

| | |
|----------|---|
| 氏名 (本籍) | 田尻 明子 (大阪府) |
| 学位の種類 | 博士 (工学) |
| 学位授与番号 | 甲第508号 |
| 学位授与日付 | 平成28年9月30日 |
| 専攻 | 生産開発システム工学専攻 |
| 学位論文題目 | 鋳造アルミニウム合金 AC4CH の疲労挙動に及ぼす鋳造欠陥の影響と その疲労強度向上のための組織改質に関する研究 (Effect of casting defect on fatigue behavior in cast aluminum alloy AC4CH and improvement of fatigue strength by microstructural modification) |
| 学位論文審査委員 | (主査) 教授 山下 実 (副査) 教授 植松 美彦 准教授 柿内 利文 |

論文内容の要旨

鋳造アルミニウム (Al) 合金の AC4CH は、優れた強度特性を有する構造用合金である。鋳造品であるが故に、複雑形状を有する部材についてもニアネットシェイプ成形が容易であるため、様々な機械部品に用いられている。さらに近年、運搬用ロボットアームのように 1m を超える大型構造物の作製にも AC4CH 合金は用いられている。しかし、鋳造品は粗大組織や鑄巣など、金属組織的な鋳造欠陥を内包することが常であり、そのような鋳造欠陥が疲労破壊起点となることが知られている。例えば高硬度鋼などについては、介在物のような材料的欠陥を起点として疲労破壊をする場合、介在物寸法と材料の硬さによって経験的に疲労限度が予測可能である事が村上等によって報告されている。一方 Al 合金は鋼よりも弾性率が小さく、停留き裂の有無なども従来の鋼とは挙動が異なるため、高強度鋼用に提案された経験則は、そのまま Al 合金には適用できない。特にロボットアームのような大型構造物に対して今後 AC4CH 合金を適用していく場合、大型であるために部位によって冷却速度が大きく異なるため、鋳造欠陥の分布や寸法だけでなく、硬さ分布も構造物の位置によって異なる。そのような場合、部位による正確な硬さや鋳造欠陥寸法を取得することで、機械構造体の信頼性確保ができなければならないが、前述のように鋳造欠陥の寸法や硬さから、疲労限度を経験的に予測できるような式が存在しないことが問題となっている。さらに、もし疲労破壊起点となる鋳造欠陥を除去することができれば、AC4CH 合金の疲労強度特性を飛躍的に向上することが可能である。こうした背景から、本論文では、鋳造欠陥寸法や硬さの異なる AC4CH の疲労試験を実施し、疲労限度を予測する経験式の構築について検討した。さらに、強塑性加工によって鋳造材から鋳造欠陥を除去し、材料を高疲労強度化することを試みた。

第1章の緒論では、「疲労現象解明の重要性」、「鋳造 Al 合金の現状と課題」、「大型構造物の疲労強度に対する鋳造欠陥寸法の定量評価」、「鋳造欠陥除去による疲労強度向上の可能性や背景」、「本研究の目的および構成」について述べた。

第2章では、実際の大型 AC4CH 鋳造材から小型疲労試験片を採取して、回転曲げ疲労試験を実施した。その際、冷却速度が異なると思われる複数の部位から試料を採取した。欠陥寸法については、複数の任意断面で最大欠陥寸法を測定し、極値統計によって欠陥寸法を予測した。その結果、試験片の採取位置によって、鋳造欠陥寸法と硬さ、さらにデンドライトアームスペーシング (DAS) のような微視組織構造も異なることが判明した。また、硬さと鋳造欠陥寸法から、疲労限度を予測する簡便な経験式を提案した。予測に用いる欠陥寸法を測定する際、複数の欠陥が集中して存在する場合、村上等の提案した手法では欠陥寸法が過大に見積もられることが判明した。本論文では、個々の欠陥を順次結合し、結合した欠陥の寸法を合理的に判定することで過大な見積もりを避け、実際の疲労限度とより近い結果を与えられることを示した。このように、簡便な経験式を提案するのみでなく、複数の欠陥が存在する場合の欠陥寸法推定について、より合理的な手法の提案も行った。

第3章では、鋳造材に対し、プローブとショルダーからなる摩擦攪拌ツールを挿入し、ツールの回転と水平移動に伴う強塑性加工によって鋳造欠陥を除去する試みを行った。この手法を摩擦攪拌改質 (FSP) と称するが、本章ではツールの水平移動速度は同一とし、ツール回転速度が 500rpm および 1000rpm と異なる2種類を試行した。この場合、回転速度が早い 1000rpm の方がより強い塑性流動が加わることとなる。微視組織観察の結果、ツールの回転速度によらず共晶 Si のデンドライト組織が粉碎されて組織が均一化し、鋳造欠陥も除去されることが確認された。鋳造材と FSP 材を用いて平面曲げの疲労試験を行ったところ、鋳造欠陥が除去されることによって、疲労き裂発生機構が欠陥支配型から繰返しすべり支配型に遷移するため疲労強度は著しく改善した。し

