

[14]

|            |  |
|------------|--|
| 氏名         | ふやま のぶゆき<br>府山 伸行                        |
| 博士の専攻分野の名称 | 博士（工学）                                   |
| 学位記番号      | 博第 532 号                                 |
| 学位授与の日付    | 2022 年 9 月 16 日                          |
| 学位授与の要件    | 学位規則第 4 条第 2 項該当                         |
| 学位論文題目     | 軽金属基複合材料のエンジン部品適用に向けた研究                  |
| 論文審査委員     | 主査 教授 西本 明生<br>副査 教授 星山 康洋<br>副査 教授 丸山 徹 |

## 論文内容の要旨

### 《概要》

本論文では、軽金属の物性を効果的に向上させる可能性を持つ複合強化技術を対象に、中小企業でも比較的適用しやすい液相プロセスにて耐摩耗性や耐熱性を高めたエンジン部品の実現を目指している。セラミック系繊維および金属間化合物系繊維強化材によるそれぞれの複合強化技術について、製法・設計の最適化や機械的性質向上の観点から、モデル実験、構成方程式などで理論構築を行い、2 つのエンジン部品製造を通じて有効性を検証することを目的とした。本研究成果により高強度軽量部品の効率的な設計・製造が可能となり、地域産業における中小企業の基盤技術強化に繋がることを期待される。

### 《各章の要旨》

第 1 章では、環境問題や軽量化の要望を受けた複合強化技術の多様性と高度化に向け、従来の複合強化技術の技術要素と課題を整理している。セラミック系繊維および金属間化合物系繊維強化材によるそれぞれの複合強化技術について、製法・設計の最適化や機械的性質向上の観点から、理論構築を行う研究指針を示すことで、本研究の意義と目的を明確化している。

第 2 章では、耐摩耗摺動特性が期待されるセラミック系強化材を使用した軽金属基複合材料の製法のうち液相法での課題解決のため、①溶湯攪拌法の水モデル実験および②溶湯浸透法のガス圧力モデル実験を通じて空隙率や分散性に関して基盤研究を行った。

①溶湯攪拌法のうち固液共存状態の(コンポキャスト)を可視化した水モデル実験により、半熔融状態の見かけの粘性に及ぼす攪拌条件の影響および強化材の投入方法について評価した。さらに実際にセラミック系強化材としてホウ酸アルミニウム粒子およびウイスカを、マトリックスとして AZ91D マグネシウム合金を使用し、コンポキャストした複合材料を作製し、その作製条件と組織の

関係を調査した。水中における可視化モデル実験をもとに、コンポキャスト時のガス欠陥の抑制や、強化材体積率と固相率の関係性をについて分散性を指標に構築した。固相率 20%まではみかけ上完全液体(0%固相率)と同じように流動することから、強化材体積率 0~20%では強化材粒子は同じ分散挙動を示す一方、33%ではマトリックスの対流が低減したために、ブレード付近においても強化材が均一に分散するなど十分な粘性であることを見出し、最適なコンポキャスト条件を確認した。このモデル実験結果から実铸造を行い、強化材体積率 10%、固相率は約 30 vol% (853 K) で作製することにより、マトリックスの対流が低減され、ブレード付近においても強化材を均一分散させることができた。また、強化材として粒子よりもウイスカ形態を用いた場合、見かけの粘性がさらに上昇することで初晶の分断効果が増すことも明らかにしている。

②高圧浸透と同等の強度特性を有する、溶湯浸透法による低圧での浸透条件確立を目的に、一般的なセラミック繊維 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) で強化した AC8A アルミニウム合金基複合材料を作製し、浸透圧力による空隙(気孔)形成状態や引張強度への影響を調査した。ガス加圧による溶湯浸透モデル実験により、濡れにくいとされる  $\text{Al}_2\text{O}_3$  繊維間に確認される数  $\mu\text{m}$  の気孔の面積率と浸透圧力の関係について高温強度特性を指標に構築した。目標の気孔面積率(1%以下)と高温強度(高圧 50 MPa と同等)が得られるガス圧力は 1.3 MPa であり、これ以上では飽和する関係を見出し、最小の低圧浸透条件を確認した。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  繊維強化複合材の引張強さは、室温において浸透圧力すなわち気孔率の影響が大きく、高圧 50 MPa 材と比べ低圧 0.8 MPa 材は 40%程度低下するものの、高温域(503 K 以上)での引張強さの差は縮小した。これは高温でのマトリックスの延性向上に伴う気孔に対する感受性の低下と推定されている。

