

**平成 23 年度戦略的基盤技術高度化支援事業
「アルミダイカスト品の高強度・高精度塑性結合の研究開発」**

研究開発成果等報告書

平成 24 年 3 月

委託者 関東経済産業局

委託先 財団法人理工学振興会

目 次

1. 研究開発の概要	1
1-1. 研究開発の背景・研究目的および目標	1
1-1-1. 研究開発の背景	1
1-1-2. 研究の目的および目標	5
1-2. 研究体制	6
1-2-1. 研究組織	6
1-2-2. 管理体制	7
1-2-3. 研究者氏名	7
1-2-4. 協力者	7
1-3. 成果概要	8
1-4. 当該研究開発の連絡窓口	8
2. 研究内容および成果	9
2-1. 結合方法の検討と推進計画	9
2-2. 塑性変形能の乏しいアルミダイカストと 鉄系部品の塑性流動結合技術の開発	12
2-2-1. アルミダイカスト材料の圧縮応力場の 塑性流動性の把握と塑性結合への適用	12
2-2-2. 強度と精度を確保するための溝形状、パンチ形状など 各種パラメータの決定	13
2-2-3. 薄肉アルミダイカスト対応の高強度塑性結合技術の開発 : 材料の変形拘束条件把握	19
2-3. 軽量化、高精度化実現のための アルミダイカスト、鉄系部品の製品設計技術の開発	19
2-3-1. 軽量化、高精度化、生産性、安定性に適した 革新的かつ最適な部品形状の設計	19
2-3-2. 塑性結合技術データの蓄積	23
2-4. 高精度・高効率加工設備の開発・導入	25
2-4-1. 量産可能な高精度塑性結合金型構造と機構の開発	25
2-4-2. 塑性流動結合用加工設備の開発	26
2-5. 塑性流動結合品の強度・信頼性保証技術の開発	27
2-5-1. 量産において結合の信頼性を確保するための加工モニタリング方法	27
2-5-2. 疲労強度他、信頼性確保のための試験法とデータの蓄積	30
3. 全体総括	34
3-1. 研究開発成果	34
3-2. 事業化展開	34

1. 研究開発の概要

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

地球規模で深刻化する温暖化問題の対応として、CO₂削減のため企業においても製品の省エネルギーと生産における省エネルギーが重要な課題なっている。自動車をはじめとする運搬機、産業機器において、機器の軽量化と高耐久化、高機能化のために複雑な形状の複数の部品を高精度、コンパクトかつ高効率に結合する要求が強まっている。

当金属プレス加工分野の高度化指針においても、川下製造業者である自動車産業においても、低コスト化、軽量化、複雑形状・一体成形が課題及びニーズとして挙げられている。

本研究開発では、自動車部品に多用されているアルミニウムダイカスト部品と鉄系部品との結合品を対象としている。アルミダイカスト部品は軽量化と複雑形状の機能品、構造品として欠くことのできないものであるが、耐摩耗、高耐久化のために鉄系部品との結合が必須である。それらの結合方法として現在はボルト結合が一般的である。しかし、ボルト結合は、一般に両部材に複数の貫通穴とねじ穴を要するために部品が大形になり、質量、部品点数が増加し、組立てコストにも問題がある。他の結合・接合方法として、溶接が考えられるが、アルミニウムと鉄系部材とでは、溶接は困難である。また、圧入方式や焼きばめは、アルミニウムダイカスト製品に作用する引張応力が大きいために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。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ので、生産性が悪く、また、位置決めをすることが難しいので、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。

(2) これまでの取組み概要

東京工業大学では、焼入れ部材などの高強度部材の塑性変形を利用して、高精度、高強度に結合する研究を推進している。その概要を以下に示す。

図1-1-1は塑性流動結合方法の概要である。焼入れした円盤と軸の一部を勘合させ、それ以外の隙間を設けた部分に塑性変形可能なリング状の結合材を挿入する。その結合材を挿入する部分の円盤と軸には溝を加工しておく。パンチでリング状の結合材を加圧して、材料をその溝に流動させることによって機械的な噛み合いを得て結合する（図1-1-2）。

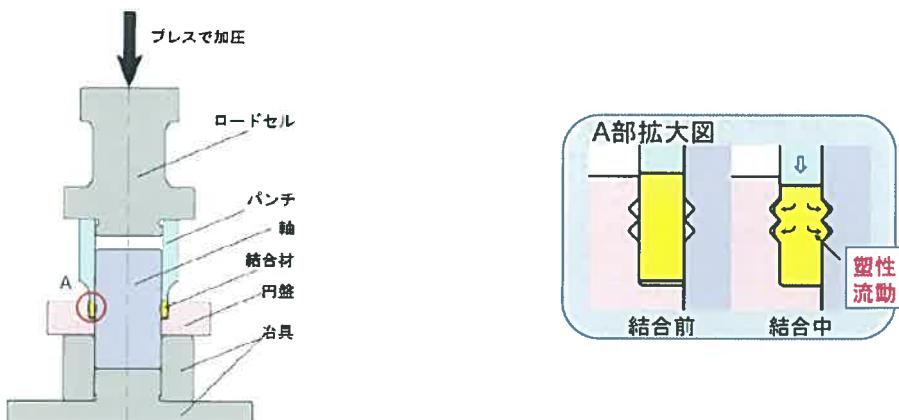


図1-1-1 塑性流動結合方法の概要

図1-1-2 塑性結合部拡大

以下、本研究の結合技術のモデル実験例を示す。結合実験には、図1-1-3に示すように、硬質材(HRC40程度)で直径20mmの軸と、厚さ10mm、直径50mmの円盤を用いた。円盤には軸とはめあう直径20mmと外径24mm深さ5mmの2段の穴があけてある。軸の外径と円盤の24mm穴の内面には、幅1mm、深さ0.5mmの溝を2本加工した。結合材は厚さ2mm、長さ5.2mm、材質は低炭素鋼S25Cである。実験には図1-1-6に示すように、溝のないもの、各種の溝形状、溝数のものを用いている。



図1-1-3 塑性結合実験

図1-1-4の右上のグラフは接合中のパンチの押し込み距離とパンチの圧力の関係を示す。パンチの押し込み量とともにパンチ圧力は単調に増加している。溝形状は図1-1-3に示したものである。

図1-1-4の結合溝付近の断面写真は、パンチ圧力の違いによる結合材の結合溝空間部への充填の状況を示す。パンチ側の溝の方が先に充填される傾向を示しているが、パンチ圧力が2,000MPaになると、空間部への充填率は90%を越えている。SKD11等の金型用の鋼は2,000MPa程度の負荷は量産的も可能なレベルである。

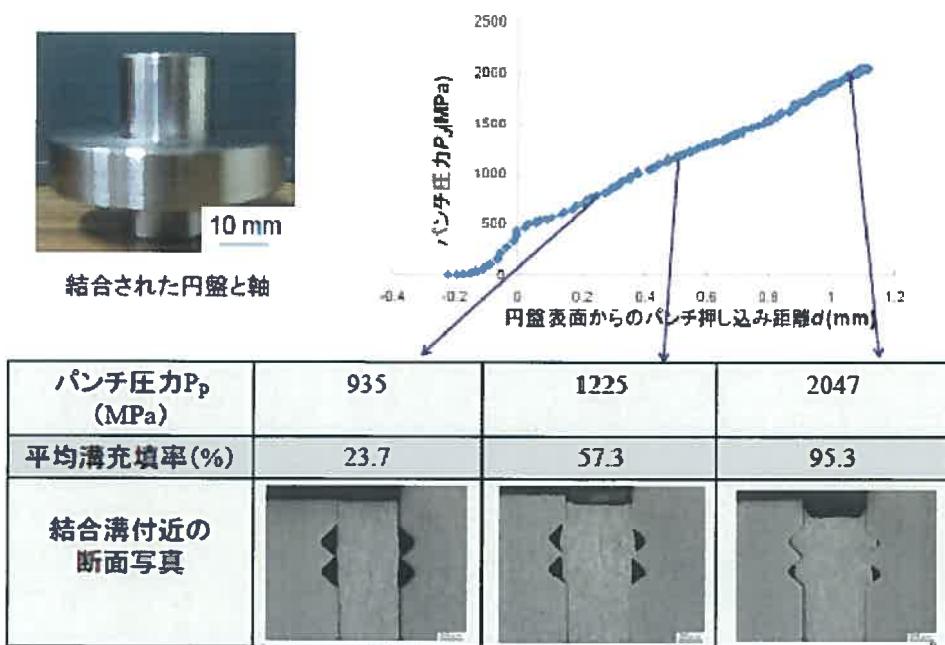


図1-1-4 パンチの押込み一荷重線図と溝への充填状況

図1-1-5は結合品強度の測定の概要である。図1-1-6は実験に供した各種の溝の断面形状を示す。図1-1-7はそれにおける、結合荷重と結合品強度の関係を示している。溝の無いものに比べて、溝を有するものは数10%高い強度を示している。この数値は約500°Cに加熱した焼き嵌めに対しても約2倍の強度である。

この塑性流動結合法の特長は、従来困難であった、焼入れした円盤状の部材と軸同士を冷間で高強度に結合することが可能である。さらに、軸と円盤が位置決め精度が良い、結合時に軸にかかる荷重が無い、軸と円盤の相対移動が無い、など精度向上を兼ね備えている。

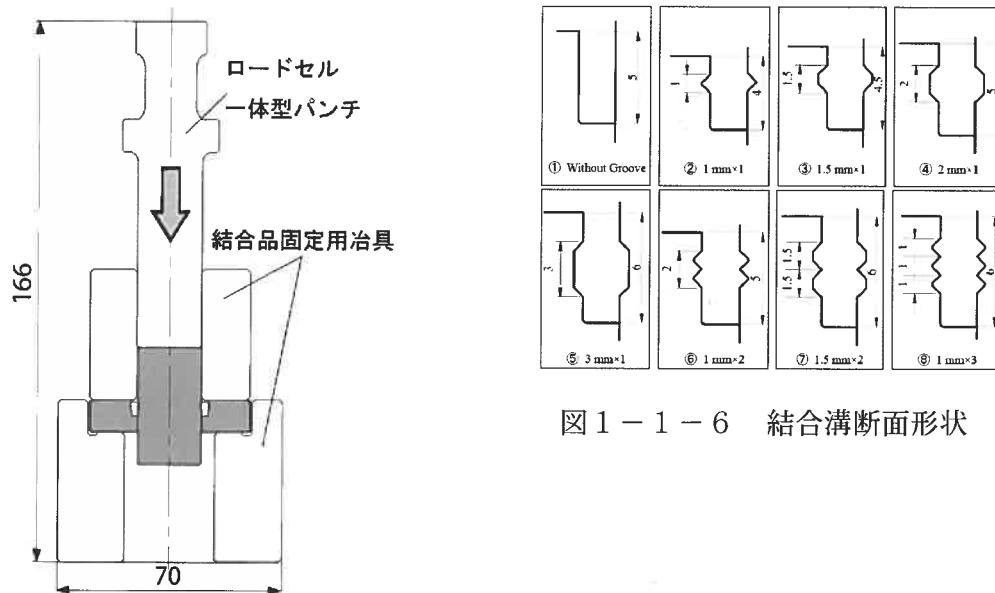


図1-1-5 結合強度測定概要

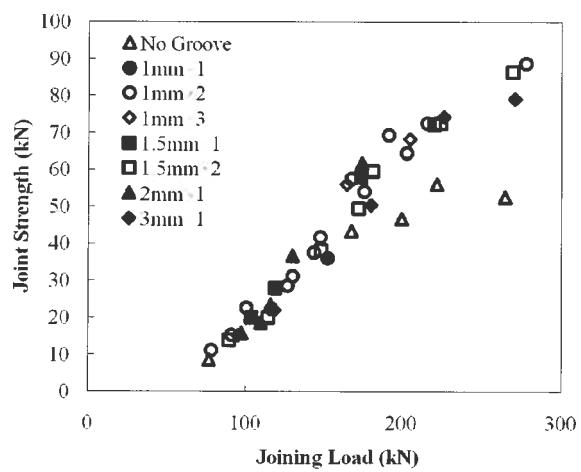


図1-1-7 結合荷重と結合品

(3) 国内外における他社技術に対する優位性

シーズとする技術は焼入れした部材を接合するものであるが、今まででは焼入れした部材を省スペースで高精度、高強度に接合するには良い方法が無かった。例えば、機械的接合であるねじ締め、図1-1-8に示す摩擦結合（シュパンリング：商品名）、リベットは頭部が露出して邪魔になり、また別部材の追加などによって、質量、容積、コストの増大を招いている。溶接は精度と強度信頼性が低下するという問題があった。

一方、接合に塑性変形を利用する方法（塑性結合法）があり、例として、図1-1-9に示すシェーピング接合、図1-1-10に示す焼入れスプラインの押し込みがある。シェーピング接合は切削機構を利用して接合するもので部材を加熱して、冷却による締め付け力と部材間の拡散接合を期待している。しかし、今回対象とするアルミダイカスト部品と鉄系部品に対して、拡散による接合は困難と考えられる。

また、焼入れスプラインの押し込みはスプライン軸が円盤（フランジ）の穴を塑性変形させながら圧入するものである。学会発表データ（第59回塑性加工連合講演論文集（2008）155-156）によれば、軸方向の強度は図1-1-7に示した強度の数分の一である。さらに、何れの方法も、軸と円盤間に大きな荷重が加わった状態で、軸と円盤の位置決めをすることになり、スプリングバックや接合設備のたわみの影響を受けるため、高精度な接合は期待できない。

アルミダイカスト製品における異材質部品との結合方法として、他社技術として、図1-1-11に示す通電かしめという方法があるが、被加工物にかしめピン部を形成しなくてはならず、通電かしめ専用の設備を準備することが必要となる。本研究のアルミ塑性結合の技術を用いることにより、アルミダイカスト製品と異材質部品の結合部に溝加工を施すだけで、結合することができ、また、汎用のプレス機にて結合できることから生産性も良く、特殊な設備を必要とすることなく、強固な結合が可能となる。

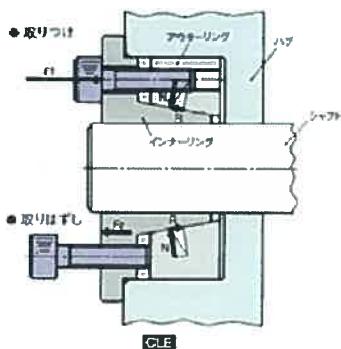


図1-1-8 摩擦接合概要

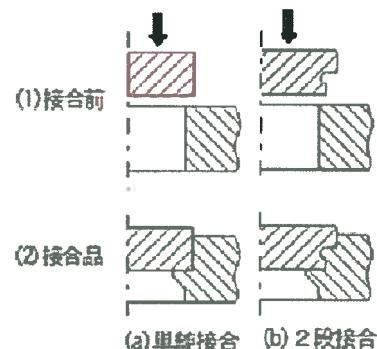


図1-1-9 シェーピング接合概要

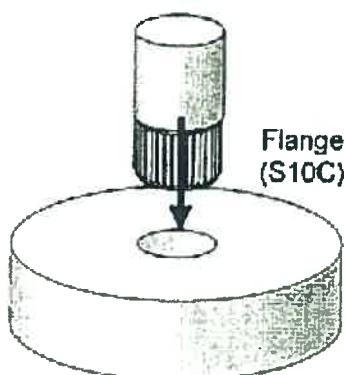


図1-1-10 焼入れスプラインの押し込み

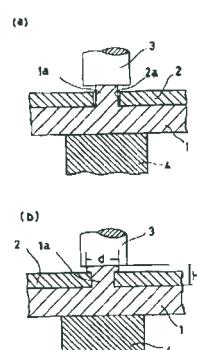


図1-1-11 通電かしめ方法

1 - 1 - 2. 研究目的および目標

(1) 当該特定ものづくり基盤技術において達成しようとする高度化の目標

(十一) 金属プレス加工に係る技術において達成すべき高度化目標

自動車部品にはアルミニウムダイカスト部品と鉄系部品との結合方法としてはボルト結合が多用されている。ボルト結合には一般に両部材に複数の貫通穴とねじ穴を要するために部品が大形になり、質量、部品点数が増加し、組み立てコストにも問題がある。以下、自動車エンジン機器部品であるアクチュエータハウジングをモデルにその課題と製品からの要請を示す。

