清 浄 鋼 浸 炭 歯 車 の 曲 げ 強 度*

井 上 克 己^{*1}, 北 村 賢 一^{*2} 山 中 将^{*1}
増 山 知 也^{*1}, 浅 野 純 一^{*3}

Bending Fatigue Strength of Carburized Clean Steel Gear

Katsumi INOUE^{*4}, Kenichi KITAMURA, Masashi YAMANAKA,
Tomoya MASUYAMA and Junichi ASANO^{*4} Graduate School of Engineering, Tohoku University,
01 Aramaki-Aoba, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi, 980-8579 Japan

It is reported that clean steel with low oxygen content may be effective to improve the fatigue strength. In this paper, the bending fatigue tests were carried out for carburized gears made of clean steel and ordinary steel with oxygen content of 5 ppm and 8 ppm, respectively. After removing the nonmartensitic layers by electropolishing, the fatigue strength of the clean steel gear is 28% higher than that of the ordinary steel gear. To discuss the influence of cleanliness, the authors estimate the fatigue strength considering the distribution of inclusions. The maximum size of inclusions in the dangerous volume of gear tooth, which is calculated according as the stress distribution of fillet including the position of crack initiation, is estimated by the statistics of extremes. Then the fatigue strength is estimated by using the maximum size of inclusion and the estimation formula proposed by the authors.

Key Words: Gear, Carburization, Clean Steel, Bending Fatigue Strength, Inclusion, Hardness Residual Stress

1. 緒 言

近年、動力伝達装置の小型・軽量化の要求が高まり、それに用いられる歯車の更なる高強度化が必要になっている。このため歯車材料の改善、浸炭焼入れなどの熱処理技術、ショットピーニングなどの表面処理の適用により、疲労強度向上が図られている^{(1)~(5)}。

このうち材料の改善については、破壊の起点になる鋼中の非金属介在物、特に酸化物系介在物を減らす高纯净化が疲労強度向上に有効である。高纯净度軸受鋼はすでに多く用いられているが⁽⁶⁾、最近では酸素含有量が10 ppm以下の肌焼鋼も量産され、回転曲げ疲労試験において疲労強度が向上したことが報告されている⁽⁷⁾。肌焼鋼の用途の一つである、浸炭歯車に対する高纯净化の効果は香川ら⁽⁸⁾による研究がある。そこでは酸素含有量を9 ppmに低減したSCM420H清浄鋼浸炭歯車の動力循環式試験機による疲労試験結果より、高纯净化が強度向上に有効であると報告されている。

本研究では、酸化物系介在物の最大径を小さくすることを意図した製鋼法⁽⁶⁾により酸素含有量を低減したSCM420清浄鋼浸炭歯車の曲げ疲労強度を求めて、同製鋼法によらない従来の通常鋼の場合と比較する。また高纯净度が疲労強度に及ぼす影響を定量的に評価するために、著者らが提案した欠陥寸法に着目した浸炭歯車に対する疲労強度の推定式⁽⁹⁾を実験結果に適用し、その妥当性を考察する。

2. 試験歯車の諸特性

2.1 試験歯車 試験歯車は酸素含有量が異なる2種類の鋼より製作され、酸素含有量の少ない方を清浄鋼歯車、他方を通常鋼歯車と呼ぶ。化学成分は両者ともJIS SCM420に従う。化学成分の測定結果を表1に示す。清浄鋼の酸素含有量は5 ppmと極めて低く、硫黄の含有量も低減されている。試験歯車の諸元を表2に示す。それぞれ直径110 mmの丸棒から歯車ブランクを切出し、機械加工で仕上げ、歯の側面からの浸炭を防止するために厚さ約20 μmの銅メッキを施した後、ホブ切りした。次に、図1に示す条件で熱処理を行った。有効浸炭深さはAGMAの推奨する浸炭深さ⁽¹⁰⁾を参考にして定めた。試験に用いた清浄鋼歯車と通常鋼歯車は全て同一の炉で同時に熱処理を行い、熱

* 原稿受付 2001 年 6 月 29 日。

^{*1} 正員、東北大学大学院工学研究科(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉01)。^{*2} 准員、東日本旅客鉄道(株)(〒114-0013 東京都北区東田端2-20-68)(元：東北大学大学院)。^{*3} 学生員、東北大学大学院。

