

博士學位論文

難加工材のプレス加工における
成形性向上技術の研究

令和5年3月

茨城大学大学院理工学研究科
量子線科学専攻

磯前 保広

要旨

近年自動車業界では、環境保護の観点から二酸化炭素の排出削減が求められており、自動車燃費向上を目的とした車体の軽量化が求められている。かかる観点から、自動車材料においてマルチマテリアル化が進みアルミニウム合金や超高張力鋼板、複合材料などが用いられている。また、製品形状の複雑化も進んでおり、難加工材の成形性向上技術（特に、製品肉厚の均一化）が強く求められている。同じ金型でも軟鋼に比べアルミニウム合金や超高張力鋼板では反りやスプリングバックといった形状不良の問題が生じる。本研究では、難加工材を複雑形状製品に成形するためのプレス加工に注目して成形性向上技術について開発することを目的とした。

まず、アルミニウム合金の張出成形において板厚を均一化させる成形技術を考案した。張出成形で一般的にエリクセン試験と呼ばれる JIS 規格で定められた試験を用いてその成形性を評価した。これは定められた寸法のパンチおよびジグを用いて、材料の破断高さの大小を比較するものである。しかし、実際の加工では製品強度の確保を目的に板厚を均一に成形することが重要であるとされエリクセン試験のみでは有効性が低い、そこで、張出成形において圧縮荷重を負荷して板厚を均一に成形する工法に取り組み、材料問わず板厚を均一に成形する技術を検討した。張出成形時に圧縮荷重を加えた成形法による板厚均一化の効果とメカニズムを考察した。この工法によって、板厚が局所的に減少する成形において、材料を上下の圧縮荷重で流動させることにより、板厚を均一に成形することが可能となった。

次に、アルミニウム合金のバーリング複雑成形技術についての検討した。一般に、穴広げ加工であるバーリング後に製品端部の高さをそろえるためにコイニングを行うが、コイニングによってロウ付け接合で必要なバーリング付け根付近の破壊が問題となっている。本章ではバーリング加工に着目して、バーリング付け根部分の板厚を均一化させる工程設計と金型構造を考案した。バーリング加工後の工程でバーリングの内外径を挟み製品外形をストッパにてコイニング時余肉の流れを止める、コイニングの影響で余肉は外側に流れようとするがス

トッパの影響で余肉は流れないためコイグ形状が成形されず寸法不良を発生させる，そこでバーリング間のストッパ形状を工夫する事によりコイグ時の余肉は外側に流れバーリング付け根付近の破壊が改善され寸法不良も改善出来た，また金型構造の問題で余肉により金型に喰い付いて製品が排出来なくなる現象が起きたが，ストッパの製品外形を押さえるタイミングと離すタイミングを変更することにより量産が可能となった。

次に，複雑形状・絞り加工において折れシワ制御と肉厚を均一化させる技術について検討した．この配管では，形状が左右対称ではなく，また絞り形状が2形状ある絞り形状で周辺材料を引き込む加工が困難とされている．異形絞りのシワ制御と板厚の均一化の為の工程設定と絞り形状の検討の三点に着目して新しい成形技術を提案した．絞り工程を2回に分けて，材料の変形量を最小限にすることによって，従来困難であった板厚減少の最小化（最大-10%）を達成した．この工法を活用することにより異形絞り，複雑形状のアルミ合金の成形加工が可能となり軽量化，最少化，高耐圧化に貢献できること検証した。

最後に，難加工材である超高張力鋼板のプレス加工において，プレスモーションの制御と潤滑に着目して形状凍結性の向上技術について検討した。

先行研究として，ドロウ成形からフォーム成形に変更することで形状凍結性向上することが可能であるが，加工方法変更のデメリットとして金型作製費用や加工時間がかかること，ドロウ成形でしか加工できない形状もあることがあげられる．そこで，金型を変えることなく形状凍結性を向上する方法として，サーボプレスにおけるモーション制御と潤滑油に注目した．自動車部品に多く用いられているハット型形状の形状凍結性悪化は，反りとスプリングバックが発生することで起きる．反りとスプリングバックは発生メカニズムが異なることから，分離して評価した．寸動モーションは形状凍結性における反りの抑制には効果的である，また，スプリングバックに対しては寸動モーションの効果は無い．潤滑は形状凍結性における反りの抑制には効果的であるが，スプリングバックに対しては形状凍結性を悪化させることが確認できた。

以上，本論文では難加工材の成形性向上の為，従来とは違ったアプローチでの

材料試験の検証や実務レベルでの複雑形状・成形技術の検証, 異形絞りのシワ制御と板厚の均一化の為の工程設定と絞り形状に着目して, 新しい成形技術を提案した. 超高張力鋼板のプレス加工においてサーボプレスによる寸動モーションと潤滑による形状凍結性向上技術を提案した. 得られた研究結果は, 今後, 難加工材のプレス加工における成形性向上技術として活用されていくものとする.

Abstract

In recent years, the automotive industry has been required to reduce carbon dioxide emissions from the viewpoint of environmental protection, and there is a need to reduce the weight of car bodies to improve fuel efficiency. From this perspective, multi-materials such as aluminum alloys, ultra-high tensile strength steel sheets, and composite materials are being used in automotive materials. In addition, product shapes are becoming more complex, and there is a strong demand for technology to improve the formability of difficult-to-form materials (in particular, to achieve uniform product thickness). Compared to mild steel, aluminum alloys and ultra-high-strength steel plates cause shape defect problems such as warpage and springback in the same mold. The purpose of this study was to develop forming technology to improve formability, focusing on press forming of difficult-to-form materials into products with complex shapes.

First, a forming technique was devised to achieve uniform thickness in the overhang forming of aluminum alloys. The formability was evaluated using the Erichsen test, which is commonly used for overhang forming and is specified in the JIS standard. This test uses a punch and jig of specified dimensions to compare the size of the material's fracture height. However, the Erichsen test alone is not effective because it is considered important to form plates with uniform thickness to ensure product strength in actual processing. The effect and mechanism of thickness uniformity achieved by applying a compressive load during overhang forming are discussed. This method made it possible to form uniform plate thickness by causing the material to flow under vertical compressive loads in forming where the plate thickness is locally reduced.

Next, a complex burr forming technique for aluminum alloys was studied. In general, coining is performed to adjust the height of the product edge after burring, which is a hole expanding process. In this chapter, we focus on the

burring process and devise a process design and die structure to make the plate thickness uniform at the root of the burring. After the burring process, a stopper is placed between the inner and outer diameters of the bar rings to stop the flow of excess wall during coining of the product's outer shape. By devising the shape of the stopper between the bar rings, the excess wall flows outward during coining and the destruction near the root of the bar rings is improved, resulting in improved dimensional defects. However, mass production became possible by changing the timing of the stopper to hold the product outline and the timing of the stopper to release the product outline.

Next, we studied the technology for controlling creases and making the wall thickness uniform in complex shape and drawing processes. In this piping, the shape is not symmetrical, and it is difficult to draw in the surrounding material in a drawing shape with two draw shapes. We proposed a new forming technology focusing on three points: wrinkle control of irregular drawing, process setting for thickness uniformity, and consideration of drawing shape. By dividing the drawing process into two separate processes and minimizing the amount of material deformation, a minimization of thickness reduction (-10% at maximum), which has been difficult to achieve in the past, has been achieved. We have verified that this method can be used to form aluminum alloys with complex shapes and deformed shapes, thereby contributing to weight reduction, minimization, and high pressure resistance.

Finally, we investigated technologies to improve shape freezing by focusing on press motion control and lubrication in press forming of ultra-high tensile strength steel plates, which are difficult materials to form.

In previous studies, it has been possible to improve shape freezing by changing from draw forming to form forming, but the disadvantages of changing the forming method include the cost and time required to fabricate the dies and the fact that some shapes can only be formed by draw forming. Therefore, we

focused on motion control and lubricant in servo presses as a method to improve shape freezing without changing the die. The shape-freezing properties of hat shapes, which are often used in automotive parts, deteriorate due to warpage and springback. Since warpage and springback are generated by different mechanisms, they were evaluated separately. Bending motion is effective in suppressing warpage in shape freezing, while it has no effect on springback. Lubrication was found to be effective in suppressing warpage in shape freezing, but to worsen shape freezing in springback.

In order to improve the formability of difficult-to-form materials, this paper proposes a new forming technique, focusing on the verification of material tests using a different approach, verification of complex shapes and forming techniques on a practical level, and process settings and drawing shapes for wrinkle control and thickness uniformity in deformed drawing. In press forming of ultra-high tensile steel sheets, we proposed a technology to improve shape freezing by using servo presses with dimensional motion and lubrication. The research results obtained from this study will be utilized in the future as a technology for improving formability in the press working of difficult-to-form materials.

目次

第1章 序論

1 はじめに

- 1.1 地球温暖化問題と自動車業界での取り組み1
- 1.2 車体軽量化と走行燃費2
- 1.3 難加工材とは3
- 1.4 従来の工法・問題点4
- 1.5 難加工材のプレス加工に関する従来の研究成果と本研究の位置付け4
- 1.6 本研究の目的6

第2章 アルミニウム合金の張出成形において肉厚を均一化させる技術

- 2.1 緒言8
- 2.2 張出成形について10
- 2.3 張出成形の研究について11
- 2.4 研究目的12
- 2.5 引張試験及およびエリクセン試験12
 - 2.5.1 供試材の材料特性12
 - 2.5.2 引張試験13
 - 2.5.3 エリクセン試験16
- 2.6 従来の考え方による張出成形19
 - 2.6.1 想定した製品形状19
 - 2.6.2 金型および成形条件20
 - 2.6.3 使用プレス機22
 - 2.6.4 肉厚の測定方法22
 - 2.6.5 成形品の断面形状と肉厚分布25
 - 2.6.6 考察28
- 2.7 引張試験における板厚減少の評価28
 - 2.7.1 引張試験における板厚測定28
 - 2.7.2 圧縮による肉厚減少と外周ひずみ試験30
- 2.8 圧縮荷重を負荷する新しい張出成形33
 - 2.8.1 金型および成形条件33

2.8.2	成形品の断面形状と肉厚分布	35
2.9	面ひずみ測定	38
2.9.1	面ひずみ測定方法	38
2.9.2	面ひずみの測定結果	42
2.9.3	圧延方向がおよぼす影響	43
2.10	結言	45
第3章	アルミニウム合金のバーリング複雑成形技術についての検討	
3.1	バーリング概要	47
3.2	従来 of 工法・問題点	47
3.3	研究目的	48
3.4	供試材および実験方法	49
3.4.1	供試材	49
3.4.2	使用プレス機	49
3.4.3	工程設定	49
3.5	バーリング後のコイニングによる変形実証試験	50
3.5.1	試験金型仕様	51
3.6	実証試験結果	56
3.7	考察	59
3.7.1	測定	60
3.7.2	測定結果	60
3.8	結言	68
第4章	複雑形状・絞り加工において折れシワ制御と肉厚を均一化させる技術	
4.1	緒言	70
4.2	近接した2つの形状の概要	72
4.3	従来 of 工法・問題点	73
4.4	研究目的	73
4.5	供試材および実験方法	73
4.5.1	供試材	73

4.5.2	使用プレス機	74
4.6	絞りの材料引き込み形状の設定	75
4.6.1	工程設定	75
4.6.2	実証試験金型仕様	79
4.7	実証実験結果および考察	81
4.7.1	考察	81
4.7.2	測定	86
4.7.3	測定結果	88
4.7.4	断面観察	89
4.7.5	断面写真	90
4.8	結言	92
第5章	プレスモーション制御と潤滑による高張力鋼板の形状凍結性向上	
5.1	緒言	93
5.2	研究目的	94
5.3	供試材および実験方法	95
5.3.1	供試材	95
5.3.2	使用プレス機	96
5.3.3	プレスモーションと使用金型	96
5.3.4	使用潤滑油	98
5.3.5	形状凍結性の評価方法	98
5.4	成形試験結果	99
5.4.1	形状凍結性におよぼす寸動モーションの影響	99
5.4.2	形状凍結性におよぼす潤滑の影響	101
5.4.3	成形プロセス	102
5.5	X線回折装置による成形品の表面ひずみ状態の評価	106
5.6	結言	109
第6章	総括	111
参考文献		
謝辞		115

第 1 章

序 論

第1章 序論

1 はじめに

1.1 地球温暖化問題と自動車業界での取り組み

近年、世界規模で取り巻く環境問題の一つとして地球温暖化が問題視されている。これは二酸化炭素の様な温室効果ガス排出の増加によるオゾン層破壊が原因であり、温暖化の結果、上昇した地球の平均気温は海や森の生態系を脅かすだけでなく、食糧生産難や人体の健康被害等、深刻な影響を与えている。図 1-1 は近年の日本における平均気温の偏差の推移を示したものである。90 年後半を境に気温が急激に上昇していることが読み取れ、日本においても地球温暖化の影響は無視できない状況にあることが現状である。

自動車は二酸化炭素の全排出のうち、大きな割合を占めている。全二酸化炭素排出量のうち自動車は約 20%の割合を占めているとされ、各社メーカーは自動車開発において国、地域から二酸化炭素の排出に関する厳しい規制を受けている。これらの規制に対し、各社は様々な対応をとっており、うち挙げられる方法として車体重量の軽量化が有効とされている。これを次節で述べる。

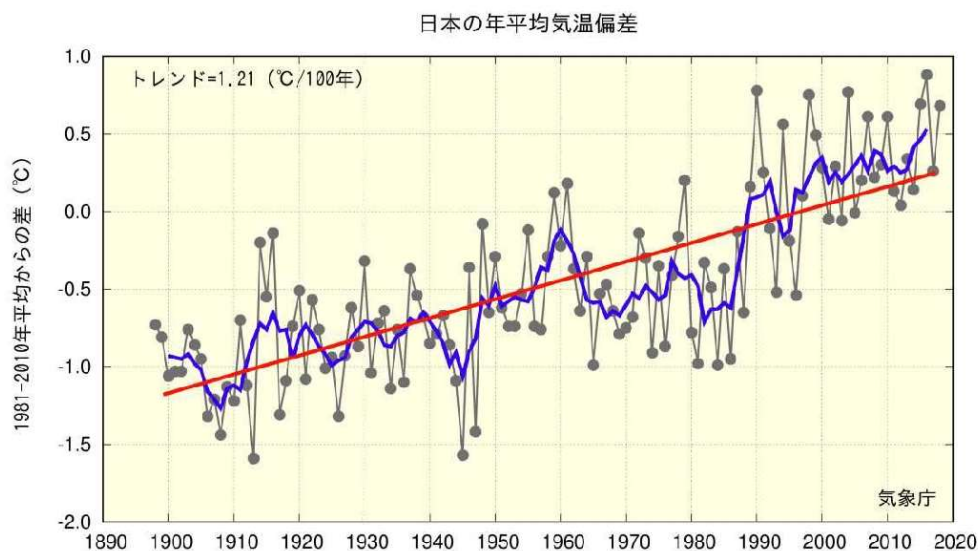


図 1-1 日本の平均気温偏差の経年変化 (1898-2018 年)

気候変動監視レポート 2018

https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/monitor/2018/pdf/ccmr2018_all.pdf

1.2 車体軽量化と走行燃費

地球環境保護の観点から、世界的に二酸化炭素の排出削減が求められている。自動車業界においては二酸化炭素の排出削減のため、燃費向上を目的とした軽量化が進められている。一方、自動車車体の衝突安全基準は厳格化する傾向にある。自動車車体の軽量化と衝突安全性向上という相反する要求性能を満足させるため、自動車のマルチマテリアル化⁽¹⁾が進み、その中でもボディへは高強度材料の適用が増加している⁽²⁾。高強度で板厚の薄い鋼板を自動車ボディに用いることで衝突安全性を向上しながらもボディ自体の重量を軽くすることが目的である⁽³⁾。車両重量を軽くすることにより、二酸化炭素の排出を抑制することができる。これは軽量化により少ないガソリンで走行を続けることで燃費が向上することで、二酸化炭素の排出が抑えられるからである。図1-2にガソリン車における車両重量と走行燃費の関係を示す。各種車両において、車体重量の軽量化が燃費の向上に有効であることがわかる。

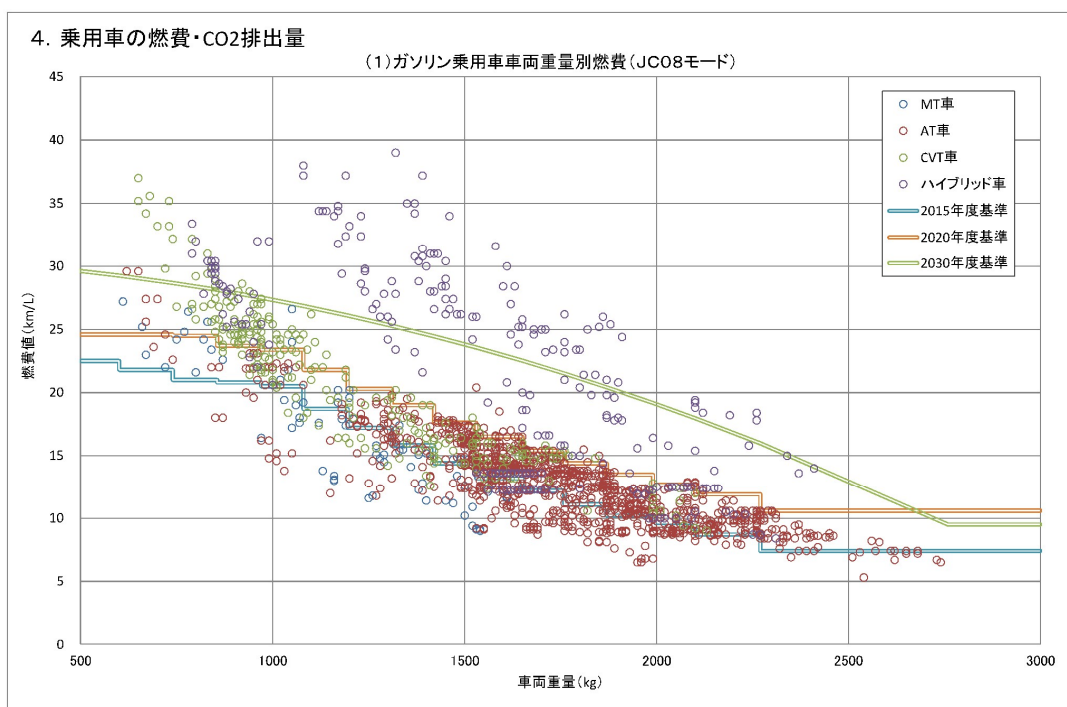


図1-2 ガソリン車における車両重量と燃費の関係

国土交通省資料より抜粋

<https://www.mlit.go.jp/jidosha/content/001337988.pdf>

1.3 難加工材とは

一般的にアルミ材のように伸び率が低い材料，異方性の有る材料のことや，超高張力鋼板のように高い高張力の材料を一般的に分類する．図 1-3 に引張試験の結果を示す．

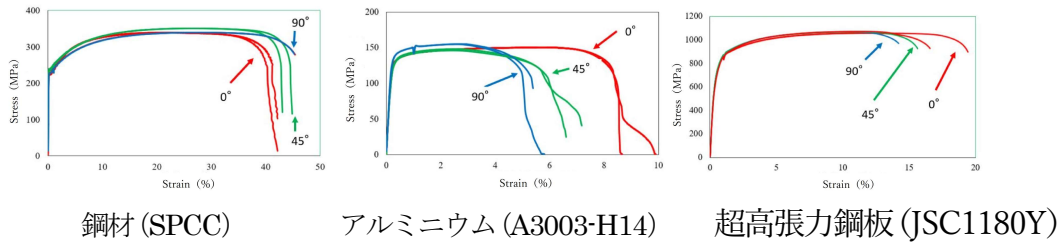


図 1-3 引張試験結果

一般的な鋼材（SPCC）では引張試験時の材料ひずみ圧延方向により若干の差があるが平均 40%の破断伸びを示す．アルミニウム（A3003-H14）はロール方向の差が 2 倍と大きく破断伸びが平均 7%と低い，超高張力鋼板（JSC1180Y）は引張強度の向上と共に伸び（破断伸びで 10%）が低下する特性があるため，材料特性を考慮した適用検討が必要となる⁽³⁾．

以上の材料特性からアルミニウムや超高張力鋼板は難加工材とされている．一方で，構造部材のマルチマテリアル化に伴い，アルミニウム合金や超高張力鋼板の様な難加工材の適用例は増加している．例として図 1-4 にホンダ・クラリティ FUEL CELL における車体構造材料を示す．軽量材料使用率が従来ガソリン車の比率が 29%に対し，クラリティ FUEL CELL は 55%と増加している，また(GFRP, CFRP)を使用しているものもあり，様々な材料を効率手的に使用するマルチマテリアル化が促進されている⁽²⁾．

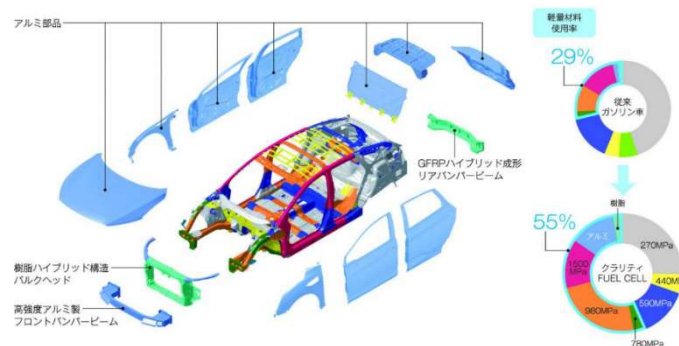


図 1-4 ホンダ・クラリティにおける車体構造材料の変化

<https://car.motor-fan.jp/tech/10013389>

1.4 従来の工法・問題点

自動車を軽量化に仕上げる方法は大きく2つあり、一つは軽い材料を利用することである。アルミニウム材を例に挙げると、鉄鋼と比較し密度が約1/3であることから自動車用部品の代替材料として注目されており、現在では車両骨格や熱交換器部品等を中心に利用が広がっている。しかし、アルミニウム材は製造コストや強度の面で鉄鋼材料に劣るため、軽量化を実現するためにはそれらを考慮することが重要である。

二つ目は、加工方法に注目することである。例えば、使用する超高張力鋼板は通常鉄鋼材料に比べて材料強度は強く材料板厚は薄く出部品の軽量化に貢献できる、1200MPa級で約25%の重量軽減効果⁽⁴⁾があるとされている。一般に、鋼板の強度が向上すると様々なプレス成形性(例えば、形状凍結性、絞り性、張出し性など)が劣化することが知られている⁽⁶⁾。特に形状凍結性は、高い寸法精度を要求させる自動車部品においては大きな問題である。同じ金型で成形した場合でも、軟鋼に比べて右の高張力鋼では、反りやスプリングバックといった形状不良の問題が生じ、形状凍結性が悪化する。しかし、近年のプレス機械を用いた加工では、工法の工夫や加工精度技術の向上により小さな形状や難加工材においても成形が可能となっており、プレス加工は今後の自動車業界での利用に期待が高まっている。

自動車部品の塑性加工には、部品形状や小型化のニーズから要求される技術が変化している。

1.5 難加工材のプレス加工に関する従来の研究成果と本研究の位置付け

難加工材であるアルミニウム合金と超ハイテンに関する研究成果は数多く報告されており、その多くが成形限界や形状凍結性に着目した研究⁽⁵⁾⁻⁽⁶⁾である。一方で、製品の成形や加工という観点からは、設計で提示された製品肉厚を寸法公差の範囲で精度良く実現する技術が重要である。したがって、近年では製品肉厚を均等に成形する技術が注目されている⁽⁷⁾⁻⁽¹²⁾。製品肉厚は材料や工法により様々な影響を受けることで変化することが知られている。以下にそれらについての研究報告を示す。

I. 材料特性が及ぼす板厚への影響

① 圧延加工⁽¹³⁾⁻⁽¹⁴⁾

圧延加工を受けた板材は、縦、横および板厚方向に対して機械的性質が異なる現象を示し、これを異方性と呼ばれる。円筒絞りの様な成形では異方性の影響により耳の発生や不均一な板厚分布の成形問題が報告されており、板厚を均一に成形する上で十分考慮する必要がある。

② 被加工材の n 値⁽¹⁵⁾⁻⁽¹⁷⁾

張出成形は材料によって成形高さが異なることが報告されている。これは材料が持つ n 値(加工硬化指数)が影響しており、一般的に n 値と破断高さは比例関係にあるとされている。

また、材料により異方性の大きさが異なることも報告されており、こちらも板厚均一化を目指す上で重要な要因である。

II. 加工方法が及ぼす板厚への影響

① 温間成形⁽¹⁸⁾⁻⁽¹⁹⁾

温間状態での張出成形についての研究が報告されている。一般に温間状態では材料の伸びの大きさが増加し成形性が向上すると予想されるが、金型の接触による冷却から、摩擦係数の偏差により成形性が劣化することを報告している。また、板厚が成形温度に影響していることも明らかにしている。

② 金型形状⁽²⁰⁾⁻⁽²¹⁾

絞り加工におけるダイ半径の影響についての研究がなされている。ダイ半径が小さくなることにより、材料の摺動抵抗や応力集中が起因し板厚が局所的に減少することが報告されており、プレス成形を行う上で金型形状が板厚均一化に重要であると言える。

③ 摩擦係数⁽²²⁾⁻⁽²⁸⁾

工具と材料間における摩擦係数は低くある程、張出性が向上するとされている。摩擦による変形抵抗が低いと、材料は流れやすくなり局所的な板厚減少が抑制されることを明らかにしている。また、薄板のプレス成形において潤滑油を用いて破壊限界値

を向上させる研究や、潤滑油の種類や粘土による影響の研究は多くされている。

④ サーボプレス機械におけるモーション制御⁽²⁹⁾⁻⁽³²⁾

サーボプレス機械では加工時のモーション制御を自由に行うことが可能である。プレスモーションの制御が成形性に及ぼす影響に関する報告はこれまでもなされており、その多くは、円筒深絞り成形や角筒絞り成形、楕円形深絞り成形の破壊限界、割れ限界向上が目的とされている。

以上を総括すると、板厚変化の影響因子は材料と加工の2種類に分類することができる。材料については機械的性質と圧延加工の影響により材料特性が異なることが問題である。また、加工においては材料を自由に流動させることが肉厚均一化を目指す上で重要である。

一般に、肉厚均一化はブロック材や厚板の鍛造技術においては確立されている⁽³³⁾⁻⁽³⁴⁾。鍛造は圧縮応力下で材料を流動させて形状を作り込んでいく技術である。近年では、板成形と冷間鍛造技術を組み合わせた板鍛造技術⁽³⁵⁾⁻⁽³⁷⁾が進歩しており、4mm程度の厚板のプレス加工において成形限界の向上と高精度化が実現されている。一方で、2mm以下の薄板において長手方向に圧縮荷重を負荷すると座屈現象が生じるため、薄板の板厚を自由に变化させることは困難である⁽³⁸⁾。

本研究では、難加工材であるアルミニウム合金と超ハイテン材で2mm以下の薄板における製品肉厚の均一化と形状凍結性の向上を実現することを試みた。実製品を想定した形状の成形を目的として、工程設定や金型形状を工夫した。従来の研究成果とは異なった視点で、薄板における材料流動に挑み、肉厚の均一化や形状凍結性を向上させることが本研究の独自性である。

1.6 本研究の目的

これまで述べてきたように近年自動車業界では、環境保護の観点から二酸化炭素の排出削減が求められており、自動車燃費向上を目的とした車体の軽量化が求められている。かかる観点から、自動車材料においてマルチマテリアル化が進みアルミ合金や超高張力鋼板、複合材料などが用いられる。図1-5に本研究の概要を示す。本研究では、プレス加工における代表的な成形方法である、張出、バーリング、絞り、ハッ

ト曲げを取り上げ、加工工程や金型形状を工夫することで、難加工材であるアルミニウム合金と超高張力鋼板の成形性を向上させることを目的とした。具体的な内容は下記の通りである。

- 2章 アルミニウム合金の張出成形において板厚を均一化させる技術
- 3章 アルミニウム合金のバーリングの複雑成形技術についての検討
- 4章 複雑形状・絞り加工において折れシワ制御と肉厚を均一化させる技術
- 5章 プレスモーション制御と潤滑による高張力鋼板の形状凍結性向上

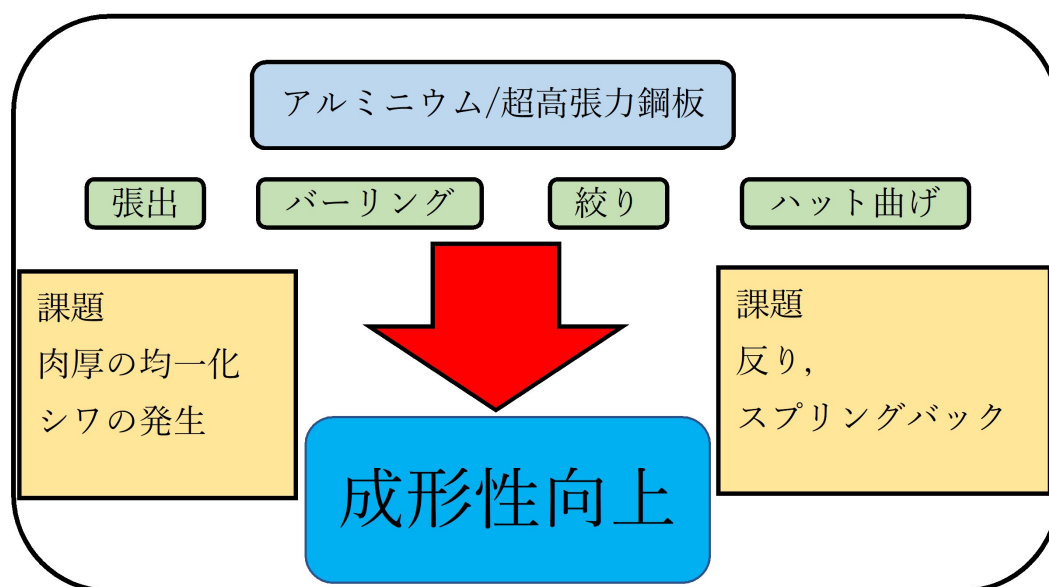


図 1-5 研究内容の概要

第2章

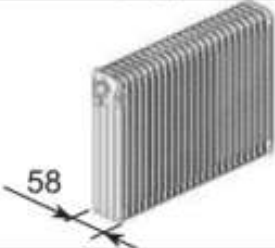
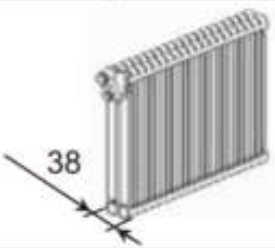
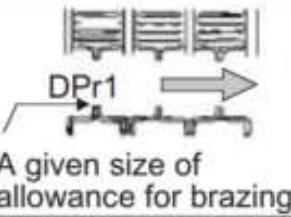

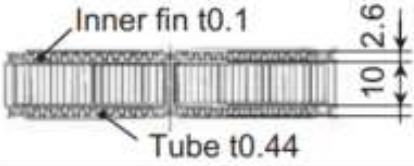
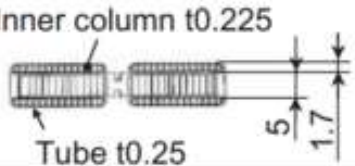
アルミニウム合金の張出成形に
おいて板厚を均一化させる技術

第2章 アルミニウム合金の張出成形において肉厚を均一化させる技術

2.1 緒言

自動車は部品単位での軽量化が求められている。1つ目として、自動車用の空調機器を例に挙げる。図2-1は近年の自動車用空調機器の動向であり、小型化と軽量化の両立を目的にコア厚さは薄く設計され、それに伴いチューブやフィンの形状は複雑なものとなっており、部品ごとで細かな要求が増えている。

図2-2に空調機器の中でもプレス加工により生産されている熱交換器部品を示す。こちらも軽量化のニーズに伴い、複雑で小さな形状の加工技術が求められており、加工の際には限られた材料を有効に利用することが重要となっている。特に熱交換器部品のフィンの様に、多くの凹凸を持つ製品においては、周辺材料を引き込む加工(深絞り)が困難とされており、それらに対応する手法として張出成形が利用されている。これを次節で述べる。

	Drawn cup type (MS)	Tank-separated type (RS)
Core thickness		
Construction inside the tank	 $DP r1 > DP r2$	 $DP r2$
Tubes and fins	 Inner fin t0.1 Tube t0.44 10 2.6	 Inner column t0.225 Tube t0.25 5 1.7

株式会社デンソー様資料より抜粋

図2-1 自動車用空調機器の動向



拡大写真

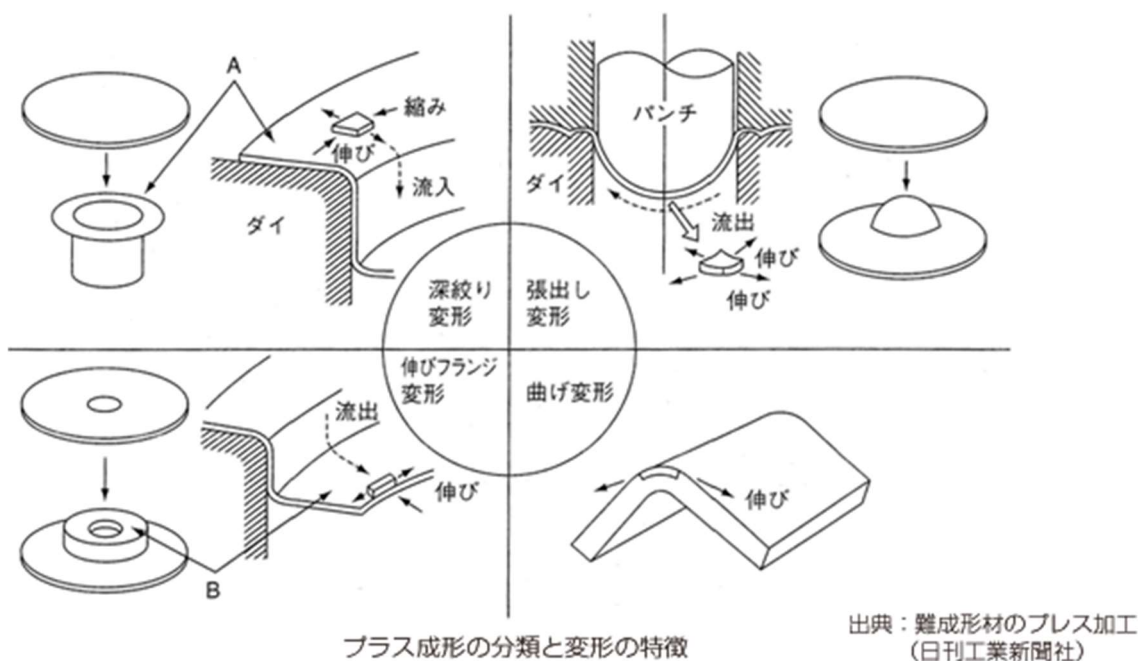
図 2-2 自動車用の熱交換器部品

2.2 張出成形について

張出成形とはプレス加工に用いられる成形手法の一つである。プレス加工とは適当なサイズを材料を、上下で異なる形状の金型で挟むことで目標形状に塑性変形させる加工方法を指す。プレス加工は材料の流れや荷重のかけ方により、図 2-3 の様に 4 つに分類され、実際の生産現場ではこれらを複雑に組み合わせることで所定の立体を作り上げる。特徴は加工速度が速いことと、寸法精度が高いことから、自動車部品をはじめ、電子部品や家電製品等、幅広い分野で利用されている。

張出成形は周辺から材料を流入させずに立体を成形させる手法である。したがって、深絞りとは比べ、フランジの材料が拘束されるため圧縮応力は生まれず、直交する 2 軸方向に対して引張応力がかかることが特徴である。プレス成形においては、ブランクホルダーを用いてフランジに荷重をかけることで外周を拘束し、パンチを押し込む方法が一般的な方法である。

張出成形は、前節で述べた小型で多くの凹凸を持つ製品形状の生産に対して、重要な技術である。



プレス成形の分類と変形の特徴

図 2-3 プレス成形における変形形態

2.3 張出成形の研究について

張出成形は一般的にエリクセン試験と呼ばれる JIS 規格で定められた試験を用いてその成形性を評価する。図 2-4 にエリクセン試験の概要を示す。これは定められた寸法のパンチおよびジグを用いて、材料の破断高さの大小を比較するものである。しかし、実際の加工では製品強度の確保を目的に板厚を均一に成形することが重要であるとされ、エリクセン試験のみでは有効性が低い。そのため近年では、張出成形における製品板厚についての研究が報告されているが、製品板厚は材料や工法により様々な影響を受けることで変化することが知られている。

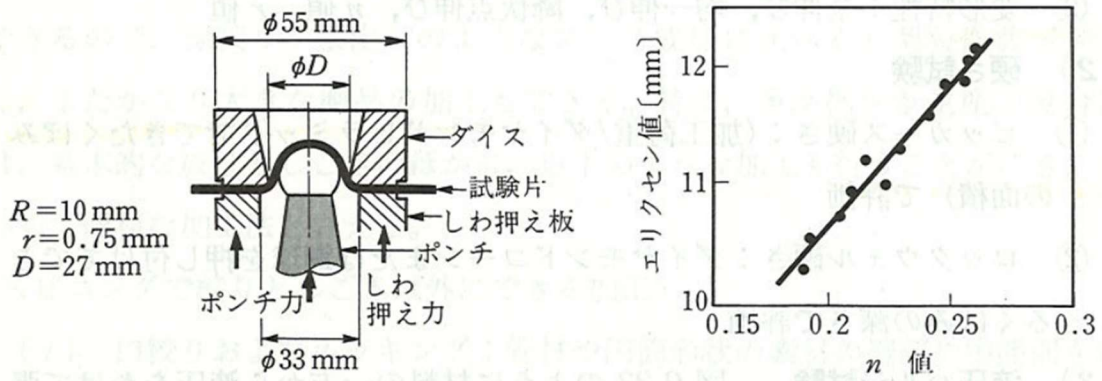


図 2-4 エリクセン試験

2.4 研究目的

前節をまとめると、張出成形においては肉厚をいかに均一に成形可能であるかが重要であり、それは一般に利用される成形試験(エリクセン試験)では評価できないことがわかった。また、張出成形による肉厚変化は機械的性質および加工条件が起因することによりばらつくことが問題であり、それは材料の流れ方に注目すること重要であることがわかる。そこで本研究では、工法を工夫したプレス成形試験を実施し、材料特性に問わず板厚を均一に成形する方法を目的とする。具体的な工法は、材料に対して圧縮荷重の負荷が可能な金型とプレス機械を用いることで材料を流し、肉厚を均一に仕上げる方法を検討する。実験ではパンチ、ダイ、シワ押さえのみで構成されるシンプルな金型構造を用いた成形と比較を行うことで、板厚均一化の効果を確認した。また、成形したサンプルは板厚測定、面ひずみ測定を用いることで板厚均一化の効果とメカニズムを考察する。

プレス成形では金型を実際に用意し、押し込み高さを一定に揃えた加工を行った。試験形状は自動車用の熱交換器部品を例に挙げ、直径約 15[mm]の小さな形状を対象とする。使用する材料は自動車の熱交換器部品に多く用いられるアルミニウム合金の 3 種類である。

2.5 引張試験およびエリクセン試験

2.5.1 供試材の材料特性

本実験で使用する材料は自動車用の熱交換部品に多く利用される A3003-H14(アルミニウム合金)と、その比較を目的に純アルミニウムを使用した。板厚はすべて 1.6[mm]である。以下に使用した 3 種類の材料を示す。

- ① A3003-H14
- ② A1050-O
- ③ A1050-H24

はじめに供試材の機械的特性と一般的な張出性を評価するため、引張試験とエリクセン試験を実施した。それらを次節で述べる。

2.5.2 引張試験

試験片は JIS13B 号に則り、図 2-5 に示す寸法とした。またロール方向による機械的性質の影響を考慮するため、ロール方向と引張方向のなす角がそれぞれ 0° 、 45° 、 90° となる様に試験片を区別し、各 2 本ずつ測定を行った。図 2-6 にそれらの写真を示す。試験速度は 5 [mm/min] とし、破断までの試験力と変位を測定することから応力-ひずみ線図を算出する。

図 2-7 から図 2-9 に 3 種類の材料の応力-ひずみ線図を示す。表 2-1 には機械的性質として、2 本の値を平均した代表数字を示す。n 値(加工硬化指数)は JIS Z2253 に則り、引張試験で得られた数値から算出した。

