

4.1 歯車の曲げ強さに及ぼす材料と表面性状の影響

4.1.1 はじめに

歯車の曲げ強さに及ぼす材料の影響は、動力伝達用歯車の設計等において極めて重要な項目の一つである。ここでは、歯車の曲げ強さ計算式^{(1)~(4)}における材料の強さについて概説し、平滑試験片の各種曲げ疲労限度を利用した一方回転歯車における歯の許容曲げ応力値の算出手順、並びに、鉄鋼材料の各種 JIS 材（以下、鉄鋼 JIS 材と呼称）の硬さと各種曲げ疲労限度との関係を述べる。また、鉄鋼 JIS 材の硬さに対応した ISO の曲げに対する材料許容応力値と基準試験歯車の歯の許容曲げ応力値について、考察・検討した結果を述べる。次に、歯車の曲げ強さに及ぼす表面性状の影響は、歯車の生産工程や生産性等において極めて重要な項目の一つである。ここでは、歯車の曲げ強さに関連するこれまでの筆者らの基礎的な研究結果^{(5)~(9)}を基に、材料の曲げ疲労強度に及ぼす表面粗さの影響、並びに、表層組織の影響について、考察・検討した結果を述べる。

4.1.2 歯車の曲げ強さに及ぼす材料の影響

(1) 歯車の曲げ強さ計算式における材料の強さ

たとえば、平歯車及びはすば歯車の曲げ強さの判定には、JGMA401-01 (1974)⁽¹⁾・JGMA6101-01 (1988)⁽²⁾・JGMA6101-02 (2007)⁽³⁾の場合、材料の強さ、すなわち、許容歯元曲げ応力 σ_{Flim} ・材料の疲労限度 σ_{Flim} ・材料の曲げ疲れ限度応力 σ_{Flim} が必要であり、一つの材料の一つの硬さ（熱処理）に対応してそれぞれの値が表にまとめて提示されている。同様に、ISO6336-3 (2018)⁽⁴⁾ B 法の場合、Nominal stress number (bending) σ_{Flim} が必要であり、ISO 6336-5 (2016)⁽¹⁰⁾において材料・熱処理・材料品質等級別に仕上げ面の表面硬さとの関係でそれぞれの値が図や関係式で提示されている。

(2) 平滑試験片の疲労限度を利用した歯の許容曲げ応力値

図 4.1-1 に、材料の各種曲げ疲労限度を利用した一方回転歯車における歯の許容曲げ応力値 σ_{Flim} の算出手順を示す。ここで、図 4.1-1 において、各種曲げ疲労限度は、材料の疲労強度データベース⁽¹¹⁾において平滑試験片の $S-N$ 曲線から求めるとした。また、一方回転歯車における歯の許容曲げ応力値 σ_{Flim} は、平歯車の曲げが平面曲げに相当し、回転が一方の場合、荷重方向が一定（片振り）になるため、片振り平面曲げ疲労限度 σ_{up} を利用して、または、片振り平面曲げ疲労限度 σ_{up} が直接得られない場合、回転曲げ疲労限度 σ_{wb} や両振り平面曲げ疲労限度 σ_{wn} を利用して、歯の応力修正係数を考慮し算出するとした。

次に、表 4.1-1 に、鉄鋼 JIS 材における平滑試験片のビッカース硬さ HV と各種曲げ疲労限度との関係を示す。ここで、表 4.1-1 において、鉄鋼 JIS 材における平滑試験片の回転曲げ疲労限度 σ_{wb} は、そのビッカース硬さ HV

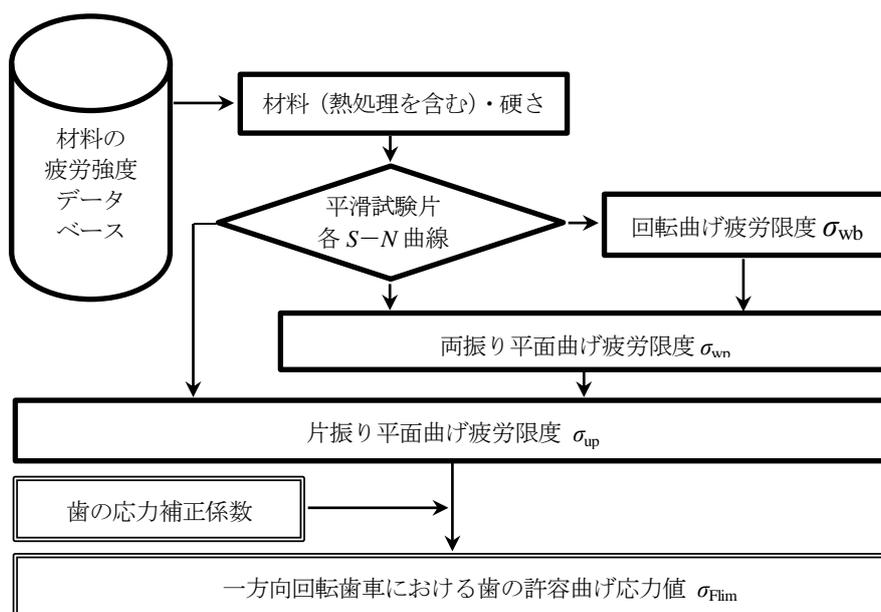


図 4.1-1 材料の各種曲げ疲労限度を利用した歯の許容曲げ応力値 σ_{Flim} の算出手順

に比例する経験則の $\sigma_{wb} \doteq K \cdot (HV)^{(12)}$ [N/mm²] (HV<400, K:材種ごとの比例定数) を用いて概算し, 両振り平面曲げ疲労限度 σ_{wp} は, 回転曲げ疲労限度 σ_{wb} との関係⁽¹³⁾ $\sigma_{wp} \doteq 0.8 \times \sigma_{wb}$ [N/mm²] を用い, 片振り平面曲げ疲労限度 σ_{up} は, 両振り平面曲げ疲労限度 σ_{wp} との関係⁽¹³⁾ $\sigma_{up} \doteq 1.5 \times \sigma_{wp}$ [N/mm²] を用いて概算した。

