

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月18日現在

機関番号：50103

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560093

研究課題名（和文） 過酷環境下で熱・機械的負荷が繰り返し作用する異材固相接合部品評価法の開発

研究課題名（英文） Development of evaluation method for a joining part by friction welding which subjected to thermo-mechanical cyclic loading under sever environment

研究代表者

高橋 剛 (TAKAHASHI TSUYOSHI)

釧路工業高等専門学校・機械工学科・教授

研究者番号：50435393

研究成果の概要（和文）：アルミ合金鋳物(AC8A)ピストン頂部のみに、アルミ合金展伸材(A6061)を摩擦圧接により接合し、強度耐久性に優れたピストンを開発する。そのための接合強度評価方法を開発するための異種形状接合条件と構造解析手法を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Using friction welding, the material of a upper part of piston would substitute A6061 by drawing process for AC8A by casting in order to improve durability of the piston subjected to thermo-mechanical cyclic loading. Authors have developed the evaluation method for a joining strength and the way of structural analysis of piston. Moreover, suitable joining conditions of friction welding between contact surfaces with different shape have completely investigated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学，材料加工・処理

キーワード：接合・溶接

1. 研究開始当初の背景

原油価格の異常高騰や地球温暖化問題から燃費改善が一層強く求められており、メーカー各社は車両総重量に占める割合の大きいエンジン材料を鋳鉄からアルミ合金に替えるなどして軽量化に取り組んでいる。但し、軽量化は強度・耐久性ポテンシャルの低下を招くこともある。そのため弱い部分だけを強化する部分強化対策が採られている。部分強化法として知られるウィスカなどのFRMは実用化されているが、繊維強化金属の配向性を制御することが難しいと言われている。いずれにしても鋳物であるが故に、ポロシティなど

の鋳造欠陥を皆無にすることは難しい。これに対して、摩擦圧接による異種材接合の利点は、固層接合であるが故に界面付近に不要な反応層が生成しないことにある。

一方、これまで摩擦圧接を用いて作られたエンジン部品の多くは、クランクシャフトなど常温に近い温度で使われる部品に留まっており、ピストンなど高温環境下で使用される鋳物部品への事例はない。高温環境下で摩擦圧接部品が使用できれば適用範囲は格段に広がるが、接合界面付近の材料挙動が明らかになっていない。更には、摩擦圧接は同一断面形状同士の部材接合に用いられてきた

が、異種形状同士の接合が可能になれば適用ニーズは高くなる。しかしながら、これを扱った研究報告もほとんど見当たらず、十分な研究蓄積があるとは言いがたい。

2. 研究の目的

アルミ合金鋳物 (AC8A) ピストンの市場不具合のほとんどはピストン頂部の熱疲労亀裂である。したがって、このピストン頂部のみを摩擦圧接により、高強度でアルマイト処理し易いアルミ合金展伸材 (A6061) に置換し、強度耐久性に優れたピストンを開発する。そのためには、適正な接合条件と熱処理条件を検討し、材料部分置換領域や圧接ピストンの耐久性予測が可能となる構造解析手法の開発も併せて行う。また、中実円柱と円管の異種形状の接合条件も明らかにする。これらの知見を元に、実際のピストン構造を真似た擬似的なピストンを試作し、構造解析により構造上の問題点を抽出し、製品化への可能性を検証する。

更に、普通旋盤を改造し、簡易型摩擦圧接機を製作し、簡易的手法による接合強度と精密制御手法による接合強度を比較し、簡易的手法の問題点を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 接合条件及び接合後熱処理条件の検討

母材 AC8A (鋳物) 及び置換強化材 A6061 (展伸材) の化学組成を表 1 に示す。いずれもアルミ合金ではあるが、製法は異なるため、これに起因し機械的特性も異なる。ここでは、圧接条件を種々変えた接合試験片に対して、引張試験や疲労試験を実施し、接合条件を確定する。

