プラスチックウォームギヤの開発に関する研究*

(第1報, 繊維および固体潤滑剤を充てんしたプラスチックウォームギヤ)

塚本 尚久^{*1}, 丸山 広樹^{*1}

A Study for Development of Plastic Worm Gears

(1st Report, Plastic Worm Gears Filled with Fiber and Solid Lubricant)

Naohisa TSUKAMOTO and Hiroki MARUYAMA

Worm gears, which undergo a great deal of slipping, produce a large amount of heat and suffer from a high degree of wear, being low in resistance to heat and wear. However, plastic worm gears are currently demanded for use in food processing equipment which should be free of oil getting into products. In the hope of developing practical worm gears from composite plastic material filled with fiber and solid lubricants, worm gears made of such plastics are produced and tests are carried out to determine degree of wear, coefficient of friction, surface roughness and changes in temperature.

Key Words: Machine Element, Tribology, Wear, Coefficient of Friction, Surface Roughness, Worm Gear, Plastic Worm Gear, Nylon Worm Gear, Fiber-Filling Worm Gear, Lubricant-Filling Worm Gear.

1. 緒 言

ウォームギヤは歯形方向のみならず歯すじ方向にも大きな滑りが生じるため歯面での発熱が大きく、平歯車などに比べ歯の温度が極めて高くなり、また歯の摩擦も著しくなる。そのため耐熱性や耐摩耗性の面で問題のあるプラスチック材をウォームギヤに使用した例は少なく、特に無潤滑で動力を伝達するウォームギヤに至っては一般のエンジニアリングプラスチックは使用不可能とされてきた。しかしながら油類の混入が許されない、また耐食性を必要とする食品関係の機械などに組み込まれるようなウォームギヤにはプラスチックを適用することが望まれている。

本研究は上記のような背景のもとに行うものであるが、研究の手順として最初にウォームギヤに適用可能なプラスチックを見いだす意味で、本報ではプラスチックの母材にガラス繊維やカーボン繊維あるいは固体潤滑剤を充てんしたものを無潤滑で運転し、それらの摩擦、摩擦係数、表面粗さ、表面温度を調べた。プラスチックウォームギヤの実用化をはかるためには材料以

外にプラスチックウォームギヤに適する歯形や形状および寸法などの問題もあるが、これらについては後報において詳しく検討する。

2. 実験装置および実験条件

2・1 試験大円板および小円筒 本実験ではウォームギヤの運転特性に対する組立精度の影響をなくすことや実験の能率を上げることなどからウォームの歯形を直線と考えて大円板におきかえ、またホイールの歯形を一定の曲率をもった小円筒におきかえて大円板と小円筒の接触で実験を行った。図1に大円板および小円筒の形状と主要部の寸法を示す。実験では小円筒の幅を5mmにし、これが接する大円板の接触回転円の直径を115mmにしている。大円板と小円筒の接触線の傾き θ は任意にかえられるが本実験においては $\theta \approx 4.2^\circ$ である。この大円板と小円筒の接触状態と実験機のウォームギヤの接触状態の対応についてはすでに上野らの報告がある⁽¹⁾。なお実験では大円板には鋼、小円筒にはプラスチックを用いた。

2・2 試験機 図2は大円板と小円筒の接触でウォームギヤの実験を行ったときに用いた試験機の概略図である。動力は①電動機から一方はVベルトを介して供給し、④傘歯車装置で向きをかえて⑧大円板に伝

* 平成2年3月10日 東北支部第25期総会講演会において講演。原稿受付 平成元年7月26日。

^{*1} 正員、千葉工業大学 (〒275 習志野市津田沼2-17-1)。

わり、他の一方は⑨タイミングベルトによって⑫小円筒に伝わり、大円板と小円筒の接触面には滑りが生じる。荷重はコンプレッサで⑮シリンダを作動し、これで⑦負荷軸装置内の軸を押し出して大円板を小円筒に圧接させて与える。⑥、⑪のトルクピックアップは大円板側および小円筒側の軸トルクを測定するためのもので、この両トルクと大円板の押付け力から摩擦係数が算出できる。

