平歯車の歯面強度に関する研究*

(潤滑油の温度と歯面の硬さの影響)

灰塚 正次^{*1}, 成瀬 長太郎^{*1}
為 永 淳^{*2}, 根本 良三^{*1}

Studies on Tooth Surface Strength of Spur Gears

(Effect of Oil Temperature and Hardness of Gears)

Shoji HAIZUKA, Chotaro NARUSE,
Jun TAMENAGA and Ryoza NEMOTO

In order to study the effect of lubricating oil temperature on tooth surface strength, the temperature of three kinds of oils which have very different viscosities at room temperature was changed between 60°C and 105°C under the condition that the viscosity is kept constant. It was shown that the tooth surface strength of case hardened gears is not affected much by the temperature change, but in the case of tempered gears, the tooth surface strength decreased remarkably with increasing oil temperature. Further, so as to study the effect of hardness on tooth surface strength, the effect of the hardness of tempered gears ($HV \approx 285 \sim 550$) and the effective case depth of case hardened gears ($h_{eff} \approx 0.2 \sim 1.1$ mm) on the tooth surface strength were examined and discussed.

Key Words: Tribology, Lubrication, Machine Element, Gear, Pitting, Spalling, Tooth Surface Strength, Hardness

1. 緒 言

歯面強度の研究は古くから行なわれているが、従来に比してより高い精度を持つ歯面強度計算式の要望が強い。このためには、歯面強度に及ぼす諸因子をより正確に捕らえる必要がある。歯面強度の研究については、古くは橋本⁽¹⁾によるもの及び Niemannら⁽²⁾による組織的研究がある。その設計計算式も AGMA⁽³⁾及び ISO案⁽⁴⁾など種々なものが提案されている。滝は歯面強度についてD値を基に検討を加えた⁽⁵⁾。また吉田らは最適有効硬化深さを基に検討を加えている⁽⁶⁾。

筆者らは前報⁽⁷⁾で、調質歯車の歯面強度には潤滑油の粘度が大きな影響を及ぼすが、浸炭焼入れ歯車においては、その影響はほとんど見られないことを述べた。本研究では、常温では大きく異なる粘度を持つ潤滑油を用いて、油温を変えることにより粘度を一定とし、油の温度のみを要因としてとりあげ、この給油温度が歯面強度に及ぼす影響を、浸炭焼入れ歯車と調質

歯車について調べた。油温の上昇は歯面強度の低下を引き起こすとの Winter ら⁽⁸⁾の報告がある。しかしこの Winter らの報告は、一定の潤滑油を用いて温度を変えた場合であるので、油温が上昇することによる潤滑油の粘度の低下が原因で発生する歯面強度の低下と、温度上昇そのものが原因で発生する歯面強度の低下が混在した結果である。本研究は、このうちの温度上昇のみによる歯面強度に及ぼす影響を、一部以前得られた結果⁽⁷⁾を引用して明らかにした。

また一般に歯面強度においては硬さが支配的な要因であるので、この硬さが歯面強度に及ぼす影響をとりあげた。すなわち、調質歯車において硬さを変えた場合及び浸炭焼入れ歯車において有効硬化深さを変えた場合に、これらが歯面強度に及ぼす影響を求めた。

2. 実験条件

2.1 実験条件及び実験方法 本研究で用いた実験装置はFZG 平歯車試験機⁽⁹⁾である。駆動歯車(小歯車)の回転数は一定 $n_1 = 1890$ rpmとした。このときのピッチ円周速度は $V = 8.0$ m/s である。実験はなじ

* 原稿受付 平成6年4月18日。

^{*1} 正員, 電気通信大学電気通信学部 (〒182 調布市調布が丘1-5-1)。

^{*2} 電気通信大学大学院。

み運転後一定荷重での運転を行った。なじみ運転は、表1に示す荷重段階表に従って、第1段階から一定荷重での運転の荷重の一段階手前まで荷重を上昇させた。各荷重段階ごとの運転時間は15 minとした。次に一定荷重で、歯車の正常運転には極めて不都合であると思われるピッチング又はスポーリングによる歯面の損傷が発生するまで運転を行った。ピッチング又はスポーリング発生による歯面強度の寿命の判定法の詳細は、2.4節参照。また、前もって設定された繰返し数において、歯面観察をすると共に、試験歯車の摩耗量の測定(天秤精度は ± 1 mg)を行った。

