

# 「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」(科研研究助成 基盤C)

高橋 剛<sup>1</sup>, 岩渕 義孝<sup>2</sup>, 長澤 徹<sup>3</sup>, 木村 真晃<sup>4</sup>

## Development of evaluation method for a joining part by friction welding which subjected to thermo-mechanical cyclic loading under sever environment

Tsuyoshi Takahashi, Yoshitaka Iwabuchi, Tohru Nagasawa, Masaaki Kimura

**Key words** : Corrosion, Freeze-thawing, Residual stress, Welding

### 1. はじめに

平成21年度から3年間、日本学術振興会の科学研究費助成事業 基盤C(課題番号 22560093)の研究助成を受け、標題に示す研究に従事したので、成果の概要を報告する。

### 2. 研究背景

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が、無理な軽量化は強度・耐久性ポテンシャルの低下を招く。そのため最弱部位のみ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イスカなどのFRM(Fiber Reinforced Metals)は実用化されているものの、それ自身が高価なこと、接合を含めた加工性に未解決の問題が多いことなどから、現状、まだ使用範囲が限られている。これに対して、摩擦圧接による異種材接合は、固相接合なので、意図しない接合界面の反応層が生成されない。何よりも、必ずしもポロシティなど皆無にできない鋳造特有の欠陥を有する鋳物材料を使う必要がないことが最大の利点がある。

一方、これまで摩擦圧接を用いた部品は、エンジン部品のクランクシャフトなどほぼ常温で使われる部品に限られており、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く、これが可能になれば適用範囲は格段に広がる。加えて、従来の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更に高くなる。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。

### 3. 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。

### 4. 研究内容と方法

#### 4-1) 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。この接合は、北見工業大学機械システム工学科富士明良教授の御協力を得て富士教授所有の電子制御摩擦圧接機を用いて接合試験片を多数製作する。

1 釧路高専機械工学科

2 釧路高専機械工学科

3 北海道教育大学釧路校(当時)

4 兵庫県立大学 機械工学部門

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	0.08	-	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 × 1h 後に水冷+200°C × 1h 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

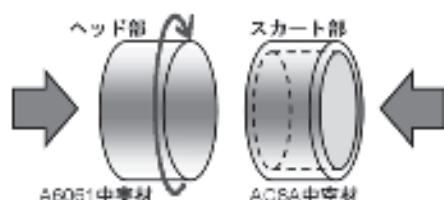


図1 中実円柱と円管の接合模式図



図2 AC8A(左)とA6061(右)の接合試験片

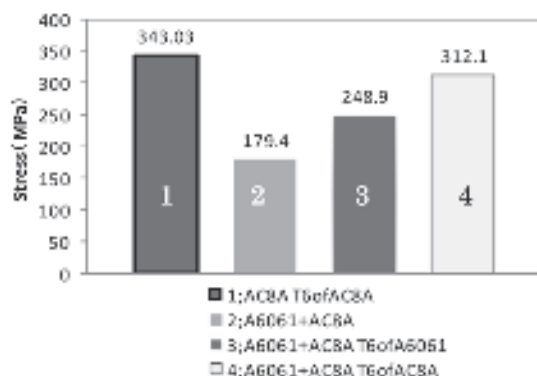


図3 接合後熱処理有無の引張試験結果

更に、これらの両材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。それらを併せて表1の下に示す。従って、接合後に処理する熱処理条件を確定する必要がある。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、従来のブレーキ式の他に、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、両者の遠正を比較する。

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課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接合機械を製造する。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。

5. 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。

- ・摩擦圧力 100MPa, 摩擦時間 0.5s
- ・アブセット圧力 200MPa, アブセット時間 6s 以上

更に、接合試験片に対してA6061とAC8AそれぞれのT6条件で熱処理し、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。引張試験結果を図3に示す。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AC8AのT6条件で処理した接合試験片の結果である。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、接合面はピンボス付付近になり、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ブセット圧力を増加する場合も同様であり、欠陥を含