かし、改善の程度は FSP 条件に依存しており、塑性流動が弱い 500rpm の場合の方が、疲労強度の向上が顕著であった。EBSD による結晶方位解析の結果、塑性流動が強い 1000rpm の方がより強い集合組織が形成されて、微小疲労き裂進展に強い影響を与えることが判明した。その結果、微小疲労き裂成長速度は 1000rpm の方が高速となり、成長速度が低速な 500rpm の方が疲労強度の向上が顕著となることを明らかにした。

第 4 章の結論では、第 2 章と第 3 章の結果を総括するとともに、今後の課題および本研究で得られた成果の工学的有用性について述べた。

論文審査結果の要旨

本論文は、鋳造 Al 合金 AC4CH の疲労限度予測式の提案と、強塑性加工による鋳巣の除去およびそれに伴う疲労強度改善に関するものである。軽量化が重要な機械構造物では、今後 AC4CH のような構造用鋳造 Al 合金を幅広く利用していく必要があり、その長期的な信頼性確保の観点から、合理的に耐疲労設計を行うことが求められている。しかしながら、AC4CH は鋳造欠陥支配型の疲労き裂発生が起こることは知られているものの、疲労限度の予測式が確立されていないことが工学的な問題である。そこで本論文の第 2 章では、実際の大型鋳造構造体において、冷却速度の異なる部位から複数の試験体を採用するとともに、異なる冷却速度をシミュレートした鋳造条件で試験体を作製し、それぞれについて疲労試験を実施し、疲労限度予測を試みている。ここで疲労限度を予測するには、各試験体に含まれる鋳造欠陥の寸法を正確に予測することが必要不可欠であるが、本論文では極値統計を用いて合理的に最大寸法を予測しているとともに、複数の鋳造欠陥が集合している場合について、集合欠陥の寸法測定手順を独自の観点から提案している。さらに、見積もられた最大欠陥寸法と材料硬さから、耐疲労設計の重要な指針となる疲労限度を予測する経験式を提案した。提案した予測式が適用可能な鋳造条件についても言及している。このような経験式は、実際の機械構造部における簡便な耐疲労設計に必要不可欠であり、工学的な重要性が高いと判断できる。

上記のように第 2 章では、AC4CH の疲労限度予測式の提案を行っている。一方で、全ての試験片における疲労破面観察から、従来の報告にあるように、同材では疲労き裂が鋳造欠陥から発生することを示している。すなわち、き裂発生起点となる鋳造欠陥を除去できれば、AC4CH の疲労限度の向上が可能である。そのような考えに基づき、第 3 章では、摩擦攪拌改質 (FSP) という手法により鋳造欠陥を除去することを試みている。その結果、組織観察を通して FSP によって有効に鋳造欠陥が除去できることを明らかにし、実際に疲労強度も向上すること示した。しかし、FSP は強塑性変形を伴う改質手法であるため、複雑な集合組織を形成する可能性がある。そこで、FSP の施工条件 (ツール回転数) を変化させることで、強塑性変形の程度の異なる試料を準備し、疲労強度に及ぼす影響について議論している。EBSD による結晶方位解析によれば、より強い強塑性変形が加わった場合に、集合組織の強度も高くなることを示し、また、集合組織が疲労き裂進展経路と疲労き裂進展抵抗に強い影響を与えることを報告している。このように本章では、FSP によって鋳造欠陥を除去し、疲労強度を向上できることを示したのみでなく、同じ鋳造欠陥を除去する場合でも、塑性変形の程度が小さい条件を選択すれば、より効率的な疲労強度向上が可能である事を理論的に明らかにしており、工学的な重要性が高い。

以上のように、本論文は新たな知見を見出しており、優れた工学的な有用性を持つ点でも評価できることから、学位審査委員会は、この論文を学位論文に値するものと判断した。

最終試験結果の要旨

審査委員会は、上記のように本論文が学位論文として十分な内容と価値ある知見を含むこと、申請者が専門の分野で学位授与にふさわしい専門知識と語学力を有することを確認し、最終試験に合格と判定した。

1. Fatigue limit prediction of large scale cast aluminum alloy A356, A. Tajiri, T. Nozaki, Y. Uematsu, T. Kakiuchi, M. Nakajima, Y. Nakamura, H. Tanaka, *Procedia Materials Science*, Vol.3, pp.924-929 (2014).
2. Effect of friction stir processing conditions on fatigue behavior and texture development in A356-T6 cast aluminum alloy, A. Tajiri, Y. Uematsu, T. Kakiuchi, Y. Tozaki, Y. Suzuki, A. Afrinaldi, *International Journal of Fatigue*, Vol.80, pp.192-202 (2015).
3. Fatigue crack paths and properties in A356-T6 aluminum alloy microstructurally modified by friction stir processing under different conditions, A. Tajiri, Y. Uematsu, T. Kakiuchi, Y. Suzuki, *Frattura ed Integrità Strutturale (Fracture and Structural Integrity)*, Vol.34, pp.393-400 (2015).