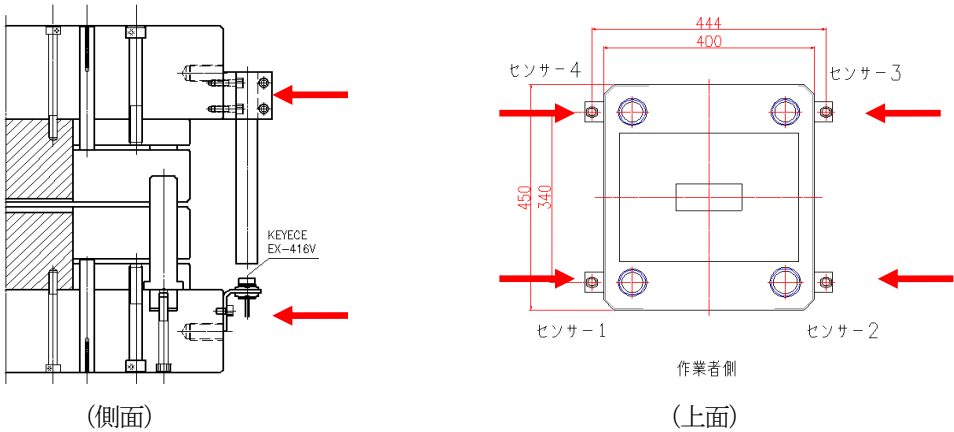


図 3.2.28 センサー取付位置

(3)研究成果

センサーを取り付けた型を図 3. 2. 29 に示す。この型を森鉄工製 F B プレス (F B 4 0 0 - F) に取り付けてタワミを測定した。

測定結果を図 3. 2. 30 に示す。プレス条件は V リング圧 8 0 0 , 5 0 0 , 4 0 0 , 2 0 0 k N の 4 条件、カウンター圧を 3 0 0 , 2 0 0 , 1 0 0 k N の 3 条件で設定して、SUS304, 0. 2mm材について測定した。さらに加圧時間も変化させてある。4つのセンサーの初期タワミが同じでなくゼロ点補正の必要があるが今回は測定データをそのまま載せた。材料成形時のタワミ (最小値として記載) はセンサー位置4点のばらつきが 5 μ m 程度あるというデータである。

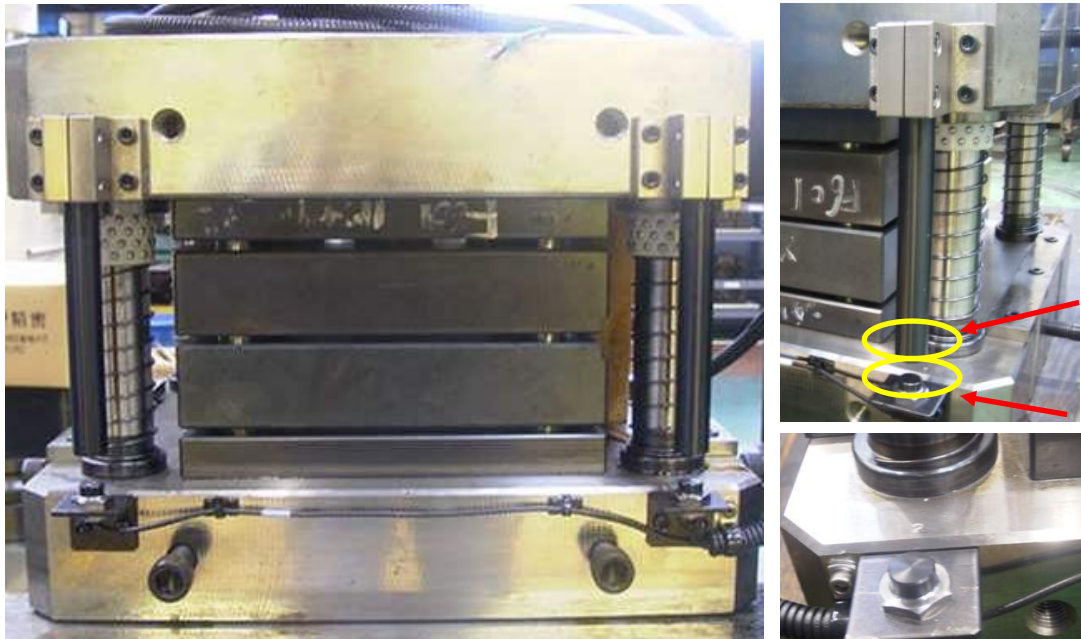


図 2. 3. 29 センサーを取り付けた金型の外観

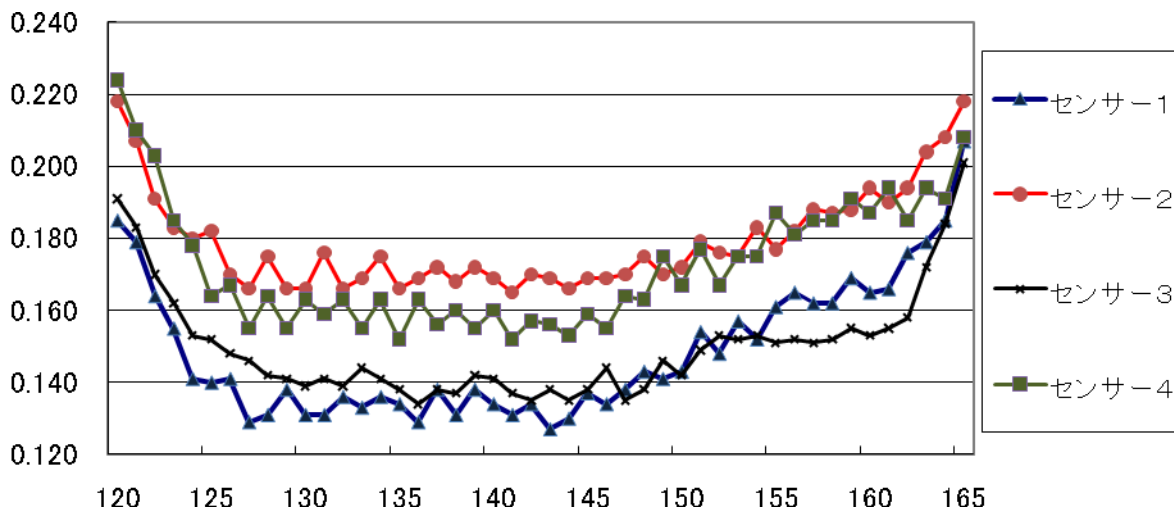


図 2. 3. 30 金型たわみ測定結果

	センサー1	センサー2	センサー3	センサー4	ばらつき
最小値	0.1	0.14	0.121	0.118	0.04

2-3-2 センサーの探査

[神奈川工科大学、三吉工業株式会社]

(1) 目的・目標

金型の精密転写のためには、金型と製品の隙間を測定できるようなセンサーが必要である。そのような計測方法と本研究でおこなう形状のプレスでは、金型の変形などにより、製品中心部付近で隙間が生じる恐れがある。前述のセンサー埋め込み金型の研究開発に先立ち、隙間を計測するためセンサーの探査を行った。

(2) 研究方法

(a) 人員

遠藤 順一：教授／総括研究代表者

萩野 直人：ポストドクター研究員

(a) 計測方法・センサーの検討

プレス加工中に、金型・製品間にセンサーを挿入することは不可能であり、隙間の計測は非接触の手法に限られる。そのような手法として下記があげられる。

(i) レーザー変位計による計測

(ii) 渦電流式センサー

(iii) 超音波探傷法

神奈川工科大学と三吉工業(株)との打ち合わせの結果、上記の手法(i),(ii)では金型の表面近くにセンサーを設置する必要がある。そのため、金型にセンサー設置用の穴を加工する必要がある、金型の精度や剛性などに影響を及ぼすため有効な手段ではないとの結論を得た。一方(iii)の方法は、非破壊検査に広く用いられており、部材の加工を行わなくても材料深部に存在する欠陥を検出することができる。そこで超音波探傷法を用いプレス加工中に生じる金型と製品間の隙間の検出法の開発を目的として、実験によりセンサーの特徴と隙間計測の可能性を調べた。研究に用いた測器は、図 2.3.8 に示す超音波探傷器と図 2.3.9 に示す。探触子（超音波センサー）は超音波振動子と超音波受信機より成る。

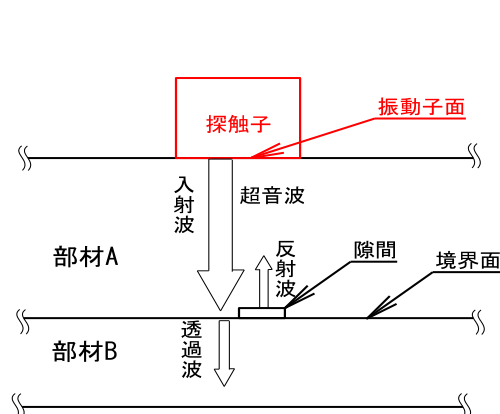


図 2.3.31 超音波探傷法の概略

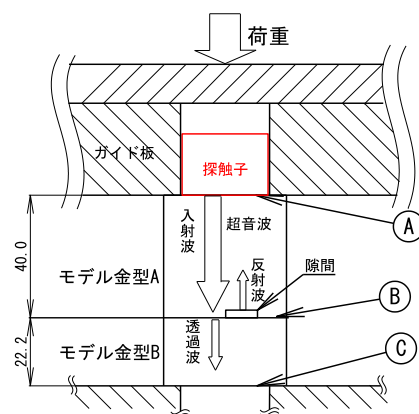


図 2.3.32 超音波による溝計測（反射法）

超音波探傷法の概略を図 2.3.31 に示す。超音波探触子より入射した超音波は境界面と溝部分で一部が反射し、残りが境界面を透過する。境界面における超音波の反射率は音響インピーダンスにより決定され、音響インピーダンスが異なる部材の接触面において超音波の反射が生じる。反射した超音波は探触子に入射し、反射した面までの距離を測定する。音響インピーダンスに関しては、鉄鋼材は $45.3 \times 10^6 \text{ Ns/m}^3$ 、空気は $45.3 \times 10^6 \text{ Ns/m}^3$ ー

である。通常の超音波探傷では、軸材内部の欠陥や亀裂の検出など、境界面がない材料で行われる事が多い。プレス加工の下死点においては、上下金型の間に薄板が挟まれる3層構造で、境界面が2つ存在する。境界面付近に隙間が存在する場合の特性は不明である。そこで金型モデルを使用した実験を行い、超音波探傷法による、金型 - 製品間の隙間の測定の可能性を検討した。

図 2.3.5 に示す装置を用いて実験を行った。モデル金型に油圧シリンダを用いて荷重を鉛直方向下向きに加える。荷重は荷重計を用いて計測した。超音波センサ（探触子）は図 2.3.32 に示すようにモデル金型 A の上部に設置した。この探触子の超音波振動数は 5MHz である。超音波探傷器は菱電湘南エレクトロニクス製の UI-25 を使用した。金型の材質は S45C とし、モデル金型 A の寸法は 40×40×100mm の直方体でモデル金型 B との接触面に矩形上の溝を加工した。モデル金型 B は 22.2×40×100mm である。本実験では、油圧シリンダにより荷重を掛け、金型の面圧を変化させながら計測を行い、超音波エコーの強度の変化を調べた。最大荷重時の面圧は 9MPa である。超音波の周波数は 5MHz、探傷器のゲインは 17.2dB とした。

(3) 研究成果

まず、溝がない金型を使用し、試験片が内場合での面圧が反射波の強度に及ぼす影響を調べた。その結果を図 2.3.33 に示す。荷重を加えない場合、図 2.3.32 の B 面でのエコーのみ見られる。これは、B 面で超音波がモデル金型 B に透過せず、B 面で全反射していることを表している。超音波は音響インピーダンスの差が大きい境界面では全反射する。この場合、表面粗さなどの影響から、金型間に空気層が僅かながら存在したため超音波が全反射したと考えられる。荷重を加えると図 2.3.32 の B 面での反射が減少し、C 面での反射が現れる。これは荷重をかけると部材間の空気の層が減少するため、超音波が透過しやすくなったと考えられる。また、B 面でのエコー強度が減少したのは超音波が透過し、B 面での反射量が減少したためと考えられる。

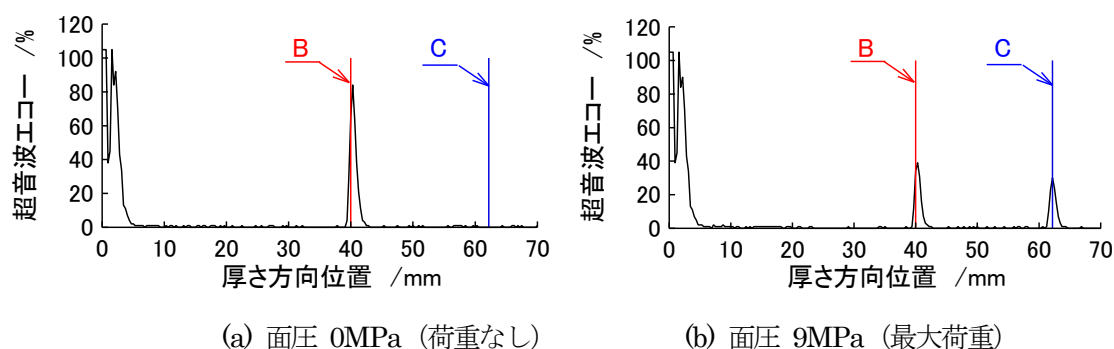


図 2.3.33 荷重の有無による計測波形の違い

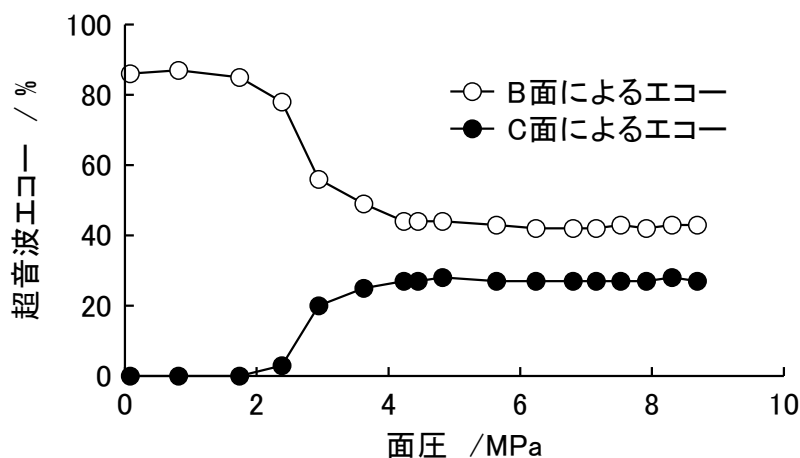


図 2.3.34 超音波エコーに対する面圧の影響

さらに面圧を変化させながら計測を行いその影響を調べた。その結果を図 2.3.34 に示す。面圧が 2MPa から 4 MPa に上昇すると境界面での反射量が減少し、下金型底面からの反射量が増加した。荷重が 4MPa 以上では、境界面および下金型底面による超音波の反射量は、共にほとんど変化しない。これは、面圧が上昇したことで、金型の境界面に存在する空気の量が減少し、反射量が変化したと考えられる。これにより、境界面の面圧が高くなることで反射強度は変化しなくなるということがわかった。

次に超音波探傷方法による波形の違いを調べた。モデル金型 A の面に $2 \times 2\text{mm}$ の溝を加工し計測を行った。探傷法は、図 2.3.34 に示す反射法と、図 2.3.32 に示す様にモデル金型 B の下部に探触子を設置し、透過する超音波の強さを計測する透過法を用いた。計測結果を図 2.3.35 に示す。反射法では、モデル金型の接触面である B 面および溝上面の B*面の計測が可能であった。しかし、透過法では B*面のエコーが検出されていない。これは、B 面を通過後、超音波が回折してしまい B*面の影響がみられなくなったためではないかと考えられる。

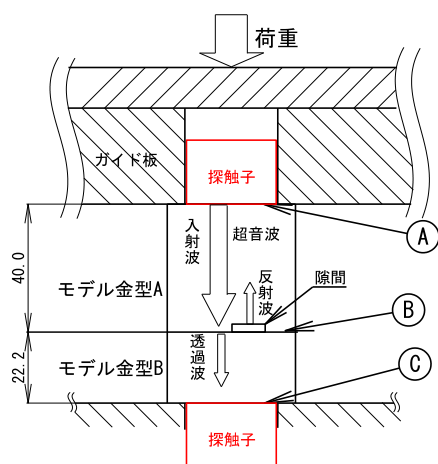


図 2.3.34 超音波による溝計測（透過法）

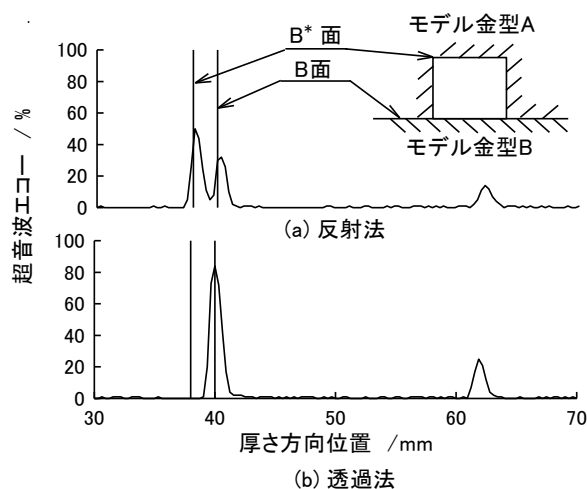


図 2.3.35 探傷法による計測波形の差

次に、上金型の溝深さを 2.0mm とし、溝幅が反射波の強度に及ぼす影響を調べた。その結果を図 2.3.36 に示す。溝幅が広くなることで、溝部からの反射量は増加し、境界面からの反射量は減少した。これにより、溝幅により超音波の反射量が変化するということがわかった。

上金型の溝幅を 2.0mm とし、溝深さが反射波の強度に及ぼす影響について調べた。その結果を図 2.3.37 に示す。溝の深さでは、超音波エコーの強さはほとんど変化しない。しかし、図 2.3.38 に示すように、溝の反射面までの測定距離が伸びたことによって、溝部の反射位置が移動した。これにより、境界面と溝の反射位置の差によって、溝の深さを測定できることがわかった。

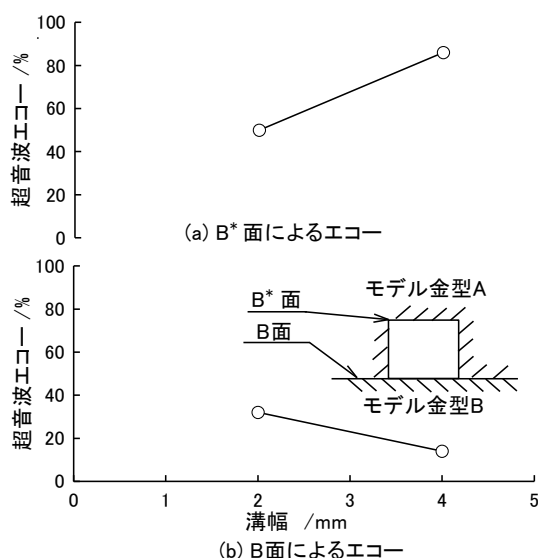


図 2.3.36 溝幅による影響 (溝深さ 2mm)

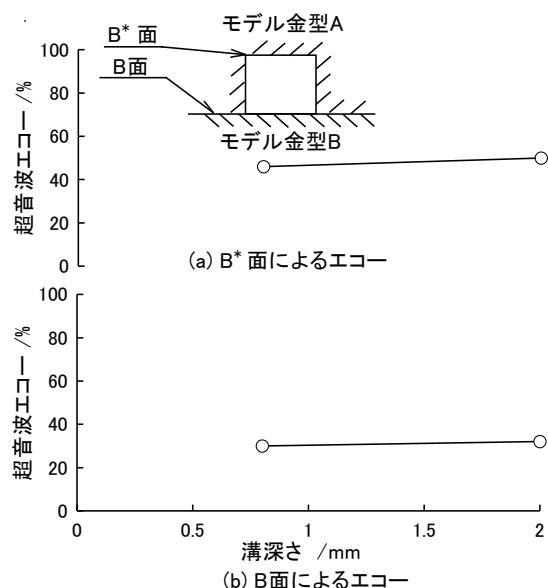


図 2.3.37 溝幅による影響 (溝深さ 2mm)

