

軽量，低コストアルミ VTEC ロックアームの開発

Development of Light Weight and Lower Cost Aluminum VTEC Rocker Arm

田 中 力*
Chikara TANAKA

山 田 範 之*
Noriyuki YAMADA

要 旨

VTEC ロックアームの軽量，低コスト化を目的として，アルミダイカスト素材を用いた VTEC ロックアームを開発した。動弁系駆動摩擦損失低減に有効なローラフォロワを使ったロッカーアームが主流であるが，アルミ素材で VTEC 機構を成立させるため，強度の必要な VTEC の連結穴については，そのローラベアリング軸を中空とした，ローラ同軸構造を採用し，ローラ軸の固定方法を圧入による固定構造とすることで，VTEC ロックアームに必要な強度と精度の両立を達成した。

結果として，従来の鋼系鍛造 VTEC ロックアームに対し，重量，コストとも 20% 以上低減し，Fit にてはじめて量産化された。

ABSTRACT

A VTEC rocker arm has been produced from aluminum die-cast materials to reduce weight and lower cost. The new arm, like the majority of rocker arms in use, employs a roller follower to reduce drive friction loss in the valve system. The VTEC connecting holes, in which strength must be guaranteed, were focused on to enable the shift to aluminum in the new VTEC mechanism. A coaxial roller structure with a hollow roller bearing shaft was adopted, allowing the roller shaft to be press-fit into place and ensuring sufficient strength and accuracy in the new rocker arm. As a result, both the weight and the cost of the new rocker arm have been reduced by more than 20% against the former forged steel arm. The new arm was then first mass-produced for use in the Fit.

はじめに

近年，エンジンとしての，出力，燃費向上のため⁽¹⁾，VTEC エンジンの適用が拡大され，全体の 60% 以上を占めるようになってきた。

従来 VTEC エンジンのロッカーアームは，高強度を目的として鋼系鍛造素材で生産されてきたが，ロッカーアームの数も多く，軽量化及び低コスト化が課題であった。

このような背景の中，軽量化と既存設備の活用と共に，加工時間の短縮や，工程削減による低コスト化の両立を狙って，素材のアルミ化が言われてきたが，VTEC ロックアームとしては強度と精度の両立に課題があった。

今回，アルミ VTEC ロックアームを開発したので，その構造開発にまつわる課題解決の手法や，その効果を報告する。

1. 開発のねらい

Fig. 1 に従来の VTEC ロックアームと今回開発したアルミ VTEC ロックアームの構造図を示す。

*栃木研究所

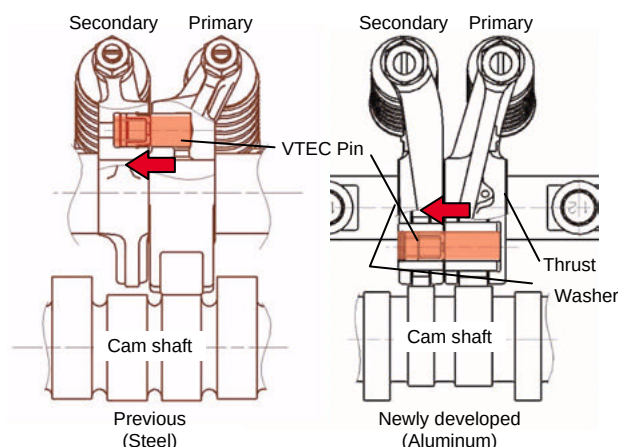


Fig. 1 Comparison of VTEC rocker arms structure

基本的に，ロッカシャフト穴，ローラ支持穴，VTEC 連結穴で構成されるが，特に連結穴においては，高強度のみならず，連結性及び連結時の精度維持のため，非常に高い位置精度が要求され，さらに連結ピストン駆動に対する耐久性確保のため，連結穴には高い強度と耐摩耗性も要求される⁽²⁾。このため，従来の VTEC ロックアームは鋼系素材とし，

