

軽量コネクティングロッドの開発

Development of Light Weight Connecting Rod

飯田 善次*
Zenji IIDA
鈴木 茂*
Shigeru SUZUKI

高田 健太郎*
Kentaro TAKADA
佐藤 史*
Chikashi SATO

要 旨

従来の中炭素非調質鋼をベースに、亀裂起点となりやすいフェライトを強化することにより高疲労強度化を達成し、一方Ti添加による靱性低下効果を最適にコントロールすることで大端部の破断分割も可能とする材料を開発した。

本開発鋼を適用したコネクティングロッドは、従来の非調質鋼を適用したコネクティングロッドに対して疲労強度が30%向上し、安定した破断分割特性も有している。従来の非調質鋼を適用した場合に比較して同等強度で13%の軽量化が可能となった。

ABSTRACT

The conventional middle carbon non-heat-treated steel used in connecting rods has been used as a base in the development of a new material. High fatigue strength has been achieved by increasing the toughness of the ferrite, which tends to act as a crack origin, while optimal control of the reduction of toughness achieved through addition of Ti has been effective in enabling fracture splitting of the material.

Connecting rods produced using the new steel demonstrate 30% higher fatigue strength than connecting rods produced from conventional non-heat treated steel, and possess stable fracture splitting characteristics. In addition, the new connecting rods show identical strength to connecting rods made of the conventional material, but are 13% lighter.

1. まえがき

近年、自動車の省燃費化、高出力化により部品の軽量化要求は高まっている。特にコネクティングロッド(以下コンロッド)は、回転運動するため、その大きさや重量がエンジンレイアウトや性能に影響を及ぼすため軽量化と小型化が要求される。また、それ自体を軽量化することにより、他部品への軽量波及効果も期待できる。

コンロッドの軽量化に関しては、軽量化材料であるチタン合金材、アルミ合金材が一部のスポーツカー等で実用化されている。しかし、これらの軽量化材料は、コストが高くなるため⁽¹⁾一般の乗用車用エンジンでは、主に非調質鋼が使用されており、軽量化に対しては、非調質鋼の高強度化がおこなわれている⁽²⁾。

近年、特に欧米においてコンロッドの大端部を破断分割する製法が採用されている。Fig. 1に従来の構造と破断分割の構造を、Fig. 2にその製造工程を示す。破断分割製法は、製造工程の短縮化が可能であり、ロッド・キャップの位置決め用部品が不要となる。また、これによりボルト締結ピッチ

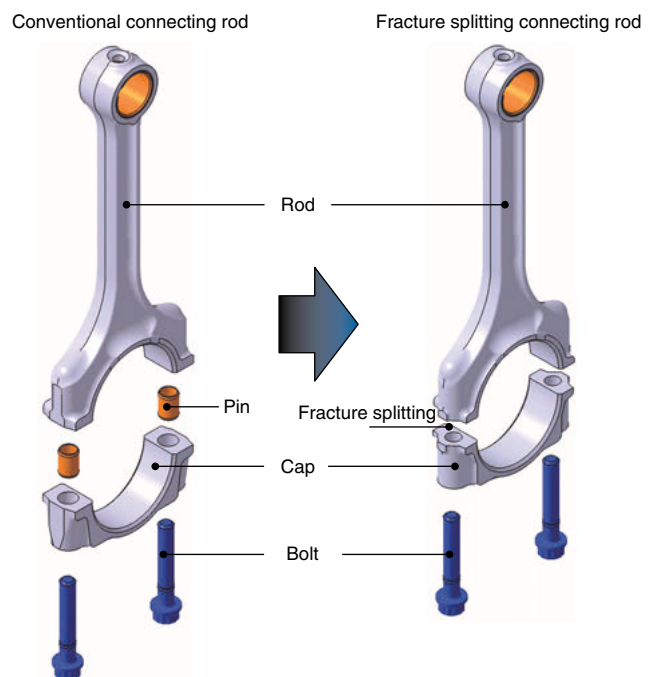


Fig. 1 Comparison of conventional connecting rods and fracture splitting connecting rods

