

連携記事

オートバイ用エンジンの軽量化に向けた コンロッドの軽量化と信頼性向上

Weight Reduction and Improvement of Reliability of Connecting Rod for
Weight Reduction of Motorcycle Engine

ヤマハ発動機(株)
パワートレインユニットコンポーネント統括部
材料技術部機能評価グループ
グループリーダー

久保田剛
Tsuyoshi Kubota

新日鐵住金(株)
技術開発本部 鉄鋼研究所
チタン・特殊ステンレス研究部
上席主幹研究員

高橋一浩
Kazuhiro Takahashi

1 はじめに

オートバイは単独では自立することができず、乗車時には運転者が常にバランスを取り続ける必要がある。そのため、その車体やエンジンには、4輪自動車以上に軽量化の要求が強い。

エンジンを軽量にする簡単で効果的な方法は、排気量を下げ、構成部品全体を小さくすることである。しかしこの場合、1サイクルで燃焼できる混合気の量が少なくなるため、取り出すことができる時間当たりエネルギー（いわゆる「馬力」）が小さくなり、商品性に影響する。4輪自動車ではこれを大きくしたい場合には排気量を大きくするのが有力な方法であるが、オートバイでは安易にそうすることができない。オートバイではこの場合、時間当たりの混合気の燃焼回数を増やす、すなわちエンジンの時間当たり回転数（以下、回転数）を増加させて対応することが多い。

回転数を上げる際の最も大きな課題の一つが、各回転部品の慣性力が上がることである。中でも、チェーンやギヤで減速されずに、エンジンの回転数そのままの回っている原動機

部品（ピストン、コンロッド、クランクシャフトなど）への影響が大きい。このような背景から、オートバイ用の原動機部品では、それぞれ4輪自動車用とは異なる高強度かつ軽量な材料が採用される。本稿では、この中でもコンロッドに焦点を当て、そこで採用されている材料と工法について解説する。

2 オートバイ用コンロッドの 要求特性と材料・工法

コンロッドは、混合気の燃焼を受けたピストンの上下運動を、回転運動に変換してクランクシャフトに伝達する部品である（図1）。コンロッドの構成を図2に示す。コンロッドは大端でクランクシャフトに組み付けられ、その組み付け孔（以下大端孔）が分離されるようになっている。分離したピストン側を「ロッド」、クランク側を「キャップ」と呼ぶ。ピストンピンを介してピストンに組みつけられる部位を「小端」、組付け孔を「小端孔」と呼ぶ。

燃焼圧による高い圧縮力と、エンジン回転数そのままの高

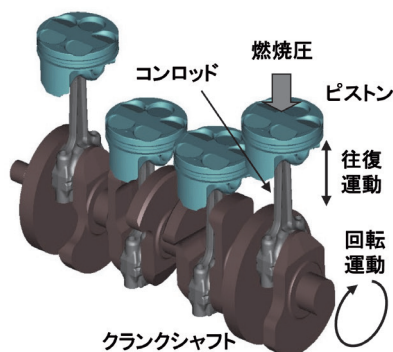


図1 コンロッドの動き

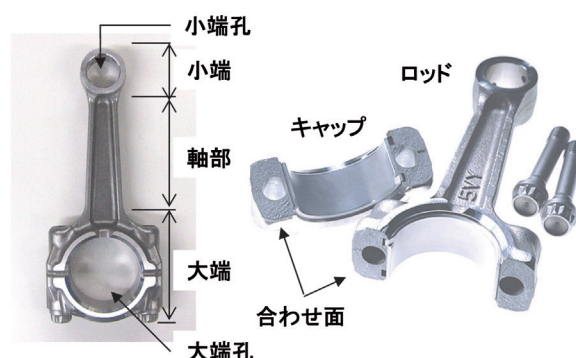


図2 オートバイ用コンロッド

速度による慣性力に耐えるため、コンロッド用材料には図3に示す特性が要求される。これらの特性をすべて満足するために、コンロッド用材料としては鉄鋼材料が適していると考えられている。4輪自動車用のコンロッドでよく用いられる材料は、構造用炭素鋼・合金鋼もしくは同等レベルの強度を持つ非調質鋼や焼結鍛造用材料¹⁻⁸⁾である。

