

お詫びと訂正

2020年12月21日に発行いたしました本誌「Vol.70, No.2 特集：素形材」におきまして、記載に誤りがございましたので以下のように訂正いたします。

ご愛読いただいている皆さま、ならびに関係各位にご迷惑をお掛けしましたことをお詫び申し上げます。

49ページ 右段3行目：

$$\text{誤： } S_N = S_{\sigma 0} \pm d \left(\frac{A}{F} \pm \frac{1}{2} \right) \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{正： } S_N = S_{\sigma 0} + d \left(\frac{A}{F} \pm \frac{1}{2} \right) \dots\dots\dots (2)$$

50ページ 左段18行目：

$$\text{誤： } S_N = S_{\sigma 0} \pm d \left(\frac{A}{F} \pm \frac{1}{2} \right) = 460 + 25 \times \left(\frac{5}{4} - \frac{1}{2} \right) \\ = 478.8 (\text{MPa})$$

$$\text{正： } S_N = S_{\sigma 0} + d \left(\frac{A}{F} \pm \frac{1}{2} \right) = 460 + 25 \times \left(\frac{5}{4} - \frac{1}{2} \right) \\ = 478.8 (\text{MPa})$$

(技術資料)

組立型クランク軸用材料の高強度化の取り組み

白藤 司*・高岡宏行・矢倉亮太

An Approach to Increase Strength of Materials for Built-up Type Crankshafts

Tsukasa SHIRAFUJI・Hiroyuki TAKAOKA・Ryota YAKURA

要旨

近年、船舶用低速ディーゼルエンジンの高効率化に関する要求が高まっている。これに対応するため、高い降伏点および高い疲労強度を有するうえに、大型鍛鋼品に生じることが多い焼割れリスクを回避した安価な組立型クランク軸用低合金鋼を開発した。開発鋼を含む複数の鋼種でクランクスローを製造し、主要部位から採取した鋼片の材料特性を確認した。その結果、開発鋼は従来鋼と比較して優れた機械的特性と疲労強度を有していることが確認された。本開発鋼が次世代エンジンに適用され、今後ますます厳しくなると予想されている環境規制への対応に貢献することが期待される。

Abstract

Recently, there is an increasing need for improving the efficiency of low-speed diesel engines for ships. In response, Kobe Steel has newly developed an inexpensive low-alloyed steel for built-up type crankshafts. This steel has a high yield point and high fatigue strength while avoiding the risk of quench cracking, which often occurs in large forged steel products. Crank throws were manufactured from multiple steel types, including the newly developed steel, and the material properties of samples of steel pieces taken from their major parts were evaluated. The results confirmed that the newly developed steel has mechanical properties and a fatigue strength superior to those of conventional steel. It is expected that this newly developed steel will be applied to next-generation engines and contribute to compliance with environmental regulations, which are expected to become increasingly stringent.

キーワード

組立型クランク軸, 疲労強度, 降伏点, 低合金鋼, 型入鍛造, 高纯净度化技術

まえがき = 大型船舶の主機エンジンは、近年の排出ガス規制の強化に基づく省燃費の観点から、高筒内圧およびロングストロークを有する設計が主流となっている。そのため、エンジンの爆発力から生じる往復運動を回転運動へ変換する組立型クランク軸において、クランクスローのピンフィレット部には大きな曲げ応力が生じる。また、焼きばめを施しているスローとジャーナルの間には大きな回転トルクが生じる。環境規制は今後段階的に強化されることが計画されており¹⁾、ピンフィレット部および焼きばめ部はますます大きな負荷を受けることが予測される。そのため、ピンフィレット部における疲労破壊を防止する観点からクランクスローの材料には高い疲労強度が求められる。さらに、焼きばめによるジャーナルのグリッピングトルクを高め、微小すべりを抑制する必要がある。このため、焼きばめ時にジャーナルを挿入するアーム部の軸穴近傍において降伏点の高い材料特性が要求される。

