

(技術資料)

高強度低合金鋼の中間軸への適用

Application of Low Alloy Steel with High Tensile Strength to Intermediate Shaft Designs



池上智紀*¹
Tomonori IKEGAMI



高岡宏行*¹
Hiroyuki TAKAOKA



田村史彦*¹
Fumihiko TAMURA



藤網宣之*¹
Nobuyuki FUJITSUNA



井口 祐*²
Yu IGUCHI

It is stipulated in Requirements Concerning Machinery Installations, Unified Requirement M68 of International Association of Classification Society (IACS UR M68) that the minimum specified tensile strength of alloy steel for a propulsion shaft shall not exceed 800MPa. This is due to the fact that torsional fatigue properties and fatigue notch sensitivity are not known in the high-strength region. Meanwhile, demand is increasing for intermediate shafts having a minimum specified tensile strength greater than 800MPa to reduce the weight by decreasing the diameter, to prevent damage to shaft bearings and to broaden the permissible scope of torsional vibration stresses. Thus we have developed a steel having a tensile strength of 1,000MPa, evaluated its torsional fatigue property and verified that the torsional fatigue strength has been increased in proportion with the tensile strength, while the fatigue notch sensitivity remains the same as that of conventional steel.

まえがき = 船舶用エンジンは、近年のCO₂排出規制および省エネの観点から、高出力・高効率化が求められるため、低回転数、高トルク回転での設計となる傾向がある。そのため、エンジンの動力をプロペラ軸に伝える部材である中間軸には、これまでよりも高いねじり振動応力が生じることが予想される。高いねじり振動応力に対応するには中間軸材料の高強度化が必要であるが、国際船級協会連合 (International Association of Classification Societies: IACS) より公示された技術決議である統一規則IACS UR M68¹⁾には、中間軸に適用される低合金鋼の規格最低引張強度は800MPaを超えてはいけなく定められている。これは、従来の材料においては、ある一定以上の高強度になった場合に、引張強度増加分の疲労強度の増加が一般的には期待できなくなる²⁾こと、また、引張強度の増加に伴って疲労強度の切欠に対する感受性が高くなる³⁾ことなどの理由から、安全性を考慮して高強度での設計を制限するためと考えられる。これらの高引張強度域での疲労強度特性が低下する原因として、鋼中に非金属介在物が存在することであると考えられている⁴⁾。

そこで当社は、800MPaを超える引張強度を有する低合金鋼を用いた中間軸の設計というニーズに応え、引張強度1,000MPaを有する清浄度の高い低合金鋼用材料を開発し、そのねじり疲労強度および切欠感受性を調査した。本稿では、開発鋼と従来鋼との疲労特性を比較して報告する。

1. 高強度中間軸の製造

図1に船舶における中間軸の搭載位置を、図2に機

械加工後の中間軸を示す。中間軸はエンジンの動力をプロペラ軸に伝える役割を有する重要な部材である。図3、4に中間軸の製造工程の概略を示す。製鋼、造塊を

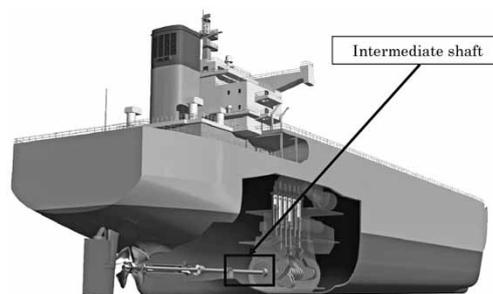


図1 中間軸搭載位置
Fig. 1 Location of intermediate shaft



図2 中間軸の外観 (機械加工後)
Fig. 2 Appearance of intermediate shaft after machining

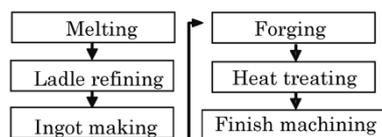


図3 中間軸製造工程
Fig. 3 Manufacturing process of intermediate shafts

*¹ 鉄鋼事業部門 鑄鍛鋼事業部 技術開発部 *² 鉄鋼事業部門 鑄鍛鋼事業部 鍛圧部

経て鋼塊を製造し、加熱、鍛造を行ってフランジ付き丸棒形状に成形を行う。続いて熱処理を施し、最後に機械加工にて所定の寸法に仕上げる。

今回開発した高強度中間軸用鋼は、表1に示すように合金成分を加えて焼入れ性を向上させて高強度化を図った。一方で、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製鋼プロセスの改善を図り、溶鋼中のS量、O量の低減、溶存酸素により生成した介在物の浮上分離の促進を行うことで清浄度の高い材料を作製した。