2.2 試験歯車 試験歯車の諸元を表2に示す。試験歯車はモジュール $m=3$ 、小歯車の歯数 $z_1=27$ 、大歯車の歯数 $z_2=34$ の標準平歯車である。その材質、表面処理及び硬さなどを表3に示す。調質系歯車の歯幅 b は大小歯車とも $b=20$ mmであった。浸炭焼入れ歯車においては、歯元強度を低下させないで歯面の接触圧力を高める手段として、大歯車の歯幅は $b=20$ mmとし、小歯車にのみ歯すじ方向に段差をつけて有効接触幅 $b=5$ mmとして用いた。この小歯車の歯の形状を図1に示す。

試験歯車(表3参照)は、すべて研削仕上げ歯車を用いた。研削は、㈱岡本工作機械製作所の歯車研削盤 SHG360 により行った。試験歯車の精度は、JIS0~1級、歯面粗さは最大高さ $R_{max} \leq 1.5$ μm であった。

表3は本研究で用いた試験歯車の材質、表面処理及び硬さなどを示す。取り扱った熱処理は、浸炭焼入れ及び調質である。浸炭焼入れ歯車に用いた材質は、クロムモリブデン鋼 SCM415 である。本研究で行った潤滑油の温度が浸炭焼入れ歯車の歯面強度に及ぼす影響の試験では、表面の硬さはビッカース硬さ $HV \approx 730$ 、研削後の有効硬化深さ $h_{eff} \approx 0.7$ mmの歯車(表3参照)を用いた。この他に、有効硬化深さが歯面強度に及ぼす影響を調べるため、有効硬化深さが約0.2 mm及び1.1 mmのものをも用意した。本研究で用いた浸炭焼入れ歯車の硬さ分布を図2に示す。有効硬化深さ1.1 mmのものは、ガス浸炭焼入れ処理による。その理由は、液体浸炭焼入れではこの有効硬化深さの実現が困難なためである。

調質系歯車に用いた材質は、S45C及び SCM435 である。このうち SCM435 は、硬さが歯面強度に及ぼす影響を調べるのに用いた。表3で SCM435 の焼入れ温度はいずれも $850^\circ C$ であった。 $HV \approx 285, 380, 550$ の焼戻し温度はそれぞれ $650^\circ C, 500^\circ C, 180^\circ C$ であった。なお実験前後における硬さの変化については付録1に記した。

2.3 潤滑油 本研究で扱った潤滑油の基油の性状を表4に示す。すべてパラフィン系鉱油であるが粘度を大きく変えた。これらの基油には、潤滑油としての機能を持たせるため、酸化防止剤、さび止め剤及びあわ立ち防止剤が実状に合わせて添加されている。基

図1 浸炭焼入れ小歯車の歯の形状

表1 荷重段階

Load stage	Torque of pinion M_1 N·m	Hertzian pressure at pitch point P_H GPa ($b=5$ mm)
1	3.3	0.29
2	13.7	0.58
3	34.3	0.92
4	58.8	1.21
5	92.1	1.50
6	131	1.79
7	171	2.04
8	204	2.23
9	236	2.41
10	270	2.57
11	302	2.72
12	344	2.93
13	385	3.07
14	418	3.20
15	452	3.30
16	490	3.46

表2 歯車諸元

Module	m	3
Number of teeth	z_1	27
	z_2	34
Cutter pressure angle	α_o	20°
Addendum modification coefficient	x_1	0
	x_2	0
Diameter of generating pitch circle	d_{o1}	81 mm
	d_{o2}	102 mm
Diameter of tip circle	d_{k1}	87 mm
	d_{k2}	108 mm
Effective face width*	b	5&20 mm
Center distance	a	91.5 mm

* $b=5$ mm was applied for case hardened pinion

表3 試験歯車の材質と熱処理

	Heat treatment	Material	Surface hardness	Effective Case depth
1	Case hardened	SCM415	$HV \approx 730$	0.2 mm
2				0.7 mm
3				1.1 mm
4	Tempered	S45C	$HV \approx 280$	
5		SCM435	$HV \approx 285$	
6			$HV \approx 380$	
7			$HV \approx 550$	

