

エンジンコンポーネントにおけるショットピーニング適用技術の進歩

Progress of Shot-peening Application Technique for Automotive Engine Components

安達修平 Shuhei Adachi

伊藤寿浩 Toshihiro Ito

●技術本部 基盤技術研究室

要旨

地球環境の保全や省資源等の社会的ニーズから、自動車ならびにモーターサイクル用エンジンへの要求は厳しさを増している。ショットピーニングは自動車産業界においては、比較的早くから補助的な工法として工程の中に取り入れられてきた。近年、制御ショットピーニング技術の発達によって、従来の技術資産を活かしながら、比較的安価に、コンポーネントの信頼性を飛躍的に高めることのできる加工技術としての認識が広まり、その応用はますます拡大する傾向にある。そこで、代表的な主運動系のコンポーネントとしてコンロッド、クランクシャフトを、また、動弁系の代表としてエンジンバルブをとり上げ、軽量化と高信頼性を目的として、制御ショットピーニング技術を適用した事例とその効果について最近の報告例を紹介する。

1 はじめに

自動車エンジンは、高性能や経済性といった顧客ニーズに加え、近年特に、地球環境保護や省資源などの社会的ニーズの高まりから、低エミッション、低燃費、軽量・コンパクト化、静肅性など種々の要求に高い次元でこたえることを求められてきている。こうした要求に対処するための施策の中で、材料とその加工技術が重要な役割を担っていることは論を待たない。とりわけ、ショットピーニングとその周辺技術は、従来の技術資産を活かしながら、比較的安価に、飛躍的な改善効果が得られる可能性を秘めており、自動車産業では早い時期から様々な部品に適用してきた。本稿では、最近の適用事例を紹介しながら、今後の動向を探る。

シリンダヘッドと動弁機構は、エンジンの性能を支配する重要な部分であり、エンジンの特性に応じて種々のタイプがある。図2にその代表的な構造と構成部品を示した。⁽²⁾

2 エンジンの構成部品とショットピーニングの適用例

自動車エンジンの代表的なものとして、4サイクルガソリンエンジンの構造例を、図1に示した。⁽¹⁾図中の、ピストン頂部付近を境に、それより上の部分がシリンダヘッド、下の部分がシリンダブロック（以下、ブロック）である。シリンダヘッドには吸・排気系が取り付けられ、ガス交換を制御するための動弁機構と点火プラグが組み込まれている。ブロックには、混合気の爆発による燃焼圧を運動に変えるための主運動系として、ピストン、コンロッド、クランクシャフトがあり、シリンダを取り囲むように冷却水通路と潤滑油通路が形成されている。

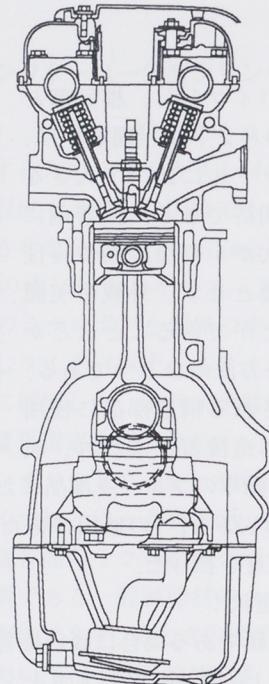
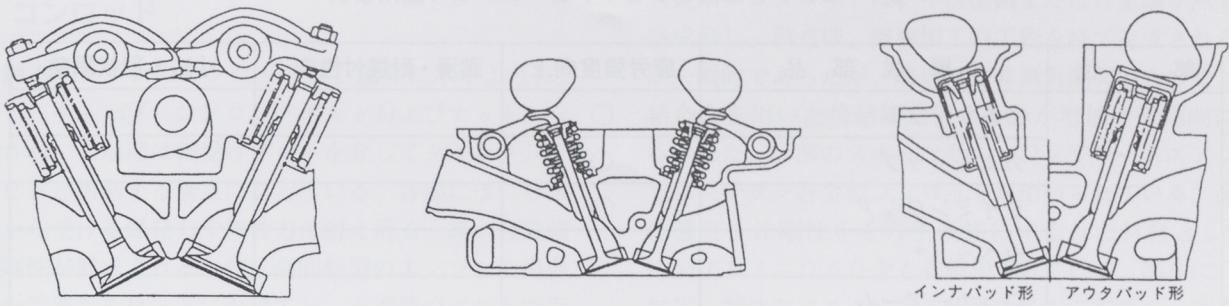


