

(解説)

当社におけるクランク軸の製造・技術開発の足跡

Technical Developments and Recent Trends in Crankshaft Materials at Kobe Steel



久保晴義*
Haruyoshi Kubo



森 啓之***(工博)
Dr. Hiroyuki Mori

Semi-built-up and solid crankshafts, as a main part of diesel engines, have been subjected to increasingly severe service conditions to meet such engine requirements as higher output and more compact size. This has driven crankshaft manufacturers to improve the fatigue strength, quality, and reliability of crankshafts. This paper describes technical developments and recent trends, such as improved steel-making processes, new materials with higher strength, and new fillet hardening processes.

まえがき = 当社ではクランク軸を中心にプロペラ軸や中間軸、ラダーストック、スタンフレームといった大型鍛鋼品(図1)を数多く製造している。

ディーゼル機関用のクランク軸は、船用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。2ストロークおよび4ストローク機関においては、2度のオイルショックを契機に省エネルギー・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。

本稿では、クランク軸材の主要な技術の変遷を解説するとともに、最近注目されている開発技術の動向について紹介する。

1. クランク軸の製造方法

1.1 組立型クランク軸の製造方法

写真1に組立型クランク軸を、図2に部位名称を示す。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ばめすることによって組立・製造される。ジャーナルはすべて鍛鋼製であるが、クランクスローは鋳鋼製のもの、鍛鋼製のものの2種類がある。クランクスローに鋳鋼を用いた鋳鋼製クランク軸は、鍛鋼製クランク軸に対し生産性が高いという利点がある。表1に鋳鋼製クランク軸の製造工程を示す。この中で、鋳鋼製クランク軸に要求される性能から重要な要素技術は、鋳造方案、製鋼技術・材質、クランク軸強化法などがあげられる。

1.2 一体型クランク軸の製造方法

写真2に一体型クランク軸を、表2に製造工程の一例を示す。一体型クランク軸は鋼塊からプレスによりパー

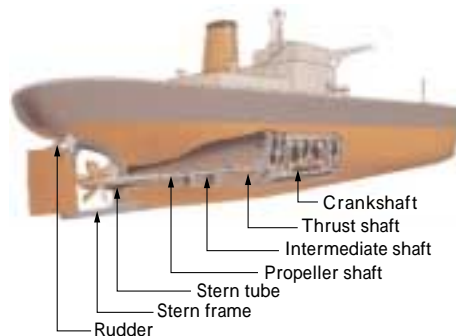


図1 船用鍛鋼品

Fig. 1 Illustration of casting and forging products for marine use

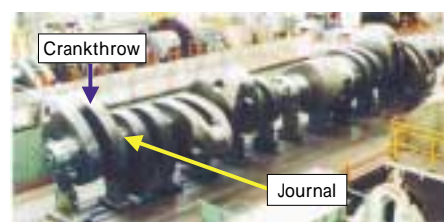


写真1 組立型クランク軸

Photo 1 Built-up type crankshaft

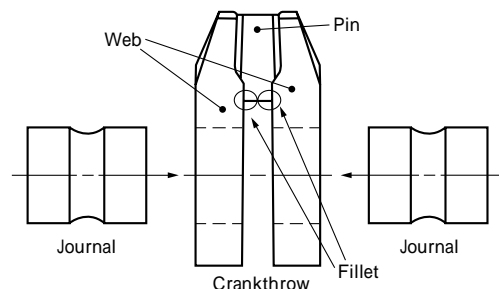


図2 組立型クランク軸の各部位の名称

Fig. 2 Illustration of built-up type crankshaft

* 鉄鋼部門 鋳鍛鋼事業部 技術部 ** 鉄鋼部門 鋳鍛鋼事業部 製造部

表 1 組立型クランク軸の製造工程

Table 1 Manufacturing sequence of built-up type crankshaft made of cast steel crankthrow