更に、これらの材料は共に時効析出硬化材料であり、強度ピークとなる時効条件 (T6) は材料に応じて異なる。それらを表 1 に併せて

表 1 供試材料の化学組成表 (wt%)

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ni	Ti	Other	Each
A6061	0.64	0.27	0.24	0.03	0.89	0.07	0.09	-	0.04	0.05	
AC8A	12.3	0.24	1.12	0.01	1.28	0.01	0.01	1.22	0.11	0.05	

・ A6061 用 T6 処理条件：

550°C × 1 h 後に水冷 + 200°C × 1 h 後に空冷

・ AC8A 用 T6 処理条件：

530°C × 4.5h 後に水冷 + 180°C × 6h 後に空冷

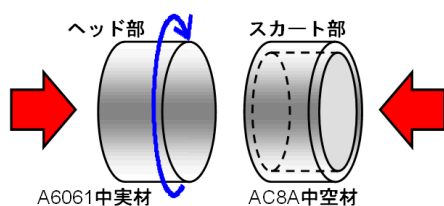


図 1 中実円柱と円管の接合模式図

示す。従って、接合後の熱処理条件をいずれにするのが適切か明らかにする必要がある。そこで、接合後試験片に対して引張試験および疲労試験を実施し、熱処理条件を確定する。

(2) 異種形状 (中実円柱と円管) 接合

図 1 に示すようにピストン頂部の中実円柱 (A6061) とスカート部の円管 (AC8A) を適切に接合するための圧接条件を検討する。ここでは、摩擦圧力や時間をパラメータに数十種類変えて接合し、引張試験を実施する。更に、従来のプレーキ式の他に、摩擦工程が終わった後、相対すべりが生じないようにするクラッチ式も実施し、両者の適正を比較する。

(3) 構造解析による材料置換領域および耐久性予測手法の開発

3次元 CAD モデルを作成し、疲労解析を用いて材料置換領域を決定する。接合界面付近の応力分布の妥当性を検証し、燃焼熱と燃焼圧の実働負荷における圧接ピストンの構造的問題点を明らかにする。

(4) 摩擦圧接によるプロトピストンの製作

実験によって得られた接合条件などを元に本物ピストン形状に似せた擬似的なピストンを製作する。具体的には、実働状態を想定したピストンの構造解析により、材料置換領域を決定し、中実円柱 A6061 と円管 AC8A を接合し、ピンボスを圧入して製作する。

(5) 簡易摩擦圧接試験機の製作

普通旋盤を改造し、簡易的に摩擦圧接ができる機械を製造する。ここでは、簡易的な接合強度と精密制御による接合強度との比較を行い、精密制御の必要性を検証する。

4. 研究成果

(1) 接合条件及び接合後熱処理条件の検討

母材 AC8A 及び置換強化材 A6061 の中実円柱形状同士の摩擦圧接は以下の条件が適切であることがわかり、その条件下で接合した試験片写真を図 2 に示す。



図 2 AC8A (左) と A6061 (右) の接合試験片

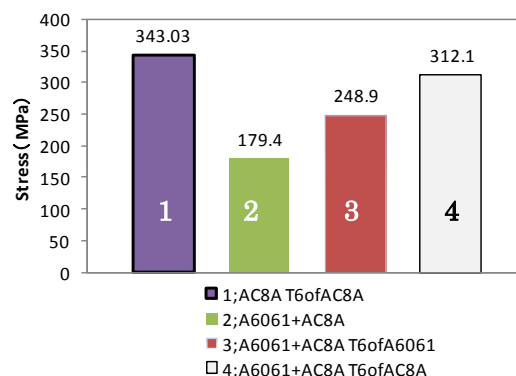


図 3 接合後熱処理有無の引張試験結果

・摩擦圧力 100MPa, 摩擦時間 0.5s,
 アプセット圧力 200MPa, アプセット時間 6s

更に, 接合試験片に対して A6061 と AC8A
 それぞれの T6 処理を施し, 引張試験を行っ
 たところ, 全ての試験片の破断箇所は接合界
 面付近の AC8A 側であった. 結果を図 3 に示

