ガス浸炭歯車の浸炭異常層が歯面強度に及ぼす影響*

吉 崎 正 敏^{*1}, 橋 本 忠^{*2}Effect of Abnormal Surface Layer on Tooth Surface Strength
of Gas Carburized Gears

Masatoshi YOSHIZAKI and Tadashi HASHIMOTO

The effect of abnormal surface layer produced by gas carburizing on the bending strength of gear tooth has already been reported, although the effect on the tooth surface strength has not been clarified. The authors carried out experiments to study the effect of abnormal surface layer on the tooth surface strength. The test gears with various conditions of abnormal surface layer used in this experiments were prepared by changing the machining process and the material of gears. As a result of experiments, the tooth surface strength of gas carburized gears is affected by the existence of abnormal surface layer. Within the limits of this experiments, it showed that the tooth surface strength of gears with abnormal surface layer is higher than that of gears without abnormal surface layer. Furthermore, it was observed that the quantitative effect of abnormal surface layer on the tooth surface strength is different from the conditions of abnormal surface layer, i.e. the uniformity and the hardness of slack quenching layer, and the production shape of intergranular oxidation. We concluded from the experiments that the suitable conditions of abnormal surface layer improve the tooth surface strength of gas carburized gears.

Key Words: Gear, Machine Element, Heat Treatment, Tribology, Tooth Surface Strength, Pitting, Spalling, Gas Carburized Gear, Abnormal Surface Layer, Intergranular Oxidation

1. 緒 言

動力伝達用歯車の代表であるトランスミッション歯車は、車両の軽量化、エンジンの高出力化に対応するため、さらなる高強度化を強いられている。トランスミッション歯車の強度を扱う上で、現在歯面強度向上はきわめて重要な課題である。これは、最近では高速道路の利用が増え、比較的低負荷における同一変速段の使用頻度が高くなったこと、特に商用車では車両寿命が延びていること、さらに材料、熱処理の改良およびショットピーニングの採用などにより歯車の歯元曲げ強度が向上したことで、トランスミッション歯車の寿命が歯面強度に支配されることが多くなってきたためである。

自動車のトランスミッション歯車には、ガス浸炭焼入れ処理が広く採用されている。ガス浸炭焼入れでは、浸炭ガス中の酸素の影響で、浸炭表層部に浸炭異常層

が生成される。浸炭異常層とは、結晶粒界酸化物とこれを包囲するように発生する不完全焼入れ層のことを称する⁽¹⁾。浸炭異常層が歯車強度に及ぼす影響に関しては、歯元曲げ強度を低下させる場合があることが報告⁽²⁾されているが、歯面強度に及ぼす影響は報告が少なく不明確である。

本研究では、加工工程と材質を変化させて浸炭異常層の生成状態が異なる歯車を作成し、同層が歯面強度に及ぼす影響を実験的に調べた。その結果、浸炭異常層は歯面強度に影響を及ぼし、同層以外の条件が同等であれば、歯面に浸炭異常層が存在する場合の方が、これがない場合よりも歯面強度が高くなる傾向が見られた。さらに、浸炭異常層が歯面強度を向上させる効果は同層の性状により異なり、歯面強度に有利に働く性状があることがわかった。本結果は、実用上、ガス浸炭歯車の歯面強度向上に有益であると思われるので、ここに報告する。

2. 試 験 歯 車

2.1 試験歯車 本実験に用いた試験歯車対は、歯直角モジュール 3.5、小歯車の歯数 31、大歯車の歯数 34、ピッチ円筒ねじれ角 23° のはすば歯車である。

* 1997年3月31日 第74期通常総会講演会および1998年4月2日 第75期通常総会講演会において講演、原稿受付1998年6月25日。

*¹ 正員、日野自動車工業(株)技術研究所 (☎ 191-8600 日野市日野台 3-1-1)。

*² 日野自動車工業(株)技術研究所。
E-mail: masatoshi.yoshizaki@hino.co.jp

歯形諸元を表1に示す。歯幅は30 mmであるが、歯元曲げ強度を低下させずに歯面の接触圧力を高めるために、駆動歯車には歯すじ方向に段差をつけて⁽³⁾、有効歯幅を5 mmにした。

