

(論文)

一体型クランク軸用高強度低合金鋼

High Tensile Strength Low Alloy Steel for Solid Type Crankshafts



深谷 荘吾*
Shogo Fukaya



藤網 宣之*
Nobuyuki Fujitsuna



香川 恭徳**
Yasunori Kagawa

With the trend toward higher output and greater compactness in marine/power generation engines, crankshafts with higher fatigue strength begin to be required. Therefore, the new steel with a tensile strength of over 1 050MPa was developed. After the chemical composition was determined based on the mechanical test results by small forgings, the actual sized crankshaft was produced in order to verify the fatigue properties. As a result, the new steel that has the excellent mechanical and fatigue properties was developed.

まえがき = 近年，船舶および陸上発電用の4ストロークディーゼルエンジンは，環境問題の高まりとともに，更なる高強度化やコンパクト化の傾向がある^{1)~3)}。それに伴い，上記エンジンに使用されるクランク軸（以下，一体型クランク軸）も，より一層の高疲労強度化が要求され始めている。

コンロッドを介してピストンの上下運動を回転運動に変換するクランク軸は，実働時には曲げ変形によりフィレット部に繰返し応力を受け続ける。従って，フィレット部には高い疲労強度が求められるが，その疲労強度向上手法にはいくつかある。例えば，材料の高強度化，CGF (Continuous Grain Flow) 鍛造法，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⁴⁾⁵⁾。中でも，疲労強度と比例関係にある引張強さ⁶⁾を向上させる材料の高強度化は，特別な製造工程を追加することなく安定した高疲労強度化が実現できるため非常に有効であり，これまでも実施されてきた。現在，一体型クランク軸用規格鋼としては，引張強さ 950MPa 級の 34CrNiMo6 鋼が最高強度である。また，引張強さ 800 ~ 900MPa 級では当社開発の 40CrMo8 鋼⁷⁾などが使用されている。しかしながら，950MPa 級以上の鋼種は存在しない。そこで，引張強さ 1 050MPa を有する低合金鋼の開発を試みた。

開発手順は，小型溶解材を用いた試験（以下，小型試験）結果を基に化学成分を決定した後，実製品に問題がないことを確認するため，大型鋼塊から実機サイズの試験材を製造し，最重要部位であるピンフィレット部から切出した試験片により，確性試験を実施した。

本稿では，開発鋼の開発経緯や機械的特性，疲労特性について紹介する。

1. 実験方法

1.1 材質設計

一体型クランク軸に使用される鋼では，主として，引張特性（強度，延性），衝撃特性（靱性）および疲労特性が要求される。本開発では，引張特性の向上による疲労特性改善を狙いとしているが，同時に衝撃特性も損なってはならない。規格鋼もしくは現状の当社開発鋼では，衝撃特性を損なわずに引張特性を向上させることが困難であるため，新規成分系を検討することとした。

材質設計の第一段階では，目標強度 1 050MPa を達成すべく引張特性に着目した。まず，過去に蓄積された様々な化学成分での引張強さのデータを基に，化学成分および熱処理条件をパラメータとする強度予測式を作成した。図 1 に，強度予測式による引張強さの計算値と引張強さの実測値の関係を示すが，両者間には非常に良い相関関係がある。そこで，本強度予測式を用いて，表 1

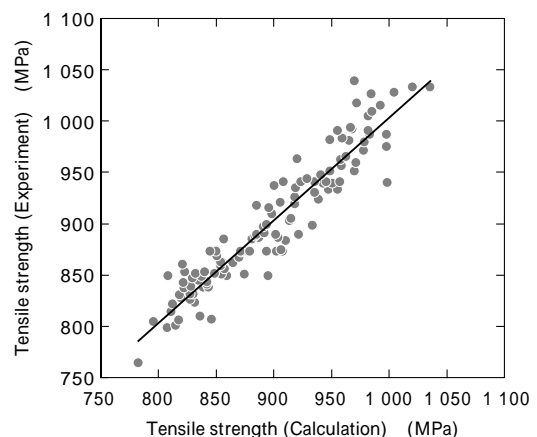


図 1 引張強さの計算値と実測値の関係

Fig. 1 Relation between calculation and experiment result of tensile strength

* 鉄鋼部門 鑄鍛鋼事業部 技術部 ** 鉄鋼部門 鑄鍛鋼事業部 製造部

表 1 従来規格鋼の化学成分

Table 1 Chemical composition of conventional steels for solid type crankshaft (mass%)

	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo
34CrNiMo6	0.34	0.25	0.65	1.50	1.50	0.23
40CrMo8	0.40	0.25	1.00	-	2.00	0.25

