

連携記事

ディーゼル機関用一体型クランク軸の製造方法と最近の動向

Production Process and Recent Trends of Solid-type Crankshafts for Diesel Engines

荒川高治
Koji Arakawa

(株) 神戸製鋼所 鑄鍛鋼事業部
技術開発部 開発室
室長

1 はじめに

ディーゼル機関は、その熱効率の高さなどから、船舶の主機関、電気推進の主電源および補機として、また陸上発電用としても広く使用されている。

ディーゼル機関用のクランク軸は、ディーゼル機関部品の中でも主要部品と位置付けられており、2ストロークディーゼル機関用の組立型クランク軸と4ストロークディーゼル機関用の一体型クランク軸とに大別される。

組立型クランク軸は、一般的にシリンダ直径400mm程度以上の2ストローク低速機関に使用され、一体型クランク軸はシリンダ直径600mm程度以下の4ストローク中高速機関に使用されている¹⁾。

組立型クランク軸は、クランクスローと呼ばれる部品とジャーナルと呼ばれる部品を焼嵌することによって組立・製造される。他方、一体型クランク軸は、1つの鋼塊からプレス成形によって製造される。

2ストロークおよび4ストローク機関においては、近年の地球環境問題等への対応を目的として省エネルギー・高出力化・高効率化が追求され、クランク軸に対しては高強度化・コンパクト化、信頼性向上が強く要求されてきている²⁻⁵⁾。これに伴い、クランク軸にはより一層の高疲労強度化が要求され始めている。接続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、曲げ応力ならびにねじり応力がフィレット部に繰返し作用するため、特にフィレット部に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⁶⁻⁸⁾。

本稿では、神戸製鋼における一体型クランク軸の製造方法と最近の動向として、材料の高清浄化と高強度化による疲

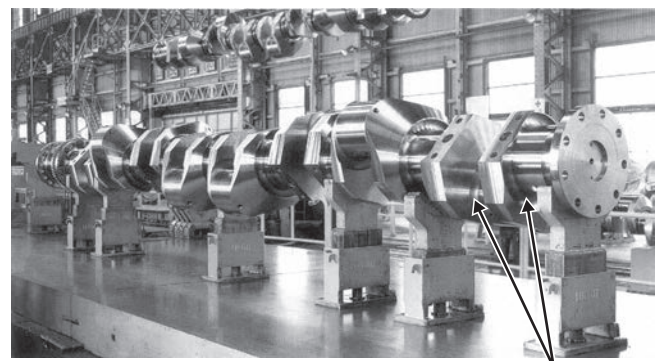
労強度向上の取組みについて紹介する⁹⁻¹¹⁾。

2 一体型クランク軸の製造方法

図1に一体型クランク軸を、図2に神戸製鋼における一体型クランク軸の製造工程概略を示す。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鍛造法およびTR鍛造法 (RR、TRとも、開発者の頭文字である) などがあり、現在主流の成形法となっている。神戸製鋼ではRR鍛造法を用いて製造を行っている。RR鍛造法は自由鍛造法の場合に比べてよりニアネットに成形できることなどから、クランク軸の最重要部であるフィレット部に鋼塊の清浄部である表層部分を使用でき、疲労強度が優れていることが特徴として挙げられる。図3にRR鍛造品の縦断面マクロ組織を示す。

2.1 溶解・精錬・造塊

クランク軸の疲労強度を高めるために製鋼プロセスにおける不純物低減は非常に重要である。



フィレット部

図1 一体型クランク軸

鍛造用鋼塊の製造は、電弧炉→取鍋精錬炉→Ar雰囲気下での下注造塊法によって行われる。取鍋精錬炉での精錬機能ならび真空脱ガス機能により品質の向上や安定化が図られている。すなわち、P、Sおよびガス成分の低減に加え鑄込み温度制御の厳格化による非金属介在物の沈殿晶帯への集積防止などがなされている。