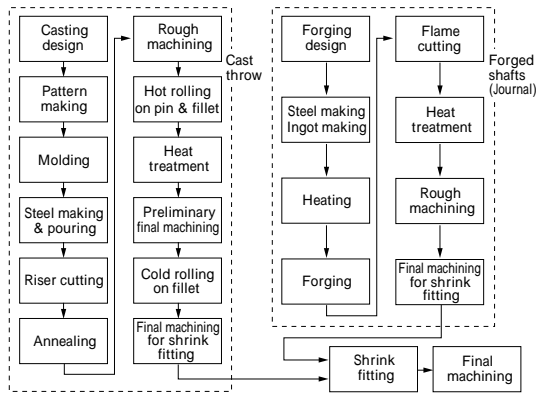
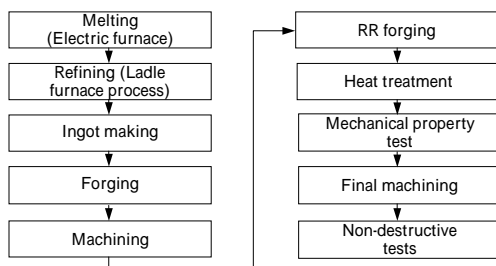


写真 2 一体型クランク軸

Photo 2 Solid type crankshaft

表 2 一体型クランク軸の製造工程

Table 2 Manufacturing sequence of solid type crankshaft



材を製作し、その後特殊鍛造装置を用いて所定の形状に成形される。特殊鍛造法には RR 鍛造法および TR 鍛造法などがあげられ現在主流の成形法となっている。一例として、当社で採用している RR 鍛造法を図 3 に示す。

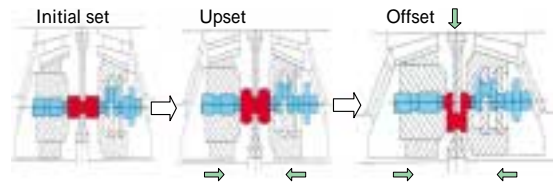


図 3 RR 鍛造法
Fig. 3 RR forging

RR^{注1)}鍛造法(および TR^{注2)}鍛造法)はよりニアネットに成形できるため、クランク軸の最重要部位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挙げられる。一体型クランク軸において要求される性能から重要な要素技術は、組立型クランク軸と同様に、鍛造方法、製鋼技術・材質、クランク軸強化法などがあげられる。

2. 組立型クランク軸材の変遷と最近の動向

2.1 組立型クランク軸の主要要素技術の変遷

表 3 に鑄鋼製組立型クランク軸に関する主要要素技術の変遷を示す。以下では、この中で製鋼法、材質、付加技術の変遷と最近の動向について詳述する。

2.2 製鋼方法の変遷

クランク軸材料内の不純物元素を低く抑えるためには、製鋼技術の進歩が不可欠である。特に燐(P)、硫黄(S)などの除去や脱ガス処理が重要である。当社では、表 3 に示すように 1988 年ごろ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。炉外精錬法の模式図を図 4 に、炉外精錬法による清浄化の効果を図 5 に示す。炉外精錬法が採用されることにより、硫黄などの不純物元素や酸素などのガス成分の除去が効果的に行われており、非金属介在物の低減に有効な役割を果たしている¹⁾⁻³⁾。

2.3 材質の変遷

ディーゼルエンジンのコンパクト化や高出力化に伴

表 3 組立型クランク軸の主要要素技術の変遷

Table 3 Technical development of built-up type crankshaft

	1950	1955	1960	1965	1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2005
Casting design	Full built-up type											
	Semi built-up type crankthrow											
	Solidification analysis											
Steel making process	Open-hearth furnace											
	Electric furnace											
	Tap degassing process (TD) → Ladle furnace process (LF)											
Cast steel material	Grade 1											
	Grade 2											
	Grade 3											
	Grade 4											
	Grade 5 Low-Si											
Fillet rolling	Cold rolling (Old type equipment)											
	Cold rolling (New type/Small size)											
	Cold rolling (New type/Large size)											
Ultrasonic test apparatus	Hot rolling											
	Automatic apparatus											