油Ⅰはおよそスピンドル油、基油Ⅱはタービン油、基油Ⅲはギヤ油、基油Ⅳはシリンダー油などの基油として用いられている粘度の油である。実験には表4に示す基油に、摩耗防止剤 ZDTP（二次型）を添加して用いた。実験に用いた潤滑油を表5に示す。

潤滑方法は強制潤滑で、試験歯車のかみ込み側から吹き付けた。吹付け油量は2.4 L/minであった。給油温度が歯面強度に及ぼす影響を調べる実験では、先ず油Ⅲを用い、油温を60℃及び90℃とし、油温が歯面強度に及ぼす影響を調べた。次に給油温度を変えて、油Ⅱ、油Ⅲ及び油Ⅳの動粘性係数を同じ（ $\nu \approx 25 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ）にした。潤滑油の温度が高くなると歯面強度が低下するとの報告⁽⁸⁾はあるが、この報告においては上記第一の実験と同様に、温度上昇による潤滑油の粘度の減少による影響と、温度上昇そのものによる影響とが重畳した結果となっており示されている。温度のみの影響をとり上げるためには、一定の油では実現できないので、ここでは粘度の異なる3種類の油を用意し、温度を変え粘度を一定に保ち、歯面強度に及ぼす温度のみの影響をとり上げた。この場合の油Ⅱ、油Ⅲ及び油Ⅳの油温はそれぞれ60℃、90℃及び105℃とし、給油位置における油の粘度を一定とした。更にこの他に潤滑油として油Ⅲを用い、給油温度を60℃とした実験をも進めた。油の温度はいずれもノズル出口での温度を用いて示し、精度を $\pm 3^\circ\text{C}$ に制御した。

2.4 寿命の判定法 歯面損傷荷重を示す尺度として、ピッチ点におけるヘルツ圧力 P_H (GPa) を用いて示した。またここでは小歯車の繰返し数 $N_1 = 2 \times 10^7$ を歯面強度の耐久限度（疲労限度） $P_{H,lim}$ (GPa) とし、同じヘルツ圧力で示した。これ以上繰返し数を進めると、耐久限度はここで定めた値より下がる傾向にはあるが、本研究で扱った範囲内での歯面強度について見いだされた全般的な傾向を論じるには、差しつかえないものと判断した。歯面強度 P_H の寿命は、ピッチング又はスポーリング発生に起因する摩耗量の急増するときまでの小歯車の繰返し数 N_1 を用いて示した。

浸炭焼入れ歯車の寿命は、ほとんどの場合スポーリングによるものであったが、高い繰返し数においてはピッチングによるものも見られた。調質歯車の場合は高い荷重においてはスポーリングの発生も見られたが、大部分の場合はピッチングによるものであった。

図3に実験により得られた摩耗曲線の一例を示す。この図は、一定荷重で運転を始めてからの繰返し数 N_1 と大小歯車の総摩耗量 W (mg) との関係を示したものである。実験条件は図に示されている。この図では、 $N_1 = 4 \times 10^5$ の運転後ピッチングが発生し始めたことを

示している。この繰返し数以降もピッチングは増加しているが、ピッチング発生の初期段階では、ピッチングの発生は摩耗曲線の傾きには大きな影響を与えていない。しかし $N_1 = 3 \times 10^6$ 付近から摩耗曲線の傾きは大きくなっている。またこの繰返し数付近からピッチングの個数も急に増加しており、摩耗曲線の傾きの変化する繰返し数と、ピッチング個数が急に増加する繰返

表4 潤滑油の基油

Base oil		I	II	III	IV
Kinematic viscosity	40℃	8.98	55.6	198	401
$\nu \text{ m}^2/\text{s} \times 10^{-6}$	100℃	2.47	7.86	18.1	28.6
Specific gravity 15/4℃		0.870	0.880	0.890	0.903
Viscosity index		84.9	99.9	100	99.0
Flash temperature °C		170	226	270	308

表5 試験潤滑油

No	Designation	Base oil & Additives
1	Oil I	I
2	Oil II	II + ZDTP 0.2 wt%
3	Oil II _A	II + ZDTP 0.1 wt%
4	Oil III	III + ZDTP 0.2 wt%
5	Oil IV	IV + ZDTP 0.2 wt%

