

## 5. 歯車強度

### 5.1 動力伝達用歯車の高負荷運転に伴う問題点

#### 5.1.1 はじめに

動力伝達用歯車装置に対しては、社会を取巻く省資源・省エネルギー・環境保全などに関する諸問題から、今後もさらに高出力化・軽量化が要求されているため<sup>(1)</sup>、高負荷容量の歯車の検討も必要とされている。

本節では、主として歯面強さを高めるために用いられる表面硬化歯車のうち浸炭焼入れ歯車を対象とし、その高負荷運転に伴う問題点について、これまでの筆者らの基礎的な研究結果<sup>(2)~(5)</sup>を基に、考察・検討した結果を述べる。

#### 5.1.2 動力伝達用歯車の損傷形態

ここでは、歯車の損傷形態の代表例と浸炭焼入れ歯車における損傷領域及び歯面損傷形態について述べる<sup>(6)~(9)</sup>。

##### (1) 歯車の損傷形態の代表例<sup>(6)</sup>

歯車の強さに関連して、歯の折損（疲労折損）・歯面の疲労（ピッチング）・歯面の熱的損傷（スコアリング）・歯面の摩耗（摩滅）が代表的な損傷形態として知られている。

したがって、歯車の設計・加工並びに運用技術に対して、これらを考慮する必要がある。

##### (2) 浸炭焼入れ歯車における損傷領域<sup>(7) (8)</sup>

歯車の歯面強さを高めるために用いられる表面硬化歯車のうち浸炭焼入れ歯車においては、歯車自身の損傷形態が、歯元の曲げ疲労強度向上策としての歯車材の開発や歯元へのハードショットピーニングの適用などの寄与により、歯の疲れ折損から歯面の疲れ損傷へ移行する傾向にある。

したがって、浸炭焼入れ歯車においては、従来と異なり歯面強さによって歯車の伝達荷重が限界となる傾向のため、歯車の更なる高出力化・軽量小型化のニーズに対応して、歯面の疲労に対する有効な改善手法の開発が要望されている。

##### (3) 浸炭焼入れ歯車における歯面損傷形態<sup>(9)</sup>

図 5.1-1 に、浸炭焼入れ歯車（モジュール:6, 圧力角:  $20^\circ$ , 歯数:21 枚, 歯幅:15mm, 素材: JIS SCM 415, 熱処理: 歯部浸炭焼入れ焼戻し, 回転数: 1800rpm) の運転性能試験で生じた歯面損傷例を示す。この図などから、浸炭焼入れ歯車を始めとする高硬度歯車の歯面損傷においては、中炭素鋼調質の中硬度歯車の場合と異なり、負荷と負荷の繰

返しによって、き裂・微小ピットの集まりである歯面くもりや歯幅に対して大きな寸法割合のピット・スポールが発生することがわかってきている。なお、歯面くもりは、様々な用途の高硬度実機歯車においても確認され、歯形の変化やピット・スポールの起点となる無視できない歯面損傷形態として知られている。

#### 5.1.3 浸炭焼入れ歯車の歯面強さ

ここでは、歯車の歯面強さ設計式で用いられる浸炭鋼の許容接触応力と二円筒面圧実験で求められた浸炭鋼の許容接触応力及び歯車負荷能力実験で求められた浸炭焼入れ歯車の歯面強さについて述べる<sup>(10)~(14)</sup>。

##### (1) 歯車の強さ設計（ISO）式で用いられる浸炭鋼の許容接触応力<sup>(10)</sup>

平歯車及びはすば歯車の歯面強さ設計（ISO: International Organization for Standardization）式で、歯面の許容応力を求める際に用いられる歯車材の許容接触応力については、歯車材の品質等級別に表面硬さとの関係線図で示されている。例えば、浸炭鋼については、材料の三つの品質等級（ML・MQ・ME）別に 650HV~800HV の表面硬さに対して、許容接触応力の値  $\sigma_{Hlim}$  が  $\sigma_{Hlim}=1.30\text{ GPa}$ ,  $1.50\text{ GPa}$ ,  $1.65\text{ GPa}$  で示されている。しかしながら、これらの表示された許容接触応力の値のみでは、歯車の歯面強さを実際に計算するうえでは不十分なことが知られている。なお、任意の歯車材につ