こうして開発した鋼が、高強度かつ疲労特性にばらつきが少なく、高強度中間軸用鋼として適用可能かどうかの検討を行った。表2に高強度中間軸の清浄度測定結果の一例を示す。開発鋼の清浄度観察視野中に存在する介在物は硫化物系介在物で長さ127 μm 以下、粒状酸化物系介在物で直径 $\phi 27\mu\text{m}$ 以下であることがわかる。ま

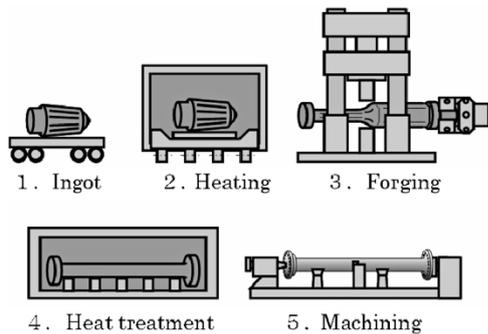


図4 中間軸製造工程

Fig. 4 Manufacturing process of intermediate shafts

表1 試験材の化学成分

Table 1 Chemical compositions of test pieces

Steel type		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
Developed	Max	0.45	0.40	1.20	0.020	0.005	2.50	0.35
	Min.	0.36	0.15	0.80	-	-	1.50	0.15
Conventional	Max	0.43	0.35	0.90	0.035	0.035	1.2	0.30
	Min.	0.38	0.15	0.60	-	-	0.90	0.15

表2 清浄度測定結果 (ISO 4976 method A)

Table 2 Cleanliness by ISO 4976 method A

Sample No.	Inclusion group									
	A		B		C		D		DS	
	Index	Total length (μm)	Index	Total length (μm)	Index	Total length (μm)	Index	Count number	Index	Diameter (μm)
	0.5	37 \leq	0.5	17 \leq	0.5	18 \leq	0.5	1 \leq	0.5	13 \leq
	1	127 \leq	1	77 \leq	1	76 \leq	1	4 \leq	1	19 \leq
	1.5	261 \leq	1.5	184 \leq	1.5	176 \leq	1.5	9 \leq	1.5	27 \leq
	Fine	Thick	Fine	Thick	Fine	Thick	Fine	Thick		
1	-	-	-	-	-	-	1	0.5		0.5
2	-	-	-	-	-	-	0.5	0.5		1
3	-	-	-	-	-	-	0.5	0.5		1
4	-	0.5	-	-	-	-	1	0.5		1
5	0.5	-	-	-	-	-	1	0.5		1
6	-	-	-	-	-	-	1	0.5		0.5

た、欠陥寸法の $\sqrt{\text{area}}$ (μm) が100 μm 以下の欠陥は、引張強度980MPaの低合金鋼のねじり疲労強度に影響を与えないことが調査されている⁵⁾。硫化物系介在物は一般的に細長い形状に伸展されており、開発鋼の清浄度観察視野中に存在する介在物は $\sqrt{\text{area}}$ で100 μm 以下だと考えられ、ねじり疲労強度を評価するにあたり介在物寸法が十分に小さいことがわかる。