2.3 小円筒および大円板の材料 小円筒には熱硬化性樹脂のポリアミノビスマレイミド(PABM)を母材とし、これに直径7 μ m、長さ25.4 mmのカーボン繊維を重量比で60%充てんしたもの(以下CF60と略称する)、同じくPABM母材に直径5~6 μ m、長さ3 mmのガラス繊維を10%と直径約50 μ mのガラス球を60%充てんしたもの(GF10)⁽²⁾、MCナイロンおよびMCナイロンに合成ワックスを充てんしたもの

の(PEナイロン)⁽³⁾の4種類のプラスチックを用いた。それぞれのプラスチックの主な特性を表1に示す。

大円板には炭素鋼(JISのS45C、硬さ $H_B=210$)を用いている。

2.4 実験条件 実験は大円板の回転数750 rpm、小円筒の回転数265 rpm(接触面での平均滑り速度は4.55 m/s)のもとで表2に示すように押付け荷重を6種類かえて行った。なお、実験はすべて無潤滑で行っている。

3. 実験結果および考察

3.1 表面粗さ 図3は運転経時に伴う各プラスチックの表面粗さの変化の一例として荷重39.2 N(4 kgf)の場合を示したものである。各プラスチック小円筒は旋削加工であるが、図3のようにそれぞれの表面の仕上りにかなり差がある。CF60は軟らかい母材のPABM樹脂と硬い充てん材のカーボン繊維を同時に切削してしまうことや、切削の際に結合していた繊維と母材の樹脂が微小ながらはがれることなどから切削面は滑らかにならず、 R_z (JIS B0601十点平均粗さ)で18~20 μ m程度に仕上がる。GF10の切削においてもCF60の切削と同じようなことがいえるが、この場合その表面は $R_z=9\sim10\mu$ m程度に仕上がる。

図3のようにCF60では総回転数(積算回転数) $N_T=5\times10^4$ までに表面突起の平滑化により粗さは急速に減少し $R_z\approx7\mu$ mになり以後ほとんど変化しない。

図1 試験大円板および小円筒の形状と寸法

- ① Motor, ② V-belt, ③ Coupling, ④ Bevel gears, ⑤ Torque limiter, ⑥, ⑪ Torque pick-up, ⑦ Loading unit, ⑧ Test disk, ⑨ Timing belt, ⑩ Bearing, ⑫ Test ring, ⑬ Valve control unit, ⑭ Cock, ⑮ Cylinder, ⑯ Oil tank, ⑰ Torque meter, ⑱ Recorder

図2 試験機および測定系の略図

表1 使用プラスチックの主な特性(23°C)

Items	units	CF60	GF10	MC nylon	PE nylon
Melting point	°C	—	—	208	208
Specific gravity	—	1.54	1.73	1.15~1.17	1.10~1.11
Rockwell hardness	HRM	116	—	21	19
Specific heat	J/(kg·K) (cal/(gf·°C))	—	—	1926 (0.14)	—
Coefficient of linear expansion	1/K	0.15×10^{-5}	2.5×10^{-5}	8×10^{-5}	9×10^{-5}
Tensile strength	MPa (kgf/cm ²)	274.4 (2800)	—	72.52 (740)	53.90 (550)
Compressive strength	MPa (kgf/cm ²)	421.4 (4300)	—	82.32 (840)	68.60 (700)
Bending strength	MPa (kgf/cm ²)	303.8 (3100)	98.0 (1000)	109.76 (1120)	80.36 (820)
Elongation	%	—	—	50	60
Young's modulus	GPa (kgf/mm ²)	24.50 (2500)	13.72 (1400)	2.84 (290)	1.96 (200)

表2 実験条件および実験記号

Load N (kgf)	7.8 (0.8)	19.6 (2.0)	39.2 (4.0)	58.8 (6.0)	78.4 (8.0)	117.6 (12.0)
Materials						
CF60	CF-1	CF-2	CF-3	CF-4	CF-5	CF-6
GF10	GF-1	GF-2	GF-3	—	—	GF-6
MC nylon	—	—	MC-3	—	—	MC-6
PE nylon	—	—	PE-3	—	—	PE-6

