

平成 25 ～ 27 年度戦略的基礎技術高度化支援事業

鋳鉄の延性を利用した自動車用鋳造部品の複合化技術

研究開発成果等報告書

平成 28 年 3 月

委託者 北海道経済産業局

委託先 一般社団法人北海道機械工業会

目 次

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1-1-1 研究の背景.....1

1-1-2 研究目的及び目標・.....1

1-2 研究体制

1-2-1 研究組織及び管理体制.....5

1-2-2 管理者および研究員.....7

1-2-3 協力者（アドバイザーとして研究支援を依頼）.....8

1-3 成果概要.....8

1-4 当該研究開発の連絡窓口.....9

第2章 本論

第1節 塑性加工に適した鋳鉄材質をえるための材質制御技術の開発

1-1 はじめに10

1-2 鋳鉄の組織と材質制御法10

1-3 技術開発の内容

1-3-1 冷却速度および化学組成による鋳鉄材質の制御性検証.....11

1-3-2 鋳型の熱特性と冷却速度.....11

1-3-3 実製品モデルによる鋳造解析12

1-3-4 実製品を想定した化学組成による材質制御.....13

1-3-5 鋳鉄材質の再現性試験.....15

1-4 生産ラインにおける材質の検証.....16

1-5 まとめ.....18

第2節 鋳鉄の材質を損なわずに複合化強度を得るための塑性加工プロセスの最適化

2-1 はじめに.....19

2-2 塑性加工プロセスの最適化

2-2-1 加重速度と材料強度の関係.....19

2-2-2 ミニチュアモデルでのプレス加工モーションと塑性加工品質の関係.....20

2-2-3 ミニチュアモデルでの設計値と接合強度の関係.....21

2-2-4 実寸大モデルでの塑性加工の最適化.....21

2-2-5 塑性加工部の溝切.....22

2-2-6 締め代の増加22

2-3 まとめ23

第3節 複合化強度・耐久性に関する評価技術の開発

3-1 研究背景	24
3-2 実験方法	24
3-3 供試材	23
3-4 動力循環式トルク負荷装置によるねじり疲労試験	25
3-5 まとめ	29

第3章 全体総括

3-1 研究開発の成果	30
3-2 今後への対応	32

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1-1-1 研究の背景

近年の環境規制強化などへの社会的意識の高まりから、自動車産業関連分野において燃費が良く排出ガス量の少ない小型車の需要が増加しており、新興市場での競争も激化している。自動車メーカーおよびその部品供給メーカーは、自動車部品のより小型・軽量化をはじめ、新たな製造法を導入した低コスト化、さらに、市場に迅速に対応する短納期化が強く求められ、その対応に迫られている。

本事業は、川下である自動車メーカー等が求める自動車部品の小型・軽量化、低コスト化、短納期化への一層厳しい改善要請に対して、鋳鉄鋳造品と機械加工品による複合部品に着目し、鋳鉄の延性を利用した「かしめ接合」に関する研究・開発により、従来品に比べて部品点数、加工工程数が少なく、かつ軽量化が可能な自動車用部品の複合化技術を開発する。

本技術開発の背景として、参画機関である北海道立総合研究機構工業試験場が、球状黒鉛鋳鉄品の塑性加工に関する技術開発に取り組み、鋳造部品複合化技術の基礎的知見を蓄積している。本事業は、これを発展させて①鋳造部品の材質制御技術、②鋳造部品向けのプレス加工技術、③複合部品の評価技術、および④本技法による量産化技術の研究・開発を行い、その実用化を目指す。

1-1-2 研究目的及び目標

北海道立総合研究機構工業試験場における既往の研究では、設備的制約から実験室レベルの縮小縮尺モデル試料による研究実績にとどまったが、これを実製品に展開するためには実製品寸法の鋳物試料において「かしめ接合」を可能とする強度、伸び等の材質を有することが要求される。

本事業は3ヵ年の実施を計画し、平成25年度（1年目）は実部品サイズへのスケールアップを前提に、縮尺サイズモデルを用いて鋳鉄材料の材質制御と加工プロセスの最適化、および品質評価技術に関する技術開発を行った。平成26年度（2年目）には実製品を想定した鋳物部品（実スケールモデル）の生産技術、「かしめ接合」による複合化加工法および品質評価法の確立を図る。平成27年度（3年目）は量産化への対応を想定し、鋳鉄鋳物の材質およびかしめ接合品質のばらつきを抑える安定化プロセス技術の技術開発を進め、本技法の実用化水準の向上により新しい自動車用鋳鉄複合化製品への展開を図る。

以下、3年間の実施項目と目標値を示す。

①「かしめ接合」に適した鋳鉄材質を得るための材質制御技術の開発

（佐藤鋳工株式会社、（地独）道総研工業試験場）

平成25年度（1年目）

- ・鋳物部品を縮尺サイズ試料から実製品寸法に合わせてスケールアップする際、鋳造後の冷却条件が異なるため鋳鉄材質が変化する。かしめ接合に要求される鋳鉄の強度、伸び、硬さなどの機械的性質を所定の目標に到達させるための溶湯組成（化学成分）の調整、接種処理における処理剤選定と処理タイミングを変えた場合の鋳鉄鋳物組織の変化を調べ、鋳鉄材質制御に関するノウハウ

ウを蓄積する。

- ・ 鑄鉄材質の制御に関連し、鑄造シミュレーション解析を利用した最適な注湯温度、湯口系・押し湯などの鑄造方案を得るため、鑄造時の鑄物・鑄型温度変化を計測し、数値解析に用いる境界条件を得る。

目標値；鑄造品の機械的性質において引張強度 450MPa の材質制御を可能とする。

平成 26 年度(2 年目)

- ・ 平成 25 年度に実施した縮尺サイズモデルによる鑄造実験で得た鑄鉄の化学組成と鑄鉄材質との相関性に関する知見に基づき、鑄物部品を実製品寸法にスケールアップした時に想定される鑄造後の冷却条件や溶湯処理効果の時効性に関する評価を行うため、実製品寸法の鑄物を製作する鑄造試験を実施し、化学成分および溶湯処理プロセスの金属組織への影響、溶湯処理および接種処理の時効効果を調べ、実製品寸法における鑄鉄材質制御に関するノウハウを蓄積する。
- ・ 鑄鉄材質の制御に関連し、鑄造シミュレーション解析を利用し鑄造方案設計手法の確立を図るため、特に数値計算結果における冷却速度に着目し、鑄造試験で得られた試料の金属組織との関連性を明らかにする。

目標値； 実スケールモデルの鑄造品の機械的性質において引張強度 450MPa の材質制御を可能とする。

平成 27 年度(3 年目)

- ・ 平成 26 年度までに実施した鑄鉄の化学組成と鑄鉄材質との相関性を検証する実験に関連し、製品品質の安定化を図る視点から実験方法を再検討し、化学成分と金属組織および機械的性質との相関関係に関するより高精度な検証を行う。
- ・ 量産化へ向けた鑄鉄品質の安定化を目標に、これまでの鑄鉄材質制御に関する試験結果からかしめ加工に最適な化学組成を選定して鑄造試験を繰り返したときの金属組織および機械的性質の再現性を確認する。また、一般に鑄造工程で行われる接種処理について、鑄鉄の金属組織と機械的性質に及ぼす接種の影響を検証し、品質の安定化に寄与する効果的な処理方法を検討する。

目標値； 量産化に向けた品質安定化の指標として、同じ化学組成に対して金属組織におけるフェライト面積率および引張強度、伸び、ブリネル硬さのばらつきの幅を一定内に収める。

②鑄鉄の材質を損なわずに複合化強度を得るための塑性加工プロセスの最適化

(佐藤鑄工株式会社、(地独)道総研工業試験場)

平成 25 年度 (1 年目)

- ・ かしめ接合の品質は、塑性変形を加える際の加工変位、速度および工程等の影響が及ぶものと予測する。これら影響の程度を調べるため、鑄鉄試験試料を用いてプレス加工時の変位、速度、工程を変化させたときの、塑性変形量および塑性加工後の材料強度を計測し、かしめ接合加工の最適条件に関するノウハウを蓄積する。
- ・ 実部品寸法の鑄鉄鑄物部品のかしめ接合加工では、縮尺サイズの場合に比べて塑性変形量や鑄物材質が異なることが予想される。実製品寸法の鑄物材質の制約範囲を想定し、鑄鉄組織のフェライト/パーライト率、黒鉛の粒数・粒径・球状化率などが変化したときの塑性加工パラメータ (変

位・速度・工程)の塑性加工品質への影響を調べ、実製品寸法試料のかしめ接合における最適加工条件に関する技術蓄積を図る。

目標値； 塑性加工後材料の引張強度の劣化を一定以内で確保する。また、鑄鉄組織のフェライト率において一定の材質に対する最適な加工条件を明らかにする。

平成 26 年度(2 年目)

・平成 25 年度に実施した縮尺サイズモデルによるかしめ接合試験で得られた知見に基づき、佐藤鑄工(株)に設置したプレス機で実スケールモデルの金型を用いて複合化加工試験を行い、プレス加工時の変位、速度、工程を変化させたときの外観上の加工品質(割れの有無)を評価し、かしめ接合加工の最適条件を導出する。

・塑性加工接合部の表面粗さ・表面形状とかしめ加工品質の相関性を調べるため、工業試験場のプレス機による縮尺サイズの塑性加工試験で接合部の性状を変化させた複合化試料を作成し、接合強度を測定する。

目標値； 実スケールモデルのかしめ加工による複合化プロセスにおいて、FCD450 相当の材質における最適な加工条件を明らかにする。また、従前の単純圧入・かしめ接合で得られる静トルク強度に対して、強度強化を発現するための加工法に関する条件を明らかにする。

平成 27 年度(3 年目)

・プレス機の一回の動作により全体をかしめる加工では、鑄造部品やリングギアの品質のばらつき、寸法のばらつきなどに影響を受け、締結強度もばらつく可能性がある。そこで、加工法を工夫し、鑄造部品の流動化を促し締結強度のばらつき低減を図る加工を行い、かしめ加工品質の安定化を図る。

・現在、圧入加工の金型とかしめ加工の金型は分かれており、複合加工を行う際は金型の載せ替えが必要である。量産を想定した場合、金型の載せ替え時間が複合加工のネックとなることが予想される。そこで、圧入加工およびかしめ加工の金型や工程を見直し、複合加工にかかる段替え時間の短縮を図る。

目標値； 実スケールモデルのかしめ加工による複合化プロセスにおいて、FCD450 相当の材質における最適な加工条件を明らかにする。また、圧入加工およびかしめ加工を行う複合加工のサイクルタイムを短縮する。

③複合化強度・耐久性に関する評価技術の開発

(佐藤鑄工株式会社、(国)室蘭工業大学)

平成 25 年度 (1 年目)

・鑄鉄鑄物に塑性加工を加えて使用する例はほとんどなく、このため、塑性加工した鑄鉄の材質特性の変化等に関する報告は稀であるが、鑄鉄材料の塑性加工前後の動的荷重の耐力の変化などの把握を行うことは極めて重要である。また、組成加工時に発生する鑄物表面のき裂は破壊に繋がる恐れがあり、これら微小き裂の影響評価を行う。

・かしめ接合に使用する型の条件(型の種類、旋盤加工、スリットの有無など)の調査、実際に使用する自動車メーカーにおいて、かしめ型が有効であるか、また採用される際の評価方法、基準

値などを調査し、検討を行う。

目標値； 塑性加工後の鋳鉄材料の耐動的加重の評価方法において、定量値のばらつきが一定値以内に収まる試験方法を開発する。

平成 26 年度(2 年目)

- ・平成 25 年度に実施した縮尺サイズモデル締結評価試験で得られた知見に基づき、実スケールモデルに対応した評価装置の試作開発を行う。新たに製作する動力循環式トルク負荷試験装置は、かしめ接合部に連続的に動力を入力し、発生するスプリットトルクを計測する。これにより、実機で発生する最大トルクに対応するかしめ締結強度を評価し、かしめ接合加工の最適条件を導出する。
- ・サブテーマ②で製作した実製品寸法の複合化加工試料（実スケールモデル）を用いて、かしめ接合部の静トルク強度および疲労強度を計測し、「かしめ強度」に関するデータの把握を行う。その際の実スケールモデルと縮尺モデルとの相関関係についての検討も行う。
- ・同試料を用いて鋳鉄材料または組成加工時に発生する鋳物表面の微小き裂の影響評価。
- ・また、動力循環式トルク負荷試験装置を用いて、かしめ接合部の表面粗さ（スリット加工を施す）の静トルク強度へ及ぼす影響を調査し評価する。
- ・本年度の知見をもって、最終年度の実製品寸法の量産化を目指すための金型製作のデータとして活用する。
- ・本評価方法、および評価基準に関して、継続して自動車メーカーにおいて調査を行い、検討を行う。

目標値； 動力循環式トルク負荷試験装置を開発し、スリットトルクによるかしめ接合強度の再現性の高い測定評価を目指す。

平成 27 年度(3 年目)

- ・平成 25 年度に実施した縮尺サイズモデル締結評価試験で得られた知見に基づき、実スケールモデルに対応した評価装置の試作開発を行う。新たに製作する動力循環式トルク負荷試験装置は、かしめ接合部に連続的に動力を入力し、発生するスプリットトルクを計測する。これにより、実機で発生する最大トルクに対応するかしめ締結強度を評価し、かしめ接合加工の最適条件を導出する。
- ・サブテーマ②で製作した実製品寸法の複合化加工試料（実スケールモデル）を用いて、かしめ接合部の静トルク強度および疲労強度を計測し、「かしめ強度」に関するデータの把握を行う。その際の実スケールモデルと縮尺モデルとの相関関係についての検討も行う。
- ・また、動力循環式トルク負荷試験装置を用いて、かしめ接合部の表面粗さ、また、締め代長さが静トルク強度へ及ぼす影響を調査し評価する。
- ・「動力循環式トルク負荷試験装置」による試験評価を複数回行い、スリット角度の実用化時の許容範囲となる基準を決定する。

目標値； 動力循環式トルク負荷試験装置を開発し、かしめ締結の評価装置とする。スリットトルクによるかしめ接合強度の再現性の高い測定評価を目指す。

④量産を想定した複合部品の品質安定化および従来製造法との比較による優位性の検証

(佐藤鋳工株式会社、(地独)道総研工業試験場、(国)室蘭工業大学)

