

(解説)

## 4サイクルディーゼル機関の高出力化への対応 ～一体型クランク軸の高疲労強度化への取組み～

### New Approach for Higher Output of 4-cycle Diesel Engines Improving Fatigue Strength of Solid-type Crankshafts



篠崎智也\*

Tomoya SHINOZAKI



保元康彦\*

Yasuhiko YASUMOTO



藤網宣之\*

Nobuyuki FUJITSUNA

Recently, solid-type crankshafts for 4-cycle diesel engines are required to have higher fatigue strength to make the power generator engines higher in output and more compact. In order to respond to this requirement, Kobe Steel strives to develop a new higher strength steel, with the tensile strength in the range over 1,000MPa, and to improve steel making process for reducing inclusions. This article describes our concepts and approaches for higher fatigue strengths.

まえがき = 当社は、船舶および陸上発電用の4サイクルディーゼル機関に搭載されるクランク軸（以下、一体型クランク軸という）を製鋼から機械加工までの一貫ラインで製造しており、中型以上（ボア径240mm以上）の一体型クランク軸は世界ナンバーワンのシェアを堅持している。近年、環境問題の高まりとともに、ディーゼル機関は高出力化やコンパクト化の傾向にあり<sup>1)~4)</sup>、これに伴い、一体型クランク軸はより一層の高疲労強度化が要求され始めている。連接棒を介してピストンの上下運動を回転運動に変換するクランク軸は、曲げ応力がフィレット部に繰返し作用するため、とくにフィレット部は高い疲労強度が求められる。

クランク軸の疲労強度向上法には、材質の高強度化、CGF（Continuous Grain Flow）鍛造法などの製造プロセスによる向上、表面層に圧縮残留応力を付与させる冷間ロール加工、高周波焼入、窒化、ショットピーニングなどが挙げられる<sup>5~7)</sup>。疲労強度と比例関係にある引張強さ<sup>8)</sup>を向上させる材質の高強度化は、特別な製造工程を追加することなく安定した高疲労強度化が実現できるため、非常に有効である。当社では、引張強さ1,000MPa以上の高強度鋼の開発<sup>9)</sup>と、介在物低減による高疲労強度化を目的とした高纯净度鋼製造プロセスの開発<sup>10)</sup>を進めており、以下にその取組みを紹介する。

### 1. 一体型クランク軸の特徴

#### 1.1 一体型クランク軸の製造工程

図1に当社における一体型クランク軸の製造工程を示す。一体型クランク軸は一つの鋼塊からプレスによりバー材を製作し、その後特殊鍛造装置を用いたCGF鍛造法により所定の形状に成形される。CGF鍛造法にはRR

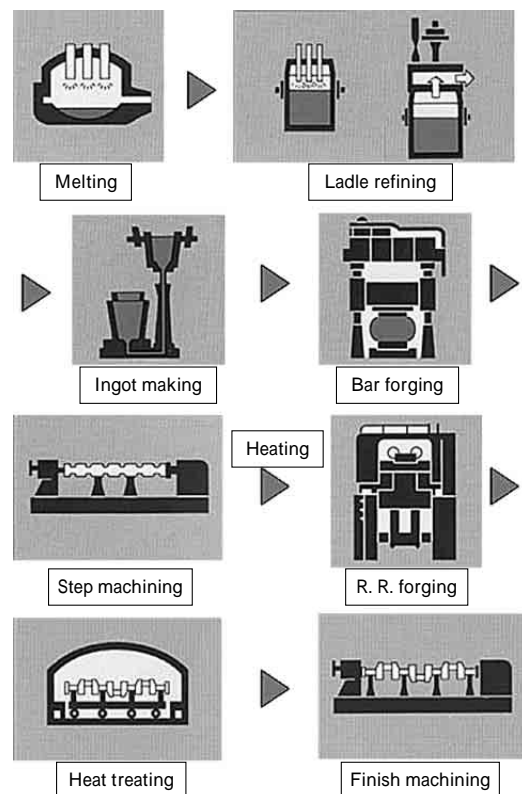


図1 一体型クランク軸鋼の製造工程  
Fig. 1 Process flow for production of solid-type crankshaft

鍛造法およびTR鍛造法などがあり、現在主流の成形法となっている。当社では、RR鍛造法を用いて製造を行っており、鍛鋼品特有の組織の流れを切断することなくクランク軸形状に鍛造できることなどから、自由鍛造方法に比して疲労強度が優れていることが特徴としてあげられる<sup>11)</sup>。RR鍛造により成型されたクランク軸は、焼