組立型クランク軸用鋼種としては主に、焼ならし処理後の空冷によって熱処理された炭素鋼が使用されている。本鋼材は600MPa級の引張強さを有する。降伏点および疲労強度を向上させる方法としては、熱処理時に急冷を施す焼入れによって引張強さの高いマルテンサイトやベイナイト組織を得る方法が一般的である。しかし大

型鍛鋼品の場合、質量効果が大きいため冷却速度が不足し、炭素鋼ではこれらの金属組織を得ることができない。そのため、Ni, Cr, Moなどの元素を添加することによって焼入れ性を高めた低合金鋼が高強度材として選択されている。組立型クランク軸用材料には引張強さ800MPa級まで高強度化された低合金鋼が使用されている。

しかし、焼入れを施した高強度を有する低合金鋼はシリンダ径500 mm以上の中型以上のエンジンで採用が広がっていない²⁾。その理由として、熱処理時の急冷に際して、複雑形状を有するクランクスローに焼割れが生じる危険性が大型化に伴って高まることが挙げられる²⁾。そこで、組立型クランク軸のスローに要求される降伏点と疲労強度を向上させるため、800MPa級の高強度を有する低合金鋼を開発した。本開発鋼は焼入れが不要であり、大型クランクスロー特有の焼割れの危険性を回避することができる。

いっぽうで、材料の疲労強度は非金属介在物をはじめとする内部欠陥の大きさに影響され、その欠陥が大きくなるとともに低下することが知られている³⁾。そこで当社は、疲労き裂発生の起点となる非金属介在物を低減させる高纯净度化技術を開発した²⁾。この技術を大型鍛鋼品に適用することによって疲労強度は向上することが確認されているものの^{4), 5)}、組立型クランク軸に適用した

* 鉄鋼事業部門 鋳鍛鋼事業部 技術開発部 (新組織名 素形材事業部門 鋳鍛鋼ユニット 技術部)

際の疲労特性は確認されていない。

本稿では、開発鋼および高 cleanliness 技術を適用して製造したクランクロー（以下、ローという）の機械的特性および疲労強度を従来鋼と比較しながら概説する。

1. 組立型クランク軸の製造および材質

図1に組立型クランク軸の製造工程を示す。溶解、製錬を経て造塊された鋼塊を加熱し、鍛造およびガス切断によってロー形状に成形する。なお、ローの成形方法は4種類あり、それぞれの成形方法を図2に示す。成形後は必要とされる機械的特性を得るために熱処理を施した後、機械加工を施す。つづいて軸部のジャーナルと偏心部のローを焼きばめによって連結し、最終機械加工によって所定の寸法に仕上げる。

今回製造した鋼種の化学成分と熱処理方法を表1に示す。また、クランクローの鋼種、製法、降伏点（YP）および引張強さ（TS）の規格強度を表2に示す。表1

に示した32CrNiMo6-3が当社の開発鋼である。本鋼種は、熱処理する際に焼ならし後の空冷処理（Normalized & tempered）によって製造する。なお本鋼種は、焼入れ（Quenched & tempered）を施す従来の低合金鋼（34CrNiMo6）と同様の金属組織が得られるように成分設計されている。したがって本鋼種は、従来の低合金鋼と同等の強度を有しつつ、大型鍛鋼品特有の焼割れを回避することが可能である。なお、表2に示したNo.1ローの製錬時には、硫化物系および粒状酸化物系介在物の両者を低減すべく、溶鋼中のSおよびOを低減し、溶存酸素により生成した介在物の浮上分離を促す高 cleanliness 技術を適用した。これによって cleanliness の高い鋼塊を作製することが可能である。

