

Surface Durability of Case-Carburized Gears

(Influence of Surface Roughness on Temperature of Rolling-Sliding Contact Surface)

○学 ティラフン ダニエル レッダ (宮崎大院) 正 中西 勉 (宮崎大) 正 鄧 鋼 (宮崎大)

Daniel Tilahun REDDA, Graduate School, University of Miyazaki

Tsutomu NAKANISHI, University of Miyazaki, 1-1 Gakuen Kibanadai-nishi, Miyazaki-shi, Miyazaki 889-2192

Gang DENG, University of Miyazaki

The influence of surface roughness on the change of the temperature of rolling-sliding contact surface was investigated by using the lubricating oil of various temperatures. First, the surfaces of case-carburized test rollers were finished by methods of grinding and hand finishing with the abrasive papers. Second, the surface temperature of the test rollers having different surface textures was measured under the condition of rolling-sliding contact. From these experiments, the following results are obtained: The surface temperature rises remarkably with the increase of normal load. The initial surface texture and the inlet oil temperature have considerable influence on surface temperature. The surface temperature greatly falls when the surface is smoother and the inlet oil temperature is lower under the high load condition. Therefore, in order to improve the surface durability of case-carburized power transmission gears, the smooth tooth surface texture and lubricating oil of low temperature are recommended.

Key Words : Case-Carburized Gears, Surface Durability, Roller, Roughness, Temperature, Lubricating Oil

1. まえがき

自動車などに用いられている動力伝達用歯車においては、動力源の高出力化や材料の省資源化などからその高負荷容量化や軽量化などの目的のために、歯車の折損に対する曲げ強さの向上が材料開発やショットピーニングなどにより図られ、現在、歯面疲れに対する歯面強さの検討が要望⁽¹⁾されている。これらのことから、筆者らは、小型歯車に用いられている浸炭焼入れ歯車を対象として、二円筒面圧基礎実験で浸炭焼入れ鋼の転がり滑り接触面の面圧強さに及ぼす硬さ分布の影響⁽²⁾、ショットピーニングの影響⁽³⁾などを明らかにしてきた。また、浸炭焼入れ鋼の高負荷運転では、転がり滑り接触面の温度上昇に伴う表面硬さの低下や油膜形成状態の劣化などが考えられるため、潤滑油の温度に着目した転がり滑り接触面の温度の低下方法⁽⁴⁾を検討した。

本報では、歯車の加工上で考慮可能な歯面粗さに着目した運転中の歯面温度の低下方法を検討した。具体的には、まず、浸炭焼入れ焼戻し円筒試験片の外周接触面を研削仕上げと研磨紙を用いた仕上げで三種類の表面形状を作成し、その特徴を明確にした。次に、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試験機⁽⁵⁾を用い、給油温度を変化させ、負荷運転にともなう転がり滑り接触面の温度変化に及ぼす表面粗さの影響を調べた。

2. 転がり滑り接触面の粗さ

2.1 試験片の寸法 円筒試験片の形状・寸法は、中空ディスク状で、外径 70 mm、内径 45 mm、軸方向長さ 28 mm である。なお、円筒試験片には、転がり滑り運動と有効接触幅の確保のため、低速側円筒試験片と一部外周断面形状の異なる高速側円筒試験片⁽⁶⁾がある。

2.2 試験片の加工工程および加工条件 円筒試験片の加工工程は、浸炭鋼 (JIS G4105 SCM420 相当品) を焼なまし・荒切削加工・浸炭焼入れ焼戻し・内研外研加工で、その後、外周接触面の粗さ製作のための研削仕上げ (表面粗さ形状 A)、さらに研磨紙で二種類の手仕上げ (表面粗さ形状 B と表面粗さ形状 C) である。なお、手仕上げは旋盤を利用し、研磨紙 #1000・#2000・#3000 を順次用いてドライで実施した。

2.3 加工結果および考察 図 1 に、加工後の外観 (光学実体顕微鏡写真) を示す。また、図 2 に、円筒試験片の外周接触面における加工後の断面形状並びに定量的な表面粗さを示す。図 1・図 2 から、表面粗さ形状 A は、小型動力伝達用歯車の歯面シェービング仕上げの粗さに相当する最大高さ⁽⁶⁾ 3.5~5.0 μmRmax 、最大高さ粗さ⁽⁷⁾ 3.5 μmRz 程度で形状は突起がランダムなこと、さらに手仕上げした表面粗さ形状 B と表面粗さ形状 C は、表面粗さ形状 B の場合 1.0~2.5 μmRmax 、1.5 μmRz 程度で突起が滑らかになり研削の加工目 (痕) が残存していること、表面粗さ形状 C の場合 0.5~1.5 μmRmax 、0.5 μmRz 程度で全体的に滑らかになっていることがわかった。

