

(解説)

舶用鑄鍛鋼品の技術開発

Development of Steel Castings and Forgings for Vessels



藤網宣之*

Nobuyuki FUJITSUNA

KOBE STEEL has been developing crankshafts, as well as other steel castings and forgings for ships, to make ships more energy efficient and reliable. This paper introduces technologies relevant to crankshafts, namely, super clean steel, technology for improving the fatigue strength of forged steel crank-throws and improved techniques of non-destructive inspection. Also introduced is the development status of highly strengthened intermediate shafts and high-strength steel for rudders.

まえがき = 当社は、クランク軸を中心として、中間軸やプロペラ軸、舵（かじ）部材用鑄鋼品やラダーストックなどの鑄鍛鋼品（図1）を製造している。

昨今、NO_x規制やSO_x規制、エネルギー効率設計指標（EEDI）の導入など、船舶に関する環境規制が段階的に強化され¹⁾、エコシップに代表される船型開発、新型省エネ機関に代表されるハード面の開発や、低速運行の導入が進められている²⁾。

このような舶用業界の動向に対し、船舶の省エネ化や信頼性向上に寄与することを目的として、舶用部材の品質向上に取り組んでいる。本稿では、当社で製造している舶用部材に関する最近の技術開発の取り組みを紹介する。



図2 組立型クランク軸
Fig. 2 Built-up type crankshaft

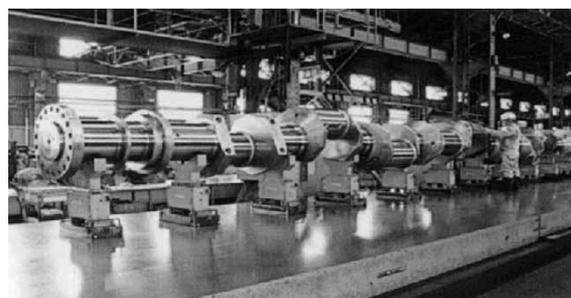


図3 一体型クランク軸
Fig. 3 Solid type crankshaft

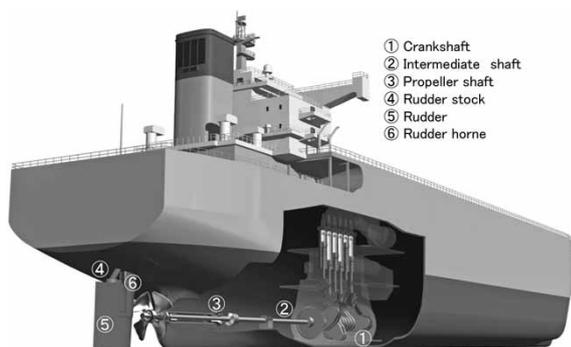


図1 鑄鍛鋼品が使用される船舶部材
Fig. 1 Marine parts using casting and forging

1. クランク軸における取り組み

ディーゼル機関用クランク軸は、舶用部品の中でも主要部品と位置づけられ、2ストローク機関用の組立型クランク軸（図2）と4ストローク機関用の一体型クランク軸（図3）がある。

1.1 一体型クランク軸

一体型クランク軸が使用される4ストローク機関は船内発電用補機や陸上発電用として使用され、クランク軸には高い疲労強度が要求される。舶用ディーゼル機関で使用されるクランク軸の設計疲労強度は、国際船級連合（IACS）の統一規則（UR）で式（1）のように規定されている³⁾。ここで、 k は製造法により決定される係数で、鍛流線が連続したCGF（Continuous Grain Flow）鍛造法に対し、1.05が与えられている。CGF鍛造法には

