

# Back-pressure Forging Using a Servo Press

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2297/42271">http://hdl.handle.net/2297/42271</a>

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



サーボプレスを活用した背圧鍛造に関する研究

Back-pressure Forging Using a Servo Press

金沢大学自然科学研究科

システム創成科学専攻

学籍番号                    1123122203

氏名                         河本 基一郎

## Abstract

Application of a servo press with a servo die cushion to the back-pressure forging process improves the shape accuracy of forged parts. Servo presses have one typical feature of the slide flexible motion, and servo die cushions have excellent performance in precise motion control and high responsiveness to set loads. Using the servo die cushion to obtain these features, back pressure is applied to the bottom outer punch during forward extrusion-type forging. Without back pressure, material flow delay around the central counter punch corner results in an unfilled corner at the bottom outer punch. Applying back pressure to the outer punch reduces the area of the unfilled corner. However, extensive back pressure at the beginning of the forming process causes burrs on the bottom part because of the clearance between the counter punch and the outer punch; variable back-pressure settings along the punch stroke effectively remove burrs while also providing a smaller unfilled area by allowing for low back pressure at the beginning of the forming process and high back pressure during the forming process. Furthermore, optimization approach of the back-pressure load setting of the servo die cushion enables both the unfilled area and forming energy to be effectively reduced. Finally, using the servo press's slide flexible motion to vary the punch motion leads to even more reduction in the unfilled area.

## 1. 序論

近年の自動車技術開発におけるキー技術として、燃費改善のための車体軽量化技術が上げられるが、軽量化には材料転換に加えてそれに伴う工法転換や構造転換が必要であり単一技術では対応できない状態となっている。またハイブリッド車や電気自動車等電動モータを駆動源とする自動車の出現により、従来の内燃機関車では存在しなかった新たな部品が必要であり、それらをいかに安く、軽く、大量に生産できるかが生産技術的な課題となっている。自動車部品はボディやシャーシだけではなく、駆動系部品を含めた機能部品の多くがプレス成形品であり、軽量化技術に対応したプレス成形技術の開発は裾野の広い研究課題といえる。

プレス機械については、近年はサーボプレスの台頭が著しく、サーボプレスによる軽量化技術への貢献は社会的発展の意味において大きな意義がある。プレス成形の中でも鍛造成形に着目すると、鍛造によるネットシェイプ加工を実現するといった形で鍛造成形による軽量化技術への貢献に期待が寄せられている。

本研究は、サーボプレスの特徴であるサーボダイクッションの可変背圧荷重制御とスライドフリーモーションを組み合わせることにより、鍛造成形品の寸法精度向上と成形エネルギーの低減を目的とした研究である。サーボダイクッションによる背圧荷重付加が成形品寸法精度や成形荷重に与える影響を実験で検証し、サーボダイクッションの最適荷重設定には有限要素シミュレーションと最適化手法を用い、その効果について実験で確認した。また、スライドフリーモーションの効果についても、成形品寸法精度と成形エネルギーに与える影響を実験で検証し、サーボプレスを鍛造成形に適用する場合のプレス荷重制御機能、サーボダイクッションによる位置・荷重制御機能の重要性を提示する。

## 2. 背圧鍛造基礎実験

### 2-1 実験概要

背圧荷重付加が成形品寸法精度と成形荷重に与える影響を検証するために、図 1 に示すような前方押しモデルにてアウターパンチに背圧荷重を付加する基礎実験を行った。供試材には、図 2 に示すようにボンデ処理（リン酸亜鉛皮膜に金属石鹸を反応させた皮膜処理）した Al-Mg 系アルミニウム合金 A5052 材、直径 49 mm、高さ 12.8 mm の円板を使用した。このような前方押しモデルでは、カウンターパンチ先端 R 部での摩擦により材料流動が遅れ、底部の金型隅部に成形品の未充填領域が形成されることが予想されるため、アウターパンチに背圧荷重を付加する金型構造とした。背圧荷重付加水準に関する実験条件を表 1 に示すが、No.1 は背圧荷重を付加せず成形品底部をフリーにした自由鍛造、No.2 は一定背圧荷重を付加した条件、No.3 はパンチストロークに沿って背圧荷重を 3 分割して設定した条件、No.4 は金型を成形品形状に固定した密閉鍛造をそれぞれ表す。No.2 および No.3 における設定背圧荷重とパンチストロークの関係を図 3 に示す。