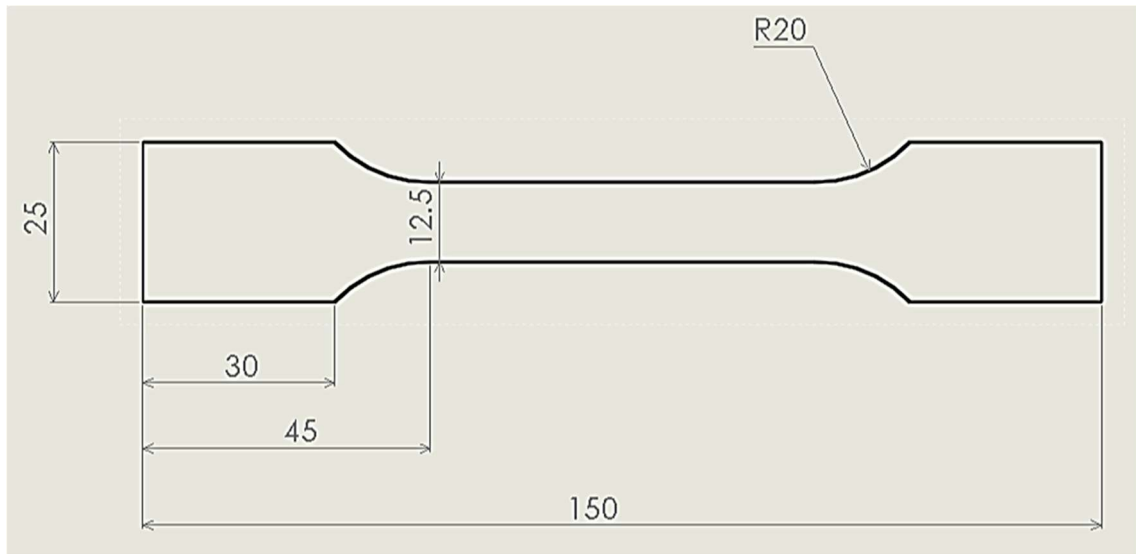


図2-5 引っ張り試験片寸法

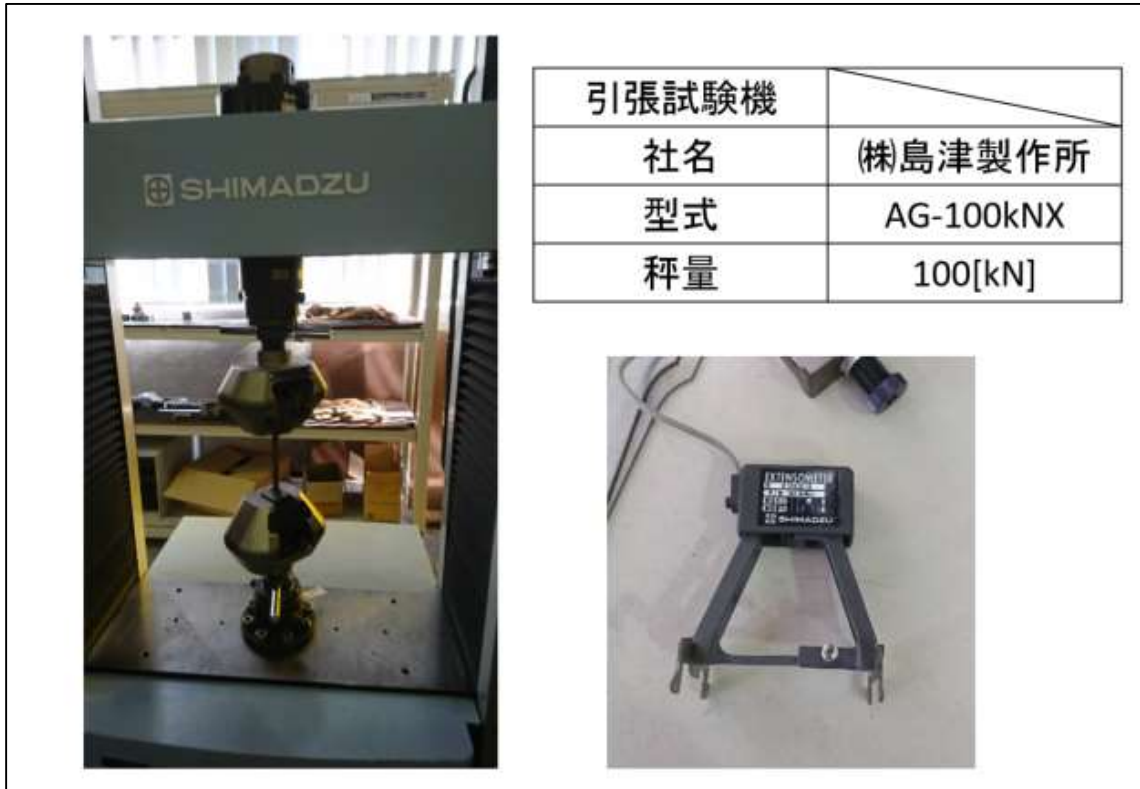


図 2-6 張試験機(左) 接触型伸び計(右下)

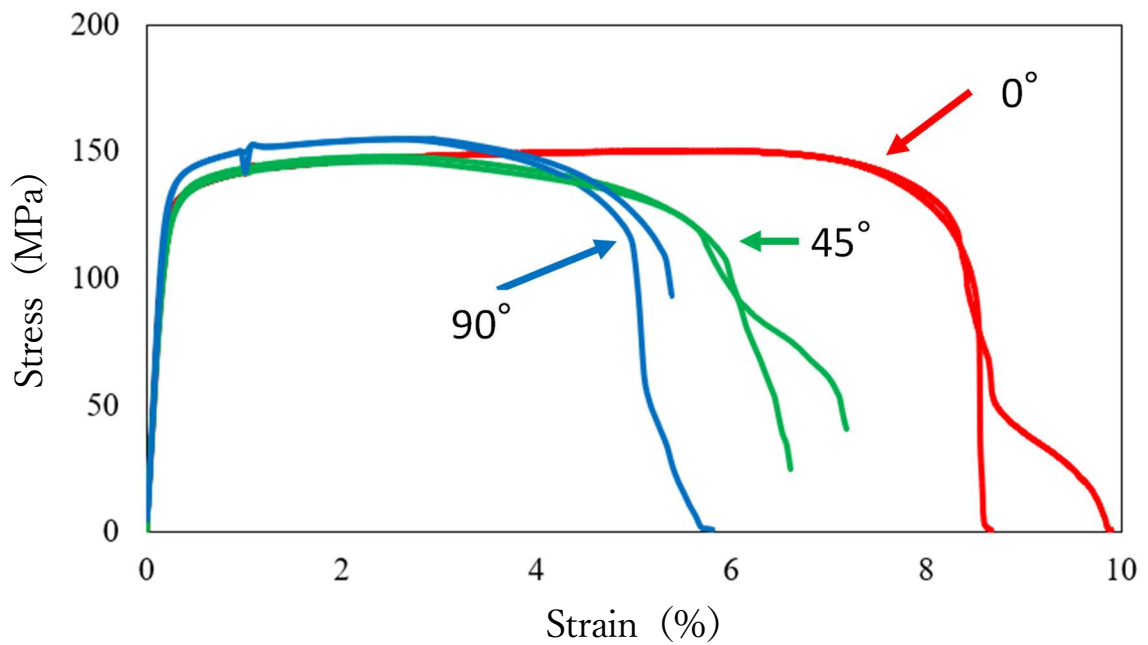


図 2-7 引張試験結果 A3003-H14

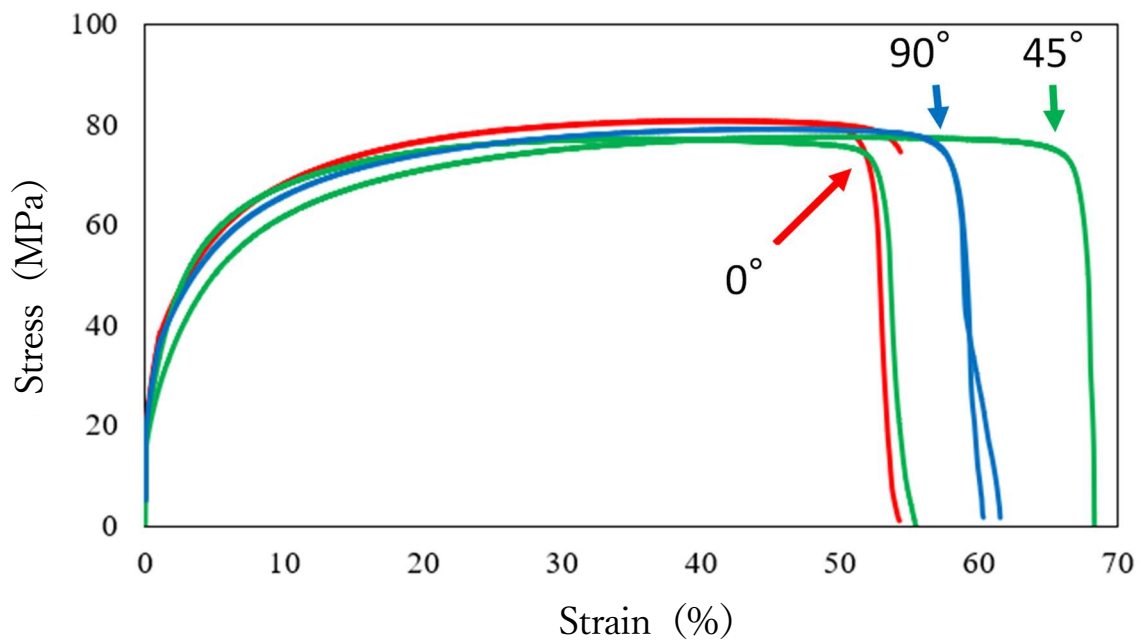


図 2-8 引張試験結果 A1050-O

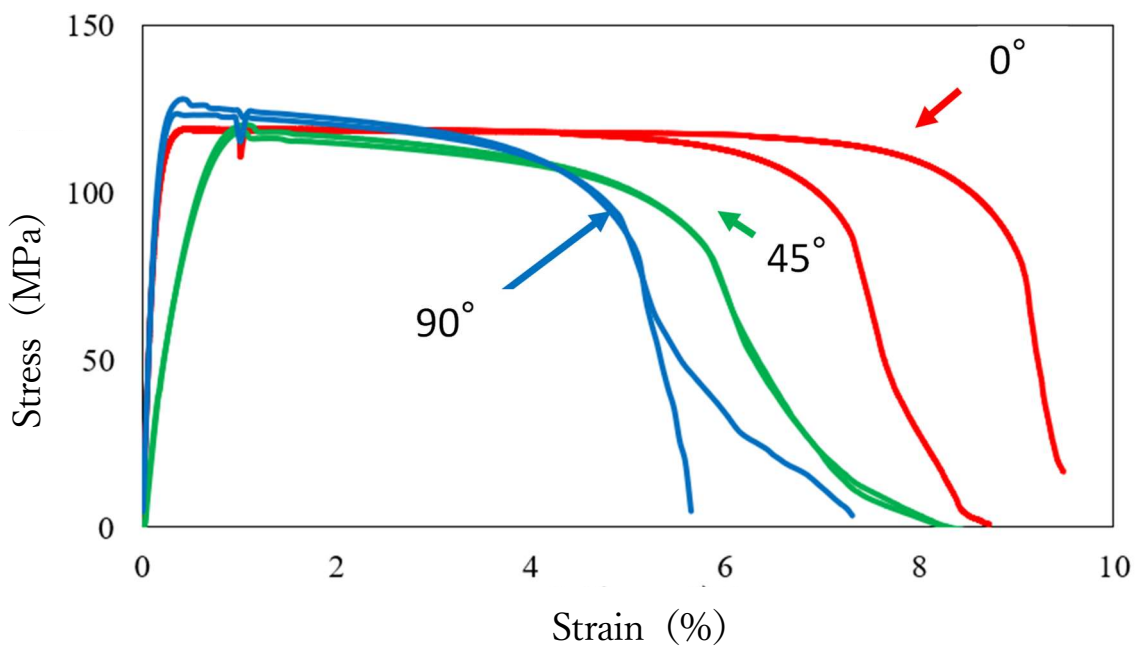


図 2-9 引張試験結果 A1050-H24

表 2-1 機械的性質

	ロール方向 と引張方向の なす角度	0.2%耐力 [MP a]	引張強さ [MP a]	全伸び [%]	n 値
A3003-H14	0°	115	150	9	0.07
	45°	111	146	7	0.07
	90°	124	154	6	0.07
A1050-O	0°	23	80	54	0.30
	45°	23	77	64	0.29
	90°	20	78	64	0.31
A1050-H24	0°	111	116	9	0.05
	45°	45	112	8	0.05
	90°	113	127	6	0.04

2.5.3 エリクセン試験

一般的な張出性を評価するため、エリクセン試験を実施し限界破断高さを測定した。図 2-10 に試験機の写真を示す。試験機は材料が破断した際の試験力の低下を検出することで、停止する仕組みとなっており、破断高さはそのパンチの押し込み量から求められる。図 2-11 に試験機のジグおよびパンチの寸法を示す。張出成形ではフランジ材料の流動を防ぐため、シワ押さえにより 10[kN]の荷重をかけ、材料を拘束することとした。パンチが接触する材料の表面にはパラフィン系低粘度オイルを塗布することで潤滑を行った。実験は 90[mm]角の材料で 3 枚ずつ試験を行い、その平均値を求めることによりエリクセン値(限界張出高さ)とした。試験速度は約 5[mm/min]である。

図 2-12 と表 2-2 に材料の n 値と破断高さの関係を示す。試験結果は n 値が増加すると共に破断高さが増加する傾向となった。



図 2-10 エリクセン試験機

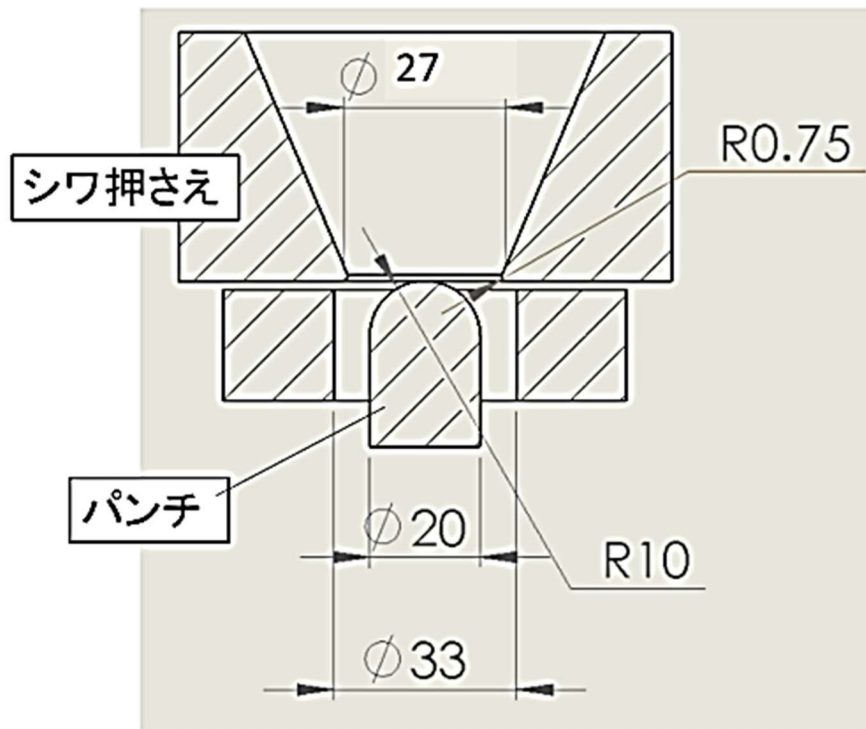


図 2-11 エリクセン試験機のジグおよびパンチ

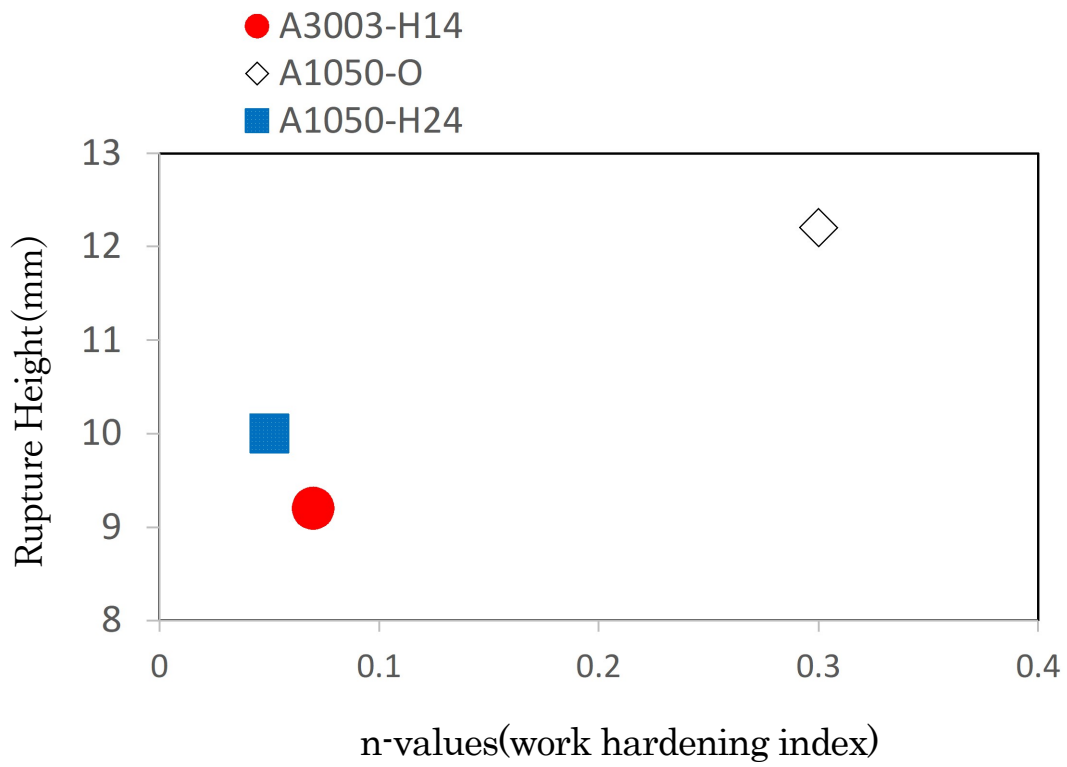


図 2-12 破断高さと n 値の関係

表 2-2 エリクセン試験結果

材質	n 値	破断高さ(mm)
A 3 0 0 3-H 1 4	0.07	9.2
A 1 0 5 0 - O	0.30	12.2
A 1 0 5 0 - H 2 4	0.05	10

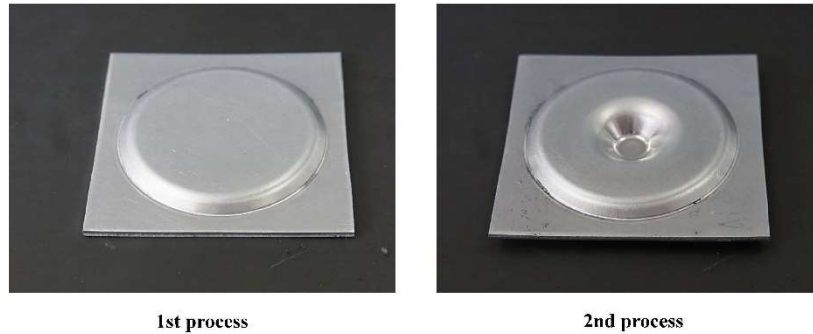


図 2-14 試験片の写真

2.6.2 金型および成形条件

図 2-15 示す金型で自動車用熱交換器に使用されている A3003-H14 材と純アルミニウム A1050-H24, A1050-O の 3 種類の材料を用いて張出成形試験を行った。図 2-16 に成形プロセスの模式図を示す。パンチに対向するダイが無く、ブランクホルダーによって周辺材料を固定してパンチを押し込んで成形する。

成形試験では電動サーボプレス（最大荷重 110 トン）を使用した。ブランクホルダーによって素材周辺部を 10kN の荷重で拘束してパンチを 6000[mm/min] の速度で押し込むことで成形を行った。パンチが接触する面にはパラフィン系低粘度オイルを塗布することで潤滑を行った。パンチの押し込み量はすべて 3.82mm である。なお、パンチ側 R は図 2-17 の様に R1.2（板厚の 75%）ダイ側 R は R1.8（板厚の 112%）とした。これらの寸法はすべて実際の製品形状を想定して決定した。

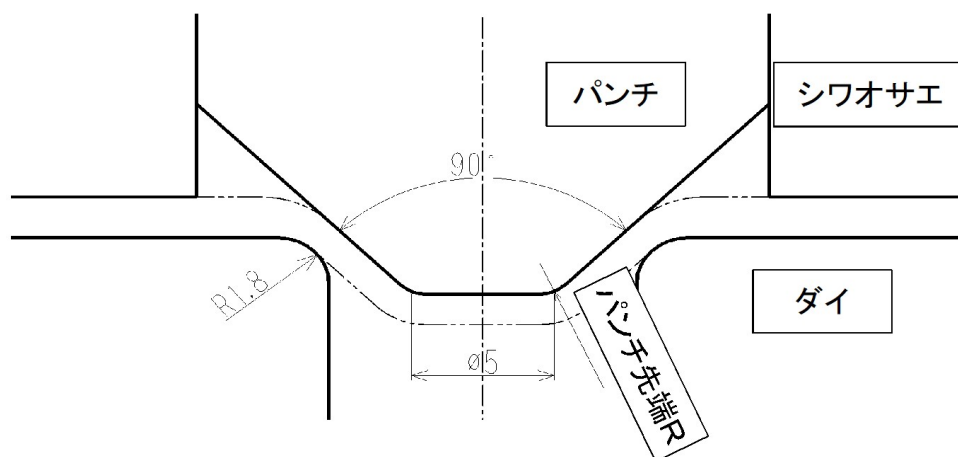


図 2-15 金型 A の詳細図

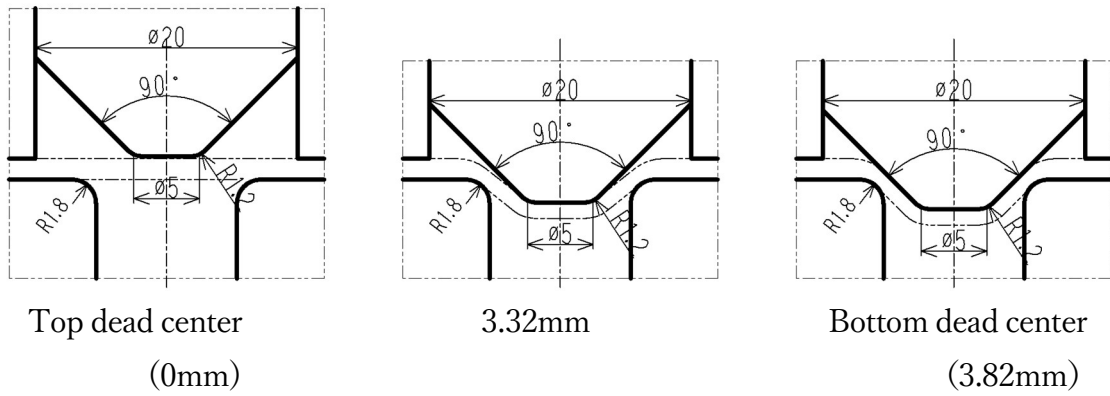


図 2-16 金型 A の成形プロセスの模式図

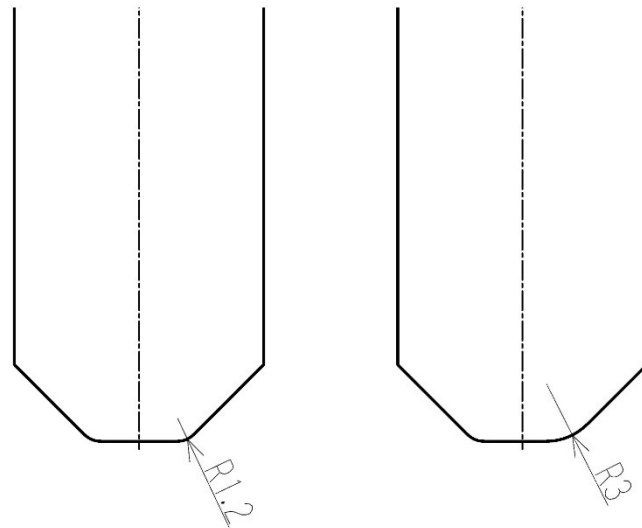


図 2-17 試験するパンチ先端 R の比較(金型 A)

2.6.3 使用プレス機

1100[kN]電動サーボプレス機を使用した。
図 2-18 に使用使用プレス機を示す。



図 2-18 電動サーボプレス機

2.6.4 肉厚の測定方法

肉厚の測定には一般的に接触式ポイントマイクロメーターが用いられる。しかし、本実験の供試材は最小の引張強さが約 80[MPa]と小さく、また小型な形状であるためそれが困難である。そこで著者は代替案として、試験片断面の写真を拡大しスケールを用いて測定する方法を行った。

図 2-19 にプレス成形を実施した試験片の概観写真を示す。測定の際にはロール方向による肉厚変化の影響を考慮するため、図 2-20 に示すようにロール方向と切り出す方向のなす角を 0° , 90° で変えることで区別した。切断の工程ではワイヤーカットによる加工代を加味し、パンチ中心より 0.5[mm]オフセットさせた位置を切っている。

図 2-21 は試験片断面の様子である。試験形状は中心軸で対象であり、中心から左右

で同じ加工条件である。そこで本実験では中心より右側の肉厚を測定した。肉厚の測定は、図 2-22 の様に顕微鏡で撮影した断面写真を A1 用紙に拡大させて印刷し、定規をあてながら距離を測定する。測定点はパンチが接触する面を基準に取り、中心から約 0.25[mm]の間隔で上面と下面の最小距離を測定し、それを肉厚とした。

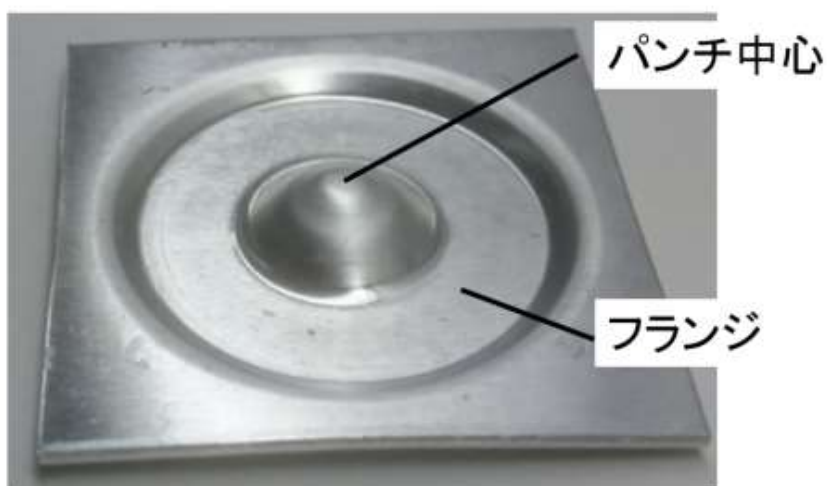


図 2-19 測定品

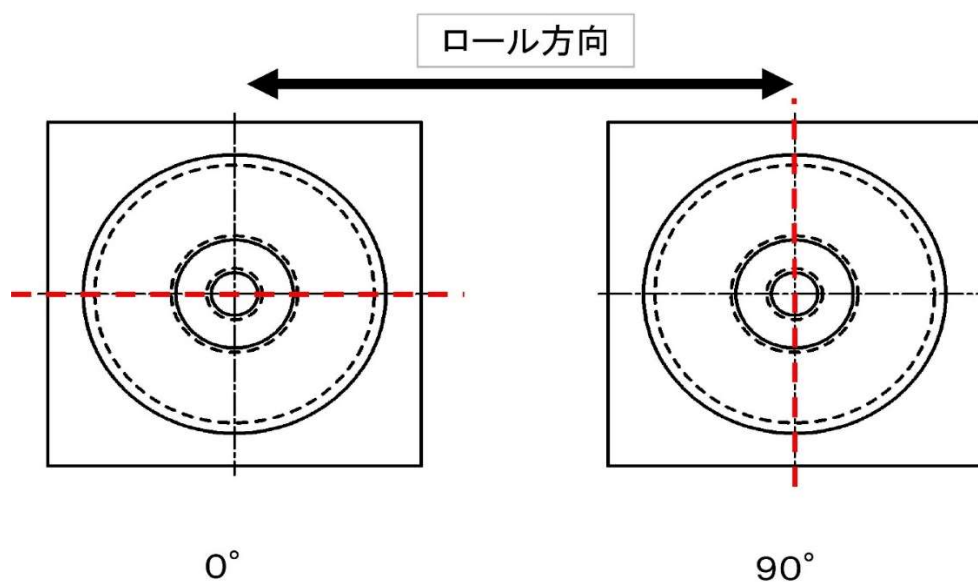


図 2-20 測定サンプルの切断位置

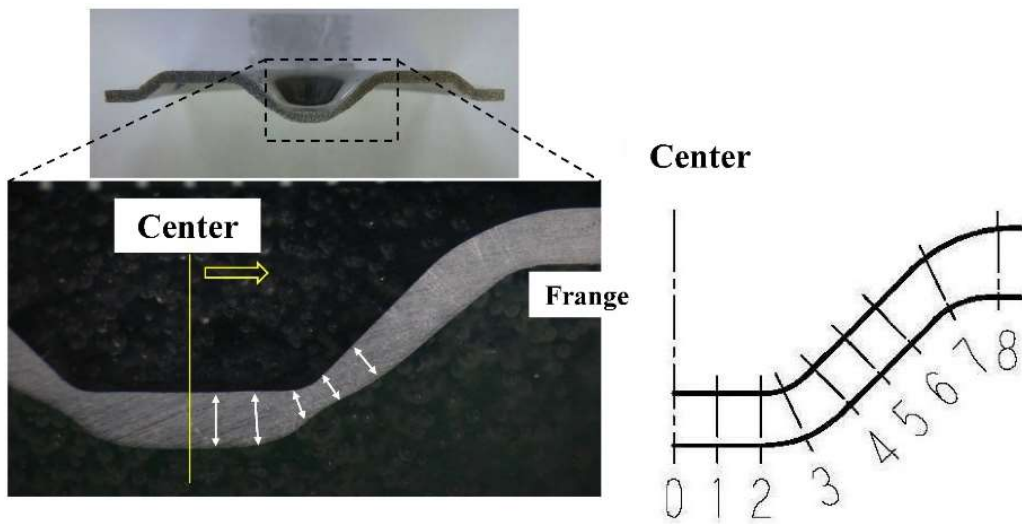


図 2-21 測定位置詳細



図 2-22 A1 用紙に印刷した試験片

2.6.5 成形品の断面形状と肉厚分布

成形品の断面写真を図 2-23 に示す。ダイを設けずにパンチのみで加工を行った結果、パンチ・ダイ R 部においてネッキングが起こり、肉厚が極端に減少している。材質が変わっても減肉個所や傾向に差は無い。

板厚の測定には一般的に接触式ポイントマイクロメーターが用いられる。しかし、本実験の供試材は最小の引張強さが約 80[MPa]と小さく、また小型な形状であるためそれが困難である。そこで著者は代替案として、試験片断面の写真を拡大しスケールを用いて測定する方法を行った。

図 2-24 に 3 種類材質の比較を示すまた図 2-25 から図 2-27 にはパンチ端 R 違いの測定値を示す

想定した形状は肉厚ひずみ-25% (板厚 1.6mm から 1.2mm へ減少) であるが、図 2-25 の肉厚分布において、パンチ端 R 部位でネッキングが生じて-35%となっている。一方、その近傍では肉厚の減少が少なく、不均一な肉厚分布となっている。全体の肉厚分布に対して材料の影響は少ない。



A3003-H14



A1050-H24



A1050-O

図 2-23 試験した成形品の断面写真

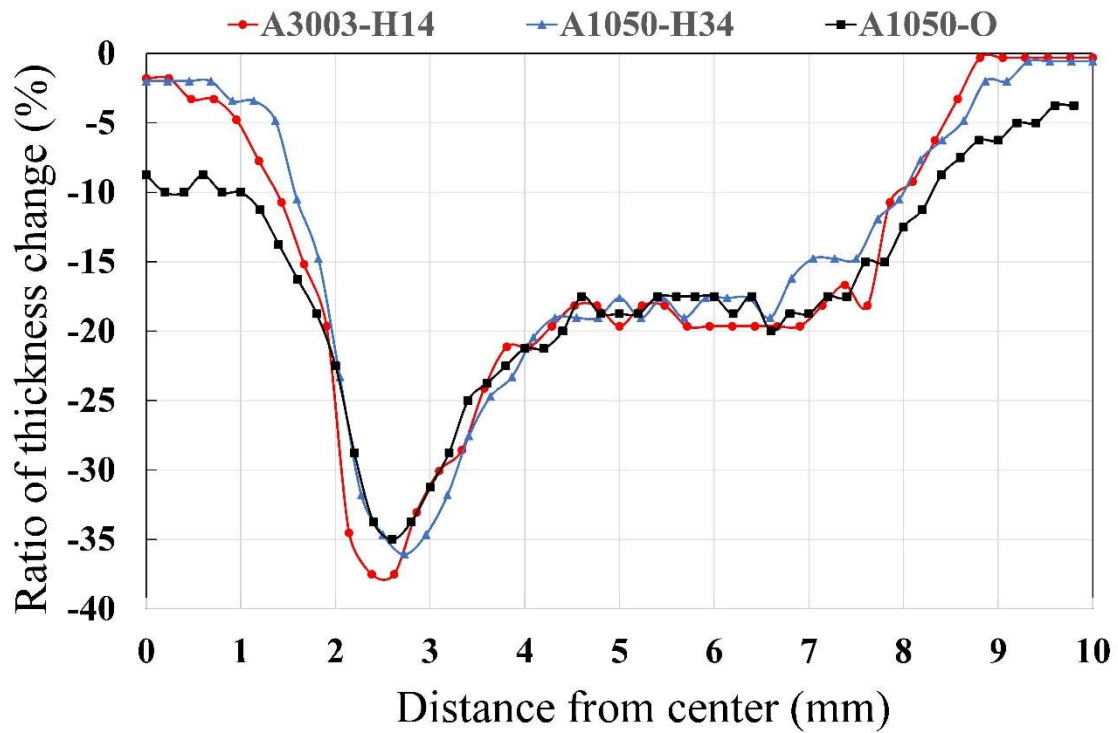


図 2-24 試験した材質違いの肉厚分布 (金型 A)

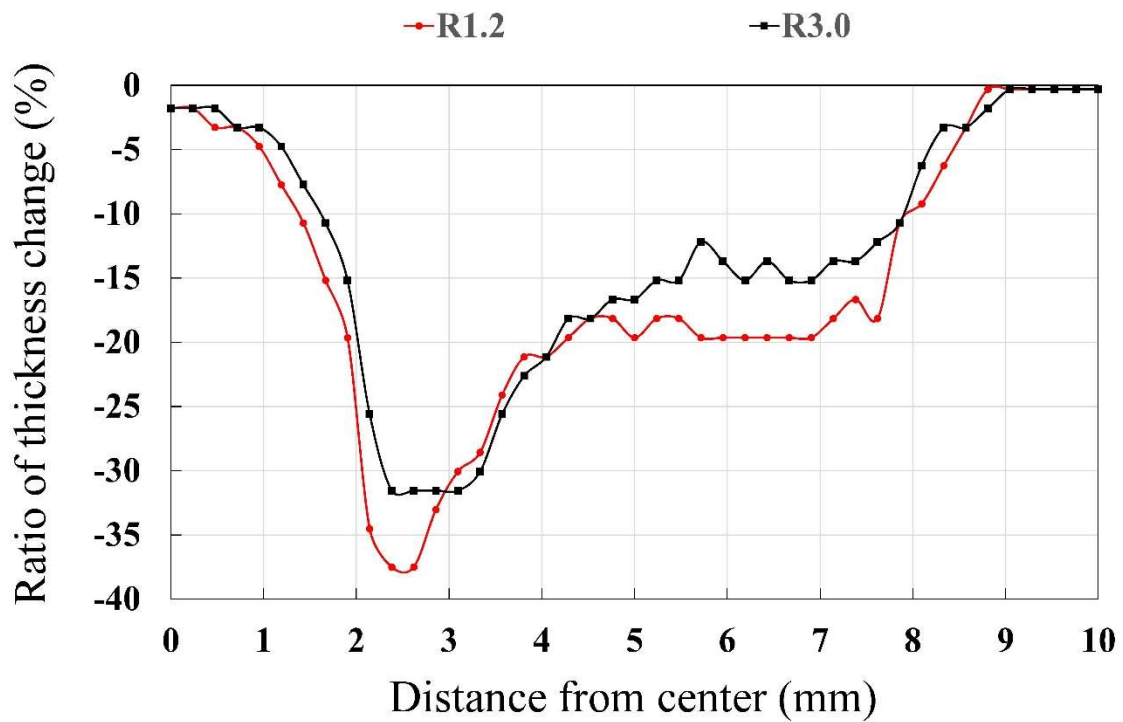


図 2-25 試験したパンチ端 R 違い A3003-H14

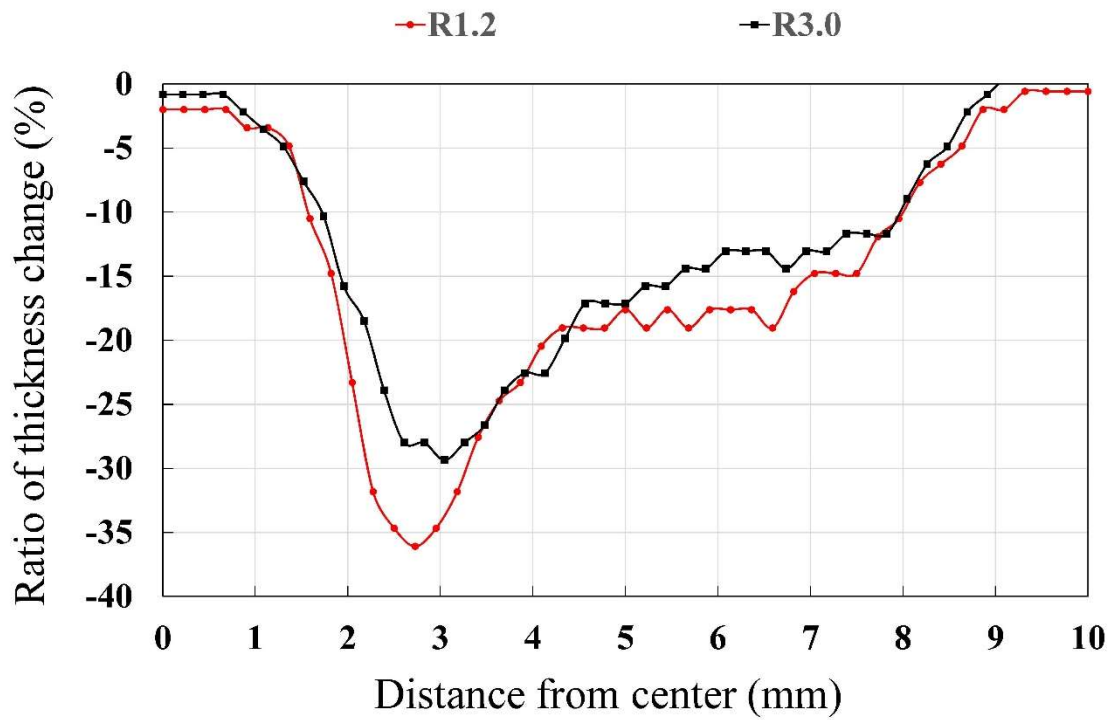


図 2-26 試験したパンチ端 R 違い A1050-H24

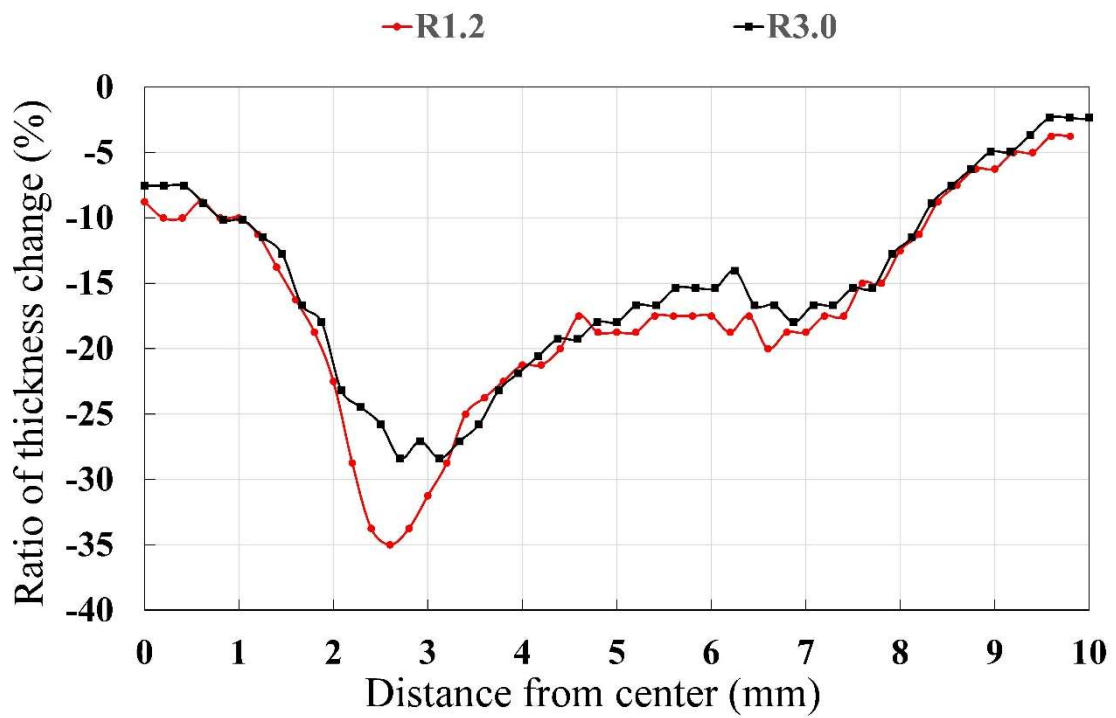


図 2-27 試験したパンチ端 R 違い A1050-O

2.6.6 考察

本研究における製品形状を成形する場合、通常の張出成形では変形が一か所に集中してネッキングが起る。したがって、張出高さを低く再設定する必要がある、表面積が狭くなるため熱交換率が減少する。このことを解決するために圧縮・張出成形という技術を提案する。

図 2-24 における肉厚分布では、製品中央のフラット部の肉厚減少が少ない。この部分を圧縮して外周へ材料を流動させることができればパンチ・ダイ R 部のネッキングを避けることが可能である。張出成形では二軸引張荷重によって肉厚が減少していきネッキングによって成形限界（張出し高さ）が設定されるが、発想を変えて板厚方向に圧縮して外周を押し広げていけばさらに成形限界が大きくなると考えられる。そこで、引張試験における肉厚減少および圧縮試験による肉厚減少と外周ひずみの増加に関する基礎実験を行った。

2.7 引張試験における板厚減少の評価

2.7.1 引張試験における板厚測定

引張試験は材料の伸びを評価するが肉厚減少の評価がないので追加試験を行った試験片は図 2-28 に示す寸法とした。またロール方向による機械的性質の影響を考慮するため、ロール方向と引張方向のなす角がそれぞれ 0° 、 45° 、 90° となる様に試験片を区別し、引張試験機で実施した。試験速度は 5 [mm/min] とし、破断手前まで停止した 0 度は 8%、 45° 度は 7%、 90° 度は 5% までとし板厚の変位を測定した図 2-29 に測定応力ひずみ線図を示す図 2-30 には引張試験におけるひずみと肉厚減少の検証結果を示す