(ア) 低コスト化：部品点数低減（5部品→2部品）及び投入材料の低減によるコスト削減（現状比40%低減）

(イ) 複雑形状化・一体化成形：アルミダイカスト製部品にスチール製部品をボルトで締結している構造から、耐摩耗性の必要な部位のみをスチール製部品とし、他の機能部位をアルミダイカスト製部品に一体化成形

(ウ) 軽量化：部品点数低減及び投入材料低減による軽量化（現状比34%低減）

上記を踏まえた高度化目標

(ア) 高張力鋼板、アルミニウム合金等の難加工材に対応した金型及び成形技術の構築

(イ) 複合加工、部品組立て及び工程短縮等を可能とする技術の向上

(ウ) 材料歩留まりの向上に寄与する技術の開発

（2）研究開発の技術的目標値

(ア) 硬脆アルミダイカスト円筒と鉄系部品の塑性結合の基本条件の確立

・目標値：軸方向強度 12,000N以上、回転方向強度 80Nm以上

・目標値：ダイカスト部品と鉄系部品との同軸度Φ0.02以下

但し、アルミダイカスト部品の結合部長さ 6mm、外径 32mm 内径 28mm

鉄系部品の外径 28mm 内径 13mm において

(イ) 軽量化、高精度化実現のためのアルミダイカスト、鉄系部品の最適形状の決定

・目標値：質量 34%低減、コスト 40%低減

(ウ) 量産加工性検証用設備、金型の開発

・試作による目標加工タクト 30秒の見極め

(エ) 品質保証のための技術確立

・モニタリング技術、特性管理データ

（3）技術的課題

(ア) 塑性変形能の乏しいアルミダイカストと鉄系部品の塑性結合技術の開発

(a) 延性の乏しいアルミニウムダイカスト材料にクラックを生じさせることなく塑性流動させる技術

(b) 高強度、高精度結合技術

(c) 薄肉ダイカスト部品を高強度に接合する技術：機器の高集積化など技術の適用拡大のために必要な薄肉材の塑性結合においては、ダイカスト、鉄系材間に高い結合圧力を保持することが難しくなる

- (イ) 軽量化実現のためのアルミダイカスト、鉄系組立製品の塑性結合設計技術の開発
- (ウ) 加工金型、設備の開発
 - ・高精度、高強度な塑性結合のための高精度、高剛性な金型・設備の開発
- (エ) 塑性結合品の強度・信頼性を保証する技術
 - ・新しい技術により構造が大きく変わった製品となる。信頼性の保証技術が重要である

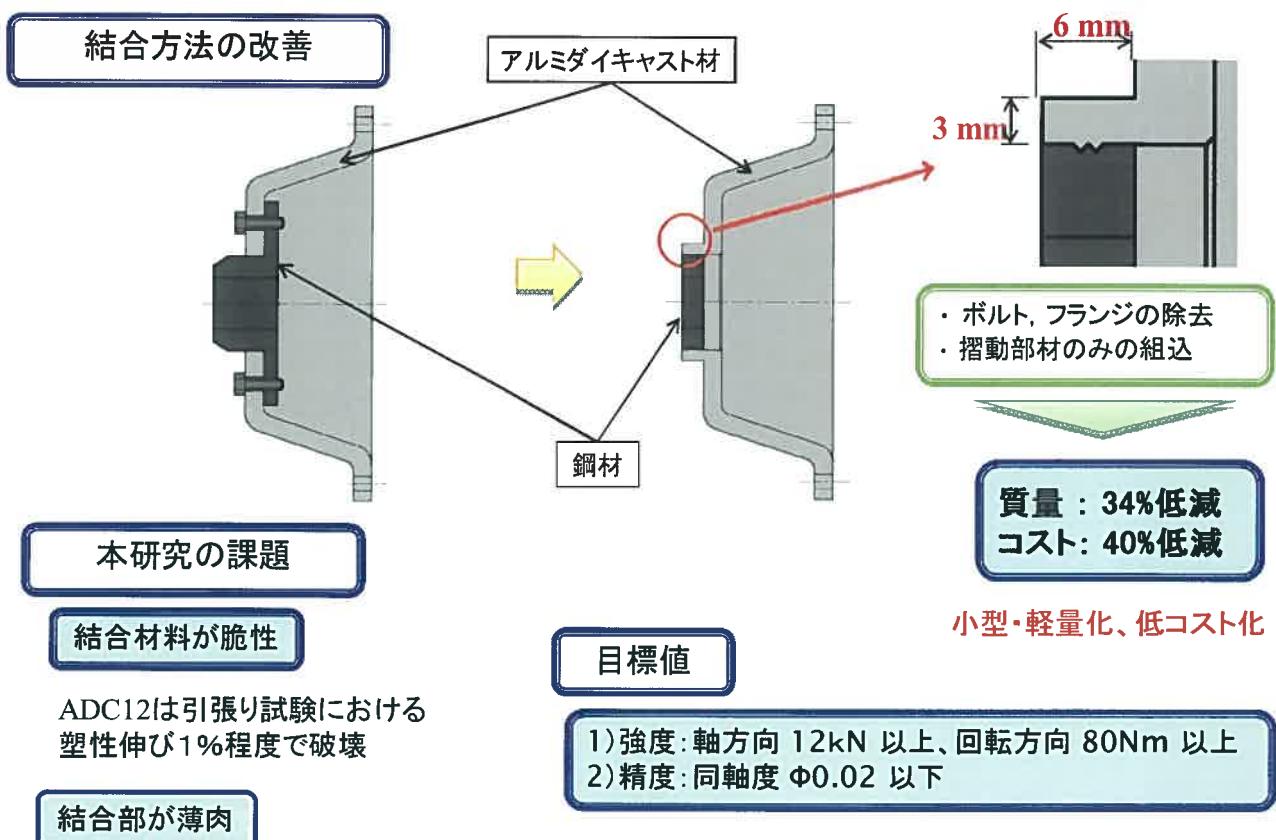
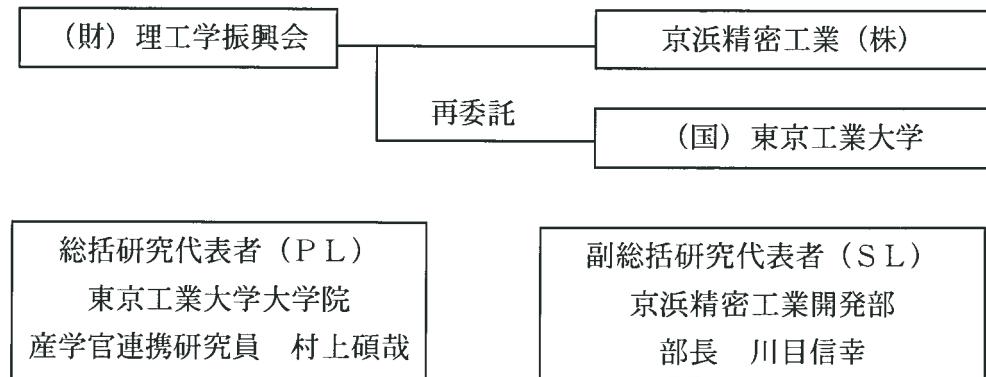


図1－1－12 研究開発の技術的目標値

1－2 研究体制

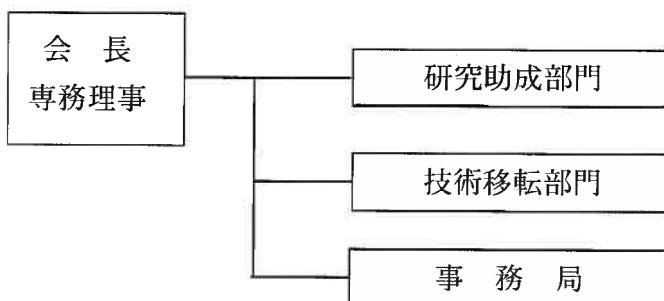
1－2－1. 研究組織



1 - 2 - 2. 管理体制

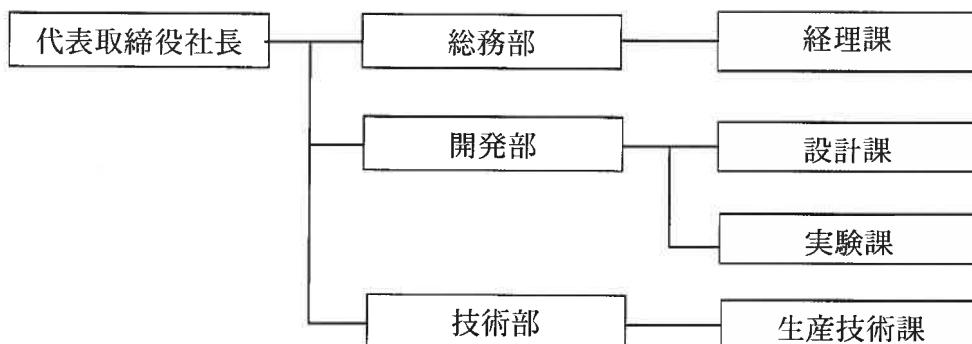
(1) 事業管理者

財団法人理工学振興会

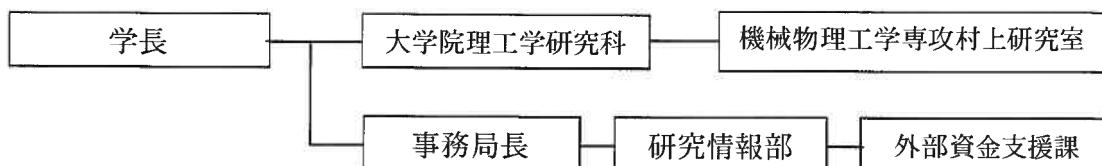


(2) 再委託先

(ア) 京浜精密工業株式会社



(イ) 国立大学法人東京工業大学



1 - 2 - 3. 研究者氏名

氏名	所属・役職	備考
村上碩哉	東京工業大学大学院理工学研究科産学官連携研究員	プロジェクトリーダー
川口信幸	京浜精密工業株式会社 開発部部長	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	
和田部雅司	京浜精密工業株式会社 開発部 設計課 課長	
佐藤雅人	京浜精密工業株式会社 技術部 生産技術課 課長	
大竹尚登	東京工業大学 大学院理工学研究科 教授	

1 - 2 - 4. 協力者

なし

1 - 3. 成果概要

平成21～23年度の研究開発項目とその成果を、以下の表1-3-1にまとめて示す。

表1-3-1 21～23年度研究開発項目と成果

開発項目・内容	21～23年度成果
1. アルミダイカストと鉄系部品の塑性流動結合技術	
1) アルミダイカストの圧縮応力場の塑性変形能の把握 2) 強度と精度確保の溝形状、パンチ形状などパラメータの決定 3) 薄肉アルミダイカストの高強度結合技術	1) ADC12は圧縮ひずみ18%までOKであり、変形能はクリアできそうである。材料の改善や変更は不要である。 2) 軸方向破壊強度を確保するために軸に設ける円周溝の形状、ピッチ、パンチ先端角度の軸方向強度に及ぼす影響を把握した。 3) ①回転方向の破壊強度を確保するために、対象品の環境温度(108℃)における歯溝の形状、数量がトルク強度に及ぼす基礎データを把握した。 ②温間での高強度化の新構造(钢管補強方式)の基礎データを把握した。
2. 軽量化、高精度化のための製品設計技術	
1) 革新的部品形状(軽量、高精度、高強度) 2) 設計者が利用しやすい塑性結合技術の基礎データの蓄積	1) 塑性流動結合による寸法精度への影響を把握した。拘束リングの効果により精度低下は生ぜず、設計仕様は確保できる見通しである。 2) ①実物モデルでの軸方向、回転方向の冷間、温間の静的強度データを把握した。 ②実物モデルの回転方向の温間の耐久強度データを把握した。
3. 高強度、高効率加工設備の開発	
1) 量産可能な高精度塑性結合金型構造と機構の開発 2) 塑性結合用加工設備の開発(プレスの構造)	1) 実物モデル用金型を用いた塑性流動結合実験を行い、機械的には量産が可能であることを確認した。 2) 製作したプレスに関して動作、機能に問題ないことを確認したが、加工荷重の測定が精度が不足していたため、金型にロードセルを内蔵する方式で改良を図った。
4. 塑性結合品の強度・信頼性保証技術	
1) 量産信頼性確保のための加工モニタリング方式 2) 疲労強度他、信頼性確保のための試験法とデータの蓄積	1) ①X線検査装置により、結合溝内の材料流動のモニタリングが可能であることを確認した。 ②X線検査装置により求めた円周溝への充填率と軸方向強度との関係を把握した。 ③結合荷重ーストローク線図より、結合溝内の材料流動のモニタリングが可能であることを確認した。 ④結合荷重ーストローク線図などを採取して、量産時には、目標タクト30秒を確保できる見通しを得た。 2) ①破壊トルク測定基礎実験装置、ねじり繰返し負荷試験装置の製作し、温間(108℃)でのねじり繰返し負荷基礎データと疲労寿命試験に活用した。 ②ドイツのボルシェエンジニアリング社において高温、振動下における負荷寿命試験を行い、現状の強度特性を把握し、川下ユーザと目標値の修正を行った。 ③静的強度試験、耐久強度試験によるデータを蓄積するとともに、強度などの目標値をクリアできる条件を把握した。

1 - 4. 当該研究開発の連絡窓口

財団法人理工学振興会 事務局長 泉洋一郎

TEL : 045-921-4391 FAX : 045-921-4395 E-mail : cpse@titech-tlo.or.jp

2. 研究内容および成果

2-1. 結合方法の検討と推進計画

図1-1-1-2に示したように、本研究で目標とする製品は、外径 $\phi 26\text{mm}$ の鋼製の結合品を外径 $\phi 32\text{mm}$ 以内のスペース内で、強度が軸方向 12kN 以上、回転方向 80Nm 以上で結合する必要がある。すなわち結合部分のハウジング側のスペースは厚さ 3mm 以内の円筒部である。

したがって、ダイカストハウジングと鋼製部品とを図1-1-2に示したような結合材を使用すると仮定すると、図2-1-1にアルミダイカストハウジングの結合部付近を示すが、先端の 3mm の厚さにダイカストと結合材を納めることになり、アルミダイカスト部分が薄くなり強度確保が困難と予想される。