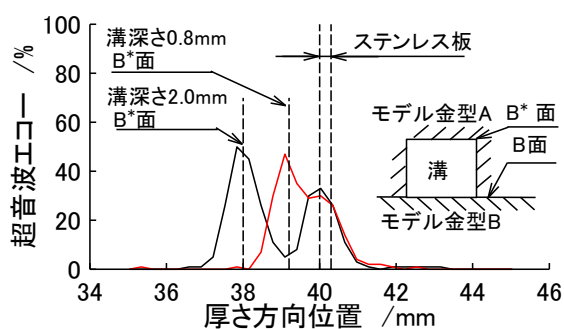


図 2.3.38 溝深さの計測

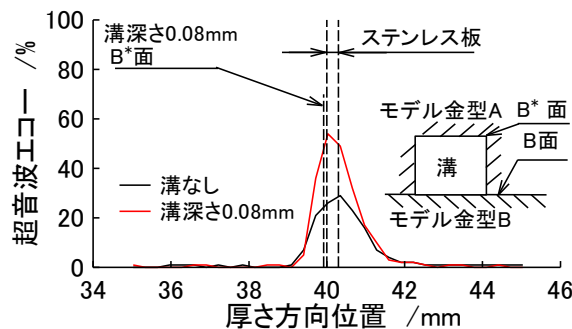


図 2.3.39 溝深さの計測

さらに、金型間に厚さ 0.3mm のステンレス板を挟み反射波の強度に及ぼす影響について調べた。その結果を図 2.3.39 に示す。ステンレス境界面での波形を確認することが出来なかった。分解能は探触子の周波数や超音波出力波形などに依存する。特に境界面が極めて近傍にある場合、両者のエコーが干渉し十分な分解能が得られない可能性がある。従って、周波数や波形をパラメータとして、その影響を調査する必要がある。しかしながら、ステンレスの板厚より深さの浅い溝を付け実験を行った結果、溝がない金型よりも波形が高く現れた。これは、溝部で反射が生じたためと考えられる。これにより溝の深さが探触子の分解能より浅い場合でも超音波の反射が生じるということがわかった。これは、わずかな隙間が生じた場合、そこに生じる空気層により、超音波が全反射し超音波エコーが大きくなったと考えられる。

【結論】

- (1) 境界面に面圧がかかることで反射強度は一定になる。
- (2) 反射面の面積により反射強度は変化する。
- (3) 隙間の深さにより超音波の反射位置が変化する。
- (4) わずかな隙間でも超音波は反射する。
- (5) 隙間と境界面の波形を分解できれば、隙間の測定は可能である。

2-4 IT 技術開発課題への対応

2-4-1 材料特性の測定と測定値をベースとした FEM 解析

この研究は東京農工大学が実施した。

[材料特性の把握]

(1) 目的・目標

プレス成形における割れやスプリングバック量を高精度に予測するためには、材料の塑性変形挙動を精度よく再現できる材料モデルの選定が不可欠である。

本研究では供試材である SUS304（初期板厚 $t_0 = 0.2\text{mm}$ ）の引張時、除荷時および圧縮時の変形特性を正確に測定する目的で面内反転負荷試験を行った。また、SUS304（初期板厚 $t_0 = 0.1\text{mm}$ ）の各種材料特性値、二軸応力下における塑性変形挙動、等塑性仕事面を測定し、FEM 解析に使用する異方性降伏関数を同定する目的で単軸引張試験および二軸引張試験を行った。

(2) 研究方法

(a) 人員

桑原 利彦：教授

村社 聡子：実験およびデータ整理協力者

(b) 研究方法

①面内反転負荷試験

・面内反転負荷試験片

本試験で使用した面内反転負荷試験片を図 2.4.1 に示す。試験片寸法は、JIS5 号試験片に基づく寸法とした。試験片は圧延直角方向のものをを用いた。

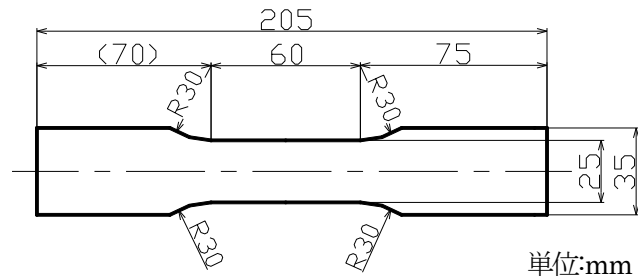


図 2.4.1 面内反転負荷試験片形状

・試験機

[単軸引張試験機] 本試験で使用した島津製作所製 AUTOGRAPH AG250kNG を図 2.4.2 に示す。ひずみの測定には島津製作所製伸び計 SG25-10（標点間距離 $L = 25\text{mm}$ ）および SG50-100（標点間距離 $L = 50\text{mm}$ ）を用いた。

[面内反転負荷試験機] 本試験で使用した面内反転負荷試験機 2 号機を図 2.4.3 に示す。本試験機の試験部は、雄歯・雌歯から成る上下の櫛歯金型より構成されている。試験片と金型の間には、摩擦低減のためにワセリンを塗布したテフロンシートを挟んでおり、金型の上方からしわ抑え力をかけ、櫛歯が噛み合った状態で反転変位させることにより、試験片を座屈させることなく面内反転負荷試験を行うことが可能となっている。



図 2.4.2 単軸引張試験機外観図

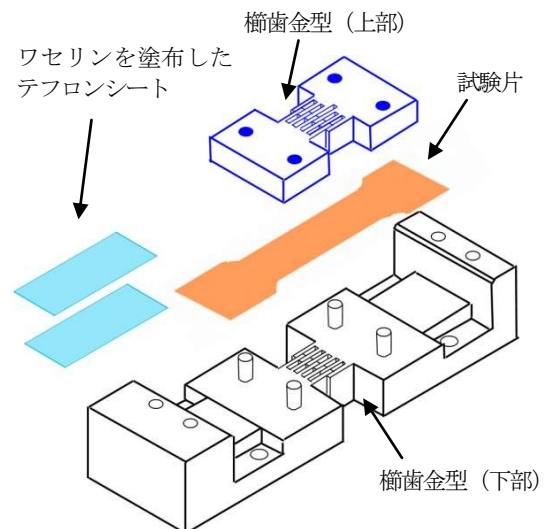


図 2.4.3 面内反転負荷試験機概念図

・実験方法

高ひずみ域における引張時、除荷時および圧縮時の変形特性を正確に測定するために、供試材にそれぞれ約 2.5%、5%、10%、15%、20%の予ひずみを与えた後、除荷を行い負荷方向を反転させ後続の圧縮変形における応力-ひずみ曲線を測定した。

しかしながら、本試験を用いて付与することのできる予ひずみは 5%程度が限度である。そこで、図 2.4.4 に示すように、まず島津製作所製 AUTOGRAPH AG250kNG を用いて、それぞれ約 4%、9%、14%、19%の予ひずみを与えて一旦除荷した (図 2.4.4 (a))。その後、面内反転負荷試験機を用いて約 1~2%の伸びひずみを与えた後 (約 2.5%の予ひずみ材は、すべての予ひずみを面内反転負荷試験により与えた)、除荷を行い、負荷方向を反転させ約 1~2%の圧縮変形を加えた (図 2.4.4 (b))。

なお、負荷する面圧は供試材の 0.2%耐力の 1%に相当する 2.8MPa とした。また、使用したひずみゲージは共和電業製一般用ひずみゲージ KFG-02-120-C1-16L1M2R である。

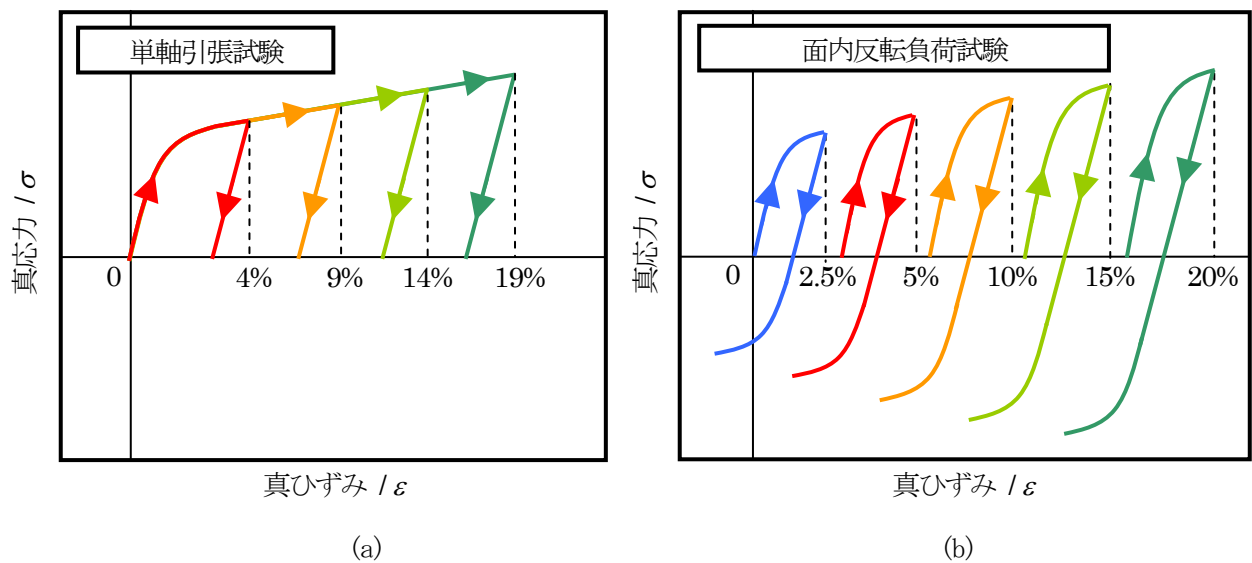


図 2.4.4 実験条件

②単軸引張試験

・単軸引張試験片

本研究で用いた単軸引張試験片はJISZ2201に規定されているJIS13号B型試験片に基づく寸法とした。試験片寸法および素板からの切り出し方向を図1.8(a), (b)に示す。試験片は、圧延方向から 0° 、 22.5° 、 45° 、 67.5° 、 90° の5方向に切り出した。本試験では各角度3本ずつ試験を行った。

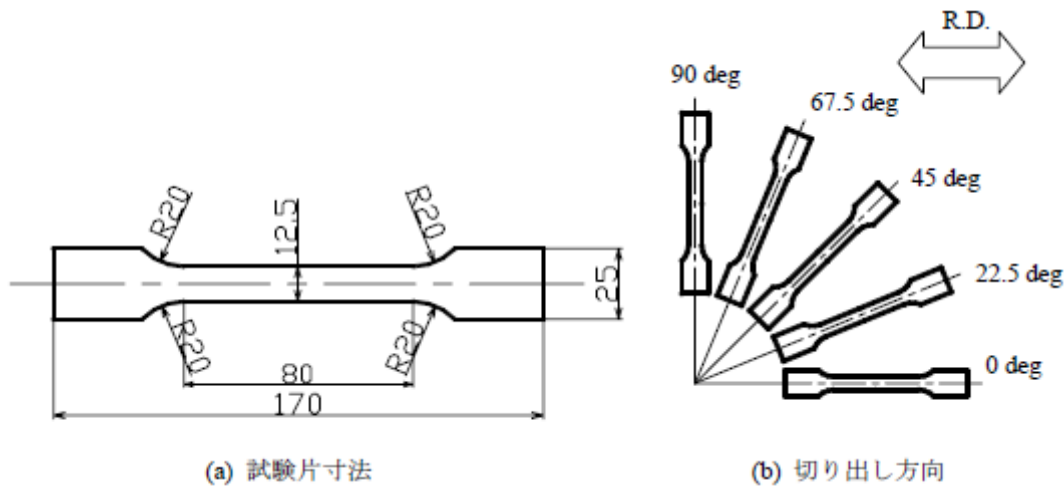


図 2.4.5 単軸引張試験片

・単軸引張試験機

試験機については、図2.4.2を使用した。

③二軸引張試験

・二軸引張試験片

本研究で用いた二軸引張試験片の形状を図2.4.6に示す。試験片の中心を座標系の原点とし、圧延方向を軸、圧延直角方向を軸とした。腕部には、レーザー加工により長さ60mm×幅0.2mmのスリットを7.5mm間隔に入れることで、60mm×60mmの中心部分(応力測定部)の変位拘束を極力小さくしている。

・二軸引張試験機

本研究で使用した油圧サーボ制御二軸引張試験機を図2.4.7に示す。対向する2対の油圧シリンダには同一の油圧が作用し、各軸の油圧は、制御用コンピュータの指令値に従ってサーボ弁により独立してフィードバック制御される。対向する油圧シリンダの変位はパンダグラフ型の等変位機構により強制的に等しくされ、試験片の中心は常に定位置に保たれる。ロードセルによる荷重の測定値および塑性域ゲージによるひずみの測定値は、0.5秒ごとにデータロガーにより測定され、計測用コンピュータに保存される。

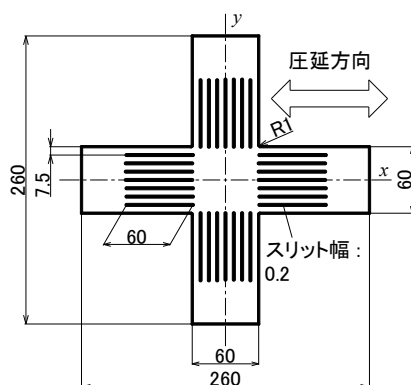


図 2.4.6 二軸引張試験片

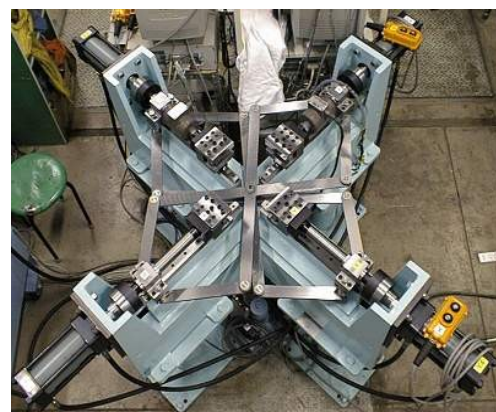


図 2.4.7 二軸引張試験機外観図

・実験方法

試験は荷重制御で行い、荷重比(圧延方向) : (圧延直角方向) = 4:1、2:1、4:3、1:1、3:4、1:2、1:4の7通りの線形荷重経路を設定した。各軸の油圧は制御コンピュータの指令値に従い、線形に増加させた。試験は各荷重比とも2回ずつ行った。なお、使用したひずみゲージは東京測器研究所製ひずみゲージYFLA-2である。

図2.4.7に本試験での真応力経路を示す。太い実線が二軸引張試験より得られた真応力経路、細い実線が理想的な線形経路を示しているが、ひずみの増加に伴い、試験より得られた経路は理想的な線形経路から外れていることが分かる。

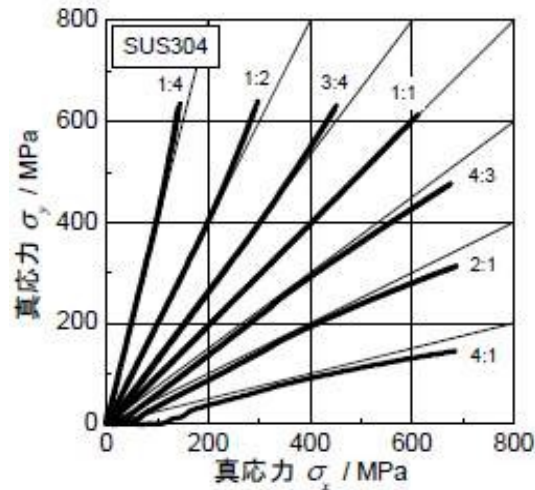


図 2.4.8 応力経路

(3)研究成果

①面内反転負荷試験

真応力-真ひずみ線図

図2.4.9に本試験により得られた真応力-真ひずみ線図を示す。試験片数はそれぞれ3本であるが、線がほぼ重なっていることから、本試験の再現性が確認された。

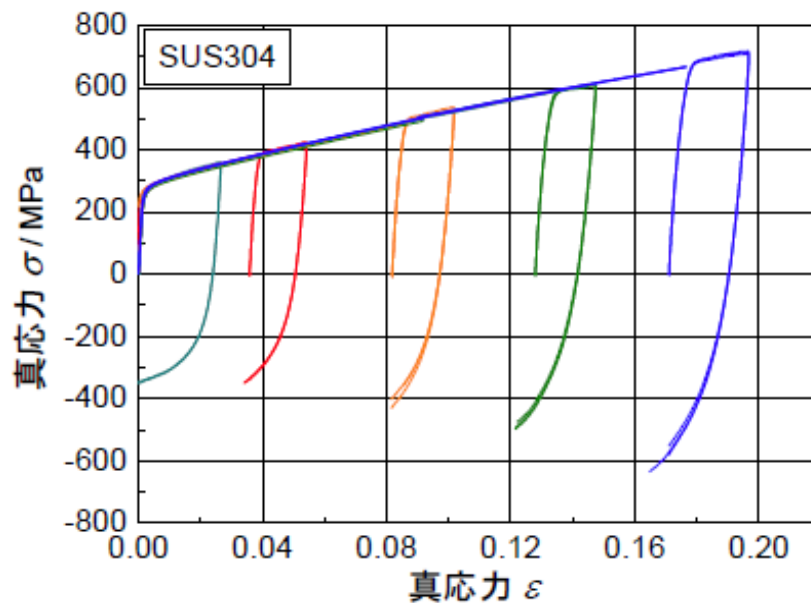
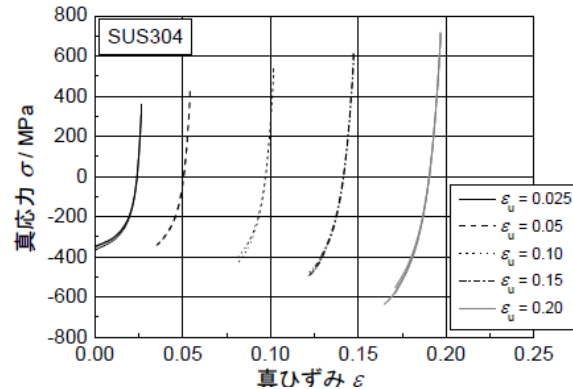


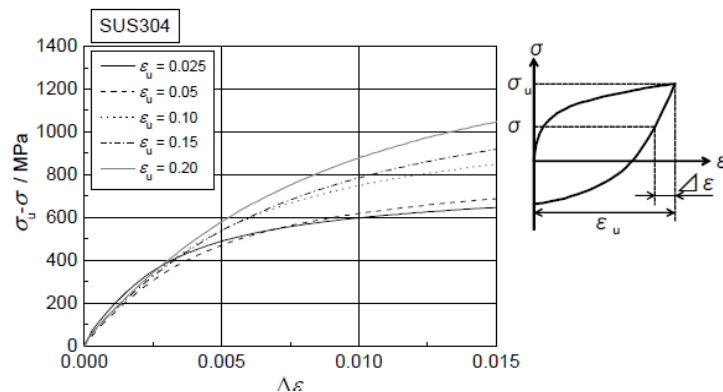
図 2.4.9 面内反転負荷試験による真応力-真ひずみ線図

除荷時および後続の圧縮変形における変形挙動

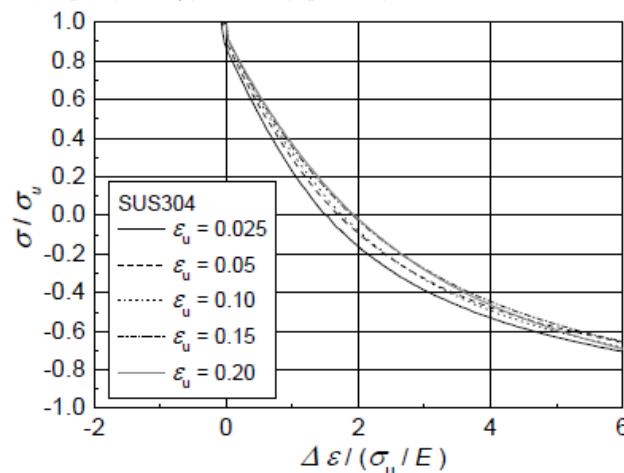
次に、面内反転負荷試験より測定された除荷時および後続の圧縮変形に着目することにした。図 2.4.10(a)、(b)、(c)に除荷時および後続の圧縮変形の応力-ひずみ曲線を示す。ここで、 ε_u は、供試材に与えた予ひずみ量の合計値を示している。図 2.4.10(b)は、図 2.4.10(a)の各曲線を平均し、 $\varepsilon_u=0.20$ における応力-ひずみ曲線を基準とし、 $\varepsilon_u=0.025, 0.05, 0.10, 0.15$ における応力-ひずみ曲線を、平行移動したものである。また、図 2.4.10(c)は今後、スプリングバックの初等解析を行う際に用いる近似式を求めるために作成した応力-ひずみ曲線である。ここで、 σ は時々刻々の応力の値、 σ_u は除荷直前の応力の値、 $\Delta\varepsilon$ は反転負荷以降のひずみの減少量、 E は初期引張時のヤング率を示している。図 2.4.9(a)、(b)より、本供試材においては、バウシング効果（付録参照）が生じていることが分かる。



