

浸炭鋼のピッチング強度解析と寿命予測

鈴木智博，小川一義，堀田昇次

Evaluation and Life Prediction of Pitting for Carburized Steel

Tomohiro Suzuki, Kazuyoshi Ogawa, Shoji Hotta

要 旨

駆動系に用いられる浸炭歯車のピッチング（歯面の剥離損傷）は多くの要因が複雑に影響する現象であり，そのメカニズムは未だ不明確である。本報では，浸炭鋼のピッチングに影響する要因として材料要因では浸炭異常層，表面粗さ，硬化層硬さ，圧縮残留応力に，運転要因ではすべり，潤滑油温度と粘度に着目して，その影響およびメカニズムをローラ試験により明らかにした。また，ローラ試験結果の歯車への適用方法も考察した。

ピッチングは表面起点型と内部起点型の両方が発生することが判明したので破壊形態ごとに整理

した結果，内部起点型の場合，せん断応力と，硬さから換算されるせん断疲労強度の比の最大値からピッチング寿命を予測できることが明らかになった。また，表面起点型の場合，ショットピーニングの影響は表面粗さ，硬化層硬さ，圧縮残留応力の影響として分離できること，これらの影響と浸炭異常層の有無，すべり率によって寿命を予測できることが明らかになった。さらに，ローラ試験による寿命予測式を歯車に適用する方法，すなわち，歯面内のピッチング寿命分布を計算する方法を提示した。

キーワード

歯面，強度，疲労，浸炭鋼，ピッチング，転がり接触，寿命予測

Abstract

In order to elucidate the mechanism and factors of tooth face pitting, roller tests were carried out. In the tests, the oxidized-nonmartensitic layer, surface roughness, case hardness and residual compressive stress were noted as material factors, and sliding, oil temperature and viscosity were as running condition factors. As a results, the pitting could be classified into two forms according to crack origin; subsurface origin pitting and surface origin pitting. In the case of subsurface origin pitting, the pitting life coincides

with the value estimated from shear stress and shear strength relating to Vickers hardness. In the case of surface origin pitting, the influence of shot peening could be regarded as a pile of influences of surface roughness, hardness and residual compressive stress. These factors of shot peening, the existence of the oxidized-nonmartensitic layer and specific sliding determined the life of surface origin pitting. The life of tooth face pitting could be calculated using these results of the roller tests.

Keyword

Tooth surface, Strength, Fatigue, Carburizing steel, Pitting, Rolling contact, Life prediction

1. はじめに

自動車の駆動系歯車はエンジンの高出力化ともなう高容量化と、小型・軽量化を両立する必要があり、疲労強度設計法や疲労強度向上法が重要である。歯車の疲労損傷は主に、歯元の曲げ応力の繰返しによる折損と、歯面の接触応力の繰返しによる剥離損傷 - ピッチング - の二つに分けられる。自動車の駆動系に多く用いられる浸炭歯車の疲労は従来、表面が硬いので歯面の摩耗や剥離は起きにくく、歯元曲げ折損が多かった。ピッチングはどちらかといえば、調質鋼等の低～中硬度の歯車で問題であった。しかし近年は、ショットピーニング（以後、ショットと略す）の採用などにより歯元強度が向上して¹⁻⁴⁾歯元曲げ折損が減り、かわって、浸炭歯車でもピッチングの発生が増えている¹⁾。

自動車用浸炭歯車のピッチングに対して考慮すべき要因として、材料面では浸炭異常層（以後、異常層と略す）、表面硬化層の硬さおよび表面から内部にかけての硬さ分布、ショットが挙げられる。一方、負荷条件では、歯面上のすべり、潤滑油やその温度が挙げられる。ピッチングについては従来、低～中硬度材の研究⁵⁾が多く、浸炭鋼のような表面硬化材の研究は比較的少なく、まだ不明確な点が多い。

本報はそこで、ローラ試験により浸炭鋼のピッチングについて検討する。この場合、ピッチングは内部起点型と表面起点型があることがわかったので、それぞれの形態について上記の要因の影響およびメカニズムを明らかにする。また、ローラ試験の結果からピッチングに対する寿命予測法を作成し、歯車への適用を検討する。

2. 実験方法

2.1 試験法と試験片

歯面のピッチングを評価するには、歯車を用いる実験もあるが、本報では要因の影響を明確にしやすいローラ試験を選択した。本報で用いるローラ試験片の接触状態の概略をFig. 1に示す。試験ローラの接触面の直径は $\phi 24\text{mm}$ 、相手ローラは $\phi 96\text{mm}$ である。ローラ径は表面下の応力状態に影響

するので、ローラと相手ローラの相対曲率は自動車トランスミッション用歯車歯面の相対曲率に相当するように設定した。試験面の接触幅は 4mm で、クラウニングはつけていない。これは、試験中にクラウニング形状が変わって応力が変化することを避けるためである。なお、端部の応力集中を防ぐために面取りをし、さらに角部はR1としている。