そこで、以後は、アルミダイカストの結合部分の材料を鋼部品の溝内に塑性流動させて結合する方式を検討することにした。

図2-1-2はそのアルミダイカストの結合部分のみを取り出して結合する方法の概要を示す。鋼部品を溝のついた軸としてモデル化し、アルミハウジングは結合部のみ薄肉円筒にモデル化している（これを以下ではダイカストリングと呼ぶ）、同図において、塑性流動はそのダイカストリングの半径方向の拡がりを抑止するために拘束リングの中に挿入し、この状態でダイカストリングの上部をパンチで加圧することにより、ダイカストリングの材料をは鋼軸の溝部に塑性流動させて結合する。

ここで、問題となるのが、結合材として塑性流動させるアルミダイカスト材料の塑性変形能である。そこで、本プロジェクトの基本となる塑性流動結合技術の研究開発のステップを図2-1-3のように行うこととした。左にステップを示し、右にそれらの結合実験におけるテストピースの概要を示す。

- ① 先ず、前提となるダイカスト素材 ADC12 の塑性変形特性を確認する。もし、塑性変形能が不足なら、材料の変更や改良が必要になる。
- ② これまで東工大が取り組んできた研究と同一サイズの内径 $\phi 20$ のダイカスト材を用いて、ダイカスト材を結合材として、溝を設けた中実軸と塑性流動結合実験を行う。ここでは、ダイカストリングの厚さを変え、中実軸には各種形状の溝を設け、またパンチの幅、パンチの先端角度を変えるなど塑性流動結合の基礎データを収集する。
- ③ 実スケールである内径 $\phi 26\text{mm}$ 、外径 $\phi 32\text{mm}$ のダイカストリングを用い、また軸部品は内径にスプラインを設けて、塑性流動結合における精度の検討も行う。
- ④ さらに、実製品寸法のアルミダイカストハウジングモデルを用いて、材料の拘束条件が結合品の強度、精度に及ぼす影響や、素材の着脱法など、一般の油圧プレスを用いて量産する課題の検討を行う。

上記とともに、本研究全体の研究開発項目と開発実施時期を表2-1-1に示す。また、以下にて、項目、内容毎に実施内容と成果を述べる。

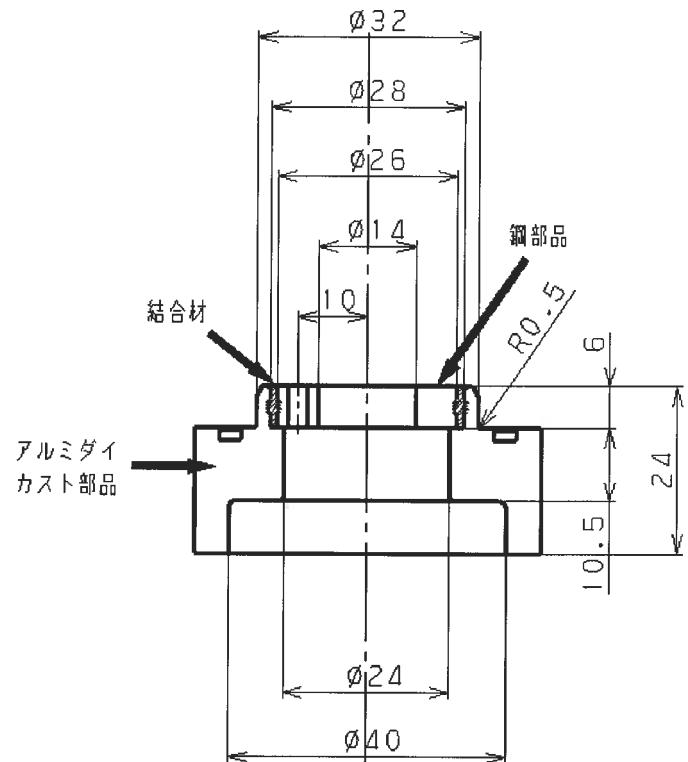


図2-1-1 アルミダイカストハウジングの塑性流動結合

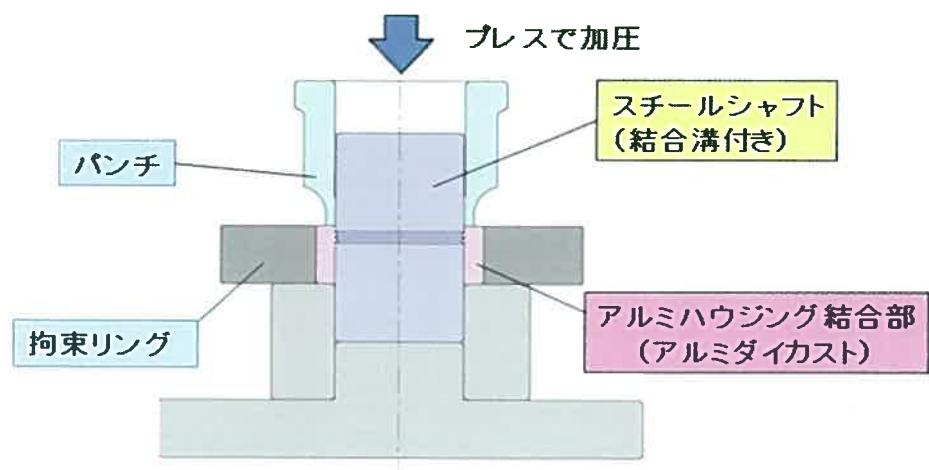


図 アルミダイカストと軸の塑性流動結合
(アルミダイカスト塑性流動型)

拘束リングでアルミダイカストのハウジング
結合部の外周拡がりを拘束し、スチールシ
ャフトの溝内へ流入させる。

図2-1-2 アルミダイカスト塑性流動結合のモデル実験概要

塑性流動結合技術の研究開発のステップ (結合技術とその評価)

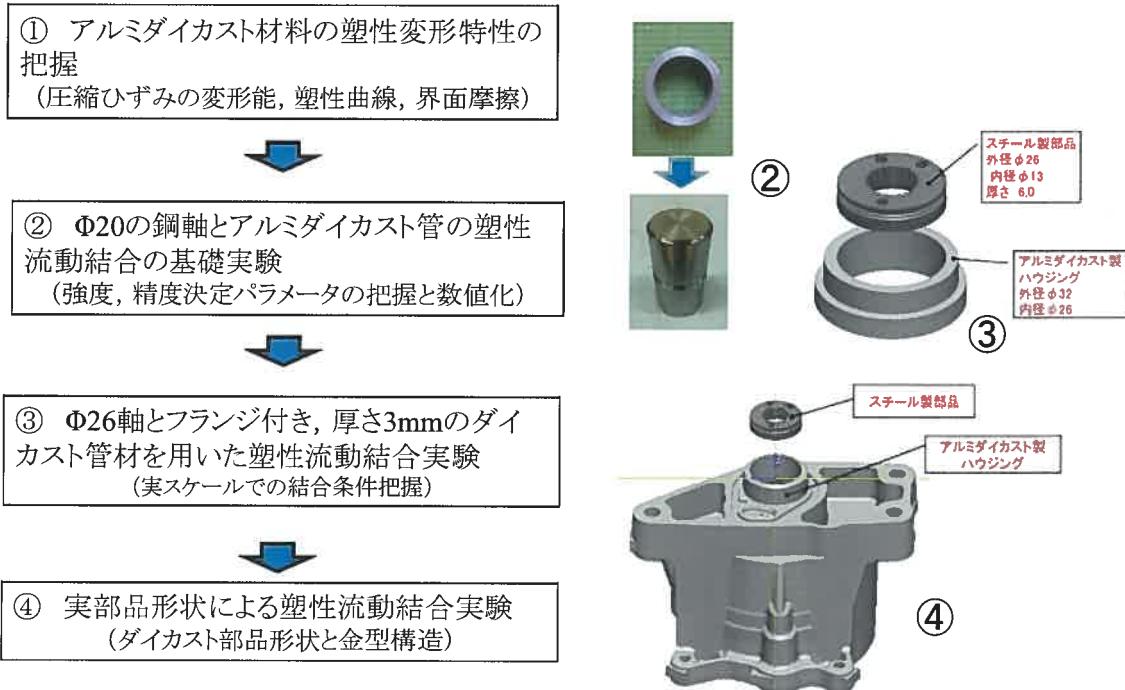


図2－1－3 塑性流動結合技術の研究開発のステップ

表2－1－1 本研究全体の研究開発項目と開発実施時期

No.	開発項目	内容	時期
1	アルミダイカストと鉄系部品の塑性流動結合技術	1) アルミダイカストの圧縮応力場の塑性変形能の把握 2) 強度と精度を確保するための溝形状, パンチ形状などパラメータの決定 3) 薄肉アルミダイカストの高強度結合技術（材料の変形拘束条件把握）	21年度 21, 22 21, 22
2	軽量化, 高精度化のための製品設計技術	1) 軽量化, 高精度化, 高効率&安定生産に適した革新的部品形状 2) 設計者が利用しやすい塑性結合技術の基礎データの蓄積	(21), 22, 23 (21), 22, 23
3	高強度, 高効率加工設備の開発	1) 量産可能な高精度塑性結合金型構造と機構の開発 2) 塑性結合用加工設備の開発（プレスの構造, 方式）	(21), 22 22, 23
4	塑性結合品の強度・信頼性保証技術	1) 量産信頼性確保のための加工モニタリング方式 2) 疲労強度他, 信頼性確保のための試験法とデータの蓄積	21, 22, 23 22, 23

2-2. 塑性変形能の乏しいアルミダイカストと鉄系部品の塑性流動結合技術の開発

2-2-1. アルミダイカスト材料の圧縮応力場の塑性流動性の把握と塑性結合への適用

アルミダイカストは引張試験においては1~2%の伸びで破断するといわれている。一方、塑性流動結合においては、その塑性変形は基本的には、パンチの加圧に伴う塑性変形であるため、圧縮応力場での塑性流動である。

(1) 円柱素材の圧縮試験

圧縮応力場の変形として、円柱素材の圧縮試験を行った。圧縮試験においては、試験片の圧縮板との界面の摩擦の影響で、試験片がバルジング（樽形変形）を生じる。そこで、ワセリンを塗布した厚さ0.05mmのテフロンシートを直径12mm、高さ18mmの試験片の上下端面に挿入し、0.1mmずつの圧縮を繰り返す方法で、破壊するまで圧縮試験を行った。2個の試験片は何れも真ひずみ0.15程度でクラックが入った。

図2-2-1のその結果を示す。2個の試験片の応力、歪関係はほぼ同等であり、真ひずみ0.15程度までの塑性変形の能力があることが分かった。

この応力ひずみ関係は22年度に行う塑性流動結合の有限要素シミュレーションに活用する予定である。

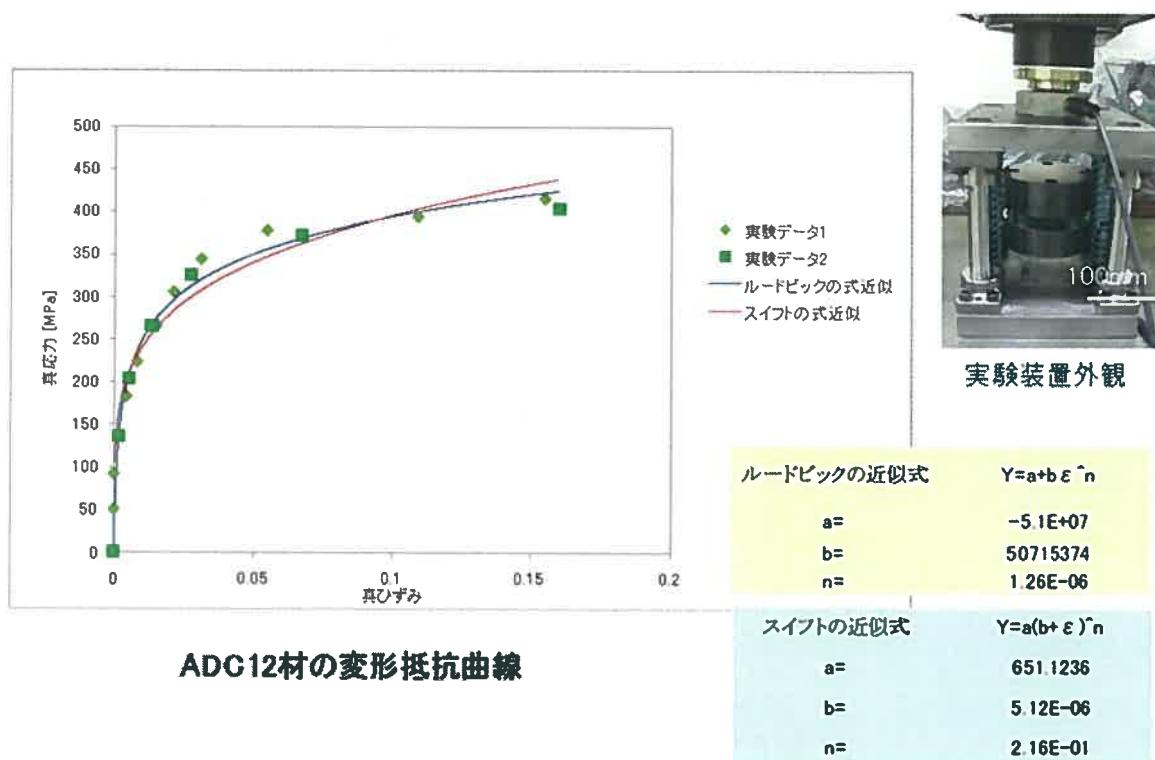


図2-2-1 アルミニウムダイカスト材ADC12の圧縮試験

(2) 外周拘束リング圧縮試験

図2-2-2に示すようなリング状試験片の外周部を拘束しながら圧縮試験を行う実験を行った。塑性流動結合は鋼軸の溝部に、外側のダイカスト材料が流入するために、材料が円周方向に縮径する。これは、図2-2-2に示すようなリング状試験片の外周を拘束しながら圧縮する試験と変形が相似である。

実験は外径 $\phi 20\text{mm}$ 、内径 $\phi 12\text{mm}$ 、高さ 5mm のアルミダイカスト試験片をスリーブ内で圧縮し、 0.1mm 毎に内表面を観察し、試験片にひびが入るまで繰り返し圧縮した。

その結果、ひびなしで 9.8mm （約18%）圧縮が可能であった。深さ 0.5mm の結合溝の場合内径が5%の圧縮ひずみが必要であるために、この18%は塑性変形能としては十分であると考えることができる。すなわち、塑性流動結合にADC12を用いることは可能であり、材料の改善や変更は必要ないとの結果を得た。