2. 中間軸の設計

IACS UR M68によると中間軸の直径は式(1)、ねじり振動許容応力は式(2-1)、(2-2)、(3)にて計算される。ここで、 σ_B は材料の引張強度、 F は軸系部材の種類による定数、 k は形状因子、 n_0 は1分間の回転数、 p は伝達力、 d_i は軸ボアの直径、 d_o は軸部材の直径、 C_k は式(4)によって計算される形状に関する係数、 C_D は軸の直径によって決まる寸法に関する係数、 λ は使用回転数と連続最大回転数との比、 scf は応力集中係数である。 τ_c は引張強度、切欠係数、応力に対する安全率を2として計算された許容応力であり、設定された連続使用禁止範囲において τ_c を超えるような条件での運転は速やかに通過することが望まれる。また、 τ_T は機関の始動、停止に伴う危険回転数通過の際に受ける荷重の生涯繰返し数を $10^{4.5}$ 回とした時間強度を考慮して計算された許容応力であり、いかなる場合も τ_T を超えない条件で運転しなければならない。高強度化するにあたっては、耐久限度、有限寿命、切欠感受性の観点において従来鋼と同等以上の疲労強度が求められるため疲労試験により確認を行った。

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

$$\pm \tau_c = \frac{\sigma_B + 160}{18} \cdot C_k \cdot C_D \cdot (3 - 2 \cdot \lambda^2) \dots\dots\dots (2 - 1)$$

$$\pm \tau_c = \frac{\sigma_B + 160}{18} \cdot C_K \cdot C_D \cdot 1.38 \quad \dots\dots\dots (2-2)$$

for $0.9 \leq \lambda < 1.05$

$$\pm \tau_T = 1.7 \cdot \frac{\tau_c}{\sqrt{C_K}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$C_K = \frac{1.45}{scf} \quad \dots\dots\dots (4)$$

3. ねじり疲労試験

3.1 試験材料

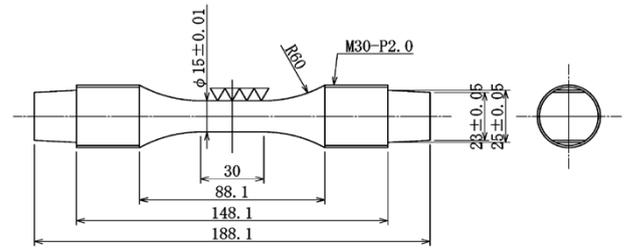
800MPa以上の引張強度を有する材料での疲労特性を評価するため、800MPa程度の引張強度を有する従来鋼、および1,000MPa程度の引張強度を有する開発鋼について疲労試験を実施した。表3に開発鋼と従来鋼の機械的特性を示す。また、表4に示すように焼戻し条件を調整することにより、800MPa以上の異なる引張強度を有する材料を作製した。本稿では、強度クラスが最も高い開発鋼KSF A95を用いて疲労試験を実施し、従来鋼の疲労特性との比較を行った。

3.2 疲労試験方法

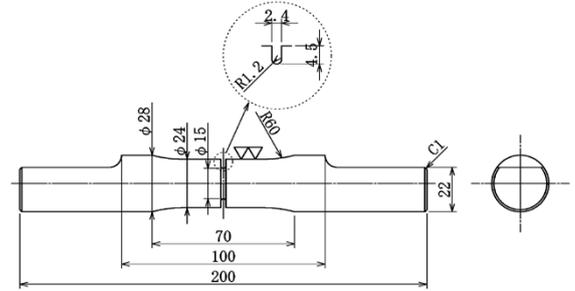
上記二つの材料を用いてねじり疲労試験を実施した。測定環境は室温大気中、応力比は $R = -1$ 、最大繰返し数は 10^7 回、評価方法はS-N法とした。図5に平滑試験片および切欠試験片形状 ($scf = 1.58$) を示す。

3.3 試験結果

図6 (a), (b) にそれぞれ、従来鋼および開発鋼を用いたねじり疲労試験結果を示す。図中には後述するクライテリアも併せて示した。図7に引張強度と 10^7 回で定義した平滑試験片のねじり疲労強度との関係を示す^{5), 6)}。図7を見ると、1,000MPaの引張強度を有する開発鋼のねじり疲労強度は、800MPa以下の引張強度を有する材料の疲労強度との回帰線より上にあり、引張強度増加分の疲労強度の増加は従来どおり見込まれることがわかる。また、図8に応力集中係数と切欠係数との関係を示す^{5), 6)}。図8から1,000MPaの引張強度を有する開発鋼の切欠係数と応力集中係数の関係は、800MPa以



