

高熱伝達界面を備えた SKD61/Cu レーザ造形金型材の冷却能実証

大同大学 工学部機械工学科
教授 田中 浩司

1. 緒言

ダイキャスト金型ではキャビティ周囲を加速冷却することで成形サイクルを短縮できるが、その形状にそった曲線水路の後加工は困難である。一方、銅(Cu)の固体冷却によるハイブリッド金型が提案されているが、熱物性の著しく異なる工具鋼 SKD61 と Cu の直接接合は容易ではない。

海外では SKD61 に相当する工具鋼 H13 のレーザー積層造形が盛んであり、造形パラメータや硬さ分布など基礎研究¹⁻³⁾のほか、金型冷却を意識した複合材の開発例⁴⁾が見受けられる。例えば H13-Cu 傾斜積層材は熱伝導特性に優れるが、金型への応用には課題があり、その冷却効果は不明である。

国内では粉末床式 3D プリント (SLM) の高出力化にともなって SKD61 が対象となり、近年プロセスマップや微粉末による造形高速化^{5,6)}が報告されている。一方、金型冷却に関して寺山ら⁷⁾は、鉄鋼/Cu 複合金型を拡散接合で製作し、Cu 側に冷却水を通して AC4C 合金の鋳造を行った。その結果、従来の全鉄鋼金型に対し 100℃以上の内部温度低下と大幅な冷却時間短縮を確認した。また石黒ら⁸⁾は SKD61 どうしの拡散接合材の熱疲労試験を行っているが、Cu との接合材に関する熱応力や冷熱耐久性に関する研究例は見当たらない。

SLM を中心とした SKD61 造形の技術動向に対し、著者らはレーザー積層方式 (LMD) に注目した。LMD は硬質材被覆や金型補修に用いられてきた肉盛り技術を発展させたもので、基材の種類を問わず高速な 3D 造形が可能である。しかし Cu 基材に SKD61 を直接造形した例は見当たらない。そこで著者らは、市販 SKD61 粉末の Cu 板への溶着性を詳細に調査し、汎用レーザー加工機による SKD61 積層/Cu の接合造形に取り組んできた。これまでに原料 SKD61 への Cu および Ni の添加による濡れ性向上や、入熱量の適正化による造形性改善に一定の結果を得ている⁹⁾。

本研究では上記 LMD に準じた方法で作製された SKD61/Cu 複合材の評価として、まず試験片レベルで伝熱・冷却特性の簡易評価を行い、シミュレーションを併用して溶着界面の熱伝達係数を算定した。次に SKD61 に Cu ブロックを複合化したハイブリッド板を試作し、鋳型の一部に使用した場合にアルミ合金鋳物の加速冷却が可能か検討した。

さらに金型への応用を見据え、上記複合材の熱膨張率差から生じる熱疲労現象に注目した。シミュレーションを参考に SKD61/Cu 界面に熱応力を生じる試験片の形状を設計し、繰り返し加熱・冷却が可能で試験機において実測を試みた。しかしながら現時点では、計測された歪みヒステリシスの妥当性検証が未達であるため、本報告の末尾に自作した冷熱試験装置を紹介するとともに、

2. 実験方法

2.1 供試材

実験に用いたのは SKD61 ガスアトマイズ粉末 (大同特殊鋼, 粒径 45~105 μm), および厚さ 8mm の無酸素銅板である。粉末の化学組成を Table 1 に示す。無酸素銅板は 40×100mm に切断して基板とし、レーザー吸収率向上のためショットブラスト (以下 SB) によりガラスビーズを 40s 間投射して表面粗さを Ra 0.7 μm 程度に調整した。

Table 1 使用した SKD61 粉末の化学組成 (mass%)

C	Si	Mn	Cu	Ni	Cr	Mo	V	O
0.38	1.02	0.40	0.02	0.05	4.92	1.25	0.98	0.016

2.2 SKD61/Cu 複合材のレーザー積層造形

波長 1030nm のファイバーレーザー (TRUMPF, TruDisk6001) を備えた加工機を用い、以下の方法で幅約 8mm, 高さ約 7mm, 長さ約 30mm の矩形積層材を Cu 板上に造形した。Cu 板に重ねた厚さ 1mm のアルミ枠を用いて SKD61 粉末を一定厚さに充填し、直径 0.2mm, 周波数 16.7Hz, 振幅 8mm のオシレーションビームを 500mm/分で粉末に走査して 7 層を溶融積層した。なお既報⁹⁾に従って、入熱量を制御するためレーザー出力は 1.0~3.0kW の範囲で下層から上層にかけて徐々に増加させた。

