

二輪車レース用軽量アルミ粉末合金製バルブスプリングリテーナの開発

Development of Lightweight Valve Spring Retainer Made from Aluminum Powder Metal for Motorcycle Races

土 居 航 介*
Kosuke DOI

堀 村 弘 幸*
Hiroyuki HORIMURA

高 橋 恭*
Kyo TAKAHASHI

要 旨

ABSTRACT

二輪車レース用エンジン性能向上のため、限界回転数の向上を目的に、軽量アルミニウム粉末合金製バルブスプリングリテーナを開発した。ナノサイズの結晶粒組織からなるナノ結晶アルミニウム粉末合金に、耐摩耗性付与のため硬質粒子を最適配合した高強度耐摩耗アルミニウム材“NCP400”(Nano Crystal Powder metal, 結晶粒径 400nm)を開発した。部品化に際しては、材料特性に応じた温度制御と鍛造方案により、後加工が必要ない温間精密密閉鍛造技術を確立した。さらに、動弁系における運転時の挙動からリテーナの負荷を定量的に評価する安全率検証手法を確立した。

In order to enhance engine performance of racing motorcycles, aiming increase of critical engine speed, a valve spring retainer made of lightweight powder aluminum alloy has been developed. The high strength abrasion resistance aluminum, “NCP 400” (Nano Crystal Powder metal with crystal grain size of 400nm), hard grains are blended with optimum amount to get abrasion resistance to Nano Crystal Powder aluminum alloy consisted of Nano-sized crystal grains, was created. Optimum temperature control and forging method for the material property established the warm-precision-closed-forging technology that post-machining is unnecessary in parts manufacturing. Verification method of safety factor was set up, by which the load of retainer could be evaluated quantitatively based on the movement of valve train during operation.

1. はじめに

2. 開発目標

近年、二輪車レースの最高峰である MotoGP クラスのファクトリマシンも従来の 2 ストロークエンジンから動弁系を有する 4 ストロークエンジンへと移行しており、エンジンの高回転化を可能とする動弁系の軽量化ニーズは非常に高い。このニーズに対して、バルブスプリングリテーナは往復運動部の慣性力低減のために、量産車エンジンに用いられるスチール製に対してチタン合金製が採用されてきたが、疲労強度／重量比を考慮するとチタン合金では軽量化に限界があった。著者らはさらなる軽量化として、1990 年代中盤よりバルブスプリングリテーナをアルミ化し、ワークスレーサおよびキットパーツ向けに適用している (Fig. 1)。本稿では、リテーナ向けに開発したアルミ粉末合金の材料設計、および部品化に際しての製造技術、安全率の検討手法について述べる。

軽量バルブスプリングリテーナの開発目標として、下記を設定した。

- (1) 従来のチタン合金製リテーナに対して軽量化率 20% 以上であること。
- (2) 表面処理 (硬質陽極酸化皮膜など) を付与することなく耐摩耗性が確保できること。

3. 材料技術

従来のバルブスプリングリテーナのアルミ化は、急冷凝固粉末に硬質粒子を混合した複合材によって進められ、Honda では 1989 年に Al-14.5%Si 粉末合金＋セラミック粉末複合材という仕様で量産四輪車エンジンに搭載した。また、現在では、他社二輪車に 2000 系 Al 粉末合金＋アルミ

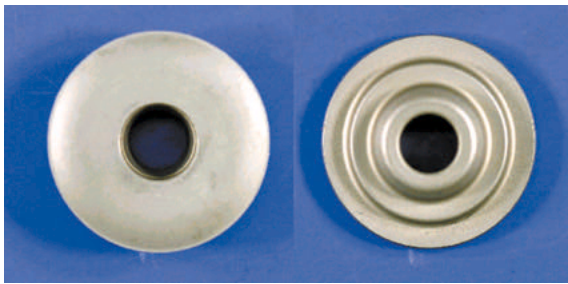


Fig. 1 Valve spring retainer made from aluminum powder metal

ナ+硬質アルマイトという仕様で実用化されている。

本開発においても同様な仕様を検討したが、主として強度面でレース用としては成立しないという結論に達した。そこで従来の急凝固粉末合金を超える特性を有する合金として、当社の基礎研究部門にて開発したナノ結晶アルミ粉末合金を適用することとした。

3.1. 急凝固粉末の組織制御による強度確保

従来の急冷による固溶限の拡大・組織微細化の考え方は別に、Al 基アモルファス合金は、La 基、Zr 基などとともに発見され、現在、バルク状のアモルファス金属を作製可能とする過冷金属研究として世界中から注目され、実用化に向けて各研究機関で研究が続けられている。ナノ結晶アルミ合金とは、そのアモルファス相からの結晶化を利用した組織制御により得られるナノサイズの結晶粒と金属間化合物による組織からなるものを言う。開発したナノ結晶アルミ粉末合金は、粉末時点ですでに結晶相であるが、その組織は過冷却液体状態からの均質核生成によって得られたものであり同質のものである。合金組成は以下の観点で選定した。

