

(技術資料)

大型ショートストローク鋳鋼製組立型クランク軸の信頼性評価

Reliability Assessment for Large Size Cast-steel Semi-built-up Type Crankshaft having Short-stroke



松田真理子*
Mariko MATSUDA



大月英士**
Eiji OTSUKI



梶原修平***
Shuhei KAJIHARA



埴 洋二****
Yoji HANAHA



濱田 猛****
Takeshi HAMADA

The main engines of large, high-speed containerships require high revolution speed as well as high power output. To meet this requirement, the MAN B&W K98MC-C engine is designed to have a shorter stroke than that of the conventional K98MC and a two-stepped journal shrink-fit which eliminates the need for processing journal bore surface in the crankpin fillet. In order to apply a cast-steel crank throw for the first time in the world, a shrink-fit test and reliability assessment were performed to guarantee its safety by evaluating the effect of the manufacturing process on the fatigue properties of its pin-fillet portion.

まえがき = 当社は、船舶および陸上発電に用いられる大型低速ディーゼル機関用の組立型クランク軸で世界一のシェアを獲得している。また、鍛鋼スローに比べ生産性の高い鋳鋼スローを世界で唯一製造しているメーカーでもある。近年のディーゼル機関設計において高出力化およびコンパクト化の要求が高まり、クランク軸にはより高い疲労強度特性が求められるようになってきた。当社は材料の高疲労強度化に取組むとともに、応力条件のとくに厳しいピンフィレット部を強化するために当社独自の技術である冷間ロール加工法を実用化するなど、高疲労強度化のニーズに応じてきた。

一方、大型コンテナ船用の主機関においては船の高速化およびプロペラ径の制限などから、高出力化に加えより高い回転数も求められるようになってきた。シリンダ径が最大の機関の中でも、高出力と高回転数を両立させた K98MC-C (Compact) 機関は、同じシリンダ径の K98MC 機関よりもストロークが短く設計されている。組立型クランク軸はスローとジャーナルを焼ばめすることで製造されるが、焼ばめ工程は疲労強度評価において無視できないほどの応力をジャーナル孔周りに発生させる可能性がある。K98MC-C 機関は K98MC 機関よりもピンとジャーナル孔が隣接し、ピンフィレット部は焼ばめ応力の影響を受けやすい構造である。また、当社の鋳鋼スローの場合、ピンフィレット部は冷間ロール加工により圧縮残留応力が付与されており、ピンフィレット部の疲労強度評価には焼ばめ応力と冷間ロール加工の残留応力を考慮する必要がある。

本稿では、K98MC-C 機関の代表例として MITSUI-MAN B&W 8K98MC-C 機関¹⁾ を取上げ、焼ばめと冷間ロール加工の製造工程がクランク軸の疲労強度に与える影響に

ついて評価した結果を報告する。

1. 焼ばめ工程の影響評価

1.1 K98MC-C 機関の特徴

図1に K98MC-C クランクスロー形状を示す。K98MC-C クランクスローは、ジャーナル孔がピンフィレット部に干渉することを避けるため、内面側の孔径を外側側よりも小さくする 2 段ジャーナル孔をもつ形状で設計されている。2 段ジャーナル孔は K98MC-C クランクスローのみに採用されている。2 段ジャーナル孔の焼ばめを 2 段焼ばめと呼ぶが、鍛鋼品のみには適用された例がなく、当社は世界で初めて鋳鋼スローへの適用を実現させた。

疲労強度向上策として、当社の鋳鋼スローには冷間口

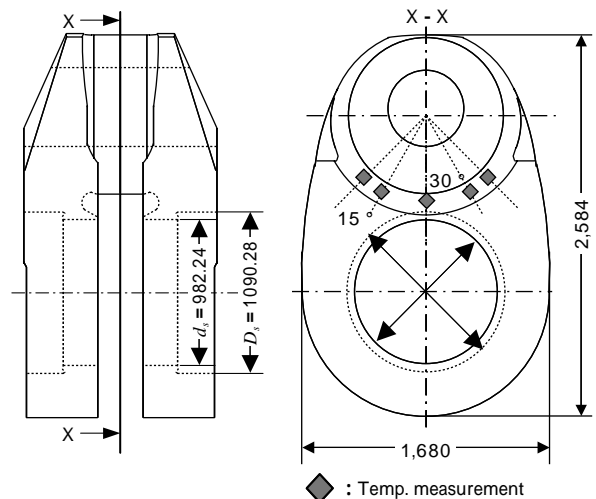


図1 K98MC-C クランクスローの形状と各計測位置
Fig. 1 Dimension of K98MC-C throw and measurement points of thermal expansion and temperature