オートバイ用エンジンでは前項で述べた通り、4輪自動車より高い回転数が要求される。回転数を上げた場合、慣性力は回転数の2乗に比例して大きくなるため、図3に示した要求特性をより高い次元で満たす必要がある。そのためオートバイ用コンロッドでは、低炭素の構造用合金鋼（肌焼き鋼、例えばJIS SCM420等）に浸炭焼入れ焼戻し（以下、浸炭）を施して用いることが多い⁹⁾。先述した4輪自動車用材料の疲労強度が420MPaから480MPa^{4,5,7)}であるのに対し、SCM420浸炭材の疲労強度は、600MPaから800MPa程度である。浸炭材は表面硬さが高いため、摺動部の耐面圧も高い。これらの材料特性によりコンロッドの軽量化が可能となり、オートバイの高回転化に貢献している。

3 チタン合金のコンロッドへの活用

オートバイの高回転化に向けて、コンロッドへのチタン合金の採用は有力な方法である（図4）。チタン合金は鋼より密度が低く質量を小さくできるが、それにより慣性力を低減できても疲労強度が低いと軽量化には繋がられないため、質量に対する疲労強度の比（比疲労強度）をどれだけ上げられるかが重要である。また、チタン合金は材料自体が高価である上、機械加工や鍛造の難易度が高く高コストであるため、これらをできるだけ安価にすることが求められる。さらに、チタン合金は熱伝導率が鋼と比較して30%以下であるため、摺動熱がこもり易く、他の金属と反応して凝着磨耗を起こしやすい。そのため、摺動部の耐凝着性や耐摩耗性をできるだけ低コストで確保する手段が必要である。以下、これらの命題に対して、量産オートバイで実用された事例¹⁰⁾を紹介する。

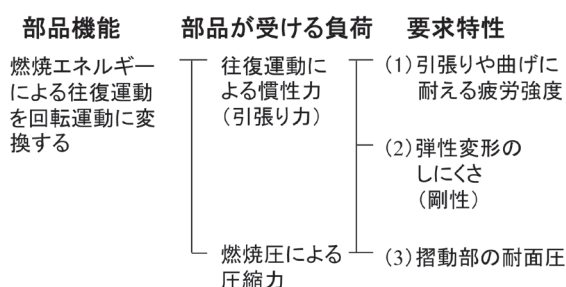


図3 コンロッドの部品機能と要求特性

3.1 コンロッド軽量化に寄与するチタン合金

前述の強度およびコスト上の課題に対しては、素材となるチタン材料からのアプローチが必須である。最も汎用なチタン合金として知られている6Al-4Vチタン合金（ASTM B348 Gr5、以下Ti-6Al-4V）の用途はほとんどが航空機部材である。古くに実用化され、種々の機械的特性や溶接性などバランスが取れているが、高価で市況影響を受けやすいVが添加されている点が自動車用途に拡大する上で課題であった。そのため、Vよりも安価な汎用元素であるAl、Fe等を活用したチタン合金を開発した¹¹⁻¹⁴⁾。その代表がコンロッドに採用された5Al-1Feチタン合金（Super-TiX[®]51AF（新日鐵住金）、以下Ti-5Al-1Fe）である。Ti-6Al-4Vと同等の強度特性になるようにAl、FeさらにOの添加量を設計し、かつ丸棒や板の量産性とそれを用いた最終製品の加工性（熱間鍛造性や機械加工）をバランスよく具備させた（図5）¹³⁾。Ti-6Al-4Vに対して、熱間鍛造設備への負荷の指標である熱間変形抵抗が700～900℃にて約15～20%軽減され、コンロッドのボルト穴を機械加工するドリル切削効率（所定のドリル穴長を加工可能な最大切削速度）が約15%高い。疲労強度レベルはTi-6Al-4Vと同等であり、コンロッドの軽量化に十分な比疲労強度を有している（図6）¹⁰⁾。



