

破断分割 (FS) 式浸炭コンロッドの開発

Development of Fracture Splitting Method for Case Hardened Connecting Rods

久保田 剛 Tsuyoshi Kubota 岩崎 進也 Shinya Iwasaki 磯部 恒雄 Tsuneo Isobe

小池 俊勝 Toshikatsu Koike

● 研究開発センター コア技術研究室 / MC 事業本部 生産技術開発室

技術論文

Abstract

The fracture splitting (hereafter FS) method is being increasingly used for manufacturing connecting rods that are made of the powder forging material, high-carbon steel, etc., which are comparatively easy to fracture, in order to improve the accuracy and productivity. On the other hand, case hardened steel (for instance, JIS SCM420), which has a high fatigue strength, is used for the connecting rod in high performance motorcycles in order to reduce the motorcycle's weight.

In this report, the application of the FS method was examined for manufacturing the connecting rod which used the JIS SCM420 carburized steel. The hardness of this material varies according to the depth from the surface, becoming less hard and less brittle toward the center. Therefore, a brittle fracture surface over the entire fractured surface area was not obtained by the conventional fracturing method, and it was impossible to reassemble the fractured parts. Moreover, there was a problem that the fracture starting point was irregular and it caused the breakaway of tiny fractions from the fracture surface. The condition to obtain the brittle fracture surface was then elucidated using a weight falling-type splitting machine with the temperature and the virtual strain rate as parameters. Moreover, as for the fracture starting point, measures were taken by analyzing it using the nonlinear simulation of the explicit method. The production of the connecting rod for the Yamaha supersport model YZF-R1 using this method was started in 2003.

要旨

コンロッドの破断分割 (Fracture Splitting、以下FS) 工法は、精度および生産性の向上を目的として、破断が比較的容易な、焼結鍛造材や高炭素鋼などを素材としたものに対して、適用が進んでいる。一方、高性能バイク用のコンロッドでは、軽量化を目的として、高疲労強度である肌焼き鋼 (例えばJIS SCM420) の浸炭材が用いられている。本報では、JIS SCM420浸炭材を用いたコンロッドに対して、FS工法の適用を検討した。この材料では、硬さが深さ方向に変化し、内部では硬度が低く脆性が低い。そのため、これまでの破断方法では、破断面全面に脆性破面を得られず、再組みが不可能であった。また、破断の発生起点が不規則になり、その結果、破面から欠落片が発生するという課題が見られた。そこで、重錘落下式破断機を用い、パラメーターとして温度と仮想歪み速度を用いて、脆性破面を得るための条件を示した。さらに、破断の発生起点については、陽解法非線形シミュレーションを用いて解析することにより、対策を行った。本工法によるコンロッドは、スーパースポーツバイクYZF-R1 (図1) 用として、2003年より生産が開始されている。

1 はじめに

多気筒エンジン用のコンロッドは、通常、クランクシャフトに組み付けるために、大端部がロッドとキャップに分割される構造となっている(図2)。近年、このような構造を持つコンロッドの精度向上と製造コスト低減を図るために、破断分割 (FS) 工法が注目され、採用が進んでいる。

FS工法(図3)では、キャップとロッドを一体で鍛造および機械加工し、その後大端内径に設けたノッチ溝を起点として、衝撃的に破断分離する。その結果、破面同士の組み合わせにより、組立て時の精密な位置決めが可能となるため、位置決めのための機械加工は不要となる。この工法により、キャップとロッドの加工工程の統合や、端面および位置決め加工の省略による低コスト化が可能となる。また、キャップとロッドの精密な位置決めが可能なることから、大端内径の精度が向上するため、信頼性の向上や、ロス低減の効果が期待される。

FS工法は、1990年代より、焼結鍛造材のコンロッドにおいて生産が開始された¹⁾。その後、エンジン性能の向上や低燃費化の要求から、より疲労強度が高い材料を用いたコンロッドへの適用が検討されている。Olaniran²⁾ や Repgen³⁾ は、焼結鍛造材よりも疲労強度が高い鍛造鋼へ、FS工法を適用するための開発を行った。さらに、福田⁴⁾ や井上⁵⁾、Park⁶⁾ は、鍛造鋼の中でも疲労強度が高く、かつ切削性が優れている非調質鋼について、FS工法を適用するための開発を行った。井上⁵⁾ が開発した非調質鋼は、疲れ限度が480MPaに達する。これらの材料では、疲労強度を維持または向上させながら、脆性を上げることで、破断を行いやすくし、FS工法の適用を可能としている。

