

3 事例報告

(1) Fe-C 合金めっきを加工した軽量ピストンの耐摩耗性評価

城戸 竜太、倉本 英哲、小原 峰司*、鶴田 健二*、道下 雅巳*

ブレーキマスターシリンダーのピストンの軽量化を図る目的で、A5052 材を素材とし、表面処理に Fe-C 合金めっきした軽量ピストンを試作した。この試作品の耐摩耗性について、実使用の状況を考慮した摩耗試験方法を考案し、耐摩耗性を評価した。試験片は試作品、純正ピストンの他、硬質アルマイト加工したアルミニウム合金及び無電解ニッケルめっき処理した鋼を比較対象として用いた。無電解ニッケルめっきは、中リンタイプで、めっき加工後熱処理をしたもの(以下、Ni-P(H))としていないもの(以下、Ni-P)を用意した。純正ピストンは、実車両に搭載されているものである。結果は以下の通りである。

摩耗試験結果から、おおむね、表面処理なし、Ni-P、純正ピストン、Ni-P(H)、硬質アルマイト、Fe-C 合金めっき(試作品)の順に摩耗量が小さくなり、試作した Fe-C 合金めっきは、実用に耐える耐摩耗性を有するものと考えられる。

試験後の摩耗形態は大きく 2 つに分けることができ、純正ピストン、Ni-P(H)、Ni-P、表面処理なしについては、摩耗試験開始直後より摩耗が始まり、硬さが大きいものほど、摩耗量は小さかった。一方、Fe-C 合金めっき及び硬質アルマイトについては、他の試験片と比較して、硬さと摩耗量の関係は成立しておらず、また、初期の段階でほとんど摩耗しない。この原因として、表面処理被膜の性質や素材との密着性に起因した挙動ではないかと考えられる。

キーワード：耐摩耗性、アブレイブ摩耗、鉄めっき、硬質アルマイト、無電解 Ni-P めっき

1. 緒言

当センターでは、EV 化に対応するために必要な基礎的知識及び新技術の習得並びに新製品開発のきっかけづくりに寄与することを目的とし、広島地区の製造業者を会員とする EV 分解調査プロジェクトを立ち上げ、活動を行ってきた。プロジェクトでは、職員自らの手で実際の EV を分解し、使用されている部品の内、特に EV 特有のものを優先して、材質調査などの詳細な調査を行った。

EV において、航続距離の延伸が課題とされており、課題解決のための重要な要素技術として軽量化が挙げられる。分解調査を行う過程で、中小規模の製造業において、今後の部品開発に資するものは何かとの観点から検討し、軽量化を実現できる要素部品の 1 つの例として、図 1(ブレーキ機構部品)中に示すブレーキマスターシリンダーのピストンの軽量化をターゲットに部品開発を行うこととした。実際に分解した車両から得られたピストン(以下、「純正ピストン」)は鋼製で、

表面に無電解 Ni-P めっき加工されており、表面のビッカース硬さが 900HV を超える硬さであった。高硬度であったことから、表面に加工された無電解 Ni-P めっきは、熱処理されていたと考えられる。これは、ピストンに耐摩耗性が求められているために加工されたものと推測した。

軽量化の手法として軽合金への材料置換を考え、ピストン本体の材質を鋼から代表的な軽合金であるアルミニウム合金(A5052)へと変更することとした。一般的に、アルミニウムの耐摩耗性は鋼よりも劣っているため、しゅう動部に使用する場合は、アルマイトやめっき等の表面処理加工がされる。

今回の試作における具体的な方法は、まずリバースエンジニアリングにより純正ピストンの三次元 CAD 図面を作成した後、切削加工により A5052 製ピストンを作成した。最終的にプロジェクトのメンバー企業である日本バレル工業(株)が開発した耐摩耗用の Fe-C 合金めっきで表面加工し、試作品とした。

表面処理材の耐摩耗性の評価方法には、砂落し摩耗

*日本バレル工業株式会社

試験、噴射摩耗試験、往復運動摩耗試験等⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾があるが、本試作品の使用状況を考慮した試験方法はない。そのため、本報告では、試作品について、使用状況を考慮した摩耗試験方法を考案し、実際の使用に耐え得る耐摩耗性能の有無について評価を行い、実用に耐えることができるか考察した結果を報告する。