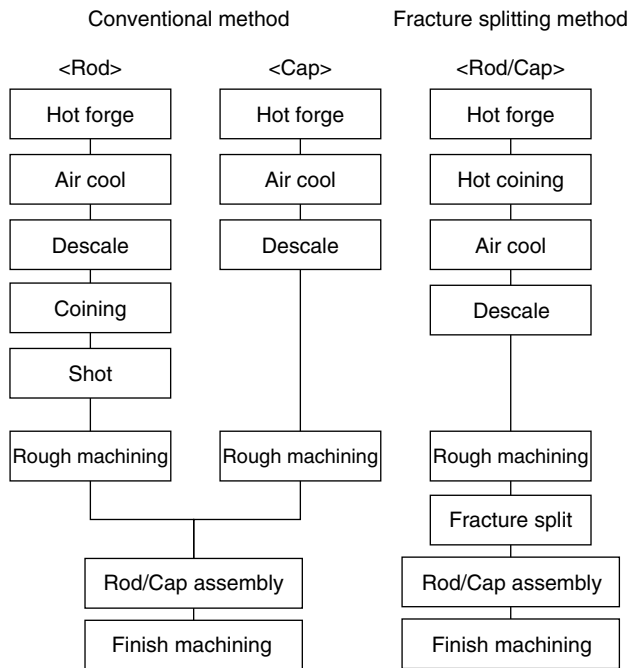


Fig. 2 Production process of connecting rod

の短縮ができ、従来構造に対して小型・軽量化が可能となる。しかしながら、破断分割に用いられる C70S6 鋼(DIN 規格)では、従来の中炭素非調質鋼と疲労強度が同等であり、さらなる軽量化は困難であった。そこで、材料強度を向上した破断分割用鋼を開発し、小型・軽量の破断分割コンロッドを実現した。

2. 開発のねらい

2.1. 破断分割

破断分割において安定した品質を得るためには、以下が必要と考えられる。

(1) 安定した破断面性状

(2) 安定した荷重で破断

これらを従来の破断分割鋼である C70S6 鋼より向上させることを目標とした。

2.2. 高強度

高強度化による軽量化は、クランク軸受の耐焼付限界向上、クランクへの負荷低下に伴う強度余裕度向上、エンジン振動低下、フリクション低減への寄与等が期待できる。過去の知見より、この効果を明確に得たい場合は、10%以上の軽量化が望ましい⁽²⁾。

よって、現用非調質鋼適用時に対して10%の軽量化を図ることを目標とした。

尚、高強度化には疲労強度向上と降伏強度向上が考えられるが、適用予定のエンジンにおいては疲労強度向上が軽量化に対して有利であるので疲労強度の向上に主眼を置いた。

Table 1 Chemical composition for impact test

(mass %)							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti	V
0.30	0.70	0.80	0.004 ~0.072	0.055	0.20	—	0.200
0.30	0.70	0.80	0.060	0.060	0.20	0 0.190	—

3. 材料成分

3.1. 開発鋼のコンセプト

機械加工性の観点から、硬度上昇を考慮し従来の中炭素非調質鋼をベースとして以下のコンセプトで成分設計をおこなった。

(1) 低靱性化

・フェライト・パーライト組織においてはフェライトの靱性が高いため、フェライトの靱性を低下させる元素を添加

(2) 疲労強度向上

・破壊起点となりやすいフェライトの固溶強化および析出強化

3.2. 低靱性化の成分設計

フェライト・パーライト非調質鋼のフェライトの靱性を低下させるには、フェライトを強化し硬さを上げることが有効と考えられる。フェライト強化については、V添加鋼が既に広く実用化されており⁽³⁾、近年 Ti を添加することによりフェライトを強化するとともに最適な靱性値が得られることも報告されている⁽⁴⁾。また、不純物元素としての P は粒界を脆くさせ、靱性が低化することも知られている。そこで、V添加鋼をベースに P を 0.004 - 0.072% に変えた場合と Ti を 0.10 - 0.19% に変えたもので各々の添加量と靱性の関係を確認した。供試鋼は、Table 1 に示す。これらの材料を熱間鍛造条件である 1250℃ に加熱放冷した後、JIS Z 2202 V ノッチ衝撃試験片に加工し室温で衝撃試験をおこなった。P 添加の影響を Fig. 3 に、Ti 添加の影響を Fig. 4 に示す。

P、Ti 添加量の増加とともに衝撃値が低下しており、特に Ti 添加による靱性低下効果は大きい。これは、フェライト中に析出する V 炭窒化物と Ti 炭窒化物の析出形態が異なるためと推定される。Fig. 5 に V 添加鋼および Ti 添加鋼のフェライト相薄膜 Transmission Electron Microscope (TEM) 組織を示す⁽⁴⁾。V 添加鋼では微細な V 炭窒化物がフェライト中に析出しているのに対し、Ti 添加鋼では析出している炭窒化物は V 添加鋼に比べて数も少なく大きいもので、Ti 炭窒化物の周りに転位ループが形成され、変形時においては転位が蓄積しやすくなり、これが靱性を低下させている要因と渡里は報告している^{(4), (5)}。

