

# 拡散接合による積層金型の熱疲労特性に関する研究

石黒 輝雄・高尾 清利・鈴木 大介・佐野 正明  
国枝 正典\*1・山崎 久男\*2・西村 仁\*3

## Study on Thermal Fatigue Characteristics of Stacked Dies by Diffusion Bonding

Teruo ISHIGURO, Kiyotoshi TAKAO, Daisuke SUZUKI, Masaaki SANO,  
Masanori KUNIEDA\*1, Hisao YAMASAKI\*2 and Hitoshi NISHIMURA\*3

### 要 約

金型形状は、機械加工による高精度化・高能率化が進むとともに複雑化傾向を示し、従来の製作手法では適切な冷却水路対応が困難な場合があり、この対応策として積層金型が注目されている。この手法は金属板を拡散接合し積層させるもので、製品形状に沿った冷却水路を設定できることから、従来と比較して優れた冷却性能を有する。しかし、拡散接合部へ繰り返し熱応力が付加された時の熱的挙動が明確となっていないという問題があった。そこで本研究では拡散接合手法を用いた積層金型の耐久性向上を目的として、各種の条件で拡散接合した熱間金型用合金工具鋼（SKD61）の接合強度試験を行った。その結果、接合温度が高いほど、抗折力、衝撃値とも高くなること。また、表面粗さが滑らかであるほど抗折力、衝撃値とも高くなること。また、焼入れ-焼き戻し処理により、引張り強度、衝撃値が高くなるという結果を得た。更に、焼入れ-焼き戻し処理を行った試験片に熱疲労試験を実施し、表面からのクラックの進展状況について観察を行った結果、熱処理された積層試験片はダイカスト金型としての使用に支障はないことが確認できた。

### 1. 緒 言

金型形状は、機械加工による高精度化・高能率化が進むとともに複雑化傾向を示し、従来の製作手法では適切な冷却水路対応が困難な場合があり、一部では試作用の金型として光造形やアルミニウム素材によるものがあるが、これらの金型はダイカストおよび鍛造金型に用いる事は困難である。この対応策として積層金型が注目されている。この手法はレーザー切断などを施した金属板を拡散接合し積層させるもので、製品形状に沿った冷却水路を設定できることから、従来と比較して優れた冷却性能を有する。しかし、拡散接合部へ繰り返し熱応力が付加された時の熱的挙動が明確となっていない。そこで本研究では拡散接合手法を用いた積層金型の耐久性向上を目的として、各種の条件で拡散接合した熱間金型用合金工具鋼（SKD61）の接合強度試験を行った。また、焼入れ-焼き戻し処理を行った試験片に熱疲労試験を行い、接合面の熱的挙動について検討した。

### 2. 実験方法

2-1 接合部の機械的特性に及ぼす接合条件の影響  
接合条件が拡散接合部におよぼす影響を調査するため、各種の条件で拡散接合した熱間金型用合金工具鋼（SKD61）を三点曲げ試験、シャルピー衝撃試験にて強度試験を行った。試験片は拡散接合した部分が中央にくるように作成した試験片と母材部のみで作成した試験片にを用意した。接合強度におよぼす接合条件の影響を調べるため、温度条件・時間条件・圧力条件・表面粗さについてそれぞれを変化させた接合条件を設定した。表1に条件を示す。以下に結果を示す。非接合部の抗折力、衝撃値を100%とした。接合温度が高い方が抗折力、衝撃値とも高くなる傾向を示した（図1）。また、加熱保持時間135分が最も抗折力、衝撃値とも高くなる傾向を示した（図2）。保持圧力については、圧力を高めるほど抗折力は増す。衝撃値については8MPaと10MPaがほぼ同等な値を示した（図3）。さらに、表面粗さの比較においては、1.5  $\mu$  mRzの方が抗折力、衝撃値とも高くなる傾向を示した（図4）。

\*1 国立大学法人東京農工大学

\*2 株式会社積層金型研究所

\*3 株式会社プログレス

表1 接合条件表

接合条件	温度変化	時間変化	圧力変化	粗さ変化
温度(°C)	1100, 1150, 1200	1200	1200	1200
時間(min)	90	90, 135, 180	90	135
圧力(MPa)	8	8	6, 8, 10	8
粗さ(μmRz)	1.5	1.5	1.5	1.5, 7

