

## 6.1 高硬度歯車の長期運転に伴う歯面損傷とその対処法

### 6.1.1 はじめに

歯車の歯面強さ計算式において、歯面が損傷しない設計条件に用いられる歯面の許容接触応力には、材料の許容応力値  $\sigma_{Hlim}$  を修正する寿命係数  $Z_{NT}$  が導入されており、表面硬化歯車の場合、負荷の繰返し数  $N_L = 5 \times 10^7$  以降  $Z_{NT} \leq 1.0$  に減少すること<sup>(1)</sup>が示されている。また、歯車の運転において、損傷のない領域のトルクは、通常用いられる回転数の表面硬化歯車の場合、材料や歯元への追加工の研究・開発により曲げ強さが向上し、従来の歯元の疲れ折損から歯面疲れのピッチングで限界となることが示され、ピッチング対策としての材料や加工方法の研究・開発例<sup>(2)(3)</sup>が紹介されている。一方、歯車の利用技術において、製品の有効利用の観点<sup>(4)</sup>から、歯車のメンテナンス・寿命管理・品質管理技術などの検討が望まれるところである。また、歯車の生産技術において、歯車の高精度化や加工コストの低減などに対応した歯車加工機の開発、並びに、歯車加工法の開発<sup>(5)</sup>が行われている。これらのことから、本節では、自動車・二輪車・産業機器などの動力駆動部で使用される浸炭焼入れや高周波焼入れで歯面を硬くした高硬度歯車の長期運転に伴う歯面損傷とその対処法について、主として、これまでの基礎実験の結果を基に、考察・検討した結果<sup>(6)~(9)</sup>を述べる。具体的には、小型のシェービング浸炭焼入れ焼戻し歯車を長期間運転した場合の歯面損傷について、動力循環式歯車試験機を用い、設定の負荷条件で繰返し数  $N_p = 1.0 \times 10^7 \sim 1.0 \times 10^8$  まで運転し、考察・検討<sup>(6)</sup>した。次に、高硬度歯車の歯面損傷<sup>(6)(10)~(12)</sup>の対処法について、シェービング浸炭焼入れ焼戻し歯面と浸炭焼入れ焼戻し超鋼仕上げホブ切り歯面に、天然資源の火砕堆積物を用いた簡便な歯面仕上げ法<sup>(13)</sup>を適用し、考察・検討<sup>(7)~(9)</sup>した。

### 6.1.2 高硬度歯車の長期運転に伴う歯面損傷<sup>(6)</sup>

#### (1) 負荷実験用試験歯車の諸元

負荷実験用試験歯車の諸元は、平歯車で、モジュールと圧力角が 2.5 と  $20^\circ$ 、歯数と歯幅が、小歯車の場合 23 枚と 16 mm、大歯車の場合 45 枚と 10 mm とした。なお、試験歯車対の歯幅が異なること、並びに、歯面端部に面取り部が存在することから、小歯車において未接触部と接触部（有効接触歯幅 8 ~ 10 mm）が存在することになる。

#### (2) 負荷実験用試験歯車の加工工程および加工精度

負荷実験用試験歯車の加工工程は、小歯車と大歯車のいずれも焼入れ性を保証した構造用鋼鋼材（JIS G 4052-2008）SCM420H を丸材に鍛造し、機械加工でギヤブランクに製作後、ホブ切り・シェービング仕上げ・浸炭焼入れ焼戻し・歯部を除くギヤブランク部の内研と外研の研削仕上げ（以下、負荷実験用シェービング浸炭焼入れ歯車と呼称）とした。

図 6.1-1 に、負荷実験用シェービング浸炭焼入れ歯車の歯形と歯すじを示す。ここで、図 6.1-1 において、小歯車と大歯車のいずれも歯先修整と、歯部端面の面取りが施されており、かみ合い状況を考慮して表示している。なお、加工後における小歯車と大歯車の精度（JIS B 1702-1-1998）は、全歯形誤差が、いずれも 4 級程度、全歯すじ誤差が、4 級程度と 6 級程度で、ピッチ誤差が、いずれも 5 級程度であった。また、小歯車と大歯車の歯面硬さは、いずれも歯部における断面硬さ分布から外挿して約 550HV で、表面からの深さ 20  $\mu\text{m}$  の位置は、約 800HV、2 mm の位置（母材硬さ）は、約 400HV で、有効浸炭深さ（JIS G 0557-2006、550HV の位置）は、0.8 mm 程度であった。さらに、歯形方向の歯面粗さ（JIS B 0601-1994 の最大高さ  $R_y$ 、現 JIS B 0601-2013 の最大高さ粗さ  $R_z$  に相当）は、2 ~ 4  $\mu\text{m}R_y$  であった。

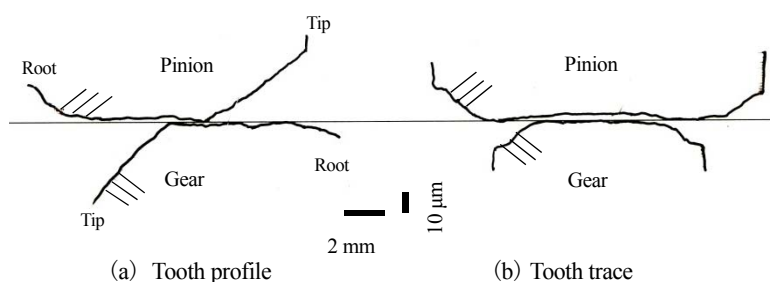


図 6.1-1 負荷実験用シェービング浸炭焼入れ歯車の歯形および歯すじのかみ合い状況

### (3) 動力循環式歯車試験機および負荷実験の条件

図 6.1-2 に、最大循環動力が 3.7 kW の動力循環式歯車試験機の概略を示す。ここで、図 6.1-2 において、動力循環式歯車試験機の歯車対の回転軸間距離  $a$  が 85 mm、小歯車の回転数  $n_p$  が  $1780 \text{ min}^{-1}$  である。

また、潤滑油には、極圧添加剤を含まない ISO VG100 鉱油（密度  $\rho : 0.8855 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、粘度： $99.40 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  (313K)、 $11.12 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  (373K)）を用い、強制循環給油法を適用し、油温一定（ $313 \pm 1 \text{ K}$ ）と油量一定（ $33 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ ）の条件で、歯車対のかみ合い部直上から噴射供給した。

次に、負荷条件は、規格書の歯面強さ計算式<sup>(14) (15)</sup> で用いられている材料の許容応力値  $\sigma_{Hlim} = (0.0013 \sim 0.0027) \text{ HV GPa}$ （HV: 歯面硬さ）を参考にして、有効接触歯幅 8 ~ 10 mm の場合のピッチ点における最大接触応力  $\sigma_H$  が、 $\sigma_H = 1.07 \sim 1.20 \text{ GPa}$  と  $1.25 \sim 1.40 \text{ GPa}$  になるように、設定負荷（基準円上での円周荷重） $F_t$  を、 $F_t = 1.96 \text{ kN}$  と  $2.66 \text{ kN}$  とした。また、設定負荷の繰返し条件は、長期間の使用を想定して（小歯車の）繰返し数  $N_p$  を、 $N_p = 1.0 \times 10^7 \sim 1.0 \times 10^8$ （連続運転約 95 ~ 950 時間相当）までとした。

### (4) 負荷実験の方法および歯面詳細観察の方法

負荷実験の方法は、歯面の熱的損傷（スカuffイング）を防止するためなどから、負荷を段階的に数分間毎に設定負荷まで増加し、その後、設定負荷を一定とした。なお、運転状況については、荷重変換器や熱電対を用いて、運転中における負荷や排出油・かみ合い部飛散油・歯車の歯先面の付着油・軸受部の各部温度を連続的に測定・記録した。また、設定負荷の繰返しに伴う歯車の歯面状態を知るために、単眼レンズと画像処理装置、並びに、画像解析付きのデジタルマイクロスコープを用いて、原則として繰返し数  $N_p = 1.0 \times 10^6$  毎に（ $N_p = 1.0 \times 10^7$  までで 10 回、 $N_p = 1.0 \times 10^8$  までで 100 回）運転を停止し、歯面を観察・記録した。