図 4.1-1 と表 4.1-1 から, 鉄鋼 JIS 材における平滑試験片の片振り平面曲げ疲労限度 σ_{up} は, そのビッカース硬さ HV に比例すること, さらに, 歯の応力補正係数を考慮して, 一方回転歯車の歯の許容曲げ応力値 σ_{Flim} を概算できることがわかる。

(3) 鉄鋼 JIS 材の硬さに対応した ISO の σ_{FE} , 並びに, ISO の σ_{Flim}

ISO 6336-5 (2016) の Allowable stress numbers (bending) σ_{FE} (以下, ISO の σ_{FE} と呼称) は, 平滑試験片の基本的曲げ強さであり, (4・1) 式で提示されている。ここで, Stress correction factor (以下, ISO の Y_{ST} と呼称) を $Y_{ST} = 2.0$ とし, Nominal stress number (bending) σ_{Flim} (以下, ISO の σ_{Flim} と呼称) は, (4・2) 式で提示されている。

$$\sigma_{FE} = \sigma_{Flim} \cdot Y_{ST} \quad [N/mm^2] \quad (4 \cdot 1)$$

σ_{FE} : ISO の σ_{FE} (ISO の曲げに対する材料許容応力値^{(14) (15)})
 σ_{Flim} : ISO の σ_{Flim} (ISO の基準試験歯車の歯の許容曲げ応力値^{(14) (15)})
 Y_{ST} : ISO の Y_{ST} (基準試験歯車の寸法に関する応力補正係数^{(14) (15)})

$$\sigma_{Flim} = A \cdot x + B \quad [N/mm^2] \quad (4 \cdot 2)$$

x : 仕上げ面の表面硬さ HBW または HV
 A, B : 材料・熱処理・材料品質等級別で与えられる定数

表 4.1-2 に, 鉄鋼 JIS 材^{(16) ~ (20)} の硬さに対応した ISO の σ_{FE} , 並びに, ISO の σ_{Flim} を示す。ここで, 表 4.1-2 において, 鉄鋼 JIS 材のビッカース硬さ HV は, それぞれの鉄鋼 JIS 材における解説附表の参考硬さ HBW^{(21) (22)} 等を利用し, ブリネル硬さ HBW からビッカース硬さ HV への換算は, $(HV) = 1.05 \times (HBW)$ を用いた。また, 鉄鋼 JIS 材に対応した ISO の σ_{FE} は, 片振り平面曲げ疲労限度 σ_{up} (表 4.1-1 参照) に等しい値 ($\sigma_{FE} = \sigma_{up}$) とし, 鉄鋼 JIS 材に対応した ISO の σ_{Flim} は, ISO の Y_{ST} を $Y_{ST} = 2.0$ とし (4・3) 式で概算するとした。

$$\sigma_{Flim} \doteq C \cdot x \quad [N/mm^2] \quad (4 \cdot 3)$$

x : 仕上げ面の表面硬さ HBW または HV
 C : 材料・熱処理別で与えられる比例定数 (表 4.1-2 参照)

表 4.1-2 から, 流通している鉄鋼 JIS 材における ISO の σ_{FE} , 並びに, ISO の σ_{Flim} (以下, ISO の $\sigma_{FE} \cdot \sigma_{Flim}$ と呼称) は, 該当する鉄鋼 JIS 材のブリネル硬さ HBW もしくはビッカース硬さ HV を用いて, それぞれに示された比例の式で簡便に概算できることがわかる。

なお, 鉄鋼 JIS 材において, 鋼種別に硬さの適用範囲があることに注意が必要であり, 表面硬化された鉄鋼 JIS 材における ISO の $\sigma_{FE} \cdot \sigma_{Flim}$ については, 今後の課題である。

(4) 鉄鋼 JIS 材における ISO の $\sigma_{FE} \cdot \sigma_{Flim}$ と ISO 材の $\sigma_{FE} \cdot \sigma_{Flim}$ との比較

図 4.1-2 に, 全体硬化鋼 (炭素鋼・合金鋼) を例として, 鉄鋼 JIS 材における ISO の $\sigma_{FE} \cdot \sigma_{Flim}$ と ISO 6336-5 (2016) に提示されている $\sigma_{FE} \cdot \sigma_{Flim}$ (以下, ISO 材の $\sigma_{FE} \cdot \sigma_{Flim}$ と呼称) とを比較して示す。ここで, 図 4.1-2 において,

表 4.1-1 鉄鋼 JIS 材における平滑試験片のビッカース硬さ HV と各種曲げ疲労限度との関係

鉄鋼 JIS 材		回転曲げ疲労限度 σ_{wb} [N/mm ²]	両振り平面曲げ疲労 限度 σ_{wp} [N/mm ²]	片振り平面曲げ疲労 限度 σ_{up} [N/mm ²]
鑄鉄	ねずみ鑄鉄品	$\sigma_{wb} \doteq 0.78 \times (HV)$	$\sigma_{wp} \doteq 0.6 \times (HV)$	$\sigma_{up} \doteq 0.9 \times (HV)$
	可鍛鑄鉄品			
	球状黒鉛鑄鉄品			
鑄鋼品		$\sigma_{wb} \doteq 1.27 \times (HV)$	$\sigma_{wp} \doteq 1.0 \times (HV)$	$\sigma_{up} \doteq 1.5 \times (HV)$
ステンレス鋼 (マルテンサイト系)		$\sigma_{wb} \doteq 1.67 \times (HV)$	$\sigma_{wp} \doteq 1.3 \times (HV)$	$\sigma_{up} \doteq 2.0 \times (HV)$
ステンレス鋼 (オーステナイト系)		$\sigma_{wb} \doteq 1.57 \times (HV)$	$\sigma_{wp} \doteq 1.3 \times (HV)$	$\sigma_{up} \doteq 1.9 \times (HV)$
機械構造用炭素鋼	焼なまし			
	焼ならし			
	焼入れ焼戻し			
機械構造用合金鋼 (低合金鋼, 耐熱鋼他)				