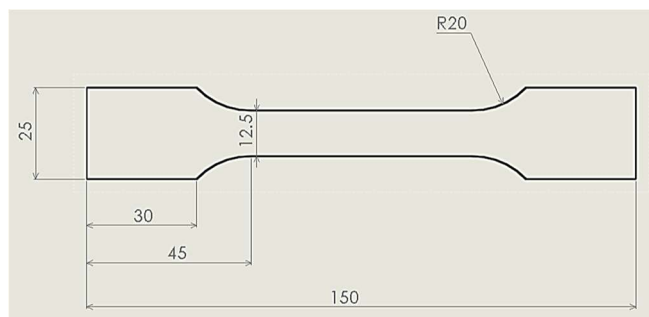
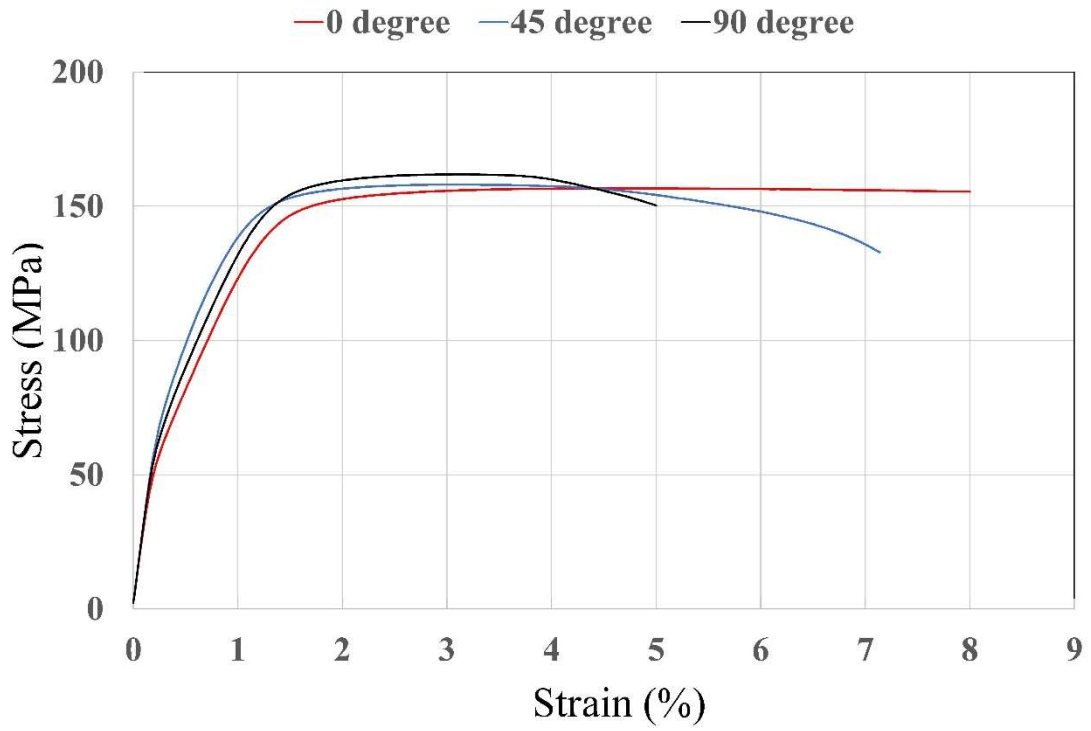


図 2-28 引っ張り試験片寸法



0度：最大8%，45度：最大7%，90度：最大4.5%で停止

図 2-29 破断手前まで測定した応力ひずみ線図

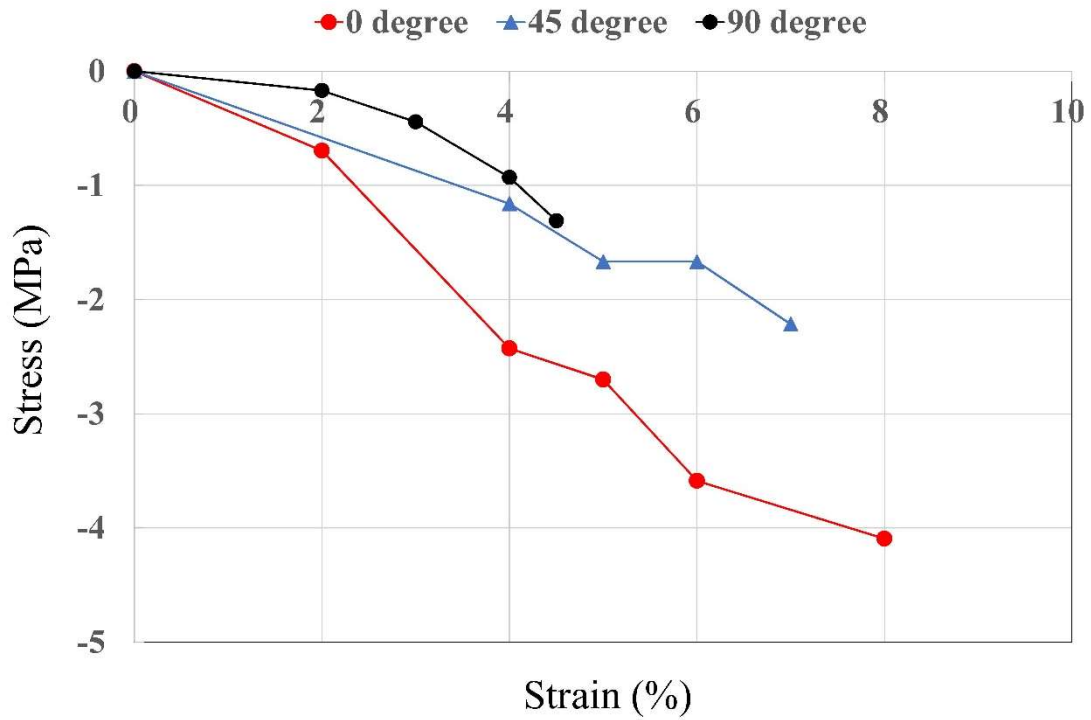


図 2-30 引張試験におけるひずみと肉厚減少

2.7.2 圧縮による肉厚減少と外周ひずみ試験

引張試験での結果として圧延方向によって降伏点応力や引張強さは変わらないが、破断伸びは大きく変わる。いずれの材料においても破断伸びは 10%以下であり引張加重による板厚減少には限界があるために、圧縮加重による板厚減少について調査する試験機は図 2-31 で示すインストロン万能試験機（60 トン）で行った、

試験片は図 2-32 の様に板厚 1.6mm のアルミニウム合金 A3003-H14 と純アルミニウム（A1050-H24, A1050-O）を直径 10mm にワイヤーカットにて切り出し、工具鋼 SKD-11 を用いて製作した治具で圧縮試験を実施した。図 2-33 は圧縮変位に対する板厚減少率、図 2-34 は周長増加率をそれぞれ示している。圧縮変位とともに板厚は減少し、周長は長くなる。A3003-H14 は純アルミニウムに比べて硬い材料なので同じ圧縮変位でも板厚減少率と周長増加率は少ない。

板厚減少率と周長増加率は体積一定の条件で決定されるのでそれぞれを縦軸、横軸にとってグラフを描くと図 2-35 に示すように材料に関係なく一つの線上にデータが整理される。板厚を 25%現象させた場合、周長は 15%増えており、外周に材料が広がったことを示している。なお、周長のひずみは引張試験による破断伸びをはるかに超えており圧縮荷重による材料の流動を利用すれば、薄板であっても鍛造のように素材から大きな形状変化で製品を成形することが可能である。以上の結果を参考にし、板厚方向に圧縮して外周に材料を移動させることでネッキングを防止する圧縮・張出成形法を考案した。



万能試験機	インストロン
メーカー	インストロン
型式	5592型
最大荷重	600kN

図 2-31 使用する圧縮試験機

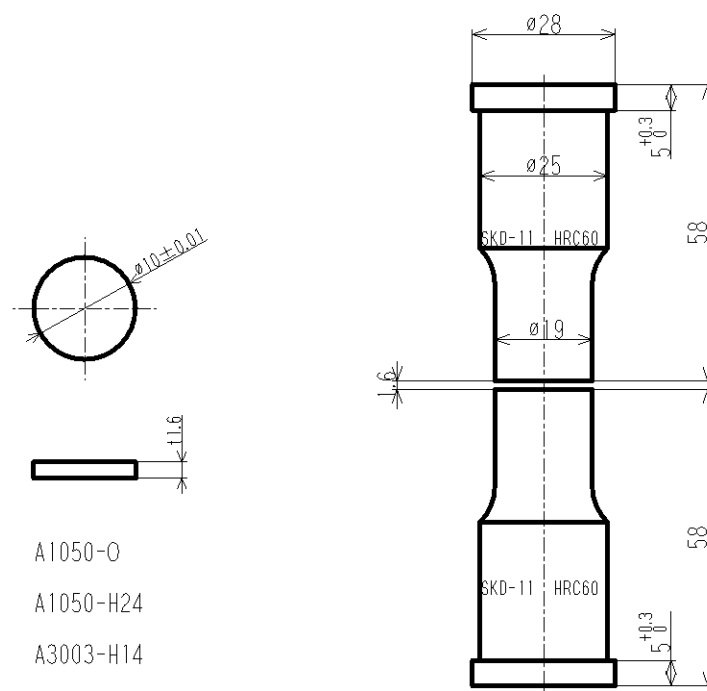


図 2-32 試験片及び圧縮試験用治具図面

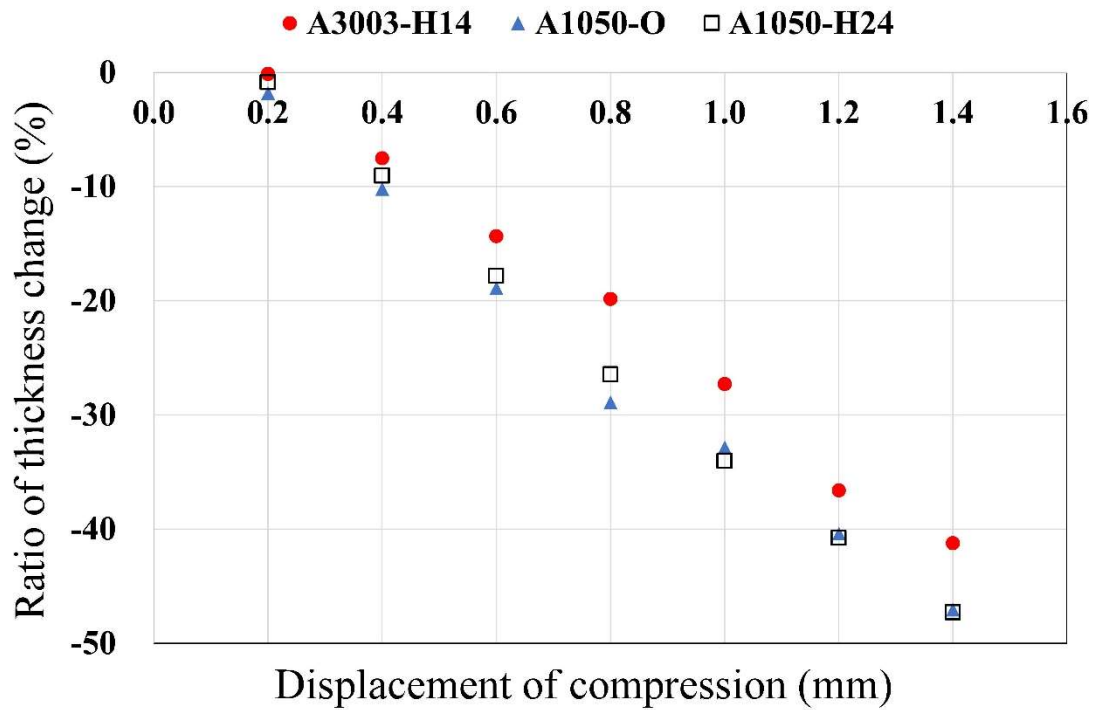


図 2-33 圧縮変位に対する板厚減少率

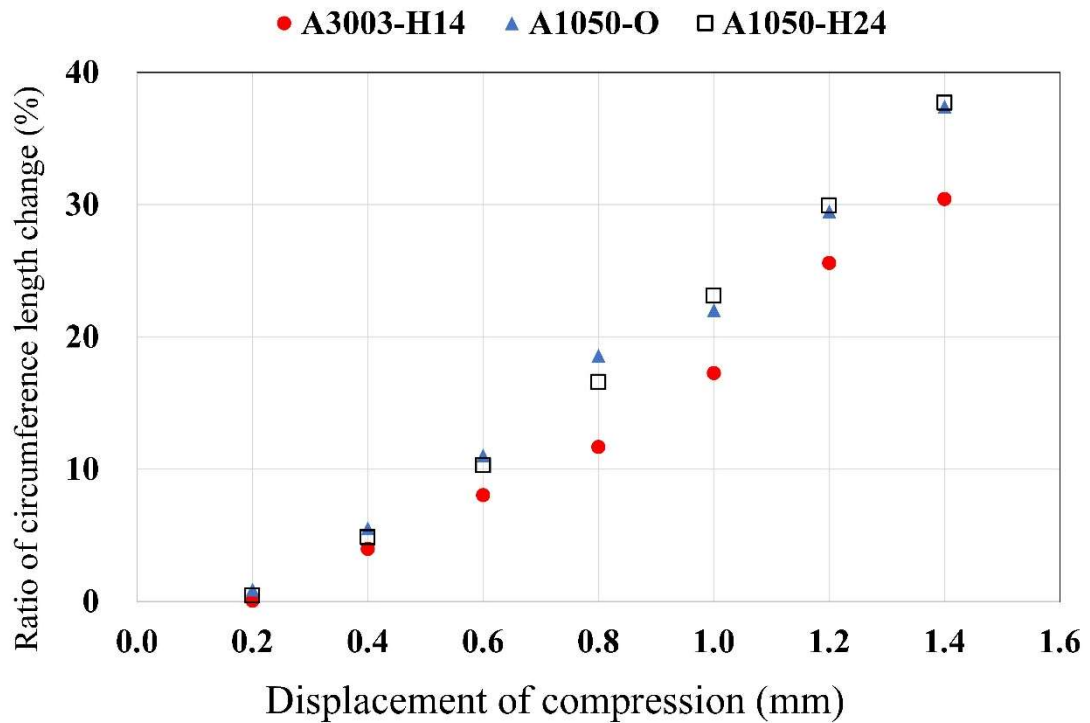


図 2-34 圧縮変位に対する周長増加率

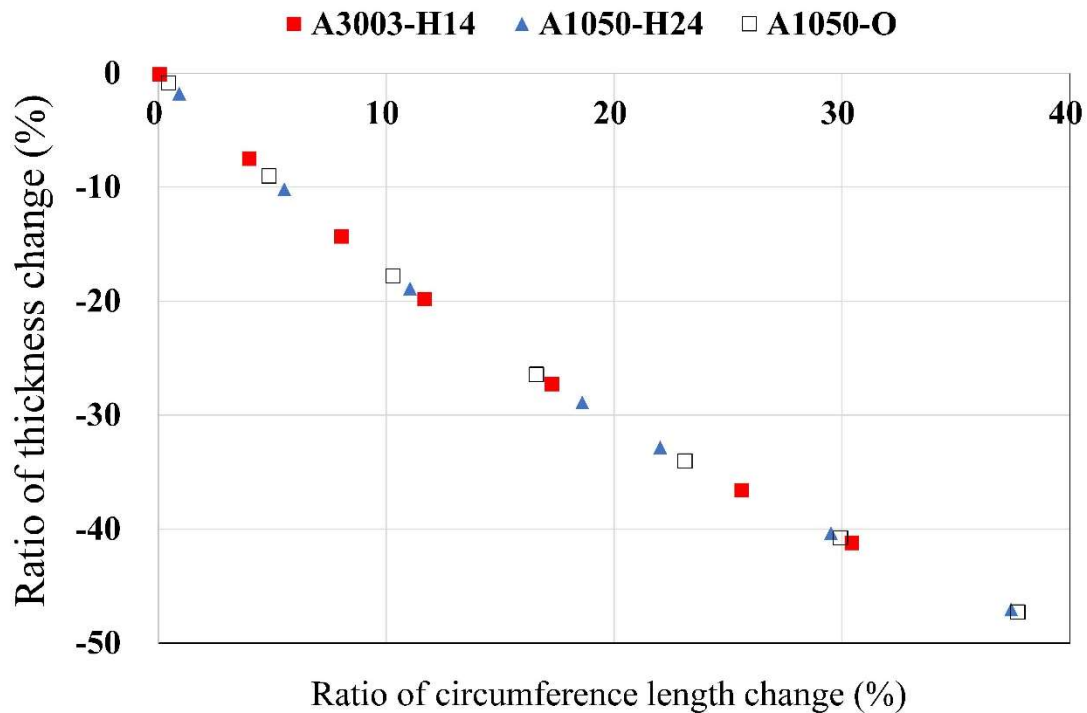


図 2-35 板厚減少率と周長増加率

2.8 圧縮荷重を負荷する新しい張出成形

2.8.1 金型および成形条件

図 2-36 示す金型で自動車用熱交換器に使用されている A3003-H14 材と純アルミニウム A1050-H24, A1050-O の 3 種類の材料を用いて圧縮・張出成形における金型を図 2-37 に示す。この金型では、ブランクホルダーとパンチに対向するダイが設定される。成形プロセスの模式図、図 2-37 では、下死点においてパンチとダイで製品中央のフラット部に圧縮荷重を与えて、パンチ頭部の材料をパンチ肩部に流して板厚を均等にすることを試みた成形試験では電動サーボプレス(最大荷重 110 トン)を使用した。

ブランクホルダーによって素材周辺部を 10kN の荷重で拘束してパンチを 6000[mm/min]の速度で押し込むことで成形を行った。パンチが接触する面にはパラフィン系低粘度オイルを塗布することで潤滑を行った。パンチの押し込み量はすべて 3.82mm である。なお、パンチ端 R は図 2-38 の様に R1.2 (板厚の 75%) ダイ側 R は R1.8 (板厚の 112%) とした。これらの寸法はすべて実際の製品形状を想定して決定した。

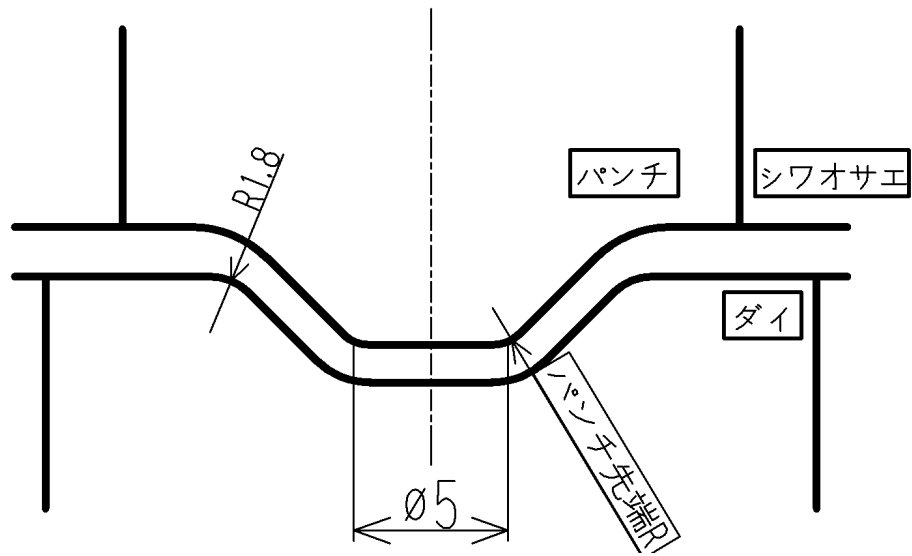


図 2-36 金型 B の詳細図

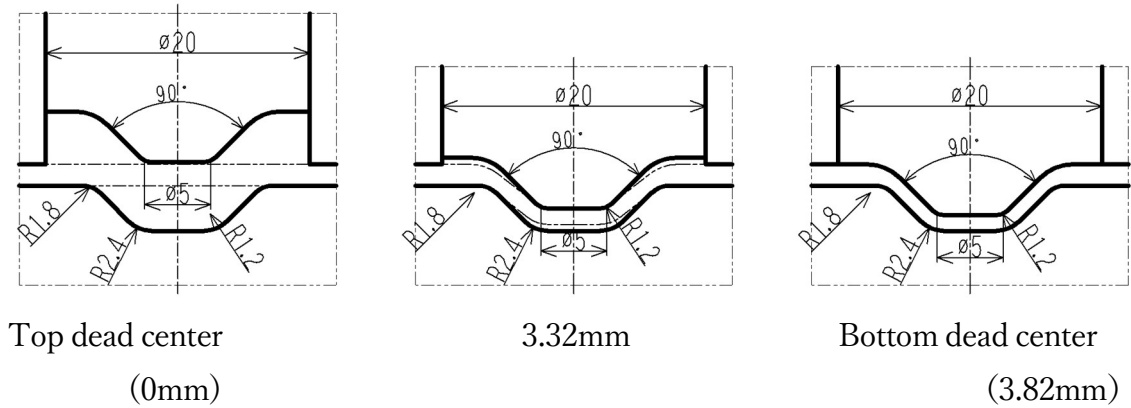


図 2-37 金型 B の成形プロセスの模式図

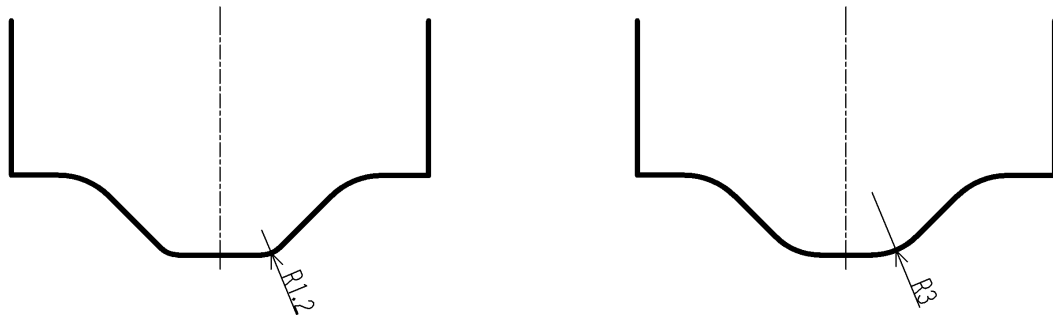


図 2-38 試験するパンチ先端 R の比較(金型 B)

2.8.2 成形品の断面形状と肉厚分布

成形品の断面写真を図 2-39 に示す。材料によらず、くぼみ部の板厚は均一であり、中央部の材料が圧縮荷重によってネッキングが生じるパンチ・ダイ R 部に流動していることが分かる。

成形サンプルの断面において頭頂部からパンチ肩部を經由してフランジ部までの肉厚をマイクロメータで測定した。図 2-40 はそれぞれの材料における製品の肉厚分布について通常の張出成形と圧縮・張出成形を比較した結果である。圧縮・張出成形では、どの材料においても製品形状である肉厚ひずみ-25% (板厚 1.6mm から 1.2mm へ減少) が達成されており、肉厚が均一である。

圧縮・張出成形において製品中央のフラット部に圧縮荷重を加えてパンチ頭部の材料をパンチ肩部に流して肉厚を均一化することに成功した。材料の流動はパンチ肩部の R 形状に影響を受けると考えられるので、張出成形と圧縮・張出成形の両方でパンチ R3 の金型を準備して、これまでのパンチ R1.2 の結果と比較した。各材料における肉厚分布を図 2.41～図 2.43 に示す。張出成形ではパンチ R を R1.2 から R3 に変更するとパンチ肩部における肉厚の減少が抑制されている。圧縮・張出し成形でもパンチ肩 R が大きい方が、肉厚の減少が抑制されており、パンチ肩 R の形状が材料流れに影響を及ぼすことがわかる。



図 2-39 試験した成形品の断面写真

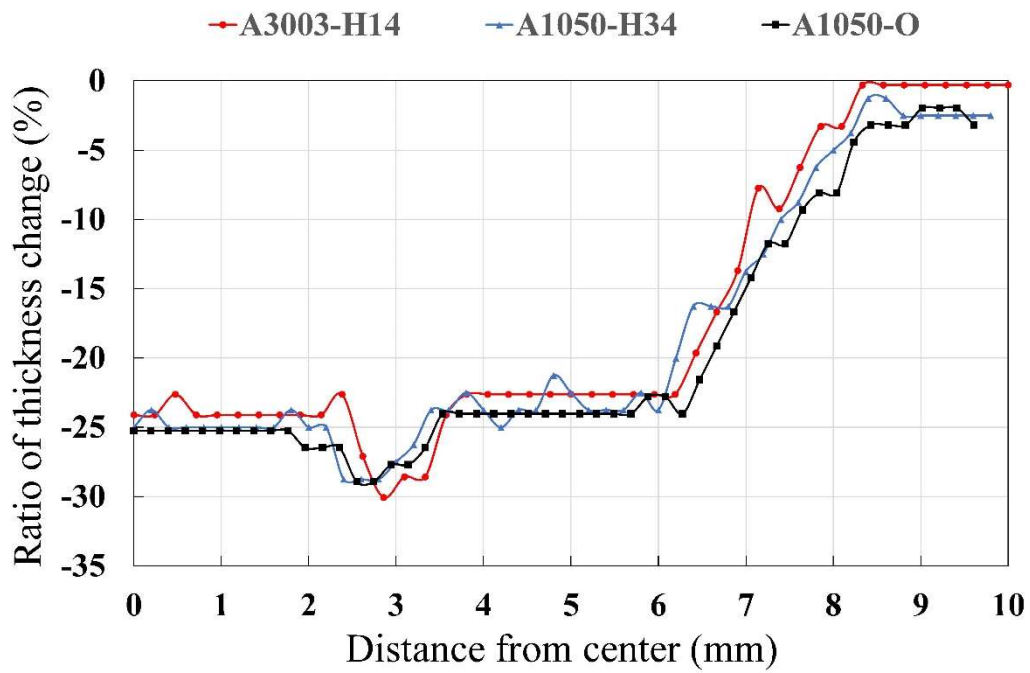


図 2-40 試験した材質違いの肉厚分布 (金型B)

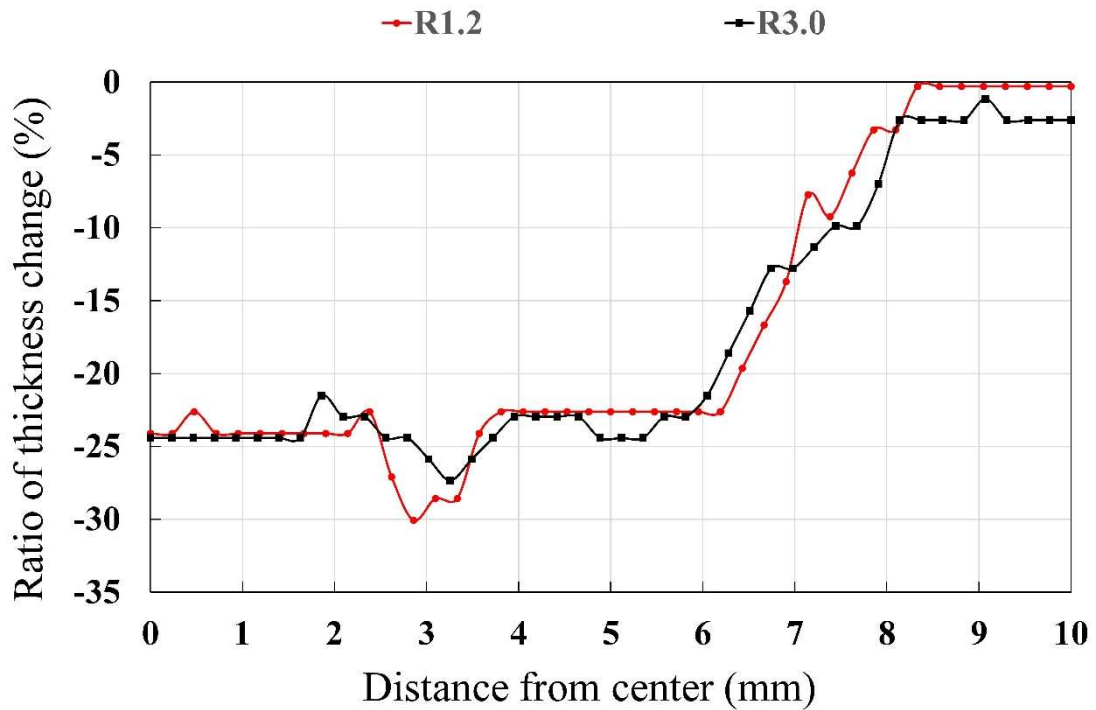


図 2-41 試験したパンチ端R違い A3003-H14

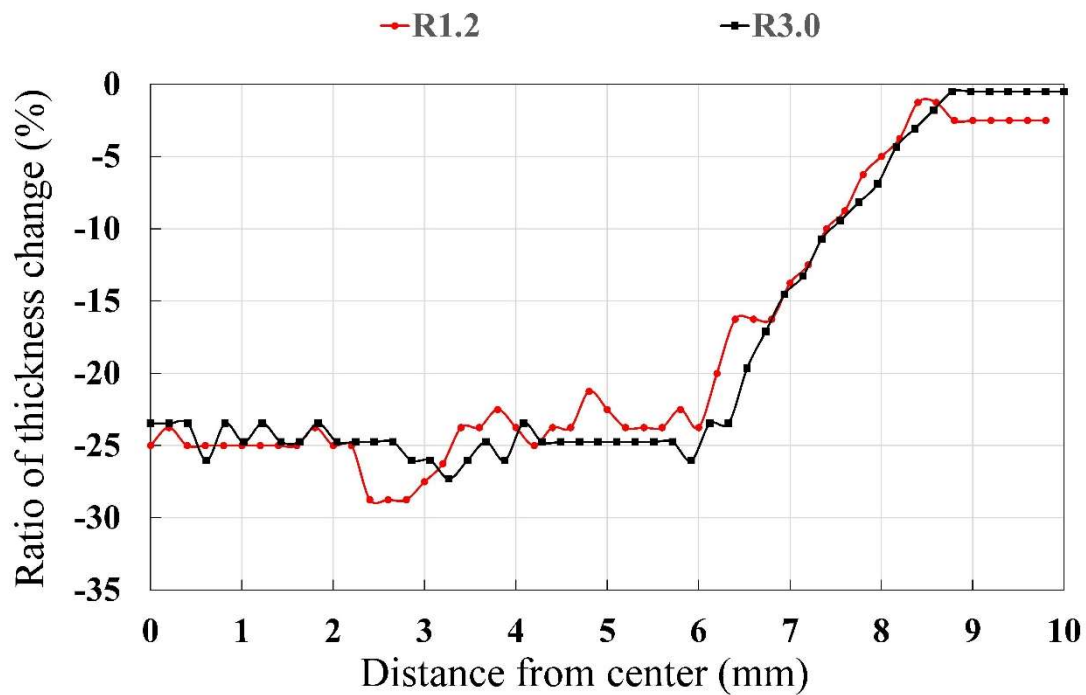


図 2-42 試験したパンチ端 R 違い A1050-H24

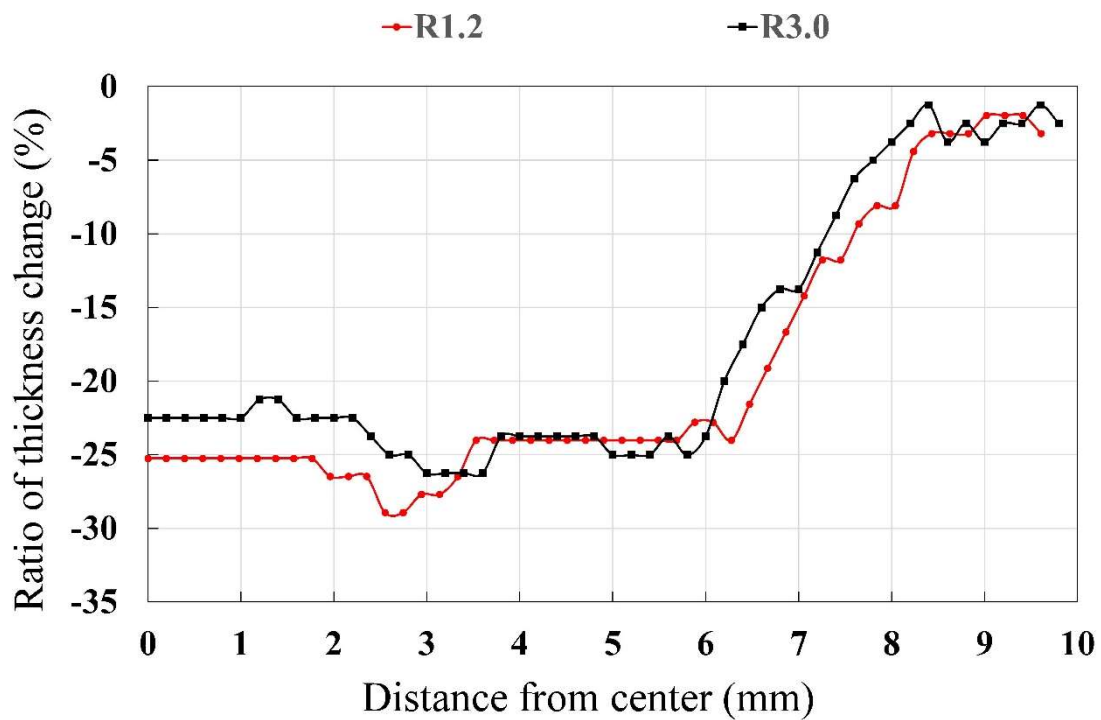


図 2-43 試験したパンチ端 R 違い A1050-O

2.9 面ひずみ測定

2.9.1 面ひずみ測定方法

本実験では張出成形における2軸引張時の面にかかるひずみと板厚方向のひずみの関係を評価するため、スクライブドマーカを用いた測定を行った。測定は成形前にはあらかじめ、レーザープリンター（ブラザー、LM2250）図2-44を用いて指定のマークを描き、成形前と成形後のマークの変化量から面ひずみを算出する測定器はOLYMPUS-STM7図2-45を使用し斜面部の測定には治具を使用し測定面をカメラに對し面直になるように測定を行った測定状態を図2-46に示す。

本実験では面ひずみを周方向と径方向のひずみの和と定義し、図2-47の様に算出した

格子状マークは1[mm]の間隔として描いた。測定点は各サンプルで計3点である。測定詳細を図2-48に示す



図2-44 レーザーマーカ



図 2-45 使用した測定器 OLYMPUS STM7



図 2-45 使用した測定器 OLYMPUS STM7

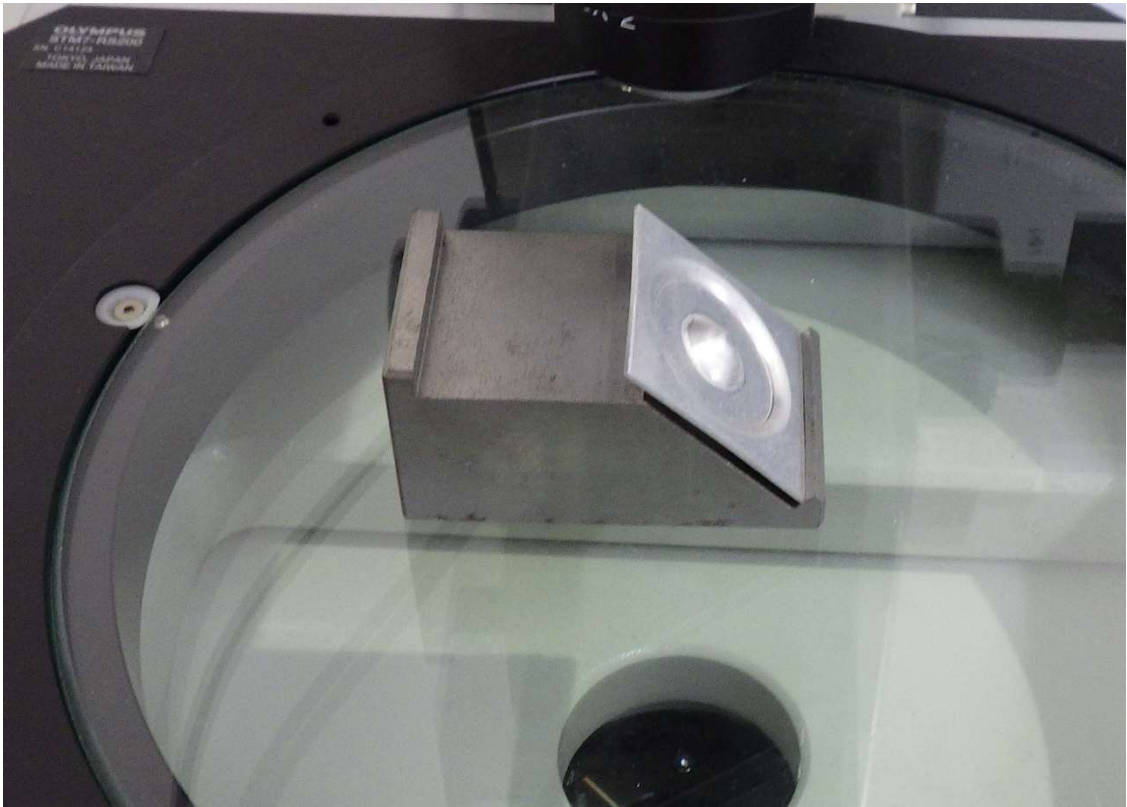
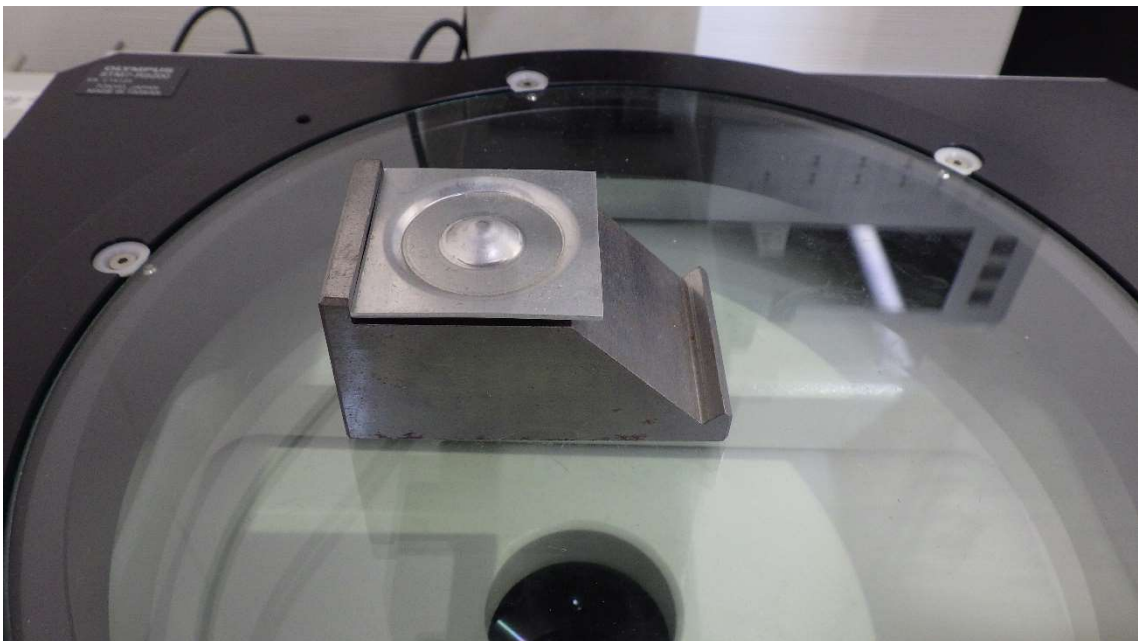
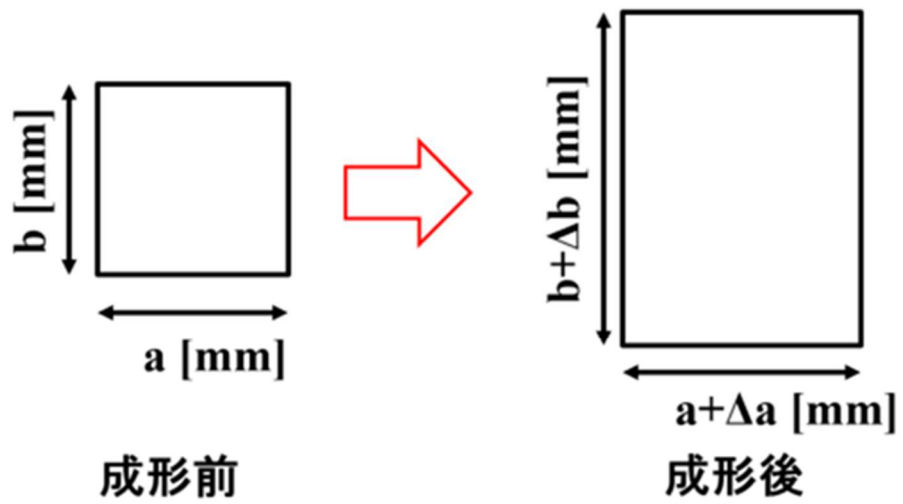


図 2-46 使用した測定治具 斜面部測定時ワーク設置



2-46 使用した測定治具 平面部測定時ワーク設置



$$\text{面ひずみ} = \frac{\Delta a}{a} \times 100 + \frac{\Delta b}{b} \times 100 [\%]$$