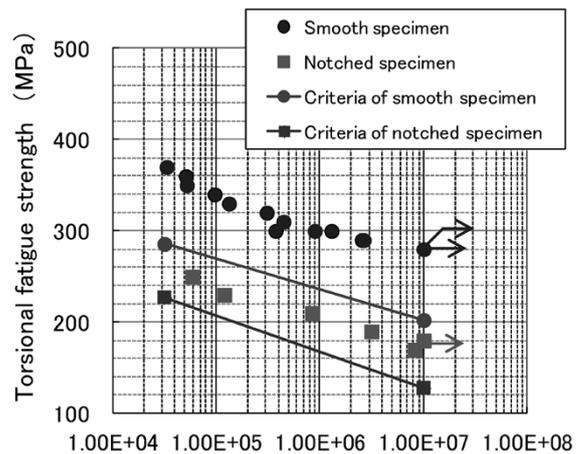
(a)平滑試験片
(a) Smooth specimen



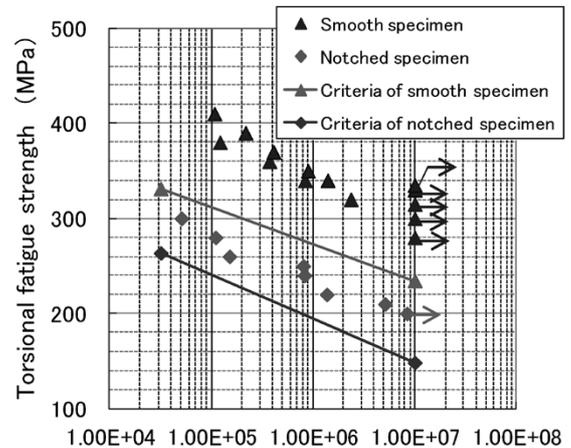
(b)切欠き試験片 ($scf=1.58$)
(b) Notched specimen ($scf=1.58$)

図5 ねじり疲労試験片

Fig. 5 Specimens for torsional fatigue tests



(a) 従来鋼
(a) Conventional steel



(b) 開発鋼
(b) Developed steel

図6 疲労試験結果

Fig. 6 Results of torsional fatigue tests

表3 試験材の機械的性質

Table 3 Mechanical property of test piece

Steel type	Tensile strength (MPa)	Yield stress (MPa)	Elongation (%)		Reduction of area (%)	
			ta	ta	ta	ta
Developed	1,023	866	16.2		55.1	
Conventional	856	679	18.5		53.5	

ta: tangential direction

表4 引張強度と焼戻し条件

Table 4 Tensile strength and tempering conditions

Grade	Steel type	Tensile strength (MPa)		Tempering condition
		Min	Max	
KSFA80	Conventional	780	930	630°C × 10 h
KSFA85	Developed	830	980	630°C × 10 h
KSFA90		880	1,030	615°C × 10 h
KSFA95		930	1,130	600°C × 10 h

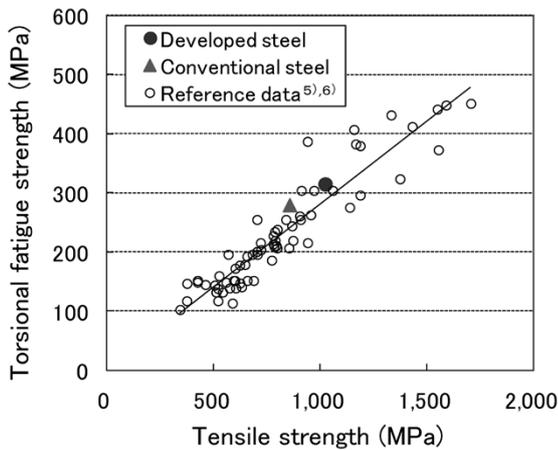


図7 引張強度と平滑試験片でのねじり疲労強度の関係^{5), 6)}
 Fig. 7 Relationship between tensile strength and torsional fatigue strength of smooth specimen^{5), 6)}

