高負荷容量用浸炭焼入れ歯車の開発に関する基礎研究* (高負荷条件下における転がり滑り接触面の変化)

中西 勉^{*1}, 竹内 隆^{*2}, 鄧 鋼^{*1}

Development of Case-Carburized Gear for the High Load-Carrying Capacity (Changes of Rolling-Sliding Contact Surface under the High Load Condition)

Tsutomu NAKANISHI^{*3}, Takashi TAKEUCHI and Gang DENG

^{*3} Department of Mechanical Systems Engineering, Faculty of Engineering, Miyazaki University,
1-1 Gakuen Kibana-dai Nishi, Miyazaki-shi, Miyazaki, 889-2192 Japan

Since the manufacturing methods of gears were improved, the failure of case-carburized gears has changed to the surface fatigue of the tooth flank from the fatigue breakage at the tooth fillet. The objective of this work is to develop the case-carburized gears for the high load-carrying capacity. Then, the factors of influence on the surface durability of the hypoxia vacuum melting case-carburized alloy steel were investigated by using a backup-roller-type two-roller fatigue test rig. As a result of examining the rolling-sliding contact surface of the test roller under the high load condition, the following were clarified: (1) The surface failure with various features occurs. (2) The surface temperature rises above tempering temperature of heat treatment process. (3) The surface asperities become very smooth. (4) The surface profiles are greatly deformed. (5) The surface hardness decreases. In addition, (6) The outside diameter of the test roller increases.

Key Words: Case-Carburized Gear, Load-Carrying Capacity, Surface Durability, Roller, Rolling-Sliding Contact Surface, Surface Fatigue, Surface Temperature, Surface Roughness, Surface Hardness

1. ま え が き

近年、歯車装置の負荷容量を高めるために用いられる浸炭焼入れ歯車においては、歯車の加工法の改善により、歯車自身の損傷形態が歯の疲労折損から歯面の疲労損傷へ移行する傾向⁽¹⁾にある。したがって、このことから浸炭焼入れ歯車の歯面強さについて、歯車材種や歯車加工などに関連させて詳細な検討^{(2)~(6)}も進められている。

本報では、動力伝達用歯車装置のいっそうの高出力・軽量化を目標⁽⁷⁾に、高負荷容量用浸炭焼入れ歯車の開発を目的として、浸炭焼入れ歯車を高負荷条件下で使用する際に考慮すべき歯面強さに及ぼす影響因子について、歯車対の歯面接触状態をシミュレートした二円筒面圧基礎実験を行い考察・検討した。具体的には、二円筒面圧基礎試験機による高面圧実験を実施するために、円筒試験片の素材に低酸素真空溶製鋼を用い、円筒試験片の運転接触面に浸炭焼入れ焼戻しの熱処理を施し、円筒研削盤により研削仕上げを行った。

次に、円筒試験片における転がり滑り接触面の表面状態の変化・表面温度の変化・表面粗さの変化・硬さの変化・寸法の変化に及ぼす負荷の大きさと負荷の繰返しの影響について、二円筒面圧基礎試験機・実体顕微鏡・走査型電子顕微鏡・表面粗さ測定器・微小硬度計などを用いて考察・検討した。

2. 実験条件および実験方法

2・1 円筒試験片 図1に、円筒試験片の形状と寸法を示す。ここで、図1において、低速側円筒試験

Fig. 1 Dimensions of test rollers

* 原稿受付 2002年9月17日。

^{*1} 正員, 宮崎大学工学部(☎889-2192 宮崎市学園木花台西1-1)。

^{*2} 准員, 宮崎大学大学院。

E-mail: t0d115u@cc.miyazaki-u.ac.jp

Table 1 Rolling-sliding condition of roller tests

		Low-speed roller (L)	High-speed roller (H)
Speed of rotation	rpm	2630	3190
Peripheral speed	m/s	9.64	11.70
Specific sliding	%	-21.3	17.6
Sliding velocity	m/s	2.05