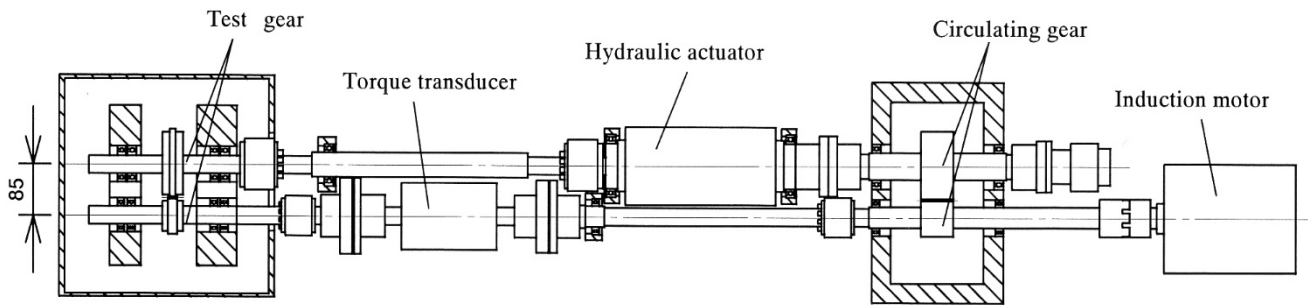


図 6.1-2 動力循環式歯車試験機の概略（歯車対の回転軸間距離：85 mm、小歯車回転数： $1780 \text{ min}^{-1}$ ）

表 6.1-1 シェービング浸炭焼入れ歯車における負荷実験の条件と結果概要

Test No.	GT-01		GT-02	
Test gear	Pinion	Gear	Pinion	Gear
Tooth surface-finishing method	Hobbing, shaving, carburizing, quenching and tempering			
Tooth profile error $F_a$ $\mu\text{m}$	3 ~ 8	4 ~ 5	3 ~ 5	3 ~ 6
Lead error $F_\beta$ $\mu\text{m}$	3 ~ 9	6 ~ 9	4 ~ 5	5 ~ 9
Tooth surface hardness HV	550 (800 at 0.02mm)			
Initial tooth surface roughness along tooth profile $Ry_i$ $\mu\text{m}$	2.0	3.0	2.5	2.0
Lubricant	ISO VG100			
Inlet oil temperature $To_i$ K	$313 \pm 1$			
Tangential Force $F_t$ kN	1.96		2.66	
Max. Hertzian stress on pitch point $\sigma_H$ GPa	1.07 ~ 1.20		1.25 ~ 1.40	
Speed of rotation $n_p, n_G$ $\text{min}^{-1}$	1780	910	1780	910
Cycles run $N_p, N_G$	$1.0 \times 10^7$	$0.5 \times 10^7$	$1.0 \times 10^8$	$0.5 \times 10^8$
Tooth surface failure	Grey-staining	No failure	Grey-staining	Grey-staining
Grey-staining area ratio $R_{AP}, R_{AG}$ %	1.12	0	12.8	1.47

次に、運転前後における歯面詳細観察の方法は、表面の形態的特徴が得られる走査型電子顕微鏡を用いて実施（SEI 二次電子像を利用）した。なお、運転後の歯面状態は、歯形方向において、相手歯車とのかみ合いに伴う負荷や転がり・滑りなどの接触条件が異なることを考慮する必要があるため、歯元から歯先まで連続的に観察を実施し、また、歯すじ方向において、歯当たりとの関係で、歯面端部から中央部まで連続的に観察を実施した。

**(5) 負荷実験の結果および考察**

表 6.1-1 に、シェービング浸炭焼入れ歯車における負荷実験の条件と結果概要を示す。また、図 6.1-3 に、負荷条件  $F_t=2.66 \text{ kN}$ （実験番号[GT-02]）における小歯車と大歯車の代表的な歯面状態の推移を示す。

表 6.1-1 や図 6.1-3 などから、設定の負荷条件  $F_t=1.96 \text{ kN}$ （実験番号[GT-01]）と  $F_t=2.66 \text{ kN}$  のいずれにおいても、歯面強さと関連する歯面損傷の歯面くもり<sup>(10)~(12)</sup>が小歯車と大歯車の両者に生じ、その状況が設定の負荷と繰返し数で異なることがわかった。また、歯車の曲げ強さと関連する折損と熱的歯面損傷と関連するスカッフイングは生じていないことがわかった。さらに、運転中における排出油・かみ合い部飛散油・歯車の歯先面の付着油・軸受部の各部温度は、設定の負荷条件に依存し、繰返し数  $N_p=1.0 \times 10^6$  毎でほぼ一定であることがわかった。

次に、図 6.1-4 に、負荷条件  $F_t=2.66 \text{ kN}$  の小歯車繰返し数  $N_p=0 \sim 1.0 \times 10^8$ （実験番号[GT-02]）における負荷の繰返しに伴う歯面くもりの変化割合を示す。ここで、図 6.1-4 (a) における歯面くもり領域の長さの伸び率  $R_{LP}$  と  $R_{LT}$ （添え字  $P$  と  $T$ ：歯形方向と歯すじ方向）は、(6.1-1)式と (6.1-2) 式から求め、図 6.1-4 (b) における歯面くもり面積率  $R_{AP}$  と  $R_{AG}$ （添え字  $P$  と  $G$ ：小歯車と大歯車）は、(6.1-3)式と (6.1-4) 式から求めている。