- ・ 鋳鉄材質制御、塑性加工プロセスおよび強度・耐久性評価に関わる技術開発の成果に基づき、複合化部品の量産化を想定した実証試験を行い、そのバラつきの程度を把握するとともに品質安定化のための制御因子に関する検討を行う。
- ・ 試験対象のかしめ複合化部品に対応する従来工法による現行部品との機能および品質の比較を行い、その優位性を検証する。

目標値；かしめ接合部の強度評価において数値のばらつきの範囲を一定値以内に収める。また、従来工法による現行部品に対する寸法差を考慮した比較において、強度・品質においては同等以上、製造コストにおいては大幅の削減を目指す。

(なお、以上の実施項目は、関連するサブテーマ①～③内で行った。)

⑤プロジェクトの管理・運営

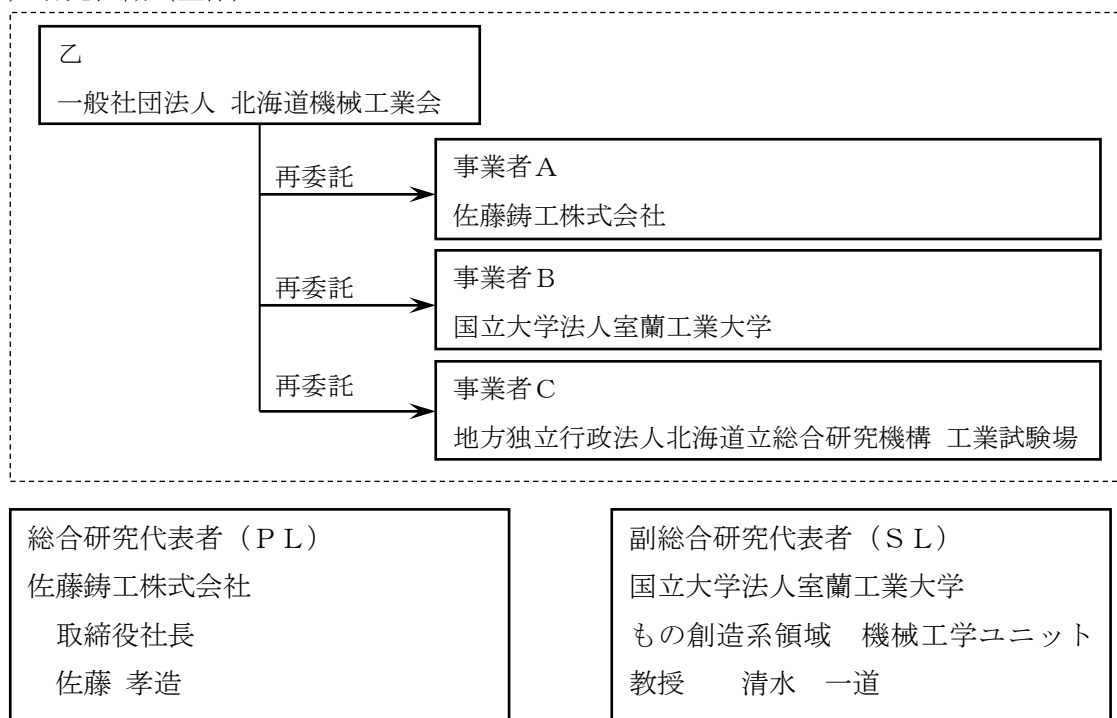
((一般)北海道機械工業会)

- ・ 本プロジェクトの円滑な運営のため必要に応じて会議等を開催するとともに、研究・開発の進捗管理、参加機関間の連絡・調整、成果報告書の取りまとめを行う。
- ・ 各研究課題の解決に向けた試験・研究の進捗報告、成果を得るための研究の進め方等に関する議論、意見交換をするために研究開発推進委員会を開催する。

1-2 研究体制

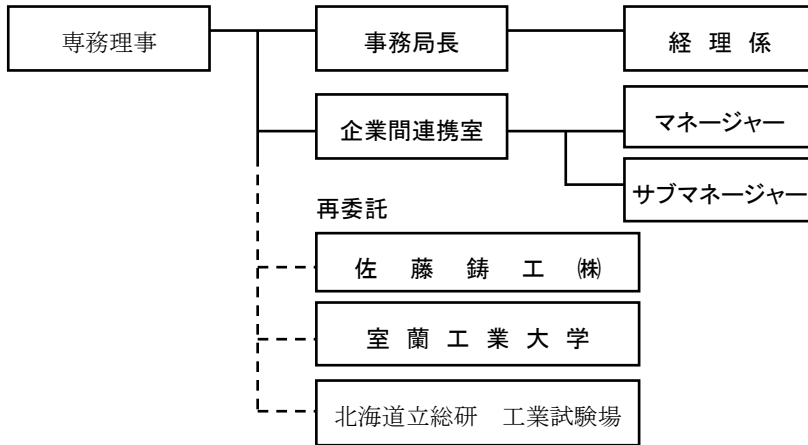
1-2-1 研究組織及び管理体制

(1) 研究組織 (全体)



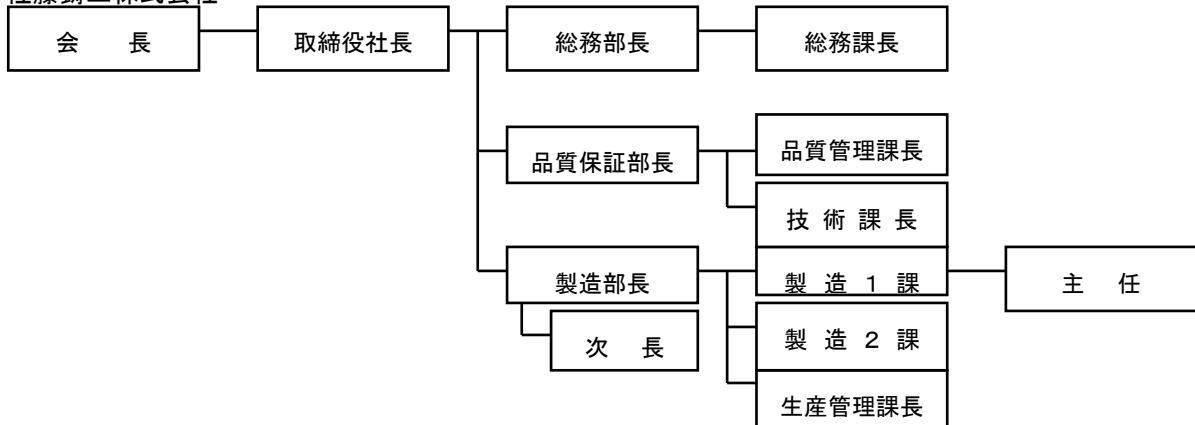
(2) 管理体制

1) 事業管理者 [(一社) 北海道機械工業会]



2) (再委託先)

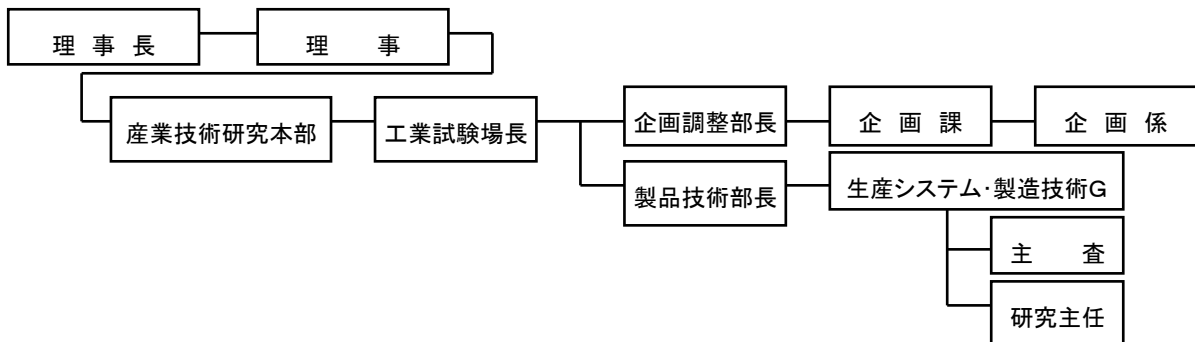
佐藤鋳工株式会社



国立大学法人 室蘭工業大学



地方独立行政法人北海道立総合研究機構 工業試験場



1-2-2 管理者および研究員

【事業管理者】 （一社）北海道機械工業会
管理員

氏 名	所属・役職	実施内容(番号)
板谷 隆広	専務理事	⑤
大澤 政昭	事務局長	⑤
長尾 信一	企業間連携マネージャー	⑤
小坂 譲	企業間連携サブマネージャー	⑤
笠島 理充	企業間連携サブマネージャー	⑤
鈴木 真弓	経理係	⑤

【再委託先】

佐藤鋳工株式会社

氏 名	所属・役職	実施内容（番号）
清水 孝幸	製造部長	① ② ③ ④
八谷 和夫	生産保全部長	①
川村 政信	技術課課長	①
三浦 孝之	品質保証部次長	①
佐橋 信明	総務部部長	① ② ③ ④
原 幸雄	製造部製造一課課長	① ②
山本 将大	品質保証部	① ② ③ ④
中川 弘路	品質管理課長	① ② ③ ④

国立大学法人 室蘭工業大学

氏 名	所属・役職	実施内容（番号）
清水 一道	もの創造系領域 機械工学ユニット 教授	③ ④
船曳 崇史	博士研究員	③ ④
八重樫 暢子	事務補佐員	③ ④

(地独) 北海道立総合研究機構 工業試験場

氏 名	所属・役職	実施内容 (番号)
飯田 憲一	製品技術部 部長	① ② ④
畑沢 賢一	製品技術部 研究主幹	① ② ④
戸羽 篤也	製品技術部 主査	① ② ④
鶴谷 知洋	製品技術部 研究主任	② ④

1-2-3 協力者 (アドバイザーとして研究支援を依頼)

氏 名	所属・役職	指導・協力事項
八木 勝春	トヨタ自動車北海道株式会社 技術部 技術開発室 開発G グループ長	自動車部品の評価 技術について指導 を受ける

1-3 成果概要

サブテーマ① 「かしめ接合」に適した鋳鉄材質を得るための材質制御技術の開発

目標値：「量産化に向けた品質安定化の指標として、同じ化学組成に対して金属組織におけるフェライト面積率および引張強度、伸び、ブリネル硬さのばらつきの幅を一定値以内に収める。」

本技法による製品の量産における鋳鉄品質の安定化という視点から、実生産ラインを想定した接種処理の方法を検討するとともに、適正な化学組成に配合した鋳鉄溶湯による鋳鉄品質のばらつきに関する試験を実施した。また、実生産ラインにおいて目標組成で製造した鋳鉄品の機械的性質および金属組織観察について、それらのバラつきの程度を確認した。その結果、ばらつきの範囲は概ね満足できる数値となった。

サブテーマ② 鋳鉄の材質を損なわずに複合化強度を得るための塑性加工プロセスの最適化

目標値：「実スケールモデルのかしめ加工による複合化プロセスにおいて、FCD450相当の材質における最適な加工条件を明らかにする。また、圧入加工およびかしめ加工を行う複合加工のサイクルタイムを大きく短縮する。」

開発を進め結果、圧入後の鋳造部品とリングギアのかしめ加工に新手法を採用することで、鋳造部品の流動化を促し締結強度のばらつき低減を図る逐次加工を検討し、かしめ加工品質の安定化を図るとともに最適な加工条件を明らかにした。圧入加工とかしめ加工を同時に行う一体金型を製作して段替時間の短縮を図り、サイクルタイムを大幅に短縮することができた。

サブテーマ③ 複合化強度・耐久性に関する評価技術の開発

目標値：「動力循環式トルク負荷試験装置を開発し、スリップトルクによるかしめ接合強度の再現性の高い測定評価を目指す。」

動力循環式トルク負荷試験装置を用い、サブテーマ②で製作した実製品寸法の複合化加工試料（実スケールモデル）を用いて、かしめ接合部の静トルク強度および疲労強度を計測し、「かしめ強度」に関するデータの把握を行った。供試材を試験機に取り付け前に静的条件でスリップトルクを測定し、試験機に締結後に静的トルク（実行トルク）を測定する。その後、荷重を掛け動的試験を実施し、実行トルクが98%の値となった時にスリップした（疲労限に達した）と判断する。各種供試材の試験結果から、試験機への取り付け前後で約30%程度のトルク減が確認された。このトルク減は供試材によってばらつく値であった。その後動的試験において、トルク減が30%程度の供試材は疲労限が10の6乗回近いのに対し30%を超える供試材は疲労限が低い。トルク減の値が低いものほど、疲労限に達する回数が増えることが判明した。これは、供試材（かしめ締結リングギア）の締結部すき間のばらつきによるものであり、かしめ締結部品の加工状態の精度が今後重要な課題であることが判明した。また、かしの締め代を変化させた供試材の評価結果から、締め代が大きくなるほど摩擦応力が増加し、滑り量が減少する結果がえられた。

以上の結果から、開発した動力循環式トルク負荷試験装置は、かしめ締結リングギアの開発においての評価機として性能を十分有しており、本装置を利用した性能評価技術が確立された。

サブテーマ④ 量産を想定した複合部品の品質安定化および従来製造法との比較による優位性の検証

目標値：「かしめ接合部の強度評価において数値のばらつきの範囲を一定値以内に収める。また、従来工法による現行部品に対する寸法差を考慮した比較において、強度・品質においては同等以上、製造コストにおいては大きな削減を目指す」。

実生産ラインにおける目標組成により製造した鋳鉄品の機械的性質において、引張強さ、ブリネル硬さのばらつきについては一定の極めて良好な再現性を確認した。黒鉛球状化率も概ね設定値以上で安定した、他の諸特性として伸び、黒鉛粒数、黒鉛粒径、フェライト面積率のばらつきは一定値内となり、黒鉛形状のばらつきが比較的大きかった。最適設計値や最適モーションを反映させた実製品サイズのかしめ加工実験を行い、スリップトルクを測定した結果、ばらつきが一定値以内に収まった。また、スリップトルクの測定結果が全て目標値を達成した。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

