プラスチック歯車の摩耗と損傷に関する研究*

(第1報, 摩耗機構)

庄 司

彰**

Studies on the Wear and Failure of Plastic Gears (1st Report, Wear Mechanism)

by Akira SHOJI

This paper discusses the wear mechanism of power transmission plastic gears when considering their generating heat. The local temperature is calculated on each meshing possession. The tooth profile test for the total number of rotations in this experiment gives the values of the local wear and the volume of wear. The local temperature has an influence on the wear in a high load, and these possessions of wear range from the pitch point to the dedendum. The fact that the local temperature of these meshing possessions is the highest agrees with the calculated value. In a low load, the tooth profile has a little wear in all the meshing possessions. Both the experiment and the theory prove that some experimental conditions for loading, etc., control the influence of generating heat of plastic gears on their wear. This experiment and this theory are able to present some data for designing and using plastic gears.

Key Words: Gear, Plastic Gear, Tooth Profile, Volume of Wear, Generating Heat, Local Temperature

1. 緒 言

プラスチック歯車は金属歯車と比べて多くの長所を持っているため、最近では動力伝達用としても使用されるようになってきた。それに伴ってプラスチック歯車の短所である金属歯車と比べて熱に弱いこと、強度的に劣ることが問題となる。前者については著者らがプラスチック歯車の歯に発生する熱量について報告⁽¹⁾している。また後者については多くの報告⁽²⁾が見られるがこれらの多くは各プラスチック材料についての実験結果であり、プラスチック材料を粘弾性材料として取り扱い考察を加えたものは少ない。そこで本研究はプラスチック歯車の摩耗、損傷についてプラスチック材料を粘弾性材料として扱い実験結果と比較検討した。本論文は第1報としてプラスチック歯車の歯の摩耗について述べたものであり、プラスチック歯車の設計、使用に対する資料を得ることを目的としている。

2. プラスチック歯車の粘弾性的挙動

著者らはプラスチック歯車も粘弾性体として取扱い

うることをプラスチック歯車の歯の温度に関して提言してきた。その結果歯面の摩擦に基づく発熱のほかにプラスチック材料が粘弾性材料であるためのヒステリシス損失に基づく発熱が運転条件によって大きく影響することがわかった。しかしこれらの発熱をも含めてプラスチック歯車の歯の損傷にどのように影響するかについては今まであまり述べられていない。

著者の実験⁽¹⁾によるとプラスチック歯車の歯に法線方向歯面荷重が加わったときのプラスチック歯車の歯の粘弾性的挙動は比較的フォークトの粘弾性模型として扱うことができ、またこのフォークトの模型は単純な型なのでその数値解析が比較的簡単である。プラスチック歯車と鋼歯車のかみあいにおいて、プラスチック歯車の損傷を考えるとプラスチック歯車の温度が問題になることが指摘されている⁽²⁾。前述のようにプラスチック歯車のかみあいにおいて発生する熱量には二つある。一つは歯面の摩擦に基づく摩擦熱量であり次式で表される⁽³⁾。

$$H_F = \mu \beta P_n |V_p - V_s| t \quad \cdots \cdots (1)$$

ここで μ は動摩擦係数, β は荷重分担率, P_n は法線方向歯面荷重, $|V_p - V_s|$ は相対滑り速度, t は時間である。

一方ヒステリシス損失に基づく発熱量は次式で表さ

* 昭和60年10月2日 第63期全国大会講演会において講演, 原稿受付 昭和60年2月25日。

** 正員, 宮城工業高等専門学校 (〒981-12 名取市愛島塩手字野田山48)。

れる⁽³⁾。

$$H_c = \frac{\pi}{2} \eta_D \omega \delta_0^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで η_D はダッシュポット粘性, ω は角速度, δ_0 はたわみ量に関する関数で詳細は別報⁽⁴⁾に述べている。プラスチック歯車の歯の損傷を考えると歯車のどのかみあい位置が損傷を受けるか問題となる。このためには歯車の歯の局所温度を知る必要がある。この局所温度について著者は別報に述べている⁽⁵⁾。

すなわち上昇温度によりプラスチック材料の機械的性質が影響を受けるからである。歯車に使用される代表的な材料, 6-ポリアミド樹脂, MC-ポリアミド樹脂およびポリアセタール樹脂について発熱量の計算および損傷の判断の PV 値や PVT 値の計算に使用される縦弾性係数および粘性係数に対する温度の関係を図 1, 2 に示す。6-ポリアミド樹脂, MC-ポリアミド樹脂は本実験の温度範囲内では影響を受けるがポリアセ