左と右の縦軸における目盛の数値は、ISO の基準試験歯車の歯の許容曲げ応力値 σ_{Fim} と曲げに対する材料許容応力値 σ_{FE} であり（応力補正係数 $Y_{ST} = 2.0$ ），図中の ML/MQ/ME の各線分は、ISO 材の材料品質等級に対応し、太い線分は、表 4.1-2 に示された鉄鋼 JIS 材（機械構造用炭素鋼・機械構造用合金鋼）における次の（4・4）式によるものである。

$$\sigma_{Fim} \doteq 0.94 \times (HV) \quad [N/mm^2] \quad (4 \cdot 4)$$

(HV) : 全体硬化鋼のビッカース硬さ HV

図 4.1-2 から、全体硬化鋼（炭素鋼・合金鋼）の場合、（4・1）式と（4・4）式を適用し概算した鉄鋼 JIS 材における ISO の $\sigma_{FE} \cdot \sigma_{Fim}$ は、ISO 材の $\sigma_{FE} \cdot \sigma_{Fim}$ の材料品質等級に対応した ML 線分と ME 線分の間の領域内にあることがわかる。

また、概算した鉄鋼 JIS 材における ISO の $\sigma_{FE} \cdot \sigma_{Fim}$ は、焼ならし低炭素鋼・鋳鋼の場合、全体硬化鋼と同じ傾向の ML 線分と ME 線分の間の領域内であり、ねずみ鋳鉄・球状黒鉛鋳鉄の場合、硬さによってわずかに ML 線分と ME 線分の間の領域外であることがわかった。

これらのことから、鉄鋼 JIS 材における平滑試験片のビッカース硬さ HV と回転曲げ疲労限度 σ_{wb} との経験的な関係を用いて、簡便に概算した ISO の $\sigma_{FE} \cdot \sigma_{Fim}$ は、ISO 材の $\sigma_{FE} \cdot \sigma_{Fim}$ と大略同じであることがわかった。なお、歯車の強さ計算式の国際的標準化に伴い、ISO の歯車の強さ計算式を利用する機会も増えるものと思われ、その際、材料の強さに関する情報、すなわち、ISO 6336-5（2016）の適用が必要となる。しかしながら、この適用において、現在のところ、国内では鉄鋼 JIS 材を用いることが多いこと、加えて品質等級による材料供給が通常行われていないことなどの問題点がある。

したがって、歯車に鉄鋼 JIS 材を用いて、ISO の曲げ強さ計算式（ISO6336-3（2018）B 法）を利用する場合、鉄鋼 JIS 材における ISO の $\sigma_{FE} \cdot \sigma_{Fim}$ を表 4.1-2 に示した比例の式から簡便に概算することは有用と考える。もちろん、過酷な条件で使用される歯車においては、材料の品質も重要であり、将来的に鉄鋼 JIS 材においても材料品質等級が要求されるとともに、それらの材料の強さに関して詳しい情報も必要である。

表 4.1-2 鉄鋼 JIS 材の硬さに対応した ISO の σ_{FE} ，並びに、ISO の σ_{Fim}

材料	熱処理	硬さの参考範囲	ISO の σ_{FE} [N/mm ²]	ISO の σ_{Fim} [N/mm ²]
鋳鉄	ねずみ鋳鉄品	150 < (HBW) < 285	$\sigma_{FE} \doteq 1.0 \times (HBW)$	$\sigma_{Fim} \doteq 0.49 \times (HBW)$
	球状黒鉛鋳鉄品	145 < (HBW) < 350	$\sigma_{FE} \doteq 1.6 \times (HBW)$	$\sigma_{Fim} \doteq 0.80 \times (HBW)$
炭素鋼鋳鋼品	140 < (HBW) < 210			
機械構造用炭素鋼	焼ならし(0.25%C以下)	110 < (HBW) < 180	$\sigma_{FE} \doteq 2.0 \times (HBW)$	$\sigma_{Fim} \doteq 0.99 \times (HBW)$
	焼入れ焼戻し	160 < (HV) < 300	$\sigma_{FE} \doteq 1.9 \times (HV)$	$\sigma_{Fim} \doteq 0.94 \times (HV)$
機械構造用合金鋼	焼入れ焼戻し	210 < (HV) < 385		

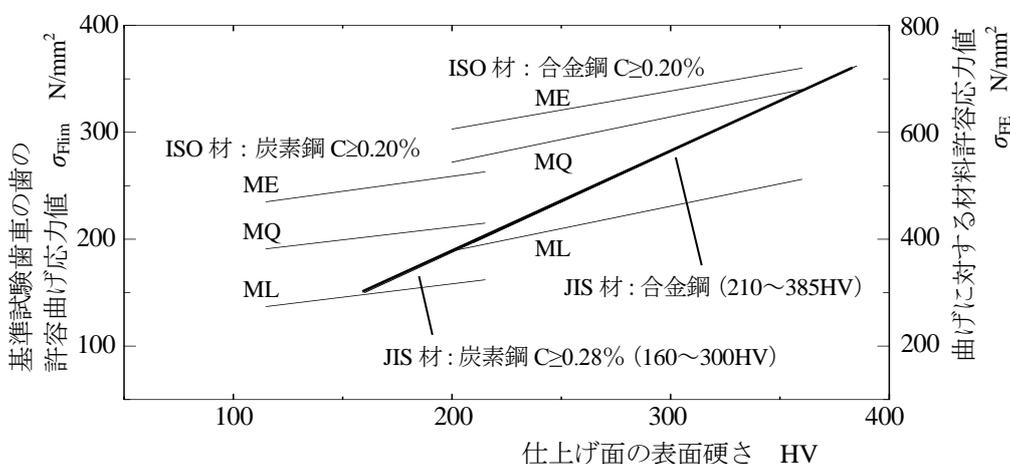


図 4.1-2 鉄鋼 JIS 材における ISO の $\sigma_{Fim} \cdot \sigma_{FE}$ と ISO 材の $\sigma_{Fim} \cdot \sigma_{FE}$ との比較(全体硬化鋼の場合)

