平成28年度

戦略的基盤技術高度化·連携支援事業

戦略的基盤技術高度化支援事業

「専用パンチを用いない薄肉大型アルミダイカスト部品の

塑性流動結合技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成29年 5月

担当局 関東経済産業局

補助事業者 国立大学法人宇都宫大学

1-1.研究開発の背景・研究目的および目標

1-1-1.研究開発の背景

(1) 課題・ニーズ・背景

自動車、鉄道車両、船舶などの輸送機械については、安全性能向上・快適性向上・省エネルギー・耐環境性・ 地球環境対策が求められている。特に自動車分野については、車体の軽量化のため、部材毎に使用環境に適 合した素材の選択が始まっており、車体外装部品においては、高張力鋼板、テーラードブランク、アルミニ ウム板の活用が進んでおり、さらに将来的には、CFRPの活用も実用化されつつあるため、川下企業の軽量 化ニーズに対応していると言える。

一方、動力伝達系においては、動力部を支持するハウジングへのアルミニウムダイカストの活用が進められ ているが、アルミニウムダイカスト部品単体では動力軸の回転や往復運動に対する耐久性が不足することか ら、アルミニウムダイカスト部品と鋼製部品の結合構造が必須となり、川下企業からその接合構造の軽量化 へ強いニーズが寄せられている。このニーズに応えることで、国内外で年間8,000万台以上生産される自動 車の更なる軽量化ならびに低燃費化が実現できると考える。

そして、近年のグローバル競争下で我が国の自動車産業が生き残るために、より低コストで高品質を実現す るための生産工程の実現が求められている。なかでも異種金属部品の結合において、川下企業から結合強度 を維持しつつ低コスト化を求めるニーズがある。このニーズに応えることで、自動車生産の更なるコストダ ウンが行え、国内メーカーの競争力強化が図れると考える。

なお、このアルミニウムダイカスト部品と鋼製部品を代表する異種金属部品の結合は動力伝達系に限定され ず、エンジン本体系、電装系などの自動車の車体部品以外の軽量化、低コスト化に共通したニーズである。 自動車部品には異種金属材料が多用されているが、その結合方法は、ボルト締結もしくは、圧入、焼きバメ が主体である。しかし、ボルトによる結合では、部品点数や質量が増加するとともに、加工・組立のコスト がかかるという問題がある。また、圧入や焼きバメは、軟質部材に作用する引張応力が大きく、延性が不足 して破損しやすいため接合強度を大きくとることができない。アルミニウムダイカスト部品では、鋳ぐるみ という方法もあるが、部品をダイカスト鋳造の度にセットしなければならないため、生産性が悪い上、位置 決めをすることも難しいため、高精度が要求される製品には、後工程で加工を施すことになる。そのため、 異種金属部品の結合において、軽量かつ低コストで結合が可能な塑性流動結合法の研究開発が急務である。

(2) これまでの取組み概要

図1-1-1は、東京工業大学で研究を行った塑性 流動結合の基本概要である。焼入れした円盤と軸の 一部を結合させ、円盤に隙間を設けた部分に塑性変 形可能なリング状の結合部材を挿入する。結合材を 挿入する部分の円盤と軸には小さな溝を加工して おき、リング状のパンチでリング状の結合材を加圧 して、材料をその溝部に流入させるとともに界面に 高い面圧を発生

させて結合する。塑性流動結合法は、部材間の嵌め 合いは隙間バメの のため、組付が容易であり、結合時の パンチでの加圧ストロークが小さい(1mm)ために高精度であり





図1-1-1 塑性流動結合方法の概要

界面にパンチで大きな結合圧力を与えることが可能で、高い結合強度を得る事ができる。

図1-1-2は、上記の技術を発展させて塑性変形能の乏しいアルミニウムダイカストリングと鋼軸の塑性 流動結合法の概略である。アルミニウムダイカストリング(薄肉のため外周部を拘束リングで抑止している) をリング状のパンチで加圧して、鋼軸に加工した溝にアルミダイカスト部材を流動させて、結合する。本技 術は、平成21年度採択のサポイン「アルミダイカスト品の高強度・高精度塑性流動結合技術の開発(理工 学振興会・京浜精密工業・東京工業大学)」にて開発され。平成25年2月より、量産化(月産25,000台) し、エンジンバルブリフト機構ユニットの軽量化18%、コスト低減34%の効果を得ている。



図1-1-2 アルミニウムダイカストリングと鋼軸の塑性流動結合法

(3)提案する新しい塑性流動結合法

本研究開発は塑性流動結合法を更に発展させ、技術の応用拡大を図るものである。すなわち、これまでの塑 性流動結合法で使用していたリング状の専用パンチを用いることなく、鋼の軸状部品とアルミダイカストの 穴部品を塑性流動結合する技術を開発する。図1-1-3に本研究のパンチを用いない塑性流動結合の基本 的な方法を示す。段付き加工を施した軟質材の穴部品に、段付き加工した硬質材の軸部品を挿入し、軸を加 圧して軸の段部で軟質材の穴の段部を圧縮変形させ、半径方向内側に塑性流動した軟質材で軸の先端を高い 圧力で締付けて結合する。この技術が開発できれば、部品点数、質量の低減のみではなく、より複雑形状の 製品の結合、さらに高強度化、部品加工コスト、結合コストの削減など多くの課題の解決が期待できる。(軟 質材の穴径と挿入する硬質材の軸とは隙間バメで良いため、組付け性が容易である。)