一般社団法人北海道機械工業会

〒060-0001 北海道札幌市中央区北1条西7丁目北一条大和田ビル4階

担当： 企業間連携マネージャー 長尾 信一

電話 011-222-9591

メール nagao-renkei@oboe.ocn.ne.jp

第2章 本論

第1節 塑性加工に適した鑄鉄材質を得るための材質制御技術の開発

1-1 はじめに

鑄造は、金属材料をその融点以上の温度で加熱溶解し、耐熱性を有する鑄型に注入した後、冷却、再凝固させて金属製品を得る加工方法である。鑄造は、機械加工では加工し難い複雑形状の製品を比較的容易に製作することができ、金属製品を低コストで大量に生産する加工法として素形材製造分野における確固たる地位を築いている。鑄物の代表的な材質である鑄鉄は、その金属組織には黒鉛や鉄との炭化物を含むため、どちらかといえば延性に乏しい材料に分類される。そのため、鑄物は、機械部品の一部として他の材質の部材と組み合わせて使われることが多い。

本研究は、鑄鉄の生産性や機能性の高さを維持しつつ、鑄鉄のなかでも延性を有するとされる球状黒鉛鑄鉄を塑性加工し、鋼材等の異種材料との複合化技法の可能性を探るとともに、その実用化のための技術開発を目指すものである。

1-2 鑄鉄の組織と材質制御法

鑄鉄は、鉄に 2.0mass%以上の炭素と 1.0～3.0mass%程度の珪素を含有する合金である。鑄鉄の金属組織中に黒鉛の結晶を含むことが大きな特徴であり、黒鉛の晶出形態によって普通鑄鉄、球状黒鉛鑄鉄、CV 黒鉛鑄鉄などに分類される。鑄鉄は、金属組織内の黒鉛の存在により一般に延性に乏しいとされるが、鑄造時の溶湯処理によって黒鉛の形状を球状化した球状黒鉛鑄鉄は、破断伸びが数%～20%程度の延性を呈する。その代表的な金属組織を図.1 に示す。

組織中に点在する円形状の黒色の部分は黒鉛、その周りの白色の部分は「フェライト」、そのほかの濃色の部分は「パーライト」と呼ばれる金属組織である。

黒鉛は炭素が結晶として晶出したもので、機械的な強度には寄与しない。フェライトは 0.2mass%以下の炭素を固溶する鉄で、延性を有する。パーライトは、フェライトと鉄の炭化物 (Fe_3C) であるセメンタイトとの混合組織である。セメンタイトは、非常に硬くて脆い組織である。軟らかく延性のあるフェライトとセメンタイトが層状複合組織として析出するパーライト組織は、鑄造条件により存在比率が変化し、鑄鉄の機械的性質に影響を及ぼす。すなわち、金属組織観察においてその面積比率が大きいほど鑄鉄材料の引張強さおよびブリネル硬さは増大し、延性伸びは小さくなる。

球状黒鉛鑄鉄の材質は、概ね基地組織のフェライトおよびパーライトの比率に支配され、鑄造後の冷却過程で黒鉛およびセメンタイトの晶出のし易い条件を設定することで制御することができる。具体的には、球状黒鉛鑄鉄の製造プロセスにおける材質制御手法として、鑄造後の冷却速度、化学組成、溶

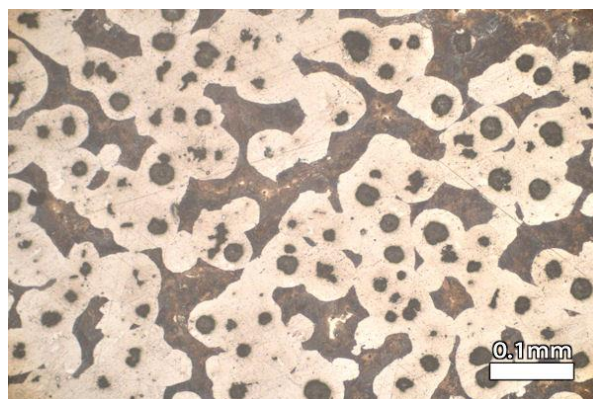


図.1 球状黒鉛鑄鉄のミクロ組織

湯処理などを利用したものが挙げられる。延性に富んだ球状黒鉛鑄鉄を得るには、冷却速度を小さくすること、珪素量を増大させること、黒鉛の晶出個数を増やすことなどによって、セメンタイトの晶出を抑える。

1-3 技術開発の内容

1-3-1 冷却速度および化学組成による鑄鉄材質の制御性検証

冷却速度および化学組成の鑄鉄材質への影響を検証するため、炭素と珪素の含有量を変化させた鑄鉄溶湯を、肉厚を変化させた試験試料に鑄造して、そのミクロ組織を観察した。鑄造試料の形状は、図.2 に示す幅 80mm×180mm で長手方向に 60mm ずつの肉厚を 3mm、6mm、9mm に変化させた階段状試験片とした。鑄型は生型とし、高周波誘導溶解炉で材料を溶解後、黒鉛球状化剤を溶湯量に対して 1.5wt%、注湯直前に Fe-Si 系接種剤を 0.3wt% 添加して溶湯処理を行い、鑄型に注湯した。

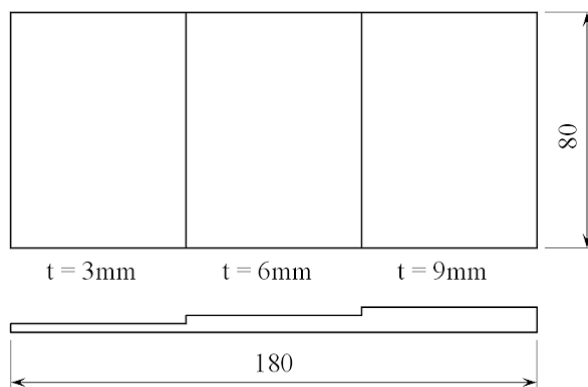


図.2 鑄造試験に用いた階段状試験片の形状と寸法

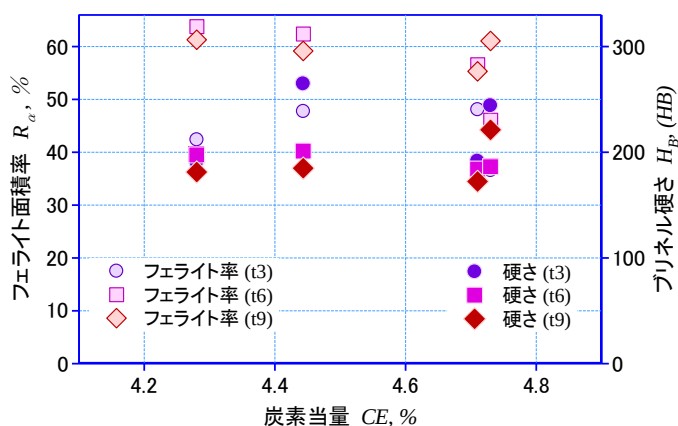


図.3 階段状試験片のフェライト面積率とブリネル硬さ

試験の結果、ミクロ組織は、いずれの試料についても肉厚 $t=3\text{mm}$ の部位の黒鉛の平均粒径が小さく、粒数も多くなっているのに比較して、肉厚 $t=6\text{mm}$ 、 $t=9\text{mm}$ の部位では黒鉛粒径が多大きく、粒数も少ない様子が認められた。試験試料の金属組織写真から計測したフェライト面積率とブリネル硬さを図.3 に示す。図の横軸は炭素当量（CE 値）で、炭素含有量に珪素含有量の 3 分の 1 を加えて算出したものである。基地組織中のフェライト率

について、薄肉の $t=3\text{mm}$ の部位では炭素当量の増大とともにフェライト率が大きくなる傾向が認められるのに対して、肉厚 $t=6\text{mm}$ 、 $t=9\text{mm}$ の部位では炭素当量の増大に伴ってフェライト率が若干減る傾向が認められた。ただし、厚肉部位では、50%以上のフェライト面積率が得られている。ブリネル硬さは、肉厚 $t=6\text{mm}$ 、 $t=9\text{mm}$ の部位で HB170～HB200 程度の安定した硬さが得られた。

1-3-2 鑄型の熱特性と冷却速度

サブサイズ試験片試料を鑄造する際の鑄型の温度変化を計測し、凝固解析システムの数値解析結果を照合して、鑄型の熱特性を把握した。鑄型温度の計測は鑄型内壁表面から 4mm、8mm、12mm の深さに熱電対を設置した。

図.4 に鑄型温度の計測結果を示す。いずれも、温度上昇後 100℃に達した後、しばらくこの温度を維

持した後に再び温度上昇が見られた。これは、生型の粘結剤であるベントナイトに含まれる水分が溶湯熱によって蒸発する間、鑄型の温度が水蒸気の温度に保たれたものである。これに対して、図.5 は、

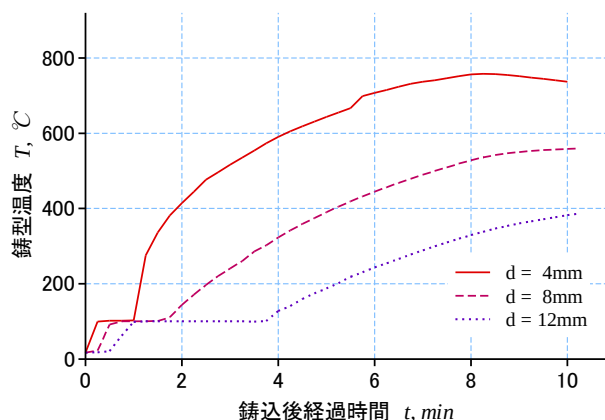


図.4 鑄型温度の計測結果

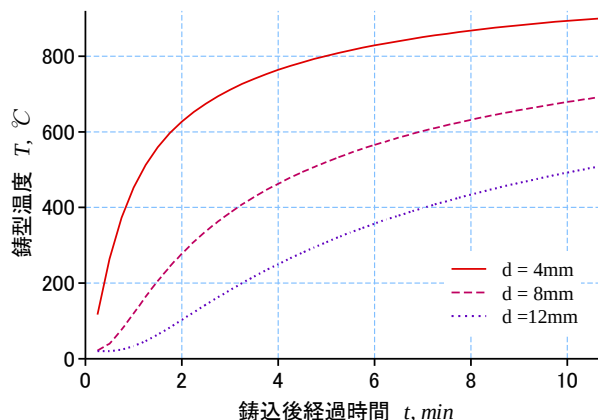


図.5 数値解析による型温度変化のシミュレーション

表.1 数値解析の境界条件

境界条件項目	鑄 型	鑄物(FCD450)
密 度 [kg/m ³]	1,300	7,000
熱 伝 導 率 [W/m・K]	0.5	20.0
比 熱 [J/kg・K]	2,000	680
熱伝達率 (鑄物／鑄型)	500	
熱伝達率 (鑄物／空気)		
	1,000	

鑄造試験と同じ条件をモデル化して数値解析を行い、熱電対を設置した位置の要素の温度変化をプロットしたものである。完全に一致していないものの、概ね計測結果が再現されていると考えられる。数値計算で用いた環境条件は表.1 に示すとおりである。

1-3-3 実製品モデルによる鑄造解析

既存の自動車部品の中から適当なものを選び、強度試験を行う試験装置の制約等を考慮して実製品を想定した実製品寸法モデルを選定した。鑄物を製造する前に、鑄造後の冷却速度を見積もるため、汎用の鑄造解析システムである「ADSTEFAN」を利用し鑄造解析システムにより数値解析を行った。解析に用いる境界条件は、表.1 に示す数値を用いた。図.6 に冷却速度の解析結果を示すコンター図を示す。図から、塑性加工部位付近は比較的に冷却速度が高いことがわかった。この領域の一部には、冷

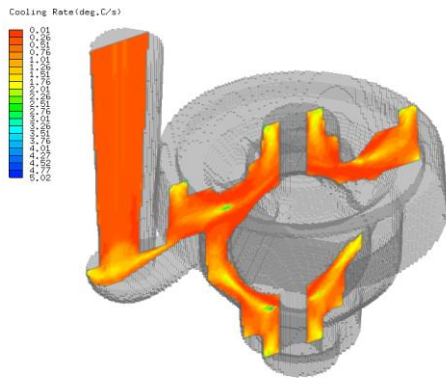


図.6 鑄造解析による冷却速度の分布

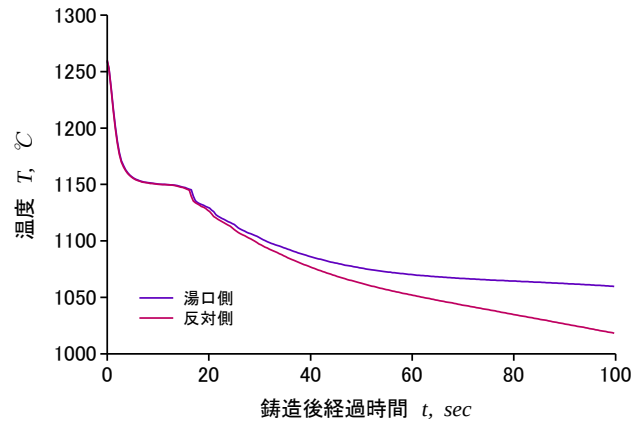


図.7 鑄造解析による塑性加工部付近の冷却曲線

却速度が $2.0^{\circ}\text{C}/\text{秒}$ を超える部分も認められるが、鑄物表面から少し内部に入った個所では概ね $1.5^{\circ}\text{C}/\text{秒}$ になっていると読み取れる。複合化加工で注目すべき塑性加工部位は、注湯の初期段階で急激に冷やされ、鑄物全体からみると急速に冷却される部位となるが、凝固が進む中で次第に温度勾配が小さくなり、早い段階で冷却速度が減速してパーライトの析出を抑えてフェライト基地が得られる可能性を示唆する。

また、塑性加工を加える部位付近で湯口に近い側と遠い側の冷却曲線を計算し比較し、図.7 に示す。湯口に近い側と遠い側の冷却曲線を比較すると、液相から共晶線温度に相当する $1,150^{\circ}\text{C}$ 付近を経過し更に温度が下がる時点まで両者はほとんど異ならず、凝固が完了したその後の冷却曲線は、湯口側の方がゆっくりと冷却される様子が認められる。これにより、凝固が完了するまでにおいて、塑性加工部位の全周についてほぼ同様な冷却過程を経ると推定できる。