一方、鍛造鋼の中で、さらに高い疲労強度を得るためには、熱処理として、焼入れ焼戻しが有効である。その中でも、低炭素肌焼き鋼への浸炭焼入れ焼戻しは、熱処理前の切削加工の容易さと、熱処理後の高い疲労強度と靱性のバランスから、小型高性能エンジン用コンロッドの素材として、広く用いられている。



図1 YZF-R1



図2 FS浸炭コンロッド



図3 FS浸炭コンロッドの製造工程

本報では、大排気量バイク用として一般に用いられている、JIS SCM420の浸炭焼入れ焼戻し材(有効硬化深さ0.5mm、疲れ限度800MPa、以下SCM420浸炭材)を用いたコンロッドについて、FS工法の適用を検討した。本材料は、硬さが深さ方向に変化し、内部では硬度が低く脆性が低い。そのため、これまでの破断方法では、破断面全面に脆性破面を得られず、また、破面の発生の仕方が不規則になるという課題が見られた。そこで、この2つの課題について、検討を行った。

2 脆性破断条件

2.1 目的

FS工法に求められる特性の1つは、コンロッドの破断前の形状・寸法と、破断して再組立てした後の形状・寸法が変化しないことである。また、キャップとロッドの組付け時に、破断面による μm 単位の精密な位置決めをする必要がある。そのために、破断面は脆性破面である必要があり、材料面および破断条件の面から、種々の検討が行われている^{2~6)}。

SCM420浸炭材は、表層付近は高炭素のため、脆性破面を得やすい。しかし、内部は低炭素で脆性が低いため、これまで検討されてきたFS用材料に比べて脆性破面を得にくいと予想される。例えば、これまでのFS用鍛造鋼では、JIS3号試験片によるシャルピ衝撃値が $19\sim 23\text{ J/cm}^2$ である⁵⁾のに対し、本材料の内部では 59 J/cm^2 以上である⁷⁾。そこで、SCM420浸炭材について、内部も含めた破断面全面に脆性破面を得られる破断条件を検討した。

2.2 方法

破断条件を検討するに当たり、シャルピ衝撃試験など、標準化された試験方法では、コンロッド実体で必要な条件を再現できないと考えられる。今回の試験で得られた結果を生産条件として反映させるために、コンロッド実体をテストピースとして用い、生産での工法を想定した試験方法を検討した。試験方法の概略図を図4に示す。

テストピースとして、JIS SCM420材をコンロッド素材形状に熱間鍛造し、機械加工を施した後、浸炭焼入れ焼戻した。図5に硬さ分布を示す。大端の内周面には、破断起点のための溝を放電加工により生成した。溝形状を図6に示す。

