

氏名・(本籍)	カガタ 川ヒト 永田 教人 (兵庫県)
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	甲第工41号
学位授与の日付	平成27年9月10日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当(課程博士)
学位論文題目	アルミニウム合金の光輝性と機械的性質に及ぼす 無電解Ni-Pめっきの影響に関する研究
論文審査委員	主査 教授 金谷 輝人 副査 教授 清水 一郎 教授 蜂谷 和明 教授 中川 恵友 教授 福原 実 教授 日野 実 (広島工業大学)

論文内容の要旨

申請者氏名 永田教人

論文題目

アルミニウム合金の光輝性と機械的性質に及ぼす 無電解 Ni-P めっきの影響に関する研究

自動車等を中心とした輸送機器産業では、CO₂排出量削減ならびに低燃費化対策として部品の一層の軽量化に迫られている。これに対応するため、これまで多用されてきた鉄鋼材料に代わって軽量で加工性、耐食性に優れたアルミニウム合金の適用が拡大している。また、自動車等の車載用部材には、車両が使用される期間での信頼性の確保という極めて厳しい要求がある。アルミニウム合金の特徴として良好な耐食性があるが、長期間での信頼性を確保するためには、めっき処理をはじめとする表面処理が必要不可欠である。

本論文は、軽量化に最も重要な材料の一つであるアルミニウム合金へのめっき処理等の表面処理技術の確立を目的とし、めっき処理等で得られる皮膜構造の基礎的知見ならびに熱処理後の表面処理がこの合金の光輝性や機械的性質等に及ぼす影響について詳細な検討を行った結果をまとめたものである。

第1章では、自動車産業を中心とする輸送機器において地球環境改善に向けたCO₂排出量削減が重要な課題であることから、鉄鋼材料からアルミニウム合金材料への軽量化による燃費向上ならびにアルミニウム合金の用途別需要と軽量化効果等について述べた。次に、アルミニウム鑄造合金への光輝性付与に特化するために用いためっき処理等について概説している。さらに、第2章以降で実施した研究内容の概略を述べた。

第2章では、アルミニウム鑄造合金 AC4CH-T6 材への光輝性付与におよぼす陽極酸化処理の影響について述べた後、この合金に対する表面処理条件や熱処理条件ならびに添加元素の影響について検討した結果を述べた。更に、各処理材の光沢度を求めることによって光輝性に及ぼす各種表面処理の影響を検討した結果、この合金の光輝性に対して添加元素が重要な影響をおよぼすことを明らかにした。

第3章では、新たに開発したアルミニウム鑄造合金 (Al-Mg-Zn 系) へのめっき処理による皮膜の密着性および光輝性について、熱処理、電解研磨処理および下地亜鉛置換処理の影響を検討した結果、この合金に対するめっき皮膜の密着性は、時効処理で生じる微細な T 相 (Al₂Mg₃Zn₃) が下地亜鉛置換処理によって脱落し、表面に微細な凹部が形成され、そのアンカー効果によって向上することを示した。また、Si を含むアルミニウム鑄造合金へのめっき処理による光輝性の低下は、機械研磨で生じる共晶 Si 相のうねりおよび化学的に安定な Si 相の凸部形成が主因であることを示した。なお、このうねりによる光の散乱防止には、基板表面の硬度均一化が有効であることを述べ、その原因を明らかにした。さらに、アルミニウム鑄造合金へのめっき処理による光輝性の低下因子を、電界放射型電子プローブ

マイクロアナライザー(FE-EPMA)、透過電子顕微鏡(TEM)、光学干渉式表面形状観察装置、電界放射型走査電子顕微鏡(FE-SEM)による観察結果を基に考察した結果を述べた。

第4章では、アルミニウム鑄造合金(Al-Si系)の機械的性質に及ぼす無電解Ni-Pめっき処理の影響について考察するために、炉冷処理と時効処理を施した両熱処理材について硬さならびに引張り特性を求めるとともに、繰返し引張り疲労試験による疲労強度の調査も行った。更に、炉冷処理材においてめっき処理後に疲労強度が低下するのは、亜鉛置換処理およびめっき処理時に発生する水素ガスの一部が炉冷材中に入り込み、特に高サイクル負荷中に試料表面の μm サイズ析出物とめっき皮膜の界面付近に集積し、微視き裂発生に著しい影響を及ぼすことを明らかにした。