試験片の供試材には、代表的な歯車材の1つであるSCr420肌焼鋼を用いた。素材の化学成分をTable 1に示す。Table 1に示すように本報では、通常のSCr420肌焼鋼と比べてP, S, O量が少ない高纯净度鋼を用いている。これは、一般的に疲労強度に影響するといわれる非金属介在物を減らし、目的とする要因の影響を明確にするためである。供試材をFig. 1に示す形状に機械加工した後、浸炭焼入れ焼戻しを施す。

試験ローラは歯車を介してインバーターモータによって駆動される。相手ローラも同じモータか

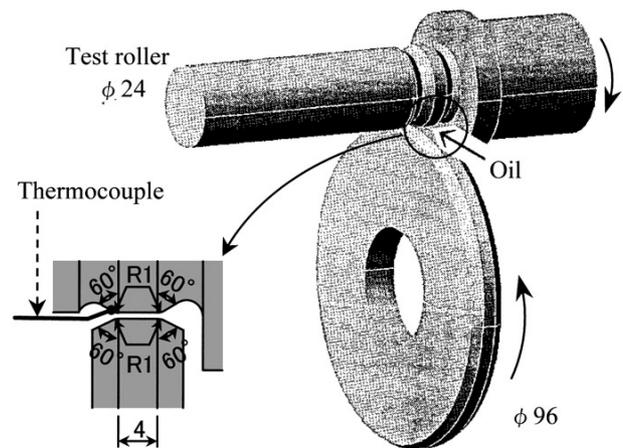


Fig. 1 Schematic of specimen.

Table 1 Chemical composition (wt%).

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	O
0.21	0.24	0.85	0.01	0.01	0.01	0.03	1.17	0.01	0.0008

ら歯車を介して駆動されるので、相手ローラの駆動歯車を交換するとすべり率を設定することができる。また、試験面の潤滑としてFig. 1に示すように、温度を調整した潤滑油を試験ローラ接触部にかみ込むように毎分400～500mlを注いでいる。なお、ピッチング発生の検知には加速度センサを用いている。

2.2 実験条件

Table 2には、本報で用いるローラ試験の標準条件を示す。要因解析実験には、この条件を基本として、種々のピッチング要因に関する実験条件を変化させて実験を行った。次に取りあげる要因と、その影響を把握するために変化させる実験条件について、箇条書きで述べる。

(1) 材料要因

・浸炭異常層：標準条件では浸炭のままに実験に供するので、試験片表面には異常層が存在する。そこで、比較のために化学研磨⁶⁾によって表面を

30 μ m研磨して異常層を除去した試験片の実験を行う⁷⁾。

・表面粗さ：熱処理前にショットを施すことにより、硬さや残留応力は標準状態と同じで表面粗さのみ4～16 μ mの範囲で調整した試験片の実験を行う⁷⁾。

・硬化層硬さ：浸炭焼入れ後の焼戻し温度を変えて製作した、硬化層硬さがHv450～760の試験片の実験を行う⁸⁾。

・残留応力：Table 3に示す種々の条件のショットを熱処理後に施し、残留応力分布を変えた試験片の実験を行う⁹⁾。

(2) 運転要因

・すべり：回転速度を500～5000rpm、すべり率を0～-82%の範囲で変えた実験を行う¹⁰⁾。

・潤滑油温度と粘度：供給温度を40～180°Cの範囲で変えた実験、および、Table 4に示す粘度の異なる潤滑油を用いた実験を行う¹¹⁾。

3. ピッチングの形態と発生条件

3.1 ピッチング形態と特徴

一連のローラ試験で発生したピッチングは、内部起点型と表面起点型の二つの形態に大別された。両形態の表面写真と断面曲線をFig. 2に示す。

内部起点型ピッチングでは、Fig. 2(a)の表面写真に見られるようにピッチングの底部は比較的平らで擦りのばされたようなせん断型の破面¹²⁾である。断面形状から、ピッチング部位の周囲は表面との段差が急で、底部は表面と平行であることがわかる。従って、内部起点型ピッチングは表面下のせん断応力によってき裂が表面と平行に発生・進展した後、表面とつながって剥離に至ると考えられる。

一方、表面起点型ピッチングは、表面の粗さ突起や潤滑油中の異物等が応力集中源となり、表面

Table 2 Normal conditions of the roller test.

Case hardness	Hv790
Surface roughness	2 μ m Ry
Rolling velocity of test rolles	2000 rpm
Specific slinding	-25%
Slip velocity	0.62 m/s
Lubricating oil	75W-90, GL-3
Lubricating temperature	80°C
Surface finishing	as Carburized

Table 3 Shot peening conditions.