$$R_{LP} = (\Sigma l_P / L_P) \times 100 \quad \% \quad (6.1-1)$$

$$R_{LT} = (\Sigma l_T / L_T) \times 100 \quad \% \quad (6.1-2)$$

$\Sigma l$ ：測定歯の歯面くもり領域の総長さ

$L_P$ ：かみ合い始めから歯先までの歯形に沿う長さ

$L_T$ ：有効接触歯幅

$$R_{AP} = (\Sigma S_P / S_P) \times 100 \quad \% \quad (6.1-3)$$

$$R_{AG} = (\Sigma S_G / S_G) \times 100 \quad \% \quad (6.1-4)$$

$\Sigma S$ ：測定歯における歯面くもりの総面積

$S$ ：歯当たり面積（かみ合い始めから歯先までの歯形に沿う長さ）×（有効接触歯幅）

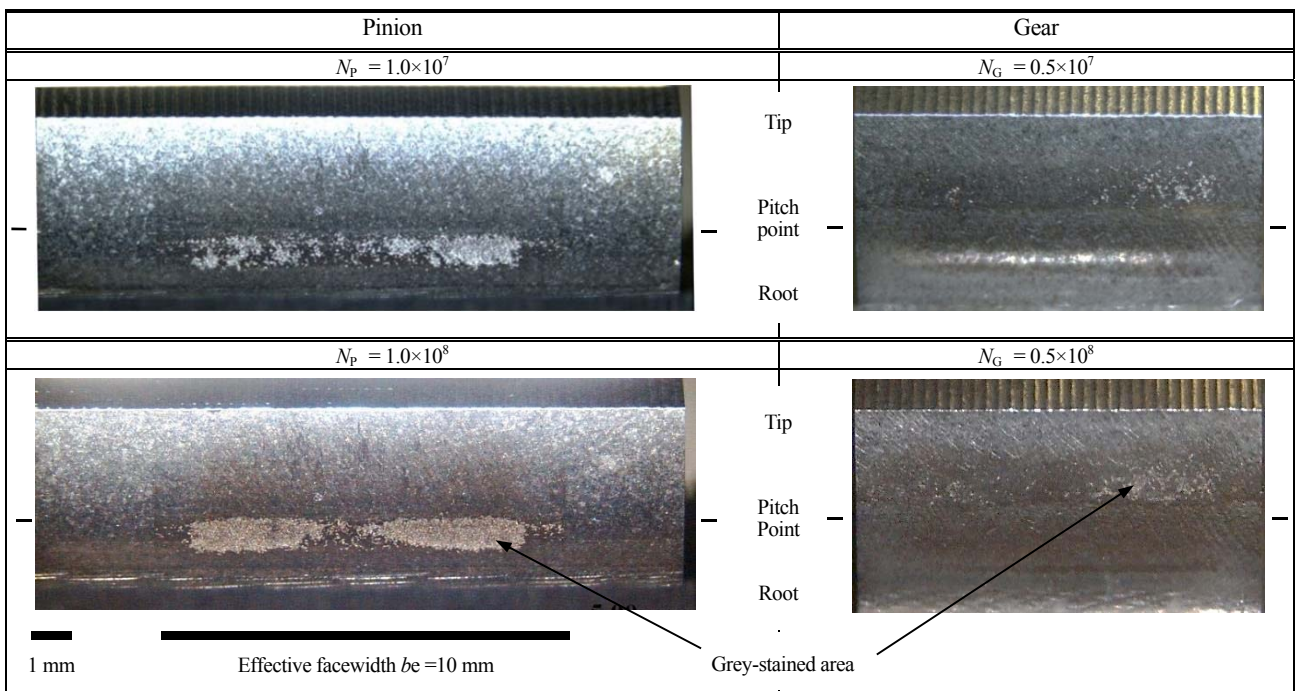


図 6.1-3 シェービング浸炭焼入れ歯車の歯面状態の推移（Test No.[GT-02],  $F_t=2.66 \text{ kN}$ ,  $N_p=1.0 \times 10^7 \sim 1.0 \times 10^8$ ）

図 6.1-4 などから、負荷条件  $F_t=2.66$  kN の場合、小歯車の歯面くもりは、繰返し数  $N_p=1.0 \times 10^6$  の早い時期から歯元面に生じ、 $N_p=1.0 \times 10^7$  以降も拡張の傾向にあること、歯すじ方向での拡張が歯形方向への拡張に比べ大きいこと、歯面くもり面積率は、 $N_p=1.0 \times 10^8$  時点で、 $N_p=1.0 \times 10^7$  の約 2 倍となることがわかった。また、大歯車の歯面くもり領域は、小歯車の歯面くもり領域に対応するかみ合い部付近に生じること、小歯車の場合に比べ繰返し数を考慮しても少ないことがわかった。

**(6) 歯面詳細観察の結果および考察**

図 6.1-5 に、負荷条件  $F_t=2.66$  kN (実験番号[GT-2]) の小歯車における運転後の未接触部と歯面くもり部の詳細観察 (走査電子顕微鏡 SEI) を示す。ここで、図 6.1-5 において、観察位置は、いずれも歯先から歯形に沿う距離 3.4 mm の位置 (歯元面で負の滑り率領域) で、観察領域は、約  $330 \times 270 \mu\text{m}$  と約  $610 \times 270 \mu\text{m}$  としている。

図 6.1-5 などから、負荷条件  $F_t=2.66$  kN の小歯車の場合、歯面接触部は、

- (i) 歯先付近において、未接触部と同様にシェービングの加工目が認められること、
  - (ii) ピッチ線付近において、未接触部で認められるわずかの加工目と熱処理後の痕跡が消失していること、
  - (iii) 歯元面において、未接触部と大きく異なり加工目並びに熱処理の痕跡が消失し滑らかになること、
  - (iv) 歯面くもり部において、歯すじ方向に伸びる多数のき裂の発生と歯形方向にき裂が伝播していること、
  - (v) 加えて、歯面くもり部において、表面の微小部分がはく離して多数の微小ピットが形成されていること、
- などがわかった。なお、これらのことは、本実験条件の場合、歯面間に形成される潤滑油膜が薄く、歯元面において、滑り接触のため表面突起が摩耗し滑らかになるとともに微小き裂が生じ、負荷の繰返しによりき裂が伝播し、さらに負の滑り率のため接線力の作用で表面がはく離を起こし易く、微小ピットに至ったことを示している。

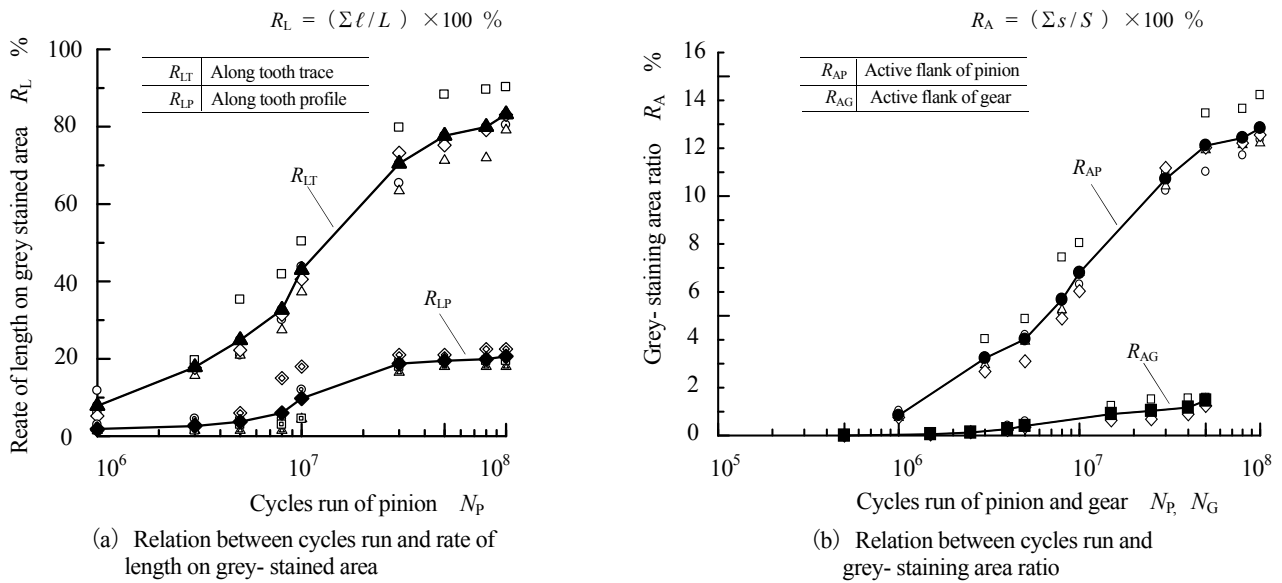


図 6.1-4 負荷の繰返しに伴う歯面くもりの変化割合 (Test No.[GT-02],  $F_t=2.66$ kN,  $N_p=0 \sim 1.0 \times 10^8$ )