(a) 除荷時および後続の圧縮変形における応力ひずみ曲線



(b) 平行移動後の除荷時および後続の圧縮変形における応力ひずみ曲線



(c) 近似式作成のための応力-ひずみ曲線

図 2.4.10 異なる予ひずみ量を与えたときの除荷および後続の圧縮変形における真応力-真ひずみ曲線

次に、除荷時および後続の圧縮変形における応力-ひずみ曲線が非線形的に減少しているかどうかを確認するため、瞬間勾配 $d\sigma/d\varepsilon$ を求めた。図 2.4.11 に除荷時および後続の圧縮変形における応力-ひずみ線図の瞬間勾配 $d\sigma/d\varepsilon$ を示す。グラフ中の直線は初期のヤング率を示している。図 2.4.11 より、除荷開始時において瞬間勾配は、初期のヤング率とほぼ同じ約 205GPa を示しているが、その後、除荷および圧縮変形の進行に伴い、瞬間勾配の値は連続的に減少する。このことより、除荷時および後続の圧縮変形における応力-ひずみ曲線の傾きは非線形となっていることが分かる。

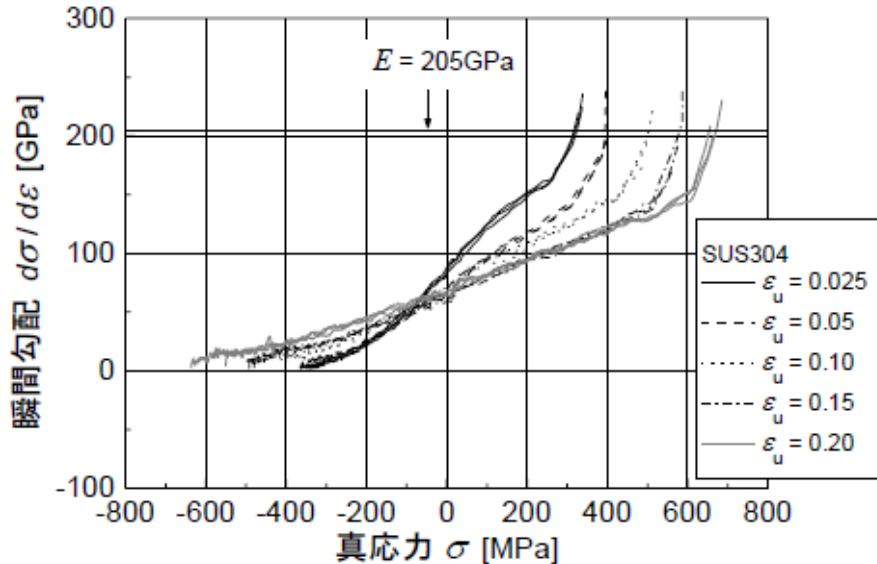


図 2.4.11 除荷時および後続の圧縮変形における瞬間勾配の変化

②単軸引張試験

真応力-対数塑性ひずみ線図

単軸引張試験より得られた全方向の真応力-対数塑性ひずみ線図を図 2.4.12 に示す。図より全方向において降伏伸びが確認された。また、圧延方向の塑性流動応力が他の方向に比べて最も高くなっていることが分かる。

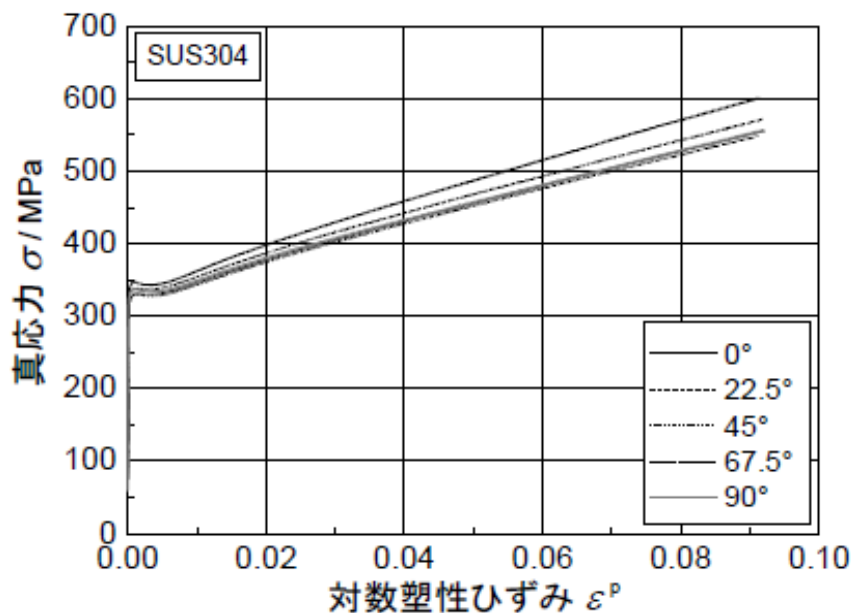


図 2.4.12 単軸引張試験による真応力-対数塑性ひずみ線図

機械的性質

単軸引張試験より得られた機械的性質を表 2.4.1 に示す。 r 値に関しては 0.9~1.2 前後と顕著な差はみられないことから、面内異方性はあまり大きくないと考えられる。

表 2.4.1 SUS304 の機械的性質

圧延方向 からの角度	E /GPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	C^* /MPa	n^*	a^*	r^{**}
0°	199	344	2067	0.671	0.065	0.938
22.5°	191	337	1890	0.652	0.068	1.116
45°	177	330	1837	0.661	0.070	1.263
67.5°	181	330	1805	0.643	0.067	0.992
90°	180	335	1818	0.654	0.071	0.777

$$*\sigma = C(\alpha + \varepsilon^p)^n \quad (\varepsilon^p = 0.002 \sim 0.093)$$

**単軸引張試験における公称ひずみ $\varepsilon_N = 0.1$ においての測定値

③二軸引張試験

等塑性仕事面

図 2.4.13 に等塑性仕事面の各応力点を平均したものを示す。各応力点から伸びる線はその時点における塑性ひずみ速度の方向を示している。

図 2.4.13 の等塑性仕事面の応力点を各 ε_0^p に対応する圧延 0° 方向の単軸引張試験における真応力 σ_0 で除して無次元化した。その結果を図 2.4.14 に示す。加工硬化に伴い等塑性仕事面が等方的に膨張するのであれば、すべての測定値は同一曲面上に載るはずである。図 2.4.14 より、荷重比 1:0、0:1 を除く全ての荷重比において等塑性仕事面が膨張する傾向がみられた。荷重比 0:1 においては、わずかではあるが等塑性仕事面が収縮する傾向がみられた。これらより、本供試材は異方硬化する材料であることが分かる。

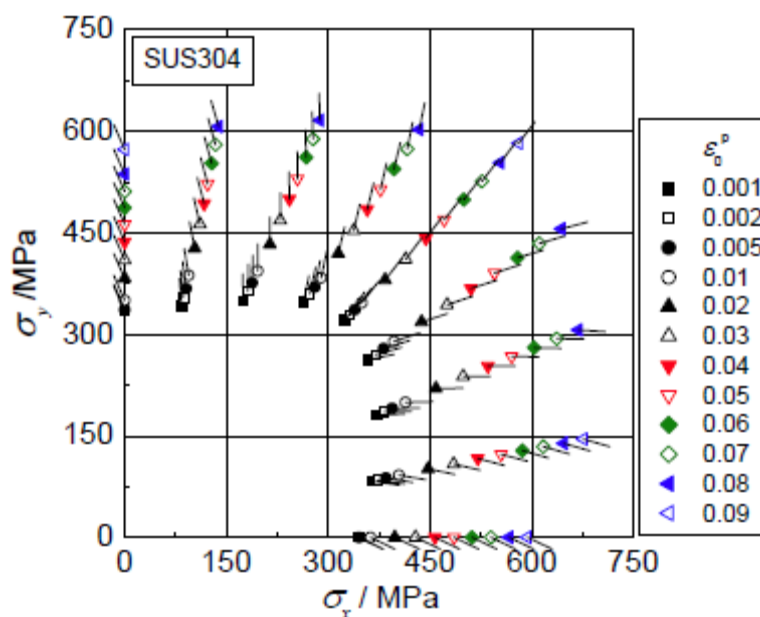


図 2.4.13 等塑性仕事面

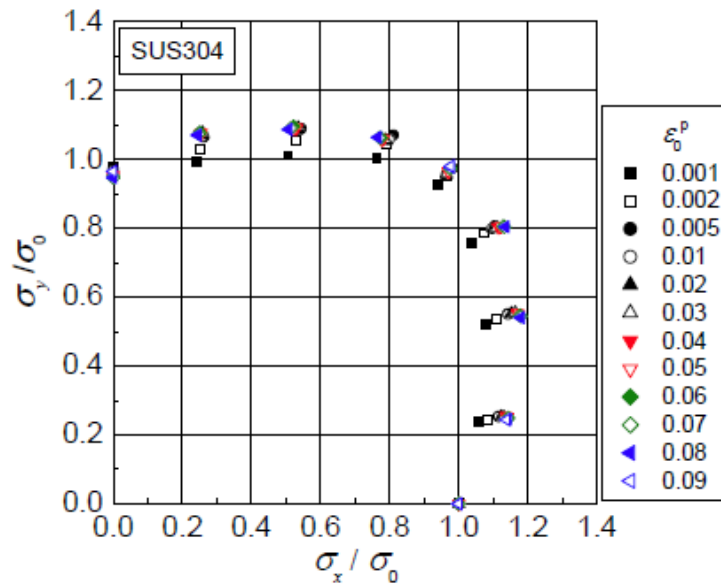


図 2.4.14 無次元化等塑性仕事面

各種降伏関数との比較

無次元化等塑性仕事面と各種降伏関数を比較することにより、供試材である SUS304（初期板厚 $t_0=0.1\text{mm}$ ）の降伏関数を同定する。比較に用いた降伏関数は、von Mises、Hill' 48、Yld2000-2d ($M=4, 6, 8$) の 5 種類である。

図 2.4.15 に無次元化等塑性仕事面と各種降伏関数をプロットしたものを示す。参考として図 2.4.15(a) に初期板厚 $t_0=0.2\text{mm}$ のものを載せている。無次元化等塑性仕事点、各種降伏関数は代表として $\epsilon_0^p=0.002$ 、 0.08 のものを載せている。各種降伏関数は、圧延 0° 方向の単軸引張試験より得られた降伏応力で無次元化してある。

さらに、目測だけでなく統計的に一致度のよい降伏関数を同定するため、実験により得られた値と各種降伏関数により得られた値との差を標準偏差の式から算出した。この差が最も小さい降伏関数が、本供試材の二軸応力下での塑性変形挙動を最も精度よく再現できると考えられる。図 2.4.16 に初期板厚 $t_0=0.1\text{mm}$ の標準偏差を示す。図 2.4.16 より、 $\epsilon_0^p=0.002$ においては次数 6 の Yld2000-2d 降伏関数が最も実験値との差が小さく、 $\epsilon_0^p=0.08$ においては次数 4 の Yld2000-2d 降伏関数が最も実験値との差が小さくなっていることが分かる。このことより本供試材の塑性変形挙動を最も精度よく捉えている関数は、 $\epsilon_0^p=0.002$ の塑性変形初期においては次数 6 の Yld2000-2d 降伏関数、 $\epsilon_0^p=0.08$ においては次数 4 の Yld2000-2d 降伏関数であるということが分かる。

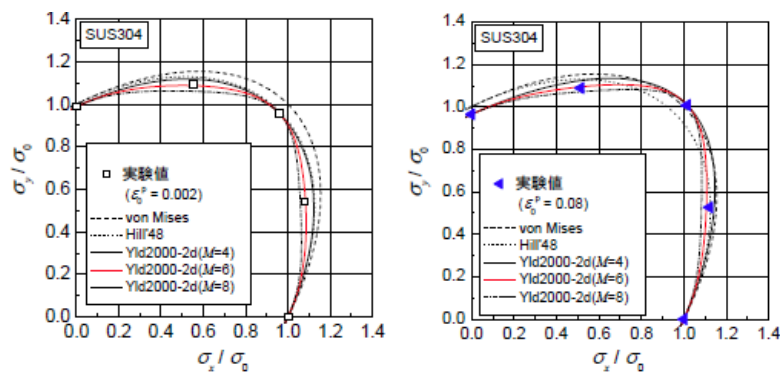
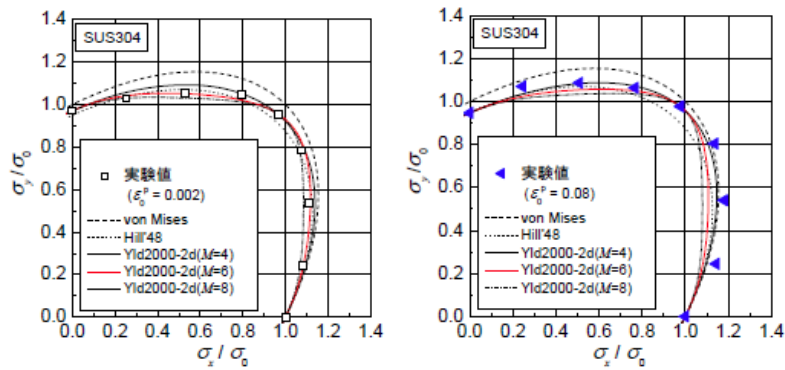

 (a) 初期板厚 $t_0 = 0.2\text{mm}$

図 2.4.15 無次元化等塑性仕事面と各種降伏関数との比較



(b) 初期板厚 $t_0 = 0.1\text{mm}$

図 2.4.15 無次元化等塑性仕事面と各種降伏関数との比較

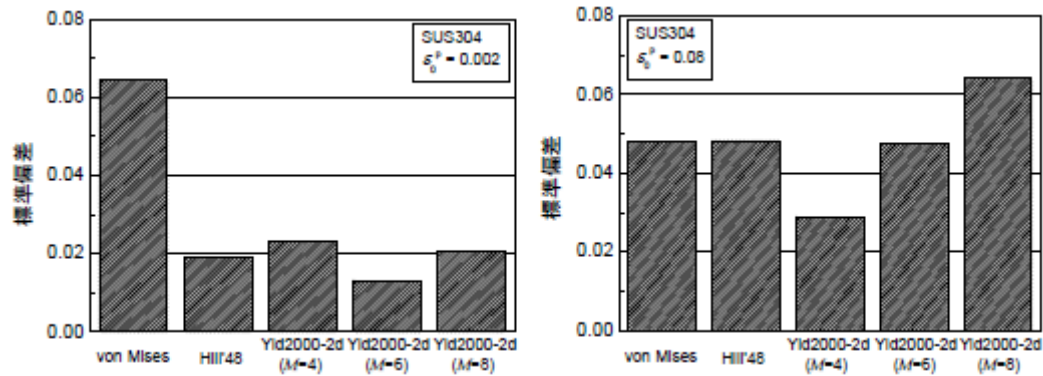


図 2.4.16 標準偏差

【結論】

- 本供試材においてバウシング効果の発現が確認された。
- 除荷開始時において瞬間勾配は、初期のヤング率とほぼ同じ値を示しているが、その後、除荷および圧縮変形の進行に伴い、瞬間勾配の値は連続的に減少することが分かった。このことより、除荷時および後続の圧縮変形における応力-ひずみ曲線の傾きは非線形となっていることが分かった。
- 本供試材の塑性変形挙動を最も精度よく捉えている関数は、 $\epsilon_0^p = 0.002$ の塑性変形初期においては次数 6 の Yld2000-2d 降伏関数、 $\epsilon_0^p = 0.08$ においては次数 4 の Yld2000-2d 降伏関数であるということが分かった。

[FEM 解析]

(1) 目的・目標

実際のプレス成形により得られた金属セパレータの形状を、FEM 解析による解析結果と比較し、その精度検証を行うことを目的とした。

(2) 研究方法

(a) 人員

桑原 利彦：教授

村社 聡子：解析およびデータ整理協力

(b) 使用ソフト

FEM 解析のソルバーとして ABAQUS / Standard Ver. 6.6-1 を使用した。解析モデルの作成には Solid Works, メッシュングには Hyper Mesh を用いた。また、ポストプロセッサーには ABAQUS / Viewer を用いた。

(c) 解析モデル

解析に用いたモデル寸法を図 2.4.17 に示す。モデルは対称性を考慮し A-A 断面における 2 分の 1 モデルとした。ブランクのサイズは、実際に実験で用いた寸法と同様の長さ 60 mm、厚さ 0.2 mm とし、要素には 4 節点低減積分平面ひずみ要素である CPE4R を使用した。また、上下パンチ、上下ホルダーは解析的剛体で作成した。

なお、ブランクの要素分割数は厚さ方向に 5、長さ方向に 1500 とした。

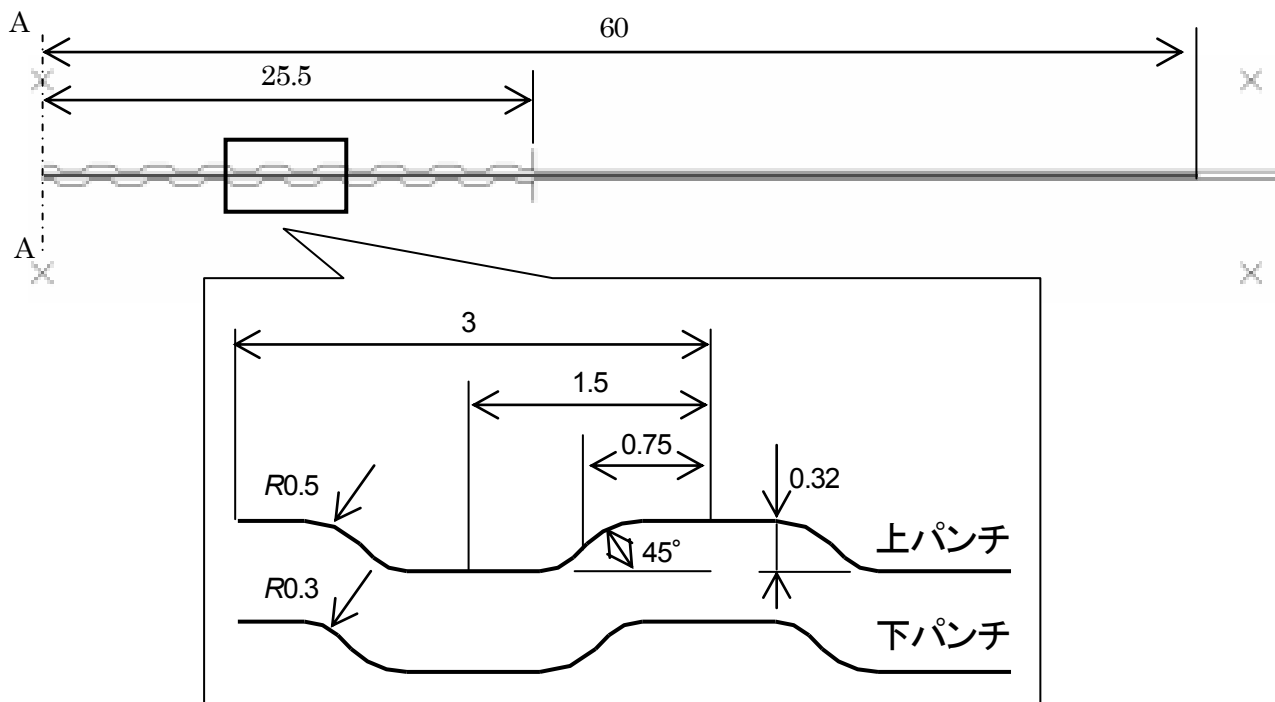


図 2.4.17 FEM モデル寸法

(d) 解析条件

降伏関数には等方性を仮定した von Mises を用いた。接触する面の摩擦係数 μ は、ブランク - 上パンチ、ブランク - 下パンチ、ブランク - 上ホルダー、ブランク - 下ホルダーのすべてを 0.1 とした。

(3) 研究成果

実際のプレス成形により得られた断面形状と、解析により得られた断面形状の比較を図 2. 4. 18 に示す。実際のプレス成形品は端部が下に反っているのに対し、解析結果はこれを再現できていない。これは解析においてバウシング効果を考慮していないことが原因であると考ええる。