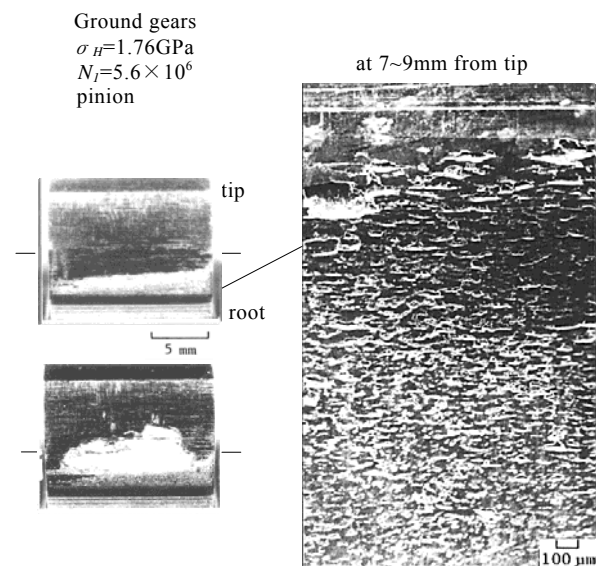


図 5.1-1 浸炭焼入れ歯車の歯面損傷例

いて、その強さの試験データがあれば、歯車材の品質等級別に表面硬さとの関係線図で示された許容接触応力の値  $\sigma_{Hlim}$  を変えて用いてもよいことになっている。

## (2) 二円筒面圧実験で求められた浸炭鋼の許容接触応力<sup>(11)~(13)</sup>

図 5.1-2 に、浸炭鋼円筒試験片（外径:68mm, 有効運転接触面幅:10mm, 素材:JIS SCM415, 熱処理:浸炭焼入れ焼戻し, 滑り率:-21%, 回転数:2630rpm）における面圧疲労実験の結果を示す。この例から、二円筒面圧実験で求められた浸炭鋼の許容接触応力の値  $\sigma_{Hlim}$  は、実験条件によって  $\sigma_{Hlim}=0.5\text{ GPa} \sim 2.0\text{ GPa}$  になっている。また、浸炭鋼の面圧強さは、材種や熱処理を含む加工工程にも影響され

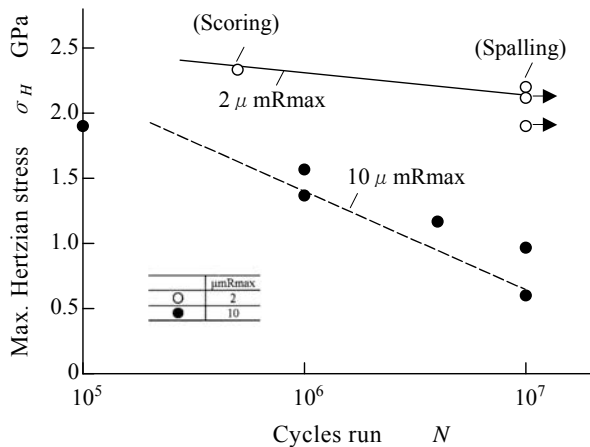


図 5.1-2 浸炭鋼（浸炭焼入れ焼戻し）の許容許容応力

ることから、浸炭鋼に含まれる添加元素の種類とその量を考慮した円筒試験片や CBN 研削・ショットピーニング・化学研磨などを表面仕上げに適用した円筒試験片を用いて検討され、それらの結果から、二円筒面圧実験で求められた浸炭鋼の許容接触応力の値  $\sigma_{Hlim}$  は、もちろん、実験条件により大きく異なる値となっているが、 $\sigma_{Hlim}=2.0\text{ GPa} \sim 3.0\text{ GPa}$  になっている。すなわち、場合によっては、浸炭鋼の許容接触応力が、これまでに歯車の歯面強さ設計式で用いられていた値より著しく高い値になりうることを示している。

したがって、浸炭鋼のさまざまな条件を一層明確にして、高負荷条件下の面圧強さに関連する諸現象の変化を明らかにするとともに、その許容接触応力の値  $\sigma_{Hlim}$  をできるだけ正確に求めることが必要になってきている。