これらの結果から、鑄物の一点部位を特定して冷却速度を制御することは容易でないことが推定されるが、特に鑄物の形状が決まると冷却速度を制御するには余分な肉厚をつけるか注湯温度を上昇させなければならなくなる。鑄物肉厚の増大はその後の機械加工量を増やし、注湯温度の上昇は鑄鉄の溶解に際してより多くのエネルギーを必要とするなど、いずれも生産性を低下させる。したがって、冷却速度による鑄鉄材質制御は合理的とは言えない。

1-3-4 実製品を想定した化学組成による材質制御

実製品の鑄物形状において、塑性加工部位の肉厚は概ね 6mm である。また、形状の特徴から幾分冷却されやすい部位であることは予測されるが、前述の階段状試験片において金属組織は 6mm 以上で大きな差異が認められなかったことから、材質制御の可能性評価の目的においては、この一から試料を採取しなくとも評価は可能であると考えた。そこで、一般の生産ラインで採られている試験試料の採取方法を適用し、図.8 に示す“ノックオフ型”試験試料を鑄造し、これを JIS 4 号試験片に加工して引張強さ、伸び、ブリネル硬さを計測後、金属組織観察を行った。鑄造試料は、表.2 に示す化学組成とし、黒鉛球状化処理は、KC アロイ (KC-3/有) 日下レアメタル研究所製) を $1.5\text{wt}\%$ を取鍋処理にて行った。出湯温度は、 $1,450^{\circ}\text{C}$ とし、球状化処理後に除滓したあと、Fe-Si ($75\text{mass}\%\text{Si}$) を $0.3\text{wt}\%$ で接種処理して鑄型に注湯した。

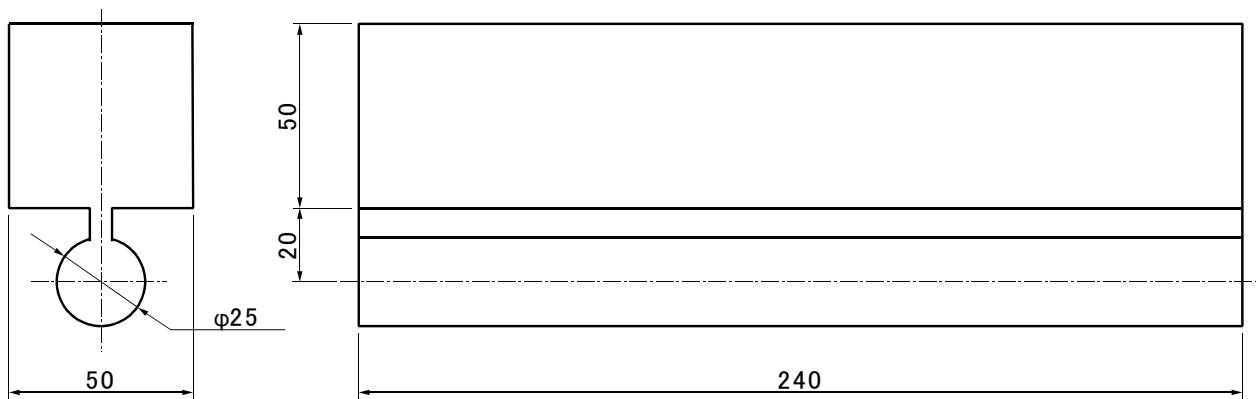


図.8 引張試験用ノックオフ試験片形状

表.2 鑄造試験供試材の目標化学組成

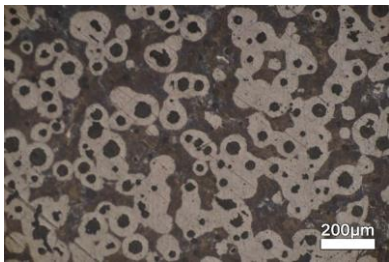
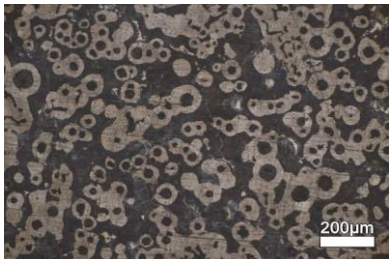
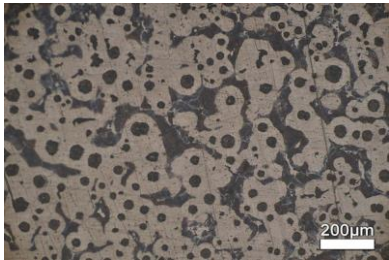
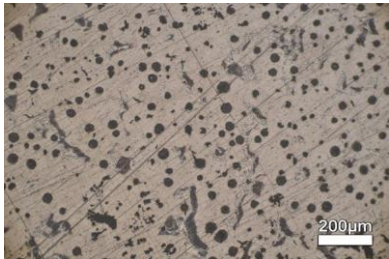
試料番号	C	Si	Mn	P	S	Mg	CE 値（参考）
元 湯	3.6～3.9	1.2～2.1	0.25	<0.03	<0.01	—	4.3
処理後	3.5～3.8	2.2～3.0				>0.02	4.5
	化学分析値		金属組織写真		金属組織計測結果		
	C : 3.67% Si : 1.86% Mn : 0.16%				黒鉛球状化率 : 98.6% 黒鉛平均粒径 : 33.0 μ m 黒 鉛 粒 数 : 121.8 個/mm ² フェライト面積率 : 53.4%		
	C : 3.70% Si : 2.21% Mn : 0.33%				黒鉛球状化率 : 97.2% 黒鉛平均粒径 : 27.9 μ m 黒 鉛 粒 数 : 150.5 個/mm ² フェライト面積率 : 55.6%		
	C : 3.80% Si : 2.65% Mn : 0.14%				黒鉛球状化率 : 97.0% 黒鉛平均粒径 : 30.5 μ m 黒 鉛 粒 数 : 132.3 個/mm ² フェライト面積率 : 72.7%		
	C : 3.77% Si : 3.00% Mn : 0.16%				黒鉛球状化率 : 93.5% 黒鉛平均粒径 : 27.3 μ m 黒 鉛 粒 数 : 147.9 個/mm ² フェライト面積率 : 94.4%		

図.9 鑄造試験試料の化学成分と金属組織

試験結果から、代表的な試料の金属組織写真を図.9に示す。これらから、化学組成の珪素量が増大するにつれて金属基地組織中のフェライトの面積率が増大する傾向が認められた。また、珪素量と機械的性質の関係を図.10に整理した。珪素量が増えるにつれて、引張強度は低下傾向が、伸びは増大傾向が確認された。ブリネル硬さについては、これらに比較して強い相関が認められなかった。

1-3-5 鋳鉄材質の再現性試験

試験結果から、かしめ加工に最も適合すると考えられる溶湯組成を炭素量 3.6 mass%、珪素量 2.6 mass%とし、表.3に示す組成で鋳造実験を繰り返し、機械的性質や金属組織のばらつきを検証する実験を行った。接種方法については、湯口系に接種材を設置して注湯流でこれを

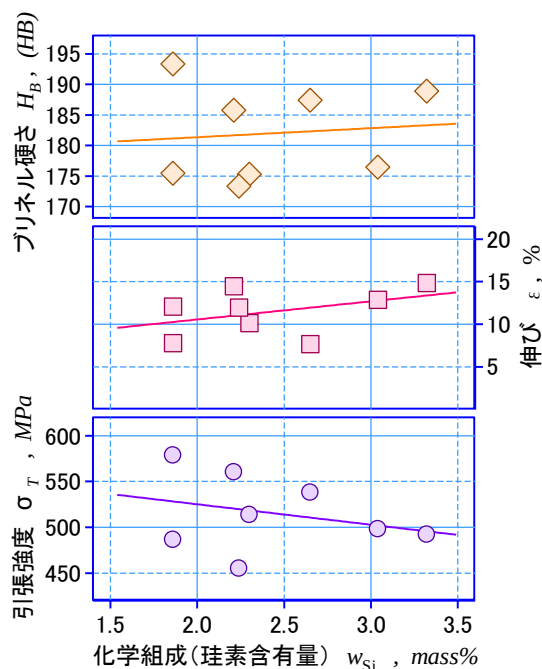


図.10 珪素量と機械的性質の関係

表.4 鋳造実験供試材の目標化学組成

溶湯	C	Si	Mn	P	S	Mg	CE 値 (参考)
元 湯	3.7	1.8	<0.25	<0.03	<0.01	—	4.3
処理後	3.6	2.6				>0.02	4.5

溶解しながら行う方法を採用した。鋳造実験で溶解ごとの化学成分を検証したところ、図.11に示すように、概ね±0.2 mass%以内の範囲に分布し、若干のばらつきが認められた。これらの試料について、機械的性質（引張強さ、破断伸び、ブリネル硬さ）を計測した結果を図.12に示す。いずれも横軸は、炭素量と珪素量による指標である炭素当量（CE 値）で整理した。炭素当量の変化に対して、引張強さ

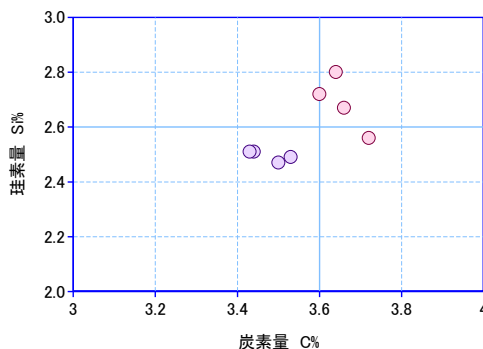


図.11 溶解バッチごとの鋳造試料の炭素および珪素含有量の分布

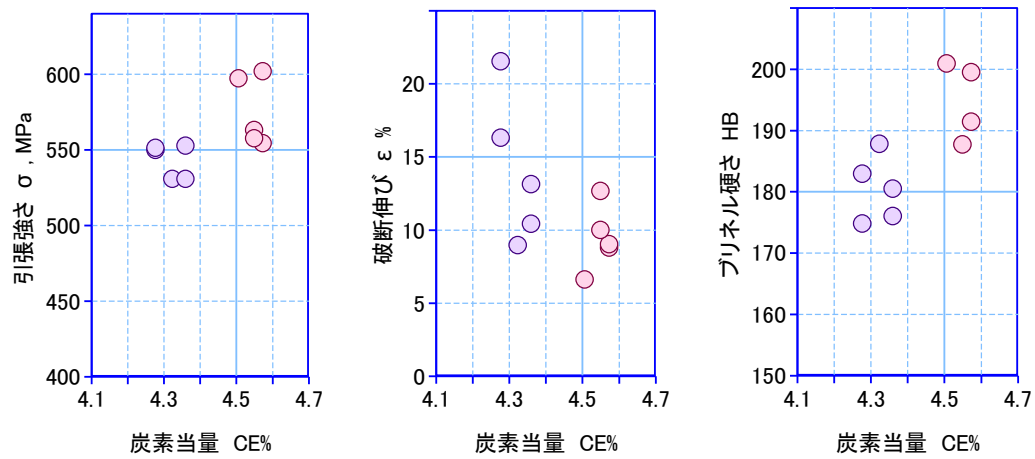


図.12 ノックオフ試験片の機械的性質

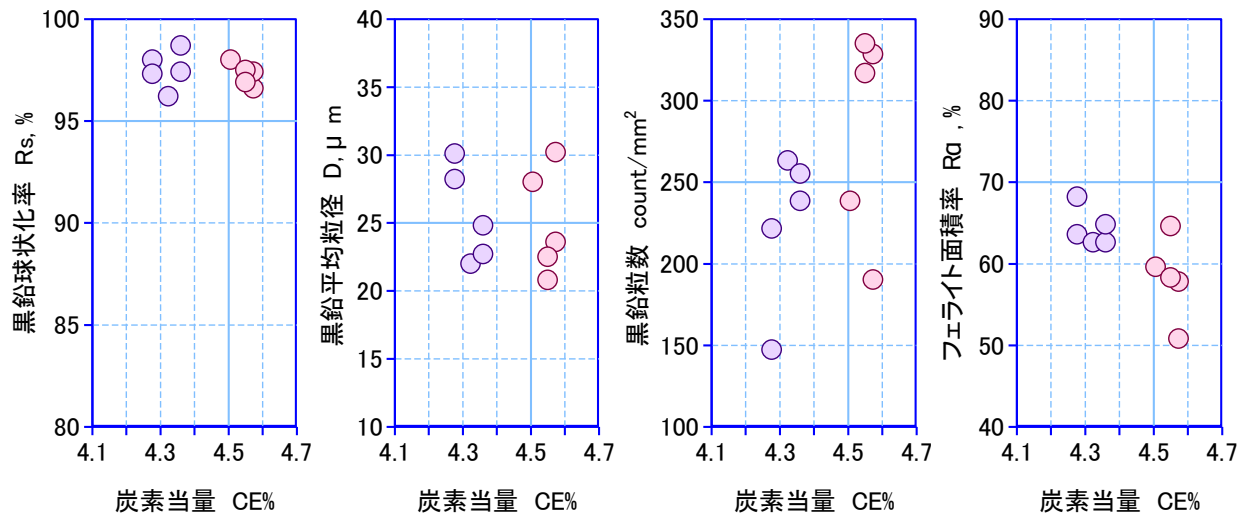


図.13 ノックオフ試験片の組織観察結果

とブリネル硬さが正の相関が認められ、それらのばらつきが概ね $\pm 5\%$ 程度であった。これに対して破断伸び炭素当量に対して負の相関が認められ、その値のばらつきは10%を超える範囲に分布した。

次に、組織観察結果についても、黒鉛球状化率、黒鉛粒数、黒鉛粒径、フェライト面積率を画像計測し、その結果を図.13に示す。黒鉛球状化率は、いずれの試料においても95%を超えており、黒鉛球状化処理が良好に行われたことを確認した。黒鉛の平均粒径は、いずれの試料も概ね $25 \pm 5 \mu m$ の範囲内にあり、ほぼ安定した結果が確認された。これに対して単位面積当たりの黒鉛粒数は、炭素当量に対して正の相関が認められ、概ね250~300個/ mm^2 に対して10%程度のばらつきが確認された。ただし、一部の試料で ± 100 個/ mm^2 程度の差があるものが認められ、ばらつきの範囲は大きいものとなった。

