

メッキ銅板の電磁圧接と変形組織から考察する接合理論の新展開

千葉大学 機械工学科

准教授 糸井 貴臣

(平成 23 年度一般研究開発助成 AF-2011031)

キーワード：電磁圧接、同種・異種金属接合、界面組織

1. はじめに

近年、環境問題への関心の高まりからハイブリッド車や電気自動車が普及している。これらの車両の駆動や速度制御には、電気電子技術が用いられており、その駆動は発電機で行われる。内部の電気配線や端子板には銅同士の接合、動力源であるリチウムイオン電池の集電体の接続には正極にアルミニウム、負極に銅という異種金属の接合が必要である。これらの電極部は耐食性を付与する為にニッケルめっきが付与される。また、接続部にはジュール熱による温度上昇や運転時の振動に耐えうる接合強度が求められており、我々はこの接合法に電磁圧接を検討している。電磁圧接は同種および異種金属の接合が可能な固相接合の一種である。¹⁾ これまでの研究において、同種、または異種の金属板の接合について報告がある。^{2~6)} 電磁圧接では、物理的および機械的特性の異なる金属板同士を強い衝撃力で接合するため、接合板同士の界面形状はその組み合わせにより変化すると考えられ、この形状変化は接合強度やその機能性にも影響すると考えられるが、その接合理論は十分に明らかにされていない。電磁圧接のみが有する特徴が明らかになれば、その特徴を効果的に利用した接合技術として発展する可能性を秘めている。そこで、本研究では上記のような実用方法を踏まえたうえで、電磁圧接により銅板およびニッケル(Ni)めっきを施した銅板とアルミニウム板について接合を行い、その接合強度と接合界面の組織学的な考察を行い、電磁圧接の特徴を明らかにする事を目的とした。

2. 電磁圧接方法

図 1 に電磁圧接の模式図を示す。本実験では同図に示すような E 字形平板状ワンターンコイルを用いた。コイルの材料はクロム銅合金板で寸法は同図内に示した。固定板と可動薄板に間隙 1.0mm を設けてコイルの上面に板を配置する。コイルにパルス大電流が流れると高密度磁束が急激に発生する。磁束が下側の可動薄板に交差し、薄板内部

に渦電流が誘導される。すると、磁束と渦電流が交差し、上向きに電磁力が発生し、金属薄板は高速度で変形して上側の固定板に衝突し接合される。供試材は端子などの材料である銅合金板(C19720H)、板厚 0.635mm を用いた。また、純銅板(C1100-1/4H) 板厚 0.6mm に約 2 μ m のニッケルめっきを施した板、および純アルミニウム板(A1050-H24)、板厚 1.0mm を用いて接合を行った。なお、ニッケルめっきを付与した板を Cu(Ni)と表記する。パルス大電流の電源にはコンデンサを用いその容量は C=100 μ F で一定とした。コンデンサに蓄えられるエネルギーを放電エネルギー W[kJ]と称し、W=0.5~4.0kJ と変化させ接合を行った。なお、W は電磁圧接板の接合強度に影響するパラメータである。

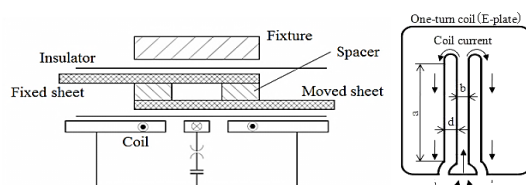


図 1 電磁圧接の概観図とそのコイル形状

3. 評価方法

電磁圧接は銅合金板同士、Niめっきを付与した Cu 板同士、および Niめっきを付与した Cu 板と Al 板の 3 種類の組み合わせで接合実験を行った。なお Al/Cu(Ni)という記述は Al を可動板に、Cu(Ni)を固定板に使用するという意味を示す(先に記述した板を可動板とする)。電磁圧接した接合板から、圧接部を含んだ JIS 13 号形状の試験片をワイヤ放電加工により採取した。接合強度 τ [MPa]は、引張せん断試験における最大荷重を接合面積で除した値とした。Cu 合金板同士の接合板において、試験は温度変化の影響を考慮して室温および温間について試験を行った。温間での試験は

電気炉を用い、設定温度で 10 分間保持した後に室温と同様の条件で試験を行った。

接合界面の観察はシーム方向と垂直な断面に対して行った。界面の観察には光学顕微鏡(OM)、走査型電子顕微鏡(SEM)、およびエネルギー分散型エックス線分析(EDS 分析)装置を用いた。さらに透過型電子顕微鏡(TEM)による詳細な組織観察も行った。観察用の試料は圧接部をシーム方向と垂直に切り出し、機械研磨により鏡面に仕上げた。TEM 試料作製においてはイオンミリングを使用し断面試料を作製した。