2.3 鋳型用ハイブリッド板の製作

いずれも厚さ 5mm の SKD61 鋼板と無酸素銅板を加工して、Fig. 1 のハイブリッド板を試作した。幅 5mm の Cu ブロックが 4 本、もしくは幅 12.5mm で 2 本が等間隔に配置されたもので、SKD61/Cu の伝熱面積を変えてアルミ溶湯冷却への効果を検証した。Cu ブロックを SKD61 板に圧入した後、750℃で 40 分間加熱保持し拡散接合させた。さらに注湯面には、パルスレーザー (DSI, Pluspower 500) を用

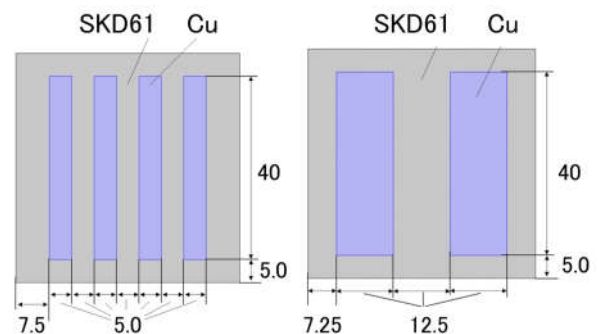


Fig. 1 鋳型材として試作したハイブリッド板の形状

いてCr-Mo鋼補修用φ0.5mmワイヤを肉盛りし、0.2mm厚さに被覆した。肉盛り面を平面研削した後、鋳型の底板として使用した。

2.4 SKD61/Cu 複合材の伝熱特性評価

Fig. 2 にレーザ積層したSKD61/Cu複合材から切り出した伝熱試験片の形状、ならびに用いた装置の加熱部を示す。試験片はSKD61積層部とCu板の厚さがともに4mmになるようにし、図中A,Bの位置に直径0.2mmのKタイプ熱電対を挿入して固定した。金型キャビティ近くを想定して試験片側面を断熱材の枠にはめ込み、SKD61側からCu側への一次元伝熱に近い状態になるよう配慮した。加熱はノズル式のエアヒータに流量20l/分のN₂ガスを通じて上面の行い、下面はグリスを塗布した水冷CPUクーラーに密着させることでほぼ室温付近に保った。

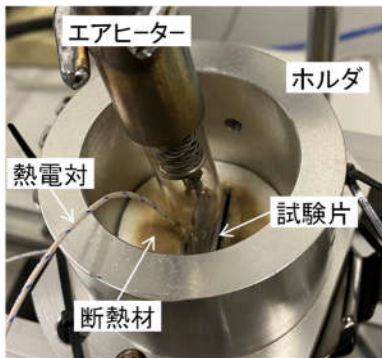
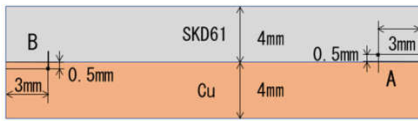


Fig. 2 SKD61/Cu 複合材試験片の模式図およびエアヒータ加熱による伝熱特性の評価

2.5 ハイブリッド鋳型材の冷却能評価

試作鋳型材の冷却能を検証するため、ADC12 (Al-10.7Si-2.1Cu-0.24Mg-0.54Zn-0.73Fe-0.21Mn,wt%) 溶湯を用いた鋳造実験を行った。Fig. 3 に鋳型の構成を模式的に示す。直径1.0mmのシースK熱電対を鋳型材の直上に設置し、注湯直後から100℃に冷却されるまでの温度変化を記録した。試験片底面は水冷銅板で冷却され、水温は15℃であった。マッフル炉で溶解した150gのADC12溶湯をタンディッシュに入れ、750℃になりしだいストッパを抜いて鋳型に注湯した。

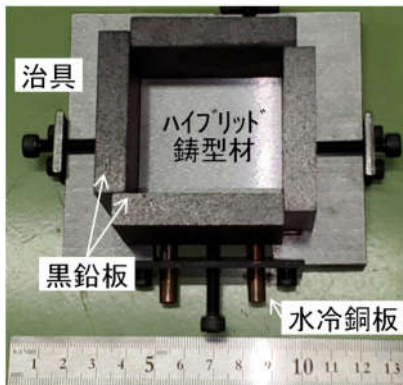


Fig. 3 SKD61/Cu ハイブリッド鋳型材を底面としたADC12 鋳造-冷却試験の型組み

2.6 伝熱挙動のシミュレーション解析

有限要素法ベースの物理現象連成解析ソフトウェアCOMSOL Multiphysics 5.6を用いてSKD61/Cu複合材試験片の温度変化を、さらにハイブリッド鋳型材によるADC12鋳物の冷却挙動をシミュレーションした。後者では各試験材料のほか、水冷銅板の純CuとH₂Oの物性値を用いて上記実験を再現するモデルを作成した。熱的境界条件としては以下の3点を仮定した。

