

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 29 日現在

機関番号：54601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560150

研究課題名(和文)自動車用部品の軽量化を実現するステンレス鋼異形鍛造の中空化技術の開発

研究課題名(英文) Development of forging method for hollow variant stainless steel structure as a technology to manufacture light-weight automotive parts

研究代表者

榎 真一 (ENOKI, Shinichi)

奈良工業高等専門学校・機械工学科・准教授

研究者番号：80550079

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：異形鍛造部品の中空化技術として、ステンレス鋼の円筒にアルミニウム合金の丸棒をはめ込んだ素材の鍛造成形技術の開発を行った。鍛造は一種類の金属を成形するのが一般的であるが、本技術では二種類の金属を同時に成形するところに特徴がある。本研究では、数値解析及び成形実験を行うことで、金属間の隙間及び摩擦係数の成形性への影響を明らかにし、数値解析手法における温度設定方法及び材料特性の設定方法が確立できた。また、特徴的な素材流れを把握することができた。

研究成果の概要(英文)：Method of forging stainless steel pipe with aluminum alloy round bar was developed for hollow variant structures. Forging is common to form one metal. The feature of this forging method is to form two metals at the same time. In this research, it was clarified that clearance and friction factor between two metals have influence on formability of the forging. Temperature and material properties at simulation for the forging were clarified. The feature of material flow of stainless steel at the forging was clarified by the simulation.

研究分野：設計工学，材料力学，生産加工学

キーワード：成形加工 鍛造 中空化 軽量化

1. 研究開始当初の背景

自動車や電力設備の軽量化による省エネルギー化が重要性を増している。鋳造品は中空化が容易であるが、材料強度の観点から軽量化には限界がある。鍛造品は比較的高い強度および高い靱性を有しているため軽量化が期待できるが、中空化が困難である。中空鍛造品としてパイプを鍛造素材としたものが開発されているものの軸対称形状に限定されており、異形鍛造品の中空化技術が望まれている。そこで、本研究では、ステンレス鋼を対象として、異形鍛造品を中空化する技術の確立を目指し、ステンレス鋼の円筒にアルミニウム合金の丸棒をはめ込んだ素材を加熱して型鍛造で異形断面へ横圧縮成形を行い、鍛造品の外形部分をステンレス鋼のみで成形させた後、ステンレス鋼よりも溶融点の低いアルミニウム合金を溶かし出すことで中空化する技術を提案した。

2. 研究の目的

鍛造は一種類の金属を成形するのが一般的であるが、本研究で提案する技術は、ステンレス鋼とアルミニウム合金の二種類の金属を同時に鍛造するところに特徴がある。そこで、本研究の目的は以下のとおりである。

- (1) 二種類の金属の鍛造素材の金属界面特性が成形性に及ぼす影響の解明
- (2) 二種類の金属の鍛造成形解析の解析条件の設定方法の確立
- (3) 二種類の金属の鍛造成形における素材流れの解明

3. 研究の方法

- (1) 図1に示すように、外径15mm、内径7mm、長さ30mmのステンレス鋼円筒に、直径7mm、長さ30mmのアルミニウム合金丸棒をはめ込んだ鍛造素材を対象として、平板圧縮を行ったとき、円筒と丸棒の隙間及び摩擦係数が成形荷重に与える影響を確認する。素材間の隙間を0、24μmの2ケース、摩擦係数を0、0.5、1の3ケースとし、それらを表1のように組み合わせで解析ソフト Simufact.forming (MSC Software 社)を用いて成形速度2mm/sで数値解析を行う。また、最大成形荷重に対してSN比を求めることで、隙間及び摩擦係数が最大成形荷重のばらつきへ及ぼす影響を検討する。SN比 η は、

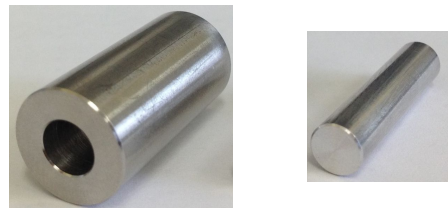
$$\eta = \log \left(\frac{\beta^2}{\sigma^2} \right)$$

で求める。ここで、 σ は最大成形荷重の標準偏差、 β は最大成形荷重とそれらの平均値との差の二乗和である。

- (2) (1)と同様の鍛造素材を対象として、電気炉(城田電気炉材)を用いて加熱した後、サーモグラフィ(NEC Avio 赤外線テクノロジー)による温度測定をおこなうことで、数値解析における温度設定方法を検