4. 実験結果と考察

4.1 銅合金同士の電磁圧接

図 2 に室温、373K および 473K における銅合金同士の圧接板の引張せん断試験の結果を示す。図中の白抜印は、はく離した場合を示し、黒塗印は母材破断した場合を示す。本研究で用いた装置では $W=1.2\text{kJ}$ 以上で接合が可能となった。まず室温の場合は $W=1.2\text{kJ}$ で接合部はく離となり、 $W=1.3\text{kJ}$ 以上で接合が強固となり母材破断した。母材破断した場合の接合強度は 270MPa 程度であった。次に温間での 373K および 473K では $W=1.3\text{kJ}$ 以下ではく離となり、 $W=1.5\text{kJ}$ 以上で母材破断となった。つまり大きな W で接合することで温間域でも強固な接合を維持することができる。接合強度に注目すると、はく離となる W では温度上昇により接合強度が急激に低下している。しかし、473K まででは $W=1.5\sim 4.0\text{kJ}$ の広いエネルギー範囲で、電磁圧接は強固に接合されている事を確認できた。

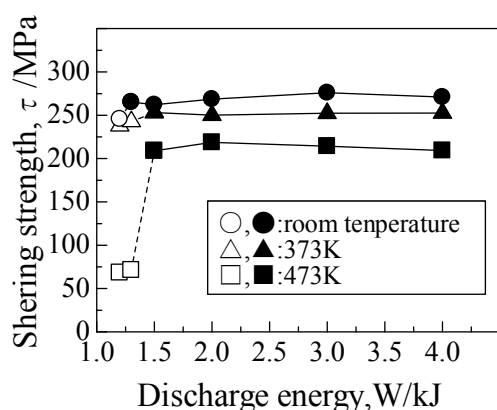


図 2 銅合金同士の圧接板におけるせん断強度と放電エネルギーの関係 (室温～473K)

図 3 に SEM により観察した銅合金同士の圧接部全体図を示す。図中の白線で囲った部分には圧接部の中央にはコイル幅に相当する空隙が存在し、黒線で囲ったその両側 2 列の部分でそれぞれ 1mm 程度の長さで接合されている。接合部の幅は W の増加に伴い増大する傾向にあり、接合面積は増大するといえる。また、図 4 は W の高低で接合界面の状態を比較した図である。図 4 (a) の $W=1.3\text{kJ}$ では平坦な接合界面であるのに対し、図 4 (b) の $W=3.0\text{kJ}$ では界面に波状模様が形成されている。間隙を設けた電磁圧接は接合原理が爆発圧接と類似しており、波状模様は板同士が高速衝突する際の塑性流動により生じる。⁷⁾ また、波状模様は中央部から遠くなるにつれて波長が大きくなる傾向にあった。これは、圧接中心部(衝突点: 図 3 の白線に近い領域)から試料の右端および左端に近づくにつれて板の衝突角度が大きくなるためであると考えられる。波状模様は $W=1.5\text{kJ}$ 以上で接合された圧接板で観察され、 W の増加に伴いその波長と振幅の最大値は増大する傾向となった。 W が高く試験温度によらず母材破断となる圧接板は、いずれも界面に波状模様が形成されていた。このことから、この波状模様の形成により温間でも強い接合を維持できると考えられる。この理由として、界面が波状になると実際の接合面積が増加することが大きな要因であると考えられる。

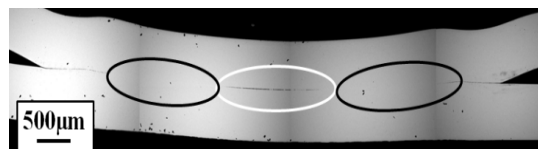
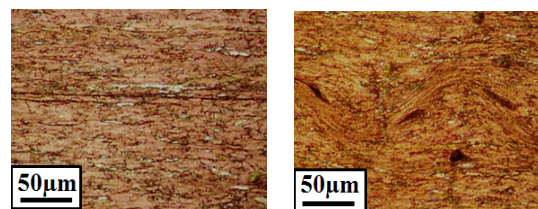