Table 1 Dimension of test gear

	Driver	Follower
Normal module (mm)	3.5	
Normal pressure angle (deg.)	22.5	
Number of teeth	34	31
Helix angle (deg.)	23	
Addendum modification coefficient	-0.0174	-0.1595
Center distance (mm)	123	
Face width (mm)	30	
Effective face width (mm)	5	30

本研究では、表1に示す歯形諸元で、加工工程と材質を変化させた4種類の試験歯車対を用いた。表2を参照。これら4種類の試験歯車対において駆動歯車と従動歯車の加工工程および材質は同一である。

まず、歯面の浸炭異常層の有無が歯面強度に及ぼす影響を調べるために、歯切り、シェーピング加工、ガス浸炭焼入れの加工工程で作成した歯車（以下シェーピング歯車と称す）と、歯切り、ガス浸炭焼入れ、歯面研削の加工工程で作成した歯車（以下研削歯車と称す）を用意した。前者では歯面に浸炭異常層が存在するのに対して、後者では歯面の浸炭異常層は研削により除去されている。さらに、歯面に浸炭異常層が存在する場合に、浸炭異常層の生成状態の違いが歯面強度に及ぼす影響を調べるために、材質を変化させて生成される浸炭異常層の深さが異なる歯車を作成した。試験歯車に用いた材質は、クロムモリブデン鋼（SCM420H 鋼、以下M鋼と称す）と はだ焼き用マンガンクロムボロン鋼（Mn-Cr-B 鋼、以下B鋼と称す）の2種類である。B鋼はM鋼の代替材料として

実用化されている⁽⁴⁾ものであるが、M鋼に比べて浸炭異常層が深く生成される特徴を持っている。表3にB鋼とM鋼の化学組成を示す。B鋼はコスト高な Mo と Cr を減らして、焼入れ性確保のために Mn を増やし B を添加したものである。なお、いずれの材質の歯車も同一条件のガス浸炭焼入れをしている。

すべての試験歯車には最終加工工程でショットピーニングを施している。一般に浸炭焼入れのままの歯面と浸炭焼入れ後研削した歯面では、歯面近傍の残留応力の状態が異なる。歯面近傍の残留応力は歯面強度に影響を及ぼすことが報告⁽⁵⁾されているため、本研究では、各試験歯車において歯面近傍の残留応力をできるだけ同等にするために、最終加工工程でショットピーニングを施した。試験歯車の残留応力の測定結果については2.2節を参照。また、歯車誤差が歯面強度に及ぼす影響を除くため、いずれの試験歯車も精度を同等に仕上げ、JIS 1級程度とした。

試験歯車は表2に示す記号で表す。材質がM鋼のシェーピング歯車は M-Sh、材質がB鋼の同歯車は B-Sh、また材質がM鋼の研削歯車は M-Gr、材質がB鋼の同歯車は B-Gr とした。

2.2 試験歯車の性状 図1は、かみ合いピッチ点付近において歯面法線方向に測定した歯面の硬さ分布である。表面から深さ $d=0.1\text{mm}$ の位置における表面近傍の硬さは、各試験歯車において Hv732 ~ Hv787 の範囲にある。有効硬化層深さは、シェーピング歯車では $1.3\text{mm} \sim 1.4\text{mm}$ 、研削歯車では $1.1\text{mm} \sim 1.2\text{mm}$ で、研削歯車では歯面を研削した分、有効硬化層深さが浅くなっている。

図2は歯面の残留応力を測定した結果である。測定はX線応力測定法を用いて、かみ合いピッチ点付近の歯幅中央部で行った。応力の測定方向は歯形方向であ

Table 2 Test gears

	Gear pair I	Gear pair II	Gear pair III	Gear pair IV
Code of test gear	M-Sh	B-Sh	M-Gr	B-Gr
Heat treatment	Gas carburizing			
Tooth surface finishing	Shaving before carburizing		Grinding after carburizing	
Material (see table 3)	SCM420H	Mn-Cr-B steel	SCM420H	Mn-Cr-B steel
Surface treatment	Shot peening for the last machining process Shot particles : Diameter = 0.8mm , Hardness = Hv550 Peening condition : Ark height = 0.35mmA , Coverage = 200%			
Gear quality grade	JIS class 1			