脚注 1) RR: CRESOT-LOIRE 社の社長 M. Roederer 氏と発明者 G. Ruget 氏の頭文字である。

脚注 2) TR: 開発者 T. Rut 氏の頭文字である。

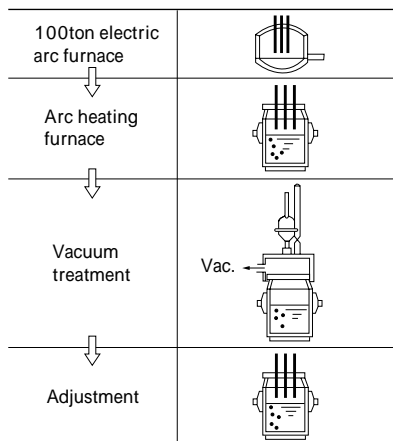


図4 炉外精錬法
Fig. 4 Ladle furnace process

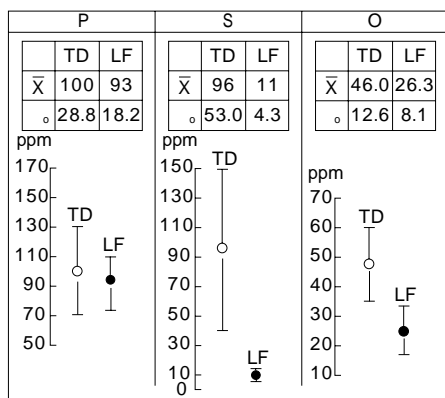


図5 出鋼脱ガス法と炉外精錬法でのP, S, O量の比較
Fig. 5 Comparison of P, S and O contents between tap degassing process and ladle furnace process

い、クランク軸にもピンフィレット部の疲労強度向上およびジャーナル焼ばめ部の把握力向上が求められてきた。そのため、鋳鋼スロー材にも高強度化、高降伏点化が必要となる。図6にこれまで採用されてきた鋳鋼スロー材の機械的性質およびその熱処理方法を示す¹⁾。ここ30年の間に材料の降伏点は1.5倍程度に向上していることがわかる。

2.4 付加技術の変遷

クランク軸で最も重要な特性として、フィレット部の疲労強度が挙げられる。その疲労強度をさらに向上させるものとして、フィレット部を外力により強化させる方法がある。その強化方法の一つとして、当社では冷間にてロール加工を施す方法(写真3:冷間ロール加工法)を開発、実用化してきた。ピンフィレット部は大きなウェブに挟まれ空間が狭いこと、およびディーゼル機関のコンパクト化傾向に相まって、その冷間ロール加工装置にも種々の改善が施されてきている^{1)A)}。冷間ロール加工を施すと、材料の加工硬化と圧縮残留応力の生成により、疲労強度が大幅に上昇する⁵⁾⁻¹²⁾。その効果は写真4に示すような実体スローの大型共振型平面曲げ疲労試験装置を用いて確認されている。その結果の一例を表4に示す。冷間ロール加工を施すことにより、疲労強度が約78%上昇することが確認されており、現在ではすべての鋳鋼スローに適用されている技術となっている¹⁾。

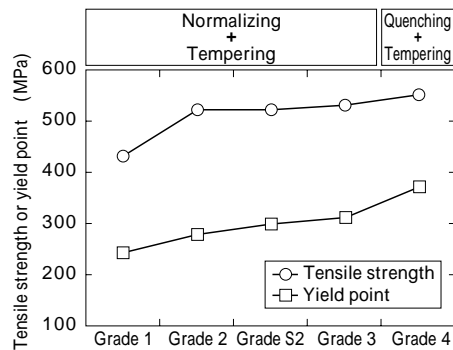


図6 鋳鋼スロー材の機械的性質と熱処理条件
Fig. 6 Mechanical properties and heat treatment of cast steel materials for crankthrow