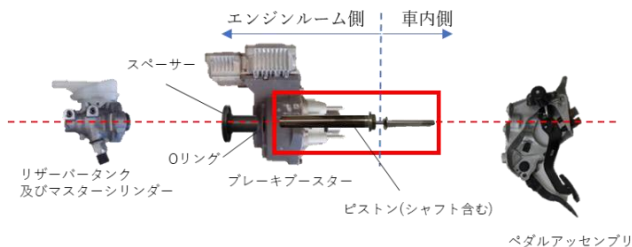


図1 ブレーキ機構部品の展開図



図2 純正ピストンの外観写真

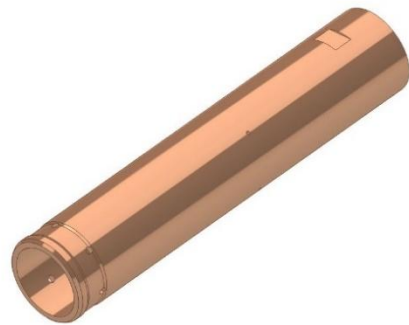


図3 純正ピストンの三次元CAD

2. 試験方法

2.1 ピストンのCADモデル

図2に、実車両から分解した純正ピストン(図1中赤四角部)の外観写真を示す。純正ピストンのCADモデルの作成にあたっては、接触式三次元測定機(株東京精密製SVA fusion 9/10/6)で形状測定を行い、三次元CADシステム(Siemens Digital Industries Software社製)によって図面化を行った。図3に得られた純正ピストンの三次元CADモデルを示す。

2.2 摩耗試験用試験片の作製

表1に、試験片の材種、表面処理及び表面のビッカ

ース硬さを示し、図4に各試験片の外観写真を示す。

ピストン用の素材として、SCM435及びA5052を用意した。図3のCADモデルをもとに、NC旋盤(株TAKISAWA製TC-200型)で加工し、ピストンのレプリカを試作した。その後、レプリカに表1の表面処理を加工し、(a)～(f)の摩耗試験用試験片とした。このとき、表面処理被膜の膜厚は、純正ピストンの膜厚(約7μm)と同程度にした。なお、ビッカース硬さは、JIS Z 2244による試験方法で、(株)フューテュアテック製FM-ARS-7000型を用いて測定した。試験荷重は、0.09807N(HV0.01)とした。

表1 摩耗試験用試験片の素材と表面処理の組み合わせ

試験片名	素材の材種	表面処理	ビッカース硬さ (HV)
(a) Fe-C 合金めっき	A5052	Fe-C 合金めっき	534
(b) 硬質アルマイト	A5052	硬質アルマイト	409
(c) Ni-P	SCM435	6%P 量の無電解 Ni めっき	550
(d) Ni-P(H)	SCM435	6%P 量の無電解 Ni めっき+熱処理したもの※	949
(e) 純正ピストン	SCM435	10%P 量の無電解 Ni めっき+熱処理したもの	929
(f) 表面処理なし	A5052	無	85

