

(論文)

組立型クランク軸用高強度鋳鋼スロー

High Strength Cast Steel Crankthrows for Semi-built-up Type Crankshafts



吉田泰正*
Yasumasa Yoshida



森 啓之***(工博)
Dr. Hiroyuki Mori



香川恭徳**
Yasunori Kagawa

The high strength cast steel, Throw Grade 5, was developed for semi-built-up type crankshafts to cover all current types of low speed diesel engines. Mechanical and fatigue properties tests were performed with test pieces taken from a full-scale crankthrow. All the test results met specification. As a result, manufacturing approvals for this material have been obtained from major Classification Societies. High strength cast steel, Throw Grade 5, was used in the Mitsui-MAN B&W 10K98MC, one of the largest low speed diesel engines in the world.

まえがき = 昨今、低速ディーゼルエンジンにおいて高出力化に対する要求が高まっており、1 シリンダあたりのエンジン出力はこの 30 年間でほぼ 2 倍に増加している (図 1)。また、積載空間を大きくとるために、エンジンの小型軽量化も強く求められている。そのため、エンジンはシリンダの高出力や熱荷重などの厳しい条件に対して設計されることになり、クランク軸に対しても高い品質と機械的性質が求められている。

鋳鋼製組立型クランク軸は、鍛鋼製のものとは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。そのため、一部のエンジンには鋳鋼が適用できないものがあつた。そこで、昨今の旺盛なクランク軸需要の中で、迅速なクランク軸供給の要望に応えるべく、高強度鋳鋼スロー (スロー 5 種) の開発を行った。

スロー 5 種は、組立型クランク軸用鍛鋼材に比べて引張強度が高く、国際船級協会連合の統一規則 (IACS UR M53, 以降 IACS ルール)²⁾ による強度補正係数 (K = 0.93) での低減を考慮しても、疲労強度は同等である。本稿では、スロー 5 種の開発経緯、実大クランクスローか

ら切出した試験片にて行った、機械的特性、疲労特性の確性試験結果及び実機エンジンへの適用事例について紹介する。

1. 高強度鋳鋼スロー (スロー 5 種) の開発

1.1 クランクスロー用鋳鋼

完全組立型及び半組立型クランク軸 (写真 1) は、当社において、1955 年から計 5 000 本以上生産されており、世界中で使用されている。組立型クランク軸に用いられている鋳鋼は、エンジンの高出力化や軽量小型化の要求に応じて開発、改良されてきた。

開発されたスロー 5 種を含む、現在用いられているクランクスロー用鋼 (鍛鋼、鋳鋼) の引張強度と降伏応力の仕様を表 1 に示す。

従来鋳鋼であるスロー 4 種の引張強度は、鍛鋼よりも低い。また、IACS ルールによれば、鋳鋼の疲労強度は、鍛鋼に対して計算されるものに、更に強度補正係数 0.93 を乗じて低く計算されることになっている。そのため、従来鋳鋼は鍛鋼に代わって全てのエンジンには適用できなかった。スロー 5 種は、これらの鍛鋼のみが用いられるエンジンに適用できるように開発されたものである。

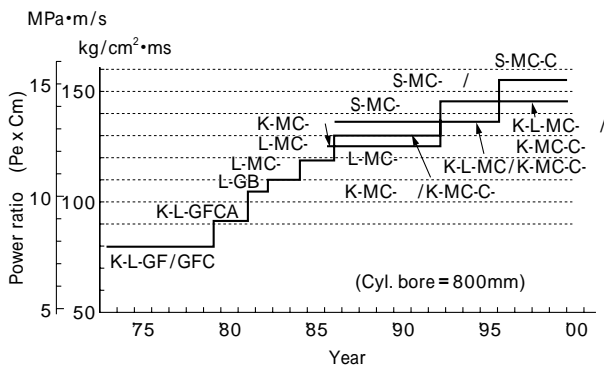


図 1 MAN B&W タイプエンジンの出力率の変遷
Fig. 1 Change in power rate of MAN B&W type engines



写真 1 鋳鋼製組立型クランク軸
Photo 1 Semi-built-up type crankshaft made of cast steel

* 鉄鋼部門 鋳鋼事業部 技術部 ** 鉄鋼部門 鋳鋼事業部 製造部

表1 クランクロー材料の機械的性質の仕様

Table 1 Mechanical property specifications of material for crankthrow

	Code name in Kobe steel	Code name in MAN B&W	Yield point (MPa)	Tensile strength (MPa)
Forged steel	-	S44S	310	590
	-	S34MnV	350	610
Cast steel	Throw Grade 3	S25VF	310	530
	Throw Grade 4	S25VF-H	370	550
	Throw Grade 5	S18NiVF	490	650