写真3 冷間ロール加工装置
Photo 3 Fillet cold rolling equipment



写真4 実体疲労試験装置
Photo 4 Fatigue testing machine for actual-sized crankthrow

表4 実体疲労試験結果

Table 4 Results of fatigue tests on actual-sized crankthrow

Type of crankshaft (Pin diameter in mm)	Material	Fillet cold rolling	Tensile strength ^a (MPa)	Fatigue strength		
				Fatigue strength _w (MPa)	Degree of increase Amount (MPa)	Degree of increase Rate (%)
Type 80 (730)	Cast steel (Grade 2)	Non	557.6	176.4	-	-
		Treated	557.6	313.6	137.2	78

2.5 最近の動向

鋳鋼製組立型クランク軸は鍛鋼製のものに比べて生産性に優れている一方で、鍛鋼材とは疲労強度が同等とはみなされていなかったため、一部のエンジンには鋳鋼が適用できないものがあった。

そこで、当社では鍛鋼材と同等の疲労強度を有することを目的とした高強度鋳鋼スロー材(Grade 5)を開発した¹³⁾。図7に鋳鋼材、鍛鋼材の降伏点と引張強度の関係を示す。高強度鋳鋼スロー材(Grade 5)は、引張強度が鍛鋼材に比べて高く、国際船級協会連合の統一規則(IACS UR M53)における強度補正係数Kによる補正をしても、疲労強度は同等である。高強度鋳鋼スロー材(Grade 5)を使用することにより、鍛鋼と同一形状の船用機関用鋳鋼製クランク軸も設計されるようになってきている。今後は、ねじり振動による応力が高く、鍛鋼のみが標準的に使用されている発電プラントへの適用が期待される。

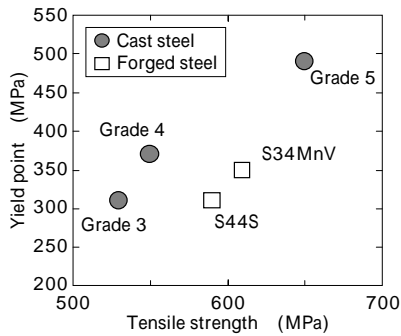


図7 鑄鋼材および鍛鋼材の機械的性質

Fig. 7 Mechanical properties of cast steel materials and forged steel materials for crankshaft

鑄鋼スローはその内部に不可避的に存在するマイクロシュリンケージの影響で、同一強度を持つ鍛鋼品に比べて若干疲労強度が低いことが知られている。当社では、重要部位であるピン部やピンフィレット部に熱間での塑性加工（熱間ロール加工）を施している。図8に熱間ロール加工装置の概略図を、図9に熱間ロール加工の効果を示す。このように、加工表面より深さ20mm程度までのマイクロシュリンケージが圧着により消失していることが

