

塑性加工に対応した高延性薄肉鋳鉄の開発

北海道立総合研究機構 産業技術研究本部 工業試験場
製品技術部 研究主任 鶴谷 知洋
(平成 22 年度奨励研究助成 AF-2010033)

キーワード：塑性加工，薄肉鋳鉄

1. 研究の目的と背景

鋳物部品において、穴あけやフランジ面加工など寸法精度が必要な部分は機械加工が行われており、機械加工費は製造原価に占める割合が大きい。そのため、コスト低減と加工時間短縮を目的として様々な検討が行われている。

大林らは鋳造後の切削加工を不要とし品質の安定性を高めるため、リベットや溶接による組立部品への工法転換を提案している¹⁾。また、松岡は高能率・高精度切削による加工時間短縮と品質向上を目的として高速ミーリング加工技術を提案している²⁾。

本研究は、機械加工をプレス加工に置換できればコスト低減と加工時間短縮につながると考え、複雑形状を低コストで量産できる鋳造技術と組み合わせた新しい量産型加工プロセスの開発を目的としている。具体的には、塑性加工に適した鋳鉄材料の材質制御技術を確認し、サーボプレスによる加工条件によって品質がどのように変化するか検証を行う。最後に鋳鉄品の塑性加工試験を行い本研究の加工技術の有効性を確認する。

2. 塑性加工に適した鋳鉄材質制御技術の確立

球状黒鉛鋳鉄材の組織写真を図 1 に示す。点在する黒点が黒鉛、黒鉛周囲の白色部分がフェライト、その他の部分がパーライトである。組織写真中の黒鉛は溶湯中のカーボンが晶出して結晶化したもので、材料の強度には寄与しない。フェライトは延性に富み、伸びなどの塑性変形能に寄与する。パーライトは硬い組織を含んでおり、材料の硬さや引張強度に影響する³⁾。

球状黒鉛鋳鉄材は、球状の黒鉛結晶が一つずつ独立し応力集中が起きにくいいため、割れにくく高い強度を持つ。そのため、靱性や伸びなどが大きく、自動車部品など高強度・高靱性を要する複雑形状の部材に用いられている⁴⁾。しかしながら、薄肉化することでチルと呼ばれる硬くて脆い組織が生じやすく、機械加工が行えなくなる問題を抱えている⁵⁾。自動車部品をはじめとする産業部品では、強度を保ちながら軽量化することが求められており、これまで様々な検討が行われている⁶⁾。

産業部品に求められる性質と鋳物部品にプレス加工を施すために必要な性質を考慮し、本研究で必要となる鋳鉄の材質を、産業機械部品に多く用いられる球状黒鉛鋳鉄を

想定し、引張強度 450MPa、伸びは軟鋼と同等の 20%以上とした。

球状黒鉛鋳鉄の組織の中で、黒鉛そのものは材料の強度に寄与しないが、黒鉛の量が多くなれば相対的に金属部分の比率が小さくなるので、黒鉛の面積率（組織写真から算出される値）が機械的性質に影響することになる。さらに、黒鉛の面積率が同じであっても黒鉛形状（黒鉛の真円度を示す指標）、黒鉛粒数（単位面積当たりの黒鉛の個数）、黒鉛粒径（黒鉛の大きさの平均値）が異なれば、引張強度、伸び、あるいは靱性といった材料特性に影響を及ぼす⁷⁾。そのため、鋳物組成および基地組織の目標値は JIS 規格の FCD450 を参考に表 1 に示す値とした。

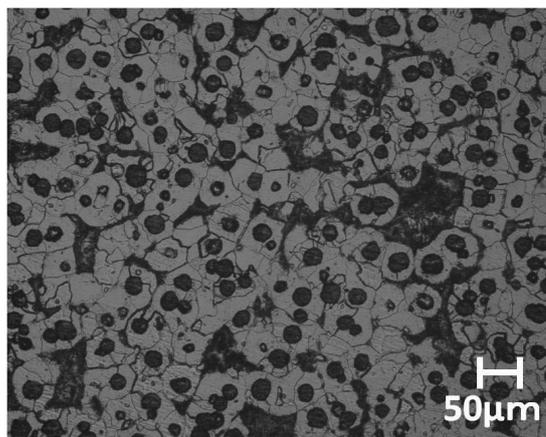


図 1 球状黒鉛鋳鉄の組織

表 1 鋳物組成・組織の目標値

C (mass%)	Si (mass%)	球化率(%)	粒径(μm)
3.6~4.0	2.3~2.7	80 以上	50 以下
粒数(1/mm ²)	フェライト率(%)	硬さ(HRB)	
1000 以上	80 以上	80~95	

