

環境適合型小型軽量ロータリーエンジンの開発

10 アルミローターハウジングの耐摩耗性強化

寺山 朗, 府山伸行, 藤井敏男, 松葉 朗*, 竹保義博*, 大関 博***, 檀上真司***

Development of aluminum alloy rotary engine Enhancement in wear resistance of aluminum alloy rotor housing

TERAYAMA Akira, FUYAMA Nobuyuki, FUJII Toshio, MATSUBA Akira, TAKEYASU Yoshihiro, OOZEKI Hiroshi and DANJYO Shinji

Fabrication of aluminum alloy rotary engine was investigated. To improve the wear resistance of aluminum alloy surface, the wrought aluminum alloys were treated by three different processes, including plating, composing, and plasma spray. A friction-wear test shows that the Al_2O_3 fiber reinforced aluminum composite had superior wear resistance properties. Thus, aluminum alloy rotor housing was made with the Al_2O_3 fiber reinforced aluminum composite, and fitted this into the aluminum alloy rotary engine. A radio-controlled helicopter with the aluminum alloy rotary engine succeeded in a stable flight.

キーワード：ロータリーエンジン, アルミニウム, 複合強化, ローターハウジング, 摩擦摩耗試験

1 緒 言

チェーンソーや草刈機など可搬機器に用いられる原動機は、作業者の身体的負担を軽減するため、コンパクトで軽量であることが必要である。これら手持機械用原動機の排気ガス規制は、環境負荷低減の考えの下、厳しくなっている。例えば、国内では自主規制値として、 $THC+NO_x$ (トータル hidrocarbon と窒素酸化物の総和)が、2003年度は $250g/kWh$ であったが、2011年度には $50g/kWh$ まで規制される見込みである。現在、これら可搬機器に用いられる原動機は2サイクルエンジンが主流であるが、排気ガスや騒音など環境性能に問題がある。4サイクルエンジンでは環境性能に優れるものの、小型化および軽量化に問題がある。それらを解決するため、コンパクトで環境性能に優れるロータリーエンジン(RE)の適用が提案されている。

REの部材では、特にローターハウジングに高い耐摩耗性が要求とされる。そのため、車載用REのローターハウジングは現在でも鋳鉄が使用されているが、軽量化には改良の余地がある。

本研究では、軽量化に有利なアルミニウム製REの開発を目的として、REを構成する部材の中で最も耐摩耗性が要求されるローターハウジングのアルミニウム化を検討した。ローターハウジング内面は高温下でシール材と摺動し、過酷な摩耗環境にさらされる。アルミニウムは鉄に比べて耐摩耗性が劣るため、アルミニウム表面に各種表面改質を行い、摩擦摩耗試験によ

り耐摩耗特性を評価するとともに、アルミニウム製REに供する表面改質技術の開発を行った。これらのうち優れた耐摩耗性を有する表面改質技術によりローターハウジングを試作し、耐久性の評価を試みた。

2 実験方法

2.1 表面改質方法

表面改質方法は、めっき、複合強化および溶射の3通りとした。各表面改質の条件を表1に示す。めっきは無電解Niめっき2種類に、硬質Crめっきを加えた3種類とした。Niめっきは非熱処理タイプで硬度の高いものを選定した。A2017合金T4熱処理材を表面粗さ $Ra=0.2$ に調整し、膜厚 $50\mu m$ になるようにめっき処理した。

複合材料の製造は、金属繊維およびセラミックスの2種類の強化材プリフォームに、鋳造用AC8Aアルミニウム合金を高圧含浸させた。溶射はプラズマ溶射法によりアルミナをA2017合金T4熱処理材に成膜した。膜厚は $50\mu m$ である。複合化および溶射試験片は、改質表面を $1\mu m$ のアルミナスラリーによりバフ研磨し、試験片表面を調整した。比較のため非表面改質のアルミニウム材を2種類加え、合計8種類の材料で評価を行った。

2.2 摩擦摩耗試験方法

耐摩耗性の評価はピンオンディスク式摩擦摩耗試験で行った。試験の模式図を図1に示す。表面処理材をディスクとし、ピンにはFCD450(硬さHV247)を使用した。試験は $100^\circ C$ に加熱したオイル中に浸漬して行