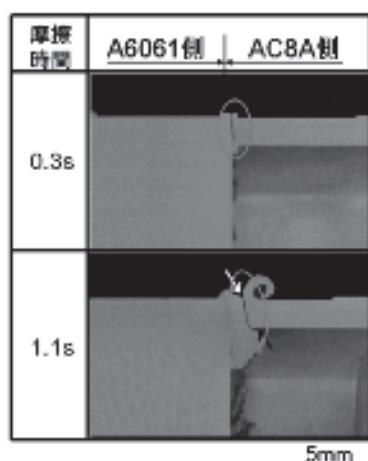
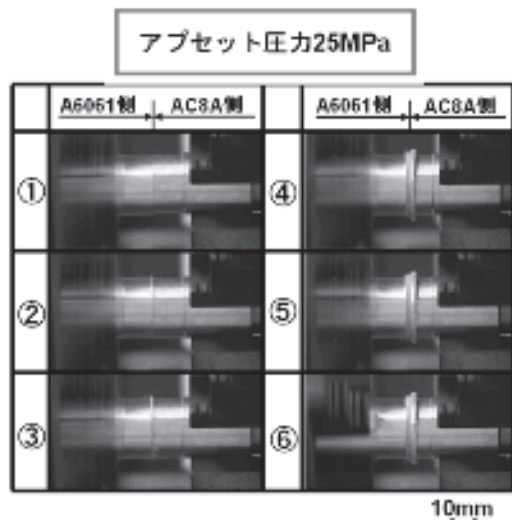
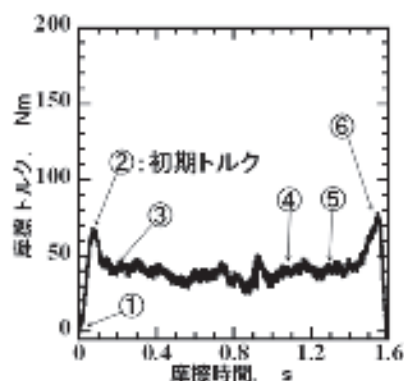


図4 接合試験片の中心軸断面



(a) 接合中の材料様相

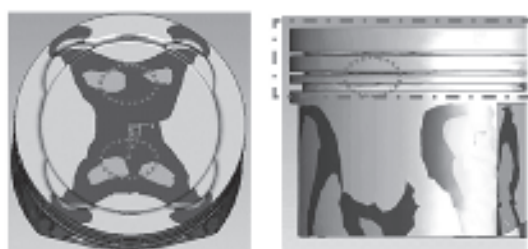


(b) 摩擦トルク曲線

図5 接合中の材料様相と摩擦トルク曲線の例

む接合面がアプセット圧力増加に伴って AC8A 側に移動し、更に圧力を高くすると AC8A 側が粉砕するため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 の二つの矢印先に見られるように、接合面の外周表面が切欠きようになっており、ここを起点に破断すると考えられる。

このような接合実験の結果、参考までにアプセット圧力が 25MPa のとき接合中の外観の様子と、そのとき



(a) 上面から (b) 側面から

図6 従来構造ピストンの疲労解析結果

の摩擦トルクの時間変化を示す。(b) 図中の①～⑥のタイミングは図 5(a)の写真のそれに対応する。開始後 0.1s 後の②で初期トルクに達し、その後トルクは減少する。そして④でブレーキを開始し、⑥で二回目のピークをとる。この条件では、摩擦圧力とアプセット圧力の設定値は同じであるため、②と⑥のピークもほぼ同じになっている。但し、このアプセット圧力では接合力が不足していたため、試行錯誤を繰り返し、結果的に以下の条件に決めた。

- ・圧接条件：摩擦速度 27.5(1/s(1650rpm))、  
摩擦圧力 25MPa、摩擦時間 0.7s

- ・アプセット圧力 75MPa、アプセット時間 6.0s 以上
- 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従来構造ピストン各部の疲労寿命分布を示している。ここで行った疲労解析とは、二種鋼の実働荷重条件から各部の応力振幅を求め、疲労寿命を予測するものである。その結果、図6(b)の四角の点線で囲んだピストン頂部から3番目リング溝までの領域を、母材の AC8A 鋳物から A6061 展伸材に材料置換する部分強化領域とすることが明らかとなった。

