

焼ならしによりV炭窒化物の析出を制御した 高強度軟窒化クランクシャフトの開発

Development of High-strength, Nitrocarburized Crankshaft with Control of Vanadium Carbonitride
Precipitation by Normalization

諏 方 悟*
Satoru SUWA
木 村 和 良**
Kazuyoshi KIMURA

川 口 大 二*
Daiji KAWAGUCHI
多 田 雅 人**
Masato TADA

村 上 敦*
Atsushi MURAKAMI

要 旨

高い生産性を有する高強度クランクシャフトを開発した。本開発では、高い疲労強度と加工性、ひずみ矯正性を両立したクランクシャフトを検討するにあたり、析出強化元素として知られるVの鋼中の固溶量が、加熱温度に依存することに着目した。熱間鍛造後の制御冷却ではなく、より簡便に処理条件を設定しやすい焼ならし温度のコントロールにより高強度化可能な材料を開発した。焼ならし温度を最適化することで、加工性、ひずみ矯正性を確保しながら、現行材に対し疲労強度が30%以上向上した。

ABSTRACT

A high-strength crankshaft with a high productivity has been developed. This crankshaft development sought to balance high fatigue strength, machinability and straightening ability. Vanadium is known as a precipitation strengthening element, and the development focused on the fact the amount of solid solution of vanadium in steel is dependent on the heating temperature. A material was developed in which a high level of strength could be achieved through control of the normalizing temperature, for which conditions could more easily be set, rather than controlled cooling following hot forging. Optimization of the normalizing temperature helped to enable the achievement of a 30% or more increase in fatigue strength against the existing material, while maintaining machinability and straightening ability.

1. はじめに

二輪車用エンジンには、これまでの高出力／コンパクト化に加え、CO₂排出削減のための燃費向上観点から、より軽量化が求められ、エンジン回転部で最も重いクランクシャフトの軽量化は重要である。クランクシャフトには、エンジンの燃焼室の爆発力やピストン、コネクティングロッドなどの往復運動部の慣性力によって生じる曲げ応力に耐える強度が必要であり、軽量化要求によりクランクシャフトへの負荷は増加している。

一方、二輪車用のクランクシャフトの機械加工工程は、レース加工、ミーリング、ドリル加工、研磨加工、ギヤ加工等の多岐にわたるため、クランクシャフト用素材は、高い加工性が求められる。そのため、クランクシャフトの高強度化を図る場合においても、生産性との両立が求められる。

* 二輪R&Dセンター

** 大同特殊鋼株式会社

本開発では、高い疲労強度と加工性、ひずみ矯正性の両立したクランクシャフトを検討するにあたり、硬さ推移曲線のデザインをおこなった。疲労強度向上のため、析出強化元素として知られるVを採用し⁽¹⁾⁻⁽³⁾、Vの鋼中の固溶量が、加熱温度に依存することに着目した。熱間鍛造後の制御冷却ではなく、より簡便に処理条件を設定しやすい焼ならし温度の制御により高強度化可能な材料を開発した。焼ならし温度を最適化することで、加工性、ひずみ矯正性を確保しながら、現行材に対し疲労強度が30%以上向上した。

2. 開発のねらい

二輪車用一体型クランクシャフトは、焼入れ焼戻しされた鋼や焼ならしされた鋼に軟窒化処理や窒化処理が施されたものが多い。焼入れ焼戻しされた鋼のクランクシャフト

は、疲労強度を確保するには有利であるが、均質な金属組織となるため被削性が劣る。焼ならしされた鋼は、フェライト-パーライトの混合組織であるため、均質な金属組織と比較して被削性に優れており、軟窒化処理や窒化処理される際、フェライト組織へのNの拡散速度が速いため、生産性に優れる。近年では、焼ならしを省略しても焼ならしされた鋼と同等の特性を有する鋼も実用化されている⁽⁴⁾。

これまで著者らは、コスト削減の観点から通常のクランクシャフトには、焼ならし省略可能なカルシウム-硫黄快削鋼を使用してきた。高い疲労強度が要求されるクランクシャフトには、応力集中部の疲労強度確保を目的として、軟窒化後に高い表面硬さが得られるAl添加された軟窒化用鉛硫黄複合快削鋼が使用されてきた。しかし、クランクシャフトに生じる応力こう配から要求される硬さ推移曲線に対し、軟窒化された現行材の表面付近の硬さは過剰に高いものになっていた。