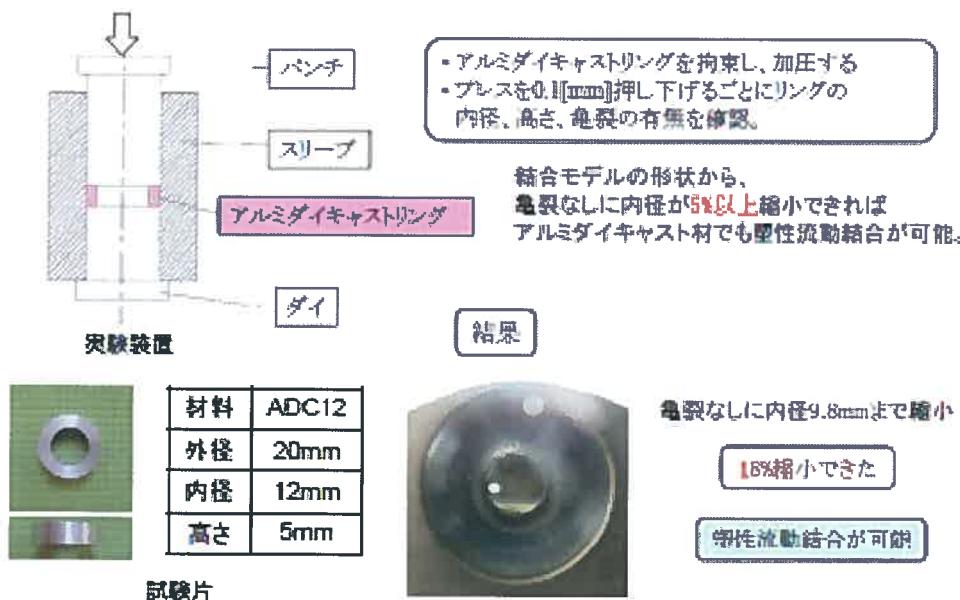


図2-2-2 アルミニウムダイカスト材の外周拘束圧縮試験

2-2-2. 強度と精度を確保するための溝形状、パンチ形状など各種パラメータの決定
 $\phi 20$ の鋼軸とアルミダイカストリングを用いての塑性流動基礎実験として、各種パラメータが結合強度に及ぼす影響を把握した。

強度に影響するパラメータとしては、図2-2-3に示すように、以下のものが考えられる。

- ① パンチ荷重（圧力）
- ② アルミダイキャストリングの肉厚
- ③ パンチの幅
- ④ 結合溝形状
- ⑤ パンチ先端の角度

ここでは、これらのパラメータのうち④～⑤までの値を各種変えて、接合条件が強度に及ぼす影響を明らかにした。(21年度に、①～④までパラメータの影響を調査済。)
また、トルク強度向上策として、各種の対策を検討した。

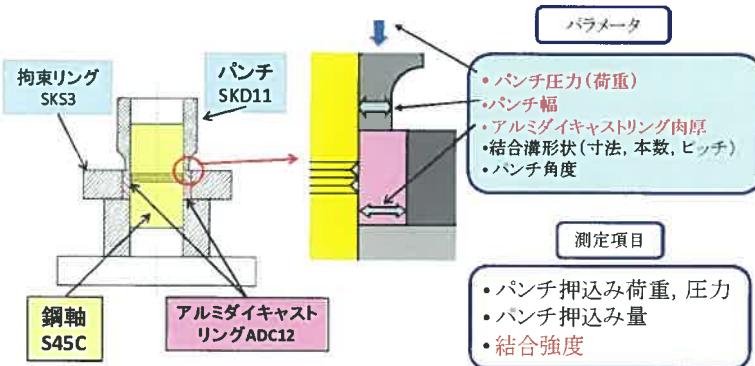


図2-2-3 塑性流動結合基礎実験 ($\phi 20$ 軸モデル)

(1) 結合溝形状、パンチ形状などが軸抜き荷重に及ぼす影響

図2-2-4に示すように、結合溝形状の溝数、溝幅及び平行部の長さを変えたもので軸方向破壊荷重の測定を行った。なお、パンチ角度としては、 90° と 75° のものを使用した。

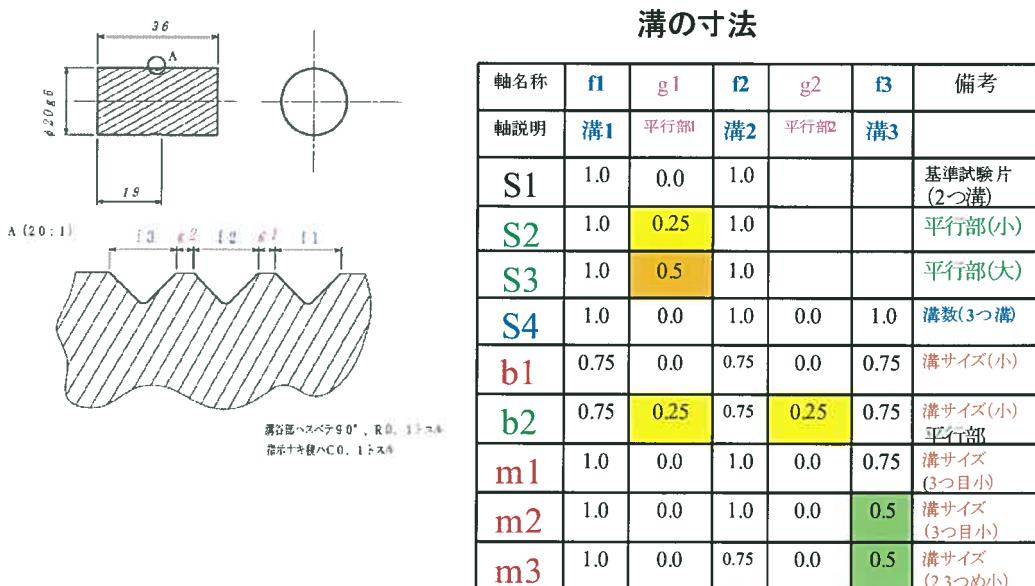


図2-2-4 軸方向破壊強度試験に供した軸溝形状

図2-2-5に90°パンチ角度品における軸抜け荷重の測定結果および図2-2-6に75°パンチ角度品における軸抜け荷重の測定結果を示す。

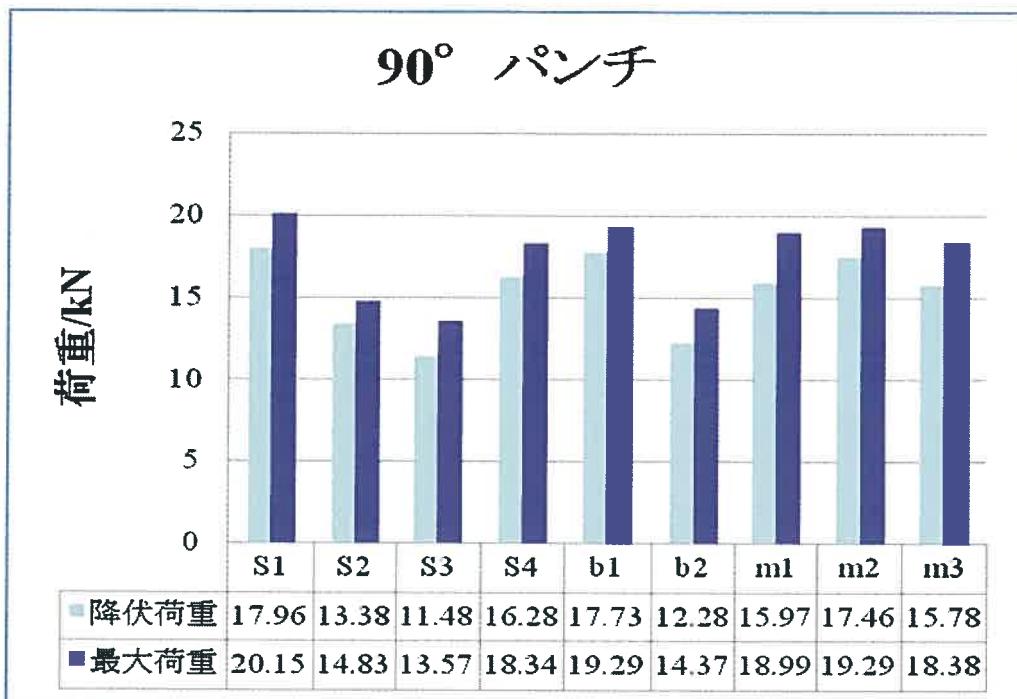


図2-2-5 軸溝形状違いによる軸方向破壊強度試験結果（90° パンチ）

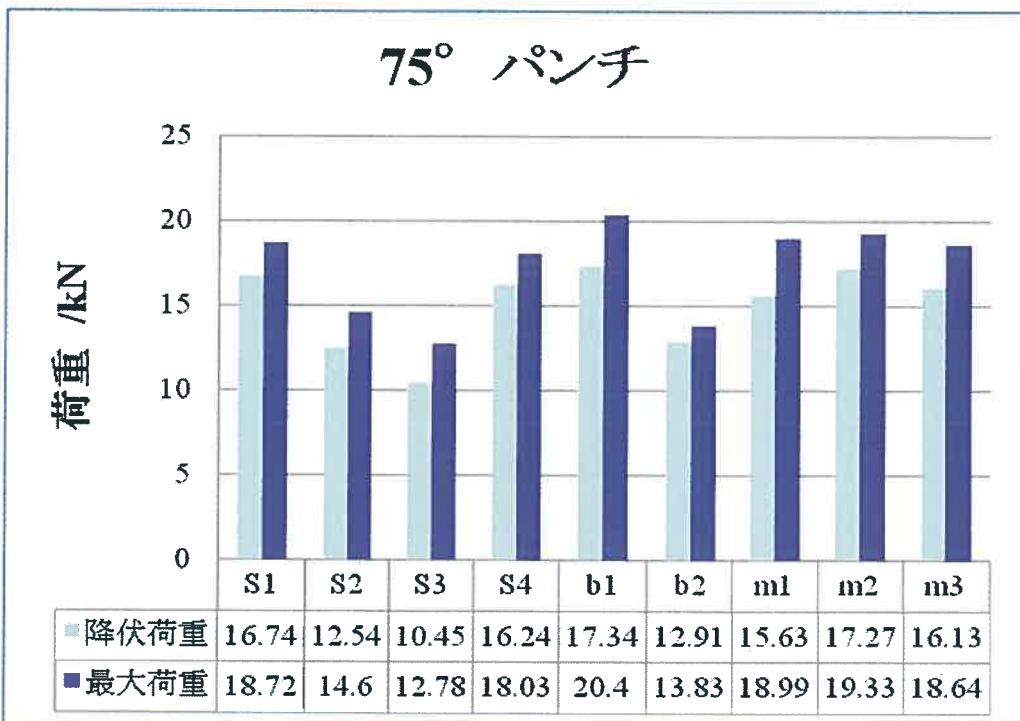


図2-2-6 軸溝形状違いによる軸方向破壊強度試験結果（75° パンチ）

結合時のパンチの圧力が 1.25GPa、パンチ幅が 1.5mmでの結果である。90° パンチの方が少し 75° パンチよりも強度が強いが、軸形状に関してはどちらも同じような傾向を示している。平行部が存在する S2、S3、b2 は荷重が小さくなっている。溝数が 3 つ (S4、m1、m2、m3) のものと 2 つ (S1) との強度はあまり変わらない。溝サイズが異なる m1、m2、m3 の強度は、あまり変わらない。

(2) トルク強度向上策の検討

表 2-2-1 トルク強度向上策の検討結果

N. o.	名称	加工法概要	長所	問題点	期待度
1	ホブ切削	歯車を切削すると同様のカッターで軸を回転させながら、軸の外形に歯形を切削する 加工範囲：②	・軸の盛り上がりがないため、リングに軸を挿入するのは容易 ・歯形精度は良い	・加工コスト（工具費、加工費） ・①は工具径を小さくすれば可能？	△
2	プローチ切削	軸方向に工具を移動させながら、歯形を切削する。 加工範囲：②	・生産性が高い。軸内面の穴部のスラインと同時加工も可能 ・盛り上がりがない	・円周溝の両側のみでなく、軸端から歯形が切削される（歯形の不要な部分まで加工される）	△
3	歯形研削	軸を割り出しながら、砥石で歯形を研削加工する。 加工範囲：②	・実験に適する ・試作の工具費は安価	・生産性、コスト	△ 実験
4	ローレット	回転する工具で歯形を成形する（塑性加工）。 加工範囲：①、② 加工方式に自由割り出し、強制割り出しがある。できれば、自由割り出し。	・生産性が高い ・①：盛り上がりがなく、リングへの軸の挿入が容易 ・②：強度大が期待できる	・歯形の精度、安定性 ・①：強度十分か？ ・②歯形成形時に軸材が盛り上がり、軸挿入に荷重重要。強度は高い	◎
5	ショットブラスト	溝の周辺をショットで粗面化して、回転方向の抵抗とする。 加工範囲：①、②	・加工は容易	・強度が向上するために十分な粗い面の加工が可能かどうか？	△
6	据込み (ステーキング)	軸を跨ぐような形の上下のパンチで軸を加圧して、V形の溝形状を成形する。 1回に4個の溝を成形、2回で8溝。	・ローレットよりも安定	・溝数12個でどの程度の強度向上が可能か？	○
7	押し出し (スライド)	あらかじめ、スライン形状を塑性加工する。	・トルクの向上は期待できる	・スライン成形時の精度低下⇒深さ0.5mm程度なので、精度低下はない。 中間部のみはできない	○

軸方向破壊強度については、目標強度である 12KN 以上を得ることができたが、トルク強度については、目標強度である 80N·m 以上を達成できていなかったため、トルク強度向上策の検討を行った。表 2-2-1 に、トルク強度の向上策の検討結果を示す。

