621.833.3.031 : 620.178.162

動力伝達用はすば歯車のピッチングについて*

(第2報, 材質の影響)

金子孝治郎**, 大内田 久**

On the Pitting of Power Transmitting Helical Gears

(2nd Report, The Effect of the Component Materials)

by Kojiro KANEKO and Hisashi ŌUCHIDA

There have already been made many studies on the component materials of power transmitting gears in relation to their pitting effect, and the effects of component on the pitting have been made clear.

However, it seems that there are few examples of comparative studies into details of the fatigue phenomena including crack, work hardening and plastic flow.

In the first report the authors tried the minute examinations of the pittings of large type helical gears made of Cr-Mo steel (SCM-1). In this report, the authors performed the same experiments on the helical gears of carbon steel (S45C) and made clear the differences in each characteristic pitting of both materials.

1. 緒 言

動力伝達用歯車のピッチングについては, すでに多くの先人により種々の面から研究がなされている。すなわち, ピッチングの材質による影響についても, 実際の歯車⁽¹⁾またはローラ形試験片⁽²⁾により実験が行なわれ, だいぶ明らかになってきている。しかし, それらは材質の差異のピッチング耐久強さあるいはピッチング形状への影響などの検討が主であって, き裂, 加工硬化および塑性流れなどを含めた歯面疲れに関する細部の点までの比較検討例は, ほとんどないように思われる。

筆者らは, さきに動力循環式歯車試験機により, クロムモリブデン鋼 (SCM-1) 製大形はすば歯車について負荷運転実験を行ない, 同歯車のピッチングに関してかなり詳細な検討を試みた⁽³⁾。本報告では, 炭素鋼 (S45C) 製歯車についても同実験を実施し, それら両材質歯車のピッチングについて比較検討を行なった結果, その特性上かなりの差異のあることを明確にすることができたのでここに報告する。

すなわち, 本報告では上述の2材質歯車のものの比較を主としているため, 必要に応じてさきの報告⁽³⁾の一部を再掲した。

* 昭和39年4月2日 第41期通常総会講演会において講演, 原稿受付 昭和39年6月4日。

** 正員, 日立製作所日立研究所 (日立市助川町1405)。

2. 試験機および試験歯車

2.1 試験機 試験機の詳細はすでに述べてある⁽³⁾ので, 第1表にそのおもな仕様のみを示す。

2.2 試験歯車 試験歯車の諸元を第2表に示す。試験歯車は, ねじれの向きを除いては, すべて同一諸元であり, 駆動歯車に右ねじれ, 被動歯車に左ねじれ歯車を使用している。すなわち, さきの報告のもの⁽³⁾と同一諸元であり, 歯先修整やかみあい状態などにつ

第1表 試験機の仕様

形 式		動力循環式
駆動用電動機		50 IP 極数変換式三相誘導電動機
最大負荷トルク kg m		700 (運転中の負荷の変動可能)
最高回転数 rpm	ギヤ軸	1800
	ビニオン軸	3000
最大循環動力 IP		500
ギヤ, ビニオン軸 中心移動範囲 mm		400~700
試験歯車の最大歯幅 mm		400

第2表 試験歯車諸元

歯 形	インボリュート並歯
歯 数	25
歯 直 角 モ ジ ュ ー ル	16
歯 直 角 圧 力 角	20°
ピ ッ チ 円 節 ね じ れ 角	15°
ピ ッ チ 円 直 径 mm	414.111
歯 先 円 直 径 mm	446.111
歯 幅 mm	45

いてはすでに詳述してあるので省略する。

試験歯車は、駆動被動両歯車とも同材料であるが、その化学成分および熱処理履歴を第 3 表に、機械的性質を第 4 表に示す。なお比較の便宜上、さきの SCM-1 歯車のもの⁽³⁾も併記した。第 1 図に S45C 材の顕微鏡写真を示す。