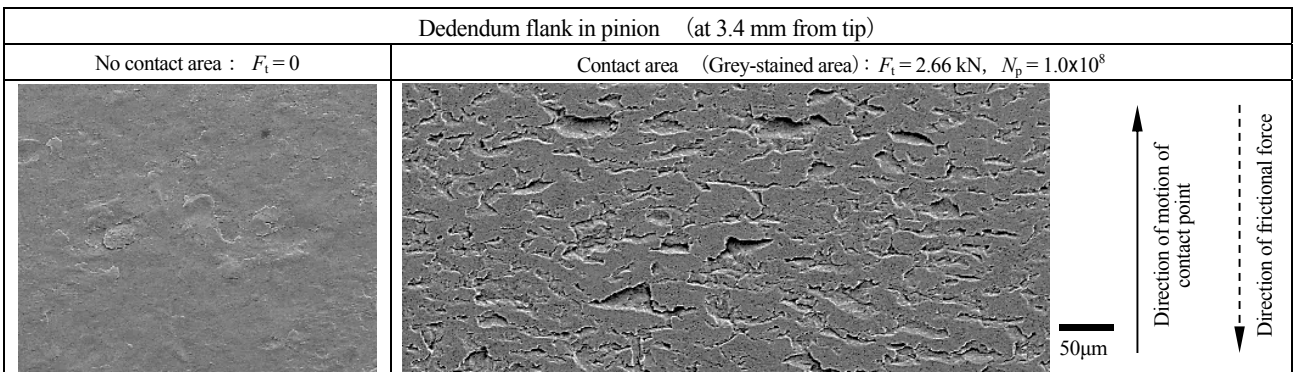


図 6.1-5 小歯車歯元面の詳細観察 (走査電子顕微鏡 SEI, [GT-02],  $F_t=2.66$  kN,  $N_p=1.0 \times 10^8$ )

## (7) 実機歯車の長期負荷実験で得られた成果

動力伝達用として用いられるシェービング浸炭焼入れ歯車を、動力循環式歯車試験機を用いて、繰返し数  $1.0 \times 10^7 \sim 1.0 \times 10^8$  まで長期運転するとともに、歯車の負荷能力を考察・検討した。その結果、繰返し数  $1.0 \times 10^7$  以降の長期間の運転（全体で3年間の運転期間）においても、負荷条件によっては、多数の微小き裂と微小ピットの集まりである歯面くもりが拡大することなどがわかった。

したがって、高硬度歯車の長寿命化のためには、歯車の精度をはじめ歯面硬さ・歯面粗さ、さらに、歯車対の歯当たりや運転条件に影響されるものの、歯形の変化や大きなピッチングの起点となる歯面損傷である歯面くもり<sup>(10)~(12)</sup>の対処法を検討しておく必要がある。

### 6.1.3 高硬度歯車の歯面損傷の対処法<sup>(7)~(9)</sup>

#### (1) 火砕流堆積物を用いた歯面仕上げ法<sup>(13)</sup>

開発した歯面仕上げ法は、歯車の歯面形状を保持したまま歯面を仕上げる手法であって、歯面上に火砕流堆積物を混入した可塑性材料を強制的に流動させ、歯面を滑らかにする加工法である。なお、この開発した歯面仕上げ法は、可塑性材料の流動のみのため単純な加工法であること、また、自然界の物質を利用しているため経済的に有利で安全、かつ、周辺の環境保全に配慮した加工法であることなどの特徴がある。

#### (2) 火砕流堆積物の成分と可塑性材料の生成

図 6.1-6 に、歯面仕上げ実験に用いた火砕流堆積物の詳細観察結果（走査電子顕微鏡 SEI）を示す。ここで、図 6.1-6 において、3 種類の火砕流堆積物 VA150・VB250・VC590 は、ふるい網の目開きがそれぞれ  $150 \mu\text{m} \cdot 250 \mu\text{m} \cdot 590 \mu\text{m}$  で精製された九州産である。

図 6.1-6 などから、用いた 3 種類の火砕流堆積物の粒子は、非球体のランダムな形状であること、粒子の長さは、火砕流堆積物 VA150・VB250・VC590 の順に、それぞれ最大で  $\ell_{\text{max}}=150\mu\text{m} \cdot 250\mu\text{m} \cdot 590\mu\text{m}$  であることがわかった。また、火砕流堆積物の成分分析の結果から、約 80 wt% の二酸化ケイ素（シリカ： $\text{SiO}_2$ ）と約 10 wt% の酸化アルミニウム（アルミナ： $\text{Al}_2\text{O}_3$ ）が主成分であることがわかった。なお、これらの成分の紛体は、一般的に遊離砥粒加工で利用されている。

次に、歯面仕上げ実験では、火砕流堆積物に適当な可塑性を与えるために、石油から得た炭化水素類の混合物を脱色して精製した白色ワセリンを混練（火砕流堆積物と白色ワセリンの重量比を 9:1）し、可塑性材料の流動性火砕流堆積物を生成した。なお、生成した 3 種類の流動性火砕流堆積物は、それぞれ含まれる火砕流堆積物で分類して、以下、MVA150（ $\ell_{\text{max}}=150\mu\text{m}$ ）、MVA250（ $\ell_{\text{max}}=250\mu\text{m}$ ）、MVA590（ $\ell_{\text{max}}=590\mu\text{m}$ ）と標記した。

#### (3) 歯面仕上げ実験用試験歯車の諸元および加工工程

歯面仕上げ実験用試験歯車（以下、仕上げ試験歯車と呼称）の諸元は、自動車用駆動系歯車として用いられている小型の平歯車で、モジュールと圧力角が 2.5 と  $20^\circ$ 、歯数と歯幅が、32 枚と 14.2 mm、歯先円直径と内径が、87 mm と 31 mm である。

図 6.1-7 に、仕上げ試験歯車の歯切り・熱処理工程を示す。ここで、図 6.1-7 において、仕上げ試験歯車は、自動車用駆動系歯車の生産ラインを利用して加工されたもので、その生産工程は、鍛造材（材種 JIS SCM420 相当品）のギヤブランクを機械加工し、ホブ切り後シェービングあるいはホブ切りのまま、浸炭焼入れ焼戻しの熱処理を施し、歯車内径等の仕上げ機械加工としている。

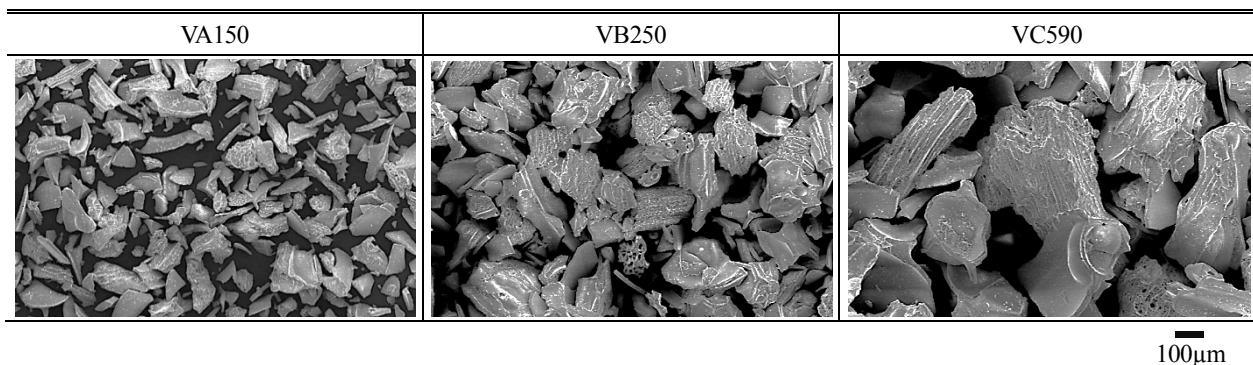


図 6.1-6 火砕流堆積物の詳細観察（走査電子顕微鏡 SEI）

#### (4) 歯面仕上げ用基礎実験装置と歯面仕上げの基礎実験方法

歯車の歯部（一歯）のみに着目して設計・製作した歯面仕上げ用基礎実験装置は、フレーム・押し棒駆動装置・シリンダー（可塑性材料の充てんと歯部の移動を考慮した矩形断面）・歯部の押し棒・負荷測定用ロードセルなどで構成された単純な構造である。

次に、基礎実験方法は、流動性火砕流堆積物をシリンダーに詰め、歯部を押し棒の先端に取付け、油圧式パンタジャッキにより押し棒を駆動した。なお、歯部の仕上げ距離は、実験前後の押し棒の位置から算出し、また、押し棒の負荷は、ロードセルとレコーダーを用いて連続的に計測した。