(a) 実際のプレス成形品



(b) 解析結果

図 2. 4. 18 実際のプレス成形品と解析結果との比較

【結論】

- ・実際のプレス成形品と FEM 解析の精度が一致しない理由として、解析でバウシング効果を考慮していないことが考えられる。

2-4-2 最適プレス条件の特定

この研究は東京農工大学が実施した。

(1) 目的・目標

FEM 解析により、最適プレス条件を特定する。

(2) 研究方法

(a) 人員

桑原 利彦：教授

村社 聡子：解析データ整理協力者

(b) 使用ソフト

FEM 解析のソルバーとして ABAQUS / Standard Ver. 6. 6-1 を使用した。解析モデルの作成には Solid Works、メッシュングには Hyper Mesh を用いた。また、ポストプロセッサには ABAQUS / Viewer を用いた。

(b) 解析モデル

解析に用いたモデル寸法を図 2. 4. 19 に示す。金型の角部半径を $R=0. 2$ 、 $0. 3$ の二水準としてモデルを作成した。

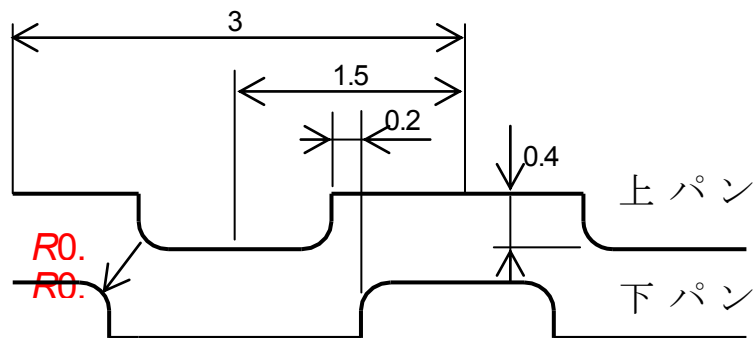


図 2. 4. 19 FEM モデル寸法

(c) 解析条件

降伏関数には等方性を仮定した von Mises を用いた。接触する面の摩擦係数 μ は、ブランク - 上パンチ、ブランク - 下パンチ、ブランク - 上ホルダー、ブランク - 下ホルダーのすべてを 0. 1 とした。

(3) 研究成果

下死点における角度を θ 、除荷後の角度を θ' として、スプリングバック量を求めた結果を図 2. 4. 20 に示す。本解析では対称性を考慮し、2 分の 1 モデルとしている。そのため図 2. 4. 20 においては x 軸が 0mm の所がモデルの中心となっている。モデルの中心部から離れるに従い $R=0. 3$ の方が $R=0. 2$ のものに比べてスプリングバック量が大きくなる。これより、 R 寸法を小さくすることでスプリングバックを抑制することが可能になると考える。

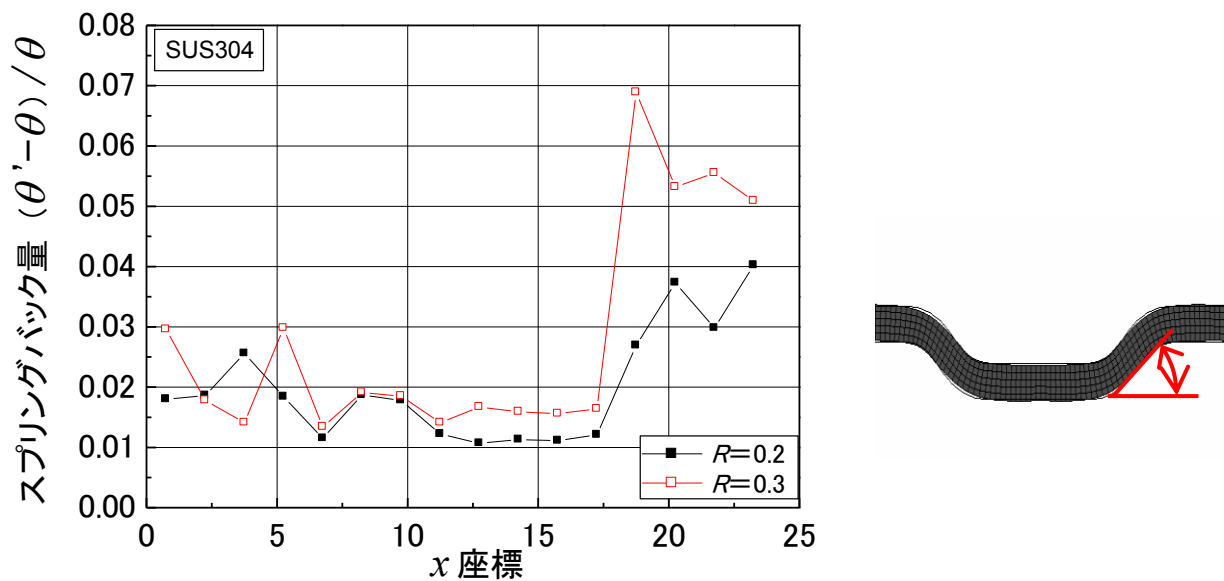


図 2.4.20 スプリングバック量

【結論】

- ・ R 寸法を小さくすることでスプリングバックを抑制できることが分かった。

<付録>

「バウシング効果」

バウシング効果の概念図を図 2.4.21 に示す。ある金属材料に引張変形を加えていき、塑性流動応力が σ_I に達したのち、除荷を行い、負荷方向を反転させる。等方硬化理論では、反転負荷を加え圧縮したときの応力-ひずみ曲線は、曲線 CBB' を点 C まわりに 180° 回転させた応力-ひずみ曲線 CEE' をたどり、 $-\sigma_I$ で降伏すると仮定する。しかし、実験では $-\sigma_I$ よりもはるかに低い σ_{II} で降伏することが確認されている。バウシングの原著論文では、バウシング効果とは再降伏応力 σ_{II} が初期の降伏応力 σ_y よりも小さくなることであると述べられているが、本研究では、再降伏応力 σ_{II} が反転負荷直前の塑性流動応力 σ_I よりも小さくなるような現象をバウシング効果 (Bauschinger effect) と呼ぶこととする。

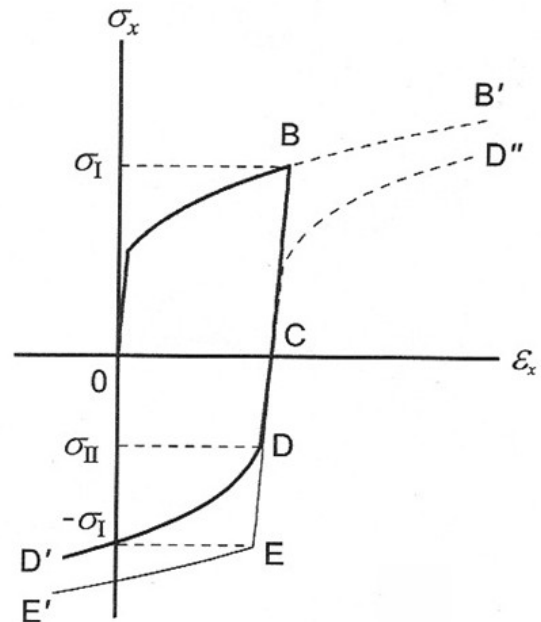


図 2.4.21 バウシング効果の概念図

2-4-3 金型・プレスの一体化制御技術の開発

この研究は神奈川工科大学が実施した。

(1) 目的・目標

金型・プレスの一体化制御技術の開発には、図 2.4.22 に示すように、下死点位置や金型-製品間の隙間のなどを計測するセンサーからの信号を、サーボプレスのコントローラへフィードバックする制御系を構築する必要がある。そこで、金型に設置されたセンサーからの信号を受信し、サーボの計測制御システムの開発を行った。本研究では、センサーを 2-3 で使用した超音波センサー（超音波探触子）を用いることとした。

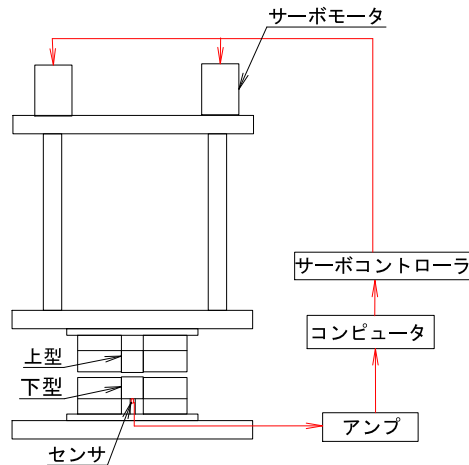


図 2.4.22 サーボプレス制御系

(2) 研究方法

(a) 人員

遠藤 順一：教授／総括研究代表者

萩野 直人：ポストドクター研究員

(b) 実験装置

計測・制御システムの検証には、図 2.4.23 に示す実験装置を用いた。また、図 2.4.24 に示すモデル金型を使用した。

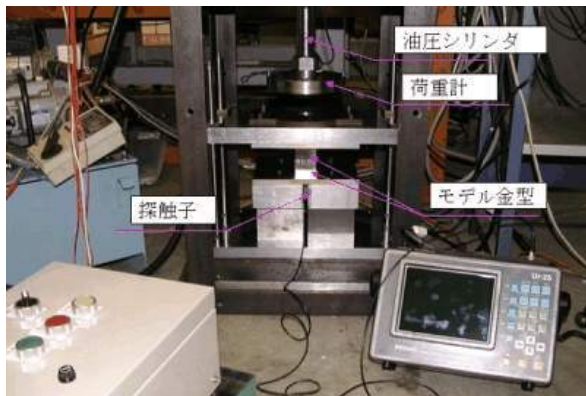


図 2.4.23 実験装置



図 2.4.24 モデル金型

(c) 計測装置

計測・制御系は図 2.4.25 に示すような接続を行った。図中に示す、A/D・D/A 変換機は 2-3-1 「センサー埋め込み金型の開発」で示した(株)Interface 製 PCI-3521 を使用した。センサー組み込み金型に組み込んだ探触子か

らの信号を超音波探傷器へ入力し、エコー強さとエコー位置をアナログで外部出力させる。そのアナログデータを計測用コンピュータに入力させてデータを保存すると同時に、あるレベル以下となると D/A 出力もしくはシリアルポートより、信号を出力できるような構成とした。

探傷器および探触子は図 2.3.8、図 2.3.9 に示す物を使用した。

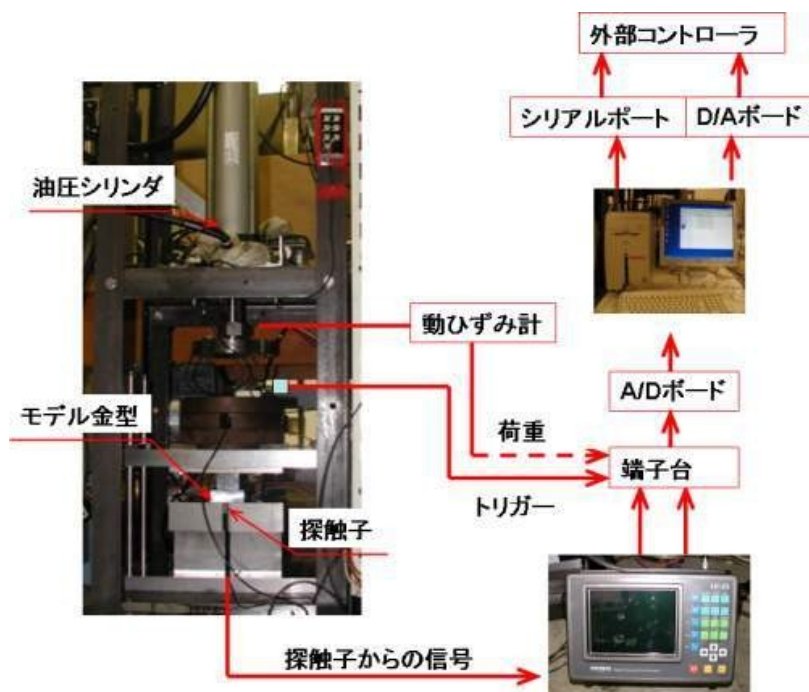


図 2.4.25 計測制御系の接続図

(3)研究成果

計測・制御用コンピュータで使用するプログラムを作成した。そのメイン画面を図 2.4.26 に示す。表示部上段には探傷器より入力されるエコー強さが表示される。このときエコー強さ 100%が+5V として出力される。また、下段には、D/A の出力結果を表示できるようにした。下段の表示部には、インプロセス計測で用いられる場合も想定し、探傷器より入力されるエコー位置も表示できる様にしている。現在は内部コードにより切り替えを行っているため今後、メイン画面より切り替えできるようにする。

D/A とシリアルポートの出力は画面上から選択できる。また外部トリガを有し外部からのデジタル信号を受けて計測を開始できるようにした。

図 2.4.27 にプログラムの動作画面を示す。このプログラムを計測制御コンピュータに組み込み、図 2.4.25 に示す様な計測制御系を構築し、センサーからの信号を受信し、出力が可能であるか調べた。

その結果を図 2.4.28 に示す。このとき超音波エコー強さが 50%のときに+5V の D/A 出力をするように設定を行った。50%以下になると外部に+5V の出力が行われことが分かる。よってコントローラまでの計測制御系を構築できた。このプログラムを元に隙間の量とエコー強さの関係をプログラムに組み込み、その値に比例したフィードバック量を外部出力として出力できるようにする必要がある。また本プログラムは入力部の多チャンネル化は容易であることから、このプログラムをベースとして、インラインでの形状計測システムを構築し、インライン計測技術の開発を行う。

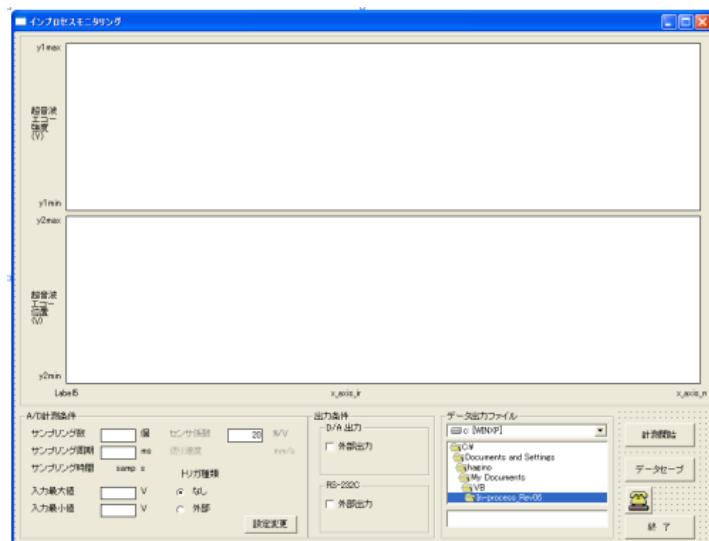


図 2.4.26 計測・制御プログラム

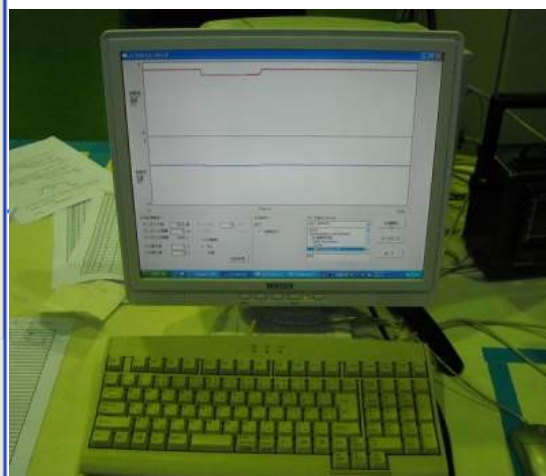


図 2.4.27 計測・制御プログラムの動作画面

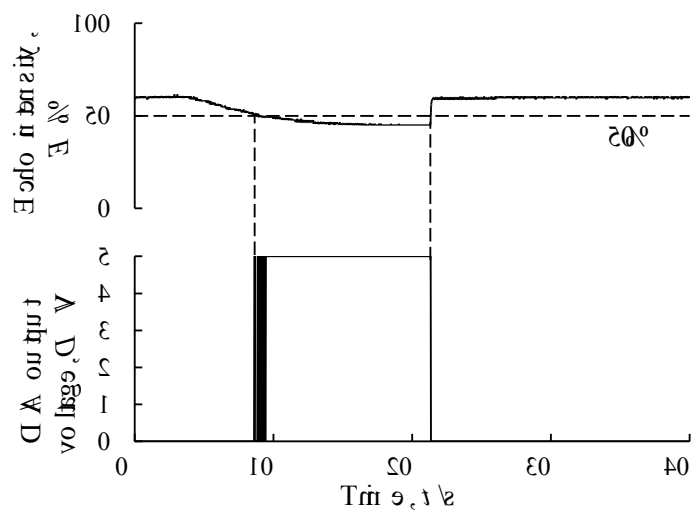


図 2.4.28 超音波エコーピークと D/A 出力の時系列データ

2-5 金属セパレータ量産技術の開発

この研究は、三吉工業株式会社と株式会社秦野精密が中心となって実施した。

固体高分子型燃料電池のセル部品であるセパレータの量産化に向けて、本研究においては各材料メーカーが研究開発中の金属セパレータ材料を想定して、極薄板で難加工材料のプレス加工技術の研究開発を行ってきた。

三吉工業株式会社は、量産化が必要とされる金属セパレータの形状を燃料電池メーカーとの技術連携によりモデル化し、研究モデルをもとに順送型を設計し、高速ジグボーラにより高精度な金型製作の研究開発を行い、3000 kN ダイレクトサーボプレスを使用して高精度なプレス加工の研究開発を行い、プレス加工における問題点の抽出を行った。

秦野精密では、FBプレスを用いた量産技術を確立し、60spm程度で製造できる技術を目指した。

また、より効果的に量産金型を開発するために、東京農工大学で三次元シミュレーションを行った。

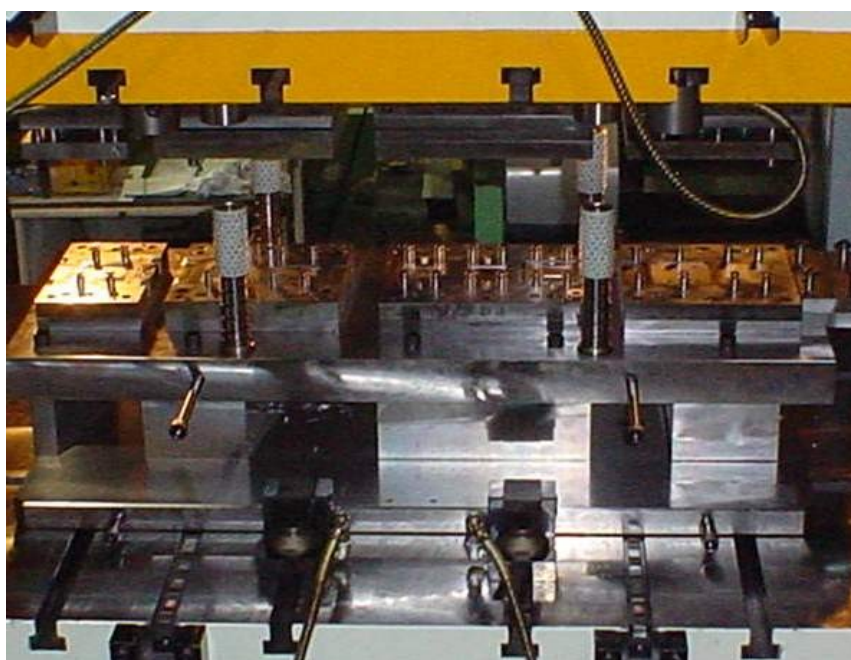


図 2.5.1 HFS200 モデルセパレータ順送型によるプレス加工

2-5-1 順送型による量産技術の開発

[三吉工業株式会社]

(1) 目標・目的

固体高分子型燃料電池のセル部品であるセパレータの量産化に向けて、本研究においては各材料メーカーが研究開発中の金属セパレータ材料を想定して、2-1 から 2-4 までの研究で極薄板で難加工材料のプレス加工技術の研究開発を行ってきた。近い将来において量産化が必要とされる金属セパレータの形状を燃料電池メーカーとの技術連携により金属セパレータを研究モデル化し、研究モデルをもとに、高速ジグボーラにより高精度な発電部形状の金型製作の研究開発を行ってきた。また、3000 kN ダイレクトサーボプレスを使用して高精度なプレス加工の研究開発を行い、プレス加工における問題点の抽出研究を行ってきた。

本項では、燃料電池メーカーに向けて燃料電池の金属セパレータ加工で市場参入を図るため、より具体的な金属セパレータの量産技術の開発を目指すために、極薄板難加工材料での金属セパレータ用順送型を製作し、より