Condition	Shot		Shot velocity, m/s	Coverage, %	Arc height, mmA
	Hardness Hv(300g)	Diameter, mm			
410/4	410	0.4	40	300	0.18
580/8	580	0.8	50		0.62
700/8	700	0.8	50		0.65
720/3	720	0.3	70		0.23
770/8	770	0.8	50		0.59
700/w	Condition 700/8 + 720/3 (Double peening)				

Table 4 Lubricating oil viscosity.

Lubricating oil		A	B	C	D
Kinematic viscosity, cSt	40°C	57	33	11	10
	100°C	9.7	6.5	2.7	2.6

あるいは表面極近傍からき裂が発生した後に内部へ進展し、ある程度進展すると再び表面とつながり剥離に至ると考えられる。Fig. 2(b)に示す表面写真では、起点から矢尻状の形態で放射状に広がっていることがわかる¹³⁾。断面形状では、表面の起点からある角度で内部に向かって段々と深くなっていることがわかる。

3.2 ピッチング形態を分ける発生条件

転がり接触下において、ピッチングは内部起点型と表面起点型のどちらの形態も発生する可能性がある。どちらの形態を示すかは、材料条件や負荷条件によって決まる。すなわち、与えられた条件に対して、ピッチング強度の低い形態が先に発生すると考えることができる。例えば、すべりや表面粗さが大きい場合、潤滑油に異物が多い場合などは表面起点型の強度が低くなるため、内部起点型が発生するより先に表面起点型が発生する。また、内部のせん断応力に対して硬さが不足している場合などは内部起点型の強度が低くなるので、内部起点型が先に発生する。

ピッチング要因と形態の関係をFig. 3に示す。この図では、右側は表面起点の強度が高く、下側は内部起点の強度が高いことを意味する。すなわ

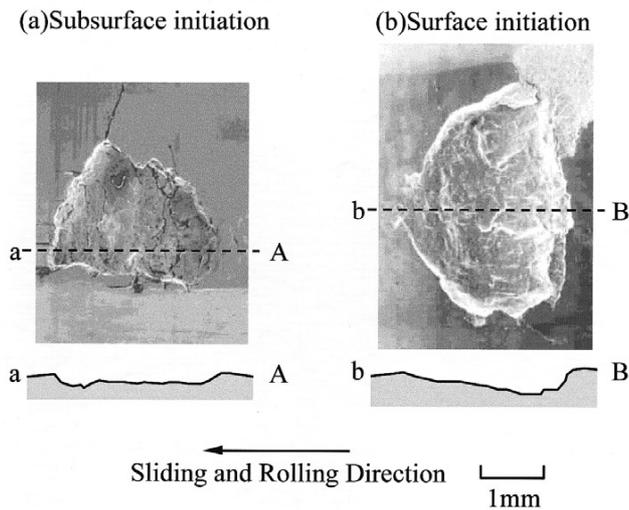


Fig. 2 Surface photographs and section profiles of two pitting forms.

ち、左下では表面起点型が発生しやすく、右上では内部起点型が発生しやすい。本報の実験範囲では、すべりが無い時¹⁰⁾と硬化層硬さの低い時⁸⁾に内部起点型ピッチングが得られた。前者は表面起点型に対する強度が高いので図の右側、後者は内部起点型に対する強度が低いので図の上側に相当すると考える。

4. ピッチング強度と寿命予測

4.1 せん断応力と硬さによる内部起点型の寿命予測

内部起点型ピッチングの強度は、表面性状等の影響がほとんど無い^{8, 10)}ので、表面下に発生する応力と材料強度から評価することができる。Fig. 2(a)に示すように、内部起点型の破面は表面と平行なせん断型なので、表面と平行なせん断応力成分 τ_{yz} ¹⁴⁾ をき裂発生させる作用応力と考える。この応力は深さ方向に分布を持つ。一方、浸炭鋼のような表面硬化材は深さ方向に材料強度の分布を持つ。Fig. 4に、ピッチングの剥離深さと表面

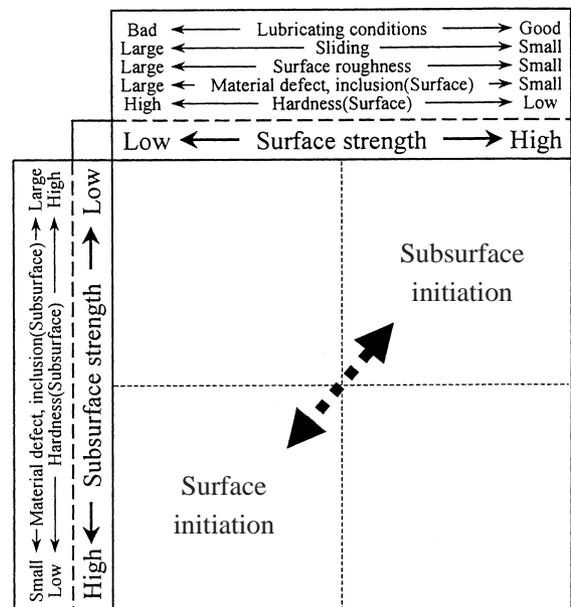


Fig. 3 The conditions deciding pitting form.