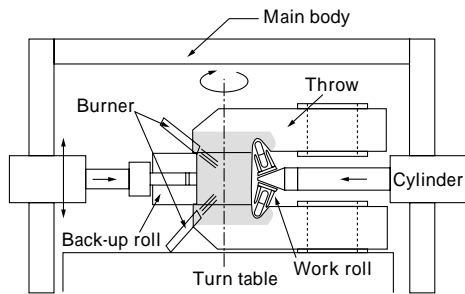


図8 熱間ロール加工模式図
Fig. 8 Illustration of hot rolling

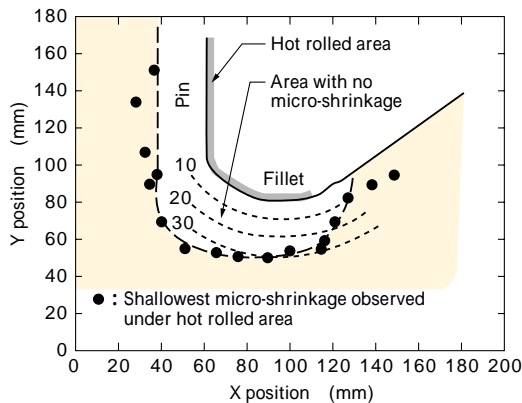


図9 熱間ロール加工の効果
Fig. 9 Effect of hot rolling



写真5 自動超音波探傷装置

Photo 5 Automatic ultrasonic inspection equipment

わかる¹⁴⁾。

さらに、クランク軸は非常に安定した品質を求められる重要部品であるため、その品質管理についても十分留意している。写真5は当社で開発した自動超音波探傷装置¹⁵⁾であるが、本装置を用いることにより人為的ばらつきを低減するとともに、合格範囲のインディケーションであっても、その位置や大きさも記録することができるようになってきている。

3. 一体型クランク軸材の変遷と最近の動向

3.1 一体型クランク軸材の主要技術の変遷

船舶や陸上発電に用いられている中・高速ディーゼル機関についても、ますます高出力化傾向に推移しており、さらに低燃費とコンパクト化の要求も強い。そこで、一体型クランク軸においても従来にもまして高強度化が求められてきている。

過去には、RR鍛造法やTR鍛造法が開発され、これらの製造方法により製造されたクランク軸は自由鍛造法により製造されたクランク軸よりも疲労強度に優れることから、CGF (Continuous Grain Flow) クランク軸と称され使用されている。現在では、ほとんどの一体型クランク軸はこのCGFクランク軸として設計されるようになっており、主流となっている。また、一体型クランク軸の重要部位もフィレット部であるため、材質の高強度化のみならず、フィレット部の疲労強度向上方法が種々検討されてきている。

3.2 材質・強度の変遷

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はじめ、現在では低合金鋼の比率(TS 800MPa)が50%程度となっている。

この中でも特記すべきは、超高強度材料の適用であり、現在では950MPa級の材料¹⁶⁾も使用されはじめている(図10)。この傾向は今後も継続するものと予想され、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。

3.3 付加技術の変遷

クランクの疲労強度向上のためには、材料強度(引張強さ)の向上だけでなく、付加技術による向上も検討されている。その方法としては、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^{17),18)}。中でも冷間ロール加工法は加熱をともしないため、熱変形もなく、寸法精度に優れるという点から実用化され

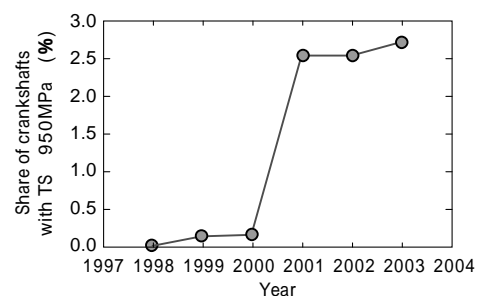


図10 950MPa級材料の本数比率

Fig.10 Share of crankshafts with tensile strength of over 950MPa



写真6 冷間ロール加工装置
Photo 6 Fillet cold rolling equipment



写真7 共振型疲労試験装置
Photo 7 Fatigue testing machine

ている付加技術の一つであり、先にも述べたように鋳鋼スローには1970年ごろから適用が開始されている。当社では、一部の低合金鋼製一体型クランク軸についても冷間ロール加工法（写真6）を適用しており、写真7に示す疲労試験装置などを用いて疲労試験が実施されるとともに、その効果が確認されている（図11）^{11),12)}。これらの付加技術についても今後適用範囲が増加することが期待されることである。

3.4 最近の動向

一体型クランク軸の製造方法として当社が採用しているRR鍛造法は、CGFクランク軸を製造できる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。当社では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。一例としてRR鍛造後のバリ高さの例を図12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。

