

ショットピーニング残留応力付与による ピストン鍛造金型寿命改善

Shot Peening Residual Stress Application Leads to Greater Piston Forging Die Life

村松 龍馬 榊原 浩 小倉 純一 山村 易見

要旨

ヤマハ発動機では、ピストンの軽量化のために鍛造ピストンを採用している。近年では、さらなる軽量化のために製品形状の複雑化が進んでおり、それにともない鍛造成型時の金型への負荷応力が高まることによって、金型の早期破損を引き起こしている。金型の短寿命化により、金型償却費が製造コストの14%を占めるまでとなり、コストの低減が課題となっている。鍛造ピストンのコスト競争力を上げるためにも、製品の軽量化とそれにとまなう金型寿命の改善が必須である。

そこで、鍛造ピストン用金型にショットピーニングによって圧縮応力を付与し、成型時に発生する応力を抑制する手法で金型寿命の改善に取り組んだ。その結果、1.7倍の寿命向上効果が確認でき、これにより金型費を40%削減することができた。

Abstract

Yamaha Motors use forged pistons to reduce the weight of its pistons. In recent years, as the product shape has become more complicated for further weight reduction, the load stress on the die during forging has increased. This has been the cause of early breakage in the die themselves. Due to the shortening of the die life, depreciation costs account for 14% of manufacturing costs, making cost reduction an issue to be tackled. In order to increase the cost competitiveness of forged pistons, it is essential to reduce the weight of the product itself and improve the life of the die used to create them.

In order to help achieve this, we applied compressive stress to the die used for forged pistons by shot peening and worked to improve the die life by suppressing the stress generated during molding. As a result, a life improvement effect has been achieved at 1.7 times, and this has resulted in a 40% reduction in die costs.

1 はじめに

二輪車のエンジンは高速回転を常に求められており、慣性重量による大きな振動を起こさないため、軽量ピストンが必要とされている。軽量化されたピストンを成型するには金型の複雑形状が不可欠だが、複雑化により金型の早期破損を招き、ピストンの製造コストの増加につながっている。この問題を解決するために、金型の寿命改善に取り組むことにした。

2 ピストンの軽量化にとまなう問題

ピストンは、強度を保ちつつ軽量にする必要がある。軽量化されたピストンは、従来のピストンのランドとよばれる部位に溝を設けて、そこにリップを立てることで強度と軽量化の両立を図っている(図1)。この軽量溝を鍛造で成型するためには、型に突起形状を設ける必要がある(図2)。しかし、この形状の型は突起部分に応力が集中し破損に至り、突起形状のない従来の型に比べて1/10ほどの寿命となっている。

そのため従来のピストンに比べて、軽量溝をもった軽量化ピストンは金型償却費(以下、金型費)が高くなってしまっている。そこで金型費を下げるための活動として「金型寿命向上」

をテーマとして掲げた。本稿では「金型寿命向上」の取り組みについて報告する。

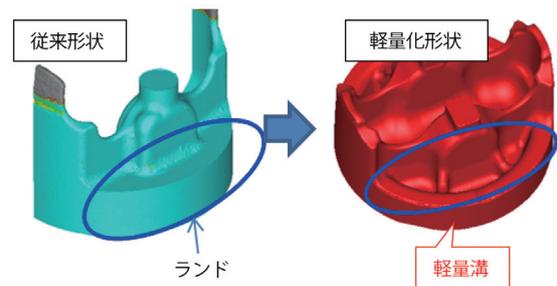


図1 従来ピストンと軽量化ピストン

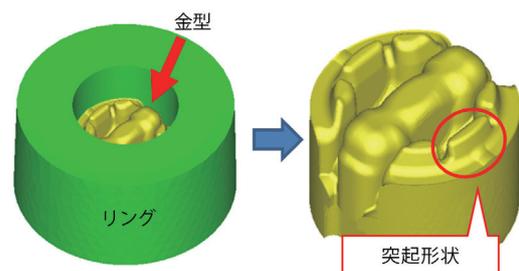


図2 金型の突起形状

3 開発の狙い

ピストンの鍛造コストのうち、50%が金型費で占められている。ピストンの製造コストを下げるため、金型費を下げる施策として寿命を2倍にすることで金型費を1/2にすることを目標とした(図3)。