本取り組みでは、表2に示した材料と、製造方法の異なるローのアーム部軸穴近傍およびピン部の降伏点と疲労強度を調べた。次章以降でその概要を紹介する。

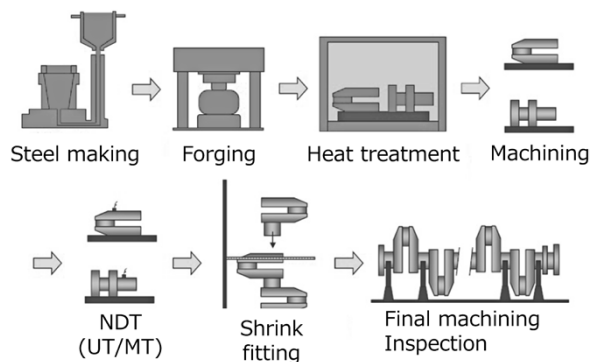


図1 組立型クランク軸の製造工程

Fig.1 Manufacturing process of semi-builtup type crankshaft

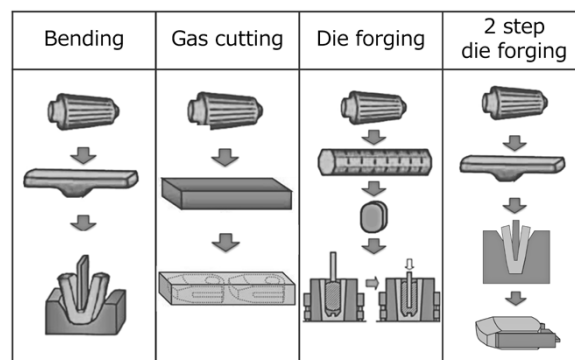


図2 鍛鋼ローの成形方法

Fig.2 Forging methods of crank throw

表1 各種試験鋼材の化学成分および熱処理方法

Table 1 Chemical composition and heat treatment methods of test steels

Steel type	Chemical composition (wt%)								Heat treatment
		C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	
32CrNiMo6-3 (developed alloy steel)	Max.	0.40	0.40	1.50	1.10	1.60	0.40	0.20	Normalized & tempered
	Min.	0.25	0.15	0.80	0.60	1.10	0.15	—	
34CrNiMo6 (conventional alloy steel)	Max.	0.38	0.40	0.70	1.70	1.70	0.30	—	Quenched & tempered
	Min.	0.30	—	0.40	1.40	1.40	0.15	—	
Carbon steel (conventional steel)	Max.	0.50	0.40	1.40	—	0.30	—	0.12	Normalized & tempered
	Min.	—	—	1.00	—	—	—	0.06	

表2 各種の試験鋼材で製造したクランクスロー
Table 2 Forged crank throws manufactured from test steels

Throw No.	Steel type	Steel making process	Cylinder size (mm)	Forging method	Specified strength	
					YP (MPa)	TS (MPa)
1	32CrNiMo6-3	Super clean (Developed)	950	2 step die forging	≧ 590	≧ 780
2	34CrNiMo6	Tap degassing (conventional)	500	Gas cutting	≧ 590	≧ 780
3	Carbon steel	Tap degassing (conventional)	600	Die forging	≧ 350~370	≧ 590~610
4	Carbon steel	Tap degassing (conventional)	600	Gas cutting	≧ 350~370	≧ 590~610
5	Carbon steel	Tap degassing (conventional)	960	2 step die forging	≧ 350~370	≧ 590~610

2. 組立型クランク軸の調査・試験方法

2.1 試験片の作製

実機の製造プロセスによって製造されたクランクスローのアーム部の軸穴近傍およびクランクピン部から引張試験片用および疲労試験片用鋼片を採取した。それぞれの試験片の採取位置を図3に示す。これらの鋼片から、引張試験片はJIS14A号(φ14×70mm)に準拠して作製し、疲労試験片は平行部φ10×30mmの平滑試験片を作製した。

2.2 疲労試験

作製した疲労試験片を使用して軸力(引張-圧縮)疲労試験を実施した。疲労特性の評価には国際船級協会IACS(International Association of Classification Society)が推奨するステアケース法⁶⁾を採用した。ステアケース法による疲労試験手順は以下のとおりである。