Table 3 Chemical composition of test gear materials

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	B	Nb	Ti
Mn-Cr-B steel	0.18	0.28	1.19	0.023	0.017	0.58	—	0.0023	0.028	0.015
SCM420H	0.22	0.32	0.80	0.022	0.015	1.14	0.16	—	—	—

(wt.%)

る。歯の表面から歯面法線方向の残留応力分布を得るために、電解研磨を行い各深さにおける測定をした。図2によると、各試験歯車の残留応力は深さ方向にはほぼ同様の分布形態をしており、歯の表面における残留圧縮応力は $\sigma = -664 \sim -802$ MPa、表面から深さ $d = 20 \sim 40 \mu\text{m}$ の位置で残留圧縮応力が最大値を示し、その値は $\sigma = -818 \sim -933$ MPa である。

また、歯面あらさは、歯幅中央部で歯形方向に測定したところ、シェービング歯車では最大高さ $R_{\text{max}} = 2.0 \sim 3.1 \mu\text{m}$ 、研削歯車では $R_{\text{max}} = 1.6 \sim 2.2 \mu\text{m}$ であった。

Fig.1 Distributions of hardness at pitch point.

Fig.2 Distributions of residual stress at pitch point.

図3は本実験で用いたシェービング歯車のマイクロ組織である。実験前の試験歯車を歯直角方向に切断し、光学顕微鏡で観察した例で、浸炭異常層の代表的な生成状態を示す。各写真の上段と下段はそれぞれ同じ位置を観察したもので、下段の写真は観察面にナイトル腐食を施した場合である。不完全焼入れ層の深さは、材質がM鋼の歯車では $12 \sim 18 \mu\text{m}$ 、材質がB鋼の歯車では $22 \sim 24 \mu\text{m}$ であり、粒界酸化深さは、M鋼歯車では $14 \sim 18 \mu\text{m}$ 、B鋼歯車では $20 \sim 22 \mu\text{m}$ であった。また、図3下段の写真に示されるように、M鋼の不完全焼入れ層は深さ方向に不均一に生成されている。すなわち、M鋼では粒界酸化の周囲のみを覆うような鋭利な様相の不完全焼入れ層が見られ、不完全焼入れ層の深い部分と浅い部分が混在している。これに対してB鋼では、粒界酸化を広く覆うように、M鋼歯車に比べて均一で深い不完全焼入れ層が観察できる。一方、歯面を研削した歯車では、いずれの材質の歯車とも浸炭異常層は完全に除去されていた。

表4に本実験に用いた試験歯車の性状をまとめて示す。4種類の試験歯車に関して、硬度、有効硬化層深

Fig.3 Typical aspects of abnormal surface layer of shaved gears used in present experiments.

Table 4 Properties of test gears

	M-Sh	B-Sh	M-Gr	B-Gr
Surface hardness (depth = 0.1mm, Hv)	732	787	746	775
Effective case depth (mm)	1.4	1.3	1.2	1.1
Surface compressive residual stress (MPa)	-778	-664	-733	-802
Max. compressive residual stress (MPa)	-822	-933	-818	-911
Surface roughness (R_{max} , μm)	2.0 ~ 2.6	2.0 ~ 3.1	1.6 ~ 2.2	1.8 ~ 2.2
Depth of slack quenching layer (μm)	12 ~ 18	22 ~ 24	0	0
Depth of intergranular oxidation (μm)	14 ~ 18	20 ~ 22	0	0
Austenite grain size number	7 ~ 8	7 ~ 8	7 ~ 8	7 ~ 8

さ、残留応力、歯面あらさ、オーステナイト結晶粒度については、各歯車の測定値が同等もしくはその差が小さい。一方、浸炭異常層の生成状態、すなわち不完全焼入れ層の深さと均一さおよび粒界酸化の深さは、材質の異なる試験歯車で差が見られる。