1-4 生産ラインにおける材質の検証

かしめ接合による複合化技術の実用化について、本技法を自動車部品に適用することを想定した場合には、その品質の安定化は重要な視点となる。ここでは、鋳鉄品の材質の視点から実生産ラインにおける鋳鉄品品質を検証するため、現状の鋳造ラインにおいて目標組成の鋳鉄溶湯で試料を製作し、その機械的性質と金属組織を調べた。鋳鉄品の試料は、本共同研究に参画する佐藤鋳工株式会社の実生産ラインで製造する鋳鉄品から、今回の目標化学組成（炭素量 3.6 mass%、珪素量 2.6 mass%）に適合する製品を鋳造する溶湯でノックオフ試料を鋳造し、それからJIS 4号試験片に加工して機械的性質として引張強度、破断伸び、ブリネル硬さを試験するとともに、金属組織観察により黒鉛球状化率、黒鉛粒径、黒鉛粒数、基地組織のフェライト面積率を計測した。

供試材の炭素量、珪素量を図.14 のヒストグラムに整理した。炭素量は、平均値が 3.657 mass%、標準偏差が 0.086 であった。珪素量は、平均値が 2.497 mass%、標準偏差が 0.062 であった。珪素量の平均値が目標組成よりも約 0.1 mass%ほど低い、いずれも、ばらつきは概ね±5%以内に収まっている。供試材の引張強度、伸び、ブリネル硬さを図 15 のヒストグラムに整理した。引張強度は、平均値が 526.24MPa、標準偏差が 14.46 であった。伸びは、平均値が 19.210%、標準偏差が 1.476 であった。ブリネル硬さは、平均値が HB165.6、標準偏差が 3.97 であった。機械的性質のばらつきを比較すると、引張強度とブリネル硬さが概ね±5%のばらつきであったのに対して、伸びのばらつきが±10%超と大きいことが分かった。

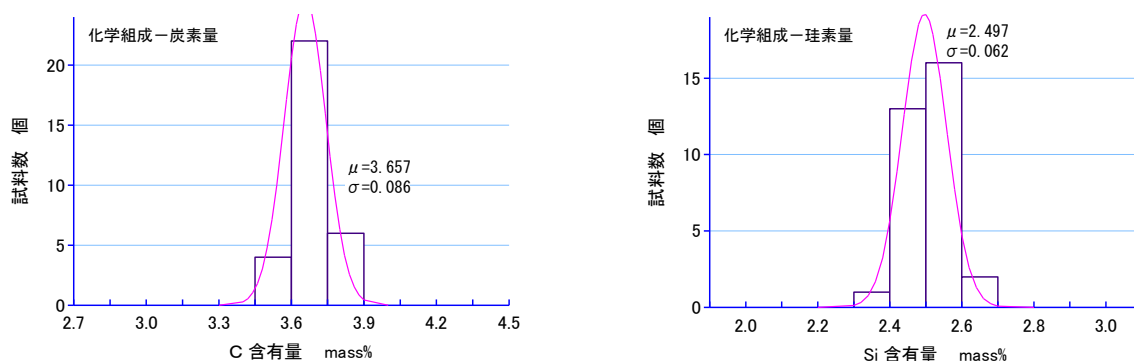


図.14 供試材の化学組成(C,Si)のばらつき

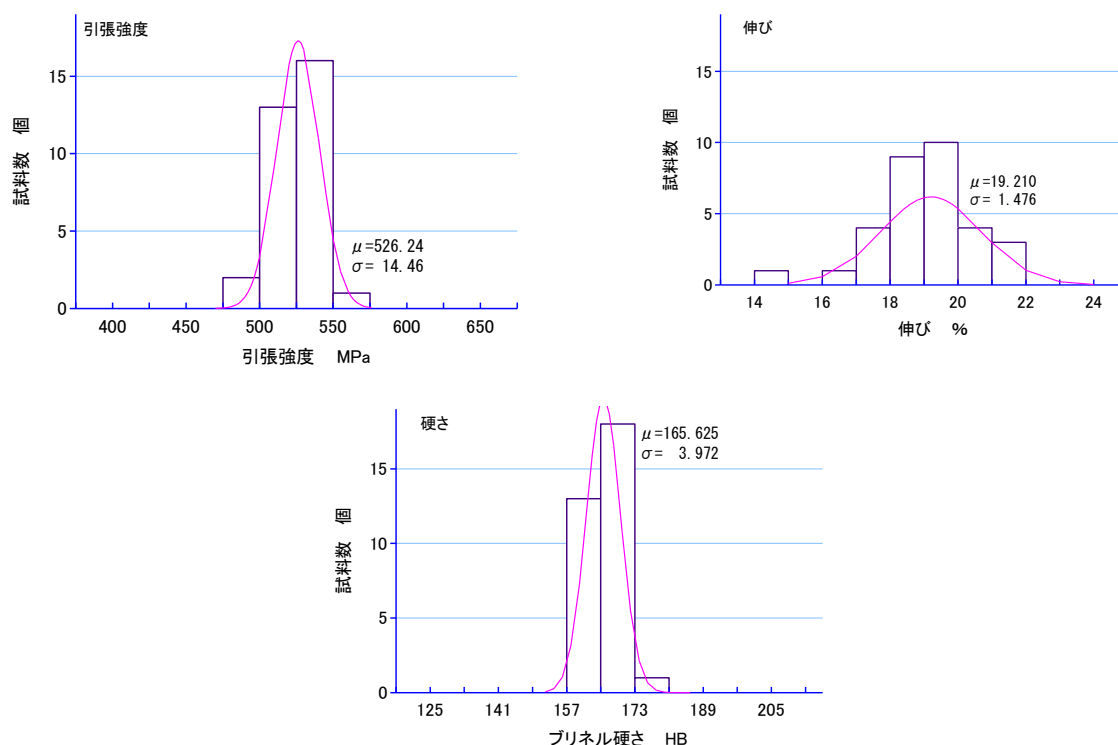


図.15 供試材の機械的性質のばらつき

供試材の金属組織計測結果を図.16 のヒストグラムに整理した。黒鉛球状化率は、平均値が 91.238%、標準偏差が 0.785 であり、概ね 90%以上となった。黒鉛平均粒径は、平均値が $33.272 \mu\text{m}$ 、標準偏差が 2.633 であった。単位面積当たりの黒鉛晶出数は、平均値が 183.034 個/ mm^2 、標準偏差が 33.048 であった。基地組織中のフェライト面積率は、平均値が 66.325%、標準偏差が 4.789 であった。

供試材の金属組織について、黒鉛形状の指標である黒鉛球状化率はほとんどの試料で 90%程度あるいはそれ以上の品質で安定したが、黒鉛の晶出形態としての黒鉛平均粒径、黒鉛粒数、および基地組織中のフェライト面積率は、数値のばらつきが大きく、制御の難易度が他の品質よりも高いことが分かった。また、これが破断伸びのばらつきにも影響していると考える。

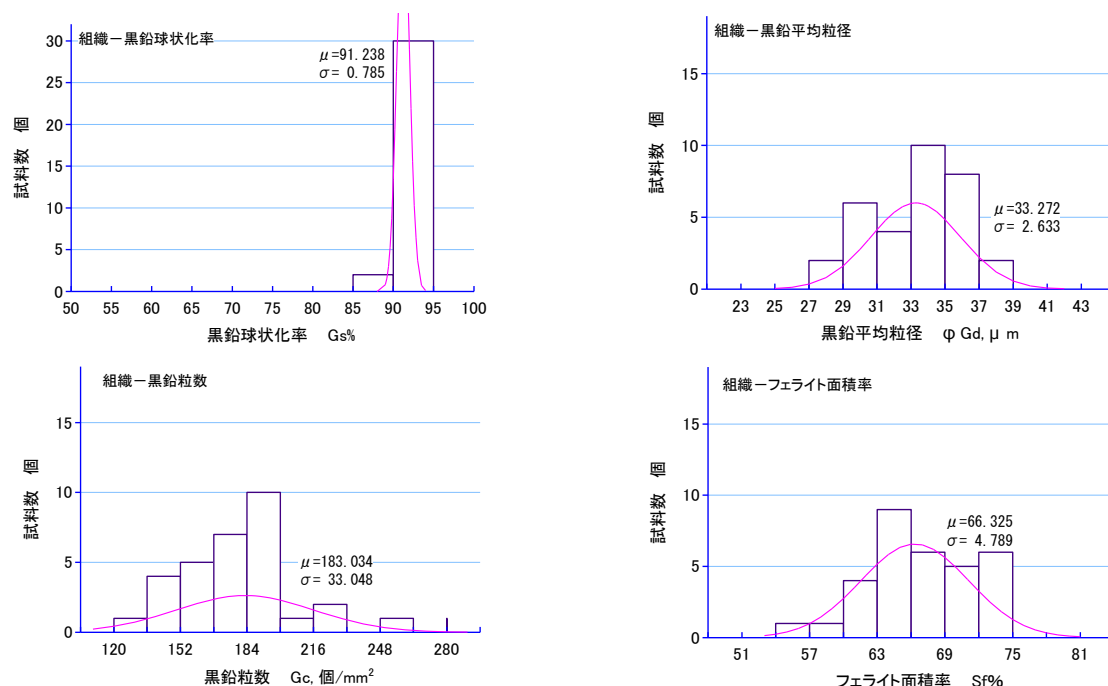


図.16 供試材の金属組織計測値のばらつき

1-5 まとめ

塑性加工に適した鋳鉄材質を得るための材質制御技術に関する試験を行い、以下の知見を得た。

階段状試験片を用いた鋳造実験により、鋳造後の冷却条件と化学成分の違いが鋳鉄材質に与える影響を調べ、冷却速度が遅く、炭素当量（CE 値／炭素と珪素の含有効果を炭素換算した値）が高い試料で金属基地組織中のフェライト面積率が大きく延性が期待できることを確かめた。

実寸サイズを想定した鋳造試験試料について鋳造解析を行い、鋳造後の冷却速度を見積もった結果、塑性加工部位は冷却速度が相対的に大きくなるが、鋳造モデルで十分な肉厚を設けることで急冷の影響が抑えられること、生産性の観点から溶湯温度を上げにくいことから、冷却速度による材質制御は合理的でないと判断した。

化学成分による材質制御法について、特に珪素含有量の鋳鉄基地組織に及ぼす影響が顕著であり、珪素量が増大するにつれて鋳鉄の延性が増す傾向を確認した。試験結果から、引張強さと伸びについて珪素量との相関関係を認め、かしめ加工に適する鋳鉄材質が得られる化学組成として、炭素 3.6 mass%、珪素 2.6 mass%の目標値を選定した。この目標組成により、量産を想定した鋳鉄材質の再現性試験を行い、実操業における炭素量と珪素量の制御におけるばらつきの範囲を確認した。この範囲における機械的性質、金属組織観察のばらつきを調べたところ、引張強さ、ブリネル硬さ、伸び、フェライト面積率、黒鉛粒径、黒鉛粒数については概ね設定値のばらつきの範囲となることを確認した。

実生産における鋳造試料の機械的性質、金属組織観察の再現性を検証したところ、引張強さとブリネル硬さはばらつきが少なく、次いで伸び、さらに黒鉛粒径、黒鉛粒数、フェライト面積率に一定のばらつきがあり、化学組成による黒鉛粒径・粒数、基地組織のフェライト面積率等の組織制御が比較的容易でないことが分かった。

第2節 鋳鉄の材質を損なわずに複合化強度を得るための 塑性加工プロセスの最適化

2-1 はじめに

自動車業界では、地球温暖化と環境汚染を防ぐための環境規制強化や燃料の高騰により、燃費が良く排出ガス量の少ない小型車の需要が世界的に増加している。また、東日本大震災後の経済復興を目的として、東北地方を小型車の国内生産の拠点とする計画が実行されている。世界市場が拡大し国内生産が強化される小型車において、グローバルな競争力を失わないために車の性能を高めるための軽量化、価格競争力を高めるための低コスト化、市場機会逸失を防ぐための短納期化が求められている。そのため、自動車搭載部品においても更なる小型化・軽量化、低コスト化、短納期化が求められており、実現のための研究開発が必要である。

関連する研究開発として、鋳造部品ではニアネットシェイプ、複数部品の一体化（部品点数削減）、鋳ぐるみ等による異種材の複合化などが行われている。プレス加工部品では、機械加工からの工法転換、テーラードブランク材による歩留まり向上や工数削減、板鍛造による複雑3次元形状一体成形、成形シミュレーションによるトライ工数削減などが行われている。

そこで本研究では、世界的に市場の拡大が続く小型車向けの機能部品を対象に、鋳造部品と機械加工部品の接合に塑性加工技術を応用し、部品点数削減と工程数削減により軽量化、低コスト化、短納期化を実現する複合化技術の開発を行う。

2-2 塑性加工プロセスの最適化

鋳鉄部品と機械加工されたリング部品を塑性加工によって締結する塑性加工プロセスの最適化にあたり、ミニチュアモデルを対象に塑性加工時の荷重速度と材料強度の関係、部品設計値と接合強度の関係を明らかにした。縮尺サイズモデルで得られた結果を基に、実寸大モデルの塑性加工の最適条件を明らかにするとともに、量産に向けて部品の性能向上とサイクルタイム短縮を図った。

2-2-1 荷重速度と材料強度の関係

プレス加工時の動作（モーション）を変えて鋳鉄の板材（図1）の潰し加工を行い、被加工材の外観観察、塑性変形量および塑性加工後の材料強度を測定した。その結果、荷重速度が大きいと板厚が6mm以下の時に材料が割れた。これは、材料の伸びがパンチの移動速度に追従できていないこと、材料接触時の衝撃が大きいことなどが原因と考えられる。最大加工荷重は板厚による大きな違いはないが、段階的に下降するモーションで加工を行うと小さくなった。これは、上下動を繰り返すことで荷重速度が小さくなり加工エネルギーが不足したためと考えられる。板厚の減少率は、板厚が6mm以上の時に荷重速度が大きいほど大きくなった。ブリネル硬さは、板厚が6mm以上の時に段階的に下降するモーションで加工を行うと減少したが、それ以外のモーションでは同程度のままか向上した。これは、加工エネルギーが足りないため上面から下面まですべての領域を潰すことができず、組織が不均一になったためと考えられる。