浸炭または窒化処理され、要求性能を満足していた。

しかし、そのため加工工程についてFig. 2に示すように、多くの工程を必要として生産されており、コストが課題となっていた。

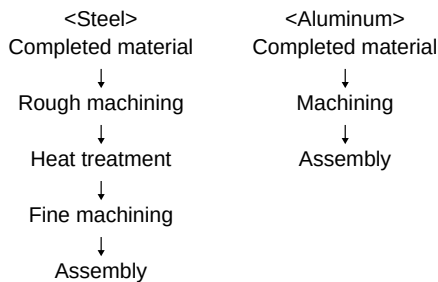


Fig. 2 Comparison of machining processes

本開発では、まず軽量化及び低コスト化のために、従来からロッカームで量産されてきたアルミダイキャスト素材をベースにし、上記 VTEC ロッカームとしての要求を満足させ、既存の鋼系素材 VTEC ロッカームが適用されているエンジンに対しても、動弁系レイアウトの変更無しにロッカームの変更だけで対応可能のように、鋼系素材ロッカームと同スペースで動弁系挙動、耐久信頼性の確保ができることを目標とした。

2. 基本構造と技術課題

VTEC ロッカームのアルミ化にあたり、課題として、ロッカーム各部の強度と動弁系挙動に影響する剛性、連結穴廻りの強度と耐摩耗性、精度が上げられる。

今回開発した、ロッカーム(Fig. 1)はFEM解析を活用し、剛性と強度が満足できる形状を設計した。

強度については、ローラロッカーム形状の最弱部にあたるローラ支持腕部は肉厚増加で対応した。その結果ローラ幅狭化の必要性も発生した。また、ローラ穴とロッカシャフト穴の間にも高い応力が発生するので、肉厚の最適化をはかった。ロッカシャフト穴内径部の変形により、VTEC 油圧供給のためのオイル穴内径に応力が発生するので、ロッカシャフト穴の中心から上方に移動し、ロッカシャフト内径で圧縮歪の発生する部位に設置し、オイル穴内径応力を低減させた(Fig. 3)。

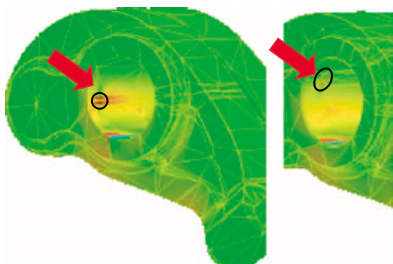


Fig. 3 FEM analysis (Oil hole location)

連結剛性については、ローラ軸と連結軸を同軸とした構造を採用することで、鋼系素材以上の剛性を達成した。その結果を Fig. 4 に示す。

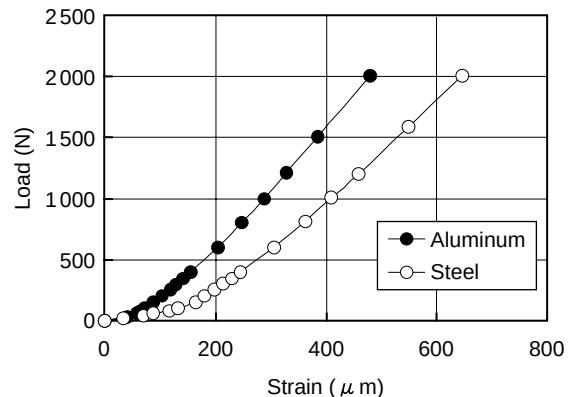


Fig. 4 Comparison of rigidity

同軸構造をとることで、連結穴については連結ピストンをアルミ材では受けずローラ軸の材料で受け持つこととなり、強度と耐摩耗性が両立できた。

また、そのローラ軸の固定方法については、連結穴径の精度を考慮してカシメではなく、圧入で固定する方法を選定した。これにより、内径の異形変形が押さえられ、連結穴として十分な精度が維持できた。

また、ロッカームのアルミ化にさいし、VTEC の構造上となりあうロッカーム同部位との摺動によるロッカーム端面磨耗の懸念があったが、対策として鉄系ワッシャを挿入することで対応をおこなった。

3. 圧入固定のメカニズムと圧入締め代設定

今回特にローラ軸を圧入で固定する構造を採用するにあたり、実機運転中の発生荷重と固定のメカニズム、ローラ腕部圧入穴の疲労強度、圧入締め代選定方法、さらには、圧入工程での固定強度への影響因子を明確にして、重要管理項目を設定した。