現実的な量産技術の研究開発を行った。

(2) 研究方法

(a) 人員

久保田 誠：技師長

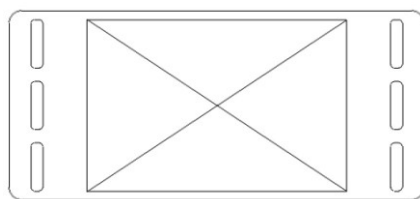
南雲 英樹：リーダー

桜井 正勝：サブリーダー

(b) 研究開発用モデル金属セパレータ

現実的な量産技術の研究開発に向け、2-1 から 2-4 までの研究開発をもとに、図番：FCS0907、品名：Hic 金属セパレータを決定し研究開発を行うこととした。

製品図を図 2.5.2、スケルトン図を図 2.5.3、全体順送型図を図 2.5.4 に示す。



図番：FCS0907

品名：Hic 金属セパレータ

材質：SUS304 板厚：t0. 1 mm

図 2.5.2 セパレータ形状

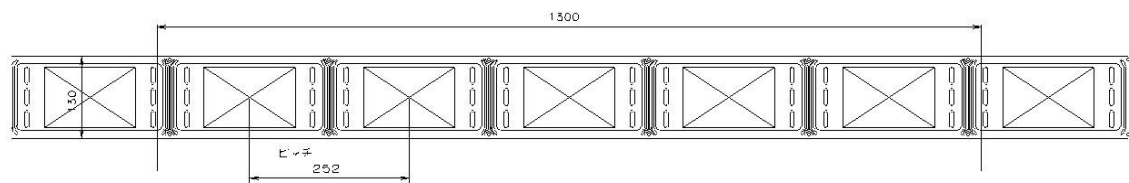


図 2.5.3 スケルトン図

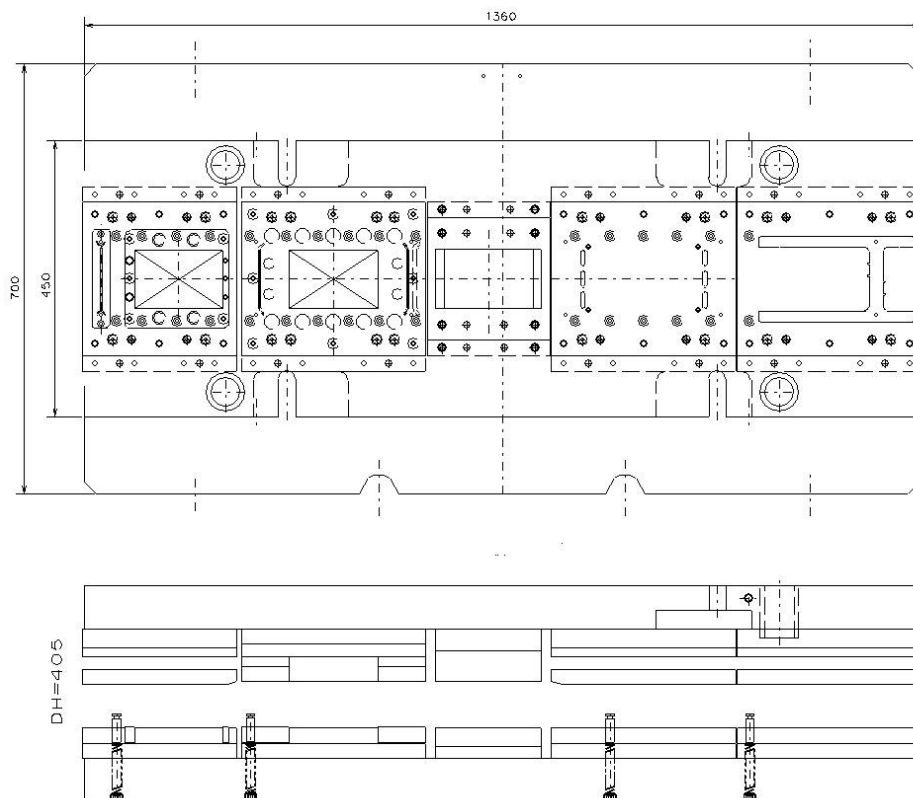


図 2.5.4 全体順送型図

(3) 研究成果

(a) 超精密ワイヤー放電加工機の加工研究

プレス量産化に向けては、順送加工化がコスト低減のために必要不可欠で、金属セパレータにおいても順送金型を製作し量産技術の開発が求められる。そのなか、極薄板難加工材料（板厚 0.1mm）の抜きクリアランスは 5 μ 以下の精度と部品間のピッチ精度も μ オーダの精度を必要とすることから、この飛躍的に高い加工精度を満足するため、超精密ワイヤー放電加工機での加工研究が必要と判断した。そこで、今年度の機器設備選定において、超精密ワイヤー放電加工機を導入し加工研究を行った。

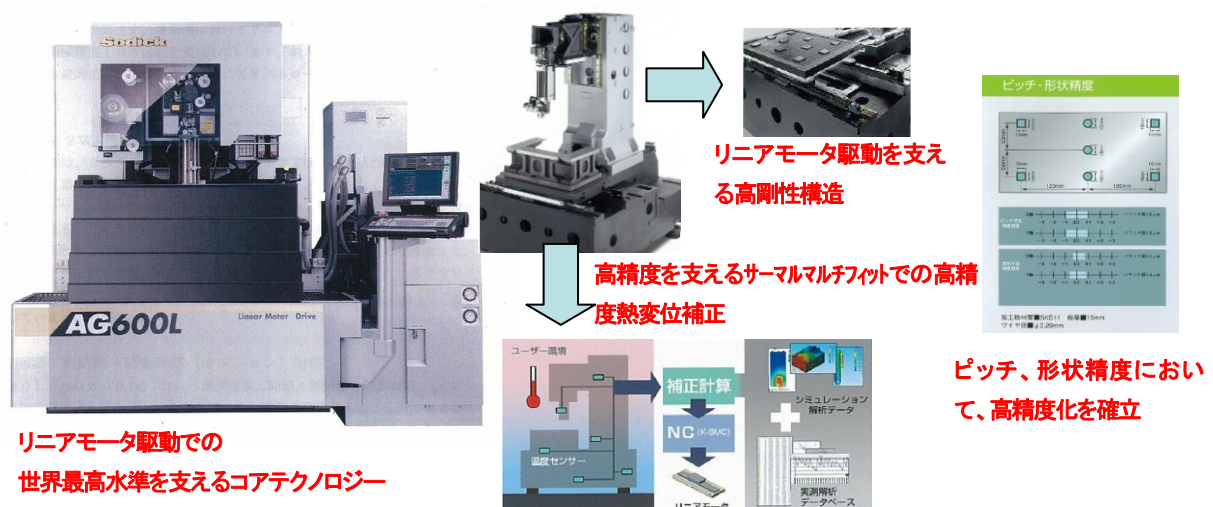
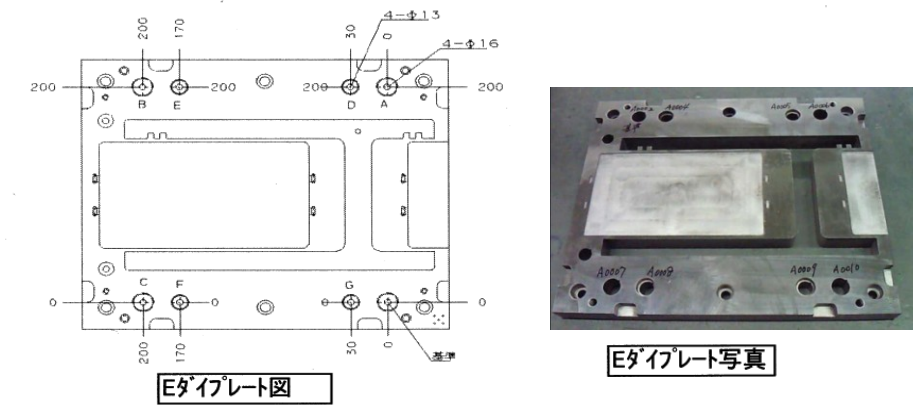


図 2.5.5 超精密ワイヤー放電加工機（ソデック製；AG600L）



超精密ワイヤー放電加工研究の測定データ

	直径(Φ16)	X	Y
基準	16.0025		
A	16.0028	-0.0015	200.0017
B	16.0020	200.0013	200.0005
C	16.0023	200.0017	-0.0013

	直径(Φ13)	X	Y
D	13.0123	30.0013	200.0010
E	13.0120	169.9985	200.0015
F	13.0131	170.0018	0.0018
G	13.0125	30.0027	-0.0026

図 2.5.6 超精密ワイヤー放電加工機を用いた加工結果

(b) 研究用順送金型の製作とセパレータのプレス加工実験

研究開発で製作した研究用順送金型の写真を下記に示す。



図 2.5.7 順送型の例

サーボプレス機を使用してプレス加工した、スケルトン、製品の写真を下記に示す。





図 2.5.9 セパレータ写真

(c) Hic 金属セパレータ (FCS0907) 発電部の形状測定結果
2-1 から 2-4 までの研究成果をもとに製作した順送型でのモデル金属セパレータの発電部測定データを下記に示す。良好な発電部形状が実現できた。

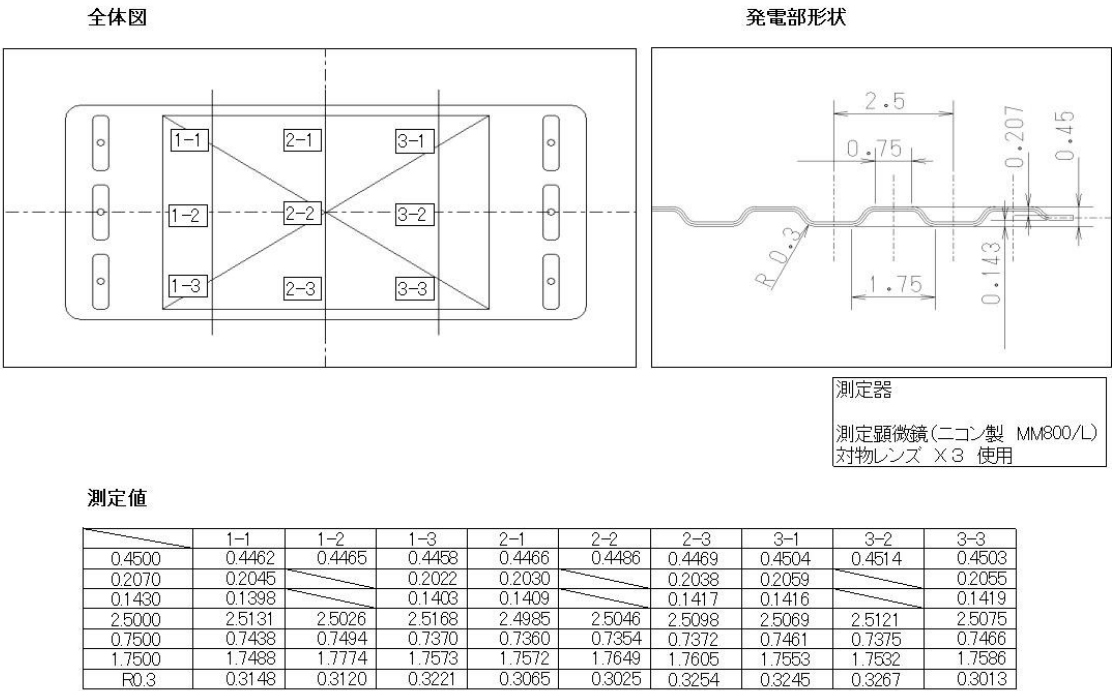


図 2.5.10 セパレータの形状計測結果

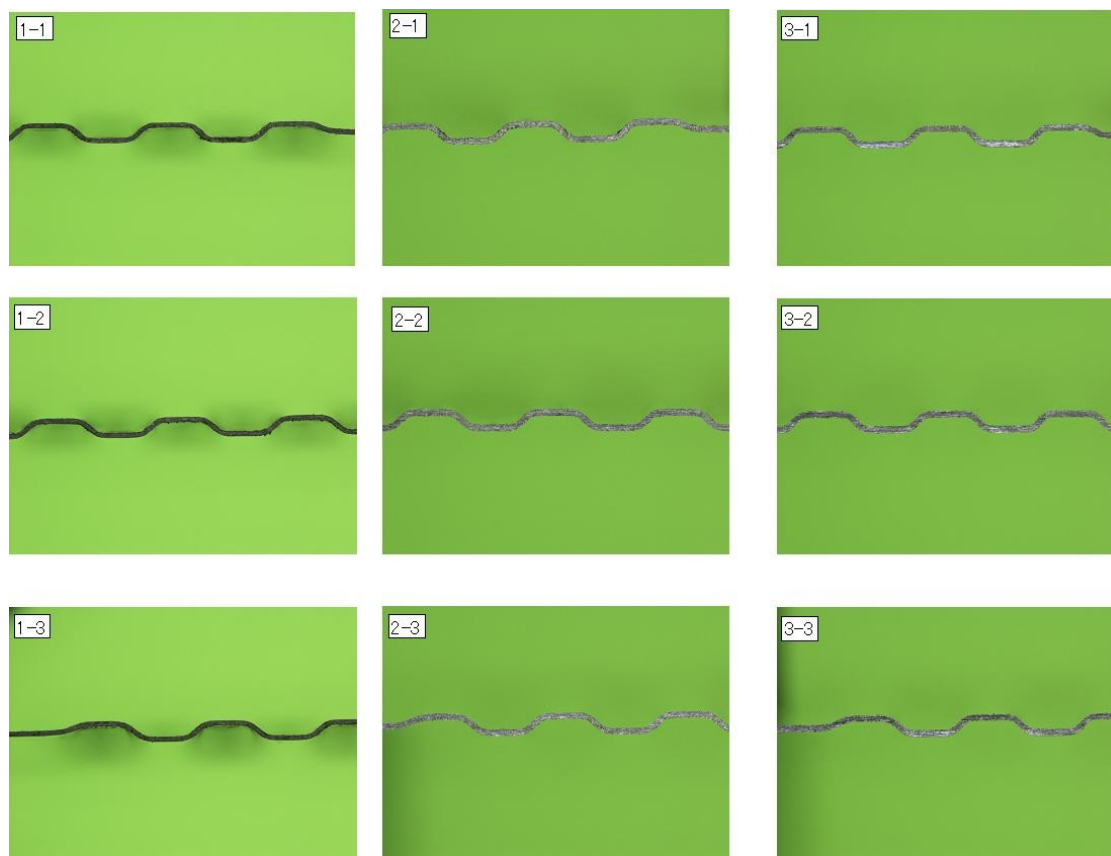


図 2.5.11 セパレータの形状計測結果

(c) まとめ

高精度なピッチ精度、抜き精度の順送型製作の向上が超精密ワイヤー放電加工研究により実現できた。また金属セパレータの順送プレス加工生産は初の試みであったが、量産における問題点の抽出、製品のばらつき等を確認することができた。

量産化の研究において、板鍛造によるセパレータ製造法の研究開発が求められた。研究開発した手法はこれに対処することができた。このセパレータは板の裏と表の溝が直交しており、薄板のプレス加工では製造が不可能なものである。ダイキャスト製品の代替として、板鍛造が求められた。

【結論】

2-1 から 2-4 までの研究をもとに具体的な金属セパレータの量産技術の開発を目指すために、極薄板難加工材料での金属セパレータ用順送型を製作し、より現実的な量産技術の研究開発を行った。

結果として、超精密順送型を製作する手法を確立し、これを用いて実際に順送型を作成し、サーボプレスにより量産試作を行い成功した。量産化の際のサーボプレスの最適モーションなどのノウハウを蓄積できた。これにより、今後積極的に燃料電池メーカーに向けて燃料電池の金属セパレータ加工で市場参入目指し、事業化に向けて、営業戦略を進める。

2-5-2 FB 型による量産技術の開発

[株式会社秦野精密]

(1) 目的・目標

ファインブランキング（以下FB）プレスは、通常、ある程度以上の厚板を加工対象としている。従って、FB プレスとFB 型により、極薄板を加工することは極めて難しい。実際に使用される形状に近い金属セパレータ形状(図 2.5.13 参照)にて、FB プレス用の金型を製作する。この金型を用いて加工条件（素材拘束力、加圧速度、加圧保持時間）を変化させ、溝形状への影響を調べて金属セパレータを量産する技術を開発する。

(2) 研究方法

(a) 人員

淵脇 健二：技術部長
三島 勲：品質保証部長
中原 弘二：技術部

(b) モデル製品・金型構造

FB プレス用金型を製作し、FB プレスにて SUS304 $t=0.1\text{mm}$ を素材拘束力、加圧速度、加圧保持時間等の加工条件を変化させて加工し溝形状への変化を確認する。

また 2-1 から 2-4 までの研究をふまえ溝形状成形部品形状を変更した。

モデルセパレータ形状と金型概要を示す。本金型は、溝形状を有する燃料電池発電部の外周を FB プレスの板押さえ圧 (F_v) 逆押さえ圧 (F_c) で拘束しながら成形出来る構造となっている。

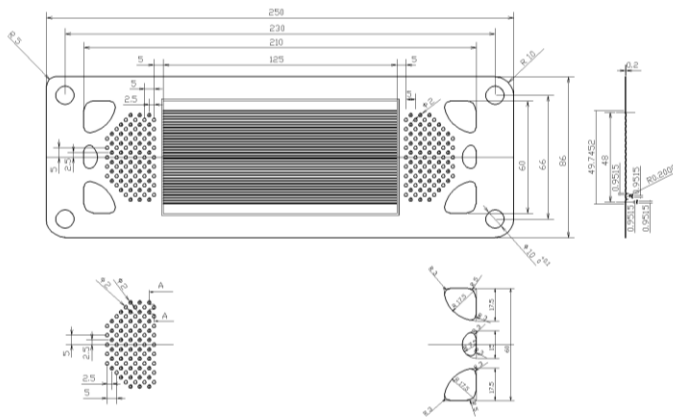


図 2.5.12 FB 型で量産試作したモデルセパレータ

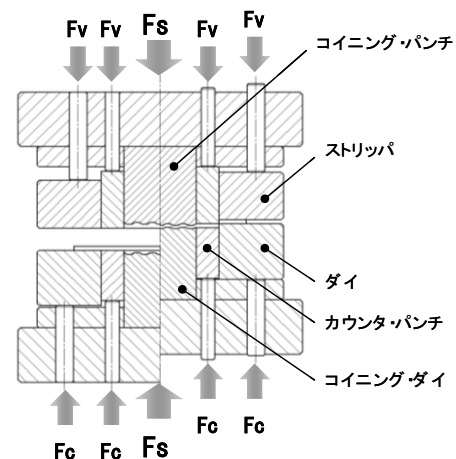


図 2.5.13 FB 金型概要

プレス加工での量産化には、金型加工の安定化が必要で、重要部分は CNC ジグボーラにて、高速度工具鋼を高速スピンドルとクーラント浄化システムを使用し製作した。

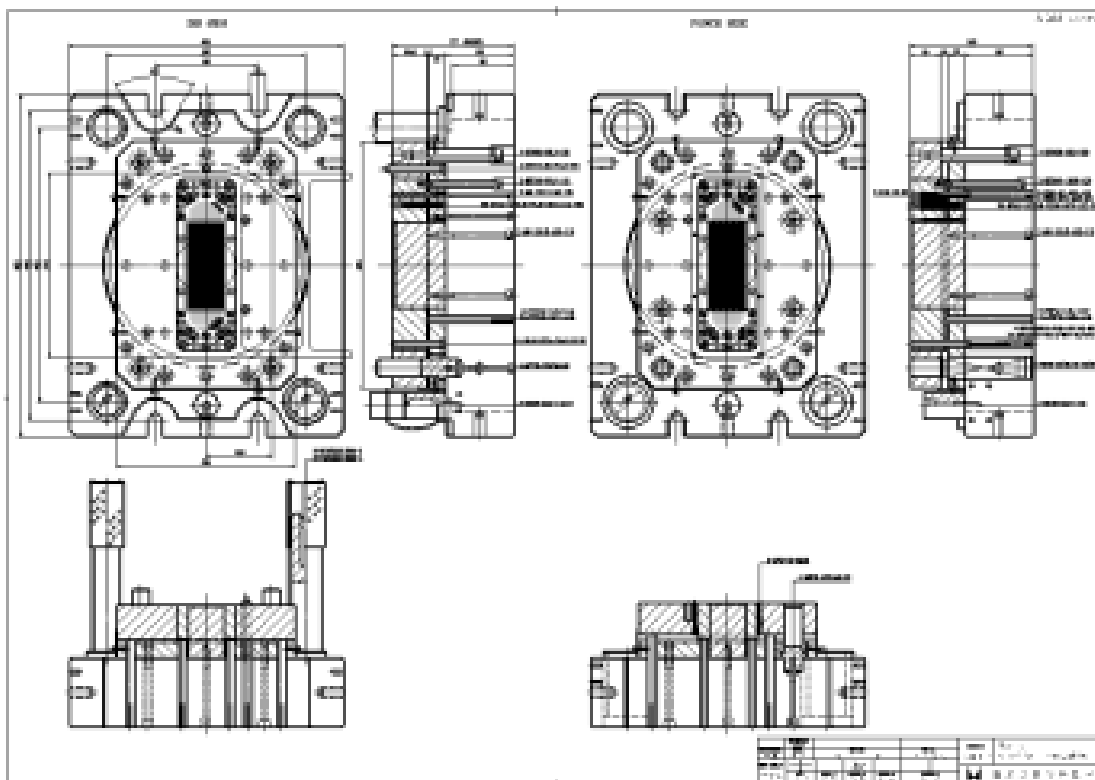


図 2.5.14 金型図面

図 2.5.15 に製作した FB 型を示す。

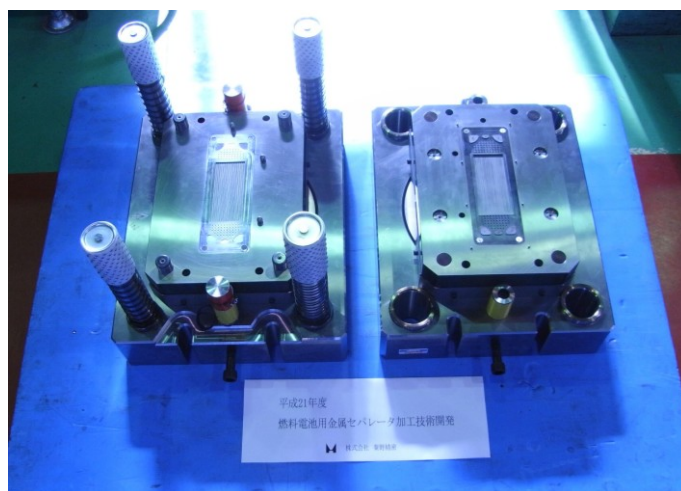


図 2.5.15 金型写真

(2) 研究成果

(a) 実験方法・条件

FB プレス用金型を製作し、FB プレスにて SUS304 $t=0.1\text{mm}$ を、加工条件を変化させて加工し、溝形状の寸法を評価した。実験には森鉄工(株)製 FB プレス FB400-FD を使用し、板押さえ圧 (V 圧)、逆押さえ圧 (C 圧)、加圧保持時間、加圧速度を変化させて、成形サンプルを作成した。



