

溶湯熱を利用したアルミ合金鋳物の複合化

戸羽 篤也, 高橋 英徳, 片山 直樹

Hybridization Process using Heat of Melt Aluminum Alloy

Atsuya TOBA, Hidenori TAKAHASHI, Naoki KATAYAMA

抄 録

無電解ニッケルめっき処理後に熱処理を施すことによって高硬度皮膜が形成できる技術に着目し、アルミ合金鋳物の耐摩耗性を要する部位に低コストで高硬度皮膜を付与する鋳ぐみ複合化技法の可能性を検討した。

予め無電解ニッケルめっきを施した純アルミ基板をアルミ合金溶湯で鋳ぐむ試験の結果、鋳型を予熱して温度を高めた金型に溶湯温度を低く抑えて鋳込むことにより、鋳物との良好な接合と、硬い表面皮膜が得られることを確認した。

キーワード：アルミ合金鋳物, 無電解ニッケルめっき, 複合化

Abstract

We focused on the hard layer formed by heat-treatment after electroless nickel plating and examined possibilities of the low-cost hybridizing process to sections that required wear resistance of the aluminum alloy castings.

We have examined the casting process that combines the aluminum alloy castings with the aluminum base-plate which has the electroless nickel plating layer. As a result, it is revealed that adequate combined condition is elucidated between the aluminum base-plate and aluminum alloy castings, and the surface layer of the electroless nickel plating is hardened, when the molds are pre-heated and the temperature of the molten metal is moderate.

KEY-WORDS : Aluminum alloy castings, Electroless nickel plating, Hybridization

1. はじめに

アルミ合金鋳物は、比重が比較的小さく軽量化が可能なこと、融点が比較的低いことから製作に要するエネルギーが小さく、金型を用いた量産が可能なこと、さらにリサイクル性に富み地球環境負荷が小さい材料であることなど多くの優位性をもつ。一方、鉄鋼材料等に比較して引張強度などの機械的性質や表面硬さが小さいなどの機能性に劣る。

アルミ合金の優位性を活かしつつ、要求される部位に機能性を付与するための複合化技術が有効である。アルミ合金製品の表面硬さを向上させる方法として、無電解ニッケルめっきを施し、これを熱処理することで硬い皮膜を形成する技法

が知られている。そこで、表面硬さが要求される部位に予め無電解ニッケルめっきを施した基板を鋳型内に設置し、これにアルミ合金を鋳込むことで鋳物とその基板を接合すると同時に無電解ニッケルめっき皮膜の熱処理を行う鋳ぐみ複合化技術の可能性を検討した。

2. 研究の目的

2.1 無電解ニッケルめっきの熱処理と表面硬さ

無電解ニッケルめっき（以下「Ni-Pめっき」という）は、耐食性、耐摩耗性に優れていることに加えて、化学的な析出反応により被加工表面に一樣の厚さでめっき皮膜が形成され

事業名：経常研究

課題名：アルミ合金鋳物の溶湯熱を利用した低コスト複合化技術の開発（平成22～23年度）

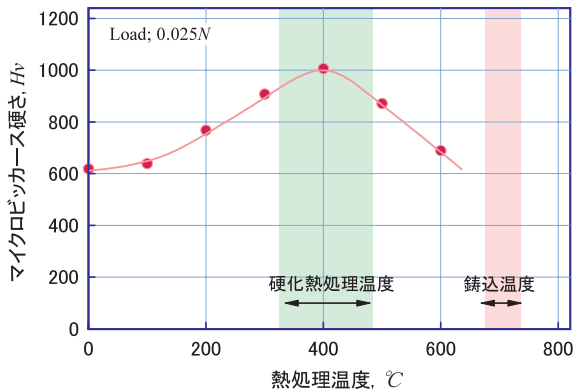


図1 無電解Ni-Pめっき皮膜の熱処理温度と表面硬さ

る。この特徴により、Ni-Pめっきをアルミ合金製機械部品などに施すことでその寸法精度を損なうことなく表面に硬い機能的皮膜を形成することができる^{1,2)}。

7～10%程度のリンを含有するNi-Pめっき皮膜の硬さはおよそHv600程度であるが、めっき後に熱処理を加えることで、さらにその硬さを増大できることが知られている。このときの熱処理温度と皮膜硬さの関係について、図1にその一例を示す³⁾。熱処理温度を上昇させると皮膜硬さが増加し、400°Cで約1時間の熱処理を施すことで組織が結晶化して皮膜硬さはHv1,000程度まで上昇する。しかしながら、さらに熱処理温度を上昇させると、今度は逆に皮膜の硬さは減少し、熱処理温度が600°Cになると、もとのNi-Pめっきを施したときと同等のHv600程度まで硬さが低下する⁴⁾。したがって、Ni-Pめっきの硬い皮膜を得るには、熱処理温度の管理が重要となる。

2.2 アルミ溶湯熱を利用した熱処理条件

本研究の目的は、アルミ鋳物とNi-Pめっき皮膜との複合化において、鋳ぐるみ時の溶湯熱を利用してNi-Pめっきの結晶化熱処理をすることである。前述のとおり、Ni-P皮膜の硬さは熱処理温度が高すぎると低下するという特性がある。

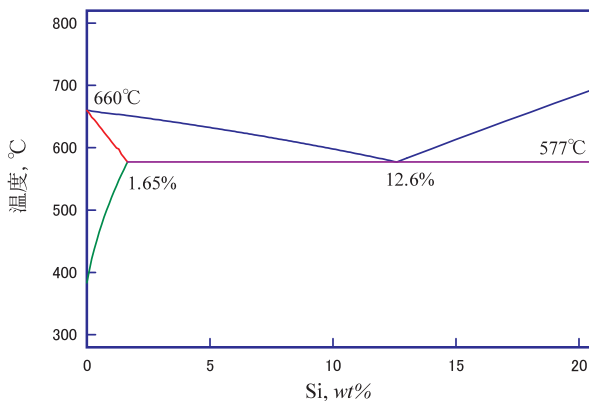


図2 Al-Si平衡状態図

Al-Si平衡状態図⁵⁾を図2に示す。共晶温度が577°Cであることから、アルミ合金鋳物の注湯温度は最も融点の低い共晶組成の合金でも注湯温度は600°Cを超える。アルミ鋳物用合金として、最も広く使用されるAC4CはSiを7wt%程度配合しており、一般に液相線温度から100°C程度高い720°C前後で注湯する。この温度は図1で「鋳込温度」として示した温度範囲となり、この温度で加熱するとめっき皮膜はHv600以下に低下することになる。