※無電解Ni-Pめっきの熱処理は、高温真空炉(島津メクテム(株)VHLgr25/18/23型)を用いて、真空環境下で400℃、2時間の条件で実施した。

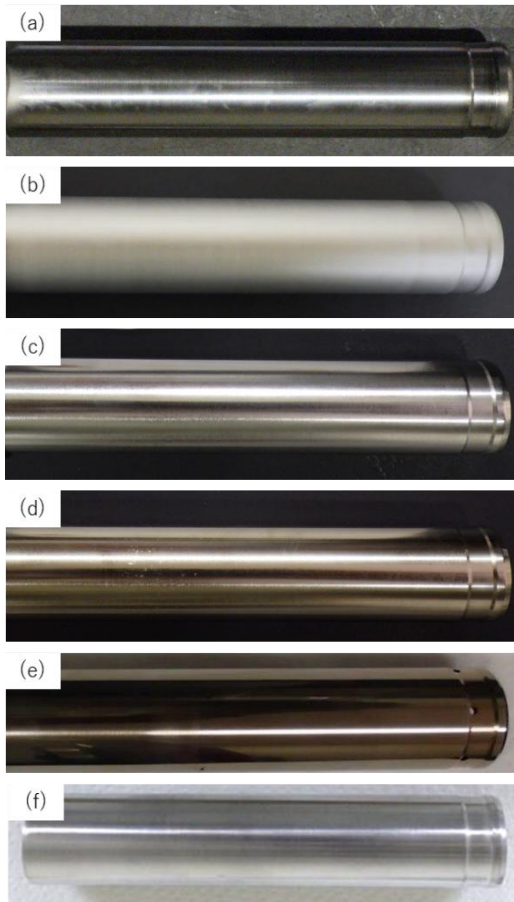


図4 各表面処理試験片の外観写真

- (a) Fe-C 合金めっき
- (b) 硬質アルマイト
- (c) Ni-P
- (d) Ni-P(H)
- (e) 純正ピストン
- (f) 表面処理なし

2.3 摩耗試験

ブレーキ機構部品の内、実際のスペーサー内部には O リングが備えられており、これによってピストンは支えられ、ブレーキを踏むことにより、ピストンがしゅう動する。このとき、ピストン表面と O リング間で摩擦が発生する。単純に O リングが相手であれば、表面処理加工していないアルミニウム合金であっても摩耗は発生しないと考える。しかし、純正ピストンには耐摩耗性を考慮した無電解 Ni-P めっきが加工されていたことから、しゅう動部で摩耗が発生することを想定していると考え。摩耗につながる原因としては、しゅう動部への硬質異物の混入が考えやすく、今回の

場合では、外部からの砂や漏れたブレーキフルードなどの混入が想定される。そこで、これらの影響を極端な状況で再現する形として、以下の試験方法を考案した。

ブレーキ構造部品のスペーサーと同じ内部構造(内径、O リング溝のサイズと設置位置)を有する鋼製の治具を作成し、疲労試験機(株島津製作所製 EHF-UD-100KN 型)によりピストンの繰り返ししゅう動を再現した。図 5、6 に摩耗試験の外観写真及び試験断面図を示す。ピストンを試験治具内部の O リング (EPDM 製、型式 P25.5) で保持するようにセットし、試験治具上部の隙間にけい砂 (JIS 試験用粉体 1 の 3 種) とブレーキフルード (日産製 PART NO. KN100-30005) を混ぜたものを入れ、ピストンを図中の両矢印方向に往復運動させた。往復運動にともない、けい砂とブレーキフルードがしゅう動部に供給される仕組みである。しゅう動距離は $\pm 5\text{mm}$ 、しゅう動速度は 1.5Hz とし、けい砂とブレーキフルードの重量比は $1:4$ とした。

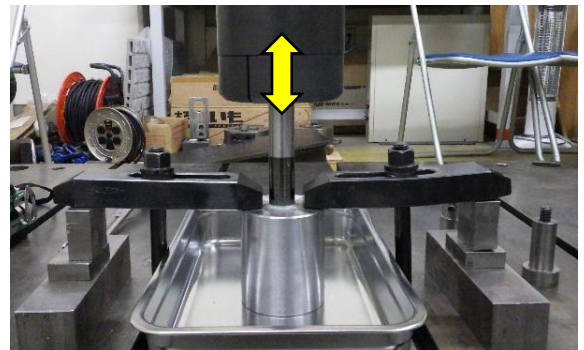


図5 摩耗試験の外観写真

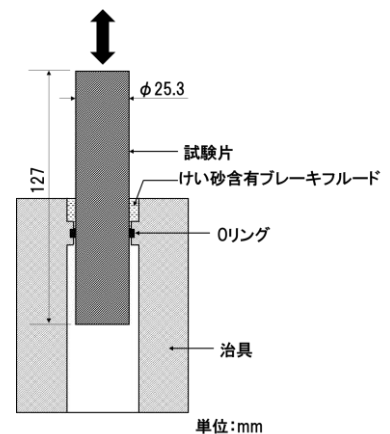


図6 摩耗試験の断面概要図

2.4 摩耗部の形状測定(摩耗量の測定)