図 2.5.16 実験用プレス機

表 2.5.1 プレス機仕様

項目	仕様	項目	仕様
加圧力		金型取付部	
メイン加圧力	2000～4000 [kN]	上テーブル面積 (LR×FB)	850 x 50 [mm]
Vリング圧力	200～2000 [kN]	下テーブル面積 (LR×FB)	850 x 1000 [mm]
カウンター圧力	100～1000 [kN]	上部インサードリング	φ400 x 80 [mm]
スピード		下部インサードリング	φ400 x 80 [mm]
加圧速度	3～45 [mm/s]	シャットハイト	320～400 [mm]
接近速度	10～200 [mm/s]	最大オープンハイト	540 [mm]
下降速度	10～200 [mm/s]	最小シャットハイト調整読み取り値	0.01 [mm]
ストローク		Vリング径	φ300 [mm]
スライド運転時ストローク	30～140 [mm]	カウンター径	φ300 [mm]
スライド最大ストローク	220 [mm]	センターサポート径	φ85 x 上下 [mm]
Vリング最大ストローク	40 [mm]	機械総重量	
カウンター最大ストローク	40 [mm]	重量	24000 [kg]

表 2.5.2 加工条件

メイン圧	250															
V圧	50															
C圧	30															
加圧保持	0				0.1				0.5				1.0			
加圧速度	3	5	10	20	3	5	10	20	3	5	10	20	3	5	10	20

メイン圧	250															
V圧	80															
C圧	60															
加圧保持	0				0.1				0.5				1.0			
加圧速度	3	5	10	20	3	5	10	20	3	5	10	20	3	5	10	20

(b) セパレータ形状の測定と評価

図 2.5.17 に製品を図 2.5.18 に溝形状の測定方法を示す。測定には、東京精密製形状測定機を使用し、断面を測定した

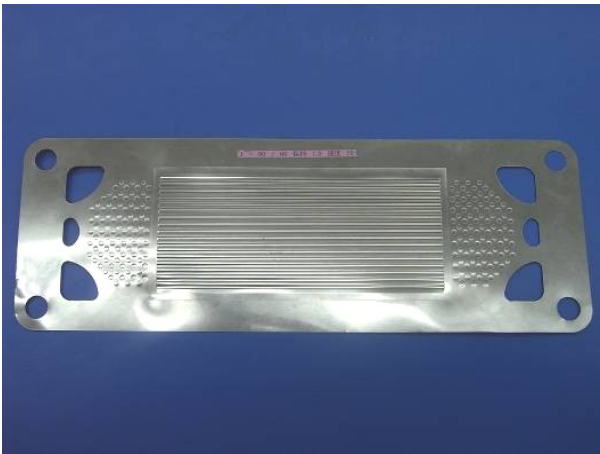


図 2.5.17 成形品

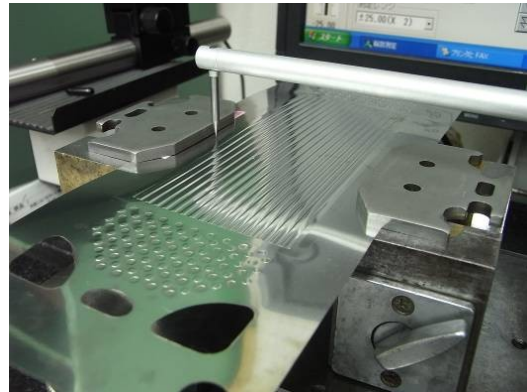
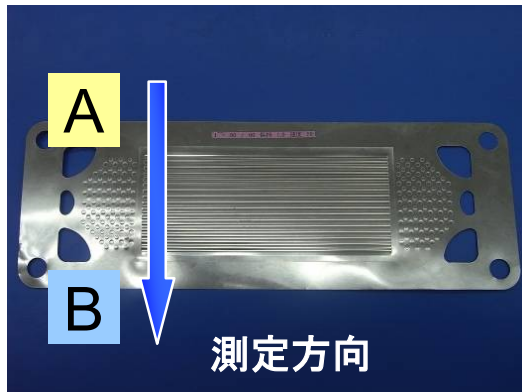


図 2.5.18 溝部形状測定方法

FB プレスにおける加工条件の素材拘束力、加圧速度、加圧保持時間などの条件を変化させてプレス加工を行い、溝形状を測定したところ、加工条件の変化による形状変化は認められなかった。これは、素材拘束力は今回設定の圧力で充分であり加圧速度、加圧保持時間に関しては、プレス機械剛性、金型剛性が十分で合ったものと考ええる。また、溝形状寸法は、金型形状に対してのスプリングバックは認められるものの、安定している。これは量産が可能であることを示している。図 2.5.19 に溝形状の測定結果を示す

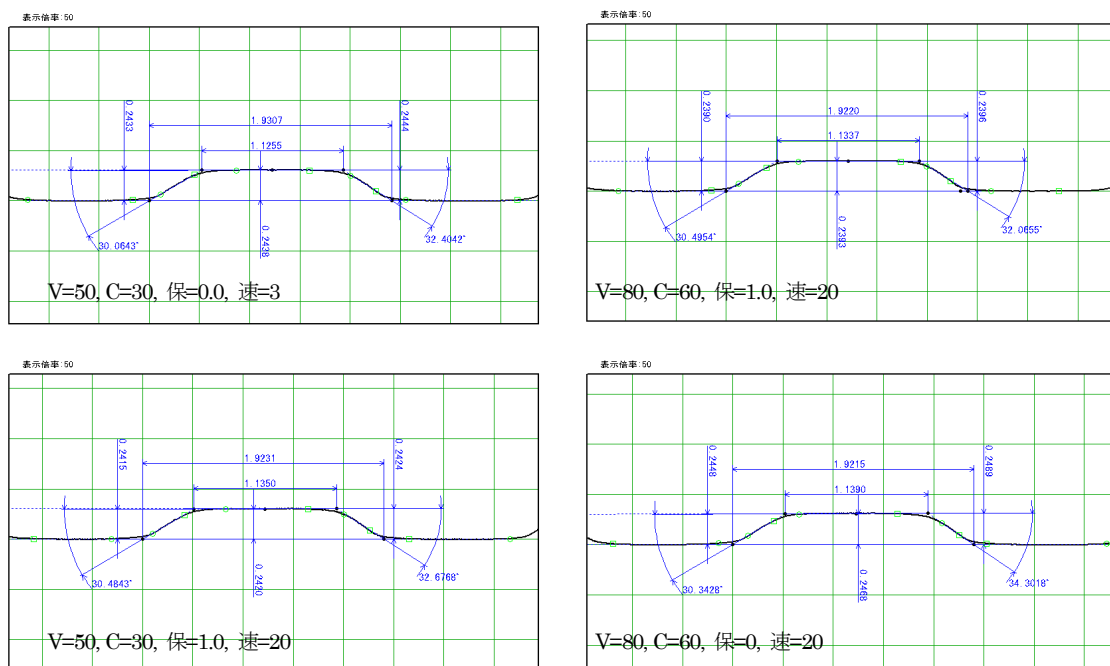


図 2.5.19 溝形状測定結果

【結論】

FB プレスと FB 型を用いて、極薄板の量産プレス加工の見通しをつけた。

2-4-3 3次元 FEM シミュレーションによる金型開発の短期化

[東京農工大、三吉工業株式会社]

課題4のIT技術への対応のなかの材料特性の測定と測定値をベースとしたFEM解析(2-4-1,2-4-2 参照)の応用として、金型設計への適用を試みた。

(1) 目的・目標

セパレータを模擬した浅絞り成形実験により得られた形状を有限要素シミュレーションによる解析結果と比較し、その精度検証を行う。図 2.5.20 に浅絞り形状を示す。この金型は三吉工業(株)が製作した。



図 2.5.20 解析対象

(2) 研究方法

(a) 人員

桑原 利彦：教授

村社 聡子：解析データ整理協力者

(b) 使用ソフト・解析モデル

使用ソフト→ABAQUS/Standard Ver.6.6-1

ABAQUS/Standard Ver.6.5-1

解析モデル→図 2.5.21 に示すモデルを用いた。対称性を考慮して1/4モデルとした。

降伏関数→von Mises, Hill '48,

Yld2000-2d ($M=4$)

摩擦係数→ $\mu = 0$

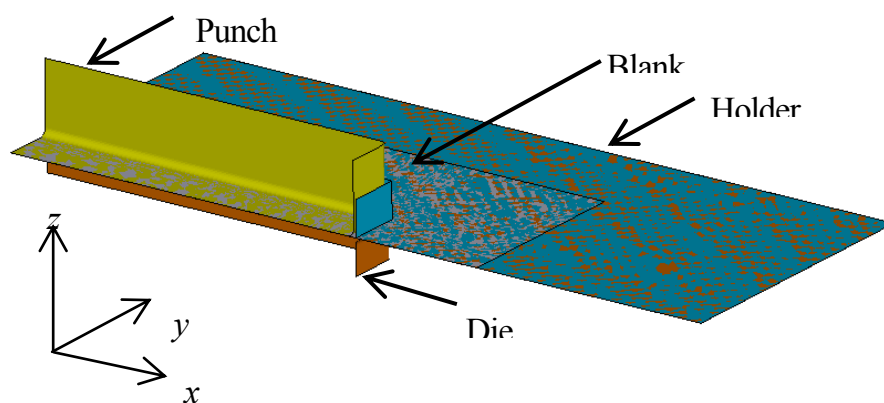


図 2.5.21 解析モデル

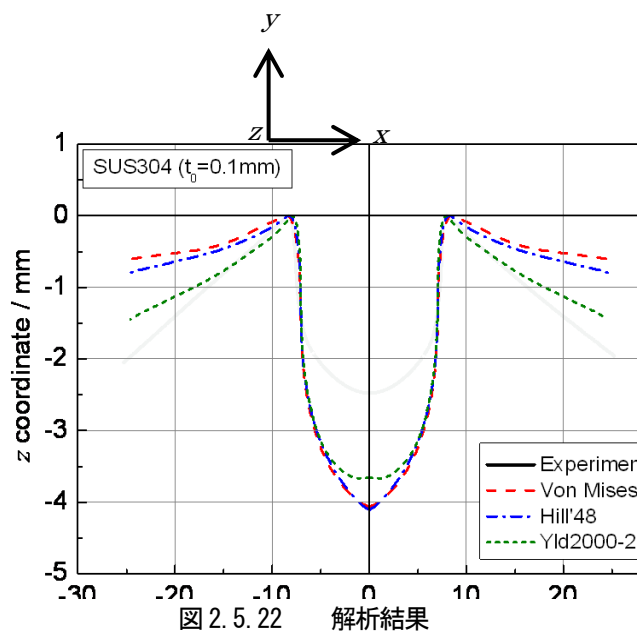


図 2.5.22 解析結果

(3) 研究成果

解析結果と実験結果の比較を図 2.5.22 示す。次数 4 の Yld2000-2d による解析結果が実験結果と最も近い傾向を示しており、異方性を考慮することによる解析精度の向上が確認された。

【結論】

極薄板の 3 次元プレス成形シミュレーションにおいては、異方性を考慮することが重要であることを見出し、実験との比較から、金型設計への適用により、トライアンドエラーによることなく、金型を設計することの見通しがついた。

2-6 セパレータのインライン計測技術の開発

この研究は神奈川工科大学及び三吉工業株式会社が研究開発を実施した。

2-6-1 加工中の下死点補正

[三吉工業株式会社]

(1) 目標・目的

量産したセパレータは、その品質保証を行う必要があり、そのためには

- 1) 加工中のプレス加工データを利用する。
- 2) 加工後の製品形状を測定する。

以上の必要があり、量産化に向けて 1)の研究を下死点補正装置により、研究を行った。

(2) 研究方法と体制

(a) 人員

久保田 誠：技師長

南雲 英樹：リーダー

桜井 正勝：サブリーダー

(3) 研究成果

(a) 下死点補正の動作内容

下死点補正はフィードバックされた信号により、スライドを動作させ下死点位置の監視補正を行う動作方式である。リアルタイム補正と加工後補正が考えられるが、サーボプレスのモーションの利点を活用しリアルタイムでの補正を検討した。リアルタイムでの補正は、フィードバックされた信号によりスライドの下限位置を補正することで、プレス加工中の金属セパレータの溝形状を良好に維持することができる。リニアスケールにより金型の変位を計測し、それをフィードバック信号とすることで、下死点補正を行い量産に向けての安定量産形状を研究した。下記に動作の内容を示す。

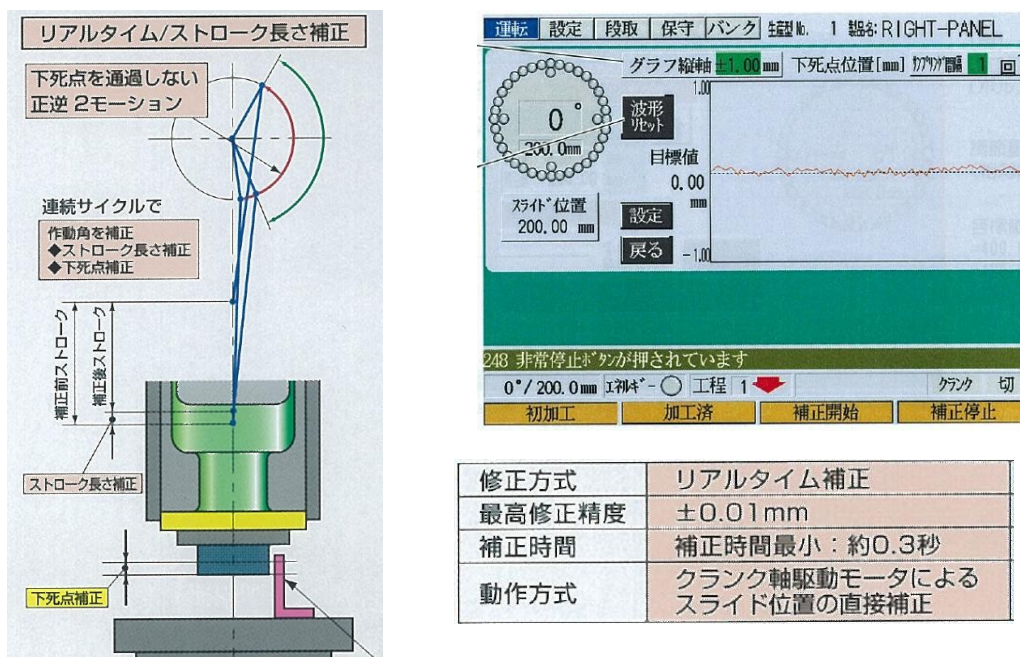


図 2.6.1 下死点補正

(b) 下死点補正の研究

下記にサーボプレスによる下死点補正のテスト加工状況を示す。

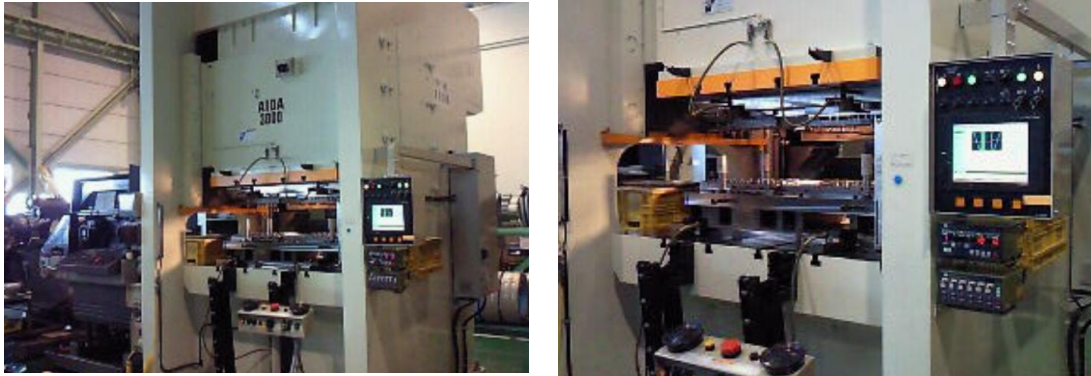


図 2.6.2 下死点補正テスト加工写真

【結論】

今回の研究において、下死点補正は、サーボプレス加工での金属セパレータの量産加工において、有効的と判断し、今後の順送方式による量産金型での活用を図る。

2-6-2 インプロセス・リアルタイム計測制御システムの開発

〔神奈川工科大学〕

(1) 目的・目標

本研究では、補正を自動的に行う金型・プレスの一体化制御技術の開発を目的としている。そのためには、下死点位置や金型・製品間の隙間などを計測するセンサーからの信号を、サーボプレスのコントローラへフィードバックする必要がある。2-3, 2-4-3 において、超音波探触子をセンサーとして埋め込んだ金型を用い、計測制御システムの開発を行った。その結果、計測制御を行う基本的なシステムを開発し、その動作を検証した。

本年度は下記の項目を重点的に研究開発を行い、リアルタイム計測制御システムの開発を行った。

- (1) 金型と試験片の接触状態を調べるためのルーチンを組み込む。
- (2) 超音波センサー以外のセンサーも接続可能なように多チャンネル化を行うとともに、ハードウェアタイマを用いリアルタイム性の向上を目指す。