3. 実験条件

実験には動力循環式歯車試験機を用いた。試験歯車の回転数は従動歯車回転数 $n_f=1500$ rpm である。潤滑油には表 5 に示す性状のギヤ油を用いて、かみこみ側より強制給油し、吹き付け油温は $90\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、吹き付け油量は 2.0 l/min に制御した。

Table 5 Lubricating oil

Base oil	Mineral oil	
Kinematic viscosity m^2/s	40 $^{\circ}\text{C}$	86.8×10^{-6}
	100 $^{\circ}\text{C}$	10.4×10^{-6}
Specific gravity (15/4 $^{\circ}\text{C}$)	0.889	
Viscosity index	102	
API service classification	GL 4	

本実験では、初めになじみ運転を行い、その後一定のトルクを負荷してピッチングまたはスポーリングによる歯面損傷が発生するまで耐久運転をした。なじみ運転は、低負荷から耐久運転時のトルクまで決められたトルク段階で負荷を増やしていく方式⁽³⁾とした。各トルク段階での繰返し数は $N_f = 2.0 \times 10^4$ である。耐久運転中は、一定繰返し数毎に歯面の摩耗量の測定と歯面状態の観察を行った。摩耗量の測定では、試験歯車を取り外して脱脂・洗浄後、高精度重量計を用いて駆動歯車と従動歯車の重量を計測し、前回の測定値からの差を歯面の摩耗量とした。測定精度は $\pm 1\text{ mg}$ である。なお本実験における歯面強度限界の決定法は、灰塚⁽⁶⁾らの方式にしたがっている。

4. 実験結果および考察

4.1 歯面強度 図 4 に歯面強度の測定結果を示す。図の縦軸はピッチ点におけるヘルツ圧力 p_H 、横軸は従動歯車の繰返し数 N_f である。この N_f にはなじみ運転は含まれていない。図中の矢印は歯面に損傷が起きず、実験を打ち切ったことを示す。図 5 の棒グラフは、図 4 に示した結果のうち、ヘルツ圧力 $p_H = 2.13\text{ GPa}$ の場合における歯面強度寿命 N_f を、各試験歯車で比較したものである。図 6 は実験後の歯面を観察した例で、歯面に発生したスポーリングを示す。

まず、歯面に浸炭異常層が存在する歯車と同層がない歯車の歯面強度を比較する。材質が M 鋼の場合、シェーピング歯車と研削歯車の歯面強度を比べると

Fig.4 Experimental results of tooth surface strength.

Fig.5 Comparison of surface fatigue life of test gears at hertzian pressure $p_H=2.13\text{ GPa}$.

Fig.6 Typical damages on tooth surfaces after durability test.

(M-Sh と M-Gr) , 歯面に浸炭異常層が存在するシェーピング歯車の歯面強度は、歯面に浸炭異常層がない研削歯車よりも高い傾向が見られる。しかしその差は小さい。一方、材質がB鋼の場合では(B-Sh と B-Gr) , 歯面に浸炭異常層がない研削歯車よりも、歯面に浸炭異常層が存在するシェーピング歯車の方が歯面強度が高い。特に低負荷領域でこの差が大きい。一般に量産歯車では、歯面仕上げが研削の場合とシェーピングの場合で歯面精度が異なる。しかし前述のように、本試験歯車ではいずれの歯面仕上げの歯車も精度を同等にしているため、本実験結果には歯面誤差の影響は含まれていない。加えて、本実験に用いた4種類の試験歯車に関して、硬度、有効硬化層深さ、残留応力、歯面あらさには大きな差は認められない。よって、M-Sh と M-Gr および B-Sh と B-Gr の歯面強度差は、歯面の浸炭異常層の有無に起因するといえる。本実験の範囲において、歯面の浸炭異常層は、これがない場合に比べて歯面強度を向上させている。