図 2-47 面ひずみの導出

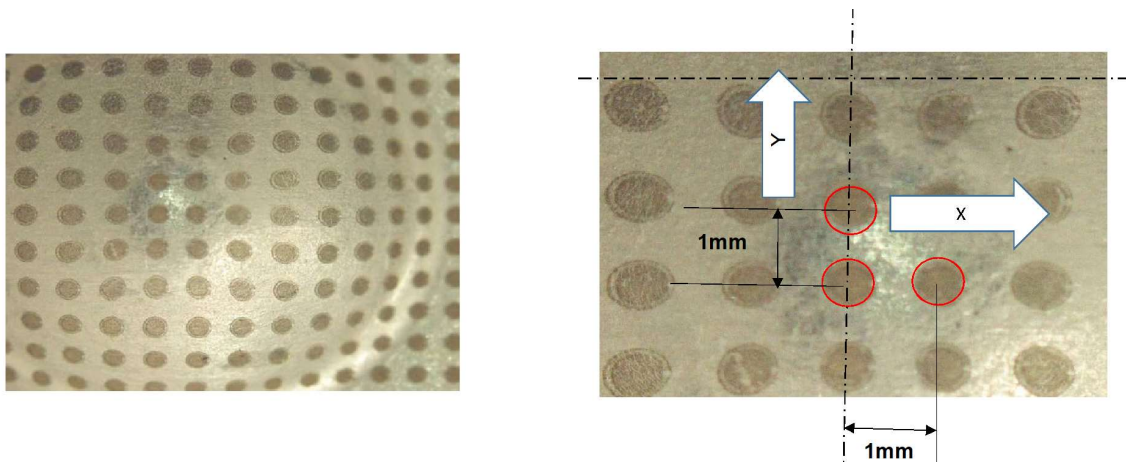


図 2-48 成形後測定方法

2.9.2 面ひずみの測定結果

金型違いによる面ひずみの即景結果を図 2-49 から図 2-51 に示す。

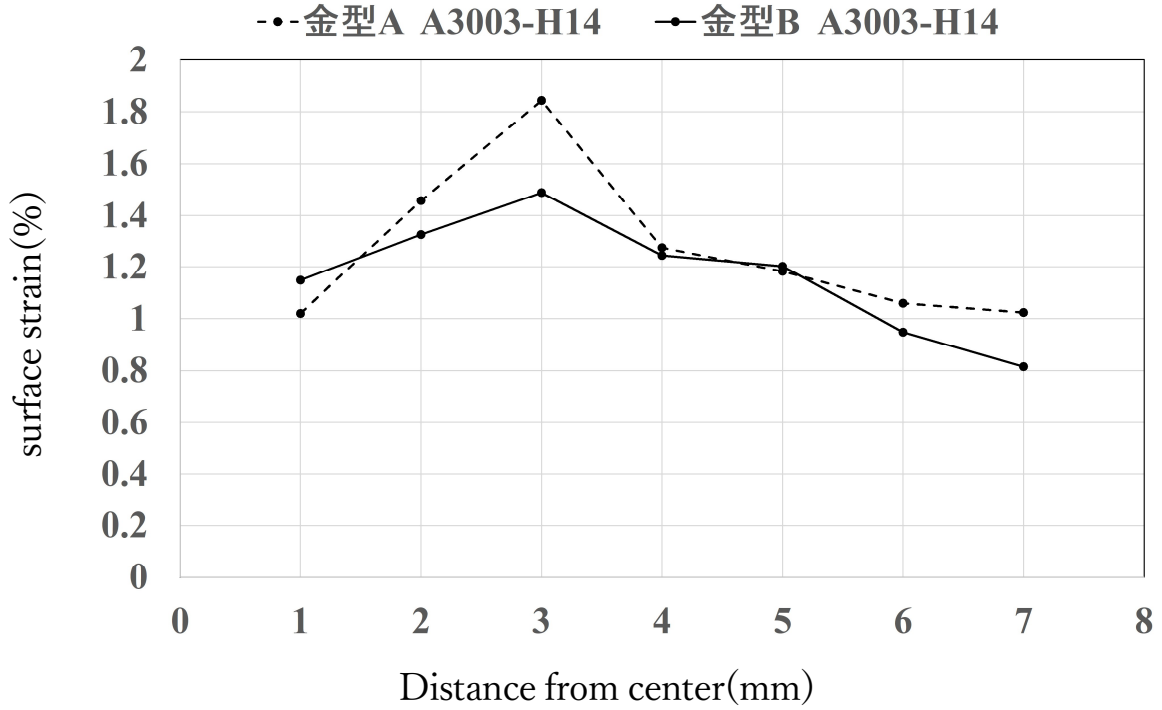


図 2-49 金型違いによる測定結果 A3003-H14

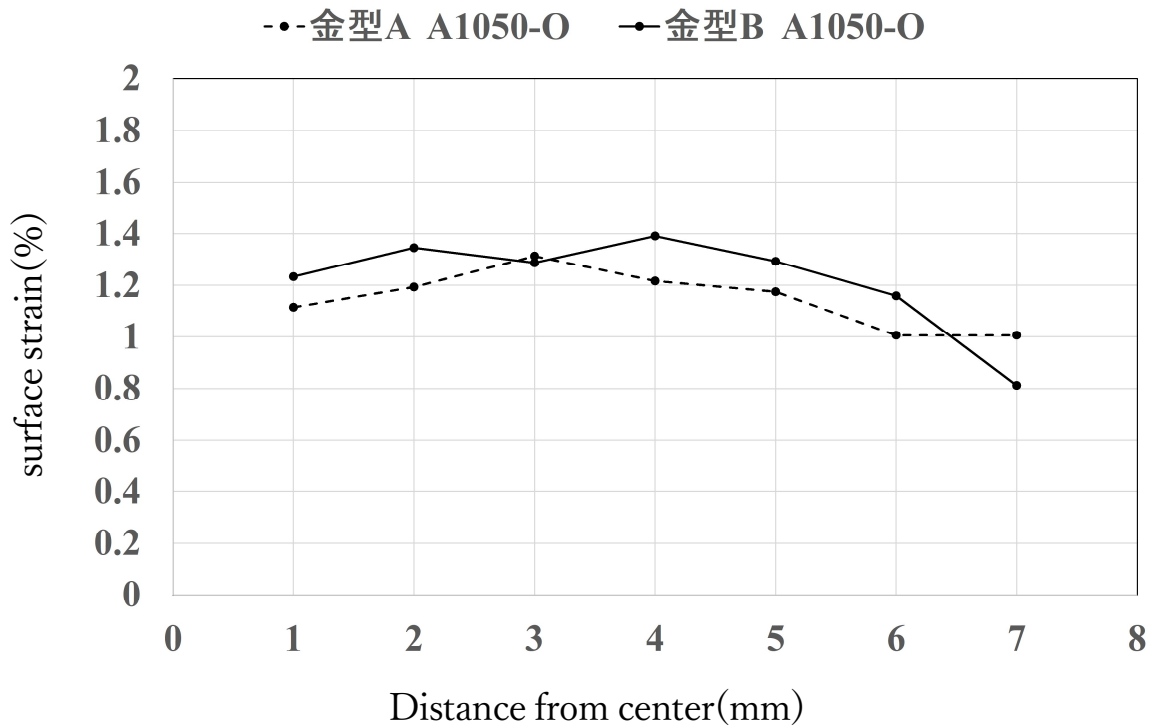


図 2-50 金型違いによる測定結果 A1050-O

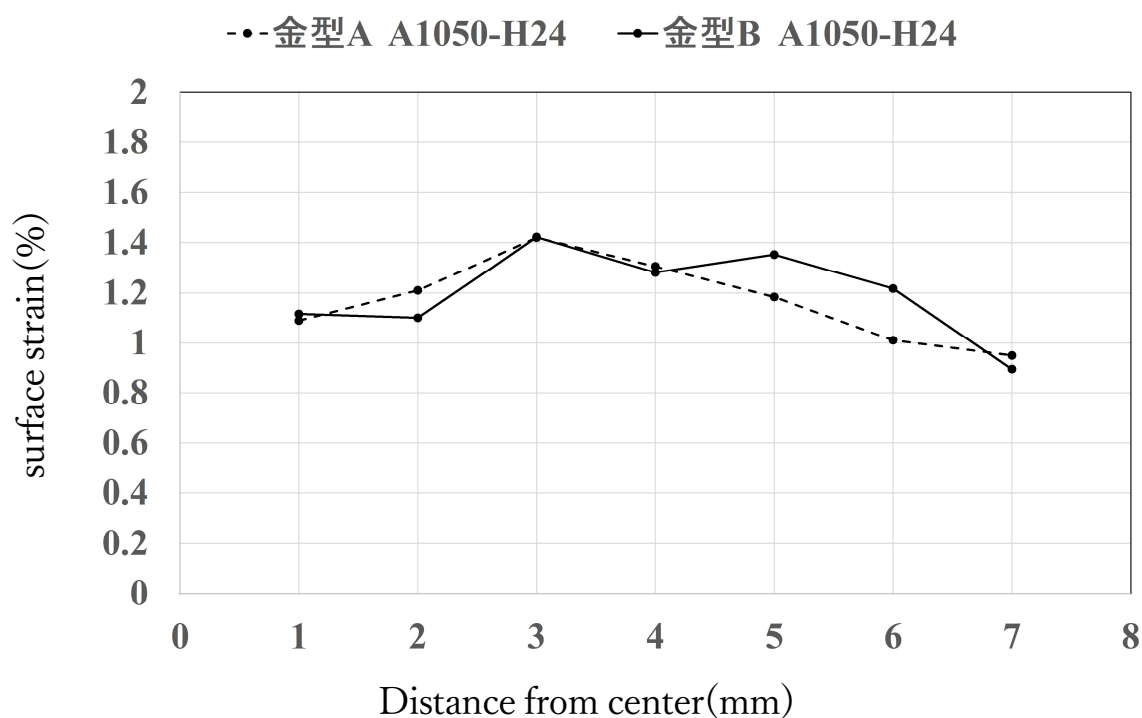


図 2-51 金型違いによる測定結果 A1050-H24

2.9.3 圧延方向がおよぼす影響

端が R1.2[mm]のパンチを用いて成形した A3003-H14 材の 0° と 90° の板厚分布を図 2-52 および図 2-53 に示す。

金型 A および金型 B どちらにおいても、パンチ R 接触部の板厚分布に差はあるがその他は圧延方向に影響せず同様である。この原因を A3003-H14 の応力-ひずみ線図から考察する。図 2-54 を見ると破断伸びのみ強い異方性を持っていることがわかり、ひずみの小さい領域では圧延方向によらず同様である。そのため、本実験で板厚分布に変化が生じなかった理由は、材料の相当ひずみが関係しており、今回の張出成形においては板厚分布に差が出る程、十分な大きさでなかったことが予想される。

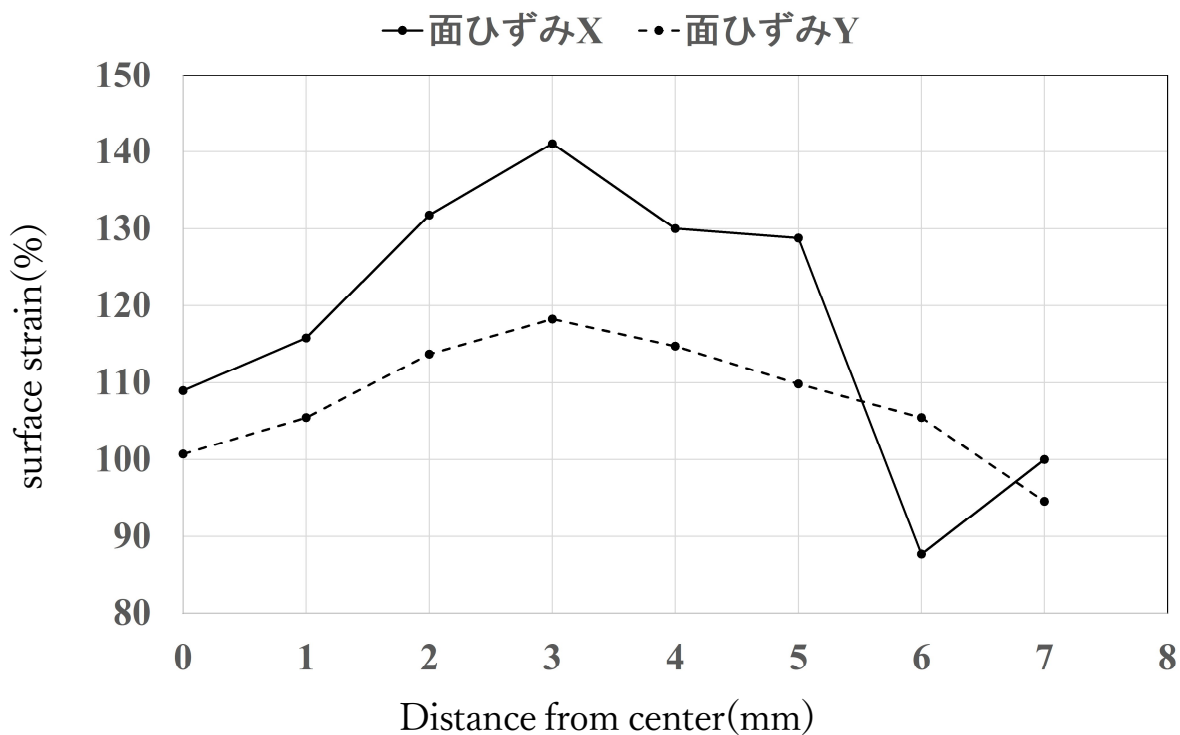


図 2-52 圧延方向の違いによる比較(A3003-H14 金型 A)

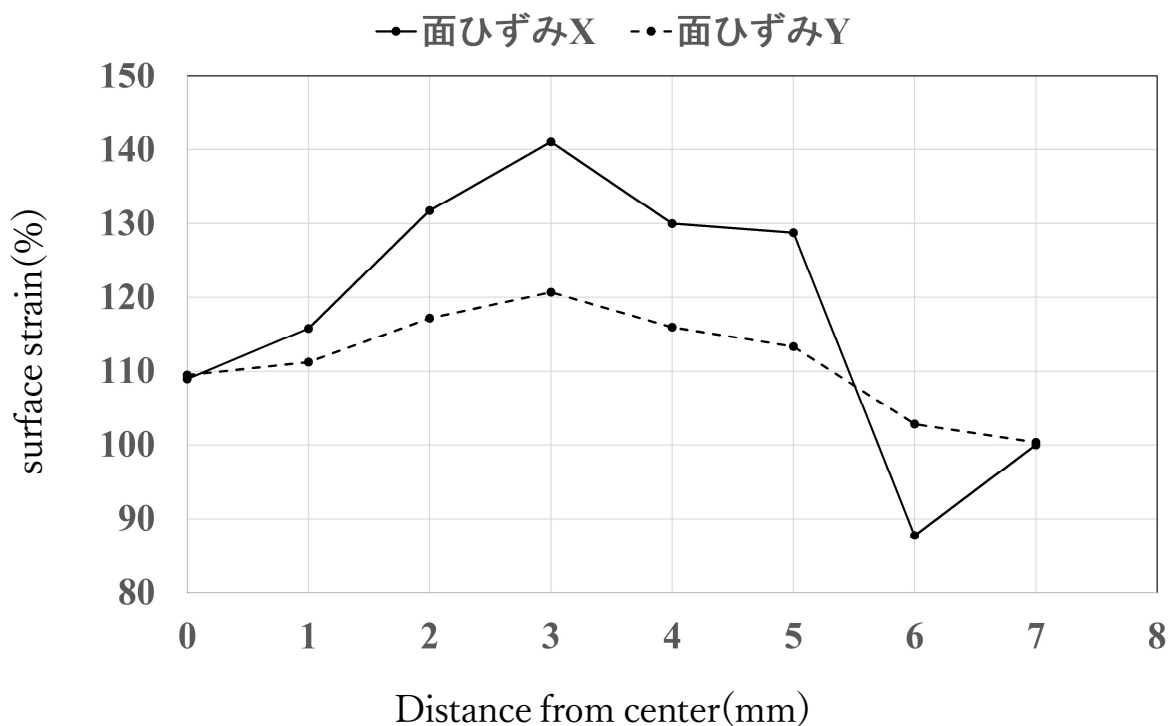


図 2-53 圧延方向の違いによる比較(A3003-H14 金型 B)

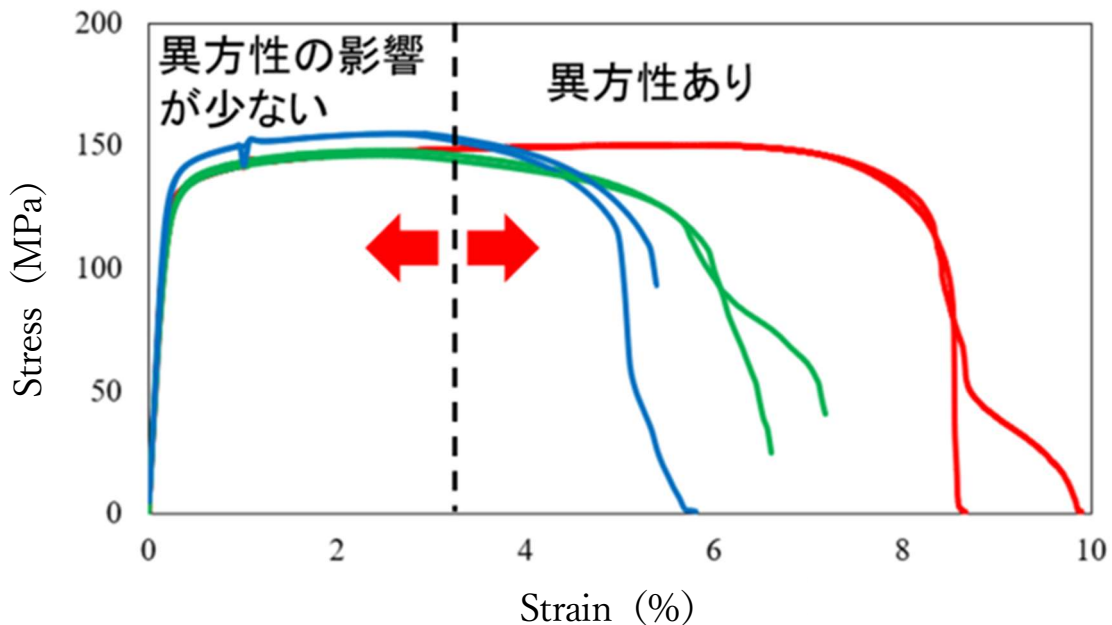


図 2-54 応力ひずみ線図中の圧延の影響について

2.10 結言

プレス成形試験による肉厚の測定結果とその考察を以下に示す。

本研究では、張出成形における一般的な成形試験であるエリクセン試験では評価できない”製品肉厚の均一化”に注目し、プレス成形試験を実施した。実験では材料に対して圧縮荷重を負荷し、機械的に板厚を均一に成形する工法に取り組み、肉厚を均一に成形する技術を検討した。また、成形サンプルに対し面ひずみの測定を行い、圧縮荷重を加えた成形法による板厚均一化の効果とメカニズムを考察した。

自動車用熱交換器を想定した製品形状（肉厚 25%減少）で、アルミニウム合金の張出成形と肉厚の均一化技術の研究を行い、生産効率や金型コストを考慮して 1 回の工程で製品を成形する事が出来る可能性が有る事が明らかになった。以下に本研究で得られた結論をまとめる。

- 1) 本研究における製品形状を成形する場合、通常の張出成形では変形がパンチ肩部に集中してネッキングが起こる。
- 2) 単純な引張変形では肉厚減少量が 5%未満であり、今回の製品形状における肉厚 25%減の実現は張出成形では困難である。

- 3) 圧縮荷重による材料の流動を利用すれば、薄板であっても鍛造のように素材から大きな形状変化で製品を成形することが可能である。板厚方向に圧縮して外周に材料を移動させることでネッキングを防止する圧縮・張出成形法を考案した。
- 4) 圧縮・張出し成形によって製品中央のフラット部に圧縮荷重を加えてパンチ頭部フラット形状の材料をパンチ肩部に流して肉厚を均一化することに成功した。パンチ肩 R の形状は材料流れに影響を及ぼし、肩 R が大きい方が肉厚の減少量が少ない。
- 5) 実際に加工を行ったプレス成形品の、面ひずみを測定することにより材料の2軸引張時における板厚減少率を算出することができた。これは n 値やエリクセン試験の様な方法とは異なり、より実践に近い加工条件下での張出性を評価することが可能である。

第3章

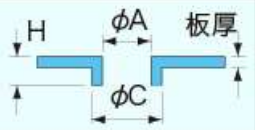

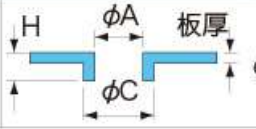
アルミニウム合金のバーリング
複雑成形技術についての検討

第3章 アルミニウム合金のバーリング複雑成形技術についての検討

3.1 バーリング概要

通常バーリングは平面上に加工される図3-1の2工程タイプのように平板に下穴を開けてパンチにて広げる加工である、一般的なバーリングのバーリング下穴とバーリング内径、外径の計算式は図3-1の様な関係になっている。

■ バーリング下穴径とチップ径簡易計算式 (対象ワーク材質:SPCC、アルミ)

	下向き1工程バーリング金型		下向き2工程バーリング金型	
	加工形状	計算式	加工形状	計算式
1工程目		$\phi C = \phi A + 1.3 \times \text{板厚}$		下穴径 $= (0.56 \sim 0.59) \phi A$
2工程目			$\phi C = \phi A + 1.3 \times \text{板厚}$	

※ 下向きバーリング金型は2工程タイプを使用することで、バーリング仕上げ精度がさらに良くなります。

図3-1 バーリング計算式
AMADA 様金型ワールドより抜粋

3.2 従来の工法・問題点

熱交換器サイズが縮小され各部品の高い精度が要求され、従来比65%とコンパクトになっている。図3-2にヒートポンプシステムの室内コンデンサの部品構成を示す。赤枠の中の部品はコンパクト化に伴い各部品単位も高性能な製品のニーズが高く求められている。これに対応する技術として冷媒を横に流すバイパスの役割をしており、連続したバーリング形状と丸管の接する部位はR形状で接している。図3-3のような製品断面形状でバーリング後のコイニング加工を施す。バーリング付け根付近のR形状は炉中ロウ付け接合性向上には必要な形状ではあるが、コイニングの影響によりバーリング付け根付近の破壊や変形が大いに予想される。

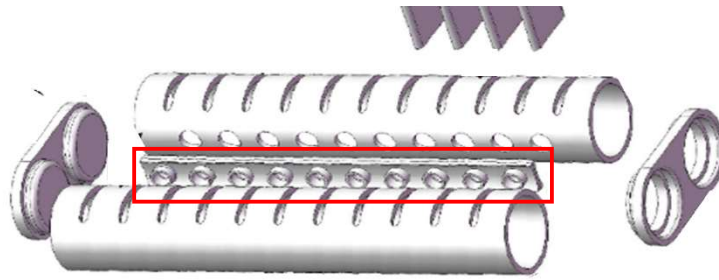


図3-2 ヒートポンプシステム室内コンデンサ用構成部品

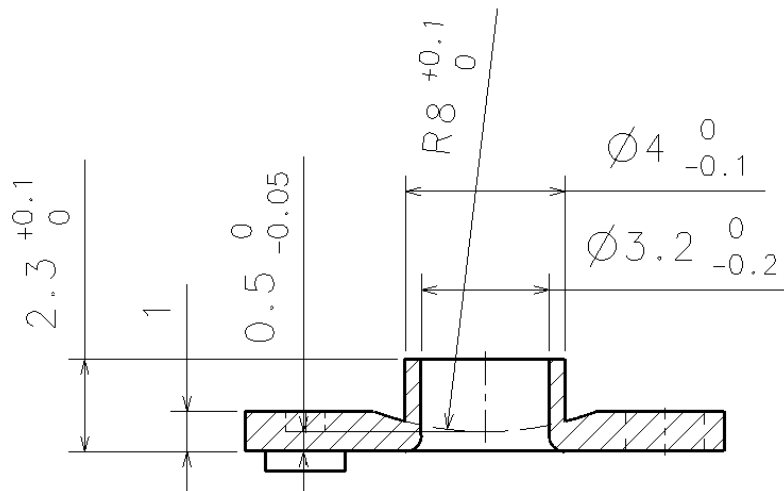


図3-3 製品断面形状

3.3 研究目的

一般に、穴広げ加工であるバーリング加工後に製品端部の高さをそろえるためにコイニングを行うが、コイニングによって炉中ロウ付け接合に必要なバーリング付け根付近の破壊が問題となっている。本章ではバーリング加工に着目して、バーリング後のコイニングによる変形実証試験、ガイドによるバーリングの変形防止の実証試験、最適なブランク幅の検証、製品がガイド内に喰い付きの発生しない構造の実証試験の効果とメカニズムを考察する。なお、本研究ではロックアウトは生産現場で最も多く使用されているエアークッションを用い試験を行った。

3.4 供試材および実験方法

3.4.1 供試材

表 3-1 に示す機械的性質を有するアルミニウム合金 A3003 (板厚 1.0mm) を使用した。

表 3-1 機械的性質値

	0.2%耐力 [MPa]	引張強 さ [MPa]	伸 び %	n 値
A3003- H14	124	154	6	0.0 7

3.4.2 使用プレス機

1100[kN]電動サーボプレス機を使用した。

図 3-4 使用したプレス機を示す。



図 3-4 電動サーボプレス機

3.4.3 工程設定

製品形状から判断し通常の場合 R8+0.1/0 部分においてコイニング成形後下穴をピアスしバーリング加工をする。コイニング成形後だとバーリング加工時の体積が一定ではないので、バーリング高さが一定にならない。コイニングした分の体積が少なくなるのでバーリング高さが低くなるなど品質上の問題が多々ある。

今回の工法はピアス工程後板厚が有る状態でバーリングを行うことで高さが稼げるが、次工程でバーリング部分 (寸法 R8+0.1/0) のコイニング成形を行う際、コイニングした体積のニゲ代を考慮することが重要である。潰した体積は外側に逃げるのでバーリング内径がつかれて外側に押し出されてバーリング内径、外径に変形が起こる。バーリング内径、外径にガイドを設置することで内径が小さくなってしまいう変形や外径が大きくなってしまいう変形は防止できると考えるが、製品外側に体積が逃げる際の変形防止の為外側にガイドを付けるとコイニングした体積はニゲ場が無くコイニング

後板厚の寸法が出にくくなる。バーリング根元付近は外側に体積は逃したくないのでバーリング間で潰した体積を逃し、バーリング内側根本付近は形状を保持出来る様にする事が重要である。

3.5 バーリング後のコイニングによる変形実証試験

試験片は図 3-5、図 3-6 のように加工する。今回の製品はバーリング根元にコイニング形状があるので、コイニング後に下穴を開けてバーリング加工をする順序ではバーリングする体積が一定にならない。加工の順番により製品の出来が左右されるので工程設定と加工順序が重要である。今回はコイニング形状が R 形状となり X 方向 Y 方向でコイニング形状が異なる為、バーリング工程後、コイニング工程とする。以下に金型の構造を示す。

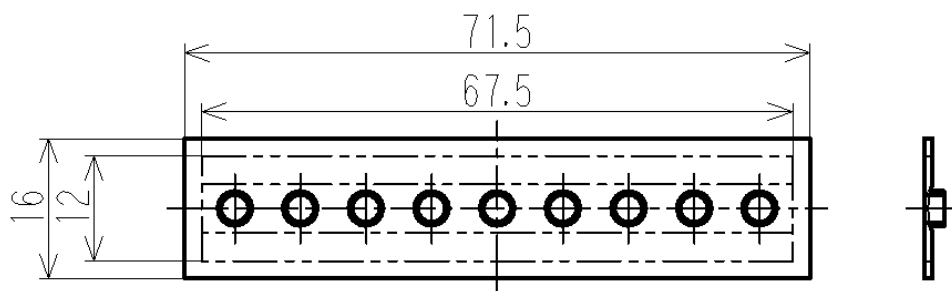


図 3-5 試験用ブランク寸法

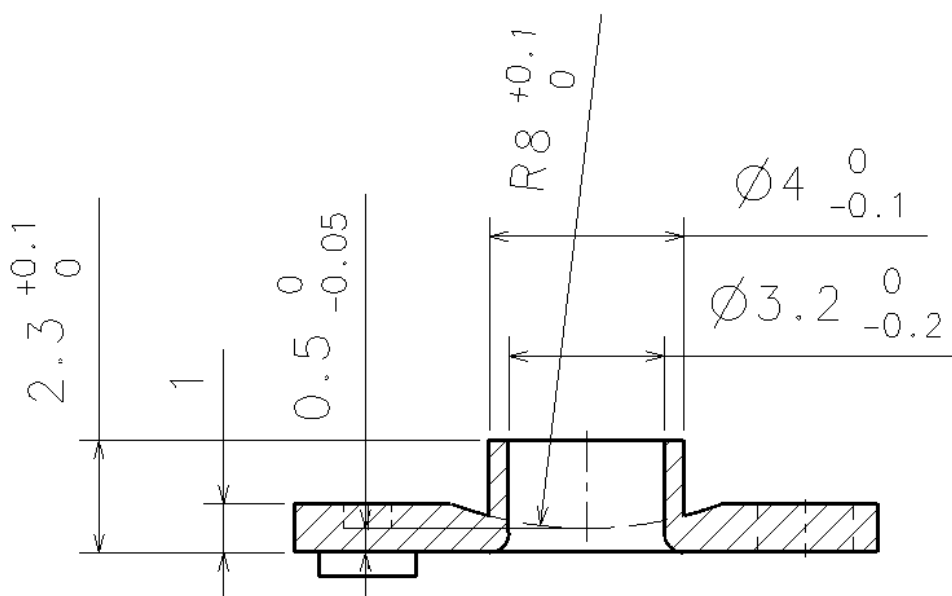


図 3-6 製品断面図

3.5.1 試験金型仕様

1) バーリング後のコイニングによる変形実証試験

金型構造を図 3-7 に示す，製品外側はフリーの状態のコイニングした場合の金型を金型 A とする。

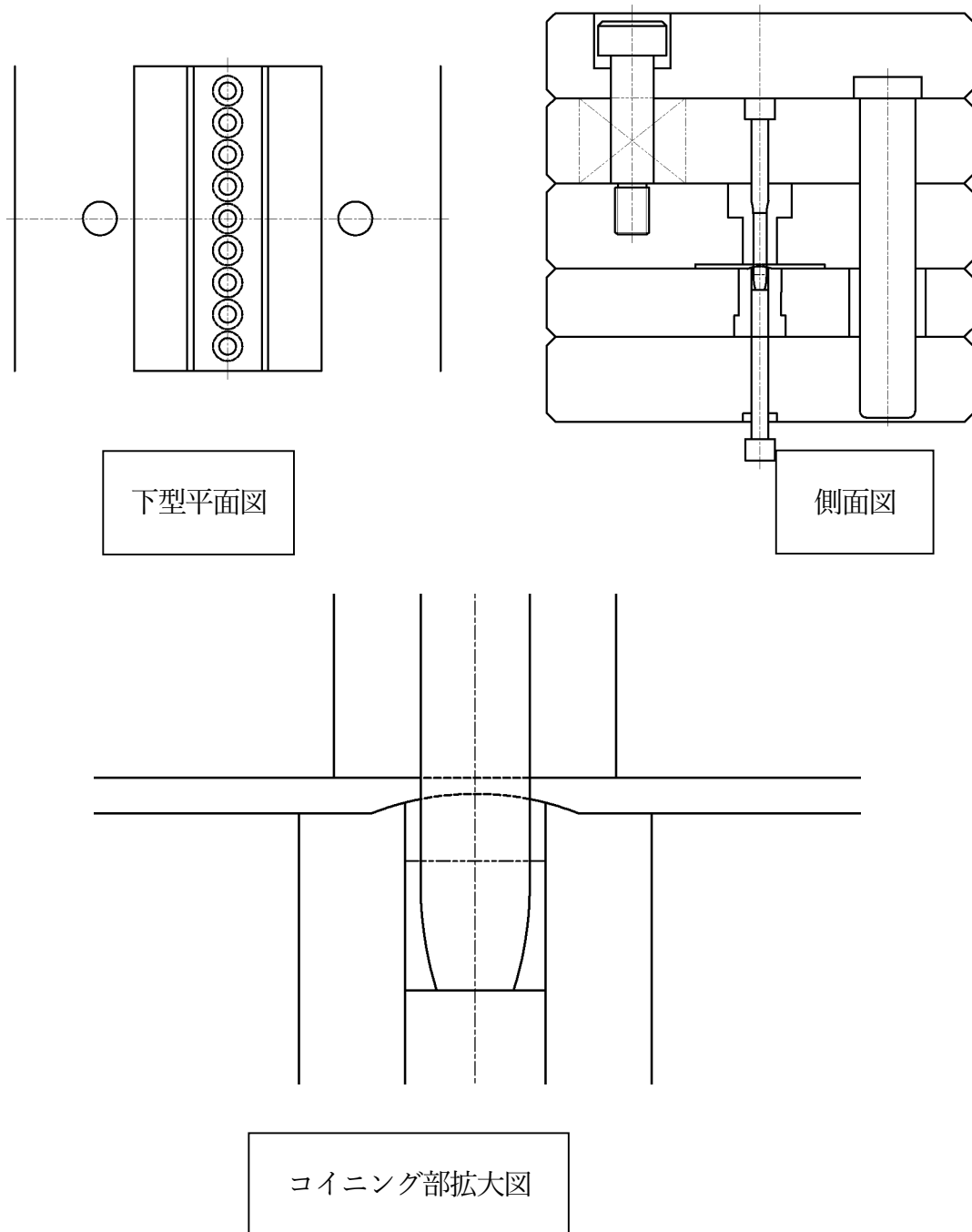


図 3-7 金型 A 図面

2) ガイドによるバーリングの変形防止の実証試験

金型構造を図 3-8 に示す、金型 B でコイニングされた体積の逃げる方向にガイドを付け体積の流れを規制し、体積逃しポケットを設定した金型を金型 B とする。

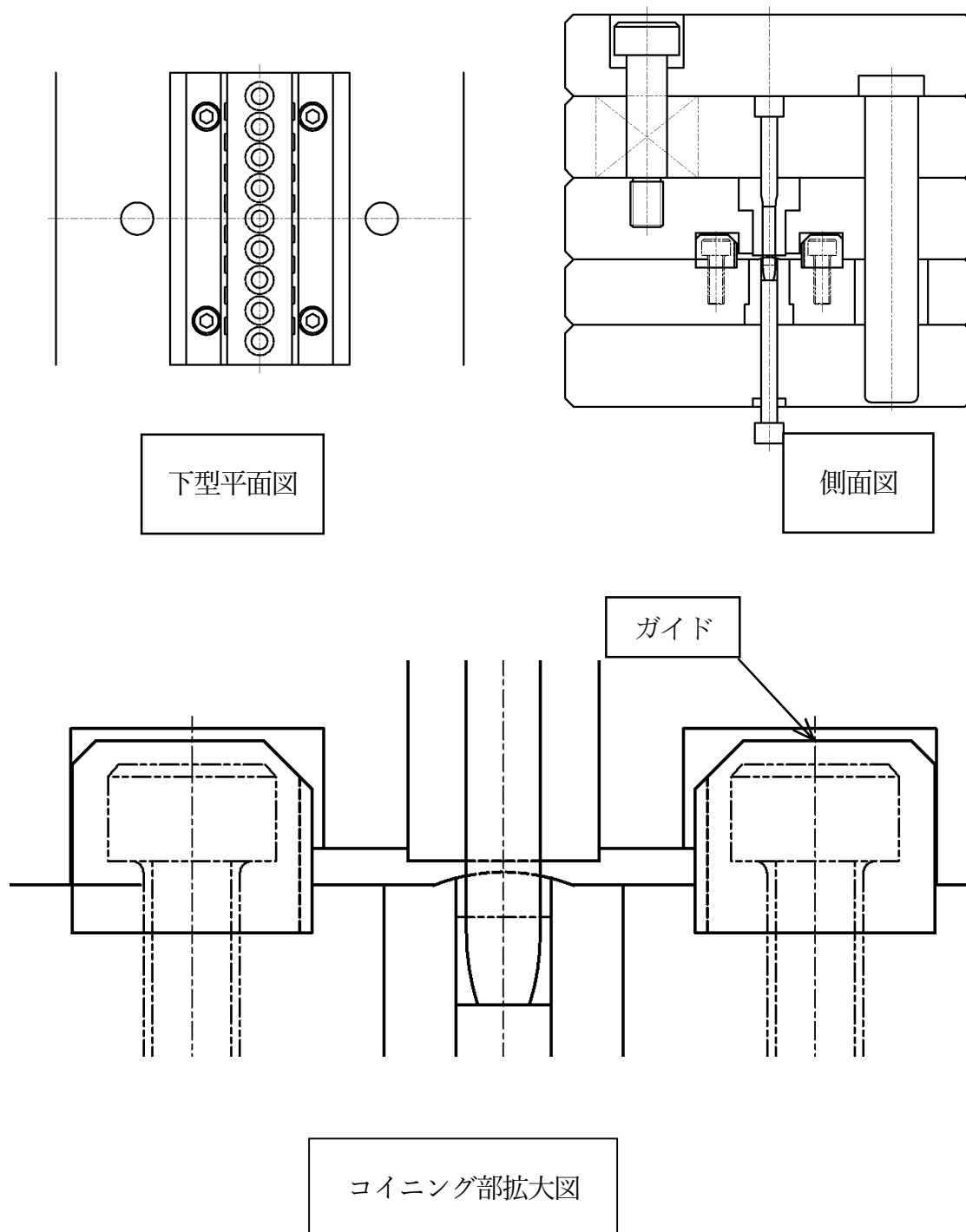


図 3-8 金型 B 図面

コイニングされた体積の逃げる方向にガイドを付け、体積の流れを規制した製品の構造+取り付けたガイドのバーリング同士の間位置にコイニングされた体積の逃げ代を下記の図 3-9 の様に設定した。

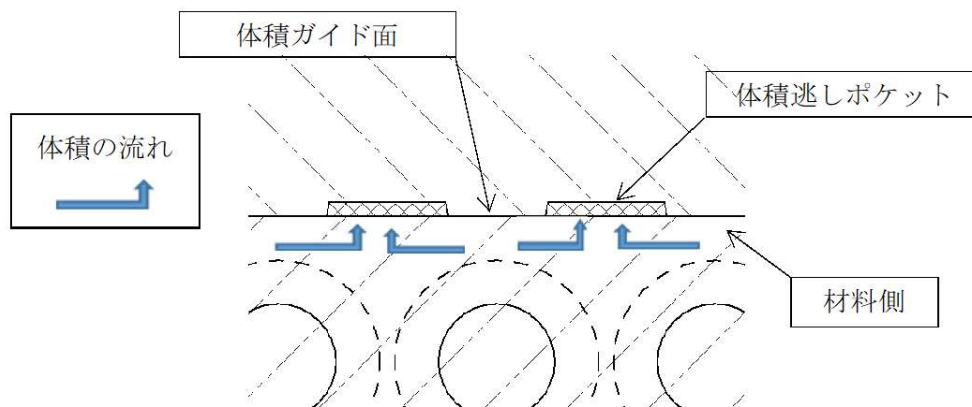


図 3-9 ガイドの体積逃がしポケットの詳細図

3)最適な金型構造とブランク幅

製品幅違いによるコイニングの変形量の確認を行った。製品幅は 16mm 図 3-10 と 10mm 図 3-11 に設定し試験を行った。金型構造を図 3-12 に示す、金型 B-改の構造で、製品幅を 10mm に変更した金型 C とする。

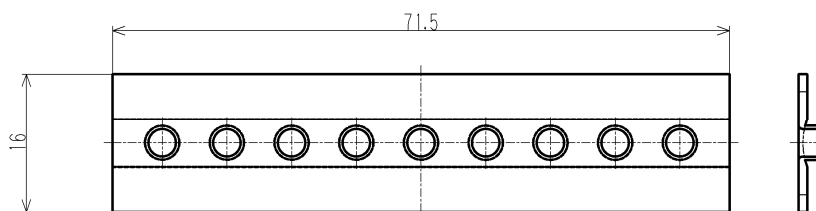


図 3-10 製品幅 16mm

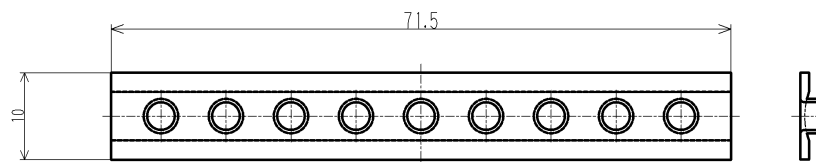
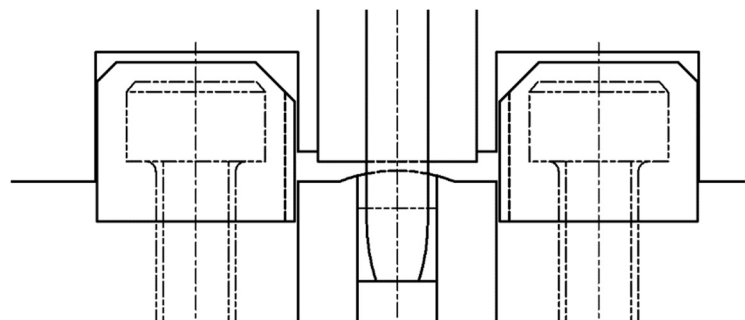
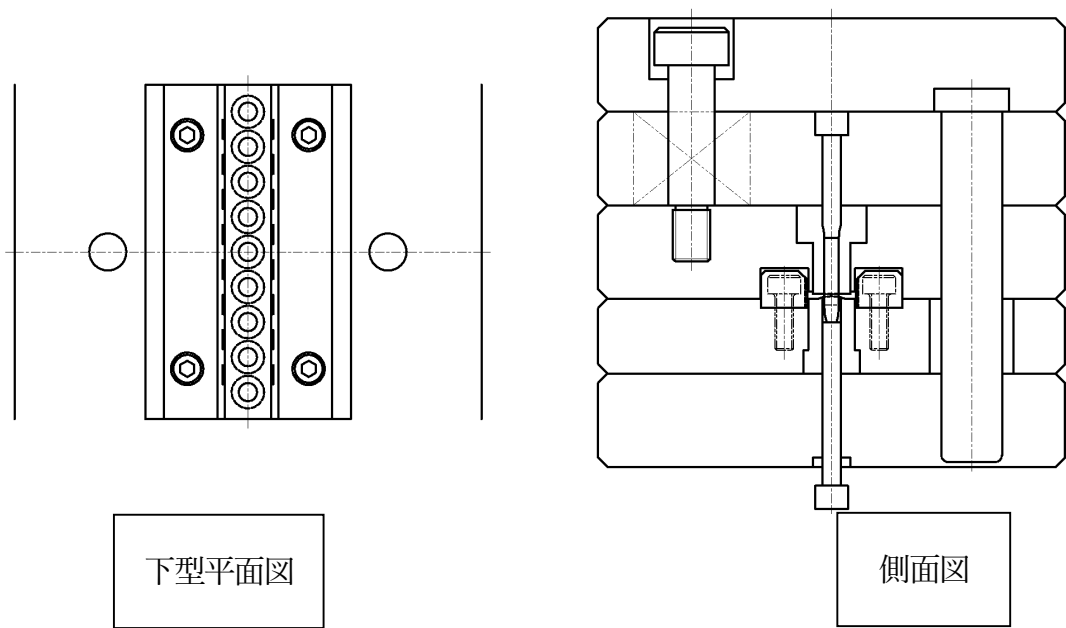