下注造塊材ではA、V偏析が発生し、鋼塊が大きくなるほど顕著になるため、鍛錬比を考慮した上で製造するクランク軸に応じた最適な形状・サイズを選択することが必要である。

普通造塊法においては、押湯保温の適正化、鑄込み速度

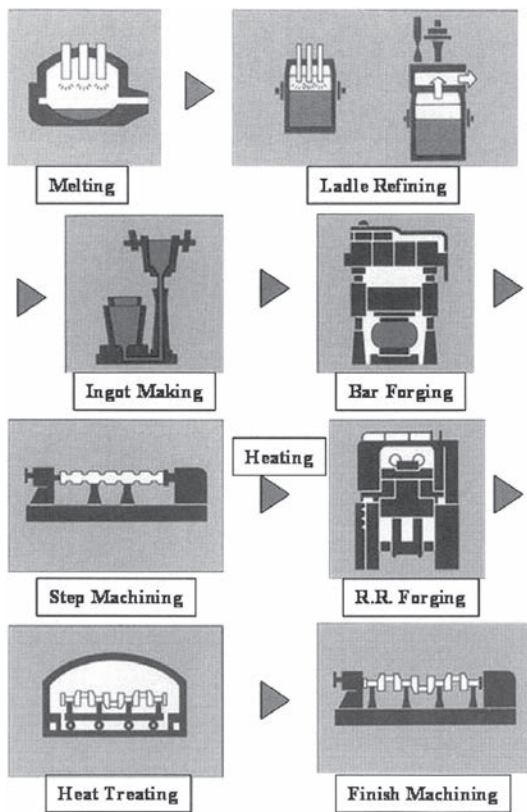


図2 一体型クランク軸の製造工程

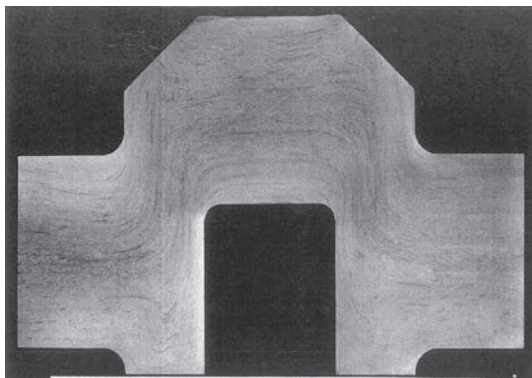


図3 RR鍛造材の縦断面マクロ組織

制御等による改善が進んではいるが、凝固の制御が充分にできないという課題が残されており、今後の研究が望まれる。

2.2 RR鍛造

RR鍛造工程では、図4のように自由鍛造された丸棒からRR鍛造用素材(RR素材)を機械加工する(図4(1))。その後、1気筒分に相当するピン軸、一对のブロック部、ジャーナル軸を部分加熱し(図4(2))、図5に示すように、プレスの圧下力をくさび機構により横方向の力に変換することで、RR素材に横圧縮力と偏芯力を同時に加えて1気筒分を鍛造する。これを必要な気筒数回繰返して、1本のクランク軸に仕上げる(図4(4))。

図6にRR鍛造における変形挙動の詳細を示す。部分加熱されたRR素材をRR鍛造装置に搬入し、金型内にセットする。このとき、ピン軸はポンチ、アンビルと呼ばれる金型で上下方向から固定され、ジャーナル軸は固定金型と呼ばれる金型で固定される(図6(1))。プレスが加圧し始めると、圧下力がくさび機構によって横圧縮力に変換される。同時にポ