次に歯面に浸炭異常層が存在する歯車で、材質がM鋼の場合とB鋼の場合の歯面強度を比較する。すなわちシェーピング歯車に着目すると(M-Sh と B-Sh) , M鋼歯車とB鋼歯車で歯面強度が異なり、B鋼歯車の歯面強度がM鋼歯車よりも高い。特に低負荷領域でこの傾向が顕著であり、高負荷領域では両者の差は小さい。一方、歯面の浸炭異常層を除去した歯車、すなわち研削歯車(M-Gr と B-Gr) では、M鋼歯車とB鋼歯車の歯面強度に差は見られない。このことから、ここで示されたM-Sh と B-Sh の歯面強度差は、浸炭異常層の影響が大きいといえる。すなわち、浸炭異常層が歯面強度に及ぼす影響は、同層の性状により大きく異なる。前述のように、M鋼歯車とB鋼歯車では、不完全焼入れ層の深さと均一さおよび粒界酸化の深さに差異があることがわかっている。歯面強度に影響を及ぼす浸炭異常層の性状に関しては、4.3 節以降で引き続き考察する。

4.2 歯面の摩耗量 図7は歯面の摩耗量を測定した結果例で、ヘルツ圧力 $p_H = 1.89$ GPa の負荷で耐久運転を行った場合のものである。図の縦軸が表す積算摩耗量 W は、駆動歯車と従動歯車の摩耗量の和をなじみ運転後から積算したものである。横軸は従動歯車の繰返し数 N_f で、この N_f にはなじみ運転は含まれていない。測定結果によれば、B鋼シェーピング歯車(B-Sh) の摩耗曲線の傾向が他の試験歯車と異なるが、B-Sh 以外の3種類の試験歯車では摩耗曲線の傾向はほぼ等しい。B-Sh では、運転開始から繰返し数 $N_f \approx 1.2 \times 10^7$ までの範囲で摩耗曲線の傾きが

大きく、歯面の摩耗が進行している。しかし $N_f \approx 1.2 \times 10^7$ を過ぎた後の摩耗曲線の傾きは、他の3種類の試験歯車とほぼ等しい。図7に示した実験において、荷重、回転数および潤滑条件は一定である。そのため、B-Sh に見られる摩耗傾向の相違は、試験歯車の歯面性状の違いに起因する。

Fig.7 Wear curves of test gears at hertzian pressure $p_H = 1.89$ GPa.

4.3 不完全焼入れ層の硬度と歯面のなじみ性

図8は歯面に浸炭異常層が存在する歯車(M-Sh と B-Sh) について、微小硬度計を用いて不完全焼入れ層の硬度を測定した結果である。実験前の歯面を歯直角方向に切断し、表面から約 $10 \mu\text{m}$ の深さにおいて、歯の断面方向から測定した。圧子荷重は 0.098N で、測定時に化学腐食は施していない。測定値にばらつきがあるが平均値で比較すると、不完全焼入れ層の硬度は、B鋼歯車では Hv363, M鋼歯車では Hv487 である。一方、浸炭異常層直下の浸炭硬化層硬度は、両鋼で大きな差はなく Hv 732 ~ 787 であった。一般に不完全焼入れ層は浸炭硬化層より低硬度であるが、材質により不完全焼入れ層の硬度はかなり異なることがわかった。B鋼歯車の不完全焼入れ層はM鋼歯車に比べて硬度が低く、表面から約 $10 \mu\text{m}$ の深さにおいて、その差は Hv 約 120 である。

Fig.8 Hardness of slack quenching layer at the depth below surface $d \approx 10 \mu\text{m}$.