図2 浸炭焼入れ歯車の硬さ分布

図3 摩耗曲線

し数とほぼ一致している。よって調質歯車の場合は、この図に示すように、比較的なだらかな傾斜を持ち傾きがほぼ一定である定常摩耗の直線と、ピッチング個数が急に増加することによる傾斜が急な直線との交点、この例では繰返し数 $N_f=3.5 \times 10^6$ を歯面強度の寿命とした。浸炭焼入れ歯車においては、スポーリングが発生すると摩耗量も急に増加したので、この繰返し数を歯面強度の寿命とした。

3. 実験結果及び考察

3.1 潤滑油の給油温度が歯面強度に及ぼす影響

3.1.1 潤滑油が一定で油温を変えた場合 図4及び図5は潤滑油を一定とした場合に、油温と歯面強度との関係を調べた実験結果である。図4は浸炭焼入れ、図5は調質歯車の場合である。図4から明らかなように、浸炭焼入れ歯車の場合、荷重を同じとして寿命を比較すると、すべての時間強度の範囲において、60℃の場合の歯面強度 P_H は、90℃の場合よりも約2倍ほど寿命が長い。しかし本実験の範囲内では、油温が浸炭焼入れ歯車の耐久限度 P_{Hlim} に及ぼす影響は10%以下である。

図5は調質歯車の場合であるが、浸炭焼入れ歯車の場合と比較すると、60℃の場合の歯面強度は90℃の場合よりかなり高いことが分かる。よって油温が歯面強度に及ぼす影響は、浸炭焼入れ歯車の場合よりも調質歯車の場合に極めて大きなことが分かる。しかし図4及び図5は、潤滑油が一定で油温を変えた場合であるので、温度変化による油の粘度変化と、温度そのものの両方が歯面強度に影響を及ぼした結果を示している。この潤滑油が一定で油温を変えた場合については、以前報告されている^{(1) (8)}。

3.1.2 油の種類と油温を変えて粘度を同じとした場合 図6は、給油温度と歯面強度との関係を示す。浸炭焼入れ歯車の場合である。ここでは温度を変えることにより、油II、III及びIVの動粘性係数を同じ($\nu \approx 25 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)に保ち、歯面強度に及ぼす温度のみの影響を取りあげた。図から明らかなように、油III(90℃)の歯面強度 P_H は、油II(60℃)を用いたときの歯面強度より低い。油IV(105℃)の場合の歯面強度の値は、油III(90℃)の場合の歯面強度と比較してみると、明白な差異は見られないが、同一荷重で得られたいくつかの実験値を互いに比較すると、油IV(105℃)の値は油III(90℃)の値より低く現われている。

図7は、図6における給油温度と浸炭焼入れ歯車の耐久限度 P_{Hlim} との関係を示した。ここでは油II(60

℃)の耐久限度を基準(単位1)として、他の条件での耐久限度の値を表示した。図から明らかなように、浸炭焼入れ歯車においては、90℃(油III)の場合における P_{Hlim} と105℃(油IV)の場合の P_{Hlim} との差は

図4 油温が浸炭焼入れ歯車の P_H に及ぼす影響

図5 油温が調質歯車の P_H に及ぼす影響

図6 油温が浸炭焼入れ歯車の P_H に及ぼす影響

ない。油Ⅱ（60℃）の場合の P_{Hlim} とこれらの値を比較すると、後者（油温90℃及び105℃の場合）の方が約6%低い値を示している。以前得られた浸炭焼入れ歯車の実験結果⁽⁷⁾では、粘度は歯面強度にはほとんど影響を及ぼさないことを示した。図4と図6により浸炭焼入れ歯車の場合、同一の油で温度上昇による歯面強度の低下は、粘度の低下による歯面強度の低下よりも、温度上昇そのものによる歯面強度の低下のほうが大きいことが分かる。