トルク強度向上策として、円周方向二本溝の基準試験片に深さ、本数を変えた歯溝を付加して、トルク強度試験を行った。図 2-2-7 に実験に供した結合溝形状を示す。

軸径Φ20モデル

実験に供したトルク強度試験用軸の結合溝形状

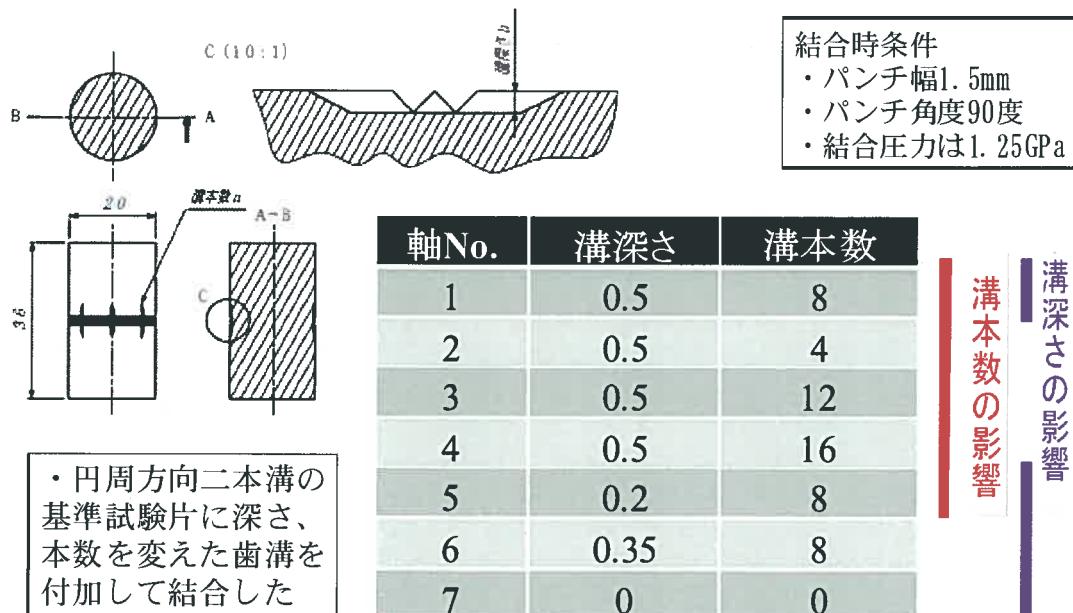


図2-2-7 トルク強度試験軸の結合溝形状

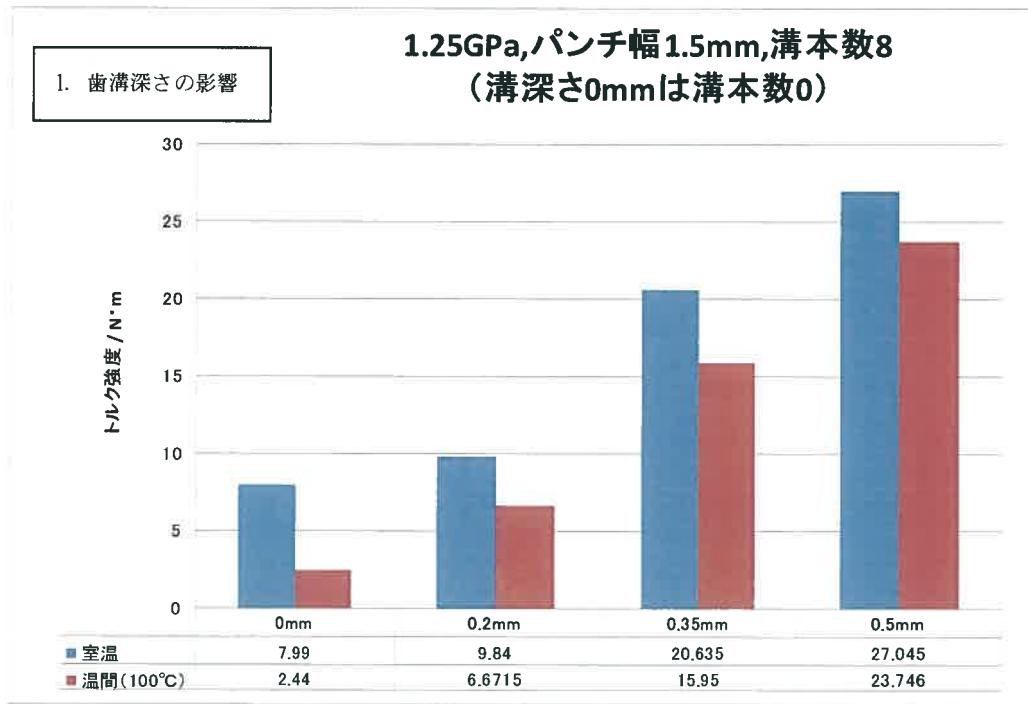


図2-2-8 トルク強度試験結果（歯溝深さの影響）

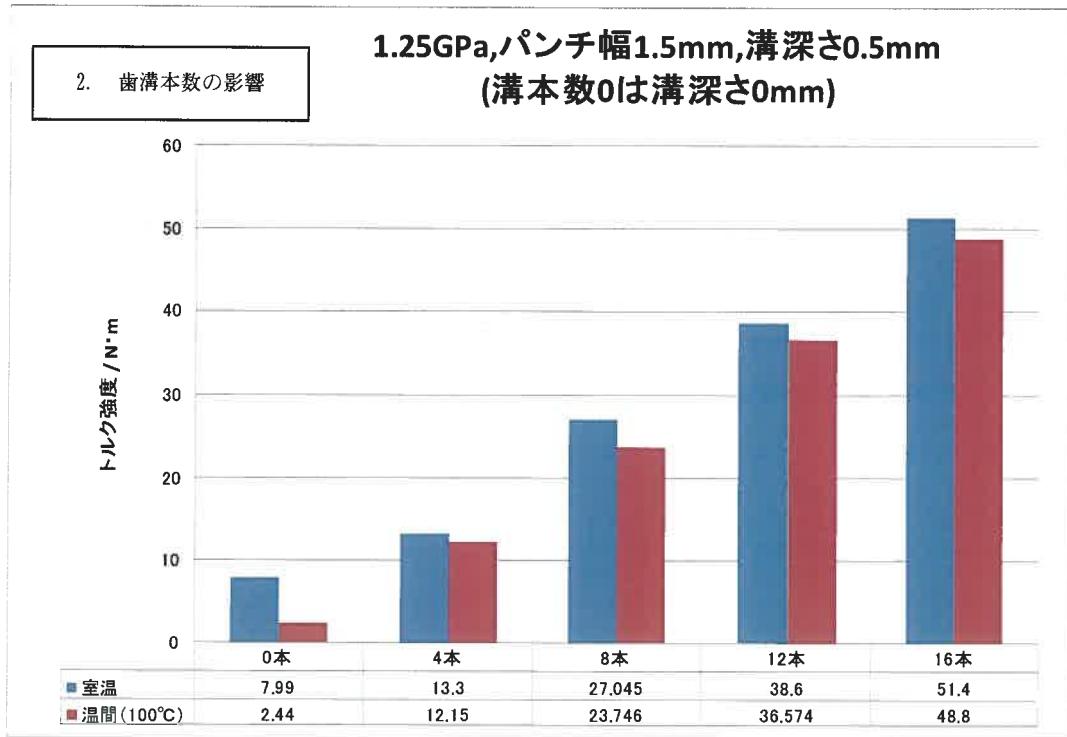


図2－2－9 トルク強度試験結果（歯溝本数の影響）

図2－2－8は、溝本数8本で、歯溝深さを0mm、0.2mm、0.35mm、0.5mmと変えた場合の室温及び温間のトルク強度試験の結果である。歯溝深さが深さに比例して、トルク強度は大きくなる。また、溝深さが0.2mm程度では、温間のトルク強度が低い。

図2－2－9は、溝深さ0.5mmで、歯溝の本数を0本、4本、8本、12本、16本と変えた場合の室温及び温間のトルク強度試験の結果である。歯溝の本数に比例して、トルク強度は大きくなる。

図2－2－10にトルクによる破壊強度試験に供した結合品の外観写真を示す。



図2－2－10 破壊強度試験に供した結合品の外観写真

2-2-3. 薄肉アルミダイカスト対応の高強度塑性結合技術の開発：材料の変形拘束条件把握

薄肉のアルミダイカスト結合のためには、ダイカストリングが薄肉であるために、結合強度は軸とリングの締付け力が大きくならない。そこで締付けによる摩擦抵抗よりも、ダイカスト材料を軸の溝部に塑性流動させて、そのインターロックによる効果の割合が大きくなると考えられる。

そこで、パンチの加圧により高い圧力を発生させるとともに、拘束リングでダイカスト材料の外周への逃げを防止し、軸部に設けた溝に材料を確実に塑性流動させる必要がある。このとき発生させた圧力は拘束リングに内圧として作用する。

図2-2-12は幅3mmのパンチを用いて塑性流動結合を行った際に破損（割れが発生した）拘束リングである。ダイカストリングの肉厚が3mmするために、材料が拘束リングと下型、パンチで密閉され、材料の逃げ場のない状態での加圧であるために、高い内圧を生じて破損したものである。拘束リングに負荷できる限界となる内圧の数値的な把握は今後の課題であるが、内圧が低い範囲での材料流動の促進を図るよう、パラメータの決定が必要である。また、拘束リングの内圧強度に関して留意することも必要である。



拘束リング
外径 : $\phi 50\text{mm}$
厚さ : 10mm
材質 : S45C
熱処理 : 焼入れ、焼き戻し

図2-2-11 割れた拘束リング
(ダイカストリング厚さ3mm、パンチ幅3mm、圧力1.25GPa)

2-3. 軽量化、高精度化実現のためのアルミダイカスト、鉄系部品の製品設計技術の開発

2-3-1. 軽量化、高精度化、生産性、安定性に適した革新的かつ最適な部品形状の設計

(1) 軽量化、低コスト化の目標値及び技術的な目標値を達成するために、まず初めにアルミダイカスト部品とスチール製部品の間に延性のよい材料を用いた結合材を使用する塑性流動結合法を検討した。しかしながら、アルミダイカスト部品の結合部の外径を相手部品との関係から大きくすることができないため、結合材を入れるとアルミダイカスト部材の結合部の肉厚が1.5mmと薄くなり、アルミダイカスト部材の結合部の強度を確保できるかどうかが心配点となった(図2-3-1)。

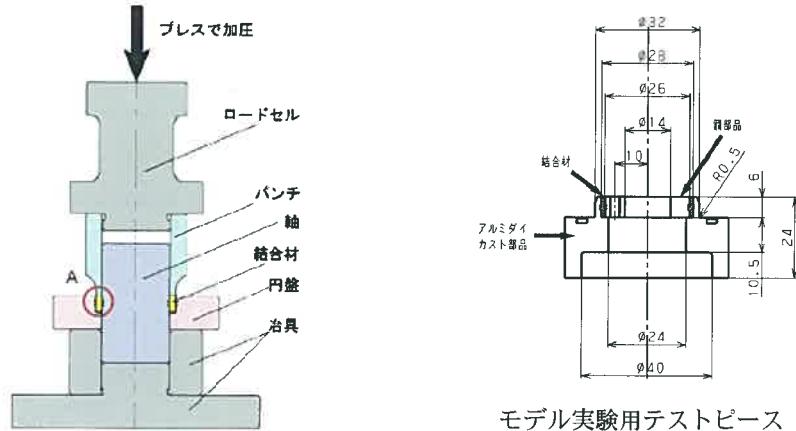


図 2-3-1 アルミダイカスト部品とスチール製部品の塑性流動結合法（案 1）

- (2) アルミダイカスト部材の結合部の肉厚を確保するため、結合材を廃止して、アルミダイカスト部品を直接パンチで加圧することにて、スチール製部品の溝部に流動させることを検討した。結合材を使用しないことより、アルミダイカスト部品の結合部の肉厚は、1.5mm から 3mm まで厚くすることが可能となったが、まだ、プレス加圧時の荷重を受けるまでに充分という肉厚までには厚くすることはできなかった。そこで、プレス加圧時の荷重に耐えうる結合法として、アルミダイカスト部品の結合部の外周部に拘束することにより、圧縮応力場における塑性流動結合法を採用した。（図 2-3-2）

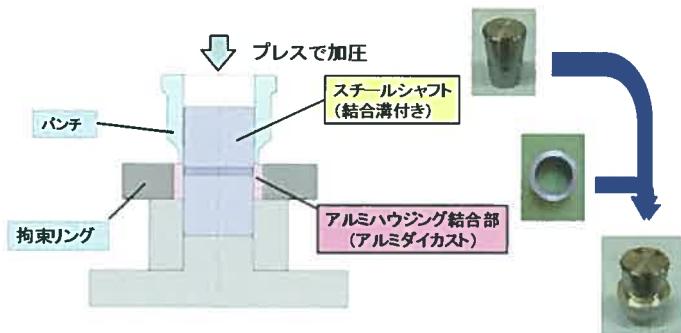


図 アルミダイカストと軸の塑性流動結合
(アルミダイカスト塑性流動型)

拘束リングでアルミダイカストのハウジング
結合部の外周抵がりを拘束し、スチールシャ
フトの溝内へ流入させる。

図 2-3-2 アルミダイカスト部品とスチール製部品の塑性流動結合法（案 2）

- (3) 圧縮応場における塑性流動結合法を採用することとして、まず初めに、製品形状に合わせた簡易的な形状をしたテストピースを作成した（図-2-3-3）。結合部の寸法は、アルミダイカスト部品の外径Φ32mm、内径Φ26mm、スチール製部品の外径Φ26mm、内径Φ13mm、厚さ 6mm とした。次に、製品の要求精度を満足させるための治具構造を検討した。治具構造は、治具 1 にて、アルミダイカスト部品とスチール製部品の位置決めをさせる構造とともにパンチのガイドをさせる構造とした。また、拘束リングをアルミダイカスト部品の外周部にはめこむ構造とし、治具 2 にて、拘束リング

を支える構造とした。塑性流動結合後のスチール製のスプライン部とアルミダイカスト部品の外周部との同軸度の要求が厳しいため、スチール製部品の外周部とアルミダイカスト部品の穴の内周部にて、位置決めができる様にハメアイ寸法を決定した。(図 2-3-4)

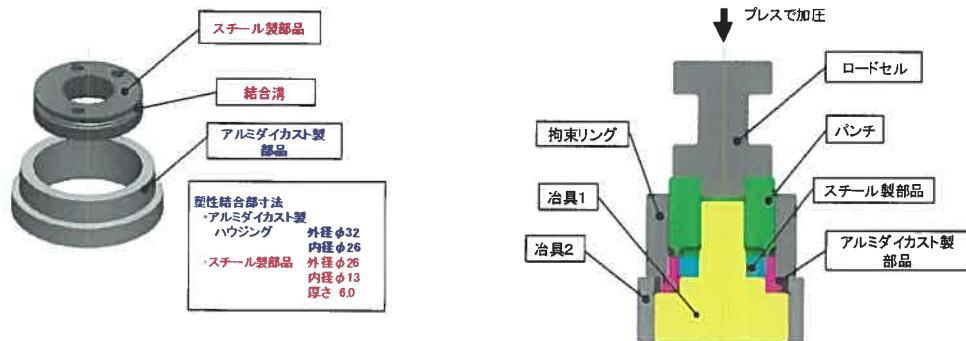


図 2-3-3 簡易的な形状のテストピース

図 2-3-4 プレス治具の構造

- (4) 製品形状に合わせた簡易的な形状をしたテストピースでの検討結果をもとに、より量産形状に近づけた製品形状の検討を行った。スチール製の部品は、簡易的な形状のテストピースで用いたものと同じものを使用することとした。アルミダイカスト部品の結合部の形状は、簡易的形状のテストピースで使用したものと同一形状とし、従来のスチール製部品で構成されていた内径形状部分をできるだけ軽量化できる様に形状の設計を行った。スチール製ベアリングホルダーのスプライン部を小型化したスチール製部品としアルミダイカスト部品に塑性流動結合させ、アルミダイカスト部品の内径形状部分の最適化を図ることにより、現状の製品重量の 874g から、723kg と 17% 低減の軽量化をすることができた。当初に予定していたベアリングのホルダー部のアルミダイカスト化については、顧客の要求より、スチール製のプレートを使用することとなったため、反映を見送ったが、更なる軽量化アイテムとして、今後も検討を進める。ベアリングのホルダー部のアルミダイカスト化の反映の際には、軽量化の目標値である 34% 低減を達成できる見込みである。現状の製品形状と今回の塑性流動結合を用いたスチール製部品とアルミダイカスト製部品の形状モデルを図 2-3-5 に示す。また、図 2-3-6 に現状形状と開発形状の断面形状の比較を示す。

