平歯車のスコ어링強さに及ぼす材料の硬さの影響*

灘 野 宏 正**, 寺 内 喜 男***

The Effect of the Hardness of Tooth Material on the Scoring
Resistance of Gears

by Hiromasa NADANO and Yoshio TERAUCHI

With respect to the effect of the hardness of a material on seizing resistance, there are a lot of test results obtained with four ball machines and roller machines. In this report, the gears ground with high accuracy after high-frequency quenching are tempered at various temperatures under a comparatively high degree of vacuum. Gears having the same chemical compositions and characteristics of the working tooth surface are produced. From the scoring tests of the gears, varied from low to high hardness, it was found that the effect of the hardness of the tooth material on the scoring resistance of the gears was significant, and the scoring resistance of the gears increased with increasing hardness of the tooth material.

Key Words: Gear, Hardness, Surface Roughness, Bulk Temperature, Surface Temperature, Scoring Resistance

1. 緒 言

焼付き強さに及ぼす材料の硬さの影響に関しては、四球試験および二円筒試験による数多くの研究成果が報告されている。著者の一人はすでに、二円筒試験機⁽¹⁾により、焼付き強さに及ぼす材料の硬さおよび金属組織の影響について検討を行った。

本研究では、高周波焼入れ後、研削した高精度の歯車を比較的高い真空度のもとで、所定の温度について焼もどしを行い、同じ組成で、ほぼ同じ表面性状をもつ高硬度のものから低硬度のものまでの歯車を製作した。動力循環式歯車試験機を使用してそれらの歯車についてスコ어링試験を行い、スコ어링強さと材料の硬さの関係およびスコ어링発生までの歯面あらさ、歯車本体温度および騒音などについて検討を行った。

2. 実 験 方 法

2・1 試験歯車 歯車材としては、S45C 材を使用し、試験歯車は高周波焼入れ後、ライスハウア研削

を行っており、歯形精度は JIS 1 級に仕上げられている。歯車の諸元を表 1 に示す。本実験で使用する動力循環式歯車試験機の負荷能力を超えない条件で、スコ어링の発生しやすい比較的大きい転位係数（小歯車：0.5、大歯車：-0.5）の Vau-Null 歯車を使用した。試験歯車対は、同じ組成で、しかも、ほぼ同じ表面性状をもつ歯車対を製作するため、0.13 Pa の真空状態で、表 2 に示した所定の温度で焼もどしを行った。

表 1 歯車の諸元

	Pinion	Wheel
Number of teeth z	18	40
Pressure angle α_0	20°	
Center distance mm	116	
Module m mm	4	
Backlash S_n mm	0.5	
Effective face width B_f mm	9.8	
Coefficient of addendum modification	0.5	-0.5
Pitch circle diameter d_0 mm	72	160
Outside diameter d mm	84	164
Amount of Tip chamfer	0	0.4
Length of action mm	16.95	
Contact ratio ϵ	1.44	
Material	S45C	
Heat-treatment	After High-frequency quenching, tempered at 453 K	
Accuracy of tooth profile	1st class of JIS	

* 昭和 61 年 3 月 15 日 東海支部第 35 期総会講演会において講演，原稿受付 昭和 60 年 8 月 14 日。

** 正員，呉工業高等専門学校（〒737 呉市阿賀南 2-2-11）。

*** 正員，広島大学工学部（〒724 広島市西条町下見）。

ピッチ点付近の歯の断面の硬さの分布を図1に示す。各歯車対はほぼ所定の硬さに焼もどしが行われている。表3は歯車材の熱的定数値⁽²⁾を示す。

2・2 潤滑油 潤滑油は無添加鉱油#140タービン油(粘度・323 K: $28 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, 363 K: $8 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)を強制潤滑で歯のかみ込み側に約0.6 L/min ずつ吹き付けた。吹き付け位置の油温は自動温度調節器により $323 \pm 2 \text{ K}$ に制御した。