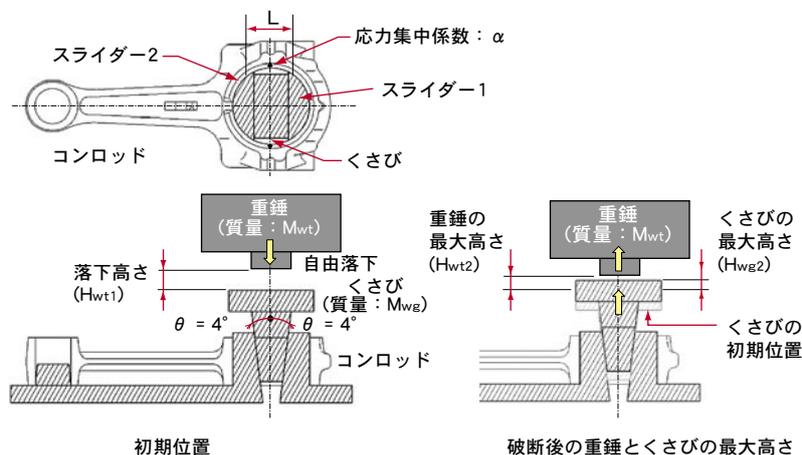


図4 試験方法の概略図

SCM420浸炭材は、従来の材料に比べ、破断のために大きなエネルギーが必要と考えられる。このような材料の破断条件を調べるために、重錘落下式分割機を用いた。図4に示すように、重錘の位置エネルギーをくさびに与え、くさびがスライダをコンロッドの軸方向に開くことにより、コンロッドの大端部を破断する。破断後、重錘は、ダンパーにより上方に反発する。この分割機では、油圧プレスやクランクプレス等による分割機に比べ、大きなエネルギーと歪み速度を得ることができる。さらに、重錘の質量および落下高さを変えることにより、歪み速度およびエネルギーの調整を容易に行うことができる。

この試験方法では、治具の摩擦などによるエネルギー吸収を正確に算出できないため、シャルピ衝撃試験等と同様の方法では破面の脆性遷移を知ることができない。そこで、本試験方法に合わせ、「仮想吸収エネルギー」と「仮想歪み速度」の2つのパラメーターを定義した。仮想吸収エネルギーとは、破断において、コンロッドと治具が吸収したエネルギーの総和であり、次のように定義した。

$$E = M_{wr}gH_{wr1} - M_{wr}gH_{wr2} - M_{wg}gH_{wg2} \quad (1)$$

ここで、 M_{wr} は重錘質量、 M_{wg} はくさび質量、 g は重力加速度、 H_{wr1} は初期の重錘高さ、 H_{wr2} は破断後の最大重錘高さ、 H_{wg2} は破断後の最大くさび高さである(図4)。重錘高さおよびくさび高さについては、レーザー変位計を用いて測定した。

また、破断起点溝底での歪み速度を比較するために、仮想歪み速度について、次式のように定義した。

$$S = \frac{2V_{wg} \tan 4^\circ}{L} \alpha \quad (2)$$

ここで、 V_{wg} はくさびの最大速度、 α は破断起点溝底の応力集中係数、 L はスライダの作用点間の距離である(図4)。

破断面の脆性/延性の判断方法として、SEM(Scanning Electron Microscope)により、破断面の観察を行った。コンロッドの破断面が、図7aに示すようなへき開破面であったものを脆性破面とし、図7bに示すようなディンプルが観察されたものを、延性破面とした。

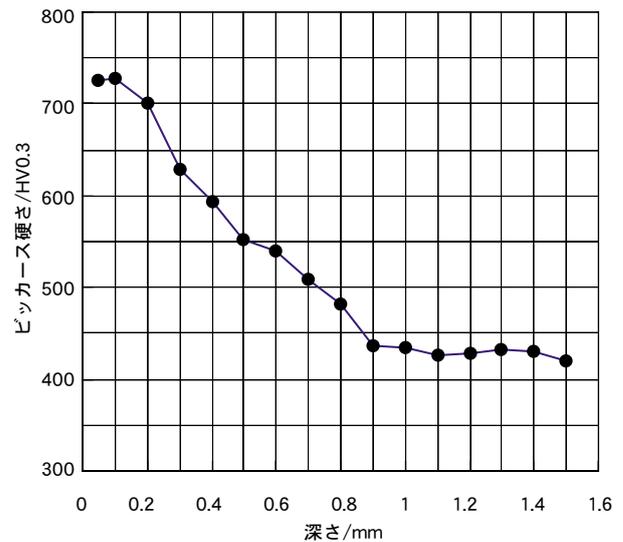


図5 コンロッドの硬さ分布

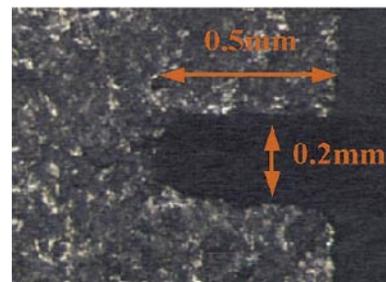
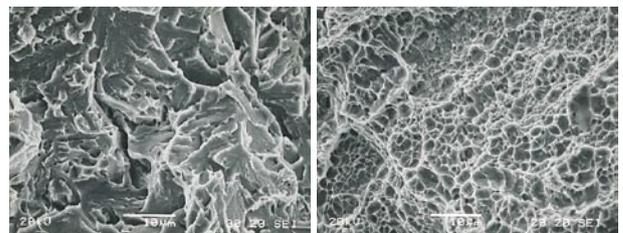