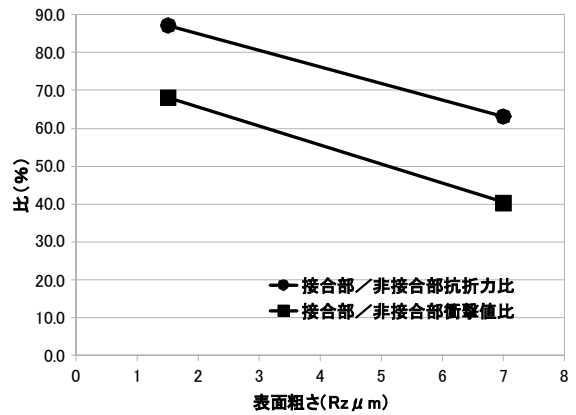


図4 表面粗さによる抗折力・衝撃値の比較

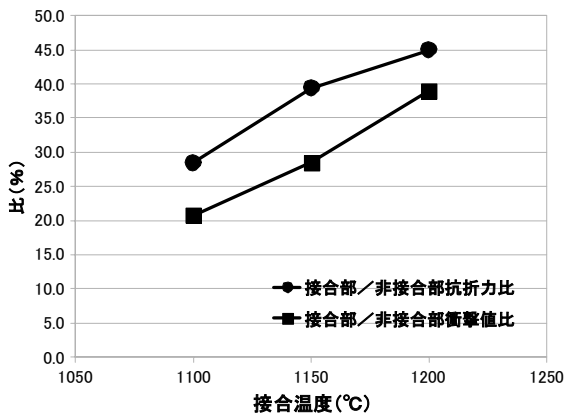


図1 接合温度による抗折力・衝撃値の比較

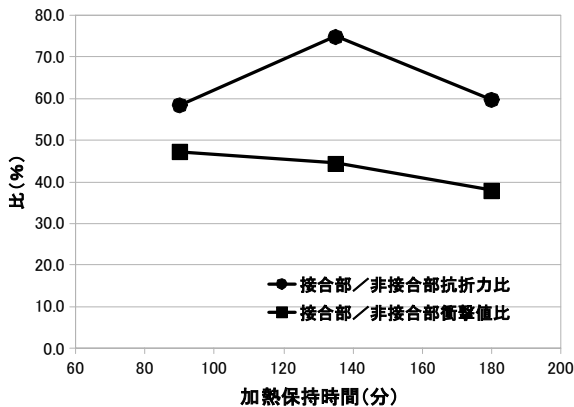


図2 加熱保持時間による抗折力・衝撃値の比較

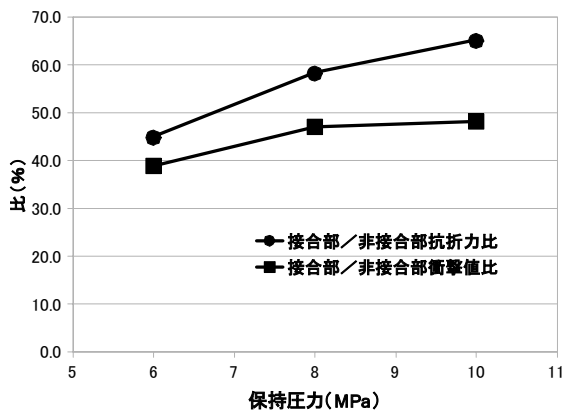


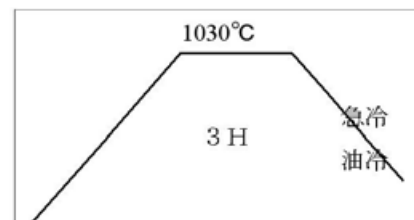
図3 保持圧力による抗折力・衝撃値の比較

2-2 拡散接合試験片に熱処理を施した場合の効果

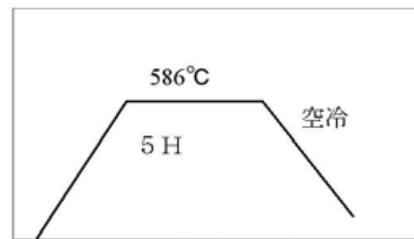
積層金型をダイカスト型に適用するためには耐ヒートチェック性を向上させることが重要である<sup>1)~3)</sup>。ダイカスト金型の耐ヒートチェック性を向上させるためには金型に熱処理や表面処理を施すのが一般的とされている。そこで焼入れ-焼戻し処理を施した熱疲労試験片を製作し、ダイカスト作業条件を想定した熱疲労試験を行うことで熱が拡散接合部におよぼす影響について調べた。