図9は歯面のX線半価幅を測定した結果である。歯の表面から、電解研磨を行いながら、歯面法線方向の分布を測定した。鋼が焼入れにより硬化されると、マルテンサイトによる微視的歪みによりX線半価幅が広がる。一方、これを焼き戻して軟らかくするとX線半価幅は狭くなる⁽⁷⁾。このようなX線半価幅と硬さとの関係を利用して、実験的に両者の相関を求め、硬度の測定法として活用される例⁽⁸⁾がある。表面硬度を測定する際、圧子により圧痕を付ける方式で試料の表面方向から測定を行うと、深さ方向に硬度勾配がある場合には正確な結果が得られない。そこで、本研究では各試験歯車における歯面極表層部の硬度を相对比较するために、X線半価幅を測定してこれを代用特性とした。図9によれば、歯の表面から深さ $d=20\mu\text{m}$ の範囲におけるX線半価幅はM-ShとB-Shで大きな差が見られ、特に表面においてB-ShのX線半価幅値が小さい。これは歯の表面付近において、B-Shの不完全焼入れ層硬度がM-Sh比べてかなり低いことを示している。図7に示した歯面の摩耗量の測定結果によれば、M-ShとB-Shで摩耗曲線の傾向が異なり、耐久運転開始後から一定繰返し数の範囲においてB-Shの摩耗量が大きい。この摩耗傾向の差は、両歯車における歯面の表面付近の硬度差、すなわち不完全焼入れ層の硬度差に起因していると考えられ、加えて不完全焼入れ層の厚さの差も影響していると考えられる。

Fig.9 Distribution of half value breadth on tooth surface before test.

前述のように、本実験の範囲において、歯面の浸炭異常層は、これが無い場合に比べて歯面強度を向上させることがわかったが、その原因の一つは、不完全焼入れ層が軟質であるため歯面のなじみ性を良好にするためであると考えられる。図10は実験前と耐久運転初期で歯面あらさを比較したものである。ここで耐久運転初期とは、3章で述べたなじみ運転を行った後、ヘル

ツ圧力 $p_H=2.13\text{ GPa}$ の負荷で、繰返し数 $N_f=2.0\times 10^6$ 回運転した場合を示す。歯面に浸炭異常層が存在する歯車(M-ShとB-Sh)では、実験前の歯面あらさが $R_{max}\approx 2.2\mu\text{m}$ であったが、前述の条件で運転後には $R_{max}\approx 0.8\mu\text{m}$ に減少している。一方、歯面に浸炭異常層がない歯車(M-GrとB-Gr)では、実験前後の歯面あらさは $R_{max}\approx 2.0\mu\text{m}$ および $R_{max}\approx 1.3\mu\text{m}$ であり、歯面あらさの減少量は歯面に浸炭異常層が存在する歯車よりも小さい。この結果から、軟質な不完全焼入れ層が歯面のなじみを促進していることがわかる。

Fig.10 Variations in tooth surface roughness before and during durability test

4.4 粒界酸化部の観察 図11は歯面に浸炭異常層が存在する歯車(M-ShとB-Sh)について、実験前の歯面をバフでごく軽く研磨後、歯面を走査型電子顕微鏡(SEM)で観察したものである。化学腐食は施していない。歯面の極表層部を除去すると、SEM像では黒く見られる部分が観察できる。この部分をEPMAで面分析した結果、Si, Mn, CrおよびOの濃縮が見られ、結晶粒界に生成された酸化物、すなわち粒界酸化であることを確認した。B鋼とM鋼ではこの粒界酸化の生成形態に特徴的な差異が見られる。すなわち、M鋼では結晶粒界に沿って連続状に酸化物が生成されているのに対し、B鋼では点列状に生成されている。一方、図12は実験前の歯面を歯直角方向に切断して、断面をSEMで観察したものである。

化学腐食は施していない。き裂状の様相を呈した粒界酸化が見られる。図 11 に示した歯の表面方向からの観察と同様に、粒界酸化の生成形態は、M鋼では連続状であるのに対し、B鋼では点列状である。

B鋼の粒界酸化が点列状に生成する機構については明確でなく今後の研究課題であるが、B鋼に添加されている Boron は結晶粒界に集中しやすく⁽⁹⁾、この結晶粒界に集中した Boron が粒界付近における酸化抑制に何らかの作用を及ぼし、酸化物が点列状に生成されるものと思われる。