討する。さらに、図2に示すように、この鍛造素材を、幅17mm、長さ32mm、長さ22.16mmの外形を持つ矩形断面中空形状に型鍛造成形するときを考慮して、数値解析とサーボプレス機(コマツ産機)による成形実験と比較することで、材料特性の設定方法を確立する。材料特性は、サーボプレス機(コマツ産機)による円柱軸方向圧縮簡易試験を行う。

- (3) 外径15mm、内径7mm及び10mm、長さ30mmのステンレス鋼円筒に、直径7mm及び10mmのアルミニウム合金丸棒をはめ込んだ鍛造素材を図2に示すように矩形断面中空形状に型鍛造成形するときを考慮して、数値解析を行なうことでステンレス鋼の素材流れを把握する。



(a)ステンレス鋼円筒 (b)アルミニウム合金丸棒

図1 鍛造素材

表1 隙間及び摩擦係数の組合せ

	隙間 [μm]	クーロン 摩擦係数	せん断 摩擦係数
条件1	0	0	1
条件2	24	0.5	1
条件3	24	0	0
条件4	0	0.5	0

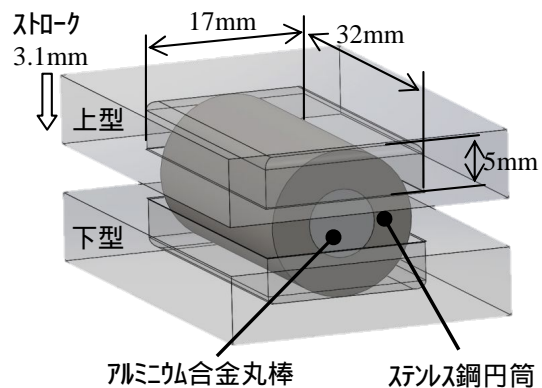


図2 矩形断面中空形状への型鍛造成形

4. 研究成果

- (1) 隙間と摩擦係数の組合せ4ケースの成形荷重 ストローク線図を図3に示す。また、隙間及び摩擦係数とSN比との関係を図4に示す。

図3より、隙間が同じであれば最大成形荷重が同じであり、隙間が大きいと最大成形荷重は大きいことがわかる。また、図4より、隙間は最大成形荷重のばらつきには寄与せず、摩擦係数が最大成形荷

重のばらつきに寄与することがわかる．以上より，最大成形荷重は金属界面の隙間によって決まり，隙間が大きい方が最大成形荷重は大きくなる．また，そのばらつきは摩擦係数に依存していると考えられる．

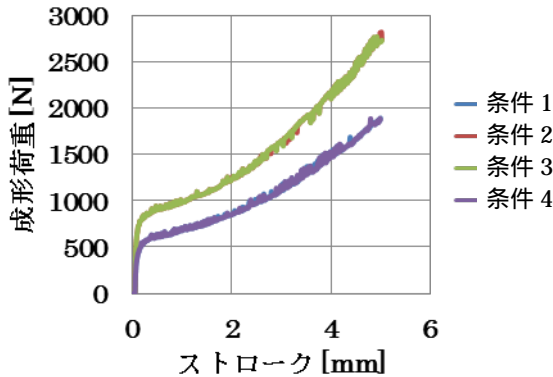


図 3 アルミニウム合金丸棒をステンレス鋼円筒にはめ込んだ鍛造素材を平板圧縮した場合の成形荷重-ストローク線図の隙間と摩擦係数の組合せの違い

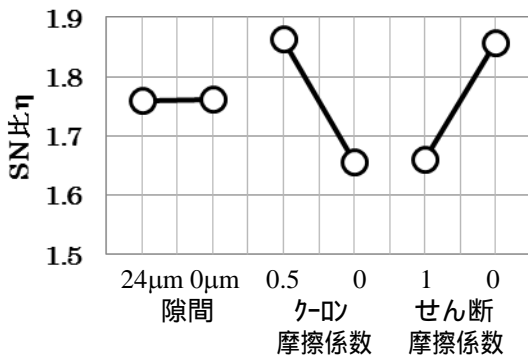


図 4 アルミニウム合金丸棒をステンレス鋼円筒にはめ込んだ鍛造素材を平板圧縮した場合の最大成形荷重の SN 比と隙間及び摩擦係数との関係

(2) 常温でアルミニウム合金丸棒をステンレス鋼円筒にはめ込んで加熱するとアルミニウム合金丸棒が溶融する可能性があるほど高温になった．そこで，ステンレス鋼円筒を加熱した後，常温のアルミニウム合金丸棒をはめ込むことで鍛造素材とした．その温度差は 200 であることがわかった．本研究での数値解析での温度設定はこの温度差を初期条件として与えることとした．