4.1.3 材料の曲げ疲労強度に及ぼす表面粗さと表層組織の影響^{(5)~(9)}

(1) 3点曲げ疲労試験片の形状・寸法と加工工程

図 4.1-3 (a) (b) と図 4.1-4 に、3 点曲げ疲労試験片の形状・寸法と加工工程概略を示す。

3 点曲げ疲労試験片（以下、試験片と呼称）の寸法は、長さ 100 mm・幅 10 mm・高さ 20 mm の直方体で、き裂発生が長さ方向中央部で発生することを考慮して、その部分をクラウニング付きの半円状ノッチ（以下、ノッチ部と呼称）に加工した。

試験片の材種と熱処理は、JIS 機械構造用炭素鋼材 S50C・S55C と焼ならし（加熱保持温度：850℃・120min, N₂ ガス中空冷），並びに、JIS 機械構造用合金鋼鋼材 SCM415 と浸炭焼入れ（浸炭拡散温度・時間：900℃・330min, 炉冷保持温度・時間：850℃・30min, 焼入れ油冷温度：90℃）・焼戻し（加熱保持温度・時間：170℃・120min）とした。なお、炭素鋼の焼ならし後の硬さは、180~230HBS, 合金鋼の浸炭焼入れ焼戻し後の最大硬さと有効浸炭深さ（550HV の位置）は、840HV と 0.95 mm であった。

ノッチ部の極表面は、炭素鋼焼ならしの場合、曲げ疲労強度に及ぼす表面粗さの影響を調べるため、研磨布紙 2000 番・400 番・240 番・100 番⁽²³⁾ の研磨布紙仕上げ 4 種類（それぞれ、試験片 NA・NB・NC・ND グループ）とし、合金鋼浸炭焼入れ焼戻しの場合、曲げ疲労強度に及ぼす表層組織の影響を調べるために、熱処理後そのまま（試験片 CA グループ）・熱処理後研磨布紙仕上げ（試験片 CB グループ）・熱処理後電解研磨 2 種類（試験片 CC1・CC2 グループ）とした。

(2) 3点曲げ疲労試験機と3点曲げ疲労試験方法

図 4.1-5 (a) (b) に、電気サーボ油圧式パルセータ疲労試験機の外観と試験片の取付け部拡大を示す。また、図 4.1-6 (a) (b) に、ノッチ部の断面モデルとイオンスパッタ金属膜の位置を示す。

