

拡散接合による積層金型の熱疲労特性に関する研究(第2報)

石黒 輝雄・佐野 正明・鈴木 大介
国枝 正典*1・山崎 久男*2

Study on Thermal Fatigue Characteristics of Stacked Dies by Diffusion Bonding (2nd Report)

Teruo ISHIGURO, Masaaki SANNO, Daisuke SUZUKI,
Masanori KUNIEDA*1 and Hisao YAMASAKI*2

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の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、より実際の条件に近づけた加熱面から 0.5mm と 1.0mm に接合面がくるように設定した焼入れ-焼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。また、拡散接合にて製作したダイカスト金型用のピンにて実用試験を実施し、実用に耐えることが確認できた。

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や直彫り加工による溝などを施した金属板を拡散接合して積層させるものであり、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、拡散接合部へダイカスト鑄造の様な厳しい条件での繰り返しの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、より実際のダイカスト鑄造時の金型条件に近づけた、加熱面から 0.5mm と 1.0mm の位置に接合面がくる様に設定した試験片を製作し、焼入れ-焼戻し処理を行った後で熱疲労試験を実施し、接合面の熱的挙動について評価して検討した。

2. 実験方法

2-1 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、第1報¹⁾の結果から最も接合強度が向上する圧力 8MPa、温度 1200℃、保持時間 135min、拡散接合面の表面粗さ 1.5μm 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た。さらに熱疲労試験を行うため、図 1 に示す様に、加熱面から平行に 0.5mm と 1.0mm の位置に接合面がくる様に直径 58mm、厚さ 20mm の円筒形状の試験片に加工した。これに図 2 に示す焼入れ-焼戻し処理を施し、実際の金型と同様に硬さを 48HRC とした。

2-2 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、水槽中へ投入し冷却 (100℃, 15S 保持) させる接触加熱方式にて行った¹⁻⁴⁾。図 3 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 4 に試験機の概略を示す。

*1 国立大学法人東京大学

*2 株式会社積層金型研究所

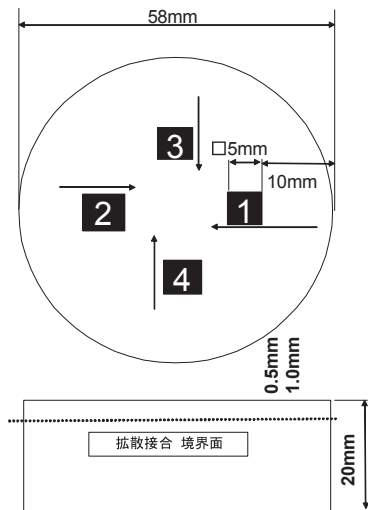


図1 熱疲労試験片および測定箇所

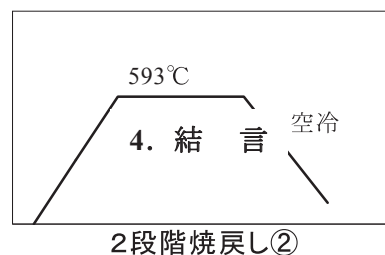
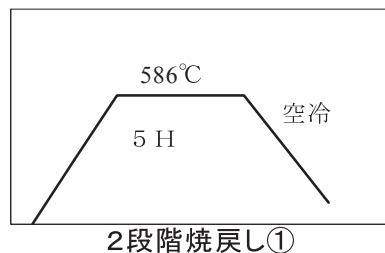
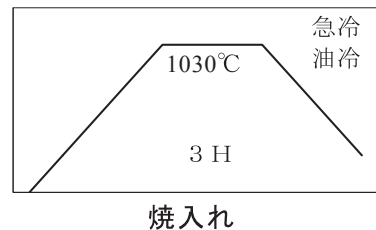


図2 焼入れ-焼戻し処理工程

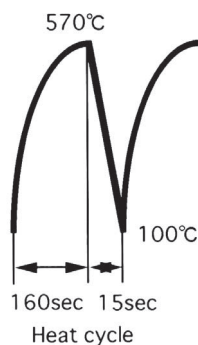


図3 加熱-冷却サイクル

2-3 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の観察を行い、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中心方向を向けて測定した。また、表1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金属顕微鏡を用いた。測定箇所については図1に示す様に、それぞれ外周から約10mm内側の、拡散接合面上の□5mm内の4箇所とした。測定値はそれぞれの平均値を用いた。