* 鉄鋼事業部門 鑄鍛鋼事業部 技術開発部

RR鍛造法やTR鍛造法などあり、当社で採用しているRR鍛造法を図4に示す。

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

k : 製造法による係数, σ_B : 引張強さ

D : 軸直径, R : フィレット半径

一方、材料の疲労強度は非金属介在物をはじめとする内在欠陥の大きさに影響され、欠陥サイズが大きくなるとともに低下することが知られている⁴⁾。そこで、疲労破壊の起点となる非金属介在物の低減を目的とし、不純物(S, O)の低減や精錬条件の最適化、造塊条件の改良を進め、高纯净度化技術を開発した^{5), 6)}。高纯净度鋼の疲労強度を、従来鋼(Tap Degassing(TD)法)および現用鋼(高纯净度鋼)と比較した結果を図5に示す。高纯净度鋼では、現用高纯净度鋼に対して20%以上、従来TD法に対して40%近く疲労強度が向上している。この結果を基に、式(1)におけるk-factorについて $k=1.15$ を船級協会に申請し、全船級協会から $k=1.15$ の承認取得を完了している。これにより、高纯净度鋼プロセスで製造したクランク軸を使用することにより、設計疲労強度を高くすることができ、エンジンの高出力化、コンパクト化が図られることが期待される。また、クランク軸の長時間信頼性の観点から、超高サイクル疲労特性の評価も進めており、当社開発鋼の40CrMo8(引張強さ: 1,000 MPa級)では超高サイクル疲労破壊が起こらないという結果が得られつつある⁷⁾。

さらなる高疲労強度化を目指し、引張強さ1,050 MPa超級高強度鋼や冷間ロール加工による圧縮残留応力付与技術の開発も進めている。

1.2 組立型クランク軸

組立型クランク軸はプロペラを回転させる主機となる2ストロークディーゼル機関で使用され、図6に示すように、ジャーナルと呼ばれる軸部と、スローと呼ばれる偏芯部を焼ばめにより組み立てて製造する。スローについては当社では、生産性の観点から鋳鋼製を主に採用し、材質、品質の改善を進めてきた^{8), 9)}。しかしながら、将来的な品質厳格化や高強度化への対応のため、2009年に鍛鋼製スローを全面採用することとした。以来、鍛鋼スローの生産性向上、品質改善に向けた技術開発を進めている。

鍛鋼スロー成形方法を図7に示す。一般には板状素材をプレスで折りたたむ折り曲げ法で製造されるが、対称性の確保など高い技能が要求される鍛造法である。これに対して当社は型入れ法を開発した。型入れ法は、棒状素材を輪切りにした一片を金型に挿入する。このため、素材が金型に拘束され、後方押し出しの状態では羽部を成形することができる。この鍛造法は技能に依存せず、対象性が高いニアネット形状を安定して得られるとともに、生産性が格段に改善された。型入れ法で製造したスロー(以下、型入れスローという)の断面マクロ組織を図8に示す。対象性が非常に高く、フィレット部では鍛流線が認められない。鍛流線の黒い部分は合金成分が濃化したマイクロ偏析部に相当し、介在物が形成されやす