図 3 銅合金同士の圧接板の断面 SEM 写真



(a) $W=1.3\text{kJ}$ (b) $W=3.0\text{kJ}$
図 4 銅合金同士の圧接板の界面 OM 写真

4.2 Cu(Ni)同士の電磁圧接

図 5 に Cu(Ni)/Cu(Ni)の接合界面の OM 像を示す。4.1 で示したように、銅合金同士の接合同形状の波状模様が接合界面に形成されていることが確認された。めっき層があ

る場合では、振幅が大きい部分では波状模様の一部に Ni が確認できず、図中に黒丸で囲んだ領域のように Ni を介さずに Cu 同士が直接接合していることが確認された(図 5 (a))。一方、波状模様の振幅が小さい部分はめっき同士で接合されている(図 5 (b))。波状模様の振幅が大きく変形量が比較

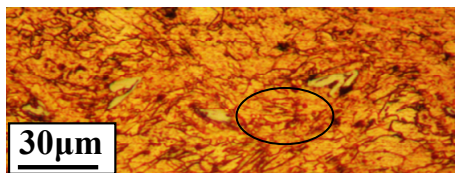


図 5 (a) 振幅の大きい領域での界面 OM 像

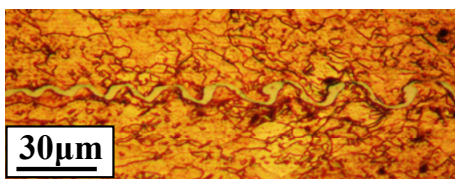


図 5 (b) 振幅の小さい領域での界面 OM 像

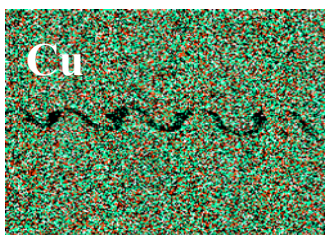


図 5 (c) 領域図 5 (b) での Cu の元素マップ

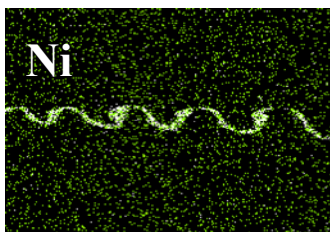


図 5 (d) 領域図 5 (b) での Ni の元素マップ

的大きい図 5 (a)については Cu とともに Ni も大きく変形するために波状模様を被覆できなくなり、Cu 同士の接触面積が増加したと考えられる。

図 5 (c)と図 5 (d)は図 5 (b)の領域において SEM 観察を行い、Cu と Ni の元素分布を調べた結果である。この元素マップからは図 5 (b)に観察されるめっき層が主に Ni で構成されていることがわかる。これは、可動板および固定板に用いた $2\mu\text{m}$ 程度の銅板上のめっき層が、板圧方向におよそ $10\sim 20\mu\text{m}$ 程度の幅を持って変形しているが、電磁圧接により母材の銅板と剥離することなく塑性変形を生じて強固に接合されているということを示している。本試料は、 $W=3.0\text{kJ}$ の条件で電磁圧接

を行っており、母材での破断をするほどの接合強度を有している。そのような強固な接合が生じる条件においても、めっき層は銅板と強固に密着している。この結果は、電磁圧接においてめっき層を施したままで強固な接合ができるという事を示している。そこで、次にこのめっき層が、アルミニウムを対象として電磁接合を行った場合、その界面が剥離することなく接合できるかを調べるために、Al/Cu(Ni)および Cu(Ni)/Al における電磁圧接を行った。

4.3 Al/Cu(Ni)および Cu(Ni)/Al の電磁圧接

Al/Cu(Ni)および Cu(Ni)/Al 圧接板において、室温にて引張せん断試験を行った結果を図 6 に示す。図中の白抜印は接合部はく離、黒塗印は母材破断を表している。接合強度が 0MPa のものは接合できなかった試料である。母材破断となった場合は正しく接合強度を評価できないが、試験結果からせん断応力で 100MPa 以上を有すると考えられる。