一般にNi-Pめっきの熱処理は400°Cで約1時間の処理が行われる。これに対し、鋳ぐるみによる複合化プロセスは、溶湯が鋳込み直後から鋳型への伝熱によって急速に冷却されるため、一般のNi-Pめっきの熱処理条件とは異なる。

そこで、鋳ぐるみ時の溶湯熱によるNi-Pめっき皮膜硬化の可能性を確かめるため、熱処理条件とNi-Pめっき皮膜の硬さとの関係を計測することにした。

3. Ni-Pめっき皮膜の硬さに及ぼす熱処理条件の影響

3.1 実験方法

試験に供した試料は、板厚1mmの純アルミニウム板（以下、「純アルミ母材」という）の片面をマスキングし、他方の面に約100μmの厚さでNi-Pめっきを施し、この試料から一辺がおよそ30mmの矩形小片を切り出して用いた。

試験は、予め所定の温度に昇温した電気炉内に供試材を投入し、所定の時間保持した後に炉外で空冷し、その中央部を切断して樹脂に埋め込み、断面を研磨してからめっき皮膜断面の硬さをマイクロビッカース硬さ計で計測した。

熱処理条件は、間口、高さ、奥行きがそれぞれ300mmの容積をもつ電気炉内を350°Cから700°Cまで50°C間隔で8水準の温度に設定した。一方、試料の炉内への投入から再び炉外に取り出すまでの時間は30秒、60秒、90秒、120秒および240秒の5水準を設定し、これら熱処理温度と熱処理時間との組み合わせによって熱処理条件とした。

3.2 実験結果

電気炉により熱処理条件を変えた時のNi-Pめっき皮膜の硬さ計測結果を図3に示す。図3-a)に、加熱温度350°Cで試験したときの加熱保持時間の違いによるNi-Pめっき皮膜の硬さの変化を示す。240秒以上の加熱保持時間を経過してもNi-Pめっき皮膜の硬さに大きな変化は認められず、ほぼ当初のめっき硬さであるHv600程度のままであった。併せて、純アルミ母材の硬さを計測したところ、加熱時間に関わりなく当初の硬さHv60前後の硬さを示した。

図3-b)に、温度を400°Cとしたときの加熱保持時間の違いによるNi-Pめっき皮膜の硬さの変化を示す。電気炉内へ投入した当初から90秒経過するまでNi-Pめっき皮膜の硬化は認められなかったが、120秒加熱保持した試料のNi-Pめ

き皮膜の硬さは最大でHv951まで急激に上昇した。併せて、純アルミ母材の硬さを計測したところ、350℃での熱処理条件と同じく熱処理の加熱保持時間によって変化は見られなかった。

図3-c)に、温度を450℃としたときの加熱保持時間の違いによるNi-Pめっき皮膜の硬さの変化を示す。電気炉内投

入後30秒経過するまではNi-Pめっき皮膜の硬化が緩やかであるが、その後の加熱保持時間の経過とともにNi-Pめっき皮膜の硬さが上昇し、60秒経過したときにその硬さがHv947程度に達した。その後は、保持時間を経過してもNi-Pめっき皮膜の大きな硬さ上昇は見られなかった。