図6 破断起点溝の形状



a. へき開破面 b. ディンプル

図7 破断面

2.3 結果

仮想歪み速度 10sec^{-1} での、破断温度と仮想吸収エネルギーの関係性を調べた結果を、**図8**に示す。温度約 230K 、仮想吸収エネルギー約 45J を境にして、破面形態が変化している。この試験方法の仮想歪み速度 10sec^{-1} での脆性遷移温度は、約 230K と考えられる。

破断温度と仮想歪み速度との関係を、**図9**に示す。仮想歪み速度 約 7.5sec^{-1} 以下(図中破線)では、破断温度に関わらず、安定して脆性破面を得ることが不可能であった。それ以上の仮想歪み速度では、破面形態に、一点鎖線で示した境界線が見られた。この2つの境界線が脆性遷移線であり、この試験方法で脆性破面を得るための条件を示している。

3 複数破面の原因と対策

3.1 目的

脆性破面が得られたコンロッドの内、**図10**の(i)、(ii)、(iii)に示した3箇所に段差が発生するものがあった。これらの段差は、**図11**および**図12**に示すように、複数の破面が重なることで発生している。これらの段差の内、段差(iii)については、機能上、製造上とも問題とならないことが確認されている。しかし、段差(i)と段差(ii)については、**図12**に示す通り、破断後の加工の取り代にかかると、その加工時に欠落片となる可能性がある。この欠落片は、キャップと