## (3) 歯車負荷能力実験で求められた浸炭焼入れ歯車の歯面強さ<sup>(13)(14)</sup>

図 5.1-3 に、高硬度歯車（モジュール:6, 圧力角:20°, 歯数:21 枚と 31 枚, 歯幅:15mm, 18mm, 24mm, 材種:JIS S43C・SCM415 など, 熱処理:歯部高周波焼入れ・歯部浸炭焼入れ焼戻し, 小歯車回転数:1800rpm）における負荷能力実験（歯面強さ）の結果を示す。この例から、浸炭焼入れ歯車の歯面強さの値  $\sigma_{Hlim}$  は、実験条件によって  $\sigma_{Hlim}=0.5\text{ GPa} \sim 2.0\text{ GPa}$  になっている。また、浸炭焼入れ歯車の歯面強さの値  $\sigma_{Hlim}$  については、自動車用駆動系歯車を対象とした小型歯車の負荷能力実験から求められ、もちろん、各々の実験条件によって異なるが  $\sigma_{Hlim}$

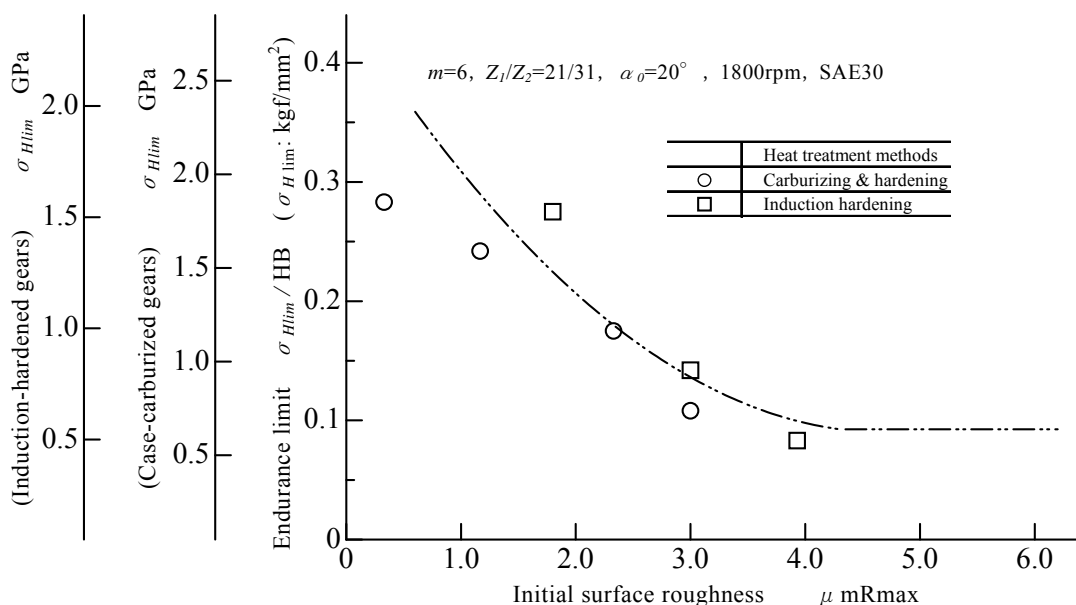


図 5.1-3 高硬度歯車（高周波焼入れ歯車・浸炭焼入れ歯車）の歯面強さ

=2.0GPa 以上になっている例がある。

したがって、従来に比べより高負荷の過酷条件下における浸炭焼入れ歯車の歯面強さの詳細な検討が更に必要になってきている。

### 5.1.4 円筒試験片を用いた高負荷運転の結果とその考察・検討

ここでは、浸炭鋼円筒試験片を用いた高負荷条件下の二円筒面圧基礎実験（法線荷重  $F=4.0 \sim 26.8$  kN, 最大接触応力  $\sigma_H=0.99 \sim 2.53$  GPa, 接触領域の幅  $2b_H=0.60 \sim 1.58$  mm, 最大せん断応力の発生する表面からの深さ  $0.5b_H=0.15 \sim 0.40$  mm, または  $0.786b_H=0.24 \sim 0.62$  mm）の結果とその考察・検討の結果について述べる<sup>(2)~(5)</sup>。