- ① ADC12 上面の熱輻射率 0.12
- ② 鋳型側面は黒鉛板による断熱
- ③ ADC12/SKD61 および Cu/冷却水の各界面における熱伝達係数はそれぞれ 500, 16000W/(m²K)¹⁰

なおレーザ溶着したSKD61/Cu界面の熱伝達係数は未知であり、以下の実験結果において述べる。

3. 実験結果および考察

3.1 SKD61/Cu 複合材の伝熱特性

Fig. 4 に、Fig. 2 の試験片上面を450℃になるまで加熱し、即ヒータガスを停止して冷却した時の温度変化を示す。比較として、同形状のSKD61鋼のバルク材、および試験片高さ8mm全体がSKD61粉末の積層で作製された単体積層材を用意した。まず単体積層材は、同じSKD61のバルク材とほぼ同様の加熱・冷却挙動を示している。熔融固化を繰り返して積層された材料は、層界面に空孔や酸化物などが存在すると積層方向の伝熱に抵抗が生じると懸念されるが、既報⁹⁾の入熱条件で積層した部分はSKD61本来の熱伝導率を示すまで高密度化していると考えられる。

今回のSKD61/Cu複合材は、他の単体材に比べ加熱速度がやや小さく、逆に冷却速度が大きいことが分かる。ダイキャスト金型の冷却目安となる150℃までの冷却にかかる時間は約30%の減少であり、Cuの固体冷却効果が認められた。また温度が上昇しにくい傾向も、Cu複合化の良い影響と言える。

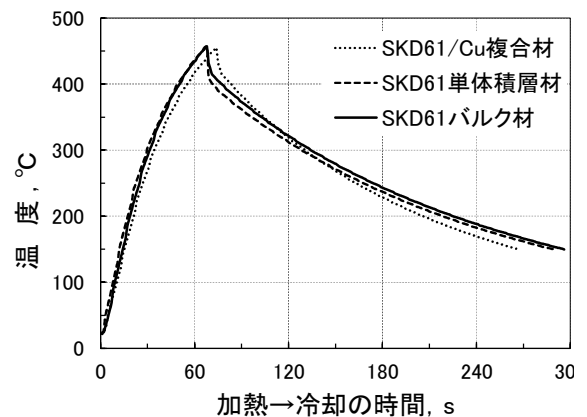


Fig. 4 表面を450℃に加熱した時の温度変化SKD61/Cu複合材と2種類のSKD61単体との比較

Fig. 5 は、同じ試験片上面を800℃に制御したN₂ガスで80s加熱した時の内部温度の変化である。界面付近ではSKD61側A点：170℃、Cu側B点：90℃程度まで加熱されており、SKD61の低熱伝導率による上下方向の温度勾配

と、界面が比較的大きな熱抵抗となっていることが伺える。図中に、各点の温度変化をシミュレーションした結果を示す。熱伝達係数 h を変化させたパラメータスタディにより、 h が $9000\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ の時、図のように実験結果を最も良く再現することが分かった。

3.2 ハイブリッド鋳型材によるアルミ合金鋳物の冷却

Fig. 6(a),(b)は作製した2種類のハイブリッド板外観である。Cuブロックの圧入時、やや外方にたわむように変形

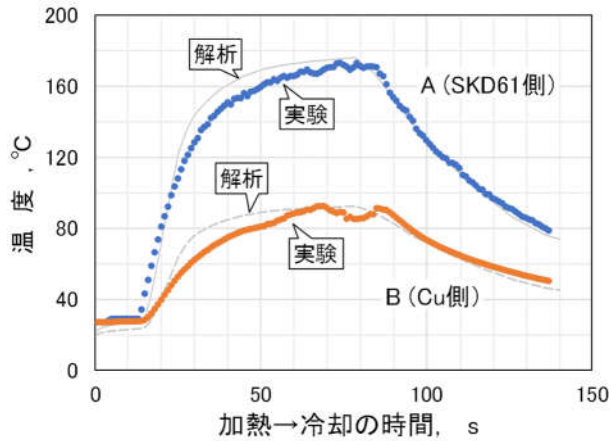


Fig. 5 加熱-冷却過程におけるSKD61/Cu試験片内部の温度変化(実験と解析の比較)