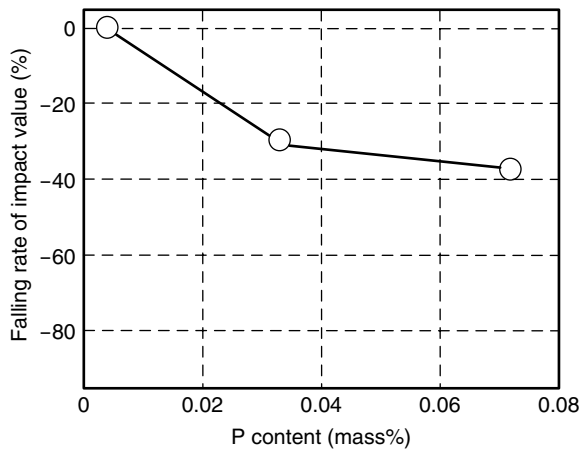


Fig. 3 Relationship between P content and impact value

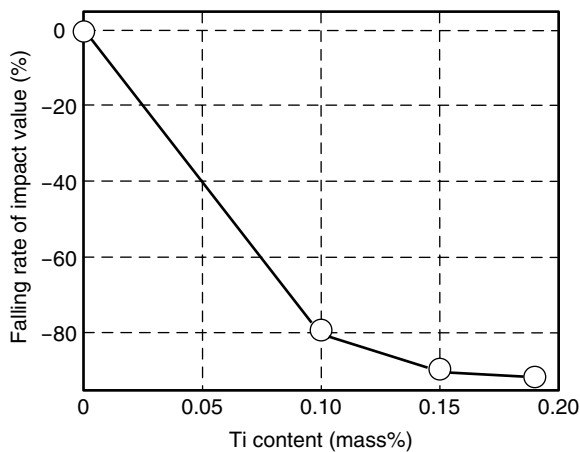


Fig. 4 Relationship between Ti content and impact value

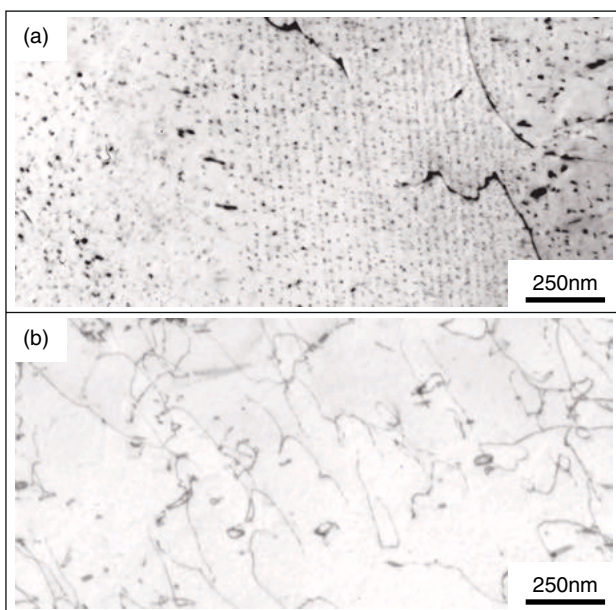


Fig. 5 TEM micrographs of (a) V added steel and (b) Ti added steel

なお、破壊形態は、ともに粒内破壊であり、P添加鋼には粒界破壊は認められなかった。したがって、P添加による韌性低下は、固溶強化の効果によるものと考えられる。

安定した破断分割をねらうためには、十分に低韌性化させることが必要と考え、Pを0.04%以上、Tiを0.15%以上とし、複合添加とした。

3.3. 高疲労強度化の成分設計

機械加工性を考慮すると、疲労強度を向上させても硬度が高くないことが望ましい。したがって、引張強度と疲労強度の比である耐久比を上げるための材料設計が必要である。

Fig. 6 にC量のみを0.1 - 0.6%に変えた構造用炭素鋼のC量と耐久比の関係を示す⁽⁶⁾。この組織はフェライト・パーライトであり、引張強度はフェライトとパーライトの体積比で決まり、疲労強度は亀裂起点部であるフェライト強度によって決まる。したがって、耐久比を向上させるには、C量を低くし、フェライトを強化することが有効であると考えられる。Fig. 6 上に実用化されている従来非調質鋼とC70S6鋼の耐久比をプロットすると良い相関が認められることから、C量は従来非調質鋼以下とした。