図4 チタン合金製コンロッド

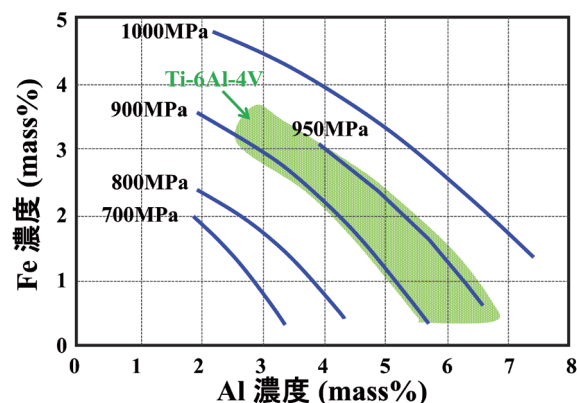


図5 Ti-Al-Fe三元チタン合金の引張強度に及ぼすAlおよびFe添加量の影響¹³⁾

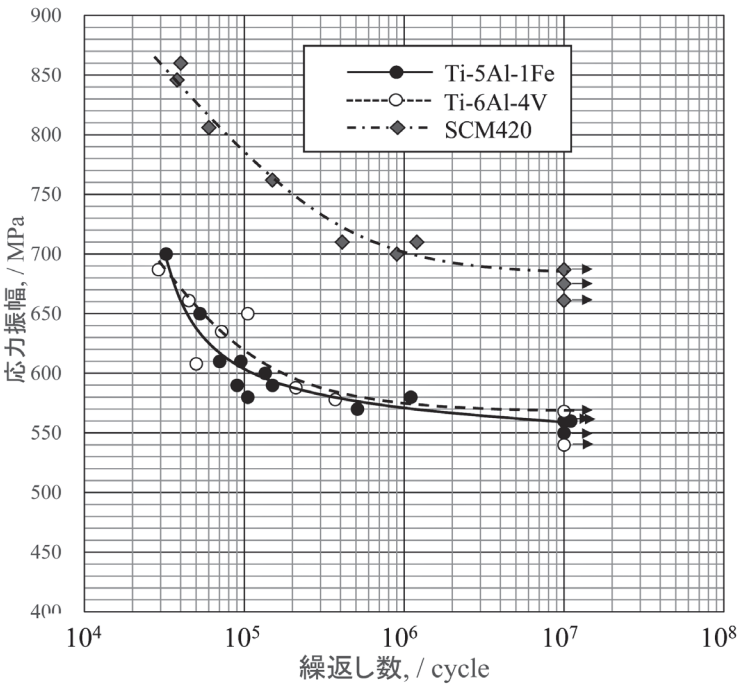


図6 曲げ疲労強度¹⁰⁾

表1 各種表面処理の膜厚および膜硬さ¹⁰⁾

		膜種	膜厚 um	インデンテーション硬さ Gpa
めっき		NiPめっき	15.0	10.3
PVD	スパッタ法	CrN(高硬度)	3-5	20.5
		CrN(低硬度)	3-5	12.5
	AIP法	CrN(AIP法)	3-5	24.6
		TiAlN	3-5	37.4

※ AIP: Arc Ion Plating

3.2 耐面圧向上表面処理

従来のチタン合金製コンロッドでは、十分な耐面圧を得るためにモリブデン溶射や銅製のブッシュを入れるなどの方法がとられてきた。しかしこれらは、材料自体の比重が高いことに加え、圧入や溶射のために余分な体積が必要なことなど、チタンの軽量化利点を阻害する要因になっている。また、部品点数増加によりコストアップの要因にもなっている。これを耐摩耗表面処理だけで対応できれば、軽量化とコストの両方共に有効である。そこで、表1に示す各種耐摩耗表面処理について、コンロッドとして用いた場合の摩擦摩耗特性(摩擦係数、耐摩耗性、耐焼付き性、密着性)を評価した^{10,15)}。表面処理を行う基材としてのチタン合金は、前項で述べたTi-5Al-1Feとした。表1の表面処理の他に、酸化处理(OD処理)および水素含有アモルファスカーボンのDLC(Diamond-like Carbon)処理についても検討したが、仕上げ加工後の処理としての十分な内径真円度や、十分な膜硬さが得られないことから、候補から除外した。

