

(各種仕上げ歯車の歯面損傷状況)

Manufacture and Performance of Medium-Hardness Gears

(Tooth Surface Failure of Various-Finished gears)

○正 中西 勉 (宮崎大) 正 有浦泰常 (九州大)

Tsutomu NAKANISHI, Miyazaki University, 1-1 Gakuenkibanadai-nishi, Miyazaki.
Yasutsune ARIURA, Kyushu University, 6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka.

Key Words: Gear, Medium-Hardness Gear, Manufacture, Load-Carrying Capacity, Hobbed Gear, Finish-Hobbed Gear, Ground Gear, Surface Texture, Surface Failure

1. まえがき

一般産業用機械等に用いられる中・大形円筒歯車を対象に、著者らはこれまでに中硬度調質(330HBS程度)歯車の負荷能力を検討し、この硬さの領域の歯車においては加工に関連する歯面粗さの大きさを歯車材と熱処理法を変えることなく歯面強さが数倍異なることを見出した⁽¹⁾。本報では、中硬度調質歯車の生産性と負荷能力向上の点からこれまでの運転性能試験結果⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾をもとに、さらに各種仕上げ歯車の仕上げ歯面とその運転歯面の状態およびそれぞれの歯面における歯面近傍硬さと断面硬さの変化について走査型電子顕微鏡・微小硬度計などを用い詳細に観察・測定し、負荷とその繰返しによって生じる歯面損傷の特徴について歯面の仕上げ加工との関連で考察・検討した。

2. 実験条件および実験方法

2.1 各種仕上げ歯車の諸元および鋼種 各種仕上げ歯車の諸元は、モジュール 6, 圧力角 20°, 歯数21枚と31枚, 歯幅 15 mm の標準平歯車で、その鋼種は合金鋼のJIS SCM435 である⁽¹⁾。

2.2 各種仕上げ歯車の加工工程 図1に各種仕上げ歯車の加工工程概要を示す。なお、それぞれの仕上げ歯車においては、小歯車・大歯車ともに生産性と負荷能力向上の点から一般的な歯車でホブ切り可能な上限硬さを考慮して、所定の硬さ(330HBS程度)になるように焼入れ焼戻しを施し、次に、ブランクの仕上げ加工後高速度鋼普通ホブでホブ切りしたもの(ホブ切り歯車)、さらに、高速度鋼仕上げ専用ホブで仕上げホブ切りしたもの(仕上げホブ切り歯車Ⅰ)、超硬仕上げ専用ホブで仕上げホブ切りしたもの(仕上げホブ切り歯車Ⅱ)、歯面研削仕上げしたもの(研削歯車)である⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。

2.3 実験方法 各種仕上げ歯車の運転性能の評価は、動力循環式歯車試験機(歯車軸間距離 156 mm・歯数比 31/21・小歯車回転数 1800 rpm・潤滑油 ISO VG150)を用い、ピッチ点での最大接触応力 $\sigma_H = 340 \sim 1180$ MPa の範囲内の設定負荷条件で行われたものである⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。したがって、本実験ではこれらの結果の試験歯車から、さらに、所用の目的のために種々の歯部試験片を製作し、次に、歯面の状態については走査型電子顕微鏡により詳細観察を行い、歯面近傍硬さ(表面から 100 μ m 以内)と断面硬さ(表面から 2mm 以内)については微小硬度計により測定を行った。