(2) 研究方法と体制

(a) 人員

遠藤 順一：教授／研究総括代表者
萩野 直人：ポストドクター研究員

(b) 実験装置

計測・制御システムの検証には、図 2.6.3 に示す実験装置を用いた。センサー入力には探触子からの信号とした。また、図 2.6.4 に示すモデル金型を使用した。

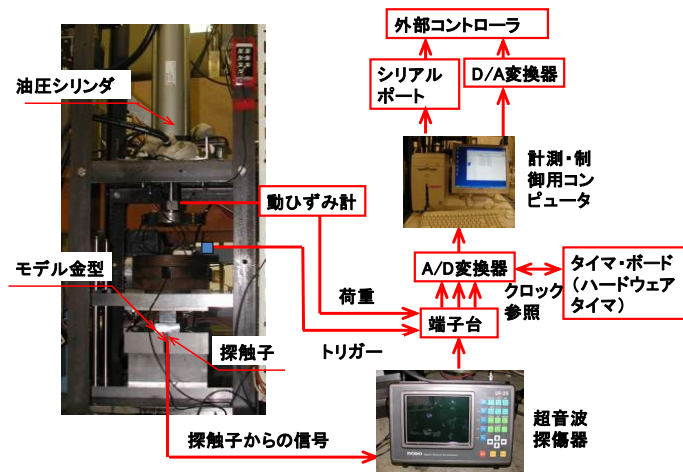


図 2.6.3 計測・制御システム検証実験装置

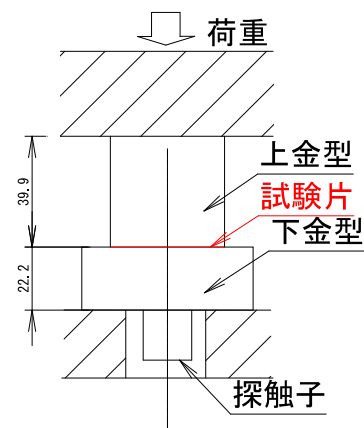


図 2.6.4 モデル金型と探触子

(c) 計測装置

使用した探傷器および探触子を図 2.6.5、図 2.6.6 に示す。また、図中 2.6.3 中の A/D および D/A 変換器は、図 2.6.7 に示す A/D・D/A 変換器（株）インターフェース、PCI-3176）を使用した。主な仕様を表 2.6.1 に示す。またシステムのリアルタイム性を向上させるために図 2.6.8 に示すハードウェアタイマモジュール（株）インターフェース、LPC-630101）を用い、そのタイマーを参照するようにした。その仕様を表 2.6.2 に示す。



図 2.6.5 超音波探傷器（UI-25）



図 2.6.6 探触子（PN10C10N）



図 2.6.7 A/D・D/A 変換器（PCI-3176）



図 2.6.8 ハードウェアタイマモジュール（LPC-630101）

表 2. 6. 1 A/D・D/A 変換器の仕様

	項目	仕様
A/D 変換部	入力チャンネル数	シングルエンド 8ch/ 差動 4ch
	分解能	16bit
	入力レンジ	バイポーラ : $\pm 1.0V, \pm 2.5V, \pm 5V, \pm 10V$ ユニポーラ : $0 \sim +2V, 0 \sim +5V, 0 \sim +10V$
	誤差	$\pm 0.15\%$ ($\pm 5V, \pm 10V$)
D/A 変換部	出力チャンネル数	1ch
	分解能	16bit
	出力レンジ	バイポーラ : $\pm 5V, \pm 10V$ ユニポーラ : $0 \sim +5V, 0 \sim +10V$
	誤差	$\pm 0.1\%$

表 2. 6. 2 ハードウェアタイマモジュールの仕様

項目	仕様
インターバルタイマ機能	動作クロック : 1MHz 周期設定範囲 : $1 \sim 1677215 \mu s$

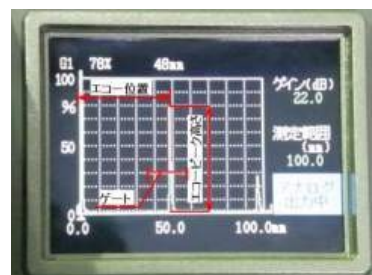


図 2. 6. 9 データ出力中の探傷器画面

探触子からの信号は、まず探傷器に入力される。このとき、図 2. 6. 9 に示した様に、予め設定されたゲート内でのエコーピーク高さとその位置を電圧で D/A 出力する。2-5 金型と製品間の接触状態は、エコーピーク高さより得られることが分かっている。そのため、エコーピーク高さの時系列データをリアルタイムに計測するように計測プログラムを作成した。

(d) 計測制御用ソフトウェア

計測制御用プログラムに関して、超音波を用いて金型と試験片の接触状態を調べるためのルーチンを組み込み、リアルタイム性の確保を行うこととし、専用のソフトウェアを作成した。プログラムの開発では特に操作の単純化に留意をした。ソフトウェアの開発は、Windows XP 上で行い、開発言語は無料配布可能な Visual Basic 2008 Express Edition を用いた。詳細は研究結果にて説明する。

(3) 研究結果

(a) 超音波の反射および透過特性

まず、金型-製品間の超音波の反射強度と接触面圧の関係を求めた。板厚 $t=0.2mm$ 、SUS340 を用いた場合の計測結果を図 2.6.10 に示す。ただし、金型と試験片の接触部分における平均接触面圧 P_i は下記の式より求めた。

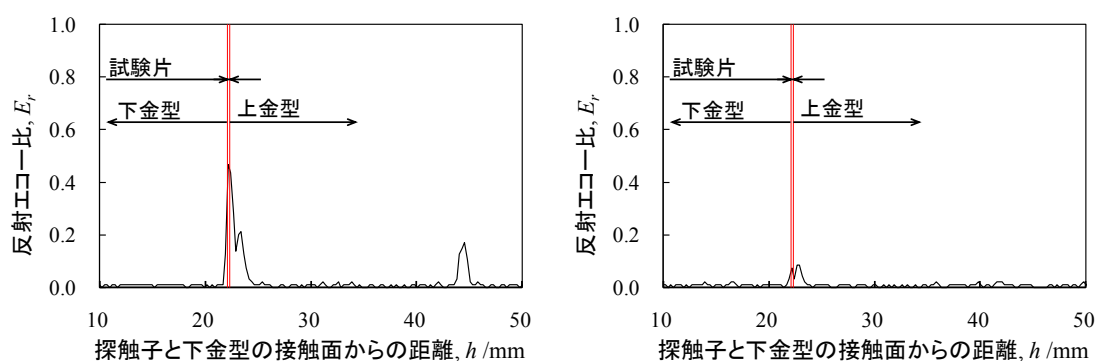
$$P_i = F / A \cdots \cdots \cdots \text{(式 2. 6. 1)}$$

ここで、 F は荷重計で計測された力と上金型の重量の和、 A は金型と試験片の接触面積である。

また、図中に示す反射エコー比 E_r は下記より求めた。

$$E_r = e_r / e_{r0} \cdots \cdots \cdots \text{(式 2. 6. 2)}$$

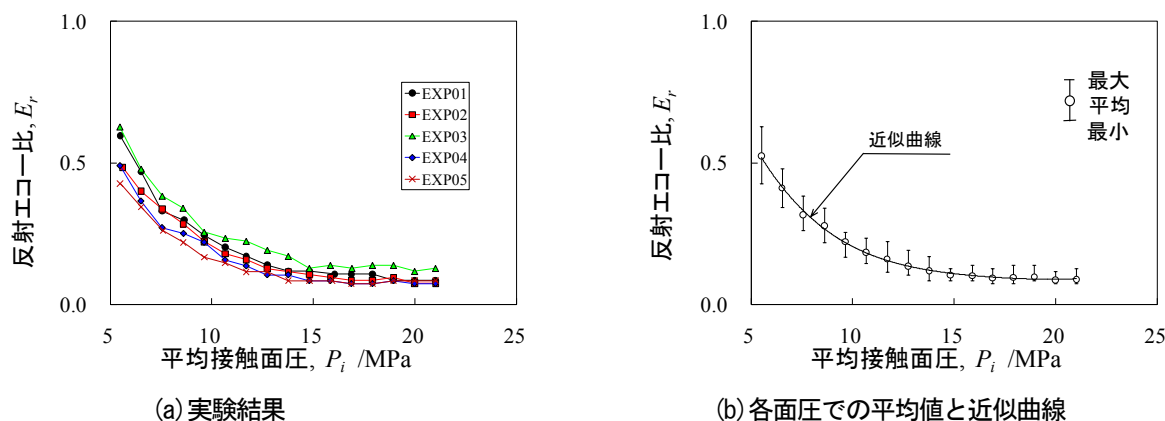
ここで、 e_r は計測時の反射エコー高さ、 e_{r0} は金型が開き、金型と試験片が接触していない場合の反射エコー高さである。


 (a) 平均接触面圧 $P_t = 6.5 \text{ MPa}$

 (b) 平均接触面圧 $P_t = 21 \text{ MPa}$

 図 2.6.10 計測結果の一例 (SUS304, $t = 0.2 \text{ mm}$)

平均接触面圧が大きくなると、金型と試験片との境界面における反射エコー比は低くなる。このとき試験片と金型との境界で反射される超音波のエコーピーク高さを求め、平均接触面圧との関係を調べた。図 2.6.11(a)には実験結果を、図 2.6.11(b)には各面圧における平均値をプロットで最大および最小値をエラーバーで示す。平均接触面圧が増加すると、反射エコー比は減少する傾向が見られる。これは平均接触面圧が増加すると、金型と製品との接触面に存在している空気が減少し、試験片に超音波が透過しやすくなったためである。接触面圧が 15 MPa を超えると反射エコー比は、ほぼ一定となる。これは、金型と製品がほぼ密着し、境界面での接触状態が変化していないためと考えられる。



(a) 実験結果

(b) 各面圧での平均値と近似曲線

 図 2.6.11 反射エコー比と平均接触面圧の関係 (SUS304, $t = 0.2 \text{ mm}$)

次に、試験片板厚を変更した場合の反射エコー比と平均接触面厚の関係を調べた。その結果を図 2.6.12 に示す。板厚が厚くなると、エコー比がほぼ一定となる接触面圧が増加する傾向がある。これは、板厚が厚くなると、試験片の剛性が増加し、試験片を金型に密着させるためにはより大きい面圧が必要となるためと考えられる。

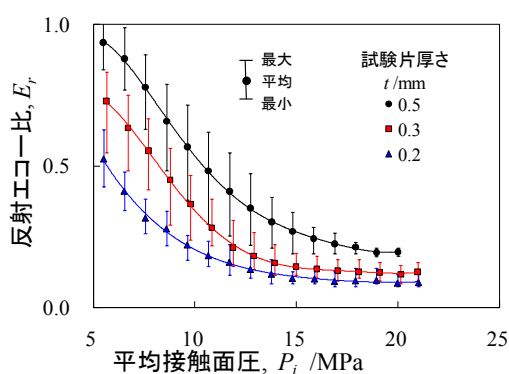


図 2.6.12 反射エコー比と平均接触面圧の関係 (SUS304)

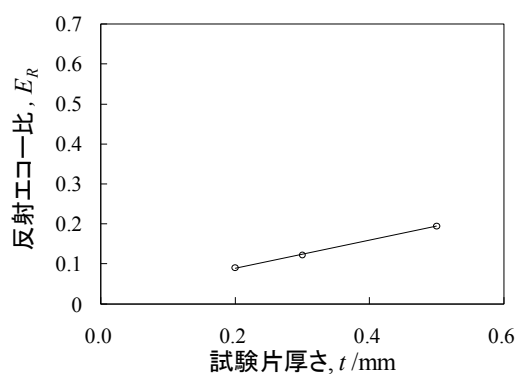


図 2.6.13 反射エコー比に対する板厚の影響 (SUS304)

また、一方、反射エコー比がほぼ一定となる領域では、試験片が厚い方が反射エコー比は大きくなる。そこで、その一定となる領域の反射エコー比の平均値と板厚の関係を調べた。その結果を、図 2.6.13 に示す。反射エコー比は、厚さに比例していることが分かる。この要因は現在不明であるが、試験片の板厚が極めて薄いことから、試験片内部で反射が生じ、その影響が現れている可能性がある。

次に、材質による影響を調べた。その結果を図 2.6.14 に示す。ただし、試験片の板厚は 0.5mm である。ステンレス (SUS304) に比べ、銅 (C1100P)、アルミ (A5052P) の方が、反射エコー比が高くなる傾向が見られた。このときの、接触面圧と反射エコー比の関係を、近似式を用いて求めた。

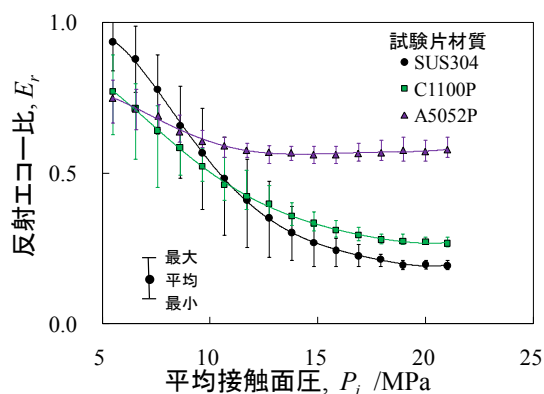


図 2.6.14 反射エコー比と平均接触面圧の関係

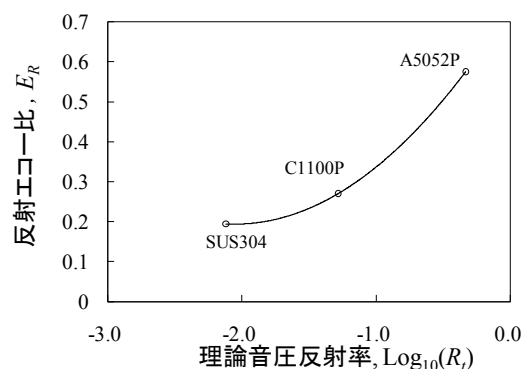


図 2.6.15 反射エコー比に対する材質の影響

次に、反射エコー比がほぼ一定となる領域の平均値と、材質の関係を調べた。異なる材質の境界面において、媒質 1 から媒質 2 が完全に密着した状態で超音波が伝達する場合、その境界面で超音波が反射される割合を音圧反射率 R_t といい、下式で表される。

$$R_t = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \dots\dots\dots (式 2.6.3)$$

式(2.6.9)中の Z は媒質の音響インピーダンスであり下式で求められる。

$$Z = \rho \times C \dots\dots\dots (式 2.6.4)$$

ここで、 ρ は媒質の密度、 C はその媒質内での音速である。この音圧反射率と反射エコー比の関係を調べた。その結果を図 2.6.15 に示す。ただし、計算に用いた音響インピーダンスは表 2.6.4 の値を用いた。また、反射エコー比は、値がほぼ一定となる部分の平均値を用いた。

表 2.6.4 音響インピーダンス

材質	音響インピーダンス $Z/Ns/m^3$	媒質 1 を鉄とした場合の音圧反射率 R_t
鉄	46.4×10^6	0.000
ステンレス	45.7×10^6	0.008
銅	41.8×10^6	0.052
アルミ	16.9×10^6	0.466
空気	0.0004×10^6	1.000

反射率が大きくなると反射エコー比が大きくなる傾向がある。板厚による影響より大きく現れている。従って、反射エコーに対しては反射率すなわち音響インピーダンスの影響が大きいことが分かる。

次に、境界面における超音波の透過特性を調べた。金型と試験片の接触面において、入射した超音波は、反射波と透過波に分離する。そこで、板厚および材質を変更し、超音波の透過特性を調べた。試験片の材質を SUS304 とし板厚を変更した場合の結果を図 2.6.16 に示す。また、図中に示す透過エコー比 E_t は下記より求めた。

$$E_t = e_t / e_{t0} \dots\dots\dots (式 2.6.5)$$

ここで、 e_t は試験片を挟んだ場合の計測時の透過エコー高さ、 e_{t0} は試験片を挟まず荷重を掛けて透過エコー高さが一定となった場合の値である。

平均接触面圧が増加すると、透過エコー比は増加することが分かる。これは反射特性と逆の傾向である。また、15MPa 付近で透過エコー比はほぼ一定となった。

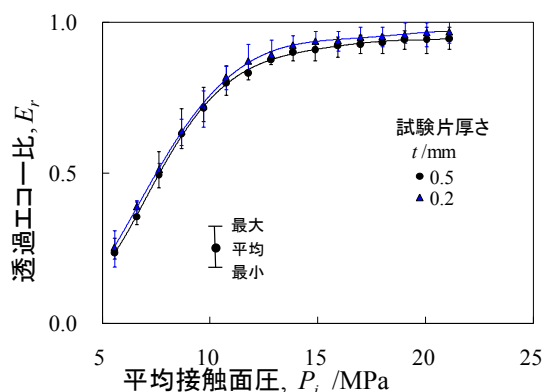


図 2.6.16 板厚が異なる場合の透過エコー比と平均接触面圧の関係

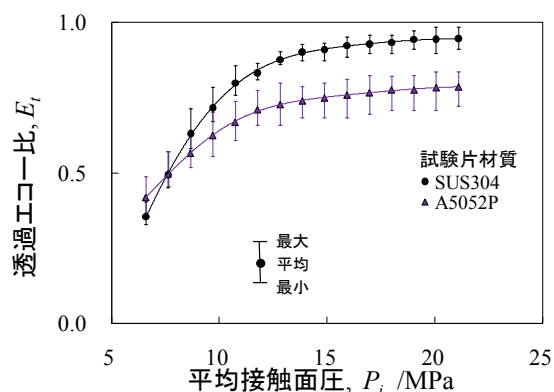


図 2.6.17 材質が異なる場合の透過エコー比と平均接触面圧の関係

材質が異なる場合の透過エコー比と平均接触面圧の関係を図 2.6.17 に示す。このとき反射率の高いアルミ（A5052P）は透過エコー比が低くなり、超音波の透過量が少なくなっていることが分かる。

以上の結果より、荷重を加えて接触面圧が増加すると、境界面に存在する空気が減少し超音波が透過しやすくなるため、反射エコー比が減少すると考えられる。また、ある荷重を境に反射エコー比がほぼ一定となる。これは、それ以上の荷重においては空気量が減少しない、つまり境界面における接触状態が変化しないためと考えられる。よって、このとき金型と製品は密着していると考えられるため、超音波を用いて金型と試験片の接触状態を調べることは可能である。

次に、この結果を組み込んだリアルタイム計測制御プログラムの開発を行った。

(b) 計測制御プログラムの構築

計測および制御信号の出力の方法により 2 種類の計測制御用プログラムを作成した。これらのプログラムのタイムチャートを図 2.6.18 に示す。非リアルタイム計測制御用プログラムは図 2.6.18(a) に示すように、計測が設定された個数の計測が終了したのちに、そのデータをもとに制御信号が出力される。そのため、加工中に逐次スライドを制御することはできないが、次の加工サイクルに計測結果を反映させることは可能である。したがって、制御出力は比較的低速でも十分である。よって、低速であるが、サーボ機器に多く利用されている RS232-C インターフェースを使用することができる。一方、リアルタイム計測制御プログラムは、ハードウェアタイマのカウント 1 回毎に計測と制御出力が行われる。その間隔は 10~20ms 程度に設定することができるため、加工中のスライドモーションをリアルタイムに制御するには十分である。この時の制御出力は高速度が要求されるため D/A 出力のみとした。

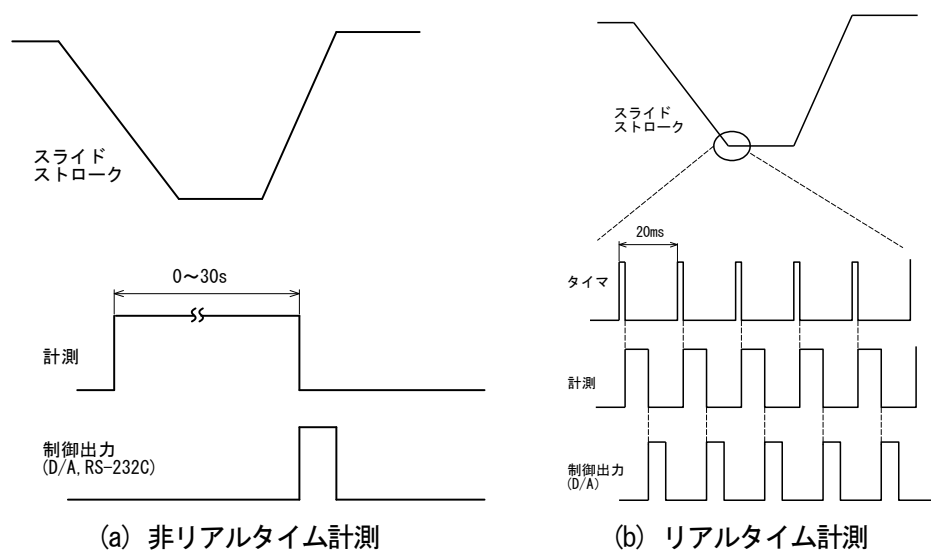


図 2.6.18 計測制御システムのタイミングチャート

まず、非リアルタイム計測制御プログラムを作成した。計測条件等は全てこの画面から行うことができる。入力耐ノイズ性の高い差動入力とし、計測可能チャンネル数を最大 4ch とした。またトリガの種類を選択できる様にした。トリガ無しの場合は、計測開始ボタンを押すと計測が開始される。外部および内部トリガを選択すると、トリガ入力待ち状態となり、指定したトリガレベルが入力すると計測が開始される。制御出力 (外部出力) は D/A およびシリアル (RS232C) 出力を選択できるようにした。また、超音波の反射および透過特性において求めた関係式をプログラムに組み込み、超音波センサー (探触子) からの入力値を用いて制御出力ができるようにした。このプログラムでは、主要部分を関数化・モジュール化しているため、入力を超音波センサー以外の値とすることは比較的容易である。