3.1. 実機発生駆動トルク

ローラ軸への入力として駆動トルクとスラスト方向の荷重が発生する。この測定方法を Fig. 5 に示す。

軸を回転自由にしておき、回転方向とスラスト方向を測定可能なロードセルで結合し、実機運転を行い測定した。エンジン回転数毎の測定結果例を Fig. 6 に示す。

各条件での測定の結果、ローラ軸への荷重は最大で駆動トルク 1.11Nm, スラスト荷重 3.31kN 程度であった。

ただし、高速回転時の挙動が不安定となる領域で荷重は増加することと、VTEC の切り替え時、特に切替えミスにより低い方のカムにロッカームが落下するハタカレ現象

時に荷重が増加することがわかった。実際の測定では、ロードセル付のロックアームで行ったこと、スプリング荷重ばらつきなど、実際の挙動差も考えられるので、目標の固定強度を駆動トルク 2.94Nm 以上、スラスト荷重 6.87kN 以上とした。

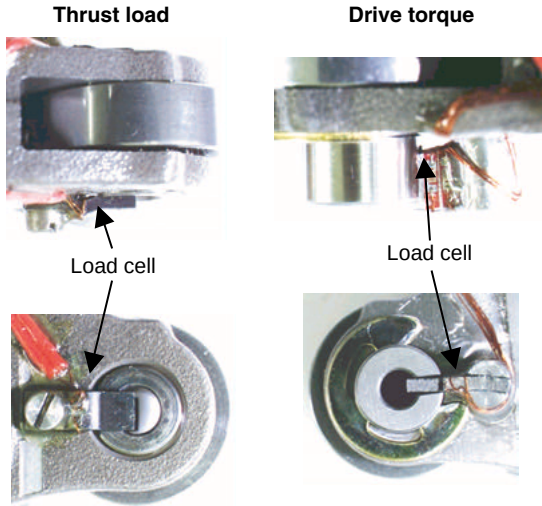


Fig. 5 Load cells for measuring thrust load and drive torque

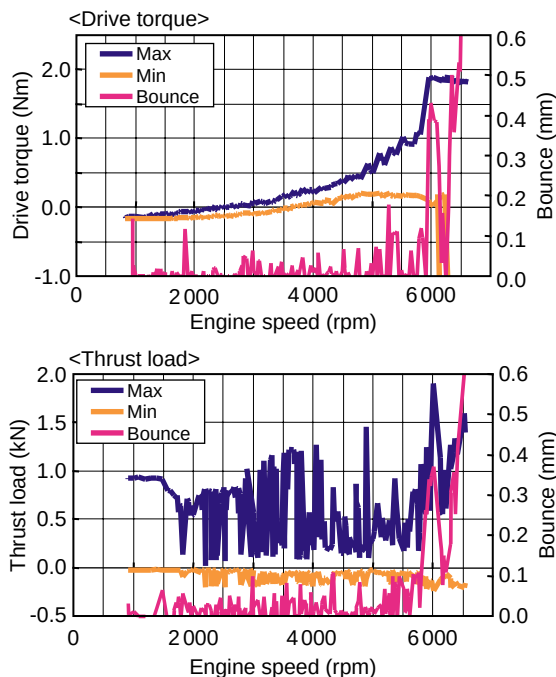


Fig. 6 Result of measuring drive torque and thrust load

3.2. 圧入締め代と固定強度

圧入締め代毎の固定強度(駆動トルクとスラスト荷重)を Fig. 7 に、圧入後の残存締め代を Fig. 8 に示す。圧入締め代は温度によって低下し、実際の運転中の条件として、油温150℃を想定して固定強度測定を行った。