2・3 試験条件および方法 試験方法としては、動力循環式歯車試験機を使用して、小歯車の回転数 n_1 を 2 200 rpm 一定のもとで、単位歯幅当たりの歯面に垂直方向の荷重 P_n を P-1 から、表4に示すように、順次増加させ、破壊的スコアリングが生じて運転が困難になるまで運転を継続した。各荷重段階における運転時間は 20 min (小歯車の総回転数: 44 000) とした。運転状況に関しては、各段階ごとに試験機を休止し、歯面あらさを測定した後、試験機に取付け歯車箱内の温度が約 318 K に達するまで、約 2 h 試験機を休止した状態で潤滑油を循環させた。スコアリングの判定は

- (1) 肉眼観察
- (2) インボリュート方向の歯面あらさの測定
- (3) 歯車本体温度の測定
- (4) 歯元ひずみの測定
- (5) 歯車騒音の測定

などにより行った。本体温度の測定は大歯車の歯の側面の中央部にカーバイドチップのドリルで直径 2

mm, 深さ 3.5 mm の穴をあけ、C-A 熱電対(テフロンチューブで被覆)を埋め込み、スリップリングにより熱起電力を取り出し、増幅してペン書レコーダに記録した。歯面あらさ、歯元ひずみおよび歯車騒音の測定方法については、既報と同様であり⁽³⁾、本報では、省略した。なお、歯元ひずみおよび騒音のデータはデータレコーダ(FM 特性: 0~10 kHz)に収録し、騒音については FFT アナライザにより周波数分析を行った。

3. 実験結果および考察

3・1 歯車本体温度 一例として、図2に歯車対 D の場合の運転時間に伴う大歯車の本体温度の時間的变化を示す。図2中、記号 S はスコアリング発生を示す。本体温度は運転開始約 3 min 後に、ほぼ定常状態に達する。荷重段階の上昇に伴って本体温度は比例的に上昇し、定常域での温度の変動が次第に増大する。なお、スコアリング発生前では、本体温度は一時上昇するなどの異常が検知された。

図3は各歯車対について、荷重段階の上昇に伴うスコアリング発生前の段階までの各荷重段階終了直前の大歯車の本体温度の変化を示す。ただし、歯車対 E の場合は、運転開始 15 min 後にスコアリングが発生したため、スコアリング発生直前の歯車本体温度を示す。荷重段階の上昇に伴う本体温度の上昇は歯車材の

表 2 歯車対と焼もどし温度

Gear pair	Heat treatment
A	Tempered at 453 K
B	Tempered at 603 K
C	Tempered at 713 K
D	Tempered at 833 K
E	Tempered at 993 K

表 3 歯車材の熱的定数値

Gear pair	Thermal conductivity κ W/(mK)	Thermal diffusivity α m^2/s	Density ρ kg/m^3	Specific heat c kJ/(kgK)
A	29.08	7.69×10^{-6}	7.85×10^3	0.481
B	34.89	9.23×10^{-6}	7.85×10^3	0.481
C	42.45	1.12×10^{-5}	7.85×10^3	0.481
D	46.52	1.23×10^{-5}	7.85×10^3	0.481
E	49.43	1.31×10^{-5}	7.85×10^3	0.481

表 4 荷重段階

Load range	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6	P-7	P-8	P-9	P-10	P-11	P-12	P-13	P-14	P-15	P-16	P-17	P-18
Tooth load $P_n \times 10^5 \text{ N/m}$	0.6	0.8	1.1	1.2	1.5	1.8	2.1	2.3	2.6	2.9	3.2	3.5	3.9	4.2	4.5	4.9	5.2	5.6
Hertzian stress $P_0 \text{ MPa}$	455	533	605	674	739	801	861	919	975	1030	1083	1135	1186	1236	1285	1332	1380	1426
Torque of wheel $\text{N}\cdot\text{m}$	43	58	76	94	113	133	153	175	197	216	243	266	291	316	341	367	393	420

図 1 歯車対の硬さ分布

硬さが増大するにつれて緩慢となり、段階 P-10 以降において、その傾向が顕著に現れ、歯車対 A の場合の本体温度の上昇の度合いが最も小さい。表 3 から明らかなように、歯車材の硬さの上昇に伴って、歯車材の熱伝導特性が低下するため、歯面に発生した摩擦熱の拡散性の低下が一因と考えられる。