図8は図6の場合と同様に、油Ⅱ_A、油Ⅲ及び油Ⅳにおいて油温を変えることにより、給油の動粘性係数 ν を同じとした場合に、給油温度と調質歯車の歯面強度との関係を示す。表5に示す通り、油Ⅱ_AのZDTP添加濃度は0.1wt%で、他の油Ⅲ及び油ⅣにおけるZDTP添加濃度は0.2wt%である。著者らの以前の研究⁽⁷⁾によれば、この程度のZDTP添加濃度の差は、歯面強度にはほとんど影響を及ぼさないことが示されている。この図8から明らかなように、油Ⅲ（90℃）及び油Ⅳ（105℃）の場合の歯面強度は、油Ⅱ_A（60℃）の場合よりもかなり低い値である。特に、時間強度における両者の寿命の差異は大きく、Ⅱ_A（60℃）の場合の寿命は、同じ荷重で比較すると油Ⅲ（90℃）及び油Ⅳ（105℃）の場合の約5倍程度にも達している。なお油Ⅲと油Ⅳの場合の歯面強度には、明瞭な差は見られず、両者のわずかな差異はばらつきの範囲と見てよい。また図6と図8とを比較すると、給油温度は浸炭焼入れ歯車の場合よりも、調質歯車の歯面強度に大きな影響を及ぼすことが分かる。

図9は、図8において、給油温度と調質歯車の耐久限度 P_{Hlim} との関係を示したものである。ここでは、油Ⅱ_A（60℃）の場合の P_{Hlim} を基準（単位1）として、

図7 油温が浸炭焼入れ歯車の P_{Hlim} に及ぼす影響

他の条件での P_{Hlim} とを比較した。この図には、これらの値との比較のため、油Ⅰ（60℃、 $\nu = 5.3 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ）の値を既発表⁽⁷⁾のものを引用して示した。図から明らかなように、調質歯車においては、90℃（油Ⅲ）の場合の P_{Hlim} と105℃（油Ⅳ）の場合の P_{Hlim} の差は見られないが、これらの値は60℃（油Ⅱ_A）の場合に比して約24%低い値である。前報⁽⁷⁾では、潤滑油の動粘性係数 ν は、調質歯車の歯面強度に大きな影響を及ぼすことを示した。これらを含めて考えると、調質歯車においては潤滑油の粘度の他に、潤滑油の給油温度も歯面強度に大きな影響を及ぼすことが分かる。また、油Ⅰの粘度 ν は、油Ⅲ及び油Ⅳの粘度より約4

図8 油温が調質歯車の P_H に及ぼす影響

図9 油温が調質歯車の P_{Hlim} に及ぼす影響

倍ほど低いにも拘らず、油Ⅰの場合の歯面強度は、油Ⅲ及び油Ⅳの場合の歯面強度よりかなり高いことを示している。このことは、潤滑油の粘度が歯面強度に及ぼす影響を論じる場合には、潤滑油の温度をも考慮に入れなければならないことを示している。

これらのことを総合すると、歯面強度に関して調質歯車の負荷能力を高めるためには、潤滑油の温度を低くして運転することが重要であることが分かる。

3.2 硬さが歯面強度に及ぼす影響

3.2.1 調質系歯車の硬さの影響 図10は調質系歯車において、硬さと歯面強度との関係を示す。実験条件は図に示されている。図中 TB (Tooth breakage) は歯の折損を示す。HV≒380 の歯車の歯面強度 P_H を同じ荷重で論ずれば、HV≒285 の場合よりも約10倍も長い寿命を示し、耐久限度 P_{Hlim} を尺度にして比較すると、およそ30%程高い値を示している。この結果は、従来得られている結果とほぼ同程度の値である。しかしHV≒550 の場合は、高い荷重においては歯が折損する現象が生じた。このHV≒550 の歯車の場合に折損が発生する荷重は、HV≒380 の場合に運転可能な荷重よりかなり低い値である。よってこのような硬度を高くした調質系歯車においては、歯の折損が同時に発生するので、歯面強度のみに着目した実験結果を得ることができなくなることが分かる。

3.2.2 有効硬化深さの影響 歯面強度 P_H は有効硬化深さの増大とともに上昇していくことは、既知の事実であるが、ここでは新しいいくつかの実験を行い、その傾向を調べてみた。

図11は浸炭焼入れ歯車において、有効硬化深さ h_{eff} と歯面強度との関係を示す。ここでは歯の表面の硬さ HV は、すべての場合ほぼ一定HV≒730 とした。図中 h_{eff} ≒0.2mm、及び0.7mm のものは液体浸炭焼入れ歯車であり、 h_{eff} ≒1.1mm のものはガス浸炭焼入れ歯車である。ここでガス浸炭焼入れを採用した理由は、液体浸炭焼入れによりこの程度の h_{eff} の値を得ることは困難だからである。図は、 h_{eff} ≒0.7mm 及び 1.1mm の場合の歯面強度は、 h_{eff} ≒0.2mm の場合の歯面強度よりかなり高いことを示している。しかし h_{eff} ≒0.7mm の場合と h_{eff} ≒1.1mm の場合とを比較すると、これらの間の差はほとんど見られない。