図 3-11 製品幅 10mm



コイニング部拡大図

図 3-12 金型 C 図面

4) 製品がガイド内に喰い付きの発生しない構造の実証試験

金型構造を図 3-13 に示す，コイニングされた体積の流れを防止するガイドを可動式とした金型を金型 D とする。

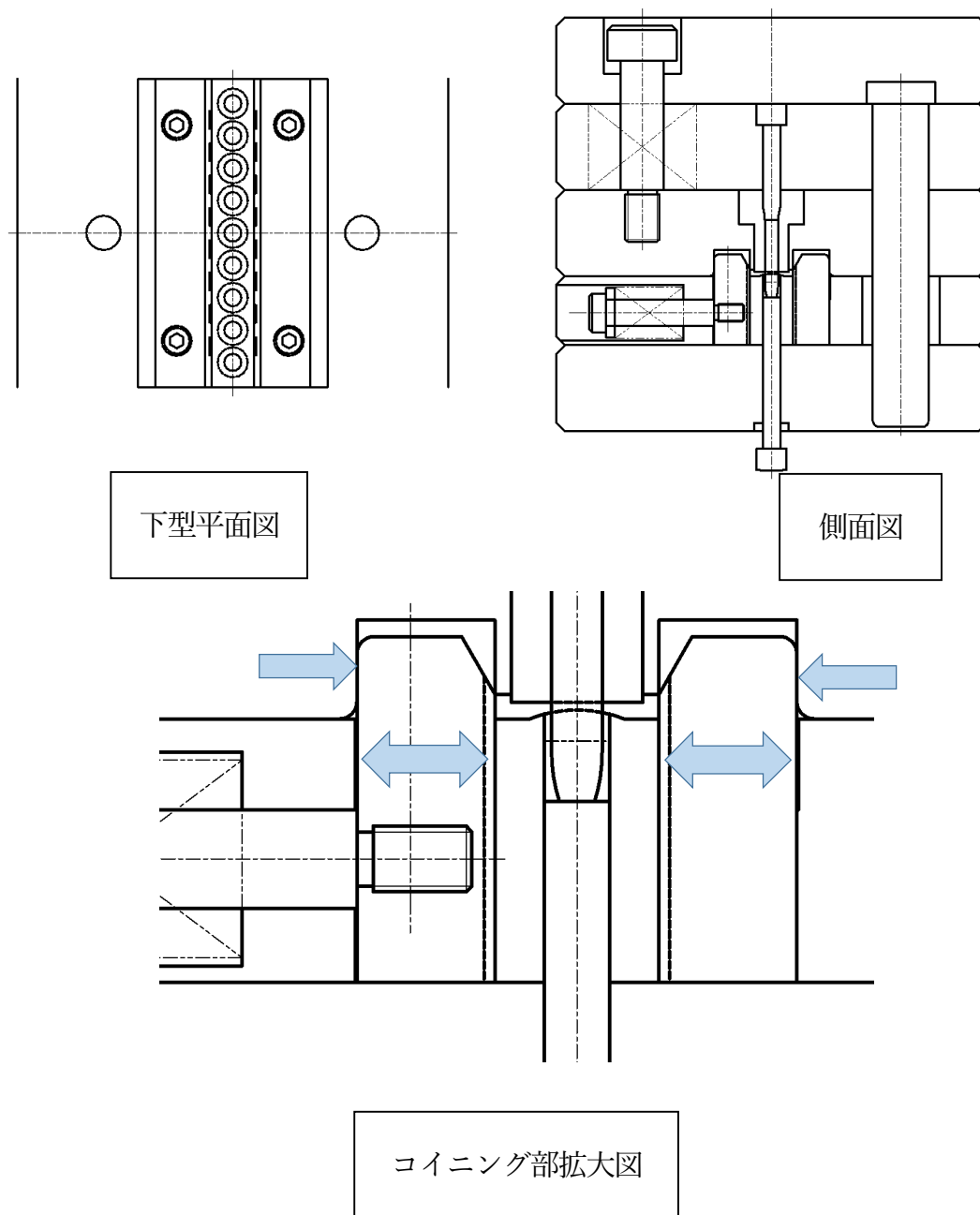
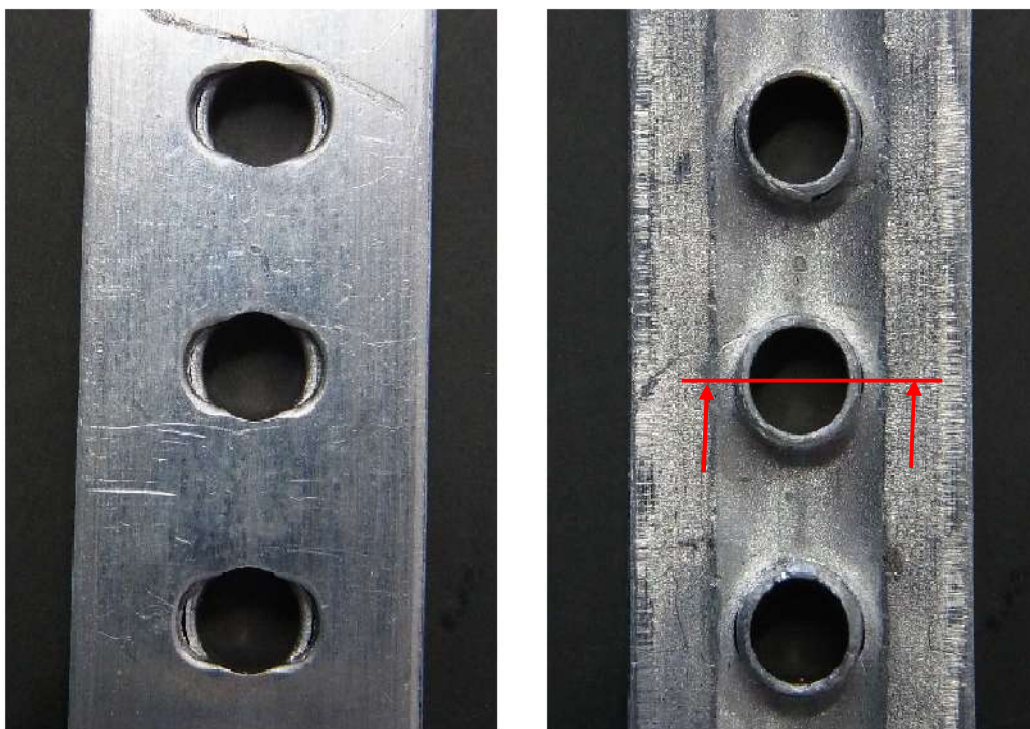


図 3-13 金型 D 図面

3.6 実証試験結果

1) バーリング後のコイニングによる変形実証試験

金型 A での実証試験では材料の流れを拘束しない状態では、コイニングした体積分が外側に向かって流れる。バーリング外径はガイドにて拘束しているため、根元の板厚部分で局所的な引き伸ばしが発生して材料が耐えられず、ワレが発生して穴部分で破壊した。(図 3-14)



変形実証試験を行ったサンプル裏表写真

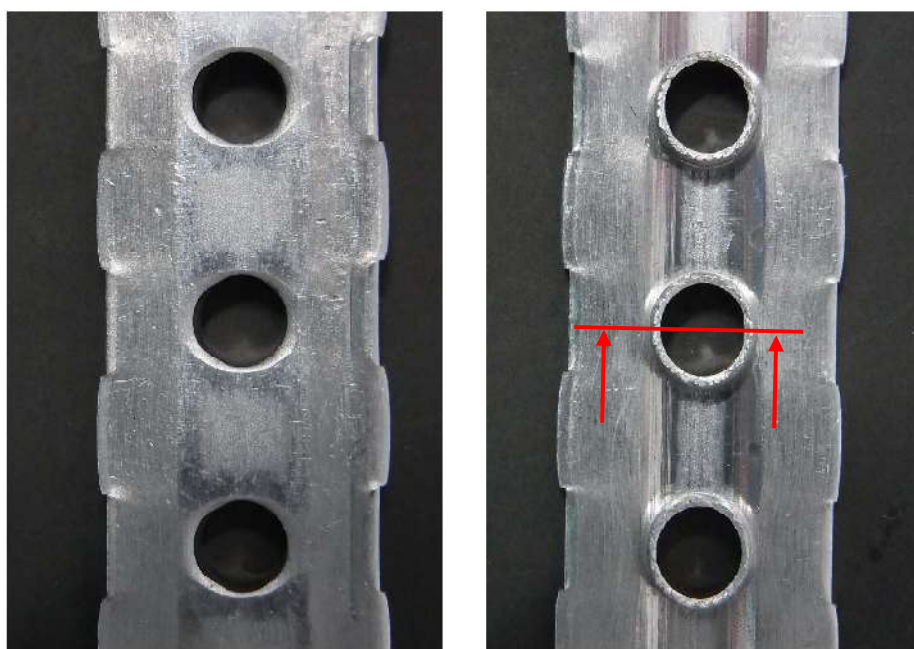


破壊発生

図 3-14 変形実証試験を行ったコイニング断面

実証試験(2)

金型 B では材料の外側にガイドを設置した，コイニングによる余肉の発生により，左右方向に体積が流れるのではなく厚み方向に流れてしまう．金型 B-改として，ガイドのバーリングとバーリングの間を体積の逃し（図 3-7 体積逃しポケット）を設定した．バーリング部位は外側を拘束し，内側も拘束した状態で加工すると，バーリング根元付近でのバーリング内側体積の流れは少なくなった．また，内側で変形が見られる変形の範囲はバーリング根元付近の板厚部品で少なくなった．（図 3-15）



変形実証試験を行ったサンプル裏表写真

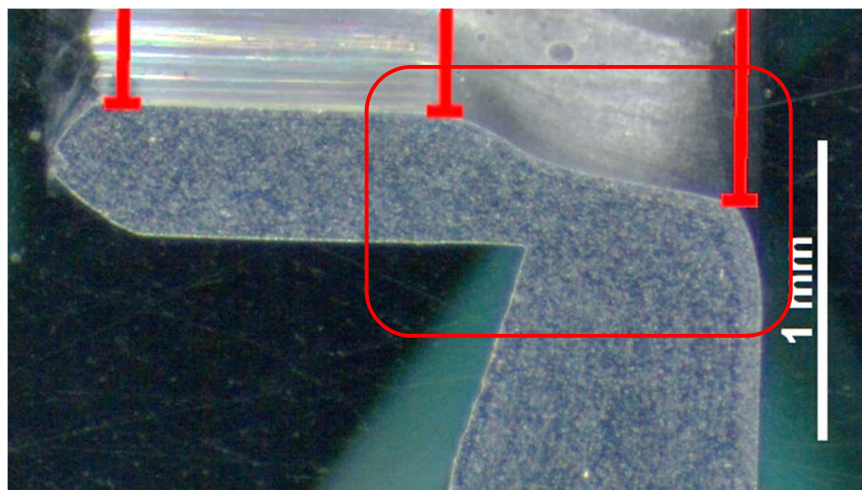


破壊無し

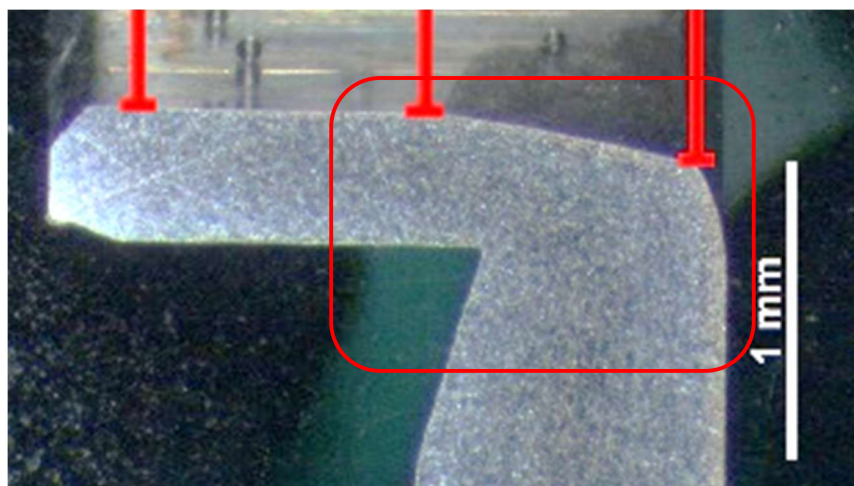
図 3-15 変形実証試験を行ったコイニング断面

実証試験(3)

金型 B で設定した金型状態で, 製品幅を 16 mm から 10mm に変更した場合はバーリングより外側の体積が少なくなったので流れる体積の絶対量に差が出て, 結果バーリング根元の変形の形状に変化が見られた. (図 3-16)



材料幅 16mm



材料幅 10mm

図 3-16 バーリング断面拡大

4) 製品がガイド内に喰い付かない構造の実証試験

金型構造の変更によりガイドのタイミングを変えたことにより, 金型に食い付きが発生しないようになった.

3.7 考察

金型実証試験の金型 A を改善前とし、金型 B を改善後として、変形量の観察を行った。観察面は製品の幅方向に平行な断面（A 断面）と長手方向に並行な断面（B 断面）である。それぞれ 2 個ずつ測定した。

コイニング時にバーリング内径体積が押しされ、局所的な板厚減少が見られた。断面観察位置を図 3-17 に、断面拡大写真を図 3-18 示す。



図 3-17 断面観察位置



図 3-18 実証試験による製品の写真

3.7.1. 測定

表面粗さ輪郭形状測定機を使用して新旧形状のバーリング内径を測定し、内径形状変形を比較した。

測定機

アメテック（株）（テーラーホブソン） フォームタリサーフ PGI 1240 型

試験片

- 1) 改善前・・・2個
- 2) 改善後・・・2個

図 3-19 に各試験片写真を示す、各試験片は区別がつくように油性ペンで色分けした、また測定箇所（計 12 箇所）に 1～3 の番号を割り当てた。

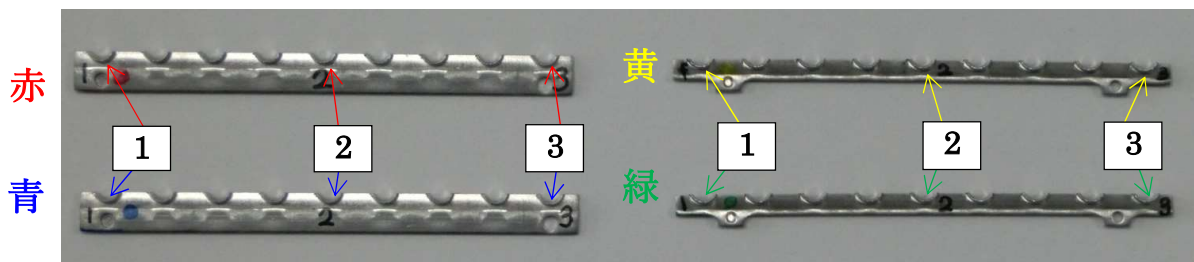


図 3-19 試験片写真 左図改善前、右図改善後のサンプル写真

3.7.2 試験結果

試験の様子を図3-20左図に示す、図5-1の左側から右側に向かってスタイラス(針)を移動させたときの形状をそれぞれ測定した。

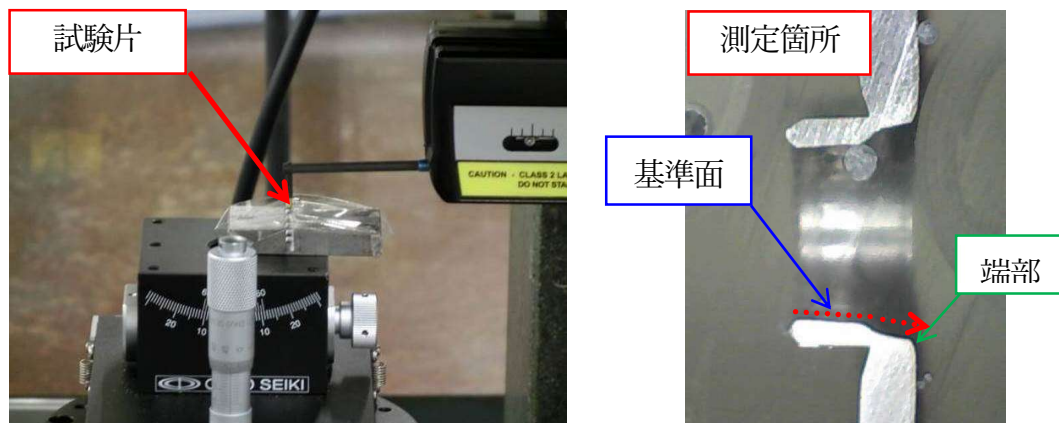


図 3-20 試験の様子と測定箇所

測定は図 3-21 に示す基準面から A 点、B 点とする。測定サンプルは改善前赤 1~赤 3、青 1~青 3 改善後黄 1~黄 3 緑 1~緑 3 とする。(図 3-22~図 3-33)
測定結果を表 1、図 3-34 に示す。

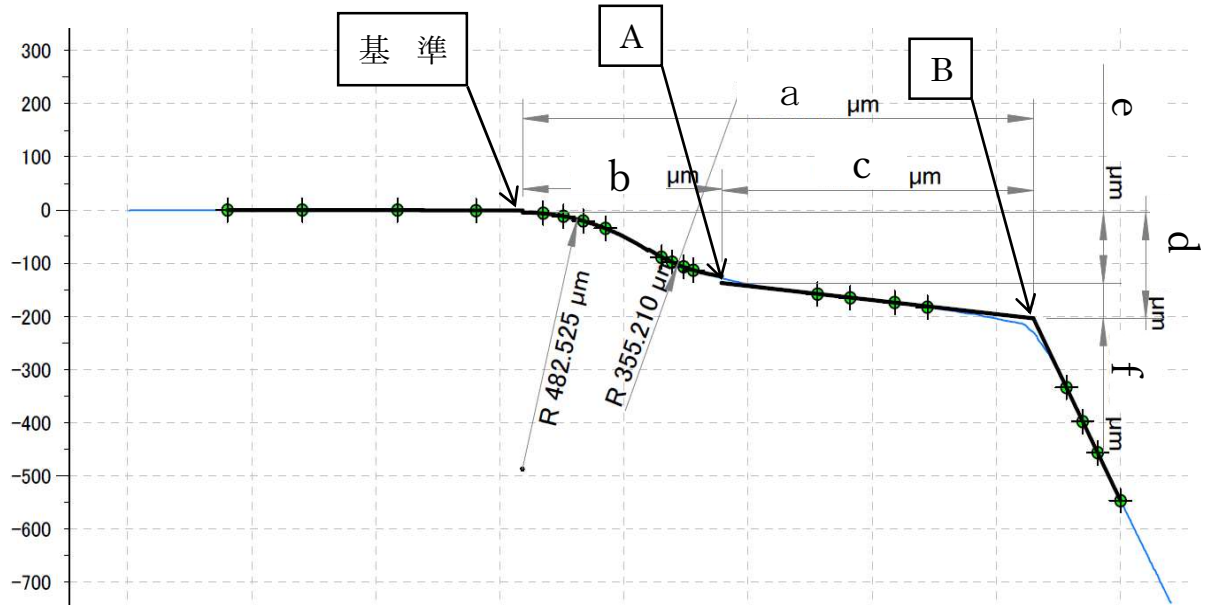


図 3-21 point of measurement

図 3-22~図 3-33 に各試験片の基準点から A、B 点の段差の測定値を示す。

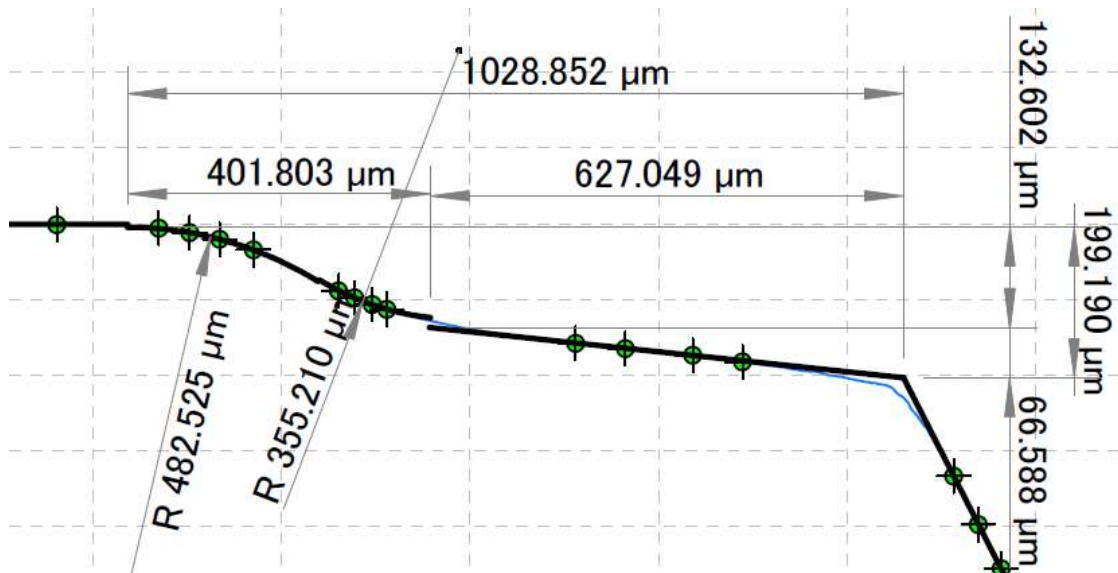


図 3-22 測定結果 改善前 赤 1 左端

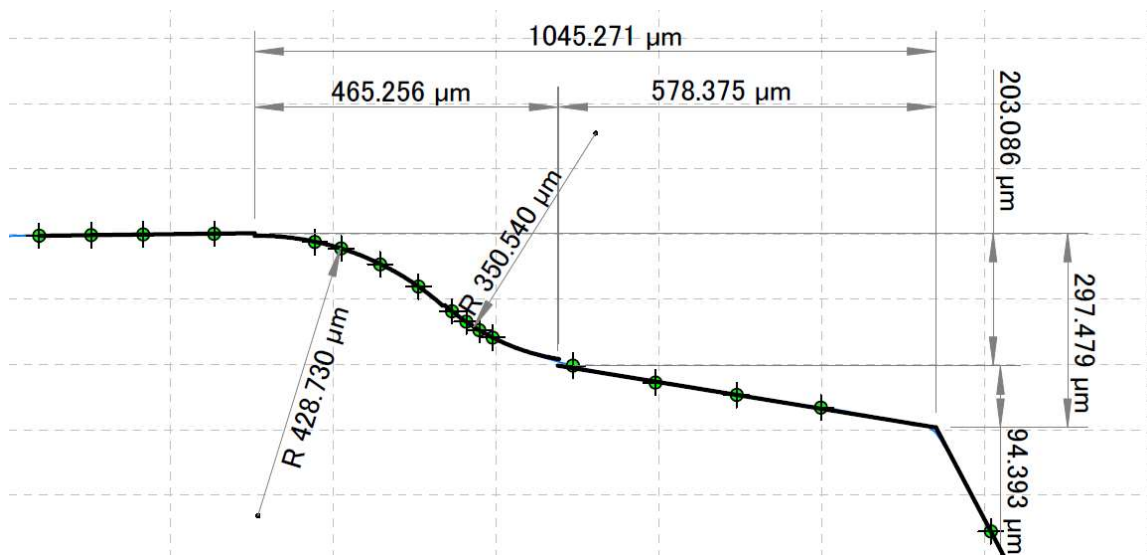


図 3-23 測定結果 改善前 赤 2 中央

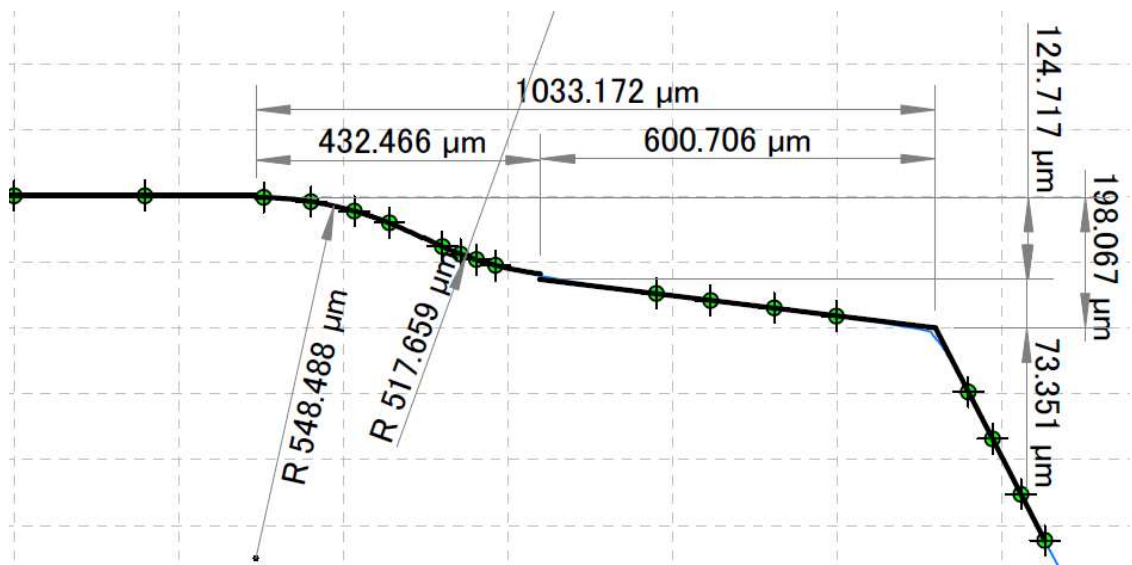


図 3-24 測定結果 改善前 赤 3 右端

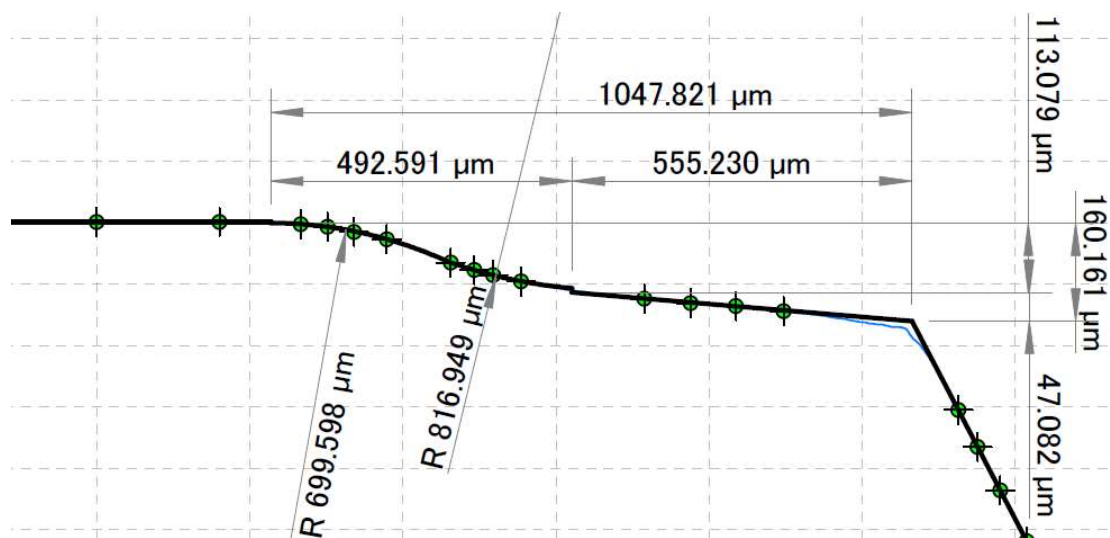


図 3-25 測定結果 改善前 青1左端

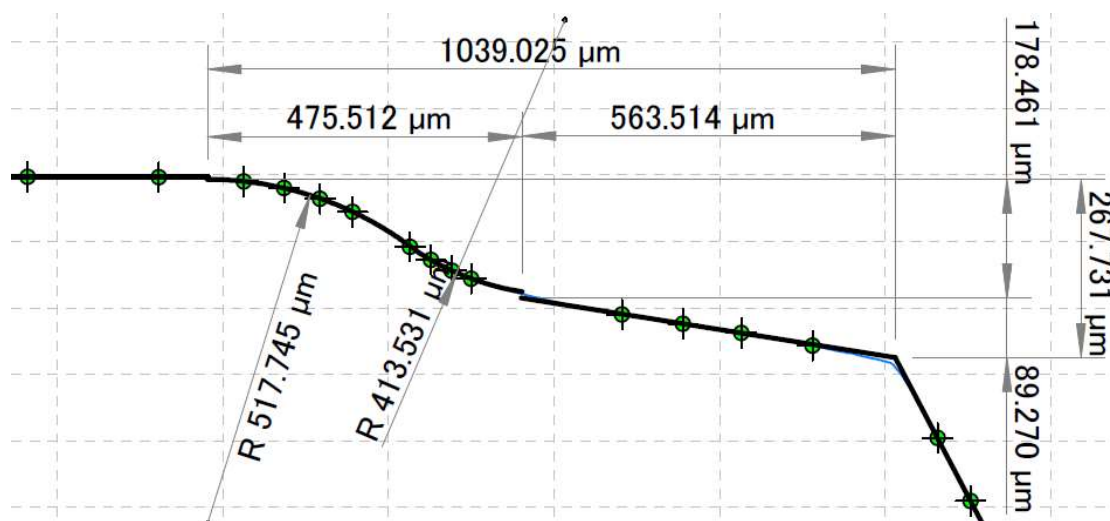


図 3-26 測定結果 改善前 青2中央

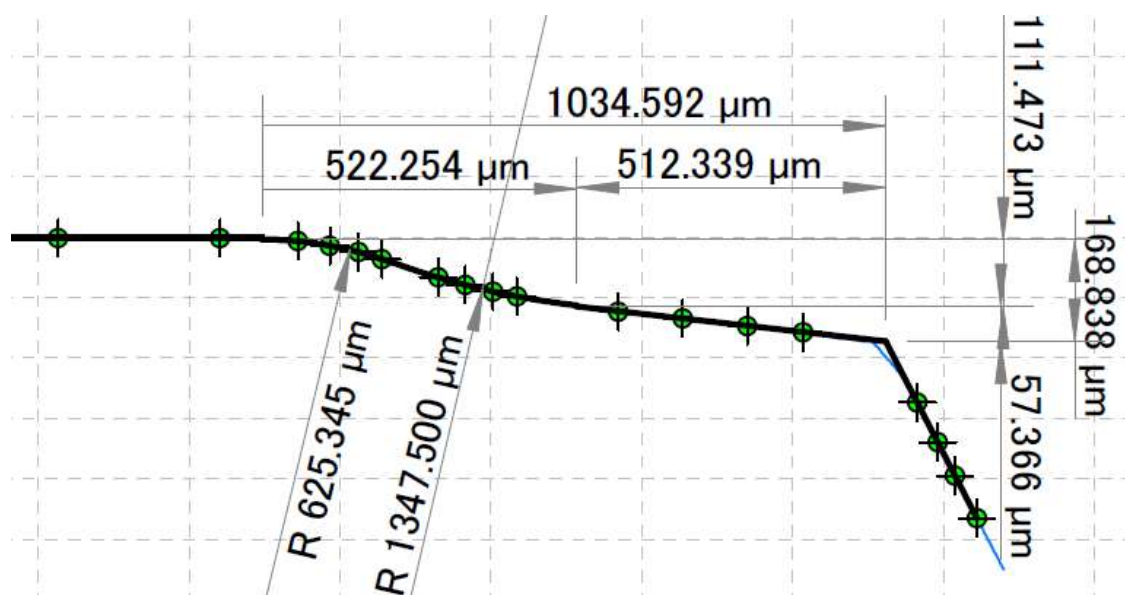


图 3-27 測定結果 改善前 青3右端

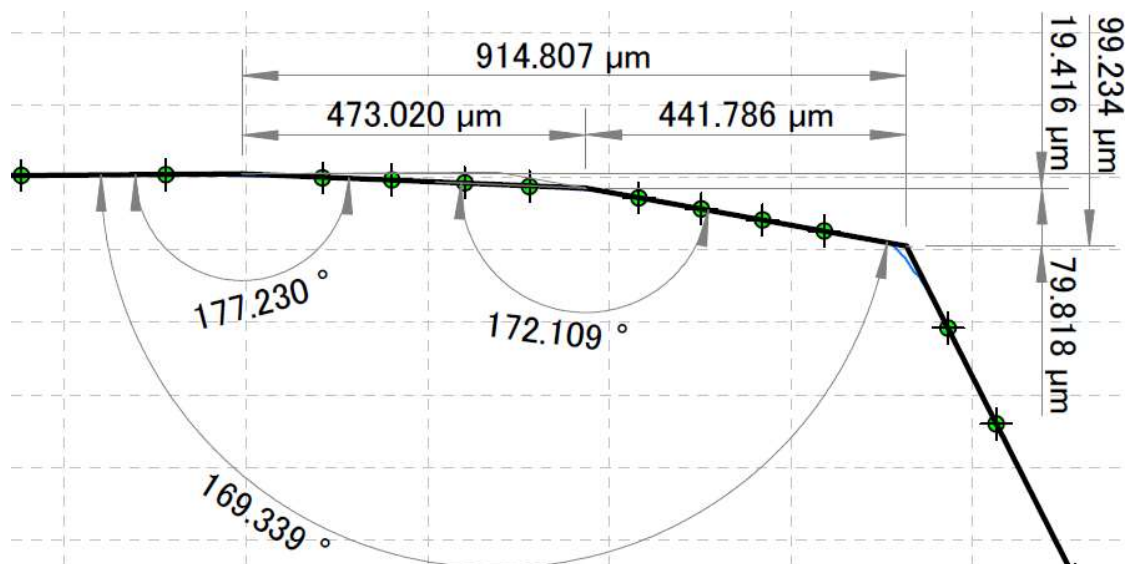


图 3-28 測定結果 改善後 黄1左端

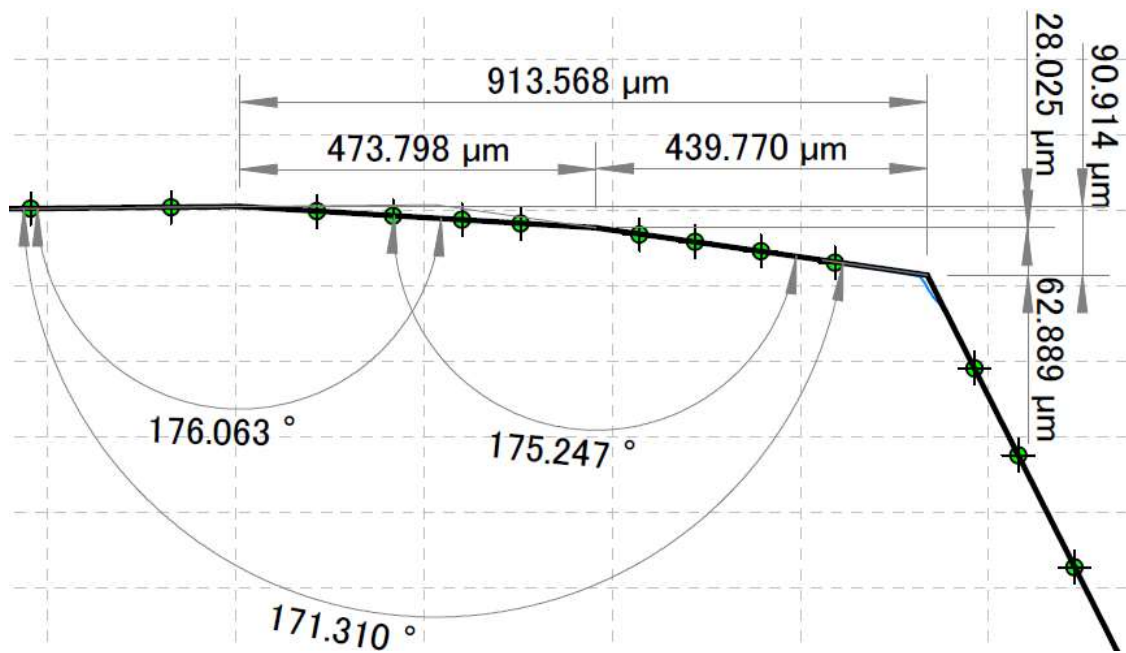


圖 3-29 測定結果 改善後 黄2中央

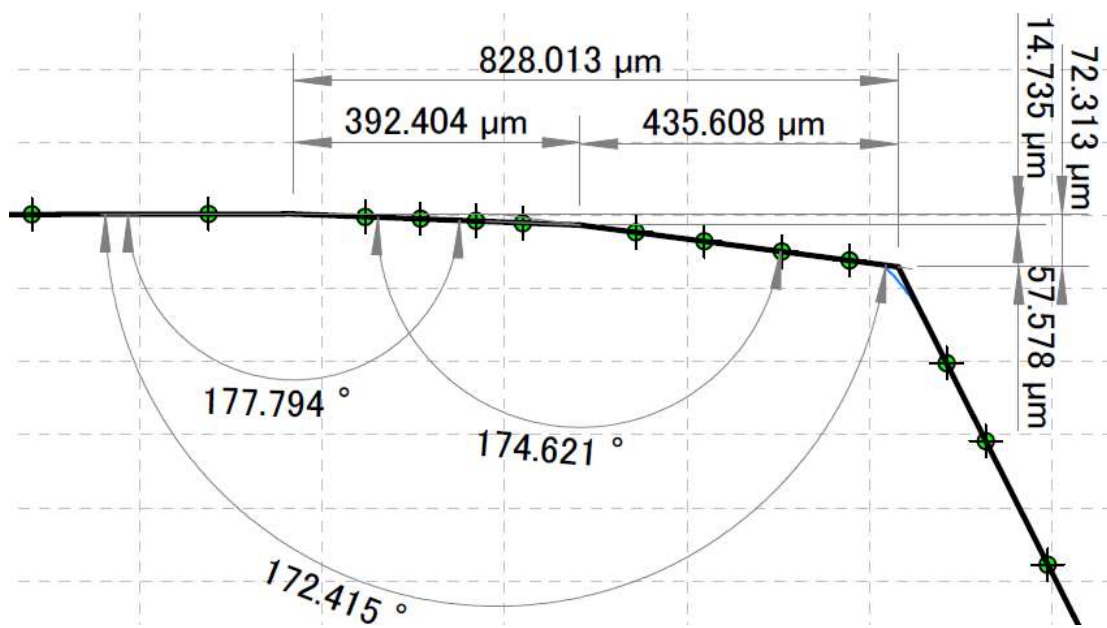


圖 3-30 測定結果 改善後 黄3右端

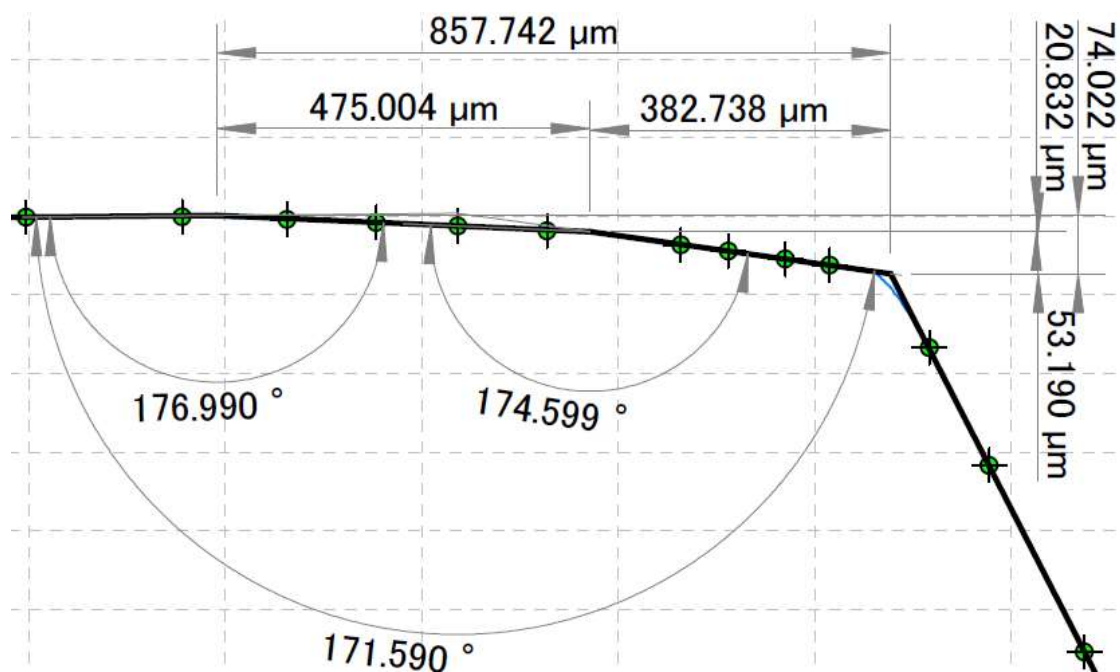


図 3-31 測定結果 改善後 緑1左端

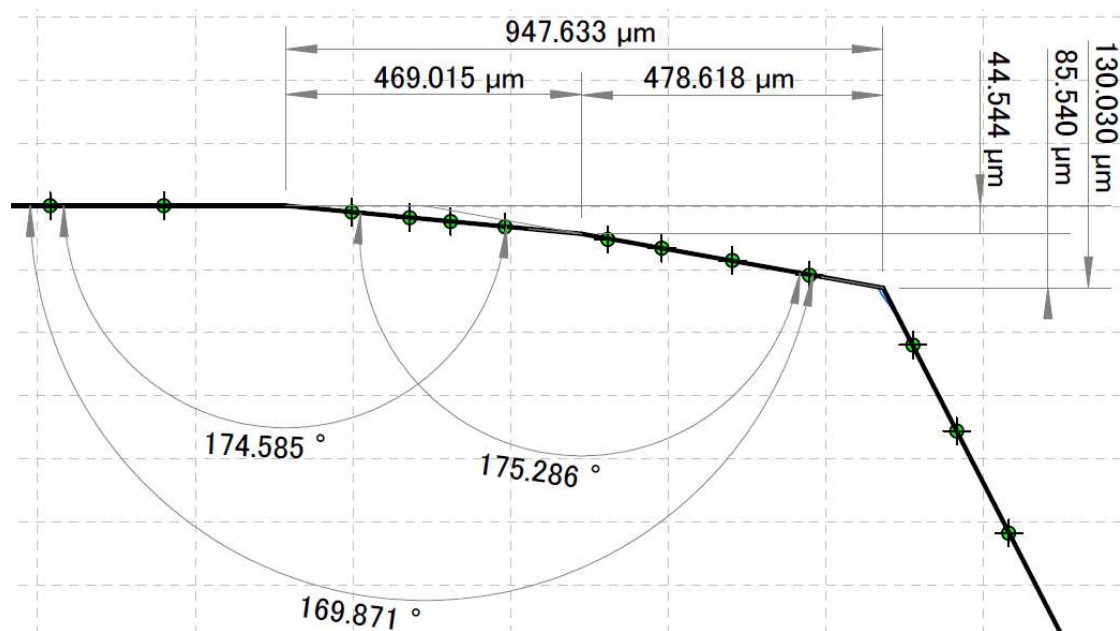


図 3-32 測定結果 改善後 緑2中央

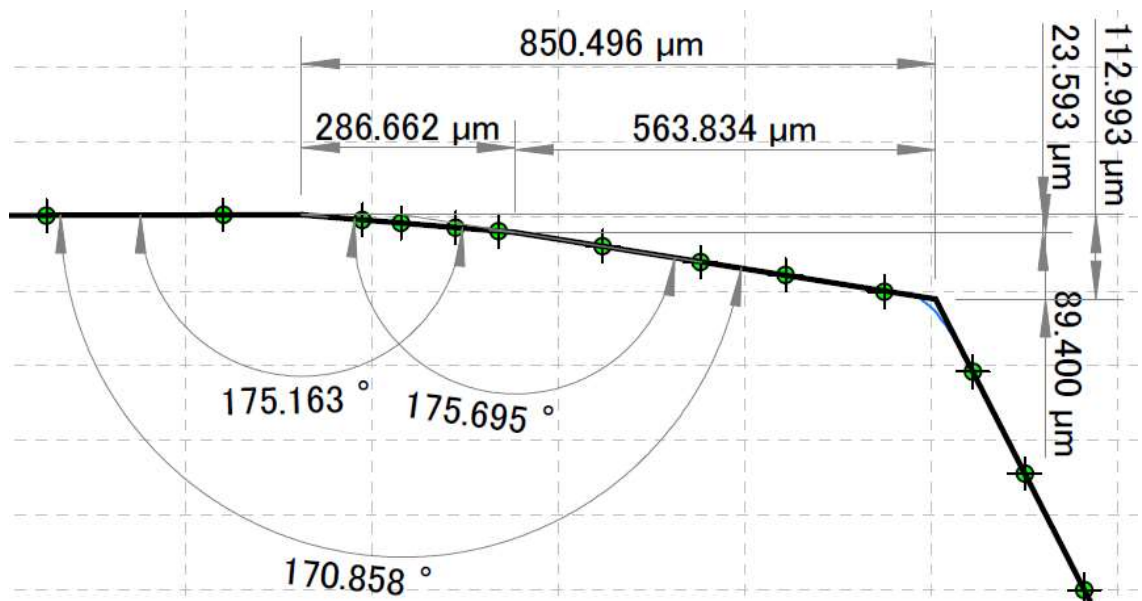


図 3-33 測定結果 改善後 緑 3 右端

表 1 基準面から B 点までの段差 d 部寸法

試験片		段差〔μm〕	平均〔μm〕	平均〔μm〕
改善前	赤 1 左端	199	231	215
	赤 2 中央	297		
	赤 3 右端	198		
	青 1 左端	160	199	
	青 2 中央	268		
	青 3 右端	169		
改善後	黄 1 左端	99	87	97
	黄 2 中央	91		
	黄 3 右端	72		
	緑 1 左端	74	106	
	緑 2 中央	130		
	緑 3 右端	113		