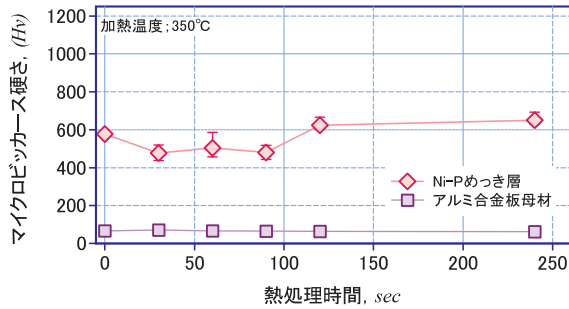


図 3-a) 加熱保持温度 350℃

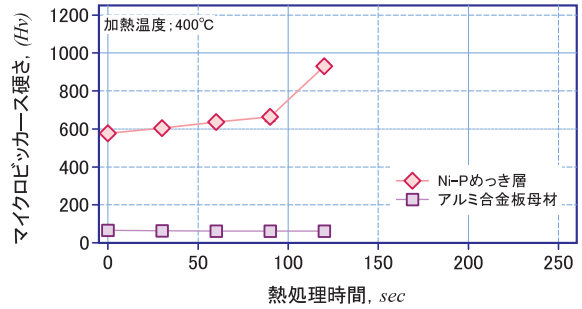


図 3-b) 加熱保持温度 400℃

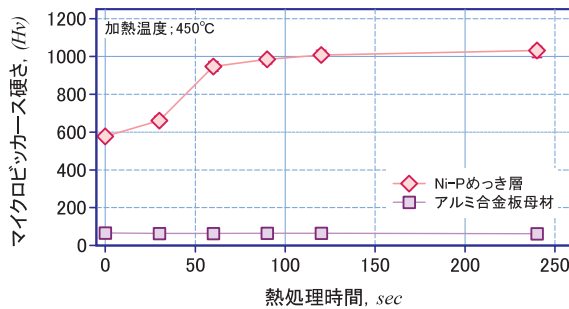


図 3-c) 加熱保持温度 450℃

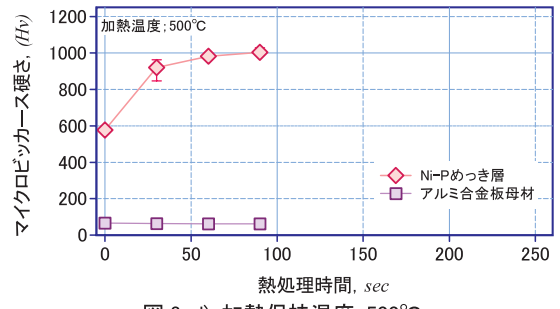


図 3-d) 加熱保持温度 500℃

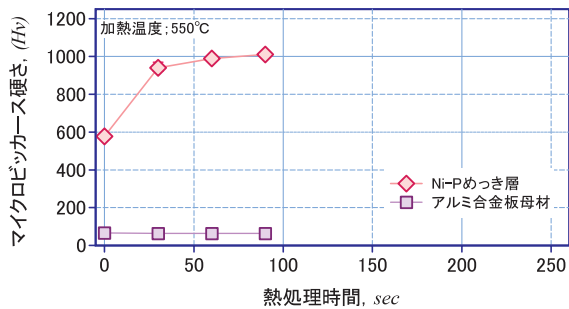


図 3-e) 加熱保持温度 550℃

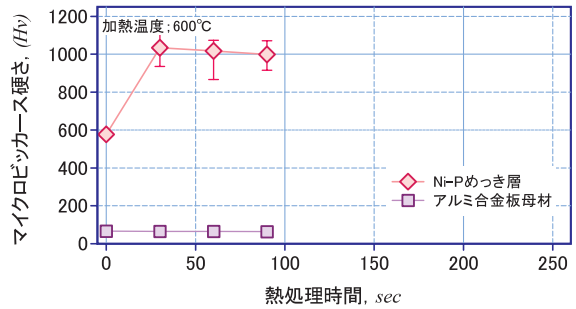


図 3-f) 加熱保持温度 600℃

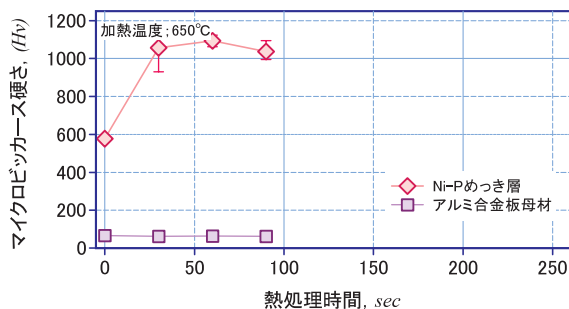


図 3-g) 加熱保持温度 650℃

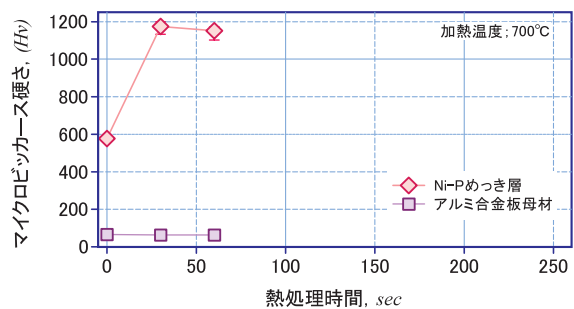


図 3-h) 加熱保持温度 700℃

図 3 種々の加熱保持温度における熱処理時間とマイクロピッカース硬さとの関係

純アルミ母材の加熱保持時間に伴う硬さ上昇は、前出の熱処理条件の場合と同様に変化が見られなかったため、以下の説明では母材の硬さ計測結果については割愛する。

図3-d)に、温度を500℃としたときの加熱保持時間の違いによるNi-Pめっき皮膜の硬さの変化を示す。電気炉内投入後ただちにNi-Pめっき皮膜の硬化が進行し、30秒経過した時点でHv920前後の硬さが計測された。その後60秒後にHv980を超え、90秒後にはHv1,000に達した。

図3-e)に、温度を550℃としたときの加熱保持時間の違いによるNi-Pめっき皮膜の硬さの変化を示す。電気炉内に投入後ただちにNi-Pめっき皮膜の硬化が始まり、約60秒経過して皮膜の硬さがHv1,000程度まで上昇し、電気炉の温度が500℃の試験結果と極めて似た挙動を示した。

図3-f)に、温度を600℃としたときの加熱保持時間の違いによるNi-Pめっき皮膜の硬さの変化を示す。電気炉内投入後、Ni-Pめっき皮膜の硬化が直ちに始まり、30秒経過後には最大Hv1,120に達した後は、保温時間が長くなるに連れて徐々に低下する傾向が認められた。90秒後のNi-Pめっき皮膜の硬さは約Hv1,000であり、500℃で90秒間熱処理した場合の硬さとほぼ同一水準である。

図3-g)に、温度を650℃としたときの加熱保持時間の違いによるNi-Pめっき皮膜の硬さの変化を示す。電気炉の温度を600℃としたときと同様に、試料を電気炉内投入後、Ni-Pめっき皮膜の硬化が直ちに始まり、30秒経過後にはHv1,056、60秒経過後にはさらに硬化してHv1,090に達した。さらに温度を保持すると、90秒後にはNi-Pめっき皮膜の硬さは若干低下してHv1,043程度の硬さとなった。

図3-h)に、温度を700℃としたときの加熱保持時間の違いによるNi-Pめっき皮膜の硬さの変化を示す。電気炉投入後、急激に硬化が進行し、30秒経過後には最大Hv1,200に達する試料も見られた。その後は硬さが低下する傾向が認められた。

3.3 鑄ぐるみ時の加熱制御手法に関する考察

電気炉を用いたNi-Pめっき皮膜の熱処理条件と硬さ変化に関する試験の結果をまとめると、以下のとおりである。

- 加熱処理温度が350℃のとき、処理時間が240秒を超えてもNi-Pめっき皮膜の硬さに顕著な硬化は認められない。
- 加熱処理温度が400℃～450℃のとき、加熱後少し時間が経過した後にNi-Pめっき皮膜の硬化が始まり、硬さがHv1,000程度に達した後、時間の経過とともに若干の硬さ増加が認められた。
- 加熱処理温度が500℃以上のとき、加熱直後からNi-Pめっき皮膜の硬化が始まり、加熱温度が高いほど最大硬さの値も高い傾向が認められた。

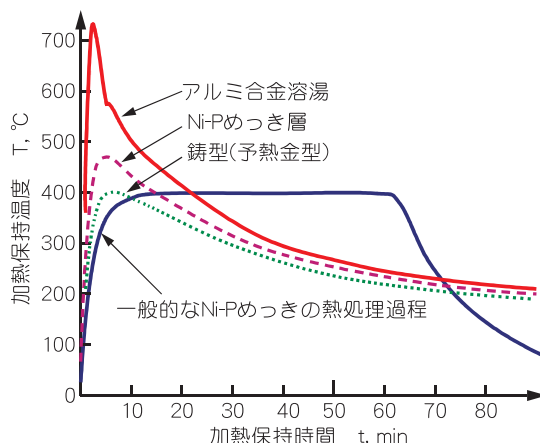


図4 鑄ぐるみ時の熱履歴曲線（模式図）

- 加熱処理温度が600℃以上のとき、加熱処理後30秒程度で最大硬さに達した後は、加熱保持時間の経過に伴ってNi-Pめっき皮膜の硬さが低下する傾向が認められた。

以上の結果から、加熱温度が600℃以上で30秒以上加熱処理すると、過熱によるNi-Pめっき皮膜の硬さ低下が生じるとの知見を得た。このことは、熱処理温度が400℃を超える過熱状態となっても保持時間が短時間であれば高い硬さを保ったままのNi-Pめっき皮膜が得られることを意味しており、鑄ぐるみ時の溶湯熱でNi-Pめっき皮膜の硬化熱処理プロセスの可能性が見いだせた。