E-mail: inoue@elm.mech.tohoku.ac.jp

Table 1 Chemical compositions of test gears (wt% except O [ppm])

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	O
Range of SCM420*	0.17–0.23	0.15–0.35	0.55–0.90	< 0.030	< 0.030	0.85–1.25	0.15–0.35	—
Ordinary steel (Measured)	0.22	0.31	0.84	0.019	0.013	1.21	0.15	8
Clean steel (Measured)	0.21	0.25	0.85	0.012	0.003	1.18	0.15	5

* JIS G 4105

Table 2 Dimensions of test gear

Cutter	JIS basic rack
Module	5
Number of teeth	18
Pressure angle [deg]	20
Profile modification coefficient	0
Face width [mm]	8.0±0.01
Tip diameter [mm]	100±0.01
Span gauge (3 teeth) [mm]	36.16±0.01
Finish	Hobbed
Gear grade	JIS 5

Fig. 1 Conditions of heat treatment

処理に起因する機械的性質の差異が生じないようにした。

2.2 硬さ・残留応力 いくつかの歯の歯幅中央を歯直角方向に切断し、表面をバフ研磨した後、歯元危険断面付近の硬さの深さ方向分布を測定した。測定例を図2に示す。図より有効浸炭深さは両者とも約0.9 mmである。両者の硬さ分布に差異は認められない。試験歯車の表面硬さ H_s 、最大硬さ H_m 、芯部硬さ H_c を表3に示す。表面異常層が存在する浸炭歯車は、表面で硬さが大きく低下することが知られているので⁽⁵⁾、表面硬さ H_s は測定値を外挿して求めた。なお、EPは歯元近傍を電解研磨により約30 μm 除去していることを示している。また、考察に用いるために表3には既報⁽⁵⁾の試験歯車の特性値も示している。

表3にはX線応力測定装置を用いて測定した各試験歯車の残留応力 σ_R も示してある。疲労強度に影響を及ぼすのは歯元の歯形方向の残留応力であるが、本試験歯車では隣接歯を切除しなければ、この応力の測定は困難である。そこで既報⁽¹¹⁾の結果に基づいて、切除しないで測定できる歯底における歯幅方向の残留応力で近似できると考え、歯幅方向残留応力を測定し、

(a) Ordinary steel gear

(b) Clean steel gear

Fig. 2 Hardness distribution at the fillet of test gears

これを σ_R とした。表より通常鋼歯車と清浄鋼歯車の残留応力に差異は認められない。電解研磨した場合も、両者の差は見られない。

2.3 介在物分布 試験歯を切断してバフ研磨後、光学顕微鏡で観察した一例を図3に示す。それぞれの試験片において、被検面積 $1.74 \times 10^7 \mu\text{m}^2$ に占める介在物の投影面積の総和は、通常鋼で $1.25 \times 10^4 \mu\text{m}^2$ 、清浄鋼では $6.66 \times 10^3 \mu\text{m}^2$ である。これらは被検面積のそれぞれ0.072%、0.038%を占めており、清浄鋼の方が介在物の割合が少ない。JIS G0555では、「鋼の非金属介在物の顕微鏡試験方法」を定めている。これは検鏡視野中に格子を挿入し、視野内の介在物と格子点が重なる点数をもって清浄度を定量的に評価する方法である。格子間隔を10 μm として、規格に基づいて測定した清浄度 d の値は、通常鋼が0.5%、清浄鋼が

Table 3 Hardness, residual stress and fatigue strength of test gears

Test gear	H_s [Hv]	H_m [Hv]	H_c [Hv]	σ_R [MPa]	σ_u [MPa]
Ordinary	628	778	398	-109	685
Ordinary (EP)	702	778	398	-283	837
Clean	605	774	378	-101	650
Clean (EP)	700	771	378	-284	1070
C*	540	750	320	-308	761
CSP2*	797	868	321	-516	1176
CCP2*	698	756	320	-496	1009
CEP2*	705	760	322	-463	965
CSP2EP2*	788	870	326	-644	1274

* Codes in ref. (5)

(a) Ordinary steel gear (b) Clean steel gear

Fig. 3 Photomicrographs of ordinary and clean steel gears

 Fig. 4 Distribution of inclusion in observed area ($1.74 \times 10^7 \mu\text{m}^2$)