図1 自動車用ガソリンエンジンの構造例⁽¹⁾



(a) 間接駆動式（シーソ形）

(b) 間接駆動式（片持ち形）
図2 シリンダヘッドと動弁機構⁽²⁾

(c) 直接駆動式

また、図3には、主運動系の構成部品を示した。⁽³⁾ エンジン重量の中で最も大きな部分を占めるのは前述のブロックであるが、重量面で出力性能に大きな影響を与えるのは、ピストン、コンロッドをはじめとする主運動系であり、これらの部品に対する軽量化の追求は飽くことがない。

さらに、これらの部品のほとんどは、回転や往復運動の摺動部をもっており、単なる疲労強度特性にとどまらず、潤滑性、耐摩耗性や耐凝着性などのトライボロジー特性に関する高い信頼性が要求されている。制御されたショットピーニング処理は、こうしたエンジン構成部品に対しより高い疲労強度レベルを保証すると同時に、潤滑を確保し、表面損傷に対する抵抗力を付与できる有効な技術のひとつである。

表1は、各部位の構成部品におけるショットピーニング処理の実施例を、目的別に分類したものである。^(4~6)多くの部品は疲労強度向上を目的としてショットピーニング処理が施されているが、この中には、フレッティング疲労に代表される接触により生じた表面損傷に起因する現象の抑制を目的にしたものも含まれている。また、表中の目的の項目にある「寸法精度・形状の調整」とは、シャフトの曲がり矯正やリング形状部品の真円度の確保のためにショットピーニングを利用することで、ピーンフォーミングの一種である。

以下では、コンロッド、クラランクシャフトおよびエンジンバルブについて、ショットピーニングの適用例を紹介する。

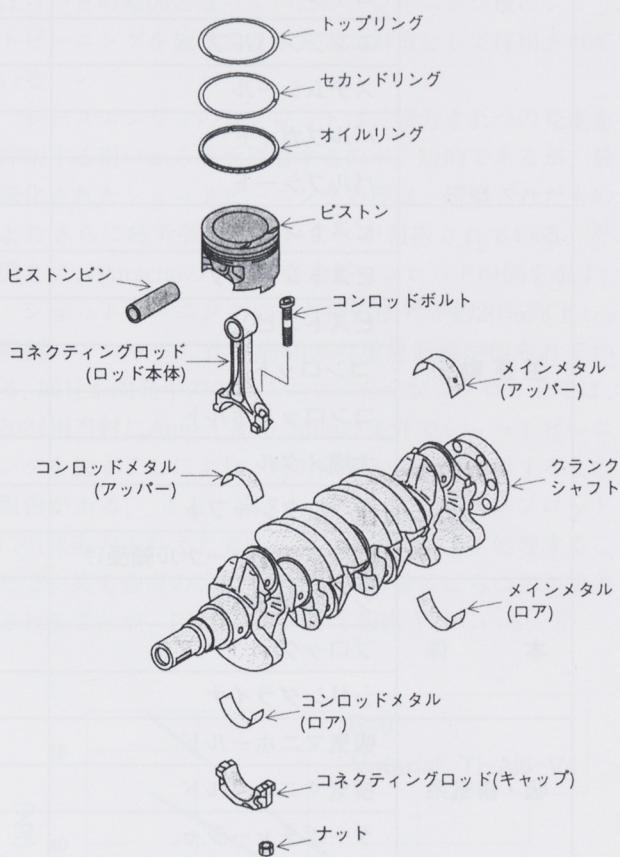
図3 主運動系の構成部品⁽³⁾

表1 エンジン部品とショットピーニングの適用事例

部 位	構 成 部 品	疲 労 強 度 向 上	潤 滑・耐 燃 付 性 向 上	寸 法・形 状 調 整
動弁系	カムシャフト	○		○
	カムキャップ	○		
	タイミングギア	○		
	タペット*			
	ロッカーアーム			
	アジャストスクリュ			
	オートラッシュアジャスタ			
	バルブスプリング	○		
	バルブスプリングリテーナ	○		
	コッタ			
	エンジンバルブ	○		
	ステムシール			
	バルブガイド			
	バルブシート			
主運動系	ピストン		○	
	ピストンリング			
	ピストンピン			
	コンロッド	○		○
	コンロッドボルト	○		
	大端メタル			
	クランクシャフト	○		
	クランクジャーナル軸受け			
本体	シリンダヘッド	○		
	ブロック	○		
	シリンダライナ		○	
吸・排気系	吸気マニホールド			
	排気マニホールド			
	ターボチャージャ	○	○	
燃料系	燃料ポンプ			
	インジェクタ	○		
要素部品	ボルト	○		
	ギア	○	○	