* 鉄鋼部門 鋳鋼事業部 技術部 ** 鉄鋼部門 鋳鋼事業部 製造部 *** 三井造船(株) 機械・システム事業本部 機械工場 **** 技術開発本部 機械研究所

ール加工を施すが、焼ばめ工程ではジャーナル孔が焼ばめ代分膨張するまでスローを長時間加熱するため、加熱時にピンフィレット部が高温となり冷間ロール加工による圧縮残留応力が緩和される可能性がある。他機関用クランクスローでは問題がないことを確認済み²⁾であるが、K98MC-C クランクスローはピンフィレット部とジャーナル孔が隣接するため、焼ばめ加熱の影響が他機関用クランクスローよりも大きい可能性がある。また、鋳鋼スローに限らず2段焼ばめに共通する技術的課題として、大径・小径がそれぞれ不均一に膨張してはめ合いが不均一になること、焼ばめ後およびエンジン稼動時ににおいてジャーナルの2段部分に応力集中が生じることがあげられる。

1.2 実物大スローの焼ばめ試験

実物大の鋳鋼スローを用いた2段焼ばめ試験を実施し、焼ばめ加熱が冷間ロール加工の残留応力に与える影響と、大径・小径の膨張均一性を調べた。図1にジャーナル孔の膨張率およびピンフィレット温度の測定位置を示す。

図2に焼ばめ試験におけるジャーナル孔の膨張量とピンフィレット温度の変化を示す。ピンフィレット温度には、測定点の中で最も高い温度位置での履歴を使用した。 D_s は大径の膨張量を、 d_s は小径の膨張量を示す。焼ばめに必要な膨張量は図中の点線で示す。同図より、約200分でジャーナル孔は必要な膨張率に到達し、その時のピンフィレット温度は約250°Cであることがわかった。またジャーナル孔の大径・小径はそれぞれほぼ均一に膨張していることが確かめられた。

焼ばめ加熱が冷間ロール加工による圧縮残留応力の緩和に及ぼす影響を確認するために、冷間ロール加工を施した試験片に焼ばめ加熱を想定した温度履歴を熱処理で与え、加熱温度と疲労強度の関係を調査した。図3に試験概要を示す。R2mmのノッチ付き試験片のノッチ部に冷間ロール加工を施し、指定温度で5時間加熱保持した後室温まで空冷する熱処理を施し、回転曲げ疲労試験により疲労強度を求めた。図4に加熱温度と回転曲げ疲労強度の関係を示す。同図より、加熱温度400°Cまでは冷