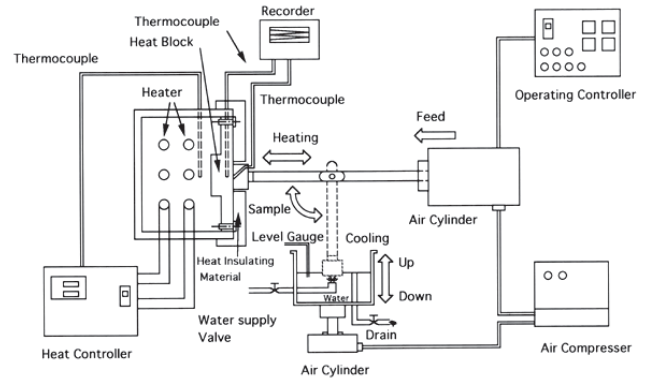


図4 熱疲労試験装置の概略

表1 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	$\alpha\text{Fe}(211)$	----
Target-Filter	Cr-V	Cr-V
管電圧	30kV	40kV
管電流	8mA	30mA
応力定数	-297MPa	----

2-4 実用試験について

ダイカストマシンの金型に拡散接合にて製作したピンを組込み、実際の溶湯に積層面を接触させる実用試験を行った。ダイカストマシン(東芝機械㈱)は型締め圧力135tfのものを用いた。ダイカスト金型に組込むピンについては、現在使用されているものと同形状(図5)とし、拡散接合面には $\phi 2.5\text{mm}$ の冷却水路をあらかじめ溝加工した。また、拡散接合による特徴を出

すため、先端部まで冷却水路加工を施した。これを、前述の熱疲労試験片と同じ条件により拡散接合を行い、加工後焼入れ-焼戻し処理を施して硬さを48HRCとし、最終的に研削加工にて所定寸法に仕上げた。この拡散接合による積層ピンと現状使用されている通常ピンの3000サイクル後における比較を行った。

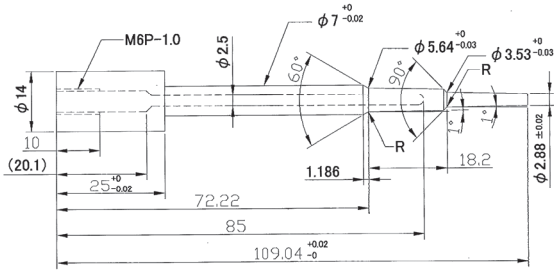


図5 ピン形状

3. 結果および考察

3-1 残留応力測定結果

接合面が加熱面から0.5mmの試験片表面における残留応力

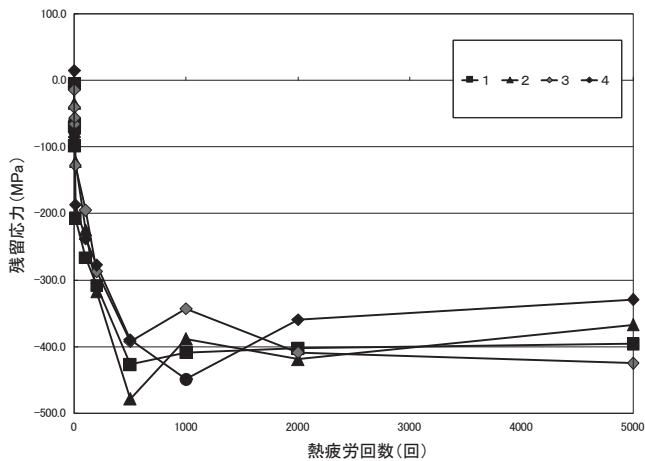


図6 残留応力値の変化 (加熱面から0.5mm)

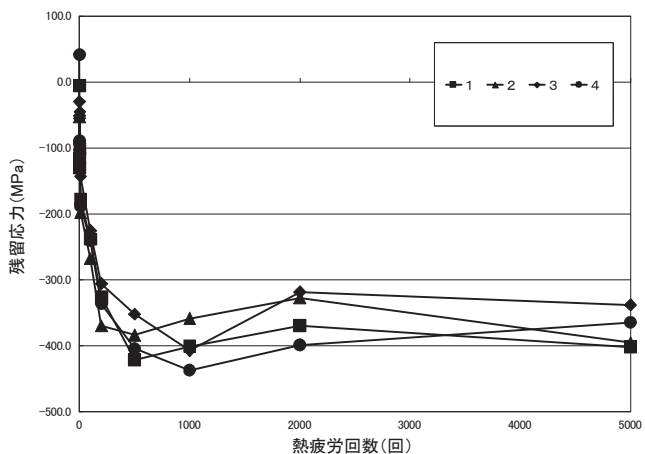


図7 残留応力値の変化 (加熱面から1.0mm)