- (1) 既存のエアーアトマイズ設備で製造可能とする。
- (2) 廉価な元素によって構成する。
- (3) 合金の比重増大を最低限に抑える。

特に上記(1)からは、冷却速度と溶解温度の制約によって、アモルファス形成能の高い元素の組み合わせを要求された。Fig. 2 に Al を主元素とした場合のアモルファス形成能の高い元素の組合せを示す。すでに、Al の他に Fig. 2 中のグループ A, B から各 1 元素を添加した 3 元系以上で、高いアモルファス形成能が得られることが見出されており、この中から添加元素を選択した。Fig. 3 にグループ A 元素を含む 3 元系合金の結晶化温度と材料価格の比を示す。グループ A からは、結晶化温度が高く、かつ廉価であるという観点から Fe を選択した。また、Fig. 4 にグループ B の各代表元素における 3 元系合金の合金密度と合金価格のグラフを示す。最も比重が小さく、廉価であるという観点から、グループ B からは Ti を選択した。こうして得られた Al-Fe-Ti 系合金をもとに、さらにアモルファス形成能を高め

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg	Group B					Group A					Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac															

Fig. 2 Combination of elements which form amorphous

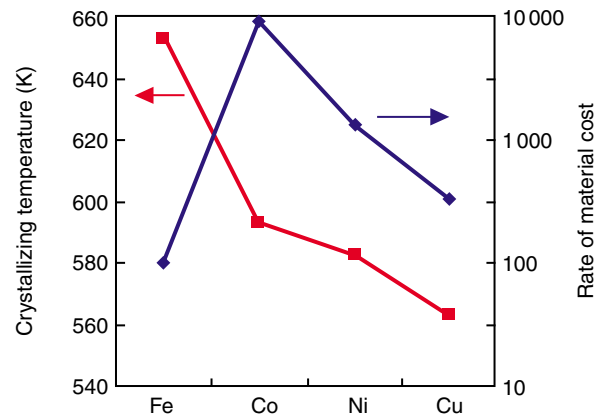


Fig. 3 Crystallizing temperature of Al-(Gr.A element)-(Rare earth element) alloy and rate of material cost of Gr.A element

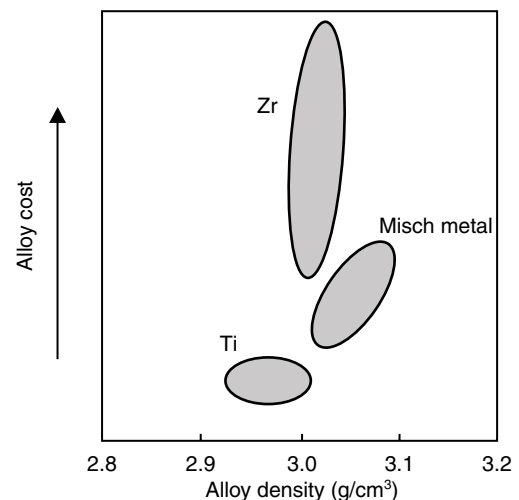


Fig. 4 Relationship between alloy density and alloy cost (Al-Fe-Ti-Gr.B element alloy)

るために第 4 元素として Si を加え、合金系は Al-Fe-Ti-Si 系の 4 元系合金に決定した。なお、Si は Ti との相互作用でアモルファス形成能を高める効果があり、Al-Fe 系化合物を球状化してじん延性低下を抑制する効果がある。

Fig. 5 に、Fe, Ti, Si の各添加量における機械的性質の関係を示す。Fe は添加量が増えるに従って引張強度を高める効果があるが、6at% 以上では融点が高くなりすぎて既存量産設備でのアトマイズは困難である。また Ti も同様に引張強度を高める効果があるが、1at% 以上では強度向上の効

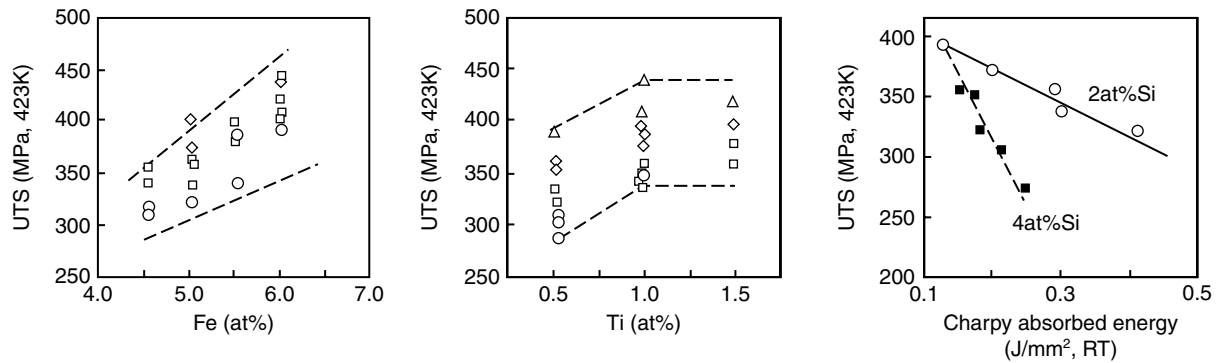


Fig. 5 Relationship between amount of addition element and mechanical properties

果が無い。Si は 2at% で引張強度に対する衝撃値の比が高いことが分かる。これらを考慮した上で、最適な合金配分として、組成は Al-6Fe-1Ti-2Si at% に決定した。