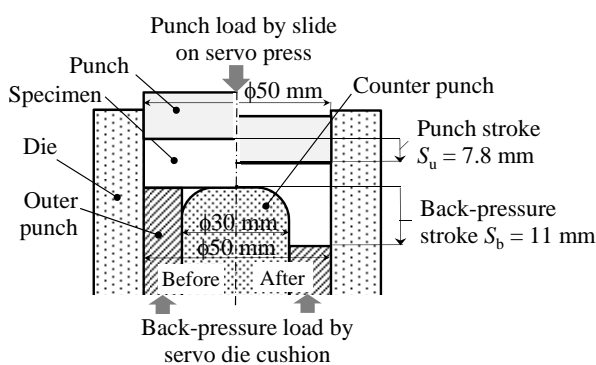


図 1 背圧鍛造前方押しモデル

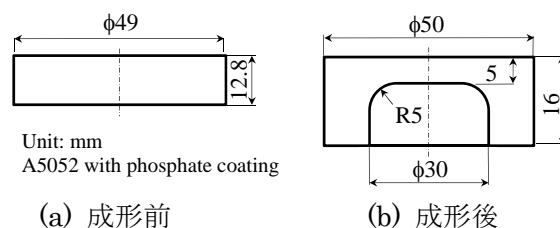


図 2 対象部品

表 1 背圧荷重実験条件

No.	Punch stroke $S_u$ (mm)	0	2.0	3.9	5.9	7.8	Remark
1		0	0	0	0	0	Free forging
2	-1	70	70	70	70	70	Constant back-pressure load
	-2	90	90	90	90	90	
	-3	120	120	120	120	120	
3	-1	70	70	70→200	200→70	70	3-step back-pressure load
	-2	70	70	70→300	300→70	70	
	-3	70	70	70→400	400→70	70	
4		-	-	-	-	-	Closed forging

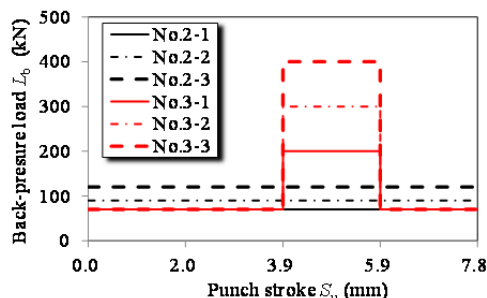


図 3 背圧荷重パターン

表 1 に示す条件にて、400 kN サーボダイクッション付の冷間鍛造用 6300 kN サーボプレスで成形実験を行った。プレス機およびダイクッションに設置された荷重計にて成形荷重と背圧荷重を 1/1000 s のサンプリング周期でそれぞれ測定した。成形品の寸法は、実験

後に 3 次元測定器で外形プロファイルを測定した。

## 2-2 実験結果と考察

実験結果として図 4 に荷重-ストローク線図の代表事例を示す。(d) 密閉鍛造(No.4)を除き、いずれの条件においても、最大成形荷重は成形終了時であるパンチストローク 7.8 mm 付近で発生していることがわかる。背圧荷重を付加した条件では、背圧荷重付加と同時に成形荷重は増加している。図中、太鎖線の[Set back-pressure load]は背圧荷重の設定値であり、細鎖線[Actual back-pressure load]は背圧荷重の実測値を表す。(d) 密閉鍛造(No.4)では、金型の強度上、最大成形荷重を 1200 kN に抑えるためにパンチストロークを 7.3 mm に減じている。従って、成形品の底厚は規定寸法には達しておらず、密閉鍛造で規定の寸法形状を得ようとすれば、最大成形荷重は更に増大するものと予想される。よって、同一寸法形状品を得ようとすれば、密閉鍛造に対しては、背圧荷重を付加することにより成形荷重を低減できるということがいえる。