2-3 試験片について

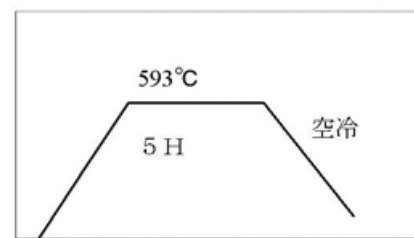
熱間金型用合金工具鋼 (SKD61) の厚板を用いて、2-1の結果から最も接合強度が向上する圧力 8MPa, 温



焼き入れ



2段階焼戻し①



2段階焼戻し②

図5 焼入れ・焼戻し処理工程

度 1200℃, 保持時間 135min, 拡散接合面の表面粗さ 1.5 $\mu$ m Rz の接合条件にて拡散接合を行った。また, 高温により金属組織が粗大化して靱性が低下する問題を解決するため, 炉内で 870℃まで 8 時間かけて徐々に加熱して 1 時間保温後, 10 時間かけて 60℃まで炉内で冷却しアニーリング処理を施し, さらに熱疲労試験を行うため, 直径 58mm, 厚さ 20mm の円筒形状の試験片に加工した。これに焼入れ・焼戻し処理が接合強度へ及ぼす影響を調査するため, 図 5 に示すような焼入れ-焼戻し処理を施し, 硬さを 48HRC とした。

#### 2-4 焼入れ-焼戻し処理による接合強度の調査

前項の処理を行なった試験片から, 引張り試験片とシャルピー衝撃試験片を製作して強度試験を行った。その結果として図 6 に示すように, 焼入れ-焼戻し処理を施すことで引張り強さは同等だが, 衝撃値は向上した。

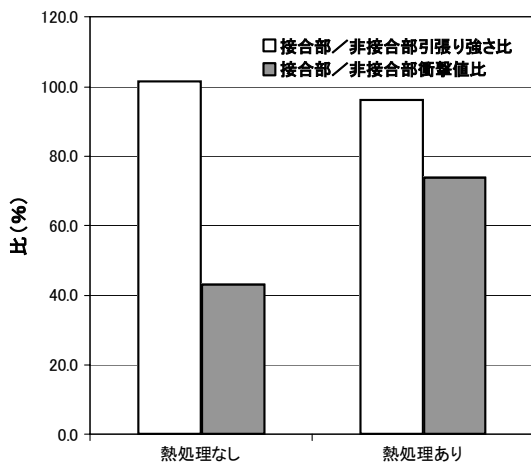


図 6 熱処理による強度比較

#### 2-5 熱疲労試験について

熱疲労試験は, 試験片の表面を加熱したブロックに接触させて加熱 (570℃, 160S 保持) 後, 水槽中へ投入し

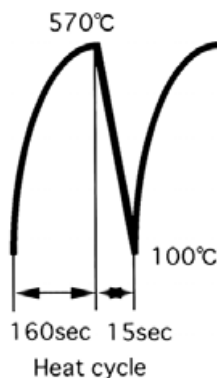


図 7 加熱-冷却サイクル

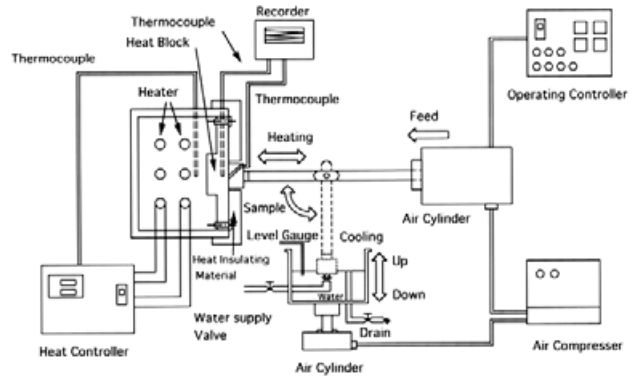


図 8 熱疲労試験装置の概略

冷却 (100℃, 15S 保持) させる接触加熱方式にて行った<sup>1)~3)</sup>。図 7 にサイクル加熱-冷却条件を示す。この条件で 5000 サイクルまで熱疲労試験を行った。図 8 に試験機の概略を示す。