4.5 耐久運転前後の歯面の観察 図 13 は歯面に浸炭異常層が存在する歯車 (M-Sh と B-Sh) について、実験前の歯面を SEM で観察したものである。試験歯車にはショットピーニングを施してあるため、歯面がショット粒の衝突でつぶされているのが観察できる。歯面の変形は、M鋼歯車に比べてB鋼歯車が顕著である。この観察からも、歯の表面硬度、すなわち不完全焼入れ層の硬度は、M鋼歯車よりB鋼歯車の方が低いことがわかる。

図 14 および図 15 は、図 13 に示した歯車を耐久運転した後に、歯面を SEM で観察したものである。各写真において、上下が歯形方向で上が歯先である。図 14 は耐久運転初期の歯面で、3章で述べたなじみ運転を行った後、ヘルツ圧力 $p_H = 2.13$ GPa の負荷で、繰り返し数 $N_f = 2.0 \times 10^6$ 回運転したものである。いずれの材質の歯車も目視では歯面に損傷は認められなかったが、拡大すると微小な損傷が発生している。また、部分的に図 11 に示した粒界酸化が見られる。微

小損傷の発生状態をB鋼歯車とM鋼歯車で比較すると、M鋼歯車では結晶粒界に沿って、すなわち連続状に生成している粒界酸化に沿って、結晶粒単位ではなく離を起しているのが観察できる。一方、B鋼歯車では結晶粒界とは関係なく、歯すじ方向に微小き裂が発生している。この観察から、M鋼歯車において連続状に生成している粒界酸化は、B鋼歯車の点列状な粒界酸化に比べて、微小損傷の起点になりやすいことがわかる。

図 15 は、ヘルツ圧力 $p_H = 2.13$ GPa の負荷で耐久運転終了後の歯面である。B鋼歯車は $N_f = 2.9 \times 10^7$ 運転の後、実験を打ち切ったもので、目視では歯面に損傷は認められなかった。M鋼歯車は $N_f = 1.1 \times 10^7$ で歯面にスポーリングが発生し強度限界に至ったもので、ここでは目視で歯面損傷が認められない部分を観察している。拡大すると、いずれの歯面にも微小損傷が見られる。B鋼歯車の歯面は全体的に滑らかな様相

Fig.11 Intergranular oxidation of shaved gears. Scanning electron micrographs of tooth surfaces after light polishing. (Not etched)

Fig.12 Intergranular oxidation of shaved gears. Scanning electron micrographs of cross-sections. (Not etched)

Fig.13 Tooth surfaces of shaved gears before test.

Fig.14 Tooth surfaces of shaved gears during durability test. Hertzian pressure $p_H = 2.13$ GPa. Number of cycles $N_f = 2.0 \times 10^6$.

Fig.15 Tooth surfaces of shaved gears after durability test. Hertzian pressure $p_H = 2.13$ GPa.

であるのに対し、M鋼歯車の歯面は微小損傷が多く発生し、荒れている。この観察からもB鋼歯車の歯面のなじみ性がM鋼歯車よりも良好であることがわかる。

4・6 歯面強度に影響を及ぼす浸炭異常層の性状

以上の実験および観察結果から、歯面強度に影響を及ぼす浸炭異常層の性状として次のものが挙げられる。

- (1) 不完全焼入れ層の深さ
- (2) 不完全焼入れ層の均一さ
- (3) 不完全焼入れ層の硬度
- (4) 粒界酸化の発生形態
- (5) 粒界酸化の深さ

本実験の範囲から、歯面強度に及ぼすこれらの作用について考察すると次のようになる。歯面に不完全焼入れ層が存在すると、浸炭硬化層に比べて軟質なこの層が歯面のなじみ性を向上させる。さらに、耐久運転初期において歯面に微小損傷の発生が観察されたが、軟質な表面層が摩耗することで、微小損傷が進展する前にこれが削り取られその進展が阻止される。しかし、同じく歯面に不完全焼入れ層が存在する場合でも、M鋼歯車はB鋼歯車よりも歯面強度が低い。この原因として次の3点が考察できる。まず、M鋼歯車ではB鋼歯車に比べて不完全焼入れ層の硬度が高いこと。特に歯の表面付近の硬度がB鋼歯車より高いため、M鋼歯車では運転開始直後のなじみ性が劣る。また、前述の摩耗による微小損傷進展の抑制効果もB鋼歯車に比べてM鋼歯車が劣る。次に、M鋼歯車において連続状な形態で生成している粒界酸化が、B鋼歯車の点列状な形態の粒界酸化に比べて微小損傷の起点になりやすいこと。さらに、M鋼歯車の不完全焼入れ層は深さ方向に不均一で鋭利な様相をしており、歯面の摩耗が進行すると高硬度な浸炭硬化層と低硬度な不完全焼入れ層が混在するため、低硬度部で微小き裂が発生し、これが進展しやすいと推測できること、が挙げられる。