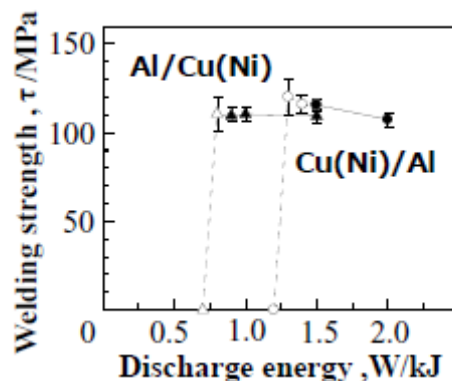


図 6 Al/Cu(Ni)および Cu(Ni)/Al の圧接板におけるせん断強度と放電エネルギーの関係

Cu(Ni)板を可動板とした場合、母材破断となる強固な接合に必要な W は、 1.6kJ 以上であり、Al 板を可動板とした場合は 0.9kJ 以上で母材破断となった。Al 板を可動板とすると Cu(Ni)板を可動板とするよりも小さな W で母材破断となる接合が可能となった。この理由として衝突速度の変化が考えられる。電磁圧接では接合の可否に影響するものに接合時の衝突速度があり、これは装置の条件が同じであれば材料の質量、変形抵抗、電気抵抗から決まる。Al 板は Cu(Ni)板よりも質量、変形抵抗は小さいが電気抵抗は大きい。これらの違いから Al 板を可動板とすることで小さい W でも大きな衝突速度を得られた為と考えられる。

図 7 に Al/Cu(Ni)の接合界面の界面 OM 写真を示す。試料は Al 板を可動板として $W=2.0\text{kJ}$ で接合された圧接板

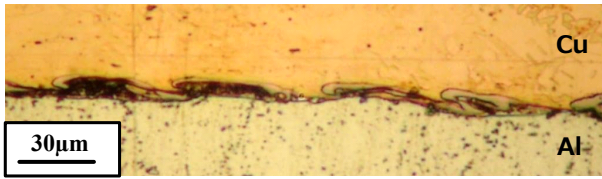


図 7 Al/Cu(Ni)の接合界面の OM 写真

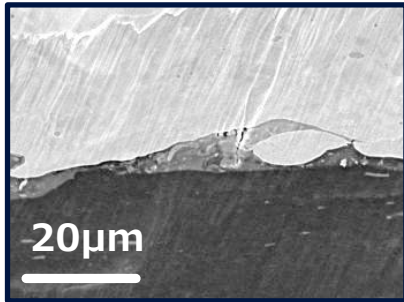


図 8(a) Al/Cu(Ni)の接合界面の SEM 写真

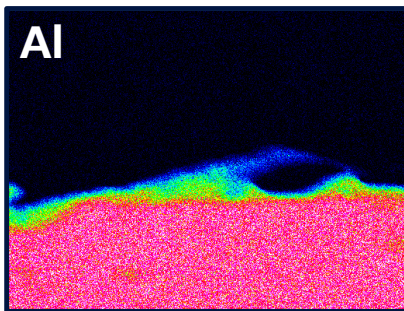


図 8(b) 図 8 (a) での Al の元素マップ

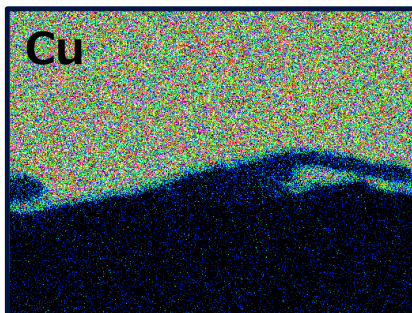


図 8(c) 図 8 (a) での Cu の元素マップ

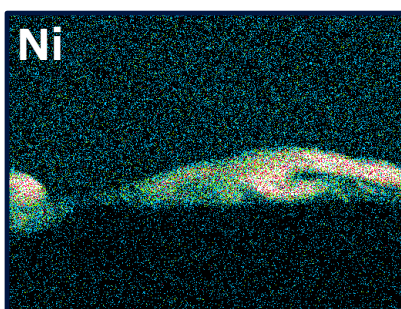


図 8(d) 図 8 (a) での Ni の元素マップ

である。上記のように、電磁圧接は変形部すべてが接合されるのではなく中央部に接合されない部分が残るその両側 2 列の細い線状の部分で実際に接合される。図 7 に示す試料の条件では接合部の幅は 0.8mm 程度となり、同図に示すのはその一部である。図 4 や図 5 の界面と比較すると、比較的板幅方向への振幅が長い傾向があり、 $30\mu\text{m}$ 程度であるが、板圧方向は $20\mu\text{m}$ 程度の幅を持った波状模様が観察される。これは可動板として Al 板を用いたことによる材料の密度差に起因していると考えられる。