フェライトを強化するためには、析出強化、固溶強化が考えられる。Fig. 7に中炭素非調質鋼において各種合金元素

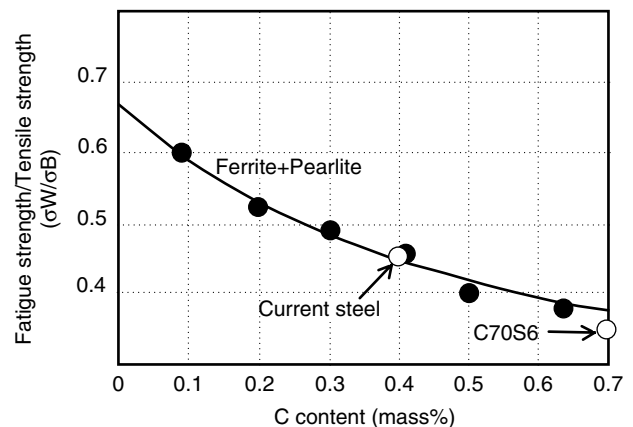


Fig. 6 Relationship between C content and $\bar{E}-W/\bar{E}-B$

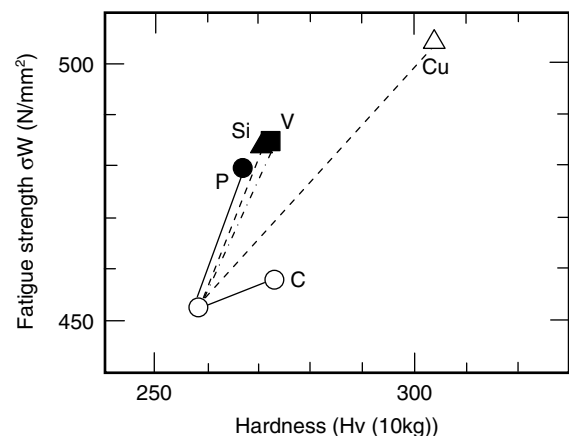


Fig. 7 Relationship between hardness and fatigue strength

添加量を変えた場合の、硬度上昇と疲労強度上昇の相関を示す⁽⁷⁾。硬度を上げずに疲労限度を向上させるためには、P、Si による固溶強化とVによる析出強化が効果的であることがわかる。また、前述のTiは析出強化元素としても知られている⁽⁸⁾。

PとTiについては、既に添加量を決定しているので、Si、Vの添加による疲労強度の向上を検討した。Table 2に示す供試鋼で小野式回転曲げ疲労試験をおこなった。供試材は、熱間鍛造を模して1250℃加熱放冷してからJIS Z 2274 1号試験片に加工した。

Fig. 8 に Si およびVの添加量と疲労強度の関係を示す。

V添加による疲労強度向上効果は大きい、Si添加による疲労強度向上効果は小さかった。この理由を考察するためにフェライト硬度を確認した。Fig. 9 に Si およびVの添加量とフェライト硬度の関係を示す。V添加によるフェライト強化効果は顕著に認められるが、Si添加によるフェライト強化は認められなかった。これは、既にフェライトがTi、V炭窒化物にて析出強化されているため、Si添加による固溶強化の効果が現れ難いためと考えられる。一方、V添

Table 2 Chemical composition for fatigue strength

(mass %)

No.	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti	V
1	0.28	0.53	0.72	0.045	0.100	0.14	0.154	0.159
2	0.28	0.56	0.73	0.054	0.090	0.17	0.173	0.168
3	0.31	0.68	0.74	0.058	0.066	0.15	0.184	0.199
4	0.32	0.19	0.60	0.035	0.063	0.15	0.179	0.199
Current steel	0.39	0.45	1.05	0.010	0.110	0.09	—	0.110
C70S6	0.70	0.20	0.53	0.008	0.060	0.12	—	0.029

加による析出強化は、前述しているようにTi炭窒化物とV炭窒化物の析出形態が異なるため、それぞれの析出強化効果が得られていると考えられる。以上より、Ti添加鋼におけるフェライト強化にはVによる析出強化が有効である。