力測定結果の変化を図6に、加熱面から1.0mmを図7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。加熱面から接合面の処理が0.5mmのものとも1.0mmのものとも熱疲労試験前から、500サイクルまでは圧縮の残留応力が入り続け、すべての測定箇所についてほぼ約-400MPaの値を示した。以降、熱疲労サイクル数が増加するに従い、圧縮残留応力は横ばいに推移し、5000サイクル終了時には-400MPaの圧縮残留応力であった。加熱面からの距離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。

3-2 X線回折法による分析結果

加熱面から0.5mmの場合の測定箇所No.1のX線回折の変化について図8に、加熱面から1.0mmの場合の変化を図9に示す。試験前においては αFe 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、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加熱面からの距離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、試料表面に様に酸化鉄が形成されていったことによると思われる。

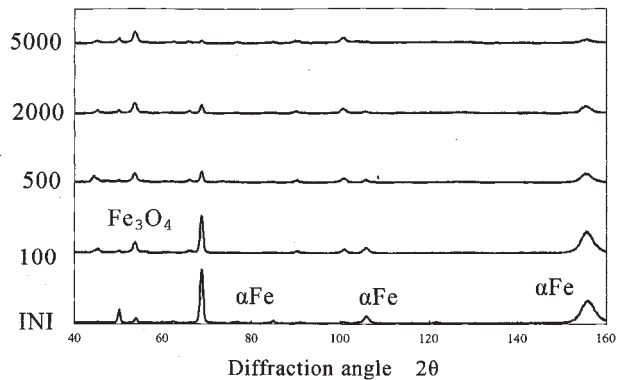


図8 X線回折の変化 (加熱面から0.5mm)

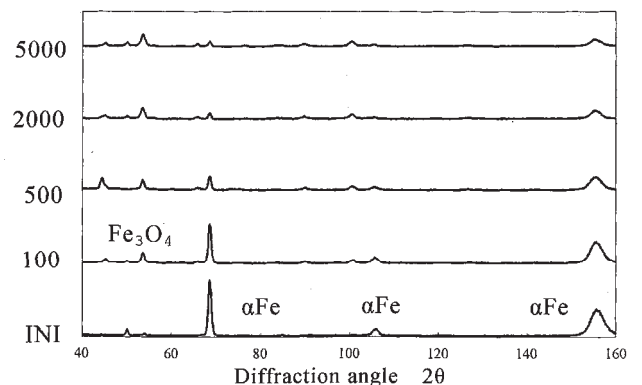
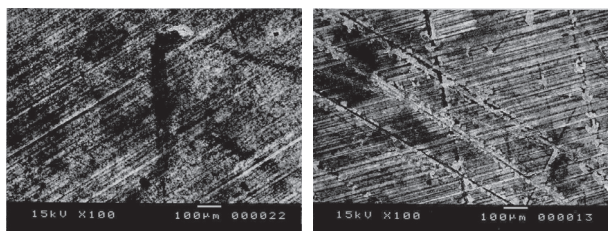


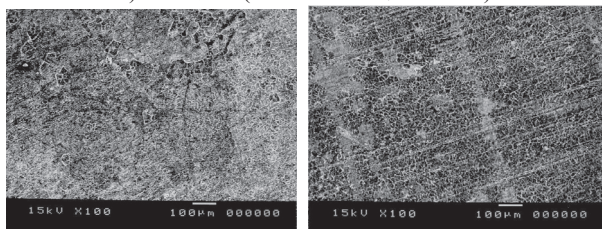
図9 X線回折の変化 (加熱面から1.0mm)

3-3 電子顕微鏡観察結果

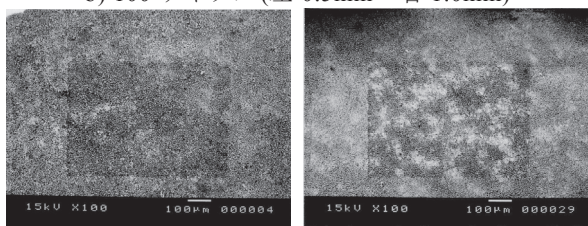
図10に測定箇所No.1における各サイクルの電子顕微鏡観察による結果を示す。左側に加熱面から0.5mm、右側に加熱面から1.0mmを示す。どちらも酸化鉄 Fe_3O_4 の成長は確認できるが顕著な変化はみられなかった。図6および図7の残留応力値の変化による結果と図8およ