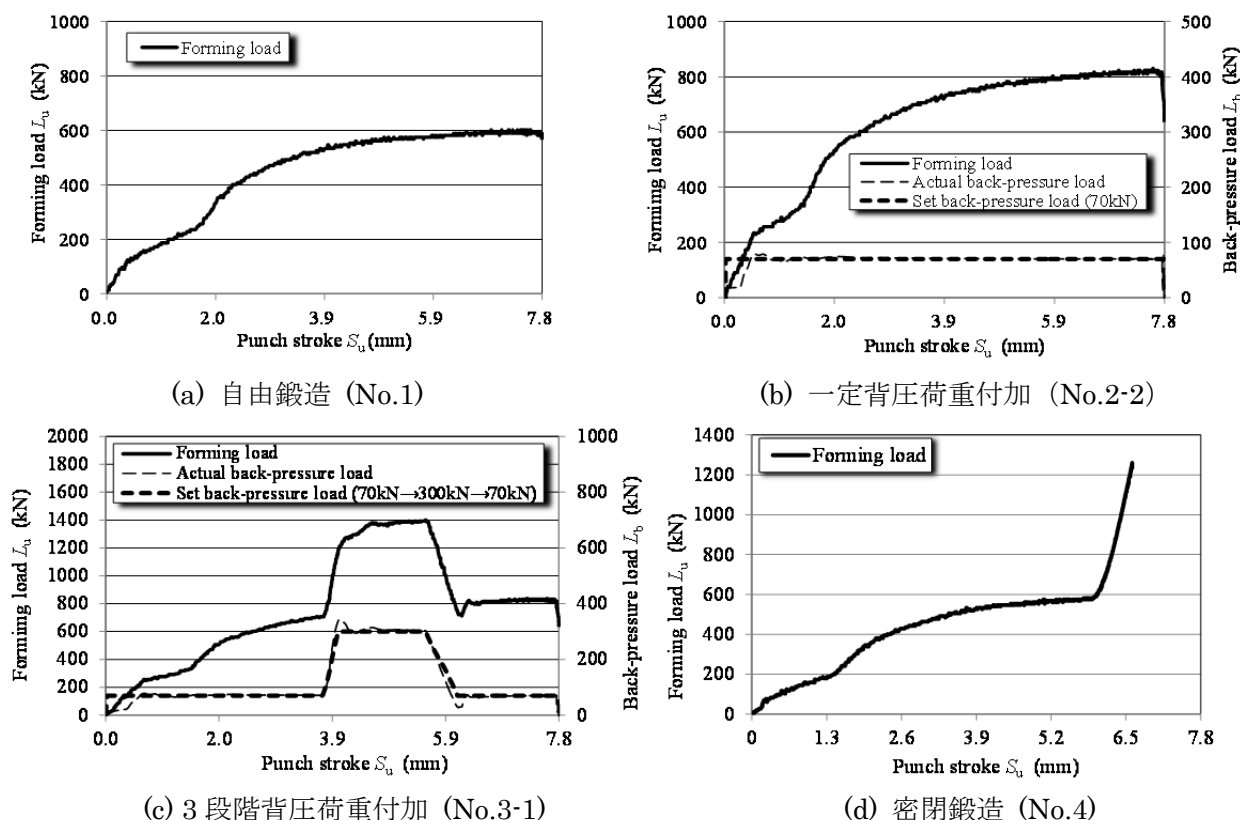


図 4 荷重-ストローク線図

背圧荷重波形に着目すると、一定背圧荷重を付加した No.2 の条件はもちろんであるが、パンチストロークに応じて背圧荷重を変化させた No.3 の条件においても、設定値に対する追従性は実用上問題の無いレベルであると判断でき、サーボダイクッションを背圧鍛造における背圧荷重付加装置として十分活用できるといえる。

成形品の寸法精度を評価するため、底部に形成される未充填部についてその面積を未充填面積  $A_u$  として数値評価した。図 5 に未充填面積の計算方法について示す。3次元測定で得られた外形データにより式(1)にて  $A_u$  を算出した。

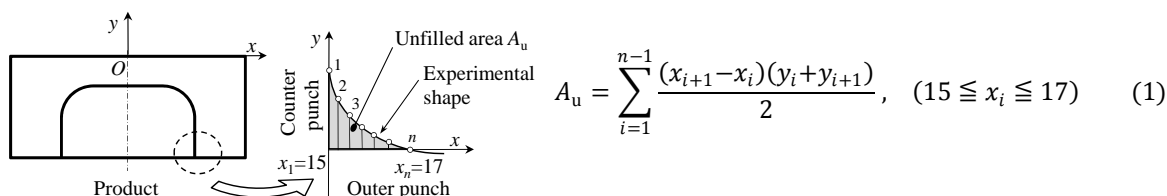


図 5 未充填面積

式(1)で算出した未充填面積と付加した最大背圧荷重との関係を図 6 に示す、図から明らかかなように、背圧荷重が増すほど未充填面積は減少しており、アウターパンチに背圧荷重を付加したことにより、未充填部への材料流動が促進されたものと思われる。成形当初から高い背圧荷重を付加すると、カウンターパンチ先端 R 部とアウターパンチのすきまに材料が流動しバリとなるため、背圧荷重を 3 分割した No.3 の条件は、成形初期は低い背圧荷重を付加し、材料がカウンターパンチ先端 R 部を超える時点、つまりパンチストロークが 3.9 mm に達した時点で背圧荷重を高めることにより、未充填部への材料流動を促進させ、更に成形後半では、再び低い背圧荷重に設定し、最大成形荷重を抑制するという意図で設定した。