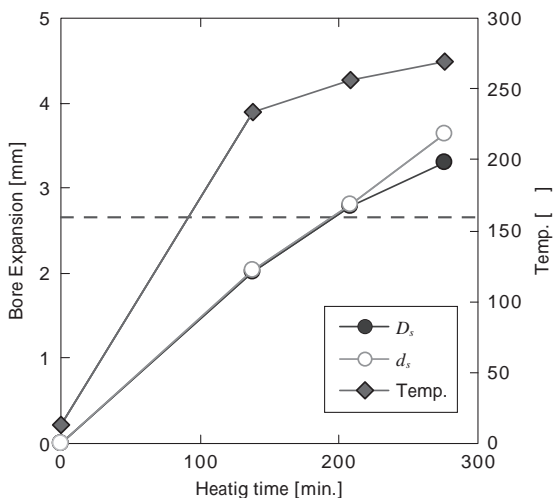


図2 焼ばめ加熱温度と膨張量の変化

Fig. 2 Change of heating temperature and bore expansion

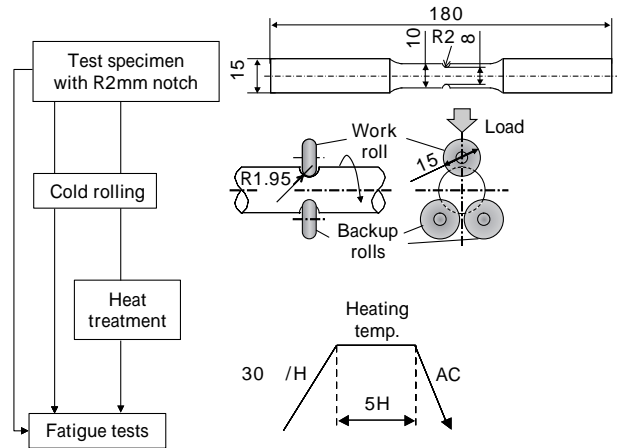


図3 疲労試験概要

Fig. 3 Fatigue test procedure using small specimen

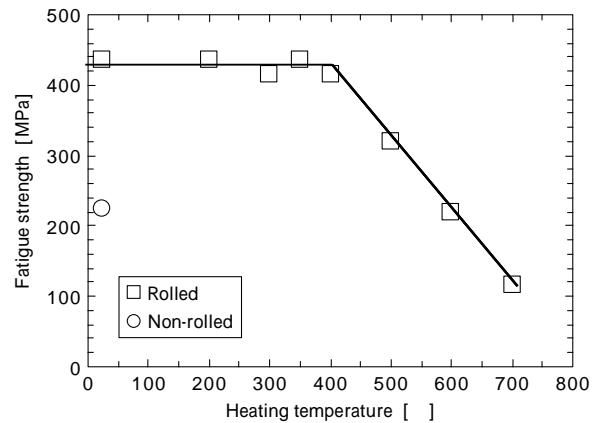


図4 加熱温度と疲労強度の関係

Fig. 4 Relationship between heating temperature and fatigue strength

間ロール加工による圧縮残留応力の緩和に影響がないことを確認した¹⁾。また、熱処理をしていない試験片の比較で、冷間ロール加工による圧縮残留応力の効果により疲労強度が約2倍向上していることもわかった。図2の2段焼ばめ試験結果によると、焼ばめ加熱時のピンフィレット温度は400°C以下であるため、冷間ロール加工の効果を低減させることなく2段焼ばめが実施可能であることが確かめられた。

1.3 焼ばめ・ねじり解析

焼ばめ後およびエンジン稼動時にジャーナルの2段部分に応力集中の生じる可能性を確認するために、焼ばめ解析および焼ばめ後のジャーナルにねじりトルクを作用させる応力解析を実施した。解析条件の諸元を表1に、有限要素モデルを図5に示す。焼ばめ解析は、ジャーナルを径方向に膨張させる簡易解析を行った。ねじりトルクを作用させる解析では、ジャーナル孔内面とジャーナル表面に摩擦係数を0.2とした接触条件を仮定した。

図6に2段焼ばめ後のジャーナルおよびスローの最大主応力コンタ図を示す。同図より、ピンフィレット部およびジャーナルフィレット部の一部に降伏応力付近の高い応力が発生するが、図中に赤丸で示したジャーナルおよびジャーナル孔の2段部分には降伏応力を超える応力は発生しないことがわかった。図7に、ジャーナルに許容トルクを作用させた際の2段焼ばめ部の最大主応力コ

表 1 焼ばめ・ねじり解析諸元
Table 1 Stress analysis conditions

Throw material (Cast steel)	Larger Diameter D_s	1,090 mm
	Smaller Diameter d_s	982 mm
	Yield point	409 MPa
Journal material (Forged steel)	Yield point	350 MPa