3.2. 硬質粒子の最適配合による耐摩耗性の確保

耐摩耗性を向上させる手法として以下のことが考えられる。

- (1) 硬質アルマイト・硬質めっき等の表面処理を施す。
- (2) 素材に硬質粒子を分散配合して複合化する。

著者らは、素材自体に耐摩耗性を持たせる(2)の手法を選択した。(1)の手法は部品化した場合にコスト増加の要因となること、また、ベース粉末合金に後から硬質粒子を分散配合できるという、粉末素材の利点を活かす理由からである。複合化にあたっては、硬質粒子の粒径・量の選定、またそれらが機械的性質におよぼす影響を確認する必要がある。また、均一に分散混合しないと機械的性質にむらを生じ

たり、疲労破壊の起点となる可能性がある。Fig. 6にアルミナ添加量と粒径が、耐摩耗性および強度におよぼす影響の概念図を示す。一般的に、添加材の粒径が大きく、添加量が多いほど、強度は低下して耐摩耗性は向上する傾向がある。Fig. 7に、実際に複合化した素材の機械的性質を示す。このテスト結果から、強度と耐摩耗性をバランスさせる添加量として5% (平均粒径3 μm) を選択した。摩耗試験は Fig. 8に示すピンオンディスク型の摩擦摩耗試験機にて行った。また、アルミナの混合にあたっては、自転公転式のロータリミキサにて混合条件の設定を行った。Fig. 9に複合材の組織を示す。アルミナは均一に分散混合しているのが分かる。Table 1 に最終的な複合材の機械的性質を示す。本合金は、リテーナとして使用される温度域(423K)でも、高い疲労強度と引張強度を有している。著者らはこの高強度耐摩耗アルミ材を“NCP400”(Nano Crystal Powder metal)とした。“400”は、結晶サイズが400nmであることを示す。本合金は、熱履歴を変化させることにより、結晶粒サイズを20nmから1 μm まで制御可能であるが、400nm前後で強度とじん延性のバランスが最も良い。