次に，円柱軸方向圧縮簡易試験を行った結果を図 5 及び図 6 に示す．この材料特性を数値解析で設定した．

これらの設定を用いて行った数値解析の結果と同じ条件で行った成形実験の結果を加工荷重-ストローク線図で比較したものを図 7 に示す．加熱温度の汎用性を広げるために，常温における数値解析及び成形実験についても比較した．

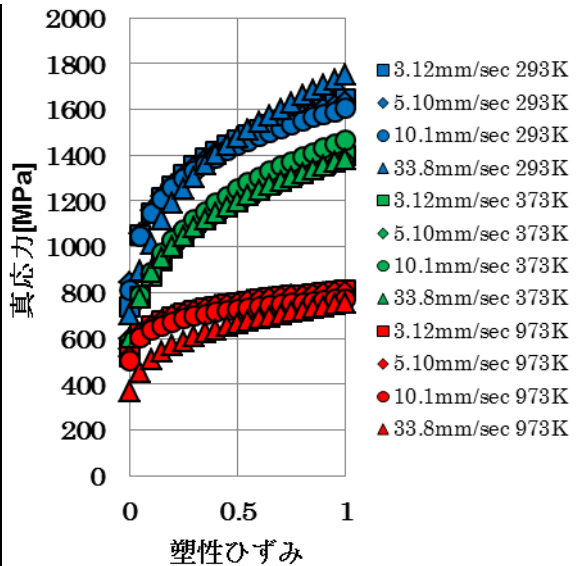


図 5 歪速度及び温度を考慮して行った円柱軸方向簡易圧縮試験による真応力-塑性ひずみ線図 (ステンレス鋼 SUS304)

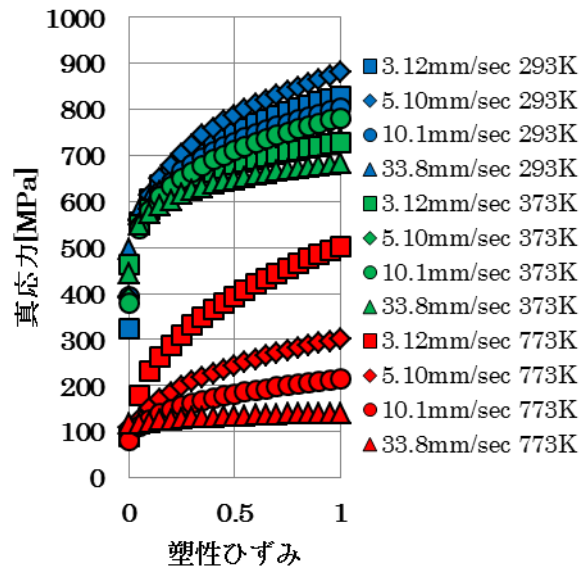


図 6 歪速度及び温度を考慮して行った円柱軸方向簡易圧縮試験による真応力-塑性ひずみ線図 (アルミニウム合金 A2017)

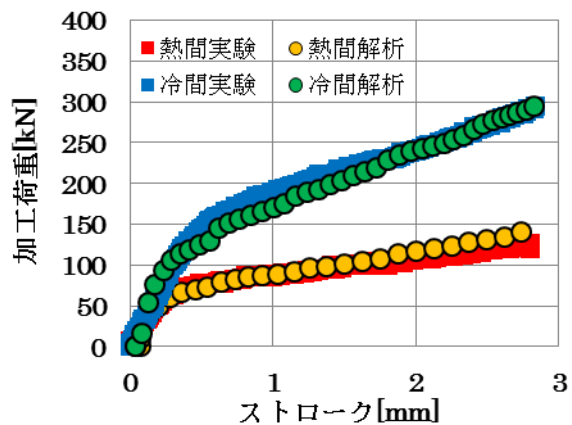


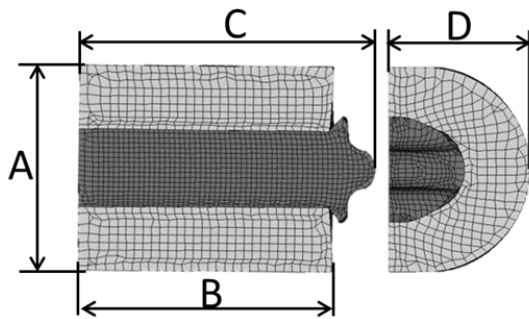
図 7 加工荷重-ストローク線図における数値解析と成形実験との比較

温度差 200 を設定した熱間鍛造において、数値解析の成形後鍛造素材の断面形状、成形実験後の鍛造素材の断面形状及び寸法を比較したものを図 8 に示す。また、常温で行った冷間鍛造において数値解析の成形後鍛造素材の断面形状と成形実験後の鍛造素材の断面形状及び寸法を比較したものを図 9 に示す。