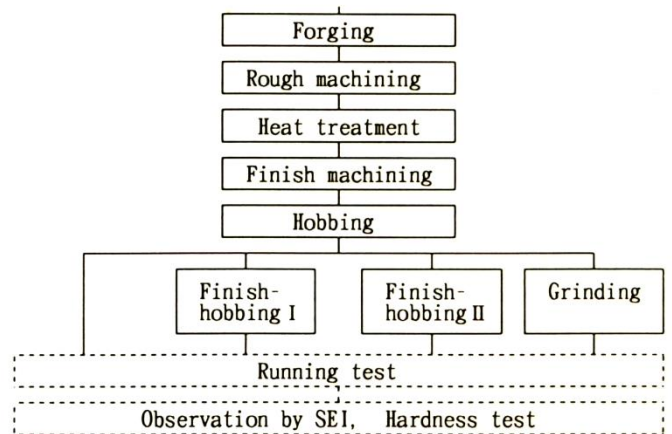


Fig.1 Outline of gear-manufacturing methods

3. 各種仕上げ歯車の仕上げ歯面性状

3.1 仕上げ歯面の状態 図2に各種仕上げ歯車の仕上げ歯面の走査型電子顕微鏡による詳細観察例(代表的に小歯車歯元面の未接触部)を示す。これらの観察結果から、

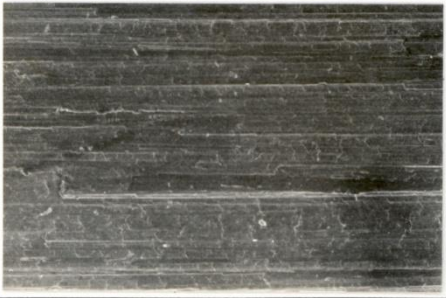


(1) ホブ切り歯車の場合、加工目の凹凸およびその間隔が不均一になっていること(歯形方向に測定した歯面粗さは 8~19 μ mRmax),

(2) 仕上げホブ切り歯車Ⅰの場合、ホブ切り歯車に比べ切削中の構成刃先による傷も少なく、加工目の凹凸および間隔がいくらか規則的になっていること(歯面粗さは 5~7 μ mRmax),

(3) 仕上げホブ切り歯車Ⅱの場合、ホブ切り歯車・仕上げホブ切り歯車Ⅰに比べさらに加工目の凹凸も小さくなっていること(歯面粗さは 3~6 μ mRmax),

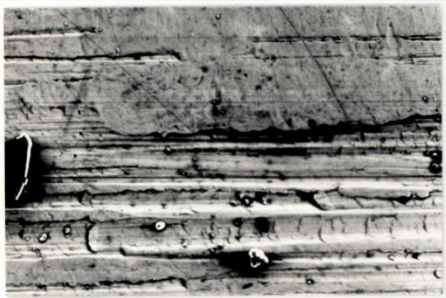

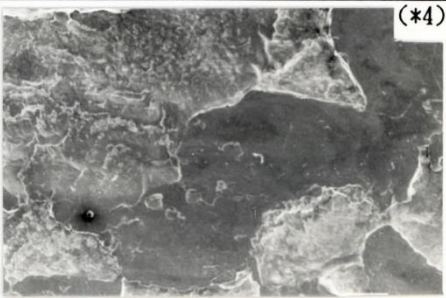

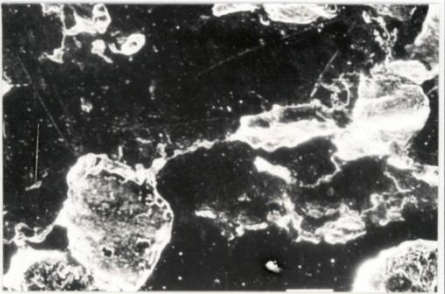

(4) 研削歯車の場合、歯面粗さを出来るだけ小さくする目的で歯面研削を適用したことであり極めて滑らかになっていること(歯面粗さは 1~2 μ mRmax),
がわかった。

3.2 仕上げ歯面の硬さ 各種仕上げ歯車の仕上げ歯面の硬さについては、歯面の状態観察と同様製作した歯部試験片の歯元面の未接触部を利用して微小硬度計による測定の結果、いずれの仕上げ歯車においても歯面近傍硬さと

| Hobbed gears, 8~19 μmRmax | Finish-hobbed gears II, 3~6 μmRmax | Ground gears, 1 μmRmax (*1) |
|---|--|---|
|  |  |  |

(*1): Various finished gears, Initial tooth surface roughness. (*2): SEM photograph at 11mm from tip, $\perp 100\mu\text{m}$.

Fig. 2 SEM photographs of finished tooth surface (pinion)

| Hobbed gears, 10 μmRmax $\sigma_H = 340\text{MPa}, N_1 = 10^7, P_1 = 0.02\%$ (66, 0, 0, 0) | Finish-hobbed gears I, 6 μmRmax $\sigma_H = 490\text{MPa}, N_1 = 10^7, P_1 = 0.07\%$ (169, 0, 0, 0) | Hobbed gears, 14 μmRmax (*1) $\sigma_H = 690\text{MPa}, N_1 = 2 \times 10^6, P_1 = 3.37\%$ (*2) (1034, 339, 33, 5) (*3) |
|--|---|--|
|  |  |  |
| Finish-hobbed gears II, 4 μmRmax $\sigma_H = 690\text{MPa}, N_1 = 10^7, P_1 = 0.50\%$ (232, 35, 6, 0) | Finish-hobbed gears II, 3 μmRmax $\sigma_H = 830\text{MPa}, N_1 = 10^7, P_1 = 3.24\%$ (570, 171, 50, 23) | Ground gears, 1 μmRmax (*1) $\sigma_H = 1180\text{MPa}, N_1 = 10^7, P_1 = 0.04\%$ (*2) (18, 2, 1, 0) (*3) |
|  |  |  |

(*1): Various finished gears, Initial tooth surface roughness. (*2): Hertzian stress, Cycles run, Pitting area ratio. (*3): Number of pits (diameter mm ; $\sim 0.3, 0.4\sim 0.6, 0.7\sim 0.9, 1.0\sim$). (*4): SEM photograph at 7mm from tip, $\perp 100\mu\text{m}$.