摩耗試験後の試験片をスクラッチ試験機(ナノピア社 CB-500 型)の形状測定機能により、図 7 に示す方法で摩耗部の形状測定を行った。図 8 は、形状測定で得られた結果の例である。摩耗量は、下式(1)、(2)により求めることとした。摩耗試験により摩耗した部分(図中赤斜線部)を摩耗断面積(A)とし、ピストンの周囲長(L)との積を、摩耗量(V)とした。

$$V(\text{mm}^3) = A(\text{mm}^2) \times L(\text{mm}) \quad (1)$$

$$L(\text{mm}) = \pi \times D(\text{mm}) \quad (2)$$

ここで、D はピストン直径である。

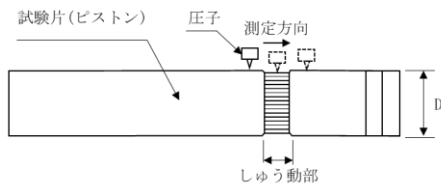


図 7 摩耗断面の形状測定方法

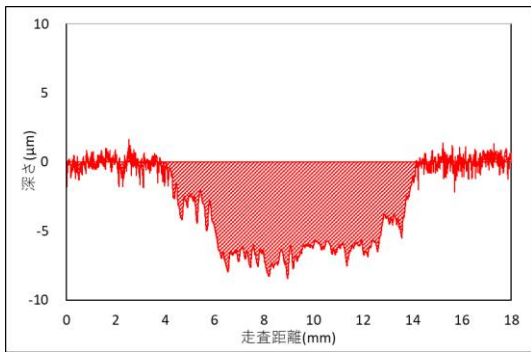


図 8 形状測定結果(例)

3. 試験結果

しゅう動回数と摩耗量の関係を図 9 に示す。

同じしゅう動回数に対して、おおむね、表面処理なし、Ni-P、純正ピストン、Ni-P(H)、硬質アルマイト、Fe-C 合金めっきの試験片の順に摩耗量が小さくなった。このうち、Ni-P(H)、Ni-P、表面処理なしは、しゅう動開始直後からしゅう動回数の増加に伴い、摩耗量が増加していく傾向が見られたが、Fe-C 合金めっき及び硬質アルマイトは、それぞれ、15 万回及び 7.5 万回程度までは、ほとんど摩耗せず、その後、徐々に摩耗量が増加した。

本報告における摩耗試験の摩耗形態は、しゅう動するピストンと O リングの隙間に硬質粒子であるけい砂が入り込み、表面(表面処理被膜)を削るアブレシブ摩耗が主であると考えられる。一般的に、耐アブレシブ摩耗性と硬さの間には相関性があり、硬さが増加するにつれて、耐摩耗性が高くなることが知られている⁵⁾。ここで、Ni-P(H)、Ni-P、表面処理なしの三者を比較すると、硬さが大きくなるほど、摩耗量は小さくなっていることが確認できる。しかし、Fe-C 合金めっき及び硬質アルマイトを含めた場合は、硬さと摩耗量の関係は成立していない。特に、Fe-C 合金めっき及び硬質アルマイトに関しては、初期の段階では、ほとんど摩耗しておらず、この理由として、Fe-C 合金めっき及び硬質アルマイト被膜の性質や素材との密着性に起因した挙動ではないかと考える。Ni-P 被膜については、ある一定の負荷を被膜表面に受けるとき、割れ(クラック)による破壊が生じることが考えられる。これは、硬さが大きいほど発生しにくいものの、一旦クラックが発生すると、密着性が劣る場合は大きな摩耗粉として脱落することが考えられる。Fe-C 合金めっき及び硬質アルマイトについては、密着性が良いために、たとえ割れが発生してもすぐに剥離せず、摩耗の進行は大きくなりにくいと考える。図 10(a)、(b)に、しゅう動回数 30 万回における Fe-C 合金めっき及びしゅう動回数 15 万回における硬質アルマイトのしゅう動部顕微鏡写真を示す。図から、どちらの被膜についても部分的な皮膜の剥離しか見られないことが分かる。