図 7 において、加工荷重-ストローク線図は、温度差 200 を設定した熱間鍛造においても常温で行った冷間鍛造においても数値解析と成形実験は一致していることがわかる。さらに、図 8 及び図 9 において、成形後の素材形状及び寸法も数値解析と成形実験で一致していることがわかる。

以上のことから、数値解析手法が妥当であると考ええる。

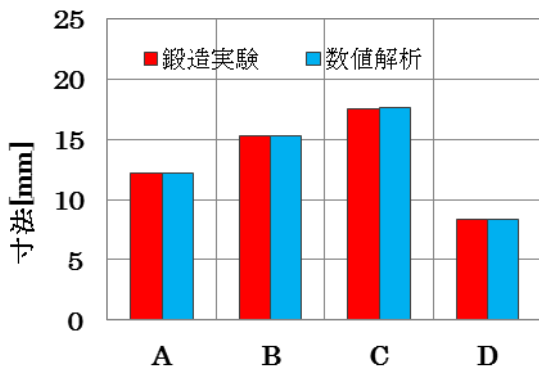
(3) 外径 15mm、内径 7mm 及び 10mm、長さ



(a) 数値解析における成形後の素材形状



(b) 成形実験後の素材形状

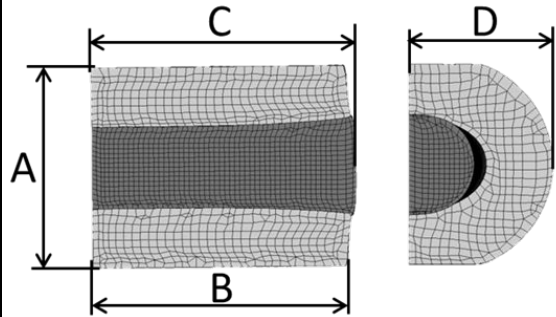


(c) 寸法値の比較

図 8 温度差 200 を設定した熱間鍛造における数値解析と成形実験の成形後の素材形状及び寸法の比較

30mm のステンレス鋼円筒に、直径 7mm 及び 10mm のアルミニウム合金丸棒をはめ込んだ鍛造素材を矩形断面中空形状に型鍛造成形の数値解析で得られたミーゼス相当応力分布を図 10 に示す。素材流れを考察するために、アルミニウム合金丸棒をはめ込まないステンレス鋼円筒のみの鍛造素材を同様に成形する場合の数値解析も行った。そのミーゼス相当応力分布を図 11 に示す。中央部の円周方向の応力分布(A, B 及び C 点)を図 12 に示す。

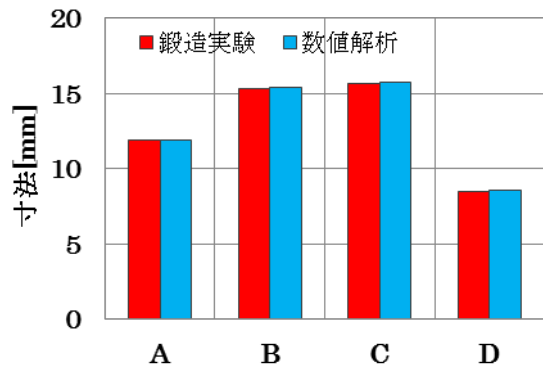
図 10 と図 11 と比べて端部の形状に特徴がある。本研究で提案する鍛造素材は端部の中空部は広がる形状になることがわかった。この点が型設計で重要となると考える。また、図 12 からアルミニウム合金丸棒を含む場合のミーゼス相当応力は円周方向にわたって均一であり、中空異型鍛造に適していると考えられる。