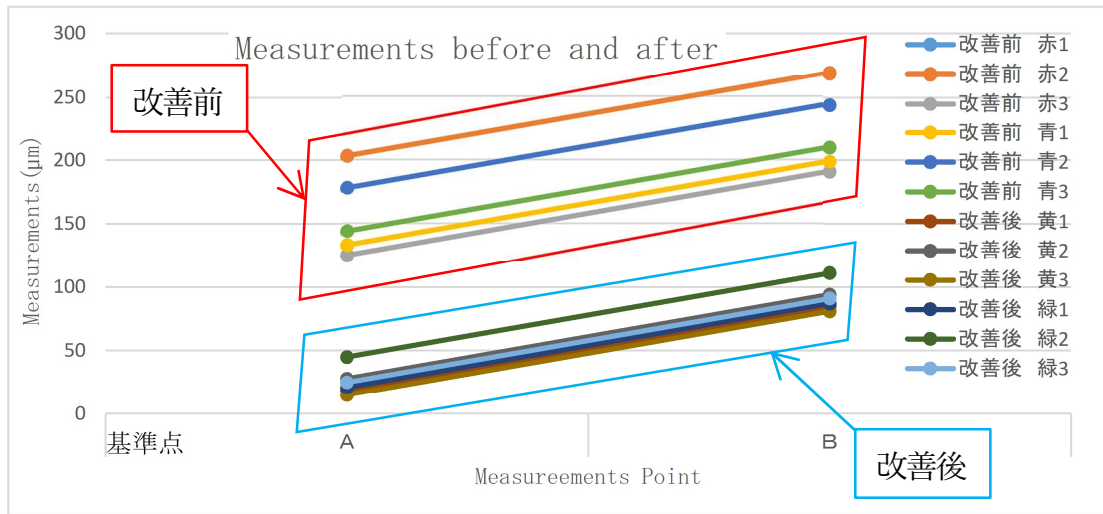


図 3-34 赤 1～青 3 改善前と黄 1～緑 3 改善後の寸法比較を示す

3.8 結言

1) 金型 A

バーリング工程後内外径を拘束してコイニングする場合は、外形がフリーの状態での加工となり、幅方向に体積が流れてバーリング付け根部分で破壊が発生した。

2) 金型 B

金型 A と同様の構造で外形をガイドにて拘束することにより、コイニングによる体積の流れが減少した。一方で、コイニングによって余分になった体積が逃げる部位がなく、結果高さ方向に流れ厚み寸法が NG となった。これに対して、両サイド拘束することによりコイニングによる余分な体積の発生によるバーリング付け根の減肉を、ある程度抑えることが出来た。次に金型 B-改ではバーリング部位のみ外形を拘束し、バーリング間に余分な体積を逃がした。ポケットを設定することよりバーリング部位のコイニングによる余分な体積を逃がした。余分な材料がポケットに流れこむことで、バーリング付け根部位の破壊は無くなった。

3) 金型 C

製品幅を 16mm から 10mm にすることでコイニングによる余肉の総量は減り、金型 B-改の試験片と金型 C の試験片では半分以下であった、A 断面（幅方向と平行な断面）のバーリング内面に変形が見られるが、バーリング内径、外径をガイドし

て製品外側を部分的に拘束することにより変形量を最小限にできた。

変形の起点となる位置は b と e の交点となる位置でこの点はコイニングの開始点で板厚が 1 mm なので変形に起点になる値であることがわかった。改善前と後での比較として e 値が金型 B では $215\mu\text{m}$ あり、金型 C では $97\mu\text{m}$ と変形量が約 45% となった、コイニング時に発生する余肉を制御できる金型構造とすることにより、飛躍的に板減を抑えることが可能である。

4) 金型 D

金型 A 金型 B, 金型 C はガイドがボルト締め固定のため、試打ち毎ボルトを外して製品を取り出していた。これに対してガイドを横方向に 0.5mm 程度可動式として、コイニング加工前にストリッパーが下降するタイミングでガイド外側を拘束し外に逃げない構造とした。コイニング加工を行い、ストリッパーが上昇するとガイドがフリーとなり、スプリングの力で外側に逃げる構造とすることで加工のタイミングとガイドするタイミングを変え、金型に喰い付くことなく製品が取り出せることが可能となった。

第4章

複雑形状・絞り加工において
折れシワ制御と肉厚を均一化
させる技術

第4章 複雑形状・絞り加工において折れシワ制御と肉厚を均一化させる技術

4.1. 緒言

地球温暖化対策として、北米・欧州・中国等では、新たに販売する自動車に対して、各地域・国毎に独自の CO2 排出量・燃費規制を設けており、その規制値は 2025 年にかけて厳格化されていく見込みとなっている。

自動車用熱交換機用エバポレーターも例外ではなく、省スペース・軽量化を常に求められている。接続用配管部品においては図 4-1 のようにパイプ式配管から図 4-2, 図 4-3 の様な絞りによる配管へと変化している。



図 4-1 エバポレーターのパイプ式配管写真



図4-2 エバポレーターの絞りによる配管写真



図4-3 絞りによる配管部品

4.2 近接した2つの形状の概要

異形状絞りの場合ブランク検討は最大に引き込みが多くなる部位を検討する。今回のケースの場合、近接した2つの形状があり、絞り形状内側が絞りではなく張出となり板減やワレが発生する。この部品は体積が引き込まれにくいので1絞り目でどれだけ体積を引き込めるかが重要となるが、2つの形状を深くしてもそれぞれのダイとパンチが接触し摩擦抵抗箇所が都合8か所発生することとなるので限界がある。

図4-4に一般的な絞りと近接した2つの形状がある絞りの模式図を示す。

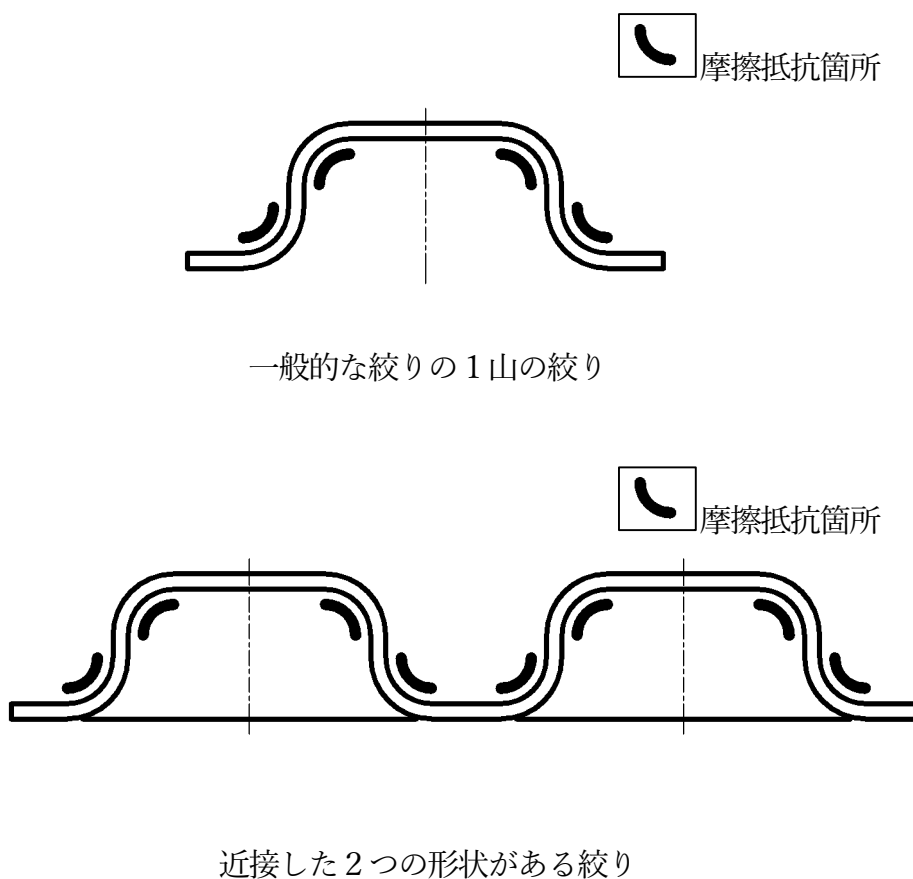


図4-4 模式図

4.3 従来の工法・問題点

自動車用熱交換器において、エバポレーターの接続部品は省スペース化、軽量化の観点から配管パイプから絞り加工によるプレート・パイプへと進化している。複雑形状・配管の絞り加工において板厚を均一化させる技術について検討した。この配管では、形状が左右対称ではなく、また絞り形状が2形状ある絞り形状で周辺材料を引き込む加工が困難とされている。

4.4 研究目的

異形絞りのシワ制御，と板厚の均一化の為の工程設定，と絞り形状の検討の三点に着目して新しい成形技術を提案した。異形絞りの絞りの際，工程設定によってはシワが制御出来るメカニズムの考察，1絞りの材料引き込み形状の設定と実証試験を行う。絞り工程を2回に分けて，材料の変形量を最小限にすることによって，従来困難であった板厚減少の最小化（最大-10%）を達成した。この工法を活用することにより異形絞り，複雑形状のアルミ合金の成形加工が可能となり軽量化，最少化，高耐圧化に貢献できること検証した。

4.5 供試材および実験方法

4.5.1 供試材

A3003 t = 1.0mm

表 3-1 機械的性質値

	0.2%耐力 [MPa]	引張強さ [MPa]	伸び %	n値
A3003-H14	124	154	6	0.07

4.5.2 使用プレス機

1100[kN]電動サーボプレス機

図 4-5 に使用プレス機を示す.



図 4-5 電動サーボプレス機

4.6 絞りの材料引き込み形状の設定

4.6.1 工程設定

1 工程目 絞り(1)

絞り(1)で重要な点は必要な体積をいかに絞り上げることが出来るかである。

展開周長で表現すると絞り(1)展開長と最終展開長はイコールか若干絞り(1)が長いほうが良い。また、絞り形状は通常なら2つの形状で絞り据え込んで行くが中央の平坦部は両側より材料は引き込めないので一度大きく絞り込むことより局部的な板厚減少を抑える効果がある。

図 4-6 に絞り(1)工程の工程計画を示す。

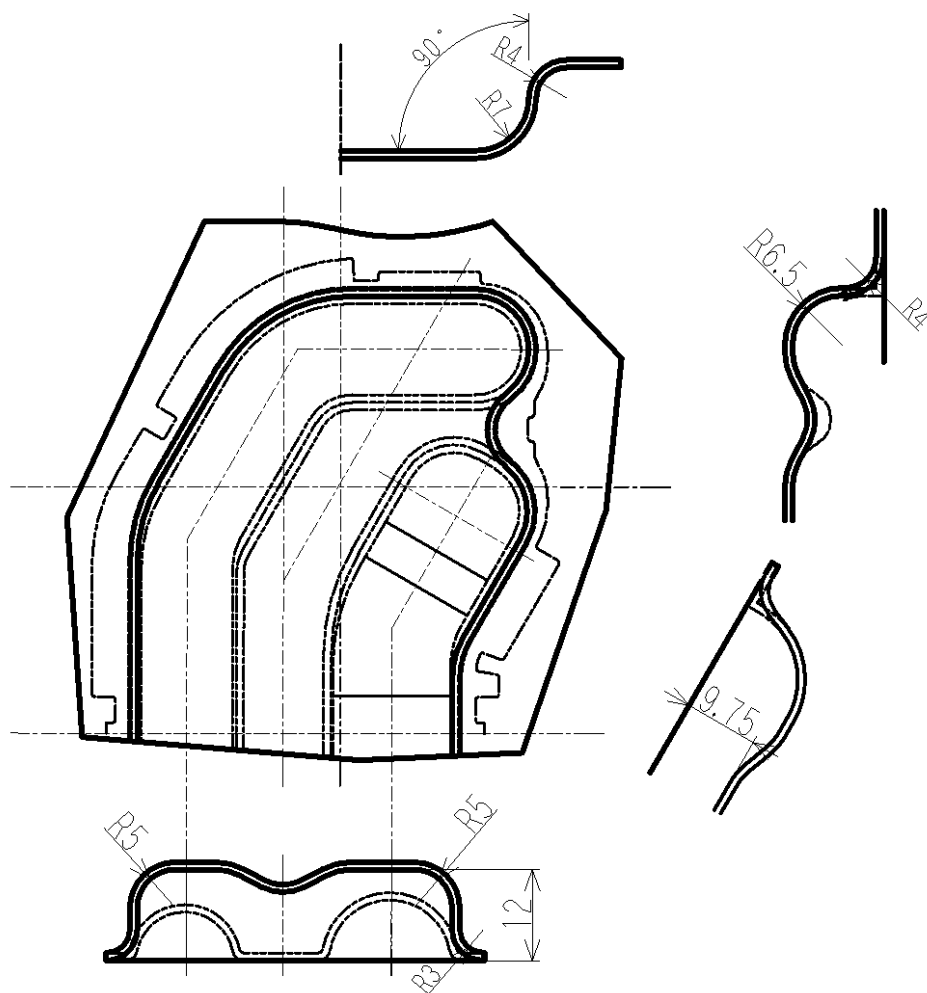


図 4-6 絞り(1)工程計画

3工程目 絞り(3)

絞り(2)で絞り輪郭が製品形状になったら、絞り R 形状を整えながら小さくしていく。

図4-8は絞り(3)の工程計画を示す。

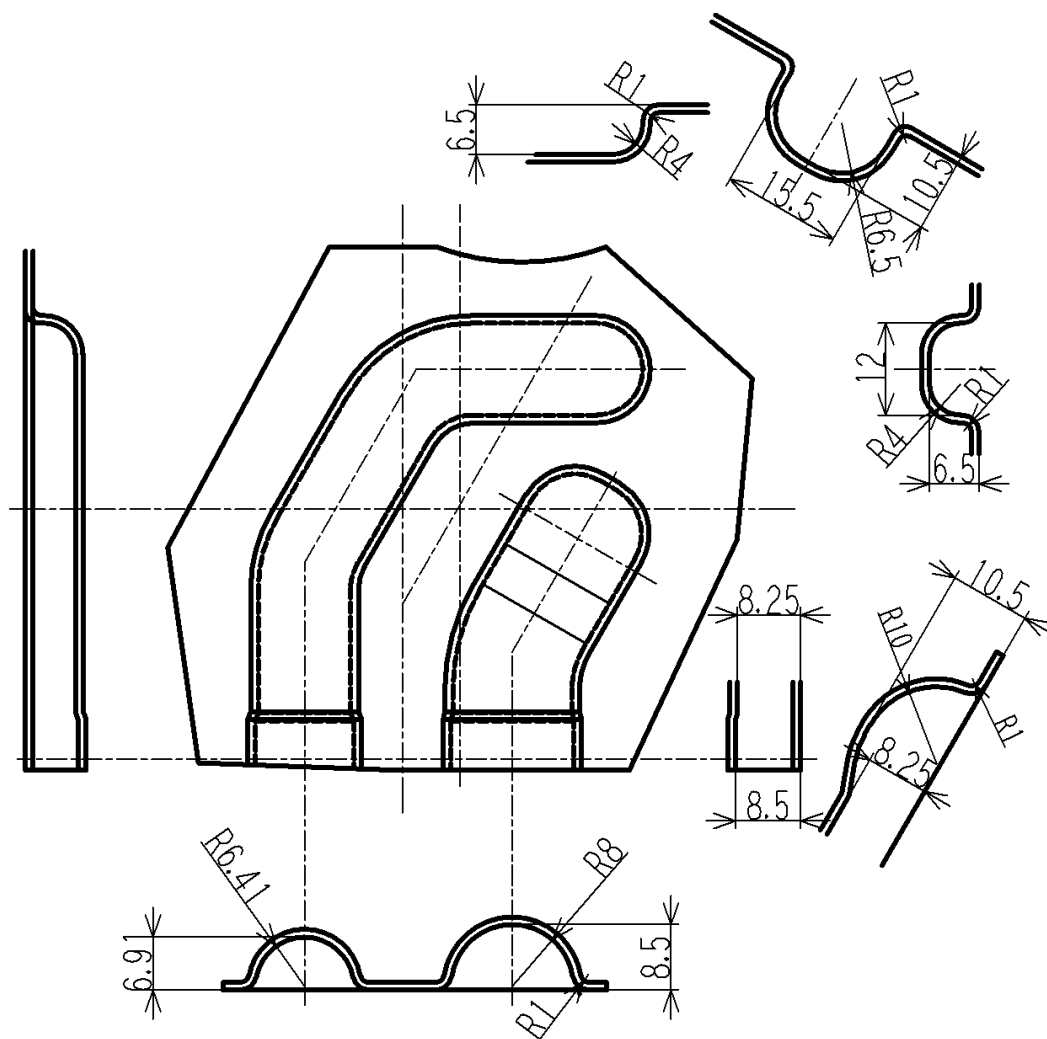


図4-8 絞り(3)工程計画

4 工程目 成形(1)

成形(1)は形状を整えながら，絞り R を小さくしていく。

図 4-9 は成形(1)の工程計画を示す。

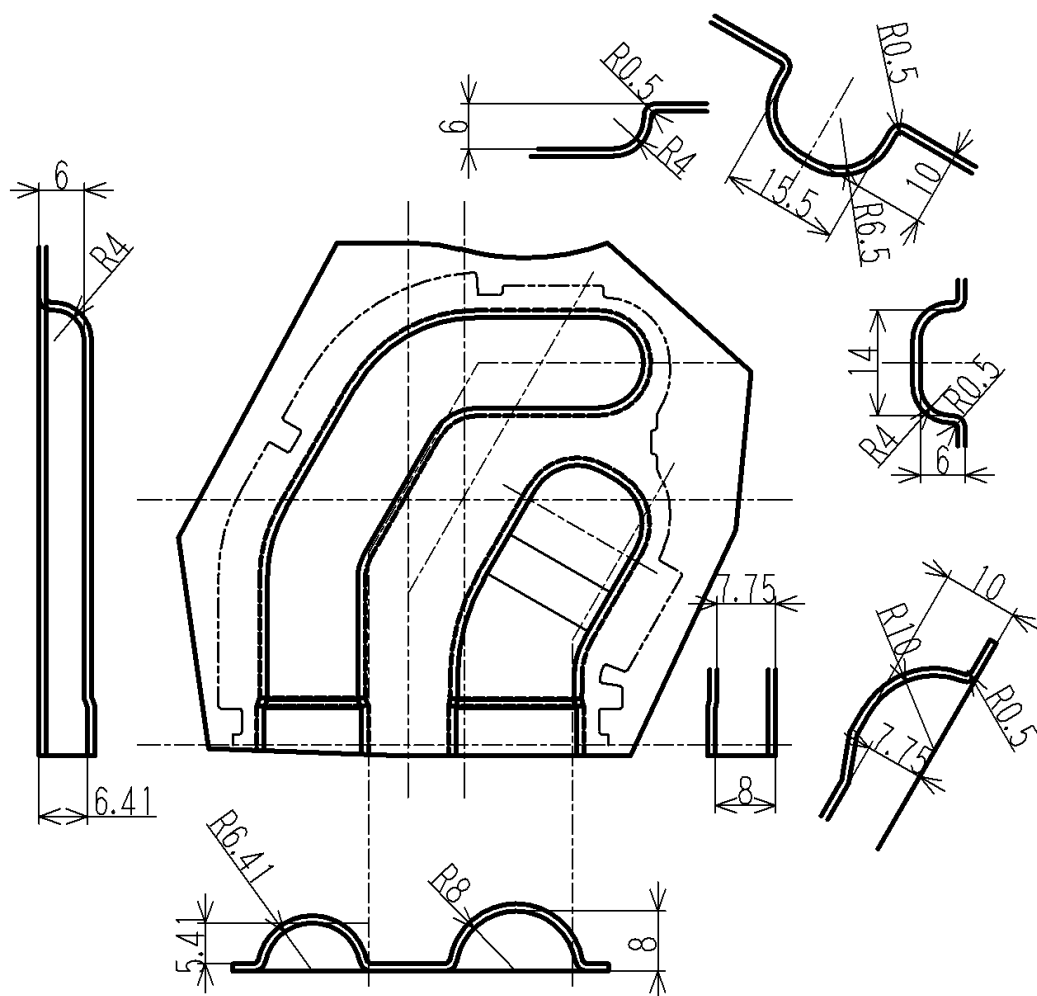


図 4-9 成形(1)工程計画

4.6.2 実証試験金型仕様

1) 絞り(1)仮型の金型構造を図 4-10 に示す.

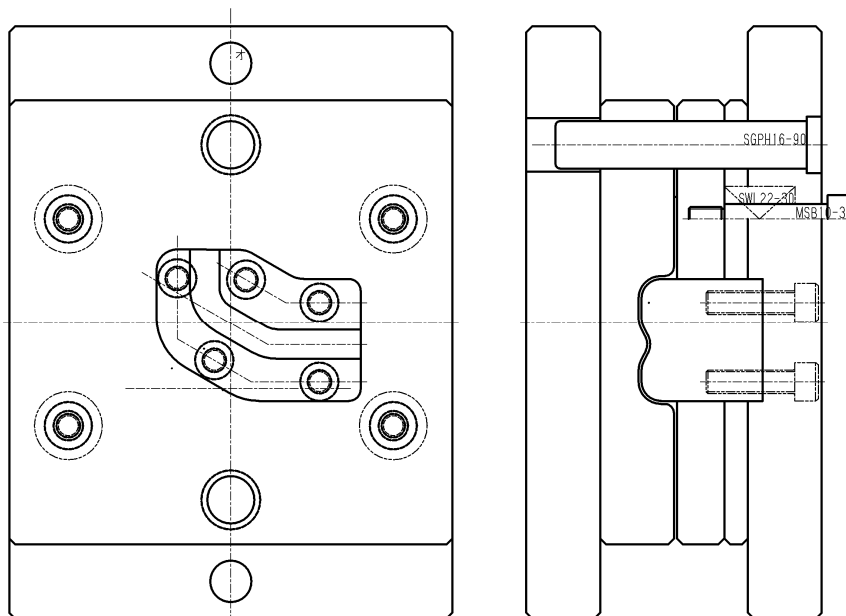


図 4-10 絞り(1)金型図

2) 絞り(2)仮型の金型構造を図 4-11 に示す.

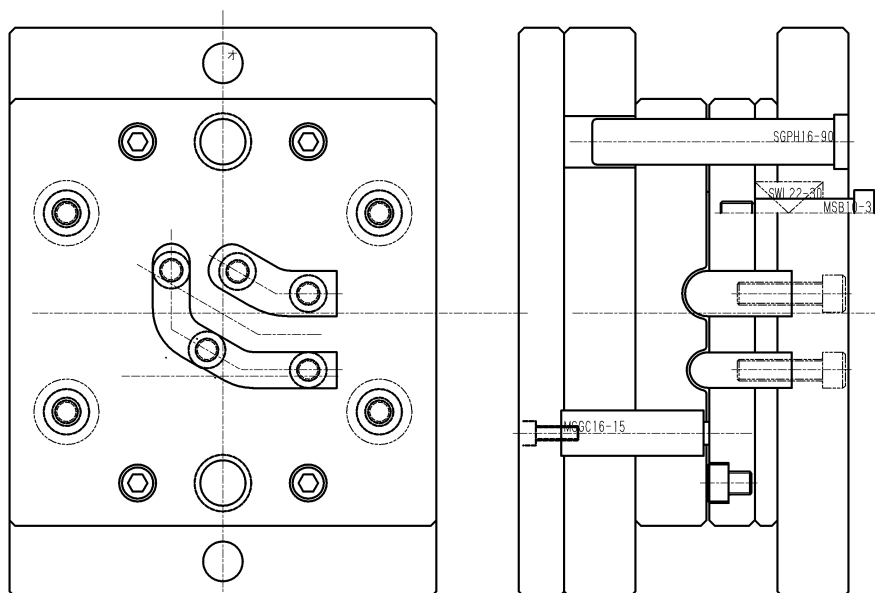


図 4-11 絞り(2)金型図

3) 絞り(3)仮型の金型構造を図 4-12 に示す

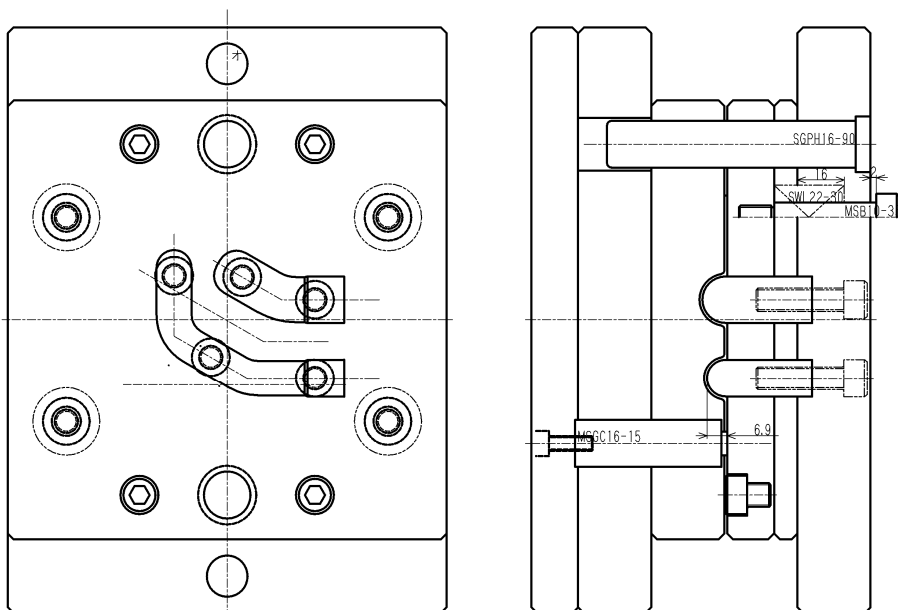


図 4-12 絞り(3)金型図

4) 成形(1)仮型の金型構造を図 4-13 示す

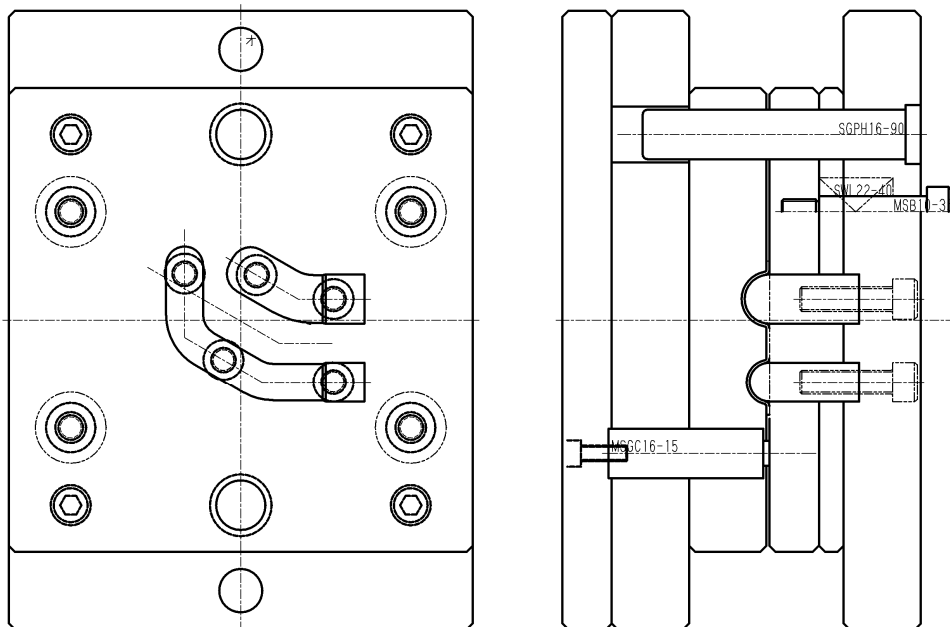


図 4-13 成形(1)金型図

4.7 実証試験結果および考察

4.7.1 考察

金型試験として1工程目、2工程目を行った結果、下記の様な折れシワが発生した。工程で重要なポイントは図4-14のA部の形状である。図4-15で改善前絞り(1)サンプルに示すように絞り形状が鋭角気味になると絞り(2)工程で図4-16絞り(2)工程加工後製品裏側のように折れシワが発生する。

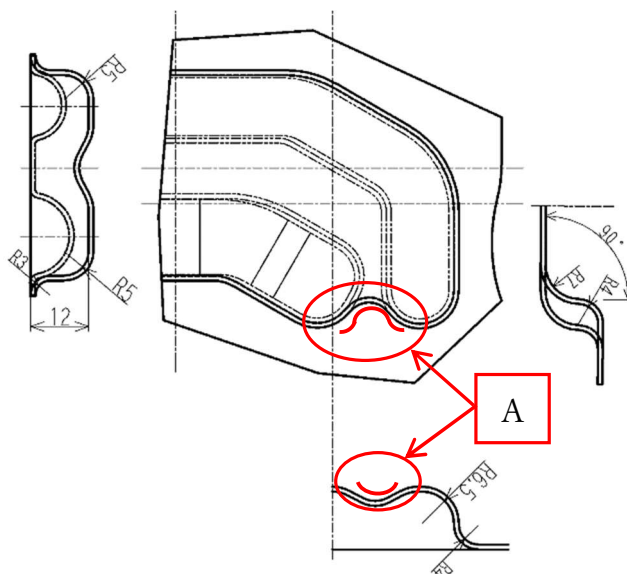


図4-14 改善前工程計画



図4-15 改善前 絞り(1)サンプル

折れシワの発生

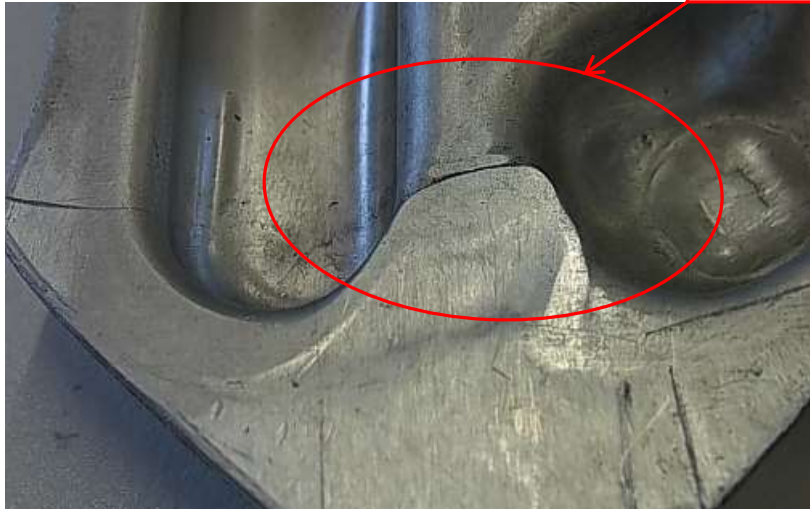


図 4-16 絞り(2)工程加工後製品裏側

図 4-17 に改善後行程計画を示す。図 4-14 の A 部形状を直線的につなぎ高さ方向の立壁に 5 度の角度をつける。改善前型構造では図 4-18 改善後の様に上型メシボリに A 部には隙間があり、この隙間部に材料がよけいに流れ込み結果鋭角気味な形状になってしまう。そこで図 4-19 の様に、メシボリ側 B 部のように隙間を作らないように設定した。その結果、絞り形状は鋭角な部位が発生せず、絞り(2)では折れシワに発生が無くなった。

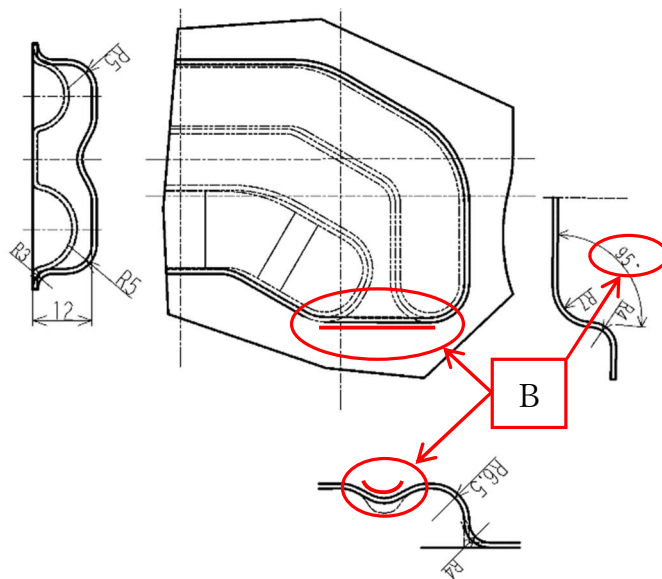


図 4-17 改善後工程計画



図 4-18 改善前後の絞り(1)サンプル

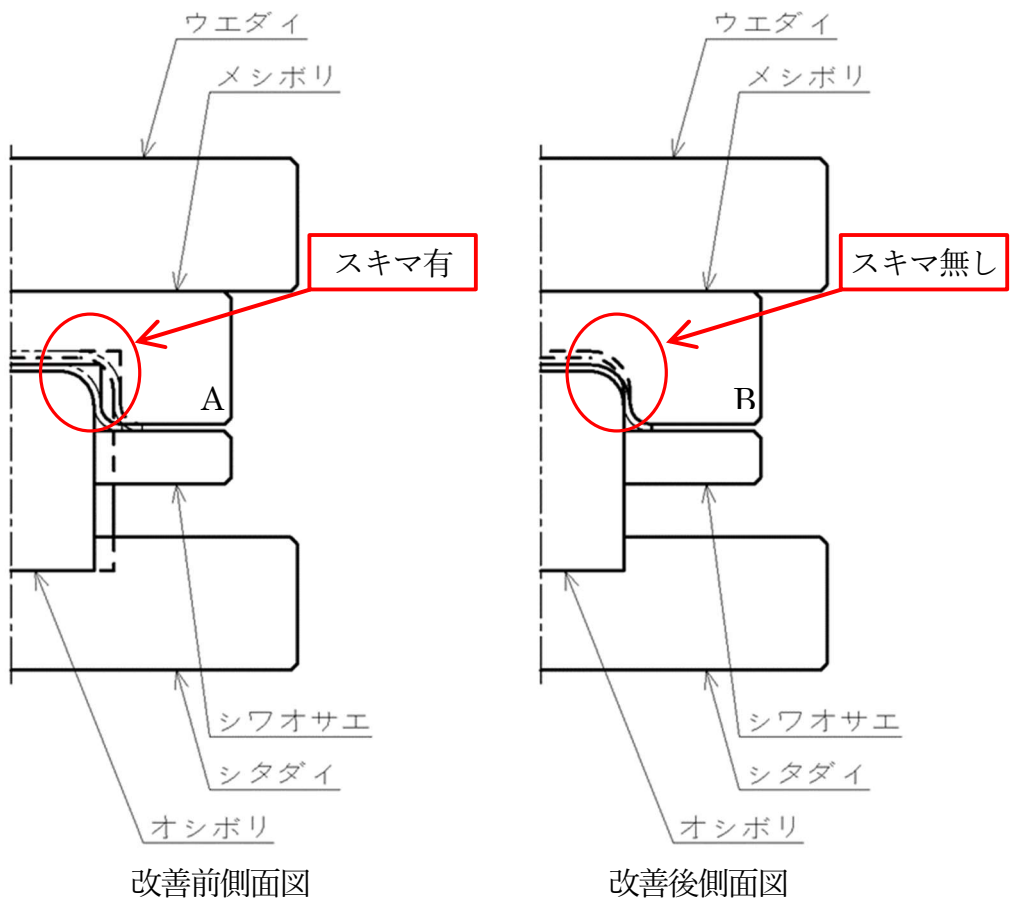


図 4-19 改善前後の金型側面図

絞り(2)

絞り(1)行程で改善をしたことにより、絞り(2)で中央部を下方方向に絞った時に余った体積が、図4-20,図4-21のようにフランジ側で外側にスムーズに逃げてくれるので折れシワの発生を防ぐことが出来た。



図4-20 改善後 絞り(2) プレス加工品表側



図4-21 改善後 絞り(2) プレス加工品裏側

絞り(3)

絞り(3)の工程では、絞り(2)の工程の高さを落としながら絞りRを小さくしていく。絞り部展開長は余り気味で次工程で成形する。図4-22



図4-22 絞り(3)プレス加工品表側

成形(1)

成形(1)の工程では、絞り(2)での絞り部展開長を各工程で合わせながら工程の高さを落とし絞りRを小さくしていく。展開長が合わないとR部の板減に影響が出やすくなる。図4-23



図4-23 成形(1)プレス加工品表側

4.7.2 測定

ポイントを決めて板厚測定を行った結果を以下に示す (図 4-24)