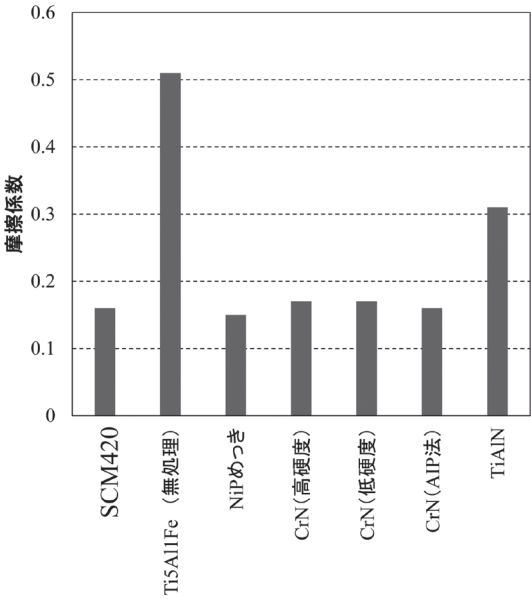


図7 各種表面処理の膜厚および膜硬さ¹⁰⁾

往復動摺動試験による摩擦係数を図7に示す。Ti-5Al-1Feに対して表面処理を行わない場合には、従来のコンロッド用材料であるSCM420浸炭と比較して摩擦係数が3倍以上であった。しかし表面処理を行った場合、TiAlN以外ではSCM420浸炭と同等の摩擦係数を示した。

図8に、往復動摺動試験による耐摩耗性の試験結果として、表面処理の膜硬さと磨耗痕の最大深さの関係を示す。膜種に

ならず、膜硬さと磨耗痕の最大深さの間に相関が見られた。硬さが低いNiPめっきやCrN（低硬度）は、他と比べて磨耗しやすいと考えられる。

さらに往復動摺動試験で焼付き荷重を比較した。焼付き荷重はワイブル分布に従う¹⁶⁾と想定して図9のように試験結果を整理したところ、NiPめっきが最も焼付き荷重が低く、TiAlNが最も焼付き荷重が高かった。

最後に、ここまでの試験の中で摩擦係数、耐摩耗性、耐焼付き性とも比較的高かったCrN（高硬度）とCrN（Ark Ion

Plating, 以下AIP法）の2仕様について、小端孔とピストンピンの摺動を模擬した内径摺動試験を行った¹⁰⁾。図10に、試験後の小端孔の外観と、面粗度計による形状測定結果を示す。CrN（高硬度）では剥離状の外観を示し、表面処理の膜厚さにあたる約4μmの段差があることから、膜が基材界面で剥離していると考えられる。CrN（AIP法）では剥離は見られなかった。同じCrN表面処理でも、スパッタ法よりもAIP法の方がイオン化率が高いため、膜の付きまわり性が良く組織が緻密になることや、窒素ガスとの反応性が高いため硬さが高くなることが知られている¹⁷⁾。同様の理由で、本試験でもAIP法のCrNの方が内径膜の密着性が高くなったものと考えられる。

以上の結果のまとめを表2に示す。摩擦係数、耐摩耗性、耐焼付き性および内径での密着性の観点から、CrN（AIP法）が、チタン合金製コンロッドにおける表面処理として最適と判断された。本手法は厚さ数ミクロン程度の蒸着処理であるが、従来使用されてきた数ミリの厚さをもつ銅ブッシュやモリブデン溶射処理の代用となると考えられる。このことは、部品そのものの軽量化や大幅な低コスト化を実現できることを意味する。