第5章では、析出挙動が第4章のアルミニウム鑄造合金(Al-Si系)に類似し、 μm サイズ析出物が生成されるアルミニウム鑄造合金(Al-Ge系)について、熱処理後のめっき処理による機械的性質の変化ならびに昇温時の水素放出量を測定した。また、水素吸蔵量の評価は、ガスクロマトグラフィー型の昇温水素脱離分析装置を使用し、無電解Ni-Pめっきの有無による試料表面に吸蔵された水素の放出挙動を検討した。また、この水素が疲労試験時に炉冷処理材の表面付近に存在する粗大なGe析出物と母相ならびに約 $30\mu\text{m}$ 厚さの緻密な非晶質Ni-Pめっき皮膜界面に集まり、微視き裂の発生を促すことにより破断を促進すると考察した。更に、これらの合金系とは異なる析出挙動ならびに結晶構造を有する粗大な μm サイズ析出物が生成されるAl-Cu合金についても同様な調査を行った結果、上述の解釈の一般性が成立することを明らかにした。

第6章では、本研究で得た成果ならびに諸結果を総括すると同時に、今後の実用化への展望を述べた。

本論文では、熱処理および無電解Ni-Pめっきを施したアルミニウム合金の表面特性、すなわち防食性・耐摩耗性・意匠性等や疲労強度等の機械的特性に及ぼす水素の影響等に関する研究で得られた成果を示した。しかしながら、金属原子の拡散機構および添加元素と熱処理がめっき処理したアルミニウム合金の表面ならびに結晶粒界近傍組織や疲労強度等に及ぼす影響については、幾つかの推測および推論を含んでいるため、これらの一層の解明は今後の検討課題である。

発表論文：

1. 論文(査読有)

- [1] 村上浩二, 日野実, 永田教人, 金築秀樹, 河合定夫, 金谷輝人, “輸送機器ホイール向け鑄造用Al-Mg-Zn系合金上の亜鉛置換皮膜形成と無電解Ni-Pめっき皮膜の密着性”, 軽金属, 62巻, 5号(2012) 219-222.
- [2] 日野実, 村上浩二, 永田教人, 井端千恵, 金築秀樹, 河合定夫, “Al-Mg-Zn合金鑄物の光沢度に及ぼす表面処理の影響”, 鑄造工学, 84巻, 8号(2012) 438-443.
- [3] 日野実, 村上浩二, 永田教人, 金築秀樹, 河合定夫, 金谷輝人, “Al-Mg-Zn合金及びAC4CH合金鑄物への無電解Ni-Pめっきに対する金属組織の影響”, 鑄造工学, 85巻, 10号(2013) 677-682.
- [4] 永田教人, 金谷輝人, 平岡隼人, 福原実, 村上浩二, 日野実: “Al-1.2%Si合金の機械的性質に及ぼす無電解ニッケルりんめっきの影響”, 日本金属学会誌, 77巻, 12号(2013) 575-579.
- [5] 村上浩二, 日野実, 永田教人, 金谷輝人: “アルミニウム合金への亜鉛置換・無電解ニッケルりんめっきに対する合金元素と水素ガス発生の影響”, 日本金属学会誌, 77巻, 12号(2013) 599-603.
- [6] M.Hino, K.Murakami, N.Nagata, C.Ibata, H.Kanetsuki and S.Kawai: “Effects of Surface Treatment on Glossiness of Al-Mg-Zn Alloy Casting”, Materials Transactions, Vol. 54 No. 12 (2013)

2238-2244.

[7] N. Nagata, M. Hino, K. Murakami, H. Kanetsuki, S. Kawai, T. Kanadani “Plating on Developed Al-Mg-Zn Alloy Casting and its Glossiness” , Materials Science Forum, Vol.783-786. (2014) 216-221.

[8] N. Nagata, T. Kanadani, M. Fukuhara, M. Hino, K. Murakami “Effect of Electroless Ni-P Plating on the Fatigue Strength of Dilute Al-Si Alloys” , Materials Science Forum, Vol.794-796 (2014) 290-295.

[9] 永田教人, 金谷輝人, 堀川敬太郎, 村上浩二, 日野実: “無電解ニッケル-りんめっきを施した Al-2%Cu 及び Al-2%Zn 合金の疲労強度に及ぼす表面組織と水素の影響”, 日本金属学会誌, 79 巻, 3 号 (2015) 142-145.

[10] 永田教人, 金谷輝人, 中川恵友, 福原実, 堀川敬太郎, 村上浩二, 日野実: “Al-4%Ge 合金の機械的性質に及ぼす無電解ニッケル-りんめっきの影響”, 日本金属学会誌, 79 巻, 3 号 (2015) 146-150.