第 3 章では、セラミック系強化材である  $\text{Al}_2\text{O}_3$  繊維で強化したアルミニウム合金基複合材料に関し、機械的特性のうち DLC コーティングによるさらなるトライボロジー特性の向上を目指した基礎研究を行っている。積層数の異なる積層 DLC 膜を成膜することにより、コーティングの亀裂や剥離を引き起こす圧縮残留応力の低減を図るとともに、基材中の強化材体積率との関係性も調査した。積層 DLC 膜のナノインデンテーション試験の結果、積層数が 2 層から 4 層に増加しても硬さに違いは見られなかったが、ヤング率は減少していた。よって積層回数を増加させることで積層 DLC 膜の残留応力が減少し、膜のヤング率を調整できること明らかにできた。また、硬さとヤング率から表される 3 つの指標、弾性ひずみ限界 ( $H/E$ )、塑性変形に対する抵抗力 ( $H^3/E^2$ ) および破壊に対する抵抗力 ( $H^2/E$ ) は、いずれも 2 層より 4 層 DLC 膜の条件が高くなる。つまり膜の耐摩耗性、耐久性ともに 4 層 DLC 膜の方が 2 層 DLC 膜よりも優れていること、破壊に対する抵抗力 (Irwin Orowan-Griffith ケース) などで理論構築できている。さらに、平面往復摩擦摩耗試験の結果、膜の剥離に至る臨界回数、基材の強化材体積率の増加や DLC 積層数の増加とともに改善することがわかった。強化材体積率による改善は、基材全体の硬さやヤング率の向上に起因し、DLC 積層数による改善は、硬さとヤング率で表される 3 つの指標で整理できることがわかった。

第 4 章では、高温域での機械的性質向上に大きく関与する金属間化合物系繊維強化材の反応性を制御する基盤研究を行っている。金属系強化材はセラミック系強化材と比較し、熱処理時の界面反応による強度劣化が問題視されている。FeCrSi 繊維強化軽金属複合材料の as-cast 時の界面反応性や、溶体化処理温度を変化させたときの界面反応層の形成状態を調べ、高温強度特性への影響を評価している。アルミニウム合金およびマグネシウム合金をマトリックスとする FeCrSi

繊維/軽金属複合材料の引張強さは、試験温度の上昇とともに繊維による強化効率が向上した。線形複合則および Baxter 理論式を用い、室温では界面せん断強度の低い理論値に近似し、高温では界面せん断強度の高い理論値に近似する傾向を明らかにした。高温域では繊維がマトリックスから径方向に圧縮応力を受け、みかけの界面せん断強度が向上したことで強化効率が高くなることを理論構築できている。

第 5 章では、高温強度が期待される金属間化合物繊維系強化材を使用した FeCrSi 金属繊維強化 AC8A アルミニウム合金複合材料の最適設計に必要な強度予測に関する基礎研究を行っている。高温用構造材料として使用温度領域での強度予測は部品設計で重要な課題である。高温変形挙動の構成方程式算出は、これまでに実用的な鋳物用共晶 Al-Si 系を母相としたアルミニウム合金基複合材料データが少なく、かつ強化相が粒子から連続繊維までの考慮は困難であった。高温圧縮試験を行うことにより、高温強度と変形機構を明らかにし、高温変形の構成方程式の導出を試みている。FeCrSi 繊維の体積分率の増加により、AC8A/FeCrSi<sub>f</sub> の流動応力は増加した。流動応力  $\sigma$  とひずみ速度の間には線形関係は  $\varepsilon^{-1/5}$  (応力指数  $n=5$ ) により良い直線近似が得られ、しきい応力を算出することができた。加えて、しきい応力も FeCrSi 繊維の体積分率の増加により向上が見られた。AC8A/FeCrSi<sub>f</sub> の高温変形の活性化エネルギーは 143~159 kJ/mol であり、純アルミニウムの格子拡散の活性化エネルギーである 142 kJ/mol と良い一致を示したことから、AC8A/FeCrSi<sub>f</sub> の高温変形は母相の格子拡散律速であると考えられる。FeCrSi 繊維体積分率の増加によるしきい応力の上昇、格子拡散と転位芯拡散といった変形機構の違いおよび亜結晶粒界のピン止めとして働く FeCrSi 繊維間隔を考慮することにより、AC8A/FeCrSi<sub>f</sub> の高温変形の構成方程式【20 vol% :  $\varepsilon=0.9 \times 10^5 (G_b/kT) (\sigma-\sigma_0/G)^5 D_L$ 】を算出でき、この構成方程式を用いることで、AC8A/FeCrSi<sub>f</sub> のひずみ速度依存性および温度依存性を有した塑性変形挙動の理論構築が初めて可能となった。加えて、粒子間隔  $\lambda$  も考慮したマイクロ組織から解析結果と構成方程式を用いた数値解析結果は良く一致しており、信頼性も保証している。得られた共晶合金ベース複合材料の構成方程式は、アルミニウム合金複合材料の高温強度向上のために、母相中の分散粒子もしくは複合材の粒子間隔を小さくすればよいという設計指針を数式化できている。高温強度の概算が可能となるため、自動車部品用の高温用構造材料として、共晶 Al-Si 合金基複合材料を使用する際に活用できると考えられる。