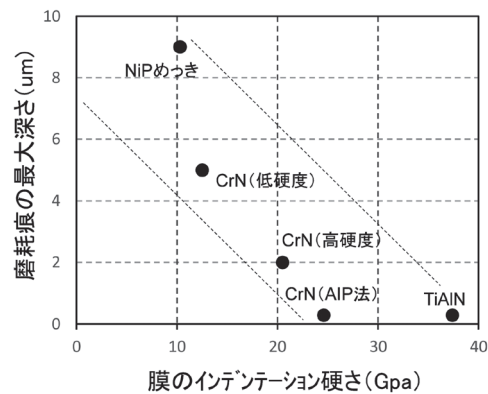


図8 膜硬さと磨耗痕の最大深さ¹⁰⁾

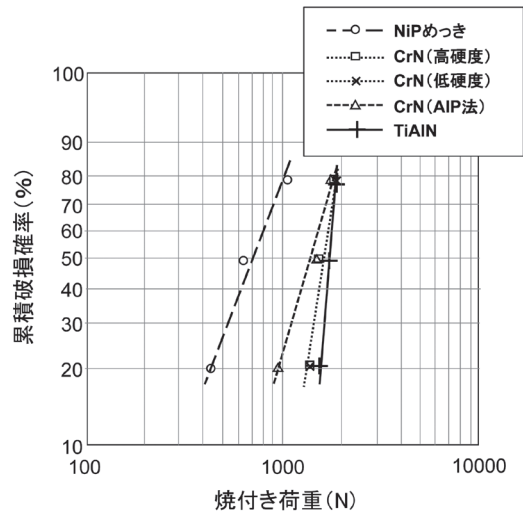


図9 耐焼付き性試験結果¹⁰⁾

4 大端破断割り工法

図3に示したコンロッド用材料への要求特性の内、高回転、高慣性力での使用で課題になりやすいのが、「(2) 弾性変形の

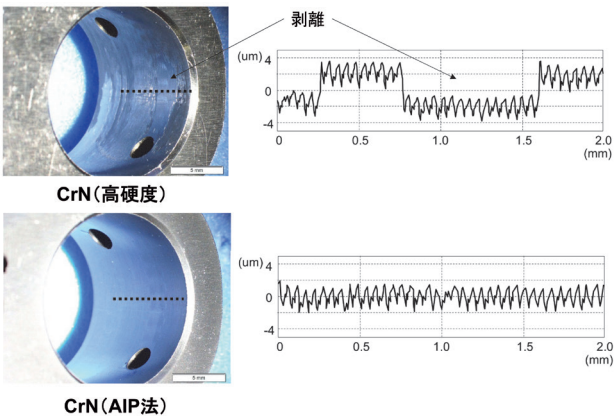


図10 内径摺動試験後の試験片外観と形状測定結果¹⁰⁾

表2 試験結果一覧¹⁰⁾

	膜種	摩擦係数	耐摩耗性	耐焼付き性 (密着性)	内径品質	
めっき	NiP	B	C	C	—	
拡散処理	OD処理	↑	—	—	(C)	
PVD	スパッタ法	CrN(高硬度)	↑	B	B	C
		CrN(低硬度)	↑	C	↑	—
	AIP法	CrN	↑	A	↑	A
		TiAlN	C	↑	↑	—
CVD	DLC(a-C:H)	B	—	—	(C)	

A:excellent
B:good
C:poor

しにくさ」である。具体的には、ピストンの慣性力により大きな引張り力がかかると、クランクシャフトに対する分割組立て部（大端孔）で、図11に示すような「クローズイン」と呼ばれる変形が起こる。クローズインにより、クランクシャフトとの間のクリアランスが狭くなり、摩擦ロスが大きくなる。

この対策として、4輪自動車用としては古くから「大端破断割り工法」が行われている¹⁻⁸⁾。この工法では製造時、キャップとロッドを一体で鍛造、機械加工する。粗加工後に衝撃を与えてキャップとロッドを破断分割し、分割後直ちにその凹凸面で精密に位置決めして再組み立てし、仕上げ加工

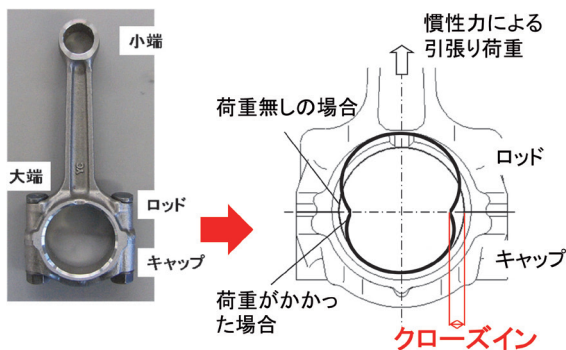


図11 使用中の大端内径の変形

を行う（図12）。この工法によると、分割組み立て部は脆性破断による凹凸でかみ合っているため、クローズインを小さくでき、高回転時の低ロス化に効果が大きい。

この工法では、破断分割で脆性破断面を得る必要があるため、靱性が低く、その結果疲労強度が比較的低い材料を用いることが多い。それに対し、オートバイ用の浸炭材やチタン合金は靱性が高いため、従来4輪自動車用コンロッドで行われてきた大端破断割り工法の適用は不可能と考えられてきた。靱性の指標として、たとえばシャルピ衝撃値は、先述した自動車用材料が $3\sim 23\text{J}/\text{cm}^2$ ^{2,5,7)}であるのに対し、SCM420材で $59\text{J}/\text{cm}^2$ 、Ti-5Al-1Feで $39\text{J}/\text{cm}^2$ である。しかし近年、温度とひずみ速度を調整することにより、オートバイ用の浸炭コンロッドやチタン合金コンロッドに本工法を適用する試みが行われている^{9,10)}。