- ①最初の1本目の試験片を対象に、疲労強度の平均値 S_N に近いと想定される応力レベルで疲労試験を行う。
- ②2本目の試験片を対象に、
 - ②-(1) ①の試験において所定の繰り返し数 N_0 (= 2×10^6 回)で未破断の場合：作用させる応力レベルを階差応力 d だけ増加させて疲労試験を行う。
 - ②-(2) ①の試験において N_0 未満で破断した場合：応力レベルを d 減少させて疲労試験を行う。
- ③2本目の試験結果に基づき、3本目に作用させる応力レベルを d 変化させて疲労試験を行う。
- ④以下、同様の試験を繰り返す。

このような手順にて階差応力 d はできるだけ疲労強度の標準偏差に近い値になるように選定する。得られた結果の評価方法を以下の手順で評価する。

$$F = \sum f_i, A = \sum if_i, B = \sum i^2 f_i \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 i ：応力レベルのナンバリング

f_i ：応力レベル i における試験片の数

ただし、式(1)における i, f_i は、全試験片で生じる破断/未破断の内、発生数の少ない方の結果のみを取り扱う⁶⁾。

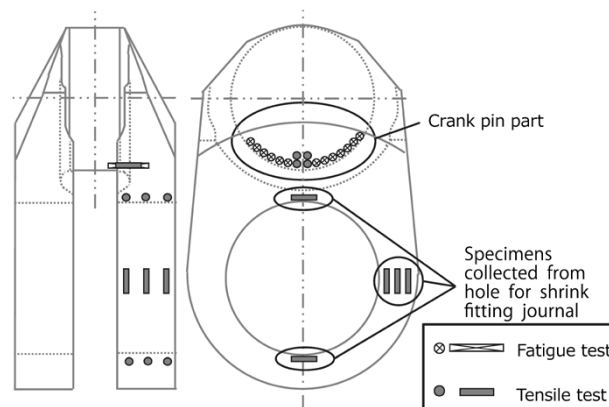


図3 引張試験片および疲労試験片の採取位置
Fig.3 Collection locations of tensile and fatigue test specimens

上記で得られた F, A, B を用いて以下の式から疲労強度の平均値 S_N および標準偏差 s を算出する。

$$S_N = S_{a0} \pm d \left(\frac{A}{F} \pm \frac{1}{2} \right) \dots\dots\dots (2)$$

$$s = 1.62d \left(\frac{BF - A^2}{F^2} + 0.029 \right) \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 S_{a0} は最小応力レベルである。ただし式(2)における S_{a0} は、式(1)と同様に全試験片で生じる破断/未破断の内、発生数の少ない方の結果のみを取り扱う⁶⁾。また、全試験片の内、破断した試験片数が少ない場合は負の符号を取り、未破断の試験片数が少ない場合は正の符号を取る⁶⁾。

本方法を採用することによって平均疲労強度と標準偏差が得られるため、疲労強度を統計的に評価することが可能である。なお本稿では、階差応力 d として25 MPaを選定した。

3. 試験結果および評価

3.1 焼きばめ部における引張試験結果

No.1~No.5スローのアーム部ジャーナル軸穴近傍から採取した試験片の降伏点と引張強さの関係を図4に示す。開発鋼の降伏点および引張強さは炭素鋼と比較して大きく向上していることが分かる。また、強度クラスのターゲットとしている34CrNiMo6と比較すると同等以上であり、表2に示した規格強度に対して上回っていることが分かる。