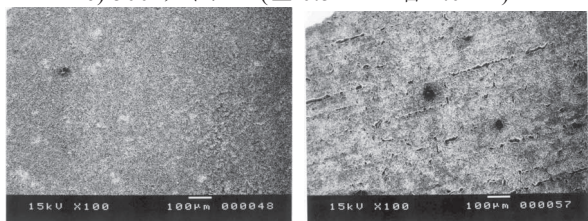
a) 試験前(左 0.5mm 右 1.0mm)



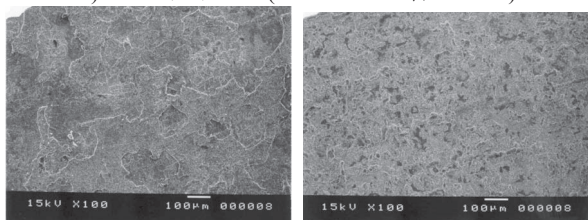
b) 100 サイクル(左 0.5mm 右 1.0mm)



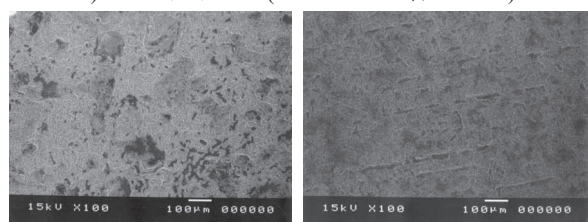
c) 500 サイクル(左 0.5mm 右 1.0mm)



d) 1000 サイクル(左 0.5mm 右 1.0mm)



e) 2000 サイクル(左 0.5mm 右 1.0mm)



f) 5000 サイクル(左 0.5mm 右 1.0mm)

図10 測定箇所No.1 電子顕微鏡観察写真

び図9のX線回折の変化による結果と併せ、表面が研削面であったため、500 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。500 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応力弛緩が影響し、その結果、圧縮残留応力が変化することなく推移したと推察される。

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、接合面の観察を行った。図11に熱疲労試験前の接合面を観察したもの、図12に5000 サイクル経過したもの断面を示す。熱疲労試験前後の断面を比較したが拡散接合面について剥離は観察されなかった。

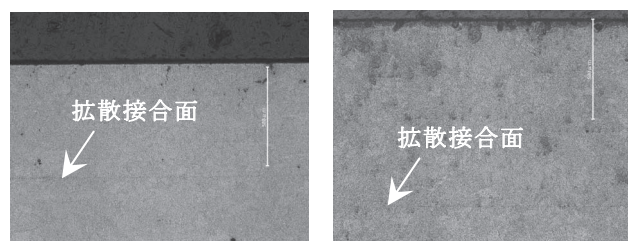


図11 熱疲労試験前No.1 断面(左 0.5mm 右 1.0mm)

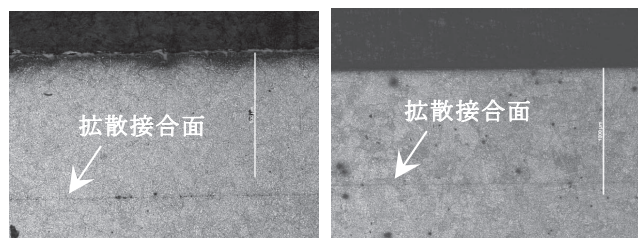


図12 5000 サイクル後No.1 断面(左 0.5mm 右 1.0mm)