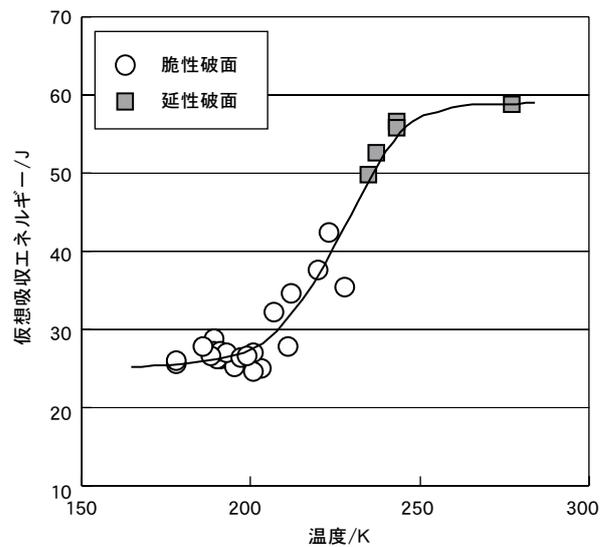


図8 破断温度と仮想吸収エネルギーの関係

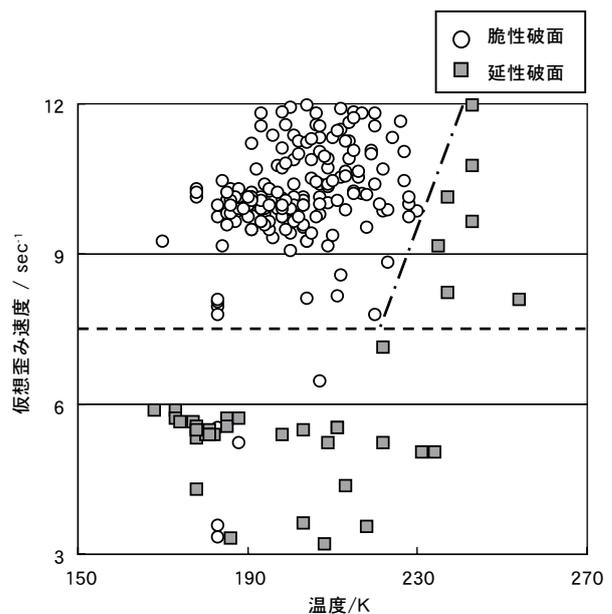


図9 破断温度と仮想歪み速度の関係

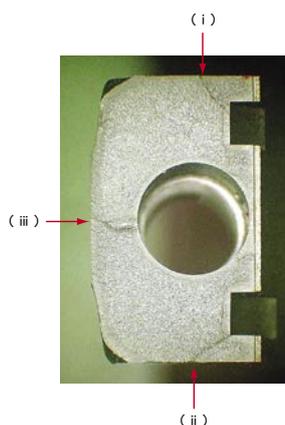


図10 破断面の段差

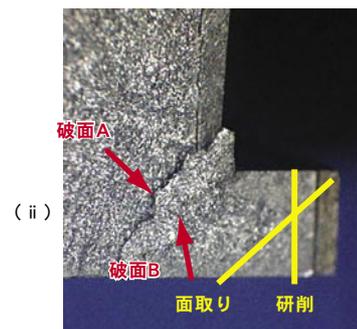


図11 図10(ii)部分の拡大図

ロッドを分離した際に破面から離れる。その後、クランクへの組付け時に破面に噛み込み、組付け不良の原因となったり、エンジンオイル中に混ざり、使用中に問題となったりすることがある。したがって、段差(i)、(ii)が発生しないように、複数の破面の発生原因調査と対策を行う必要がある。

3.2 方法

複数の破面の発生原因を調べるために、高速な衝撃現象を計算可能な、陽解法非線形シミュレーションを行った。破面に発生する応力の解析を行い、起点が発生する可能性のある場所を調査した。ソルバーとして、LS-DYNA960を用いた。

モデルは、全体の対称性を考慮して2分の1モデルとした。全体図を、**図13**に示す。重錘がくさびに接触する時点を開始時間とし、重錘の初速を650mm/secとした。また、くさびとスライダーについては、剛体と仮定して計算を行った。

また、コンロッドの形状として、これまでの形状のほかに、端の部分の破断起点溝を切除した形状(**図15**)においても、計算を行った。

3.3 結果

シミュレーションによる応力解析の結果を、**図14**に示す。図中のa、b、c三箇所に応力が集中しており、それぞれが独立して破面発生起点となる可能性が確認された。段差(i)と(ii)は、それぞれ応力集中部aとb、bとcを起点とした破面が合流して発生していると考えられる。