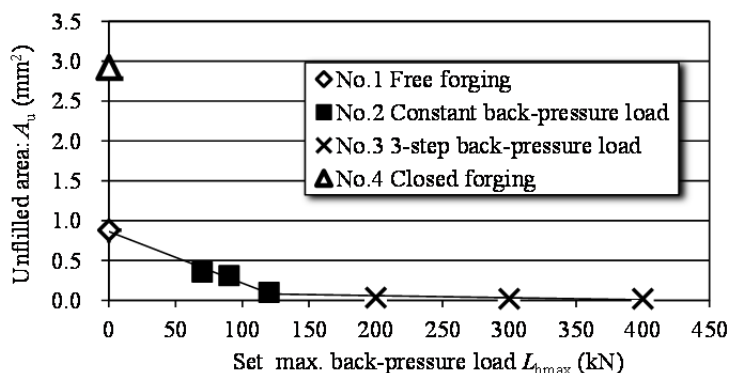


図 6 未充填面積と設定最大背圧荷重の関係

No.3 の条件に着目すると、中段の背圧荷重を更に増加させても未充填面積の大幅な改善には至っていない。一方では図 4(b)あるいは図 4(c)に示すように背圧荷重付加により最大成形荷重は増加しており、成形エネルギーという視点ではむやみに背圧荷重を増加させることも課題が残る。上記で設定した背圧荷重水準は試

行錯誤的に設定した水準であり、最終的に必要とする水準を実機による成形実験で見出すには時間と労力を要するため、シミュレーションによる事前検討が必須である。そのシミュレーションにしても、設定すべき背圧荷重には何らかの指針が必要であり、背圧荷重設定の設計指針となるべく、最適化の考え方について次章で述べることとする。

### 3. 背圧鍛造の最適化

#### 3-1 シミュレーションモデルの構築

本研究で扱った前方押しシミュレーションモデルの構築について記載する。シミュレーションには DEFORM-2D を使用し、対象部品は軸対称形状のため図 7(a)に示すハーフモデルでシミュレーションを行った。図 7(b)および図 7(c)にメッシュ構造を示すが、シミュレーション精度を向上させるため、オートメッシュ機能は使用せずマニュアルメッシュによりすべて長方形要素とし、ひずみ量が大きくなる材料下面のアウトーパーンチが接する部分は極力小さくした。最終的に要素数 5000、接点数 5151 点のシミュレーションモデルとなった。

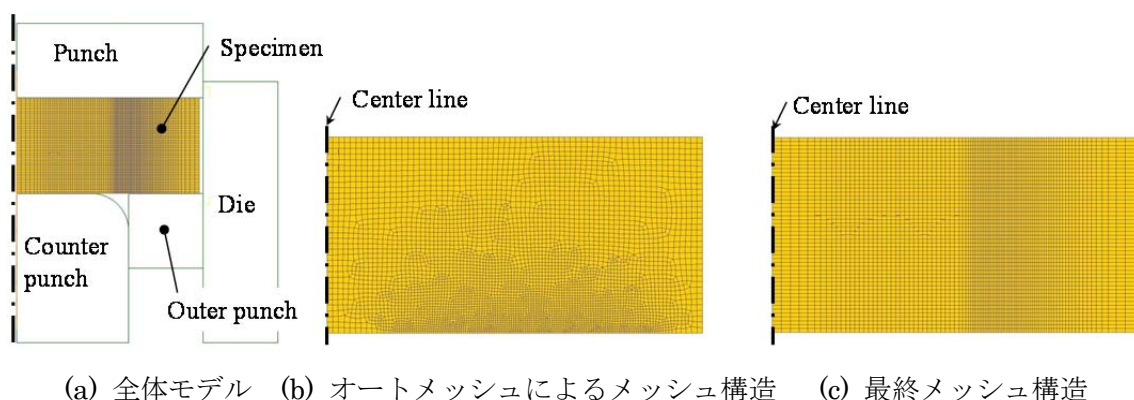


図 7 シミュレーションモデル

変形抵抗曲線については、試料と同一材料 A5052 材で単純圧縮試験を行い、 $n$  乗硬化則によるものとして、式(2)の近似式を得た。本研究におけるシミュレーションでは一貫して式(2)による変形抵抗曲線を使用した。