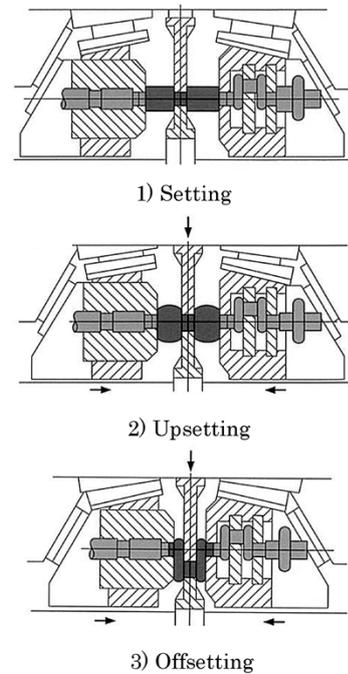


図4 RR鍛造法
Fig. 4 RR Forging

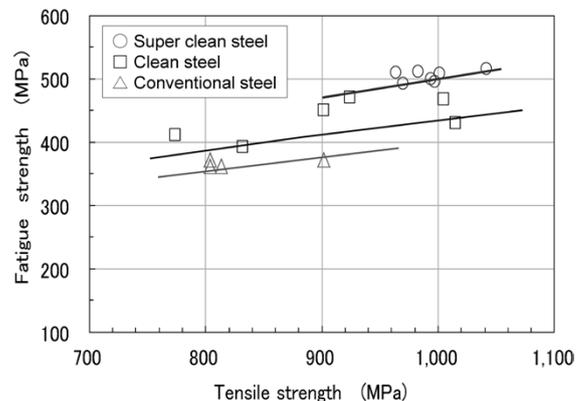


図5 一体型クランク軸用高纯净度鋼の疲労強度
Fig. 5 Fatigue strength of super clean steel for solid type crankshaft

い。型入れスローのフィレット部は、鍛造方法により鍛流線が横切らないため、マイクロ偏析に起因する介在物のない高纯净な領域で形成されている。これは、一体型クランク軸におけるCGF鍛造と同様の効果を有しているといえる。高纯净度改善を目的とした低S化を採用した型入れスローの疲労試験結果を図9に示す。低S化の効果も含まれるが、型入れスローでは折り曲げスローと比較し、約20%向上している。本結果を基に、日本海事協会より設計疲労強度計算式(式(1))におけるk-factorについて $k=1.05$ の特別承認を得た。

組立型クランク軸で使用される鋼種は、シリンダ径約400 mm以下の小型クラスでは引張強さ800 MPaの低合金鋼が使用されており、シリンダ径500 mm以上の中型クランク以上では主に炭素鋼が使用されている。これは、焼ばめによって製造される組立型クランク軸においては、スローの大型化に伴って低合金鋼では焼き割れの危険性が大きいことによる。そのため、製造性の容易な低合金鋼の開発を進めている。