試験片の支持スパンは、80mm で、疲労試験の条件は、荷重比 (P_{min}/P_{max}) 0.05 以下、最大荷重 30 k N, 負

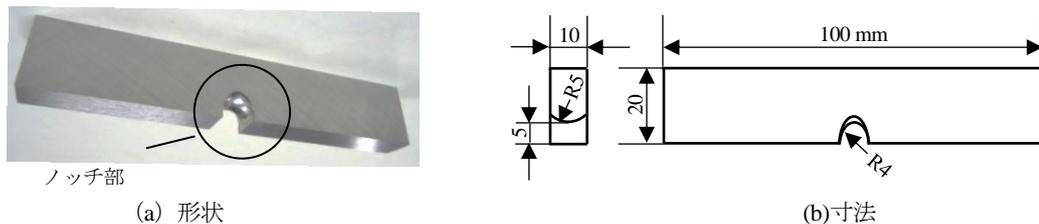


図 4.1-3 3 点曲げ疲労試験片の形状・寸法

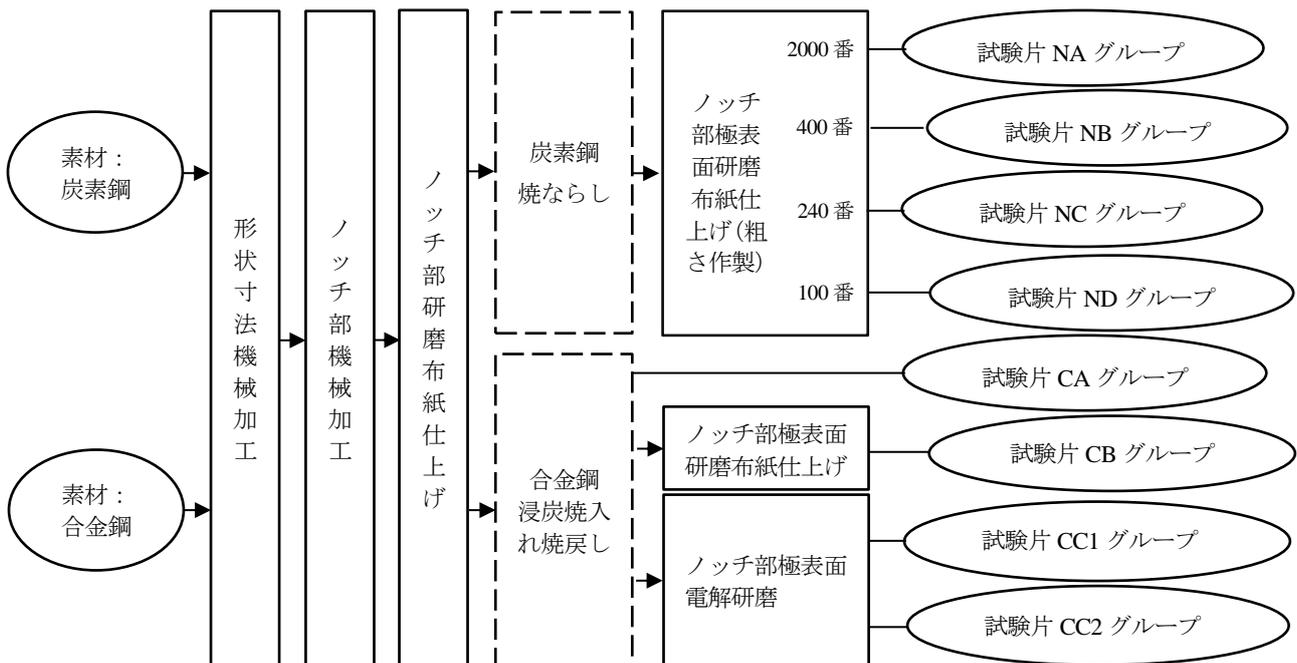


図 4.1-4 3 点曲げ疲労試験片の加工工程概略

荷速度 30Hz, 破断の生じない場合繰返し数 10^7 までとした。また、ノッチ部の最大実応力の計算には有限要素法解析を用いて求めた。

各試験片グループの3点曲げ疲労限度（以下、曲げ疲労限度）は、ステアケース法により実施した疲労試験結果を用いて Little の方法で推定した。また、疲労き裂の発生は、き裂の発生によってノッチ部表面の極めて薄い絶縁膜とイオンスパッタ金属膜が切れ、その電気抵抗が上昇することから、電気抵抗に比例する電圧信号を記録することで検出した。なお、試験片の疲労き裂発生寿命は、試験開始点から電圧信号の上昇開始点までの繰返し数（以下、き裂発生寿命 N_i と呼称）、疲労き裂進展寿命は、電圧信号の上昇開始点から破断までの繰返し数（以下、き裂進展寿命 N_g と呼称）とし、疲労寿命（破断繰返し数）（以下、疲労寿命 N_f と呼称）は、試験開始点から破断までの繰返し数とした。

(3) 曲げ疲労限度に及ぼす表面粗さの影響（炭素鋼焼ならしの場合）

図 4.1-7 に、加工後のノッチ部の外観例と表面粗さを示す。ここで、図 4.1-7 において、JIS B0601-1994⁽²⁴⁾ に基づき計測した最大高さ R_y と算術平均粗さ R_a は、それぞれ JIS B0601-2013⁽²⁵⁾ における粗さパラメータの最大高さ粗さ R_z と算術平均粗さ R_a に相当する。

図 4.1-7 などから、ノッチ部は、研磨布紙仕上げ 4 種類において、台紙の目盛線が映し出された鏡面状況（試

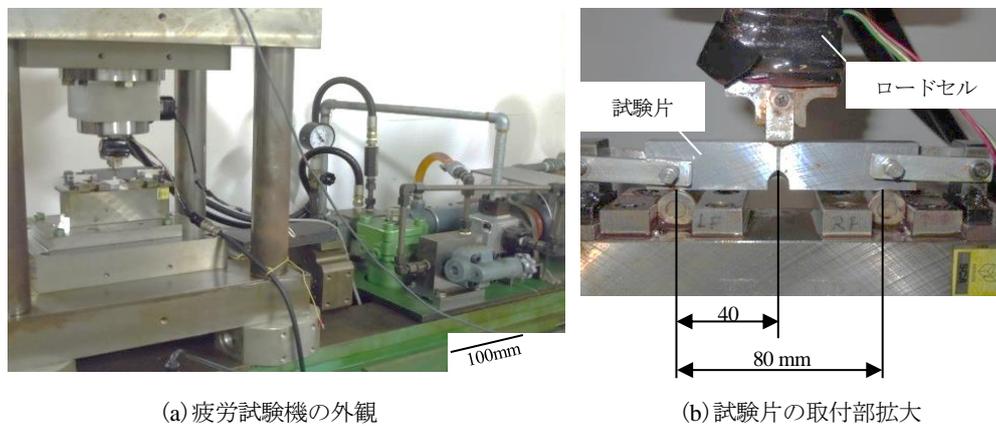


図 4.1-5 電気油圧式サーボパルセータ疲労試験機の外観と3点曲げ疲労試験片の取付部拡大

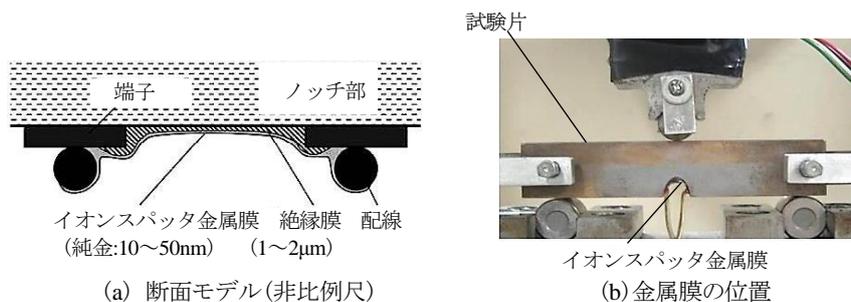


図 4.1-6 ノッチ部の断面モデルとイオンスパッタ金属膜の位置

試験片 NA グループ	試験片 NB グループ	試験片 NC グループ	試験片 ND グループ
P2000 : 0.4 $\mu\text{m}R_y$, 0.04 $\mu\text{m}R_a$	P400 : 2 $\mu\text{m}R_y$, 0.3 $\mu\text{m}R_a$	P240 : 5 $\mu\text{m}R_y$, 0.7 $\mu\text{m}R_a$	P100 : 9 $\mu\text{m}R_y$, 1.3 $\mu\text{m}R_a$

4.0 mm

図 4.1-7 ノッチ部の外観例と表面粗さ（炭素鋼焼ならし研磨布紙仕上げ）

験片 NA・NB シリーズ) と仕上げ加工目の方向がわかる表面状況 (試験片 NC・ND シリーズ) に区別が外観上可能であった。また、表面粗さの計測結果から、たとえば、試験片 NA・NB・NC・ND グループの場合、それぞれ $0.2\sim 0.6\mu\text{mRy}$ ・ $2\mu\text{mRy}$ 程度・ $5\mu\text{mRy}$ 程度・ $8\sim 9\mu\text{mRy}$ となっており、表面粗さの差異が明確であった。

図 4.1-8 に、炭素鋼 S55C 焼ならしと S50C 焼ならし (以下、S55C と S50C と呼称) の曲げ疲労限度に及ぼす表面粗さの影響を示す。ここで、図 4.1-8 において、縦軸は、各試験片グループの疲労試験を用いて推定した曲げ疲労限度であり、横軸はノッチ部の表面粗さの最大高さである。