#### (1) 円筒試験片及び面圧基礎実験方法<sup>(2)~(5)</sup>

##### a. 円筒試験片

図 5.1-4 に、円筒試験片の形状と寸法を示す。なお、試験片の素材は、JIS SCM420 に相当する化学成分（C:0.20%, Cr:1.04%, Mo:0.19%, その他）で、加工工程は、低酸素真空溶製（酸素含有量 10ppm）・熱間鍛造・焼ならし・荒機械（切削）加工・浸炭焼入れ・焼戻し・仕上げ機械（研削）加工とした。また、歯車材の面圧強さを評価するうえで重要な円筒試験片の運転接触面は、歯面加工法を考慮して円筒研削盤により約  $4 \sim 6 \mu\text{mRmax}$ （約  $3 \sim 5 \mu\text{mRy}$ ）に仕上げられており、その表面硬さは 750HV (690HBS) 程度で、その有効浸炭深さ（550HV の位置の深さ）は 1.2 mm 前後であった。

##### b. 面圧基礎実験方法

試験機と潤滑油は、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・高速側円筒試験片において、回転数：2630 rpm・3190 rpm, 滑り率：- 21.3 %・17.6%, 滑り速度：2.05 m/s）

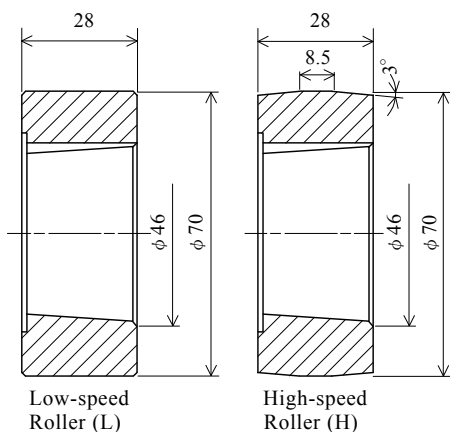
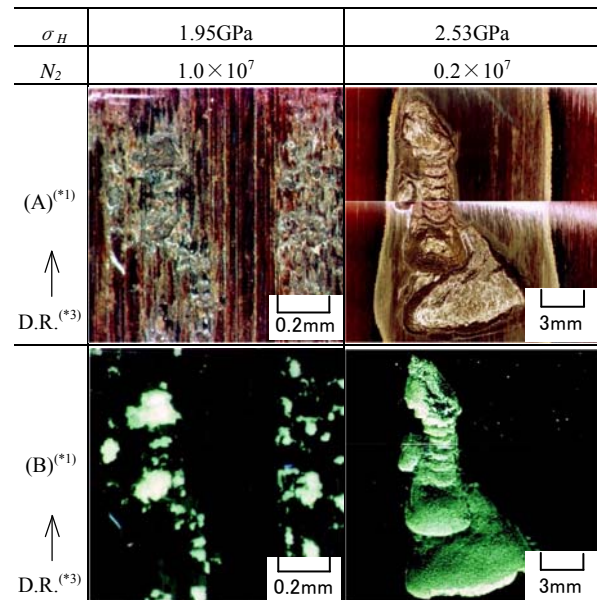


図 5.1-4 円筒試験片の形状・寸法

と SAE30 基油（供給油温  $313 \pm 1$  K（粘度  $97.49 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ）, 油量  $33 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ ）とした。なお、面圧基礎実験は、試験機の負荷用コイルばねを利用して、円筒試験片対の運転接触面に設定値の負荷が作用するようにして、負荷運転を行った。また、運転に伴う円筒試験片の詳細な変化を知るために、円筒試験片の運転接触面における表面温度を、その表面に接触させた熱電対（クロメル-コンスタンタン：タイプ E）を利用して、運転中に測定するとともに、表面状態を実体顕微鏡・走査型電子顕微鏡・表面粗さ測定器・微小硬度計などを利用して調べた。

#### (2) 運転接触面における表面状態の変化に及ぼす負荷の影響<sup>(2)~(5)</sup>

図 5.1-5 と図 5.1-6 に、各負荷条件と繰返し数における円筒試験片の運転接触面の外観例と詳細観察例を示す。これらの図などから、運転接触面の加工（研削）目は、低速側円筒試験片と高速側円筒試験片の両者ともに負荷と負荷の繰返しの増加とともに少なくなり、高負荷領域の場合、少ない繰返し数の時点でほとんど消失していることがわかった。また、運転接触面の外観上の表面損傷状況は、低速側円筒試験片と高速側円筒試験片の両者ともに、微小ピット（ $d < 0.1$  mm,  $d$ : 損傷の相当直径で損傷部分の表面積と等しい面積をもつ