そこで開発にあたっては、高い疲労強度と加工性、ひずみ矯正性の両立を目的とし、以下の特性を満足できる材料を設計した。

- (1) 特別な熱処理工程の追加なしに高強度化可能なこと
- (2) 現行材同等の生技性であること
- (3) 鉛フリー化可能なこと

3. 高強度クランクシャフト用材料開発のブレイクスルーポイント

3.1. 硬さ推移曲線デザイン

材料成分設計に先立ち、硬さ推移曲線のデザインをおこなった(Fig. 1)。疲労強度向上のためには、応力こう配から要求される硬さ推移曲線を上回る硬さプロファイルとする必要がある^{(5), (6)}。高強度化のため、現行材の硬さ推移曲線に対して、内部硬さを高め、窒化拡散深さを深くする。さらにひずみ矯正性を確保するため、表層硬さを低くする。

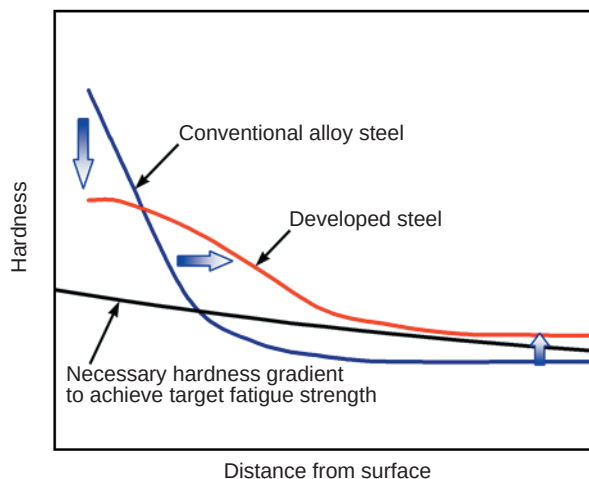


Fig. 1 Hardness transition curve design

より深い窒化深さと低い表層硬さが求められることから、実用窒化深さの目標を 0.3 mm 以上、表層硬さ(母材表面からの距離が 0.05 mm の位置の硬さ)の目標を Hv500 以下に設定した。また、加工性を低下させないため、焼ならし後の硬さの目標を HRB100 以下とした。

3.2. 従来のクランクシャフト用材料の特徴と高強度化手法の検討

Honda 二輪車の標準的な負荷が生じるクランクシャフト用鋼(以下、標準材という)と高い疲労強度が要求されるクランクシャフト用鋼(以下、現行材という)の金属組織を Fig. 2 に示す。標準材の組織は熱間鍛造後の焼ならしを省略しているため、結晶粒径が大きい粗い組織となっているが、両組織ともに高い加工性を確保するためフェライト-パーライト組織となっている。

大型二輪車用クランクシャフトの多くは、焼入れ焼戻しにより素材の硬さを高くし、さらに軟窒化処理や窒化処理により疲労強度を向上させる方法が用いられている。しかし、均質な焼戻しマルテンサイトのような金属組織は、フェライト-パーライトのような混合組織と比較して被削性が劣る。また、窒化処理時の N の拡散速度がフェライトと比較して遅いため、窒化拡散深さを向上させようとすると長時間の処理が必要になり、生産性が低下する。そのため、加工性を低下させることなく疲労強度を向上させるには、フェライト-パーライト組織のまま疲労亀裂起点となるフェライトを強化することが有効である。

フェライトを強化するためには、V, Ti 添加による析出強化, P, Si 添加による固溶強化が考えられる。Ti, P の添加は衝撃値を低下させるため、クランクシャフトにプライマリードライブギヤが直接切削されているものもある大型二輪車のクランクシャフト用材料としては望ましくない。また V 添加による疲労強度向上と比較して、同一添加量では Si 添加による疲労強度向上効果は小さい^{(1), (2)}。

以上より、開発材は V 添加により硬さの上昇を最小限としながら疲労強度向上を図ることをねらいとした。

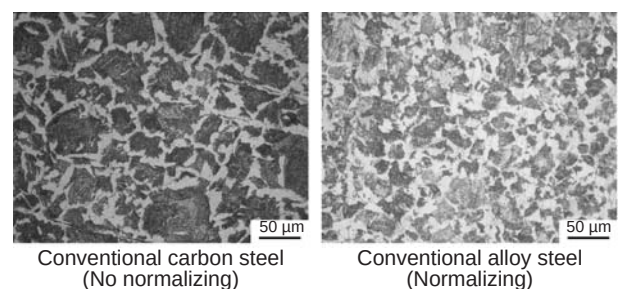


Fig. 2 Microstructure of conventional carbon steel and conventional alloy steel

3.3. V 固溶量制御手法の検討

V 添加鋼は非調質鋼とも呼ばれ、熱間鍛造後の焼入れ焼戻し(調質処理)を省略しても焼入れ焼戻しされた鋼と同等の特性が得られることから、クランクシャフト、コネクティングロッド、ホイールハブ等に幅広く実用化されている。Fig. 3 に統合型熱力学計算システム Thermo-Calc にて計算した、加熱温度と V 固溶量の関係を示す。加熱温度の上昇によって V 固溶量が増加するが、非調質鋼に添加される V 量は、熱間鍛造前の加熱(1100 – 1300℃)で V を完全固溶させるため、0.2%以下の場合が多い。