2.1 薄肉球状黒鉛鋳鉄の鋳造試験

薄肉球状黒鉛鋳鉄材の試験片は、冷却速度を低下させるため「はかせ方案」を用いて薄板状とし、駄肉部も設けた。また、Mn を 0.5mass%、Mg を含む合金による脱酸処理と Fe-Si による接種処理を行った。JIS 規格で規定された FCD450 の一般的な溶湯温度 1350℃~1400℃ではチルが生じやすく十分な伸びが得られなかった。そこで冷却速度を

遅くしチルの発生を抑えるため 1450~1500℃に管理した。得られた鋳物を図 2 に示す。

試験片は、得られた鋳物から湯口および駄肉を切り離し、図 3 に示す幅 60mm 長さ 300mm 厚さ 3mm の板状に切り出した。



図 2 鋳造試験により得られた鋳物

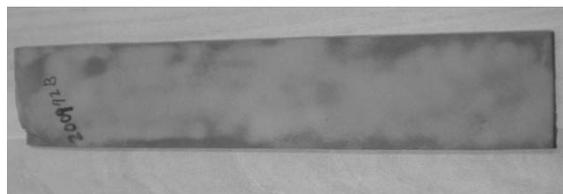


図 3 切り出した試験片

2.2 材料試験

材料試験を行うに当たり、得られた試験片の両面を鋳肌の影響が残らないよう平面研削し板厚 2mm とした。引張試験片については、さらに機械加工を行い図 4 に示す形状・外観とした。引張試験機は(株)島津製作所製の S-2000、硬さ試験は(株)ミツトヨ製の AR-20 を使用し、組織は光学顕微鏡にて撮像した画像を(株)イノテック製の画像処理ソフト QuickGrain にて解析した。

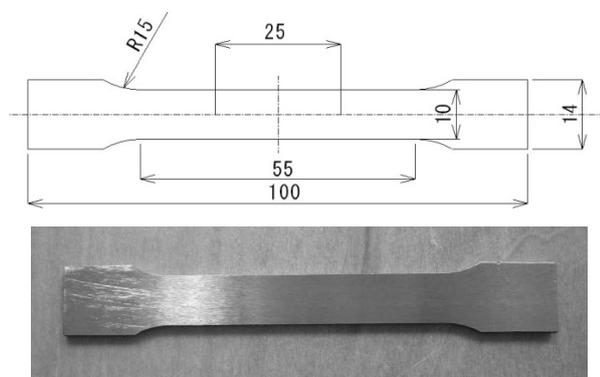


図 4 引張試験片 (上: 形状, 下: 外観)

目標とする機械的性質(引張強度と伸び)を達成した材料の材料試験結果を表 2 に、組織写真を図 5 に示す。伸びに寄与するフェライト量を増やすよう Cmass%を減らした

結果, C は 3.09~3.43mass%の範囲で, Si は範囲が広く 1.92~3.30mass%の値において目標とする機械的性質が得られた。一般的な球状黒鉛鋳鉄 (FCD450) の化学成分は C 3.6~3.9mass%, Si 2.4~3.0mass%であるが, C mass%, Si mass%ともに低めの値とすることで伸びが大きくなることが明らかとなった。

次に組織であるが、球化率はほぼ当初の目標値通りである 79.6%以上、粒径も同様に 50 μm 以下となり目標とする機械的性質が得られた。また、これらの目標とする機械的性質において、ロックウェル硬さの値も 89.6HRB となり、目標値を達成した。