Fig. 3 SEM photographs of tooth surface failure after running (pinion)

断面硬さのそれぞれにおいて、特に母材硬さとの差異は認められなかった。このことは、歯車材において合金鋼を用いていることと熱処理法において硬く調質を行っていることから、材料の塑性変形能が小さく通常のプロブ切り・仕上げプロブ切り・研削のいずれの歯面仕上げ加工においても歯部の加工硬化等は生じにくいことを示している。

4. 各種仕上げ歯車の運転歯面性状

4.1 運転歯面の状態 図3に、各種仕上げ歯車の運転歯面の走査型電子顕微鏡による詳細観察例（代表的に小歯車の歯元面のピッチ線寄り）を示す。なお、図中に設定負荷条件・繰返し数・ピッチング面積率（発生したピット

の全面積を全作用歯面面積で除した値）・ピットの大きさの分布（発生したピットの全個数を大きさ別に区分した値）を併記している。これらの観察・測定結果から、各種仕上げ歯車の運転歯面については、いずれの設定負荷条件でも歯車の損傷形態として歯面の疲労（ピッチング）であり、その状況が異なっていること、すなわち、

(1) プロブ切り歯車の場合、設定負荷条件の上昇とともに歯面の加工目が消失し滑らかになっているものの、特に高負荷条件ほど少ない繰返し数で歯元面にき裂・ピットが発生していること、

(2) 仕上げプロブ切り歯車 I の場合、プロブ切り歯車と同一設定負荷条件のうち、低い負荷領域では仕上げ歯面の加工目

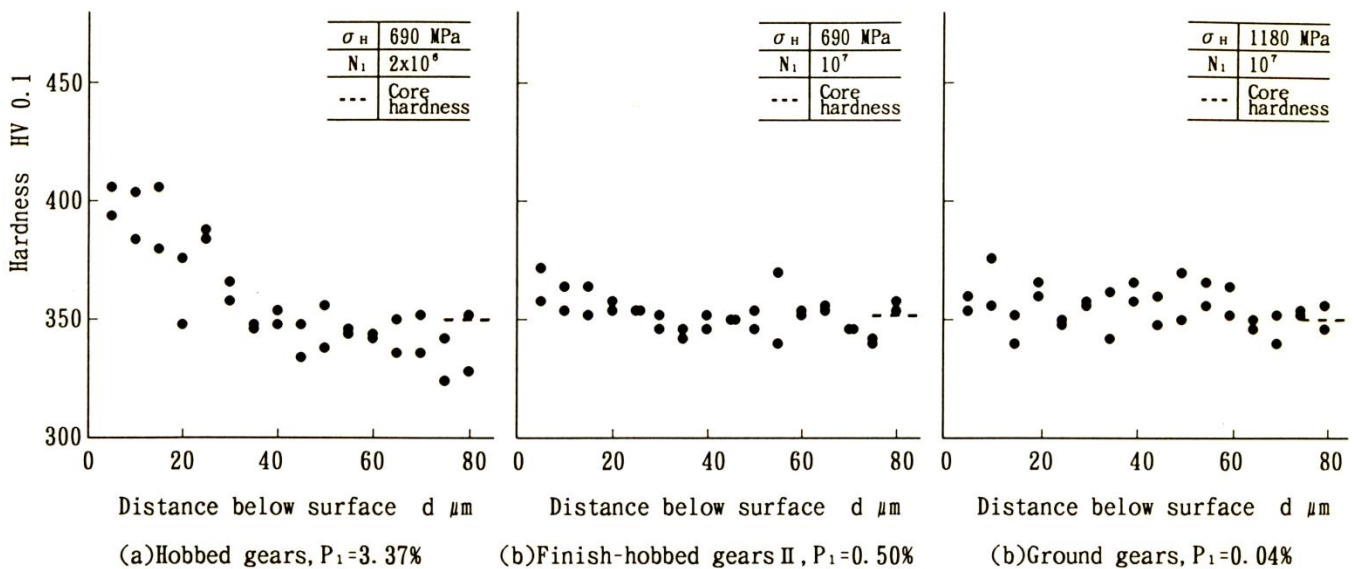


Fig. 4 Sectional hardness distributions of gear tooth (pinion, near the surface at pitch line)