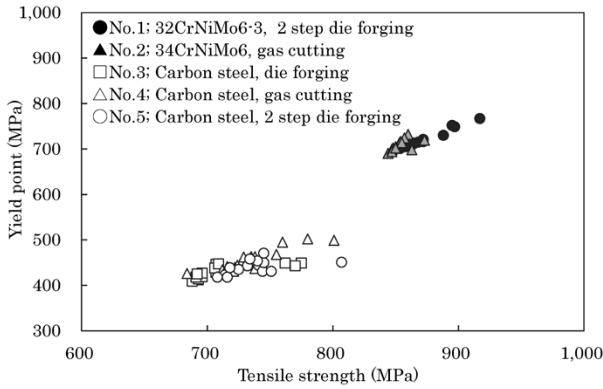


図4 クランクローアーム部ジャーナル軸穴近傍から採取した試験片の引張試験結果

Fig.4 Tensile test results of specimens collected from crank arm in the vicinity of hole for shrink fitting journal

3.2 クランクピン部における材料特性

3.2.1 引張試験結果

No.1～No.5 スローのクランクピン部から採取した試験片の降伏点と引張強さの関係を図5に示す。開発鋼の降伏点および引張強さは、炭素鋼はもとより、ベンチマークとした34CrNiMo6の強度と比較しても大きく上回っており、表2に示した規格強度に対しても大きなマージンを有していることが分かる。

3.2.2 疲労試験結果

開発鋼を用いて製造したクランクローのクランクピン部から採取した試験片の疲労試験結果を図6に示す。破断した試験片が4本であり、未破断の試験片が9本であるため、ナンバリングの対象は発生頻度の少ない破断した試験片とする。破断が生じたときの最小応力 S_{a0} は460 MPaであることから、式(1)～式(3)にそれぞれの値を代入して平均疲労強度と標準偏差を算出した。

$$\begin{aligned}
 F &= 4, A = 5, B = 9, \\
 S_N &= S_{a0} \pm d \left(\frac{A}{F} \pm \frac{1}{2} \right) = 460 + 25 \times \left(\frac{5}{4} - \frac{1}{2} \right) \\
 &= 478.8 \text{ (MPa)} \\
 s &= 1.62d \left(\frac{BF - A^2}{F^2} + 0.029 \right) \\
 &= 1.62 \times 25 \left(\frac{9 \times 4 - 5^2}{4^2} + 0.029 \right) \\
 &= 29.0 \text{ (MPa)}
 \end{aligned}$$

開発鋼と同様に従来鋼についてもステアケース法によって平均疲労強度および標準偏差を算出した。その結果を表3にまとめた。

3.3 疲労特性評価

ステアケース法を使用した統計的な疲労特性評価において、疲労強度が正規分布で分散していると仮定した場合、信頼区間の下限強度で評価することがIACSによって推奨されている⁶⁾。 $X = (1 - \alpha) \times 100\%$ としたとき、 $X\%$ 信頼区間における下限疲労強度 $S_{aX\%}$ は式(4)によって算出される⁶⁾。

$$S_{aX\%} = S_N - t_{\alpha, n-1} \frac{s}{\sqrt{n}} \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 $t_{\alpha, n-1}$ ：片側確率 α 、自由度 $n - 1$ におけるt分布の逆関数
 n ：試験片の本数

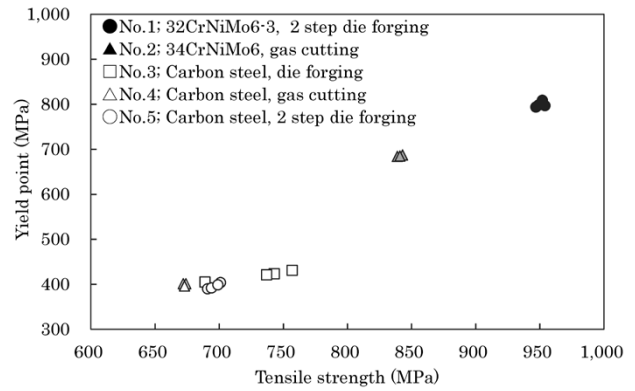


図5 クランクピン部から採取した試験片の引張試験結果
 Fig.5 Tensile test results of specimens collected from crank pin