図12は P_{Hlim} と h_{eff} との関係を示す。図中(7)は、筆者らの以前の研究結果の引用であることを示す。これによれば、 P_{Hlim} は、 h_{eff} がおよそ0.7mm までは h_{eff} の増大に伴って直線的に上昇している。これ以上の h_{eff} の値を液体浸炭焼入れで得ることは困難なので、ガス浸炭焼入れによりこの高い h_{eff} を得て、こ

の場合の歯面強度を得た。その結果図示されている結果を得た。すなわち h_{eff} >0.7mm では、 h_{eff} の増大により P_{Hlim} は上昇しないことが分かる。吉田ら⁽⁶⁾は、浸炭焼入れ歯車の歯面強度に対しては、最適な有効硬化深さが存在することを提案している。この h_{eff} ≒0.7mm の歯面強度と h_{eff} ≒1.1mm の歯面強度がほぼ同じであることは、ガス浸炭焼入れと液体浸炭焼入れの両方式の相違が歯面強度にどう影響を及ぼすかの問題、及び吉田らの提案とを併せて今後のより詳細な研

図10 硬さの相違が P_H に及ぼす影響

図11 有効硬化深さの相違が P_H に及ぼす影響

図12 有効硬化深さと P_{Hlim} との関係

究が必要である。

3.2.3 表面の硬さと歯面強度 図13は、本研究で得られた耐久限度 P_{Hlim} と、表面の硬さHVとの関係をまとめたものである。図には、ISO案及びJSMEの推薦値をも同時に示してある。ISO案の運転条件は、粘度 $\nu=100\text{mm}^2/\text{s}$ 、ピッチ円周速度 $V=10\text{m/s}$ 、歯面粗さ $R_{\text{tm}}=3\mu\text{m}$ 及び P_{Hlim} の繰返し数を $N=5\times 10^7$ 以上の値のときとしている。よって本研究の運転条件とは完全には一致していないが、全体の傾向を論ずるにはさしつかえない。この図によると、本研究で得られた調質系歯車 (Tempered S45C & SCM435) の P_{Hlim} は、ISO案及びJSMEの値より若干高い値を示している。そして浸炭焼入れ歯車 (Case hardened)における本研究の P_{Hlim} は、ISO案及びJSMEの値よりかなり高いことが分かる。また、塩浴窒化歯車 (Nitrided) の場合の歯面強度 P_{Hlim} は、浸炭焼入れ歯車と調質歯車の場合の中間にあることが分かる。なおこの塩浴窒化歯車についての詳細は、付録2に記した。

4. 結 言

潤滑油の温度及び試験歯車の硬さを変えた本実験結果の範囲から得られた内容をまとめると、以下のとおりである。

- (1) 互いに異なっている粘度を持つ3種類の潤滑油を用いて、温度を変え粘度を一定とした場合は、潤滑油の温度は、浸炭焼入れ歯車よりも調質歯車においての歯面強度に大きな影響を及ぼすことが分かった。
- (2) 硬さの高い調質処理鋼の場合、歯面硬さが高くなるに伴ない歯面強度は上昇していくが、一方歯の折損を考慮してかかる必要がある。折れに対する硬さ限界は、SCM435の場合、ビッカース硬さ $HV=550$ では歯の折損が発生する。
- (3) 浸炭焼入れ歯車の歯面強度の耐久限度は、有効硬化深さが約 0.7mm まではほぼ直線的に上昇する。
- (4) 塩浴窒化歯車の歯面強度は、材質及びその処理温度に影響を受けて変化するが、これらの値は、浸炭焼入れ歯車と調質歯車との中間にある。

終りに本研究をすすめるにあたり、種々ご援助いただいたパーカー熱処理工業(株)の社長里見彰彦氏及び関係の方々に厚くお礼申し上げます。本実験に使用した試験片の熱処理はすべて同社のご好意によりなされた。