結果的に、スロー5種の引張強度は現行の鍛鋼と比較して高いばかりでなく、降伏応力も4割高い。これにより、スロー5種を用いれば、鍛鋼より高い焼ばめ把握力を確保できることとなった。

1.2 スロー5種の化学成分設計

大型鋳鋼品であるクランクロー用鋼の成分設計には、強度のほかにも以下の特性を満足する必要がある。

- 良好な溶接性
- 良好な表面品質
- 高い延性・じん性

高い引張強度を達成するには、従来鋼に比較して大幅に合金元素量を増加させる必要がある。しかし、溶接性と強度は化学成分の設計においては相反する性質となる。すなわち、溶接性を確保するためには、強度を上げるために必要な式(1)で計算される炭素当量(C_{eq}, IIW³⁾)を上昇させない必要がある。

$$C_{eq} = C + Si/24 + Mn/6 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14 \dots (1)$$

スロー5種とほぼ同じ化学成分の鋼における、CとNiに対する、強度上昇率と炭素当量上昇量の関係を図2に示す。

図2から、Niの方が少ない炭素当量の増加で高い強度上昇率を実現できることがわかる。そこで、スロー5種には、従来鋳鋼に比べてCを減少させ、Niを増加させる成分設計を行った(表2)。

1.3 実大クランクローによる確性試験

スロー5種の機械的性質を実大クランクローで調査した。試験片の切出し位置を図3に示す。試験片は以下の各性質が求められる位置から切出した。

- ピンフィレット及びピン孔周りの疲労強度
- ジャーナル焼ばめ孔周りの降伏応力(0.2%耐力)
- ピン部の引張強度

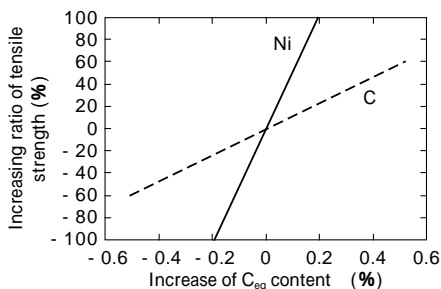


図2 炭素当量の変化に対する強度上昇率

Fig. 2 Variation of increasing ratio of tensile strength to increase of C_{eq} content

表2 スロー3, 4及び5種の化学成分

Table 2 Chemical composition of Throw Grade 3, 4 and 5

	(mass%)					
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Others
Grade 3, 4	0.24	0.07	1.05	0.40	0.35	Mo, V
Grade 5	0.18	0.10	1.00	1.65	0.35	Mo, V

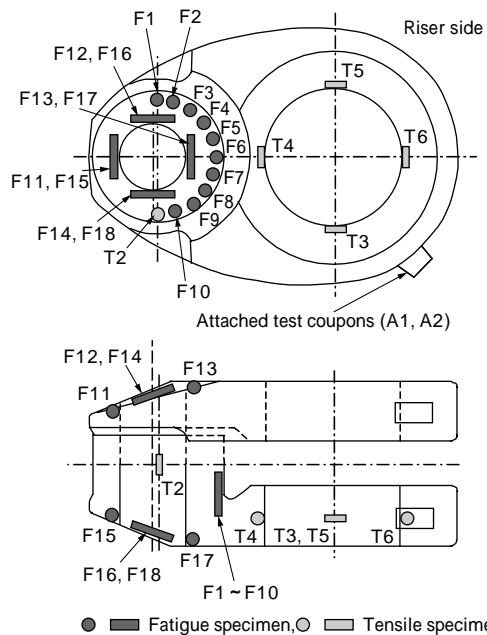


図3 実大クランクロー(MAN B&W K90MC)からの試験片切出し位置

Fig. 3 Location of test specimens on MAN B&W K90MC full-scale crank throw

表3 実大クランクローから切出したスロー5種試験片の機械的性質

Table 3 Mechanical properties of specimen of Throw Grade 5 from full-scale crankthrow

	σ ₂ (MPa)	σ _B (MPa)	EL. (%)	RA (%)	2mmV-notch impact strength (J)
Spec.	490	650	12	30	12 (mean value)
A1	626	742	20	59	38, 46, 66 (50)
A2	626	740	19	56	34, 12, 36 (27)
T2	625	743	21	61	-
T3	620	734	20	58	-
T4	611	732	19	57	-
T5	611	728	19	59	-
T6	609	726	19	62	-