$$\sigma = 298\varepsilon^{0.245} \quad (2)$$

ここで、 $\sigma$ は真応力、 $\varepsilon$ は真ひずみを表す。

### 3-2 最適化アプローチ

本研究では Radial Basis Function (RBF) ネットワークによる多目的逐次近似最適化手法を用いて最適化を行った。背圧鍛造モデルでは、背圧荷重設定値を設計変数とし、未充填面積と成形エネルギーを支配する背圧エネルギーを評価関数として最適化を実施した。背圧荷重設定値については、図 8 に示すようにパンチトロック全域  $l_{\max}$  を  $n$  等分し、各ストロークにおける背圧荷重  $x_i$  を設計変数とした。評価関数としての未充填面積  $f_1(x)$  および背圧エネルギー  $f_2(x)$  は式(3)、式(4)にてそれぞれ算出した。未充填面積  $f_1(x)$  は図 9 で示すように、成形品とカウンターパンチが接している接点番号を 1 とし、成形品とアウトーパーンチが接触する部分の接点番号を  $P$  とし、接点座標を  $(X_i, Y_i)$  ( $i = 1, 2, \dots, P$ ) として算出した。

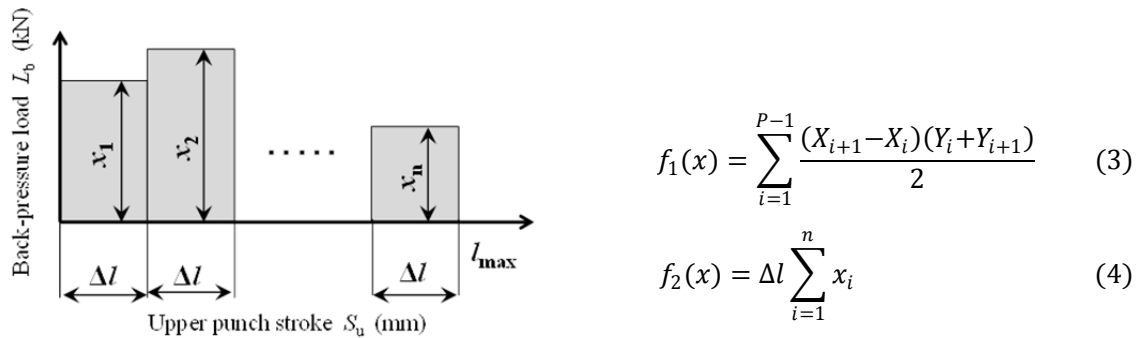


図 8 設計変数としての背圧荷重設定

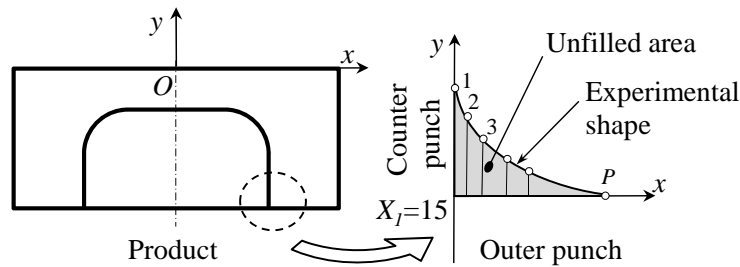


図 9 未充填面積

背圧エネルギーは、本来は背圧荷重と背圧ストロークの積の総和で表される。しかし、パンチストロークと背圧ストロークは厳密には異なり、実際のプレス機では、パンチストロークに応じて背圧荷重を設定するため、本研究では背圧エネルギーを背圧荷重とパンチストロークの積の総和として近似的に扱うこととする。