[11] 永田教人, 金谷輝人, 中川恵友, 福原実, 堀川敬太郎, 村上浩二, 日野実: “無電解ニッケル-りんめっき処理した Al-1.2%Si 合金の疲労強度に及ぼす表面組織と水素の影響”, 日本金属学会誌, 79 巻, 3 号 (2015) 151-155.

[12] K. Murakami, M. Hino, N. Nagata and T. Kanadani: “Effect of Alloying Element and Generation of Hydrogen Gas on Zincate Treatment and Electroless Nickel-Phosphorus Plating for Aluminum Alloys” , Materials Transactions, Vol.56 No.5 (2015) 691-695.

2. 解説 (査読無)

[1] 日野実, 永田教人, 村上浩二, 水戸岡豊, 金谷輝人, “アルミ合金とプラスチックとの接合強度を向上する表面改質技術” カロス出版 『アルトピア』 Vol. 45 No. 4 (2015) 5-10.

3. 国際会議発表

[1] N. Nagata, M. Hino, K. Murakami, H. Kanetsuki, S. Kawai, T. Kanadani “Plating on Developed Al-Mg-Zn Alloy Casting and its Glossiness” , THERMEC 2013, (2013. 12. 05), Las Vegas

[2] N. Nagata, T. Kanadani, M. Fukuhara, M. Hino, K. Murakami “Effect of Electroless Ni-P Plating on the Fatigue Strength of Dilute Al-Si Alloys” , ICAA 2014, (2014. 06. 21), Trondheim

4. 学協会口頭発表ほか

[1] 永田教人, 井端千恵, 河合定夫, 金築秀樹, 日野実, 村上浩二, “アルミニウム casting 材の光輝性に及ぼす表面処理の影響”, 表面技術協会関西支部第 12 回関西技術フォーラム, (2010. 12. 03) (於: 京都大学)

[2] 永田教人, 井端千恵, 河合定夫, 金築秀樹, 日野実, 村上浩二, “アルミニウム casting 材の光輝性に及ぼす表面処理の影響”, 表面技術協会関西支部第 13 回関西技術フォーラム, (2011. 11. 30) (於: キャンパスプラザ京都)

[3] 永田教人, 井端千恵, 金築秀樹, 河合定夫, 村上浩二, 日野実, 金谷輝人, “めっきに適した新規 casting 用アルミニウム合金の開発”, 表面技術協会関西支部第 14 回関西技術フォーラム (2012. 11. 30) (於: 京都大学) (優秀講演賞受賞)

[4] 永田教人, 山西琢磨, 井端千恵, 金谷輝人, “アルミニウム合金における無電解 Ni-P めっき皮膜の密着性に及ぼす亜鉛置換液の影響”, 日本材料科学会四国支部第 22 回講演大会, (2013. 06. 15) (於: リーガルロイヤルホテル新居浜)

- [5] 永田教人, 井端千恵, 河合定夫, 金築秀樹, 日野実, 村上浩二, 金谷輝人, “めっきに適した鋳造用 Al-Mg-Zn 合金の開発”, 軽金属学会第 5 回中国四国支部講演大会, (2013. 07. 06) (於: 香川大学)
- [6] 永田教人, 井端千恵, 河合定夫, 金築秀樹, 日野実, 村上浩二, 金谷輝人, “サーテック永田での産学官共同研究への取り組み”, 表面技術協会関西支部 2013 年関西表面技術シンポジウム, (2013. 07. 24) (於: 大阪鍍金会館)
- [7] 永田教人, 日野実, 村上浩二, 井端千恵, 金築秀樹, 河合定夫, 金谷輝人, “鋳造用アルミニウム合金の光沢度に及ぼすめっき処理の影響”, 日本金属学会・日本鉄鋼協会中国四国支部金属第 53 回・鉄鋼第 56 回中国四国支部講演大会, (2013. 08. 19) (於: 愛媛大学)
- [8] 永田教人, 日野実, 村上浩二, 井端千恵, 河合定夫, 金築秀樹, 金谷輝人, “アルミニウム合金への表面処理が光輝性に及ぼす影響”, 第 15 回関西表面技術フォーラム(2013. 11. 29) (於: 岡山大学)
- [9] 永田教人, 金谷輝人, 村上浩二, 日野実, 金築秀樹, 河合定夫, “アルミニウム合金への表面処理が光輝性に及ぼす影響”, 日本金属学会・日本鉄鋼協会 中国四国支部 第 28 回「若手フォーラム」, (2014. 02. 21) (岡山国際交流センター)
- [10] 永田教人, 金谷輝人, 山西琢磨, 井端千恵, 村上浩二, 日野実, “アルミニウム合金における無電解 Ni-P めっき皮膜の密着性に及ぼす亜鉛置換液の影響”, 軽金属学会第 126 回春期講演大会, (2014. 05. 18) (於: 広島大学)
- [11] 永田教人, 井端千恵, 金谷輝人, 福原実, 平岡隼人, 村上浩二, 日野実, “Al-1.2%Si 合金の機械的性質に及ぼす無電解ニッケル-リンめっきの影響”, 金属第 54 回・鉄鋼第 57 回中国四国支部講演大会, (2014. 08. 21) (於: 徳島大学)
- [12] 永田教人, 井端千恵, 金谷輝人, 村上浩二, 日野実, “無電解 Ni-P めっきした Al-1.2%Si 合金材の機械的性質”, 表面技術協会関西支部第 16 回関西技術フォーラム, (2014. 11. 28) (於: 甲南大学)
- [13] 永田教人, 金谷輝人, 福原実, 中川恵友, 堀川敬太郎, 村上浩二, 日野実, “Al-4%Ge 合金の機械的性質に及ぼす無電解 Ni-P めっきの影響”, 日本金属学会 2015 春期講演大会, (2015. 03. 19) (於: 東京大学)