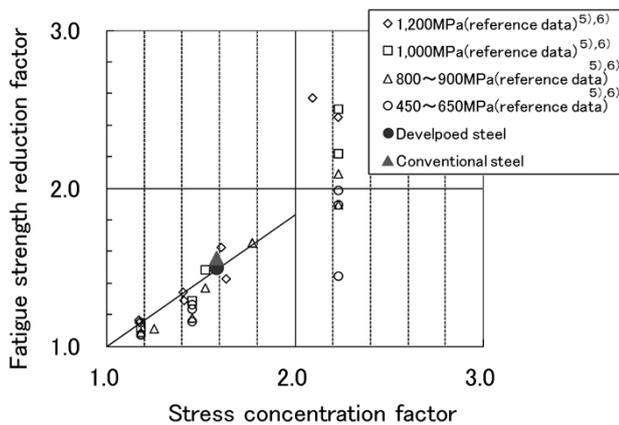


図8 応力集中係数と切欠き係数の関係^{5), 6)}
 Fig. 8 Relationship between fatigue notch sensitivity and stress concentration factor^{5), 6)}

下の引張強度を有する従来鋼の切欠き係数と応力集中係数との回帰線上にあり、引張強度増加に伴う疲労強度の切欠に対する感受性が高くなる傾向は確認されなかった。

4. 考察

IACS UR M68の考えに基づくと、 τ_c は 10^7 回の繰り返し数に対する許容応力であると考えられる。また、 τ_T は危険回転数を通過する際のねじり振動の繰り返し数を $10^{4.5}$ 回 (3.16×10^4 回)として計算された許容応力と考えられる¹⁾。本稿では、 τ_c は式2-1の $\lambda = 0$ で計算し

た。これは、 τ_c の最大値を算出するためである。また、切欠試験片の場合は、 C_k は当社で製造した中間軸の最大値である $scf=1.58$ として式(4)にて計算するものとした。このように計算された τ_c と τ_T とをS-N線図上にて直線で結んだ線をクライテリアとして与え、試験結果と比較することとした。図6から平滑試験片および切欠試験片での試験結果は、いずれもクライテリアより高い応力振幅側に位置しており、安全側であることがわかる。これらの結果から、1,000MPaの引張強度を有する開発鋼を用いることで、規格最低引張強度950MPa未満の規格材に適用可能であることが示唆される。

むすび=800MPa以上の引張強度を有する低合金鋼での中間軸の設計可否を検討するため、引張強度1,000MPaを有する清浄度の高い低合金鋼にてねじり疲労試験を実施した。以下にそれらの結果を示す。

- ・ 開発鋼では引張強度増加分の疲労強度の増加は従来どおり見込まれることがわかった。
- ・ 開発鋼の切欠係数と応力集中係数との関係は800MPa以下の引張強度を有する材料と傾向はほぼ一致しており、高強度化により切欠感受性が高くなる傾向は確認されなかった。
- ・ τ_c と τ_T を用いて設定したクライテリアに対し、試験結果が高応力振幅側に位置することから、開発鋼が規格最低引張強度950MPa未満の規格材に適用可能であると示唆される。

なお、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APPENDIX Iが2015年4月にIACS UR M68に追加された。本結果を生かして高強度材の適用を推進していく。

参考文献

- 1) International Association of Classification Society, "Requirements Concerning Machinery Installations, Unified Requirement M68". 2015.
- 2) 村上敬宜ほか. 日本機械学会論文集. 1987, 54巻, 500号, p.688-696.
- 3) 石田 正. 金属の疲労と破壊の防止. 養賢堂, 1967.
- 4) 齊藤 誠ほか. ばね論文集. 1985, Vol.30, p. 11-19.
- 5) 日本材料学会. 金属材料疲労強度データ集, 2000.
- 6) 日本機械学会. 疲労強度の設計資料I. 1982.