\* 鉄鋼部門 鑄鍛鋼事業部 技術部

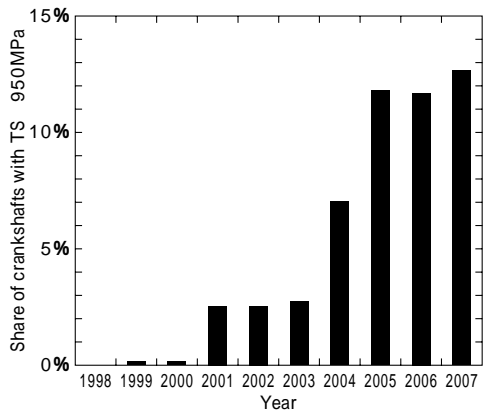


図2 950MPa 級材料の本数比率

Fig. 2 Share of crankshafts with the tensile strength of over 950MPa

入れ・焼戻しにより特性を付与した後に、所定の形状に加工される。

### 1.2 一体型クランク軸の強度の変遷

現在、一体型クランク軸用規格鋼としては、引張強さ 950MPa 級が最高強度鋼であり、DIN 規格鋼の 34CrNiMo6 鋼<sup>12)</sup> と当社開発鋼の 40CrMo8 鋼<sup>13)</sup> が使用されている。図 2 に近年、当社において製造した 950MPa 級一体型クランク軸の本数比率の推移を示す。950MPa 級の材料は 1999 年頃から使用され始め、増加傾向にある。このように、高強度材化傾向は今後も継続するものと予測され、1,000MPa 超級の材料も視野に入れる必要があり、本報で後述する。

## 2. クランク軸の設計疲労強度

船用ディーゼル機関におけるクランク軸の設計疲労強度は船級規則で規定され、IACS UR M53 として式(1)により計算される<sup>14)</sup>。

$$D_W = K \left( 0.42 \sigma_B + 39.3 \left( 0.264 + 1.073 D^{-0.2} + \frac{785 - \sigma_B}{4900} + \frac{196}{\sigma_B} \sqrt{\frac{1}{R}} \right) \right) \dots (1)$$

ここで、 $\sigma_B$  : 引張強さ (MPa)

$D$  : ピン径 (mm)

$R$  : フィレット半径 (mm)

式(1)において、 $K$  は製造プロセスによる付加要素であり、CGF 鍛造法については  $K = 1.05$  と規定されている。

前述したように、当社では材質の高強度化と介在物低減による高疲労強度化を目的とした高品質鋼製造プロセスの開発を進めているが、高疲労強度化は式(1)における  $K$ -factor 向上に対応する。

## 3. 高強度鋼の開発

### 3.1 高強度鋼の材料設計

一体型クランク軸の材料特性としては、引張特性(強度、延性)、衝撃特性(靱性)および疲労特性が要求される。クランク軸は、前述したように、焼入れ・焼戻し処理を行い、強度・靱性を高めている。本開発では、引張特性の向上による疲労強度向上を狙いとしているが、同時に衝撃特性も損なってはならない。一般的に、材料は強度が高まると靱性は低下するため、現用鋼(規格鋼もしくは現状の当社開発鋼)では、熱処理条件を変えるこ

とで引張特性を向上させたとしても靱性の低下を抑えることが困難である。そこで、新規成分を検討することにした。過去に蓄積された様々な化学成分での機械的特性のデータを基に成分設計した高強度開発鋼を表 1 に示す。

### 3.2 開発鋼の機械的特性

図 3 に、高強度開発鋼と現用鋼の強度と靱性の関係を示す。現用鋼としては、現状最高強度である 34CrNiMo6 鋼と 40CrMo8 鋼の結果を示した。これらの結果より、開発鋼は従来鋼と同等以上の引張強度でも高い靱性を有していることがわかる。