ール樹脂はほとんど影響を受けないことがわかる。すなわちポリアミド系樹脂とポリアセタール樹脂では歯の摩耗および損傷においても異なる挙動を示すことが考えられる。

3. プラスチック歯車の歯の上昇温度の計算

熱的平衡状態におけるプラスチック歯車の歯の上昇温度を知るためには発散熱量を知る必要がある。この発散熱量 H_E は次式で与えられる。

$$H_E = \alpha_w A (T_p - T_r) \frac{60}{n_p} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで α_w は回転している歯車歯面から大気への平均熱伝達率, A は一つの歯の表面積, $(T_p - T_r)$ はプラスチック歯車の歯の平衡温度と室温との差, n_p はプラスチック歯車の毎分回転速度である。平均熱伝達率 α_w については著者らの実験式⁽¹⁾を使用した。よって平衡状態における平衡温度 T_p は次式で表される。

$$T_p = T_r + \frac{F n_p (H_F + H_c)}{60 A \alpha_w} \quad \dots\dots\dots (4)$$

局所温度の計算で発生する熱量の一つの単位としてヘルツの接触幅での上昇温度を求め作用線上でかみあい領域について求めることができる。

4. 実験方法および実験条件

実験は動力吸収式歯車運転装置⁽¹⁾⁽³⁾で行い, 歯車はインボリュート平歯車である。実験で使用した歯車の諸元を表 1 に, 実験条件を表 2 に示す。回転速度はプラスチック歯車が一般に使用される 400~1000 rpm の範囲とし, またヒステリシス損失に基づく発熱が使用するプラスチック材によって影響されと思われる回転速度および影響を受けにくいと考えられる回転速

図 1 プラスチック材の縦弾性係数
(ひずみ速度 5 mm/min)

図 2 プラスチック材の粘性係数

表 1 試験歯車諸元

Module	6
Number of teeth	26 / 21
Pressure angle	20°
Materials	6-Polyamid Polyacetal
Test gears (Gear accuracy)	Plastic gear (Hobbing JIS 4~5) Steel pinion (Grinding JIS 0)

表 2 実験条件

Items	Conditions	
Rotational speed rpm	400	920
Load N/mm	24.5	14.7
	34.3	34.3
Method of lubrication	Dry	

度とした。また荷重は動力伝達用歯車として使用される値であり、特に 920 rpm, 34.3 N/mm はほぼ限界荷重と考えられる。実験は 400 rpm の場合は 10 時間運転ごとに、920 rpm は 5 時間運転ごとに歯形解析を行った。この歯形解析に使用した試験機⁽⁵⁾は著者が試作したインボリュート歯形を直角座標 (X, Y 座標) 表示しパソコンで処理するものである。この解析によりかみあい領域内の歯形の摩耗状態を見ることが出来る。実験に使用したプラスチック材料は歯車材として一般によく使用されているものの内、2 章で述べた理由により 6-ポリアミド樹脂とポリアセタール樹脂を選んだ。

5. 実験結果および考察

図 3, 4 に 6-ポリアミド樹脂およびポリアセタール樹脂歯車の各種運転条件における歯形試験の結果の一例を示す。図中 a, b, c, d, p の記号はそれぞれかみあい始め, かみあい終り, 1 歯かみあい始め, 1 歯かみあい終り, ピッチ点を示す。また ADD., DED. はそれぞれ歯末側, 歯元側を示し、図中の数字 1~10 は 400 rpm の場合は運転開始後 10 時間ごと 920 rpm の場合は 5 時間ごとの結果であり総回転数では両回転速度ともほぼ対応する。すなわち 400 rpm の場合は 100 時間運転 (2.4×10^6) 後まで、920 rpm は 50 時間運転 (2.76×10^6) 後までの結果を示したものである。