3.2 歯面あらさ 一例として、歯車対 A と D の場合の試験前とスクーリング発生前の段階の大歯車のインボリュート方向の歯面あらさを図 4 に示す。スクーリング発生前の段階では、歯元よりの一組かみあいの限界付近の歯面はあらさの突起部が摩耗により消失し、かなり平滑となり、研削痕の溝部がわずかに認められる。この傾向は小歯車の場合も同様に認められる。なお、スクーリングによる歯面の損傷はこのかみあい位置（小歯車：歯先よりの一組かみあい限界点，大歯車：歯元よりの一組かみあい限界点）付近が著しい。後述するように、上記のかみあい位置における歯面の瞬間温度上昇は最高となる。

図 5 は各歯車対について、荷重段階の上昇に伴うスクーリング発生前の段階までの各荷重段階終了直前

図 2 時間経過に伴う歯車本体温度の変化（歯車対 D）

図 3 歯車本体温度の変化

の歯面あらさの変化を示す。ただし、 R_{rms} の値は、スクーリングによる損傷が著しく現れた付近の歯面あらさの測定値を示す。すなわち、小歯車の場合は歯先よりの一組かみあいの限界点からインボリュート方向に沿って前後 1 mm の範囲、大歯車の場合は歯元よりの一組かみあいの限界点の前後 1 mm の範囲における R_{rms} の平均値を示す。歯車対 A の場合は、段階 P-7 までは荷重段階の上昇に伴って歯面あらさは減少するが、その後のあらさの減少はスクーリング発生前の段階まできわめて小さい。一方、歯車対 B, C および D の場合には、初期の荷重段階で歯面あらさは著しく減少する。その後のあらさは荷重段階の上昇にほぼ比

図 4 試験前とスクーリング発生前の段階における歯面あらさ（大歯車）

図 5 インボリュート方向の歯面あらさの変化

例して減少する。この傾向は歯車材の硬さの低下に伴って顕著となり、歯車対 D の場合の歯面あらしの減少する割合が最も大きい。

3・3 歯元ひずみおよび歯車騒音 一例として、歯車対 B, C および D の場合の段階 P-7 における音圧レベルのパワースペクトラムおよび歯元ひずみの波形の変化を図 6 に示す。図 6 中、A.P. は全騒音を表す。各歯車対とも、音圧レベルはほぼかみあい周波数 f_z (660 Hz) と、その倍数の周波数 $2f_z, 3f_z, \dots$ に対する音圧レベルから構成されている。歯車対 B の場合は、奇数倍の周波数における音圧レベルが、偶数倍の周波数におけるそれと比して、きわめて大きい。一方、歯車対 C および D の場合は、一次のかみあい周波数における音圧レベルが優勢である。これは、焼もどしによる歯のばねこわさの低下によるものと考えられる。これらの傾向は他の荷重段階においても同様に認められる。

また、歯車対 B の場合の歯元ひずみ波形の異常は段階 P-7 ではほとんど認められなく、図示したひずみ波形は試験前の静的歯元ひずみのそれとほとんど変わらない。しかしながら、歯車対 C および D の場合では、歯面が軟弱なため、歯形がかなり変化するため、一組かみあい域におけるひずみ波形に異常が現れる。

図 7 は各歯車対について、荷重段階の上昇に伴う各荷重段階終了直前における歯車騒音（音圧レベル、A. P.）を示す。各歯車対とも歯車騒音は荷重段階の上昇に伴って増加しており、スコ어링発生時にはかなり音圧レベルは上昇する。したがって、騒音の測定により、スコ어링発生による歯車の異常が検知できる。

3・4 瞬間温度上昇およびスコ어링強さ 各歯車対の場合のスコ어링を発生した段階について計算した瞬間温度上昇の分布を図 8 に示す。横軸はピ

ッチ点からの距離を示す。なお、瞬間温度の計算には、Blok の温度上昇式⁽⁴⁾を使用した。歯車材の熱的定数値は表 3 に示した値を使用し、摩擦係数 $\mu=0.066$ とした。また、スコ어링発生時の歯面荷重を石川の歯のたわみ計算式⁽⁵⁾に代入して、かみあい位置における荷重分担率を求めて、歯面温度を計算した。各歯車対とも、瞬間温度上昇の最高値は小歯車の歯先よりの一組かみあいの限界点に現れる。