3. 転がり滑り接触面の温度

3.1 試験片の組合せ 低速側円筒試験片と高速側円筒試験片は、同一表面粗さ形状のものを組合せた。

3.2 実験方法および実験条件 図 3 に、実験装置・円筒試験片・転がり滑り接触面の温度測定用 (移動回転表面用) 温度センサー (E 熱電対) の一部を示す。ここで、図 3 において、実験装置はバックアップロール式二円筒面圧基礎試験機 (低速側円筒試験片と高速側円筒試験片; 回転数 2630 rpm と 3190 rpm, 転がり滑り接触条件の滑り率 21.3 % と 17.6 %, 滑り速度 2.05 m/s)⁽⁵⁾ で、潤滑油は極圧

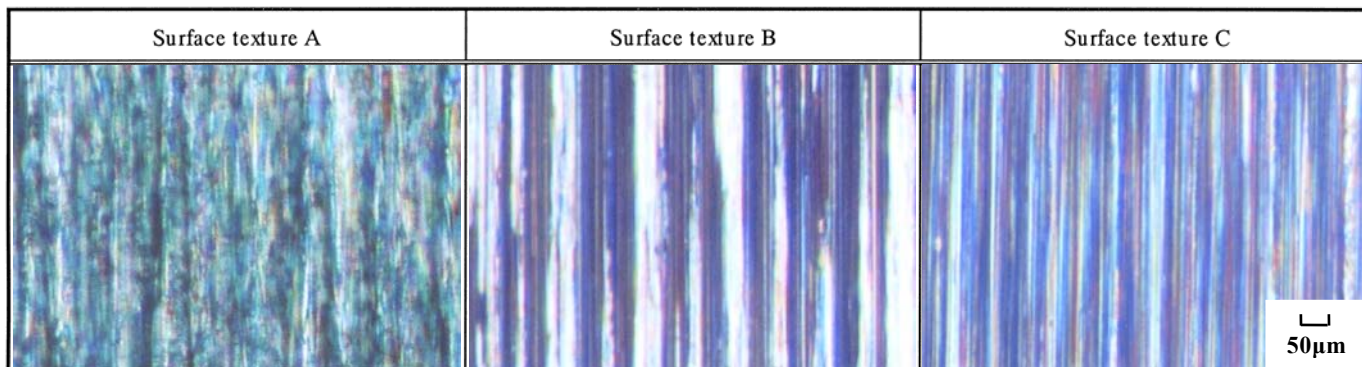


Fig. 1 Appearances of surface in test rollers (after finishing)