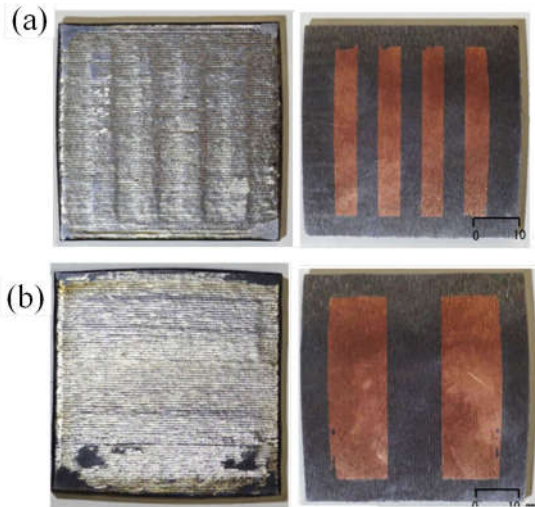


Fig. 6 SKD61/Cuハイブリッド板の外観
Cuブロック:(a)幅5.0mm×4,(b)幅12.5mm×2

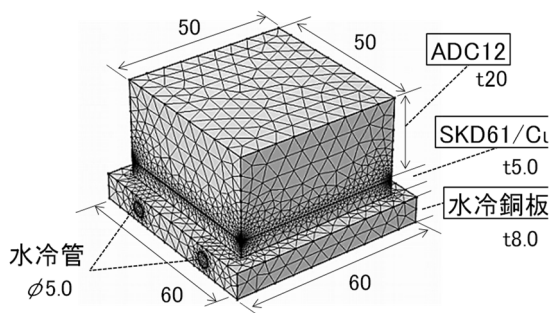


Fig. 7 ハイブリッド板+水冷銅板によるADC12鋳物の冷却シミュレーション用フリーメッシュ4面体モデル

したが、両材は隙間なく接合されている。肉盛り後の取り代が小さかったため、ワイヤ痕が線状に残り、Cuブロックが覆われた位置が凸にうねっている。Fig. 7に、このハイブリッド板によるADC12鋳物の冷却を解析した3Dメッシュモデルを示す。鋳物厚さは実験に従って20mmとし、厚さ5.0mmのハイブリッドが鋳型底に設置され、水冷銅板で冷却されている。本解析では鋳物の初期温度を750°Cとし、凝固潜熱は無視して上面の輻射と下面の固体接触による冷却をシミュレーションした。SKD61/Cu界面の h は前節で求めた値を用いた。