0.12%であり、清浄鋼の方が清浄度が高いことが確認された。

次に介在物の大きさの分布を図4に示す。図より介在物面積が $50 \mu\text{m}^2$ 以下の範囲では通常鋼、清浄鋼ともに同程度の介在物が存在するが、 $50 \mu\text{m}^2$ 以上の範囲では通常鋼の方が介在物の個数が多く、特に $200 \mu\text{m}^2$ を越える大きな介在物については、清浄鋼では観察されなかった。

Fig. 5 S-N curves of test gears

2.4 介在物の元素分析 鋼中の介在物について元素分析を行った。介在物の投影面積が $100 \mu\text{m}^2$ 以下のものでは主にMnとSが検出されたほか、AlやSiも検出された。介在物の投影面積が $100 \mu\text{m}^2$ を超えるものではAlとSiがほとんどであり、MnやSは検出されなかった。したがって、一般的に疲労強度に影響を及ぼすと考えられる大寸法の介在物の主な組成は、AlやSiを含む酸化物である可能性が高い。また、実験で用いた清浄鋼は酸素とともにSの含有量が極めて低いが、Sは小型介在物から主に検出される傾向にあることから、その含有量の低減が疲労強度向上に及ぼす影響は少ないと考えられる。

3. 疲労試験の結果および考察

3.1 試験方法 電気油圧サーボ式歯車曲げ疲労試験機⁽⁵⁾を用いて通常鋼歯車および清浄鋼歯車の曲げ疲労試験を行なった。試験歯の歯先より0.5 mm内側で歯面法線方向に荷重を加えた。応力比は0.01である。応力レベルSは二次元有限要素法で計算した引張側の歯元最大実応力⁽¹³⁾で示した。負荷打ち切りの繰り返し数は 3×10^6 回とした。また、既報⁽¹²⁾において疲労強度の正規分布の標準偏差が約60 MPaであることから、応力レベル間隔を60 MPaと定めた。

3.2 試験結果 通常鋼歯車および清浄鋼歯車の曲げ疲労試験の結果とS-N曲線を図5に示す。疲労強度をステークス法に基づくLittleの方法⁽¹⁴⁾で求めたところ、通常鋼歯車では685 MPa、清浄鋼歯車では650 MPaであった。両者の差は約5%であり、両歯車の疲労強度はほぼ等しいと考えた。

表面近傍を走査型電子顕微鏡で観察したところ、両者に平均 $15 \mu\text{m}$ の厚さの表面異常層が存在していることが知られた。著者らは、歯車表面に異常層が存在する場合は、異常層内の個々の介在物に着目するので

はなく、異常層を一つの欠陥として扱うことが適当であると考え、4.1節で詳述する強度評価法が適用できることを示した⁽⁹⁾。この評価法を適用して本試験歯車の疲労強度を推定したところ、後述する最大介在物寸法より求められる疲労強度よりも低いことがわかった。したがって両者は異常層厚さによって強度が決定され、等しい異常層厚さにより、ほぼ等しい疲労強度を示したと考えられる。

3.3 表面異常層除去後の疲労強度 表面異常層を除去することで介在物の影響を顕在化できると考え、表面異常層を除去して疲労試験を行なった。除去方法として電解研磨法を用いた。歯元危険断面近傍の表面異常層を完全に除去するため、ピッチ点から歯底に至る範囲を表面より約30 μm 研磨した。研磨した歯車を用いた疲労試験の結果、表3に示す疲労強度を得た。通常鋼歯車、清浄鋼歯車ともに表面異常層を除去することにより疲労強度が向上し、それぞれ22%、65%の向上が認められた。電解研磨後では清浄鋼歯車の疲労強度は通常鋼歯車より28%高く、表面異常層を除去することにより、疲労強度に影響を及ぼすと考えられる大型介在物の含有量が低減された清浄鋼が、疲労強度向上に有効であることが確認された。同様の効果は香川らの試験結果においても認められる⁽⁸⁾。