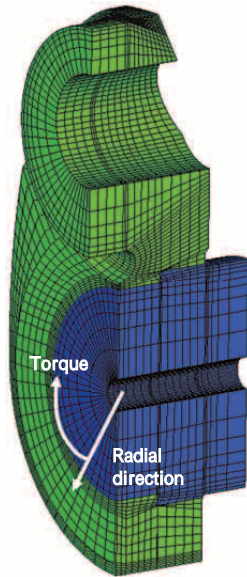


図 5 解析モデル (1/2)
Fig. 5 Analysis model

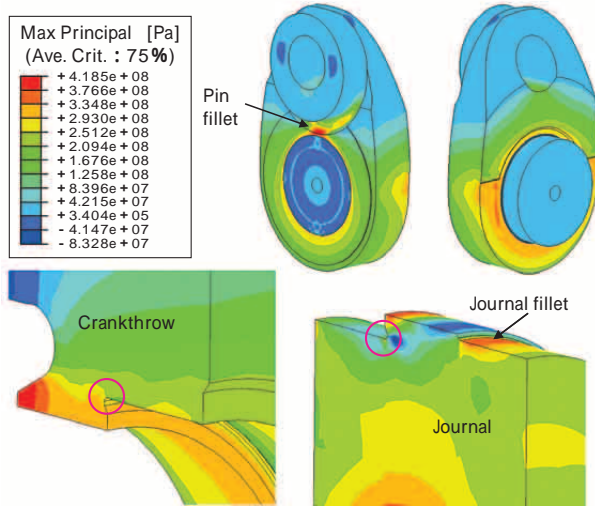


図 6 2 段焼ばめ解析結果 (最大主応力コンタウ)
Fig. 6 Results of shrink-fit analysis

ンタ図を示す。同図においても、ジャーナルおよびジャーナル孔の 2 段部分に降伏応力を超える応力は発生していなかった。

つぎに、ねじりトルクを作用させる解析において、トルクを許容トルク以上に増加させた解析を実施した。ねじり角とねじりトルクとの関係を図 8 に示す。ここで、ねじり角とはねじりトルクを作用させた際のジャーナルの回転角度のことである。同図から、ねじり角が 0.25 [deg.] まではジャーナルがすべることなく保持されており、最大ねじりトルクは許容トルクの約 2 倍であることがわかった。また、大径・小径のはめ合いが不均一であることを想定し、大径または小径のどちらかが基準の焼

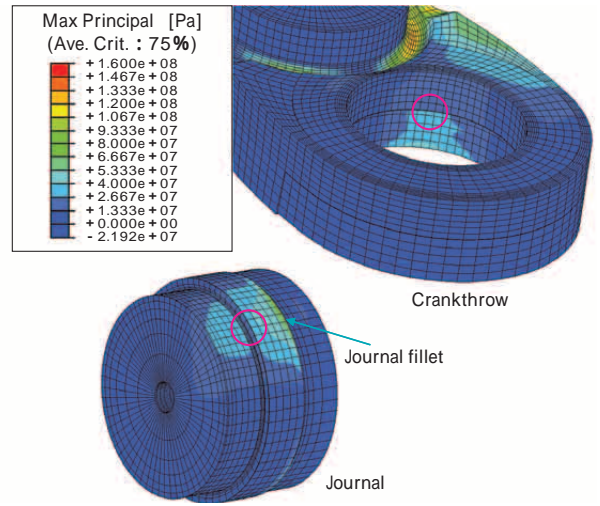


図 7 許容トルク負荷時の 2 段焼ばめ部に発生する応力
Fig. 7 Stress analysis under loading gripping torque

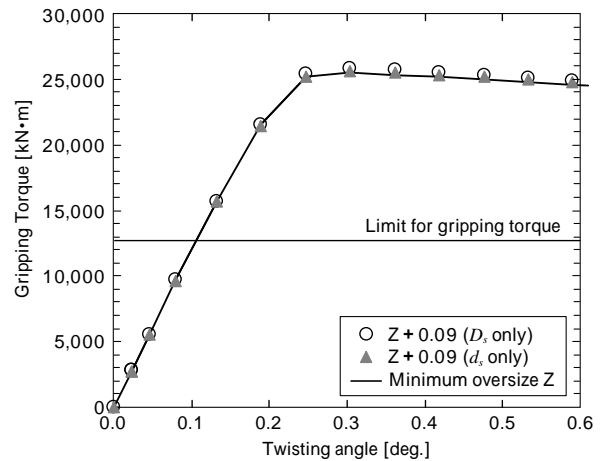


図 8 ねじり角とねじりトルクとの関係
Fig. 8 Relationship between twisting angle and gripping torque

ばめ代 Z よりも公差分 +0.09 大きい条件で同様の解析を実施した。図 8 の丸のプロットは大径側が基準焼ばめ代より +0.09 大きい場合の結果を、三角のプロットは小径側が基準焼ばめ代より +0.09 大きい場合の結果を示す。同図より、ねじり角とねじりトルクの関係に差異は見られなかったことから、公差分程度の焼ばめ代の変化は焼ばめのはめ合い性能に対して影響がないことがわかった。