#### 2-6 評価方法について

評価方法は, 加熱-冷却過程における 1, 2, 5, 10, 200, 500, 1000, 2000 サイクルにて, 試験を中断して各サイクルの表面における残留応力の測定, X 線回折法による分析および電子顕微鏡によるクラック発生状態の観察を行った。また, 5000 サイクル終了後, 同様な試験片表面の測定と試験材料を切断して表面からのクラックの進展状況および硬度について測定を行い, 熱疲労挙動の検討を行った。

残留応力測定については, 平行ビーム法による並傾法で行った。測定方向は拡散接合面に対して垂直方向を V, 水平方向を H として測定した。また, 表 2 に残留応力測定および X 線回折の測定条件を示す。表面のクラック観察には電子顕微鏡を用いた。5000 サイクル終了後の硬度測定については, マイクロビッカース硬度計を使用し, 荷重 50g にて測定を行った。

表 2 残留応力および X 線回折法による分析条件

測定条件	残留応力	X 線回折
回折角度	$\alpha$ Fe(211)	----
Target-Filter	Cr-V	Cr-V
管電圧	30kV	40kV
管電流	8mA	30mA
応力定数	-297MPa	----

測定箇所については図 9 に示す様に, それぞれ外周から約 10mm 内側近辺の, 拡散接合面上の 2 点 (測定

箇所No.1, No.2), 非拡散接合面上の 2 点 (測定箇所No. 3, No.4) の 4 箇所とした. 測定値はそれぞれの平均値を用いた.

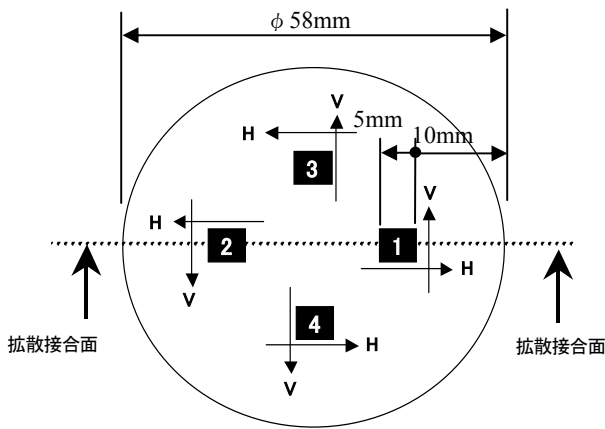


図9 熱疲労試験片および測定箇所

### 3. 結果および考察

#### 3-1 残留応力測定結果

焼入れ-焼戻し処理なしの試験片表面における残留応力測定結果の変化を図 10 に, 焼入れ-焼戻し処理ありを図 11 に示す. 残留応力値がマイナスであるのは圧縮の残留応力であることを示している. 焼入れ-焼戻し処理なしの試験片では, 熱疲労試験前と開始直後について,

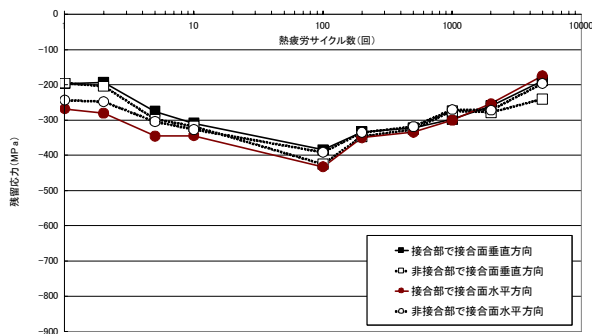


図10 残留応力値の変化 (熱処理なし)