3.4 硬さと残留応力に着目した強度推定 SCM415およびSCM420H浸炭歯車の曲げ疲労実験結果を整理して、疲労強度 σ_u [MPa]を推定する式を得ている⁽⁴⁾。

$$\begin{aligned}\sigma_u &= \sigma_{uc} + \sigma_{usc} + \sigma_{uR} \\ &= f(H_c) + g(H_s - H_c) + h(\sigma_R) \\ &= (257 + 1.17H_c) + 3.1 \exp[0.0097(H_s - H_c)] \\ &\quad - 0.5\sigma_R\end{aligned}\quad (1)$$

ここで、 H_c [HV]: 芯部硬さ、 H_s [HV]: 表面硬さ、 σ_R [MPa]: 歯元表面の圧縮残留応力である。また、 $\sigma_{uc} = f(H_c)$ 、 $\sigma_{usc} = g(H_s - H_c)$ 、 $\sigma_{uR} = h(\sigma_R)$ はそれぞれの母材の疲労強度、表面硬化層による疲労強度の増加、残留応力による疲労強度の増加を表す。表面硬化によって σ_R が発生することを考えれば、 σ_{usc} と σ_{uR} は本質的に独立とはいえないが、ここでは式(1)に示すように独立に扱えるものとする。

表3に示した測定値を式(1)に代入して得られる疲労強度予測値と疲労試験結果の比較を図6に示す。比較に示した柳ら⁽⁵⁾の実験結果は本研究と同一諸元のSCM415浸炭歯車Cを基にして、ショットピーニングを施した歯車CSP2、化学研磨を施したCCP2、電解研磨を施したCEP2、ショットピーニング後に電解研磨

Fig. 6 Comparison between experimental fatigue strength and estimated fatigue strength (AC; As carburized, EP; Electropolished)

を施したCSP2EP2によるものである。本実験の4系列の中で、電解研磨した清浄鋼歯車以外の3系列は推定値に比べて約15%低い値を示した。既報⁽⁵⁾においては、推定誤差は6%以内でありこの3系列は誤差が大きい。これまでに得た硬さ、残留応力の値と比較すると、本系列の芯部硬さは大きく、残留応力は小さい傾向を示しているが、ばらつきの範囲内と考えられる。表面処理が類似したCと通常鋼歯車、CEP2と電解研磨した通常鋼歯車の疲労強度を比較しても本系列の方が低い値を示している。一方、電解研磨した清浄鋼歯車は他の3系列とは逆に推定値に比べて約17%大きい値を示した。これは表面異常層の除去による硬さと残留応力の増加に起因する強度向上に加えて、介在物分布に起因する母材強度の違いが影響するためと思われる。したがって、介在物分布の影響を考慮した疲労強度の推定が必要である。

4. 疲労強度向上に及ぼす清浄度向上の効果

4.1 欠陥寸法に着目した強度の推定 村上は微小欠陥や介在物を含む材料の疲労強度を予測するために次式を提案している⁽¹⁵⁾。

$$\begin{aligned}\sigma_w &= \frac{1.43(H + 120)}{(\sqrt{area})^{1/6}} \left[\frac{(1-R)}{2} \right]^\alpha \\ \alpha &= 0.226 + H \times 10^{-4}\end{aligned}\quad (2)$$

ここで σ_w は応力振幅、 H は破壊起点近傍の硬さ、 R は応力比、 $\sqrt{area}$ は介在物の主応力方向への投影面積の平方根を示す。村上はさらに、硬さの高い鋼の疲労強度はばらつきが大きく、ばらつきの幅すなわち疲労強

度の上・下限値を精度よく予測する必要があると指摘し(15)、実用的な評価法として上限値 σ_{wu} は硬さに比例すると考えて $\sigma_{wu} \cong 1.6 \cdot H$ より推定し、下限値 σ_{wl} は極値統計を利用して推定した最大寸法 $\sqrt{area}_{max}$ に基づいて推定することを示している。

著者らは浸炭歯車の曲げ強度に対する欠陥の影響を歯元切欠き深さで定量化する実験を行い、式(2)を修正して下記の強度評価式を提案した(9)。

$$\sigma_w = \beta \frac{(H + 120)}{(\sqrt{A})^{1/6}} \left[\frac{(1 - R)}{2} \right]^\alpha \quad (3)$$