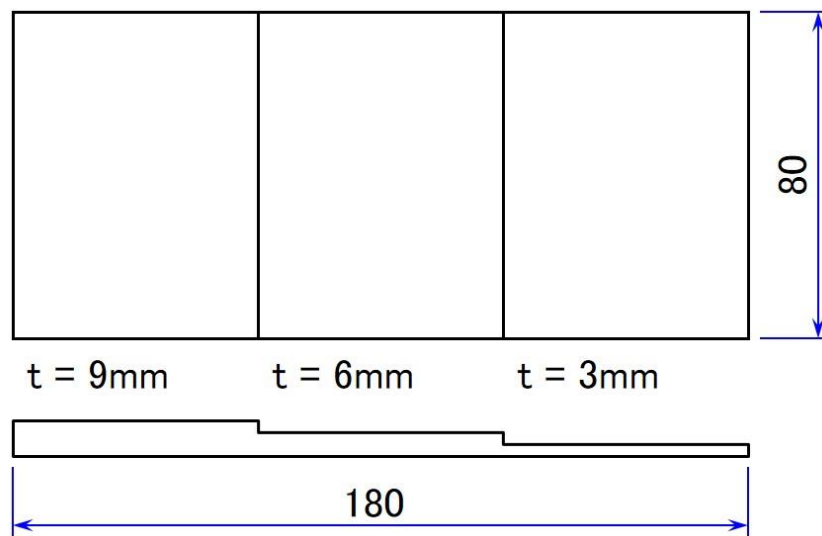


図1 板材の潰し加工

2-2-2 ミニチュアモデルでのプレス加工モーションと塑性加工品質の関係

ミニチュアモデルを用いた塑性加工（図 2）を行い、プレス加工モーションと材料組織、塑性加工品質の関係について調べた。その結果、材料組織のフェライト率が低いと荷重速度が上がった際に割れが発生した。潰し加工と同様に、材料の伸びが金型の移動速度に追従できていないこと、材料接触時の衝撃が大きいことなどが原因と考えられる。フェライト率が小さい場合、加工後の寸法は一定であったが、フェライト率が大きくなると加工後の寸法が大きくなった。これは、材料が柔らかすぎるとモーション等の加工条件の影響を受けて材料の伸び量が変わるためと考えられる。

また、最大加工荷重はモーションやフェライト率でほぼ変わらないことから、塑性加工時に必要な加圧力は、金型部品の形状や被加工材の寸法で決まると考えられる。

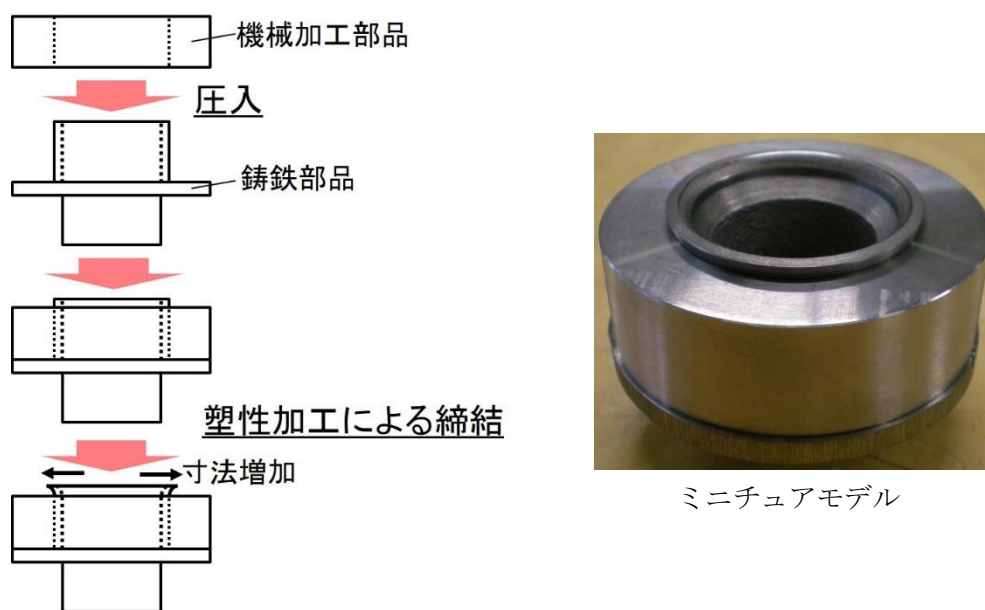


図2 ミニチュアモデルを用いた塑性加工による締結

2-2-3 ミニチュアモデルでの設計値と接合強度の関係

ミニチュアモデルを用いて圧入加工と塑性加工を行うにあたり、圧入加工および塑性加工中の最大加工荷重の測定および加工後の外観の観察を行った。その結果、全ての締め代で外観にワレが発生しなかった。これは、鑄鉄の延性が十分あったためと考えられる。圧入加工時の荷重については、締め代が大きいほど値が大きくなっており、締め代と圧入抵抗に相関があることが確認できた。塑性加工時の荷重については、大きな違いがないことから締め代と相関がないと考えられる。これらの実験結果から最適な締め代を明らかにし、実寸大モデルの設計値に反映させた。

2-2-4 実寸大モデルでの塑性加工の最適化

実寸大モデル（図3）を用いて、プレス加工時のモーションと塑性加工品質の関係について調べた。圧入および塑性加工を行ったところ、全てのモーションで割れが発生した。最下点での金型の隙間（ダイハイト）が小さいほど割れが明瞭であり、最下点に繰り返し下降するモーションの場合で最も明瞭な割れが発生した。これは、塑性加工部の厚みが不足しており、金型を押し付ける量が増えるほど、また、最下点で何度も打つことで割れが広がるためと考えられる。スリップトルクについては、ばらつくものの、圧入のみと比較して大きな締結力が確認できたことから、塑性加工部の厚みを適切な値にすることで十分な締結力が得られると考えられる。これらの実験結果から、塑性加工部の厚みの適正值と最適なモーションを導出した。

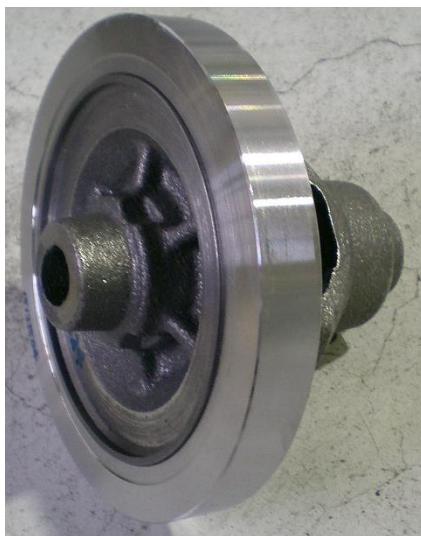


図3 実寸大モデル

2-2-5 塑性加工部の溝切

機械加工部品の溝切、圧入加工、塑性加工を行った試験体のスリップトルクの測定を行い、溝切効果について確認した。その結果、溝を増やすことによりスリップトルクが増加した。これは溝に鋳鉄が流れ込むことで回転に対する抵抗になっているためと推察される。そこで加工品をカットし、塑性加工部を顕微鏡で観察（図4）するとともに、溝への鋳鉄の流れ込み部の面積から、増加するスリップトルク量を計算した。計算値に対して実測の方がスリップトルクの増加効果が大きくなったが、これは塑性加工時に鋳造部品の径が大きくなったためと考えられる。

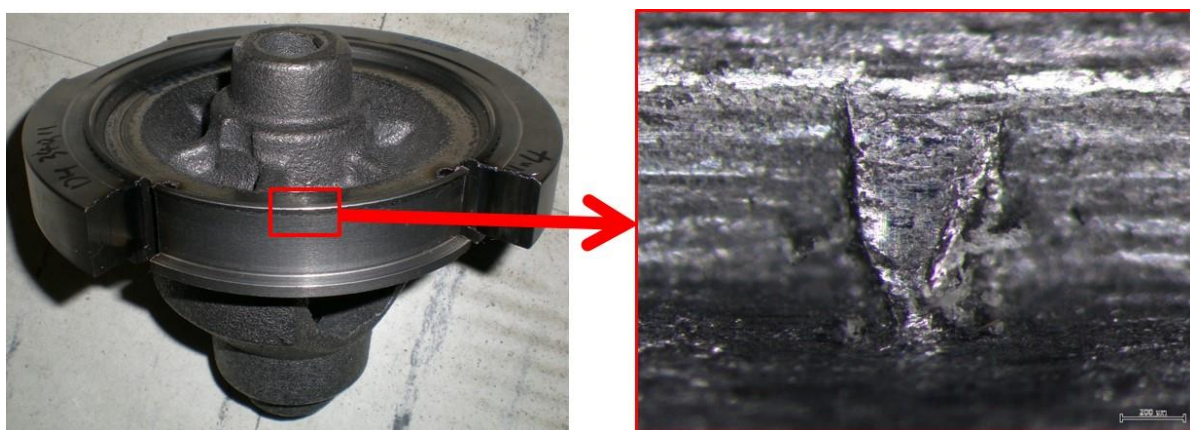


図4 鋳鉄部品の溝への流入

2-2-6 締め代の増加

スリップトルクの更なる増加を目的として、締め代を大きくした鋳鉄部品と溝切した機械加工部品を嵌め込み、その後塑性加工した場合のスリップトルクについて測定した。締め代は3種類としたが、

これまで通りの圧入が困難と思われることから焼き嵌めとし、その後塑性加工を行った。スリップトルクの測定結果を表 1 に示す。

表 1 スリップトルク測定結果

リング種類	スリップトルク平均値 [N・m]
A	3634
B	3846
C	3601

適切な締め代とかしめ部の溝切の複合効果により、十分なスリップトルクを得られることがわかった。量産工程を想定した場合、スリップトルクのばらつきをさらに抑える必要があると考えられる。

2-2-7 圧入・塑性加工一体加工によるサイクルタイム短縮

圧入・塑性一体加工を行うと同時に、金型段替作業をビデオ撮影し、金型 1 台当たりのセット時間と取り外し時間を測定した。測定した時間から圧入加工とかしめ加工を個々に行う場合の金型段替時間と圧入・塑性一体加工の場合の金型段替時間を比較したところ、サイクルタイムを 50%削減できることがわかった。金型セット作業と金型外し作業は習熟度の向上やワンタッチ化等のカイゼンにより更に短縮できる可能性が高いと思われる。このことから、圧入・塑性一体加工による効果は生産コストの削減に大きく寄与できると考えられる。

2-3 .まとめ

初めに板材を用いて鋳鉄への塑性加工に関する基礎データを得た。次にミニチュアモデルを対象に塑性加工時の荷重速度と材料強度の関係、部品設計値と接合強度の関係を明らかにした。最後に得られたデータを活用して実寸大モデルの設計値や塑性加工条件の最適化を行うとともに、量産に向けて部品の性能向上とサイクルタイム短縮を図った。

その結果、自動車用鋳造部品を生産するための塑性加工プロセスを確立することができた。

第3節 複合化強度・耐久性に関する評価技術の開発

3-1 研究背景

近年の自動車産業において、排出ガス量が少なく低燃費な自動車の需要が増加している。それに伴い、自動車部品の小型、軽量化をはじめ、新たな製造法を導入することで低コスト化及び工期の短縮化が求められており、本事業ではデフケースとリングギアの接合法に着目した。自動車部品のデフケースとリングギアを接合する際、従来はボルト接合を使用してきたが、材料と材料を圧入することで固定するかしめ接合がボルト接合に代わる技術として注目されている。従来技術であるボルト接合は、機械加工や組立の工数が多く、ボルトを使用することによって重量が増し、コストが高くなることが欠点である。かしめ接合の場合、工程が圧入のみであるため、穴あけ等の機械加工が不要であり作業工程の短縮化を図ることができ、ボルトが不要な為、軽量化及び低コスト化が可能である。しかしながら、かしめ部の割れや緩みから抜けなどの不良現象が発生する為、かしめ部における強度評価方法を確立することが重要である。

そこで、本テーマではかしめ接合法の自動車製品への実用化を目的とし、ねじり疲労試験を行うことで、かしめ接合部の強度評価を行った。

3-2 ミニチュアモデルによるスリップトルクの測定

締め代によるスリップトルクの影響を調査するため、実寸大の寸法と比較して小さくしたミニチュアモデルを使用してスリップトルクの測定を行った。締め代を3種類として試験を行った結果、締め代0.0475mm~0.1mmの供試材が最も高いスリップトルクを示し、締め代が大きい程高いスリップトルクとなった。また、かしめ部に溝を導入し試験を行った。その結果を図1に示す、圧入する際に塑性流動によりかしめ部の結合力が高くなることを想定していたが、溝を入れた場合においても溝を導入していない供試材と比較してスリップトルクは低下しており、溝への流動が生じなかったと考えられる。

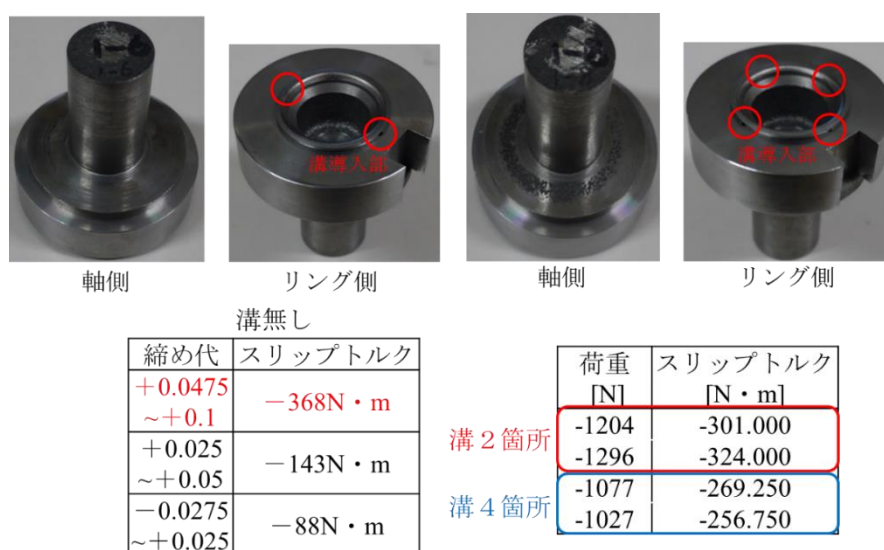


図1 試験結果

3-3 シミュレーションによる強度評価

実寸大モデルを用いて FEM 解析ソフト ANSYS によるシミュレーション解析を行った。解析結果を図 2 に示す。摩擦応力は、締め代 0.1mm において最も大きい 46.3N/mm^2 となり、締め代が増える程大きくなっており、スリップ量に関しても、締め代 0.1mm において最小の 0.014mm となり、締め代が増える程小さくなった。以上より、締め代が大きくなる程スリップトルクが増加し、かしめ部の摩擦応力が大きくなり、スリップ量が低下しているの、かしめ部の強度が向上していることが明らかとなった。