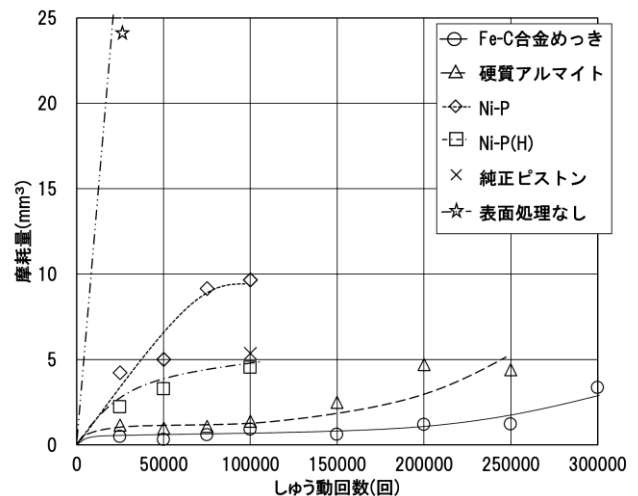


図 9 しゅう動回数と摩耗量の関係

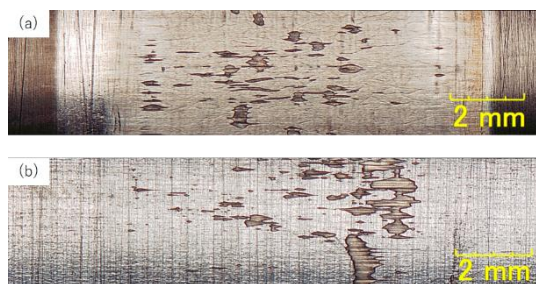


図 10 しゅう動部の顕微鏡観察結果

- (a) Fe-C 合金めっきのしゅう動回数 30 万回後の表面状態
- (b) 硬質アルマイトのしゅう動回数 15 万回後の表面状態

4. 結言

ブレーキマスターシリンダーのピストンの軽量化を図る目的として、A5052 材を素材とし、表面処理に Fe-C 合金めっきした軽量ピストンを試作した。この試作品の耐摩耗性について、実使用の状況を考慮した摩耗試験方法を考案し、耐摩耗性を評価した。試験片は、試作品、純正ピストンの他、硬質アルマイト加工したアルミニウム合金及び無電解ニッケルめっきで処理した鋼を比較対象として用いた。無電解ニッケルめっきは、中リンタイプでめっき加工後、熱処理をしたもの (Ni-P(H)) としていないもの (Ni-P) を用意した。純正ピストンは実車両に搭載されているものである。結果は以下の通りである。

- (1) 摩耗試験の結果から、おおむね、表面処理なし、Ni-P、純正ピストン、Ni-P(H)、硬質アルマイト、Fe-C 合金めっき (試作品) の順に摩耗量が小さくなり、Fe-C 合金めっきについて、実用に耐える耐摩耗性を有するものと考えられる。
- (2) Ni-P(H)、Ni-P、表面処理なしの三者間の比較で

は、摩耗試験開始直後より摩耗が始まり、硬さが大きくなるほど、摩耗量は小さくなった。

- (3) Fe-C 合金めっき及び硬質アルマイトについては、硬さは中程度であるものの、摩耗量は非常に小さく、また、初期の段階でほとんど摩耗しない。この理由として、表面処理被膜の性質や素材との密着性に起因した挙動ではないかと考えられる。

5. 謝辞

おわりに、本報告の実施に際して、使用した CNC 三次元測定機、高温真空炉、精密万能試験機、疲労試験機、スクラッチ試験機は、公益財団法人 JKA の自転車等機械工業振興事業に関する補助金により整備したものである。また、表面処理には日本バレル工業株式会社に協力していただいた。その他、研究への御協力、御支援いただいた関係各位に深く感謝する。

参考文献

- (1) JIS H 8503 めっきの耐摩耗性試験方法 (1989)
- (2) JIS H 8682-1 アルミニウム及びアルミニウム合金の陽極酸化皮膜の耐摩耗性試験方法—第 1 部：往復運動平面摩耗試験 (2013)
- (3) JIS H 8682-2 アルミニウム及びアルミニウム合金の陽極酸化皮膜の耐摩耗性試験方法—第 2 部：噴射摩耗試験 (2013)
- (4) JIS H 8682-3 アルミニウム及びアルミニウム合金の陽極酸化皮膜の耐摩耗性試験方法—第 3 部：砂落し摩耗試験 (2013)
- (5) 木村 好次、野呂瀬 進：普及版トライボロジーの解析と対策 株式会社テクノシステム (2003)、p290.