### 3.3 開発鋼の疲労特性

開発鋼において良好な機械的特性が確認されたことから、実機クランク軸を製造し、ピンフィレット部の疲労試験を実施した。疲労特性の評価は、ステアケース法<sup>15)</sup>を用いた。図 4 および表 2 に高強度開発鋼のステアケー

表 1 現用鋼および高強度開発鋼の化学成分

Table 1 Chemical compositions of currently-used and newly developed steels for solid type crankshafts

	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo
34CrNiMo6	0.34	0.25	0.65	1.50	1.50	0.23
40CrMo8	0.40	0.25	1.00	-	2.00	0.25
Developed steel	0.35	0.25	0.90	1.60	1.60	0.50

表 2 現用鋼と開発鋼の疲労試験結果

Table 2 Results of fatigue tests on currently-used and developed steels

	Tensile strength (MPa)	Fatigue strength (MPa)	Endurance limit
Developed steel	1,085	509	0.469
40CrMo8	989	465	0.470

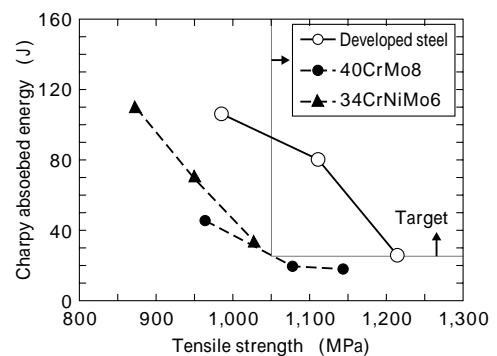


図 3 引張強さとシャルビー吸収エネルギーの関係

Fig. 3 Relationship between tensile strength and Charpy absorbed energy

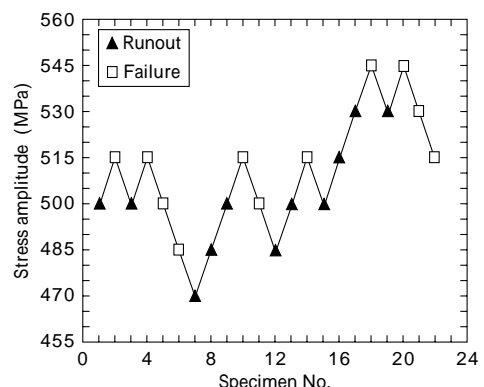


図 4 開発鋼のステアケース法による疲労試験結果

Fig. 4 Fatigue test results of developed steel by staircase method

ス法による疲労試験結果を示す。表2には現用鋼(40CrMo8鋼)の疲労試験結果も示している。開発鋼の疲労強度は現用鋼に対して約10%向上している。また、耐久限度比(=疲労強度/引張強さ)は現用鋼と同等であり、引張強さと疲労強度の比例関係が維持されている。すなわち、高強度化に伴う切欠き感受性の増大は認められない。

#### 4. 高純度鋼製造プロセスの開発

##### 4.1 製鋼プロセスの変遷

鋼中の不純物元素を排除するには製鋼技術の進歩が不可欠である。とくにSなどの除去や脱ガス処理が重要である。当社では1988年頃までは出鋼脱ガス法(TD法: Tap Degassing process)と呼ばれる製鋼プロセスが用いられてきた。その後は、電気炉から一度溶鋼を取鍋に受け、取鍋内で精錬を行う炉外精錬法(LF法: Ladle Furnace process)が適用されている。炉外精錬法が採用されることにより、Sなどの不純物元素やOなどのガス成分の除去が効果的に行われている(図5)。

##### 4.2 非金属介在物低減・微細化の考え方

鋼中に存在する非金属介在物(以下、介在物という)は疲労強度に及ぼす影響が大きいので、これらの低減は一体型クランク軸の高疲労強度化にあたって極めて重要な課題である<sup>16)</sup>。現用鋼における疲労破面からは、鍛伸