*:バルブリフタ

3 コンロッド

自動車エンジンのコンロッドは、図4に示すように、ロッド、キャップ、コンロッドボルトおよびナットから構成され、大端部は軸受けメタルを介してクランクシャフトピンと摺動する構造になっている。各部には、ピストンから受ける爆発力や慣性力に耐え得る、高い疲労強度と剛性が要求される。特に高回転型のエンジンの場合は、小端部からロッドにかけてと、大端部のボルト座面隅部の疲労破壊の危険性に対し、充分な配慮がなされなければならない。さらに、大・小端部では、相手部品との干渉による摩耗や焼き付き、ブッシュ間でのフレッティング疲労などが問題となる場合がある。

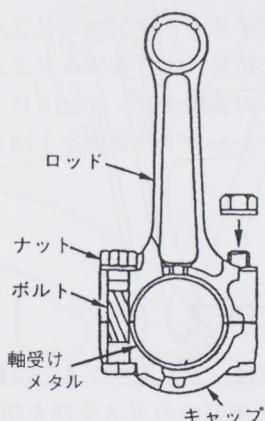


図4 コンロッドの構成⁽²⁾

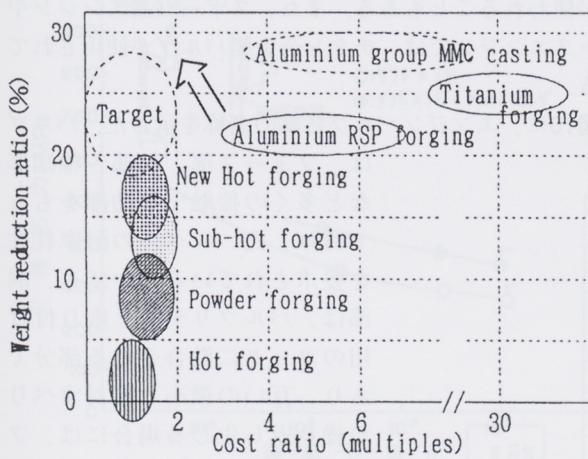


図5 種々の材質・製法によるコンロッドの軽量化効果とコスト比⁽⁷⁾

従来、コンロッドは、中炭素鋼または合金鋼を熱間鍛造成形し、熱処理、機械加工の工程を経て完成されるのが一般的であったが、最近では非調質鋼製のものや、焼結合金を用いた焼結鍛造製のものが増加する傾向にある。また、一部のスポーツ系エンジンやレースエンジンでは、チタン合金製コンロッドが用いられている。高い比強度・比剛性をもち生産性にすぐれた材料として、P/Mアルミニウム合金も有望視されている。図5に、各材質・製法のコスト比率と軽量化効果の関係の一例を示した。⁽⁷⁾ この例では、鋼製コンロッドは、材料の改良とショットピーニングの適用により従来比約50%の疲労強度向上が計られ、軽量化に大きく貢献している。特に、鍛造後に実施する冷間コイニング工程では、表面に大きな残留引張応力が発生するため、疲労強度の低下や強度ばらつきの原因となっていたが、コイニング後にショットピーニングを施すことが有効な対策として採用されている。

レースエンジンのコンロッドは、疲労きれつの発生を抑制する狙いから表面研磨するのが一般的であるが、最適化されたショットピーニング処理は、研磨されたものよりさらに疲労強度が高いことが報告されている。⁽⁸⁾ 図6に、Porscheのチタン合金製コンロッドの例を示す。

ショットピーニングにより疲労限界が約20%向上し、鋼製コンロッドに比べ約40%の重量低減が得られている。同社が開発中のアルミニウム合金製コンロッドでは、2024相当材にAlmen A=0.3mmの条件でショットピーニングを施すことにより、疲労限界が約50%上昇するとの報告がある。また、図7に示したように、コンロッドに引張応力を与えたままショットピーニング処理することで、疲労強度の大幅な上昇と共に強度ばらつきが改善されることが、BMWの例として報告されている。⁽⁸⁾