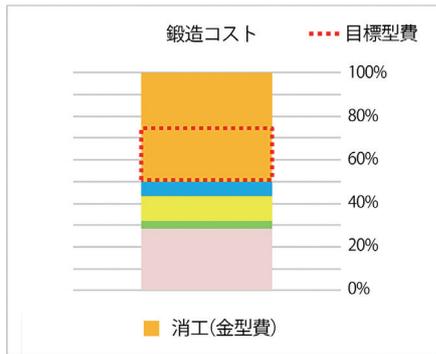
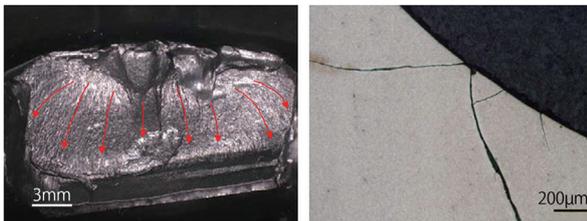


図3 コスト構成

4 現状分析と対策案の検討

4-1. 破損部位の調査

金型寿命を延ばすためには、金型の破損原因を調査する必要がある。寿命の短い金型の破損形態を分析するために、破損した金型の組織観察を行った(図4)。破損部位の組織観察の結果、R部を起点とする放射状模様および疲労破壊の特徴である貝殻模様を確認された。クラック進展中の金型の断面を観察すると、上側に進行するクラックと下側に進行する複数のクラックが発生していることが確認できた。以上のことからR部を起点として疲労破壊が発生し、クラックが進展することによって金型破損が発生していることが分かった。



隅R形状部を起点とする放射状模様および疲労破壊の特徴である貝殻模様が見られる
上側に進行するクラックと下側に進行する複数のクラックが交わっている

図4 組織観察結果

4-2. 解析による応力分布の確認

疲労破壊が起きていることから、起点のR部には高い力が加わっていることが考えられる。そこで構造解析を行い、破損部位周辺の応力分布を確認した。解析結果より、クラックの起点部分で一番大きな引張応力が出ているのが分かった

(図5)。この引張応力が繰り返し発生することで疲労破壊が起きていると考えられる。

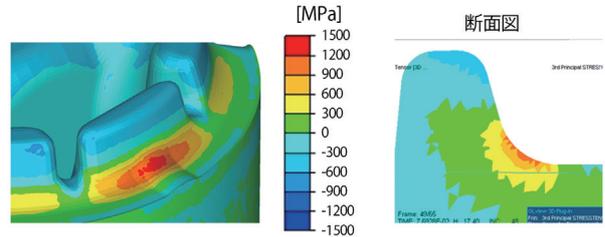


図5 破損部位の最大主応力分布

4-3. 疲労現象

延性金属においては、疲労現象は繰り返し応力のもとで材料の表面に生ずる非可逆的な滑り変形が、次第に表面に微細な凹凸または入込み／突出しを作り出す過程からなることが知られており、疲労亀裂は、通常、そのような入込み／突出し部に形成される^[1](図6)。

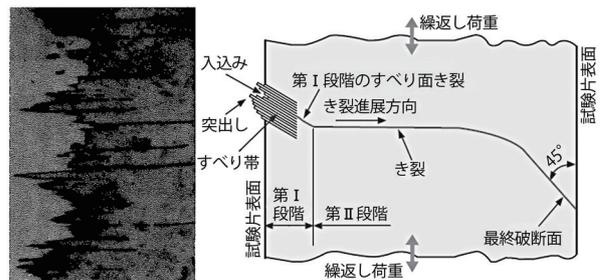


図6 高力アルミニウム合金平滑材の疲労で観察される種々の破壊形態^[1]

組織観察と構造解析の結果から、今回のピストン金型にも同様の現象が起きていると考えられる。滑りを起こさないためには、繰返し応力を抑制する必要がある。その方法として、繰返し応力が発生する場所にあらかじめ圧縮残留応力を付与しておき、滑りを抑制する手法がある。

そこで今回の取り組みでは、圧縮応力を付与する方法を検討することにした。圧縮応力を付与する工法を表1に示す。工法の選定にあたっては、ショットピーニング、磨き、浸炭焼入れ、高周波焼入れの4工法について、圧縮応力の付与の大きさ、金型の変形のしにくさ、金型への処理コストを評価した。

磨きに関しては、すでに金型製作工程の最終工程として導入済みである。浸炭焼入れは、今回の金型材である工具鋼には適していない。高周波焼入れに関しても、破損部位がR部をもつ突起形状であるため、今回の金型には向いてない。ショットピーニングに関してはどの手法よりも大きな圧縮応力を付与することができ、変形しにくい処理であるため今回の金型に最も適している。