非調質鋼のクランクシャフトは、熱間鍛造後に大型扇風機等により制御空冷され、硬さが HRC20 以上になる⁽⁷⁾ため硬いま加工される、もしくは硬さを低くするため、焼なましされる場合もある。本開発では、熱間鍛造後の大型扇風機による制御空冷では細かな冷却速度コントロールは困難であると考えられることから、焼ならし温度の調整により V 固溶量を制御し、硬さをコントロールすることを試みた。

4. 合金設計

4.1. 基本成分

二輪車用のクランクシャフトに直接切削加工されるタイミングスプロケット等は、耐摩耗性向上のために高周波焼入れされ、HRC50以上の焼入れ硬さを得ている。高周波焼入れ硬さを安定的に得るため、C 量は 0.4%を下限とした。Al は N と結合しやすいため、表層の硬さ上昇が著しく、軟窒化処理時の N の拡散を阻害するため、非添加とした。S は鋼中で MnS となり、被削性向上に寄与するが、高周波焼入れ時に焼割れを引き起こす場合があるため、S 量は JASO S1 レベルの 0.06%とした。さらに、切粉破碎性確保のため、鋼中の硫化物系介在物を微細分散化することによ

り、快削成分としての Pb を非添加とした。その上で、C, Mn, Si, V 量を調整した。

まず、現行材に対して C, Mn, Cr, V を添加または削減し、焼ならし後の硬さが HRB100 以下となるように C 当量 Ceq を調整した合金を複数作製した。C 当量は以下の式(1)により算出した。

$$Ceq = C + 0.07Si + 0.16Mn + 0.19Cu + 0.17Ni + 0.2Cr + [V] \quad (1)$$

[V]: 焼ならし加熱時の γ 中に固溶できる V 量

これらの合金を現行材と同じ条件で焼ならし後に塩浴軟窒化し、表層硬さ、実用窒化深さを測定した。Fig. 4 に Cr 量と表層硬さの関係を示す。Cr 添加量が 0.3%以上となると軟窒化後の表層硬さが目標上限を超えるので、Cr 量は 0.3%以下とした。表層硬さ、実用窒化深さの関係を Fig. 5 に示す。表層硬さと窒化深さに明確な相関はないことから、合金添加量の調整により窒化深さを向上させながら表層硬さを低下させることが可能であることが示唆された。