図 4.1-8 から、曲げ疲労限度は、S55C の場合、ノッチ部の表面が滑らかな試験片 NA・NB グループが試験片 NC・ND グループに比べ向上していること、S50C の場合、同様に試験片 NA・NB グループが試験片 NC グループに比べ向上していることがわかる。また、定量的に、たとえば、ノッチ部の最大高さを $10\mu\text{mRy}$ から $1\mu\text{mRy}$ に上げると、曲げ疲労限度は、S55C の場合約 15% の向上、S50C の場合約 20% の向上がわかる。なお、S50C の試験片 ND グループの曲げ疲労限度は、ノッチ部の表面粗さが最も粗いにもかかわらず、表面が滑らかな試験片 NB グループと同等となっており、場合によって曲げ疲労限度に及ぼす表面粗さの影響に加えて、その他の要因、たとえば、表面加工法に関連する残留応力の影響なども考慮する必要があることを示唆している。

したがって、炭素鋼ならしの曲げ疲労限度は、ノッチ部が滑らかなほど向上すること、明確な曲げ疲労限度の向上のためには、ノッチ部を鏡面仕上げする必要があることがわかった。また、これらのことは、材料・熱処理が同一でも表面仕上げに着目することで曲げ強さの向上が可能なことを示している。

(4) 疲労寿命に及ぼす表面粗さの影響 (炭素鋼焼ならしの場合)

図 4.1-9 に、炭素鋼焼ならしの各種寿命に及ぼす表面粗さの影響を示す。ここで、図 4.1-9 において、縦軸は、一定の応力 ($\sigma_{\text{max}}=732\text{MPa}$) の疲労試験において得られたき裂発生寿命 M_i ・き裂進展寿命 N_g ・疲労寿命 N_f であり、横軸はノッチ部の表面粗さの最大高さである。また、図中の各印は、ノッチ部の表面粗さ 1 グループに対して数回の疲労試験の平均値である。

図 4.1-9 から、一定の応力レベルの試験片 NA・NB・NC・ND グループにおいて、それぞれのき裂発生寿命 M_i は、各疲労寿命 N_f の約 80% の繰返し数、き裂進展寿命 N_g は残りの約 20% の繰返し数であること、すなわち、ノッチ部の表面粗さがいざいでも、疲労寿命 N_f のうちき裂発生寿命 M_i の占める割合が多いことがわかる。また、試験片 NA・NB・NC・ND グループにおいて、き裂発生寿命 M_i と疲労寿命 N_f は、ノッチ部の表面が滑らかなほど増加すること、き裂進展寿命 N_g は、ノッチ部の表面粗さに影響されずほとんど変化しないことがわかる。たとえば、ノッチ部の最大高さを $10\mu\text{mRy}$ から $1\mu\text{mRy}$ に上げると、一定の応力レベルで、き裂発生寿命 M_i は約 4 倍増加し、その結果、疲労寿命 N_f は増加することがわかる。なお、ノッチ部の表面性状で、き裂発生寿命が大きく異なったことは、き裂の発生が表面性状に影響されること、き裂進展寿命がほぼ同一であったことは、き裂の進展が内部の材質に影響されるものの、ここでは同一材質であったことからわかる。

したがって、曲げ疲労強度において、疲労寿命 N_f を増加するためには、き裂発生寿命 M_i を増加すること、すなわち、ノッチ部の表面性状を滑らかにすることがわかった。

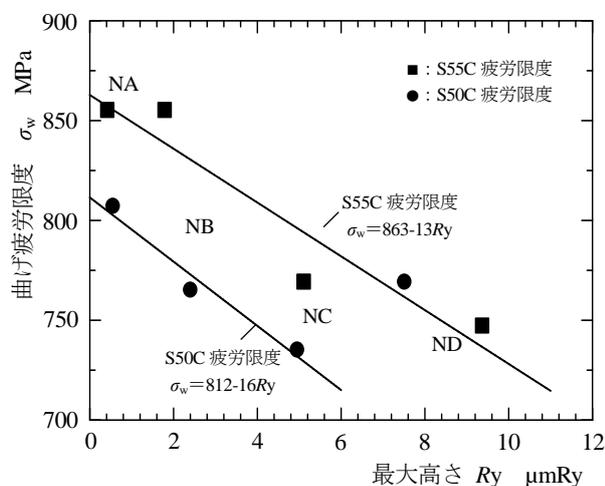


図 4.1-8 曲げ疲労限度に及ぼす表面粗さの影響

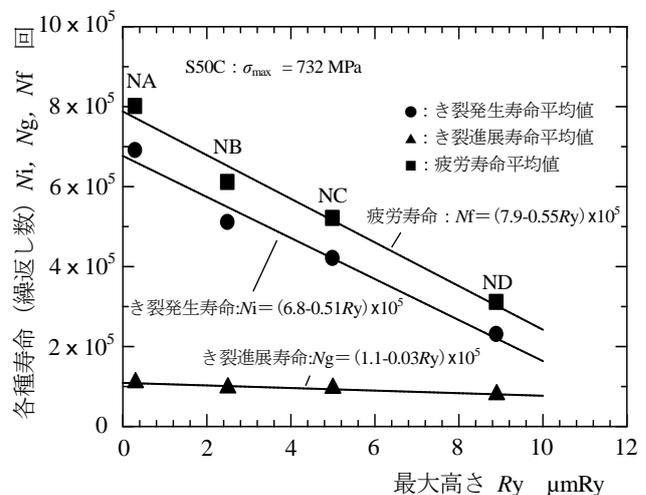


図 4.1-9 各種寿命に及ぼす表面粗さの影響

これらのことから、表面性状に着目した動力伝達用歯車の曲げ強さ向上のためには、歯元すみ肉部を滑らかにする簡便な加工方法、並びに、加工した表面の簡便な計測方法などの開発が必要と思われる。

(5) 曲げ疲労強度に及ぼす表層組織の影響（合金鋼浸炭焼入れ焼戻しの場合）

図 4.1-10 に、熱処理後と電解研磨後における表層組織（電子顕微鏡写真）を示す。ここで、図 4.1-10 において、熱処理後（極表面除去加工なし）とは、合金鋼浸炭焼入れ焼戻し後の状態のままであり、電解研磨後（極表面除去加工あり）とは、熱処理後に電気化学的な研磨法の電解研磨で極表面の除去加工を施したもので、図中の数値 HV は、それぞれ表面からの深さが約 20 μm と 50 μm の位置におけるビッカース硬さである。