- 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、実構造を模倣したプロトピストンを試作した。図7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8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、圧縮応力であるため問題はない。

図9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10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人力で押し込むことで発生させる。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11に示す。寄り代(バリ)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確認できた。

6. 主な発表論文等

- 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 阪口寛幸, 木村真晃, 日下正広, 海津浩一, 高橋剛, 「A6061中実材とAC8A中空材との摩擦圧接における接合手法の検討」, 溶接学会平成24年度秋期全国大会概要第91集, pp. 386-387, 2012, 9
- ④ 高橋剛, 木村真晃, 長澤徹, 岩淵義孝, 「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」, 日本機械学会北海道支部第51回講演会, 講演概要集, 2012, 10, pp. 71-72
- ⑤ 阪口寛幸, 木村真晃, 日下正広, 海津浩一, 高橋剛, 「A6061/AC8A 摩擦圧接の接合現象に及ぼす接合端面形状の影響」, 日本機械学会第20回機械材料・材料加工技術講演会(WMP2012), CD-ROM 論文集, 12-9, No. 410, 2012, 11
- ⑥ 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

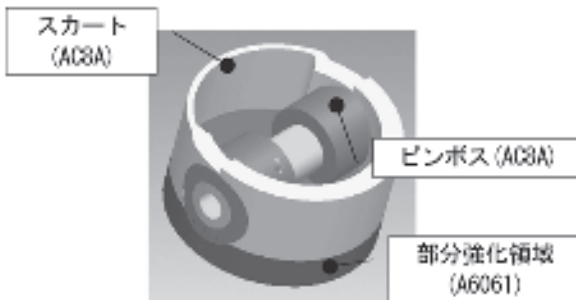


図7 圧接によるプロトピストンのCAD

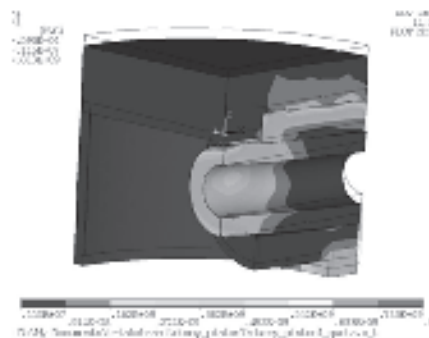


図8 実働荷重作用下における圧接ピストンのミゼス応力分布



図9 圧接ピストンの試作外観(直径30mm)

【謝辞】

本研究を遂行するにあたり、北見工業大学 機械システム工学科 富士明良教授に材料接合試験片の製作を協力頂いた。また、接合試験片の熱処理と引張試験を釧路高専教育研究支援センター小林勲職員の指導の下、平成24年当時機械工学科5年中村和生君が担当頂いた。重ねて謝意を表します。

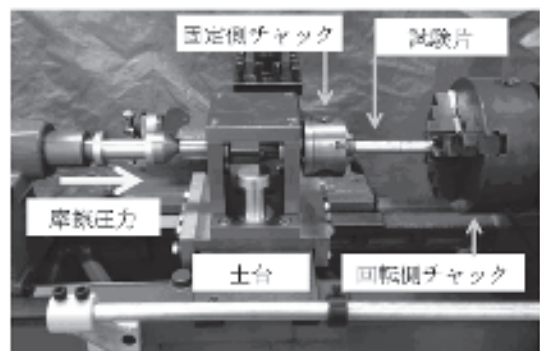


図10 簡易摩擦圧接機の外観写真

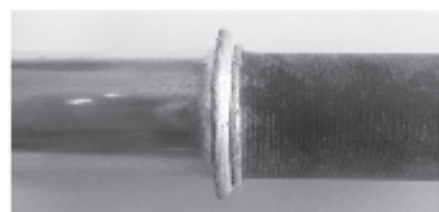


図11 簡易摩擦圧接機を用いた接合試験片の接合部周辺の外観写真