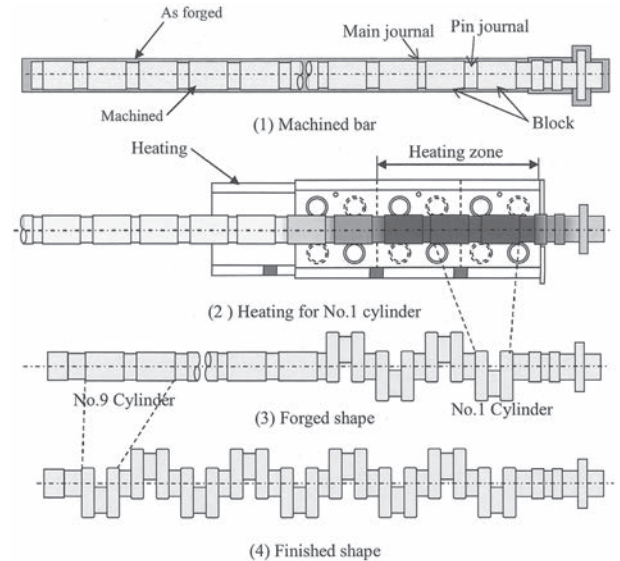


図4 RR鍛造工程

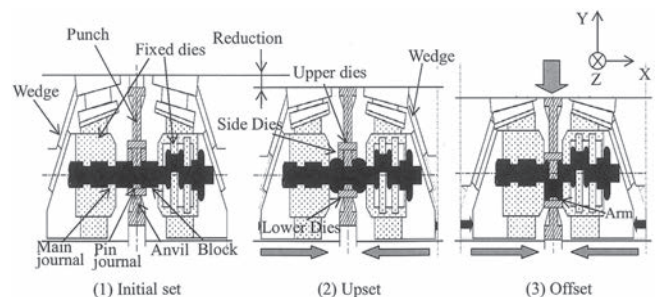


図5 RR鍛造法

ンチとアンビルは図示していないシリンダーのリリーフ機構により、初期の位置でピン軸を保持したまま停止している。そのため、ブロック部のみ圧縮される工程となる(図6(2)アップセット)。アップセットが所定位置まで到達すると引続きブロック部は圧縮され、ポンチとアンビルはプレスの降下に伴い移動し、ピン軸が偏芯する工程(図6(3)オフセット)となり、所定のアーム形状が鍛造される。

RR鍛造法はCGFクランク軸を製造可能な優れた鍛造法であるが、プレス挙動や素材の変形挙動などが複雑で、鍛造工程設計を行うためには豊富な経験や知識を必要としていた。神戸製鋼ではこれらの経験や知識を伝承し、より適正な工程

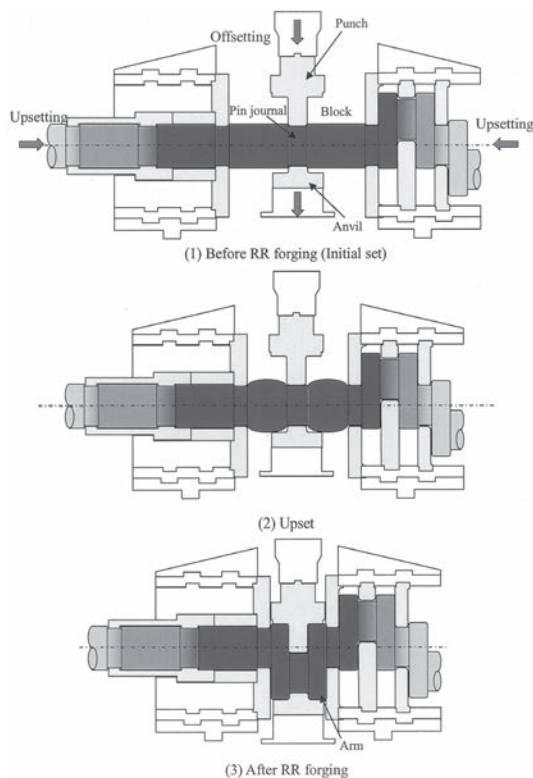


図6 RR鍛造の変形挙動

設計手法を確立するために3D-FEM変形解析を活用したRR鍛造の形状予測技術を開発した¹²⁾。一例としてRR鍛造形状および各位置におけるバリ形状の解析結果の例を図7に示す。解析結果と実機鍛造後の形状は精度良く一致しており、今後の鍛造工程設計への活用が期待される。