回転速度 400 rpm, 荷重 34.3 N/mm と回転速度 920 rpm, 荷重 14.7 N/mm は同一動力であるが小荷

重の方は両プラスチック歯車ともかみあい始めからかみあい終わりまでほとんど摩耗していない。一方、荷重 34.3 N/mm になると 6-ポリアミド樹脂歯車とポリアセタール樹脂歯車では摩耗を異にする。前者は 400 rpm の場合ピッチ点から歯元にかけて大きな摩耗を示し、歯末はあまり摩耗しない。しかし 920 rpm の場合は歯末も摩耗している。また 400 rpm の場合は 70 時間でピッチ点にクラックが入り 100 時間でピッチ点付近で折損した。ポリアセタール樹脂歯車は 400 rpm, 920 rpm ともピッチ点から歯元部および歯末部で大きな摩耗を示した。しかし折損はしないが 920 rpm の場合は 55 時間でクラックが入ったが摩耗の進行がクラックの成長より速く 90 時間でクラックの部分は摩耗してなくなった。

6-ポリアミド樹脂歯車については次の原因が考えられる。プラスチック歯車の局所温度を著者の理論式⁽³⁾で求めてみる。一例として 920 rpm で 34.3 N/mm と 14.7 N/mm の場合を図 5 に示す。図において D, p, A は歯元, ピッチ点, 歯末を示す。低荷重の場合は歯面上も歯面から 0.5 mm 歯幅方向の位置ともかみあい始めからかみあい終わりまでほとんど同一温度で温度上昇も少ない。一方高荷重の場合はピッチ点から歯元部および歯末部で高温になっており、摩耗位置と傾向が似ている。高荷重になると相手鋼歯車の歯末のかどによる当たりとプラスチック材が粘弾性材であるためのヒステリシス損失に基づく発熱の影響でプラスチック材の機械的性質が劣化したものと思われる。

図 3 6-ポリアミド樹脂歯車の歯形試験結果

図 4 ポリアセタール樹脂歯車の歯形試験結果

図5 6-ポリアミド樹脂歯車の局所温度計算値

以上のことはポリアセタール樹脂歯車についても言えるが局所温度の計算結果は歯末部において1歯かみあい領域と同じくらい高温になること、歯面上と歯面から0.5mmの位置とではかなりの温度差が見られることなどから摩耗に影響したことも考えられるが比較的機械的性質が温度に影響されにくいことを考えると6-ポリアミド樹脂歯車に比べるとたわみ量が少なく高荷重による鋼歯車の当たりによるものと考えられる。

次に摩耗量を表すものとして歯形試験の結果から摩耗体積 V_t を次式の定義に基づいて求めた。

$$V_t = \left\{ \int_0^l f_t(x) dx - \int_0^l f_0(x) dx \right\} F \quad \dots\dots (5)$$

ここで $f(x)$ は歯形曲線, l はかみあい長さ, 添字の $t, 0$ は運転開始後 t 時間, 運転開始前, F は歯幅で結果を図6, 7に示す。両歯車とも高荷重, 高速回転では初期摩耗が激しい。6-ポリアミド樹脂歯車は 2×10^6 回転付近で減少しているのは温度上昇による歯の膨張の影響である。また金属の摩耗体積が 10^{-6} m^3 を一つの目安としていることを考えるとかなり大きな摩耗量で運転条件が大きく影響する。

6. 結 言

動力伝達用プラスチック歯車の摩耗機構について次のことが解明された。

(1) プラスチック材料は粘弾性材料であり, 運転条件によってはヒステリシス損失に基づく発熱の影響で機械的性質の劣化から摩耗を考えることができた。

図6 総回転数に対する摩耗体積(1)

図7 総回転数に対する摩耗体積(2)

(2) 歯車材料としてよく使用される6-ポリアミド樹脂歯車, ポリアセタール樹脂歯車で実験を行ったが高荷重になると両者はその摩耗機構を異にし, 特に前者は歯の膨張現象も見られた。しかし低荷重においてはかみあい領域で一様な微小摩耗である。

(3) プラスチック歯車の局所温度からある程度局部的な摩耗か全体的な摩耗が予測できる。

以上の結果からプラスチック歯車の設計, 使用に対する資料を得ることができた。

文 献

- (1) Takanashi・Shoji, Proc. ASME Present Century 2 Int. Power Transm. Gear. Conf., 80-C-2/DET-107 (1980), 1.
- (2) 例えば, 塚本, 機論, 50-459, C (昭59), 2165.
- (3) 庄司, 機論, 51-463, C (昭60), 597.
- (4) 庄司, 機論, No. 841-2 (昭59-6), 53.
- (5) 庄司, 設計製図講義, No. 2 (昭59), 41.