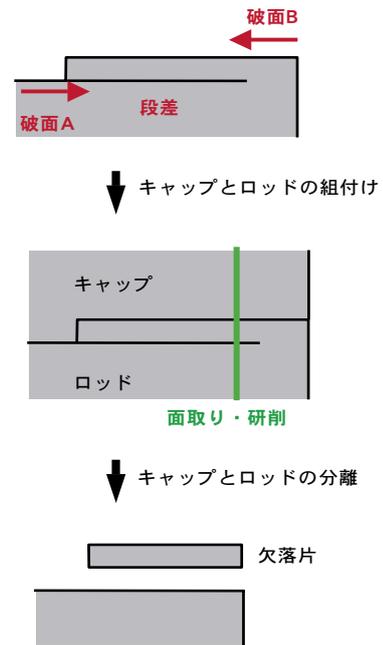


図12 破面の重なりによる欠落片発生過程

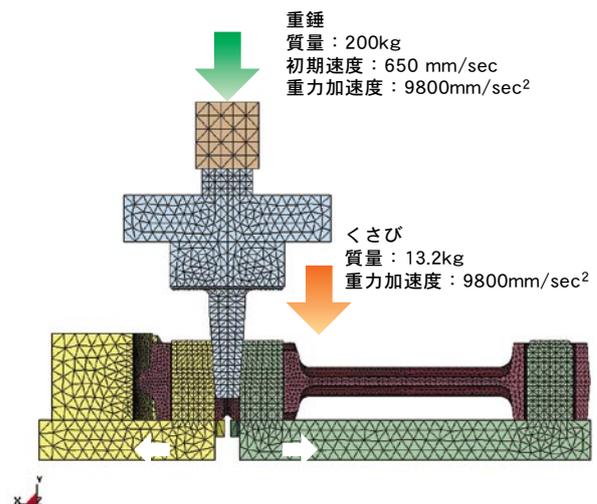


図13 FS工法の非線形シミュレーション

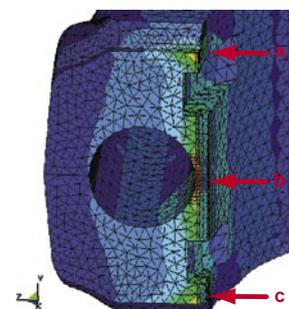


図14 応力解析結果

そこで、aとcでの応力集中を減らすため、この部分の破断起点溝を切除し(図15)、再度シミュレーションを行った。その結果、図16に示すように、aとcの応力集中が緩和されていることが分かった。この形状でコンロッドを試作し実験を行ったところ、図17に示すように、aとcを起点とする破面は見られず、段差(i)と段差(ii)の発生を防げることが確認された。その結果、破断後の加工において、欠落片が発生しないことが確認できた。

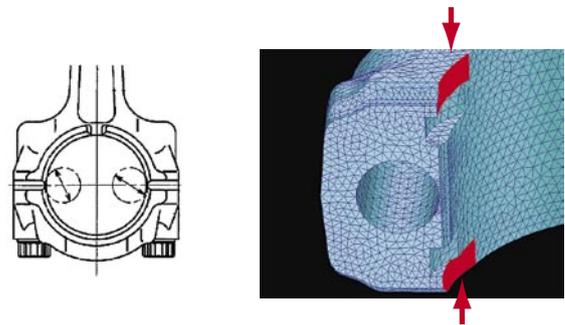
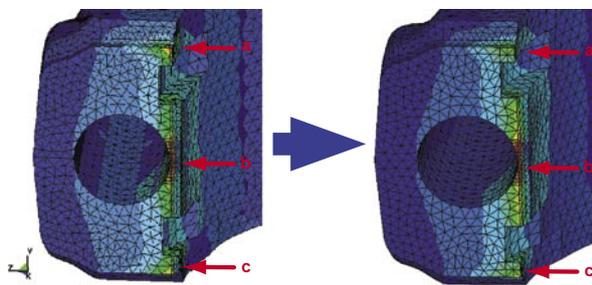


図15 破断起点溝の切除形状



a. 破断起点溝切除前
(図14に同じ)

b. 破断起点溝切除後

図16 応力解析結果

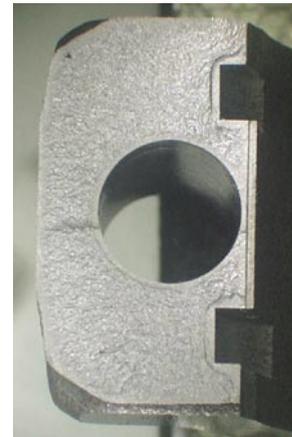


図17 破断起点溝切除後の破断面

4 おわりに

SCM420浸炭材を用いたコンロッドに対してFS工法を適用する際の、2つの課題について検討を行った。

1. 温度と仮想歪み速度が破面の脆性に影響することを示し、脆性破面を得られる条件として、脆性遷移線を示した。
2. 複数の破面の発生原因とその対策効果について、非線形シミュレーションにより調査できることを示した。その結果、破断後の加工における欠落片の発生を防止することができた。

以上により、疲れ限度800MPaであるSCM420浸炭材を用いたコンロッドへの、FS工法の適用が可能となり、大端精度の向上による信頼性向上、製造コストの約30%低減といった効果を、バイク用の小型高性能エンジンにもたらすことが可能となった。本工法を用いたコンロッドは、スーパースポーツバイクYZF-R1用として、2003年より生産が開始された。

■参考文献

- 1) M.Weber; SAE Technical Paper Series, No.910157(1991)
- 2) M.A.Olaniran, C.A.Stickels; SAE Technical Paper Series, No.980033(1993)
- 3) B.Repgen; 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, 13(2000).
- 5) 井上幸一郎, 中村貞行; 電気製鋼, 71-1, 81(2000).
- 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) JIS G4105

■著者



久保田 剛



岩崎 進也



磯部 恒雄



小池 俊勝