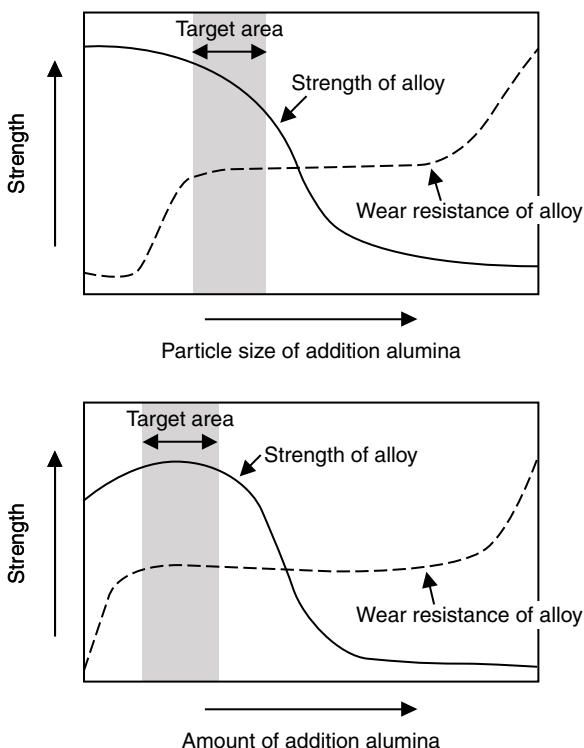


Fig. 6 Amount and particle size of alumina

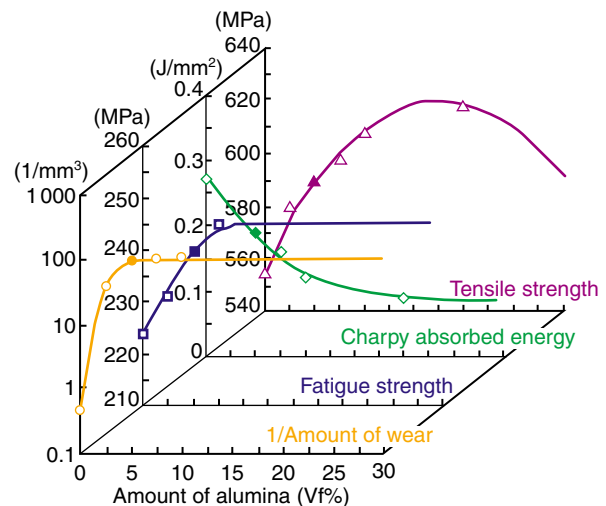


Fig. 7 Mechanical properties of composite metal

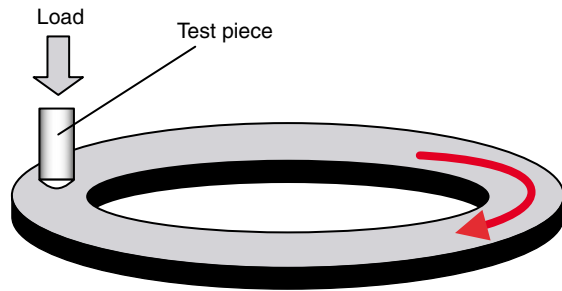


Fig. 8 Abrasion test

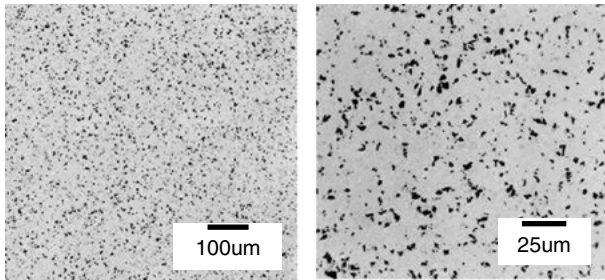


Fig. 9 Microstructure

Table 1 Mechanical properties of NCP400

		RT	423K	473K
Tensile strength	(MPa)	590	485	445
Yield strength	(MPa)	484	412	374
Elongation	(%)	3.0	3.7	4.3
Fatigue strength	(MPa)	220	210	—
Charpy absorbed energy	(J/mm ²)	0.14	—	—
Young's modulus	(GPa)	97	94	89
Density	(g/cm ³)	3.04	—	—

4. 部品化技術

4.1. 精密密閉鍛造

本リテーナでは、強度向上と加工コスト低減のために鍛造後に切削加工が不要な精密密閉鍛造を試みた。NCP400は、ナノ結晶組織であるために従来のアルミ粉末合金よりも加工性は良いが、一般的な展伸材に比較すると高温強度が高いために熱間時の変形抵抗が高い。また、加工硬化がほとんど見られないという特徴を有する。そのため、鍛造方案や潤滑材の選定、ワーク温度、金型温度などを工夫する必要がある。この中で、特に温度制御は重要な要素である。

4.1.1. ワーク温度

ワーク温度は、材料特性上の高温伸びと再結晶温度の関係から決定した。Fig. 10 に NCP400 の温度と伸びの関係を示す。常温では数%程度の伸びであるのに対して、573Kを超えると格段に伸びが増加し始めることが分かる。Fig. 11 にワークの保持温度と硬さの関係を示す。773Kを超え

ると組織の成長が始まり、製品強度が低下していくことが分かる。このことから、ワークの加熱温度は573K～773Kの範囲で鍛造テストを行ない、最適なワーク温度として623Kを選定した。ワークは623Kにおいて100時間保持後も硬さには変化が無く、十分な耐熱性を有している。なお、ワークの加熱はメッシュベルト式の連続炉にて行ない、ベルト速度、雰囲気温度の設定によりベルト出口にてワークが623Kに安定するようにしている。

4.1.2. 金型温度

金型温度が高すぎると、製品の寸法精度の悪化、焼付き・凝着の発生、型寿命が短くなるなどの不具合が生じる。一方、温度が低すぎると加熱されたワーク温度の低下が生じ、割れが生じて健全な製品が成形できない。Fig. 12に割れが生じる部位、Fig. 13に成形時の金型温度と割れ発生率の関係を示す。外周割れ、天井割れとも金型温度との相関が高く、473K以下では割れ発生率が上昇する。このことから、最適な金型温度として523Kを選定した。また、鍛造中に金型温度が安定するよう、上型・下型ともに埋め込みヒータにより制御を行っている。