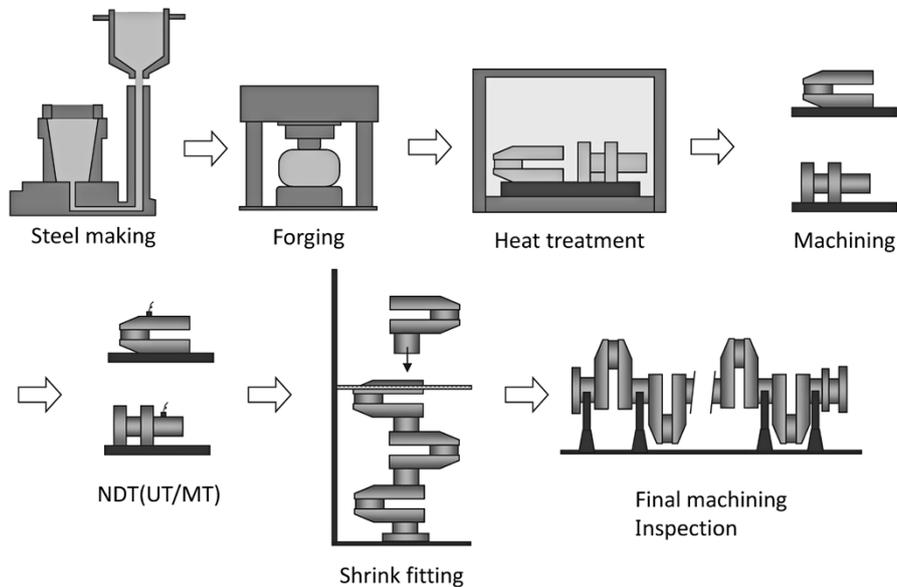


図 6 組立型クランク軸の製造工程

Fig. 6 Manufacturing sequence of built-up type crankshaft

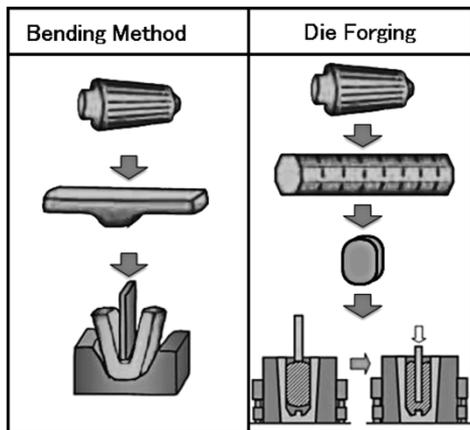


図 7 鍛鋼スロー成形方法

Fig. 7 Forging method of crank-throw

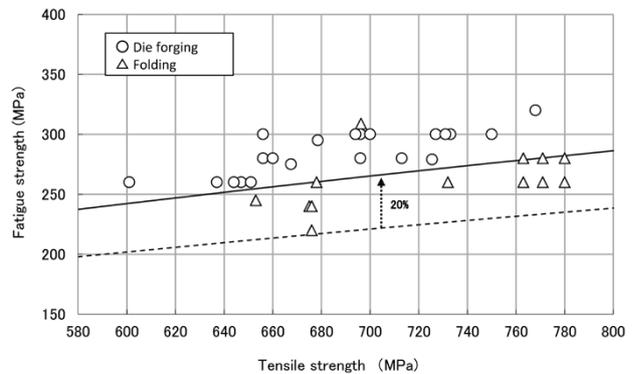


図 9 鍛鋼スローの疲労強度

Fig. 9 Fatigue strength of forged throw

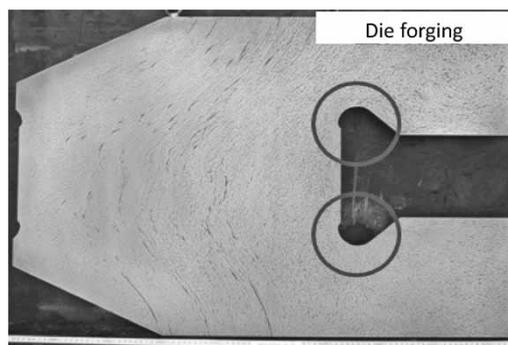


図 8 型入れスローの断面

Fig. 8 Cross section of throw by die forging

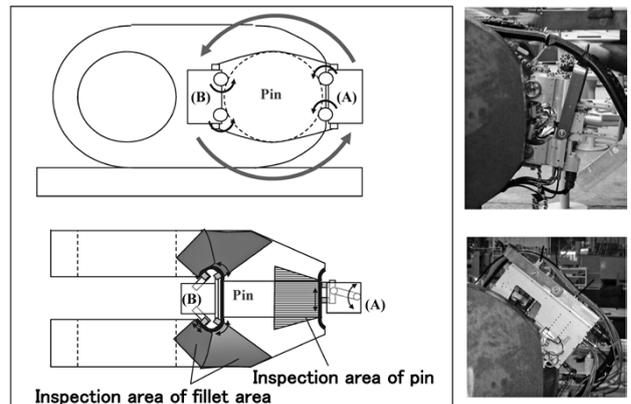


図 10 スロー自動超音波探傷の走査装置

Fig. 10 Scanning system of throw automatic ultrasonic inspection

1.3 クランク軸の非破壊検査技術

クランク軸の信頼性を確保する上では、特に高い応力が負荷されるフィレット部の内部品質を厳しく管理する必要があり、安定した検査技術が求められる。従来は探触子を手で走査する超音波探傷を行ってきたが、組立型クランク軸用、および一体型クランク軸用自動超音波探傷装置を開発し^{10), 11)}、適用している。

組立型クランク軸のスロー用自動超音波探傷装置の走査機構部を図10に示す。本装置では、ピン部探傷ユニ

ット(図10(A))とフィレット部探傷ユニット(図10の(B))の二台のユニットをローラチェーンで結合することにより、ピンをはさんで180°対向位置に固定できる。この状態でピン周りを自走(回転)しながら探傷することができる。ピン部探傷ユニットには、表層近傍を探傷する斜角探触子と深部を探傷する垂直探触子が組み込まれており、ピン軸方向を往復走査する。フィレット探傷ユニットには、フィレットR部の曲面に沿う凸R曲面を有する斜角探触子、および直線形状の傾斜部を探傷