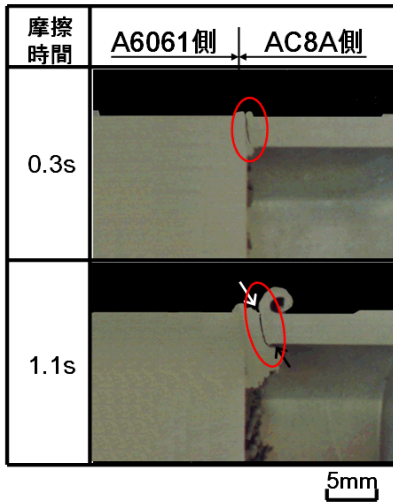
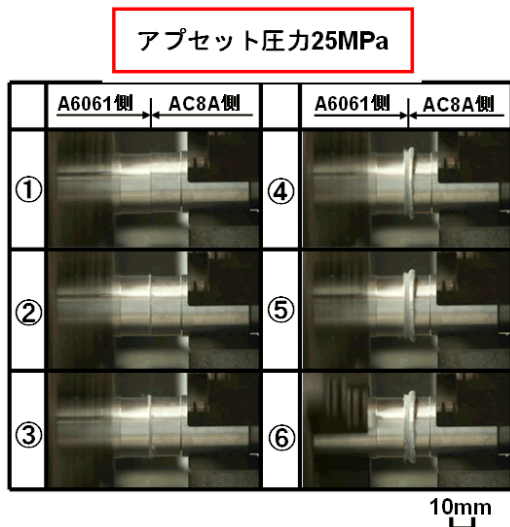
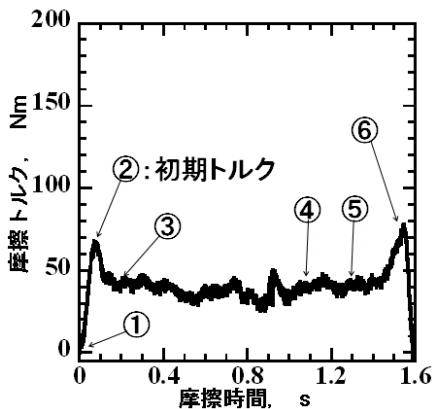


図 4 接合試験片の中心軸断面



(a) 接合中の材料様相



(b) 摩擦トルク曲線

図 5 接合中の材料様相と摩擦トルク曲線

す. ここで図中の棒グラフ” 1” は AC8A-T6
 単体の結果である. 一方, ” 4” は接合試験
 片に対し, AC8A の T6 処理を施した結果で
 ある. 単体材” 1” の値に比べて接合材” 4” は
 約 10%強度が低下しているものの, ピストン
 構造上の接合面はピンボス付近になり, 応力
 的には上面ほど厳しくないことが構造解析
 でも確認できている. このことから総合的に
 判断し, 接合試験片に対して AC8A の T6 処理
 を施すことが適当であることが分かった.

(2) 異種形状(中実円柱と円管)接合

材料置換するピストントップ部を A6061 中
 実材, スカート部を AC8A 円管材とし, 摩擦
 圧力などの接合条件を種々変えて実施した.
 その結果, 図 4 の赤丸で示すように接合面内
 に非接合領域と認められる欠陥がある. この
 欠陥は, 圧接面形状が異なることで円管側の
 熱の伝導が悪くなり, その熱の移動に伴って
 圧接面が AC8A 側へ移動することで生じると
 考えられる. 加えて, 摩擦時間が長くなるほ
 ど圧接面が AC8A 側へ移動することも分かっ
 た. この傾向は, 接合力を高めるためにアプ
 セット圧力を増加する場合も同様であり, 欠
 陥を含んだ接合面がアプセット圧力増加に
 伴い AC8A 側に移動し, 圧力を更に高くす
 ると AC8A 側が粉砕し, 結果的に高い継手効
 率を得ることができなかった. この理由の一
 つとして, 図 4 の摩擦時間 1.1s の写真の 2
 つの矢印先に見られるように, 切欠きになっ
 ており, ここを起点に破断すると考えられる.