表3及び図4に試験結果を示す。全ての試験結果は仕様を満足し、スロー5種はクランクロー用材料とし各国主要船級協会から製造承認を受けた。

2. 高強度鋳鋼スロー(スロー5種)の適用

IACSルールにより計算されるスロー5種の疲労強度は、鋳鋼であることによる強度補正係数(K=0.93)を考慮しても、現行の鍛鋼の疲労強度と同等である。したがって、従来、鍛鋼しか用いらなかったスローをスロー5種に代えることが可能になった。鍛鋼のスローをスロー5種に代えることで生産性の向上につながるばかりでなく、スロー5種の降伏応力が鍛鋼より十分に高いことから、許容焼ばめ把握力を高くとることができることとなった。

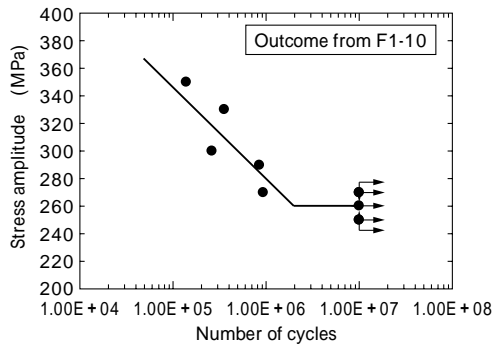


図4 実大クランクスローのピンフィレット部から切出したスロー5種試験片の疲労試験結果

Fig. 4 Fatigue test results of Throw Grade 5 from pin-fillet of full-scale crankthrow

なお、スロー5種を採用しても既存の鍛鋼スローと同じ形状のスローの設計・製造が可能であり、バラシングや振動面で軸系計画の変更を伴わずに可能である。

最大級の低速ディーゼルエンジン型式である Mitsui-MAN B&W 10K98MC (写真2, 表4) 及び11K98MCエンジンは、当初鍛鋼スローと鋳鋼スローの両方を用いたハイブリッド設計が採用されていた。すなわち、10K98MCのNo.5及び6, 11K98MCのNo.9~11スローには鍛鋼が、そのほかには鋳鋼が使用されていた。この鍛鋼スローがスロー5種に変更できれば、全て鋳鋼とすることができることになる。スロー5種を用いた Mitsui-MAN B&W 10K98MC 1号機は既に完成し、2005年2月に就航している。

なお、応力解析、振動解析などにより、Mitsui-MAN B&W 10K98MCエンジンのNo.5及び6スローにスロー5種を用いた場合の安全性が確認されている⁴⁾⁵⁾。

3. 今後の取組み

高強度鋳鋼スロー5種は船舶用エンジンへの適用のみならず、ねじり振動による応力が高く、鍛鋼のみが標準的に用いられている発電用プラントへの適用も計画されている。また、将来的に更なる高シリンダ圧、小型軽量化、高振動トルクに対して、クランク軸材料としてスロー5種の採用が有効な解決策となると考えられる。

高強度鋳鋼スロー5種の適用拡大のために、今後もエンジンメーカ、ライセンスと一体化した活動を強く進めていく。



写真2 Mitsui-MAN B&W 10K98MCエンジンのクランク軸(三井造船提供)

Photo 2 Crankshaft of Mitsui-MAN B&W 10K98MC engine (By courtesy of Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd.)

表4 Mitsui-MAN B&W 10K98MCエンジンの諸元
Table 4 Particulars of Mitsui-MAN B&W 10K98MC engine

Type	Mitsui-MAN B&W 10K98MC
Output (kW)	57 200
MCR (rpm)	94
Cylinder number	10
Cylinder bore (mm)	980
Stroke (mm)	2 660
Firing order	1-8-7-3-5-9-4-2-10-6 (Unequal intervals)
Throw material	Grade 3 (No. 1, 2, 3, 4)
	Grade 5 (No. 5, 6)
	Grade 4 (No. 7, 8, 9, 10)

むすび= 現行の全ての組立型クランク軸に適用可能な高強度鋳鋼スローとしてスロー5種を開発し、実機への適用を行った。スロー5種の適用拡大のため、安全性評価を中心として、今後ともたゆまない研究開発を行っていく所存である。

更なるエンジンのシリンダの高出力化、小型軽量化のニーズに応えるべく、スロー5種を上回る高強度鋳鋼の開発にも取り組んでいく。

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) IACS UR M53: Calculation of Crankshafts for I. C. Engines.
- 3) Dearden J. et al.: Trans.Int'l Weld, 3(1940) p.203.
- 4) 堀 洋二ほか: 日本マリンエンジン学会誌, Vol.39, No.2(2005) p.104.
- 5) Y. Hanawa et al.: 24th International Congress on Combustion Engines (2004) Paper No.: 75.