に示す従来の高強度鋼の成分系を参考に、目標強度 1 050 MPa が達成可能と考えられる化学成分を 15 種選択した。

1.2 小型材を用いた機械試験

引張特性と衝撃特性のバランスを調査するために、選択した 15 種の化学成分で作製した小型溶解材を用いて機械試験を実施した。図 2 に機械試験までのフローを示す。大気誘導溶解炉にて溶製した 40kg の小型溶解材を、鍛錬比 5.6S で鍛錬した。その後、870 より冷却速度約 20 /min で焼入れ、600 で 13 時間焼戻すという実製品を模擬した熱処理を行った。熱処理後、鍛錬方向、つまり鍛錬後の鋼塊の長手方向に沿って試験片を切出し、室温において引張試験およびシャルピ衝撃試験を実施した。

1.3 実機サイズ試験材を用いた確性試験

疲労特性は介在物や偏析などの影響を受けるため⁸⁾、小型試験では正確な評価は難しい。そこで、一体型クランク軸への適用可否を検証するため、小型試験により決定した化学成分で、写真 1 に示す 3 スローの実機サイズの試験材(ピン直径 270mm, ピンフィレット半径 18mm)を製造した。試験材は、大型鋼塊作製後に CGF 鍛造の一種である RR 鍛造成型を行い、実際のクランク軸と同様の熱処理を施した。

図 3 に、実機サイズの試験材からの引張および疲労試験片の採取要領を示す。試験片は、機械加工完了後のクランクスロー仕上げ面のピンフィレット部より、クランク軸の長手方向に対して 45° 傾けた位置から切出した。この部位は、実製品における最重要部位である。

切出した試験片を用いて室温引張および小野式回転曲げ疲労試験を実施した。疲労特性の評価にはステアケース法^{9),10)}を用いたが、その試験方法および試験結果の評価方法について説明する。

試験は以下に示す手順に則って行った。

1 本目の試験片について、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。

1 本目の試験で、所定の繰返し数 $N_C (= 10^7 \text{ 回})$ で未破断の場合には、2 本目の試験片に作用させる応力レベルを階差応力 d だけ増加させ、 N_0 未満で破断の場合には d だけ減少させて疲労試験を行う。

2 本目の試験結果より、3 本目に作用させる応力レベルを変化させ、疲労試験を行う。

以下、同様の作業を繰返し、その試験結果を図 4 のように表示する。

この手順において、応力階差 d は疲労強度の標準偏差になるべく近くなるように選ぶ。

図 4 のように得られた結果は、引続いて表 2 のように整理して評価する。

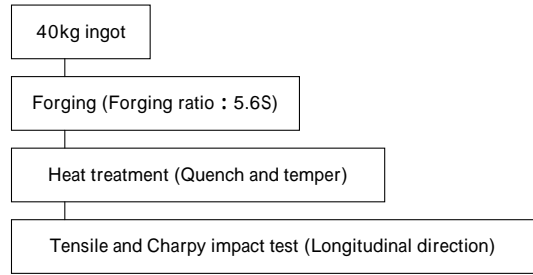


図 2 小型溶解材を用いた試験の流れ
Fig. 2 Developmental sequence of chemical composition using small size ingot



写真 1 実機サイズの試験材
Photo 1 Actual sized crankshaft for evaluation test

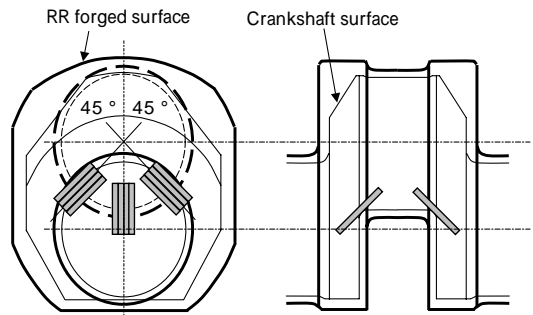


図 3 実機サイズの試験材から切出した引張および疲労試験片の採取位置
Fig. 3 Location of tensile and fatigue test specimens taken from actual sized crankshaft

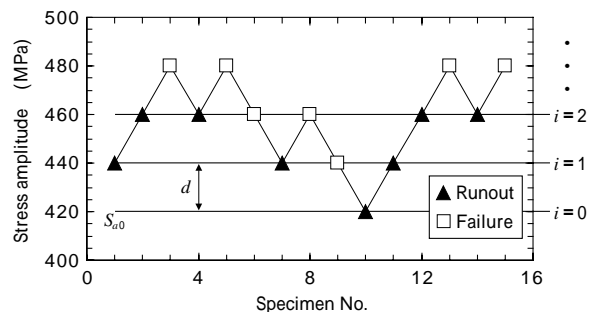


図 4 ステアケース法による試験結果の表示方法(例)
Fig. 4 Scheme of test results by staircase method (example)

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

$$S_{ai} = S_{a0} + id \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 i : 応力レベルを表す値 (最小応力振幅 : $i = 0$)
 f_i : ある応力レベル値 i での試験回数 (試験片の本数)