図4は、鑄ぐるみによるNi-Pめっき皮膜硬化の熱処理条件について、アルミ合金注湯後の溶湯温度、鑄型温度およびNi-Pめっき皮膜の温度変化を模式的に示したものである。図中に太い実線で示した曲線は、一般的なNi-Pめっきの硬化熱処理に用いられる条件である400℃で概ね1時間の加熱保持する過程を示している。これに対し、鑄ぐるみでは注湯された溶湯が鑄型を介して冷却される過程の中で、同図に示す3本の冷却曲線の様にアルミ合金溶湯、鑄型（金型）および純アルミ母材に施されたNi-Pめっき層がそれぞれの温度差を保ちながら温度変化をたどる。

今回の実験で、加熱温度が400℃を下回ると、鑄ぐるみプロセスにおけるNi-Pめっき皮膜の硬化熱処理には余り効果を及ぼさないことが分かった。したがって、図4の破線で示したNi-Pめっき皮膜の冷却曲線において、その部位の温度が400℃を超える範囲に相当する経過時間がNi-Pめっき皮膜の硬化熱処理の有効時間になると考えられる。

そこで、鑄ぐるみによる複合化試験の実験方法を計画するにあたり、鑄造CAEシステムを利用して鑄造後の鑄物と鑄型の温度変化を試算した。

図5は、鑄物の肉厚と鑄型の予熱温度を変えて凝固解析を行った結果から得た鑄造後の鑄物と鑄型表面の冷却曲線である。解析に用いた境界条件として、鑄物は鑄造用アルミ合金

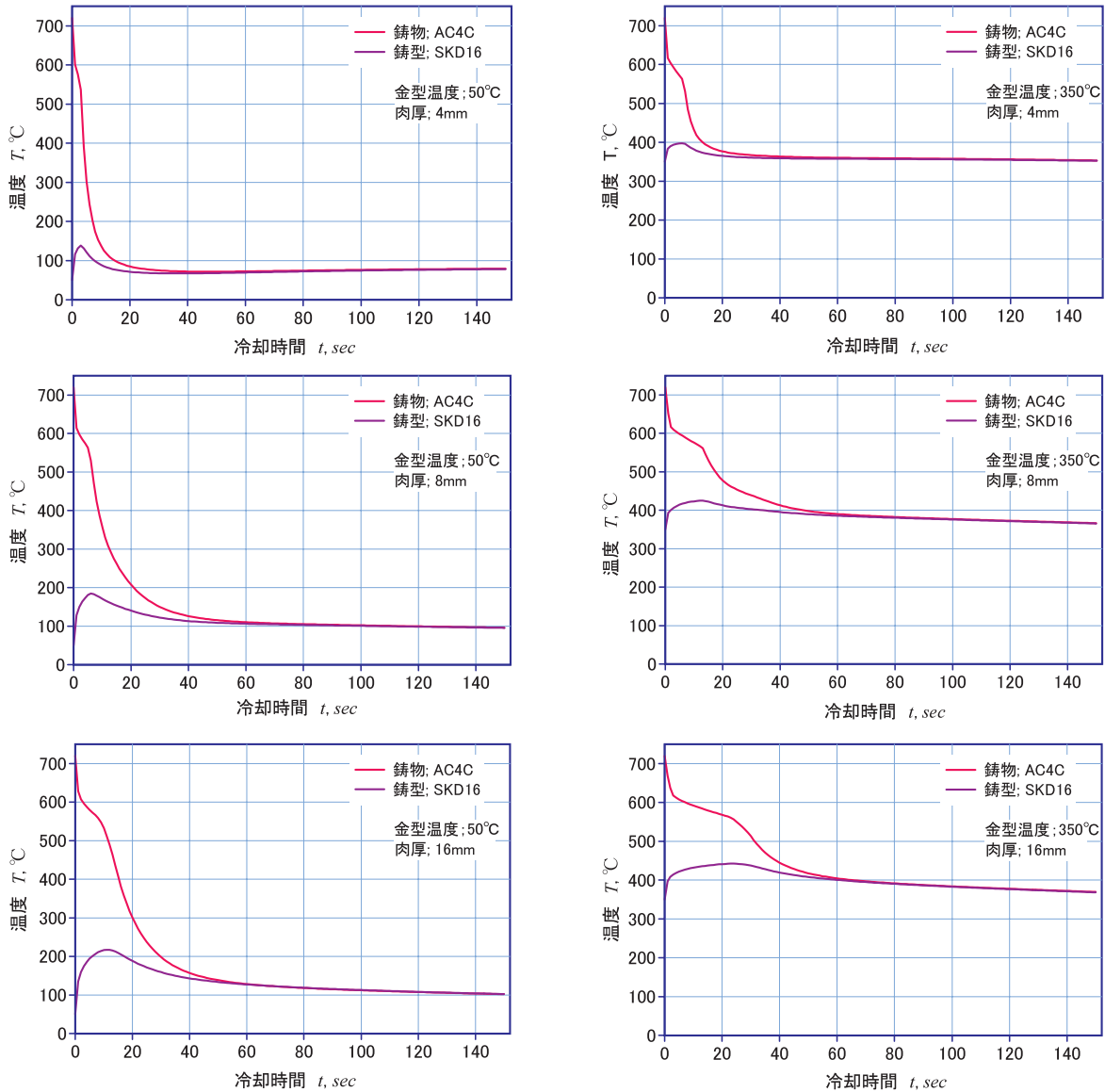


図5 鋳造CAEによる鋳ぐるみ後の冷却シミュレーション例

として広く用いられているAC4Cの物性値を用いた。一方、鋳型は金型とし、SKD16の物性値を用いた。本来、この解析の目的はNi-Pめっき皮膜および純アルミ母材の温度変化を推定することであるが、数値解析の重要な境界条件である熱伝達係数が得られていないため、ここでは目的を大まかな有効熱処理時間の制御に関する可能性を検証することとし、母材およびめっき皮膜の温度変化は金型表面温度の温度変化から推定することとした。