図1-1-3 パンチを用いない塑性流動結合法

(4)予備実験結果

本研究の結合技術に関してモデルによる予備実験を行った。その結果を以下に示す。図1-1-4に結合実験の概要を、また図1-1-5に結合強度を把握するための軸戻し実験の概要を示す。試験片の形状、寸法を図1-1-6に示す。軟質穴部材のモデル材としてアルミニウム A5056 を、また軸部品には機械構造用炭素鋼 S45C を用いた。







図1-1-5 軸戻し強度測定の実験概要



図1-1-7は、結合荷重と軸戻し耐荷重(軸の戻し方向の荷重と変位の関係が直線性を失う荷重)の関係 を示す。結合荷重が45kNまでは軸戻し耐荷重が直線的に大きくなるが、それ以上の結合荷重では軸戻し荷重 は一定となった。この原因が軸部品の先端形状によるものか、面圧が一定になるためであるかなど含めて、 必要となる結合強度を得るための最適条件の設定は今後の研究課題である。図1-1-8は、軸戻し耐荷重 /結合荷重を結合効率とし、結合荷重/段差部面積を結合面圧とし、結合面圧/軟質材(穴部品)引張強さ が結合効率に及ぼす影響を示す。塑性流動結合は引張強さの2~3倍という高い面圧の結合荷重を段差部に負 荷できること、またその高い結合荷重の30%程度と高い軸戻し耐力の値を得ることができている。この予備 実験の結果は、この専用パンチを用いない塑性流動結合法が実用性に富んだ結合法であることを示している。



以上の予備実験の結果により、パンチを用いない軸系部品と穴付き部品の塑性流動結合が原理的に可能であ ることが明らかになった。そこで、川下業者のニーズの主体であるアルミニウムダイカストと鋼製部品の異 種金属部品の結合において、提案する新しい塑性流動結合法の実現を目指す。

1-1-2.研究目標

(1) 高度化目標

(ア) 高強度化

専用のパンチを用いずに軸部品と穴部品を塑性流動結合する技術を開発し、事業化目標製品において、結合の高強度化により、軸戻し荷重(引抜荷重)30kN以上、トルク強度100N-m以上を確保する。

(ケ)低コスト化

結合部品のコンパクト化、及び圧入廃止による寸法公差緩和により、加工コスト 30%低減を目標とする。

(2)研究開発の技術的目標値

1. 専用パンチを用いない塑性流動結合技術の開発

(1-1) アルミダイカスト用ハイシリコン材料 ADC14 の塑性流動性の把握

・ADC14 材の拘束圧縮試験などによる塑性流動性の把握、塑性流動結合プロセスにおける塑性ひずみの許 容値の決定

(1-2) 中実鋼軸と ADC14 リングの塑性流動基礎技術の確立

・結合効率30%以上を安定確保するための条件決定

・FEM シミュレーションによる強度予測技術の確立

(1-3) 薄肉鋼軸と ADC14 リングの塑性流動基礎技術の確立

・軸の厚さ、リングの厚さ、フランジの有無など結合強度に対するパラメータの影響把握と結合効率 25% 確保

・FEM シミュレーションによる強度、精度に及ぼすパラメータの影響予測技術確立

2. 軽量化及びコスト低減のための製品設計技術の開発

(2-1) 最適な部品形状の設計

・インナー部材コスト 50%低減

(2-2) 塑性結合技術データの蓄積

・ドラムとインナーの結合強度:軸戻し強度 30kN 以上、トルク強度 100N-m 以上を確保

3. 高精度・高効率加工設備の開発・導入

(3-1) 量産への対応が可能な塑性流動金型構造と機構の開発

・結合荷重や離型力などの結合条件が確保でき、仕上げ切削省略可能な高精度金型の開発(加工コスト 20% 低減)

(3-2) 塑性流動結合用加工設備の開発

・加工タクトタイム低減 (30 秒→20 秒)

4. 結合品の強度・信頼性保証技術

- (4-1) 結合プロセスのモニタリング方法
- ・結合荷重、ストローク等と加工品の寸法関係データの採取、蓄積によるオンライン計測法開発
- (4-2) 強度、信頼性確保のための試験法とデータの蓄積
 - ・疲労強度、製品使用環境を考慮した試験法とデータ蓄積
 - ・間便な非破壊検査方法の開発、導入

1-2 研究体制

1-2-1.研究組織



1-2-2. 管理体制

(1) 事業管理者

国立大学法人宇都宫大学



(2)研究実施機関

(ア) 京浜精密工業株式会社







1-2-3.研究者氏名

氏名	所属・役職	備考
川目信幸	京浜精密工業株式会社 開発部部長	プロジェクトリーダー
村上碩哉	京浜精密工業株式会社 技術顧問	サブリーダー
鈴木行則	京浜精密工業株式会社 開発部 実験課 課長	
福田和央	京浜精密工業株式会社 開発部 実験課 係長	
和田部雅司	京浜精密工業株式会社 開発部 設計課 課長	
大貫和明	京浜精密工業株式会社 技術部 生産技術課 課長	
白寄篤	宇都宮大学大学院工学研究科准教授	
十场刊仙	栃木県産業技術センター 機械電子技術部	
ノへ作同个小川山	機械システム研究室 特別研究員(TL)	
芒廿三山	栃木県産業技術センター 機械電子技術部	
而开放也	機械システム研究室 技師	
関口康弘	栃木県産業技術センター 材料技術部	