\*1:Print by measurement method A

\*2:Print by measurement method B \*3:Direction of rotation

図 5.1-5 運転接触面における外観例（低速側円筒試験片，実体顕微鏡）

円の直径)が、低負荷領域の場合でも多数発生していること、負荷と負荷の繰返しの増加に伴って、低速側円筒試験片に小ピット ( $0.1 \leq d < 0.3$ )・ピット及びスポール ( $0.3 \leq d$ ) が発生し、高負荷領域ではそれらが生じてからわずかの負荷の繰返しでほぼ運転接触面全幅に伝播する特徴もわかった。さらに、運転接触面の表面損傷においては、き裂・マイクロピットが加工目の凹部と凹部の間の滑らかな部分に表面もしくは表面近傍から生じていること、高負荷領域の場合、加工目の消失とともになき裂・マイクロピットが互いに連なっている状態になり表面損傷が大きくなっていることがわかった。

したがって、浸炭鋼(浸炭焼入れ焼戻し)の表面損傷に及ぼす負荷の影響はきわめて大きく、負荷の大きさによって運転接触面は、中炭素鋼(調質)の場合と異なり、加工目の消失とともに種々の特徴ある表面損傷形態になることがわかった。また、これらのことから、浸炭鋼(浸炭焼入れ焼戻し)における許容面圧強さの値  $\sigma_{Hlim}$  は、材料を始めとする諸条件が全く同一でも、全く表面損傷(き裂・マイクロピットの発生)を許さない評価基準の場合と運転に大きな支障をきたす表面損傷(ピット・スポールの発生)を許さない評価基準の場合とで大きく異なることがわかった。

なお、以上の結果は、動力伝達用歯車の高負荷運転に伴う問題点として、歯面強さに関連する表面損傷形態が種々になるため、それぞれの表面損傷形態の評価基準を十分に考慮する必要性のある

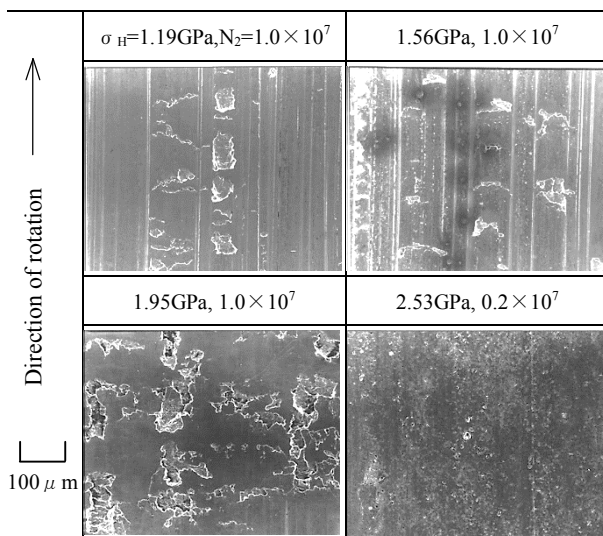


図 5.1-6 運転接触面における詳細観察例(低速側円筒試験片, 走査型電子顕微鏡)

ことを示唆している。

### (3) 接触運動面における表面温度の変化に及ぼす負荷の影響<sup>(2)~(5)</sup>

図 5.1-7 に、負荷に対する円筒試験片の運転接触面における表面温度の変化(各測定値の最低温度と最高温度の範囲)例を示す。これらの図などから、低速側円筒試験片と高速側円筒試験片の両者ともに接触運動面における表面温度は、いずれも負荷の増加により発生する摩擦熱等の増加にとともに上昇していること、また、浸炭鋼(浸炭焼入れ焼戻し)においては、焼戻し温度が中炭素鋼(調質)に比べて低く、高負荷領域の場合、円筒試験片の運転接触面における表面温度が運転中に熱処理工程の焼戻し温度以上にも達することがわかった。さらに、これらの表面温度を考慮して、円筒試験片対の接触部における EHD 理論に基づく最小油膜厚さ  $h_{min}$  を計算すると、最大接触応力  $\sigma_H = 0.99 \sim 2.53$  GPa の負荷のとき、油温 313 K で  $h_{min} = 2.5 \sim 1.9 \mu m$ , 473 K で  $h_{min} = 0.6 \sim 0.5 \mu m$  程度となることがわかった。

したがって、高負荷条件下では、浸炭鋼(浸炭焼入れ焼戻し)の運転接触面において、表面温度の変化に及ぼす負荷の影響は無視できず、熱処理工程における焼戻し温度以上の温度環境下で運転される場合のあること、接触部の油膜形成状態が極めて薄くなる可能性のあることがわかった。