Fig. 2 Backup-roller-type two-roller fatigue test rig

Table 2 Experimental conditions and results in roller tests

Test No.	Roller (*1)	Normal load F_n kN	Hertzian stress σ_H GPa	Cycles run N	Surface temperature T_s K ($N=0 \sim \text{stop}$)	Surface roughness $\mu\text{m}R_{\text{max}}$		Appearance of surface damage after running d mm			Area of surface damage S mm ²
						Initial	Final	Micropits ($d < 0.1$)	Small pits ($0.1 \leq d < 0.3$)	Pits&Spalls ($0.3 \leq d$)	
RT-01	(L)	4.0	0.99	1.0×10^7	333~366	5.2	3.7	Many	No	No	-
	(H)			1.2×10^7	333~368	4.7	3.1	Many	No	No	-
RT-02	(L)	5.7	1.19	1.0×10^7	363~397	3.9	3.6	Many	No	No	-
	(H)			1.2×10^7	364~395	3.4	3.1	Many	No	No	-
RT-03	(L)	7.8	1.35	1.0×10^7	377~402	4.0	2.8	Many	No	No	-
	(H)			1.2×10^7	381~413	4.0	2.7	Many	No	No	-
RT-04	(L)	10.2	1.56	1.0×10^7	404~430	4.2	3.1	Many	Slight	No	-
	(H)			1.2×10^7	408~432	4.8	2.6	Many	Slight	No	-
RT-05	(L)	12.9	1.76	0.5×10^7	421~448	5.5	3.1	Slight	No	No	-
	(H)			0.6×10^7 (*2)	426~454	5.0	2.6	Slight	No	1 (crack)	-
RT-06	(L)	15.9	1.95	1.0×10^7	431~469	4.1	2.8	Slight	Slight	3(pits)	-
	(H)			1.2×10^7	443~474	3.9	2.5	Many	No	No	-
RT-07	(L)	19.2	2.16	0.5×10^7 (*3)	448~498	4.1	2.2	Slight	No	1 (spalls)	11.53
	(H)			0.6×10^7	453~509	3.9	2.0	Slight	No	No	-
RT-08	(L)	22.9	2.37	1.0×10^7	461~498	4.1	2.2	Many	Slight	No	-
	(H)			1.2×10^7	466~511	3.8	2.0	Many	No	No	-
RT-09	(L)	26.8	2.53	0.2×10^7 (*3)	482~524	4.1	2.6	Many	Slight	1 (spalls), 1 (pits)	79.59
	(H)			0.3×10^7	492~530	3.8	1.7	Slight	No	1 (crack)	-

(*1) (L):Low-speed roller, (H):High-speed roller (*2) Grinding cracks are observed. (*3) A large spall appears.

片の有効運転接触面幅は、高速側円筒試験片の外周形状から8.5 mmとなる。なお、試験片表材の化学成分は、JIS SCM 420 相当(成分:重量%; C:0.20, Si:0.24, Mn:0.86, P:0.014, S:0.007, Cr:1.04, Mo:0.19, その他)で、加工工程は、低酸素真空溶製(酸素含有量 10 ppm)・熱間鍛造・焼ならし・荒機械(切削)加工・浸炭焼入れ焼戻し・仕上げ機械(研削)加工とした。また、歯車材の面圧強さを評価するうえで重要な運転接触面は、これまでの歯面加工⁽⁸⁾を考慮し、円筒研削盤により、断面曲線から求めた最大高さで約4~6 $\mu\text{m}R_{\text{max}}$ ⁽⁹⁾、粗さ曲線から求めた最大高さで約3~5 $\mu\text{m}R_y$ ⁽¹⁰⁾に仕上げた。なお、外周表面の硬さは750 HV(690 HBS)程度で、有効浸炭深さ(550 HVの位置の深さ)は1.2 mm前後であった。

2.2 試験機、潤滑油および実験方法 図2に、高面圧実験が可能なバックアップロール式二円筒面圧基礎試験機の概略を示す。また、表1に、低速側および高速側円筒試験片の転がり滑り条件などを示す。な