以上のことから、ショットピーニングを圧縮応力付与の工法として選定した。

表1 圧縮応力工法比較

工法	圧縮応力	備考	変形しにくい	コスト
ショットピーニング	◎	大きな圧縮応力を付与できる	◎	○
磨き	○	導入済み	◎	△
浸炭焼入れ	○	工具鋼には向かない	×	◎
高周波焼入れ	○	複雑形状には向かない	×	△

4-4. ショットピーニング

ショットピーニングとは、冷間加工の一種である。ショットピーニングを一言にしていえば、無数の鉄あるいは非鉄金属の丸いたまを高速で金属表面に衝突させることである(図7)。これら鉄の丸いたまをショットという。一般的には材料に比べショットは硬いので、このショットが高速で材料の表面に衝突すると、材料表面がへこみ、表面に丸いくぼみを残すようになる。従ってショットピーニングを行った面は無数のくぼみ(痕)でおおわれるようになり梨子地模様となるが、表面の硬さが増し、また繰返し荷重に対しては表面層に付与された圧縮残留応力が相殺する形で作用し疲れ強さが増す^[2]。

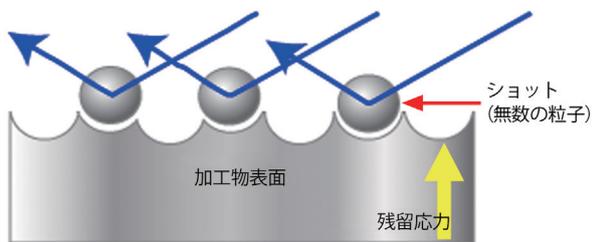


図7 ショットピーニング^[2]

5 圧縮応力による寿命向上効果

5-1. 圧縮残留応力付与と疲労寿命の確認

金型に残留圧縮応力を付与する前に、試験片を用いて、残留応力が付与できるか、また疲労寿命が向上するか疲労試験を実施し確認を行った。試験片材料はピストン鍛造に用いられるマトリックスハイスに金型と同様の焼入れ焼き戻しを施したものを使用した。

疲労試験の方法は様々あるが、今回は表面起点での破損を促進する回転曲げ疲労試験を選択した。熱の影響を除外するために、温度は常温にて実施した。応力振幅は、疲労形態を実機に近付けるため、10000回前後で破損する応力を設定した(表2)。

回転曲げ疲労試験は島津製小野式回転曲げ疲労試験機を用いて行った(図8)。

表2 回転曲げ疲労試験条件

試験機	島津製小野式回転曲げ疲労試験機
回転数[rpm]	3460
試験温度	室温
応力振幅[MPa]	±1400
材料	マトリックスハイス
熱処理	焼入れ焼き戻し



図8 島津製小野式回転曲げ疲労試験機

試験片は、生産型と同等条件で作成した試験片Aと、その試験片にダブルショットピーニングを施した試験片Bを用意した。ダブルショットピーニングとは、異なる大きさのメディアをそれぞれ照射して適度な深さまで応力を付与する方法である。まずはX線回折装置(以下、XRD)を用い、表面の残留応力を比較した。

測定の結果、試験片Aは-621MPa、試験片Bは-1241MPaの残留応力を確認した。試験片Aに対して、ダブルショットピーニングを施した試験片Bの方が-620MPa圧縮側に応力が付与されていることが分かる(図9)。