の存在が認められホブ切り歯車に比べピットが少なく、高い負荷領域ではホブ切り歯車と同様仕上げ歯面の加工目が消失し歯元面にき裂・ピットが多数発生していること、

(3) 仕上げホブ切り歯車 II の場合、仕上げホブ切り歯車 I に比べ設定負荷条件のさらに高い負荷領域で仕上げ歯面の加工目が消失し、高負荷条件のため少ない繰返し数で歯面はより滑らかなになり歯元面に大きなピットが発生していること、

(4) 研削歯車の場合、極めて高い設定負荷条件においても、仕上げ後の歯面が滑らかなため運転中の接触状況が良好でほとんど始めの歯面の状態が維持され、ピットもわずかしかなかった。

4.2 運転歯面の硬さ 図4に各種仕上げ歯車の運転歯面の微小硬度計による硬さの測定例(代表的に小歯車のピッチ線付近歯面近傍)を示す。なお、図中に設定負荷条件・繰返し数・ピッチング面積率を併記している。これらの測定結果から、運転歯面の歯面近傍硬さについては、歯車の損傷すなわちピッチングと関連があり、歯面のごく表面近傍において、

(1) ホブ切り歯車の場合、設定負荷条件の低い負荷領域では硬さの変化が少なくピットがほとんど発生せず、高い負荷領域では負荷の少ない繰返しでも著しい加工硬化が認められ大きなピットが発生していること、

(2) 仕上げホブ切り歯車 I・II の場合、ホブ切り歯車と同様な傾向で加工硬化が認められる設定負荷条件下では多くのピットが発生していること、

(3) 研削仕上げ歯車の場合、設定負荷条件の極めて高い負荷領域でも硬さの変化は少なくピットがほとんど発生していないこと、

がわかった。
次に、運転歯面の断面硬さの測定結果から、各種仕上げ歯車のいずれにおいても負荷とその繰返しによる硬さの変化は、一般的に計算される最大せん断応力の発生位置⁽⁴⁾の場所を含め認められなかった。したがって、このことは、各種仕上げ歯車に生じるピッチングが運転条件、すなわち、かみあい中の歯面上に生じる油膜厚さ⁽⁵⁾と歯面粗さの突起との相対関係で歯面が滑らかなになるとともに歯面のごく近傍に大きな局所的応力が作用し、その繰返しにより歯面

(表面)が被害を蓄積し、き裂の発生・伝播・はく離の過程で生じることを示している。

5. まとめ

中硬度調質の各種仕上げ歯車の仕上げ歯面とその運転歯面の性状について、走査型電子顕微鏡および微小硬度計を用いて考察・検討した結果、

(1) 仕上げ歯面の状態から、歯面仕上げ法によりそれぞれ特徴ある形状になること、

(2) 仕上げ歯面の硬さから、通常の歯面仕上げでは材料の塑性変形能の小さいこともあり歯面の加工硬化は生じにくいこと、

(3) 運転歯面の状態から、負荷とその繰返しで仕上げ歯面の加工目が消失する運転条件下ではピットが多数発生していること、仕上げ後の歯面が滑らかなほど高負荷条件下でも良好な接触状態が維持できピットも少ないこと、

(4) 運転歯面の硬さから、負荷の少ない繰返しで歯面近傍において著しい加工硬化が認められる運転条件下では大きなピットが多数発生していること、すなわち、運転条件によっては歯面近傍において歯面粗さの突起に起因する大きな局所的応力の作用とその繰返しによりき裂が生じその伝播・はく離の過程でピットとなること、

が明確になった。
なお、中硬度調質歯車の生産性と負荷能力向上の点から仕上げ専用ホブの適用を含め何らかの簡便な歯面仕上げ法をさらに開発する必要があると考える。

終わりにご協力・ご援助を賜った住友金属工業株式会社・三菱石油株式会社・アヅミ株式会社ならびに九州大学工学部機械系学科・宮崎大学分析センターおよび工学部機械系学科の各位に対し深く感謝の意を表する。

文 献

- (1) たとえば 中西・有浦・上野, 機論, 52-483, C(1986), 2892.
- (2) 有浦・中西・上野・奈良, 機論, 52-483, C(1986), 2899.
- (3) 中西・有浦・上野, 機械の研究, 40-9(1988), 1013.
- (4) 日本機械学会編, 機械工学便覧 応用編 B 1, (1985), 31, 日本機械学会.
- (5) Dowson, D., Proc. Conf. Wear, 1ME, (1967), 151.