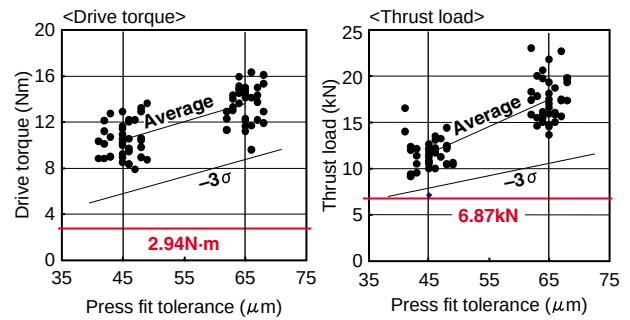


Fig. 7 Drive torque and thrust load

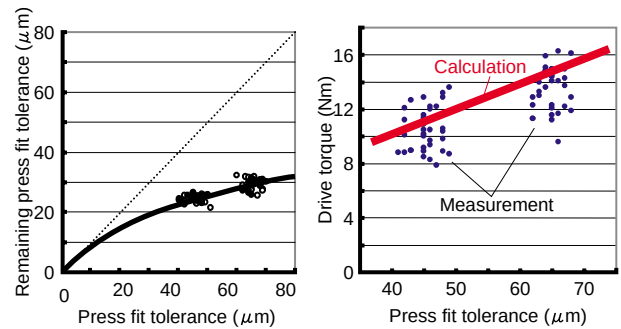


Fig. 8 Remaining press fit tolerance and comparison of drive torque between measurement and calculation

残存締め代とローラ軸とロックアームのアルミダイカスト素材での摩擦係数の実測値を用いて計算した値とも比較した。計算では以下に示す2重管の計算式を用いた。

A : Contact area between rocker arm and roller shaft

r_1 : Inner diameter of roller shaft

r_2 : Outer diameter of roller shaft

r_3 : Outer diameter of rocker arm

E_A : Young's modules of roller shaft

ν_A : Poisson's ratio of roller shaft

E_B : Young's modules of rocker arm

ν_B : Poisson's ratio of rocker arm

δ : Strain

P : Surface pressure

μ : Coefficient of friction between rocker arm and roller shaft

$$\cdot \text{Fixing strength} \quad F = \mu \cdot P \cdot A \quad (1)$$

$$P = \frac{\delta}{r_2} \frac{1}{\frac{1}{E_B} \left(\frac{r_3^2 + r_2^2}{r_3^2 - r_2^2} + \nu_B \right) + \frac{1}{E_A} \left(\frac{r_2^2 + r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} - \nu_A \right)} \quad (2)$$

・ Stress at each location on rocker arm

$$\text{Outer diameter } (\sigma)_{r_3} = P \cdot \frac{2 \cdot r_2^2}{r_3^2 - r_2^2} \quad (3)$$

$$\text{Inner diameter } (\sigma)_{r_2} = P \cdot \frac{r_3^2 + r_2^2}{r_3^2 - r_2^2}$$

圧入締代は圧入時塑性変形により、初期圧入締代のおよそ50%しか残らない。その条件では、計算値とテスト結果は良く合致しており、固定強度は締代と摩擦係数の関係で表されることがわかる。

以上から、ローラー軸の固定強度を安定させるには、圧入締代が重点管理すべき項目といえる。さらに上記結果より、本ロッカアームとして実機運転中の固定強度を満足するためには、締代 45 μm 以上が必要となる。

3.3. ロッカアーム本体の歪と疲労強度

次に、圧入されて塑性変形した、アルミ部分の疲労強度について述べる。圧入締代とロッカアーム実体の圧入部の疲労強度について Fig. 9 に示す。

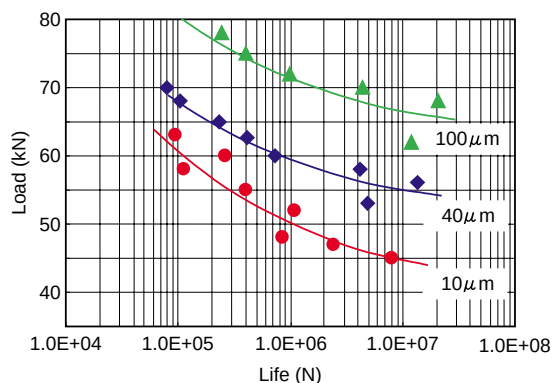


Fig. 9 Effect for fatigue strength

締め代増加に伴い疲労強度が向上することがわかる。同じ材料で試験片を作成し、塑性変形量と疲労強度の関係を測定して、締め代増加によりアルミ材の塑性変形量が増加した効果であることを確認した。

本結果をもとに疲労限度線図にて評価を行うと、締め代増加により残留応力は増加し、疲労限度が向上するため、おおむね従来どおりの疲労限度で評価できることがわかった。(Fig. 10)