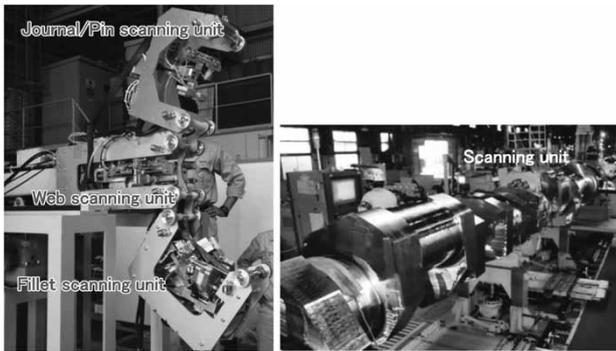


図11 一体型クランク軸用自動超音波装置走査ユニットおよび検査状況

Fig.11 Scanning system of automatic ultrasonic inspection for solid-type crankshaft

する斜角探触子が組み込まれ、型式ごとにあらかじめ教示された範囲をプレイバック方式で走査する。ピン部探傷およびフィレット部探傷の両ユニットで1走査終了ごとに周方向に一定ピッチで移動し、1周することによりピン部およびフィレット部の全領域を探傷する。欠陥検出能として平底穴 (FBH) $\phi 1.0\text{mm}$ を検出できる。

一体型クランク軸に対しては、分解能として平底穴 $\phi 0.5\text{mm}$ を検出できる自動超音波探傷装置を開発した¹¹⁾。開発した装置の走査機構部と検査状況を図11に示す。ピン/ジャーナル平行部、フィレット部およびスローアーム部を探傷する走査ユニットを組み込んだ走査ヘッドがクランク軸に追従して回転しながら検査する。また、本装置のフィレット走査ユニットでは、複数の超音波振動子をアレイ状に配置し、様々なUTパルスを発生させることができるフェイズドアレイ法を適用している。

これら自動超音波探傷装置はコンピュータシステムに接続されており、データはデジタルデータとして保管され、当該クランク軸の内部欠陥の確認等のトレーサビリティが確保されている。

2. 中間軸における取り組み

中間軸はエンジンの出力をプロペラに伝達する軸である。エンジンからの振動やプロペラの動きに伴う振動を受けるため、優れたねじり疲労強度が要求される。中間軸の直径は、船級規則で規定される式(2)で計算され、使用できる最高引張強さは800MPaを超えてはいけないとされている¹²⁾。

$$d = F \cdot k \cdot \sqrt[3]{\frac{P}{n_0} \cdot \frac{1}{1 - \frac{d_i^4}{d_o^4}} \cdot \frac{560}{\sigma_B + 160}} \dots\dots\dots (2)$$

F: 軸系部材の種類による定数, k: 形状因子
 n_0 : 1分間の回転数, p: 伝達力
 d_i : 軸中心孔の直径, d_o : 軸部材の直径

引張強さの上限が800MPaに規定されている理由は明確ではないが、800MPaを超える領域でのねじり疲労強度が不明確であることが要因と想定された。そこで、一体型クランク軸で実績のある当社開発鋼40CrMo8のねじり疲労特性を評価した結果、図12に示すように、ねじり疲労強度の低下はなく、引張り強さの増加に従って

ねじり疲労強度が比例的に向上することが確認された。切欠感受性や船級規則で規定される振動応力に対する安全率についても従来鋼と同等であることを同時に確認している¹³⁾。

これらの結果から、日本海事協会から40CrMo8について950MPa級まで強度計算に使用可の承認を取得した。また、日本海事協会を通して、中間軸の材料に800MPaを超え950MPa未満の強度の合金鋼を用いる特別承認を得るためのIACS UR M68のAPPENDIX Iが2015年4月に追加された。