以上のことから、注湯温度の管理と Cmass%の調整を行うことにより、塑性加工に必要な引張強度 450MPa、伸び 20%以上を持つ材料を得ることができた。

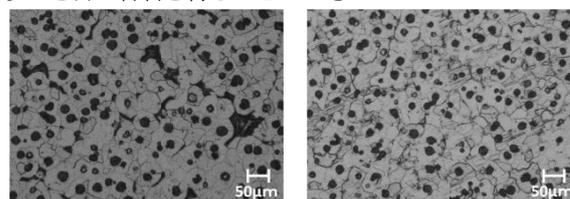


図 5 得られた試験片の組織写真 (左: A, 右: B)

表 2 材質試験結果

試験片	C (mass%)	Si (mass%)	球化率 (%)	粒径 (μm)	粒数 (1/mm ²)
A	3.43	1.92	84.3	14.1	191.6
B	3.09	3.30	79.6	11.6	274.6

試験片	フェライト率 (%)	引張強度 (MPa)	伸び (%)	硬さ (HRB)
A	88.5	492.5	24.4	89.6
B	89.0	526.8	21.6	91.1

3. サーボプレスによる加工条件と加工品質の検証

本研究では、加工特性を観察するため様々な加工条件の設定が必要になると想定されることから、一般的なプレスと異なり加工工程中の金型の位置や速度を自由に制御でき、加工可能領域が大きいサーボプレスを用いた。一般的なプレスの加工動作(モーション)とサーボプレスのモーションの一例を図 6 に、使用したサーボプレスを図 7 に示す。

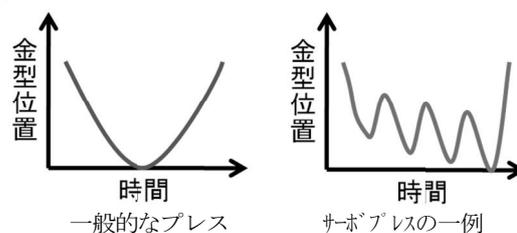


図 6 プレスによる加工動作(モーション)の違い



アイダエンジニアリング(株)製

加圧能力	800kN
ストローク	160mm
エアダクション	63kN
エアダクションストローク	70mm

図7 使用したサーボプレス

3.1 平面研削材による加工実験

開発した鋳鉄板の塑性加工品質を検証するため、表2の試験片Bの鋳造条件で得られた材料を用いて加工実験を行った。材質そのものの評価を行うため、鋳肌を平面研削し平滑な状態にした材料を用いた。実験内容は、材料の加工特性を把握するのに必要な曲げ、潰し、抜き加工の3種類の加工とした。加工の模式図を図8～図10に示す。曲げ加工はパルスハンドルによる手動加工、潰し加工および曲げ加工は一般的なプレス加工のモーシヨンと同じクランクモーシヨンによる加工とした。

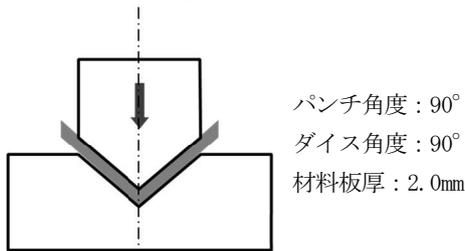


図8 曲げ加工模式図

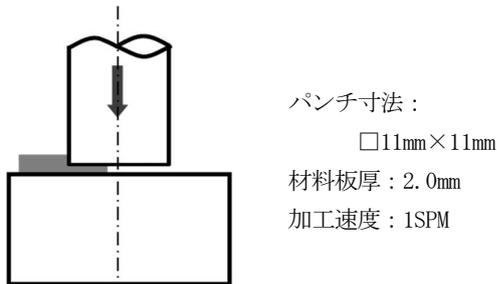


図9 潰し加工模式図

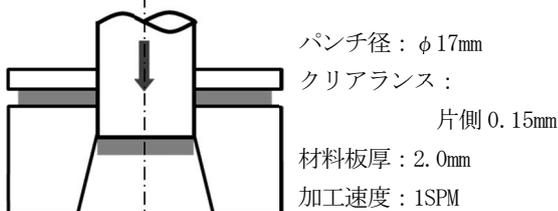


図10 抜き加工模式図

加工後の写真を図11～図13に示す。曲げ加工では頂点部において割れが発生するケースが見受けられた。これは、穴ぼこ状の模様（ディンプルパターン）が発生していることから延性破壊が起きていると考えられる。また、結晶構造の弱い面で平らに割れるへき開破面が見られないことから脆性破壊は発生していない。以上のことから、製作した材料は伸びが十分あることがわかった。