2. 製造工程を考慮した疲労強度評価

2.1 冷間ロール加工の効果

冷間ロール加工によるピンフィレット部の疲労強度強化効果を評価するために、K98MC-C 機関とシリンダ径が同じである K98MC 機関の冷間ロール加工後の残留応力を計測した。K98MC クランクスローと K98MC-C クランクスローはピンフィレット径が同じであり、冷間ロール加工条件も等しいため、残留応力状態も同等であると考えられる。測定したクランクスローの材料はスロー 3 種材である。表 2 にスロー 3 種材の機械的性質を示す。

残留応力の計測位置を図 9 に、計測結果を図 10、図 11 に示す。同図より、半径方向および円周方向ともにロール接触表面には最大 400MPa 程度の圧縮残留応力が付与

表2 スロー 3 種材の機械的性質
Table 2 Mechanical properties of " Throw Grade3 "

Throw Grade3	σ_f [MPa]	σ_b [MPa]	EI [%]	R.A [%]
Spec.	530	310	20	45

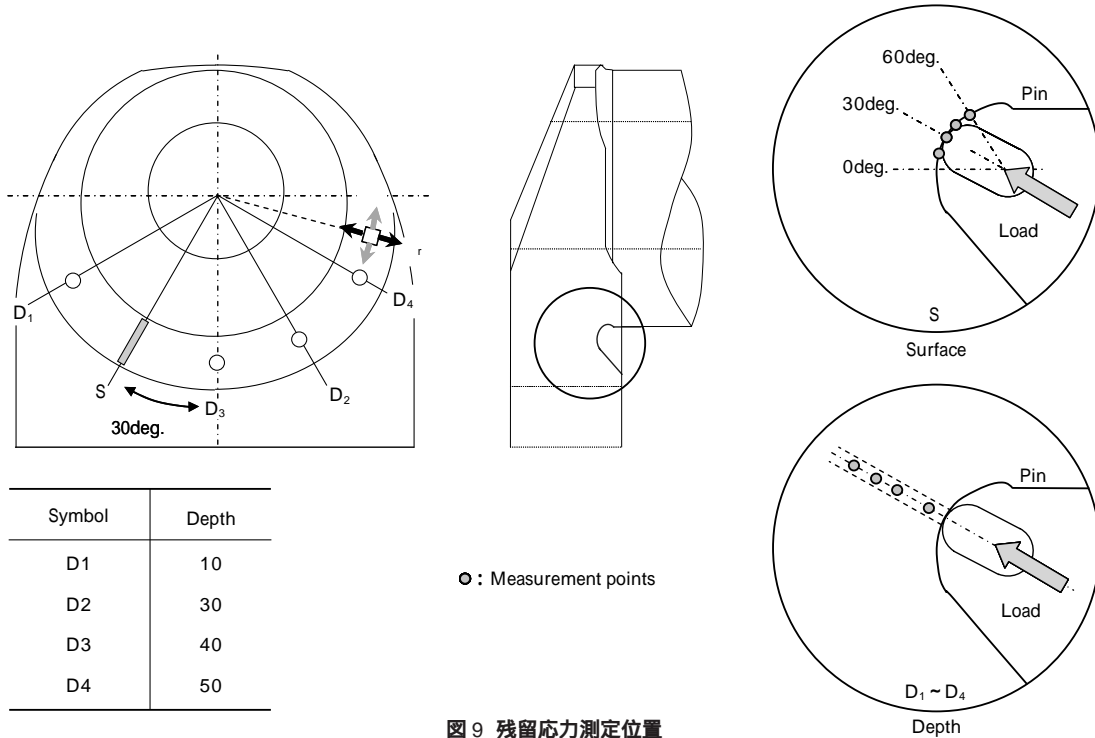


図9 残留応力測定位置
Fig. 9 Residual stress measurement points

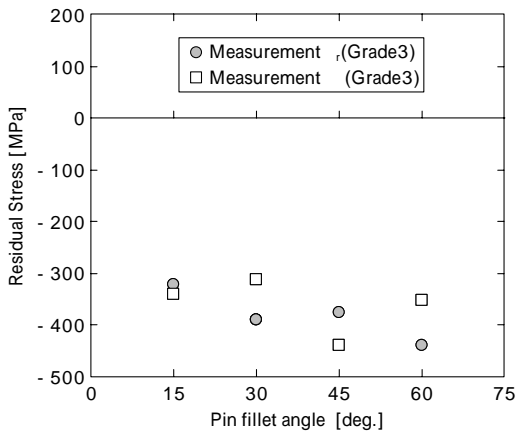


図10 ピンフィレット表面の残留応力測定結果
Fig.10 Residual stresses on pin fillet surface

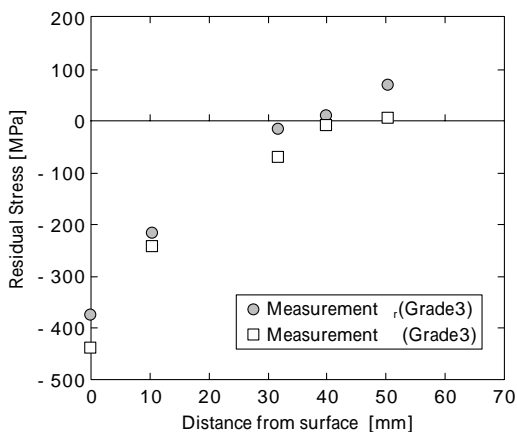


図11 ピンフィレット深さ方向の残留応力測定結果
Fig.11 Relationship between residual stress and distance from pin fillet surface

されており、深さ方向に関しても表面から深さ約 30mm の位置まで圧縮残留応力が付与されていることを確認した。よって、最も負荷応力が高いピンフィレット部表層に対し、冷間ロール加工により十分な疲労強度強化効果があることがわかった。

2.2 エンジン稼働時の応力照査