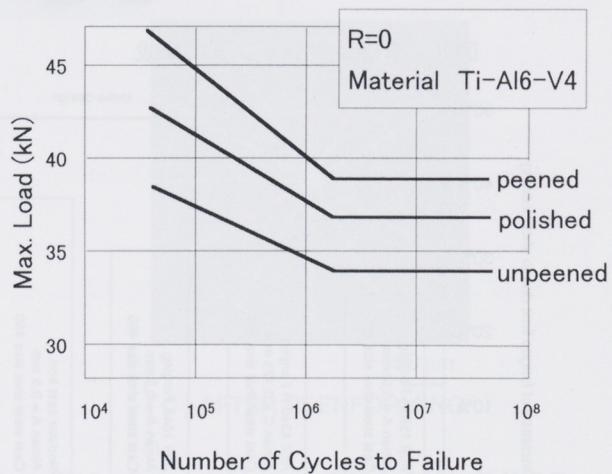


図6 チタン合金製コンロッドの疲労強度⁽⁸⁾

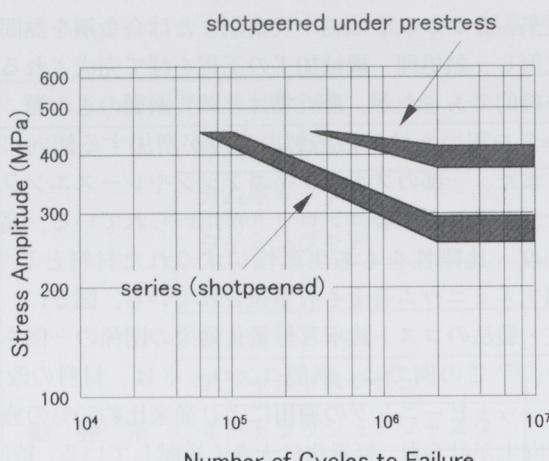


図7 ショットピーニングによるコンロッドの疲労強度ばらつきの改善

4 クランクシャフト

ピストンの往復運動を、コンロッドと共に、回転運動に変換するコンポーネントがクランクシャフトである。図8に、各部の名称を示す。ピンおよびジャーナルは曲げおよびねじりの繰り返し応力を受けるため、とくにフィレット部の疲労強度が重要であると同時に、軸受けメタルとの摺動部の潤滑が確保され、焼き付きなどのトラブルを起こさないことが要求される。

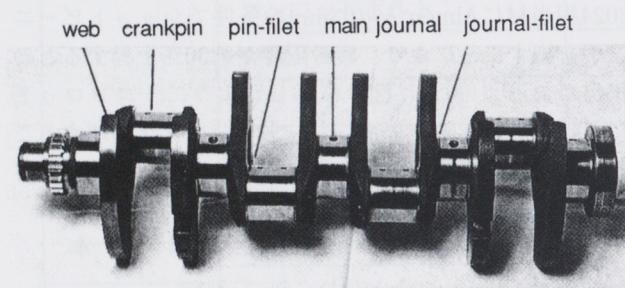


図8 クランクシャフトの構成

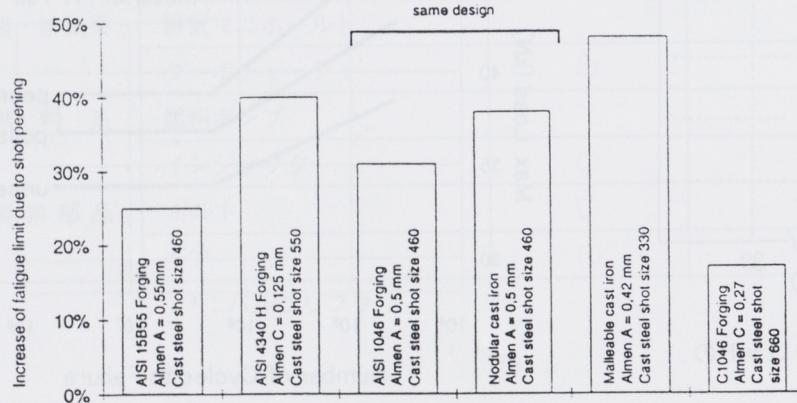


図9 ショットピーニングによるクランクシャフトのフィレット部の疲労強度改善例 著しく疲労強度が低くなる

代表的なクランクシャフト用材料としては、JIS S50Cなどの中炭素鋼や、JIS SCM440などの合金鋼があり、鍛造後、それぞれ目的に応じた熱処理を施して使用される。また、Vを微量添加した非調質鋼も多く用いられ、Sなどの添加により快削性の改善を計ったものが多用されている。機種によっては、低コスト化、振動特性上の要求から、ダクタイル鉄製のクランクシャフトも採用されている。この他、レースエンジンには窒化鋼が用いられる場合もある。