下のせん断疲労強度 τ_w 分布，せん断応力 τ_{yz} 分布の関係を示す。材料強度分布Aの場合では表面からの距離 d_A ，分布Bの場合では表面からの距離 d_B は材料強度に対してせん断応力が大きくなるので，内部起点型ピッチングに対する最も弱い深さと考えられ，Fig. 2(a)に示すピッチングの剥離深さと一致する。

せん断応力に対する材料強度は， 10^7 回寿命を示す強度を 10^7 回せん断疲労強度 τ_w とすると，硬さ H_v と引張強さや疲労強度の一般的な関係とミーゼスの関係¹⁵⁾ から，

$$\tau_w(\text{MPa}) = 0.94H_v \quad (1)$$

を得る¹⁰⁾。式(1)の関係線をFig. 5に示す。この図には，本報の高純度鋼を用いたローラ試験で得られた硬さとせん断疲労強度の関係，すなわち，ピッチング起点深さでの硬さ H_v と， 10^7 回寿命を示すHertz応力が作用するときの起点深さの τ_{yz} との関係⁸⁾ も併せて示す。Fig. 5において式(1)と実験点は良く一致する。従って，高純度鋼のように介在物などの材料欠陥が少ない場合，材料のせん断疲労強度は式(1)で表され，硬さ分布からせん断疲労強度を求めることができる。

Fig. 4に示すようにき裂は τ_w 分布に対して τ_{yz} が

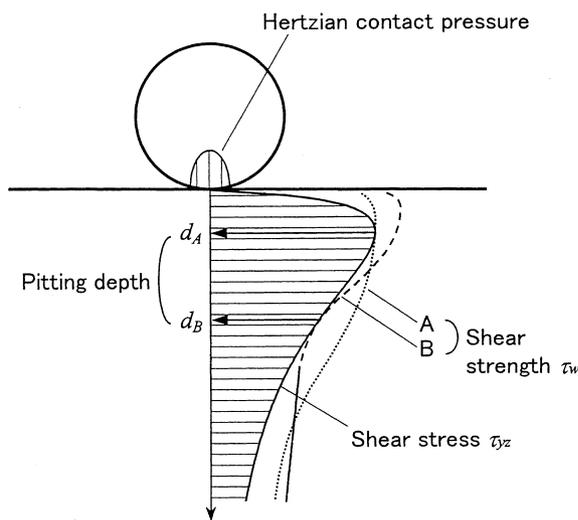


Fig. 4 Relationship between pitting depth d and shear stress τ_{yz} , shear strength τ_w .

一番大きい深さで発生するので， (τ_{yz} / τ_w) が表面下で最大となる深さをピッチング起点とし，その最大値によって寿命が決まると考えることができる。一般に作用応力 σ と寿命 N_f が両対数で直線関係にある場合は， $N_f = C \cdot \sigma^{-n}$ と表すことができる。従って，内部起点型の寿命 N_{fi} は，

$$N_{fi} = C_i \{ (\tau_{yz} / \tau_w)_{MAX} \}^{n_i} \quad (2)$$

と表すことができる。ローラ試験によって得られた内部起点型ピッチングの寿命を整理すると， $(n_i, C_i) = (-26, 1.2 \times 10^8)$ が得られる。

以上のことから，表面下に分布する (τ_{yz} / τ_w) の最大値を式(2)に適用すれば，内部起点型ピッチングの寿命 N_{fi} を予測することができる。

4.2 表面起点型に影響を及ぼす要因

表面起点型ピッチングは内部起点型と異なり，表面粗さや潤滑油といった表面性状等の影響を受ける。ローラ試験による実験解析で得られた要因の影響について，以下に箇条書きで述べる。

(1)材料要因

- ・浸炭異常層：異常層の存在する試験片ASCと化学研磨によって除去した試験片CPのローラ試験

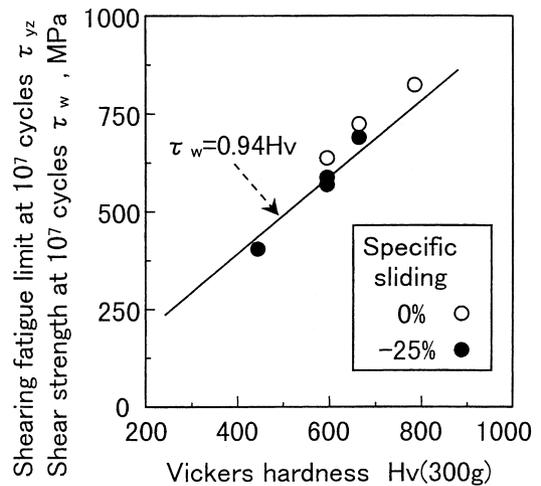


Fig. 5 Relationship between shearing fatigue limit at 10^7 cycles τ_{yz} , shear strength at 10^7 cycles τ_w and Vickers hardness.