この試験片Aおよび試験片Bを用いて、回転曲げ疲労試験を実施した。

結果は、試験片Aが10200回で破損、試験片Bが39700回で破損した(図10)。ダブルショットピーニングを施すと、4倍の寿命向上効果があることが確認できた。

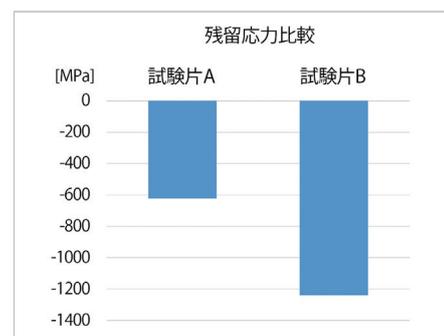


図9 残留応力比較結果

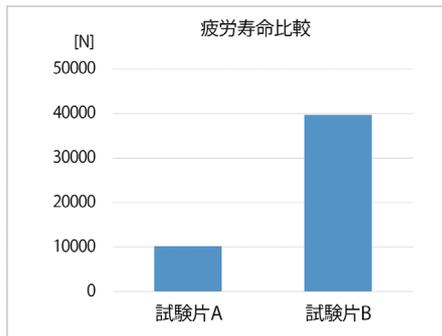


図10 疲労寿命比較結果

5-2. 圧縮残留応力の付与深さ

与える圧縮残留応力の深さや値を変化させた際、寿命に影響があるかの確認を行った。

まず、残留応力の付与深さに差をつけることができるか確認する。そのためにメディアの大きさと処理回数を変えて、深さ方向の分布に変化を加えた。

電解研磨機とXRDを用いて、条件を変えながらそれぞれの試験片の残留応力の付与深さを確認した。その結果、トリプルショットピーニング>ダブルショットピーニング>シングルショットピーニングの順に、深い部分まで圧縮応力が付与できていることが分かった(図11)。

次に、残留応力の値をさらに圧縮側に増やそうと試みた。しかし、条件を変えても-1200MPa以上付与することができなかった。この理由としては、材料の降伏応力以上の残留応力は付与できないことが考えられる。

残留応力の付与した深さと寿命の関係を見るために、それぞれの処理方法で試験片を用意し、疲労試験を実施した。今回の疲労試験では、実機の鍛造状態をできるだけ模擬するために、周波数や試験温度を実機に合わせて設定し、引張圧縮試験で再現した(表3)。

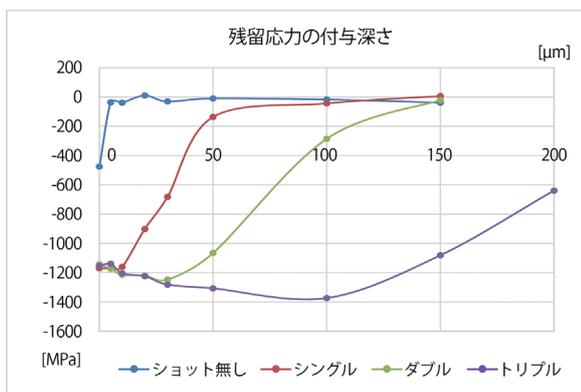


図11 残留応力比較結果

表3 回転曲げ疲労試験条件

試験機	油圧サーボ疲労試験機
周波数[Hz]	10
試験温度[°C]	300
応力振幅[MPa]	±1200
材料	マトリックスハイス
熱処理	焼入れ焼き戻し

疲労試験の結果は、深さ方向で残留応力の分布が変わっても大きく寿命に影響しないことが分かった(図12)。現状はダブルショットピーニングを主な改善手法として用いているが、今後はコストメリットのあるシングルショットピーニングも検討していきたい。

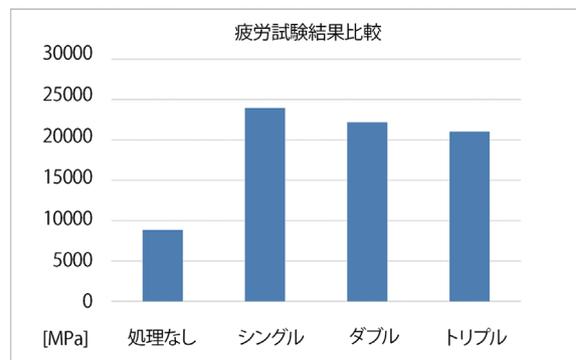


図12 残留応力の付与深さと寿命の関係

5-3. 圧縮残留応力と熱の関係性

ここまでの試験を通し、ショットピーニングの寿命向上効果として以下のことが分かった。

- ・ 常温での疲労試験では4倍の効果を確認
- ・ 300°Cでの疲労試験では2倍の効果を確認

寿命効果に乖離が見られたが、2つの疲労試験の大きな違いとして温度があげられる。温度が加わったことで、応力除去焼きなましのような現象が起り、付与した圧縮応力が緩和してしまった可能性がある。

そこで熱により、付与された圧縮応力がどれだけ解放されるか確認することにした。金型材にダブルショットピーニングを施した試験片を用意して、炉で熱を与えた時の残留応力変化を確認した。

炉の条件を決めるにあたり、ピストン生産時にデータロガーを用いて金型の温度を確認した。ピストンを1000shot生産した際、破損部位において、300°Cで50分(条件1)、210°Cで370分(条件2)の熱負荷が加えられていることが確認できた(表4)。

表4 熱処理条件

	温度 [°C]	時間 [min]
条件1	300	50
条件2	210	370

試験片に条件1、条件2の熱負荷を与え緩和状態を確認した。それぞれの加熱前後の残留応力を測定し、変化量の確認を行った。測定結果は各条件2点を複数回測定した平均値である。