	金属材料研究室 特別研究員(TL)	
柳田治美	栃木県産業技術センター 材料技術部	
	金属材料研究室、特別研究員	

1-2-4. 協力者

なし

1-3. 成果概要

No	開発項目	内容	目標成果
1	専用パンチを用いない塑性	【1-1】 アルミダイカスト用ハイ	 ADC14の拘束圧縮試験などに
	結合技術の開発	シリコン材料 ADC14 の塑性流動	よる塑性流動結合の塑性ひず
		性の把握	みの許容値決定
		【1-2】中実鋼軸と ADC14 リング	・結合効率 30%安定確保の条件
		の塑性流動結合基礎技術の確立	決定
			・FEM シミュレーションによる強度予測
			技術確立
		【1-3】薄肉鋼軸と ADC14 リング	・形状の強度影響把握と結合
		の塑性流動結合基礎技術の確立	効率 25%確保
			・FEMによる形状の強度,精度
			影響把握
2	軽量化及びコスト低減のた	【2-1】 最適な部品形状の設計	・インナー部材の低コスト化 50%
	めの製品設計技術の開発	【2-2】 塑性結合技術データの蓄	・ドラムとインナー結合強度:軸戻
		積	し強度 30kN 以上、トルク強度
			100N-m 以上を確保
3	高精度、高効率加工結合設備	【3-1】量産への対応が可能な塑	・結合条件が確保でき、仕上
	の開発・導入	性流動結合金型構造と機構の開	げ切削省略の高精度金型の開
		発	発(加工コスト 20%低減)
		【3-2】 塑性結合用加工設備の開	・加工タクトタイム(30 秒→
		発	20秒)
4	結合品の強度・信頼性保証技	【4-1】結合プロセスのモニタリ	・結合荷重、ストローク等と加工品
	術	ング方法	寸法関係データの蓄積によるオン
		【4-2】強度、信頼性確保のため	ライン計測法開発
		の試験法とデータの蓄積	・製品使用環境考慮の試験法
			とデータ蓄積

	・簡便な非破壊検査方法の開
	発、導入

1-4 当該研究開発の連絡窓口

京浜精密工業株式会社 開発部 部長

川目 信幸

TEL 0289-76-2141

FAX 0289-76-2145

E-mail nobuyuki-kawame@ksk-inc.co.jp

2-1. アルミダイカスト用ハイシリコン材料 ADC14 の塑性流動性の把握

アルミダイカスト用ハイシリコン材料 ADC14 材の塑性流動性を把握するために圧縮試験と 拘束圧縮試験を行った。

図2-1-1に圧縮試験の概要図、拘束圧縮試験の概要図、図2-1-2に、拘束圧縮試 験用冶具を示す。



(a)圧縮試験

(b)拘束圧縮試験

図2-1-1 圧縮試験、拘束圧縮試験の概要図



(c)拘束圧縮試験用治具

図2-1-2 拘束圧縮試験用治具

図2-1-3に圧縮試験結果、図2-1-4に拘束圧縮試験結果を示す。ADC14 のリング は、圧縮試験において、厚さ方向で約 10%のひずみまで、亀裂を生じることなく塑性変形 が可能である。その時の半径方向のひずみは、内径方向約 4%、外径方向約 6%である。ADC14 リングの拘束圧縮試験において、約 20%のひずみまで亀裂を生じることなく塑性変形が可 能である。その時の内径方向のひずみは約 25%である。圧縮試験における亀裂発生時の応 力は、約 500MPa、拘束圧縮試験では、約 1,000MPa に増加する。



2-2. 中実鋼軸と ADC14 リングの塑性流動結合基礎技術の確立

1/2 実験モデルの、S45C 中実鋼軸と ADC14 リングの試験品の寸法を図 2-2-1 に示す。



段差量 0.5mm

図2-2-1 1/2実験モデルの中実鋼軸とADC14リングの試験品の寸法

図2-2-2に塑性流動結合モデル実験型を示す。



図2-2-2 塑性結合モデル実験型

中実鋼軸結合実験モデルにおける条件決定及び残留応力の測定のため FEM シミュレーション を用いて強度、精度に及ぼすパラメータの影響を調査した。 図2-2-3に、FEM シミュレーション結果を示す。



FEM シミュレーションが、ADC14 の拘束圧縮試験の結果とほぼ等しいことが確認できた。 これにより、以後のシミュレーションが有効であることが確認できた。 図2-2-4に結合部の残留応力の分布を示す。塑性流動結合後の締付力(残留応力)が、

解析できるようになった。



図 2 - 2 - 5 に、FEM シミュレーションによる段差幅 1.0mm と段差幅 0.5mm の結合荷重と 締付荷重のシミュレーション結果を示す。



図2-2-5 FEM シミュレーションによる結合荷重と締付荷重

FEM シミュレーション結果、段差幅 1.0mm の場合、結合荷重 153kN(公称結合面圧 1,186MPa) で、締付荷重が 66kN となり、結合耐荷重の予測値は、66kN×0.34=22.4kN となり、結合 効率が 15%となる。段差幅 0.5mm の場合、結合荷重 96kN(公称結合面圧 1,500MPa)で、締 付荷重が 43kN となり、結合耐荷重の予測値は、43kN×0.34=14.6kN となり、結合効率が 15%となる。