の結果であるFig. 6において、CPの方が高強度であった。従って、異常層自体の強度は低い⁷⁾。

・表面粗さ：異常層が存在する場合は、異常層の変形・磨耗による表面粗さの変化を考慮する必要がある。異常層の有無および表面粗さの影響を検討した実験では、試験後に異常層が存在せず、かつ試験後表面粗さの小さい場合はピッチング強度が高い。すなわち、Fig. 7に示すように、ピッチ

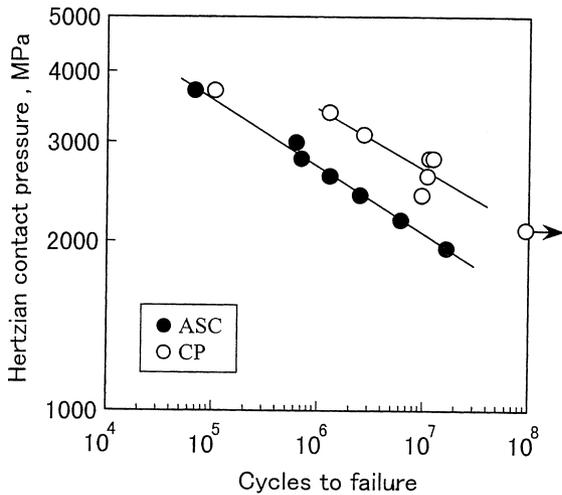


Fig. 6 Influence of oxidized and nonmartensitic layer.

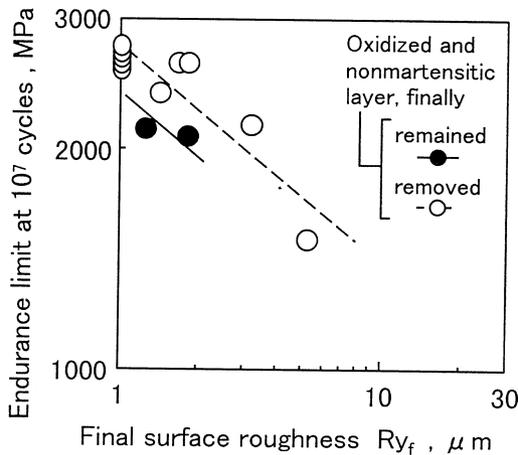


Fig. 7 Relationship between final surface roughness and endurance limit at 10⁷ cycles.

ング強度は試験後の浸炭異常層の有無と試験後の表面粗さによって決まる⁷⁾。

・硬化層硬さ：内部起点型の場合、硬さが高いほどピッチング強度は高い。しかし、表面起点型の場合、Fig. 8に示すように硬化層硬さが高いほどピッチング強度は低い⁸⁾。これは、一般の材料欠陥と同様に、硬過ぎると表面の粗さや油中の異物等に対して敏感になるので強度が低下するためと考えられる。また、硬さが低いほど表面起点型のピッチング強度は高くなるといえるが、あまり硬さが低いと内部起点型ピッチングが発生するようになるので、両方の破壊に対する強度がバランスする最適な値がある⁸⁾。

・残留応力：ショットを施すと圧縮残留応力とともに表面硬さ、表面粗さも変化する。このときのピッチング強度は、表面粗さ、残留応力、硬さの影響が重畳する結果になる。そこで、標準条件を基準としたショットによるピッチング強度の変化、試験後表面粗さの変化、表面硬さの変化、圧縮残留応力の変化をP, R, H, Sとし、先に得られた表面粗さと硬さの寄与度から、

$$P = R^{-0.44} \cdot H^{0.45} \cdot S^\gamma \tag{3}$$

γは圧縮残留応力の寄与度と考える⁹⁾。ショット品の実験結果を式(3)に適用した結果がFig. 9であ

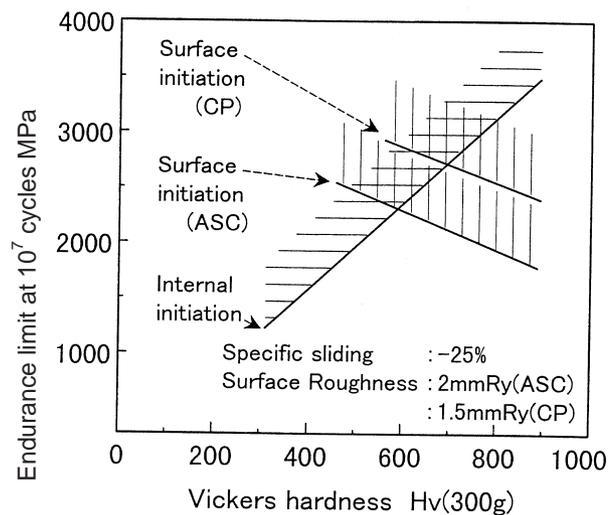


Fig. 8 Relationship between Vickers hardness and endurance limit at 10⁷ cycles.