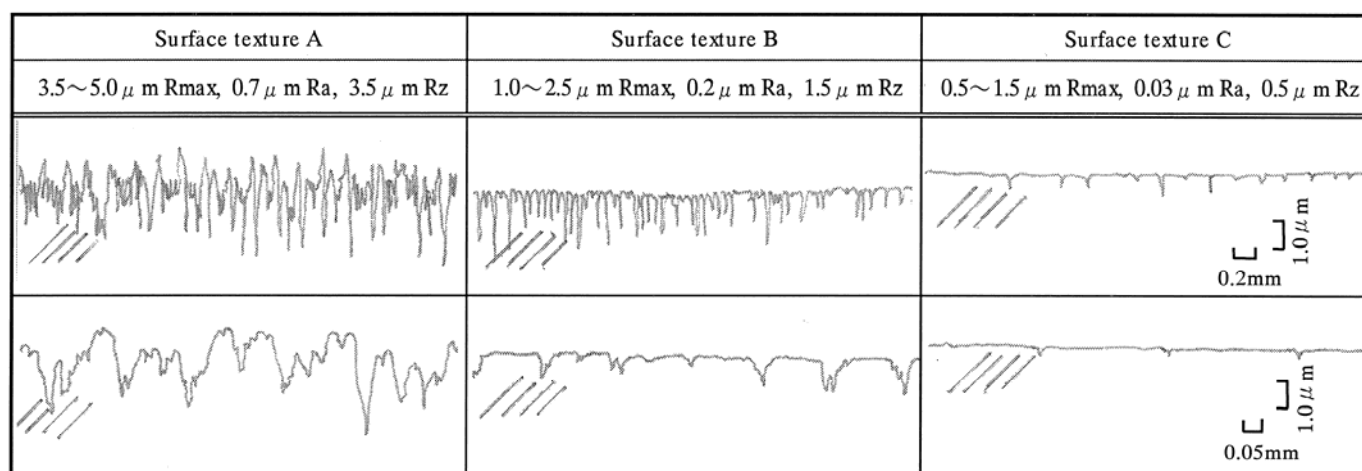


Fig. 2 Surface profile and surface roughness in test rollers (after finishing)

添加剤を含まない SAE30 相当の ISO VG100 (密度： $0.8855 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 粘度： $99.40 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (313 K), $11.12 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (373 K)) である。なお、他に、実験装置の各部温度測定用として、室温用のフレキシブル形温度センサ (T 熱電対) と給油温度用並びに飛散油温度用のシース形温度センサ (T 熱電対) 2 本を用い、各部の测温データは、実験時間と負荷状況のデータとともに連続的に多ペンレコーダーと IC メモリカードに記録⁽⁴⁾した。また、実験条件は、三種類の表面粗さ形状の円筒試験片に対して、給油量は一定の $33 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ で、給油温度を 4 つの設定値 ($T_o = 306 \cdot 313 \cdot 329 \cdot 338 \text{ K}$) とし、負荷を 7 つの設定値 (円筒試験片接触面の法線荷重 $F_n = 3.98 \cdot 4.74 \cdot 6.45 \cdot 8.42 \cdot 10.65 \cdot 13.15 \cdot 15.92 \text{ kN}$, 有効接触面幅 7.5 mm で最大接触応力 $\sigma_H = 1.05 \cdot 1.14 \cdot 1.33 \cdot 1.52 \cdot 1.71 \cdot 1.90 \cdot 2.10 \text{ GPa}$) とし、各負荷の繰返しを低速側円筒試験片の繰返し数 $N_2 = 1.0 \times 10^5$ までとした。

3.3 実験結果および考察 図 4 に、二円筒面圧基礎実験における実験時間と負荷並びに実験時間と各部温度の計測値の代表例を示す。また、図 5 に、表面粗さ形状 A・C における負荷と低速側円筒試験片の接触面温度 (繰返し数 $N_2 = 1.0 \times 10^5$ 時温度) との関連を示す。図 4 と図 5 などから、表面粗さ形状 A・B・C のいずれの実験においても、転がり滑り接触面の温度は、負荷の増加とともに発生する摩擦熱が増大し著しく上昇すること、一方、飛散油温度は、測定位置に依存するものの緩慢に上昇することがわかった。また、転がり滑り接触面の温度は、接触面の表面形状並び

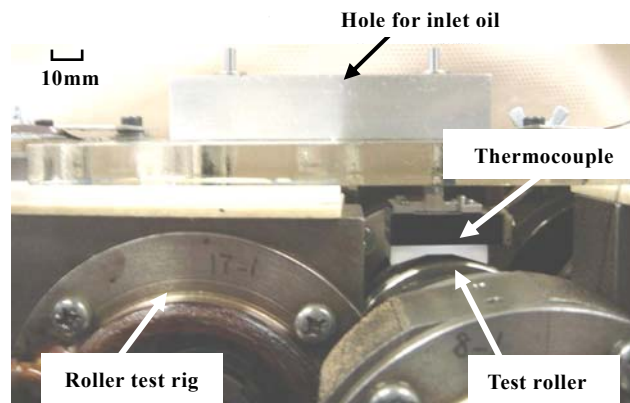


Fig.3 Side view of roller test rig, test roller and thermocouple for temperature of rolling-sliding contact surface

に給油温度の影響を受けること、たとえば、高負荷条件で表面粗さ形状 A の場合、給油温度が同一の表面粗さ形状 C の場合に比べ接触面の温度は約 70 K 高く、給油温度が約 30 K 高くなると追従して接触面の温度も約 30 K 高くなることがわかった。