S45C 試験歯車は全部で 3 組であり、SCM-1 歯車の場合⁽³⁾と同様にホブ切のままのものである。

第 2 図に、それら作用歯面における単一ピッチ誤差例を示すが、SCM-1 のもの⁽³⁾とほぼ同程度の値である。

3. 実験条件

実験条件を第 5 表に示す。同表に接線荷重のほかに軸直角または歯直角各断面上ピッチ点における最大接触応力を示してあるが、それらの計算は次式による。

$$\sigma_s = 0.418 \sqrt{\frac{P_u E}{B \rho_{rs} \cos \alpha_s}} \dots\dots\dots (1)$$

$$\sigma_n = 0.418 \sqrt{\frac{P_u E}{B \rho_{rs} \cos \alpha_n \cos \beta_0 \sec^3 \beta_g}} \dots\dots\dots (2)$$

第 3 表 試験材料の化学成分および熱処理履歴

歯車種類	化 学 成 分								熱 処 理 履 歴
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	
S45C 歯車	0.42	0.34	0.65	0.016	0.005	0.13	0.09	0.02	850°C×4h o.q., 600°C×8h a.c
SCM-1 歯車	0.33	0.31	0.55	0.013	0.003	0.10	1.31	0.26	850°C×4h o.q., 650°C×8h a.c

第 4 表 試験材料の機械的性質

歯車種類	機械的性質 kg/mm ² , %, kg m/cm ²				
	σ_s	σ_B	φ	ψ	シャルピー衝撃値
S45C 歯車	46.8	70.5	29.0	59.6	8.6
SCM-1 歯車	65.3	78.9	18.5	42.8	13.4

×200

第 1 図 供試材の顕微鏡写真 (炭素鋼)

ここに

- σ_s : 軸 直角断面上ピッチ点における最大接触
- σ_n : 歯 応力 kg/mm²
- ρ_{rs} : 軸直角断面上ピッチ点における相対曲率半径 mm
- α_n : 歯直角圧力角 °
- α_s : 正面圧力角 °
- β_0 : ピッチ円筒ねじれ角 °
- β_g : 基礎円筒ねじれ角 °
- B : 軸方向歯幅 mm
- E : 縦弾性係数 2.1×10^4 kg/mm²
- P_u : 接線荷重 kg

なお、潤滑油はかみあっている歯面の上部から噴射した。すなわち、本実験は高粘度の潤滑油を使用した比較的低速負荷運転時のものである。

4. 実験結果

4.1 ピッチング形状および発生状態 第 3 図に S45C 歯車 (以後 S45C と略称) の場合のピッチング

第 5 表 実験条件

実験番号		1	2	3	4
接線荷重 kg/cm	S45C 歯車	/	456	393	335
	SCM-1 歯車	521	456	/	335
ピッチ点における静的最大接触応力 kg/mm ²	軸直角断面上	75	70	65	60
	歯 "	72.5	67.9	63.1	58.2
回 転 数 rpm		600			
ピ ッ チ 円 周 速 m/s		13			
潤滑油	種 類	E.P. スワコール油 (丸善石油製)			
	粘 度 kg s/cm ²	$(2.38 \sim 2.50) \times 10^{-6}$			
	油量 cc (1cm 幅 1min あたり)	500

第 2 図 単一法線ピッチ誤差

形状および発生分布状態を示す。比較のため SCM 1 歯車（以後 SCM 1 と略称）の場合⁽³⁾も載せた。

すなわち, S 45 C では貝がら状あるいは扇形状のはっきりした形のかなり大きいピッチングが個々に発生する傾向がみられる。その扇形の頂角は 90° 程度のもが多く、橋本の報告⁽⁴⁾にみられるように、その先端は乳頭状をなすものがあり、その形状は歯車の軸直角

な断面に平行な直線にほぼ対称であった。しかし、接線荷重 456 kg/cm の場合では 3 mm 程度の大きさのピッチングが多くみられ、さらに負荷繰返しを継続した場合、個々のピッチングが拡大し続けるということではなく、他の箇所に発生したものとつながり合ってピッチング部分の面積の増加する傾向がみられる。一方 SCM-1 の場合は、細かいピッチングがほぼ一様な分