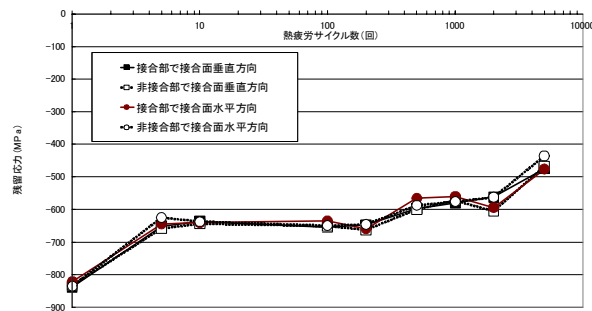


図11 残留応力値の変化 (熱処理あり)

100サイクルまでは残留応力値はほぼ直線的に増加し, 約-400MPaを示した. 以降, 熱疲労サイクル数が増加するに従い, 圧縮残留応力は減少し, 5000サイクル終了時には-200MPaに収束した. また, 100サイクル以降は, 拡散接合面と非拡散接合面, 測定方向の違いによる残留応力の違いが明確に認められず, サイクルの増加に従って, ほぼ同一の値に収束したことがわかる. また, 焼入れ-焼戻し処理を施した場合では初期状態にて-800MPaの圧縮残留応力が作用しており, サイクル数の増加に従い圧縮残留応力が減少していくことがわかる.

#### 3-2 X線回折法による分析結果

焼入れ-焼戻し処理なしの試験片について, 測定箇所No.1 のX線回折の変化について図 12 に, 焼入れ-焼戻し処理ありの場合の変化を図 13 に示す. 試験前においては $\alpha$ Fe のみの回折線であったが, サイクル数の増加に従ってピークが減少し, 処理なしでは 100 サイクルから, 処理ありでは 500 サイクルから酸化鉄  $Fe_3O_4$  回折線が観察されるようになった. また, これについては他の 3 箇所についても同様な結果であり, X線回折の分析結果には拡散接合面と非拡散接合面における違いは特に認められなかった. これは熱疲労試験によるサイクルの増加に伴い, 試料表面に一樣に酸化鉄が形成されていったことによると思われる.

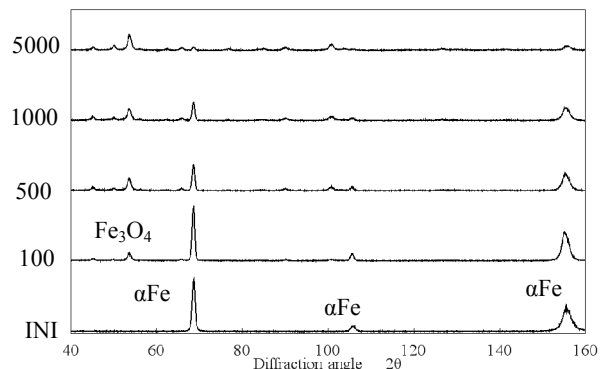


図12 X線回折の変化 (熱処理なし)

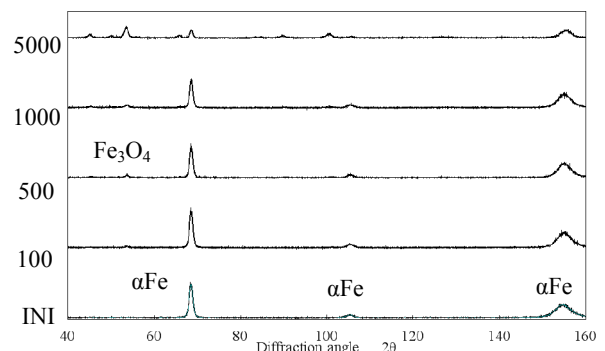


図13 X線回折の変化 (熱処理あり)