### 3-3 実験による検証結果

背圧荷重の 2 分割と 4 分割での設定に関して、実験結果の一例を図 10 および図 11 にそれぞれ示す。図中(a)は荷重-ストローク線図を表し、図中(b)の矢印は該当するパレートフロント曲線上でのプロットを表す。実験結果はシミュレーションと同等の波形を呈しており、特に背圧荷重については、その変化点にてシミュレーション、つまり実機における設定値に対して充分追従している。これは、サーボダイクッションの応答性の高さもさることながら、最適化シミュレーションにおいて、実機性能を加味した条件設定、つまり分割数や制約条件の設定が妥当であったものといえる。

未充填面積、背圧エネルギーおよび最大成形荷重についてシミュレーション結果と実験結果との相対誤差を表 2 に示す。相対誤差については、最大成形荷重では 6% に達するものの、未充填面積や背圧エネルギーは 5% 未満であり、実用上においても十分な精度を有しているといえる。



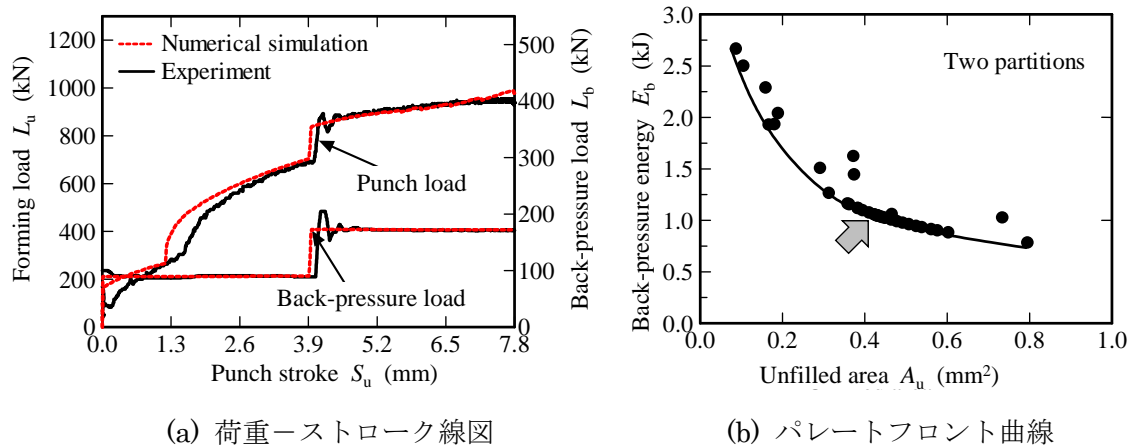


図 10 最適化シミュレーション結果と実験結果 (背圧荷重 2 分割)

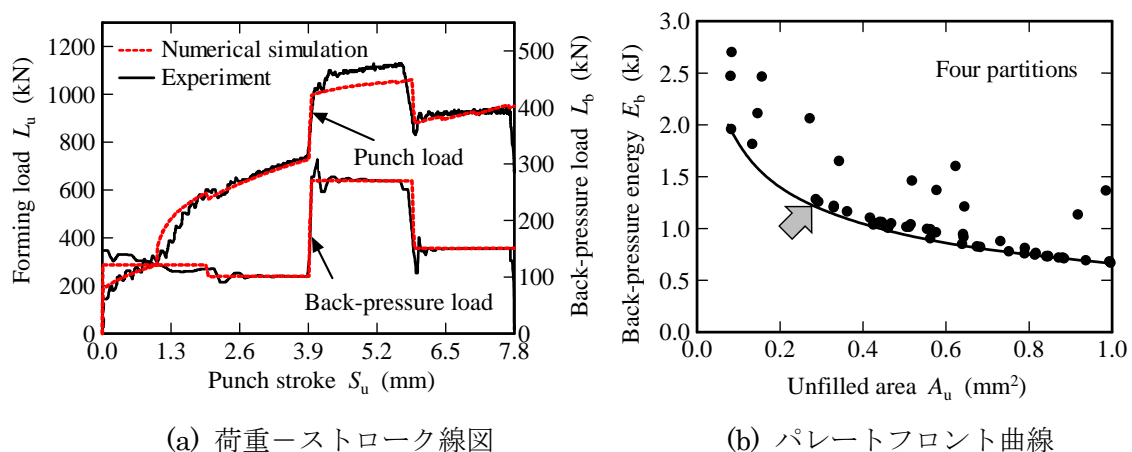


図 11 最適化シミュレーション結果と実験結果 (背圧荷重 4 分割)