中間軸高強度化の効果としては、図13 (A) に示すように、軸径を変えずに材料強度が上がることから、許容振動応力 (τ_1 , τ_2) が向上し、エンジン出力の増大や振動抑制機器の低減・省略が期待される。また、エンジンの出力が同一で、高強度化により軸径を細くすると固有振動数が小さくなることから、バードレンジが低回転数側にシフトする (図13 (B)) と考えられる。ここで、

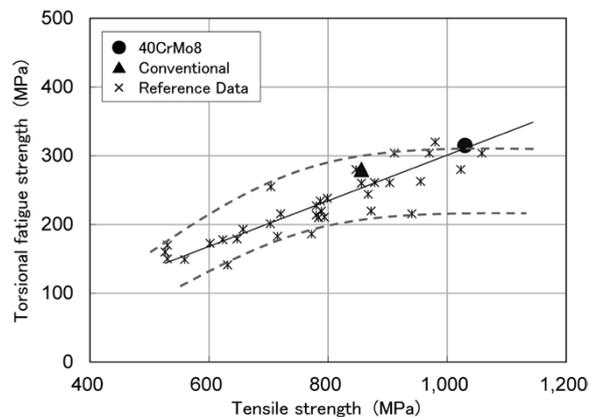
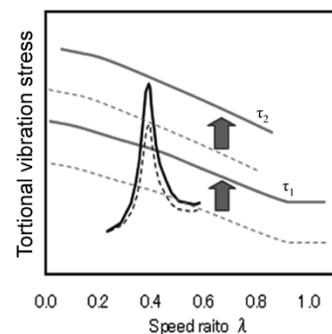
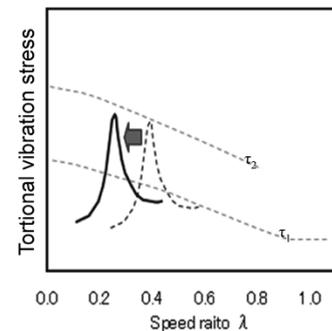


図12 引張強さとねじり疲労強度の関係
 Fig.12 Relationship between tensile strength and torsional fatigue strength



(A) In the case of diameter immutability



(B) In the case of decreased diameter

図13 高強度中間軸の適用効果
 Fig.13 Effect of applying high-strength intermediate shaft

横軸のSpeed ratio λ は定格最大回転数に対する比率(回転数/定格回転数)である。これにより常用回転数を下げることができ、低速運航の余裕度が向上できると考えられる。

3. 舵部材における取り組み

舵は船舶の針路を制御する装置であり、旋回性や推進性の観点から工夫された種々の型式や構造のものがある。代表例としてマリナ型舵を図14に示す。ここで、旋回軸(舵軸)となるラダースtockとピントルは鍛鋼品が使用される。また、舵およびラダーホンのベアリング部は鋳鋼品が使用され、ラダーホンについては一体型鋳鋼品の場合もある。

舵厚さ(t)を薄くすれば船速抵抗が低減することから、燃費の向上を図ることができると考えられる。舵厚さ(t)を薄くするためには、図14下図(横断面図)から、ピントルやラダーホンの直径を小さくすること、ベアリング(鋳鋼品)の肉厚を薄くすること、すなわち舵用鋳鍛鋼品の高強度化が有効と考えられた。ここで、ラダースtockおよびピントルについては船級規則より溶接性が要求され、C量は0.23%以下と規定されている¹⁴⁾。本規則要件を満足し、設計に必要となる降伏点が高い高強度材として、表1に示す低合金鋼(鋼種名KSFA65W-S)を開発し、主要船級協会から特別承認を取得した。本鋼種はラダースtockおよびピントルとして既に多数採用され、実船に搭載されている。