第 6 章では、各強化材による 2 つの複合材料に関して、製法・設計の最適化や機械的性質向上の観点から研究成果について実製品製造を通じて有効性を検証している。① Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 繊維強化 AC8A アルミニウム合金複合材料では、小型アルミニウム合金エンジンハウジングのライニング層への適用を目指した。ラジコンヘリ用ロータリーエンジンローター (排気量 30 cc) を設計し、第 2 章で最適化した空隙欠陥を最小限とする低圧浸透条件によって試作し、従来の Ni めっきと比べ摩耗量が約 1/10、Cr めっきと比べ相手材攻撃性は約 1/8 に改善する効果が得られた。優れたエンジン出力特性を示すなど、低圧での溶湯浸透法による複合強化技術の道筋を得ている。② FeCrSi 繊維強化 AC8A アルミニウム合金複合材料では、高出力・低燃費の自動車用エンジンに対応するため、燃焼部の高温強度・疲労特性を向上させたアルミニウム合金ピストンへの適用を目指した。頭頂部の部分強化位置は幅や厚さを可変させた強度シミュレーションを行い、最大主応力値を抑えた。得られた最大主応力値をもとに、第 5 章で導出した高温変形構成方程式を活用することで、使

用高温域でのひずみ速度レベルを概算可能となった。このひずみ速度下で自動車エンジンの耐久年数(時間)を勘案したピストンクリアランス精度の維持について、設計の許容を考察している。

第7章では総論として、第2章から第6章において得られた知見を要約している。

## 論文審査結果の要旨

本論文では、軽金属材料の耐摩耗性や耐熱性のさらなる向上を目指し、セラミック系繊維および金属間化合物系繊維強化材を用いたそれぞれの複合強化技術について、製法・設計の最適化や機械的性質向上の観点から、モデル実験、構成方程式などで理論構築を行い、さらに実製品製造を通じてその有効性についても検証している。

耐摩耗摺動特性が期待されるセラミック系強化材を使用した軽金属基複合材料の製造法について検討し、溶湯攪拌法では、熔融および半熔融状態を模倣した水モデル実験を構築することで強化材の挙動を可視化することに成功し、粘性に及ぼす攪拌条件の影響および強化材の投入方法について系統的实验を行うことで最適鑄造条件を確認している。実鑄造では適切な強化材体積率と固相率にすることで、強化材を均一に分散した複合材料が作製できることを見出している。溶湯浸透法では、一般的に行われている 50 MPa 以上の高圧を必要とせず 1.3 MPa の浸透圧力で目標の気孔率と高温強度の複合材料が得られることを見出し、専用装置を必要としない複合材料の調製への道を拓いている。また、これまでほとんど報告例のないアルミニウム合金基複合材料に対する DLC コーティングを行い、さらなるトライボロジー特性の向上を目指した基礎研究を行っている。積層数の異なる積層 DLC 膜を成膜することにより、コーティングの亀裂や剥離を引き起こす圧縮残留応力の低減を図るとともに、基材中の強化材体積率との関係性も明らかにしている。また報告例の少ない金属系の FeCrSi 繊維を強化材とした金属間化合物系繊維強化材の反応性について調査し、高温強度特性への影響を評価している。FeCrSi 繊維/軽金属複合材料の引張強さは、試験温度の上昇とともに繊維による強化効率が向上し、線形複合則および Baxter 理論式を用いることで、室温では界面せん断強度の低い理論値に近似し、高温では界面せん断強度の高い理論値に近似する傾向を明らかにした。さらに使用温度領域での強度予測のために高温変形挙動の構成方程式の導出を試み、流動応力とひずみ速度との間には応力指数  $n=5$  の直線近似が得られ、しきい応力が算出できることを見出し、さらに高温変形の活性化エネルギーを求め、複合材料の高温変形は母相の格子拡散律速であることを考察している。これらのことから本研究で用いた複合材料のひずみ速度依存性および温度依存性を有した塑性変形挙動の理論構築を初めて明らかにした。さらに本研究結果を基にして 2 つの複合材料に関して、製法・設計の最適化や機械的性質向上の観点から実製品製造を通じて有効性を検証している。本研究で得られた以上の結果は、複合材料技術に貴重な知見を与えるものであり、高強度軽量部品の効率的な設計・製造が可能となり、地域産業における中小企業の基盤技術強化に繋がることを期待される。よって、本論文は博士論文として価値あるものと認める。