* 広島県立総合技術研究所 東部工業技術センター

*** ヒロボー株式会社

表 1 表面改質条件

No	名称	改質方法	硬度(HV)	特徴
①	高硬度 Ni めっき	めっき	702	低 P 量、非熱処理タイプ、高強度
②	中硬度 Ni めっき		522	非熱処理タイプ、中強度
③	硬質 Cr めっき		915	車載実績あり
④	鉄化合物複合材料	複合強化	176	金属繊維強化
⑤	Al ₂ O ₃ 複合材料		121	セラミクス繊維強化
⑥	Al ₂ O ₃ 溶射	溶射	264	90% Al ₂ O ₃
⑦	展伸材 (A2017)	非改質	127	T4 処理材 ジュラルミン
⑧	高 Si 押出材		139	過共晶 Si 組成の粉末押出材

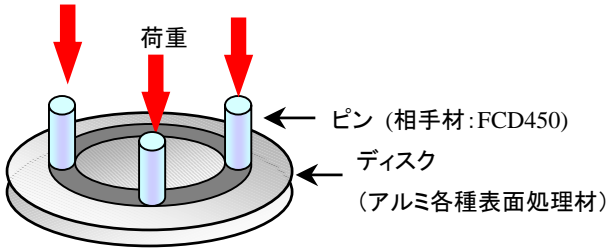


図 1 摩擦摩耗試験の模式図

い、速度は 1.2m/s、摺動距離 3300m とし、試験圧力を 30MPa および 45MPa と変化させた。試験前後はディスクおよびピンの重量変化を測定、SEM より摩耗表面を観察した。

2.3 実機の試作および耐久性の評価

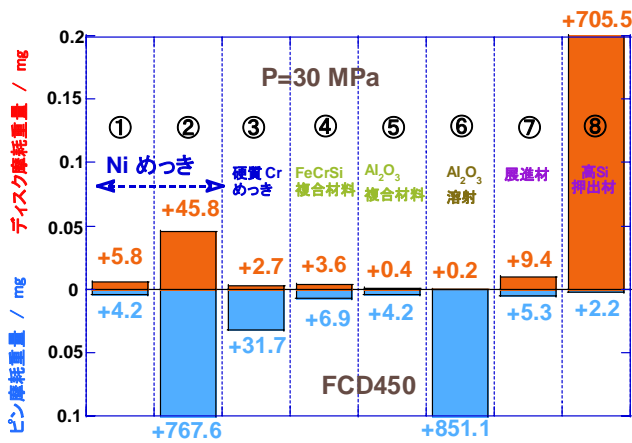
摩擦摩耗試験結果から優れた耐摩耗性を有する表面改質を選定し、ローターハウジングを試作した。さらに、耐久性を評価するため 30 時間の連続運転を行い、試験後に改質表面を観察した。

3 結果および考察

3.1 摩擦摩耗試験結果

3.1.1 摩耗重量に及ぼす表面改質の影響

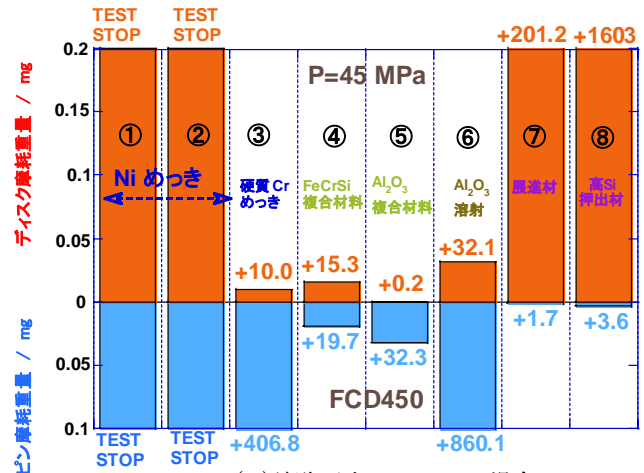
図 2 に摩擦摩耗試験前後のディスク(アルミ改質材)