図 2 - 2 - 6 に、S45C 中実鋼軸と ADC14 リングの段差量 0.5mm と段差量 1.0mm の結合荷重 と結合効率の関係の試験結果を示す。



図2-2-6 S45C 中実鋼軸と ADC14 リングの結合荷重と結合効率

段差量 0.5mm の方が、結合荷重が低い時でも、結合効率が高い。

段差量 0.5mm、結合荷重 100kN の時の結合効率は、6.96%から 14.8%であり、シミュレーション結果(15%)より低めであった。段差量 1.0mm、結合荷重 180kN の時の結合効率は、9.4% から、14.3%でありシミュレーション結果(15%)より低めであった。図 2 - 2 - 7 に、S45C 中実鋼軸 ADC14 リングの結合荷重とストロークの線図を示す。



図2-2-7 S45C 中実鋼軸と ADC14 リングの結合荷重とストローク

2-3 薄肉鋼軸と ADC14 リングの塑性流動結合基礎技術の確立

S45C 薄肉鋼軸と ADC14 リングの試験品の寸法を図 2-3-1 に示す。



図 2-3-1 S45C 中空鋼軸と ADC14 リングの寸法



図2-3-2に、S45C 中空鋼軸 内径 φ34(t=3.0) ADC14 リングでの結合荷重と結合効率の関係を示す。

図2-3-2 S45C 中空鋼軸 内径 φ34 (t=3.0) ADC14 リングでの
 結合荷重と結合効率の関係

図2-3-3に、S45C 中空鋼軸 内径 φ 35(t=2.5) ADC14 リングでの結合荷重と結合効率の関係を示す。



図 2 − 3 − 3 S45C 中空鋼軸 内径 φ 35 (t=2.5) ADC14 リングでの 結合荷重と結合効率の関係



図2-3-4に、S45C中空鋼軸 内径 φ 36 (t=2.0) ADC14 リングでの結合荷重と結合効率の関係を示す。

図 2 − 3 − 4 S45C 中空鋼軸 内径 φ 36 (t=2.0) ADC14 リングでの 結合荷重と結合効率の関係

図2-3-5に、S45C 中空鋼軸 内径 φ 37 (t=1.5) ADC14 リングでの結合荷重と結合効率の関係を示す。



図 2 − 3 − 5 S45C 中空鋼軸 内径 φ 37 (t=1.5) ADC14 リングでの 結合荷重と結合効率の関係

内径 φ 34 (t=3.0) での最大結合効率は、段差量 0.5mm で 14%。内径 φ 35 (t=2.5) での最大結合効率は、段 差量 0.5mm で 13%。

内径 φ 36 (t=2.0) での最大結合効率は、段差量 1.0mm で、9%。内径 φ 37 (t=1.5) での最大結合効率は、段 差量 0.5mm で 11%となった。 図2-3-6に、中空鋼軸の肉厚と結合効率の関係を示す。



図2-3-7に、S45C 中空鋼軸と ADC14 リングでの中空鋼軸の肉厚と軸戻し耐荷重の関係を示す。 目標である軸戻し耐荷重 30kN 以上を実製品で達成するためには、本試験品で 15kN 以上が必要である。段差 量1.0mm で、肉厚 3mm 品が目標値を満足しているが、それ以外の仕様では、まだ、目標値未達となっている。



鋼軸肉厚と軸戻し耐荷重の関係

薄肉鋼軸と ADC14 リングの塑性流動結合の結合効率アップのため、ADC14 リングの外周及び内周を拘束した 拘束タイプでの結合試験を実施する。

ADC14 リングの外周及び内周、薄肉鋼軸の内径を拘束した塑性流動結合モデル拘束実験型を写真2-3-1 に示す。



写真2-3-1 塑性流動結合モデル拘束実験型

S45C 中空鋼軸 内径 φ 35 (肉厚 t=2.5) ADC14 リング 段差量 0.5mmm での拘束有無による結合効率と結合荷 重の関係を図 2-3-8 に示す。



図 2 − 3 − 8 S45C 中空鋼軸 内径 φ 35(t=2.5) ADC14 リング 拘束有無での結合荷重と結合効率の関係

S45C 中空鋼軸 内径 φ 35 (肉厚 t=2.5) ADC14 リング 段差量 0.5mm での拘束有無による軸戻し耐荷重と結 合荷重の関係を図 2-3-9に示す。



図2-3-9 S45C 中空鋼軸 内径 φ 35(t=2.5) ADC14 リング 拘束有無での軸戻し耐荷重と結合効率の関係

実製品と肉厚が等しい S45C 中空鋼軸 内径 φ 25 (t=2.5) ADC14 リング 段差量 0.5mm での拘束有無での軸 戻し耐荷重の測定結果、拘束無しでは、結合荷重 200kN 以上、拘束有りでは、結合荷重が 160kN 以上で目標 値の 15kN 以上を満足できる目処がついた。