#### (5) 歯面仕上げ条件と歯面状況の観察方法

図 6.1-8 に、各種仕上げ試験歯車の歯面仕上げ工程を示す。ここで、図 6.1-8 において、シェービング仕上げ・浸炭焼入れ・焼戻し工程を経たシェービング浸炭歯車（シェービング浸炭歯面[SC]）、シェービング浸炭歯車を流動性火砕流堆積物で歯面仕上げした 3 種類の浸炭歯面仕上げ歯車（浸炭歯面仕上げ歯面[SF150]、[SF250]、[SF590]）、浸炭焼入れ・焼戻し・超硬仕上げホブ切り（切削速度 150m/min）の工程を経た浸炭仕上げホブ切り歯車（浸炭仕上げホブ切り歯面 [FH150]）、浸炭仕上げホブ切り歯車を流動性火砕流堆積物で歯面仕上げした歯車（浸炭仕上げホブ切り歯面仕上げ歯面[FSF250]）としている。なお、歯面仕上げに用いた流動性火砕流堆積物は、MVA150 ( $\ell_{max}=150\mu\text{m}$ )・MVA250 ( $\ell_{max}=250\mu\text{m}$ )・MVA590 ( $\ell_{max}=590\mu\text{m}$ )で、仕上げ距離は、歯幅を考慮して  $L=420\text{mm}$  と  $140\text{mm}$  とした。

次に、加工前後の歯面については、走査型電子顕微鏡を用いて二次電子像で観察するとともに、触針式のデジタル表面形状・粗さ測定機を用いて歯面形状と歯面性状<sup>(16)</sup>の測定、並びに、微小硬度計を用いて歯面の深さ方向位置における硬さを測定した。

#### (6) 歯面詳細観察の結果および考察

図 6.1-9 に、流動性火砕流堆積物を用いた歯面仕上げ前後の歯面における詳細観察（走査電子顕微鏡 SEI）を示す。ここで、図 6.1-9 において、3 種類の加工前のシェービング浸炭焼入れ歯面[SC]と加工後の歯面仕上げ歯面[SF150]・[SF250]・[SF590]で、観察領域は、代表的な歯面におけるピッチ線付近の歯形方向約  $200\mu\text{m}$  と歯すじ方向約  $350\mu\text{m}$  の長方形である。

図 6.1-9 などから、歯面仕上げ条件において、シェービング浸炭歯面[SC]では、浸炭焼入れ焼戻しの熱処理により歯面に不規則な表面あれが存在し、シェービング加工の痕跡がわずかに確認できること、次に、流動性火砕

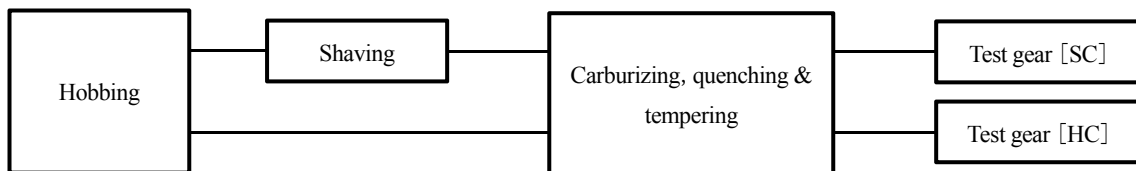


図 6.1-7 仕上げ試験歯車における歯切り・熱処理工程

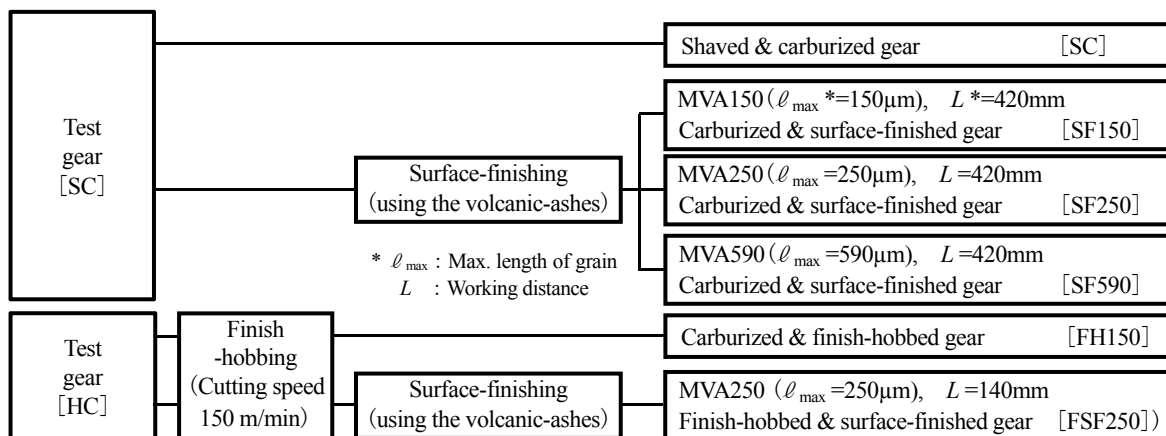


図 6.1-8 各種仕上げ試験歯車における歯面仕上げ条件

流堆積物を用いた浸炭歯面仕上げ歯面[SF150], [SF250], [SF590]では, いずれも, 熱処理工程後の不規則な表面あれが消失し, シェービング加工の痕跡が明確に確認できる場合と消失している場合のあることがわかった.

**(7) 三次元歯面性状の測定結果および考察**

図 6.1-10 に, 各試験歯車の仕上げ歯面の代表的な三次元断面曲面並びに三次元断面曲面パラメータ ( $SPz \cdot SPz_{10}$ )

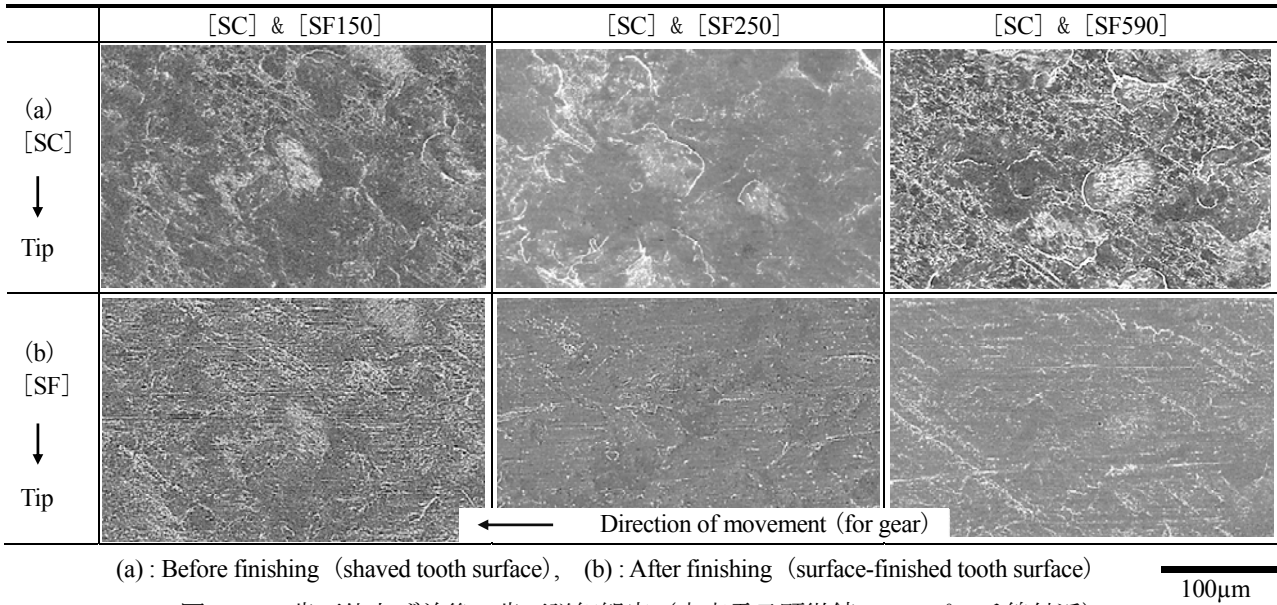


図 6.1-9 歯面仕上げ前後の歯面詳細観察 (走査電子顕微鏡 SEI, ピッチ線付近)