お、潤滑油は、極圧添加剤を含まないSAE 30 基油[密度 $0.8861 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ (288 K), 粘度 $97.49 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (313 K), $10.91 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (373 K), 粘度指数 96]を用い、円筒試験片対の接触部直上から油温を $313 \pm 1 \text{ K}$ に制御し、油量 $33 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ の割合で供給した。高面圧実験は、円筒試験片対の運転接触面に設定値の負荷が作用するように可動ブロックを負荷用コイルばねで押付け運転した。また、運転に伴う円筒試験片の詳細な変化を知るために、運転前後と運転中の適時に実体顕微鏡による表面観察を行うとともに、運転前後に表面粗さと外径を測定した。なお、円筒試験片の表面温度は、クロメル-コンスタンタンの熱電対(タイプE)を表面に接触させて測定⁽¹¹⁾した。

3. 高面圧実験結果および考察

3.1 高面圧実験結果の概要 表2に面圧基礎実験の条件および結果の概要を示す。ここで、表2において、各実験における負荷の大きさ、すなわち、円筒

試験片対の運転接触面での法線荷重は、 $F_n = 4.0 \sim 26.8$ kN で、この場合の最大接触応力 σ_H とヘルツの接触幅 $2b_H^{(12)}$ は、 $\sigma_H = 0.99 \sim 2.53$ GPa と $2b_H = 0.60 \sim 1.58$ mm となり、最大せん断応力の発生する表面からの深さ $0.5b_H$ または $0.786b_H^{(12)}$ は、 $0.5b_H = 0.15 \sim 0.40$ mm または $0.786b_H = 0.24 \sim 0.62$ mm となっている。なお、これらの値は、中硬度調質材⁽¹³⁾の場合に比べ、大きな値となっていることがわかる。また、各実験における運転打ち切りの繰返し数は、低速側円筒試験片の繰返し数 $N_2 = 1.0 \times 10^7$ 時点あるいは、円筒試験片の運転接触面に大きな表面損傷が生じ試験機の振動・騒音が著しく大きくなった時点までとした。表2から、負荷の大きさに相応して、各試験片における表面粗さ・表面温度・表面損傷などに変化が認められる。以下、円筒試験片の運転に伴って現れた諸現象の変化に及ぼす負荷の大きさと負荷の繰返しの影響について、詳細に考察・検討した。

3.2 高負荷条件下における表面状態の変化

図3に、各負荷条件における円筒試験片の運転接触面の外観を示す。ここで、図3において、各外観は、実体顕微鏡を用いて適時に観察したうちの運転打ち切り時であり、特に下段右端は生じたスポールの一例である。表2と図3から、負荷の大きさ $F_n = 4.0 \sim 26.8$ kN ($\sigma_H = 0.99 \sim 2.53$ GPa) の範囲において、運転打ち切り時点で表面状態を比較すると、運転接触面の加工(研削)目は、低速側および高速側円筒試験片のいずれも負荷の増加とともに少なくなり、 $F_n = 26.8$ kN ($\sigma_H =$

2.53 GPa) の負荷の場合低速側円筒試験片の繰返し数 $N_2 = 0.2 \times 10^7$ 時点でもほとんど消失していることがわかる。また、運転打ち切り時点での円筒試験片の外観上の表面損傷状況は、中硬度調質材⁽¹³⁾には認められなかった微小ピット ($d < 0.1$ mm, d : 損傷の相当直径で損傷部分の表面積と等しい面積をもつ円の直径) が、低速側および高速側円筒試験片に $F_n = 4.0$ kN ($\sigma_H = 0.99$ GPa) の負荷の場合でも多数発生していること、小ピット ($0.1 \leq d < 0.3$) とピットおよびスポール ($0.3 \leq d$) が、おもに低速側円筒試験片にそれぞれ $F_n = 10.2$ kN ($\sigma_H = 1.56$ GPa) と $F_n = 15.9$ kN ($\sigma_H = 1.95$ GPa) 以上の負荷領域で発生していることがわかる。さらに、特に試験機の振動・騒音のため運転打ち切りの原因となる円筒試験片の重大な表面損傷(ピット・スポール)が生じる場合、その個数は少ないものの生じてからわずかの負荷の繰返して表面損傷がほぼ運転接触面全幅に至る特徴もわかった。