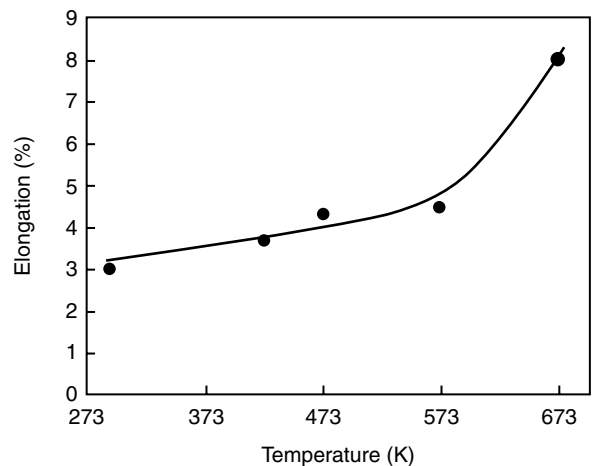


Fig. 10 Relationship between temperature and elongation

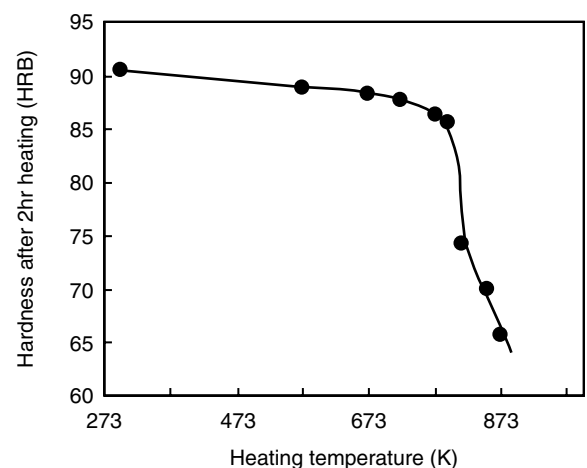


Fig. 11 Tempering curve

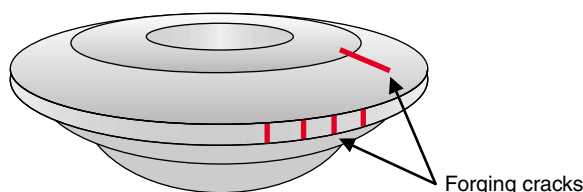


Fig. 12 Position of forging cracks

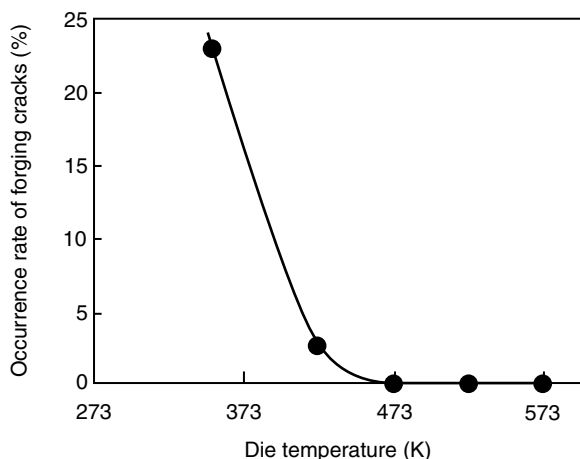


Fig. 13 Relationship between die temperature and occurrence rate of cracks

4.1.3. 鍛造方案

ナノ結晶アルミ合金は、従来のアルミ粉末合金に比較すると、塑性加工性は優れている。しかしながら、組織がナノメータサイズであることから加工硬化が小さく、変形が一部に集中しやすい。そのため、成形途中で各部位に平均的、かつ緩やかに加工する必要がある。このことから、穴あきピレットを作製し、2段成形にて密閉鍛造を行った。Fig. 14 にその方案を示す。なお、つば部の単体疲労試験結果では、鍛造品は切削加工品に比較して 20% 疲労強度が向上している。これは鍛造によるフローの形成効果であると考えられる。

4.2. 安全率の検証

4.2.1. リテーナが受ける負荷

二輪車レーサの動弁系には、カムが直にバルブリフタを介してバルブを駆動する DOHC リフトタイプが多く用いられている。Fig. 15 にリフタまわりの模式図を示す。リテーナが受ける負荷を以下に示す。

- (1) スプリングからのリフト荷重および動的な慣性荷重によるつば部の折り曲げ負荷。
 - (2) オーバレブ等のバルブバウンス時にコッタから受ける縦割り衝撃負荷。
 - (3) バルブスプリングとの摺動による座面の摩耗負荷。
- (3) については 3.2 節で述べたとおり、硬質粒子の最適

配合により単体モータリングテストおよび実機テストにて十分な耐久性を有することが証明されているため、ここでは(1)、(2)について述べる。

4.2.2. 動弁系挙動の測定

リテーナが運転中に受ける負荷を実機で定量的に測定するには、動弁系の挙動をとらえることが重要である。リテーナが受ける荷重は、静的にはバルブスプリングからのリフト荷重のみである。ところがエンジン回転によりスプリングが粗付け状態からリフト状態を繰り返すようになると、静的なリフト荷重のほかに、スプリングが運動している部分の質量分(不等ピッチ巻きのスプリングの場合、スプリング質量の約1/3)の慣性力が加わる。さらに高回転になると、往復運動部の慣性力がバルブスプリングの荷重以上になり、バルブは設計されたカムのプロフィールに沿って駆動するのではなく、バウンス、ジャンプなどの挙動を示す。このためにリテーナには、さらにこの加速度分の慣性力が加わることで、計算だけでこの負荷を予測することは困難である。量産車においては、この領域の回転数まで使用することは無いが、レース車両では、ここでの耐久性保証が重要となる。