なお、以上の結果は、動力伝達用歯車の高負荷運転に伴う問題点として、歯車の熱処理工程における温度履歴と運転接触面における表面温度の上

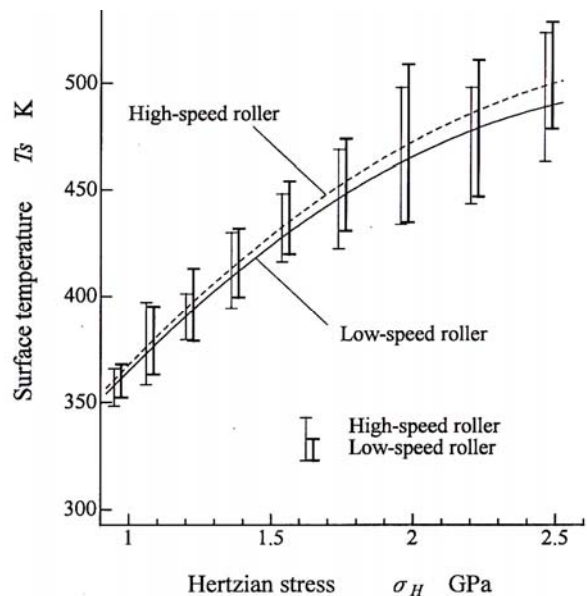


図 5.1-7 運転接触面における表面温度の変化例

昇並びに接触部の油膜形成状態を考慮する必要性のあることを示唆している。

#### (4) 接触運転面における表面粗さの変化に及ぼす負荷の影響<sup>(3)(5)</sup>

図 5.1-8 に、各負荷条件と繰返し数における円筒試験片の外周（軸方向）の表面粗さ（断面曲線）の変化例を示す。これらの図などから、運転前後の円筒試験片の表面粗さの変化状況を比較すると、負荷の上昇にともない表面の突起部が滑らかになり、高負荷領域の場合、運転前の表面の突起部、すなわち、初めの表面の突起部がほとんど消失していること、低速側円筒試験片の表面粗さ（断面曲線）から、負荷の上昇にともない塑性変形と摩耗による変形が顕著になり、運転未接触面と運転接触面との差、すなわち、運転接触面の断面形状の変化が明確になることがわかった。次に、JIS に基づく表面粗さの表示において、低速側円筒試験片と高速側円筒試験片の両者ともにいずれも、表面の突起の高さと関連のある最大高さ  $R_{max}$ ・ $R_y$  と十点平均粗さ  $R_z$  は、負荷が増加するとともにそれぞれの値は減少する傾向にあること、表面の突起の間隔と関連のある凹凸の平均間隔  $S_m$ ・局所山頂の平均間隔  $S$  は、負荷が増加するとともにそれぞれの値は増加する傾向にあること、すなわち、

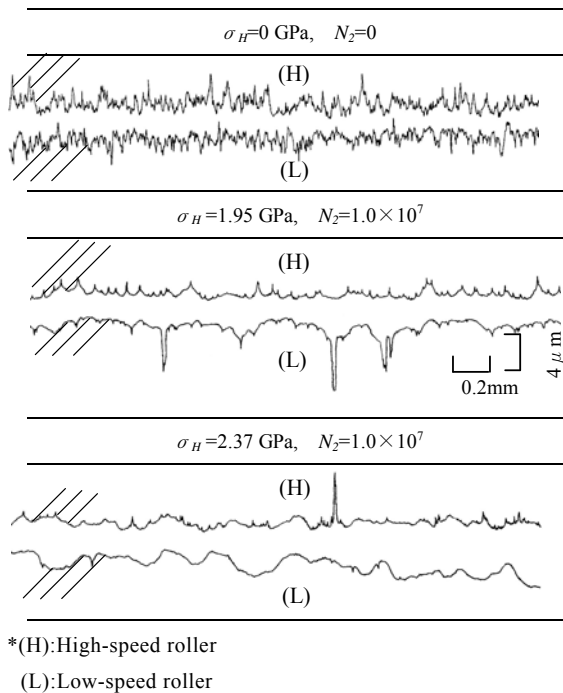


図 5.1-8 運転接触面における表面粗さ（断面曲線）の変化例

表面が滑らかになることが定量的にもわかった。

したがって、浸炭鋼（浸炭焼入れ焼戻し）の運転接触面において、表面粗さの変化に及ぼす負荷の影響は、極めて著しく、特に高負荷領域では、断面形状が塑性変形と摩耗などにより大きく変形することがわかった。