Fig. 10 には供試鋼、従来非調質鋼およびC70S6鋼の全硬度と疲労強度の関係を示す。フェライトが強化された供試鋼は硬度に対する疲労強度が高いことがわかる。

Si添加量については、従来非調質鋼と同等に設定し、V添加量については硬度と強度のバランスを考慮し設定した。

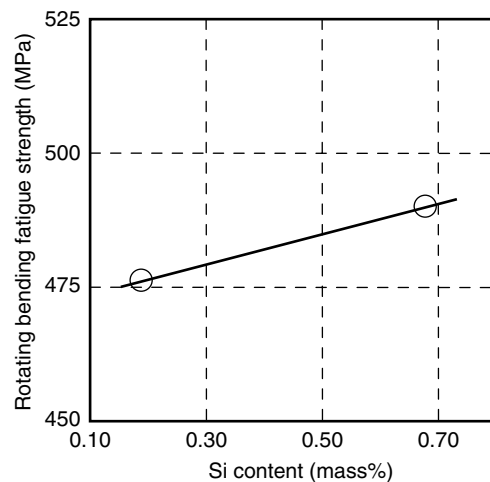
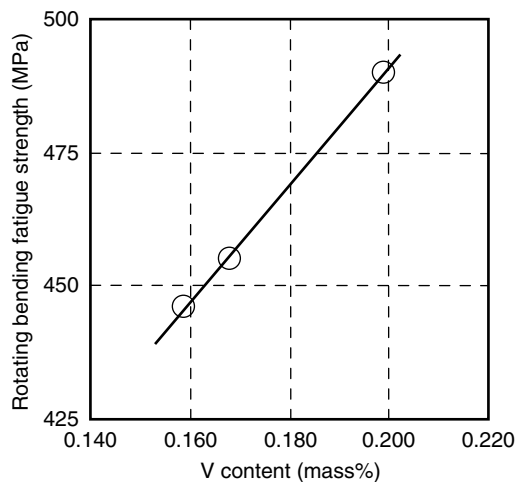


Fig. 8 Relationship between V/Si content and fatigue strength

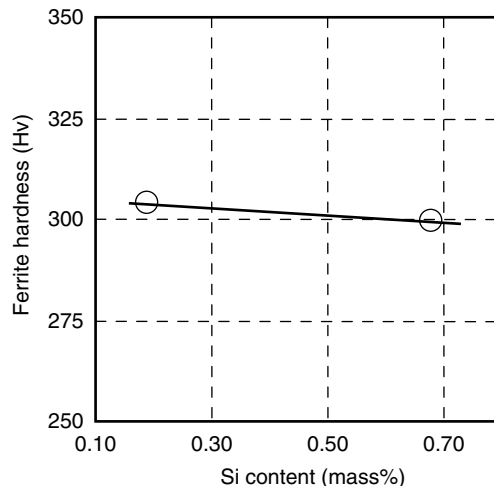
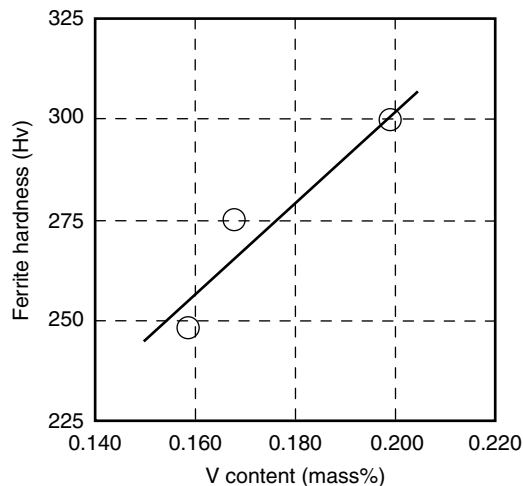


Fig. 9 Relationship between V/Si content and ferrite hardness

3.4. 材料成分の設定

以上の検討結果から破断分割性の確保及びフェライト強化による疲労強度向上、機械加工性確保のための硬度設定を基本とした成分設計をおこなった。その内容をTable 3に示す。また、Fig. 11 に開発鋼の組織を C70S6 鋼と比較して示す。開発鋼の組織は、フェライト・パーライト組織となっている。