る。この図の傾きから $\gamma = 0.29$ を得る。すなわち、圧縮残留応力はピッチング強度を向上させることが明確である。またショット品の結果から、比較的径が小さくて硬い粒子を高速でショットすると、表面粗さが余り大きくなり、かつ高い圧縮残留応力を付与することができるので、ピッチ

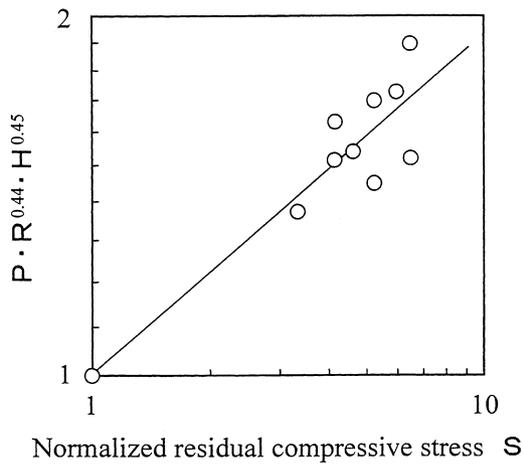


Fig. 9 Relationship between normalized residual compressive stress S and modified pitting strength $P \cdot R^{0.44} \cdot H^{0.45}$

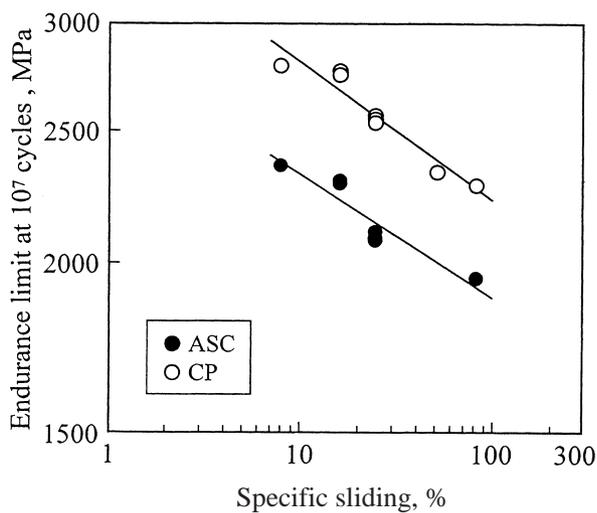


Fig. 10 Relationship between endurance limit at 10^7 cycles and specific sliding.

ング強度は向上する⁹⁾。

(2) 運転要因

・すべり：すべりなどの表面の転がり状態に関係の深い回転速度やすべり速度、すべり率、表面温度、接線力、油膜厚さに注目し、これらの因子と表面起点型ピッチング強度との相関を調べた結果、Fig. 10に示すようにピッチング強度はすべり率と相関が高いことが明らかである¹⁰⁾。表面の微小な粗さ突起が接触相手の粗さ突起と干渉して受ける繰返し損傷を表面突起の接触頻度 N_{asp} ¹⁶⁾とすると、これはすべり率に比例する。すなわち、すべり率に比例して表面粗さ突起の受ける繰返し損傷が多くなり、表面起点型のピッチング寿命が短くなると考える¹⁰⁾。

・潤滑油温度と粘度：潤滑油の温度上昇は材料の強度低下や潤滑油の粘度低下を引き起こす。本報の実験範囲では、潤滑油の温度が材料（浸炭鋼）の焼戻し温度近辺までであれば材料の強度低下は認められなかった。一方、潤滑油粘度の影響については、動粘度 ν によるピッチング強度の変化 P をFig. 11のように整理した結果、動粘度 ν が約5cSt以下になるとピッチング強度は低下することが明らかになった¹¹⁾。

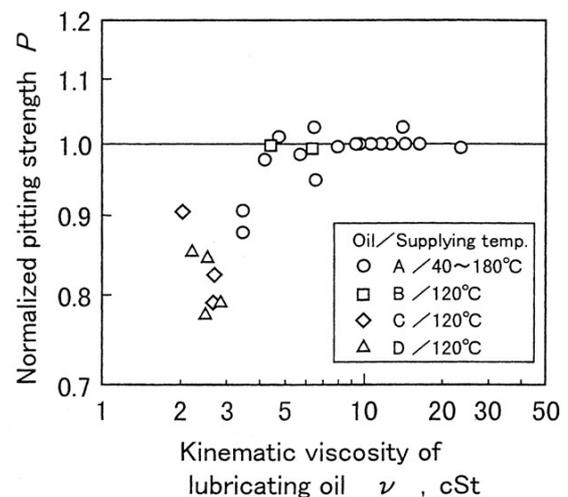


Fig. 11 Relationship between normalized pitting strength P and kinematic viscosity of lubricating oil ν .