潰し加工では、亀裂が入ったものの、黒鉛を起点とした破断面で黒鉛をつなぐようになっていること、一部ディンプルパターンが認められることから曲げ加工同様に延性破壊が発生しており、伸びが十分あることがわかる。黒鉛粒とその周囲の組織が大きく変形して伸びており、材料としての流動性が良い。以上のことから、潰し加工において十分な加工品質が得られることがわかった。

抜き加工では、曲げ加工や潰し加工と比較して黒鉛の変形が小さく、黒鉛をつなぐように破断面が形成されているが、加工面が直線になっており、加工精度が高いことがわかった。

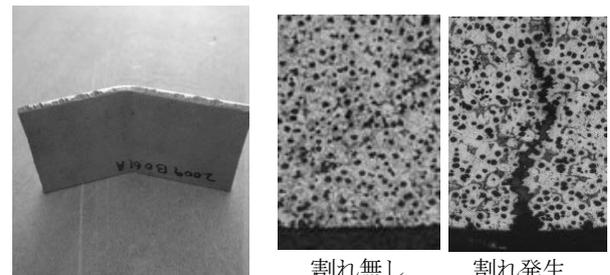


図11 曲げ加工結果（左：外観，右：組織）

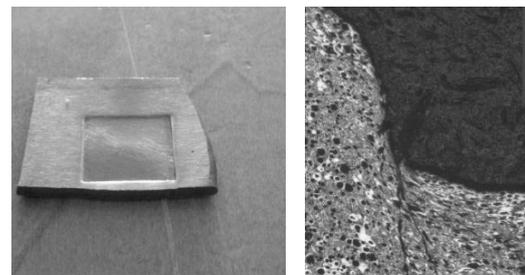


図12 潰し加工結果（左：外観，右：組織）

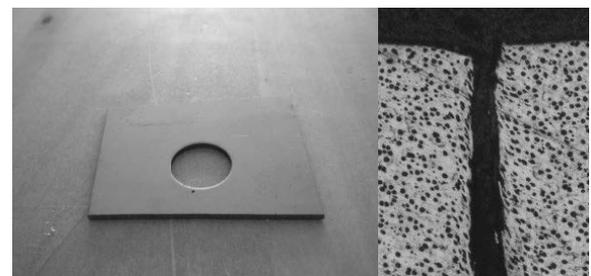


図13 抜き加工結果（左：外観，右：組織）

3.2 鑄放し材による加工実験

3.2.1 高延性薄肉鑄鉄材を用いた加工実験

実部品への適用を想定した場合、鑄放し品を対象とした実験を行う必要があることから、鑄放しの鑄鉄品を用いた加工実験（潰し加工）を行い、加工品質を評価した。実験では図 14 及び表 3 に示す一般的な製法による球状黒鉛鑄鉄（FCD450、以下「一般鑄鉄材」という）と本研究で製作した延性薄肉鑄鉄（以下「高延性薄肉鑄鉄材」）を使用した。加工条件を表 4 に示す。加工動作は一般的なプレスと同じクランクモーションを用いた。