ここで $\sqrt{A}$ は欠陥寸法であり、介在物寸法 $\sqrt{A_i}$ 、切欠き深さ a_{nth} 、表面異常層厚さ δ の影響を $\sqrt{A} = \sqrt{A_i} = \sqrt{10} a_{nth} = \sqrt{10} \delta$ と定量化したものである。表面異常層を除去した歯車に対する係数 β は、SCM415浸炭歯車曲げ疲労試験において疲労強度を低下させない限界の切欠き深さ $a_{nth} = 6 \mu\text{m}$ と疲労強度906 MPaを知り、式(3)に代入して $\beta = 0.98$ を得ている(17)。

ここでは式(3)を試験歯車に適用して σ_{wl} を推定し、実験結果と比較する。まず試験歯車においてき裂が発生する可能性がある危険体積 V 中に予測される最大介在物寸法 $\sqrt{A_i}_{max}$ を算出する。危険体積 V は図7に示す歯元近傍において、以下の手順で求めることにする。

- (1) 本試験歯車と同一の諸元の歯車を用いた疲労試験におけるき裂発生範囲(16)から歯形方向の危険範囲の長さ l を求める。
- (2) 曲げ応力はHoferの30°接線位置近傍で最大となり、範囲 l の両端に向かって減少する。この応力分布を有限要素法で計算し、範囲の両端での応力値(危険応力値)を知る。
- (3) 範囲 l の歯形表面から深さ方向の応力分布を求め、(2)で求めた危険応力値となる深さを求める。この深さを結ぶ曲線で囲まれる図7に示す危険部分の面積 S を決定する。本試験歯車の場合、 $S = 0.88 \text{ mm}^2$ を得た。
- (4) S と歯幅 b の積を危険体積とする。

次に危険部分をデジタルマイクロスコップで観察し、視野中の最大の介在物の面積 A_i を測定する。検査視野数は $N = 50$ とした。測定した介在物を小さい順に並べ、その寸法を $\sqrt{A_i}_{max,j}$ ($j = 1 \sim N$)とする。これを図8に示すように横軸を $\sqrt{A_i}$ 、縦軸を基準化変数 y_j としてプロットし、直線近似を行う。ここで基準化変数は次式で表される。

$$y_j = -\ln \left(-\ln \frac{j}{N+1} \right) \quad (4)$$

Fig. 7 Dangerous volume of gear tooth

Fig. 8 Reduced variate of extreme values of inclusions

観察時の視野面積である検査基準面積 S_0 に、仮想的な厚さである測定した $\sqrt{A_i}_{max,j}$ の平均値を乗じて求められる検査基準体積 V_0

$$V_0 = S_0 \cdot \frac{\sum \sqrt{area}_{max,j}}{N} \quad (5)$$

と危険体積 V から、介在物の最大寸法を予測するために必要な再帰期間 T が得られる。

$$T = \frac{(V_0 + V)}{V_0} \quad (6)$$

このときの基準化変数は

$$y = -\ln \left(-\ln \frac{T-1}{T} \right) \quad (7)$$

となる。通常鋼と滑浄鋼について y を求め、図8より最大介在物寸法 $\sqrt{A_i}_{max}$ を予測したところ、それぞれ $28 \mu\text{m}$ 、 $14 \mu\text{m}$ が得られた。

4.2 強度推定の考察 表3に示したように電解研摩後の H_s と σ_R がほぼ等しいので、 $H = 700 \text{ Hv}$ 、 $\sigma_R = -284 \text{ MPa}$ を与えて、式(4)より疲労強度の下限値 σ_{wl} を推定する。 σ_{wl} と $\sqrt{A_i}$ の関係を図9に示す。比較のために村上が提案した式(2)を用いて計算した強度も合わせて示す。また、村上は σ_{wl} の推定誤差は約15%と示している。浸炭鋼のような硬い材料ではさらに誤差は大きくなると思われる。浸炭歯車に対する強

Fig. 9 Relation between estimated fatigue strength and inclusion size $\sqrt{A_i}$