3-5 実用試験による拡散接合面の検討

拡散接合により製作した積層ピンと通常ピンの、3000 サイクル終了後について評価と観察を行った。評

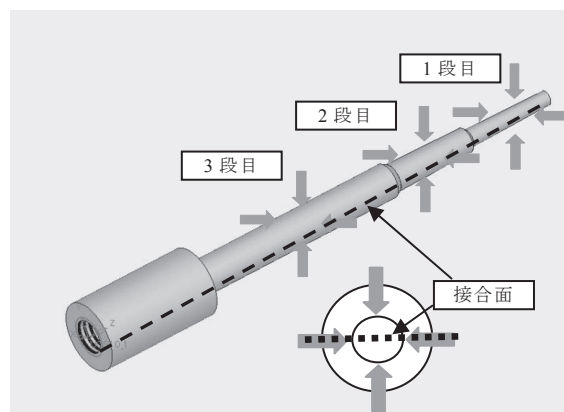


図13 残留応力測定と同軸度測定箇所について

価項目として残留応力測定と同軸度測定を行った。応力測定は拡散接合面と非拡散接合面について2箇所ずつ4方向の各段付部分について測定を行った。通常ピンについても任意に姿勢を設定し同箇所を測定した。残留応力測定値はそれぞれの平均値を用いた。測定箇所を図13に、応力測定結果について図14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。積層ピンと通常ピンについて、3段目について通常ピンは約-350MPa、拡散接合による積層ピンは約-600MPaの値を示した。1段目と2段目については通常ピンは約-350MPa、拡散接合による積層ピンは約-500MPaの値を示した。これは研削ロットによる誤差と推測される。3000サイクル終了時、直接溶湯と接触しない3段目については変化せず、通常ピンと積層ピンとも1段目と2段目についてほぼ残留応力が平衡状態に変化した。ただし、通常ピンと積層ピンの残留応力の差異は認められなかった。

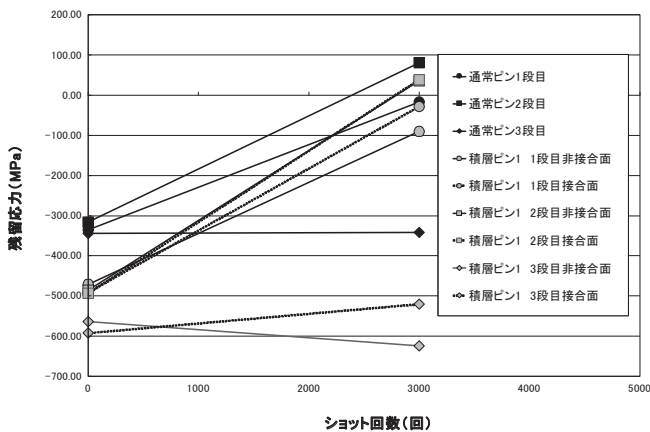


図14 残留応力値の変化(通常ピンとの比較)

同軸度の変化について表2に示す。同軸度については3段目をデータムとしてそれぞれの段付部の測定を行った。同軸度について、通常ピンでは1段目が3.81μmから84.11μm、積層ピンでは0.2μmから103.0μmへ変化した。積層ピンが通常ピンより19μm大きい値となったのは先端まで冷却水路を施したため、肉厚の薄さの違いによる影響と推測される。ただし、実用上この程度の差異はダイカスト成型上問題なかった。

表2 同軸度の変化(通常ピンとの比較)

	2段目(μm)		1段目(μm)	
	初期	3000cyc.	初期	3000cyc.
通常ピン	1.70	27.00	3.81	84.11
積層ピン	0.3	30.6	0.2	103.0

次に、外観の観察結果の比較について図15に示す。拡散接合面が剥離の様子は観察できず、通常ピンと積層ピンの外観の差異もみられなかった。これらの結果より、3000サイクル経過時における通常形状のピンと積層ピンによる差異はみられず3000サイクルまでは実用に耐えることが確認できた。

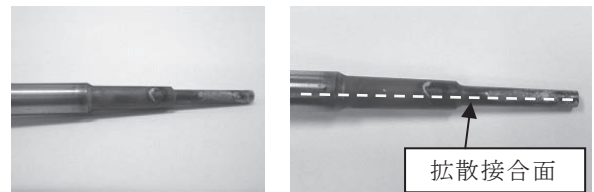


図15 外観の比較(左 通常ピン 右 積層ピン)

4. まとめ

加熱面に対して水平方向に拡散接合した熱疲労試験片への熱疲労試験を行い、熱的挙動について検討した結果と、実用試験による結果を以下に記す。

0.5mm, 1.0mm 共に

- (1) 熱疲労試験前から、500サイクルまでは圧縮の残留応力が入り続け、すべての測定箇所についてはほぼ約-400MPaの値を示し5000サイクルまで横ばいに推移した。
- (2) X線回折の分析結果では加熱面からの距離における違いは特に認められなかった。
- (3) どちらも酸化鉄 Fe₃O₄の成長は確認できるが顕著な変化はみられなかった。
- (4) 熱疲労試験前後の断面を比較したが拡散接合面について剥離は観察されなかった。

実用試験において、

- (5) 実際の溶湯に対して3000サイクルまで問題なく使用可能であった。

積層金型のダイカスト金型への適用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。

拡散接合によるピンの実用試験に関して、株式会社エスワイ精機様には大変ご協力いただきました。文末になりますがここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 石黒 輝雄, 他: 拡散接合による積層金型の熱疲労特性に関する研究, 山梨県工業技術センター研究報告, No.25, p.128-134 (2011)
- 2) 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)

- 3) 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, 山梨県工業技術センター研究報告, No.16, p. 4-8 (2002)
- 4) 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)