RR鍛造により成型されたクランク軸は、焼入れ・焼戻しにより機械的特性を付与した後に、所定の形状に機械加工される。

2.3 機械加工

図8に大型一体型クランク軸の機械加工工程を示す。機械加工工程は荒加工、仕上加工、2次加工に大別できる。

荒加工は黒皮状態からの加工となるが、比較的公差の緩い部位は図面寸法にまで加工し、軸・ピン・フィレットなど厳しい公差を要求されている部位は仕上加工代を残す。軸の振れ公差が $30\mu\text{m}$ と厳しいため、荒加工によって、除去部位にある残留応力を開放し仕上加工での残留応力による微小変形

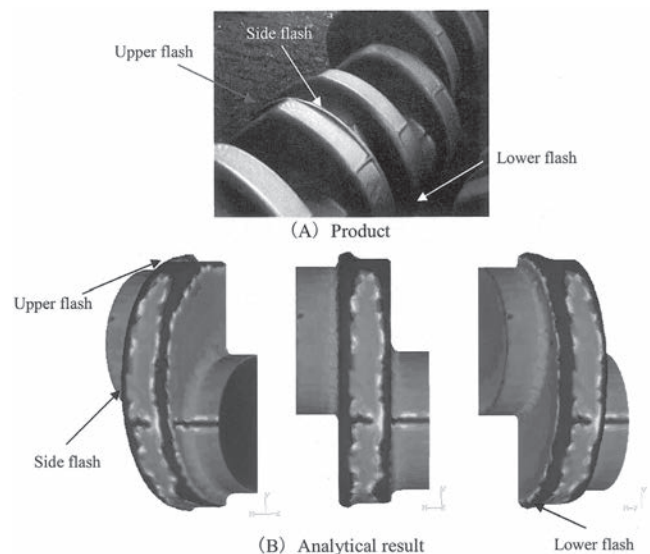


図7 鍛造形状およびバリ形状の実機とFEM解析結果の比較

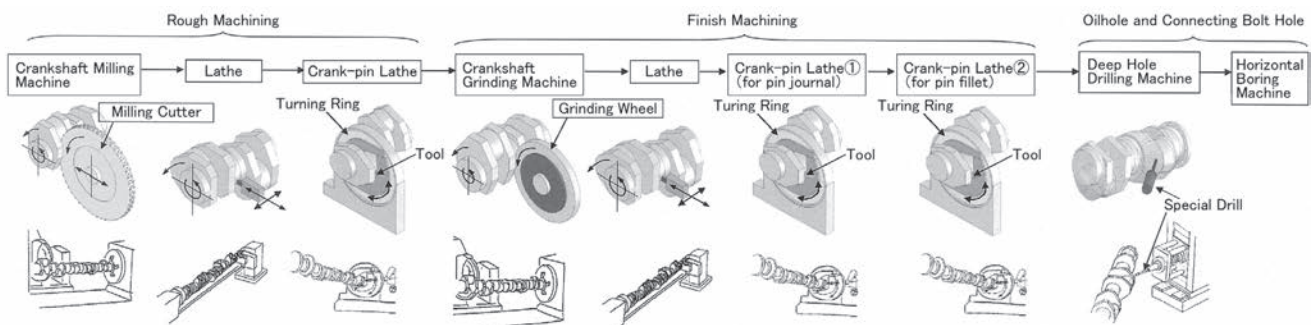


図8 大型一体型クランク軸の機械加工工程

を極小にすべく加工することが肝要である。加工機はクランク専用ミーリング機、旋盤などを使用する。

仕上加工は軸、ピン、フィレットなどの部位を図面寸法にまで加工する。軸直径が $\phi 450\text{mm}$ の製品で軸の直径公差は $\pm 20\mu\text{m}$ であり、髪の毛の直径 ($80\sim 100\mu\text{m}$) よりも極めて小さく、真円度 (真円からの偏差) は $20\mu\text{m}$ 、軸・ピンの表面粗さ (表面の凹凸) も $1.2\mu\text{m}$ と極めて精密である。従って仕上加工は製品温度をも考慮しながらの加工となる。ちなみに鋼の熱膨張率は 12×10^{-6} であるので $\phi 450\text{mm}$ の場合、室温と製品との温度差が 1°C あると $5.4\mu\text{m}$ 寸法差が生じているのでその差分を考慮して狙い寸法を決めて仕上加工する。加工機は軸研削盤、ピン旋盤などである。