接線荷重 456 kg/cm , 繰返し数 4×10^6 回

接線荷重 456 kg/cm , 繰返し数 10^7 回

接線荷重 335 kg/cm , 繰返し数 1.5×10^7 回

(a) S 45 C 駆動歯車歯面

接線荷重 335 kg/cm , 繰返し数 1.5×10^7 回

(b) SCM-1 駆動歯車歯面

第 3 図 ピッチングの形状および発生分布 $(\times 2 \times \frac{3}{4})$

← 歯 先 方 向

歯 元 方 向 →

ピッチ点から歯先方向 1 mm ($\times 75$)

(a) 駆動歯車歯面

ピッチ点から歯元方向 4.1 mm ($\times 37.5$)

ピッチ点から歯先方向 4.5 mm ($\times 75$)

(b) 被動歯車歯面

ピッチ点から歯元方向 5.8 mm ($\times 37.5$)

第 4 図 S 45 C 歯車のき裂測定例 (接線荷重 456 kg/cm , 繰返し数 4×10^6 回)

布で密集し、両者のピッチング形状およびその発生分布にかなりの差異がある。

また、比較的低負荷である接線荷重 335 kg/cm の場合では、繰返し数 1.5×10^7 回でも S45C ではほとんどピッチングがみられず、かみあい前の歯面あらさがとれてなめらかな面を示すのに対し、SCM-1 では

少ないながら細かいピッチングが発生している。しかし、ピッチングは両材質歯車とも駆動歯車の歯元の面で多くみられた。

4・2 き裂 第 4 図に S45C におけるき裂測定例を示す。き裂の向きは、SCM-1 のとき⁽³⁾と同様に歯末と歯元の各面では異なり、駆動被動の歯車では逆の

関係にあった。しかし、SCM-1 に比べて枝わかれしている形のものが多くみられた。第 5 図はかなり高倍率にしたき裂末端部付近の形状を示すが、SCM-1 ではほぼ一様な幅の細い一筋のものであるのに対し、S45C では多方向に無規則に枝わかれしており、き裂形状についてもかなりの違いのあることが明らかである。

4・3 かたさ分布 S45C における接線荷重 456 kg/cm、 4×10^6 回繰返し後の 1 組を歯直角方向に切断して測定した表面付近のかたさ分布状態を第 6 図に示す。測定荷重は 100 g である。実験前のかたさは背面側のかたさから約 $H_V 225$ と推定できた。したがって加工硬化の最大値は $H_V 35$ 程度であり、その位置は表面から面心部に約 0.15 mm 離れた位置となっている。またそのかたさ分布の歯面上の位置による差異は特にみられないが、一歯かみあい領域であるピッチ点付近でわずかに大きい傾向にある。

一方、第 7 図に上述と同接線荷重 (ただし、負荷繰返し数 10^7 回後) における SCM-1 の測定結果

第 6 図 実験後における S45C 歯車歯面のかたさ分布

第 7 図 実験後における SCM-1 歯車歯面のかたさ分布

接線荷重 456 kg/cm, 繰返し数 4×10^6 回
S45C 歯車

接線荷重 521 kg/cm, 繰返し数 2×10^6 回
SCM-1 歯車

第 5 図 き裂特性の差異

を示すが、加工硬化の最大となる位置は上述の S45C のものとほぼ同位置であり、また、加工硬化の最大値も $H_v 34$ 程度で両者のあいだにほとんど差異が認められない。

4.4 塑性流れ 第8図に塑性流れの測定例を示す。S45C および SCM-1 とともに接線荷重 456 kg/cm のものである。ともに歯末および歯元の各面で流れの向きを異にしているが、それら両歯車の塑性流れの深さはほぼ同じ値の約 80μ である。