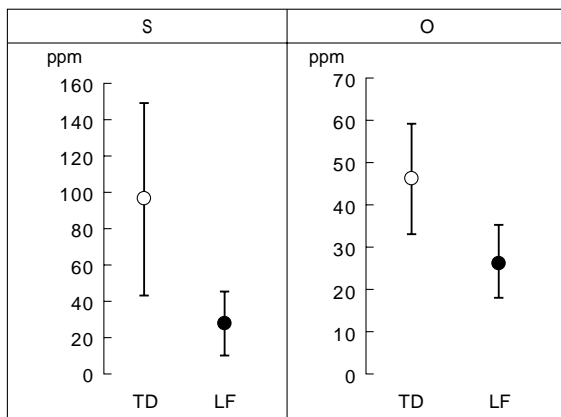


図5 TD法およびLF法でのS、O量の比較

Fig. 5 Comparison of S and O content between TD and LF process

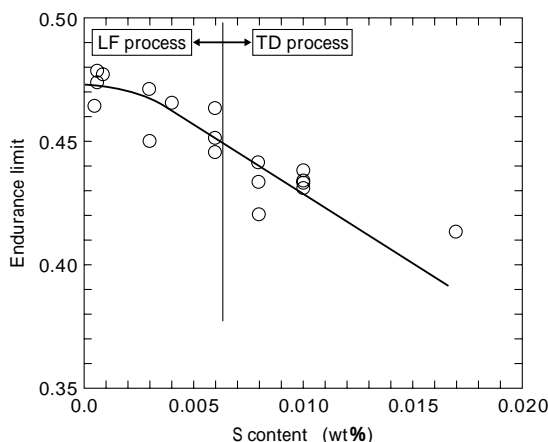


図6 耐久限度比とS量の関係

Fig. 6 Relationship between endurance limit and S content

により引伸ばされたMnSなどの伸長形態を示す介在物や、酸化物が凝集した形態の粒状介在物が認められる。村上らによって、疲労強度に及ぼす介在物種類の影響は小さく、介在物サイズの影響が主体であることが示されている<sup>17)</sup>。クランク軸の高疲労強度化を考える上で、MnSのみでなく、粒状酸化物系介在物の両者を低減する必要がある。

MnSの低減には、S量の低減が効果的である。実機クランク軸のフィレットおよびバー材のフィレット相当位置における疲労試験を実施し、S量と耐久限度比の関係を整理した結果を図6に示す。S量を低減することで高い耐久限度比を示すことがわかる。そこで、高純度鋼の目標を介在物構成元素となるS量を20ppm以下にすることにした。

酸化物系介在物を低減するためには、溶鋼中の酸素を低減し、溶鋼酸化を抑える必要がある。精錬工程では、スラグ組成の適正化によりスラグ-メタル反応での溶鋼中の酸素低減を促進し、溶存酸素により生成した酸化物を浮上分離させる。精錬時に溶鋼のかくはんを行うことで、スラグ反応を促進させるが、かくはんが強いと酸化生成物の浮上分離が抑制される。そこで、スラグ反応の促進と酸化生成物の浮上分離を両立しうるかくはん条件を適正化した。

##### 4.3 純度評価

高純度鋼製造プロセスで製造した供試鋼の鋼塊Top側およびBottom側の純度評価結果を図7に示す。純度は、DIN K法(DIN 50 602)にて評価している。ここで、純度は一般的な評価基準のK4より小さな介在物も評価するK3による評価を実施した。高純度鋼では、K3の評価でも大半はIndex 5以下であり、最大でもIndex 12である。本結果より、高純度プロセスを適用することにより、現用鋼と比較して純度が格段に改善されていることが確認された。

##### 4.4 疲労特性

図8に高純度鋼の疲労試験結果を示す。図には、従来鋼(TD法)および現用鋼の疲労試験結果も示している。高純度鋼の疲労強度は、従来鋼に対して約20%、現用鋼に対して約10%向上している。また、T方向の疲労強

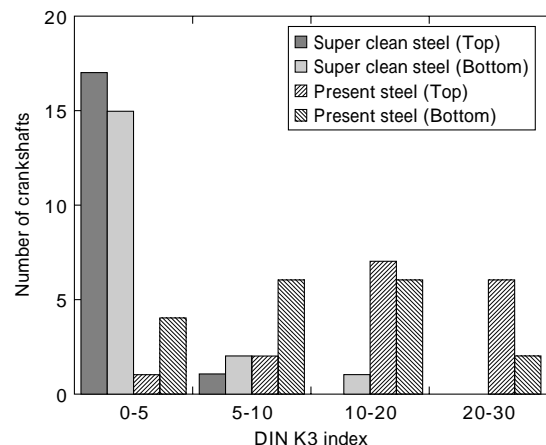


図7 高純度鋼と現用鋼の純度(DIN K3)