図13 硬さと P_{Hlim} との関係

付図1 実験後の試験歯車表面の硬さ分布

目 録

1. 実験後の硬さの分布

本論では歯面強度のみを述べた。しかし実験後の硬さは、歯面強度とは密接な関係があると思われ、興味ある結果が得られたのでここに付録として記した。

付図1(a)、(b)は実験後の小歯車の硬さ分布を示す。歯面から0.15 mmの深さの位置における歯丈方向の測定値である。(a)は浸炭焼入れ歯車、(b)は調質歯車の場合である。また図中Pはピッチ点、B₁、B₂は最悪荷重点、E₁及びE₂は、それぞれ小歯車の歯先(かみあい終り)、大歯車の歯先(かみあい始め)がかみあっている位置を示す。図(a)が示すように、浸炭焼入れ歯車の場合、運転後の硬さは、歯面かみあい領域全体(E₁~E₂)にわたってほぼ一様(HV≒730)であり、運転前の歯面の硬さ(HV≒730)とほとんど変わらず、運転前後で硬さの変化はほとんどないことが分かる。しかし調質歯車の場合、図(b)が示すように、歯丈方向の位置の相違により硬さが大きく異なっている。調質歯車の場合実験前の硬さがほぼ一様(HV≒280)であったが、かみあいによる加工硬化により歯面の硬さは複雑に変化することを示している。特に最悪荷重点付近(B₁及びB₂)の加工硬化は最も大きい。この加工硬化についてはいくつかの報告がある⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。

2. 塩浴室化処理歯車の歯面強度

窒化処理は、工業的に見ると浸炭焼入れ処理及び調質処理と共に重要な役割を果たしている表面処理の一つであるが、浸炭焼入れ及び調質処理において硬さを変えた場合とは趣旨が異なるので、塩浴室化処理歯車の歯面強度を付録として記した。試験歯車の諸元(表2参照)、小歯車の歯の形状(図1参照)、仕上げ方法、精度及び運転条件などはすべて浸炭焼入れ歯車の場合と同じにした。付表1は試験歯車の材質、処理温度及び硬さなどを示す。塩浴室化処理は、調質処理後(HV≒280)に行った。

付図2は、塩浴室化処理を施した歯車の歯面強度を示す。この図より SCM435 に塩浴室化処理を施した場合は、S45Cの場合よりも全体的に高い歯面強度を示しており、材質の違いは塩浴室化歯車の歯面強度に多少の影響を及ぼすことが分かる。また本研究で得られた実験の範囲内では、窒化処理温度は少なからず歯面強度に影響を及ぼし、S45Cの歯車の場合の歯面強度に最

適な処理温度は、約 610℃(Nit-2)であることが分かる。また図より塩浴室化処理歯車の耐久限度P_{HLim}は、ほぼ1.35~1.7GPaであることを示している。これらの値は、調質歯車のP_{HLim}と浸炭焼入れ歯車のP_{HLim}の中間の値であり、吉田らにより得られた軟窒化処理歯車の場合⁽¹²⁾とほぼ同じ値である。

付表1 試験歯車の材質と熱処理

Designation	Temperature of heat treatment	Material	Surface hardness*
1		S45C	HV≒600
2 Nit-1	630℃	SCM435	HV≒610
3		S45C	HV≒470
4 Nit-2	610℃	SCM435	HV≒480
5 Nit-3	570℃	S45C	HV≒470
6 Nit-3(shot)**	570℃	SCM435	HV≒650

*Hardness just below the compound layer

**Shotpeening was operated after nitrided 3

付図2 塩浴室化歯車の歯面強度

文 献

- (1) 橋本誠也, 機論 27-178(1961), 877, 28-190(1962), 700.
- (2) Niemann, G. & Richter, H., Konstruktion 12-5~10(1960), 185.
- (3) AGMA Information sheet 215.01(1966).
- (4) ISO/DP 6336/II(1982).
- (5) 滝農彦, 機論 47-416, C(1981), 493.
- (6) 吉田他3名, 機論 51-465, C(1985), 992.
- (7) 灰塚他3名, 機論 53-487, C(1987), 855.
- (8) Winter, H. & Knauer, G., Antriebstechnik 29-8(1990), 65.
- (9) Niemann, G. & Rettig, H., Erdöl und Kohle 7, 10(1954), 640.
- (10) 金子, 大内田, 機論 30-211(1964), 388.
- (11) 石橋, 横手, 機論 36-285(1970), 852.
- (12) 吉田他5名, 機論 53-485, C(1987), 164.