次にこの界面のめっき層の組成を調べるために SEM 観察を行い、元素分析を行った。その結果を図 8 に示す。図からは OM 観察と同様にめっき層が観察されるが、よく見るとめっき層中に濃度分布を生じている様子が伺える。EDS 分析により SEM 像と同位置において、それぞれ Al、Cu および Ni の元素マップを調べた結果、めっき層の領域は純粋なニッケルに加えて Ni と Al で主に構成されている部分が存在し、Cu(Ni)/Cu(Ni)の界面とは異なる界面を形成していることが明らかとなった。この層は W を大きくすることで生成量も増加する傾向があり、めっき層が主に Al と反応した可能性がある。次にこの形成された層がどのような機械的特性を示すかについて、この界面近傍についてマイクロビッカース硬さ試験を行った。試験後の試料について SEM 観察を行った結果を図 9 に示す。

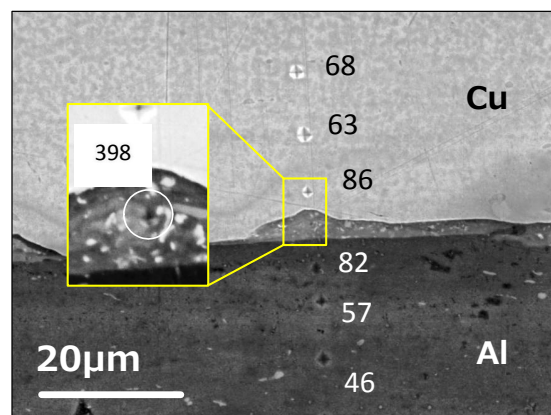


図 9 Al/Cu(Ni)の接合界面のマイクロビッカース硬さ試験後の SEM 像

図中の数値は硬さ値を示す。この結果から、Al および Cu の界面近傍では、比較的母材と比較して硬さ値が高くなっていることがわかり、加工硬化を生じていることがわかる。この事は、電磁圧接においてその界面が加工硬化しており、接合強度にも寄与しているといえる。また、図中の拡大図はめっき層の領域を拡大したものであるが、その硬

さ値は 400 近い値を示しており、両母材とは大きく異なる硬さ値を示す。このことは、母材やめっき層とは異なる物質が新たに界面に形成されたことを示唆する。そこで、この界面について TEM 観察を行った。図 10 に Al/Cu(Ni) の接合界面の HAADF-STEM 像を示す。

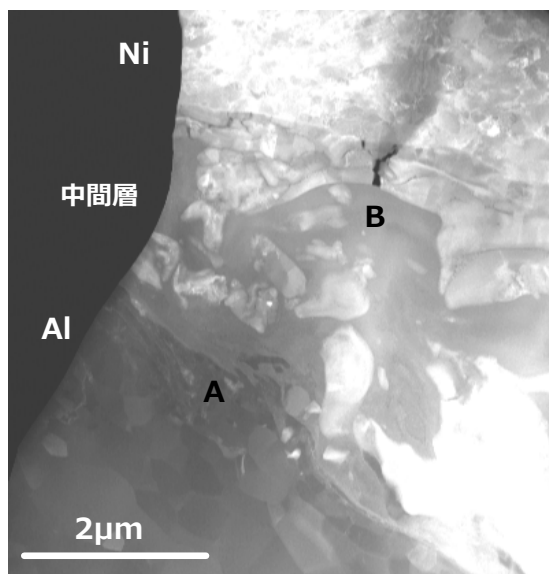


図 10 Al/Cu(Ni)の接合界面の HAADF-STEM 像

HAADF (High-Angle-Annular-Dark-Field)-STEM の像コントラストは物質の電子数に依存するため、より電子数の多い材料はより明るいコントラストで示される為、今回のような異種金属界面の観察に適している。写真上部はめっき層のニッケル、下部はアルミニウムで、その間に中間層が存在していることがわかる。中間層をよく見ると、その層の中にはいくつかのコントラストを有する物質が確認される。また、このコントラストの形態を見ると、マーブル状に入り組んでいることから、電磁圧接による衝突でめっき層とアルミニウム界面の温度が上昇してニッケルとアルミニウムの一部が溶解して交じり合っていることがわかる。図 10 の中間層中にコントラスト差が生じている領域 A と B について電子線回折パターンからその生成物質を同定した。図 11(a)と(b)にそれぞれ図 10 の領域 A と B から得られた電子線回折パターンを示す。