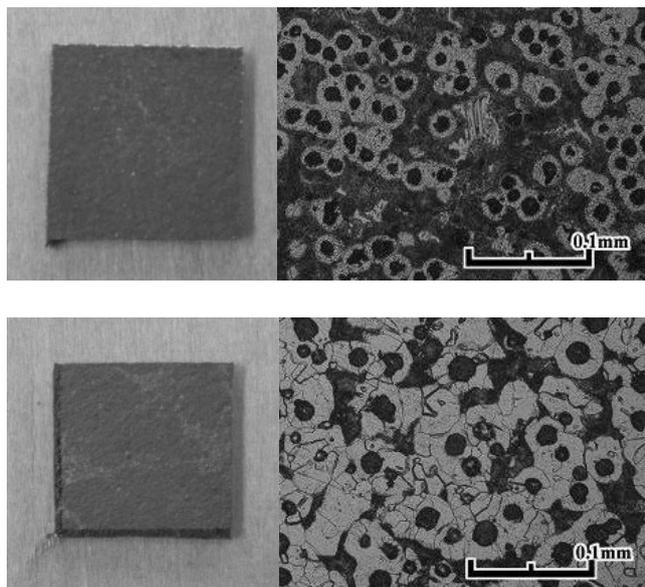


図 14 使用した材料

（上：一般鑄鉄材，下：高延性薄肉鑄鉄材）

表 3 材料分析値

	一般鑄鉄材	高延性薄肉鑄鉄材
粒数 (個/mm ²)	693.4	742.9
粒径 (μm)	15.4	18.4
球化率 (%)	71.8	80.2
フェライト率 (%)	45.4	65.4

表 4 加工条件

材料寸法	16mm×16mm
SPM	5
パンチ寸法	11mm×11mm
潰し設定値	2.0mm

実験結果を図 15 および表 5 に示す。一般鑄鉄材ではパンチ接触部外周から材料の外周に向かい 3 か所の割れが発生した。高延性薄肉鑄鉄材では材料外周に変形が認められるものの、割れは発生しなかった。また、加工前後の板

厚、面粗さは、一般鑄鉄材と高延性薄肉鑄鉄材共にともに同じであった。

以上から、高延性薄肉鑄鉄材は一般鑄鉄材と同等の板厚変化量を持ち、面粗さの向上も同程度であり、塑性加工に十分対応可能な伸びを持っていることがわかった。

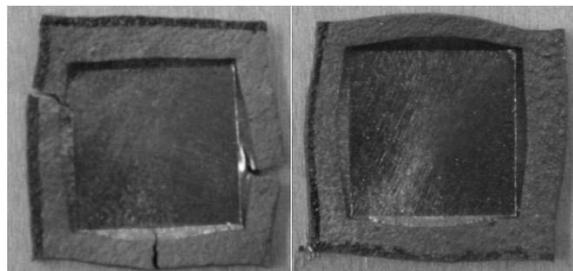


図 15 潰し加工後の材料表面

（左：一般鑄鉄材，右：高延性薄肉鑄鉄材）

表 5 潰し加工後の板厚および面粗さ

	一般鑄鉄材		高延性薄肉鑄鉄材	
	加工前	加工後	加工前	加工後
板厚 (mm)	2.88	2.19	2.87	2.21
面粗さ (Ra)	5.1	0.6	4.8	0.8

3.2.2 サーボプレスのモーションを利用した加工実験

次に高延性薄肉鑄鉄材を対象として、一般的なプレスのモーションとサーボプレスのモーションを利用した場合の加工精度を評価する実験を行った。実験では 3.2.1 で用いたものと同じ試験片を用いた。実験条件を表 6 に、サーボプレスのモーションを図 16 に示す。

表 6 加工条件

材料寸法	16mm×16mm
SPM	5
パンチ寸法	11mm×11mm
潰し設定値	2.3mm

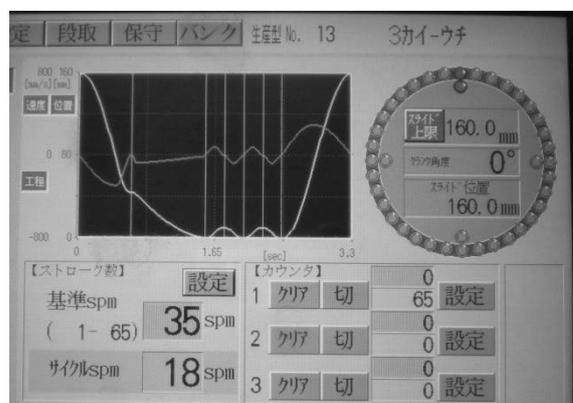


図 16 サーボプレスのモーション

実験結果を図 17 および表 7 に示す。一般的なプレスとサーボプレスの加工とサーボプレスの加工とを比較して材料外周の湾曲が強く、材料の伸び量が大きい。板厚については、一般的なプレスの加工では 2.79mm から 2.39mm への変化であったが、サーボプレスの加工では、2.79mm から 2.30mm への変化となり、サーボプレスの加工の方が潰し設定値に近かった。以上のことから、サーボプレスの加工の方が加工精度が良いことがわかった。