4.3 表面起点型の要因の寄与度と寿命予測

表面起点型ピッチングは表面粗さや潤滑油といった表面性状等の影響を受けるので、内部起点型ピッチングのように表面下のせん断応力 τ_{yz} だけで評価することはできない。そこで、ここでは実験的に求めた要因の影響を、ピッチング寿命を修正する係数として整理する。

作用要因として挙げられる最大Hertz応力 p_{max} と寿命は、他の要因が同じであれば両対数で直線関係がある。すなわち、標準条件の p_{max0} と表面起点型のピッチング寿命 N_{fs0} は

$$N_{fs0} = C_{s0} \cdot p_{max0}^{ns} \quad (4)$$

である。

材料要因として浸炭異常層、表面粗さ、硬さ、残留応力の影響を前節で明らかにした。浸炭異常層は試験後に存在するか否かで強度が変わるので、それぞれの場合について寿命予測式を作成する。試験後表面粗さ R_{yf} 、硬さ Hv 、残留応力 σ_R の影響は、前節の式(3)と $\gamma = 0.29$ から、

$$P = R^{-0.44} \cdot H^{-0.45} \cdot S^{0.29} \quad (5)$$

である。S-N線図においてピッチング強度が向上することは、見かけ上作用応力が低下するとみなすことができる。従って、式(3)に P を導入して材料要因の影響を考慮すると、

$$N_{fs} = C_{s0} \cdot (p_{max} / P)^{ns} \quad (6)$$

となる。

運転要因としてすべりの影響と潤滑油温度、粘度の影響を明らかにした。すべりの影響は、表面突起の接触頻度 N_{asp} によって整理できる。これは、

$$N_{fs} = A \cdot p_{max}^{ns} / N_{asp}^{10} \quad (7)$$

と表すことができる。一方、潤滑油動粘度が5cSt以下になるとピッチング強度は低下するが、その粘度は潤滑油SAE75W-90で約140°Cに相当する。この温度は、耐久試験などの過酷な条件を除けば通常の使用では達しない温度である。すなわち、通常の使用を前提とすれば、潤滑油粘度のピッチング強度への影響はほとんど無いと考えることができる。

以上の表面起点型ピッチングに及ぼす要因の影響をまとめると、式(4)~(7)から、

$$N_{fs} = C_s \cdot (p_{max} / (R^{-0.44} \cdot H^{-0.45} \cdot S^{0.29})^{ns} / N_{asp} \quad (8)$$

を得る。この式では、定数 C_s を試験後に浸炭異常層が残る場合と、存在しない場合(あらかじめ除

去した場合を含む)について求めておけば、式(8)によって表面起点型ピッチングの寿命を予測することができる。ローラ試験によって得られた表面起点型ピッチングの結果から、異常層有無別の定数はそれぞれ、 $(n_s, C_s) = (-8.86, 4.76 \times 10^{36})$, $(-9.48, 2.16 \times 10^{39})$ である。

5. 歯面のピッチング寿命予測

浸炭鋼のピッチングに対して、内部起点型と表面起点型の破壊形態別にローラ試験による寿命予測式を作成した。これらの式を歯車歯面に適用する方法について以下に考察する。

表面起点型ピッチングの寿命は式(8)を用いて、運転要因であるHertz応力 p_{max} と表面突起の接触頻度 N_{asp} 、材料要因である試験後表面粗さ R_{yf} と硬さ Hv 、圧縮残留応力 σ_R から求められる。材料要因は歯面上でほぼ均一であっても、作用要因の p_{max} と、すべり率に比例する N_{asp} は歯面上で分布を持つ。従って、歯面上を分割した各点で式(7)による寿命を計算すれば、得られた予測寿命の最小値を歯面の表面起点型ピッチング寿命とみなすことができる。

自動車用歯車の例¹⁷⁾として、歯数46および26、モジュール2.00、圧力角17°、ねじれ角29°のはずば歯車対について、歯幅12mm、入力トルク300Nmとして久保と梅澤の方法¹⁸⁾によって接触応力を求め、材料は本報の標準条件と同じとして、表面起点型ピッチングの予測寿命を式(8)によって計算した例をFig. 12に示す。一般に表面起点型ピッチングは、正のすべり側より負のすべり側で発

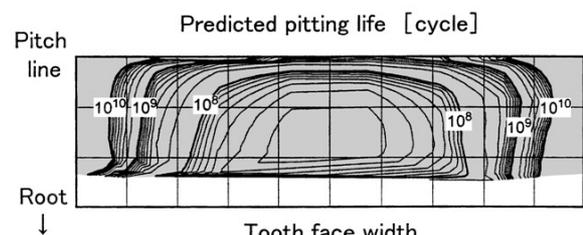


Fig. 12 Distribution of pitting life on the tooth face predicted by roller tests.