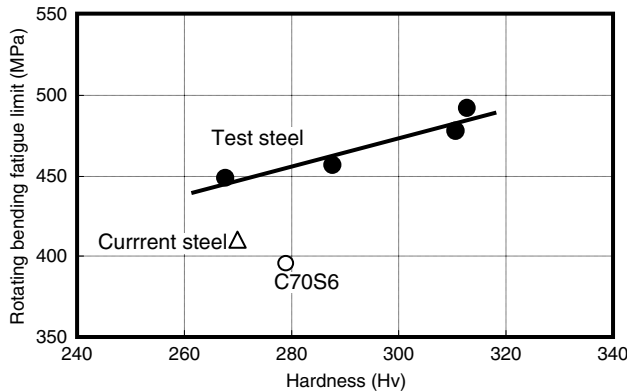


Fig. 10 Relationship between hardness and fatigue strength

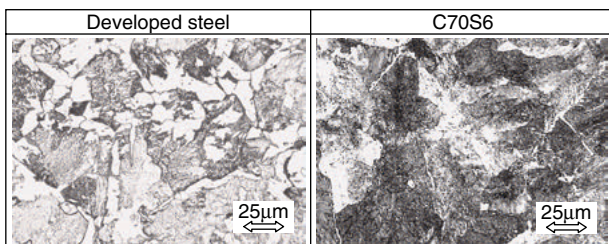


Fig. 11 Micro structure of actual connecting rod

4. 開発コンロッドの破断分割特性

大端部を破断分割する際に求められる機能と特性は下記のようなになる。

(1) 要求機能

- a : 破断面の一致
- b : ボルト軸力の安定
- c : 組立時にロッド・キャップがずれなく組み付く

(2) 要求特性

- a : 破断面が脆性破面
 - b : 破断面の粗さ安定
 - c : 部品間公差以内で破面整合
- a については、破断面に延性破面が生じた場合、塑性変形した部分が破面密着の妨げになる。
- b については破面粗さが大きい場合、表面積が増加し破断面密着にボルト軸力が消費され、また破断面粗さが小さい場合は、破断面密着のボルト軸力が小さくなり、ボルト軸

Table 3 Chemical composition of developed steel

(mass %)							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti	V
0.30	0.50	0.70	0.050	0.100	0.10	0.180	0.180

力の安定性が低下することが懸念される。

c についてはクランクシャフトとコンロッドを組付ける時にロッド・キャップがずれてしまうと正常な組付け状態とならないため機能障害に至る。

4.1. 破断面粗さの安定化

ロッド・キャップ一体コンロッドを熱間鍛造で作製し、所望の寸法・形状に機械加工を施し、破断分割の起点となる切り欠きを機械加工により大端内径に入れ、Fig. 12に示した破断分割装置を用い試験をおこなった。

装置は、コンロッドを固定した後、クサビを引き込むことで大端部に挿入されている半割り治具が拡張され、破断分割する構造となっている。

破断面の粗さを定量化するため、3次元粗さ測定機にて破面を測定し、その粗さを表面面積率 AR として下式にて定義した。測定部位は Fig.13 に示す。

$$AR = \frac{SA}{PA}$$

AR : 表面面積率

SA : 実測面積

PA : 投影面積

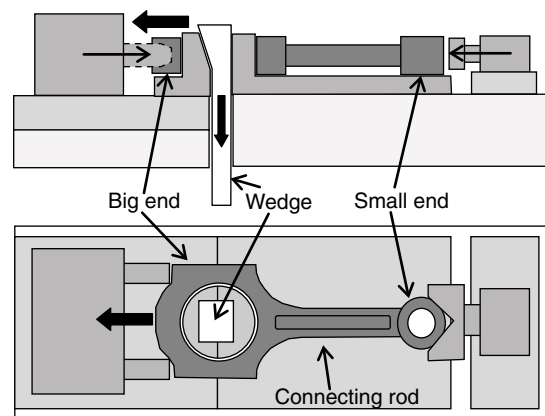


Fig. 12 Fracture splitting device

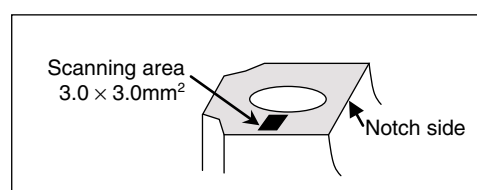


Fig. 13 Measuring area

破断面粗さをコントロールするために大端部内径に入れる切り欠き深さの影響を確認した。切り欠きについては、機械加工によるものとレーザによるものの双方について実施した。また、C70S6 鋼についても機械加工切り欠きのみではあるが試験をおこない比較した。

Fig. 14に示すように切り欠き深さが深くなるにしたがい表面面積率が低下し、切り欠き深さが1 mm 以上で安定した表面面積率が得られた。機械加工切り欠きとレーザ切り欠きの比較では、同等の表面面積率であった。