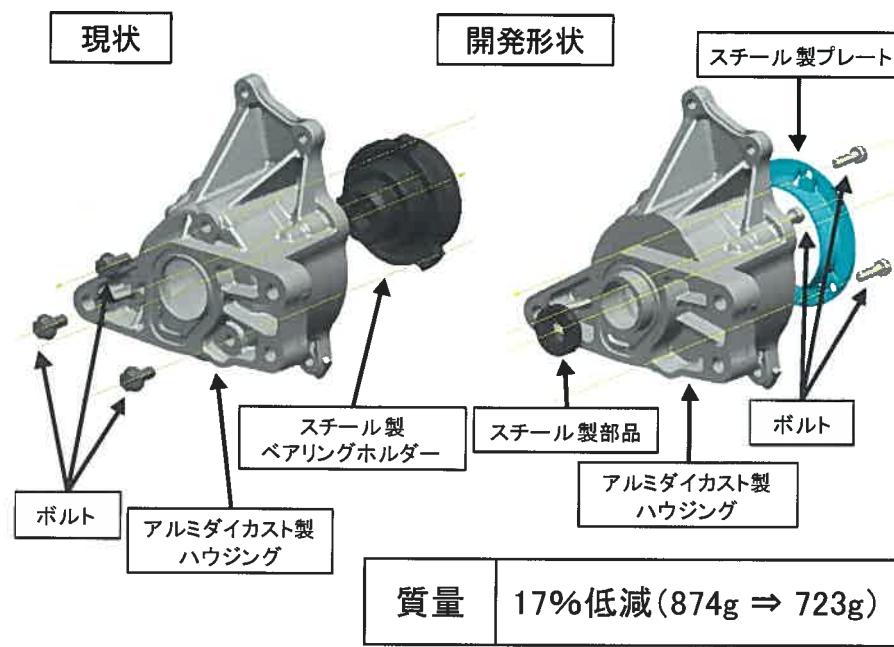


図 2－3－5 現状の製品と塑性流動結合の量産モデル

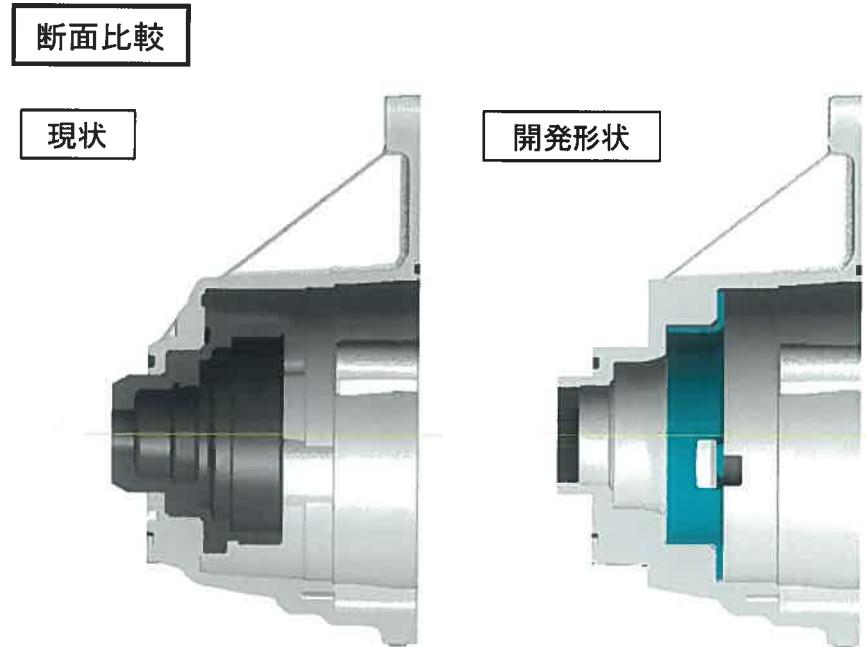


図 2－3－6 現状の製品と塑性流動結合の量産モデルの断面形状の比較

2-3-2. 塑性結合技術データの蓄積

塑性結合は、パラメータが多いが基礎となるデータが不足している。そこで、設計の基礎となる各種のデータ取得を実施した。以下にその実験データを示す。

(1) スプライン精度の影響

実製品モデル結合時の鋼軸内側のスプライン精度変化を測定したものを図2-3-7に示す。結合時において、鋼軸内側のスプライン精度はほとんど変化していない。

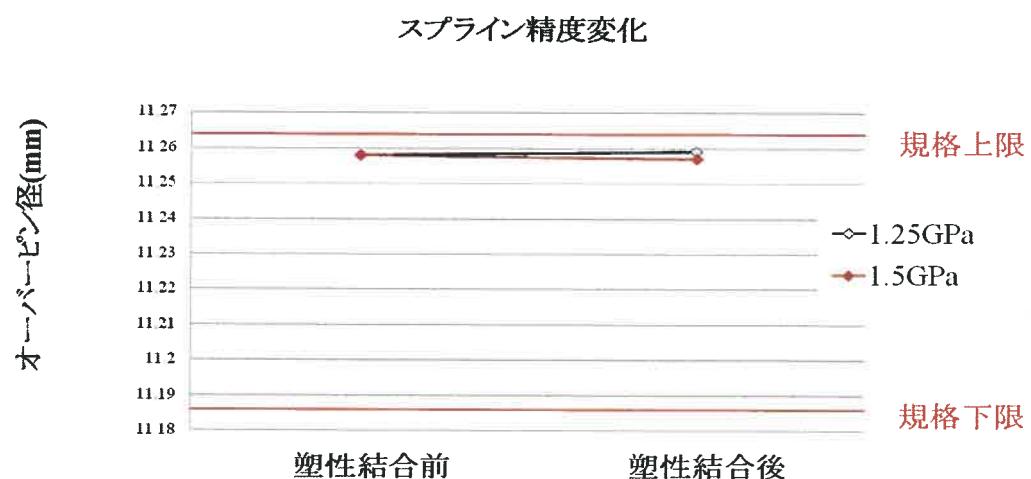


図2-3-7 実製品モデル結合時のスプライン精度への影響

(2) ハウジング外径変化量

製品モデル結合時のハウジング外径の寸法変化量を測定したものを図2-3-8に示す。結合時において、外径寸法は変化するが、バラツキはほとんどない。あらかじめ寸法変化量を見込んだ外径寸法を設定することにより、結合後の製品寸法を確保することが可能である。

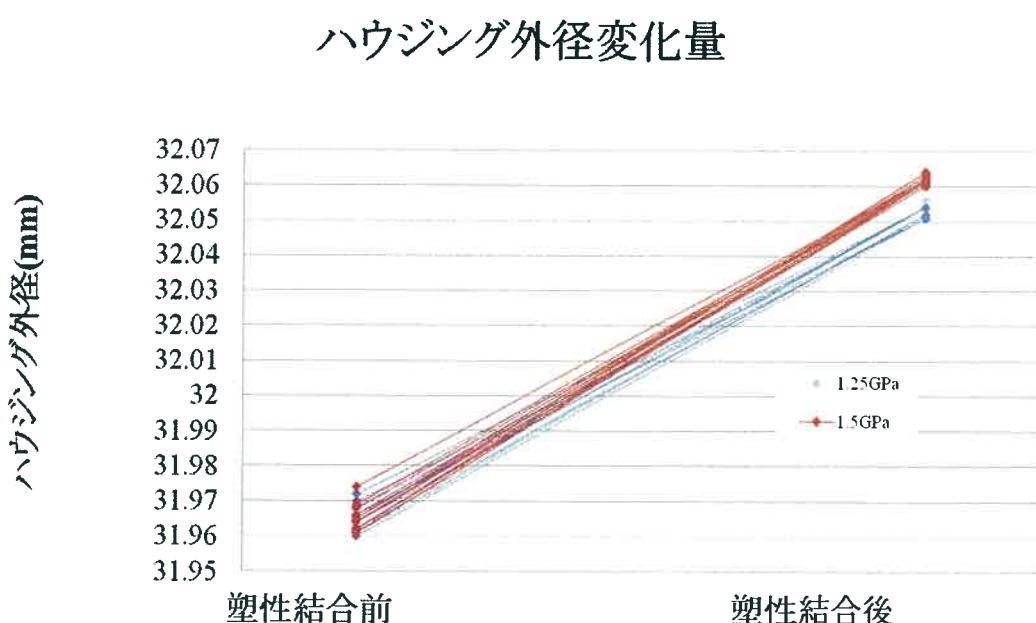


図2-3-8 実製品モデル結合時のハウジング外径寸法への影響

(3) ローレット溝付き品の軸方向強度

図2-3-9に、ローレット溝付き品(溝深さ 0.2mm)のパンチ溝深さと軸方向強度を示す。目標強度である12KN以上を満足している。

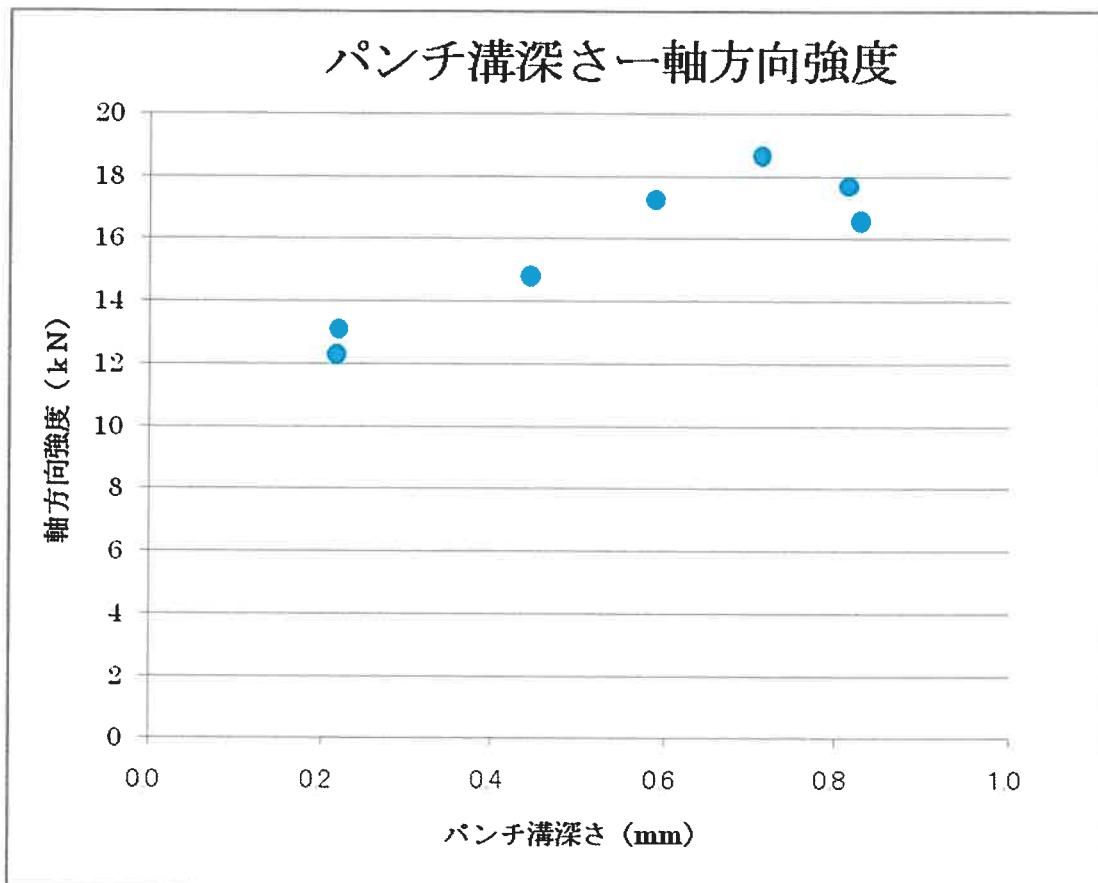


図2-3-9 ローレット溝付き品での軸方向強度

2-4. 高精度・高効率加工設備の開発・導入

2-4-1. 量産可能な高精度塑性結合金型構造と機構の開発

塑性結合用プレス機の概要について、図2-4-1に示す。

プレス機の概要

仕様

プレス能力	: 500 kN
スライド引上げ能力	: 100 kN
スライドストローク	: 200 mm
ノックアウト能力	: 50 kN
ノックアウトストローク	: 100 mm



図2-4-1 塑性結合プレス機の概要

量産形状に近い製品形状モデルにて、塑性流動結合を実施するため、プレス金型構造の検討を行った。プレス機のメーカーであるアイダエンジニアリング(株)の協力のもと、プレス金型構造の検討を行った。図2-4-2に、今回使用する油圧プレス機に搭載して実験検討するための金型の全体図を示す。

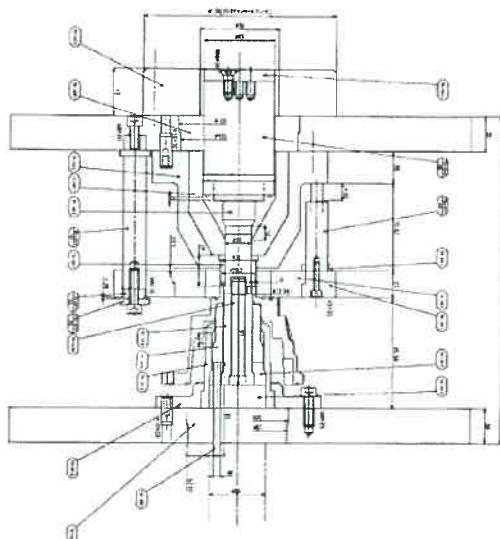


図2-4-2 油圧プレス機の金型の全体図

今回、油圧プレス機に搭載した金型を使用したプレスの加工工程について、図2-4-3に示す。

プレスの加工工程

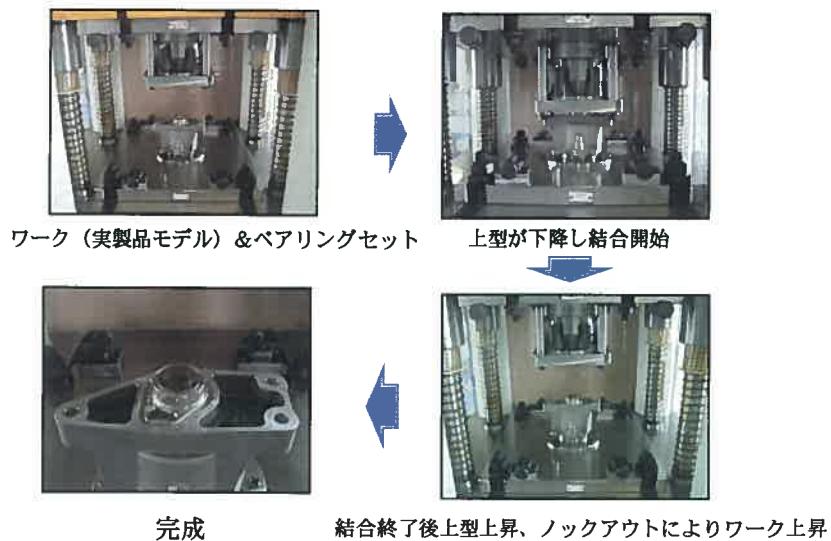


図2-4-3 プレスの加工工程

本金型構造とプロセスにて、塑性流動結合が機構的に可能であることが明らかになった。

2-4-2. 塑性流動結合用加工設備の開発

製作したプレスに関して動作、機能に問題ないことを確認したが、加工荷重の測定の精度が不足している。加工荷重の測定の精度を上げるために、図2-4-4の様に、金型の荷重の負担部分にひずみゲージを貼って計測した。