また、ロッカアーム本体の耐久性確認と、固定強度下限の実機耐久試験としては、ともに締め代下限品で実施すれば良いことがわかった。

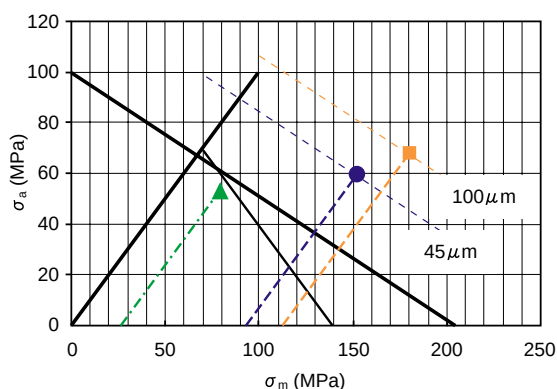


Fig. 10 Limit line of fatigue strength

3.4. 締め代設定概略

圧入することで各部が変形し寸法変化を引き起こす。よって寸法精度確保の上から圧入締め代の上限を設定する必要がある。

また Fig. 11 には、ロッカアーム本体のアルミが圧入によりシャフトでむしられる、かじり現象が発生する限界を示す。かじりが発生した場合には、単にローラーへのゴミ噛みという問題のみではなく、固定強度への影響も大きい。

これによっても、締め代上限値は決定される。

したがって、締め代設定の手順としては、下限は実機荷重に対して十分な固定強度の確保、上限は、寸法精度とかじり限界から決定する。

今回のロッカアームにおいては、固定強度から下限を 45 μm とし、寸法精度を考慮して、上限は実績のある加工能力 20 μm 公差から、65 μm と設定した。

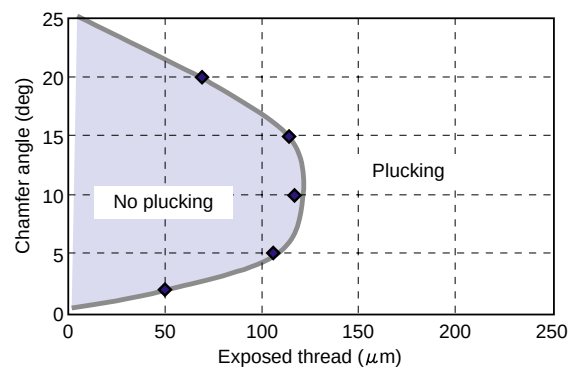


Fig. 11 Plucking limit

4. ローラー細幅化

ロッカアーム本体のアルミ化に伴い、ローラー溝腕部の強度、剛性確保のため厚肉化が必要となり、ローラーの細幅化が必要となった。ローラーサイズは、外輪の発生応力と、定格容量によるローラー寿命で決定される。ロッカアームの軽量化によりローラーの定格荷重低減が可能であり、細幅化は可能である。ただし下限はニードルの形状と生産性により、ニードル径の2倍程度は必要と言われている。

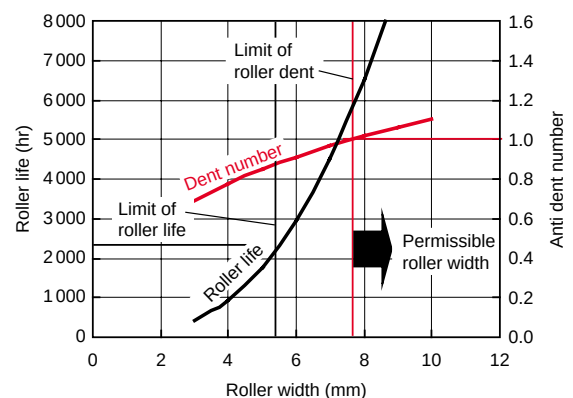


Fig. 12 Optimization of roller width

また、VTEC ロックアームに用いる場合、ハタカレ現象が発生した際の衝撃荷重により、ローラ内輪部にニードルによる圧痕が発生する。これを防止しなければならないためローラ下限サイズが決定されることがわかった。Fig. 12 にロックアームの軽量化と必要定格荷重から決定するローラ寸法、圧痕から必要なローラ寸法を示す。