図 4.1-10 などから、熱処理後（極表面除去加工なし）では、表面から約 20 μm の表層において、組織の異常が認められ、この付近で大きな硬さの低下があった。この組織の異常の原因は、ガス浸炭時において表面に酸化性ガスが存在するため、合金元素の Mn・Cr・Si 等の酸化物、すなわち、粒界酸化物⁽²⁶⁾ が生成されたためと思われる。また、表層付近における硬さの低下の原因は、表層の Mn・Cr・Si の元素不足に伴って、焼入れ性が低下する不完全焼入れ組織の存在によるものと思われる。一方、電解研磨後（極表面除去加工あり）では、表面を電解研磨することで、表層の粒界酸化物などが取り除かれるため、硬さの変化も少ないことがわかった。

次に、図 4.1-11 に、各試験片グループの曲げ疲労限度を示す。ここで、図 4.1-11 において、縦棒は、試験片 CA・CB・CC1・CC2 グループのそれぞれの疲労試験から推定した曲げ疲労限度である。

図 4.1-11 から、極表面除去加工した試験片 CB・CC1・CC2 グループの曲げ疲労限度は、極表面除去加工なし試験片 CA グループの場合に比べ、約 5~8% 向上していることがわかる。なお、電解研磨で極表面除去加工した試験片 CC1・CC2 グループの曲げ疲労限度は、極表面除去加工なし試験片 CA グループと研磨布仕上げ試験片 CB グループに比べ高い傾向であり、また、極表面除去加工した試験片 CC1 グループの曲げ疲労寿命は、極表面除去加工なし試験片 CA グループに比べ、最大実応力の高い領域で増加する傾向であった。今後、曲げ疲労強度に及ぼす極表面加工法などの影響についても詳細な検討が必要となった。

したがって、合金鋼浸炭焼入れ焼戻しにおいて、表層組織に異常が認められる場合、その曲げ疲労限度や場合によって曲げ疲労寿命に影響を及ぼすことがわかった。

これらのことから、動力伝達用浸炭焼入れ歯車の負荷能力向上のためには、歯部の表層組織に問題がある場合、粒界酸化物を低減する鋼材開発⁽²⁷⁾ や酸化性ガスを低減するプロセスの開発、真空浸炭処理・窒化処理・表層の簡便な除去加工や付加加工などの開発が必要と思われる。

4.1.4 まとめ

動力伝達用歯車の曲げ強さに及ぼす材料の影響に関連して、材料の各種曲げ疲労限度を利用した歯の許容曲げ応力値の算出手順を示し、鉄鋼 JIS 材における平滑試験片の硬さと回転曲げ疲労限度との関係などを用いて概算した ISO の曲げに対する材料許容応力値と基準試験歯車の歯の許容曲げ応力値について、考察・検討した。その

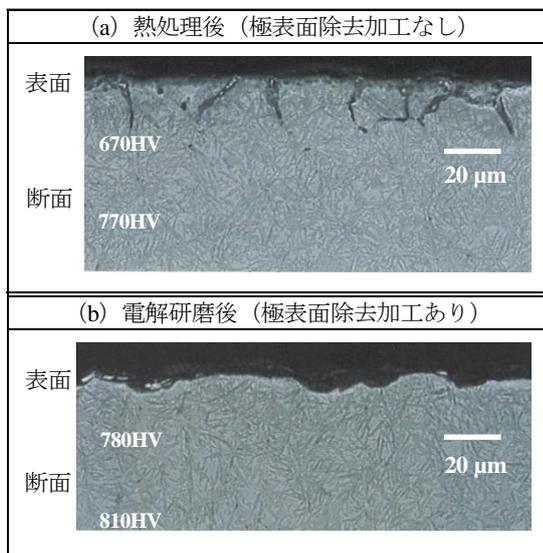


図 4.1-10 熱処理後と電解研磨後における表層組織

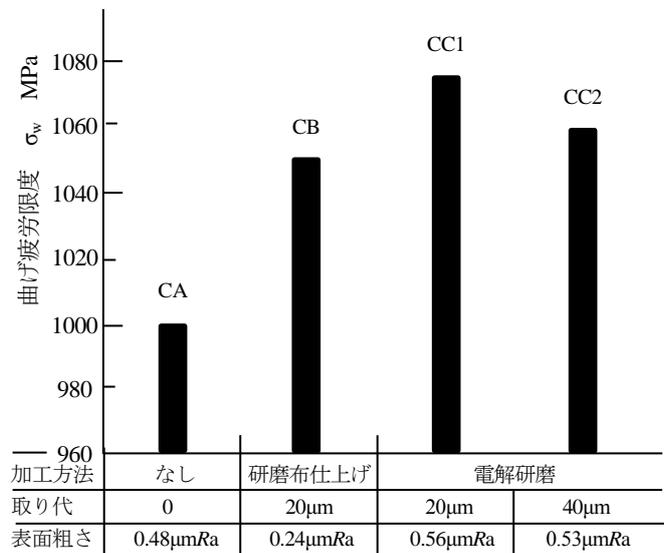


図 4.1-11 曲げ疲労強度に及ぼす表層組織の影響

結果、歯車に鉄鋼 JIS 材を用いる場合において、簡便にその硬さを用いて概算した ISO の各応力値は、該当する ISO の曲げ強さ計算式 (ISO6336-3 (2018) B 法) の利便性に寄与することがわかった。

次に、炭素鋼焼ならしの曲げ疲労強度に及ぼす表面粗さの影響について、実験で検討した結果、同一材料・同一熱処理材でも表面を滑らかにするほど、曲げ疲労限度が向上すること、疲労き裂発生寿命が増加するとともに疲労寿命が増加することなどがわかった。また、合金鋼浸炭焼入れ焼戻しの曲げ疲労強度に及ぼす表層組織の影響について、実験で検討した結果、同一材料・同一熱処理材でも場合によって熱処理後の極表面を除去することで、曲げ疲労限度が向上すること、疲労寿命が増加する傾向などがわかった。