次に、図4に、円筒試験片の運転接触面の詳細観察結果を示す。ここで、図4において、各詳細観察は、走査型電子顕微鏡を用いて負の滑り率の低速側円筒試験片に着目し、その運転接触面およびその断面の詳細観察結果のうち代表的な運転前後の運転接触面である。図4から、低速側円筒試験片の運転接触面の表面損傷において、き裂・微小ピットが表面もしくはごく表面近傍から進展していることがわかる。また、き裂・微小ピットが $F_n = 4.0 \sim 10.2$ kN ($\sigma_H = 0.99 \sim 1.56$ GPa) の負荷の場合加工目の凹と凹の間の

Fig. 3 Appearances of contact surface after running in roller tests (low-speed rollers)

Fig. 4 SEM micrographs of surface failure in roller tests (low-speed rollers)

滑らかになった部分に生じていること、 $F_n = 15.9 \sim 26.8 \text{ kN}$ ($\sigma_H = 1.95 \sim 2.53 \text{ GPa}$) の負荷の場合加工目の消失に伴いき裂・微小ピットが互いに連なっている状態になり、表面損傷が大きくなっていることがわかる。

したがって、これらの結果から、浸炭焼入れ焼戻し材の表面損傷に及ぼす負荷の影響は極めて大きく、負荷の大きさによって運転接触面は、加工目の消失とともに、同程度のピットの個数が増加する中硬度調質材⁽¹³⁾の場合と異なり、き裂・微小ピット・小ピット・ピット・スポールなどの種々の特徴ある表面損傷形態になることがわかった。なお、このことは、高負荷容量用浸炭焼入れ歯車を開発する際、歯面強さに関連する表面損傷形態の評価基準を十分に考慮する必要性を示唆している。例えば、本実験条件における低酸素真空溶製鋼の浸炭焼入れ焼戻し材の許容面圧強さ σ_{Hlim} (ここでは、負の滑り率の低速側円筒試験片に着目し、繰返し数 1.0×10^7 で損傷評価した最大接触応力) は、全く表面損傷の発生(き裂・微小ピットの発生)を許さない評価基準の場合 $\sigma_{Hlim} \sim 0.99 \text{ GPa}$ 、運転に支障をきたす表面損傷の発生(ピット・スポールの発生)を許さない評価基準の場合 $\sigma_{Hlim} = 1.56 \sim 1.95 \text{ GPa}$ と見積ることができる。

3・3 高負荷条件下における表面温度の変化 図5に、負荷に対する円筒試験片の表面温度の変化を示す。ここで、図5において、各負荷条件における円筒試験片の表面温度は、運転中における測定値の最低温度と最高温度の範囲で示したものである。また、各測定値は、回転している円筒試験片上部に直接熱電対を軽く接触させて付着油膜の温度を計測したもので、油膜の厚さが非常に薄いことを考慮して、各測定値を近似的に表面温度⁽¹¹⁾としたものである。図5から、低

Fig. 5 Surface temperature in relation to normal force in roller tests

速側および高速側円筒試験片の表面温度は、いずれも負荷の増加、すなわち、発生する摩擦熱の増加に伴い上昇していることがわかる。また、浸炭焼入れ焼戻し材においては、熱処理工程の焼戻し温度⁽¹⁴⁾が中硬度調質材⁽¹³⁾に比べて低く、 $F_n = 15.9 \text{ kN}$ ($\sigma_H = 1.95 \text{ GPa}$) 以上の負荷の場合、円筒試験片の表面温度が運転中に焼戻し温度(本実験条件で 443 K) 以上にも達していること ($453 \sim 523 \text{ K}$) がわかる。さらに、本実験条件における EHD 理論に基づく最小油膜厚さ h_{min} ⁽¹⁵⁾ の計算値は、最大接触応力 $\sigma_H = 0.99 \sim 2.53 \text{ GPa}$ の負荷のとき油温 313 K で $h_{min} = 2.5 \sim 1.9 \mu\text{m}$ 、 473 K で $h_{min} = 0.6 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 程度となることがわかった。