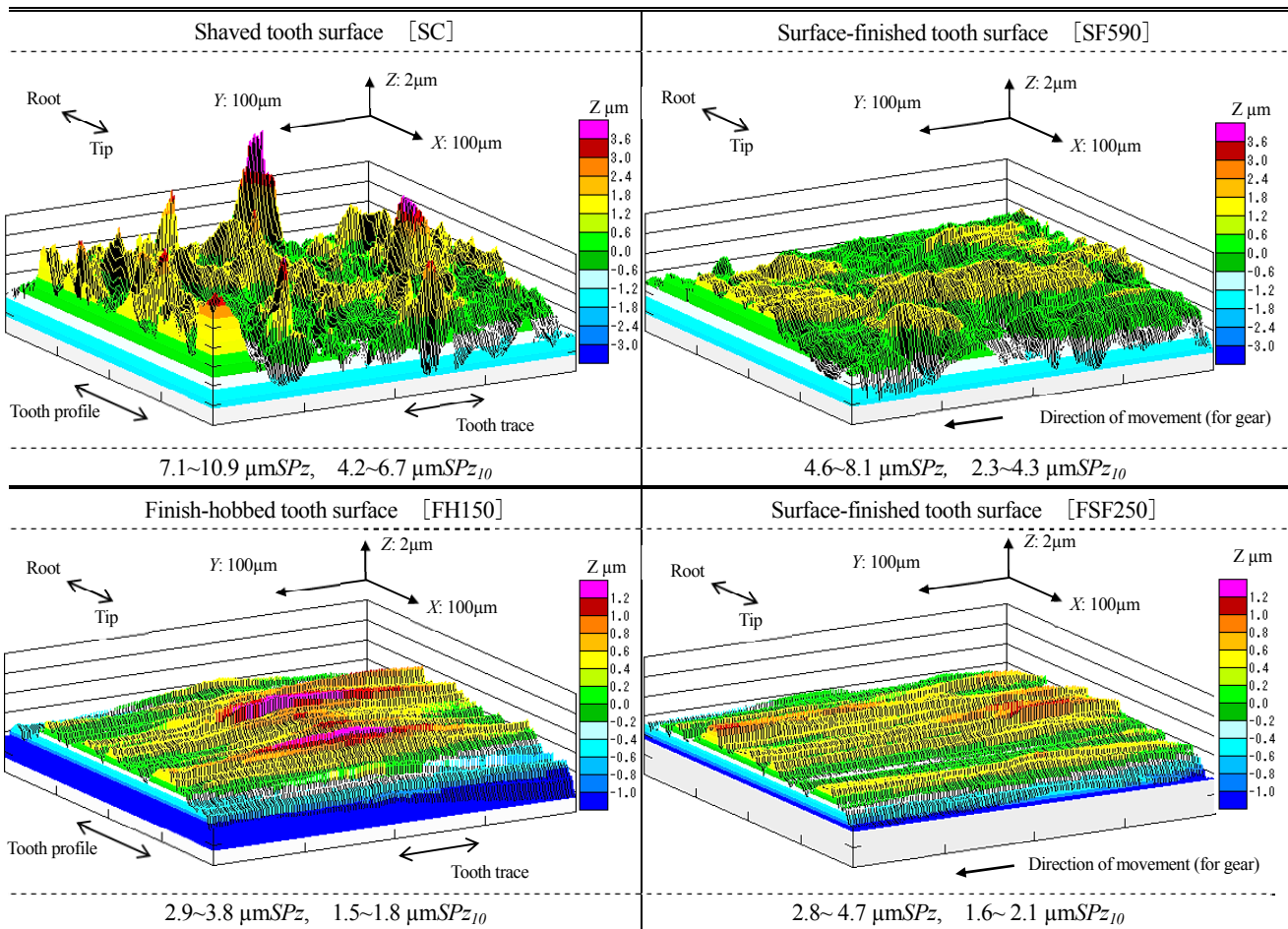


図 6.1-10 各歯面の三次元粗さ (鳥瞰図: X スキャン図) および断面曲面パラメータ (ピッチ線付近)

を示す。ここで、図 6.1-10 において、鳥瞰図( $X$  スキャン図)は、高さ方向倍率( $Z$  方向)を  $X$  方向の 20 倍として表示し、算出された三次元断面曲面パラメータの  $SPz \cdot SPz_{10}$  は、断面曲面の平均面に平行な 2 平面で断面曲面を挟んだ時の間隔・平均面に対し高い方から 5 番目までの山頂の平均高さとし、深い方から 5 番目までの谷底の平均深さの間隔である。また、測定場所は、歯面のピッチ線付近で 5 か所とし、測定条件は、歯形( $X$  方向)がピッチ  $1.2\mu\text{m}$ 、歯すじ( $Y$  方向)がピッチ  $1.0\mu\text{m}$  とし、測定領域は、 $400\mu\text{m}$  の正方形としている。なお、 $X$  方向の測定長さ  $400\mu\text{m}$  は、運転負荷によりピッチ線上で最大接触応力  $\sigma_H = 2.0 \text{ GPa}$  が生じる場合のヘルツの接触幅に相当する。

図 6.1-10 などの結果から、シェービング浸炭歯面[SC]の場合、高い山頂(突起)がランダムに存在していること、浸炭歯面仕上げ歯面[SF150]、[SF250]、[SF590]の場合、ランダムな高い突起が消失するとともに、歯面の起伏の間隔が狭くなることがわかった。また、浸炭仕上げホブ切り歯面 [FH150]の場合、シェービング浸炭歯面 [SC]に比べ全く異なった歯面形状をしており、規則的に滑らかな歯すじ方向に一部に盛り上がった山の部分(歯切り時の送りマーク)が存在していること、浸炭仕上げホブ切り歯面仕上げ歯面[FSF250]の場合、盛り上がった山の部分が滑らかな傾向がわかった。

次に、図 6.1-11 に、各歯面の断面曲面から算出された三次元断面曲面パラメータを用いた  $r_{SP}$  値を示す。ここで、図 6.1-11 において、 $r_{SPz}$  値と  $r_{SPz10}$  値は、それぞれ分母をシェービング浸炭歯面[SC]の断面曲面パラメータ  $SPz$  と  $SPz_{10}$  とした (6.1-5) 式と (6.1-6) 式から求めたもので、各歯面において  $r_{SP}$  値  $< 1$  場合、シェービング浸炭歯面[SC]に比べて歯面の起伏の間隔が狭くなったこと、すなわち、歯面が滑らかになったことを表す。

$$r_{SPz} = SPz [\text{SC, SF, FH or FSF}] / SPz [\text{SC}] \quad (6.1-5)$$

$$r_{SPz10} = SPz_{10} [\text{SC, SF, FH or FSF}] / SPz_{10} [\text{SC}] \quad (6.1-6)$$

$SPz \cdot SPz_{10}$  : 三次元断面曲面パラメータ  
 $[\text{SC, SF, FH or FSF}]$  : 各種試験歯車の仕上げ歯面

図 6.1-11 などの結果から、断面曲面パラメータにおいて、シェービング浸炭歯面[SC]に比べ歯面仕上げ歯面 [SF150] [SF250] [SF590] の場合、 $r$  値  $= 0.65 \sim 0.90$ 、仕上げホブ切り歯面[FH]と歯面仕上げ歯面[HF250]の場合、 $r$  値  $= 0.4$  程度になっており、歯面の起伏が狭くなっていることがわかった。