先にも述べたように、一体型クランク軸の高強度化傾向はますます加速するものと思われる。そのためには1000MPa超級材料¹⁹⁾の開発が急がれるとともに、日本海事協会の研究²⁰⁾にもあるように、高強度化に伴い非金属材料の低減も実施していく必要があるものと考えられる。非金属材料の低減に際しては、これまで製鋼法の改良などによりかなり改善してきているものの、さらなる高品質化を目指した研究開発に取り組んでいきたいと考える。

むすび=当社の主力製品の一つであるクランク軸について、本稿ではその長い歴史を振り返り、主要要素技術に関

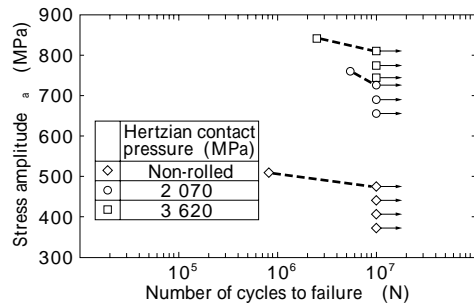


図11 実体クランク軸の疲労試験結果
Fig.11 Results of fatigue tests on actual-sized crankshaft

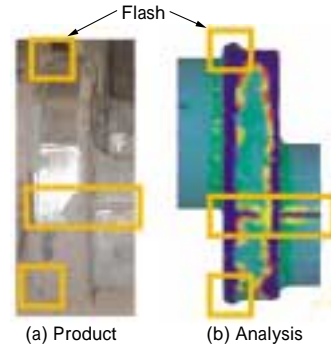


図12 実機と解析結果の比較
Fig.12 Comparison between product and analysis result

する開発経緯と最近の動向について述べた。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。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、今後も更なる研究開発を推進してゆく所存である。

参考文献

- 1) 森 啓之ほか：R&D神戸製鋼技報，Vol.50，No.3（2000）p.41.
- 2) 岡村正義ほか：R&D神戸製鋼技報，Vol.33，No.3（1983）p.3.
- 3) A. Suzuki：10th International Forging Conference Sheffield（1985）.
- 4) 安 文在ほか：R&D神戸製鋼技報，Vo.19，No.2（1969）p.88.
- 5) 西原 守：日本船用機関学会誌，Vo.8，No.10（1973）p.48.
- 6) M. Nishihara：Bulletin of the M. E. S. J.，Vol.2，No.2（1974）p.57.
- 7) 西原 守ほか：日本船用機関学会誌，Vol.5，No.5（1970）p.22.
- 8) T. Kameoka et al.：Trans. I. Mar. E.，Vol.83（1971）p.205.
- 9) M. Nishihara et al.：9th International Congress on Combustion Engines（1971）A5.
- 10) 西原 守ほか：日本船用機関学会誌，Vol.7，No.1（1972）p.53.
- 11) S. Araki et al.：21st International Congress on Combustion Engines（1995）D17.
- 12) 長坂英明ほか：R&D神戸製鋼技報，Vol.48，No.1（1998）p.68.
- 13) 香川恭徳ほか：日マリ学講，第70回論集（平成15年度秋季）p.9.
- 14) 落 敏行ほか：R&D神戸製鋼技報，Vo.52，No.1（2002）p.11.
- 15) 和佐泰宏ほか：鉄と鋼，Vol.90，No.11（2004）p.877.
- 16) 香川恭徳ほか：日マリ学講，第68回論集（平成14年度秋季）p.157.
- 17) 日本機械学会編：金属材料疲れ強さの設計資料（ Ⅰ1965）.
- 18) 島本敏郎ほか：自動車技術，Vol.44，No.6（1990）p.95.
- 19) 深谷莊吾ほか：日マリ学講，第72回論集（平成16年度秋季）p.109.
- 20) たとえば，小俣重雄：日本海事協会誌，No.262（2003 Ⅰ ）p.35.