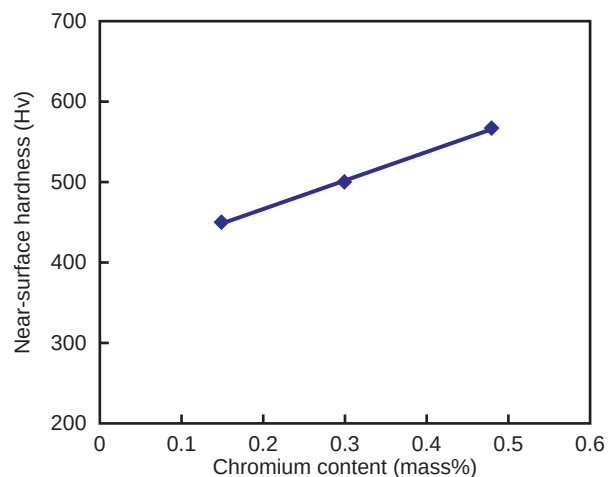


Fig. 4 Relationship between chromium content and near-surface hardness

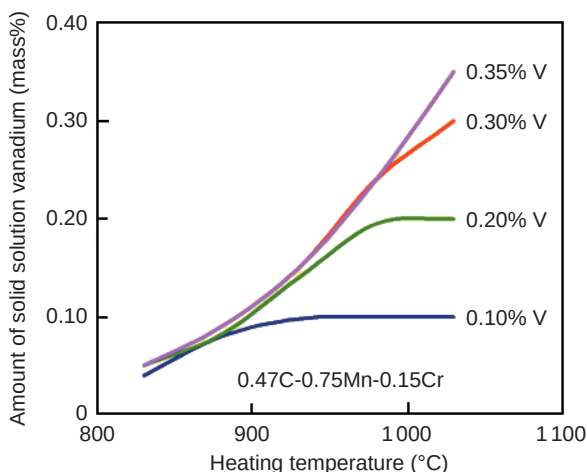


Fig. 3 Relationship between heating temperature and amount of dissolved vanadium

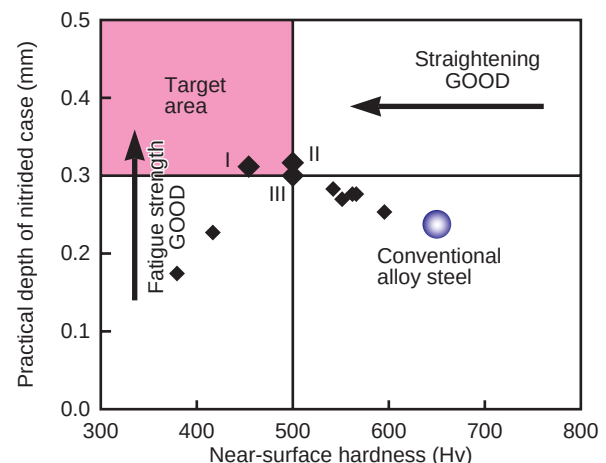


Fig. 5 Relationship between near-surface hardness and practical depth of nitride case

4.2. 疲労強度による検討

Fig. 5 にて表層硬さと実用窒化深さが目標範囲内にある 3 鋼種について小野式回転曲げ疲労試験をおこなった。化学成分を Table 1 に示す。試験片は、クランクシャフトのフィレット R 部に生じる応力こう配相当の応力分布となる形状 (Fig. 6) とした。表層硬さと疲労強度の測定結果を Fig. 7 に示す。試験片の焼ならし温度は 900℃以下のため、焼ならし加熱時に再固溶する V 量は同じとなる (Fig. 3)。しかし、V 添加量が少ない鋼種Ⅲの疲労強度は、他と比較して低い。鋼種Ⅲは、焼ならし加熱時に未固溶の V 量が少なかったため結晶粒が粗大化し、疲労強度が低くなったと考えられる。我々は、表層硬さと疲労強度のバランスがよい鋼種Ⅰを選出した。

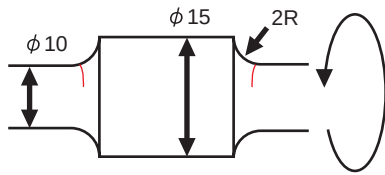


Fig. 6 Geometry of rotating-bending fatigue test specimen

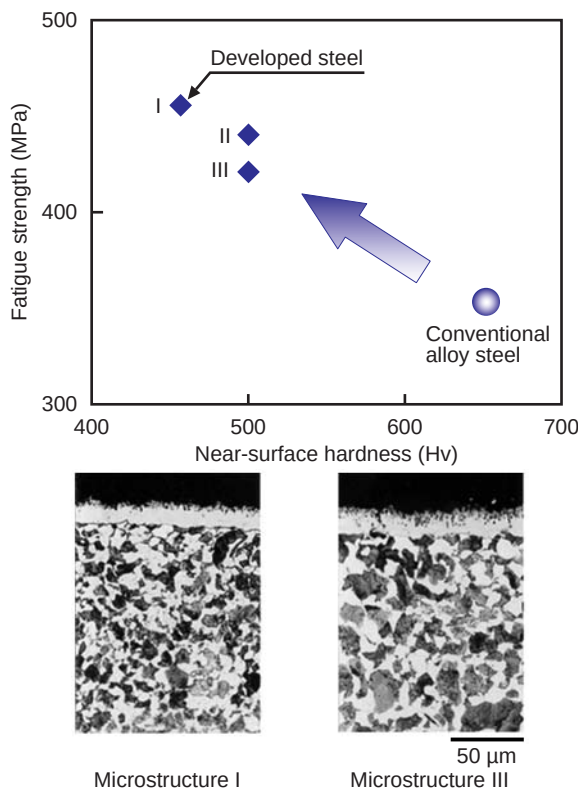


Fig. 7 Near-surface hardness and fatigue strength

5. 開発鋼の特性

5.1. 焼ならし特性

焼ならしは、熱間鍛造によって荒れた組織の改善、硬さの調整を目的としておこなわれるため、AC3 温度以上に加熱する必要がある。一般的には、ワークは温度バラツキ等を考慮して、AC3 温度 + 50℃以上に加熱され、空冷される場合が多く、標準的な加熱温度の範囲は 50℃前後とされている。開発鋼の AC3 温度を下記の式 (2) にて計算すると約 770℃となるため、820℃以上に加熱する必要がある。