2-4 最適な部品形状の設計

事業化の最初の対象製品は、アルミダイカスト ADC14 製のドラムと鉄鋼(SCM420)部品であるインナーを結合する自動車用 AT 部品(ダイレクトクラッチ用ドラム)である。

現状の加工法(図2-4-1(a))はスチール製インナーの管部をアルミダイカストADC14製のハウジング 内径部に圧入した後に、寸法が変化する部分(☆印部)を仕上げ切削するが、結合強度を確保するために圧 入長さが長くなるため、圧入力も大きくなる。加えて、圧入部の嵌め合いのために圧入部品にも高精度加工 が要求されるため加工コストも高くなっている。

一方、開発する塑性流動結合(図2-14-1(b))では、拡大図に示すように、ADC14製ドラムに高面圧 を発生させて結合するため、高い結合強度が得られる。また嵌め合い条件の緩和による圧入部品の要求加工 精度緩和や、圧入工程の効率向上、さらに圧入後の寸法変化の抑制による後加工工程の削減が可能となり、 加工コストの大幅低減が実現できる。



更なるコストダウンのために、鋼製インナーのコ スト低減のため、現状工程に対する開発工程の検 討を行った。

図2-4-2に鋼製インナーの形状、

図2-4-3に現状の工程と開発工程の比較を 示す。

現状のパイプ材からの熱間鍛造から端面及び内 径、外径加工を行うのに対して、薄肉パイプ素材 からの切断、しごき加工を経て、プレス加工にて フランジ成形を行う工法を開発する。

フランジ成形においては、45°成形型、オーバー ベンド成形型、90°成形型の3段階を経て、成形 する工法をトライした。



図2-4-2 鋼製インナーの形状



図2-4-3 鋼製インナーの現状工程と開発工程の比較

写真2-4-1に、鋼製インナーの工程毎の形状を示す。



写真2-4-1 鋼製インナーの工程毎の形状

図2-4-4に鋼製インナーの寸法測定位置を示す。



図2-4-5に鋼製インナーの内径d1(上側)の寸法変化を示す。



図2-4-5 鋼製インナー内径(上側)の工程毎の寸法変化

図2-4-6に鋼製インナーの内径d2(中側)の寸法変化を示す。



図2-4-6 鋼製インナー内径(中側)の工程毎の寸法変化

図2-4-7に鋼製インナーの内径d3(下側)の寸法変化を示す。



図2-4-7 鋼製インナー内径(下側)の工程毎の寸法変化

鋼製インナーの内径上側の寸法が、フランジ内Rの影響でバラツキが見られるが、中側、下側の工程毎の寸法は安定している。



図2-4-8に鋼製インナーの外径D1(上側)の寸法変化を示す。

図2-4-8 鋼製インナー外径(上側)の工程毎の寸法変化

図2-4-9に鋼製インナーの外径D2(中側)の寸法変化を示す。



図2-4-9 鋼製インナー外径(中側)の工程毎の寸法変化



図2-4-10に鋼製インナーの外径D3(下側)の寸法変化を示す。

図2-4-10 鋼製インナー外径(下側)の工程毎の寸法変化

鋼製インナーの工程毎の外径の寸法は、上側、中側、下側ともに安定している。

鋼製インナーを薄肉パイプ素材から切断、しごき加工を経て、プレス加工にてフランジ成形を行う工法 によって、鋼製インナーを薄肉パイプ素材から成形することが可能であることが確認できた。

2-5. 高精度・高効率加工設備の開発・導入

塑性流動結合法の量産工法の確立のため、結合荷重や離型力などの結合条件が確保でき、仕上げ切削加工の 省略可能な高精度金型の開発に取り組んだ。図2-5-1に、実サイズ製品結合試験金型と結合部概要を示 す。



図2-5-1 実サイズ製品結合試験金型と結合部概要

写真2-5-1に、実際の実サイズ製品結合試験金型を示す。



写真2-5-1 実サイズ製品結合試験金型

実サイズ製品にて、塑性流動結合を実施するため、塑性結合加工設備の検討を行った。写真2-5-2に塑 性流動結合実験装置を示し、表2-5-1に装置の主要な仕様を示す。



表2-5-1 装置仕様 トン数 60トン ボルスター $6\ 0\ 0 \times 5\ 0\ 0$ mm 有効面積 装置外形寸法 $900 \times 600 \times 1600$ mm (カバー高さ除く) ストローク長さ $150 \sim 180 \,\mathrm{mm}$ シャットハイト 318 mm 下死点上5mmから、20mm/秒 下降速度 (寸動可とする) それ以外は100mm/秒程度 平行度 0.01以内 下死点精度 0.01以内 ダイクッション $2.5\,\mathrm{mm}$ ストローク 1トン クッション力 油圧ブースター又はガススプリング

写真2-5-2 塑性流動結合実験装置

2-6 塑性結合技術データの蓄積

実製品サイズ結合実験型を用いて塑性流動結合実験を実施した。その結果、結合荷重 300kN 程度で、ド ラムアウターの亀裂、破損が発生した。

写真2-6-1に、塑性流動結合実験の写真を示す、



写真2-6-1 塑性流動結合試験

表2-6-1に、試験結果を示す。

表2-6-1 試験結果

	結合荷重	軸戻し耐荷重	結合後の破損状態
No. 1	393.3 k N	4.9 k N	ドラムアウター破損
No. 2	291.0kN	6.3 k N	ドラムアウター亀裂発生
No. 3	286.3 k N	7.4 k N	ドラムアウター亀裂発生