荷重計測に関する問題点と対策

荷重計測：プレス機からのアナログ出力により計測を行っているが、荷重レスポンスが悪い

金型の荷重を負担部分にひずみゲージを貼って計測する

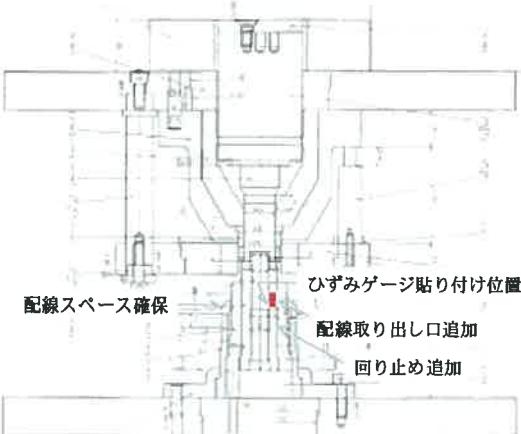


図2-4-4 荷重測定精度に関する問題点と対策

金型の荷重を負担する部分に、ひずみゲージを貼って計測したデータを図2-4-5に示す。プレス結合時の結合荷重-ストローク線図のデータの蓄積ができる様になった。

結合荷重-ストローク線図からわかるように、結合時間は、2秒程度であり、量産時のタクトとして、15秒以下にすることが、充分可能である。

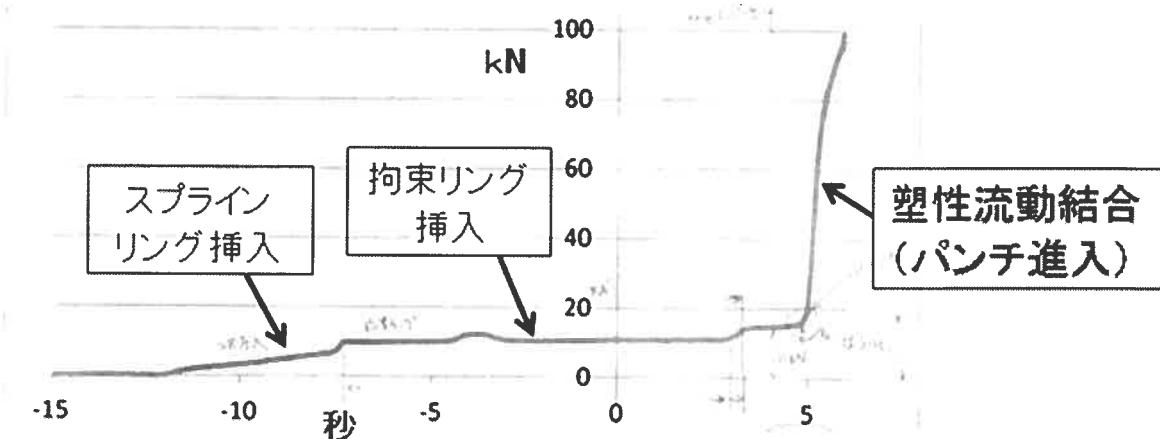


図2-4-5 プレス結合時の結合荷重-ストローク線図

2-5. 塑性流動結合品の強度・信頼性保証技術の開発

2-5-1. 量産において結合の信頼性を確保するための加工モニタリング方法

塑性流動結合は、金属の溶融を伴わないために材料の変質、耐食性の劣化など信頼性の低下する要因は少ないと信頼性の観点からは優れた接合法である。

一方、接合状態が外観から検査できないことは、他の接合法と変わることはない。

量産的に、接合の可否を判断するための方法として今後検討を進めていくが、現時点で考えられるものを以下に挙げておく。

- ① 結合のプロセスでの情報を検出し、基準内であるかどうかを判定する
- ② 結晶の寸法、形状を管理する。結合品の直径、あるいは溝の部分の結合後の精度の特徴を把握し、基準値と比較する
- ③ 溝への材料の流入量を非破壊で測定し、基準値と比較する

①に関して以下に検討する。

図2-5-1は、ひずみゲージを用いてデータ取得した結合時の荷重-ストローク線図にて、設定範囲を示した例である。量産時の結合作業時においては、設定荷重に至るまでの荷重とストロークの関係を記録しておき、その荷重-ストローク曲線があらかじめ設定した範囲に入りていれば合格として、後工程に流すことが、考えられる。

この範囲を設定しておくことが必要である。

結合荷重一ストローク管理線図の設定

結合荷重一ストローク線図を下記の如く仮設定する。

結合荷重 100KN ~ 120KN

ストローク 0.9mm ~ 1.5mm

ストローク線図は、下記範囲内にあること。

荷重一ストローク到達点
の範囲

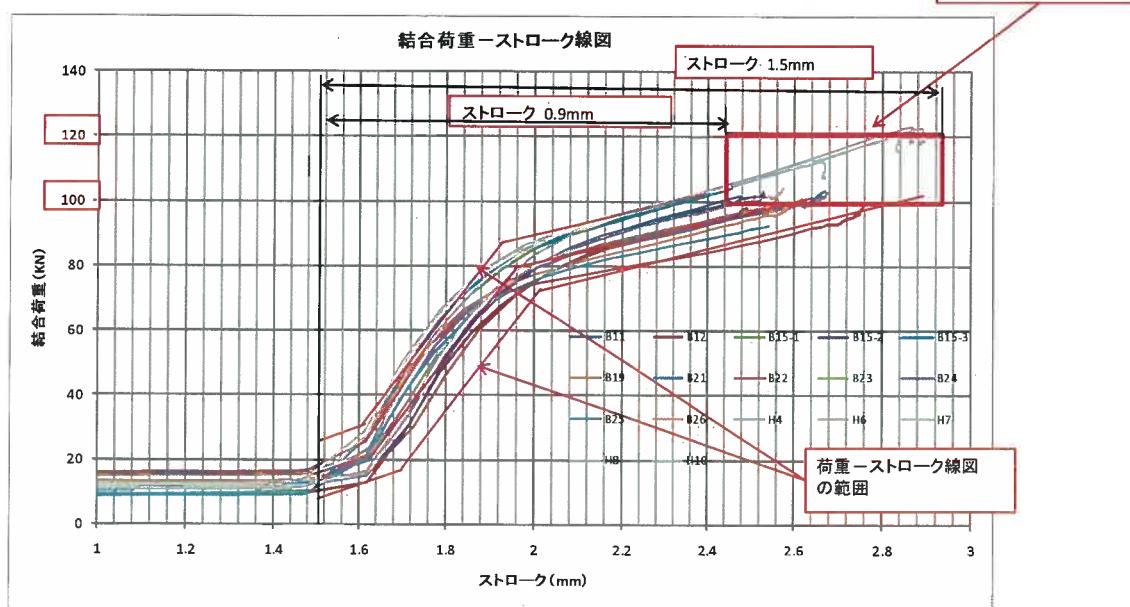


図 2－5－1 荷重一ストローク線図の設定範囲の例

②のためには、今後の精度の特徴と強度との相関関係を系統的に行っていく必要がある。

図 2－3－1 2で示した様に、パンチ溝深さと軸方向強度に相関があることから、パンチ深さを寸法管理項目とすることも有効である。

③に関して、非破壊検査用として導入したX線透視検査の外観図写真を図 2－5－2 に示す。図 2－5－3 に試料テーブルを示す。



図 2－5－2 X 線透視検査装置の外観写真

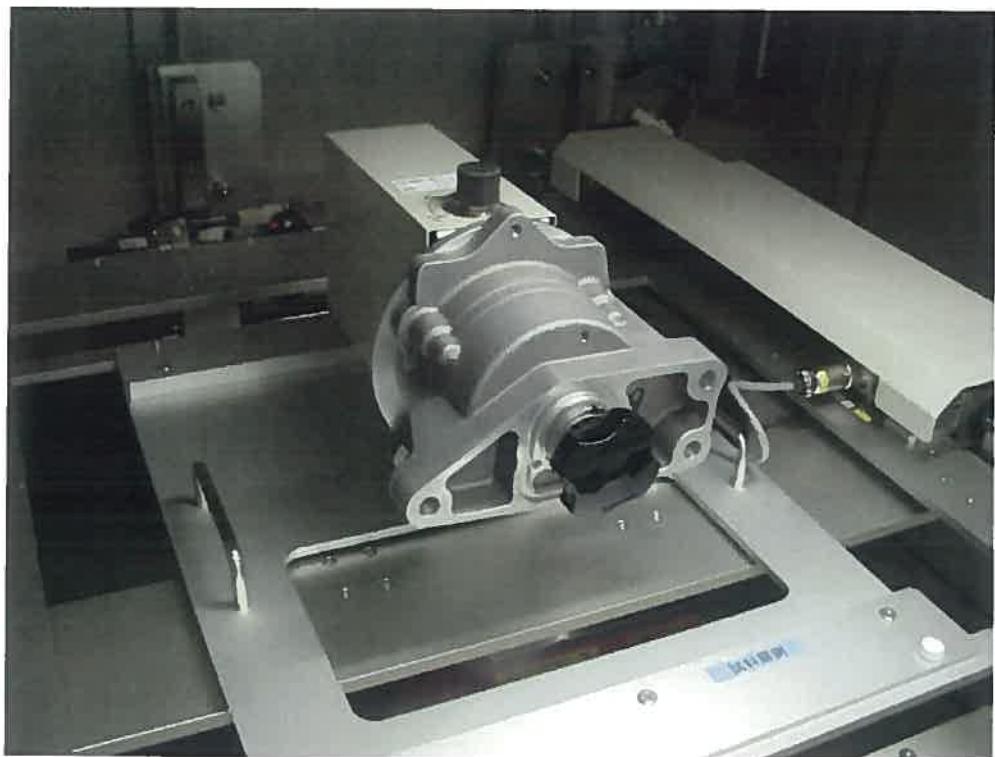


図2－5－3 X線透視検査装置の試料テーブル

実製品モデルにおける塑性結合後の部品のX線透視検査結果を図2－5－4に示す。写真で黒い部分が鉄製リング、灰色の部分がアルミダイカスト製ハウジングに部分である。鉄製リングの溝の部分に灰色のアルミダイカスト材が流動している様子がよくわかる。リングの溝の白く見える部分が、アルミダイカスト材が流動していない部分で、灰色に見える部分が、アルミダイカスト材が流動している部分である。

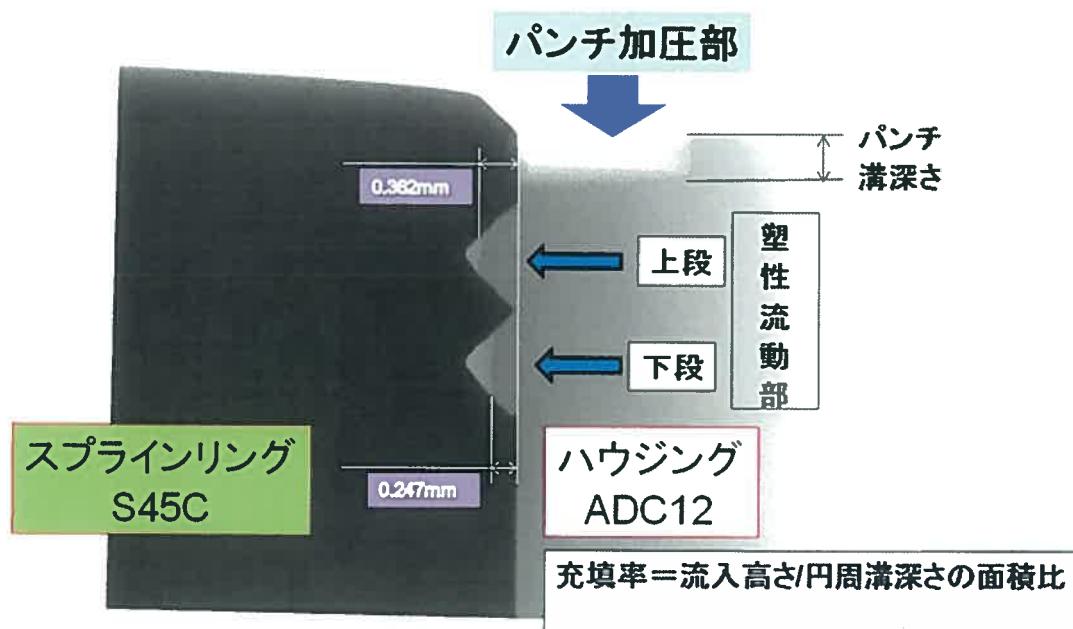


図2－5－4 塑性結合後の部品のX線透視検査結果

2-5-2. 疲労強度他、信頼性確保のための試験法とデータの蓄積

今回の製品が自動車エンジンのアクチュエーター用ハウジングであることから、より実際の条件にあった使用条件下での耐久性を確認するために自動車用製品のエンジニアリング会社のなかでも権威のあるポルシェ・エンジニアリング（株）へ複合トルク試験を委託した。

実際の試験設備を図2-5-5、図2-5-6、に示す。

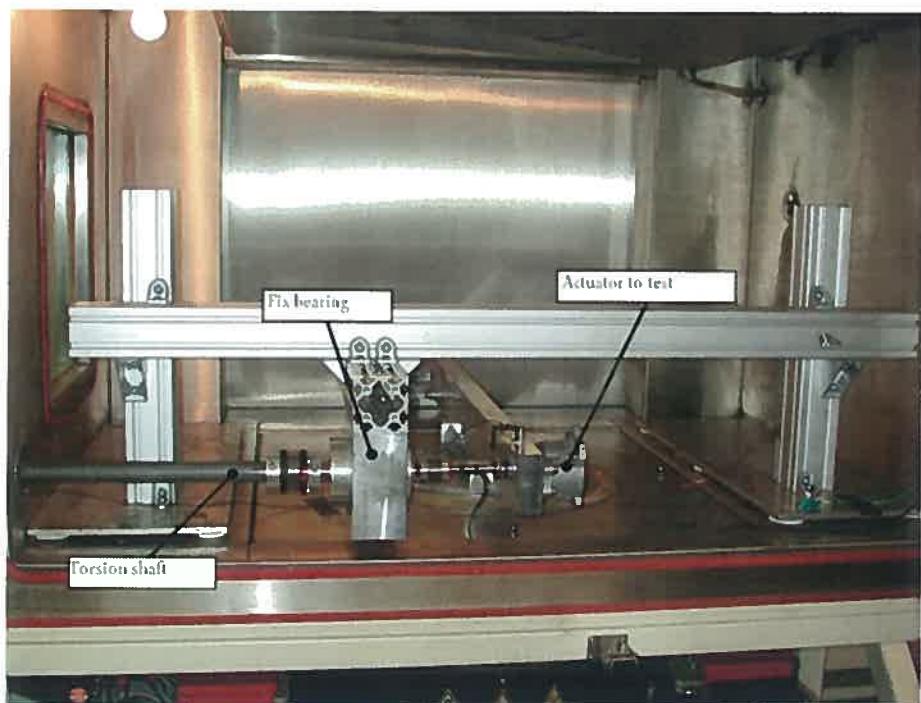


図2-5-5 ポルシェ・エンジニアリング（株）における
トルク耐久試験設備の内部写真

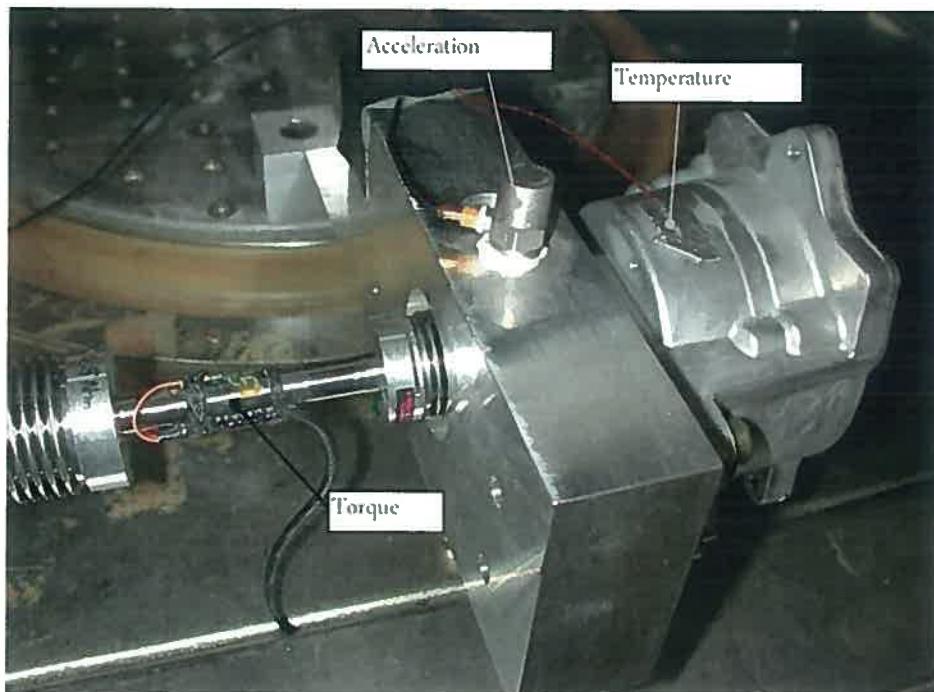


図2-5-6 ポルシェ・エンジニアリング（株）における
トルク耐久試験設備テストピース部の写真

ポルシェ・エンジニアリング（株）で実施した高温・振動条件下における耐久試験結果を図2-5-7に示す。

その後、川下ユーザーとの調整により、トルク耐久試験の目標値を入力トルク 1Nm で、 1×10^7 疲労限と設定したが、残念ながら、入力トルク 1Nm で、 1×10^7 までには至らなかった。