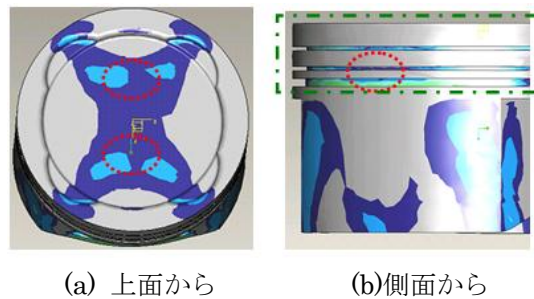


図 6 部分置換後ピストンの疲労解析結果

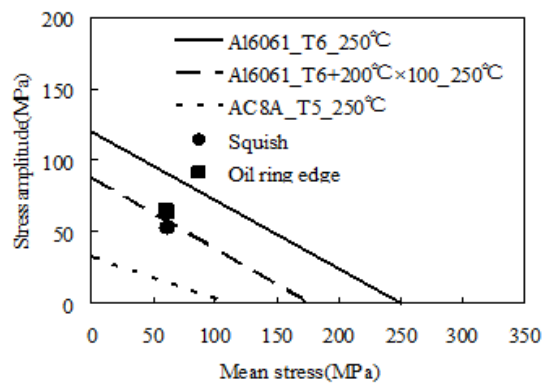


図 7 疲労限度線図を用いた耐久性評価

このような接合実験の結果、従来のブレーキ式では制動直後に破砕することが多いため、クラッチ式の方が適しており、以下の接合条件が中実円柱材と円管材の適切な接合が可能であることが分かった。

摩擦圧力：25MPa，摩擦時間：1.0sec

アプセット圧力：50MPa，アプセット時間：min.12sec

この条件を用いて接合したときの摩擦トルク曲線とそれに対応する接合中の母相様相を図5に示す。

(3) 構造解析による材料置換領域および耐久性予測手法の開発

図6は燃焼熱及び燃焼圧が同時に作用した場合のピストン各部の疲労寿命分布を示している。この結果と図7に示す疲労限度線図を用いて耐久性を評価した。その結果、図6(b)の四角の点線で囲む範囲を部分強化領域とし、母材のAC8A 鋳物からA6061 展伸材に材料置換する。

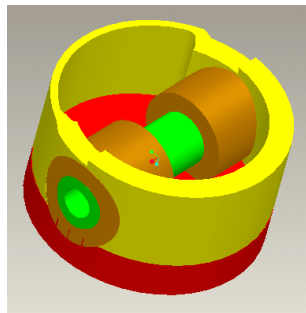


図8 圧接によるプロトピストンのCAD

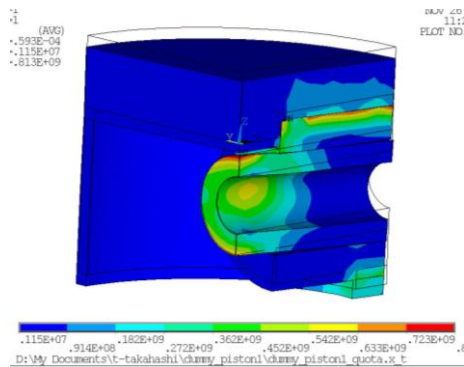


図9 実働荷重作用下における圧接ピストンのミゼス応力分布



図10 圧接ピストンの試作外観(直径30mm)

(4) 摩擦圧接によるプロトピストンの製作

上述した(2)、(3)から得られた知見を元に、実構造を模擬したプロトピストンを試作する。図8に直径30mmのプロトピストンのCADモデル図を示す。赤色で示したピストン頂部の領域が疲労解析結果により決定した置換領域である。肌色のピンボス部は、AC8A材の円管を圧入して設け、中に緑色のピストンピンを通す。この基本構造に対する実働状態のミゼス応力分布を示したものが図9である。このモデルは対称条件を活用し、1/4モデルで計算した。ピンボス嵌合面に嵌合応力が生じているものの、応力レベルは大きくない。