次に、図 6 に、各負荷条件における転がり滑り接触面の表面粗さと最大表面温度との関連を示す。ここで、図 6 において、最大表面温度は、低速側円筒試験片の繰返し数 $N_2 = 0 \sim 1.0 \times 10^5$ 間におけるその接触面の温度の最大値である。図 6 などから、転がり滑り接触面の温度は、給油温度

一定並びに負荷一定の条件において、接触面の表面粗さが小さいほど低下していること、また、接触面の温度低下量は、高負荷条件ほど接触面の表面粗さが小さいほど大きいことがわかった。また、高負荷領域の転がり滑り接触面の温度を、接触面の表面粗さ並びに給油温度の条件によって、浸炭焼入れ鋼の加工工程の焼戻し温度 (423 K) 以下に保持できることがわかった。したがって、これらのことから、浸炭焼入れ鋼の転がり滑り接触面の表面粗さに着目して、高負荷領域の温度上昇による接触面の材質の変化⁽²⁾ ⁽⁸⁾並びに油膜の形成状態の変化等を少なくすることが可能である。

4. 転がり滑り接触面の表面粗さと最大接触応力

図 7 に、転がり滑り接触面の初めの (加工後の) 表面粗さと最大接触応力との関連を給油温度が同一並びに接触面

の温度が同一の条件で示す。図 7 から、給油温度と接触面の粗さ並びに運転上許容される転がり滑り接触面の温度をそれぞれ設定すると負荷可能な最大接触応力が求められることがわかる。また、一方、給油温度と負荷する最大接触応力並びに運転上許容される転がり滑り接触面の温度をそれぞれ設定すると接触面をどの程度の粗さに仕上げる必要があるかがわかる。すなわち、図 7 は、たとえば、給油温度を 338 K・表面粗さを 4 μmRz ・運転上許容される転がり滑り接触面の温度を 423 K とした場合、負荷可能な最大接触応力は 1.3 GPa となることを示し、また、一方、給油温度を 338 K・負荷する最大接触応力を 1.8 GPa・運転上許容される転がり滑り接触面の温度を 423 K とした場合、接触面の表面を 2.5 μmRz に仕上げる必要があることを示していることになる。