5. 考 察

5.1 ピッチング面積率 前述のように、S45C および SCM-1 とともにピッチングは駆動歯車の歯元の面において多く発生したが、その部分の各負荷における繰返し数とピッチング面積率との関係を求めると第9図のようになる。ただし、ここで述べるピッチング面積率とは、ピッチ線から半径方向歯元側 9 mm までの作用歯面全面に対するピッチング部分がしめる面積の割合のことであり、歯数 25 のうち約 120° 位相を異にする3歯のものの平均値をもって示している。

いま、それら両材質歯車に共通の実験条件、すなわ

ち接線荷重 456 kg/cm および 335 kg/cm の各場合について比較検討してみる。接線荷重 456 kg/cm のときの繰返し数の初期では、ピッチングは S45C の場合ほとんど発生していないが、SCM-1 では少ないながらもみられ、ピッチング面積率は SCM-1 のほうが大きい。

第9図 ピッチング面積率

しかし、その後の負荷繰返し数に対するピッチング面積率の増加度は、SCM-1 では比較的鈍いのに対し、S45C ではピッチングが発生し始めると急増する傾向をもつ。一方、接線荷重 335 kg/cm では、繰返し数 1.5×10^7 回において、SCM-1 では 4% 程度のピッチング面積率を示すのに対し、S45C では前述のようにほとんどピッチングが発生していない。

上述のように、S45C の場合ピッチングが発生し出すとその面積率の急増しやすいのは、後述するようにき裂が一般に深い傾向にあること、またき裂伝ば速度が大きいために、き裂が、はく離まで進行しやすいなどの理由をあげることができる。すなわち、S45C のピッチングの進行度は SCM-1 のものに比べて負荷の変化に対して鋭敏な反応を示すことがわかる。

5.2 き裂特性と歯面上の発生位置との関係 第 4 図に、S45C におけるき裂測定例を述べたが、さらに測定点を増してき裂深さと歯面上の発生位置との関係を図示すると、第 10 図のようになる。同図は、接

線荷重 456 kg/cm、負荷繰返し数 4×10^6 回後（ピッチング面積率 16.4%）の歯面について、駆動被動の各場合とも歯直角断面数約 15 のものの測定結果を集めたものである。すなわち、ピッチ点から歯先および歯元にそれぞれ半径方向 9 mm の範囲のものを測定の対象にしており、黒丸はき裂がはく離まで進行したもの、白丸はき裂のままで停滞しているものを示している。なお、き裂深さ 10μ 以下のものは歯面あらさと間違っていて混同する危険性があるため省略している。

き裂深さと歯面上の発生位置とのあいだに特に一義的な関係はないが、歯元の面のき裂が一般に深い傾向にある。歯末の面では、駆動歯車に大きなき裂はほとんどないが、被動歯車では少数ながら発生している。き裂深さは、かなり深いものがあり、最大のものは駆動歯車で 1230μ 、被動歯車で 750μ であった。また本試験歯車における摩擦係数を零とした場合の最大せん断応力の発生位置は、表面から面心部に約 360μ の位置であるから、大部分のき裂はその深さよりも浅いということができる。

さらに SCM-1 についても同じ検討を行なった⁽³⁾がそれは接線荷重 521 kg/cm で上述よりも 65 kg/cm ほど高い場合であった。しかし、き裂深さのほとんどでは 300μ 以下であり、S45C のときのように深いき裂は見当らなかった。このように S45C のき裂の深い傾向にあるのは、さきの第 5 図のようにき裂の伝ばしやすいことも原因していると思われる。

また、はく離まで進行していないき裂の、はく離まで進行したものを含めた全体の数に対する比率は、第 6 表に示すように S45C の場合駆動歯車歯末の面では零すなわち全部はく離しており、歯元の面では 11% 程度になっている。一方被動歯車では歯末および歯元の各面ともほぼ同比率で 21% 前後の値を示す。

さらに、上述の場合と接線荷重を異にするが、ピッチング面積率ではあまり違いのない SCM-1（接線荷重 521 kg/cm、ピッチング面積率 18.7%）について同検討を行なった⁽³⁾が、第 6 表から明らかなように、上