一方、鋳鋼品については船級規則の成分範囲¹⁴⁾が限定されているが、JIS溶接構造用鋳鋼品のSCW620をベースとして表2に示す4グレードの材料承認を取得し

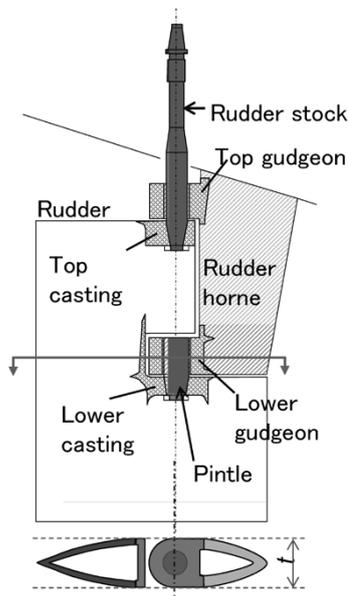


図14 マリナ型舵の断面模式図
Fig.14 Schematics of cross section of mariner rudder

表1 ラダースtock, ピントル用低合金鋼KSFA65W-Sの材料特性
Table 1 Mechanical properties of low alloy steel KSFA65W-S for rudder-stock and pintle

Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)		Reduction of area (%)	
		Longitudinal	Tangential	Longitudinal	Tangential
640-790	445 min.	17 min.	12 min.	50 min.	35 min.

表2 舵用高強度鋳鋼の材料特性
Table 2 Mechanical properties of low alloy cast steel for rudder parts

Grade	Tensile strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)	Absorption energy at 0°C (J)
SCAI450W	450 min.	255 min.	20 min.	27
SCAI480W	480 min.	275 min.	20 min.	27
SCAI550W	550 min.	355 min.	18 min.	27
SCAI620W	620 min.	430 min.	17 min.	27

た。鋳鋼品は厚鋼板との溶接構造となるため、製作作業および一体型ラダーホンの船尾への取り付け作業性の観点から、溶接予熱フリー化のための最適化を進めており、ほぼ目途が付きつつある。

むすび=当社における船用鋳鍛鋼品の技術開発状況を紹介した。

本稿で紹介した材料技術や部材成形技術、検査技術を主体とした船の価値向上(燃費改善、品質・信頼性向上)に資する技術シーズを展開し、顧客ニーズに対応していくことによって海運・造船業界の発展に貢献していくべく、今後も技術開発を継続していく所存である。

参考文献

- 1) 石田悟史. 日本マリンエンジニアリング学会誌. 2011, Vol.46, No.6, p.46-48.
- 2) 近藤守男ほか. 日本マリンエンジニアリング学会誌. 2011, Vol.46, No.2, p.5-9.
- 3) Calculation of Crankshaft for I.C. Engines. Unified Requirement M53s of International Associations of Classification Societies Ltd.
- 4) 村上敬宜. 金属疲労 微小欠陥と介在物の影響. 養賢堂, 1993, 265p.
- 5) Fujitsuna et al. 17th International Forgemasters Meeting. 2008, p.390.
- 6) 篠崎智也ほか. R&D神戸製鋼技報. 2009, Vol.59, No.1, p.94-97.
- 7) R. Yakura et al. 27th CIMAC Congress. 2013, Paper No.442.
- 8) 吉田泰正ほか. R&D神戸製鋼技報. 2005, Vol.55, No.3, p.7.
- 9) 吉田泰正ほか. R&D神戸製鋼技報. 2005, Vol.55, No.3, p.13.
- 10) 岡本 陽ほか. R&D神戸製鋼技報. 2005, Vol.55, No.3, p.16.
- 11) Hamano et al. 19th International Forgemasters Meeting. 2014, p.520.
- 12) Dimensions of propulsion shafts and their permissible torsional vibration stresses. Unified Requirements M68 of International Associations of Classification Societies Ltd.
- 13) T. Ikegami et al. 1th International Symposium on Marine Engineering (ISME2014).
- 14) 日本海事協会. 鋼船規則. K編 材料.