### 3-3 電子顕微鏡観察結果

図 14 に拡散接合面である測定箇所No.2 における各サイクルの電子顕微鏡観察による結果を示す。なお、拡散接合面は写真中央部で垂直方向である。左側に焼入れ-焼戻し処理なし、右側に焼入れ-焼戻し処理ありを示す。どちらも接合面において顕著な変化はみられなかった。また図 15 に 5000 サイクル時における各測定箇所の観察結果を示す。処理の有無にかかわらず、全てにおいて若干の差はあるが拡散接合面と非拡散接合面における違いは特に認められなかった。これから、表面部分での接合境界における耐ヒートチェック性の低下は生じていないと推察される。図 10 および図 11 の残留応力値の変化による結果と図 14 および図 15 の電子顕微鏡観察結果と併せ、焼入れ-焼戻し処理なしにおいて、表面が研削面であったため、100 サイクルまでは試験面への酸化鉄の形成により圧縮残留応力が増加したと考えられる。100 サイクル以降は酸化鉄の増加による圧縮残留応力の増加とヒートチェックやクラックによる圧縮残留応力の開放が影響し、その結果、徐々に圧縮残留応力が減少したと推察される。焼入れ-焼戻し処理ありにおいては、当初顕著な酸化鉄の形成は確認できないため、新たに圧縮残留応力が増大せず、高温熱源と接触している間に生じる応力弛緩の影響だけを受けて徐々に圧縮残留応力が減少したと推察される。500 サイクルから 2000 サイクルまでは酸化鉄の形成と応力弛緩の影響の結果、ほぼ平衡状態で推移し、2000 サイクル以降では酸化鉄の形成が飽和し応力弛緩の影響のみ受け圧縮応力が減少したと推察される。

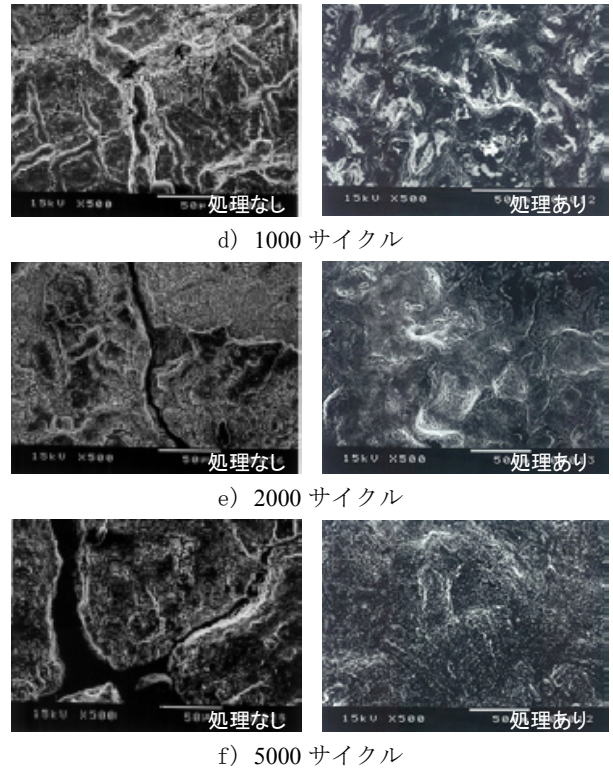
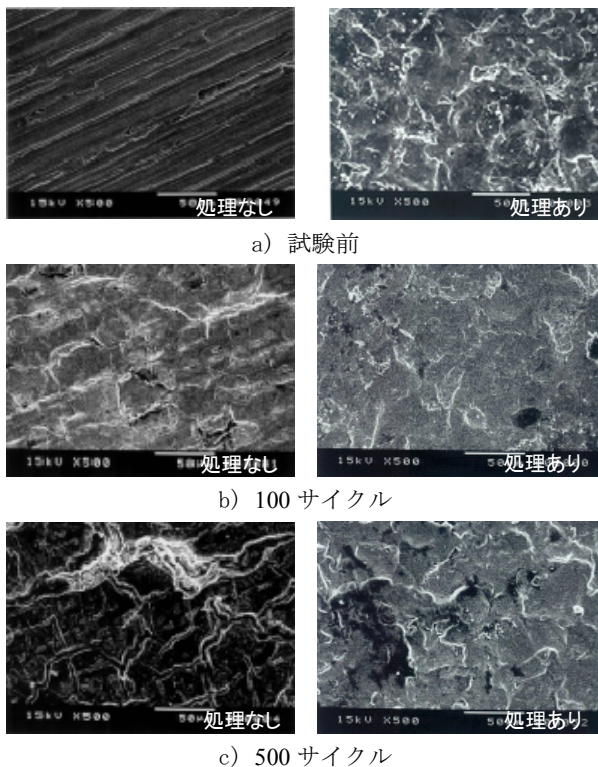