度推定式の誤差範囲については十分検討を行っていないが、同じく15%と仮定してそれらの範囲を図中に合わせて示す。

前節で推定した最大介在物寸法に対して実験で求めた疲労強度を図9中に丸プロットで示す。これらはステアケース法で求めた破壊確率50%における疲労強度である。疲労強度のばらつきは正規分布に従い、平均値を中心に $\pm 3\sigma$ (σ は標準偏差)の範囲に99.7%の確からしさで分布するので、 σ_{wl} に相当する値は $\sigma_u - 3\sigma$ で近似できると考えた。図中に $\pm 3\sigma$ の範囲を示してある。 σ は既報⁽¹²⁾において求めた $\sigma = 60$ MPaに等しいと仮定すると、図より、 $\beta = 0.98$ では清浄鋼の場合は σ_{wl} の誤差範囲内に $\sigma_u - 3\sigma$ が存在し、通常鋼の場合には推定値の方がわずかに大きく推定誤差は22%であった。一方、式(2)を用いた推定では通常鋼歯車、清浄鋼歯車ともに σ_{wl} は $\sigma_u - 3\sigma$ よりも大きい値を示す。これより著者らが提案した式(3)を用いた強度評価は妥当なものであり、高 cleanliness 化の効果を定量的に評価することができた。

5. 結 言

清浄鋼と通常鋼を用いた浸炭歯車の疲労試験を行い、曲げ強度を評価した。得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 同一条件の浸炭焼入れを行った場合、酸素含有量の違いが硬さ分布、残留応力および浸炭焼入れによる表面異常層の分布に影響を与えることはなく、異常層を有する歯車の曲げ疲労強度はほぼ同等である。
- (2) 表面異常層を除去すると、清浄鋼歯車は通常

鋼歯車に比べ28%高い疲労強度を示し、大型介在物含有量の低減が疲労強度向上に有効である。

- (3) き裂発生位置の歯元応力分布に基づいて、危険体積を求める方法を示し、その中に含まれる介在物の最大寸法に着目した強度推定を行った。その結果、実験値に近い強度が得られ、高 cleanliness 化の効果を定量的に評価することができた。

謝 辞

試験歯車の材料は山陽特殊製鋼(株)に提供頂き、技術企画部佐藤紀男氏のご協力を頂いた。また浸炭焼入れは同和鋳業(株)熱処理事業部辻隆治氏にお引き受け頂いた。ご厚意に深く感謝する

文 献

- (1) Okada, Y., et al., *SAE1992 Trans. J. Passenger Cars*, Sect. 6, **101** (1992), 948-957.
- (2) 小川一義・浅野高司・鈴木憲一・相原秀雄・下田健二, 機論, **61**-582, A (1995), 233-238.
- (3) Wern C., et al., *Proc. DETC'00* (2000), DETC2000/PTG-14445 (CD-ROM).
- (4) 井上克己・前原利之・山中将・加藤正名, 機論, **54**-502, C (1988), 1331-1337.
- (5) 柳晟基・井上克己・加藤正名・大西昌澄・下田健二, 機論, **50**-572, C (1994), 1391-1396.
- (6) 西森博・増田孜・川上潔・古村恭三郎・橋爪一弘, 日本金属学会会報, **32**-6 (1993), 441-443.
- (7) 林亮二・濱田兼彰・小林一博・佐藤紀男, 山陽特殊製鋼技報, **2**-1 (1995), 22-27.
- (8) 香川裕之・石黒守幸・松本和明・久松定興, N K K 技報, **144** (1993), 26-31.
- (9) Masuyama, T., Kato, M., Inoue, K., Yamashita, T., *Proc. DETC'00* (2000), DETC2000/PTG-14381 (CD-ROM).
- (10) *AGMA 218.01* (1982), 30.
- (11) 戸部俊美・加藤正名・井上克己・高津宣夫・森田功, 機論, **51**-465, C (1985), 1018-1025.
- (12) 戸部俊美・丸山昇, 機論, **47**-420, C (1981), 1065-1072.
- (13) Tobe, T., Kato, M., Inoue, K., *Proc 5th World Cong. Theory Mach. Mech.*, **2** (1979), 1105-1108.
- (14) Little, R. E., *ASTM STP*, **511** (1972), 29-42.
- (15) 村上敬宜, 金属疲労: 微小欠陥と介在物の影響, (1993), 54-130, 養賢堂.
- (16) 井上克己・鄧鋼・加藤正名, 機論, **55**-514, C (1989), 1488-1493.
- (17) Deng, G., Masuyama, T., Kato, M., Inoue, K., *JSME Int. J.*, **43**-2, C (2000), 432-438.