図5の上段から鋳物肉厚を4mm、8mm、16mmとして鋳物の熱容量を変化させ、金型の予熱温度は50°Cと350°Cの2水準とした。

解析結果は、鋳物の熱容量が大きくなると冷却速度が小さくなるため冷却過程における温度変化が緩やかになることを示しており、鋳造後に溶湯が凝固して金型温度付近まで冷却されるのに要する時間は鋳物の肉厚とともに変化し、肉厚4

mmで約20秒、8mmで約40秒、16mmで約60秒となった。鋳ぐるみ複合化における有効熱処理時間は、最大でもこれらの値となるが、解析結果から推測すると肉厚6mm程度の鋳物でも30秒間程度の有効熱処理時間が得られる可能性があることを確認した。

また、熱処理温度は金型の予熱温度に大きく影響を受け、50°Cの金型に鋳込んだ場合は最大加熱温度が400°Cに達することなくその後冷却が進むのに対して、金型を350°Cに予熱した場合は、複合化基板の温度が400°Cを超える領域が得られることを示した。

以上の解析結果から、鋳ぐるみ複合化におけるNi-Pめっき皮膜の有効熱処理時間は、主に冷却速度とこの部位の最高到達温度に支配され、鋳物と鋳型の重量（熱容量）が決まれば、アルミ合金を鋳込む際の注湯温度と鋳型の予熱温度によって制御できる見通しが得られた。

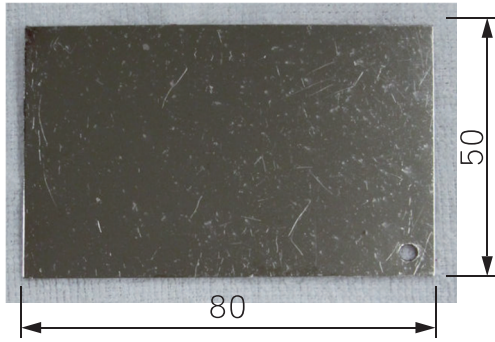


図6 実験に供した铸ぐるみ複合化試料

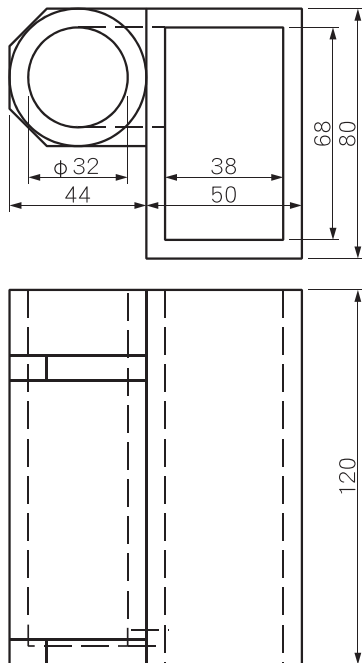


図7 実験に用いた铸型の形状・寸法

4. アルミ铸物の铸ぐるみ複合化試験

4.1 実験方法

铸ぐるみによるアルミ铸物のNi-Pめっきの熱処理硬化処理による複合化の可能性を確認したので、Ni-Pめっきを施した純アルミ母材を設置した铸型にアルミ合金溶湯を铸造し、その品質を評価した。

実験に用いた複合化試料は、縦80mm×横50mm×板厚0.8mmの純アルミ母材の片面をフロンマスクでマスキングし、他方の表面に皮膜厚さ0.03mm (30 μ m) となるように一連のNi-Pめっき処理を施した。その後、フロンマスクを除去し、接合性に悪影響がないようにマスク除去面をアセトンで脱脂処理して実験に供した。複合化試料の外観を図6に示す。

実験に用いた铸型は、図7に示す形状および寸法の砂型を粉末RP铸型法^{6,7)}により製作し、底面の窓の空いた部位に複合化試料をめっき処理面が外側に向くように取り付け、この面を下向きにして金型に見立てた鉄製基板の上に静置した

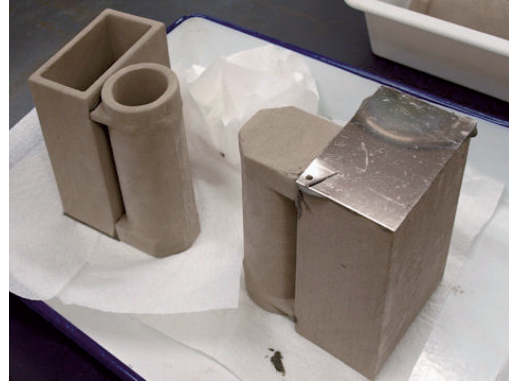


図8 粉末RP铸型とこれに取付けた複合化試料

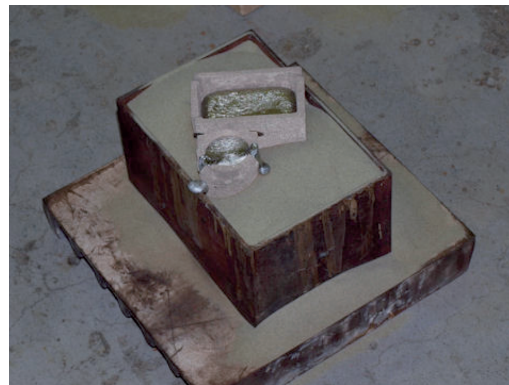


図9 铸ぐるみ実験での铸造後の様子

後、铸型の周りに金枠を置いて乾燥砂でバックアップした。

铸造に用いるアルミ合金材料は、前項の铸造解析で解析条件として設定した材質とほぼ同等のAl-Si系铸造用アルミ铸物用合金AC4CHを用いた。溶解は、黒鉛るつぼに約5kgの材料を投入し、るつぼをLPGガスバーナーで加熱昇温し、所定の温度に達したところで铸型に铸込んだ。