MITSUI-MAN B&W 8K98MC-C 機関を対象に、2 段焼ばめ応力と冷間ロール加工による残留応力を考慮した、実働下におけるピンフィレット部の疲労強度評価を実施した。表 3 に対象機関の諸元を示す。ここでは、ピンフィレット部の応力が最大となる No.8 シリンダのクランク軸について検討した。ピンフィレット部に発生する応力は実働応力解析³⁾にて求めた。焼ばめ応力は図 6 に示した 2 段焼ばめ解析の結果を使用した。冷間ロール加工による残留応力は、図 10、図 11 に示した K98MC 機関の結果を使用した。上記の通り、K98MC 機関は K98MC-C 機関とピンフィレット径が同じであり冷間ロール加工条件も等しいことから、冷間ロール加工による残留応力は同等であると考えた。

ディーゼル機関用クランク軸に関する国際船級協会連合の統一規則 (IACS UR M53, 以下 IACS ルールという⁴⁾) において、軸系としての振動計算を元にピンフィレット応力の評価を行うことが定められている。本稿での疲労強度評価には IACS ルールの評価式を適用した。ただし、IACS ルールでは、変動応力の応力振幅のみに着目し平均応力の効果を含めないため、ここでは修正 Goodman 線図式に基づき曲げ応力振幅を修正する手法を取入れた。ねじり応力振幅に関しては、一般に平均応力の影響

が小さいとされているため平均応力の影響は無視した。冷間ロール加工による残留応力と焼ばめ応力を考慮する際には、曲げ応力成分のみ平均応力の項に加えた。IACS ルールの評価式を式(1)に、修正 Goodman 線図式に基づく応力振幅修正式を式(2)に示す。

$$\frac{DW}{\sqrt{(BH' + add')^2 + 3H'^2}} \geq 1.15 \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 BH' ：変動曲げ応力振幅修正項
 H' ：変動ねじり応力
 add' ：IACS ルールに記載の付加曲げ応力修正項
 DW ：ピンフィレット部の疲労強度

$$BH' + add' = (BH + add) \frac{B}{B - m}, H' = H \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 BH ：変動曲げ応力振幅
 H ：変動ねじり応力
 add ：IACS ルールに記載の付加曲げ応力
 m ：平均曲げ応力
 B ：引張強さ