5. 耐久性確認

5.1. 動弁系挙動

挙動に影響する因子として、剛性と慣性重量がある。今回のロックアームにおける、鋼系材ロックアームとアルミロックアームでの比較は前述のとおり、アルミで鋼系材以上の剛性値を達成し、かつ慣性重量として 30%の低減ができた。

各々のロックアームを用いた動弁系の回転数によるバウンス特性測定結果を Fig. 13 に示す。

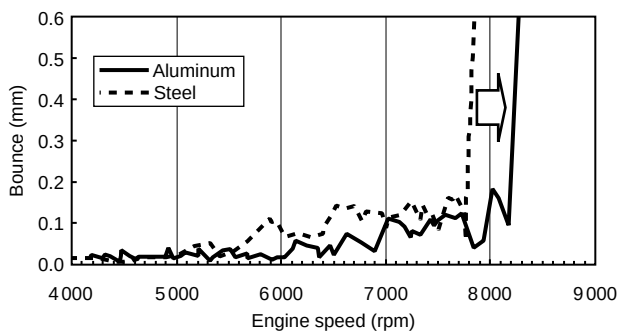


Fig. 13 Comparison of bounce limit between steel and aluminum rocker arm

軽量化により 500rpm の回転数向上が確認できた。この効果は、バルブスプリング荷重に換算すると 12%の低減効果となる。この効果により、ローラロックアームにおいてもフリクションとしては 1%程度の低減効果があり、燃費低減効果をも得られた。

5.2. ロックアーム応力

運転中のロックアーム各部に発生する応力を測定した。測定点は FEM 解析で応力の高い部位とした。

Fig. 14 に代表点の測定結果を示す。

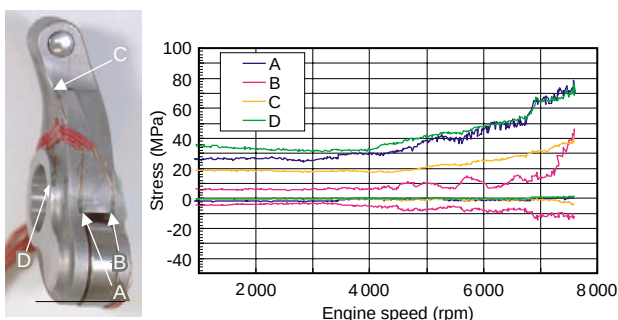


Fig. 14 Rocker arm stress under VTEC-linked condition

最大応力発生部位は、ローラ支持腕部外側とロックシャフト穴端面であるが、材料疲労強度限度内であり十分な耐久性が確認された。

5.3. タペットクリアランス変化

実走耐久テストでのタペットクリアランス変化をFig. 15 に示す。

量産鋼系材ロックアームでの実績と今回のアルミロックアームを比較したが、同等であることが確認できた。この結果から、カムシャフトのバルブリフトカーブも鋼系ロックアームと同一とすることが可能であり、エンジン適用時はロックアームのみの交換で対応できる。

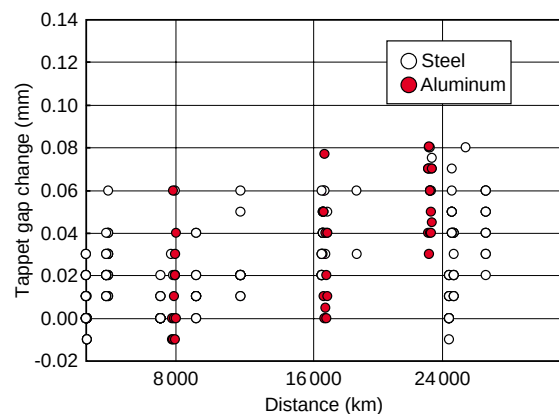


Fig. 15 Tappet gap variation

5.4. 耐久テスト後のローラ軸固定強度低下確認

所定の評価モードで耐久テストを実施した。破損、摩耗や著しいタペットクリアランス変化等が無いことを確認できた。また耐久テスト後の固定強度低下の有無を確認した結果を Fig. 16 に示す。