$$AC3 = 854 - 180C + 44Si - 14Mn - 17.8Ni - 1.7Cr \quad (2)$$

焼ならし加熱温度の影響を確認するため、40 mm × 40 mm の試験片にて加熱温度を 830℃— 980℃とし、空冷後の硬さを測定した。焼ならし温度と硬さの関係を Fig. 8 に示す。焼ならし温度が高い方が、硬さが高い傾向を示す。これは熱間鍛造後の空冷時に析出した V 炭窒化物が、焼ならし加熱されることで再固溶し、その際高温で加熱された方が再固溶する量が多く、その後の冷却過程でより V 炭窒化物による析出硬化が大きくなったためと考えられる。つまり、Thermo-Calc で計算された固溶量よりも多量に V を添加した場合、その計算で用いた温度以下の焼ならし温度においては、その温度を制御することで任意の硬さが得られることがわかった。

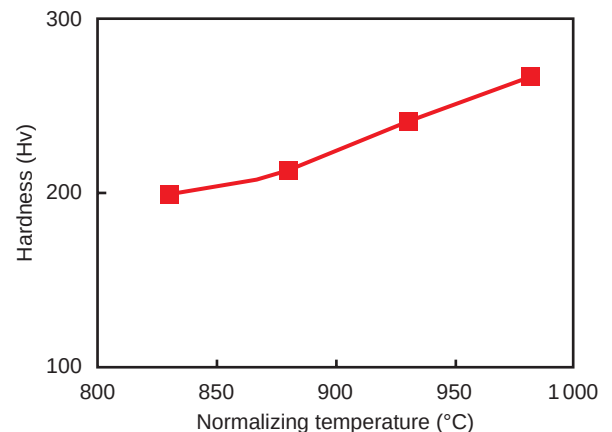


Fig. 8 Relationship between normalizing temperature and hardness

Table 1 Chemical composition of conventional alloy steel and developed steel

Steel Grades	C	Mn	S	Cr	V	Al	Pb
Conventional alloy steel	0.23	1.00	0.055	1.00	-	0.016	0.08
Sample I	0.47	0.75	0.048	0.15	0.30	-	-
Sample II	0.45	0.74	0.049	0.30	0.29	-	-
Sample III	0.43	0.75	0.047	0.30	0.15	-	-
Developed steel *	0.47	0.75	0.060	0.15	0.30	-	-

* Based on Sample I

冷却速度の影響を確認するため、加熱温度を820℃、880℃とし、冷却速度を0.1 – 2℃/secとした時の硬さを測定した。焼ならし硬さに及ぼす冷却速度の影響をFig. 9に示す。冷却速度が速い方が、遅い場合に比べ硬くなる傾向を示す。冷却速度が速いとV炭窒化物が冷却過程で微細分散し析出硬化能を高め、遅い場合はV炭窒化物が凝集し硬化能が低くなることによるものと考えられる。また、冷却速度が遅いと結晶粒が粗くなり、疲労強度、ひずみ矯正性に悪影響を及ぼす可能性がある。

5.2. 疲労強度特性

開発材の焼ならし温度の疲労強度特性への影響を確認するため、Fig. 6の試験片を用い小野式回転曲げ疲労試験をおこなった。試験片は、40 mm × 40 mm にて焼ならしをおこない、試験片に加工後塩浴軟窒化処理したものをを用いた。Fig. 10に焼ならし温度と疲労強度の関係を示す。焼ならし温度の上昇により疲労強度が向上する原因は、内部硬さの上昇によると考えられる。しかし、焼ならし温度980℃の疲労強度は、930℃と比較して向上していない。Fig. 11に焼ならし温度980℃、930℃の金属組織を示す。焼ならし温度上昇により、結晶粒が粗大化したため、疲労強度が向上しなかったと考えられる。焼ならし温度930℃以下では、焼ならし温度により疲労強度のコントロールが可能である。