Fig. 7 Comparison of cleanliness by DIN K3 between super clean steel and currently-used steel

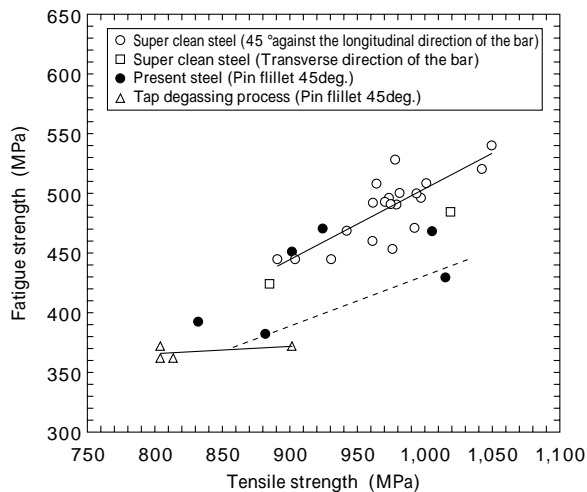


図 8 高纯净度鋼と現用鋼の疲労特性

Fig. 8 Fatigue strength of super clean steels compared with currently-used and conventional steels

度が 45° 方向の疲労強度とほぼ同レベルにあり，方向差が小さくなっている。これは，高纯净度化により介在物サイズが微細化されたためであると考えられる。

## 5. 今後の取組み

上で述べたように，材質の高強度化においては，高強度・高靱性鋼を開発し，クランク軸に求められる特性を満足できることを確認した。また，高纯净度化に関しても，現用鋼と比較して纯净度が格段に改善され，疲労強度が向上することも確認した。

今後は，高纯净度・高強度鋼によるさらなる高疲労強度化を進め，次世代エンジンへの適用を図ってゆく。

むすび = 当社の主力製品のひとつである一体型クランク軸の高疲労強度化への取組みとして，高強度鋼の開発，および高纯净度鋼の開発について紹介した。今後も，さらなる高性能・高品質化を目指し，エンジンメーカーのクランク軸に対するニーズにこたえるべく研究開発に取り組んでいきたい。

## 参考文献

- 1) 真壁 稔：第 75 回マリンエンジニアリング学術講演会予稿集，(2006) p.77.
- 2) Franz Koch：The new MAN B&W L21/31 Engine-Design Development and Experience，(2004) No.174.
- 3) Juha Kytola：Development of the Waertsilae 4-stroke engine range，(2004) No.123.
- 4) Yutaka Miyawaki et al.：The new DAIHATSU DC-17 4-stroke medium speed diesel engine，(2004) No.101.
- 5) 長坂英明ほか：R&D神戸製鋼技報，Vol.48, No.1 (1998) p.68.
- 6) 日本機械学会：金属材料疲れ強さの設計資料 ( ) (1965)
- 7) 島本敏郎ほか：自動車技術，Vol.44, (1990) p.95.
- 8) 日本鉄鋼協会：鉄鋼便覧，第 3 版，第 巻，(1981)
- 9) 深谷荘吾ほか：R&D神戸製鋼技報，Vol.55, No.3 (2005) p.22.
- 10) Nobuyuki Fujitsuna et al.：17th International Forgemasters Meeting (2008) p.390.
- 11) 西原 守：日本船用機関学会誌，Vol.8, No.10 (1973) p.48.
- 12) DIN (Deutsches Institut für Normung)：DIN EN 10083-1.
- 13) 香川恭徳ほか：第 68 回マリンエンジニアリング学術講演会予稿集，(2002) p.157.
- 14) International Association of Classification Society：Requirements Concerning Machinery Installations, Unified Requirement M53, (2004)
- 15) 日本機械学会：統計的疲労試験方法 JSME S 002, (1981) p.33.
- 16) 星野次郎：機関損傷解析と安全対策 NK 船 50 年の歩み，(1999)
- 17) 村上敬宜：金属疲労，微小欠陥と介在物の影響 (1993)