Fig. 8は、冷却時間5sにおけるハイブリッド板の表面から内部へ0.5mm、すなわちSKD61肉盛り層の下0.3mmの

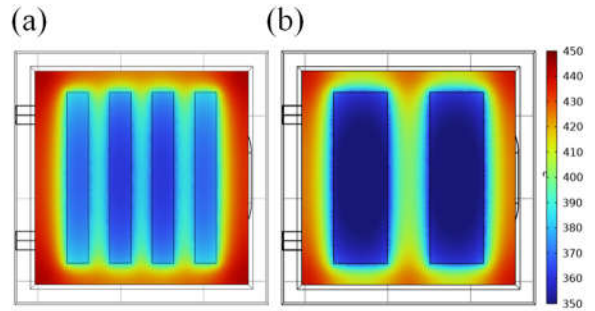


Fig. 8 750°C鋳物冷却5sのハイブリッド板の温度分布
Cuブロック:(a)幅5.0mm×4,(b)幅12.5mm×2

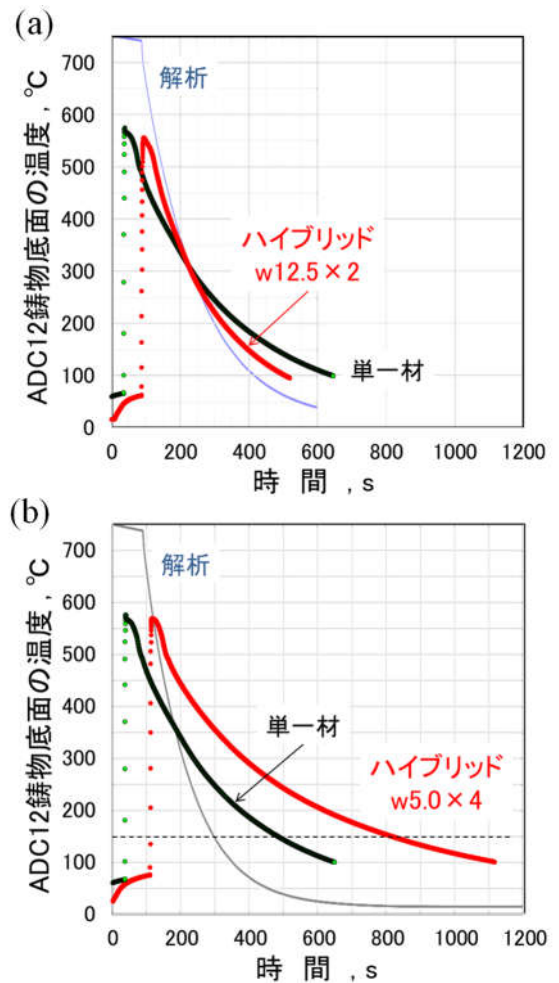


Fig. 9 ハイブリッド板+水冷銅板を用いたADC12の冷却温度曲線の比較
Cuブロック:(a)幅5.0mm×4,(b)幅12.5mm×2

位置での温度分布を比較したものである。Cu ブロックが、周囲のSKD61 枠に比べ60~80℃低く、複合化したCuによる固体冷却効果が確認できる。なおCu ブロックが2本の(b)の方が、4本の(a)よりもやや温度が低くなっており、両者の比較検討は後述する。

Fig. 9 (a),(b) に、実際に铸造したADC12 鋳物の温度変化を示す。前述のように熱電対は鋳型材の直上にあり、鋳物表面(下面)の最速冷却挙動を計測したものと考える。比較として、同形状のSKD61 単一鋼板を鋳型材に用いた場合の結果を合わせて示す。実測では、注湯直後に凝固温度範囲582℃~515℃のほぼ上限にあたる温度が記録されており、鋳型材に触れた部分は30秒ほどで凝固したと推定される。その後のハイブリッド鋳型材による冷却を単一材と比べると、Cu ブロック幅が5.0mmの(a)では遅く、12.5mmの(b)では早まっている。注湯から150℃までの冷却時間は、単一材で640sに対し、前者で約1100s、後方で504sとなった。

一方、シミュレーションではいずれも実験結果より高速な冷却が予測されており、これには以下の原因が考えられる。例えば圧入したCuとSKD61との境界熱伝達率が低い、側面の断熱が不完全など、仮定条件との差である。しかしながら、2種類のハイブリッド板の差は解析と実験で逆転しており、現在のところ理由は分かっていない。鋳型の温度を

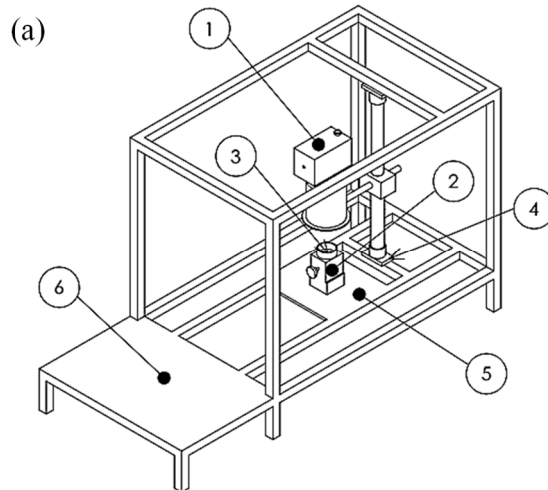
充分低下させて再度実験したが、再現性が認められた。

ここで両ハイブリッド板中のCu/SKD61の総境界面積は幅12.5mmの時2050mm²、5.0mmの時2600mm²であり、Cuブロックへの伝熱面積が大きい後の方が早く冷却すると思われる。ところが表面の肉盛層とCuとが溶着した面積に限ると前者の方が25%大きく、Cuブロックの総体積も同様である。溶着面の熱伝達係数は前節で9000W/(m²K)と見積もったが、実験結果を正しく考察するため、圧入面の熱伝達係数を含めて詳細な熱流束の解析による裏付けが必要である。