まず、試験片に条件1で熱負荷を与えた結果、熱処理前に -1261MPaだったものが -1100MPaまで応力が緩和された(図13)。

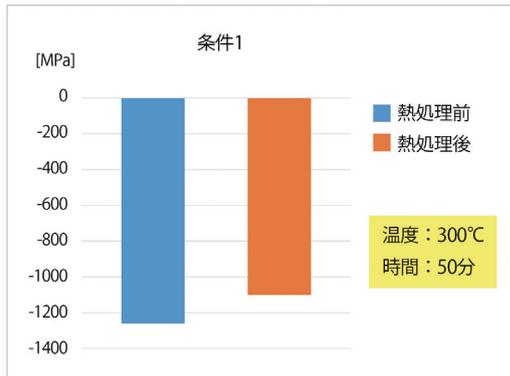


図13 熱による応力緩和—条件1

次に、試験片に条件2で熱負荷を与えた結果、熱処理前に -1245MPaだったものが -1132MPaまで応力が緩和された(図14)。

条件1は161MPa、条件2は113MPa引張方向に推移した。それぞれの残留圧縮応力の緩和にあたり、2つの熱負荷による緩和量の和が成り立つと仮定すると、1000shot生産した際、付与した圧縮応力が274MPa程緩和されることが推測できる。このことから、金型に残留応力を付与する際、2000~3000shotごとにショットピーニングを施すことで型表面の圧縮応力を維持できると考えられる。

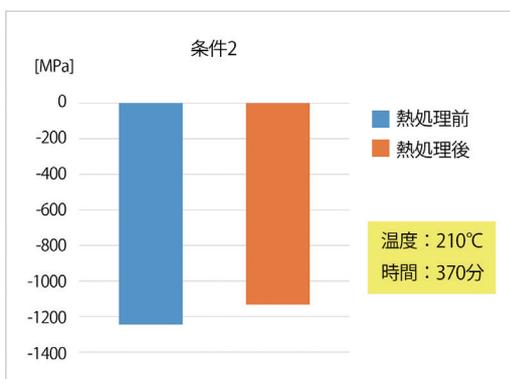


図14 熱による応力緩和—条件2

5-4. 生産での寿命検証

生産型と生産型にダブルショットピーニングを施した金型(以下、トライ型)を用意し、実機での寿命を比較した。まず、生産型にて1000shotごとにXRDを用い表面の残留応力の

測定を実施した。3000shot時に型表面を観察した際、初期クラックの兆候がみられ、2000~3000shotの間で初期クラックが発生していることが確認できた。残留応力の変化としては、初期クラックが発生するまで生産するごとに表面の残留応力がプラス方向(圧縮応力が緩和する方向)に推移することが分かった(図15)。この生産型は5300shotで破損に至った。

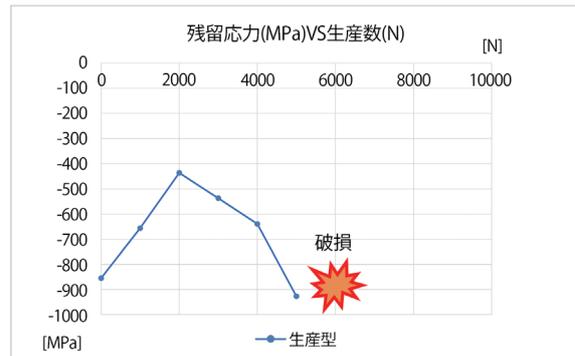


図15 生産金型の残留応力の変化

0shotの時点で表面に圧縮残留応力が付与されているのは、金型作成の最終工程である磨きで圧縮応力が付与されたと考えられる。3000shotで残留応力が圧縮側に推移しているのは、クラックが発生したことで最表面に引張応力が発生しなくなったからと推測される。

トライ型では表面の圧縮残留応力を維持するために、定期的にダブルショットピーニングを処理し、割れにくい表面状態を維持した。(0、2000、5000、7000shot時にダブルショットピーニングを実施。)このトライ型では、5000shot時に型表面に初期クラックの兆候がみられ、4000~5000shotで初期クラックが発生していることが確認できた。トライ型では8800shotで破損に至った(図16)。