なお、以上の結果は、動力伝達用歯車の高負荷運転に伴う問題点として、初めの歯面粗さはもちろんのこと、歯面における運転に伴う表面突起の変化や摩耗なども十分に考慮する必要性のあることを示唆している。

#### (5) 接触運転面における硬さの変化に及ぼす負荷の影響<sup>(3)(5)</sup>

図 5.1-9 に、円筒試験片の運転接触面における表面近傍及び断面硬さ（試験荷重 2.942 N・保持時間 15 s）の変化例を示す。これらの図などから、表面から有効浸炭深さ（550HV の位置の深さ）付近までの領域において、負荷の増加にともない中炭鋼（調質）の場合と異なり、運転前に比べ硬さの著しい低下が認められることがわかった。なお、運転中の運転接触面の硬さを考慮するために、浸炭鋼（浸炭焼入れ焼戻し）の高温硬さを測定した結果、373 K～523 K の高温硬さの場合、323 K の高温硬さに比べ 80～300HV 程度の低下が認められることがわかった。

したがって、浸炭鋼（浸炭焼入れ焼戻し）の運転接触面において、負荷の増加に伴う温度の上昇に起因すると考えられる硬さの低下が無視できな

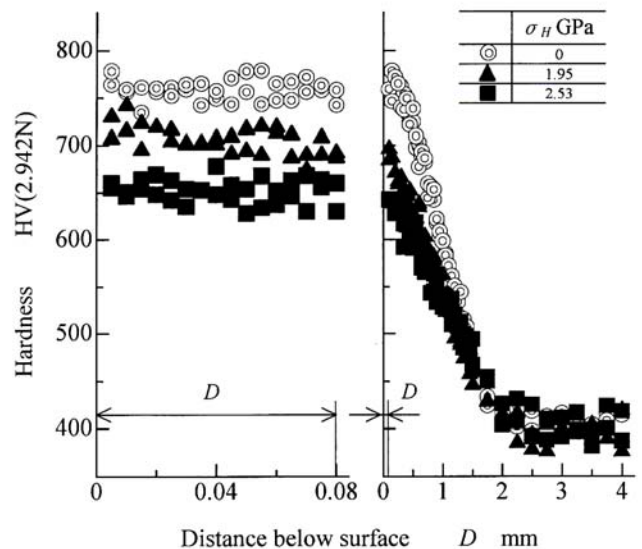


図 5.1-9 運転接触面における表面近傍及び断面硬さの変化例

いほど著しいことがわかった。

なお、以上の結果は、動力伝達用歯車の高負荷運転に伴う問題点として、運転前の歯面硬さ、すなわち、熱処理を含む加工工程後の歯面硬さが保持できない場合を考慮する必要性のあることを示唆している。

### (6) 寸法の変化に及ぼす負荷の影響<sup>(3) (5)</sup>

図 5.1-10 に、各負荷条件下における円筒試験片の寸法(外径)の変化例を示す。これらの図などから、寸法の測定精度と表面粗さの変化(塑性変形と摩耗)並びに運転打ち切り時の負荷の繰返し数を考慮しても、高負荷領域の場合、明らかに円筒試験片の寸法(外径)の増加すなわち膨張が認められることがわかった。なお、この寸法の膨張の原因としては、高負荷運転であることや運転中の運転接触面における表面温度が熱処理工程の焼戻し温度以上に達していること、すなわち、浸炭鋼(浸炭焼入れ焼戻し)の冶金学的組織の変化などとも関係があるものと考えられる。

したがって、浸炭鋼(浸炭焼入れ焼戻し)において、高負荷領域では、塑性変形と摩耗による変形のほかに、熱処理工程における焼戻し温度以上の温度環境下で運転されることなどのため、中炭素鋼(調質)の場合と異なり、材料の寸法の変化に及ぼす負荷の影響も大きいことがわかった。