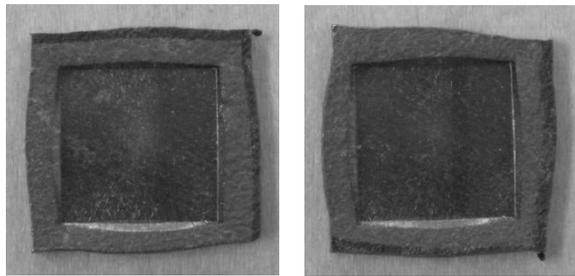


図 17 モーションの違いによる加工後の材料表面 (左：一般的なプレスのモーション、右：サーボプレスのモーション)

表 7 モーションの違いによる潰し加工後の板厚

	一般的なプレスのモーション		サーボプレスのモーション	
	加工前	加工後	加工前	加工後
板厚(mm)	2.79	2.39	2.79	2.30

(目標値 2.30mm)

4. 実部品への適用実験

実部品への適用実験にあたり、鋳物部品と機械加工部品がボルトで結合されている自動車部品を想定し、かしめ結合への工法転換を行った (図 18)。

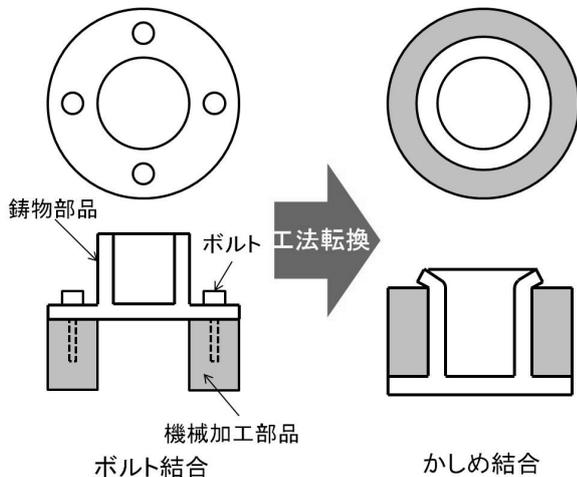


図 18 実部品への適用 (工法転換)

4.1 鋳物形状の設計・製作

想定した部品は、フランジ部を有する円筒部品で、フランジ部に設けられた穴を用いてボルト締結していたものを、かしめにより締結する構造とした。図 19 に設計・製作した鋳物を示す。

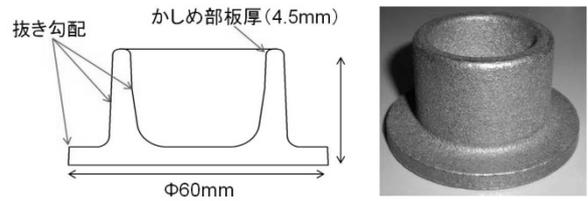


図 19 設計・製作した鋳物

4.2 金型の設計・製作

鋳物部品の形状に合わせて、鋳物上部の開口部を押し広げて鋳物部品と機械加工部品を結合するかしめ加工の金型を設計・製作した (図 20)。

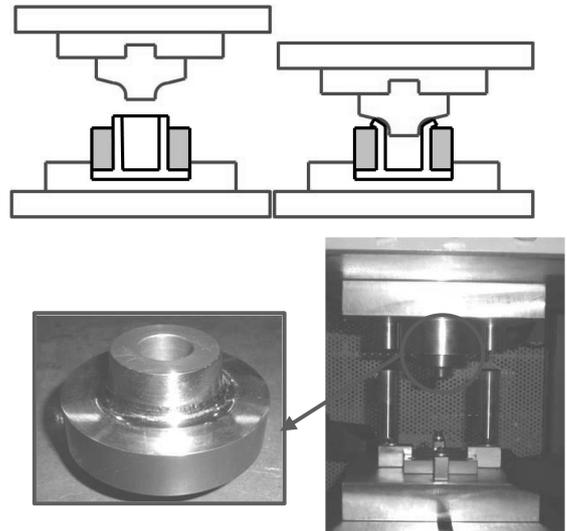


図 20 かしめ金型

(上：かしめ加工模式図、下：金型とパンチ形状)