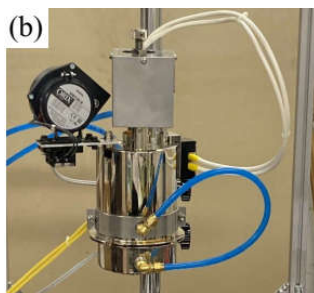
4. 熱疲労耐久性の評価にむけて

4.1 冷熱試験装置の構成

Fig. 9(a)は、製作した冷熱試験装置の見取り図である。これまでのエアヒータ加熱から赤外線ランプ加熱に変更し、加熱速度を向上させた。試験片は位置調節機構の上に、2.4節の伝熱試験と同様、断熱材にはめ込んで設置した。Fig. 9(b)~(d)に、購入した赤外線集光加熱器と出力制御器、温度・歪み計測器(デジタル動歪み計)を示す。運転においては、加熱出力パターンの発生から試験片の温度、歪みの計測までを、全てパソコンで行えるよう結線した。



部品番号	部品名
1	赤外線集光加熱器
2	位置調整機構
3	試験片
4	フランジ
5	試験片天板
6	計測器天板



サーモ理工 IR298UT 型
最高到達温度:1300℃
加熱面積:φ20mm
最高昇温速度:100℃/sec



サーモ理工 TP920FF 型
フィードバック制御, 出力制御



東京測器研究所 DC-004P
測定範囲:~±80,000×10⁻⁶
サンプリング速度:
80μs(4ch)/20μs(1ch)



Fig. 9 (a)冷熱試験装置の組立図, 採用した(b)赤外線集光加熱器, (b)出力制御器, (c)温度・歪み計測器, (d)試験片

4.2 自己拘束型試験片

1 設計・製作した SKD61/Cu 冷熱試験片の側面外観を Fig.
9(e)に示す。外形 25mm 角, 厚さ 10mm であり, コの字型に加工された谷部分に Cu ブロックを圧入して同様に 750°C で拡散接合してある。Cu ブロックの高さは約 5.0mm で幅を 3 種類変えて, 自己拘束による熱応力を比較することにした。

5 治具拘束型の試験片は形状が単純化できるが, 治具を含めて均一に雰囲気加熱する必要があり, 装置は大がかりになる。またサイクルにより治具が変形して拘束力が低下する欠点もある。そこで簡便な自己拘束型を採用し, シミュレーションで界面にほぼ均等なせん断応力が発生することを確認した。現在, 図のように SKD61/Cu 界面の両側に高温歪みゲージを貼付し, 繰り返し計測を行って熱応力の変化を検証中である。

15 謝 辞

20 卒業研究として装置製作と実験にまい進された学生, 水谷功佑氏 (現 ㈱朝日工業社), 川村知也氏 (現 ㈱高木製作所) に感謝します。また, 学生に指導して頂いた豊田中央研究所 生野元氏に厚くお礼を申し上げます。

参 考 文 献

- 1) R. Keshavamurthy, P. Rashmirathi, A.R. Vinod, C.K. Srinivasa, P. V. Shashikumar : Adv. Mater. Manuf. Charact. **3** (2013) Issue 2, 515. 1
- 2) L. Xue, J. Chen, S.-H. Wang : Metallogr. Microstruct. Anal. **2** (2013), 67. 5
- 3) R. Cottam, J. Wang, V. Luzin : J. Mater. Res. **29** (2014) No.17, 1978.
- 4) U. Articek, M. Milfelner, I. Anzel : Adv. Prod. Eng. Manage. **8** (2013) No.3, 169.
- 5) 京極秀樹, 生田明彦, 上村武, 山根卓也, 吉川研一, 大森整 : 近畿大学次世代基盤技術研究所報告 **4** (2013) 71. 10
- 6) 溝口高史, 長濱貴也, 吉見隆行, 米原牧子, 京極秀樹 : 2019 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 (2019), 355.
- 7) 寺山朗, 府山伸行, 本多正英, 大橋俊彦, 山崎拓哉 : 広島県立総合技術研究所西部工業技術センター研究報告 **55** (2012), 25. 15
- 8) 石黒輝雄, 高尾清利, 鈴木大介, 佐野正明, 国枝正典, 山崎久男, 西村仁 : 山梨県工業技術センター研究報告 **25** (2011), 128. 20
- 9) 田中浩司, 岡良樹, 杉本智紀 : 銅と銅合金 **60** (2021) No.1, 50.
- 10) 河野正道 : 電気製鋼 **85** (2014) No.1, 53. 20

25 25

30 30

35 35

40 40

45 45

50 50

54 54