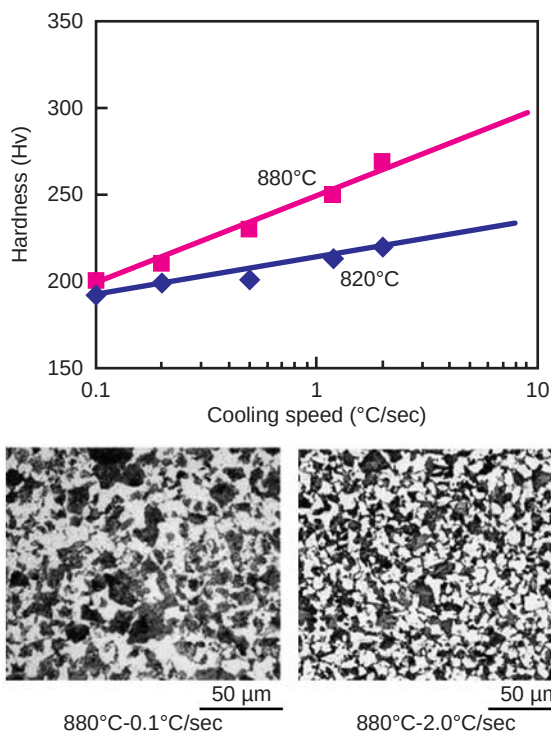


Fig. 9 Effect of cooling speed on hardness after normalizing

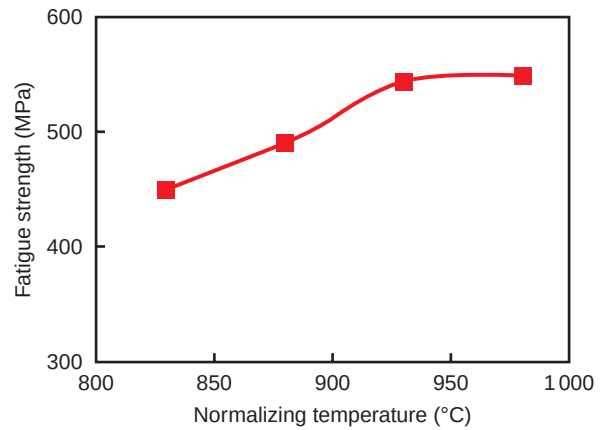


Fig. 10 Relationship between normalizing temperature and fatigue strength

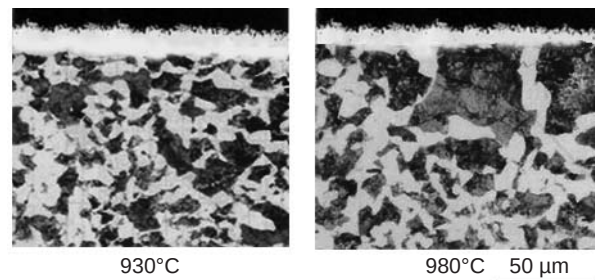


Fig. 11 Microstructure of developed steel at normalizing temperature of 930 °C and 980 °C

5.3. ひずみ矯正性

Fig. 6の試験片を用い、焼ならし温度のひずみ矯正性の影響を確認するため、3点式静曲げ試験をおこなった。支点間距離を106 mmとし、亀裂が生じるまで中央部を押し込み、除荷後の振れ変化量を測定した。Fig. 12に焼ならし温度と振れ変化量の関係を、Fig. 13に内部硬さと表層硬さの関係を示す。焼ならし温度上昇により内部硬さは上昇するが、表層硬さに差異はないため、応力が高い表面部の延性は変わらない。しかし、曲げによって生じる内部の塑性変形量は硬さの上昇によって低下するため、焼ならし温度の上昇によりひずみ矯正能が低下したと考えられる。