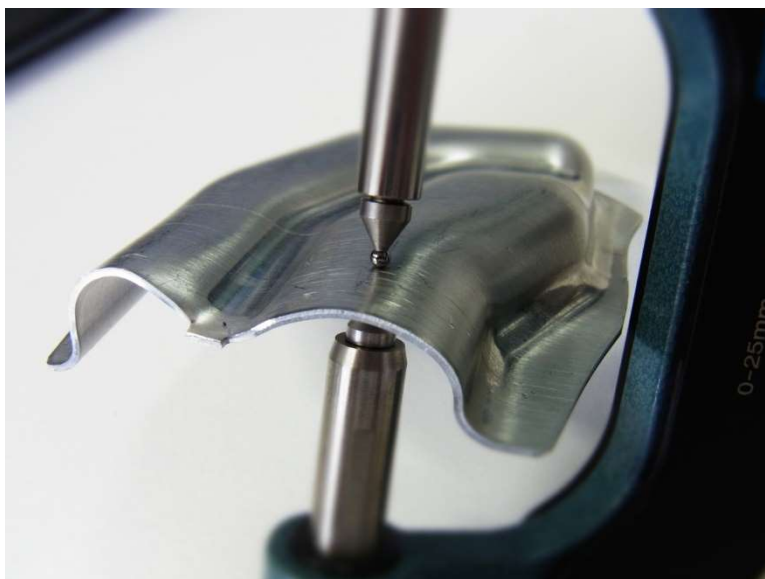


図 4-24 Mitutoyo マイクロメーターによる測定方法

測定点を以下に示す. 図 4-25~図 4-28

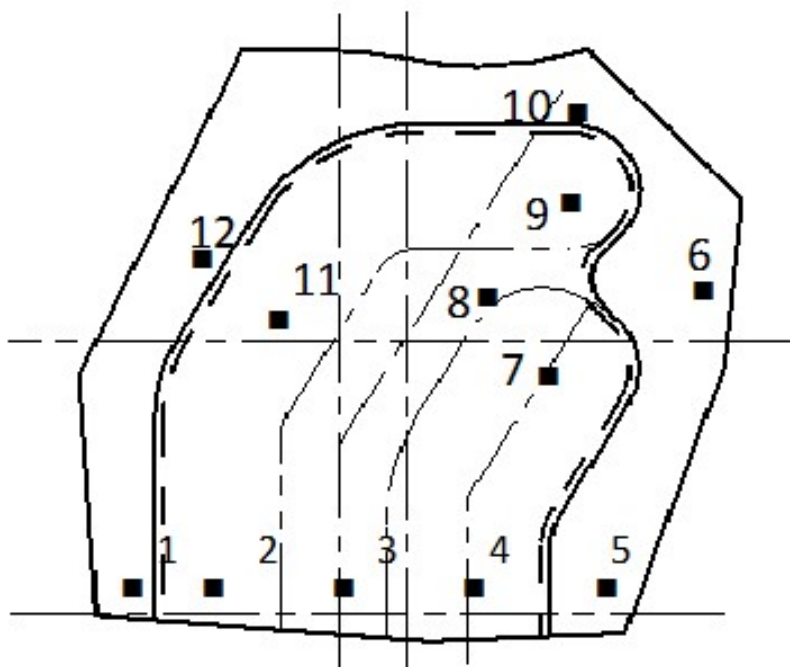


図 4-25 絞り(1) 測定点

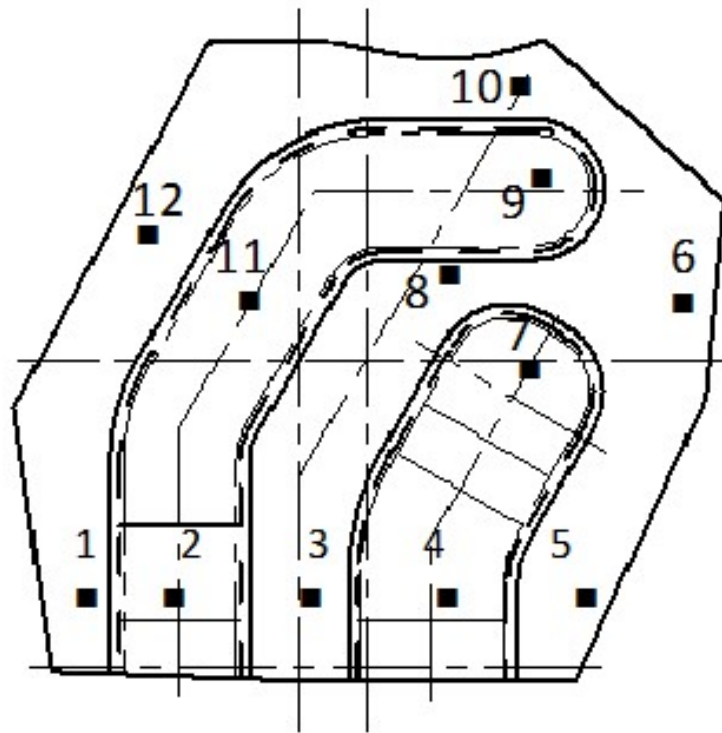


図4-26 絞り(2) 測定点

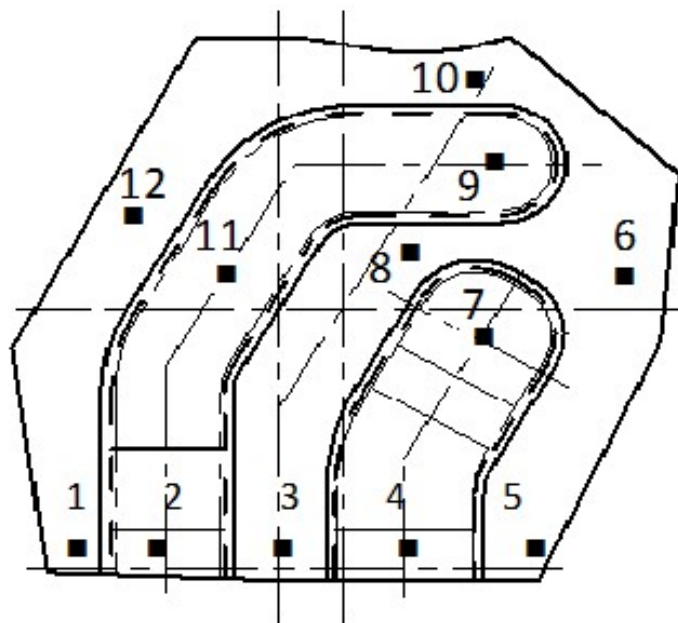


図4-27 絞り(3) 測定点

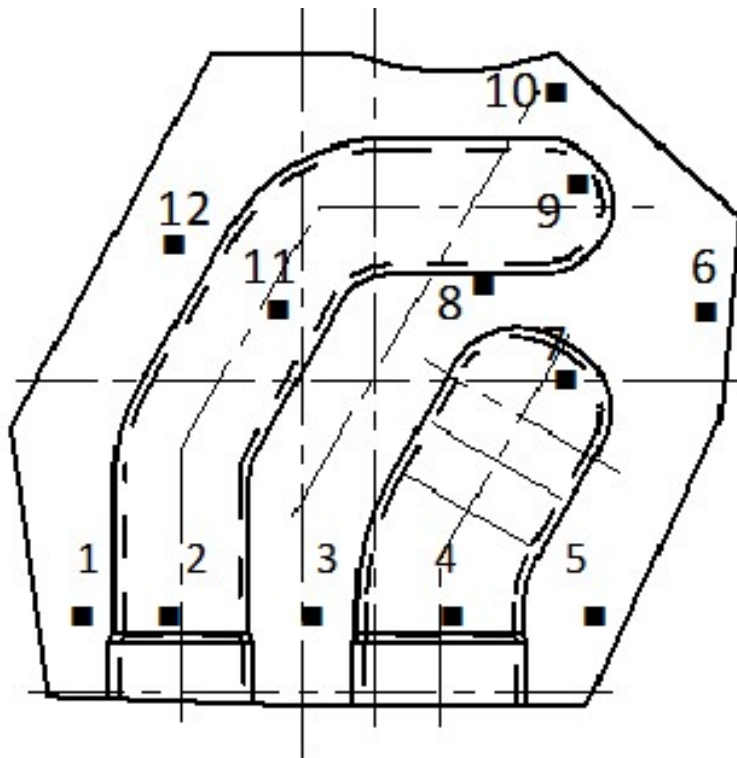


図 4-28 成形(1) 測定点

4.7.3 測定結果

板厚測定結果を以下に示す。 図 4-29

材質 HA991P-0 板厚 t=1.0m/m

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
絞り(1)	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00	1.05	0.97	0.93	0.95	1.05	0.98	1.02
絞り(2)	1.00	0.99	0.97	0.99	1.00	1.00	0.88	0.94	0.95	1.03	0.99	1.03
絞り(3)	1.01	0.99	0.97	1.00	1.00	1.04	0.87	0.94	0.93	1.01	0.99	1.02
成形(1)	1.01	0.99	0.97	1.01	1.00	1.05	0.88	0.95	0.95	1.03	0.99	1.02
MIN	1	0.99	0.97	0.99	1.00	1.00	0.87	0.93	0.93	1.01	0.98	1.02
MAX	1.01	1.00	0.99	1.01	1.00	1.05	0.97	0.95	0.95	1.05	0.99	1.03
AVE	1.005	0.99	0.98	1.00	1.00	1.04	0.90	0.94	0.95	1.03	0.99	1.02



図 4-29 板厚測定結果

4.7.4 断面観察

OLYMPUS-STM7 図 4-30 を使用し斜、樹脂埋めして測定を行った。図 4-31 に観察位置を示す。



図 4-30 使用した測定器

断面観察位置を以下に示す。図 4-31

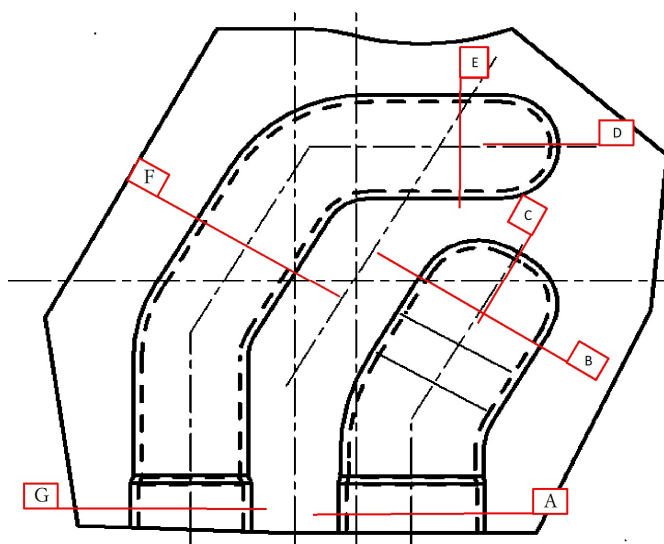


図 4-31 断面観察位置

4.7.5 断面写真

断面写真を以下に示す. 図 4-32~図 4-36

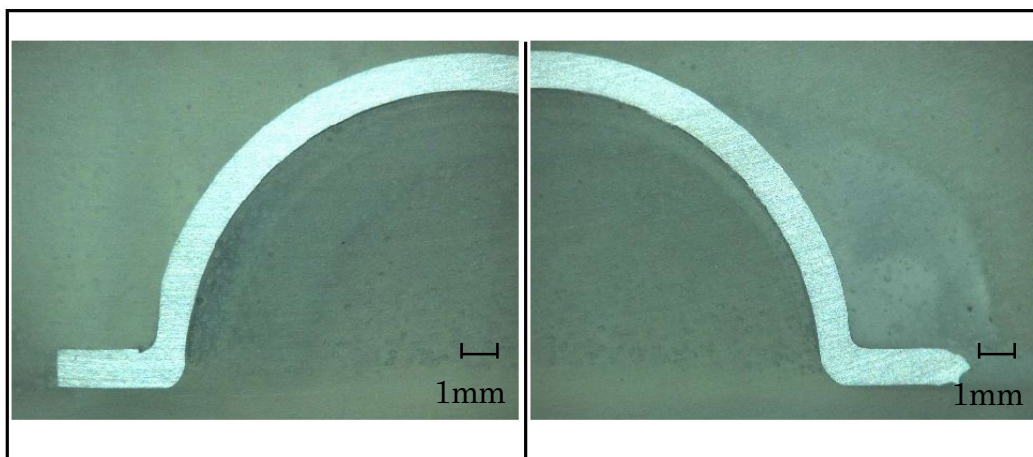


図 4-32 A 断面観察

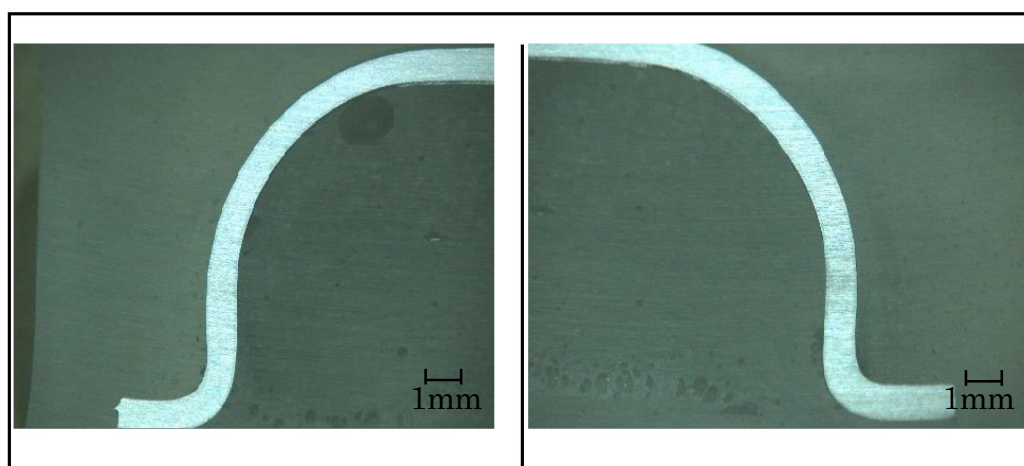


図 4-33 B 断面観察

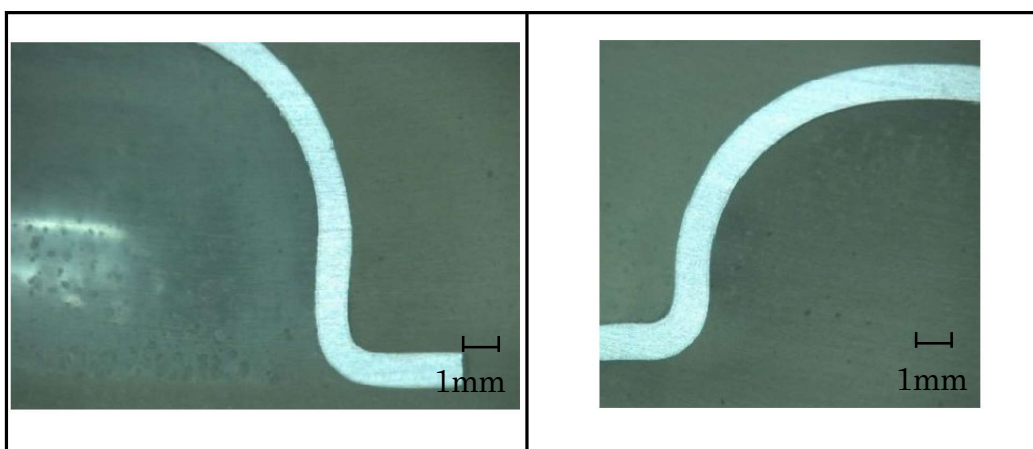


図 4-34 C 断面観察

D 断面観察

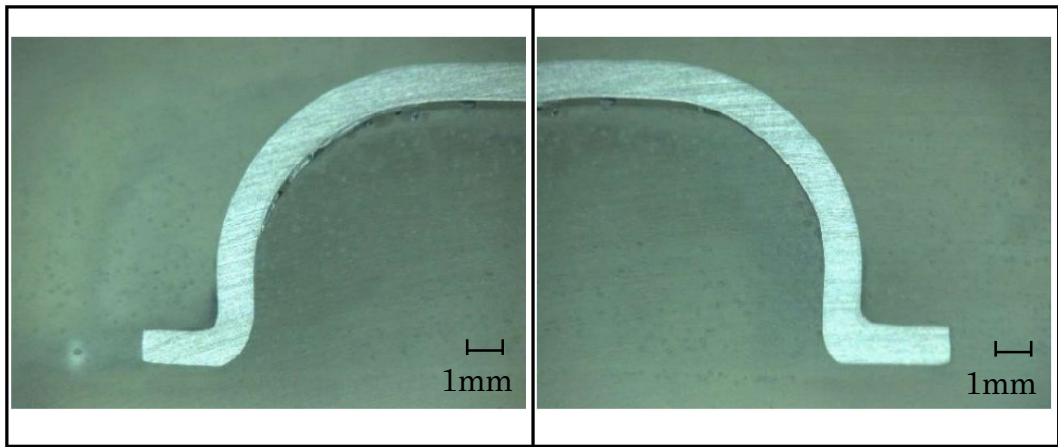


図 4-35 E 断面観察

F 断面観察

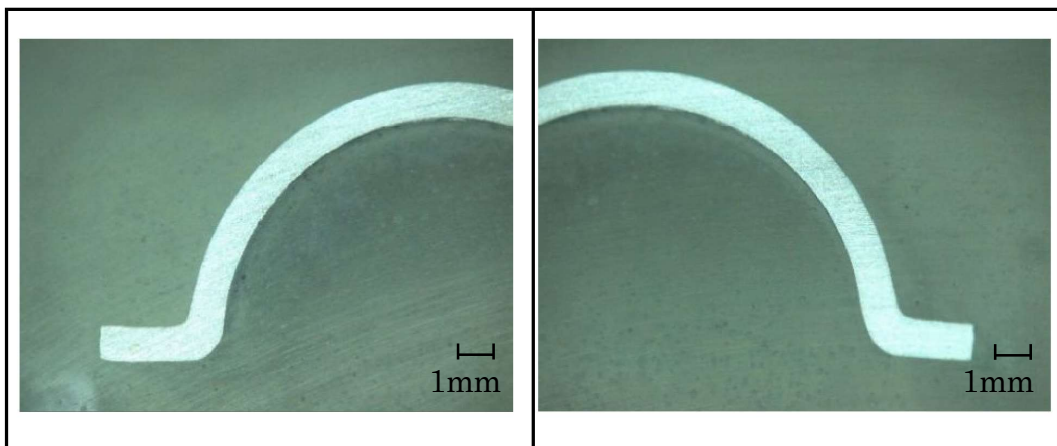


図 4-36 G 断面観察

4.8. 結言

- 1) 絞り(1)で大きく1山で絞り、絞り(2)で1山の中央部を下げる工法により、元板厚に対しての板厚減を最大13%以下に抑えた。
- 2) 絞り(1)で図4-37に示す改善後形状のように、凹凸が少な3D形状にすることで絞り(2)で図4-38の様に折れシワの発生を抑えた。
- 3) 絞り(2)において、立て壁部の余肉になると思われる部位で、改善後の体積がフランジ方向に移動していることが確認できた。

絞り(1)から絞り(2)での体積の動き



図4-37 絞り(1)



図4-38 絞り(2)

今回の異形絞りの場合は、2山絞るので間の平坦部位の板減が予想され、対応策として絞り(1)で2山分大きく1山で絞り、絞り(2)で中央部を下げることで2山とする成形法を考案した。この方法によって、従来困難であった板減の最小化が出来ることが実証された。この工法を活用することによりアルミニウム材を用いた異形絞りや複雑形状の成形が可能となり、製品の軽量化、最少化、高耐圧化に貢献できる。

第 5 章

プレスモーション制御と潤滑に
よる高張力鋼板の形状凍結性向上

第5章 プレスモーション制御と潤滑による高張力鋼板の形状凍結性向上

5.1 緒言

自動車業界では、環境保護の観点から二酸化炭素の排出削減が求められており、自動車の燃費向上を目的とした車体の軽量化が進められている。かかる観点から、自動車材料においてマルチマテリアル化が進み、高張力鋼板や軽金属、複合材料などが用いられている。一般に、鋼板の強度が向上すると様々なプレス成形性(例えば、形状凍結性、絞り性、張出し性など)が劣化することが知られている。図5-1に自動車に多く用いられているハット形状のプレス加工製品を示す。同じ金型でも左の軟鋼に比べて右の高張力鋼では、反りやスプリングバックといった形状不良の問題が生じ、形状凍結性が悪化する。著者らの一人は加工方法をドロウ成形からフォーム成形に変更することで、高張力鋼板の形状凍結性を向上させる研究を行った。超ハイテン材(JSC1180Y)を用いて、ドロウ成形とフォーム成形を実施した時の形状凍結性の相違を図5-2に示す。

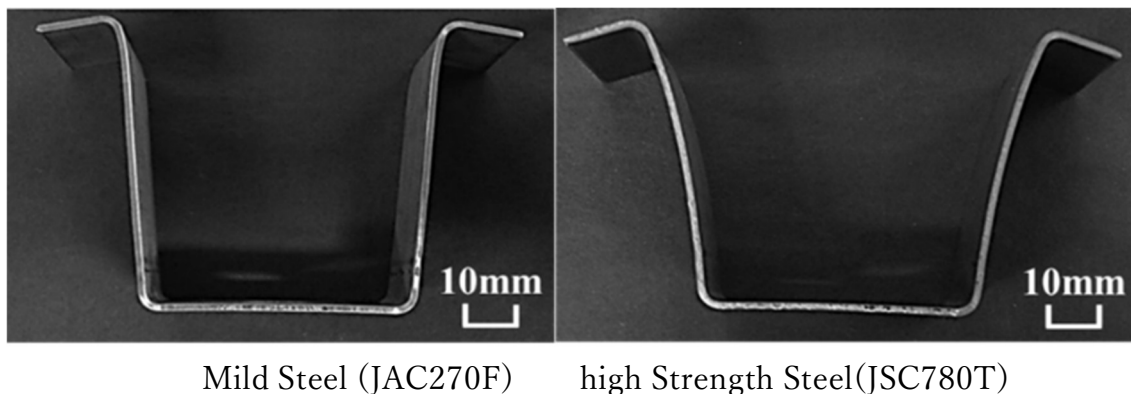


図 5-1

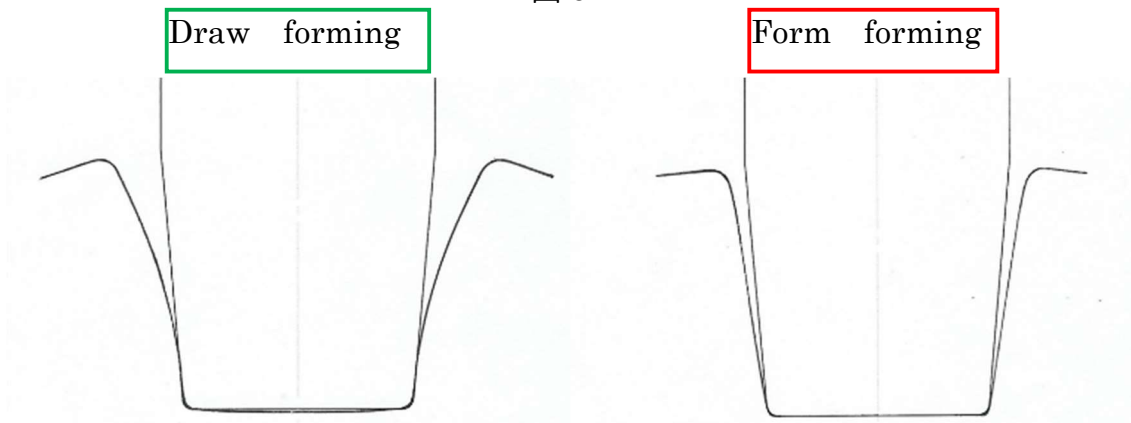


図 5-2

自動車のマルチマテリアル化により高張力鋼板や非鉄鋼材料が多く用いられるようになってきている。多くの自動車部品はプレス成形によって成形されており、自動車のマルチマテリアル化に伴い、製造現場では様々な成形不良が問題となっている。一般に、鋼板の強度が向上すると様々なプレス成形性(例えば、形状凍結性、絞り性、張出し性など)が劣化することが知られている。特に形状凍結性においては、高い寸法精度を要求させる自動車部品においては大きな問題である。

5.2 研究目的

ドロウ成形は外周部を押さえパンチを押し込み成形する方法で、フォーム成形は金型で材料中央部を押さえ、周囲の材料を自由に移動させる方法である。加工方法を変更することで形状凍結性向上を実現できた。一方で、加工方法を変更する際に金型の費用がかかることや、ドロウ成形でのみ加工できない形状もあることなどデメリットがある。そこで、金型を変えることなく形状凍結性を向上する方法として、サーボプレスにおけるモーション制御と潤滑に注目した。

プレスモーションの制御が成形性に及ぼす影響に関する報告は多いが、円筒深絞り成形や角筒絞り成形、楕円形深絞り成形の破壊限界、割れ限界向上が目的とされており、自動車に多く用いられているハット形状部品の形状凍結性向上に着目した研究は少ない。

金型を変えることなく形状凍結性を向上させる方法の2つ目として潤滑に着目した。先行研究でのプレス加工は全て潤滑油を用いていない。プレス成形において潤滑油を用いることのメリットは、材料と工具間の摩擦低減、焼付きかじりの抑制による成形限界や工具寿命の向上、しわ、キズ、割れなどの発生による製品品位低下の防止、冷却効果、表面被膜により防錆などである。

金属材料の塑性加工の中でも特に薄板のプレス成形において、工具と被加工材料の界面に作用する摩擦力の制御は、加工の成否を決める重要な作業である。そのため、潤滑油を用いることで形状凍結性向上を試みた。薄板のプレス成形

において潤滑油を用いて破壊限界値を向上させる研究や、潤滑油の種類や粘土による影響の研究は多くされている。一方で、プレス成形への潤滑の影響に関する報告の大半は、しわや割れといった成形不良を抑制するものであり、反りやスプリングバックの形状凍結性向上を目的とする報告は少ない。

本研究では、自動車で多く用いられているハット型部品の形状凍結性を金型や成形方法を変更することなく形状凍結性を向上させることを目的として、形状凍結性に及ぼすプレスモーションおよび潤滑の影響について個別に調査、検討した。また、成形工程における材料の変形を詳細に観察することで、各条件における形状凍結性の相違を成形メカニズムから考察した。

5.3 供試材および実験方法

5.3.1 供試材

JSC1180Y $t = 1.2 \text{ mm}$

表 3-1 機械的性質値

供試材は板厚 1.2mm, 幅 30mm, 長さ 150mm に切断して試験片とした。成形時のバラツキについて調査するために、各条件で 3 個の試験片を成形した

表 3-1 機械的性質値

	引張強さ [MPa]	耐力 [MPa]	伸び %	ヤング率 [kgf/mm ²]	比重 [g/cm ³]
JSC1180Y	1210	860	14	21000	7.87

5.3.2 使用プレス機

1500[kN]電動サーボプレス機を使用した。
図 5-3 に使用プレス機を示す。



図 5-3 使用プレス機

5.3.3 プレスモーシヨンと使用金型

プレス機械は、最大荷重 1500kN サーボプレス機（アマダ製）を使用して通常のプレス加工で用いられる 1 回の上下動加工モーシヨン（成形速度 5spm）と細かく上下動を繰り返す寸動モーシヨンで成形実験を行った。図 5-4 に示すように寸動モーシヨンにおける成形速度は 5spm，1 回に寸動において金型の上昇量は 1 mm で一定として，下降量を 1.25，1.5，2.0 mm の 3 種類に設定した。すなわち，上下動のスライド量はそれぞれ 0.25，0.5，1.0 mm である。下死点通過後は全て 5spm の速度で金型を上昇させた。図 5-5 の金型でハット型部品を加工するドロウ成形を実施した。成形時のバラつきについて調査するために，各条件で 3 個の試験片を成形した。

プレスモーション

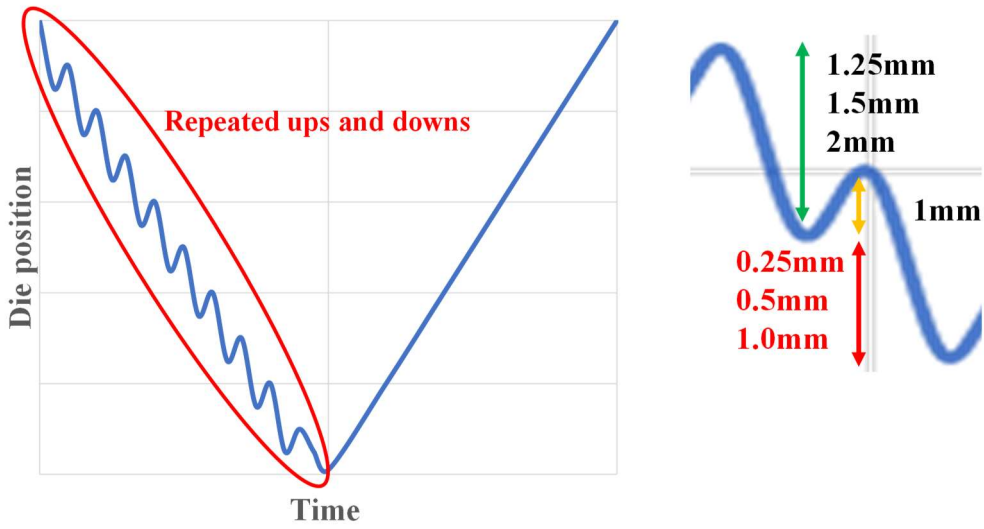


図 5-4 サーボプレスのモーションの詳細

使用金型

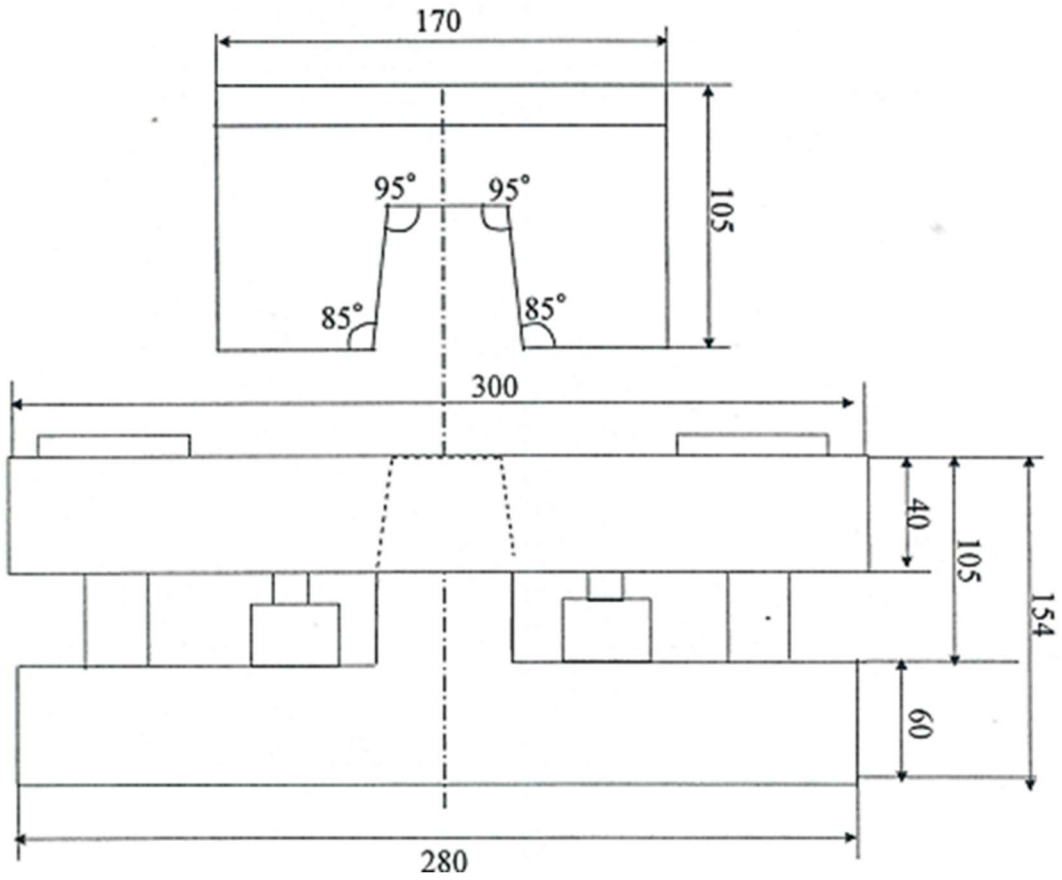


図 5-5 使用した金型の図面

5.3.4 使用潤滑油

潤滑油は、日本工作油株式会社製の G-6231F 工作油を使用した。この潤滑油は薄板の打抜きや曲げに適している。特徴として、完全脱脂レスな潤滑油であるため、加工後すぐにシール貼りやシルク印刷が可能である。乾燥線図のデータより、1時間で約80%、約2時間半で100%揮発する。脱脂・洗浄工程が必要なため、自動車部品には潤滑油を用いないことが多い。本潤滑油は脱脂・洗浄工程を行う必要がないため、自動車部品のプレス成形に適する潤滑油である。なお、本研究ではプレス加工の直前に試験片表面に潤滑油を塗布して、その後すぐに成形実験を行った。

5.3.5 形状凍結性の評価方法

図5-6はハット型製品(試験片)の理想形状である。曲げ角度は 95° に設定した。一般に形状凍結性はフランジ部の開き幅で評価されているが、後述するように成形メカニズムを詳細に解析すると、図5-6に示すように形状凍結性不良は、底面(以後ウェブ面と称す)近傍の曲げ部分におけるスプリングバックとたて壁における反りに分解することができる。そこで、本研究では寸動モーションと潤滑が反りとスプリングバックそれぞれに及ぼす影響について調査した。たて壁の上下点を結んだ直線とウェブ面の角度からたて壁下部の接線とウェブ面の角度を引き算した値(①-②)を反り角度、たて壁下部の接線とウェブ面の角度から金型における曲げ角度を引き算した値(②- 95°)をスプリングバック角度と定義した。測定方法は以下の通りである。まず試験片形状を紙にトレースし、スキャナにより電子データ化する。その後、3次元CADソフトSolid Worksを用いて図5-7定義した反り角度とスプリングバック角度を測定した。

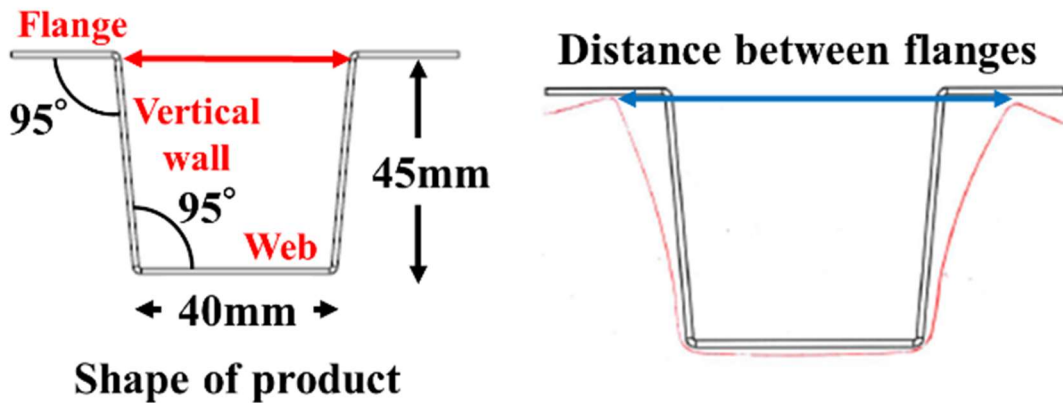


図 5-6 ハット型製品（試験片）の理想形状

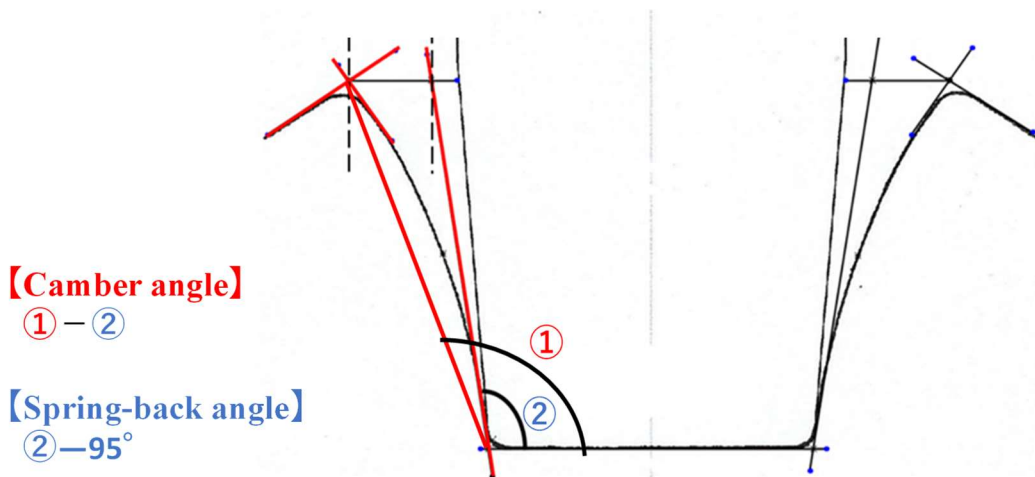


図 5-7 反りとスプリングバックの分類

5.4 成形試験結果

5.4.1. 形状凍結性におよぼす寸動モーシヨンの影響

反り角度に及ぼす寸動モーシヨンの影響について図 5-8 に示す。図中の緑の点線は通常のモーシヨンにおける平均値である。寸動モーシヨンによって反り角度は減少している。一方、寸動 1 回における下降量には差が無い。スプリングバック角度に及ぼす寸動モーシヨンの影響を図 5-9 に示す。反り角度に対してスプリングバック角度は小さく、寸動モーシヨンの影響は認められない。

寸動モーシヨンは形状凍結性における反りの抑制には効果的であり、寸動 1 回における下降量の影響はない。また、スプリングバックに対しては寸動モーシヨンの効果は無い。

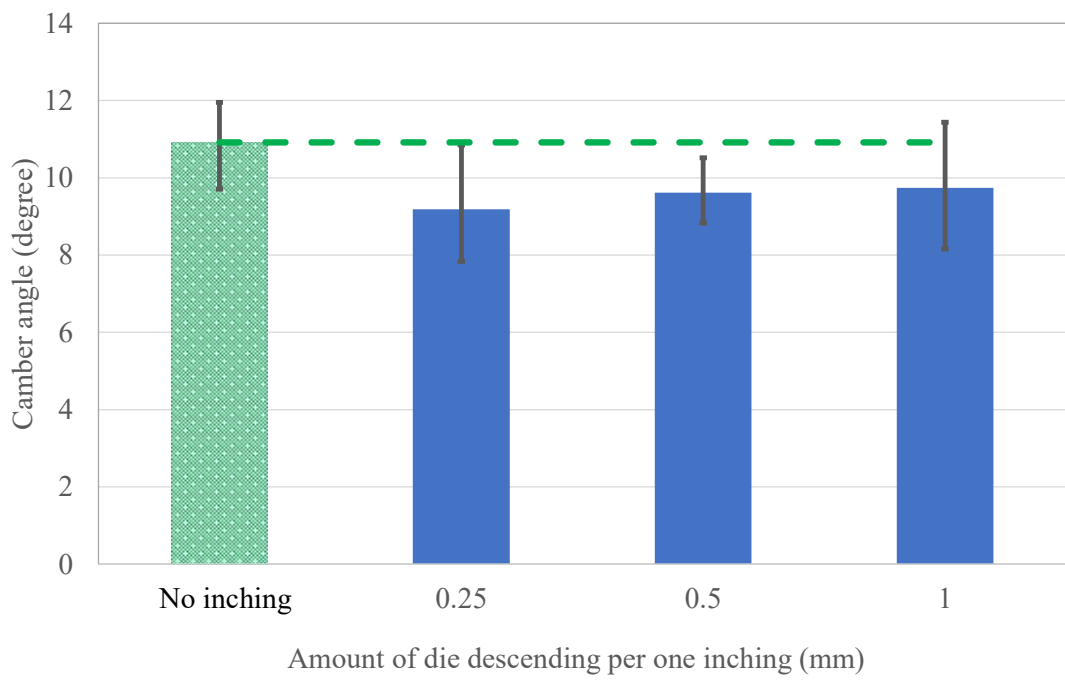


図 5-8 コイニングモーションにおける反り角度

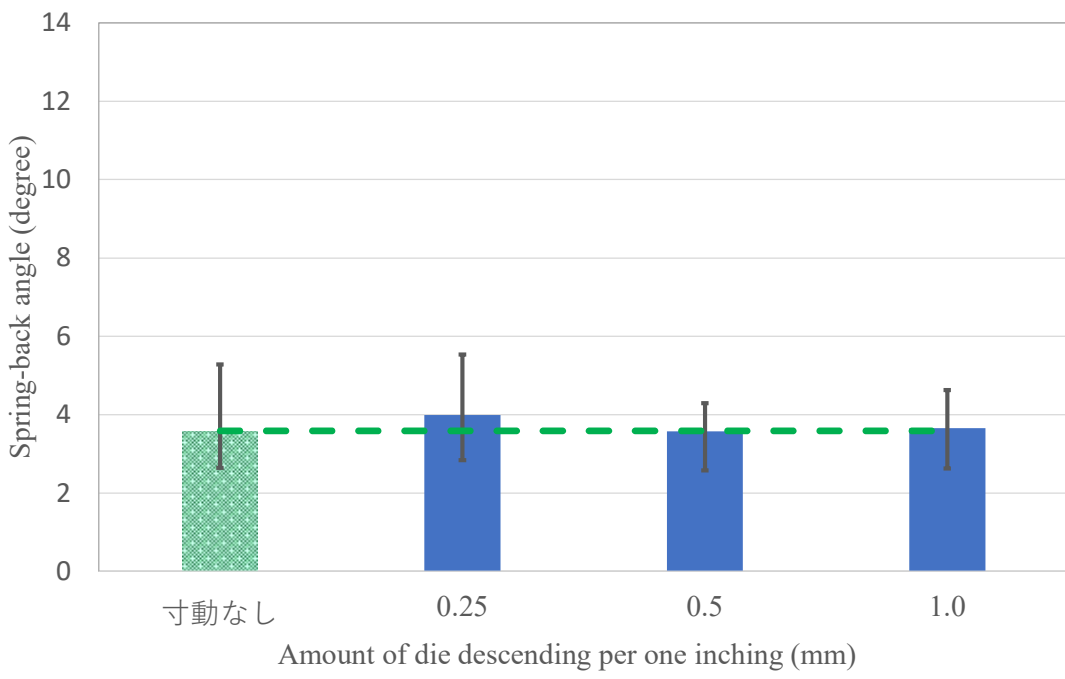


図 5-9 寸動モーションにおけるスプリングバック角度

5.4.2 形状凍結性におよぼす潤滑の影響

反り角度に及ぼす潤滑の影響について図 5-10 に示す。なお、プレスモーションは寸動を行わない通常モードを使用した。同図より潤滑油の適用で反り角度は減少している。スプリングバック角度に及ぼす潤滑の影響を図 5-11 に示す。潤滑油の適用でスプリングバック角度は増加している。