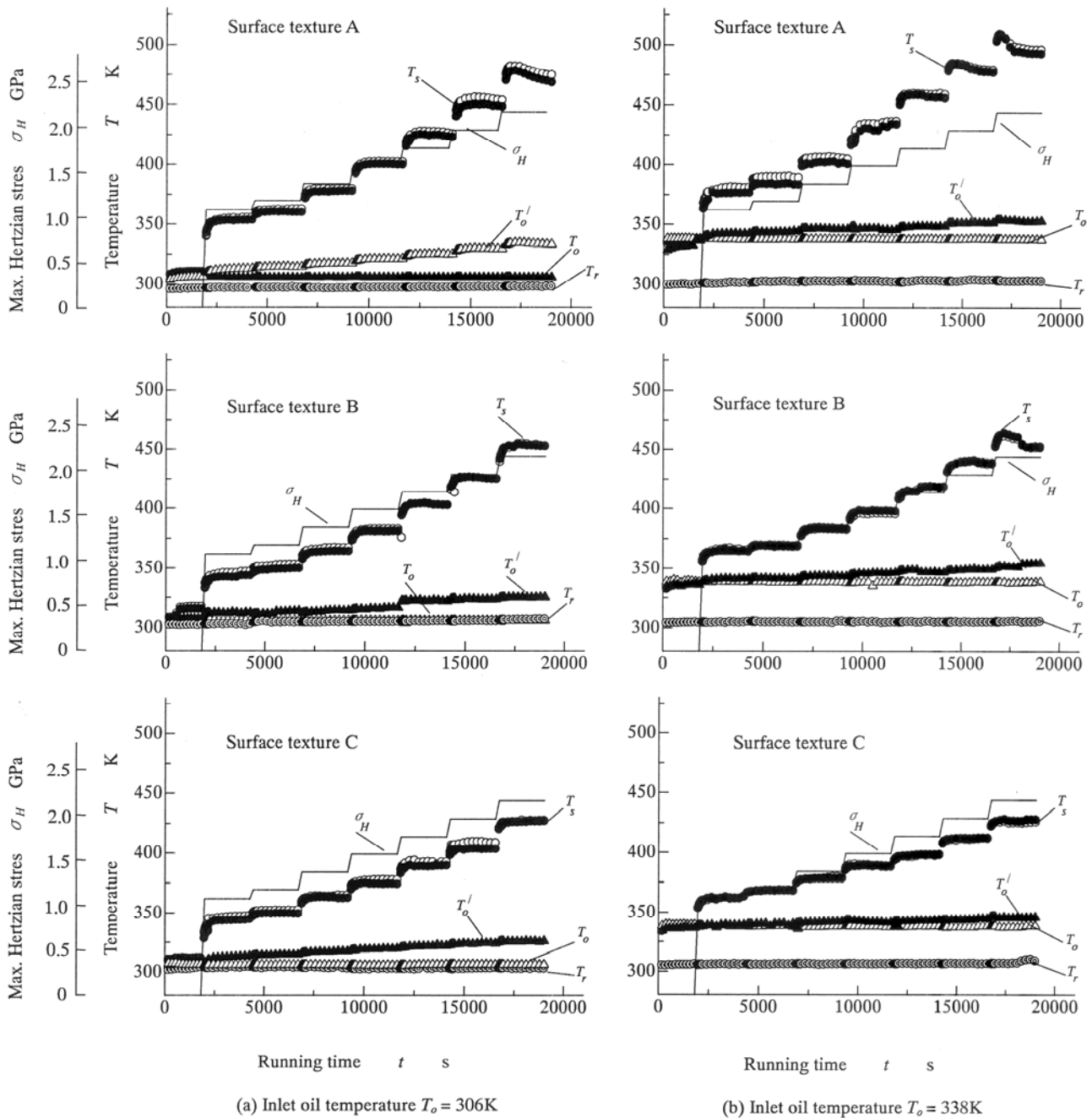


Fig. 4 Temperature measurement results in roller tests (T_s, T_o, T_r : Surface, splash oil and room temperatures)

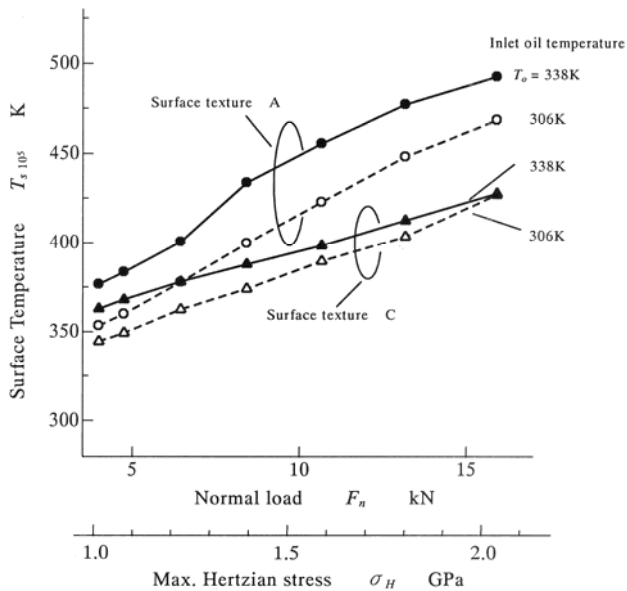


Fig. 5 Relationship between normal force and temperature of rolling-sliding contact surface (T_s : Surface temperature of low-speed rollers at $N_2=1.0 \times 10^5$ cycles)

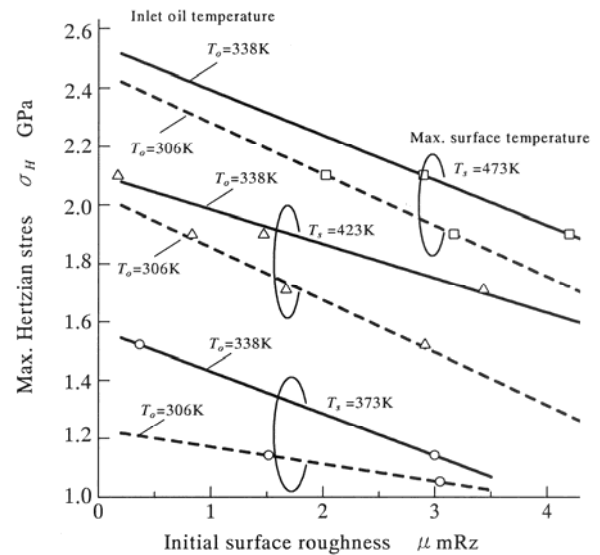


Fig. 7 Relationship between initial surface roughness and max. Hertzian stress of rolling sliding contact surface in the same inlet oil and surface temperatures