歯面強度向上に対して、浸炭異常層のいずれの性状の寄与が大きいかについては、潤滑、歯面の接触圧力およびすべり速度などの条件で異なると見られるが、不完全焼入れ層の均一さ、不完全焼入れ層の硬度および粒界酸化の発生形態の影響が大きいと考える。すなわち、不完全焼入れ層が深さ方向に均一に生成されていること；同層の硬度が適度に低いこと、粒界酸化が連続状に生成されていないこと、が歯面強度に有利に働く性状といえる。不完全焼入れ層の深さについては、これが過大であると摩耗による歯形の悪化が懸念されるため、適値があると考えられる。

ガス浸炭焼入れにおける浸炭異常層の生成機構については、これまでも報告⁽¹⁰⁾があり、ほぼ解明され

ている。合金中のSi、Mn、Crなどの含有量を調整すること、および浸炭条件の変更により浸炭異常層の性状を制御し、同層を利用することでガス浸炭歯車の歯面強度を向上できると考えている。なお、今後は浸炭異常層が歯元曲げ強度へ及ぼす影響を考慮した研究が必要である。

5. 結 言

本研究で得られた結果をまとめると次のようになる。

- (1) ガス浸炭焼入れ歯車の歯面に生成される浸炭異常層は、歯面強度に影響を及ぼす。
- (2) 本実験の範囲において、浸炭異常層以外の条件が同等であれば、歯面に同層が存在する場合の方が、これがない場合よりも歯面強度が高い。
- (3) 不完全焼入れ層の硬度は材料成分により異なる。
- (4) 粒界酸化の生成形態は材料成分により異なり、結晶粒界に沿って連続状に生成される場合と、点列状に生成される場合がある。
- (5) 歯面に生成された粒界酸化は、特にそれが連続状に生成されていると、歯車の運転にともない微小損傷の起点となりやすい。
- (6) 歯面強度に影響を及ぼす浸炭異常層の性状として、不完全焼入れ層の深さ、不完全焼入れ層の均一さ、不完全焼入れ層の硬度、粒界酸化の発生形態、粒界酸化の深さが挙げられる。
- (7) 浸炭異常層が歯面強度を向上させる効果は、同層の性状により異なり、歯面強度に有利に働く性状がある。

日頃よりご指導頂いている電気通信大学成瀬長太郎名誉教授、灰塚正次助教授にお礼を申し上げます。また、本実験に協力いただいた日野自動車工業(株)機構実験部、生産技術部の方々に感謝の意を表します。

文 献

- (1) 石井,熱処理,30-5(1990),240-246.
- (2) 例えば,柳・井上ほか3名,機論,60-572,C(1994),1391-1396.
- (3) 灰塚・成瀬ほか2名,機論,53-487,C(1987),855-862.
- (4) 本宿・黒羽,金属材料,17-5(1985),57-60.
- (5) 例えば,久松・金沢,自動車技術,41-7(1987),722-728.
- (6) 灰塚・成瀬ほか2名,機論,60-580,C(1994),4310-4317.
- (7) B.D.Cullity,松村訳,X線解析要論,アグネ社,265.
- (8) 小木曾,機械学会講習会資料,616(1986),41-49.
- (9) 村井・ほか2名,住友金属,44-3(1992),14-22.
- (10) 例えば,蟹澤・佐藤,熱処理,37-4(1997),225-230.