クランクシャフトのフィレット部にショットピーニングを施して疲労強度を改善した例を、図9に示した。⁽⁹⁾ジャーナルベアリング径は約95mmで、代表的なショットピーニングパラメータは、ショット粒径：S460、Almen A = 0.55 mm、カバレージ：100%以上である。材質の異なる同一サイズのクランクシャフトにショットピーニングを施した結果、より安価なダクタイル鉄製のクランクシャフトの強度が、ショットピーニングを施さない鍛造クランクシャフトの強度を上回ることが報告されている。

5 エンジンバルブ

エンジンバルブは、カムシャフトの位相に対応して往復運動を行い、燃焼室のガス交換を制御する部品で、通常、1シリンダ当たり、吸気バルブ、排気バルブそれぞれ1～2本ずつ配置されている。⁽¹⁰⁾吸気バルブには、JIS SUH3やSUH 11相当材が用いられ、排気バルブには、JIS SUH35やSUH36相当材などが用いられる。排気温度が特に高いエンジンの排気バルブには、Inconel系の合金が使われることもある。また、スポーツ系エンジンやレースエンジンでは、チタン合金製バルブが使用されている。

図10に、エンジンバルブ各部の名称を示した。バルブは、フェース部、軸部、軸端部など多くの接触・摺動部をもっており、高いレベルの耐摩耗性を要求されている。中でも、溝部は、バルブリテーナ取り付け用のコッタに勘合される部分であり、互いの微小な相対すべりが繰り返し生じる場合には、フレッティング摩耗が発生する危険性がある。この面損傷を起点として疲労破壊にいたる場合は、

ことが知られており、有効なフレッティング防止策を施す必要がある。⁽¹¹⁾ バルブ溝部のコッタ勘合部近傍に微細粒のハードショットピーニングを施すと、フレッティング損傷が抑制され、その結果、疲労強度が向上する。図11に、その実施例を示す。⁽¹²⁾ ショットピーニングパラメータは、ショット粒径0.1~0.2mm (steel beads, 硬度700Hv以上), アークハイト0.12~0.135mmA, カバーレージ100%以上である。

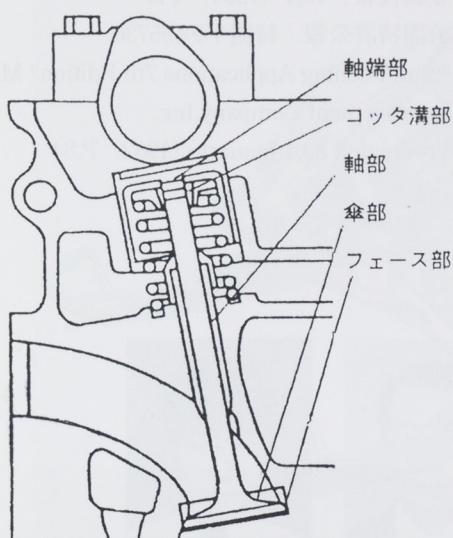
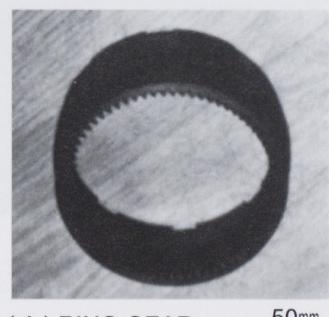


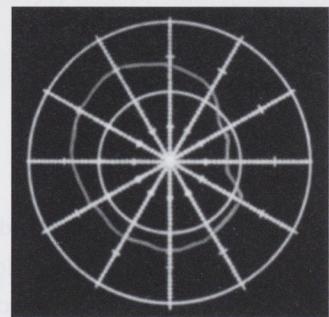
図10 エンジンバルブの構成

6 その他の事例

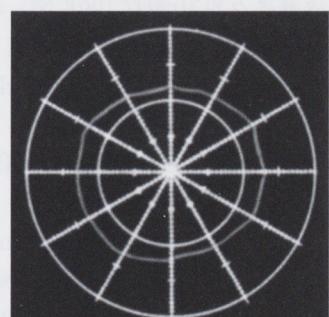
ショットピーニングの適用例には、疲労強度の改善や潤滑性の向上を狙ったものが多いが、部品の形状を調整する目的でショットピーニングを利用する場合がある。図12はその一例で、浸炭焼入れ焼戻しの熱処理を施した鋼製リングギアについて、真円度の不良をショットピーニングにより修正したものである。⁽¹³⁾ このほかにも、比較的韌性に乏しく曲げ修正の難しい鉄製カムシャフトを、ショットピーニングにより矯正しているミシガン州ポンティアックのGeneral Motorsの製造ラインの例などがある。⁽¹⁴⁾