切り欠き深さが浅い場合は、切り欠き先端での応力集中度合いが低くなり、亀裂発生部位や亀裂の進行方向のばらつきが大きくなるため、相対的に表面面積率が大きくなるとともにばらつきも大きくなると考えられる。それに対し

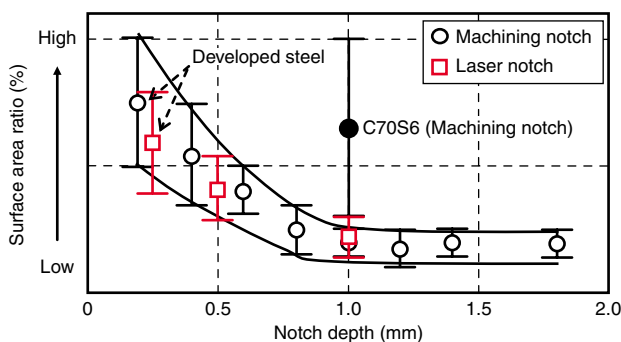


Fig. 14 Relationship between notch depth and surface area ratio

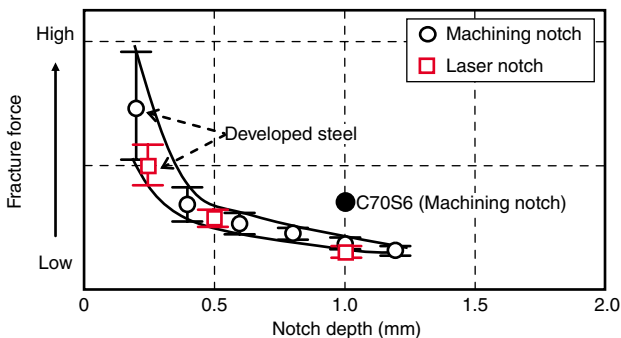


Fig. 15 Relationship between notch depth and fracture force

て切り欠き深さが深い場合は、応力集中度合いが大きくなり、亀裂発生部位や亀裂の進行方向範囲が狭められ、表面面積率が小さくなるとともにばらつきも小さくなると考えられる。開発鋼においては、1 mm 以上の切り欠き深さで安定した破断面を得ることができる。

Fig. 15には、切り欠き深さと破断荷重の関係を示す。なお、破断荷重は、装置のクサビ引き抜き用油圧シリンダーから油圧変動をモニターし検出した。

ノッチ深さと表面面積率の関係と同様にノッチ深さが大きくなるにしたがい破断荷重の低下とともにばらつきも小さくなり、1 mm 以上の切り欠き深さで安定した破断荷重となった。機械加工切り欠きとレーザ切り欠きの比較では、同等の破断荷重であった。

開発鋼とC70S6鋼を比較すると、開発鋼の方が破断面粗さのばらつきが小さく、低い荷重で破断分割が可能となることがわかる。以上より、開発鋼はC70S6鋼に対して、より破断分割性が良好な材料であると言える。また、開発鋼は機械加工、レーザ双方の切り欠きに対応可能である。

Fig. 16 に破断分割面の Scanning Electron Microscope (SEM) 像を示す。破断開始の切り欠き底部から破断終部まで脆性破面(へき開)である。

4.2. 破断面のセルフフィット

破断分割コンロッドは組付けた時にロッド・キャップがずれることなく組みつけられることが要求される。

セルフフィットは、破断面の凹凸がガイドとなり組み付く事象と考えられるので、破断面粗さコントロールは、セルフフィットの観点からも重要と考えられる。

5. 開発コンロッドの疲労強度

コンロッドは鍛造肌のままで使用される部品であるので、実際のコンロッドにおいてI断面部の引張-圧縮疲労強度を検証した。結果を Fig. 17 に示す。なお、同様工程で作製したC70S6鋼を用いたコンロッドも比較して示す。開発鋼は、現用非調質鋼、C70S6鋼に対し、同等硬度で30%の疲労強度向上を達成した。