写真2-6-2に、試験品の破損状況を示す。



写真2-6-2 試験品の破損状況

図2-6-1に、試験品 No.3の結合時の荷重-ストローク線図及び軸戻し耐荷重測定時の荷重-ストローク線図を示す。





図2-6-1 結合時と軸戻し耐荷重測定時の荷重-ストローク線図

ドラムアウターの亀裂、破損の原因究明のため、FEM シミュレーションを実施した。 図2-6-2に、FEM シミュレーションでの解析モデルを示す。パンチ及び支持部は剛体とし、パンチ は下方のみ移動、支持部は空間に固定した。



図2-6-2 FEM シミュレーションモデル(亀裂、破損の原因究明)

図2-6-3に、FEM シミュレーション解析結果を示す。解析結果、亀裂発生位置①で割れることが確認できたが、亀裂発生位置②では、割れは確認できなかった。



図2-6-3 FEM シミュレーション結果

亀裂発生位置②の変位解析結果を図2-6-4に示す。



図2-6-4 亀裂発生位置②の変位解析結果

亀裂発生位置②の変位解析結果、破損位置が約0.08mm 拡がっていることが確認できた。 結合強度を確保するために、アウター部の外周拘束が必要であることがわかった。

ドラムアウターとインナーの結合強度の目標値である 30kN 以上を満足させるために、インナーの結合 部の段差高さ、段差幅、結合溝形状の検討を行った。 結合部形状の検討結果を図2-6-5に示す。



図2-6-5 インナー結合部形状の検討結果

結合溝有りの結合品では、溝内へ軟質材料(ADC14)が塑性流動することにより結合強度が向上するため、溝内充填率(流入面積/溝面積)が確保できる結合条件を選定する必要がある。したがって、非線 形構造解析システムにより、結合条件(段差幅W=0.75,1.0mm、結合応力1.3,1.5GPa)を変化させて塑 性流動による充填率を求めるシミュレーションを行った。図2-6-6にシミュレーションの結果を示 す。右図より、アウター材料(ADC14)が塑性流動してV形状の溝内に流入する状況が把握でき、結合 溝の位置や大きさが適切であることが確認できた。また、最も充填率が高い条件は、段差幅W=0.75、 結合応力1.5GPaであることも確認できた。





段幅:0.75mm、1.0mm 荷重条件:1.3GPa、1.5GPa の4条件を解析した。

結合条件 (結合応力,段差幅)	充填率 [%]
1.3GPa, W0.75mm	64.4
1.3GPa, W1.0mm	57.8
1.5GPa, W0.75mm	74.2
1.5GPa, W1.0mm	64.7

図2-6-6 非線形構造解析システムによる塑性流動充填率シミュレーション

これらの充填率を求めるシミュレーションにより得られた結合品モデルに、軸戻し荷重を与えるシミ ュレーションを行い、結合強度の比較を行った。図2-6-7にシミュレーション結果を示す。軸戻し 耐荷重の目標値 30kN を超える可能性を示した。



図2-6-7 軸戻し荷重シミュレーション解析結果

塑性流動シミュレーション結果の検証のために、結合部を切断して金属組織から塑性流動を確認した。 切断及び観察位置を図2-6-8、組織写真とシミュレーションの比較を図2-6-9に示す。結合条 件は、段差幅0.75mm、結合応力1.44GPaである。組織写真では、アウターとインナーの間にすき間が あるように見えるが、これは切断した際に結合部が分離したためである。分離したアウターとインナー を組み合わせて固定し樹脂埋めを行ったが、それらの間に樹脂が入り込みすき間ができてしまっている。 また、シミュレーションでは、V形状の溝の底を90°のピン角としてモデリングしているが、組織写 真では約0.2mmの隅Rとなっている。これらの違いを考慮して比較すると、塑性流動の状況が精度良く シミュレーションできていると考えられる。



図2-6-8 金属組織の観察位置



図2-6-9 金属組織とシミュレーションの比較



図2-6-10 各断面の金属組織

実製品モデルのアウター・インナー結合部周方向の4断面を切断し、金属組織の観察を行った。 図2-6-9に1断面、図2-6-10に他の3断面を示す。これらの結果から、全周に亘って均一な 塑性流動が生じていることが確認できた。また、有害な割れは生じていないことが確認できた。

実製品モデルのアウターと結合溝有りインナーの塑性流動結合品について、軸戻し荷重試験を行った時の荷重-ストローク線図を図2-6-11に示す。軸戻し耐荷重の目標値30kNを超えることが確認できた。段差幅0.75mmと1.0mmの結合溝有りインナーを使用し、結合荷重と軸戻し耐荷重の関係を求めた結果を図2-6-12に示す。軸戻し耐荷重が40kNを超えると結合荷重を増加しても耐荷重が増加しないことがわかる。耐荷重が40kNを超えると結合部が外れるのではなく、アウターが破断してしまうためである。このことからも、結合部の強度が十分であることがわかる。また、段差幅1.0mmに比較し段差幅0.75mmでは、小さな結合荷重で軸戻し耐荷重の目標値を超えていることがわかる。段差幅0.75mmの方が加工時に消費するエネルギーを抑制できると考えられる。