図14 測定箇所No.2 (拡散接合面) 電子顕微鏡観察写真

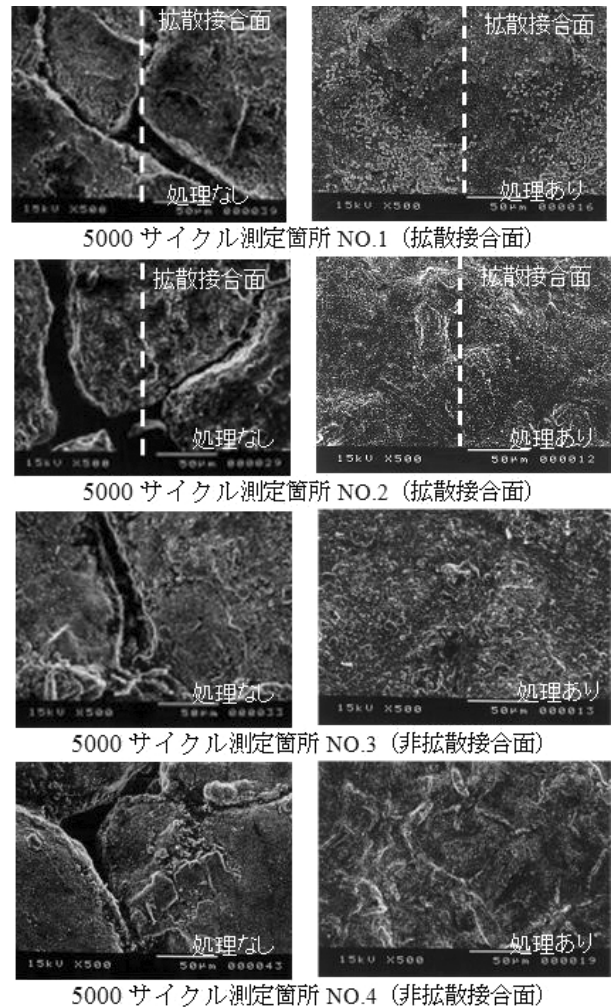


図15 拡散接合面と非拡散接合面での比較 (5000サイクル時)

3-4 試験後の断面観察による熱疲労挙動の検討

5000 サイクル終了後測定箇所について切断を行い、クラックの発生状況の観察を行った。図 16 および図 17 に焼入れ-焼戻し処理なし、焼入れ-焼戻し処理ありの熱疲労試験後の断面観察結果を示す。図 16 は処理なしの熱疲労試験 5000 サイクル実施後の断面を観察した結果で、拡散接合面測定箇所No.1 では 1.5mm、測定箇所No.2 では拡散接合面に沿って直線的に最大 3.5mm のクラックが観察された。非拡散接合面測定箇所No.3 では 0.8mm、測定箇所No.4 では 0.9mm のクラックが認められた。一見変化は無いように見えたが、内部ではクラックが進展している。

図 17 は処理ありの熱疲労試験 5000 サイクル実施後の断面を観察した結果で、拡散接合面測定箇所No.1 では 0.018mm、測定箇所No.2 では 0.038mm のクラックが観察された。非拡散接合面測定箇所No.3 では 0.033mm、測定箇所No.4 では 0.038mm のクラックが認められた。接合面と非接合面の間で断面の状態やクラックの大きさに顕著な差はみられない。内部においても変化はなく、焼入

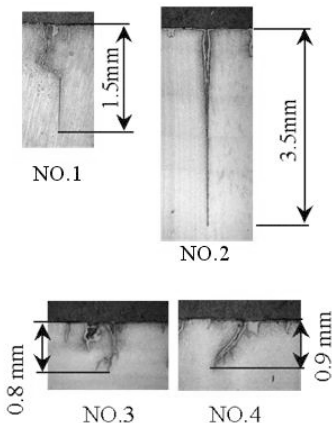


図16 処理なしの試料断面の比較 (5000サイクル後)