铸造試験は、铸型底部に設置した金型に見立てた鋼製定盤を電熱ヒーター等で徐々に予熱し、所定の温度に落ち着くように保温し、一方のアルミ合金溶湯の温度が所定の温度になったところで加熱を止め、目標の铸込み温度になったところで铸型に注湯した。铸造条件は、金型温度については、室温(20 $^{\circ}$ C付近)、100 $^{\circ}$ C、200 $^{\circ}$ C、300 $^{\circ}$ Cの4水準とし、注湯温度は650 $^{\circ}$ C、700 $^{\circ}$ C、750 $^{\circ}$ Cの3水準とした。

铸造後の試験片は铸型から取り出し、铸型砂等を除去したところでNi-Pめっき面の外観観察を行い、その後試料を切断して接合部位断面の顕微鏡観察を行った。

図8に、実験に使用した粉末RP铸型の外観写真を示す。手前に見える铸型は上下が逆さになっており、铸込み時に底側になる部位には、純アルミ母材にNi-Pめっきを施した複合化試料が耐熱性接着剤で取り付けられている。

铸造実験において、鋼製定盤の上に製作した粉末RP铸型を静置し、周囲を乾燥砂でバックアップしてアルミ合金を注湯した後の写真を図9に示す。金型に見立てた鋼製定盤を予

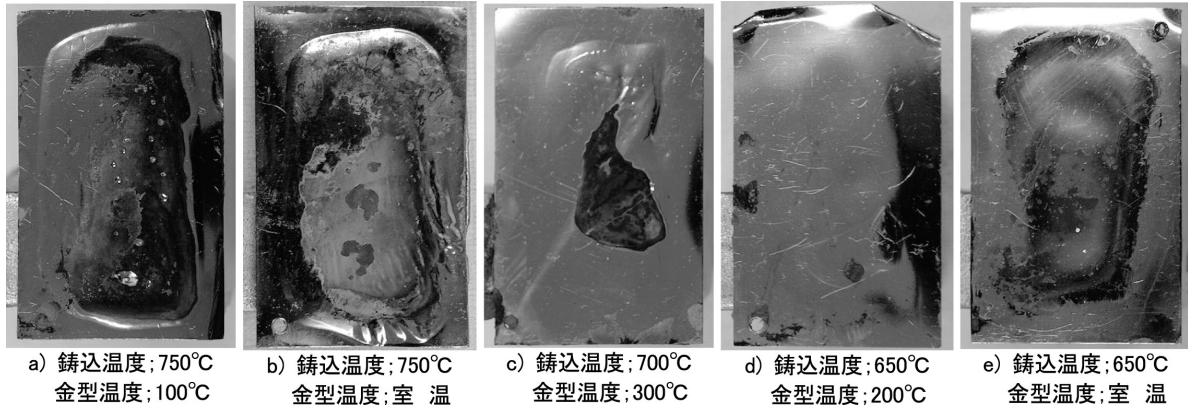


図10 鑄ぐるみによる複合化試料のNi-Pめっき皮膜外観写真

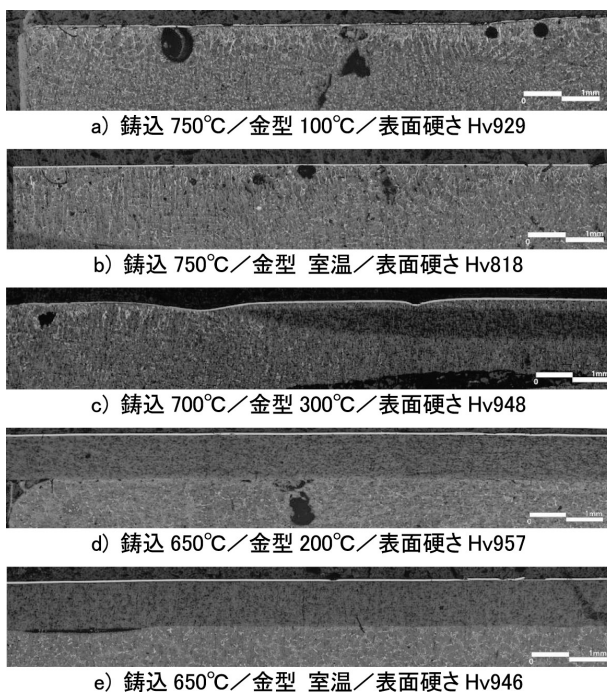


図11 鑄ぐるみ複合化試料の断面組織観察

熱する試験では、写真の定盤の下に電熱ヒーターを置くなどして加熱し、定盤上の金枠付近で表面温度計測して予熱温度を確認した。また、実際の鑄造試験では、粉末RP鑄型の上部に錘を置くなどして鑄型が鑄造時のアルミ溶湯による浮力で鑄型が浮き上がらないように配慮した。

4.2 実験結果

鑄ぐるみ鑄造試験で得られた試料のNi-Pめっき皮膜の外観写真を図10に示す。それぞれの試料の鑄造条件は試料写真の下に記述したとおりである。

鑄込み温度750°Cで鑄造した試料a)およびb)は、表面が大きく変形しており、過熱の影響を受けたと思われる変色が見られるとともに、一部めっき皮膜が剥離した。試料a)は金型予熱温度を100°C、試料b)は金型予熱温度を室温

(約20°C)でそれぞれ鑄造したものであるが、これらに関して金型予熱温度の差による顕著な違いは認められなかった。

試料c)は、鑄込み温度700°C、金型予熱温度300°Cの条件で鑄造した試料である。めっき面の中央部に過熱によると思われる変色とめっきの剥離が見られる。また、750°Cで鑄造した試料と同様に、めっき表面の変形は見られるが、その程度は若干抑えられているように見える。

試料d)と試料e)は、鑄込み温度650°Cで鑄造した試料である。試料d)は金型予熱温度を200°C、試料e)は金型を室温(約20°C)で鑄造したものであり、いずれも700°C以上で鑄込んだ試料に比べて表面の変形が小さい。特に、金型を200°Cに予熱した試料d)の変形は試験で得られた試料の中で最も変形が小さく抑えられていた。