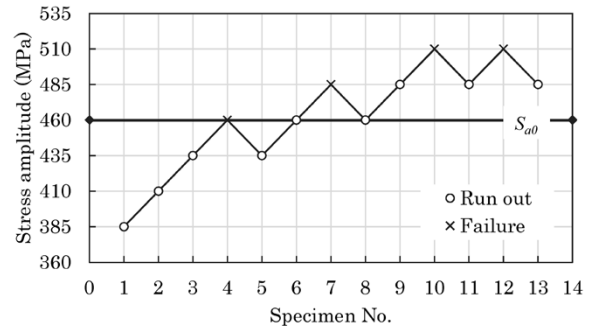


図6 ステアケース法による開発鋼の疲労試験結果
 Fig.6 Fatigue test result by stair case method for developed steel

表3 試験材の平均疲労強度および標準偏差
 Table 3 Mean fatigue strength and standard deviation of test steels for crank throws

No.	steel type	d (MPa)	n	S_N (MPa)	s (MPa)
1	32CrNiMo6-3	25	13	479	29.0
2	34CrNiMo6	25	13	438	17.4
3	Carbon steel	25	13	313	1.2
4	Carbon steel	25	13	263	1.2
5	Carbon steel	25	13	313	1.2

d : Stress increment or decrement
 n : Total number of the fatigue test specimens
 S_N : Mean fatigue strength
 s : Standard deviation

なおIACSは、信頼区間として通常90%を使用することを提唱している⁶⁾。ここでもそれに倣い、 $\alpha = 0.1$ としたときの90%信頼区間の下限疲労強度 $S_{a90\%}$ を式(4)に代入して算出した。

いっぽうで、船用エンジンに適用されるクランク軸は船級協会が規定する設計疲労強度を満足する必要がある。本稿ではIACSが規定する設計疲労強度 σ_{DW} ⁶⁾と比較することによって疲労特性の評価を行った。 σ_{DW} は式(5)によって算出される⁶⁾。

$$\begin{aligned}
 \sigma_{DW} &= \pm K (0.42\sigma_B + 39.3) \\
 &\times \left(0.264 + 1.073D^{-0.2} + \frac{785 - \sigma_B}{4900} + \frac{196}{\sigma_B} \sqrt{\frac{1}{R_H}} \right) \dots \dots (5)
 \end{aligned}$$

表4 90%信頼区間の下限疲労強度における疲労特性評価

Table 4 Evaluation of fatigue characteristics at lower limit of fatigue strength with 90% confidence interval

No.	steel type	① σ_B (MPa)	② D (mm)	③ R_H (mm)	④ $\sigma_{DW, K=1.0}$ (MPa)	⑤ $t_{0.1, n-1}$ (MPa)	⑥ $S_{a90\%}$ (MPa)	⑥ / ④
1	32CrNiMo6-3	951	1,220	90	224	1.4	468	2.09
2	34CrNiMo6	841	645	40	229	1.4	431	1.88
3	Carbon steel	732	720	45	209	1.4	312	1.49
4	Carbon steel	673	730	55	197	1.4	262	1.33
5	Carbon steel	696	990	70	194	1.4	312	1.61

σ_B : Average tensile strength result of crank pin part

D : Diameter of crank pin

R_H : Radius of crank pin fillet

$\sigma_{DW, K=1.0}$: Designed fatigue strength (K=1.0)

$t_{0.1, n-1}$: Inverse function of t-distribution with one-sided probability α of 0.1 and degrees of freedom $n-1$

$S_{a90\%}$: Fatigue limit resulted from 90% confidence interval

ここで、 D : クランクピン直径 (mm)

R_H : ピンフィレット半径 (mm)

σ_B : 引張強さ (MPa)

K: 製造プロセスに対する係数

なお、製造プロセスに対する係数Kに対して、自由鍛造により製造されたクランク軸には1.0が、CGF (Continuous Grain Flow) 鍛造により製造されたクランク軸には1.05が与えられる⁶⁾。当社は高纯净度化技術を適用した一体型クランク軸に対してK=1.15の特別承認を全船級協会より取得している²⁾。すなわち、この係数Kの値が高い製造プロセスを適用した一体型クランクを使用することにより、従来よりも高い疲労強度でクランク軸を設計することが可能である。