S_{ai} : ある応力レベル値 i における応力振幅
表 2 より得られた F, A, B 値を用いて、以下の式から、

表2 ステアケース法による試験結果の評価方法(例)

Table 2 Evaluation of test results by staircase method (example)

Stress amplitude (MPa)	<i>i</i>	<i>f_i</i>	<i>if_i</i>	<i>i²f_i</i>
480	3	6	18	54
460	2	7	14	28
440	1	3	3	3
420	0	1	0	0
Total()		17(= F)	35(= A)	85(= B)

疲労強度の平均値 S_N および標準偏差 s を求める。

$$S_N = S_{a0} + d \frac{A}{F}, \quad s = d \cdot \sqrt{\frac{BF - A^2}{(F-1)F}} \quad \dots \dots \dots (3)$$

本方法は、与えられた繰返し数 N_0 に対する疲労強度の平均値 S_N を推定することを目的とした統計的疲労試験方法の一種である。数十個の試験片を用いて S_N とともに標準偏差 s を推定する場合と、数個の試験片を用いて S_N のみを推定する場合とに分けられるが、本試験では前者の方法を用いた。本方法は、疲労強度付近での試験を数多く行うことにより、精度の良い疲労強度が得られることが特徴である。

2. 実験結果および評価

2.1 小型材の引張および衝撃特性

15種の小型鋼塊を用いた試験結果から、最も強度と靱性のバランスに優れた化学成分を選択した。表3に決定した化学成分を示す。図5に示すとおり、決定した化学成分で得られる強度と靱性のバランスを、従来鋼における最高強度鋼である34CrNiMo6鋼と比較すると、衝撃特性を損なうことなく引張強さが向上していることが確認された。

2.2 実機サイズ試験材の引張および疲労特性

2.2.1 ピンフィレット部の引張特性

表4に、実機サイズ試験材の室温における引張試験の結果を示す。実機サイズでも引張強さの目標値1050MPa以上を安定的に確保できていることが確認された。

2.2.2 ピンフィレット部の疲労特性

図6に示すステアケース法による疲労試験結果を式(3)に代入することにより、疲労強度 S_N と標準偏差 s を算出した。

$$S_N = S_{a0} + d \frac{A}{F} = 470 + 15 \times \frac{57}{22} = 509 \text{ (MPa)}$$

$$s = d \times \sqrt{\frac{BF - A^2}{(F-1)F}} = 15 \times \sqrt{\frac{183 \times 22 - 57^2}{(22-1) \times 22}} = 19.5 \text{ (MPa)}$$

2.2.3 疲労強度の評価

船用エンジンに使用されるクランク軸は、船級協会の定める規定や要求を満足する必要がある。ここでは、実機サイズの試験より得られた疲労試験結果を代表的な船級規則と照らし合わせて評価した。

国際船級協会 IACS (International Association of Classification Society) では、計算によって求められるクランク軸の疲労強度 DW 、すなわち、設計に反映される疲労強度は式(4)のように示されている¹¹⁾。

$$DW = \pm K(0.42 B + 39.3) \times \left(0.264 + 1.073D^{-0.2} + \frac{785 - B}{4900} + \frac{196}{B} \sqrt{\frac{1}{R_H}} \right) \dots (4)$$

表3 開発鋼の化学成分

Table 3 Chemical composition of new steel

	(mass%)					
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo
New steel	0.35	0.25	0.90	1.60	1.60	0.50

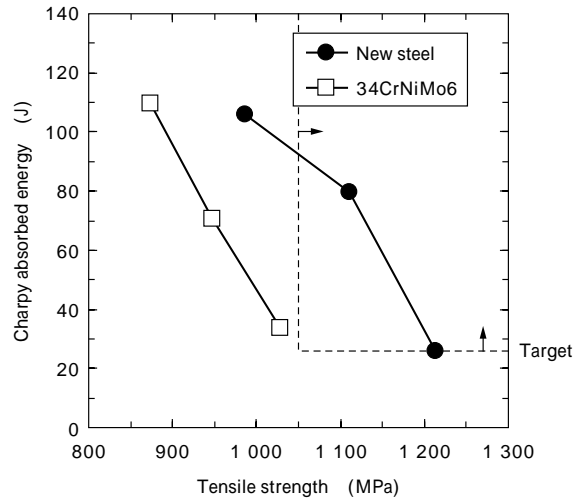


図5 引張強さとシャルビ吸収エネルギーの関係

Fig. 5 Relation between tensile strength and Charpy absorbed energy

表4 開発鋼の引張試験結果

Table 4 Tensile test results of new steel

No.	0.2% proof stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
1	961	1 085	17.1	59.1
2	961	1 082	14.2	46.6
3	966	1 087	15.5	49.3
Mean	963	1 085	15.6	51.7