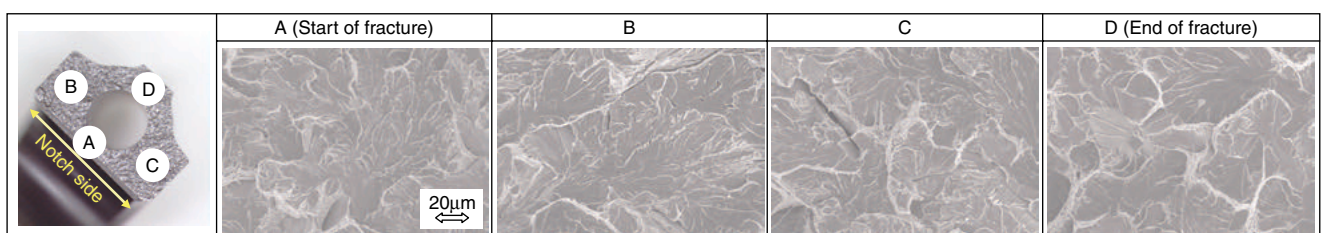


Fig. 16 SEM micrographs of fracture surface

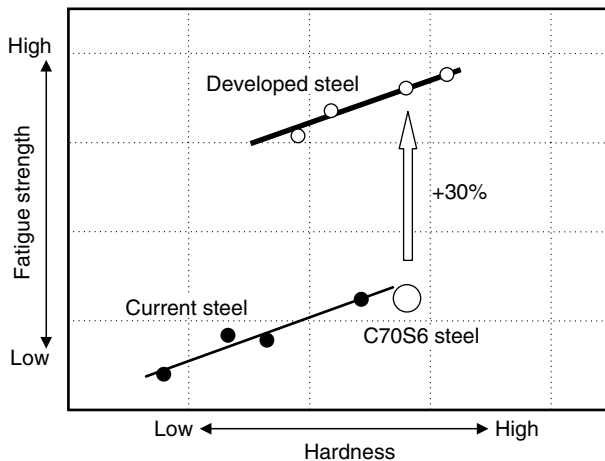


Fig. 17 Comparison of tension and compression fatigue strength between developed connecting rods and C70S6 connecting rods

6. 軽量化効果

本開発鋼を用いることにより、I断面形状の小断面積化、破断分割による位置決めピンの廃止と小型化により、13%の軽量化が達成でき、コンロッドの軽量化により波及したクランクシャフトの軽量化も含めると2005年にフルモデルチェンジした「CIVIC」のエンジン1台あたり約450gの軽量化を達成した。

7. まとめ

疲労強度向上と大端部破断分割化を両立する材料でコンロッドの軽量化が達成できた。その内容を以下にまとめる。

- (1) 破断分割にはフェライト強化が有効であり、特にTi添加による炭窒化物の析出強化を活用することによって、従来鋼に対し破断分割特性が向上した。
- (2) 耐久比向上のためには従来非調質鋼に対しC量を下げることとV及びTi炭窒化物の析出強化を活用することが有効であった。
- (3) 本開発鋼を適用することにより、疲労強度が30%向上し、13%の軽量化が可能となった。

参考文献

- (1) 松原俊彦, 佐藤泰紀, 木村健二, 川瀬直和, 伊藤茂: 快削チタン合金コネクティングロッドの開発, HONDA R&D Technical Review, Vol.3, p.12-26
- (2) 松原俊彦, 佐藤泰紀, 飯田善次, 田口隆: コネクティングロッド用高疲労強度快削非調質鋼の開発, HONDA R&D Technical Review, Vol.4, p.73-85
- (3) 佐藤武史, 栗田真人: 最近の非調質鋼について, 鍛造

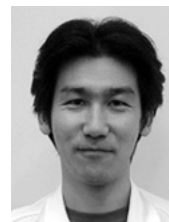
技報, 第83号, p.16-25(2000)

- (4) 渡里宏二: 非調質鋼の靱性に及ぼす析出物形態の影響, CAMP-ISIJ, Vol.11, p.551(1998)
- (5) 渡里宏二: 非調質鋼の靱性に及ぼす析出物形態の影響, 第46回(平成10年度春季)日本熱処理技術協会講演大会, p.83-84
- (6) 西岡邦夫, 平川賢爾, 外山和男: 実物部材の疲労破壊, 住友金属, Vol.32, p.68-88(1980)
- (7) 柿崎哲, 鎌田芳彦, 西田和彦, 栗田真人: 高強度非調質鋼の疲労強度に及ぼす合金元素の影響, CAMP-ISIJ, Vol.7, p.774(1994)
- (8) 渡里宏二, 相原賢治: Vレス-Ti添加熱鍛非調質鋼の機械的性質, CAMP-ISIJ, Vol.9, p.506(1996)

■著者■



飯田 善次



高田健太郎



鈴木 茂



佐藤 史