表 2 シミュレーション結果と実験結果の相対誤差

		Unfilled area (mm <sup>2</sup> )	Back-pressure energy (J)	Max. forming load (kN)
Two partitions	Experimental result	0.472	1013	956
	Numerical simulation	0.450	1020	988
	Error (%)	4.66	0.691	3.35
Four partitions	Experimental result	0.305	1258	1129
	Numerical simulation	0.294	1254	1061
	Error (%)	3.61	0.318	6.02

#### 4. スライド連動モーシヨンの検証実験

##### 4-1 実験条件

サーボプレスにはサーボダイクッションによる可変背圧荷重制御だけではなく、スライドフリーモーシヨンという最大の特徴がある。未充填面積と最大成形荷重 (成形エネルギー) の更なる低減を目指し、スライドモーシヨンを背圧荷重付加タイミングと連動させて変更した実験を行った。背圧荷重付加条件としては、表 1 及び図 3 に示した No.3-2 として、ス

ライドモーションを2水準設定した。これらの実験条件を表3に示す。

表3 スライド連動モーション実験条件

Type	Slide motion	Back-pressure load condition
A	<p>2 s-stop at 3.8 mm-punch stroke → 0.5 mm-reverse → Reforward to BDC</p>	<p>Same as No.3-2 in Table 2.2</p>
B	<p>0.5 mm-reverse at 3.8 mm-punch stroke → 2 s-stop → Reforward to BDC</p>	

#### 4-2 実験結果

実験結果として、荷重-ストローク線図を図12(a)および図12(b)に示す。パンチストロークは、データサンプリング容量の制約上、7.8 mm 全域では採取できていないので、背圧荷重を 300 kN に上昇させ、パンチが停止あるいは逆転する領域から記載する。

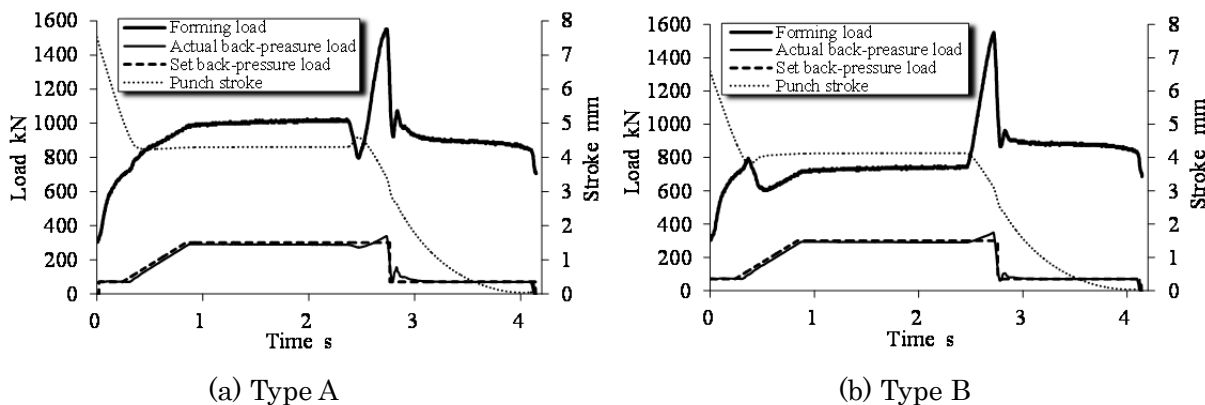


図12 スライド連動モーションによる荷重-ストローク線図

最大成形荷重については、いずれの条件でもパンチが再下降する際に 1500 kN と同等に発生しており、同一背圧荷重条件である No. 3-2 における 1400 kN よりも増加している。これは、今回の実験では設備仕様上、背圧荷重はパンチストロークに対する設定・制御となっており、背圧荷重が付加されたままパンチ下降が始まったため、その反力としてピークとなって発生したもので、未充填部の形成とは相関がないと思われる。よって、パンチ再下降と同時にあるいは再下降直前で背圧荷重も一旦除荷するなどの制御を行えば、未充

充填面積に影響を与えることなく、最大成形荷重も低減できると思われる。

パンチモーションが未充填面積と成形エネルギーに与える影響について検証するため、標準パンチモーションにおける同一背圧荷重条件（No.3-2）の結果と合わせて未充填面積とパンチストローク 3.9 mm～5.9 mm における平均成形荷重の関係を図 13 に示す。