(a) 試験圧力 30 MPa の場合

とピン(相手材：FCD450)の重量変化を示す。(a)試験圧力 30MPa の場合、ディスクの摩耗重量が最も大きいのは、非改質材の⑧高 Si 押出材であった。また、改質材の中で最も摩耗重量が大きいのは、②中硬度 Ni めっきであり、試験後の試験面の表面粗さが大きく変化していた。その他の改質材の摩耗重量は、10mg 以下と非常に少ない。一方、相手材(FCD450)の摩耗重量が最も大きいのは、⑥Al₂O₃ 溶射であり、攻撃性が高いことが伺える。また、②中硬度 Ni めっきも相手材が大きく摩耗している。これは上述の通り、試験中に試験面の表面粗さが変化することで、相手材が摩耗したと考えられる¹⁾。

(b)試験圧力 45MPa の場合、①および②の Ni めっきでは、試験中に摩耗表面粗さが変化し、ディスクとピンともに大きく摩耗が進行し、試験の続行が不可能であった。また、非改質材の⑦展伸材および⑧高 Si 押出材もディスクが大きく摩耗した。③硬質 Cr めっきおよび⑧Al₂O₃ 溶射では、ディスクの摩耗重量が比較的少ないものの、相手材が大きく摩耗しており、どちらも相手材への攻撃性が高い。これらの結果から相手材への攻撃性が少なく、耐摩耗性のバランスが最も優れた改質材は、⑤Al₂O₃ 複合材料であることが判明した。



(b) 試験圧力 45 MPa の場合

図 2 摩擦摩耗試験前後のディスクとピンの重量変化

3.1.2 摩耗表面に及ぼす表面改質の影響

図3に摩耗試験後のディスクのSEM写真を示す。試験圧力は30 MPaである。(a)①高硬度 Ni めっきおよび(c)③硬質 Cr めっきの表面には、ピンとの摩擦により生じたと思われる条痕が確認できる。(b)②中硬度 Ni めっきは、前述の通り表面状態が大きく変化している。EDXによる元素分析の結果より、写真中央の黒色部からはアルミが検出され、めっきが完全に剥離していることがわかった。これは、めっき層が摩耗するよりも、剥離が支配的に起こったためと推定される。

(d)④鉄化合物複合材料では、線状の白色部が鉄化合物強化繊維を示している。(e)⑤Al₂O₃ 複合材料では、線状もしくは点状に Al₂O₃ 強化繊維が突出している部分が確認できる。マトリクスアルミ合金と強化繊維では硬度に差があるため、マトリクスアルミ合金が優先的に摩耗したものと考えられる。この生じた凹凸部分が油溜りになり、摩耗が抑制された可能性が高い。なお、両複合材料も強化繊維の抜け落ちた痕跡は見られなかった。非改質材の(f)⑧高 Si 押出材は表面状態が粗く、激しく摩耗している様子が確認できる。