動弁系の挙動測定に関する報告資料⁽¹⁾は現在までいくつか例があるが、リテーナが受ける負荷に換算して定量評価したものは見られない。そこで著者らはレーザ計測などの大掛かりな設備を使わず、かつシリンダヘッドに特殊な加工を必要としないバルブゲージ法による定量評価を試みた。その手法は、Fig. 16 に示すように、バルブ軸部の軸方向にひずみゲージを2枚貼りつけ、Fig. 17 に示すようなシリンダヘッド単体によるモータリング装置にて実測するという、極めて簡易的なものである。軸部対上の2点にて測定するのは、バルブの曲げ方向のひずみを解消するため、二つの測定値の平均値を軸方向のひずみととらえ、そのひずみを

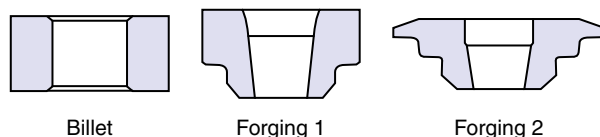


Fig. 14 Forging design

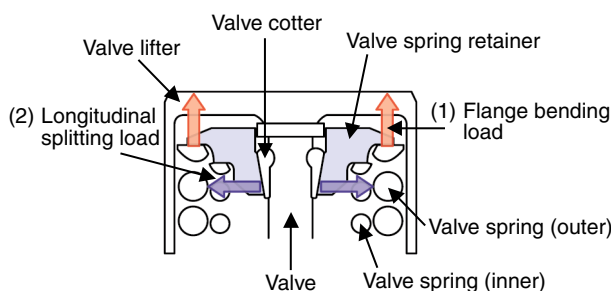


Fig. 15 Valve system

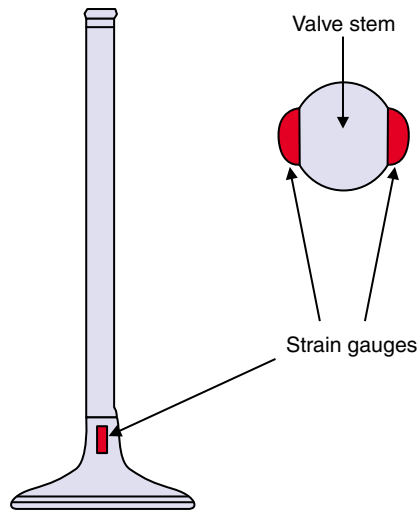


Fig. 16 Sticking location of strain gauges

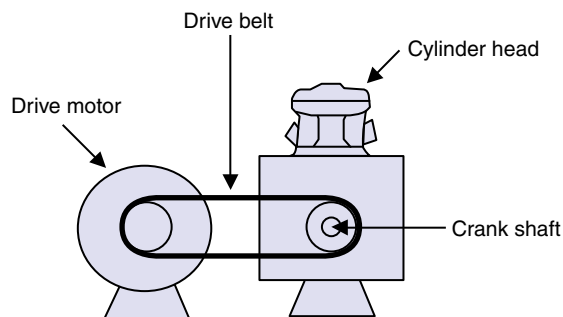


Fig. 17 Motoring test

荷重に換算した。この方法によって得られる波形をFig. 18 ~ Fig. 21 に示す。極低速(60r/min 以下)のクランク回転数では Fig. 18 に示すような慣性力が働かない直線的な波形であるのに対して、中速回転域(3000r/min前後)ではFig. 19に示すように慣性力により波形に変化が見られた。更に回転を上げていくと、Fig. 20に示すようにリフト終了時付近に突出した圧縮波形が見られ、更には Fig. 21 に示すように引張波形が見られた。Fig. 20はカム上り山中腹でジャンプしたバルブ~バルブリフタが、カム下り山へ着地したときに生じる圧縮波形を示している。さらにFig. 21はジャンプしたままカム下り山を通過して、バルブがバルブシートへ直接着座したときの引張波形である。著者らはこのピーク荷重を読み取り、式(1)の運動方程式により往復運動部の加速度を求めた。

$$a = F_v / M \quad (1)$$

a : 往復運動部の加速度

F_v : バルブに生じる実測荷重

M : ひずみゲージ添付位置(バルブ軸部)が受け持つ慣性重量

リテーナつば部の折り曲げ荷重(Fig. 15 の(1))は、

$$F_{tuba} = F_{ol} + F_{ok} \quad (2)$$

$$F_{ok} = M_o \times a \quad (3)$$

F_{tuba} : リテーナつば部にかかる荷重

F_{ol} : アウタバルブスプリングのリフト荷重

F_{ok} : アウタバルブスプリングの慣性荷重

M_o : アウタバルブスプリング質量の 1/3

で表せる(厳密にはリフト荷重は時間軸に対して一定ではなく、 F_{ol} と F_{ok} には位相差があるが、ここでは簡易的に双方の和で表した)。式(3)を式(2)に代入すると

$$F_{tuba} = F_{ol} + M_o \times a \quad (4)$$

またリテーナ縦割り荷重(Fig. 15 の(2))は、

$$F_{tate} = F_{tl} + (M_r + M_o + M_i) \times a \quad (5)$$

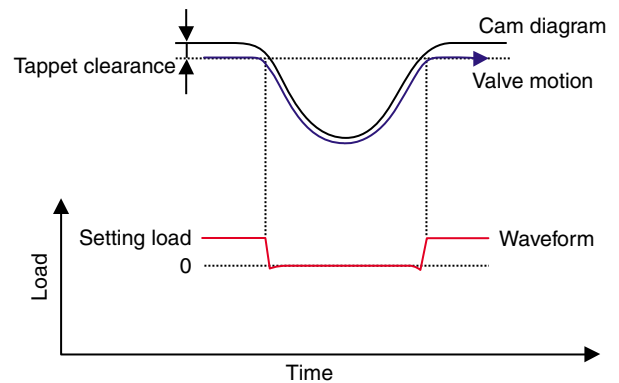


Fig. 18 Waveform of load (under 60 r/min)