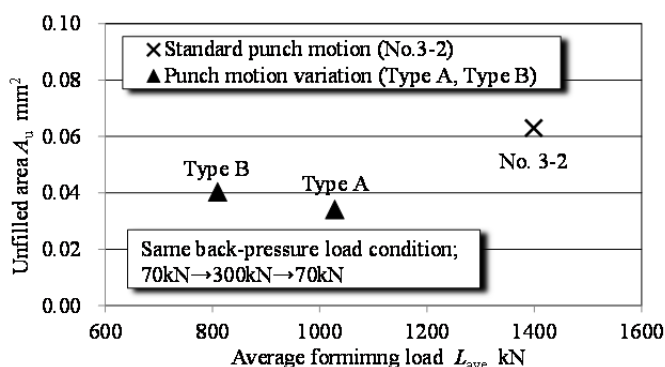


図 13 未充填面積と平均成形荷重の関係

Type A, Type B とともに、標準パンチモーションに対して、未充填面積を低減しつつ、平均成形荷重が大幅に低減している。背圧荷重はいずれも同一設定につき、平均荷重が低減しているということは成形エネルギーを低減できるということを意味しており、背圧荷重の適正な設定にパンチモーションを連動させることにより、未充填面積

と成形エネルギーを更に低減できるという可能性を示唆している。

## 5. 結言

本研究により以下の結論を得た。

- (1) 一定背圧荷重付加により成形品の底部に形成される未充填部位の低減を実験で検証し、そのメカニズムを解明できた。
- (2) 底部未充填面積および背圧エネルギーの両者を目的関数とした多目的逐次近似最適化による可変背圧荷重付加にて、バリを抑制しつつ背圧エネルギーと未充填面積を最小化できることをシミュレーションと実験で検証した。
- (3) 可変背圧荷重付加に加えて、パンチモーションも連動して可変とすることにより、成形エネルギーと未充填面積の減少を実験で検証した。
- (4) 上記により、冷間鍛造成形へのサーボプレスおよびサーボダイクッションの活用性を実証し、その指針を提示した。

プレス加工に代表される塑性加工技術は匠の技と言われるが、それだけ人に依存した部分が多く、数値化による技能伝承が難しい技術である。今後の研究課題としては、これらの技術をいかに社会実装し次代に継承して行くか、つまり、いかにして製品で実用化を図って行くかという点である。塑性加工技術に最適設計の視点を折り込むことにより、これまで匠の技としてブラックボックス的に最適とされていた解が、数学的に最適と位置付けできるようになる。プレス機械だけではなく産業機械全般において、機械そのものが知能化して行くスマートマシン化の流れの中で、プレス機械内部で最適化処理を行えるようにして行くことが、真に最適化を図るということであり、社会実装したといえる。

## 学位論文審査報告書（甲）

1. 学位論文題目（外国語の場合は和訳を付けること。）

サーボプレスを活用した背圧鍛造に関する研究

2. 論文提出者 (1) 所 属 システム創成科学専攻

(2) 氏 名 河本 基一郎

3. 審査結果の要旨（600～650 字）

当該学位論文に対し、平成 27 年 1 月 29 日に第 1 回論文審査委員会を開催し、提出された学位論文および関連資料について詳細に検討した。同日における口頭発表後、第 2 回論文審査委員会を開催し、慎重に審議した結果、以下の通り判定した。

本論文は、サーボプレスが持つサーボダイクッションの荷重制御機構とスライドフリーモーションを組み合わせて、背圧鍛造における寸法精度向上と成形エネルギー低減を図ったものである。背圧鍛造とは、スライド側とは反対側から加圧することで、成形品末端部への材料充填を促進して、寸法精度向上とプレス荷重低減を図る方法である。軸対象形状の基本成形品を対象とし、まず基礎実験として、背圧荷重が寸法精度や荷重低減に与える効果を確認している。次に有限要素法による解析と最適設計法を活用し、エッジ部における未充填率と背圧エネルギーを目的関数とし、背圧荷重のパターンを変えてシミュレーションを行い、最適な背圧荷重パターンを算出している。この最適背圧荷重パターンの妥当性を実験によって確認している。さらにスライドフリーモーションと背圧荷重とを連動させた荷重低減についても、実験を行って、有用性を見出している。

以上より本論文は、サーボプレスを用いた背圧鍛造に適用する有用性を明らかにし、サーボプレスの鍛造への適用を開拓しており、博士（工学）の学位に値すると判定した。

4. 審査結果 (1) 判 定 (いずれかに○印) 合 格 ・ 不合格

(2) 授与学位 博 士 (工学)