次に、各試料の中央付近を切断し、その断面の金属組織を観察した。図11に各試料の断面組織を示す。

鑄込み温度750°Cで鑄造した試料a)およびb)は、複合化試料の純アルミ母材が残存しておらず、表面近傍までAl-Siの共晶組織となっている。試料a)と試料b)で切断した箇所が異なるが、試料a)の表面にはNi-Pめっき皮膜が認められず、溶湯温度による過熱および母材の大きな変形等によりめっき皮膜が剥離したものであると思われる。一方の試料b)は表面にNi-Pめっき皮膜の残存が見られるが、めっき皮膜の直下からAl-Si共晶組織となっている。鑄込み温度が750°Cでは、金型の温度に関わらず、鑄造後の冷却過程でアルミ合金の溶湯熱により複合化試料の純アルミ母材をすべて熔融する加熱条件となったことが伺える。また、いずれも表面近傍に空孔の存在が認められた。

鑄込み温度700°Cで鑄造した試料c)は、写真の右側から真ん中より少し左側まで複合化試料の純アルミ母材が残存しているのが認められる。それよりさらに左側は、試料a)、試料b)と同様に、純アルミ母材が熔融したものと考える。さらに、同部位の表面にはNi-Pめっき皮膜が残っておらず、熱影響および母材の変形によりめっき皮膜が剥離している。一方、複合化試料の純アルミ母材が残存した領域では表面に

めっき皮膜が残存している。

鑄込み温度650℃で鑄造した試料d)と試料e)は、いずれも複合化試料の純アルミ母材およびNi-Pめっき皮膜ともに残存しており、良好な複合化品質が得られた。金型に見立てた鋼製定盤を予熱せずに室温のまま鑄込んだ試料e)では、複合化試料の純アルミ母材と鑄物の間に空隙が存在する部位が認められる。一方、鋼製定盤を200℃に予熱した試料d)では鑄物表面近傍に空隙らしいものが認められるものの、純アルミ母材とアルミ鑄物との間には空隙等がなく、概ね良好な冶金学的接合状態が得られたと考える。

また、これらの試料について表皮膜のNi-Pめっき皮膜の硬さを計測した結果、鑄込み温度750℃で鑄造した試料a)、試料b)のめっき皮膜が残存する境界付近ではHv900前後の硬さが得られ、700℃以下で鑄造した試料c)、試料d)、試料e)では、それより若干高いHv950程度の硬さが得られた。

いずれも、皮膜硬さがHv900以上となったことから、鑄ぐり時の溶湯熱を利用した無電解Ni-Pめっき皮膜の硬化熱処理が有効であることが分かった。

以上の結果から、本研究の目的であるアルミ鑄物の表面に硬い皮膜を形成する条件として、複合化試料の母材全てを溶融させずに残存させることが重要となることが分かった。

4.3 考察

一般に、AC4Cアルミ合金の鑄込み温度は約720℃で鑄造される。特に、金型鑄造において肉厚が薄い部位があって湯回り不良が心配されるものについては、若干高めの温度で鑄込まれる場合もある。しかし、溶湯保持温度が高いと大気中から溶湯中にガスを取り込み、鑄物にブローホールやピンホールなどのガス欠陥を生じやすくなる。一方、アルミ合金は熱伝導性がよく比熱も小さいので、鑄造後の冷却速度が速くなり、注湯温度が低いと肉薄部に溶湯が回らないなどの鑄造欠陥につながる。

今回の実験において鑄込み温度としては低温限界に近い650℃で鑄込んだ時に良好な接合が得られたことは、鑄ぐりによる複合化に際しては、溶湯温度を低く設定し素早く鑄込む

ことが要求されることを示しており、鑄物の形状によっては湯回り不良、湯境不良などの発生に十分配慮しなければならない。

一般に鑄造品の肉厚は一律ではない。鑄物の肉厚変動により接合やめっき皮膜の加熱処理の品質に影響する熱容量が変化するので、複合化試料の母材と鑄物との接合性やめっき皮膜硬化のための有効熱処理時間は一律にならない。また、鑄造時の鑄物から鑄型あるいは複合化試料への熱移動において、鑄造時の溶湯流速は熱伝達量に大きく影響するので、鑄型内で早期に溶湯が満たされる部位と常に高温の溶湯が流入するセキ近傍とでは溶湯から伝達される熱量が異なる。同一試料の断面組織観察において、複合化試料のアルミ母材が残存する領域と残存しない領域の境界が観察されたのはこのためと考えられる。

したがって、本技法の利用に当たっては、鑄物の形状や鑄造方案も考慮して複合化する部位を検討する設計手法が必要となる。

ここで、本研究で想定される鑄ぐり複合化時の熱の伝わり方について考察する。図12に、鑄ぐり複合化におけるアルミ合金溶湯、鑄型および複合化母材となるNi-Pめっきを施した純アルミ母材を配置したときの溶湯熱量の移動に伴う温度分布の模式図を示す。アルミ溶湯は鑄型に注湯されたあと、この伝熱状態に沿って鑄型へと熱量が移動して凝固、冷却が進行する。

鑄ぐり時の冷却過程において図の右側のアルミ溶湯から左側の鑄型に向かって熱流が生じる。鑄造後、純アルミ母材が溶湯と接する部位で、温度が純Alの溶融温度に達すると、母材表面が溶融してアルミ鑄物と冶金学的に接合する。また、この部位が純Alの溶融温度に達しない場合でも、アルミ溶湯側から純アルミ母材表面にSiが拡散して、その組成の液相線温度に達すれば同じく冶金学的に接合する。

複合化試料の純アルミ母材とアルミ合金鑄物との境界付近では、温度が純Alの融点より低い場合は純アルミ母材に接した溶湯が母材に冷却されAl-Si系合金の共晶凝固温度である577℃となる。この温度を境として、アルミ溶湯側と純アルミ母材側でそれぞれの温度勾配をもつ温度分布となるが、アルミ系材料は熱伝導率が大きいため、鑄物と金型の間に相当の温度差がなければ、この温度勾配はあまり大きくなりません。純アルミ母材とアルミ鑄物が冶金学的に接合されればこの境界における熱伝達係数は小さな値とならないので、純アルミ母材とアルミ鑄物との間にあまり大きな温度差が生じないことになる。

一方、Ni-Pめっき皮膜の熱処理条件は、純アルミ母材側から流入する熱量と鑄型側へ奪われる熱量の差、すなわちNi-Pめっき皮膜層に残留する熱量によって加熱温度および加熱保持時間が決定される。複合化試料のNi-Pめっき表面と金型は機械的に接触しているだけであるから、この境界で