(a) 数値解析における成形後の素材形状



(b) 成形実験後の素材形状



(c) 寸法値の比較

図 9 常温の冷間鍛造における数値解析と成形実験の成形後の素材形状及び寸法の比較

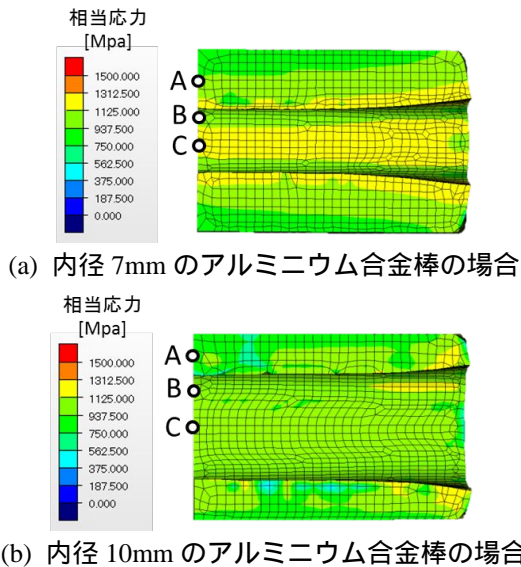


図 10 アルミニウム合金棒を含む鍛造素材を成形した場合を数値解析した成形後のミーゼス応力分布

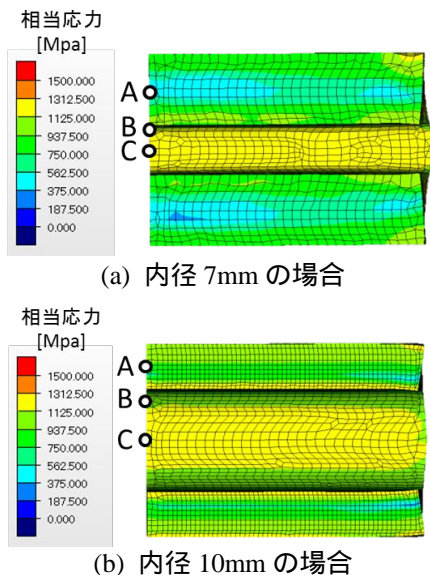


図 11 アルミニウム合金棒を含まないステンレス鋼円筒のみを成形した場合を数値解析した成形後のミーゼス応力分布

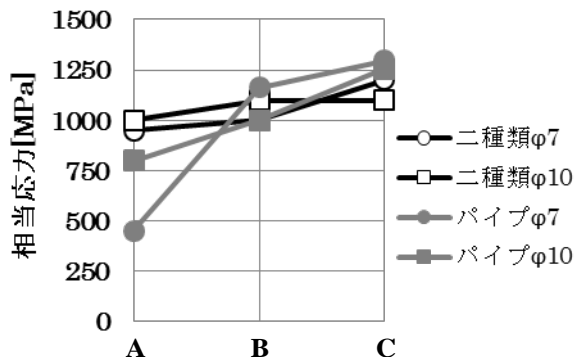


図 12 アルミニウム合金棒を含む鍛造素材とステンレス鋼円筒のみを鍛造素材とする場合の中央部の円周方向の応力値の比較

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

Takashi Ueda, Shinichi Enoki, Heat Forging Analysis Method on Blank Consist of Two Metals, International Journal of Chemical, Nuclear, Metallurgical and Materials Engineering, World Academy of Science, Engineering and Technology, 査読有, Vol:8, No:12, 2014, 1311-1314
<http://waset.org/Publication/heat-forging-analysis-method-on-blank-consisting-of-two-metals/10000059>

[学会発表](計6件)

Takashi Ueda, Shinichi Enoki, Takashi Iizuka, Effect of blank dimension on formability of forging blank consisting of two metals, COMPLAS XIII : XIII International Conference on Computational Plasticity, Fundamentals and Applications, 2015.9.1-2015.9.3, Barcelona (Spain)

上田大, 榎真一, 飯塚高志, 二種類の金属で構成される素材の鍛造解析手法における材料特性の設定方法, 日本塑性加工学会平成27年度塑性加工春季講演会, 2015.5.29-2015.5.31, 慶応義塾大学(神奈川県)

Takashi Ueda, Shinichi Enoki, Heat Forging Analysis Method on Blank Consist of Two Metals, ICME2014 : International Conference on Mechanical Engineering, World Academy of Science, Engineering and Technology, 2014.12.18-2014.12.19, Bangkok(Thailand)

上田大, 榎真一, 二種類の金属で構成される素材の加工荷重におけるひずみ速度の影響, 日本塑性加工学会第65回塑性加工連合講演会, 2014.10.11-2014.10.13, 岡山大学(岡山県)

上田大, 榎真一, 二種類の金属で構成された素材の加熱鍛造における変形特性, 日本塑性加工学会第64回塑性加工連合講演会, 2013.11.1-2013.11.3, 大阪大学(大阪府)

上田大, 榎真一, 二種類の金属で構成される素材の加熱鍛造における金属界面摩擦の影響, 日本機械学会 関西学生会学生員卒業研究発表講演会, 2013.3.15, 大阪工業大学(大阪府)

6. 研究組織

(1)研究代表者

榎 真一 (ENOKI, Shinichi)

奈良工業高等専門学校・機械工学科・准教授

研究者番号：80550079