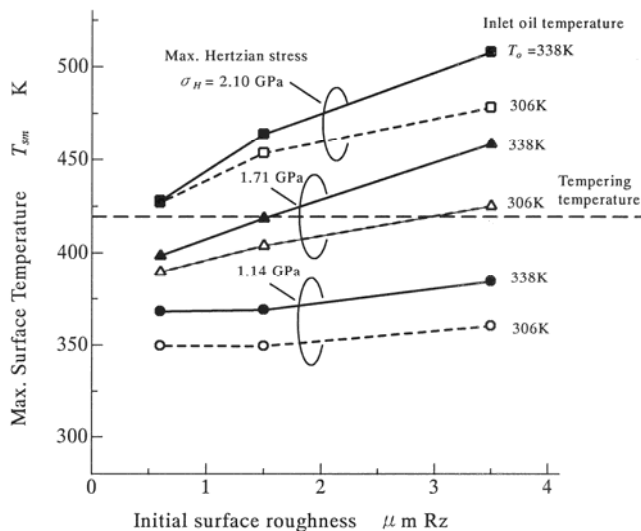


Fig. 6 Relationship between initial surface roughness and temperature of rolling-sliding contact surface (T_{sm} : Max. surface temperature of low-speed rollers at $N_2=0 \sim 1.0 \times 10^5$ cycles)

5. まとめ

浸炭焼入れ歯車の歯面強さ向上を目的に、各円筒試験片の外周をそれぞれ三種類の表面形状に作成し、転がり滑り接触面の温度変化に及ぼす表面粗さの影響について、給油温度を制御した潤滑油と二円筒面圧基礎試験機を用い考察・検討した。その結果、転がり滑り接触面の温度は、

- (1) 負荷の増加とともに発生する摩擦熱が増大し著しく上昇すること、
- (2) 接触面の表面形状並びに給油温度の影響を受けること、
- (3) 接触面の表面粗さが小さいほど高負荷条件で大きく低下すること、

がわかった。また、歯車の強さ設計法あるいは加工法並びに運転技術上において、

- (4) 考慮すべき歯面粗さや給油温度などの影響因子並びに負荷条件が定量的に求められること、
- が明確になった。

なお、以上の結果は、転がり滑り接触面を出来るだけ滑らかに仕上げるとともに、低い給油温度を用いることで、転がり滑り接触面の温度上昇に起因する材料の強さの低下を抑制することができることを示しており、このことから浸炭焼入れ歯車の歯面強さの向上が計られることが期待できると考えられ、今後さらに検討する予定である。

終わりに、株式会社住友金属小倉・新日本石油株式会社並びに宮崎大学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) たとえば、鈴木義友、日本機械学会（機素潤滑設計部門 MPT2004 シンポジウム〈伝動装置〉）講演論文集、04-17（基調講演）、(2004-11)、1-4.
- (2) たとえば、竹内 隆・中西 勉・鄧 鋼、日本機械学会論文集、70-697、C(2004-9)、2774-2779.
- (3) たとえば、中西 勉・竹内 隆・鄧 鋼、日本機械学会論文集、71-712、C(2005-12)、3561-3566.
- (4) 中西 勉・ティラフン ダニエル レッダ・伊野大輔・鄧 鋼、日本機械学会（創立 110 周年記念 2007 年次大会）講演論文集、Vol.4、07-1、(2007-9)、31-32.
- (5) たとえば、Tsutomu NAKANISHI, Takashi TAKEUCHI, Gang DENG, Proceedings of The JSME International Conference on Motion and Power Transmissions (MPT2001), Fukuoka, JAPAN, Vol. I, (2001-11), 255-260.
- (6) 日本規格協会編、JIS ハンドブック 機械要素、(1983-4)、269-273、日本規格協会.
- (7) 日本規格協会編、JIS ハンドブック 機械要素、(2002-1)、177-190、日本規格協会.
- (8) たとえば、矢島悦次郎・市川理衛・古沢浩一、若い技術者のための機械・金属材料増補版、(1993-10)、131-135、丸善株式会社.