今回は自由鍛造により製造されたクランク軸が基準となる。このため、K=1.0を式(5)に代入した設計疲労強度 $\sigma_{DW, K=1.0}$ で下限疲労強度 $S_{a90\%}$ を規格化することにより、各スローの $S_{a90\%}$ を係数K相当に換算して評価した。その結果を表4に示す。なお引張強さ σ_B は、図5にプロットした各クランクスローのピン部における引張強さの平均値を使用した。各スローの $S_{a90\%}/\sigma_{DW, K=1.0}$ の値は1以上であり、設計疲労強度を上回っていることが分かる。とくに、高纯净度化技術と二段型入法を適用して製造したクランクスローはK=2.09に相当する優れた疲労特性であり、設計疲労強度に対して大きなマージンを有している。

むすび= 開発鋼および従来鋼で製造したクランクスローから試験片を採取し、機械的特性と疲労特性を評価した。以下に結果の概要を示す。

- ・ 開発鋼で製造したクランクスローのアーム部ジャーナル軸穴近傍は従来鋼よりも高い降伏点を有している。また、従来の低合金鋼の強度規格と比較して高い降伏点を有する。
- ・ 高纯净度化技術および型入法を経て製造した開発鋼のクランクスローは高い疲労強度を有しており、その90%信頼区間における下限疲労強度はIACS UR M53で規定される設計疲労強度の係数に換算して2.09の優れた疲労特性を有している。

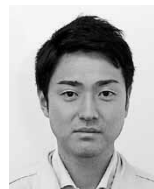
なお、これらの結果を基に、開発鋼の32CrNiMo6-3

は従来の規格よりも高強度である降伏点650 MPa、引張強さ850 MPaを有する組立型クランク軸用材料として日本海事協会をはじめとする多くの船級協会から特別承認を取得した。さらに、高纯净度化技術および型入法を経て製造された開発鋼の組立型クランクスローは一体型クランク軸と同様に²⁾、設計疲労強度の式(5)における製造プロセスに対する係数Kの値として1.15を与える特別承認を取得した。これらの承認が得られた結果、上記の当社独自技術を適用することによって組立型クランク軸におけるグリップングトルクや疲労強度を従来よりも高く設計することが可能となった。

今後、本開発鋼および製造技術が次世代エンジンへ適用され、ますます厳しくなる環境規制への対応に貢献することが期待される。

参考文献

- 1) 米沢挙志ほか. 日本マリンエンジニアリング学会誌. 2019, Vol.54, No.5, p.680.
- 2) 藤網宜之. R&D神戸製鋼技報. 2016, Vol.66, No.1, p.2-6.
- 3) 村上敬宜. 金属疲労 微小欠陥と介在物の影響. 養賢堂, 1993, 265p.
- 4) 篠崎智也ほか. R&D神戸製鋼技報. 2009, Vol.59, No.1, p.94-97.
- 5) R. Yakura et al. 27th CIMAC Congress. 2013, Paper No.442.
- 6) International Association of Classification Society, "Calculation for I.C. Engine Crankshafts, Unified Requirement M53". 2017.

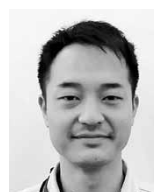


白藤 司

鉄鋼事業部門 鋳鍛鋼事業部 技術開発部 鉄鋼事業部門 鋳鍛鋼事業部 技術開発部
(新組織名: 素材材事業部門 鋳鍛鋼ユニット 技術部) (新組織名: 素材材事業部門 鋳鍛鋼ユニット 技術部)



高岡宏行



矢倉亮太

鉄鋼事業部門 鋳鍛鋼事業部 技術開発部
(新組織名: 素材材事業部門 鋳鍛鋼ユニット 技術部)