### (8) 輪郭曲線方式による表面性状の測定結果および考察

図 6.1-12 に、各試験歯車の歯形方向、並びに、歯すじ方向の断面曲線と粗さパラメータ<sup>(16)</sup>の代表例を示す。ここで、図 6.1-12 において、粗さパラメータの  $R_p \cdot R_v \cdot R_z$  は、それぞれ最大山高さ・最大谷深さ・最大高さであり、測定場所は、歯元から歯先までの歯形方向( $X$  方向)で 3 か所、ピッチ線付近の歯すじ方向( $X$  方向)で 1 か所としている。また、測定条件は、 $X$  方向のサンプリング間隔を  $0.1\mu\text{m}$  とした測定断面曲線から、評価長さを  $l_n = 0.8 \text{ mm}$  とし、断面曲線(カットオフ値  $\lambda_s = 2.5 \mu\text{m}$ )と粗さ曲線(カットオフ値  $\lambda_s = 2.5 \mu\text{m}$ ,  $\lambda_c = 0.8 \text{ mm}$ )を求め、それぞれの曲線から断面曲線パラメータ( $P$ -parameter)と粗さパラメータ( $R$ -parameter)を算出している。なお、輪郭曲線のレベリング処理は、歯形方向の曲線の場合のみ円弧近似とした。

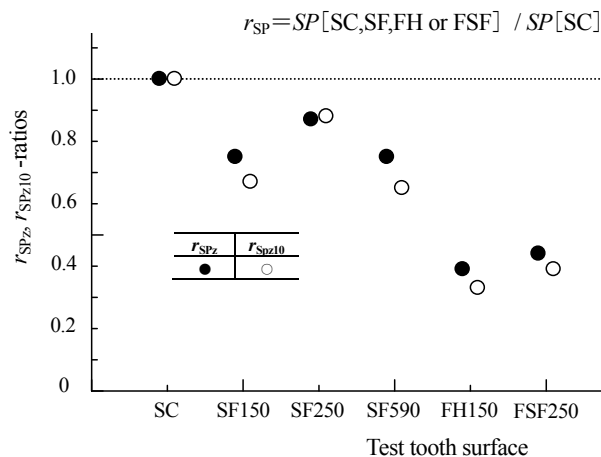


図 6.1-11 各歯面の断面曲面パラメータを用いた比較値 ( $r_{SPz}$  値,  $r_{SPz10}$  値)



図 6.1-12 の結果などから、測定断面曲線において、各種歯面仕上げ歯車の歯形方向形状と歯すじ方向形状の傾向が把握できた。次に、断面曲線において、定性的な歯面仕上げ法の特徴が把握でき、流動火砕流堆積物を用いた歯面仕上げ法の適用で、歯面の突起が滑らかになっていること、粗さパラメータにおいて、最大山高さ  $R_p$  の減少量が大きく、最大谷深さ  $R_v$  がほとんど変化のないこと、最大山高さ  $R_p$  と最大谷深さ  $R_v$  の和で示される最大高さ  $R_z$  の減少量の内訳がわかった。なお、これらの粗さパラメータの定量的な傾向は、本実験において、仕上げホブ切り歯面[FH150]と流動火砕流堆積物を用いた歯面仕上げ歯面[FSF250]の比較の場合、明確でなかった。

### (9) 歯面硬さの測定結果および考察

図 6.1-13 に、ホブ切り浸炭焼入れ歯面[HC]と浸炭焼入れ仕上げホブ切り歯面（切削速度 100 m/min）[FH100]における歯部の深さ方向硬さ分布を示す。ここで、図 6.1-13 において、硬さは、ピッカース硬さであり、測定場所は、歯面の表面からの深さ位置 0.005mm から 0.08mm（表面近傍硬さ）と深さ位置 0.1mm から 4.0mm（歯部の断面硬さ）である。また、測定条件は、測定荷重を 300g (2.942N) 負荷時間を 15 秒としている。

図 6.1-13 から、ホブ切り浸炭焼入れ歯面[HC]の表面近傍は、深さ方向に特徴的な硬さ分布を持ち表面付近で硬さの低下が認められること、一方、浸炭焼入れ仕上げホブ切り歯面[FH100]の表面近傍は、深さ方向に様な硬さになっていることがわかった。また、歯面の有効浸炭深さ（550HV の位置）は、ホブ切り浸炭焼入れ歯面[HC]と浸炭焼入れ仕上げホブ切り歯面[FH100]において、いずれも 0.5mm 程度であることがわかった。

したがって、これらの結果から、熱処理後の歯面仕上げ加工により、浸炭焼入れに伴う表面異常層が取り除かれているため、表面近傍の硬さ分布が一定になると推察できる。すなわち、浸炭焼入れ焼戻し後に何らかの歯面仕上げを施すことで、熱処理の伴う表面異常層を取り除くことが可能と思われる。

Shaved tooth surface [SC]	Surface-finished tooth surface [SF590]	Finish-hobbed tooth surface [FH150]	Surface-finished tooth surface [FSF250]
Along tooth profile			
1.2~3.8 $\mu\text{m}R_p$ , 1.5~3.3 $\mu\text{m}R_v$ 2.6~6.4 $\mu\text{m}R_z$	0.9~3.3 $\mu\text{m}R_p$ , 1.2~3.9 $\mu\text{m}R_v$ 2.4~6.0 $\mu\text{m}R_z$	0.9~1.5 $\mu\text{m}R_p$ , 0.7~1.1 $\mu\text{m}R_v$ 1.8~2.4 $\mu\text{m}R_z$	0.8~1.5 $\mu\text{m}R_p$ , 0.7~1.1 $\mu\text{m}R_v$ 1.6~2.3 $\mu\text{m}R_z$
Along tooth trace			
2.0~5.7 $\mu\text{m}R_p$ , 1.4~2.5 $\mu\text{m}R_v$ 3.6~7.3 $\mu\text{m}R_z$	0.9~2.7 $\mu\text{m}R_p$ , 1.5~2.9 $\mu\text{m}R_v$ 2.4~5.5 $\mu\text{m}R_z$	0.2~0.4 $\mu\text{m}R_p$ , 0.1~0.3 $\mu\text{m}R_v$ 0.4~0.7 $\mu\text{m}R_z$	0.3~1.0 $\mu\text{m}R_p$ , 0.2~0.9 $\mu\text{m}R_v$ 0.3~0.8 $\mu\text{m}R_z$