図12に疲労強度評価の対象範囲を、図13に平均応力を考慮した疲労強度評価結果の例を示す。本機関は2段焼ばめによる引張応力を考慮しても、冷間ロール加工による圧縮残留応力の効果でさらに安全側となることがわかった。

表3 対象機関諸元
 Table 3 Particulars of studied engine

Type		MITSUI-MAN B&W 8K98MC-C
Output	kW	45,680(62,080HP)
MCR	rpm	104.0
Cylinder number		8
Cylinder bore	mm	980
Stroke	mm	2,400
Firing order		1-8-3-4-7-2-5-6
Throw material		Grade3(Cast steel)

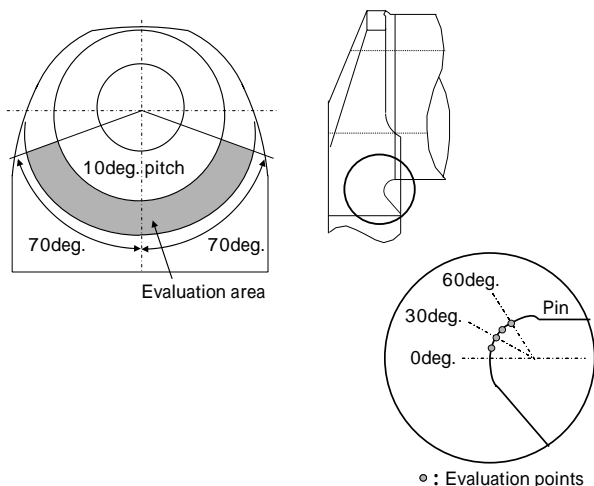


図12 信頼性評価の対象範囲
 Fig.12 Evaluation area of reliability assessment

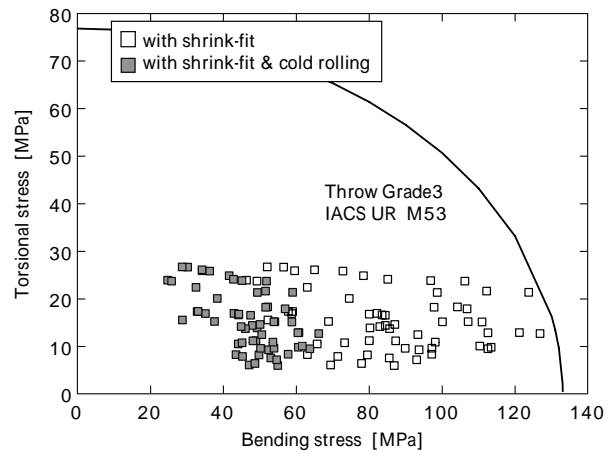


図13 ピンフィレット部における変動曲げ応力とねじり応力の相関 (No.8 シリンダ)
 Fig.13 Correlation between bending and torsional alternating stress at pin fillet (No.8 cylinder)

むすび = MITSUI-MAN B&W 8K98MC-C 機関を対象に、2段焼ばめおよび冷間ロール加工の残留応力を考慮したエンジン稼動時のピンフィレット部の疲労強度評価を実施し、製品の安全性を確認した。同時に、実物大スローの2段焼ばめ試験を実施し、焼ばめ加熱が冷間ロール加工の残留応力に影響がないこと、ジャーナルの大径・小径はほぼ均一に膨張することを確認した。また、2段焼ばめ解析およびねじりトルクを作用させる応力解析を実施し、ジャーナルの2段部分には降伏応力を超える応力は発生せず、仮にジャーナルのはめ合いが不均一になった場合もジャーナルの締付力に問題がないことを確認した。

ディーゼル機関業界では、クランク軸の疲労強度評価に応力解析を取入れるなど、安全性の評価基準をより高精度化していく流れである。当社もクランク軸メーカーとして製品の信頼性を高めるために、製品品質の向上に力を入れると同時に、可能な限り製品の使用状況を想定した安全性評価も実施していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 大月英士ほか：マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集，Vol.75 (2006) pp.61-62.
- 2) 大月英士ほか：マリンエンジニアリング，Vol.42, No.2(2007) pp.295-300.
- 3) 塙洋二ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.55, No.3 (2005) pp.10-12.
- 4) IACS UR M53 : Calculation of Crankshafts for I. C. Engines.