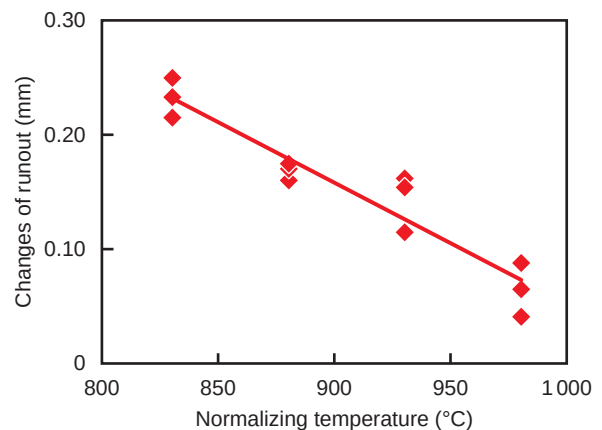


Fig. 12 Normalizing temperature and changes of runout

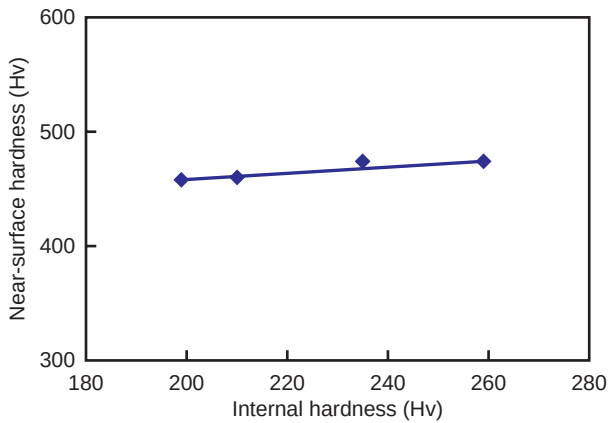


Fig. 13 Relationship between internal hardness and near-surface hardness

6. クランクシャフト特性

6.1. 疲労特性

供試クランクシャフトの形状を Fig. 14 に示す。加工工程は、焼ならし温度を 820°C とした以外は、現行材と同じ加工工程とした。開発材と現行材との硬さ推移曲線を Fig. 15 に示す。現行材と比較して高い内部硬さ、深い窒化拡散層深さ、低い表面硬さを有するクランクシャフトが得られた。次に、クランクシャフト両端のジャーナル部を保持し、センタジャーナルを両振り加振した。発生応力は、センタジャーナルのフィレット部にひずみゲージを貼って測定した (Fig. 16)。クランクシャフト曲げ疲労試験の結果を Fig. 17 に示す。開発材の疲労強度は、疲労強度が最も低くなる焼ならし温度 820°C においても現行材と比較して 30% 向上した。

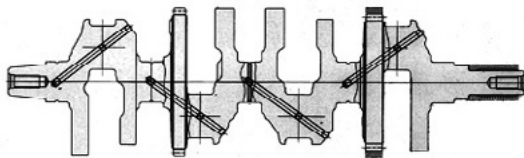


Fig. 14 Shape of sample crankshaft

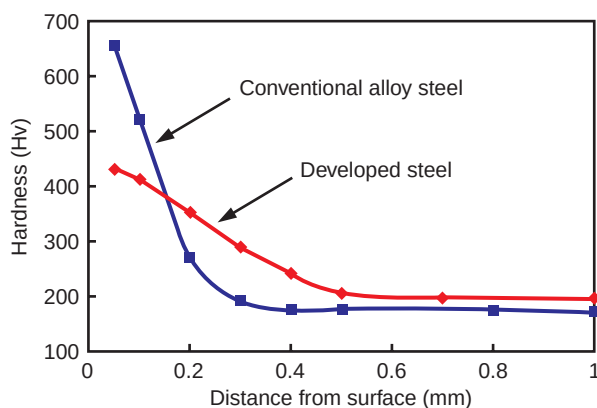


Fig. 15 Hardness transition curve of developed and conventional alloy steel

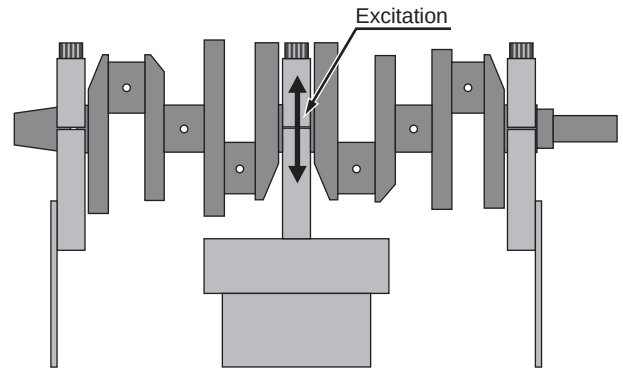


Fig. 16 Bending fatigue test method for crankshaft

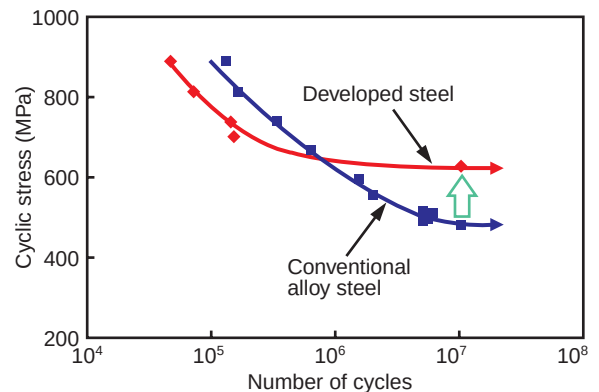


Fig. 17 Results of bending fatigue test for crankshaft

6.2. ひずみ矯正性

Fig. 14 の形状のクランクシャフトを用いて、クランクシャフト両端のジャーナルを V ブロックにて支持し、亀裂が生じるまでセンタジャーナルを押し込み、除荷後のセンタジャーナルの振れ変化量を測定した (Fig. 18)。焼ならし温度と振れ変化量の関係を Fig. 19 に示す。焼ならし温度の上昇に伴い、ひずみ矯正能が低下する。生産性を考慮した場合、焼ならし温度を低めに設定した方が望ましい。しかし、加工精度の向上や軟窒化処理後に発生するひずみ量の抑制手法の構築により、開発鋼は基本工程を変えることなく焼ならし温度を高めることで疲労強度の更なる向上を図ることが可能である。