生しやすい。本報のローラ試験範囲も負のすべり側のみ実施した。そこで、Fig. 12の計算は負のすべり率側のピッチ線から歯元側のみ実施した。Fig. 12で得られた予想される表面起点型ピッチング寿命は 1.3×10^7 回であった。その位置はピッチ線より歯元側1mm弱であることがわかる。

一方、内部起点型ピッチングの寿命は式(2)に示すように、せん断応力 τ_{yz} とせん断疲労強度 τ_w から求めることができる。 τ_{yz} は表面に作用するHertz応力 p_{max} に比例し、 τ_w は硬さ H_v に比例するので、歯面上の p_{max} 分布と硬さの深さ方向分布から τ_{yz} / τ_w 分布を求めれば、その最大位置で内部起点型の寿命が決まると考えることができる。

6. おわりに

浸炭歯車歯面のピッチングを対象として、破壊のメカニズムおよび要因の影響をローラ試験によって解析した。また、これらの要因の影響を破壊形態別に寿命予測式としてまとめ、歯車への適用方法も提示した。実際の歯車では、研削方向や摩擦条件、あるいは温度条件など、ローラ試験と異なる場合や、ローラ試験の検討範囲を外れる場合が想定される。より広い範囲に対してローラ試験による寿命予測式を適用する場合には寿命予測式の修正が必要な場合もあるが、基本的にはこれらの方法で歯車歯面のピッチング寿命は予測できると考えられる。

本報の執筆にあたり、化学研磨については加工基盤研究室清水富美男技師、歯面の接触応力計算については機械力学研究室樽谷一郎副研究員に協力していただいた。

参考文献

- 1) 石井：熱処理, 30-5(1990), 240
- 2) 久松, 金沢：自動車技術, 41-7(1987), 722
- 3) 柳, 井上, 加藤, 大西, 下田：日本機械学会論文集C編, 60-572, (1994), 1391
- 4) 小川, 浅野, 鈴木, 相原, 下田：日本機械学会論文集A編, 61-582, (1995), 233
- 5) 例えば, 藤田, 吉田：日本機械学会論文集C編, 45-396, (1979), 936

- 6) 鈴木, 梶野, 清水：豊田中央研究所R & Dレビュー, 30-1(1995), 27
- 7) 鈴木, 小川, 堀田：日本機械学会論文集C編, 64-622, (1998), 2199
- 8) 鈴木, 小川, 堀田：日本機械学会論文集C編, 65-637, (1999), 3758
- 9) 鈴木, 小川, 堀田：日本機械学会論文集C編, 65-637, (1999), 3765
- 10) 鈴木, 小川, 堀田, 横川：日本機械学会論文集C編, 65-637, (1999), 3751
- 11) 鈴木, 小川, 堀田：日本機械学会講演論文集, 98-3, V, (1998), 95
- 12) 大塚, 森, 川村：日本機械学会論文集A編, 45-399, (1979), 1312
- 13) 村上, 栄, 市丸, 森田：日本機械学会論文集C編, 62-594, (1996), 683
- 14) 小長：豊田中央研究所R & Dレビュー, 24-2(1989), 13
- 15) 石橋：金属の疲労と破壊の防止, (1967), 19, 養賢堂
- 16) Hamer, J. C., Hutchinson, J. M., Olver, A. V., Sayles, R. S., Ioannides, E.: The British Gear Association Congress, (1991)
- 17) 米倉：自動車用歯車の製造の現状, 日本歯車工業会議, (1989), 2
- 18) 久保, 梅沢：日本機械学会論文集C編, 62-594, (1996), 683

(1999年8月25日原稿受付)

著者紹介



鈴木智博 Tomohiro Suzuki

生年：1967年。

所属：構造用材料研究室。

分野：金属材料および、その強度に関する研究。

学会等：日本機械学会会員。



小川一義 Kazuyoshi Ogawa

生年：1947年。

所属：構造用材料研究室。

分野：材料および機械要素の強度評価・解析に関する研究。

学会等：日本機械学会、日本材料学会、自動車技術会会員。

1991年日本材料学会技術賞受賞。



堀田昇次 Shoji Hotta

生年：1952年。

所属：構造用材料研究室。

分野：金属材料の疲労強度評価に関する研究。

学会等：1992年日本鋳物協会東海支部
奨励賞受賞。