(A) RING GEAR 50mm



(B) BEFORE PEENFORMING 50 μm



(C) AFTER PEENFORMING 50 μm

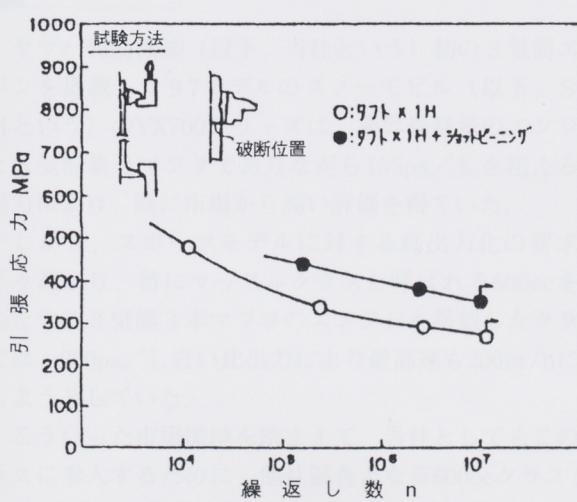


図11 ショットピーニングによるバルブ溝近傍のフレッティング疲労の改善例

図12 ショットピーニングによるリングギアの形状矯正例

7 まとめ

- 1) 自動車エンジンの構造を概説し、ショットピーニング処理の適用実績のあるコンポーネントを目的別に分類した。ショットピーニングの目的は、次の3つに大別することができる。
 - (1) 疲労強度向上
 - (2) 潤滑性確保
 - (3) 形状調整
- 2) 代表的な自動車エンジンコンポーネントとしてコントロッド、クランクシャフト、バルブをとり上げ、その要求機能とショットピーニング技術の適用例について紹介した。いずれの部品も、ショットピーニング処理の狙いは疲労強度の向上と面損傷の防止である。
- 3) 形状調整手段としてのショットピーニング処理の実例を2例紹介した。特に、曲げ修正の難しい低靭性材の矯正法として有効と思われる。

最後に、本稿をまとめるにあたり、多くの貴重な資料を提供頂きました、Metal Improvement Company社のMr. James Daly, Mr. Jerome Mogul両氏に、深く感謝いたします。

■参考文献

- (1) Menne,R.J, Rudderham,T.,Latz, F. and Brohmer, A.M : "Neue Vierventilmotoren fuer den neuen Fiesta" , MTZ(Motortechnische Zeitschrift), Vol.56 (1995) P379
- (2) ヤマハ発動機(株) モータサイクル編集委員会編著:モータサイクル,山海堂,1991
- (3) 日経メカニカル, No.499(1997) P.78
- (4) Johnson,D.E., : "Shot Peening for Racing" , Stock Car Racing Magazine, Feb. 1987
- (5) 倉富, et.al. : 自動車技術会学術講演会前刷集, 946(1994) P.185
- (6) Coyell, J.W. and Garibay,R.P : "Enhanced Fatigue Life of Hypoid Gears with Precision Shot Peening" , SAE Tech. Paper Series 962162 (1996)
- (7) 石原 : 自動車技術会学術講演会前刷集, 962 (1996) P.197
- (8) Shuetz W. : "Shot Peening of Automobile Components", P.217 Marsh,K.J., ed., "Shot Peening : Techniques and Applications",

Engineering Materials Advisory Service,Ltd.
(EMAS), London, UK 1993

- (9) Burrell N.K. : "Controlled Shot Peening to Increase the Fatigue Properties of Crankshafts" in "Proceedings of the Second Int. Conf. on Shot Peening", The American Shot Peening Society, Chicago, 1984
- (10) 日経メカニカル, No.500(1997) P.84
- (11) 平川 :"フレッティング疲労の事例と対策", 住友金属技報, 46,4 (1994) P.4
- (12) 公開特許公報 特開平9-195730
- (13) "Shot Peening Applications 7th Edition" Metal Improvement Company,Inc.
- (14) Production 89,1 January (1982) P.84

●著者



安達 修平



伊藤 寿浩