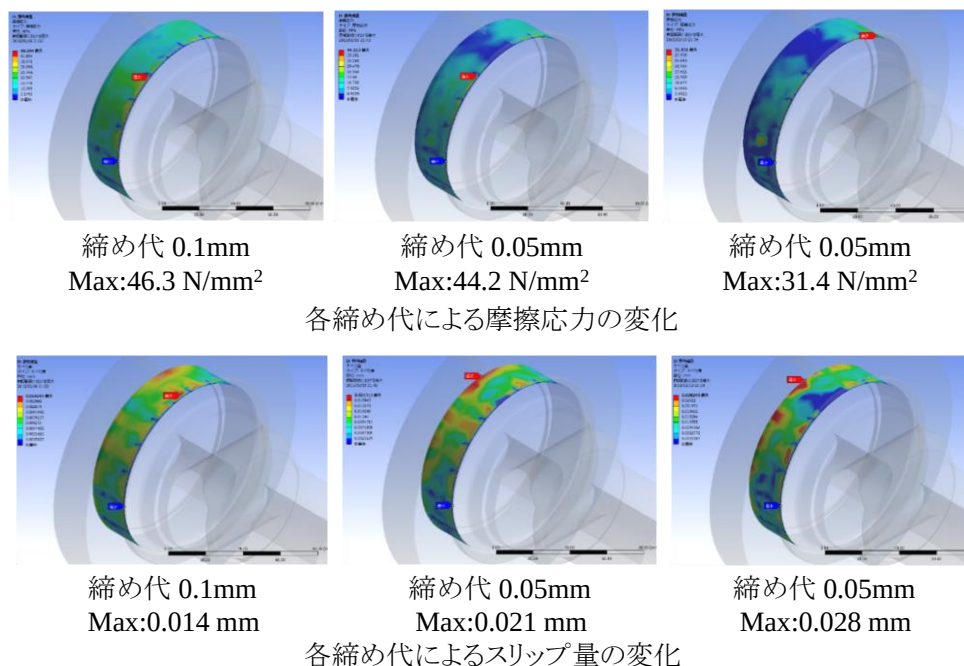


図 2 シミュレーション解析結果

3-4 動力循環式トルク負荷装置によるねじり疲労試験

供試材は、図 3 に示すボルト接合とかしめ接合による複合供試材を使用した。リングギアモデルの穴にボルト接合部品を圧入し、かしめた後、シャフト部とのボルト接合を行っている。締め代は加工誤差程度で約 $18\mu\text{m}$ の物(型番 160)と $138\mu\text{m}\sim 155\mu\text{m}$ の範囲の物(型番 RK)を使用した。軸側及び圧入部分は FCD450、リング側は S45C 焼入れ、焼戻し材を用いた。



	シャフト	リング
材質	FCD450	S45C
縦弾性係数 GPa	161	205
線膨張係数 1/°C	1.05×10^{-5}	1.17×10^{-5}
ポアソン比	0.3	0.25

図 3 供試材の外観と材質

ねじり疲労試験には、図 10 に示す動力循環式トルク負荷装置を使用した。供試材にトルクを負荷する機構は図 11 のようになっており、試験装置に供試材を取り付けた後、トーションバーをねじることによってトルクを負荷し、その状態で試験装置を締結させ、回転させることでねじり疲労試験を行う。試験装置の 2 つのエンコーダでズレを計測し、抜けを判定する。装置の基本仕様は、駆動モータ 7.5Kw サーボモータ、減速比 1/14, 供試材回転数 Max100R/M, 負荷トルク Max1500Nm, 供試材圧入リング径 Max ϕ 100mm である。

試験を行う際に供試材へ負荷されるトルクの変化を図 12 に示す。試験装置を締結する前に負荷される最大のトルクを、スリップトルクとして試験装置を締結する。締結後にトルク負荷機構を外す際にスリップトルクから 30~40%程度トルクが低下する。この低下したトルクを試験実施トルクとして、試験実施トルクから 2%低下した場合に抜けが発生したと判定し回転が停止するように設定した。また、回転数が 106 回に達した場合はその供試材においては抜けが発生しないと判断し、試験終了とした。



装置の全体像

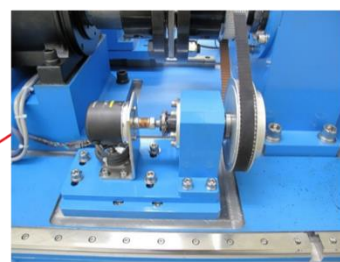
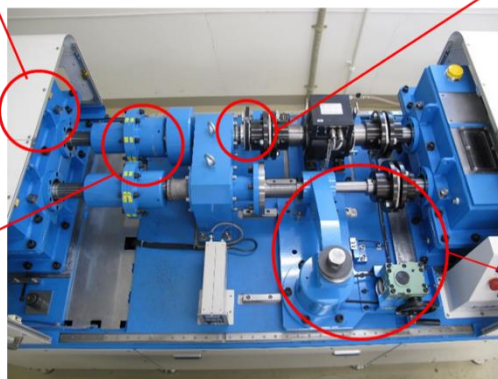


操作モニター

図 4 動力循環式トルク負荷装置の外観



エンコーダ2



エンコーダ1



試料取り付け位置



トルク負荷機構

図 5 動力循環式トルク負荷装置の機構

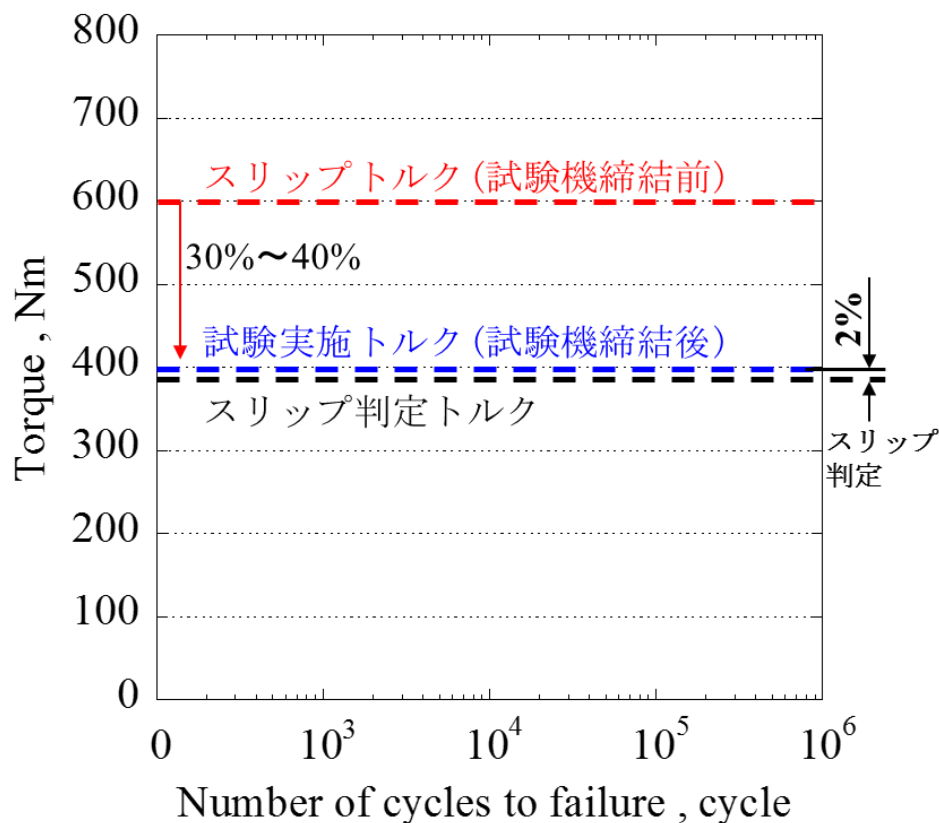


図 6 供試材への負荷トルクの変化

各供試材のスリップトルクの測定結果を表 1,2 に示す。スリップトルクにバラつきが確認されたため、最大値及び最低値であった供試材を選定し、ねじり疲労試験を行った結果を図 7,8 に示す。締め代が約 $18\mu\text{m}$ の供試材(型番 160)ではスリップトルクが 466Nm から 30%低下し、試験実施トルク 326Nm において 118536 回転で抜けが発生したが、スリップトルク 494Nm 及び 640Nm の供試材において、それぞれ 30~31%低下した 346Nm と 442Nm では抜けは発生しなかった。また、締め代が $138\mu\text{m}$ ~ $155\mu\text{m}$ の範囲の供試材(型番 RK)ではスリップトルク 1089Nm 及び 948Nm の供試材において、それぞれ 22,27%低下した 948Nm と 712Nm において試験を行ったが抜けは発生しなかった。

表 1 締め代約 $18\mu\text{m}$ の供試材におけるスリップトルク(型番 160)

	無記入	160-1	160-3	160-5	160-6	160-8	160-11	160-13	160-14
スリップトルク Nm	508	576	595	609	466	494	570	640	581

160-2,4,7,9,10,12 欠番

表 2 締め代 138 μ m~155 μ m の供試材におけるスリップトルク(型番 RK)

RK-40,41,43,48,49 欠番

	RK42	RK44	RK45	RK46	RK47	RK50
スリップトルク Nm	1001	1042	1089	1029	948	962

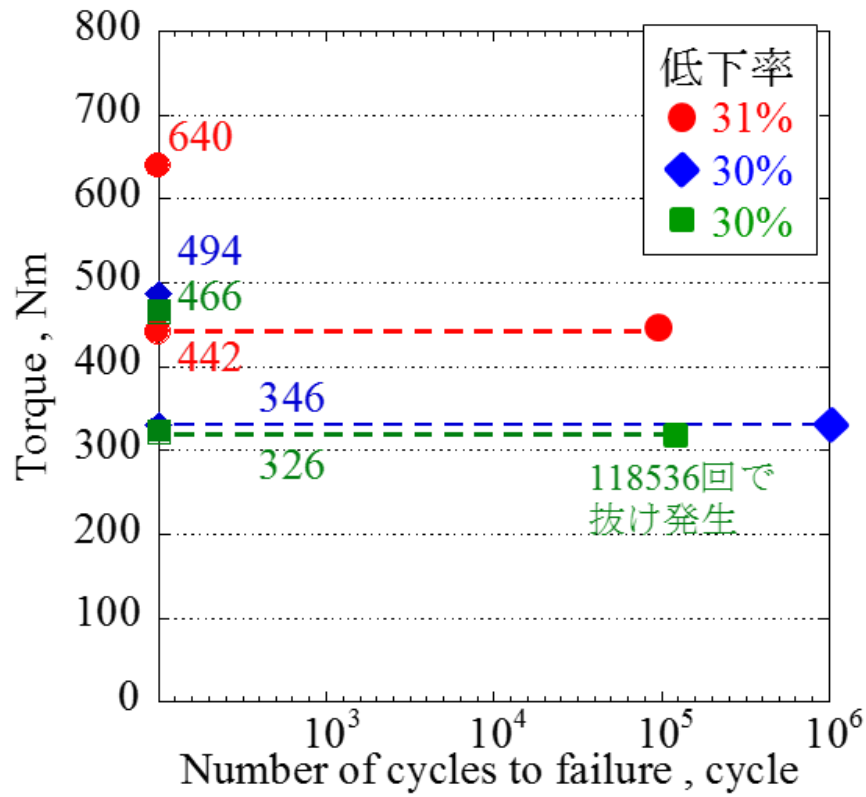


図 7 型番 160 の疲労試験結果

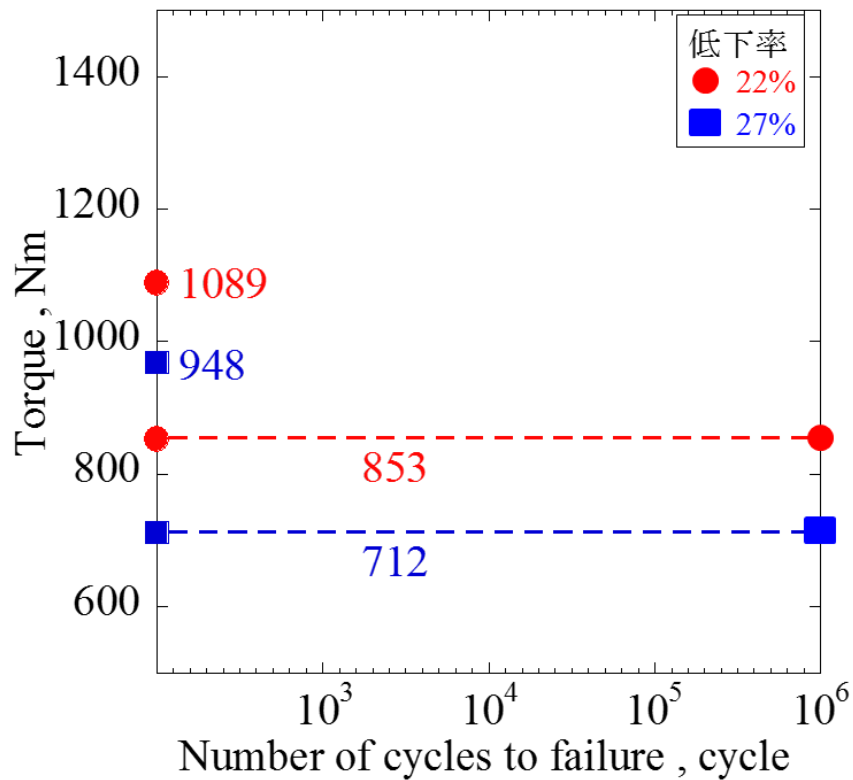


図 8 型番 RK の疲労試験結果

締め代が $138\mu\text{m}\sim 155\mu\text{m}$ の供試材における締め代とスリップトルクの関係を図 9 に示す。締め代の数値とスリップトルクには相関性が確認されず、バラつきが生じている。疲労試験において抜けが発生した供試材は締め代が最低値となったものだけであったため、締め代の僅かな誤差によるスリップトルクへ及ぼす影響が大きいことがわかる。そのため、リングやシャフトの加工精度を向上させ、かしめ工程の再現性を高めることが重要である。