浸炭材やチタン合金で脆性破断面を得るために、図13に示した重錘落下式の破断機を用いて、式1のように定義したひずみ速度 S と破断温度との関係を調べた。

$$S = \frac{2V_{wg} \tan \theta}{L} \alpha \quad (1)$$

ここで、 V_{wg} は、くさびの最大速度であり、試験中にレーザー変位計によって実測した値である。これ以外の変数の定

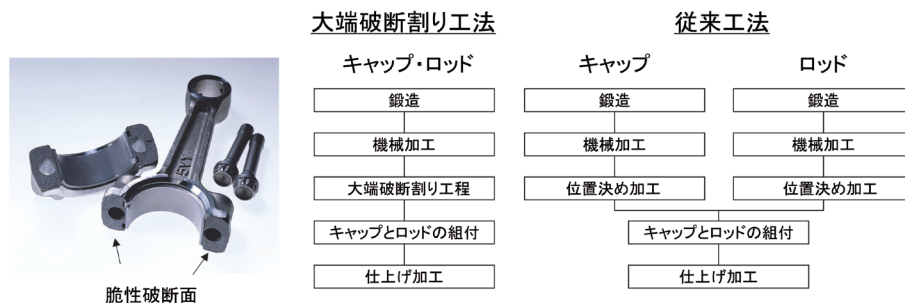


図12 大端破断割りコンロッド

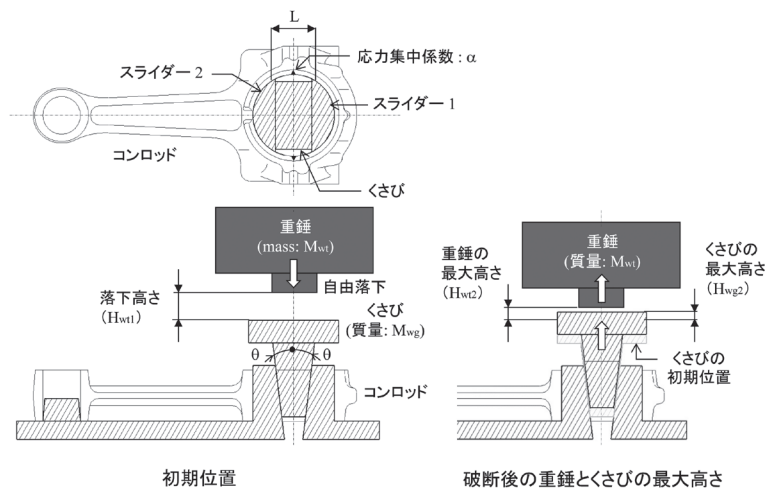


図13 重錘落下式分割治具¹⁰⁾

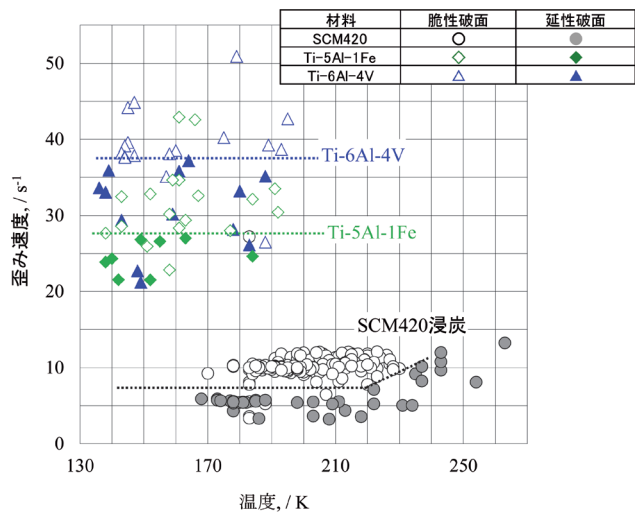


図14 温度・歪み速度の破断面への影響¹⁰⁾

義は、図13中に記されている。

材料として、オートバイコンロッド用材料であるSCM420 浸炭材とTi-5Al-1Fe、比較対象として、Ti-6Al-4Vを用いた。

試験結果を図14に示す。各材料とも、温度およびひずみ速度を適切にすることにより、脆性破断面を得られることが分かる。

本工法を適用したコンロッドのクローズインの測定結果を図15に示す¹⁸⁾。弾性係数が小さいチタン合金製コンロッドでも、本工法を適用することにより、従来の鋼製コンロッドと同等のクローズインが得られることが分かる。つまり、クローズインを減らすために大端周辺の断面積を上げる必要が無く、チタン合金の軽量化効果をより活かすことができる。

本工法により、オートバイ用の浸炭コンロッドやチタン合金コンロッドの使用中の摩擦ロスを低減できるだけでなく、生産における鍛造および加工の工程数を図12に示したように30～40%削減できる。特に、キャップとロッドの組み付け時の位置決めが破断分割した脆性破断面の凹凸で可能になるため、位置決めに必要なピン孔などの精密加工を省略できることから、チタン合金では難しいと言われている研磨加工を無くすることができる効果が大きい。

5 おわりに

オートバイ用エンジン部品の中でも、4輪自動車用と比べて特に異なる特徴をもつコンロッドについて、要求特性とそれを実現する材料、表面処理および工法を紹介した。今後も、これらの部品に最新の技術をタイムリーに適用することにより、オートバイ用エンジンのさらなる高性能化、軽量化、低燃費低排出化が可能になると考えられる。

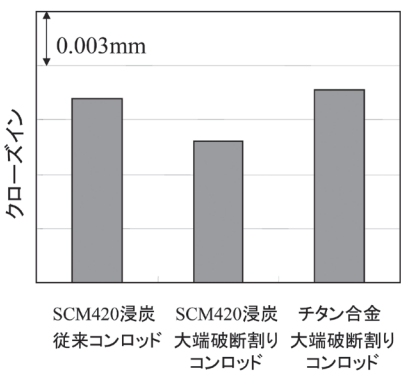


図15 クローズイン測定結果

参考文献