潤滑は形状凍結性における反りの抑制には効果的であるが、スプリングバックに対しては形状凍結性を悪化させる。

ハット型部品のドロー成形において、形状凍結性に及ぼす寸動モードと潤滑の影響は反りとスプリングバックに分解して調査するとその効果が個別に異なることが明らかとなった。次章では成形プロセスを詳細に観察して、その原因について考察する。

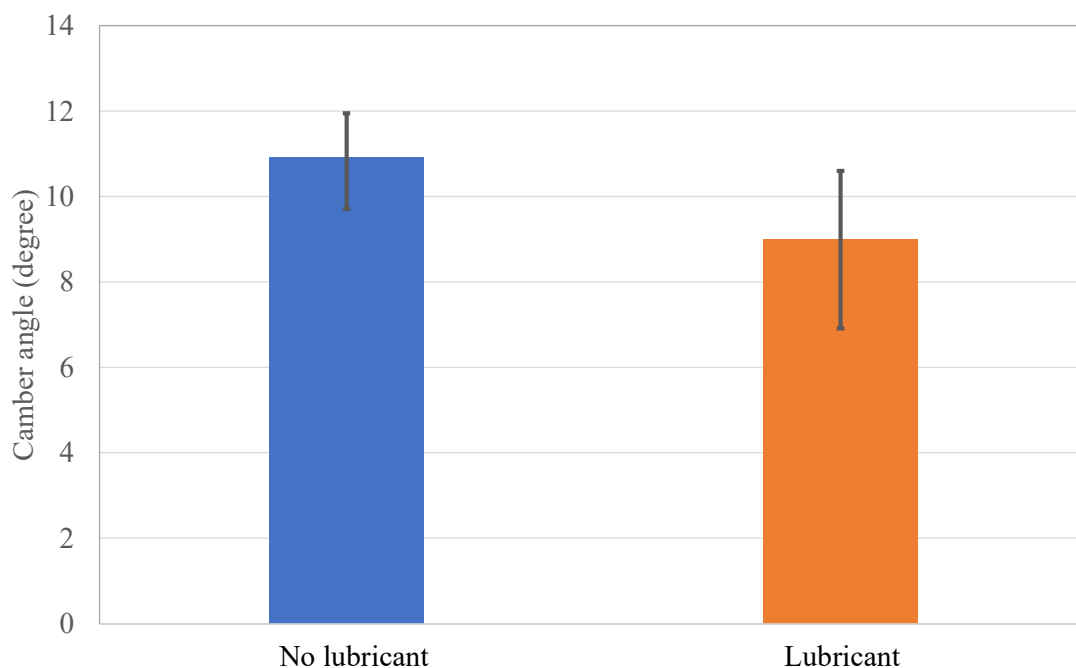


図 5-10 潤滑油有無比較反り角度

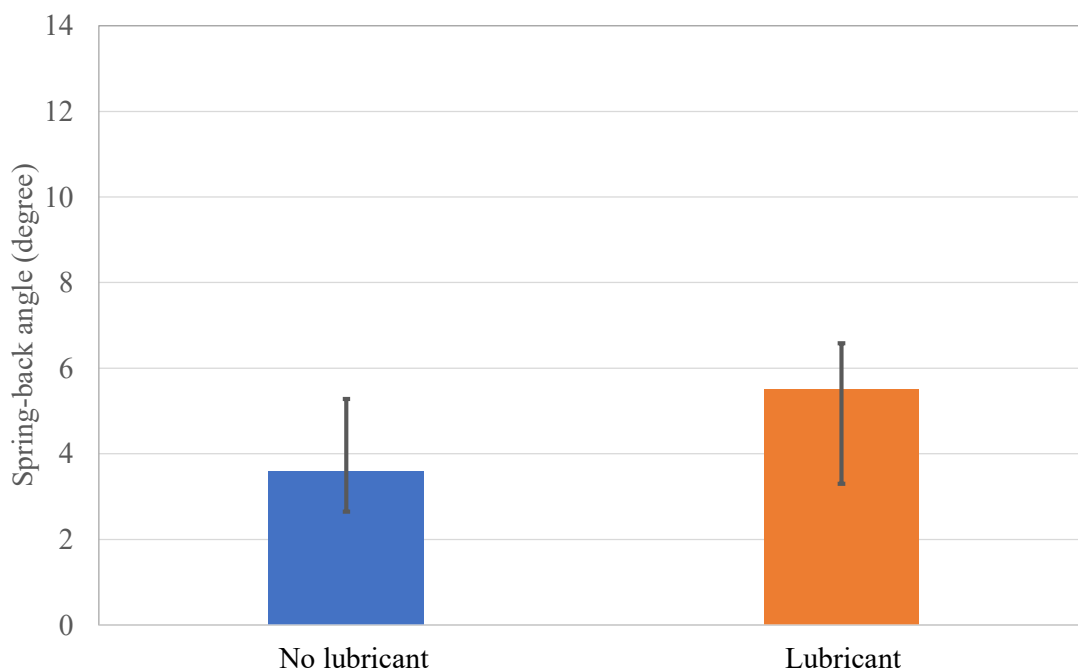


図 5-11 スプリングバック角度に及ぼす潤滑の影響

5.4.3 成形プロセス

本研究で使用したサーボプレスの特徴を活用して、様々なスライド量で金型を停止させて成形プロセスにおける被加工材の変形過程を観察した。その結果を図 5-12 に示す。下死点の位置は金型の押し込み量 45mm であり成形はこの時点で終了する。

最初に、ダイが下降してブランクホルダで固定された試験片（板材）にパンチが接触する。押し込み量 10mm の時点でウェブ面左右の曲げ部が成形される。すなわち、ウェブ部左右の曲げ（スプリングバック）は初期段階の成形で決定される。

押し込み量を増やしていくとブランクホルダで固定された材料がダイ肩部を通過して曲げられて流入する。その後、曲げられた材料はたて壁部で直線形状になる。このプロセスは「曲げ戻し」と呼ばれる。材料が曲げ戻しされながら流入して、ハット型のたて壁部が形成される。その後、押し込み量 45mm で成形が終了する。各押し込み量における被加工材の変形工程を図 5-13 に示す。ダイ

の押込みとともにフランジ部の材料が動いていく。ダイ肩部を通過して曲げ戻しされた後に、たて壁を形成する。すなわち、たて壁部の反りは材料の曲げ戻し過程で決定される。

以上の観察から、ハット型部品のドロウ成形における形状凍結性はたて壁部の曲げ戻しによる反りとウェブ面左右の曲げにおけるスプリングバックの2つの要素に影響を受けていることがわかった。

したがって、反りを抑制するためには、曲げ戻しにおける負荷を低減させること、すなわち、ダイ肩 R 部を材料が通過する際に被加工材と金型間の摩擦を低減させることが効果的である。

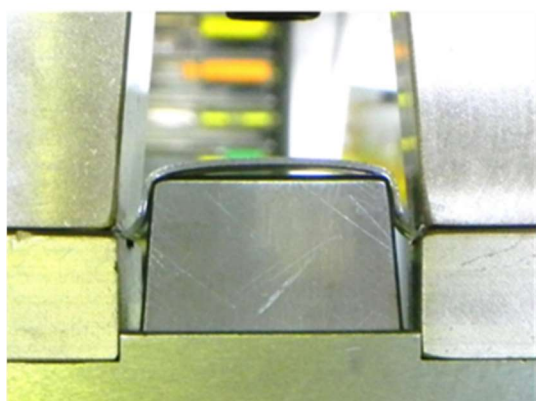
寸動モーションでは、上金型（ダイ）が上下動しながら被加工材を成形していく。上金型が上昇する時は被加工材と上金型が離れ、たて壁成形時の上金型と被加工材の摺動距離は小さくなる。鉄鋼材料では工具と材料間の相対速度が増加すると摩擦係数が減少することが知られている。寸動モーションの金型と被加工材の摺動距離は 1.25~2.0mm であるのに対し、寸動モーションを用いなかった場合の摺動距離は 45mm であり、大きな差がある。摺動距離が小さくなることで、摩擦係数が小さくなり、金型と被加工材間の摩擦が抑制され、曲げや曲げ戻し時の負荷が減少したと考えられる。また、潤滑油を使用した場合では、被加工材と金型の間に油膜が存在するために摩擦が低減して反りが抑制されたと考えられる。

次に、スプリングバックの抑制について考察する。図 5-14 に示すように、製品上部の端面はパンチ肩 R 部において被加工材が曲げられることによって成形される。ダイが降下する際にダイ肩 R 部でも被加工材が曲げられることからパンチ肩 R 部の曲げには引張力が作用していることがわかる。

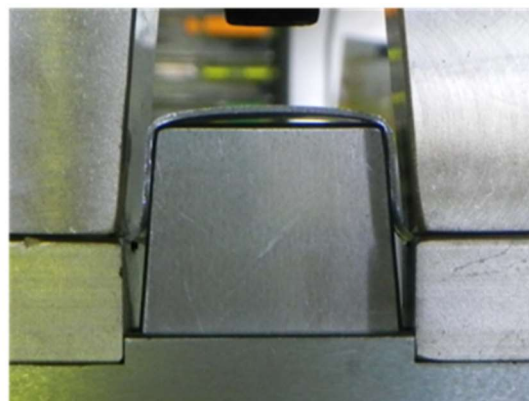
曲げ加工における曲げ部の応力状態を図 5-15 に示す。材料の外側は引張、内側は圧縮の応力が発生する。曲げ後除荷するとこれらの応力が反転した状態で残留応力として存在しスプリングバックが発生する。そのため、応力分布を均一にさせればスプリングバックは減少する。引張力を付加しながら曲げ加工を行った場合、中立軸が圧縮側にずれることで引張応力に支配され、応力分布は

均一になる。よってスプリングバックは減少する。潤滑によってスプリングバックが増加する原因は摩擦に起因するダイ肩 R 部の引張力が低下して、パンチ肩 R 部の曲げにおける引張荷重の効果が低減したためであると考えられる。

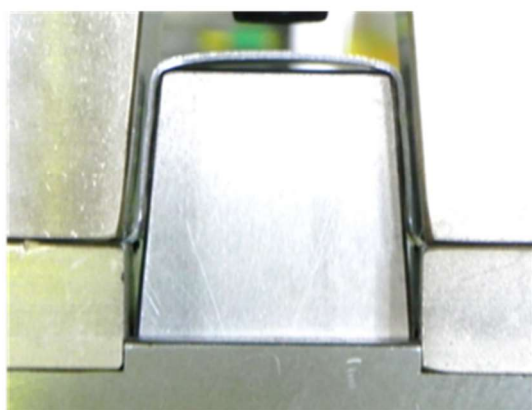
以上の結果の妥当性を確かめるために、次節では X 線回折装置によって、たて壁および曲げ部のピークプロファイルから半価幅を測定することで、成形品表面のひずみ状態について検討した。



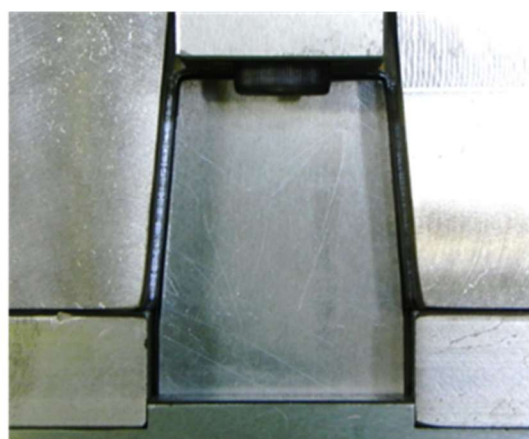
Stroke 10mm



Stroke 20mm



Stroke 30mm



Stroke 45mm

図 5-12 被加工材の変形工程

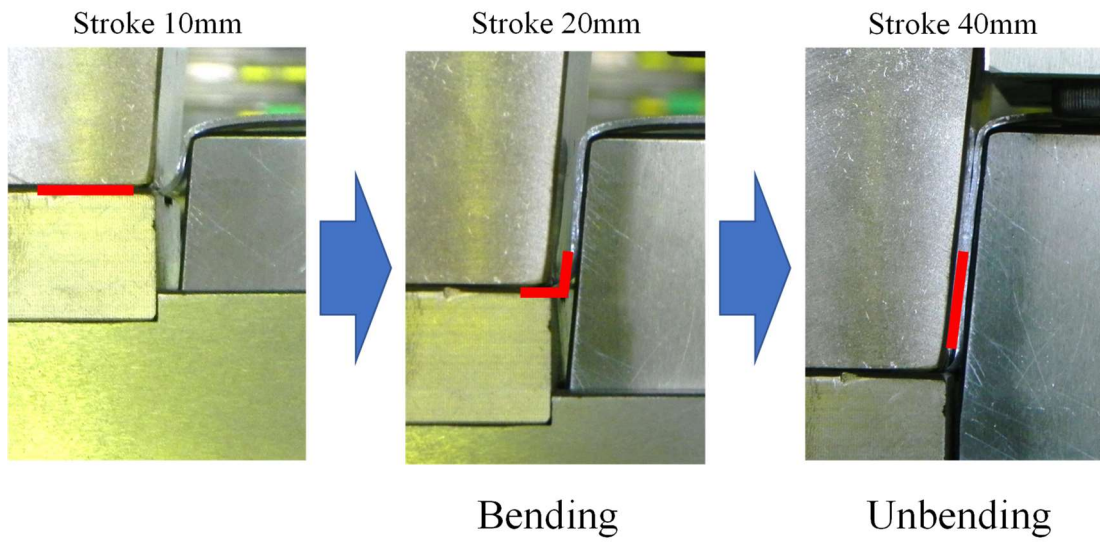


図 5-13 各押し込み量における被加工材の変形工程

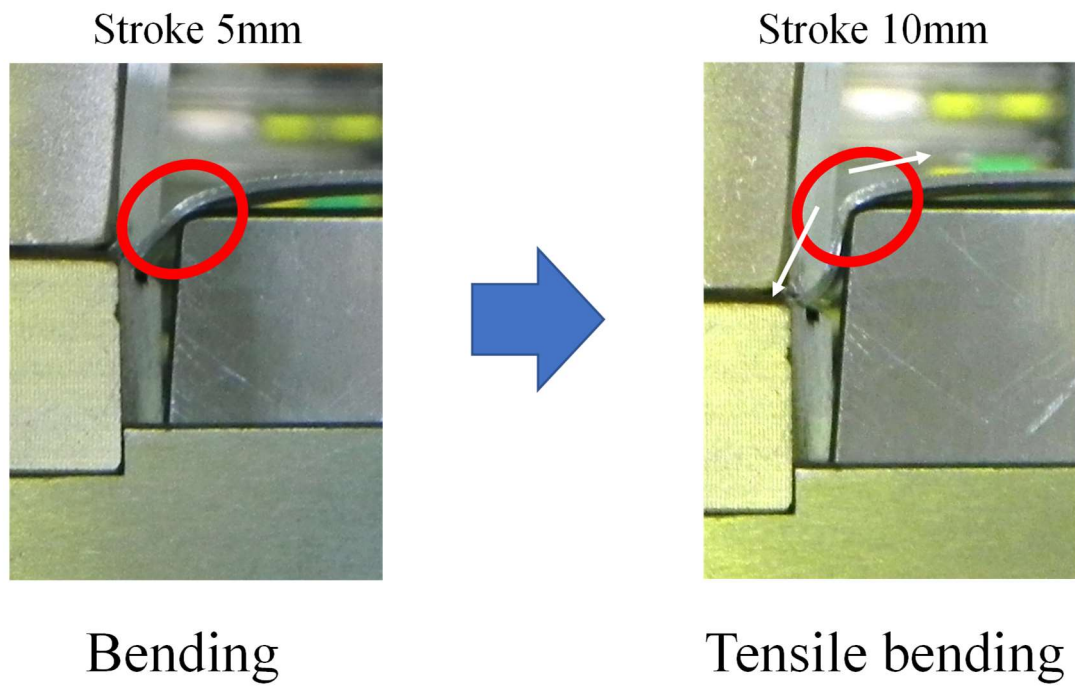


図 5-14 スプリングバックの抑制

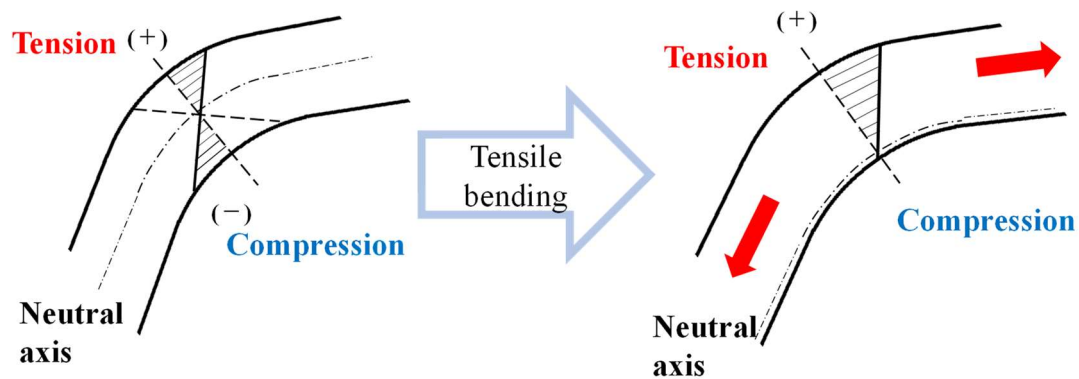


図 5-15 曲げ加工における曲げ部の応力状態

5.5 X線回折装置による成形品の表面ひずみ状態の評価

X線回折装置（パルステック工業株式会社製 μ -X360）を用いて成形品の表面ひずみの状態を計測した。同装置では、単一方向からX線を入射し、照射物より返ってくる回折X線（デバイ環）を計測する。回折X線の半価幅は金属材料の転位密度と相関があり、材料が受けたひずみが大きければ半価幅も大きくなる¹²⁾。この特性を利用して成形品のたて壁と曲げ部の表面ひずみ状態を調査した。図5-16に示すように、成形品・たて壁の測定箇所は、成形工程でダイ肩Rと接触する外側であり、フランジ側から10～30mmの範囲で5点測定した。ウェブ側面の曲げ部については外側であり、試験片幅（30mm）を4等分した3点で計測した。

図5-17、5-18に、たて壁における半価幅の測定結果を示す。図5-17は寸動モーシヨンの影響、図5-18は潤滑の影響をそれぞれ示している。たて壁のどの場所においても寸動モーシヨンと潤滑によって半価幅が低くなっており、加工時に受けるひずみが小さいことがわかる。すなわち、ダイ肩R部を材料が通過するときに働く摩擦力が寸動モーシヨンと潤滑によって低減されている。図5-19に、曲げ部における半価幅の測定結果を示す。潤滑した場合は無潤滑の場合に比べて曲げ部の半価幅が減っているおり、曲げ部のひずみが小さい。すなわち、潤滑した場合は前章で述べたように摩擦に起因するダイ肩R部の引張力

が低下して、パンチ肩 R 部の曲げ部において十分な引張ひずみを与えることができずスプリングバックが増加したと考えられる。

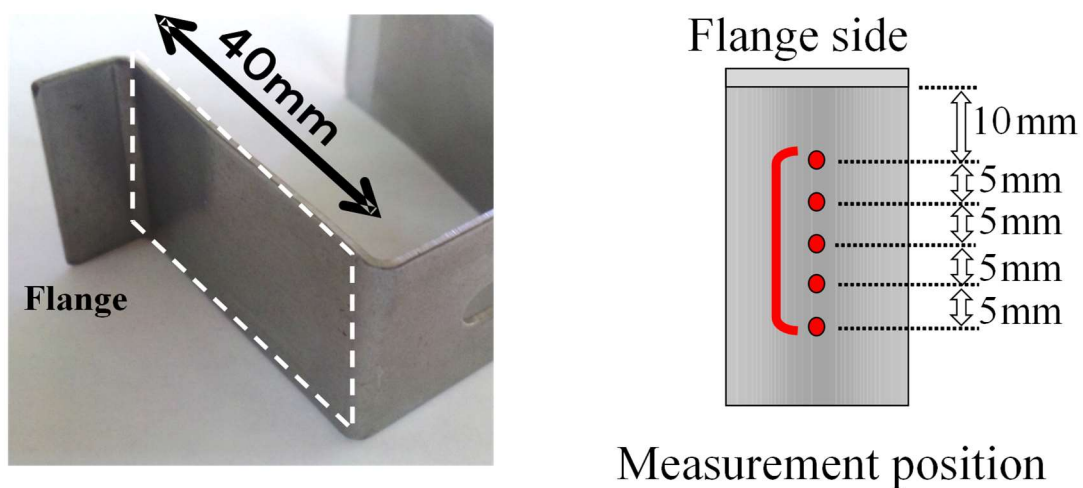


図 5-16 製品の測定範囲

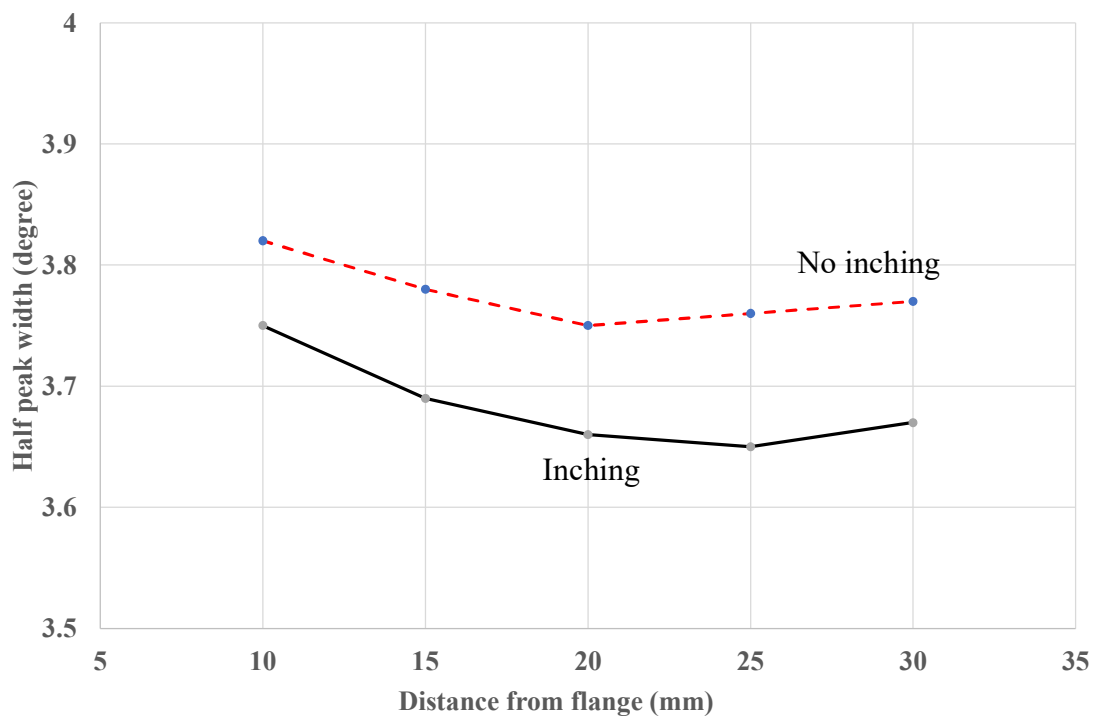


図 5-17 寸動モーションの影響による半価幅

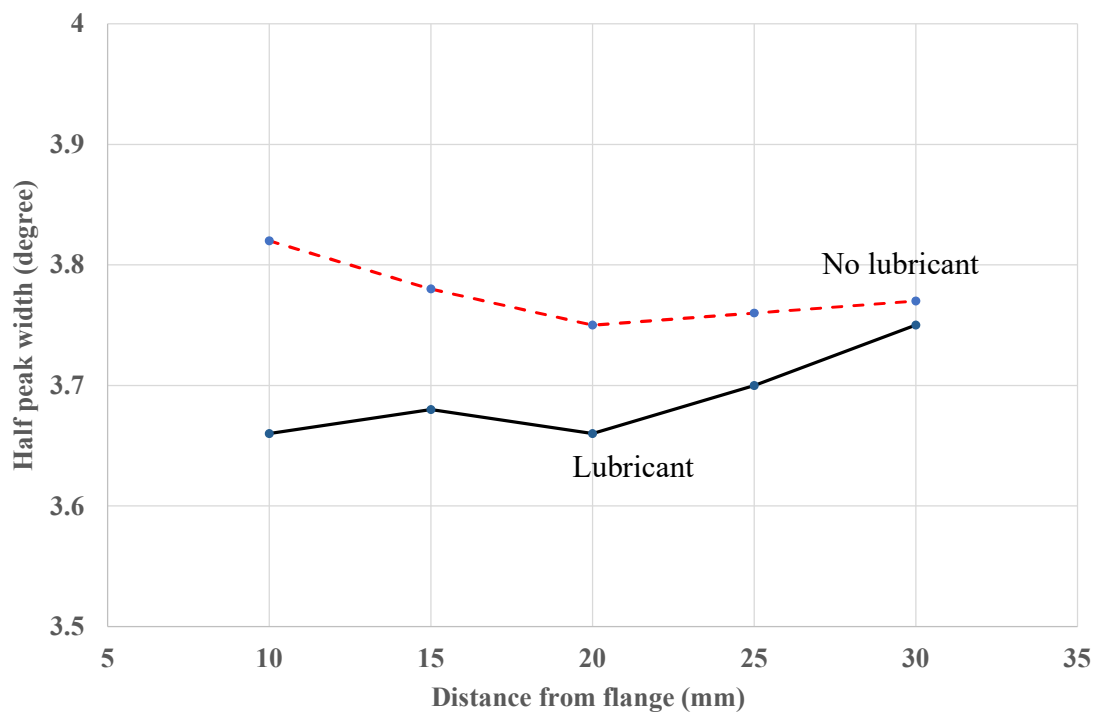


図 5-18 潤滑の影響による半価幅

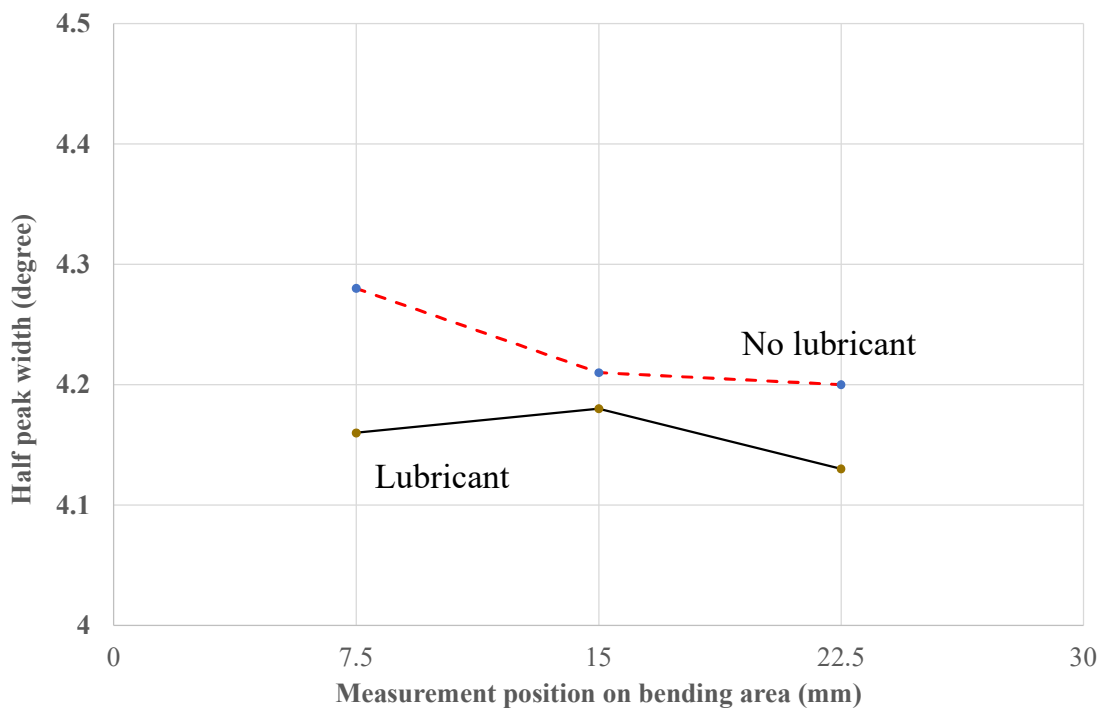


図 5-19 潤滑の影響による曲げ部の半価幅

5.6 結言

本研究では、サーボプレス of 寸動モーションと潤滑がドロ成形によって製造されたハット型部品の形状凍結性に及ぼす影響について検討した。形状凍結性については、たて壁部の反りとウェブ側面の曲げ部のスプリングバックに分解して検討した。また、成形工程における材料の変形を詳細に観察することで、各条件における形状凍結性の相違を成形メカニズムの解明から考察した。得られた結果を以下に示す。

- 1) 寸動モーションは形状凍結性における反りの抑制には効果的であり、寸動 1 回における下降量の影響はない。また、スプリングバックに対しては寸動モーションの効果は無い。潤滑は形状凍結性における反りの抑制には効果的であるが、スプリングバックに対しては形状凍結性を悪化させる。
- 2) ハット型部品のドロ成形における形状凍結性はたて壁部の曲げ戻しによる反りとウェブ面左右の曲げにおけるスプリングバックの 2 つの要素に影響を受けている。
- 3) 寸動モーションでは、金型と被加工材間の摺動距離が小さくなることで、摩擦が抑制され、曲げや曲げ戻し時の負荷が減少する。潤滑油を使用した場合は、被加工材と金型の上に油膜が存在するために摩擦が低減する。したがって、寸動モーションと潤滑によってたて壁部の反りが抑制される。
- 4) 引張力を付加しながら曲げ加工を行った場合、スプリングバックは減少する。潤滑によってスプリングバックが増加する原因は摩擦に起因するダイ肩 R 部の引張力が低下して、パンチ肩 R 部の曲げにおける引張荷重の効果が低減したためである。

5) X線回折実験から、たて壁のどの場所においても寸動モーションと潤滑によって半価幅が低くなっており、加工時に受けるひずみが小さい。すなわち、ダイ肩 R 部を材料が通過するときに働く摩擦力が寸動モーションと潤滑によって低減されている。潤滑した場合は無潤滑の場合に比べて曲げ部の半価幅が減っているおり、曲げ部のひずみが小さい。すなわち、潤滑した場合は摩擦に起因するダイ肩 R 部の引張力が低下して、パンチ肩 R 部の曲げ部において十分な引張ひずみを与えることができずスプリングバックが増加する。

第 6 章

総 括

第6章 総括

本研究は、近年自動車車体の軽量化と衝突安全性向上という相反する要求性能を満足させるため、自動車のマルチマテリアル化が進み、その中でもボディへは高強度材料の適用が増加しており、難加工材のプレス加工における成形性向上技術の研究としてオリジナルなプレス成形法の開発を目的に行ったものである。全5章からなり、各章から得られた結論は以下のとおりである。

第1章では社会的背景と本研究の目的を示した。

第2章では、製品板厚の均一化”に注目しアルミニウム材については圧縮荷荷を利用した工法を用いることで、板厚の均一化に有効であることが分かった。この工法は板厚が局所的に減少する成形において、材料を上下の圧縮で機械的に流すことにより、板厚を均一に成形することが確認できた。

- 1) 本研究における製品形状を成形する場合、通常の張出し成形では変形がパンチ肩部に集中してネッキングが起る。
- 2) 単純な引張変形では肉厚減少量が5%未満であり、今回の製品形状における肉厚25%減の実現は張出成形では困難である
- 3) 圧縮荷重による材料の流動を利用すれば、薄板であっても鍛造のように素材から大きな形状変化で製品を成形することが可能である。板厚方向に圧縮して外周に材料を移動させることでネッキングを防止する圧縮・張出し成形法を考案した。
- 4) 圧縮・張出し成形によって製品中央のフラット部に圧縮荷重を加えてパンチ頭部フラット形状の材料をパンチ肩部に流して肉厚を均一化することに成功した。パンチ肩Rの形状は材料流れに影響を及ぼし、肩Rが大きい方が肉厚の減少量が少ない。
- 5) 実際に加工を行ったプレス成形品の、面ひずみを測定することにより材料の2軸引張時における板厚減少率を算出することができた。これはn値やエリクセン試験の様な方法とは異なり、より実践に近い加工条件下での張出性を評価することが可能である。

第3章では、アルミニウム合金のバーリング複雑成形技術についての検討をした。コイニングによってバーリング付け根付近の破壊が問題となっている、金型構造の違いで破壊が発生する部位の改善に取り組んだ。

- 1) 金型 A バーリング工程後内外径を拘束してのコイニングとなり、外形がフリーの状態での加工となり、幅方向に体積が流れてバーリング付け根部分で破壊が発生した。
- 2) 金型 B 金型 A と同様の構造で外形をガイドにて拘束することにより、コイニングによる体積の流れが減少したがコイニングによる余分になった体積が逃げる部位がなく、結果高さ方向に流れ厚み寸法が NG となったが、両サイド拘束することによりコイニングによる余分な体積の両生によるバーリング付け根の減肉がある程度抑えることが出来た。次に金型 B-改ではバーリング部位のみ外形を拘束しバーリング間に余分な体積を逃がしポケットを設定することよりバーリング部位のコイニングによる余分な体積は逃がしポケットに流れバーリング付け根部位の破壊は無くなった。
- 3) 金型 C 製品幅を 16mm から 10mm にすることによるコイニングによる余肉の総量は減り、金型 B-改の試験片と金型 C の試験片では半分以下であった、A 断面（幅方向と平行な断面）のバーリング内面に変形が見られるがバーリング内径、外径をガイドし製品外側を部分的に拘束することにより変形量は最小限に出来ることがわかった。変形の起点となる位置は b と e の交点となる位置でこの点はコイニングの開始点で板厚が 1 mm なので変形に起点になる値であることが解りました。改善前と後での比較として e 値が金型 B では $215\mu\text{m}$ あり金型 C では $97\mu\text{m}$ と変形量が約 45% となった、コイニング時に発生する余肉を制御できる金型構造とすることにより、飛躍的に板減を抑えることが可能であることがわかった。
- 4) 金型 D 金型 A 金型 B、金型 C はガイドがボルト締め固定のため、試打ち毎ボルトを外して製品を取り出していたが、ガイドを横方向に 0.5mm 程度可動式としコイニング加工前に、ストリッパーが下降するタイミングでガイド外側を拘束し外に逃げない構造としコイニング加工を行い、ストリッパーが上昇するとガイドがフリーとなりスプリングの力で外側に逃げる構造とし、加工のタイミングとガイドするタイミングを変えることで、金型に喰い付くことなく製品が取り出せることが可能となった。

第4章では、今回の異形絞りの場合は2山絞るので間の平坦部位の板減が予想され、対応策として絞り（1）で2山分大きく1山で絞り、絞り（2）で中央部を下げることで2山とする成形法を用いることにより、従来困難であった板減の最小化が出来ることが実証された。この工法を活用することにより異形絞り、複雑形状のアルミ材により成形加工が可能となり、軽量化、最少化、高耐圧化に貢献できることが確認できた。

5章では、サーボプレスでの寸動モーションと潤滑がドロウ成形によって製造されたハット型部品の形状凍結性に及ぼす影響について検討した。形状凍結性については、たて壁部の反りとウェブ側面の曲げ部のスプリングバックに分解して検討した。また、成形工程における材料の変形を詳細に観察することで、各条件における形状凍結性の相違を成形メカニズムの解明から考察した。得られた結果を以下に示す。

- 1) 寸動モーションは形状凍結性における反りの抑制には効果的であり、寸動1回における下降量の影響はない。また、スプリングバックに対しては寸動モーションの効果は無い。潤滑は形状凍結性における反りの抑制には効果的であるが、スプリングバックに対しては形状凍結性を悪化させる。
- 2) ハット型部品のドロウ成形における形状凍結性はたて壁部の曲げ戻しによる反りとウェブ面左右の曲げにおけるスプリングバックの2つの要素に影響を受けている。
- 3) 寸動モーションでは、金型と被加工材間の摺動距離が小さくなることで、摩擦が抑制され、曲げや曲げ戻し時の負荷が減少する。潤滑油を使用した場合は、被加工材と金型の上に油膜が存在するために摩擦が低減する。したがって、寸動モーションと潤滑によってたて壁部の反りが抑制される。
- 4) 引張力を付加しながら曲げ加工を行った場合、スプリングバックは減少する。潤滑によってスプリングバックが増加する原因は摩擦に起因するダイ肩 R 部の引張力が低下して、パンチ肩 R 部の曲げにおける引張荷重の効果が低減したためである。
- 5) X 線回折実験から、たて壁のどの場所においても寸動モーションと潤滑によって半価幅が低くなっており、加工時に受けるひずみが小さい。すなわち、ダイ肩 R

部を材料が通過するときに働く摩擦力が寸動モーションと潤滑によって低減されている。潤滑した場合は無潤滑の場合に比べて曲げ部の半価幅が減っているおり、曲げ部のひずみが小さい。すなわち、潤滑した場合は摩擦に起因するダイ肩 R 部の引張力が低下して、パンチ肩 R 部の曲げ部において十分な引張ひずみを与えることができずスプリングバックが増加する。

以上のように本研究で得られた研究結果は、今後、難加工材のプレス加工における成形性向上技術として活用されていくものとする。

【参考文献】

- (1) 藤田誠人：野村総合研究所 知的資産創造 2017/4月号
- (2) 杉山隆司：塑性と加工, Vol.46, No.534, pp.552-551, 2005
- (3) 齋藤和也：まてりあ, Vol.53, No.12, pp, 584-588, 2014
- (4) 小田幸治：溶接学会誌, Vol.68, No.4, pp66-69, 1999
- (5) 中哲夫：塑性と加工, Vol.52, No.606, pp.782-786, 2011
- (6) 田中幸一ほか1名：軽金属, Vo.25, No.11, pp.426-438, 1975
- (7) 福井泰好ほか1名：日本機械学会論文集(A編), Vol.54, No.498, pp372-378, 1988
- (8) 小林政教ほか1名：日本機械学会論文集(C編)：Vol.55, No.516, pp2221-2227, 1989
- (9) 森下勇樹ほか3名：塑性と加工, Vol.50, No.586, pp52-56, 2009
- (10) 高野拓樹ほか1名：軽金属, Vol.58, No.10, pp509-515, 2008
- (11) 畑中伸夫ほか2名：軽金属：Vol.58, No.2, pp47-53, 2008
- (12) 畑中伸夫ほか2名：軽金属：Vol.59, No.4, pp185-189, 2009
- (13) 大年和徳ほか2名：軽金属：Vol.53, No.6, pp239-244, 2003
- (14) 今津勝宏：日本機械学会論文集(C編), Vol.63, No.610, pp312-317, 1997
- (15) 藤倉潮三：軽金属, Vol.30, No.11, pp664-675, 1980
- (16) 鋸屋正喜ほか2名：鉄と鋼, Vo.72, No.6, pp649-656, 1986
- (17) 西村尚ほか3名：軽金属, Vol.53, No.7, pp302-308, 2003
- (18) 時田裕一ほか3名：塑性と加工, Vo.57, No.660, pp47-52, 2016
- (19) 伊藤泰弘ほか4名：塑性と加工, Vol.57, No.660, pp53-59, 2016
- (20) 畑中伸夫ほか4名：軽金属, Vol.58, No.2, pp65-70, 2008
- (21) 今津勝宏：日本機械学会論文集(C編), Vol.63, No.615, pp341-346, 1997
- (22) 西田進一ほか5名：軽金属, Vol.65, No.11, pp573-577, 2015
- (23) 星野克弥ほか5名：自動車技術会論文集, Vol.45, No.4, pp751-756, 2014
- (24) Sergey A.Aksenov, Donato Sorgente：Procedia Engineering, No.207, pp1892-1897, 2007

- (25) 木村茂樹：塑性と加工, Vol.47, No.540, pp.24-28, 2006
- (26) 塩飽義之：日本機械学会誌, Vol.62, No.489, pp. 1538-1546, 1959
- (27) 木原諄二：日本機械学会誌, Vol.13, No.8 号 pp. 605-612, 1974
- (28) 尾形浩行：まてりあ, Vol.33, No.9, pp. 1126-1133, 1994
- (29) 玉井良清：塑性と加工, Vol.55, No.636, pp.34-38, 2014
- (30) 岩田隆道：塑性と加工, Vol.56, No.658, pp.993-998, 2015
- (31) 四宮徳章：塑性と加工, Vol.54, No.629, pp.542-546, 2013
- (32) 玉井良清：塑性と加工, Vol.50, No.587, pp.1081-1085, 2009
- (33) 関口常久：軽金属, Vol.44, No.12, pp.741-758, 1994
- (34) 櫻井久之：塑性と加工, Vol.49, No.568, pp.378-383, 2008
- (35) 井村隆昭：塑性と加工, Vol.5, No.49, pp.17-21, 2022
- (36) 村井映介ほか1名：塑性と加工, Vol.5, No.49, pp.27-31, 2022
- (37) 石川幸司：塑性と加工, Vol.3, No.28, pp.194-198, 2020
- (38) 田尻彰：軽金属, Vol.45, No.4, pp.226-245, 1995

謝 辭

謝辞

本研究をまとめるに当たり終始親切丁寧なご指導を賜りました茨城大学大学院理工学研究科量子線科学専攻大学院准教授西野創一郎先生には多大なる助言ならびにご指導を受け賜りましたこと厚く御礼申し上げます。

本研究を遂行する上で、本研究グループの佐々木駿真氏、磯本桜花氏には研究のとりまとめや文献調査などを共同で進めることが出来ました。

本研究にあたり様々な人のご協力を頂きました，ご協力いただいた方に感謝致します。最後に、支えてくれた妻に感謝します。

令和5年3月

磯前 保広