図2-6-11 軸戻し荷重試験時の荷重-ストローク線図



図2-6-12 結合荷重と軸戻し耐荷重の関係

図2-6-13に、段差幅0.75mm、結合溝有りのトルク強度測定結果を示す。 段差幅0.75mm、結合溝深さ0.3mm、結合溝幅0.6mm、結合溝数2の鋼製インナーと実製品モデル試験金 型に外周拘束プレートを追加したもので、結合荷重295.6kNで結合し、トルク強度を測定した結果、398.5Nm となり、目標の100Nm以上を満足することができた。



図2-6-13 インナー溝有り トルク強度測定結果

2-7 間便な非破壊検査方法の開発、導入

事業化により量産する場合には、結合強度の信頼性を確保するための簡便な非破壊検査が必要となる。 その手段として、超音波を使用して軸戻し耐荷重を推測する技術を開発し、その有効性の検証を行った。 実験装置を図2-7-1に示す。超音波探触子は、電動Z軸によりインナー軸方向である上下に走査す る。実製品モデル結合品を回転テーブル上に固定して、図2-7-2に示すとおり、インナー内径側か ら超音波探触子により入射波を発振し、結合面からの反射波を同じ探触子で受振した。微細な分布を評 価するために、超音波探触子は、φ1mm点焦点水浸型探触子(周波数20MHz)を使用した。この探触子 は水中で使用する必要があるため、インナーの底に蓋を付けてインナー内を水で満たし、結合面から探 触子までの距離を焦点距離(約12.7mm)に保ちながら探触子を上下に走査することにより反射波の高 さ分布を求めた。



図2-7-1 超音波探傷器と実験装置

図2-7-2 結合面反射波の受振方法

図2-7-3に、超音波反射波高さから結合強度を推測する原理を示す。右図中のカラーマップは結 合により生じた半径方向(結合面の法線方向)の残留応力であり、青は圧縮応力を示している。



図2-7-3 軸戻し耐荷重を推測する原理

結合前や結合応力が小さく結合面の密着率が低い場合は、結合面に入射した超音波は全て反射される ため反射波が高くなる。一方、結合応力が大きく結合面の密着率が高い場合(右図の青い部分)は、結 合面を透過する超音波(透過波)が増加して反射波は低くなる。したがって、反射波の高低は結合によ る残留応力の大きさに相関し、理論的には残留応力に比例する軸戻し耐荷重が推測できることとなる。 反射波高さの低下が顕著に表れることが予測されるのは、結合溝中心(右上図)と隅R部(右下図) であるため、これらの位置近傍での反射波高さと結合応力や軸戻し耐荷重との関係を求めることとした。

実製品モデルによる実験の前に、結合部の直径が実製品モデルの1/2である縮小モデルを用いて超音波の測定実験を行った。図2-7-4に、超音波反射波の高さ分布をカラーマップした超音波画像を示す。 画像の縦方向がインナー軸方向で、画像の横方向がインナー半径方向(肉厚方向)である。反射波の高 ~低を赤~青で示している。2本の結合溝とその上に隅R部が確認できる。



図2-7-4 超音波画像

縮小モデルの ADC14 リングと結合溝有りの薄肉鋼軸を使用して、超音波反射波高さと結合応力の関係 を求めた結果を図2-7-5に示す。左図に隅R部0.1mm ピッチ、結合溝中心0.04mm ピッチで求めた 反射波高さの分布を示す。1組の ADC14 リングと薄肉鋼軸から1個の結合品を作製し、結合応力を 1.0GPa から1.4GPa まで0.1GPa ごとに増加させて反射波の測定を行った。パルス電圧175V、レシーバ ゲイン 75db 一定で測定した。測定縦軸の0mm は、結合溝中心位置である。右図に隅R部(1.0~1.7mm) 反射波高さの平均値及び結合溝中心(-0.08~0.08mm)の平均値と結合応力の関係を示す。結合応力の 増加とともに反射波高さが減少していることがわかる。隅R部では1.0GPa から1.2GPa の減少が顕著に なり、結合溝中心では1.2GPa から1.4GPa の減少が顕著になる。これらの関係により、反射波高さから 結合応力が推測できると考えられる。



図2-7-5 超音波反射波高さと結合応力の関係(縮小モデル)

次に、実製品モデル5組のADC14アウターと結合溝有りSCM420インナーを使用して、結合応力1.03GPa から1.54GPaまでの5個の結合品を作製し、超音波反射波高さと結合応力の関係を求めた。結果を図2 -7-6に示す。結合品の円周方向に3断面測定しその平均値で示している。実製品モデルでは5個の 結合品を使用したため、個々の部品の品質の差に起因する超音波減衰の影響を小さくする必要があり、 超音波が全反射する部位(図2-7-4の空隙部)において、同じ反射波高さになるように超音波レシ ーバのゲイン調整(8%以内)を行った後に、隅R部と結合溝中心からの反射波高さを測定した。前述の 縮小モデルと実製品モデルでは形状が異なる部分があるため、反射波高さのレベルに差異があるものの、 結合応力の増加に伴い反射波高さが減少する傾向が確認できた。