初期の固定強度が維持されていることがわかる。また、ローラ軸のラジアル方向とスラスト方向の移動も無く、固定強度として十分な信頼性があることを確認した。

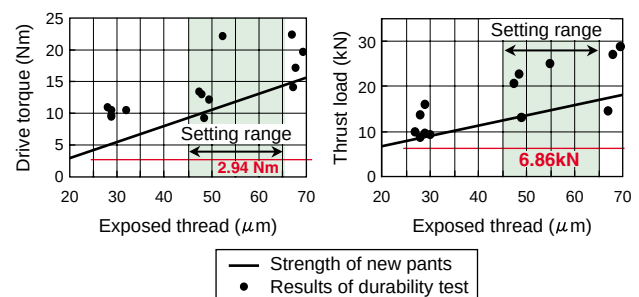


Fig. 16 Fixing strength after durability test

5.5. ロックシャフト端面摩耗

VTEC ロックアームのアルミ化にさいし、VTEC ロックアームの構造上、隣り合うロックアーム間での端面の摺動による摩耗が課題となる。端面の摩耗状態を Fig. 17 に示す。

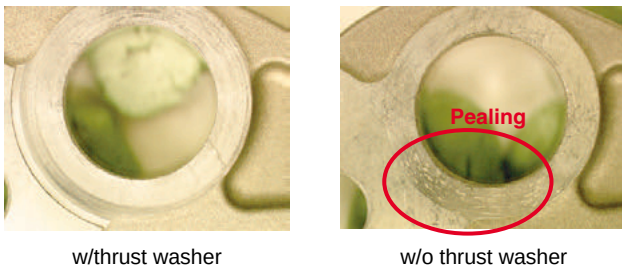


Fig. 17 Effect of thrust washer against peeling of rocker arm end face

ワッシャ無では著しい摩耗が発生し、VTEC 切替え穴間の隙間寸法が拡大することによる、切替え応答性悪化が懸念される。対応として、ロッカアーム間に鋼系ワッシャを挟む構造とすることで、アルミ部材同士の摺動を避けることができ、摩耗低減を確認した。

6. 生産性とコスト

6.1. アルミ材での低コスト化の考え方

VTEC ロッカアームのコスト内訳の代表例を Fig. 18 に示す。アルミ化による加工性向上効果で、加工コストの中の労務、設備費いずれも低下させることができ、理論上は約50%の低減が可能となり、全体コストとしては20%の低減が可能といえる。

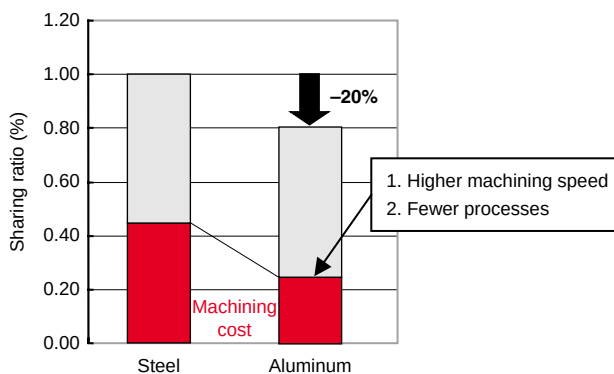


Fig. 18 Effect of cost reduction

7. まとめ

従来の鋼系素材を用いた VTEC ロッカアームに対して、軽量化と低コスト化を両立したアルミダイキャスト製 VTEC ロッカアームを開発した。

- (1) ローラ軸に発生する荷重測定に成功し、必要なローラ軸の固定強度を明確にした。
- (2) ローラ軸圧入構造をもつロッカアームにおける、軸廻りの耐久信頼性を、固定強度と疲労強度の両面から確立した。

- (3) ローラ VTEC ロッカアームの小型化に影響する、ローラ寸法の限界設定要件が明確にできた。

8. 謝辞

本開発を推進するに当たり、ご協力頂いた、(株)田中精密工業様、(株)日進製作所様、(株)NTN様に、深く感謝いたします。

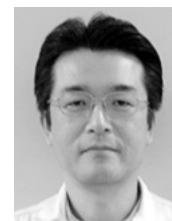
参考文献

- (1) 三浦ほか：可変機構を用いたガソリンエンジンの高効率化について、自動車技術 Vol.45, No.8, p.93 (1991)
- (2) 井上ほか：新しい可変バルブタイミング機構を装着した高効率エンジン—第一報可変動弁システムの開発—、自動車技術会学術講演会前刷集, 891004

■ 著 者 ■



田中 力



山田 範之