したがって、これらの結果から、浸炭焼入れ焼戻し材においては、高負荷条件に伴う運転接触面の温度上昇に起因する材料の変化や油膜形成状態の変化を十分

考慮する必要性が明確になった。

3・4 高負荷条件下における表面粗さの変化 図6に、各負荷条件下における円筒試験片の表面粗さの変化例を示す。ここで、図6において、円筒試験片の外周(軸方向)の表面粗さ(断面曲線)⁽⁹⁾は表面粗さ測定器を用いて運転前後に測定したものである。図6などから、運転前後の低速側および高速側円筒試験片の表面粗さの変化状況を比較すると、いずれも負荷の上昇に伴い表面突起が滑らかになり、 $F_n=22.9\sim 26.8$ kN ($\sigma_H=2.37\sim 2.53$ GPa)の負荷の場合、運転前、すなわち、初めの表面突起がほとんど消失していることがわかった。また、低速側円筒試験片の表面粗さ(断面曲線)から、負荷の上昇に伴い塑性変形と摩耗による変形が顕著になり、運転未接触面と運転接触面との差、すなわち、運転接触面の断面形状の変化が大きくなることがわかった。

次に、JISに基づく表面粗さの表示において、低速側および高速側円筒試験片のいずれも、表2などから、表面突起の高さと関連のある最大高さ $R_{max}^{(9)}$ の値は、負荷が増加するとともに減少する傾向にあること、すなわち、表面が滑らかになることが定量的にもわかった。

したがって、これらの結果から、浸炭焼入れ焼戻し材の運転接触面において、負荷の増加に伴い表面突起がより滑らかになること、表面形状が塑性変形と摩耗などにより大きく変形することがわかった。なお、高負荷運転により浸炭焼入れ焼戻し材の表面が滑らかになるものの面圧強さが向上しない原因は、表面が滑ら

かになる過程ですでに表面に被害⁽¹⁶⁾を受けているものと考えられる。また、これらのことは、高負荷容量用浸炭焼入れ歯車を開発する際に、初めの歯面粗さと運転に伴う摩耗なども考慮する必要性を示唆している。

3・5 高負荷条件下における硬さの変化 図7に、円筒試験片の運転前後における断面硬さの代表例を示す。ここで、図7において、円筒試験片の断面硬さは、各低速側円筒試験片から硬さ測定用試験片を作製し、微小硬度計を用いて試験荷重 2.94 N・保持時間 15 sで測定したものである。図7から、表面から有効浸炭深さ(550 HVの位置の深さ)付近までの領域において、負荷の増加に伴い中硬度調質材⁽¹³⁾の場合と異なり、硬さの著しい低下が認められる。例えば、 $N_2=1.0\times 10^7$ 時点における表面近傍の硬さは、 $F_n=22.9$ kN ($\sigma_H=2.37$ GPa)以上の負荷の場合、運転前に比べ 100 HV程度の低下が認められる。すなわち、これらのことは、負荷の増加に伴う表面温度の上昇に起因するもので、特に $F_n=15.9$ kN ($\sigma_H=1.95$ GPa)以上の負荷の場合、運転接触面が熱処理工程の焼戻し温度(443 K)以上にも達していることと関連があると考えられる。

したがって、高負荷容量用浸炭焼入れ歯車の開発において、高負荷条件下では、運転前の硬さ、すなわち、熱処理を含む加工工程後の硬さが保持できない場合のあることも考慮する必要性がわかった。

3・6 高負荷条件下における寸法の変化 図8に、各負荷条件下における円筒試験片の外径の変化を示

Fig. 6 Changes in surface roughness of test rollers

Fig. 7 Sectional hardness distribution before and after running (low-speed rollers)

Fig. 8 Relation between normal force and change in diameter of test rollers

す。ここで、図8において、各円筒試験片の運転前後における外径は、直進式ミクロンマイクロメータ(デジマチックタイプ)と専用治具を用いて円周上の30°ごとに6箇所を測定(測定誤差 $\pm 3 \mu\text{m}$ 以内)し、外径の変化は、それぞれの測定値における平均値の差(総合誤差 $\pm 5 \mu\text{m}$)から求めたものである。図8から、外径の測定精度と前述した表面の塑性変形および摩耗並びに運転打ち切り時点の負荷の繰返し数を考慮しても、 $F_n = 15.9 \text{ kN}$ ($\sigma_H = 1.95 \text{ GPa}$)以上の負荷領域の場合、低速側および高速側円筒試験片のいずれも明らかに外径の増加すなわち膨張が認められることがわかる。このことは、前述した円筒試験片における硬さの変化の原因と同じく、 $F_n = 15.9 \text{ kN}$ ($\sigma_H = 1.95 \text{ GPa}$)以上の負荷の場合、運転中の運転接触面が熱処理工程の焼戻し温度(443 K)以上に達していることとも関連があると考えられる。