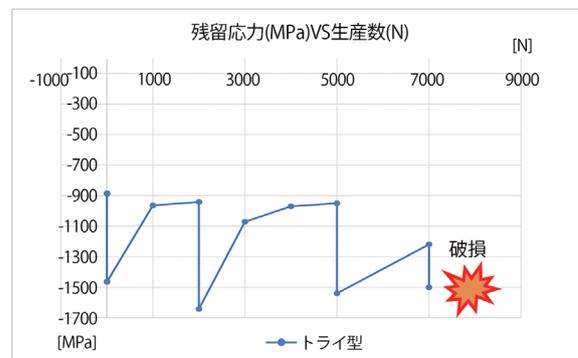


図16 トライ型の残留応力の変化

5-5. 圧縮応力付与に関するまとめ

金型にダブルショットピーニングを施すことで、通常生産用金型の1.7倍の寿命向上効果が確認できた。金型表面にもそ

の効果があらわれている。5000ショット時の生産型とトライ型を観察した際、ショットを施したトライ型の方が、クラックの発生を遅らせることができていることが分かる(図17)。ダブルショットピーニングを施すことで、耐疲労効果を見込めることが分かった。

熱による応力緩和はトライ型でも確認ができた。海外拠点では潤滑剤の塗布方法の違いにより、国内より低い型温度で生産しているため、ショットピーニングの効果は国内よりも期待される。

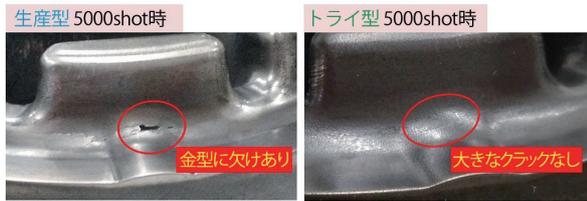


図17 金型表面の比較

6 寿命改善の成果

今回のショットピーニングによる型寿命向上の取り組みを通して、寿命向上を見込めるところまで進めることができた。現在までの取り組みをコストの観点で見たととき、鍛造コストの金型費としては、金型寿命向上の効果により40%削減となっている。目標まであと10%の削減が必要である(図18)。

今後の方針としては、ダブルショットピーニングの処理費用の低減と海外拠点でのN増し検証による寿命向上効果の確認を行っていき、目標達成を目指す。

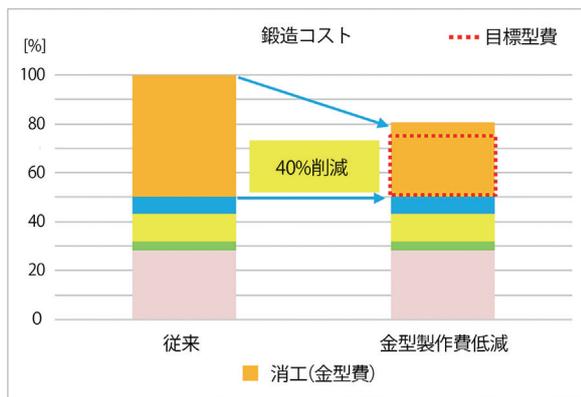


図18 現時点でのコスト効果

7 まとめ

- (1) 金型材にショットピーニングを用いることで2倍から4倍の寿命向上効果が確認できた。
- (2) 熱影響のある環境では応力開放を起こすが、生産実績から1.7倍の寿命向上効果が確認できた。

- (3) ショットピーニングを用いた型寿命向上の取り組みで、鍛造コストとしては、金型費を40%削減することができた。

今後も目標達成のために、ショットピーニング費用の削減活動と海外拠点にて本手法を展開し、寿命向上効果の確認を行っていく。

■謝辞

本調査にあたりエンシュウ株式会社スタッフの方々に多大なご協力を頂いたことに深謝する。

ご指導頂いた、イノベーション社会連携推進機構の中村保客員教授、静岡大学大学院の早川邦夫教授に感謝の意を表す。

■参考文献

- [1]中曽根 祐司: 金属疲労の基礎とFEM解析・寿命および耐疲労設計への応用 JTCセミナー資料
 - [2]ショットピーニング技術協会: <http://www.shotpeening.gr.jp/shotpeening/index.html>
- ※引用内にある「ショット」は本稿の「メディア」と同義

■著者



村松 龍馬
Tatsuma Muramatsu
生産技術本部
生産技術部



榎原 浩
Hiroshi Sakakibara
生産本部
製造技術統括部
PT技術部



小倉 純一
Junichi Ogura
生産技術本部
生産技術部



山村 易見
Yasumi Yamamura
生産技術本部
生産技術部