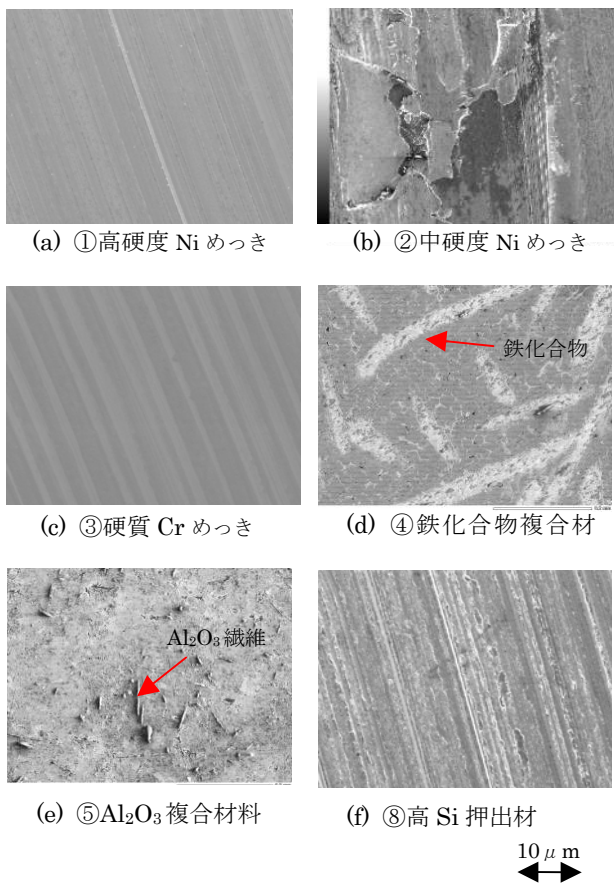


図3 摩耗表面のSEM写真

3.2 アルミ製ローターハウジングの耐久性

3.2.1 複合強化アルミローターハウジング試作

摩擦摩耗試験結果より、Al₂O₃ 複合材料は特に優れた耐摩耗性を有していることがわかった。よって、ローターハウジングの内面のみを Al₂O₃ 部分複合強化した、複合強化アルミローターハウジングの作製を試みた。実機の試作はガスを加圧媒体とする低圧含浸法を採用した。低圧含浸法は、高圧含浸法のように大規模な装置を必要とせず、比較的大きな部品の作製にも適しており、低コストな製法である。加圧媒体としてアルゴンガスを用い、含浸圧力を変化させ、鑄造欠陥(空隙)に及ぼす影響について調べた。

複合材料では、この欠陥が機械的強度や、疲労強度の低下を招く。図4は、組織中の鑄造欠陥に及ぼす含浸圧力の影響を示している。図中の黒点部が、鑄造欠陥である。(a)含浸圧力 0.4MPa のときは鑄造欠陥が多く、画像処理により求めた欠陥面積率が 2%よりも高い値であった。含浸圧力の上昇に伴って欠陥面積率は低くなり、(c)含浸圧力 2.0MPa では欠陥面積率が 0.5%で、著者らが以前に報告している²⁾ (d)高圧含浸材に匹敵する低い値までに改善した。また、含浸圧力を 2.0MPa にすると高温引張強さは高圧含浸材に匹敵する高い値となり、高圧含浸材と同等の組織と強度が得られることがわかった。

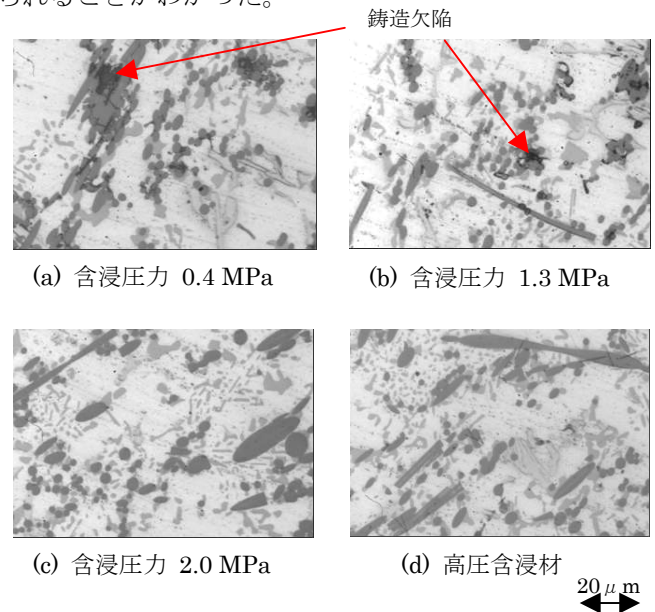


図4 鑄造欠陥に及ぼす含浸圧力の影響

図5に含浸圧力 2.0MPa の低圧含浸法により作製した複合強化アルミローターハウジングの外観を示す。複合強化部分はセラミクス繊維が配合されているため、アルミニウム合金に比べて機械加工性が悪い。生産性を考慮して耐摩耗性が要求されるハウジング内面を 5 mmの厚みで部分複合強化し、軽量性を損なわない設計を行った。排気量は 30cc である。

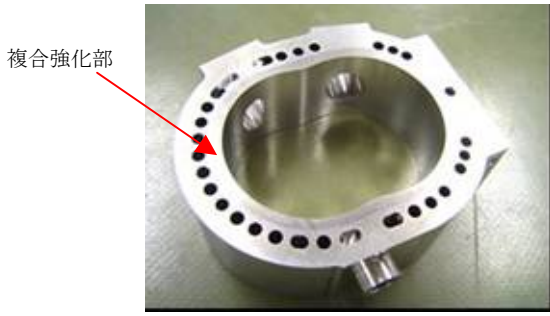


図5 複合強化アルミローターハウジングの外観

3.2.2 耐久試験結果

複合強化アルミローターハウジングを RE に組み込み、30 時間定常運転し、耐久性を検討した。図 6 に試験後のローターハウジング内面を示す。ローターの打痕が見られるが、摩耗や破損部など確認されず、安定した出力が得られた。