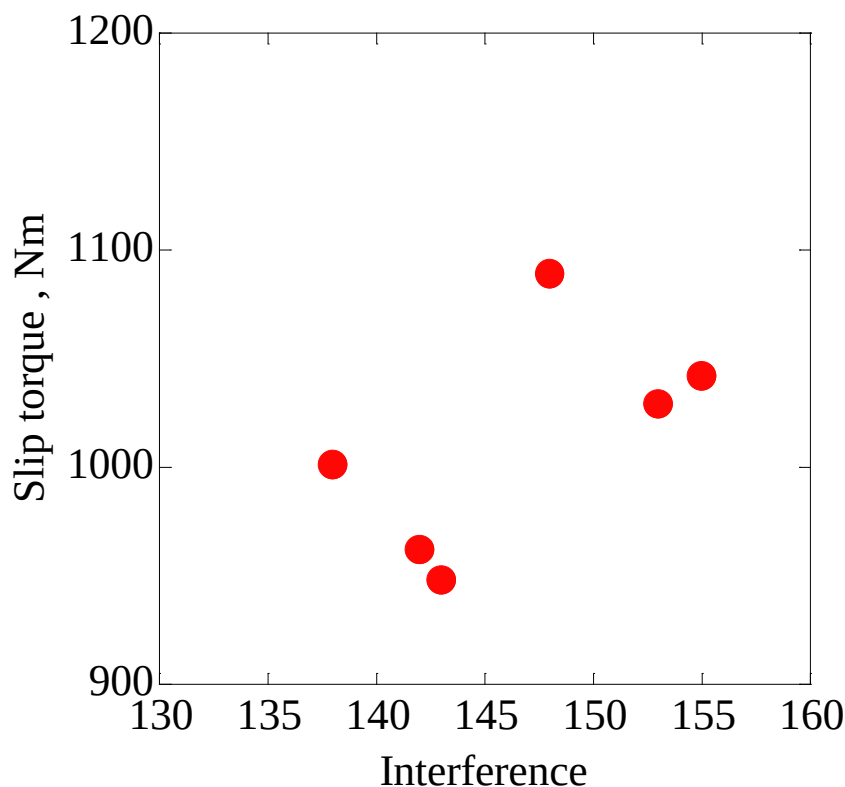


図 9 スリップトルクと圧入代とスリップトルクの関係

3-5 まとめ

本テーマでは動力循環式のトルク負荷装置にて、実寸大寸法の供試材を使用してねじり疲労試験を行い、その結果から締め代における抜けの発生やスリップトルクへの影響を調査した。試験結果より、複合供試材ではスリップトルク 466Nm で試験実施トルクが 326Nm において 118536 回転で抜けが発生した。しかしながら、これ以上の試験実施トルクでは抜けが生じなかったことから、本実験においてはトルクが 330Nm を下回った場合に抜けが生じやすくなることが推察される。また、スリップトルクと圧入代の関係性を調査した結果、バラつきがあり、相関が確認されなかったことから、僅かな締め代の差においてもスリップトルクへの影響が大きくなると考えられる、よって、加工精度や圧入技術を向上させることでかしめ部の強度を安定させることがスリップトルクの再現性の観点からも重要である。

第3章 全体総括

本事業では、自動車部品に求められる小型・軽量化、低コスト化、短納期化への厳しい改善要請に対して、鋳鉄鋳造品と機械加工品による複合部品に着目し、鋳鉄の延性を利用した「かしめ接合」に関する研究・開発により、従来品に比べて部品点数、加工工程数が少なく、かつ軽量化が可能な自動車用部品の複合化技術の開発を行った。

本技術開発にあたっては、参画機関である北海道立総合研究機構工業試験場が蓄積していた、球状黒鉛鋳鉄品の塑性加工を用いた鋳造部品複合化技術の基礎的知見を発展させ実用化を図ったものである。既往の研究では、設備的制約から実験室レベルの縮尺サイズモデル試料による研究実績にとどまったが、これを実製品に展開するためには実製品寸法の鋳物試料において「かしめ接合」を可能とする強度、伸び等の材質を有することが要求される。

このため、本事業では複合化技術を実現するために、研究開発を3要素技術に分け、それぞれを次のサブテーマを設定し、3ヵ年の実施を計画し、各年度毎に当初の実験室レベルの縮尺サイズモデルから実スケールモデル、量産化をイメージしたモデルへとレベルアップを図り実用化を図った。

- ①鋳造部品の材質制御技術
- ②鋳造部品向けのプレス加工技術
- ③複合部品の評価技術
- ④本技法による量産化技術の研究・開発(①、②と連動して行う)

3-1 研究開発の成果

サブテーマ① 「かしめ接合」に適した鋳鉄材質を得るための材質制御技術の開発

平成25年度（1年目）： 鋳物部品を縮尺サイズモデルから実製品寸法に合わせてスケールアップする際、鋳造後の冷却条件が異なるため鋳鉄材質が変化するため、かしめ接合に要求される鋳鉄の強度、伸び、硬さなどの機械的性質を所定の目標に到達させるための溶湯組成（化学成分）の調整、接種処理における処理剤選定と処理タイミングを変えた場合の鋳鉄鋳物組織の変化を調べ、引張強度 450MPa、伸びの鋳鉄材質制御に関する制御指針をえることができた。

また、鋳鉄材質の最適な制御のために、鋳造シミュレーション解析の有効な利用法を開発した。最適な注湯温度、湯口系・押し湯などの鋳造方案を得るため、鋳造時の鋳物・鋳型温度変化を計測し、数値解析に用いる境界条件とすることで精度の高い解析が可能となった。

平成26年度（2年目）： 鋳物部品をスケールアップした場合に想定される鋳造後の冷却条件や溶湯処理効果に関する評価を行うため、化学成分および溶湯処理プロセスの金属組成への影響を調べ、実製品寸法における鋳鉄材質制御に関するデータ蓄積を行った。また、鋳造シミュレーション解析を利用した鋳造方案設計を行い、冷却速度による材質制御の可能性を検証した。その結果、FCD450相当の実スケールモデルの材質制御が可能となった。

平成27年度（3年目）： 本技術開発による製品の量産における鋳鉄品質の安定化という視点から、実生産ラインを想定した接種処理の方法を検討するとともに、適正な化学組成に配合した鋳鉄溶湯による鋳鉄品質のばらつきに関する試験を実施した。また、実生産ラインにおいて目標組成で製造した鋳鉄品の機械的性質および金属組織観察について、それらのバラつきの程度を確認した。その結果、量産化に向けた品質安定化の指標として、同じ化学組成に対して金属組織におけるフェライト面積率および引

張強度、伸び、ブリネル硬さのばらつきの幅を10%以内に制御できることを確認した。

サブテーマ② 鋳鉄の材質を損なわずに複合化強度を得るための塑性加工プロセスの最適化

平成25年度（1年目）： かしめ接合の品質は、塑性変形を加える際の加工変位、速度および工程等の影響が及ぶものと予測され、これら影響の程度を調べるため、鋳鉄試験試料を用いてプレス加工時の変位、速度、工程を変化させたときの、塑性変形量および塑性加工後の材料強度を計測し、かしめ接合加工の最適条件を導出する手法が得られた。

また、実部品寸法の鋳鉄鋳物部品のかしめ接合加工では、縮尺サイズの場合に比べて塑性変形量や鋳物材質が異なると思われることから、実製品寸法の鋳物材質の制約範囲を想定し、鋳鉄組織のフェライト/パーライト率、黒鉛の粒数・粒径・球状化率などが変化したときの塑性加工パラメータ（変位・速度・工程）の塑性加工品質への影響の解析から、実製品寸法試料のかしめ接合における最適加工条件の設定手法が得られた。その結果、塑性加工後材料の引張強度の劣化を-10%以内に確保し、鋳鉄組織のフェライト率において30～50%の材質に対する最適な加工条件を明らかにすることができた。

平成26年度（2年目）： 試作したFCD450相当の材質について、実スケールモデルの金型を用いて複合化加工試験を行い、プレス加工時の変位、速度、工程を変化させたときの外観上の加工品質（割れの有無）の評価を行い、かしめ接合加工の最適条件を導出した。また、従前の単純圧入・かしめ接合で得られる静トルク強度に対して、強度強化を発現するための接合部表面性状の加工法を検討した。塑性加工接合部の表面形状とかしめ加工品質の相関性を調べるため、縮尺サイズの塑性加工試験で接合部の性状を変化させた複合化試料を作成し接合強度を測定し、最適条件を明らかにできた。

平成27年度（3年目）： 当初目標値として「実スケールモデルのかしめ加工による複合化プロセスにおいて、FCD450相当の材質における最適な加工条件を明らかにする。また、圧入加工およびかしめ加工を行う複合加工のサイクルタイムを50%以上短縮する」こととして開発を進め結果、圧入後の鋳造部品とリングギアを回転させながら少しずつかしめ加工を行うことで、鋳造部品の流動化を促し締結強度のばらつき低減を図る逐次加工を検討し、かしめ加工品質の安定化を図るとともに最適な加工条件を明らかにした。圧入加工とかしめ加工を同時に行う一体金型を製作して段替時間の短縮を図り、サイクルタイムを50%短縮することができた。

サブテーマ③ 複合化強度・耐久性に関する評価技術の開発

平成25年度（1年目）： 評価方法の開発を行うため、縮尺サイズモデル用の評価試験装置の基本設計を行い、スリップトルクを評価するための縮尺サイズモデル締結評価機（φ40mm：トルク負荷最大能力：400N・m）が開発された。シミュレーションや実測の結果から、スリップトルクの計測によるかしめ強度評価法が可能であることが判明し、手動縮尺モデル評価機から自動実機サイズ評価機的设计を行うことができた。

平成26年度（2年目）： 平成25年度に実施した縮尺サイズモデル締結評価試験で得られた知見に基づき、実スケールモデルに対応した評価装置「動力循環式トルク負荷試験装置」の試作開発を行った。本試験装置（φ1000mm：トルク負荷最大能力：1500N・m）は、かしめ接合部に連続的に動力を入力し、発生するスプリットトルクを計測する。これにより、実機で発生する最大トルクに対応するかしめ締結強度を評価することが可能となった。平成25年度に引き続き、縮尺サイズモデル締結評価機を利用して、溝無し・溝あり（2箇所、4箇所）の各種リングギアのスリップトルク測定も併用できる。

平成27年度（3年目）： 動力循環式トルク負荷試験装置を用い、サブテーマ②で製作した実製品寸法の複合化加工試料（実スケールモデル）を用いて、かしめ接合部の静トルク強度および疲労強度を計測し、「かしめ強度」に関するデータの把握を行った。供試材を試験機に取り付け前に静的条件でスリップトルクを測定し、試験機に締結後に静的トルク（実行トルク）を測定する。その後、荷重を掛け動的試験を実施し、実行トルクが98%の値となった時にスリップした（疲労限に達した）と判断する。各種供試材の試験結果から、試験機への取り付け前後で約30%程度のトルク減が確認された。このトルク減は供試材によってばらつく値であった。その後動的試験において、トルク減が30%程度の供試材は疲労限が10の6乗回近いのに対し30%を超える供試材は疲労限が低い。トルク減の値が低いものほど、疲労限に達する回数が多くなることが判明した。これは、供試材（かしめ締結リングギア）の締結部すき間のばらつきによるものであり、かしめ締結部品の加工状態の精度が今後重要な課題であることが判明した。また、かしめの締め代を変化させた供試材の評価結果から、締め代が大きくなるほど摩擦応力が増加し、滑り量が減少する結果がえられた。

以上の結果から、開発した動力循環式トルク負荷試験装置は、かしめ締結リングギアの開発においての評価機として性能を十分有しており、本装置を利用した性能評価技術が確立された。

サブテーマ④ 量産を想定した複合部品の品質安定化および従来製造法との比較による優位性の検証

最終年度に目標値を次の通り設定した。「かしめ接合部の強度評価において数値のばらつきの範囲を一定値内に収める。また、従来工法による現行部品に対する寸法差を考慮した比較において、強度・品質においては同等以上、製造コストにおいては8%の削減を目指す」。これに対して、実生産ラインにおける目標組成により製造した鋳鉄品の機械的性質において、引張強さ、ブリネル硬さのばらつきについては±5%の極めて良好な再現性を確認した。黒鉛球状化率も概ね90%以上で安定した、他の諸特性として伸び、黒鉛粒数、黒鉛粒径、フェライト面積率のばらつきは±10%程度となり、黒鉛形状のばらつきが比較的大きかった。最適設計値や最適モーションを反映させた実製品サイズのかしめ加工実験を行い、スリップトルクを測定した結果、ばらつきが一定値内に収まった。また、スリップトルクの測定結果が全て目標値を達成した。

3-2 今後への対応

本研究開発は、自動車部品のデフケースを対象に、FCD450相当の鋳鉄製デフケースと鋼製リングギアとのかしめ締結を実現し、実スケール大のサンプル品の形で成果が見えるようになった。

これを実現するためには、鋳鉄の延性の品質を制御できる技術、最適条件でかしめ加工できる塑性加工技術、また、かしめ加工にも新たな加工法を採用することができた。さらにかしめ締結部品の疲労強度を評価できる動力循環式トルク負荷試験装置の開発を行うことができた。

それぞれの技術は個々でも十分に成果を上げて行けるレベルであるが、本事業ではその3要素技術を統合して取り組めたことが、新たな機械部品を効率的に作り出すことができ、たいへん有意義な研究開発であった。

今後、自動車業界を中心に、ボルト結合に替わにかしめ結合が自動車部品として、あるいは個別に延性を有した鋳造部品として、また、技術自体としても、個々の実用化を図り、商品化、ビジネス化からの事業化を目指していく予定である。本技術が広く普及していくことを期待する。

最後に、本研究開発を3年間にわたり続けることができたのは、アドバイザーとして参画された

トヨタ自動車北海道㈱の八木様、ならびに北海道経済産業局の関係者の皆さまの多大なご支援により事業を完結することができた。ここに皆様に心から感謝の意を表する。