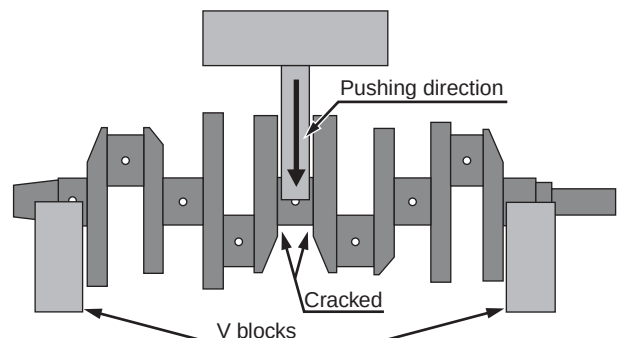


Fig. 18 Changes of runout test method for crankshaft

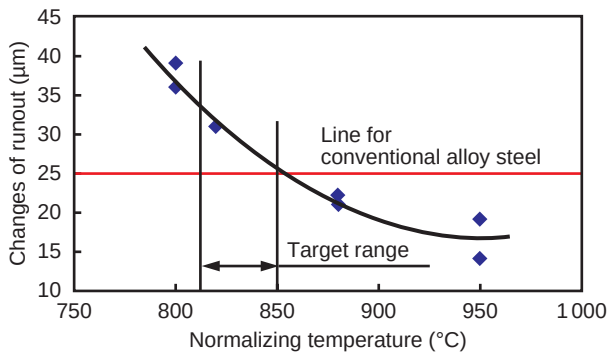


Fig. 19 Relationship between normalizing temperature and changes of runout



Fig. 21 Crankshaft with new geometry for new V-4 cylinder engine

7. 適用効果

開発材によるクランクシャフトは新ジオメトリV型4気筒エンジンを搭載した2010年モデルのVFR1200F(Fig. 20)に適用され、現行材を使用した場合と比較してクランクピン径を約2mm縮小することができ、エンジンの小型、軽量化を実現した(Fig. 21)。

8. まとめ

開発材の適用により、現行材と比較して高い内部硬さ、深い窒化拡散層深さ、低い表面硬さを有するクランクシャフトが得られ、以下の知見を得た。

- (1) 焼ならし温度で固溶するV量以上のVを添加すると、焼ならし温度の制御により硬さを調整することが可能である。
- (2) 焼ならし加熱時の未固溶量が少ない場合、結晶粒が粗大化するため、V添加量が多い方が疲労強度は高い。
- (3) 焼ならし温度を最適化することで、加工性、ひずみ矯正性を確保しながら、現行材に対し疲労強度が30%以上向上した。

本技術を用いたクランクシャフトの適用は、エンジンの小型／軽量化を実現し、高出力のみならず、CO₂排出削減のための燃費性能向上にも貢献するものである。



Fig. 20 Mass production motorcycle VFR1200 using developed crankshaft

参考文献

- (1) 飯田善次, 高田健太郎, 鈴木茂, 佐藤史: 軽量コネクティングロッドの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.17, No.2, p.115-121
- (2) 松原敏彦, 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) 中村貞行, 秦野敦臣: ステアリングラック用高強度・高靱性非調質棒鋼, 電気製鋼, Vol.69, No.1, p.73-78 (1998)
- (4) 天孝篤志, 諏方悟: 焼ならし処理省略可能なクランクシャフト用鉛フリー快削鋼の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.14, No.1, p.141-148
- (5) 西坂強, 佐藤康夫: フレッチング損傷防止に関する研究, トライボロジスト, Vol.40, No.9, p.768-775(1995)
- (6) 井上幸一郎, 松村康志: 中炭素鋼の軟窒化特性に及ぼす合金元素の影響, 電気製鋼, Vol.75, No.1, p.11-18 (2004)
- (7) 田原謙, 清水真吾: 小型汎用エンジンクランクシャフト用高じん性非調質・鉛フリー快削鋼の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.16, No.2, p.191-196
- (8) 大同特殊鋼株式会社: 特殊鋼ハンドブック, p.518 (2001)

■ 著 者 ■



方 悟



川口 大二



村上 敦



木村 和良



多田 雅人