これらの考察・検討が、今後の歯車の設計技術と加工技術の発展に対して何らかの参考になれば幸いである。

終わりに、本件に関する資料をご提供いただいた一般社団法人日本歯車工業会歯車規格委員会と標準化委員会の各位、並びに、実験研究を推進された宮崎大学 鄧 鋼 教授と従事されご協力いただいた宮崎大学教職員・工学部学生・大学院学生にお礼申し上げる。

文献

- (1) 日本歯車工業会歯車規格委員会編, “JGMA401-01 (1974), 平歯車およびはすば歯車の曲げ強さ計算式”, (1974), pp.1-36, 日本歯車工業会.
- (2) 日本歯車工業会歯車規格委員会編, “JGMA6101-01 (1988), —ISO 規格に準拠—平歯車及びはすば歯車の曲げ強さ計算式”, (1988), pp.1-63, 日本歯車工業会.
- (3) 日本歯車工業会歯車規格委員会編, “JGMA 6101-02 (2007), 平歯車及びはすば歯車の曲げ強さ計算式”, (2007), pp.1-20, pp.参 1-4, pp.解 1-32, 日本歯車工業会.
- (4) ISO, “ISO 6336-3 (2018), Calculation of Load Capacity of Spur and Helical Gears — Part3: Calculation of Tooth Bending Strength”, (2018), pp.1-63, ISO. (Third edition, 2019.12 発行).
- (5) たとえば, 鄧 鋼・奈須光太郎・黒岩修平, 中西 勉, “一枚型イオンスパッタ金属膜によるき裂長さの測定, 日本機械学会論文集 (C 編), 第 73 巻, 727 号, (2007), pp.849-854.
- (6) たとえば, 園田 亮, 宝蔵寺隆市, 鄧 鋼, 中西 勉, “曲げ疲労強度に及ぼす表面粗さと浸炭焼入れ異常層の影響” 日本機械学会講演論文集 (九州支部宮崎講演会), No.118-3, (2011), pp.17-18.
- (7) Gang Deng, Syohei Suzuki, Tsutomu Nakanishi, “Effects of Surface Roughness and Abnormal Surface Layer on Fatigue Strength”, *Advances in Power Transmission Science and Technology*, (2011), pp.867-870.
- (8) Gang Deng, Tsutomu Nakanishi, “Effects of Surface Roughness and Non-Martensitic Surface Layer on Fatigue Life” *Journal of JSEM*, Vol.11, Special Issue, (2011), pp.SS251-255.
- (9) 鄧 鋼, 西元祐一, 三谷省平, 中西 勉, “疲労き裂発生寿命に基づく曲げ疲労強度の推定に関する研究” 運動及び動力伝達機構 (Motion and Power Transmission) 2013 シンポジウム <伝動装置> 講演論文集, No.13-17, 2207, (2013), pp.288-292.
- (10) ISO, “ISO 6336-5 (2016), Calculation of Load Capacity of Spur and Helical Gears — Part5: Strength and Quality of Materials”, (2016), pp.1-48, ISO. (Third edition).
- (11) たとえば, 日本材料学会編, “金属材料疲労強度データ集 Vol.1~3 (1996 年版)”, 2000, 日本材料学会.
- (12) 日本材料学会編, “疲労設計便覧, 第 12 章 疲労信頼性設計”, (1995), pp.384-386, 養賢堂.
- (13) 日本機械学会編, “金属材料疲労強度の設計資料 I 一般, 寸法, 切欠効果 (改訂第 2 版)”, (1982), pp.1-196, 日本機械学会.
- (14) 日本工業規格, “JIS B1755 (1999), 平歯車及びはすば歯車負荷容量計算法 —材料の強度及び品質”, (1999), pp.1-36, 日本規格協会 (用いた用語 (日本語) は, ISO6336-5 (1996)⁽¹⁵⁾ を翻訳した本文献を参考とした).
- (15) ISO, “ISO 6336-5 (1996), Calculation of Load Capacity of Spur and Helical Gears — Part5: Strength and Quality of Materials”, (1996), pp.1-35, ISO. (First edition).
- (16) 日本工業規格, “JIS G5501 (1995), ねずみ鋳鉄品”, (1995), pp.1-7, 日本規格協会.
- (17) 日本工業規格, “JIS G5502 (2001), (2007), 球状黒鉛鋳鉄品”, (2001, 2007), pp.1-13, 日本規格協会.
- (18) 日本工業規格, “JIS G5101 (1991), 炭素鋼鋳鋼品”, (1991), pp.1-4, 日本規格協会.
- (19) 日本工業規格, “JIS G4051 (2016), 機械構造用炭素鋼鋼材”, (2016), pp.1-19, 日本規格協会.
- (20) 日本工業規格, “JIS G4053 (2016), 機械構造用合金鋼鋼材”, (2016), pp.1-18, 日本規格協会.
- (21) たとえば, 日本工業規格, “JIS G4051 (2005), 機械構造用炭素鋼鋼材”, (2005), p.33 (解 p.22), 日本規格協会.
- (22) たとえば, 日本工業規格, “JIS G4105 (1979), クロムモリブデン鋼鋼材”, (1979), (1993 鉄鋼ハンドブック p.1331), 日本規格協会.
- (23) 日本工業規格, “JIS R6010 (2000), 研磨布紙用研磨材の粒度”, (2000), pp.1-6, 日本規格協会.
- (24) 日本工業規格, “JIS B0601 (1994), 表面粗さ—定義及び表示”, (1994), pp.1-20, 日本規格協会.
- (25) 日本工業規格, “JIS B0601 (2013), 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”, (2013), pp.1-28, 日本規格協会.
- (26) 村井暢宏, 津村輝隆, 長谷部光弘, “ガス浸炭処理での平衡炭素量に及ぼす合金元素と酸素ポテンシャルの影響”, 鉄と鋼, Vol.81 (1995), No.3, pp.47-52.
- (27) 堀本雅之, 宮西 慶, 藤堂尚二, 志賀 聡・今高秀樹, “トランスミッション用肌焼き鋼の開発”, 日本製鉄技報, 第 412 号 (2019), pp.103-109.