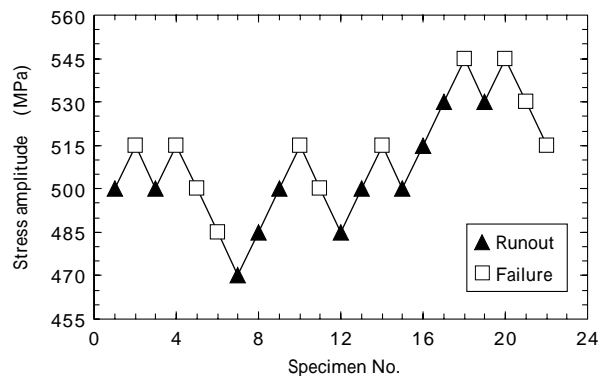


図6 ステアケース法による疲労試験結果

Fig. 6 Result of staircase test

Stress amplitude (MPa)	<i>i</i>	<i>f_i</i>	<i>if_i</i>	<i>i²f_i</i>
545	5	2	10	50
530	4	3	12	48
515	3	6	18	54
500	2	7	14	28
485	1	3	3	3
470	0	1	0	0
Total()		22(= F)	57(= A)	183(= B)

表5 疲労強度の評価
Table 5 Evaluation of fatigue strength

		Eq.	Fatigue strength (MPa)
Test result		-	509
Target	IACS M53	(4)	305
	NK's rule	(5)	409

ここで、 D : クランクピン直径 (mm)
 σ_B : 引張強さ (MPa)
 R_H : ピンフィレット半径 (mm)
 K : 製造方法に応じた定数 (CGF 鍛造は 1.05)

一方、日本海事協会 NK (Nippon Kaiji Kyokai) では、
 実体疲労試験における CGF クランク軸の満足すべき疲労強度 σ_w が式 (5) (試験片直径 $D = 200\text{mm}$ のとき) のように示されている¹²⁾。

$$\sigma_w = 1.2 \times 177 \times \left\{ 1 + \frac{2}{3} \times \left(\frac{TS}{440} - 1 \right) \right\} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 TS : 引張強さ (MPa)
 本開発鋼の疲労強度は、式 (4)、(5) から算出される値を満足しなければならない。今回得られた疲労強度を計算値 ($\sigma_B = TS = 1050\text{MPa}$, $D = 270\text{mm}$, $R_H = 18\text{mm}$ のとき) と比較すると、表5のように十分に高い値であり、一体型クランク軸に適用可能であると考えられる。

むすび = 一体型クランク軸用 1050MPa 級鋼の引張、衝撃および疲労特性を小型溶解材と実機サイズの試験材で確認した結果をまとめると、以下のとおりである。
 ・小型溶解材にて機械特性を確認した結果、開発鋼は衝撃特性を損なうことなく、従来の最高強度鋼以上の引張特性を有していた。

・実機サイズの試験材を製造し、ピンフィレット部の引張および疲労特性を評価したところ、良好な結果が得られた。
 以上のことから、本開発鋼は一体型クランク軸に適用可能と判断される。今後、エンジンの更なる高出力化やコンパクト化が要求される次世代クランク軸への適用が期待される。

参考文献

- 1) J. Kytola : Development of the Waertsilae 4-stroke engine range, (2004) No.123.
- 2) Dr. F. Koch : The new MAN B&W L21/31 Engine-Design Development and Experience, (2004) No.174.
- 3) Y. Miyawaki et al. : The new DAIHATSU DC-17 4-stroke medium speed diesel engine, (2004) No.101.
- 4) 日本機械学会編：金属材料疲れ強さの設計資料 (), (1965) .
- 5) 島本敏郎ほか：自動車技術, Vol.44, No.6, (1990) p.95 .
- 6) 日本鉄鋼協会：鉄鋼便覧, 第3版, 第 巻, (1981) p.541.
- 7) 香川恭徳ほか：第68回マリンエンジニアリング学術講演会予稿集, (2002) .
- 8) 村上敬宜：金属疲労 微小欠陥と介在物の影響, (1993) .
- 9) 日本機械学会：統計的疲労試験方法 JSME S 002, (1981) p.33.
- 10) M. Huck : Ein Verbesertes Verfahren fur die Auswertung von Treppenstufen-versuchen. Berichtsbande zu Sitzungen des DVM Arbeitskreises Betriebsfestigkeit. Berichtsband der 6. Sitzung, (1981) S.147/76. Herausgegeben vom Deutschen Verbandfur Materialprufung, Berlin.
- 11) International Association of Classification Society : Requirements Concerning Machinery Installations, Unified Requirement M53, (2004) .
- 12) 日本海事協会：船用材料・機器等の承認及び認定要領, 第1編, 4章, (2004) .