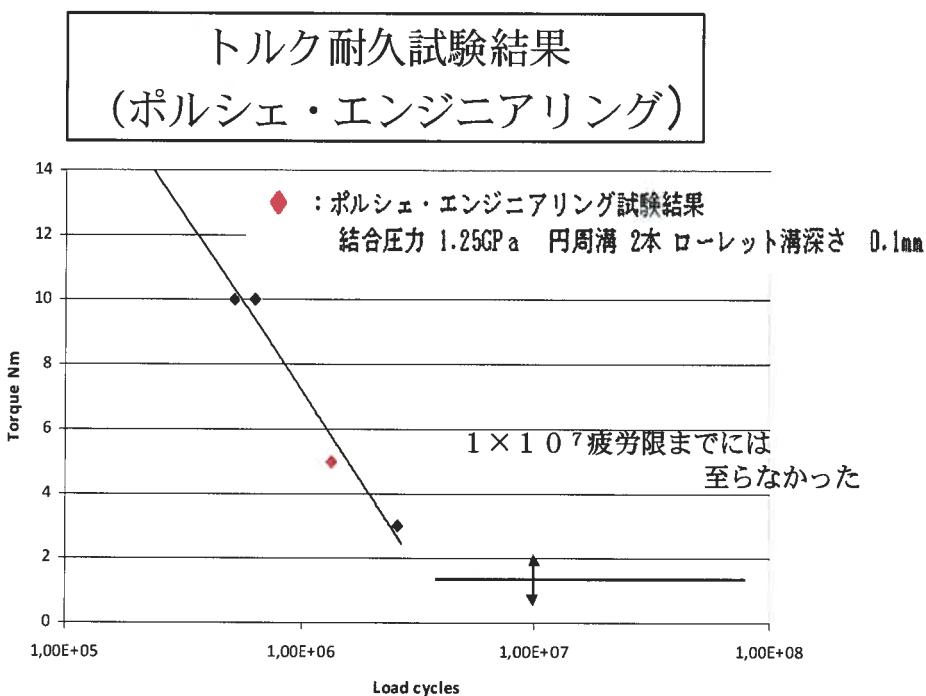


図2-5-7 ポルシェ・エンジニアリング（株）における
トルク耐久試験結果

ポルシェ・エンジニアリングでのトルク耐久試験結果では、目標寿命である入力トルク 1Nm で、 1×10^7 疲労限までには、至らなかったが、トルク強度向上策としてあげたローレットの歯溝の深さを 0.1mm 程度から 0.2mm 以上に深くしたものを使いしてトルク耐久試験を行うことが必要になった。

そのため、社内で試験を行うためのねじり繰返し負荷試験装置の検討を行った。

図2-5-8にねじり繰返し負荷試験装置の概要及び図2-5-9にねじり繰返し負荷試験装置の全体の外観を示す。

更には、加熱トーチ、熱電対を追加し、ポルシェ・エンジニアリング(株)で実施した高温条件下でのトルク耐久試験ができる様にした。

図2-5-10に温間ねじり繰返し負荷試験装置を示す。

ねじり繰返し負荷試験装置の概要

仕様 : $\pm 50 \text{ N} \cdot \text{m}$
トルク負荷コントロール
トルク値モニター
回転（異常）検知リミッター
アナログ出力

構想図

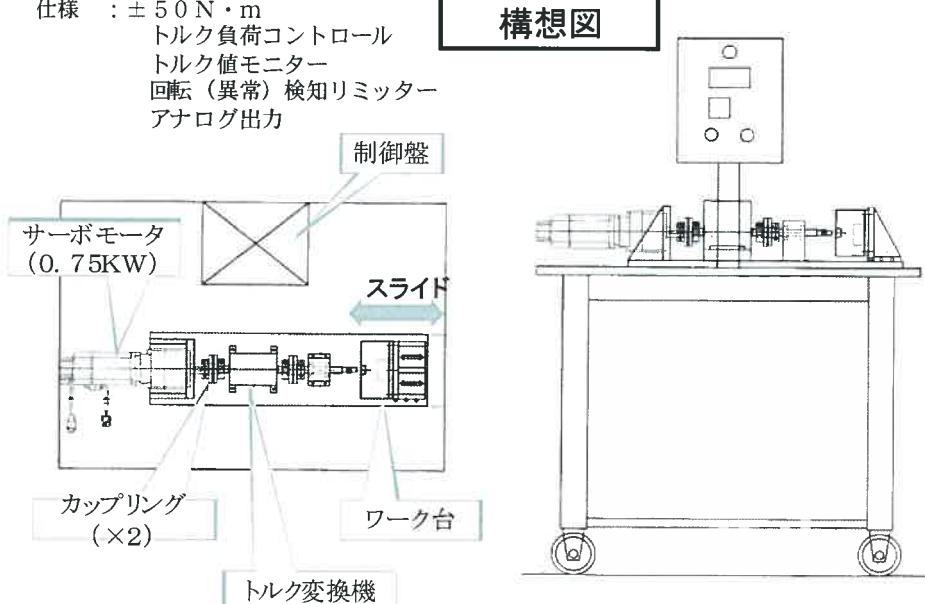


図 2－5－8 ねじり繰返し負荷試験装置の概要

ねじり繰返し負荷試験装置の外観

仕様 : $\pm 50 \text{ N} \cdot \text{m}$
トルク負荷コントロール
トルク値モニター
回転（異常）検知リミッター
アナログ出力

制御盤

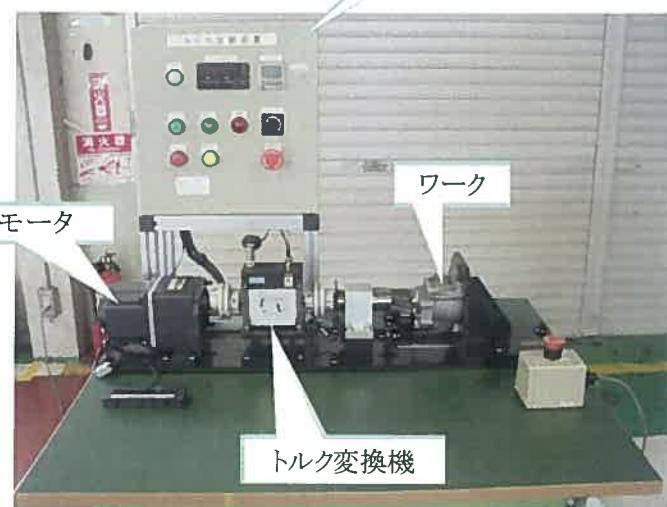


図 2－5－9 ねじり繰返し負荷試験装置の全体の外観

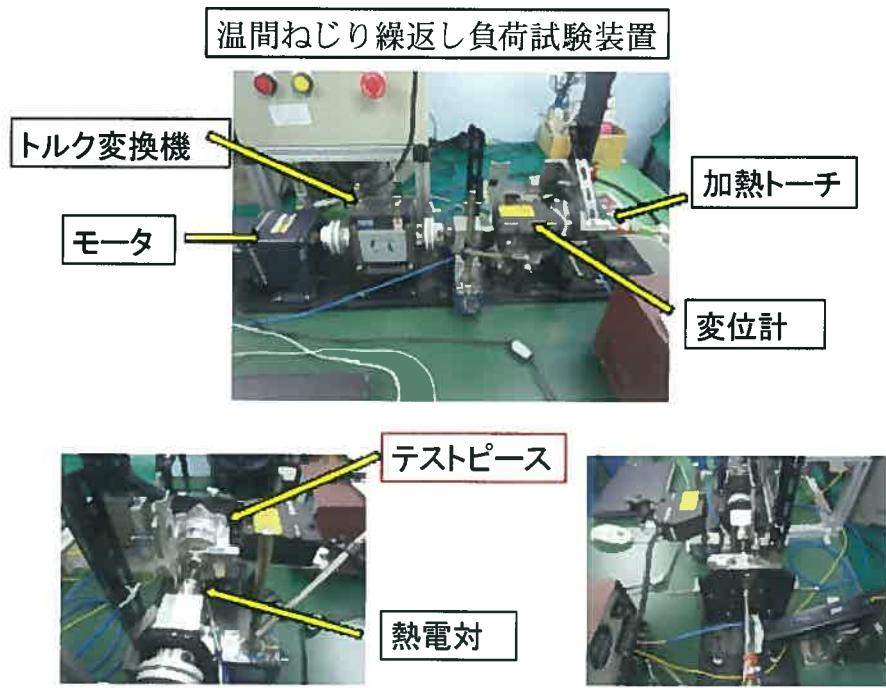


図 2-5-10 溫間ねじり繰返し負荷試験装置

実製品モデルにおける鉄製リングのローレット深さを 0.1mm 程度から 0.2mm に変更したものを温間ねじり繰返し負荷試験装置を用いて試験した結果を図 2-5-11 に示す。

ポルシェ・エンジニアリング（株）で実施した試験結果の傾きを用いて、目標寿命である入力 1Nm にて、 1×10^7 疲労限に対しての直線を描き、それぞれの入力トルクに対する目標寿命の設定を行った。温間ねじり繰返し負荷試験装置を用いて、入力トルク 30Nm、20Nm、10Nm で試験を行い、目標寿命を満足することができた。

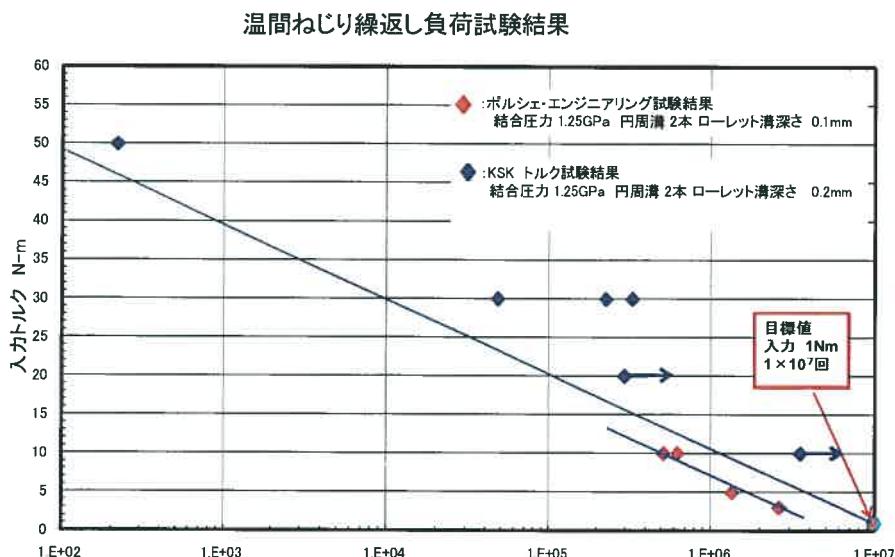


図 2-5-11 溫間ねじり繰返し負荷試験結果

3. 全体総括

3-1. 研究開発成果

研究課題における研究成果を示したものと表3-3-1に示す

4項目における研究課題の目標値を達成することができた。

表3-3-1 研究開発成果

研究課題	研究実施機関	研究目標 (具体的に数値を記入すること)	研究目標に対する研究達成度	
			達成率(%)	説明(研究目標値に対する達成数値も併せて記載)
①アルミダイカスト・鉄系部品の塑性流動結合技術	京浜精密工業、東京工業大学	・目標値：軸方向強度 12,000N以上 回転方向強度 80Nm以上 ・目標値：ダイカスト部品と鉄系部品の同軸度 0.02以下	100%	・軸方向の破壊強度を確保するために、軸に設ける円周溝の形状、ピッチ、パンチ先端角度の軸方向強度に及ぼす影響を把握した。 ・回転方向の破壊強度を確保するために、歯溝の形状、数量がトルク強度に及ぼす影響を把握した。 ・同軸度については、結合による変化は少なく、ハウジング及び鉄製リングの単体の同軸度に倣うことがわかった。
②軽量化、高精度化実現のためのアルミダイカスト、鉄系部品の製品設計技術の開発	京浜精密工業、東京工業大学	・軽量化、高精度化、生産性、安定性に適した革新的かつ最適な形状の部品を設計する ・目標値：質量 34%低減 コスト 40%低減	100%	軽量化、高精度化、生産性、また強度の安定性を確保できる部品の設計技術とその基本となる実験データを蓄積した。
③軽量化、高精度化実現のためのアルミダイカスト、鉄系部品の製品設計技術の開発	京浜精密工業、東京工業大学	・量産可能な高精度塑性結合金型構造と機構を開発する ・塑性流動結合用加工設備を開発する ・試作による目標加工タクト 30秒の見極め	100%	・量産可能な塑性流動結合用の金型機構と構造と、その金型を搭載するプレス加工設備を作成し、また強度実験などに供する各種部品の試作を行い、設備の機能を確認した。 ・接合荷重・ストローク線図などを採取して、量産時には目標タクト30秒を確保できる見通しを得た。
④軽量化、高精度化実現のためのアルミダイカスト、鉄系部品の製品設計技術の開発	京浜精密工業、東京工業大学	・量産において結合の信頼性を確保するための加工モニタリング方法を開発する ・疲労強度他、信頼性確保のための試験法を開発しデータを蓄積する	100%	・接合荷重・ストローク線図、円周溝への材料流動状態のX線によるモニタリング法を開発した。 ・静的強度試験、耐久強度試験によるデータを蓄積するとともに、強度などの目標値をクリアできる条件を把握した。

3-2. 事業化展開

自動車向けエンジン機器などのアルミダイカスト部品と鉄系部品の結合品を対象に京浜精密工業(株)が事業化する。まず、本研究開発で取り上げた「可変バルブリフト機構ハウジング」は、川下ユーザーのニーズと一致しており、実用化のための検討を開始した。しかし、川下ユーザーから提案された技術目標値が、本プロジェクトの当初の目標値と異なる項目がある。温間の軸方向、回転方向の強度は達成しており、さらに耐久強度も仕様をクリアしているが、加振試験及び軸方向耐久試験について、現時点では、達成できていない項目がある。それらの項目の対策を追加して、現在、評価を実施中である。また、川下ユーザーとしての評価も依頼中であり、技術目標値をクリアできれば、平成24年春に実用化の予定である。なお、本製品の実用化を最優先として進めるが、今後、アルミダイカスト製品に限らず、他の製品への塑性流動技術の普及拡大を図っていく。

以上