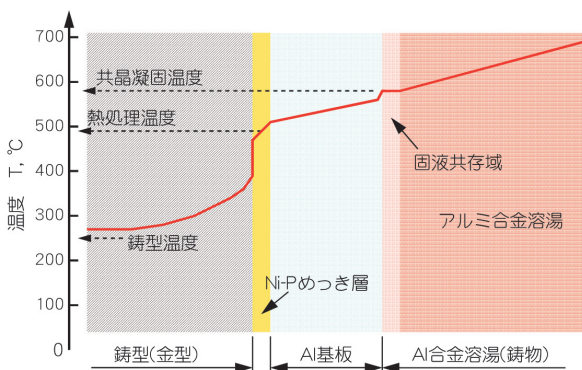


図12 鑄ぐり時の熱の伝達状態 (模式図)

の熱伝達係数は小さくなる。したがって、アルミ溶湯から複合化試料のNi-Pめっき皮膜まではあまり温度差が生じず、鋳物と鋳型（金型）の温度差のほとんどが、めっき皮膜表面と金型の境界で生じるという温度分布になることが想定される。すなわち、溶湯熱を利用したNi-Pめっき皮膜へ硬化熱処理において、Ni-Pめっき皮膜に流入する熱量が金型へ奪われる熱量を大きく上回るため、Ni-Pめっき皮膜の加熱温度は、金型の予熱温度よりもアルミ合金の注湯温度の方が支配的となる。鋳込み温度を750℃とした試料で、金型の温度に関わりなく複合化試料の純アルミ母材が溶融して残存しなかったのは、この理由によるものと考えられる。

さらに、Ni-Pめっき皮膜と金型の熱伝達が良くないとすれば、金型の温度を熱処理に必要な温度になるべく近づけ、溶湯温度を純Alが溶融する温度よりわずかに高い温度で鋳込む条件で最良の接合状態が得られることになる。金型温度を200℃に予熱し、アルミ溶湯を650℃で鋳込んだ試料で最良の複合化品質が得られたのはこの考え方で説明できる。

さらに、溶湯温度と金型の温度差が小さい場合に有利な条件として考えられるのは、複合化基板の変形への影響が小さくなることである。純Alおよびアルミ合金は、比較的熱膨張係数が大きいことが知られている⁵⁾。

鋳ぐるみの際に溶湯と純アルミ母材の間に大きな温度差があると、溶湯の注入によって母材が急激に加熱される。このとき、今回の試験のように複合化試料の周辺が拘束されている条件では、母材が加熱されて膨張すると内側か外側に変形せざるを得なくなる。

これに対して、金型の予熱によって徐々に温度が上昇した場合は、溶湯による加熱とは異なって基板の拘束力に打ち勝って全体が一様に膨張できるため変形は少なくて済む。また、溶湯との温度差も小さい分、変形も小さくなる。金型を200℃で予熱し、650℃で鋳込んだ試料で最も変形が少なかったことは、この考え方で説明できる。

最後に、実験で得られた試料の中で、アルミ鋳物内に空孔が生じた原因として、鋳造時の空気の巻き込み、溶湯内のガスが気化して生じたブローホール、あるいは酸化物等の介在物などが考えられる。いずれも、方案設計あるいは鋳物の溶湯管理という、鋳造の基本的な欠陥対策で防止できるものであり、健全な複合試料を得るためには、温度管理に加えて、溶湯管理も重要である。

5. まとめ

アルミ鋳物の優位性を活かしつつ、さらに部分的に耐摩耗性を付与して従来のアルミ鋳物の機能性向上を図る複合化法として、予めNi-Pめっきを施したアルミニウム基板を鋳型内に設置して、これにアルミ合金溶湯を鋳込む「鋳ぐるみ法」を利用した低コスト複合化技法の可能性について検討した。

Ni-Pめっき皮膜の熱処理による硬化に注目し、特に鋳ぐるみの場合の熱処理パターンが、従来採用されている熱処理パターンと異なることから、加熱温度と保温時間を変えて熱処理した試料のめっき皮膜硬さを計測した結果、鋳ぐるみを想定した高温かつ短時間の加熱保温プロセスでNi-Pめっき皮膜の硬さがHv1,000程度まで硬化できることを確かめた。

また、本プロセスにおいて鋳型と鋳物の間にNi-Pめっきを施した複合化試料を配置するが、Ni-Pめっき皮膜への有効な加熱温度と保温時間を得るためには、鋳型には金型を選択し、350℃程度に予熱して用いるのが効果的であることが分かった。

また、純アルミ母材の片面にNi-Pめっきを施した複合化試料を用いた複合化実験の結果、金型を200℃に予熱し、これに650℃の低温で溶解したアルミ溶湯を鋳込むことで最も良好な接合品質が得られた。

一方、鋳造時に溶湯で急激に加熱されることにより複合化試料の表面に変形が生じる。これはアルミ合金材料の熱膨張に起因すると推定されることから、これを防止するには試料を金型に密着させる等の工夫が必要である。

参考文献

- 1) 阿部芳彦, 片山直樹, 浅野信夫, 中尾英弘; 「無電解ニッケルめっきに関する研究 (第4報)」, 北海道立工業試験場報告 No. 294 (1995.6)
- 2) 阿部芳彦, 片山直樹, 西村智也; 「無電解ニッケルめっきに関する研究 (第5報)」, 北海道立工業試験場報告 No. 296 (1997.6)
- 3) 馬籠隆広, 西本洋道, 山下嗣人; 「クエン酸浴からのNi-P結晶質/非晶質系多皮膜膜の作製及び特性評価」, 神奈川県産学公交流研究発表会要旨集 (2006.10)
- 4) 岡田紘子, 小林靖之, 野呂美智雄, 藤原裕, 松川公洋; 「無電解Ni-P/PTFE複合めっき皮膜の撥水特性に及ぼす熱処理の影響」表面技術協会講演大会講演要旨集 (2008.2)
- 5) 「金属データブック」日本金属学会編, 丸善 (1987.10)
- 6) 戸羽篤也, 安田星季, 和田晴司, 清水一道, 桃野正, 津村治, 沖野美佐男; 「粉末R P成形体を利用した鋳物づくり」, 日本鋳造工学会第149回全国講演大会講演概要集 (2006.10)
- 7) 戸羽篤也; 「粉末R P鋳型による超迅速鋳物づくり技術の開発」, 外部資金活用研究 (平成19年度シーズ発掘試験研究) 報告書 (2008.3)