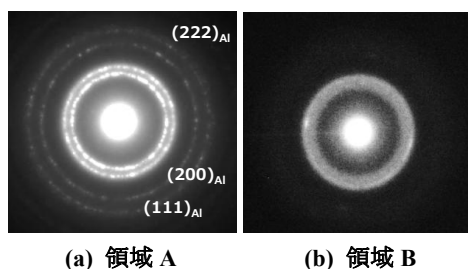


図 11 図 10 の領域 A と B から得られた電子線回折パターン

図 11 の電子線回折パターンより、図 10 の領域 A はアルミニウムであることがわかる。高分解能観察の結果、その結晶粒は数十 nm であり、微細組織であることがわかった。また、領域 B については、結晶によるシャープなスポットも観察されるものの、ハローパターンが観察され、アモルファス相であることがわかった。つまり、電磁圧接による可動板の固定板への衝撃による発熱により、局部ではあるものの溶解が生じ、また、その溶解した部分は急激に冷却されているといえる。アモルファス相は Ni を 60at%程度含んでいるニッケルリッチな組成であり、2 μm も離れていない場所で大きな濃度差を生じ、それらが十分に交じり合うことなく早く冷却されたため、組成の分布が生じ、マーブル状の組織が形成されたと考えられる。図 9 に見られるような中間層の高い硬さ値は、このようなアモルファス相や微細結晶粒の形成に起因しているといえる。アモルファス相は結晶構造を持たず、結晶金属との整合性もよいことから、多くの結晶金属との接合に適しているとも考えられる。このような反応は、図 5 の Cu(Ni)/Cu(Ni)界面では観察されないことから、めっき層と可動板に用いる材料の種類により、界面で生成する組織が異なるといえる。つまり、板の表面に生じる塑性変形を利用した電磁圧接では、めっき層を母材から剥離させることなく、めっき層同士の接合が可能である事が示唆され、また、めっき層自体を局部溶解し、新たな物質に作り変えることができる。現時点では、このように不均一な組織が形成されているが、めっき層の種類やその膜厚を変化させることで、異種金属界面にとって、機能性や接合に友好的な界面の形成も可能であることも示唆している。本研究では、電磁圧接による界面反応を知るとともに、新たにその接合の可能性を知ることができた。

5. まとめ

- 1) 銅合金同士の接合において、室温では放電エネルギー 1.3~4.0kJ、温間では 1.5~4.0kJ で母材破断するほど強固な接合が可能であった。
- 2) 銅合金同士の接合において母材破断となる試料の界面には波状模様が観察された。これによる界面での実際の接触面積増加が板同士の強い接合強度に効果的であると考えられる。
- 3) Cu(Ni)/Cu(Ni)の接合界面には銅合金同士の接合同様に波状模様が観察された。波状模様の振幅が小さい部分ではニッケルめっき層同士で接合している箇所が存在した。
- 4) Al/Cu(Ni)および Cu(Ni)/Al の接合において、Cu(Ni)板を可動板とした場合、母材破断となる強固な接合に必要な W は、1.6kJ 以上であり、Al 板を可動板とした場

合は0.9kJ以上で母材破断するほど強固な接合が可能であった。

- 5) Al/Cu(Ni)接合板の界面にはめっき層のニッケルに加え部分的に中間層が観察された。中間層はニッケルとアルミニウムで構成されており、TEM 観察の結果、微細なアルミニウムとニッケルリッチなアモルファス相が観察された。
- 6) Al/Cu(Ni)接合板の界面について HAADF-STEM 観察を行った結果、中間層には組成分布がマーブル状のコントラストとして観察された。このことは接合時の衝撃で局部的に溶解が生じており、また、5)の結果をあわせて考えると、溶解後は急冷されていると考えられる。

参考文献

- 1) 相沢友勝：塑性と加工，41-470(2000)，P265.
- 2) 岡川啓悟，相沢友勝：塑性と加工，47-546(2006)，P632.
- 3) K.J. Lee, S. Kumai and T. Arai : Materials Transactions, Vol. 46, No. 8 (2005) P1847.
- 4) T. Aizawa, M. Kashani, and K. Okagawa : Welding Journal, Vol.86, (2007), P.119.
- 5) K.J. Lee, S. Kumai, T. Arai and T. Aizawa : Materials Science and Engineering A 471 (2007), P95.
- 6) M. Watanabe and S. Kumai : Materials Transactions, Vol. 50, No. 2 (2009), P286.
- 7) G. R. Cowan, A. H. Holtzman : J. Appl. Phys. 34(1963), P928.

謝辞

本研究は公益財団法人天田財団一般研究開発助成（AF-2011031）の支援を受けて行われたものである。付記して感謝申し上げます。