図 6.1-12 歯形方向、並びに、歯すじ方向における断面曲線（ピッチ線付近）と算定された粗さパラメータ

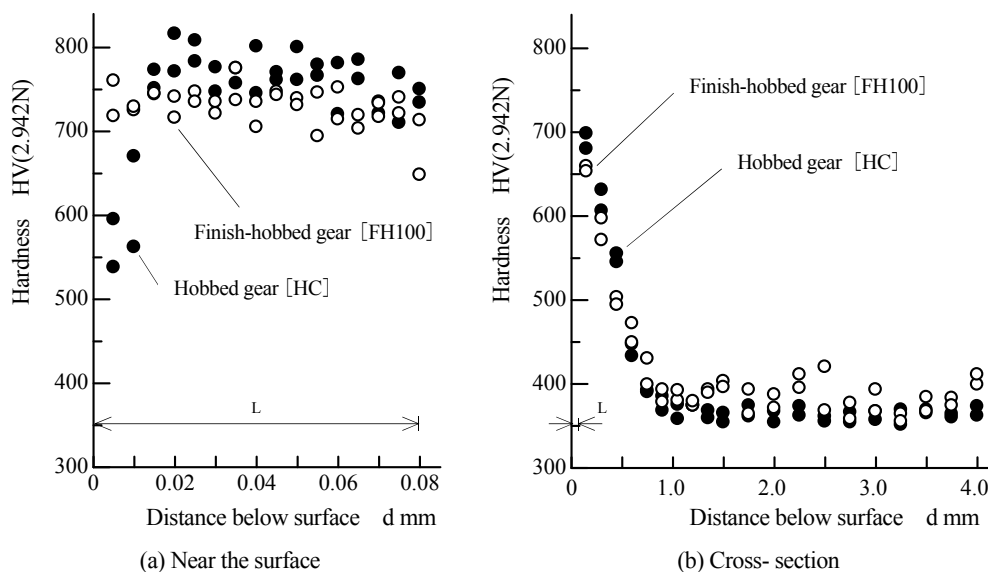


図 6.1-13 各歯面の深さ方向硬さ分布（ホブ切り浸炭歯面・浸炭仕上げホブ切り歯面、ピッチ線付近）

## (10) 歯面仕上げ実験で得られた成果

高硬度歯車の経済性と環境保全を考慮した歯面仕上げ法を開発するためと高硬度歯車の負荷能力向上のために、浸炭焼入れ歯車を対象として、天然資源の火砕流堆積物を用いた簡便な歯面仕上げ法を開発し考察・検討した。その結果、浸炭焼入れ歯車の歯面を流動性火砕流堆積物で仕上げることで、歯面のランダムな高い突起が滑らかになること、歯面上の凹凸の高低差が小さくなること、最大山高さが減少することなどがわかった。

したがって、流動性火砕流堆積物を用いた歯面仕上げ法は、高硬度歯車における歯面の硬い突起を滑らかにして局所的な接触応力を緩和すること、並びに、表面異常層の除去の可能性があることなどから、歯面損傷の歯面くもり<sup>(10)~(12)</sup>の対処法となり、同一材料・同一熱処理で表面加工に着目した歯面強さ向上法として期待できる。なお、今後の課題として、開発した歯面仕上げ法の適用範囲と加工条件の最適化と実用化を図る必要がある。

### 6.1.4 まとめ

本節では、自動車・二輪車・産業機器などの動力駆動部で使用される表面硬化された高硬度歯車を対象に、実機のシェービング浸炭焼入れ歯車を用い、負荷の繰返し数 $1.0 \times 10^8$ までの長期運転に伴う歯面損傷について、述べた。さらに、高硬度歯車の歯面損傷の対処法の一つとして、天然資源の火砕流堆積物を用いた歯面仕上げ法を紹介するとともに、基礎実験によりその歯面性状への効果について、述べた。これらの研究結果が、今後の動力伝達用歯車の設計技術・生産技術・運転技術に対して何らかの指針になれば幸いである。

終わりに、本研究・開発では、2009年~2013年の長期にわたり、産業界・官公庁・学術機関・大学院生/学部生/研究生/留学生からご協力・ご援助を賜った。ここに、感謝の意を表する。

### 文献

- (1) たとえば、ISO6336-2 Second edition, "Calculation of Load Capacity of Spur and Helical Gears-Part2 : Calculation of Surface Durability (Pitting)", (2006-9), Corrected version (2007- 4), pp.1- 33, ISO Standards.
- (2) たとえば、鈴木義友, "トランスミッションと歯車技術動向", 日本機械学会講演論文集 (機素潤滑設計部門 MPT2004 シンポジウム < 伝動装置 > 講演論文集), No. 04-17 (2004-11), 基調講演 pp.1-4.
- (3) たとえば、中西 勉, "動力伝達用歯車の歯面強さ向上を目的とした材料と加工法の開発について (所属の大学研究室で得られた実験結果)", 日本機械学会 2015 年度年次大会 DVD 論文集, No.15-1, K11200 (基調講演), (2015- 9), pp.1- 5.
- (4) たとえば、経産省ホームページ, "持続可能なものづくり技術分野", pp.1- 49, [http://www.meti.go.jp/policy/economy/gijutsu\\_kakushin/kenkyu\\_kaihatu/str2010/a8\\_1.pdf](http://www.meti.go.jp/policy/economy/gijutsu_kakushin/kenkyu_kaihatu/str2010/a8_1.pdf), (参照日 2014 年 6 月 15 日) .
- (5) たとえば、瓜生耕一郎, 一幡浩久, 川本憲二, 池野一広, 小野塚 隆, 郡山 司, 藤沢孔裕, "3. 歯車加工装置", (日本機械学会) P-SCD380 動力伝達用高性能歯車の設計と製造技術に関する調査研究分科会 研究成果報告書, (2016-2), pp.42- 73, 日本機械学会.
- (6) 中西 勉, 山本順平, 畑中 陵, 鄧 鋼, "シェービング浸炭焼入れ歯車の負荷能力に関する研究 (長期間の運転に伴う歯面状態の変化)" 日本機械学会 2014 年度年次大会 DVD 論文集, No.14-1, S1160105, (2014- 9), pp.1- 5.
- (7) 中西 勉, 西牟田昌吾, 鄧 鋼, "自動車用駆動系歯車の加工と性能に関する基礎研究(歯面性状に及ぼす火山灰を用いた歯面仕上げ法の影響)", 日本機械学会 2011 年度年次大会 DVD-ROM 論文集, No.11-1, S111033, (2011- 9), pp.1- 5.
- (8) 中西 勉, 山本琢也, 福間絵理香, 鄧 鋼, "火山灰を用いた歯面仕上げ法の開発に関する基礎研究 (浸炭焼入れ歯車の歯面性状に及ぼす加工条件の影響)", 日本機械学会 2012 年度年次大会 DVD 論文集, No.12-1, S111041, (2012- 9), pp.1- 5.
- (9) 中西 勉, 福間絵理香, 加藤聖也, 鄧 鋼, "浸炭焼入れ歯車の歯面仕上げと歯面性状に関する基礎研究 (火砕流堆積物を用いた歯面仕上げ法の適用)" 日本機械学会講演論文集 (機素潤滑設計部門 MPT2013 シンポジウム< 伝動装置 > 講演論文集), No.13-17, (2013- 11), pp.212- 216.
- (10) 有浦泰常, 上野 拓, 中西 勉, "高硬度歯車の負荷能力に関する研究 (浸炭歯車に生じる歯面くもりについて)", 潤滑, 第 24 巻, 第 10 号 (1979- 10), pp. 662 - 669.
- (11) 中西 勉, 有浦泰常, 上野 拓, "高硬度歯車の負荷能力に関する研究 (面圧強さに及ぼす粗さの影響)", 日本機械学会論文集 (C 編), 第 52 巻, 第 477 号 (1986- 5), pp.1649-1655.
- (12) T. Nakanishi, Y. Ariura, "Effect of Surface-Finishing on Surface Durability of Surface-Hardened Gears", Proceedings of the International Conference on Motion and Power Transmissions, Hiroshima, JAPAN, (1991), pp.828 - 833.
- (13) 国立大学法人 宮崎大学, "歯車の歯面研磨剤及びこれを用いた研磨方法", 特願 2010-044814, (2010- 3), 特許第 5589209 号, (2014- 8) .
- (14) 日本歯車工業会歯車規格委員会編, "JGMA 6102-02 平歯車及びはすば歯車の歯面強さ計算式", (2009- 1), pp.1- 29, 日本歯車工業会.
- (15) 日本歯車工業会歯車規格委員会編, "JGMA 6202-01 かさ歯車の歯面強さ計算式", (2013- 6), pp.1- 22, 日本歯車工業会.
- (16) 日本工業規格, "製品の幾何特性仕様 (GPS) - 表面性状: 輪郭曲線方式 - 用語, 定義及び表面性状パラメータ", JIS B 0601-2001 (2001- 1), pp.1- 22, 日本規格協会.