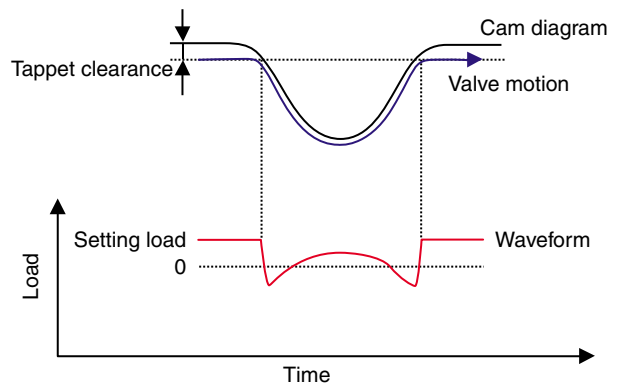


Fig. 19 Waveform of load (about 3000 r/min)

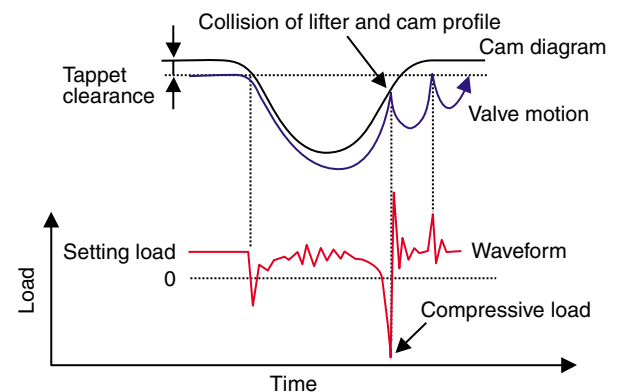


Fig. 20 Waveform of load (High engine speed)

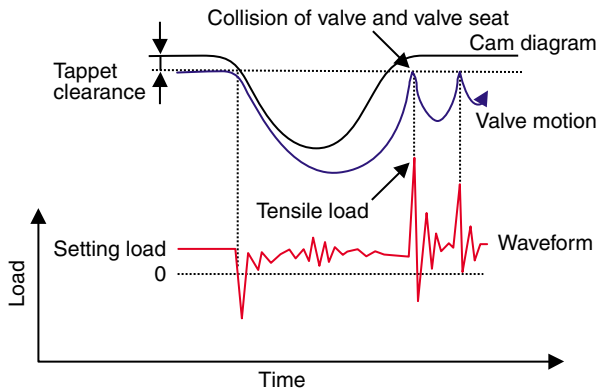


Fig. 21 Waveform of load (High engine speed)

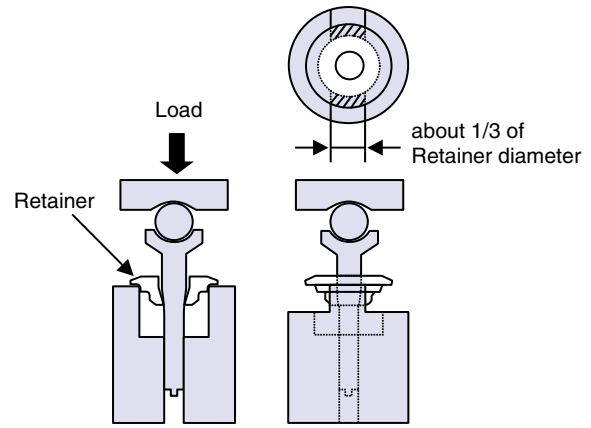


Fig. 23 Component jig test

F_{tate} : リテーナ縦割り荷重

F_{tl} : アウタ、インナバルブスプリングのトータルリフト荷重

M_r : リテーナ質量

M_i : インナバルブスプリング質量の 1/3

で表せる。式(4)および式(5)により求めた荷重を、横軸をエンジン回転数として整理したグラフを Fig. 22 に示す。

4.2.3. 単体疲労試験および静破壊試験

4.2.2 項で述べたように実機での負荷が測定できたため、その負荷に対するリテーナの実力値の把握を単体試験にて行った。単体試験は実機での破損モードにあわせて2種類行った。つば部の折り曲げ負荷に対する疲労試験と、縦割り静破壊試験である。治具形状の例を Fig. 23 に示す。なお、バルブスプリングの座面は全面で均一にリテーナに接触するのではなく、Fig. 24 に示すように端部およびその 180° 側で面圧分布が大きくなるため、治具の形状もこれにあわせる形で2点受けとしている。これらの試験結果と Fig. 22 の結果により、実機での安全率が 1.2 以上となるようにリテーナの最適形状を設定した。