- 1) M.Weber : SAE Technical Paper Series, No.910157 (1991)
- 2) M.A.Olaniran and C.A.Stickels : SAE Technical Paper Series, No.980033 (1993)
- 3) B.Reppen : SAE Technical Paper Series, No.980882 (1998)
- 4) 福田晋作, 衛藤洋仁 : 自動車技術会学術講演会前刷集, No.86-00 (2000), 13.
- 5) 井上幸一郎, 中村貞行 : 電気製鋼, 71 (2000) 1, 81.
- 6) H.Park, Y.S.Ko, S.C.Jung, B.T.Song, Y.H.Jun, B.C.Lee and J.D.Lim : SAE Technical Paper Series, No.2003-01-1309 (2003)
- 7) 長谷川達也, 佐野直幸 : 熱処理, 47 (2007) 6, 343.
- 8) 高田健太郎, 小暮亮介, 佐藤正昭, 高田稔 : 自動車技術会論文集, 39 (2008) 2, 99.
- 9) T.Kubota, S.Iwasaki and T.Koike : SAE Technical Paper Series, No.2004-32-0064 (2004)
- 10) T.Kubota, K.Doi, T.Murakami, Y.Kojima and T.Miura : SAE Int. J. Engines, 9 (2016) 1, 483.
- 11) 藤井秀樹, 高橋一浩 : 新日鉄技報, 375 (1999), 99.
- 12) 藤井秀樹 : チタン, 64 (2016) 2, 125.
- 13) 藤井秀樹, 前田尚志 : 新日鉄住金技報, 396 (2013), 16.
- 14) 岳辺秀徳, 藤井秀樹 : 工業材料, 65 (2017) 12, 31.
- 15) 土居航介 : トライボロジー会議予稿集, 2012 (2012) 9, 423.
- 16) T.Uhara and H.Kurita : SAE Int. J. Mater. Manf., 7 (2014) 1, 207.
- 17) J.Vetter : TIRI + SFSJ, Tokyo, (2012)
- 18) T.Kubota and H.Yamagata : FISITA 2006 Yokohama Conf. F2006M033, (2006)

(2018年6月29日受付)