2次加工は潤滑油の流路となる油穴、カウンターウェイト (クランクピンによる重量のアンバランスを軽減するもの) の取付部位と取付用メネジ、プロペラ軸や発電機に結合するためのフランジ穴の加工を行う。油穴は非常に細長く (例えば $\phi 40\times 1000\text{mm}$ 以上)、特殊ドリルを用いる加工技術上高度な加工が必要である。加工機は斜め穴加工機、横中ぐり盤などである。

以上の機械加工の後、 1mm 以下程度のバリ取りなどの手仕上、寸法検査、非破壊検査、防錆、梱包を経て出荷となる。

3 高疲労強度化への取組み

3.1 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¹³⁾。

$$\sigma_{DW} = K (0.42 \sigma_B + 39.3) \cdot \left[0.264 + 1.073 D^{-0.2} + \frac{785 - \sigma_B}{4900} + \frac{196}{\sigma_B} \sqrt{\frac{1}{R}} \right] \quad (1)$$

ここで、 σ : 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、自由鍛造法については $K=1.0$ であるのに対しCGF鍛造法については、 $K=1.05$ と規定されている。

引張強さ 1000MPa 以上の高強度鋼の開発と介在物低減による高疲労強度化を目的とした高 cleanliness 鋼製造プロセスの開発において、介在物低減による高疲労強度化は式 (1) における K -factor向上に対応する。

3.2 高 cleanliness 鋼製造プロセスの開発

鋼中に存在する非金属介在物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。クランク軸材における疲労破面からは、鍛伸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¹⁴⁾。クランク軸の高疲労強度を考える上で、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9に示す。図には、取鍋精錬炉導入前の出鋼脱ガス法 (Tap Degassing process) におけるSレベルでの疲労試験結果も併せて示す。S量を低減することで高い耐久限度比 (= 疲労強度 / 引張強さ) を示すことが分かる。

取鍋精錬炉では $S \leq 10\text{ppm}$ が可能となっているが、鍛鋼材においては水素割れ防止のためにSを一定量残存させることが一般的に必要と考えられている。これは、生成したMnSがトラップサイトとして水素を分散させ水素凝集を防止する効果によると考えられている。従って、低S化を実現させるためには、同時に低水素化を実現することが必要であり、真空度向上などによる脱ガス強化と脱ガス後の水素ピックアップ低減による低水素化 ($H \leq 1.0\text{ppm}$) を進め、 $S \leq 10\text{ppm}$ でも水素割れすることなく製造を可能とした。

酸化物系介在物を低減するためには、溶存酸素を低減し、介在物の浮上分離を促進する必要がある。精錬工程における

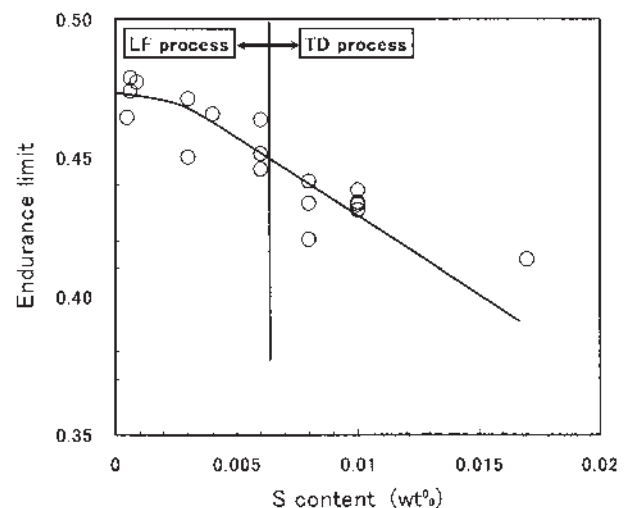


図9 耐久限度比とS量の関係

スラグ組成および溶鋼の攪拌条件の適正化による溶鋼中の酸素低減の促進、下注ぎ造塊時におけるArシール改善による再酸化防止、鋳型内での押湯保温条件の最適化による介在物浮上分離の促進により、酸化物系介在物の低減を図った。