なお、以上の結果は、動力伝達用歯車の高負荷

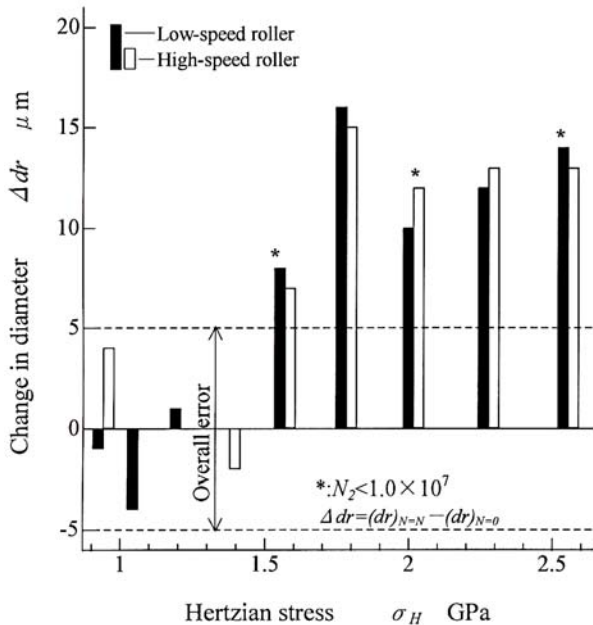


図 5.1-10 各負荷条件下における寸法(外径)の変化例

運転に伴う問題点として、負荷と摩擦熱などによる歯車の形状寸法(材料の組織)の変化も考慮する必要性のあることを示唆している。

### 5.1.5 まとめ

本節では、動力伝達用歯車の損傷形態と浸炭焼入れ歯車の歯面強さ並びに動力伝達用歯車の高負荷運転に伴う問題点について、主に浸炭鋼(浸炭焼入れ焼戻し)の円筒試験片を用いた二円筒面圧基礎実験の結果から、負荷と負荷の繰返しによる表面性状の変化に着目し考察・検討した。これらの研究結果が、今後の歯車材の開発と歯車加工法の開発並びに歯車強さ設計法の検討さらに歯車運転技術の検討に対して、何らかの指針になれば幸いである。

### 参考文献

- (1) 例えば、松本 将，日本機械学会九州支部部門講習会教材・歯車製造技術の基礎と応用，(2000-11)，pp. 1~12.
- (2) 中西 勉・鄧 鋼・木之下広幸・岡元研二，日本機械学会講演論文集，No. 988-2，(1998-7)，pp. 48~50.
- (3) 中西 勉・鄧 鋼・木之下広幸・竹内 隆，日本機械学会講演論文集，No. 998-39，(1999-10)，pp. 109~110.
- (4) 中西 勉・竹内 隆・鄧 鋼，日本機械学会講演論文集，No. 018-1，(2001-3)，pp. 203~204.
- (5) T. NAKANISHI・T. TAKEUCHI・G. GANG，Proceedings of the JSME International Conference on Motion and Power Transmission (MPT2001-Fukuoka)，Fukuoka，JAPAN，Vol. I，(2001-11)，pp. 255~260.
- (6) 日本機械学会，技術資料 歯車強さの設計資料，(1979-12)，pp. (1)~(16)，日本機械学会.
- (7) 有浦泰常・中西 勉・上野 拓，機械の研究，第37巻，第11号(1985-11)，pp. 1208~1216.
- (8) 例えば、吉田 誠，日本機械学会講習会教材・最新の機器設計に必要な歯車技術の基礎から応用まで-応用編-，No. 98-48，(1998-12)，pp. 9~21.
- (9) T. NAKANISHI・Y. ARIURA，Proceedings of the International Conference on Motion and Power Transmission (MTP' 91-Hiroshima)，Hiroshima，JAPAN，(1991-11)，pp. 828~833.
- (10) ISO 6336:1996(E)，Calculation of Load Capacity of Spur and Helical Gears-Part V: Strength and Quality of Materials. (改訂 ISO/CD6336-5-1999).
- (11) 小林幹和・桜田 徹，三菱自動車テクニカルレビュー1995，No. 7，(1995-4) pp. 59~65.
- (12) 例えば、鈴木智博・小川一義・堀田昇次，日本機械学会論文集(C編)，第64巻，622号，(1998-6)，pp. 2199~2204.
- (13) 例えば、中西 勉・有浦泰常・上野 拓，日本機械学会論文集(C編)，第52巻，477号，(1986-5)，pp. 1649~1655.
- (14) 吉崎正敏・橋本 忠，日本機械学会論文集(C編)，第65巻，630号，(1999-2)，pp. 694~701.