第 10 図 き裂発生位置とそれらの深さとの関係

第 6 表 はく離まで進行していないき裂の数、はく離まで進行したものを含めた全体の数に対する比率

歯車種類	駆動被動面の別	比率 %		
		歯末の面	歯元の面	歯面全体
S45C 歯車	駆動面	0	11.1	6.9
	被動面	23.5	20.5	21.4
SCM-1 歯車	駆動面	17.1	14.8	15.8
	被動面	45.0	34.0	37.1

述の比率について両材質歯車間かなりの違いがみられる。すなわち, S45C のほうがき裂のまま停滞し難い傾向にあるが, これは, 後述のように, 両材質のき裂伝ば速度の差異がかなり影響しているように考えられる。また, き裂のままで停滞しているものが, 駆動歯車に比べて被動歯車に多いのは, 両材質歯車とも同じである。

第 11 図は, S45C におけるき裂の歯面上の発生位置と表面となす角(表面となす二角のうちの鋭角)との関係を示すが, 両者のあいだに特に相関が認められず, き裂は表面とほぼ 40° 以内の角度で進行している。これは, SCM-1 の場合⁽³⁾と同傾向にあり材質による差異はあまり認められない。

5.3 加工硬化および塑性流れ 前述のように, 接線荷重 456 kg/cm の場合の最大加工硬化量および塑性流れの深さを検討の結果, S45C と SCM-1 とではともにほとんど差異が認められなかった。S45C は負荷繰返し数 4×10^6 回後(ピッチング面積率 16.4%), 一方 SCM-1 は負荷繰返し数 10^7 回後(ピッチング面積率 12.1%)のものであり, 同一条件での測定結果ではない。しかし, 負荷繰返し数 2×10^6 回で加工硬化がほぼ飽和に達するという, 平野らのローラ形試験片によるところから実験結果⁽⁵⁾から, 両材質歯車の加工硬化の最大値にほとんどの差異のないものとみなしてよ

第 11 図 き裂の発生位置と表面となす角度との関係

いように思われる。このように差異のみられないのは両歯車の運転前のかたさにあまり違いのなかったことも一因していると考えられるが, それらの細部は別に検討したい。

なお, それら両材質歯車の加工硬化最大の位置は, 摩擦係数を零と仮定した場合の最大せん断応力の発生位置よりもともに 60% 表面寄りの位置であった。

5.4 き裂伝ば速度の検討 歯面に発生したき裂は, その内部の潤滑油の衝撃的な強圧化的作用によって進行しやすいことがさきに述べられている⁽⁶⁾。したがって, SCM-1 に比べて S45C のように衝撃値の低い材料のほうのき裂が進行しやすい傾向にあると考えられるが, 回転曲げ試験により両材料のき裂伝ば速度を求めてみた。すなわち, 油圧により強圧化される場合と回転曲げ試験による場合とでは, き裂部の応力状態に多少の差異があるとみられるが, 両材質歯車におけるき裂進行の難易については, 本実験結果より推定できるものと考えられる。すなわち, 試験片は第 12 図に示すような人口き裂をほどこしたものであり, 試験片の採取が実際の歯車からは不可能であったので, 別の同種材料から採取した。それらの材料の化学成分および機械的性質を第 7 表に示す。

測定結果を第 13 図に示す。 $\sigma = 28 \text{ kg/mm}^2$ および 23 kg/mm^2 の各場合について測定しているが, S45C のほうのき裂伝ば速度がかなり大きい傾向にある。したがって, S45C においてピッチングが発生し始めた場合急速に増加しやすいこと, およびき裂のまま停滞しているものの比率の少ないことの理由が上述の実験結果からほぼ明らかである。

第 12 図 試験片の形状および寸法 (単位 mm)

SCM-1, $\sigma = 23 \text{ kg/mm}^2$ の場合は, 繰返し数 10^7 でもき裂発生せず。

第 13 図 き裂伝ば速度の差異