図2-7-6 超音波反射波高さと結合応力の関係(実製品モデル)

図2-7-7に超音波画像の比較を示す。結合応力が大きくなると、隅R部(ピンク色楕円内)と結 合溝中心(白楕円内)の反射波の高さを表す青色が薄くなり、反射波が低くなっていくことが確認でき る。



図2-7-7 各結合応力による超音波画像の比較

5個の実製品モデル結合品について、超音波反射波の測定後に軸戻し荷重試験を行った。 図2-7-8に、軸戻し荷重試験により求めた耐荷重と事前に測定した超音波反射波高さの関係を示す。 結合溝中心の反射波高さが20%を下回ると軸戻し耐荷重が目標値の30kNを超えると推測される。また、 結合溝中心のグラフからでは、30kN以下の耐荷重は区別ができないが、隅R部のグラフからは、それ 以下の小さな耐荷重となる場合も推測できる可能性を示している。これらの結果から、開発した超音波 検査技術の有効性が検証できたと考えられる。



図2-7-8 軸戻し耐荷重と反射波高さの関係

3 複数年の研究開発成果

サブテーマ番 号	成果	効 果
【1-1】	・拘束試験において、約20%のひずみ まで亀裂無く変形可能である。	・塑性変形能は充分にある。
【1−2】	・段差量 0.5mm の方が、結合荷重が 低い時でも結合効率が高い。	・シミュレーション技術を確立できた。
[1-3]	・結合効率は段差量 0.5mm で最大 14.8%、段差量 1.0mm で最大 14.3% である。	・拘束条件の追加により、更なる結合効率の向 上が見込まれる。
[2-1]	・インナーを鋼管から成形する基本 的な技術を構築した。	・従来の成形法から、大幅なコストダウンを 図ることができる技術を構築することがで き、他の部品にも水平展開が可能である。
[2-2]	 ・実製品モデルにおける塑性流動シミュレーション技術が確立できた。 ・結合部断面の金属組織写真により塑性流動が確認できた。 	 ・塑性流動結合を他の製品に水平展開する場合 に、迅速に最適な結合条件を見出すことができ、顧客ニーズに対してタイムリーに試作品を 提供することが可能になった。 ・欠陥のない信頼性の高い結合技術であること
[3-1]	・量産への対応が可能な塑性流動結合 の金型構造を開発できた。	・ADC12 材よりも、塑性変形能の乏しい ADC14 材 に対して、拘束条件の改良を加え、金型の要素 技術を確立することができ、塑性変形能の乏し い他の材料につても展開可能である。
[3-2]	・量産への対応が可能な塑性流動結合 の設備を開発できた。	・加工タクトタイム 20 秒以下の目標を達成で きた。
[4-1]	・結合検査装置にて結合部の測定を 行い、データの蓄積ができた。	・結合部位寸法、結合荷重より結合応力や軸 戻し耐荷重を推測可能となった。
【4−2】	 ・超音波による簡便な非破壊検査技術 検査が開発できた。 ・トルク耐久試験機と静破壊試験機 を使用し、信頼性確保のためのデ ータを蓄積した。 	・事業化による量産においても、結合強度の信 頼性を確保できるようになった。

4. 補助事業の成果に係る事業化展開について



図4-1 事業化体系図

研究対象部品であるアルミダイカスト ADC14 製のドラムと鉄鋼(SCM420)製のインナーを結合する自動車用 AT 部品(ダイレクトクラッチ用ドラム)は、圧入によりインナーの結合力を確保するために圧入部の寸法公 差が厳しいため部品加工コストが高く、圧入工程の効率も悪いため工数削減が困難であった。また、本研究 対象部品では、スチール製インナーの管部をアルミダイカスト ADC14 製のハウジング内径部に圧入した後に、 寸法が変化する部分を仕上げ切削している。

今回の塑性流動結合を採用することにより、圧入部品の嵌め合い条件の緩和による要求加工精度の緩和や、 圧入工程の効率向上、さらに圧入後の寸法変化の抑制による後加工工程の削減が可能となり、加工コストの 低減(-20%)のニーズに応えることができる。

既存顧客である(株)A殿への自動車用AT部品(ダイレクトクラッチ用ドラム)のサンプル出荷を平成29年度の前半期に行い、(株)A殿及びATメーカーであるB(株)殿の試験評価、耐久評価を経て、平成30年度に設備投資を行い、平成31年度より、製品の生産、販売を行う予定である。

表4-1に(株)A殿向け自動車用AT部品(ダイレクトクラッチ用ドラム)の塑性流動結合品の事業化 スケジュールを示す。

製品等の名称		DRUM;DIRECT-CLUTCH						
開発事業者		京浜精	京浜精密工業株式会社					
想定するサンプル出荷先 株式		株式会	社 A					
	年 度		平成 29 年度	平成 30 年度	平成 31 年度	平成 32 年度	平成 33 年度	
ス	サンプルの出荷		1					
ケジュール	追加研究							
	設備投資							
	製品等の生産							
	製品等の販売							
売	売上高(千円)				306, 000	612, 000	612, 000	
上	販売数量(単位を記載)				180, 000	360, 000	360, 000	
込	売上高の根	拠	従来の製品として、月産30,000台の実績があり新技術の製品としても同数 の売上が見込まれる。					

表4-1 事業化スケジュール