図 9 はスコ어링発生時のヘルツ応力およびスコ어링に対する臨界温度と歯面のビッカース硬さの関係を示す。なお、ヘルツ応力は瞬間温度上昇が最高値を示した小歯車の歯先よりの一組かみあいの限界点における計算値を示す。スコ어링に対する臨界温度 θ_{cr} は次式より計算した。

$$\theta_{cr} = \theta_0 + \theta_f \times 1.27 / (1.27 - S)$$

ただし、 θ_0 ：大歯車の本体温度、 θ_f ：瞬間温度上昇、 S ：歯面あらし R_{rms} である。 θ_0 の値は大・小歯車の本体温度の平均値⁽⁶⁾で近似できるが、本実験では小歯車の本体温度の測定は行っていないので、スコ어링発生前の段階における大歯車の本体温度（図 3）を用いた。また、 S の値はスコ어링発生前の段階における大・小歯車の歯面あらしの平均値（図 5）を使用した。歯車材の硬さが減少するにつれて、スコ어링発生時のヘルツ応力およびスコ어링に対する臨界温度は著しく減少しており、歯車材の硬さがスコ어링強さに著しく影響を及ぼしていることがわかる。

歯車対 E の場合のスコ어링に対する臨界温度は約 350 K であり、きわめて低い表面温度でスコ어링が発生している。図 10 から明らかなように、歯車対 E の場合のような低硬度の歯車の場合のスコ어링はいわゆる Cold Scoring で、歯面上には大きな、深いひっかきあとが接触点の移動方向に流動した

図 6 段階 P-7 における音圧レベル (C 特性) のパワースペクトラムおよび大歯車の歯元ひずみの変化

状態で認められる。しかも、小歯車には大歯車からの移着片も多数認められた。他方、歯車対 A の場合のような高硬度の歯車の場合のスコ어링は Warm Scoring と称せられるものであり、高負荷により発生した摩擦熱の影響で溶着箇所は多数の微細な粒状片からなり、歯面はなし地状となる。

4. 結 言

高周波焼入れ後、研削した高精度の歯車を比較的高い真空度のもとで、所定の温度で焼もどした高硬度のものから、低硬度のものまでの歯車に対するスコ어링試験結果より、つぎのことが明らかになった。

(1) 荷重段階の上昇に伴う歯車本体の温度上昇

図 7 歯車騒音の変化

図 8 スコ어링発生時の瞬間温度上昇とかみあい位置の関係

は、歯車材の硬さが増加するにつれて次第に緩慢となり、高周波焼入れ後、453 K で焼もどした歯車の場合の本体温度の上昇する度合は最も小さい。

(2) 荷重段階の上昇に伴う歯面あらさの変化は、高周波焼入れ後、453 K で焼もどした高硬度歯車の場合がきわめて小さい。しかしながら、焼もどし温度が上昇するにつれて、歯面あらさの減少する度合は大き

図 9 スコ어링発生時のヘルツ応力およびスコ어링に対する臨界温度と歯面の硬さの関係

Gear pair A

Gear pair E

図 10 歯車対 A および E の場合のスコ어링による損傷状態 (大歯車)

くなる。

(3) スコーリング発生時のヘルツ応力およびスコーリングに対する臨界温度は、歯車材の硬さが減少するにつれて著しく減少しており、歯車材の硬さは歯車のスコーリング強さに著しく影響を及ぼす。

- (2) 寺内・宮尾・灘野, 機論, 39-317 (昭48), 404.
- (3) 寺内・灘野・中本, 機論, 48-435, C (昭57), 1797.
- (4) Blok, H., *Proc. General Discussion on Lubrication and Lubricants*, 2 (1973), 14.
- (5) 石川, 東京工業大学学報, 3-2 (昭32), 197.
- (6) 河野, 学位論文 (広島大学), (昭60), 119.

文 献

- (1) 寺内・竹原, 機論, 43-370 (昭52), 2363.
-