以上の他 6 件

5. その他発表

- [1] 永田教人, 金谷輝人, 山西琢磨, 井端千恵, 村上浩二, “アルミニウム鋳造材の光輝性に及ぼす表面処理の影響”, OUS フォーラム 2013, (2013. 11. 22) (於: 岡山プラザホテル)
- [2] 永田教人, 金谷輝人, 山西琢磨, 井端千恵, 村上浩二, 日野実, “車載用アルミニウム合金-エンジニアリングプラスチック接合部材の開発”, OUS フォーラム 2014, (2014. 11. 21) (於: 岡山プラザホテル) (奨励賞受賞)

審査結果の要旨

博士論文：「アルミニウム合金の光輝性と機械的性質に及ぼす
無電解 Ni-P めっきの影響に関する研究」

永田教人君より提出された上記博士論文について、平成 27 年 5 月 29 日に学位論文公聴会、最終試験および最終審査委員会を実施した。学位授与の方針に従って試験を行った結果、永田教人君の学位論文が専門分野の高度な知識を十分に学習した上でまとめられていること、ならびに先行研究の調査を含む関連論文等の情報収集が充分に行われていることを確認した。

本論文は、序論と総括を含む 6 つの章から構成される。第 2 章の「アルミニウム casting 合金への光輝性付与に及ぼす各種表面処理の影響」では、この合金に対する表面処理条件や熱処理条件ならびに添加元素の影響等について検討し、光輝性に対して添加元素が重要な影響をおよぼすことを明らかにした。第 3 章の「アルミニウム casting 合金への光輝性付与に及ぼす無電解 Ni-P めっきの影響」では、新たに開発したアルミニウム casting 合金 (Al-Mg-Zn 系) におけるめっき皮膜密着性や光輝性の向上に有用な因子を明らかにした。第 4 章の「Al-Si 系合金の機械的性質に及ぼす無電解 Ni-P めっきの影響」では、この合金にめっき処理した際に発生する水素ガスの一部が合金中に入り込み、試料表面の μm サイズ析出物とめっき皮膜の界面付近に集積し、微視き裂発生に著しい影響を及ぼすことを示した。第 5 章の「無電解 Ni-P めっき処理した Al-Ge および Al-Cu 合金の疲労強度に及ぼす表面組織と水素の影響」では、4 章で導かれた解釈の一般性が成立することを明らかにした。

本研究の成果は、機械・金属工学分野の問題に関連する優れた研究成果を含んでおり、これらの分野の研究発展ならびに技術開発に資する有益な情報を多く含んでいる。また、研究成果は学術雑誌に公表されている。これらのことを総合的に審査した結果、本論文は博士学位論文として合格であると認める。

既に提出済みの研究業績リストに見られるように、永田教人君は掲載済みの査読付き論文 12 編（筆頭著者論文 6 編）に加えて 2 件の国際会議発表や 21 件の国内学協会講演等を行っている。また、最優秀講演賞や奨励賞なども受賞している。

提出済みの学位論文に含まれる研究成果と一連の研究の立案・計画・実施を行ってきたことを合わせて審査した結果、永田教人君は自立した研究者として十分な素養を備えていると認める。

以上より、提出された論文は博士論文として受理するにふさわしいものであり、永田教人君は最終試験に合格と判断し、博士（工学）の学位を受ける資格があると認める。