上述の高清浄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側の清浄度評価結果を図10に示す。清浄度は、DIN K法 (DIN 50 602) にて評価している。ここで、清浄度は、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。高清浄度鋼では、K3の評価でも大半はIndex5以下であり、最大でもIndex12である。本結果より、高清浄度プロセスを適用することにより、現用鋼と比較して清浄度が格段に改善されていることが確認された。

図11に高清浄度鋼の疲労試験結果を示す。図には、従来

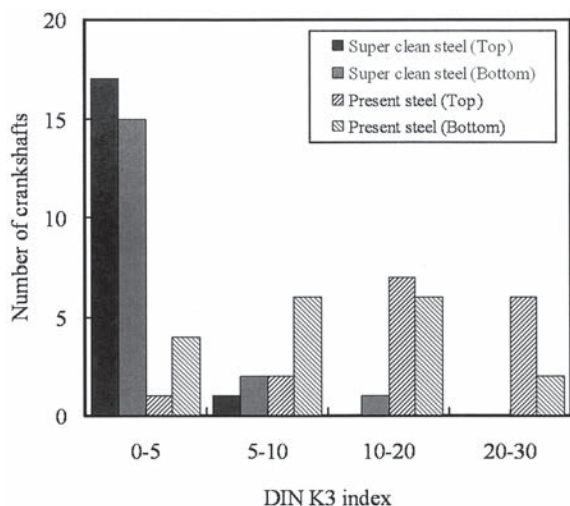


図10 高清浄度鋼と現用鋼の清浄度 (DIN K3) の比較 (清浄度の度数をクランク軸数として示す)

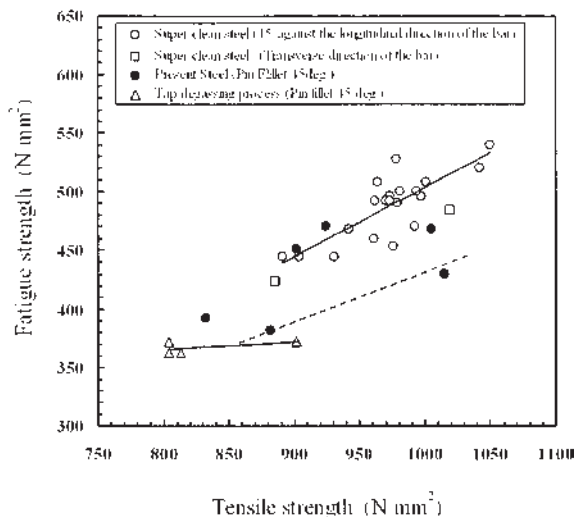


図11 高清浄度鋼と現用鋼の疲労特性の比較

鋼 (TD 法) および現用鋼の疲労試験結果も示している。高清浄度鋼の疲労強度は、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、高清浄度化により介在物が微細化されたためであると考えられる。

3.3 高強度鋼の開発

一体型クランク軸用の材料は、1960年ごろまではほとんどが450MPa級の炭素鋼が主流であったが、その後低合金鋼も使用され現在では低合金の比率 (TS $\geq$ 800MPa) が50%以上となっている。

この中でも特記すべきは、高強度材料の適用であり、現在では950MPa級の材料も使用されている。この傾向は今後も継続すると予想され、将来的には1000MPa超級の材料も使用されるであろうと思われる。