図10は、以上の知見をもとに製作した圧接ピストンの試作品である。直径30mmであり、接合条件は(2)で述べた通りである。通常の鋳物ピストンの構造との違いは、ピンボス部とスカート部の交差部の肉厚が薄いこと、反対にスカート部の肉厚が従来構造に対して厚いことが挙げられる。

(5) 簡易摩擦圧接試験機の製作

図11は、普通旋盤を改造して製作した簡易型摩擦圧接機である。接合試験片の端部を従来の回転側チャックに、反対側の端部を新たな固定側チャックで挟む。この固定側チャックは自作の箱型支持台で支持され、摩擦圧力は心押し台からセンターを黄色矢印の方向に進ませることで軸力として与える。この簡易装置を用いて製作した中実円柱材の接合部付近の外観写真を図12に示す。寄り代は図2に示したほど大きくはないが、軸ずれを起こすことなく、外見上の欠陥も認められず問題なく接合できていることができた。

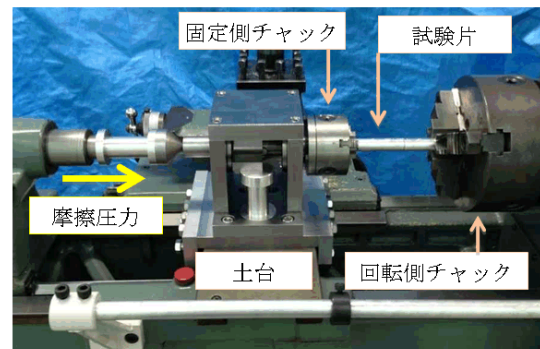


図11 簡易摩擦圧接機の外観写真

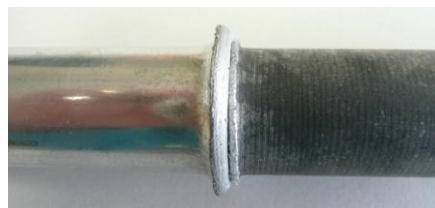


図12 簡易摩擦圧接機を用いた接合試験片の接合部周辺の外観写真

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計4件)

- ① 長澤徹, 高橋剛, 荒川弘行, 固相接合強度耐久性に優れたアルミ合金製エンジン部品の材料適正化, 日本機械学会北海道支部第49回講演会, 講演概要集, 2010. 11
- ② 高橋剛, 長澤徹, 木村真晃, 耐久性向上のための摩擦圧接によるアルミニウム合金ピストン試作, 平成23年度日本塑性加工学会春季講演会, 講演論文集, 2011. 5, pp. 287-288
- ③ 高橋剛, 木村真晃, 長澤徹, 岩淵義孝, 日本機械学会北海道支部第51回講演会, 異種形状固相接合によるアルミピストン試作とその熱処理条件, 講演概要集, 2012. 10, pp. 71-72
- ④ 中村和生, 高橋剛, 長澤徹, 木村真晃, 耐久性向上のための摩擦圧接によるアルミニウム合金ピストンの試作, 日本機械学会北海道学生会第41回学生員卒業研究発表会講演会講演論文集, 2013. 3, pp. 113-114

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 剛 (TAKAHASHI TSUYOSHI)
釧路工業高等専門学校・機械工学科・教授
研究者番号：50435393

(2) 研究分担者

岩淵 義孝 (IWABUCHI YOSHITAKA)
釧路工業高等専門学校・機械工学科・教授
研究者番号：90232701

(3) 研究分担者

長澤 徹 (NAGASAWA TOHRU)
北海道教育大学・教育学部・教授
研究者番号：90109489

(4) 研究分担者

木村 真晃 (KIMURA MASAASKI)
兵庫県立大学・工学(系)研究科(研究院)・
准教授
研究者番号：90285338

(5) 連携研究者

()

研究者番号：