したがって、高負荷容量用浸炭焼入れ歯車の開発において、高負荷条件の運転にともなう塑性変形と摩耗による変形のほかに、中硬度調質材⁽¹³⁾の場合と異なり、負荷と摩擦熱などによる材料の寸法(組織)の変化も考慮する必要性がわかった。

4. ま と め

本報では、浸炭焼入れ歯車の高負荷条件下における歯面性状の変化について、歯車対の歯面接触状態をシミュレートした二円筒面圧基礎実験を行い考察・検討

した。その結果、低酸素真空溶製鋼の浸炭焼入れ焼戻し材の場合、高負荷条件下の円筒試験片の転がり滑り接触面において、負荷とその繰返しで

- (1) さまざまな表面損傷(き裂・微小ピット・小ピット・ピット・スポール)が発生すること、
 - (2) 表面温度が、熱処理工程の焼戻し温度以上に上昇すること、
 - (3) 表面突起が、滑らかになること、
 - (4) 表面形状が、大きく変化すること、
 - (5) 表面硬さが、低下すること、
- さらに、円筒試験片の寸法において
- (6) 外径が、膨張すること、
- がわかった。

したがって、高負荷条件下で運転される浸炭焼入れ焼戻し材の転がり滑り接触面を評価する上で考慮すべき重要な因子が明らかになり、高負荷容量用浸炭焼入れ歯車の開発に対する指針を与えることができた。

終わりに、住友金属工業株式会社と日石三菱株式会社ならびに九州大学大学院工学府機械系専攻と宮崎大学分析センター・工学部機械システム工学科の各位のご援助・ご協力に対し感謝の意を表する。

文 献

- (1) 例えば、吉田 誠、機習教、No. 98-48 (1998-12), 9-21.
- (2) 中西 勉・有浦泰常・上野 拓、機論, 52-477, C (1986), 1649-1655.
- (3) Nakanishi, T. and Ariura, Y., *Proc. Int. Conf. Motion and Power Transmission (JSME)* (1991), 828-833.
- (4) 小林幹和・桜田 徹、三菱自動車テクニカルレビュー 1995, No. 7 (1995), 59-65.
- (5) 例えば、鈴木智博・小川一義・堀田昇次、機論, 64-622, C (1998), 2199-2204.
- (6) 吉崎正敏・橋本 忠、機論, 65-630, C (1999), 694-701.
- (7) 例えば、松本 将、機習教 (九州支部・機素潤滑設計部門), (2000-11), 1-12.
- (8) 中西 勉・有浦泰常・上野 拓、機械の研究, 35-10 (1983), 1151-1156.
- (9) 日本工業規格, 表面粗さの定義と表示 JIS B 0601-1982, (1982), 1-20, 日本規格協会.
- (10) 日本工業規格, 表面粗さ一定義及び表示 JIS B 0601-1994, (1994), 1-20, 日本規格協会.
- (11) 鄧 鋼・中西 勉、機論, 65-630, C (1999), 732-737.
- (12) 例えば、Lipson, C. and Robert, C. J., *Handbook of Stress and Strength: Design and Materials Applications*, (1963), 43-68, Macmillan.
- (13) 例えば、有浦泰常・扇谷保彦・中西 勉、機論, 55-512, C (1989), 1004-1009.
- (14) 日本機械学会, 機械工学便覧応用編 B 4 材料学・工業材料, (1986), 15-18, 日本機械学会.
- (15) Dowson, D., *Lubric. and Wear: Fundamentals and Application to Design, Proc. Inst. Mech. Eng.*, 182, Pt. 3 A (1967-68), 151-167.
- (16) 曾田範宗・山本隆司、潤滑, 20-6 (1975), 435-442.