次に、非リアルタイム計測制御プログラムを作成後、そのプログラムを基に図 2.6.20 に示すリアルタイム計測制御プログラムを作成した。プログラムの作成に当たり、フローでハードウェアタイマを参照し、計測と制御出力を行うようにした。高速に動作させるために、計測制御時にはデータを HDD に保存せず、バッファとして用意した配列変数に格納した。データの保存は、計測制御が終了した後に行うようにした。疑似信号を入力して動作確認をしたところ、10~20ms のリアルタイム性を確保することができた。

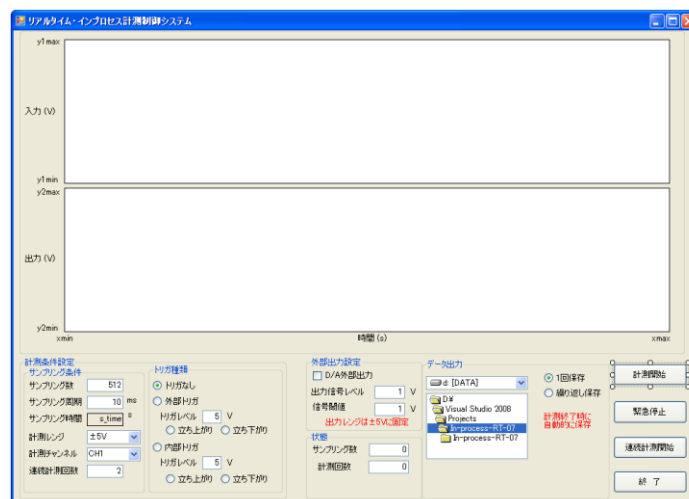


図 2. 6. 19 リアルタイム計測制御プログラム

(c) リアルタイム計測制御プログラムの検証実験

このリアルタイム計測制御プログラムを計測制御コンピュータに組み込み、図 2.6.3 に示す様な計測制御系を構築した。超音波センサーからの信号を受信し、リアルタイムに出力が可能であるか調べた。その結果を図 2.6.20 に示す。ただし、リアルタイム計測制御プログラムを用いた。このとき、反射エコー比が 0.1 のときに +3V の制御出力を行うように設定を行った。反射エコー比が 0.1 以下になると外部に +3V の出力が行われことが分かる。よって、リアルタイムに計測と制御出力を行うことが可能であることが分かった。

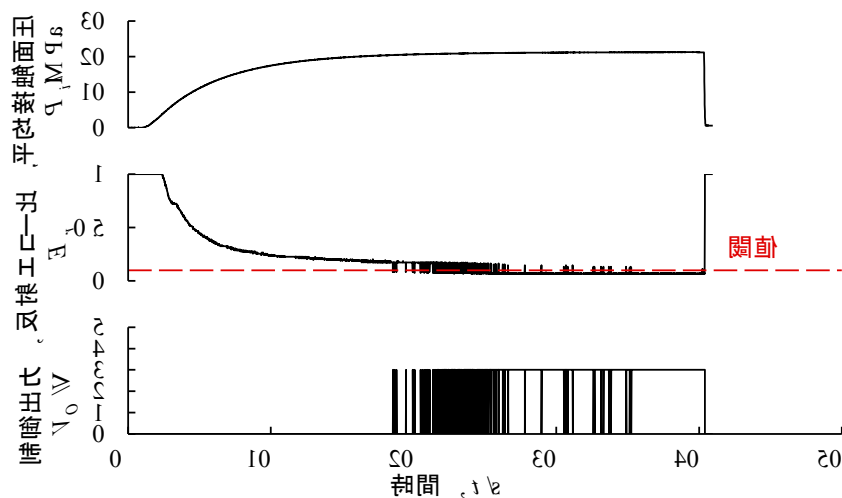


図 2. 6. 20 リアルタイム計測制御検証実験結果

【結論】

以上の結果より、リアルタイム・インプロセス計測制御用プログラムを用い、リアルタイムに制御ができるシステムを構築した。本システムでは、最大 4ch のデータを基に、それらのデータに対する制御が可能である。さら各部を関数化・モジュール化しているため、超音波以外の入力に対応することは容易である。

2-6-3 完成品形状のインライン計測システム

(1) 目的・目標

燃料電池用セパレータ溝の形状精度はマイクロメータ・オーダーの精度が要求される。しかしながらその形状はピッチが数 mm、深さが 0.3～0.5mm 程度であり、接触式の形状計測器での計測は困難である。一方、2-1 から 2-4 までの研究より、セパレータ溝形状の計測には非接触式レーザー変位計が有効であることが判明している。しかし、計測に要する時間は、センサーの調整等を含めると 1 枚につき 60～90 分程度ときわめて長い時間であり、生産ラインにおけるインライン形状計測には適していない。そこで、本研究では、高速・高精度レーザー変位計を用い、セパレータの形状を高速に計測可能なシステムの開発を行った。計測時間の目標は、生産ラインでの抜き取り検査を想定し、一枚あたり 2 分以下とした。

(2) 研究方法と体制

(a) 人員

遠藤 順一：教授／研究総括代表者

萩野 直人：ポストドクター研究員

(b) 計測装置

セパレータ形状計測装置を図 2.6.21 に示す。形状の計測には図 2.6.22 に示すレーザー変位計を 2 台用いた。従来は、X 方向のテーブルの制御は専用コントローラからのみ行う仕様であったが、本年度は全ての操作を計測制御用コンピュータおよび、コンピュータに接続した汎用コントローラから行えるようにした。さらに、形状計測開始と Y 方向のテーブルの動作を同期させ自動計測できるように計測プログラムを作成した。計測されたデータはデータレコーダを経由し、コンピュータに保存した。

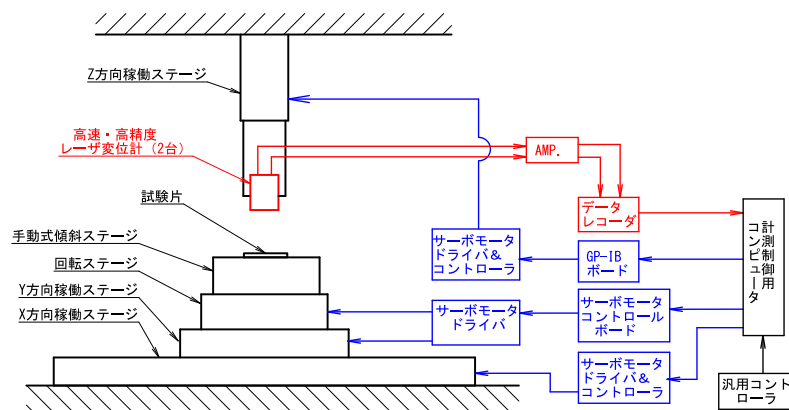


図 2.6.21 セパレータ溝形状計測システム

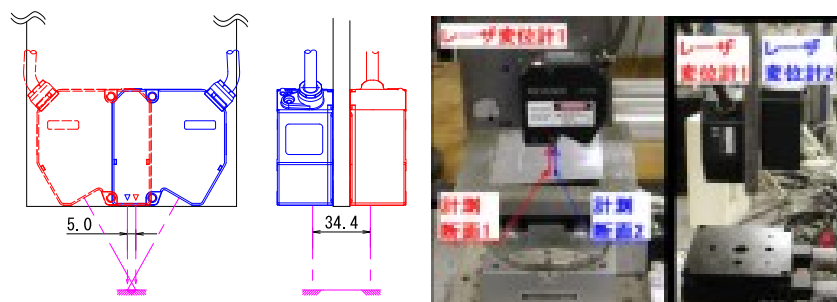


図 2.6.22 高速・高精度レーザー変位計

本年度は計測速度の向上を目的として、高速・高精度レーザー変位計（株）キーエンス、LK-H050）を2個使用した。レーザー変位計とデータレコーダの仕様を以下に示す。

レーザー変位計 (株)キーエンス		データレコーダ (株)キーエンス
LK-H50 (センサーヘッド)		NR-HA08 高速アナログ計測ユニット
LK-G5000 (アンプ)		測定周期 1 μ s ~ 60s
基準距離 50mm		AD 分解能 14bit
計測範囲 ± 10 mm		
繰り返し精度 0.025 μ m		

(d) インライン形状計測プログラム

セパレータ形状計測に関して、専用のソフトウェアを作成した。プログラムの開発では、特に生産ラインでの計測を考慮し、操作の単純化に留意をした。ソフトウェアの開発は、Windows XP 上で行い、開発言語は無料配布可能な Visual Basic 2008 Express Edition を用いた。詳細は研究結果にて説明する。

(3) 研究結果

この計測装置を用いてセパレータの表面形状を計測するプログラムを作成した。その画面を図 2.6.23 に示す。従来、作成した形状計測プログラムを基に、2ch 化とそれに伴う内部演算の見直し、プログラムの高速化を行った。さらに従来、計測終了後に別途算出していた溝深さ等の形状データを計測後に自動的に算出するようにした。データ保存部など一部のプログラムコードはインプロセス・リアルタイム計測制御プログラムのものを使用している。このプログラムでは、操作性の向上を目指し、図 2.6.23 に示す画面より全ての操作を行うことができるようにした。従来、溝深さの算出は Fortran 言語で記述していたものを Visual Basic に書き直した。また、2断面分の計算を行う必要があるため、繰り返し溝深さの算出部分と呼び出せるように計算部分を関数化・サブルーチン化した。溝深さの計算は計測データを保存するときに行うようにした。

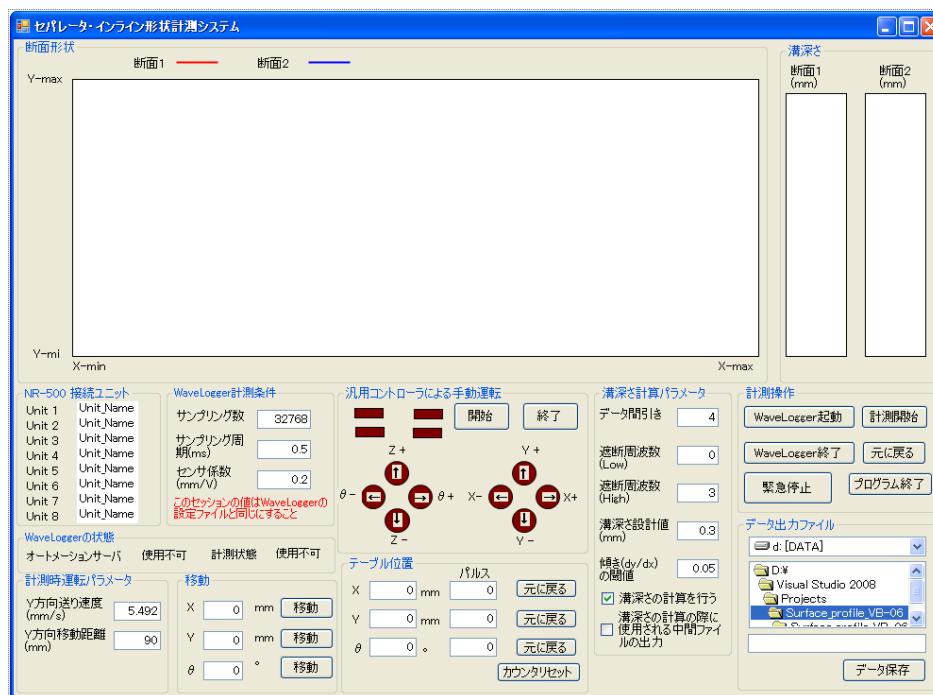


図 2.6.23 インライン形状計測プログラム

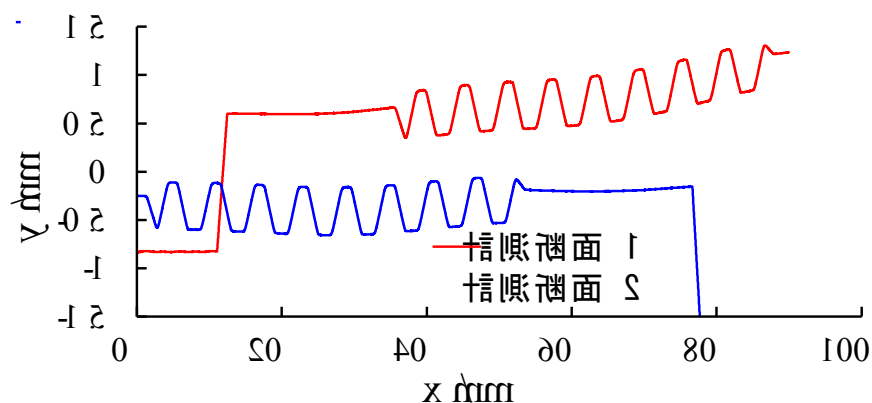


図 2.6.24 セパレータ断面形状計測結果

これらの計測装置と作成したインライン形状計測プログラムを用いて 0.2mm 厚のモデルセパレータの計測を行った。その結果を図 2.6.24 に示す。このとき計測した溝深さを図 2.6.25 に示す。これらの形状計測および、溝深さの算出は図 2.6.26 示す様に約 40 秒で終了した。

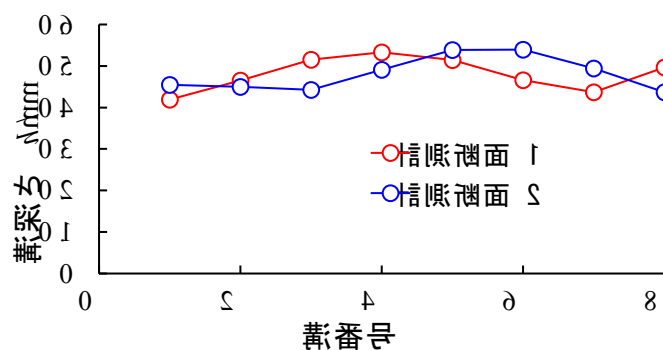


図 2.6.25 溝深さ

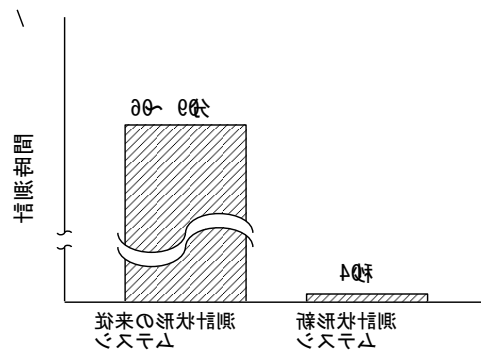


図 2.6.26 計測時間

【結論】

以上の結果より、従来、センサーの調整等を含めると 60~90 分程度要した計測時間が 40 秒となり、インラインでの抜き取り検査で用いるには十分な速度を確保できた。また、溝深さの算出に特殊な作業を必要せず、計測終了後、速やかに算出できるようになった。

第3章 全体総括

政府の国際公約であるCO₂削減に向けて、次世代のエネルギー源として燃料電池が注目され、経済産業省の「特定ものづくり基盤技術高度化指針」において、(三)金属プレスに係る技術に関する事項(3)燃料電池に係る事項及び(2)情報家電に係る事項で取上げられ、いずれにおいても「①川下製造業者の抱える課題及びニーズ」において「低コスト化」が取上げられている。

燃料電池の開発において、川下製造業からの低コスト化に対する強いニーズから、金属セパレータのプレス加工技術の開発を目指している。特に自動車用として実用化が期待されている固体高分子形燃料電池用の金属セパレータのプレス加工技術を開発し、現在のカーボン製セパレータのコストの約50分の1の実現を目指した。

このため、極薄板プレス加工製品の平坦度保持技術の開発、低周波振動プレス加工技術の開発、センサー埋め込み金型技術の開発、金型・プレスの一体化制御技術の開発、加工製品のインプロセス計測技術の開発等を、FEMシミュレーション技術を活用して行った。

本研究開発においては以下に示す技術課題を取上げた。当初予定したチタン系極薄板は特注圧延品であり、実験量とコストを考慮すると、購入は無理と判断し、燃料電池セパレータのもう一つの有力な材料であるステンレス極薄板に対象を絞ることとし、0.1mm、0.2mm厚の板を一括購入し、各分担者の実験に供した。

- (ア) 難加工薄板材の成形技術の開発
- (イ) サーボプレス機械を中心に、プレス成形技術の開発及び金型技術の向上
- (ウ) ITを活用した生産技術の向上

これらの技術課題に対応し、以下に示す実施計画を作成し、研究開発を行った。

- [1] 極薄板プレス加工製品の平坦度保持技術の開発（平成19年度、20年度）
 - (i) サーボプレスによる平坦度保持技術の開発（実施：三吉工業、神奈川工科大学）
 - (ii) 溝付け加工用超精密金型技術の開発（実施：三吉工業、秦野精密）
- [2] 低周波振動プレス加工技術の開発（平成19年度、20年度）（実施：三吉工業、神奈川工科大学）
 - (i) サーボプレスのソフトウェア開発による加工中低周波振動重畳技術の開発（実施：三吉工業、神奈川工科大）
 - (ii) 低周波振動プレス加工の加工特性の把握（実施：三吉工業、神奈川工科大）
- [3] 金型技術開発課題への対応（平成19年度、20年度）（実施：秦野精密、神奈川工科大、三吉工業）
 - (i) センサー埋め込み金型の開発（実施：秦野精密、神奈川工科大、三吉工業）
 - (ii) センサーの探査（実施：神奈川工科大）（平成19年度）
- [4] IT技術開発課題への対応（平成19年度～平成21年度）
 - (i) 材料特性値の測定と測定値をベースとしたFEM解析（実施：東京農工大）
 - (ii) 最適プレス条件の特定（実施：東京農工大）
 - (iii) 金型・プレスの一体化制御技術の開発（実施：神奈川工科大）
- [5] 金属セパレータの量産技術の開発（平成21年度）（実施：三吉工業、秦野精密、東京農工大）
 - (i) 順送型による量産技術の開発（実施：三吉工業）
 - (ii) FB型による量産技術の開発（実施：秦野精密）
 - (iii) 3次元FEMシミュレーションによる金型開発の短期化（東京農工大、三吉工業）

[6]インライン計測技術の開発(平成21年度)(実施: 神奈川工科大学、三吉工業)

(i) 加工中の下死点補正(実施: 三吉工業)

(ii) インプロセス・リアルタイム計測制御システムの開発(実施: 神奈川工科大)

(iii) 完成品形状のインライン計測システム(実施: 神奈川工科大)

研究開発の成果については第2章本論で詳述しているので、重複を避けるためここでは省略するが、特に以下に得られた成果は極めて重要であり、我国の工業技術の発展に寄与するものである。

- (1) サーボプレスのスライドモーションを変えることによる、極薄板金属セパレータの溝成形に与える影響を明らかにし、目標となる平坦度をクリアすることができた。
- (2) 金属セパレータ用金型に微細な溝を加工するための加工条件を見出すことができ、いかなる溝形状にも対応できることが示された。
- (3) 金属セパレータのプレス成形におけるスプリングバックを考慮して溝斜面角度を決定することができるようになった。また、溝斜面角度は小さいほうが溝隅への材料の充填がよくなることが分かった。
- (4) 超音波を利用することにより、金型の内部に材料が充填していく状態をモニターできることが分かった。金型内部の被加工材の挙動を実時間でモニターしたのは世界で始めてである。併せて、斜面における超音波の挙動を明らかにし、一般の金型へ適用できることを見出した。
- (5) 金型の四隅に変位センサーを取り付けることにより、上下金型の隙間や金型の傾きを計測することができ、これをプレスのNCにフィードバックすることにより、より精密な成形加工が可能であることを示した。
- (6) 極薄ステンレス板の異方性を含めた材料特性を明らかにすることができ、降伏曲線を定めることができた。特に、極薄板において、バウシinger効果を見出したことは世界に誇るべき成果の一つである。これを元にし、FEM解析を行うことにより、トライアンドエラーに頼ることなく金型の設計が可能になる。
- (7) 順送型+サーボプレス、FB型+FBプレス による極薄板金属セパレータの量産化技術を確立し、さらに3次元FEMシミュレーションを利用することによる金型形状を短時間で決定する手法が得られた。

以上を要するに、本研究開発は順調に推移し、多くの重要な結果を得ることができ、極薄板金属セパレータをプレス加工で生産できる見通しをえた。さらに、川下の燃料電池メーカーにおいて、酸素と水素のガス流路を直交させたいという要望があり、これは極薄板金属セパレータでは対処不可能である。現在はダイキャストによる金属セパレータが用いられており、これを板鍛造に代替することを提案し、実現できた。これは本研究開発における順送型の金型の製造技術と量産化のためのサーボプレス利用技術を応用したもので、すでにサンプル出荷をしてテスト中である。このように、開発技術は極めて応用範囲が広く、プレス加工技術の進歩に寄与している。