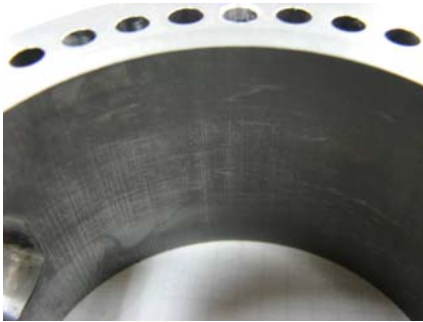


図6 耐久試験後の複合強化部分の様子

比較のため、ローターハウジング内面に高強度 Ni めっきを施し、同様の耐久試験を行った。試験後のハウジング内面を観察した結果、図 6 と同様にローターの打痕が確認できるほか、めっきの剥離と思われる部分が確認された。図 7 に断面組織を示す。アルミ下地と Ni めっきの間は、緩衝のために低硬度のめっき(中間膜)を施してある。試験後この中間膜で裂けており、Ni めっきが浮き上がっている。Ni めっきの膜厚は変化しておらず、ほとんど摩耗していない。耐摩耗性には問題ないが、めっきの密着性が課題である。

複合強化ではアルミ母材の内部に強化繊維を埋込み

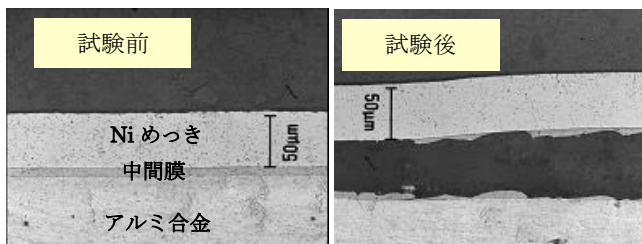


図7 耐久試験前後のめっき部の様子

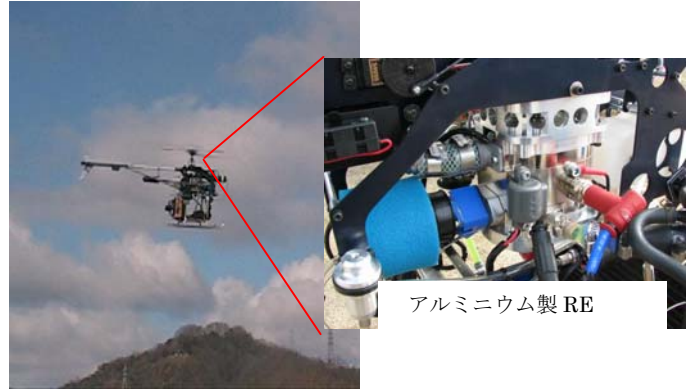


図8 アルミ製 RE を搭載した無人小型ヘリコプターの飛行する様子

強化するため、めっきで発生したような表面のみが剥離するような現象は起こらない。よって、耐摩耗性および耐久性に優れたアルミローターハウジングの製造には複合強化が適しているといえる。

3.3 無人小型ヘリコプターへの応用

開発したアルミローターハウジングを組み込んでアルミニウム製 RE を作製した。図 8 に示すように、この RE を無人小型ヘリコプターに搭載し、安定飛行に成功した。

4 結 言

アルミニウム製の RE を開発するため、表面改質により耐摩耗性の向上を試みた。めっき、複合強化および溶射によりアルミニウム表面を改質し、摩擦摩耗試験により耐摩耗性の評価を行った。

良好な耐摩耗特性を有し、相手材への攻撃性も低い Al_2O_3 複合材料と Ni めっきにより、アルミニウム製ローターハウジングを試作し、耐久性の評価を行った。

Al_2O_3 複合材料では、30 時間の耐久試験でもほとんど摩耗せず、出力低下なく動作した。一方、Ni めっきでは試験中にめっきが剥離し、密着性に問題があることがわかった。 Al_2O_3 複合材料を用いることで、耐久性に優れたアルミニウム製 RE の開発が可能となった。

なお、本研究は地域コンソーシアム「環境適合型小型軽量ローターエンジン」の開発」によって実施した。

文 献

- 1) 例えば、社団法人日本機械学会：摩耗の標準試験方法(1999)
- 2) 府山，寺山，藤井，萩原，白石，勝矢，佐々木，日本鑄造工学会全国講演大会講演概要集，149 (2006),62