クランク軸は、焼入れ・焼戻し処理を行い、強度・靱性を高めている。引張強度の向上による疲労強度向上を狙った場合、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 (DIN規格鋼34CrNiMo6もしくは現状の神戸製鋼開発鋼40CrMo8¹⁵⁾) 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、過去に蓄積された様々な化学成分での機械的特性データを基に成分設計した高強度開発鋼を表1に示す。

図12に、高強度開発鋼と現用鋼の強度と靱性の関係を示

表1 現用鋼および高強度開発鋼の化学成分 (mass%)

	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
New steel	0.35	0.25	0.90	1.60	1.60	0.50

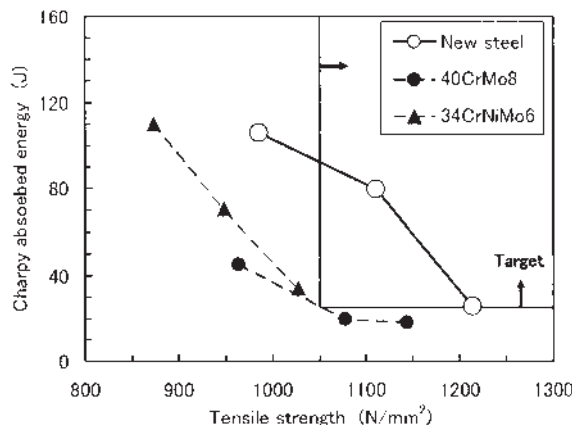


図12 引張強さとシャルピー吸収エネルギーの関係

す。現用鋼としては、現状最高強度である34CrNiMo6鋼と40CrMo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分かる。

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、ステアケース法を用いた。表2に高強度開発鋼のステアケー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。また、耐久限度比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。

4 おわりに

ディーゼル機関は低燃費の観点からも優れた推進機関であり、その主要部品の一つであるクランク軸には、更なる高性能・高品質化が求められるものと考えられる。

クランク軸の品質としては、強度・靱性・疲労強度等の優れた素材品質と機械加工精度の両者が求められている。今後も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、更なる研究開発を推進して行きたいと考える。

表2 現用鋼と開発鋼の疲労試験結果

	Tensile strength [N/mm ²]	Fatigue strength [N/mm ²]	Endurance limit
New steel	1085	509	0.469
40CrMo8	989	465	0.470

参考文献

1) 久保晴義, 森啓之: R & D 神戸製鋼技報, 55 (2005) 3, 2.
2) 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), 77.
3) Franz Koch: 24th CIMAC World Congress, (2004) 174.
4) Juhe Kytola: 24th CIMAC World Congress, (2004) 123.
5) Yutaka Miyawaki et al.: 24th CIMAC World Congress, (2004) 101.
6) 長坂英明, 森啓之, 荒木重臣, 石橋保樹, 濱田猛, 高見元彦: R & D 神戸製鋼技報, 48 (1998) 1, 68.
7) 日本機械学会: 金属材料疲れ強さの設計資料(Ⅱ), (1965)
8) 島本敏郎, 山口俊弘, 鈴木義秋, 近江竜司: 自動車技術, 44 (1990), 95.
9) 深谷荘吾, 藤綱宣之, 香川恭徳: R & D 神戸製鋼技報, 55 (2005) 3, 22.
10) 篠崎智也, 保元康彦, 藤綱宣之: R & D 神戸製鋼技報, 59 (2009) 1, 94.
11) Nobuyuki Fujitsuna et al.: 17th International Forgemasters Meeting, (2008), 390.
12) 柿本英樹, 長田卓, 仲山公規, 高橋洋一, 高原浩司, 森啓之: R & D 神戸製鋼技報, 55 (2005) 3, 26.
13) International Association of Classification Society: Requirements Concerning Machinery Installations, Unified Requirement M53, (2004)
14) 村上敬宣: 金属疲労 微小欠陥と介在物の影響, (1993)
15) 香川恭徳, 藤綱宣之, 森啓之: 第68回マリンエンジニアリング学術講演会予稿集, (2002), 157.

(2010年2月26日受付)