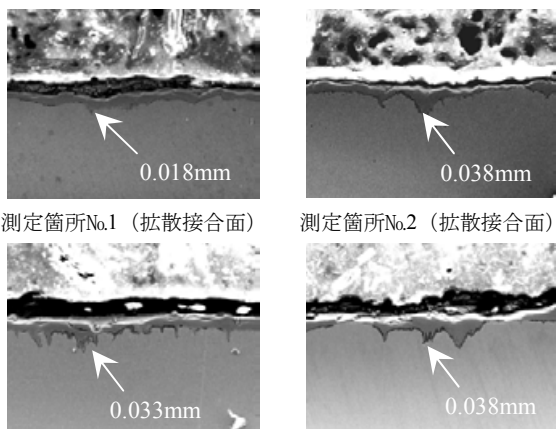


図 17 処理ありの試料断面比較 (5000 サイクル後)

れ-焼戻し処理した方がクラックの進展が抑制されているのがわかる。クラックの発生と進展が抑制されたのは、焼入れ-焼戻し処理による圧縮残留応力の付加と硬さの増加によるものと推察される。

また、断面方向の硬度測定結果を図 18 に示す。測定箇所はNo.2 の拡散接合面近傍である。焼入れ-焼戻し処理のなしではビッカース硬度 HV260 程度、焼入れ-焼戻し処理ありでは HV400 程度で一定の値を保っており、試験片内部においても変化は認められなかった。

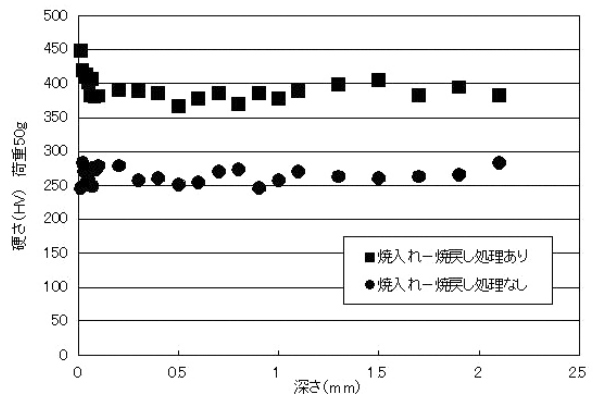


図18 硬度測定結果

4. まとめ

接合部の機械的特性に及ぼす接合条件の影響と焼入れ-焼戻し処理を施した積層金型への熱疲労試験を行い、熱的挙動について検討した結果を以下に記す。

4-1 接合強度の検証について

- (1) 接合温度が高い方が抗折力、衝撃値とも高くなった。
- (2) 加熱保持時間については 135 分が最も抗折力、衝撃値とも高くなった。
- (3) 圧力変化は、抗折力については圧力が高いほうが、衝撃値については 8MPa と 10MPa がほぼ同等な値を示した。
- (4) 表面粗さの比較においては、 $1.5 \mu\text{mRz}$  の方が抗折力、衝撃値とも高くなる傾向を示した。

4-2 拡散接合試験片に熱処理を施した場合の効果について

- (1) 焼入れ・焼戻し処理の有無による接合強度は、引張り強さでは同等だが、衝撃値は焼入れ-焼戻し処理を行うことで向上する。
- (2) 熱処理の有無に関わらず、試験面の SEM 観察では接合面および非接合面の違いによる変化は認められなかった。

- (3) 焼入れ・焼戻し処理による圧縮残留応力の付加と硬さの増加が熱疲労試験に有効に作用した。

積層金型のダイカスト金型としての熱処理を施すことが有効であることが確認できた。しかし、金型寿命の把握という観点よりさらなる調査が必要であると思われる。

#### 参考文献

- 1) 佐野 正明, 他: 薄板を用いた簡易金型の製作に関する研究, 山梨県工業技術センター研究報告, No.22, p.131-134 (2008)
- 2) 八代 浩二, 他: 表面処理における金型鋼の機能性向上に関する研究 (第一報), 山梨県工業技術センター研究報告, No.16, p.4-8 (2002)
- 3) 佐野 正明, 八代 浩二: 放電加工面の高品質・高精度化に関する研究 (第二報), 山梨県工業技術センター研究報告, No.16, p.83-86 (2002)