4.3 加工実験

一般鋳鉄材と高延性薄肉鋳鉄材を用いて、かしめ加工を行った。かしめ部分において、一般鋳鉄材ではワレが発生したが、高延性薄肉鋳鉄材ではワレが発生せず、かしめ加工を行うことができた (図 21)。また、締結力を測定したところ 588[N・m] となりボルト接合と同等の結合力が得られた。

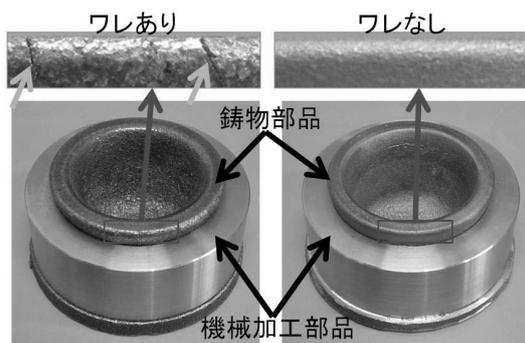


図 21 かしめ加工結果
(左：一般鋳鉄材，右：延性薄肉鋳鉄材)

- 2) 松岡甫たか：鋳物の切削加工技術 V 鋼の高速ミーリング加工技術，*鋳造工学*，Vol. 75 No. 2，pp. 169-174，(2003)
- 3) 小綿利憲・堀江ひろし：薄肉球状黒鉛鋳鉄の機械的性質の評価，*鋳造工学*，Vol. 73 No. 4，pp. 253-257，(2001)
- 4) 野口徹・中村孝：機械材料工学，工学図書株式会社，pp. 186-187，(2001)
- 5) 名雪東彦：鋳鉄の軽量薄肉化技術，*北海道立工業試験場技術情報*，Vol. 22 No. 1，pp. 5，(1999)
- 6) 永吉英昭・中野英治・今西幸平・上田精心：薄肉高靱性球状黒鉛鋳鉄，*日立金属技報*，Vol. 14，pp. 65-72，(1998)
- 7) 戸羽篤也・安田星季・櫻庭洋平・三戸正道・宮腰康樹：薄肉球状黒鉛鋳鉄品の製造と材質特性，*北海道立工業試験場報告*，No. 307，pp. 129-135，(2008)

5. まとめ

鋳物部品の後加工である機械加工をプレス加工に転換し、複雑形状を低コストで量産できる鋳造技術と組み合わせた新しい量産型加工プロセスの開発を行った。詳細を以下に示す。

(1) 鋳型の冷却速度を下げ、溶湯温度管理と各種成分調整と脱酸処理、接種処理を行うことで、伸びが 20%以上を持つ塑性加工に適した鋳鉄材料が得られた。

(2) 鋳鉄材料を用いて曲げ加工、潰し加工、抜き加工を行った結果、一般鋳鉄材と比較し高延性薄肉鋳鉄材は伸びが十分あることがわかった。特に潰し加工、抜き加工においては十分な加工品質が得られることもわかった。

(3) サーボプレスのモーションを利用した加工は、一般的なプレスのモーションの加工と比較して板厚の変化量が大きく、加工精度が高いことがわかった。

(4) 実部品への適用実験としてかしめ加工を行い、トルク強度を測定した結果、ねじによる結合と同等の締結力が得られた。

以上のことから、本研究の加工技術の有効性を確認することができた。

謝辞

本研究は、天田金属加工機械技術振興財団の平成 22 年度奨励研究助成事業 (AF-2010033) により実施したものであり、深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 大林根生・奈良小太郎：鋳物製機械構造部品の板金製品への転換，*塑性と加工*，Vol. 48 No. 563，pp. 1094-1098，(2007)