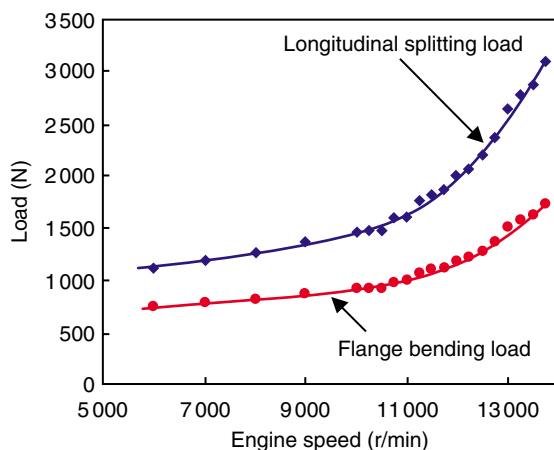


Fig. 22 Relationship between engine speed and load which retainer receives

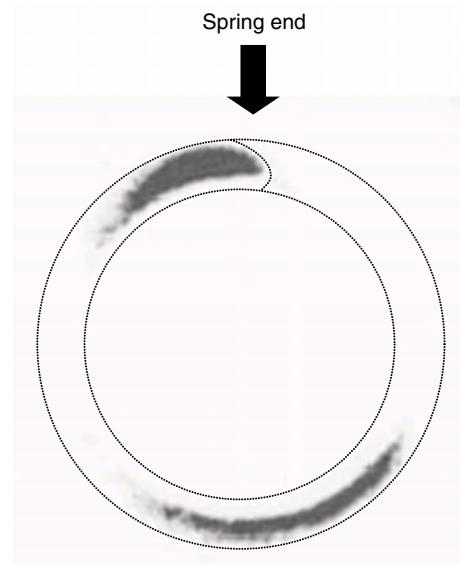


Fig. 24 Pressure distribution of valve spring seating surface (by No carbon paper)

4.2.4. CAE 解析

本リテーナでは、単体疲労試験の疲労限度と、CAE解析による最大応力との相関性を明確にすることを試みた。CAEモデルは1/2モデルとし、単体疲労試験の治具をそのまま用い、接触条件を設定することにより疲労試験がそのままシミュレーションされるよう設定した。これによりテスト工数の削減による開発効率の向上を行った。Fig. 25にその例を示す。

5. 実機での効果

従来のチタン合金製に比較して 23%軽量化を達成した。これにより動弁系の挙動を安定させ、動弁系他部品の負荷を低減するとともに、バウンス限界回転数を 220r/min 向上させることを可能とした。その結果、エンジンのレブリミット回転数を向上させ、出力の向上により戦闘力増大へとつなげた。本リテーナは1990年代中盤からスーパーバイ

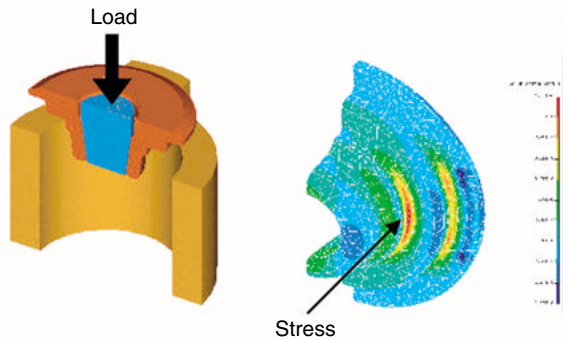


Fig. 25 FEM simulation of component jig test

クラスのワークスレーサに適用され、鈴鹿8時間耐久ロードレースの6連覇に貢献した。また、キットパーツとしても販売されている。

6. 結論

- (1) 従来のチタン合金製に比較して23%軽量化を達成した。
- (2) 高強度・高じん延性ナノ結晶アルミ粉末合金を開発した。
- (3) 耐摩耗性付与のための硬質粒子の最適配合技術を確立した。
- (4) 部品供給コスト削減のための精密密閉鍛造技術を確立した。
- (5) 動弁系挙動からリテーナ負荷を定量的に評価できる安全率検証手法を確立した。

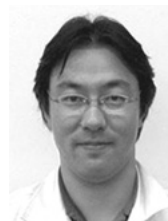
謝 辞

材料の共同開発を行った東洋アルミニウム(株)、住友電気工業(株)、および部品製造において田中精密工業(株)の関係者の皆様に、深く感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 神田久, 田中求来: 動弁系におけるバルブ変位のレーザ計測技術の確立, HONDA R&D Technical Review Vol.12, No.2, p.141-146 (2000)

■ 著 者 ■



土居 航介



堀村 弘幸



高橋 恭