GF 10は $N_r=0$ の表面粗さはCF 60より小さいが、長時間運転してもCF 60より表面は滑らかにならず、なじみ後の粗さは $R_z=8\mu\text{m}$ である。MC ナイロンおよびPE ナイロンははいねいに旋削加工すると $R_z=4\sim 5\mu\text{m}$ に仕上がりを、これを運転すると前者では $R_z=1\mu\text{m}$ に、後者では $R_z=3\mu\text{m}$ になる。

図4は相手鋼の表面粗さの変化の一例を示したものである。CF 60との接触では鋼の表面粗さは $N_r=10^4$ で減少しその後はほとんど変化しないが、GF 10の場合では運転経時に伴い粗さは増加する傾向にある。MC ナイロンおよびPE ナイロンとの接触でも若干ではあるが粗さは増加する傾向を示す。

なお、小円筒、大円板の表面粗さの変化傾向は他の実験条件においてもほぼ同様のものであった。

3・2 摩耗 図5は運転経時に伴うプラスチックの摩耗を比較したもので、上図がCF 60、中間がGF 10、下図がMC ナイロンおよびPE ナイロンである。比重の異なる4種類のプラスチックの摩耗を比較するために各図の縦軸の摩耗量は(摩耗重量/比重量)とした体積表示をしている。図5では摩耗の多い順位はGF 10, CF 60, MC ナイロン, PE ナイロンである。特にGF 10の摩耗は著しく、例えば荷重39.2 N(実験記号末尾の3)の $N_r=15\times 10^4$ 時の摩耗で他のプラスチックと比較してみるとCF 60およびMC ナイロン

の約5倍、PE ナイロンの約20倍になっている。このようにGF 10の摩耗が多いのは母材であるPABMそのものの摩耗がMC ナイロンより多いのに加えて充てんしたガラス繊維やガラス球が母材の摩耗とともに脱落し、それが砥粒の役目をなすためと思われる。同じく繊維を充てんしたプラスチックでもCF 60の摩耗は少ない。これは充てんしたカーボン繊維の摩擦特性によるものと思われる。CF 60の摩耗は切削目とれるまでが多く、全体の2/3程度を占めることから加工方法を工夫すればさらに摩耗を減少させることも可能であると思われる。MC ナイロンは摩耗が少ないが高荷重下では熔融してしまう。PE ナイロンは最も摩耗が少なく、本実験条件下では後述する表面温度もあまり高くならず、合成ワックスによる良好な接触状態を維持しているようである。

図6はCF 60およびGF 10と接触した鋼円板の接触面の摩耗深さを測定した結果を示したものである。

図3 プラスチックの表面粗さの変化の一例

図4 鋼の表面粗さの変化の一例

図5 プラスチックの摩耗

GF 10 と接触する場合は鋼の摩耗も著しく、例えば荷重 39.2 N の場合 $N_T=15 \times 10^4$ 時で CF 60 と接触するときの約 6 倍となっている。なお MC ナイロンおよび PE ナイロンとの接触の場合にはほとんど摩耗せず測定できる値ではなかった。

3.3 表面温度 図 7 はプラスチックおよび鋼の表面温度を示したものである。図 7 中の下限の温度は実験中の室温の平均的な値を表し、上限の温度はプラスチックおよび鋼表面の平衡温度である(ただし、GF-6 および MC-6 は平衡温度が得られなかったので破損時の表面温度を示す)。運転前の表面温度は室温にほぼ等しいことから上限下限の温度差が表面の上昇温度を表す。図 7 より同一の実験条件で比較するとプラスチックの上昇温度の高い順は GF 10, CF 60, MC ナイ

ロン, PE ナイロンである。本実験では平衡温度を得られなかったものを除くとプラスチックに比べ鋼のほうが $3 \sim 14^\circ\text{C}$ 程度上昇温度は高くなっている。

3.4 プラスチックの破損 本実験では GF-6 が総回転数 $N_T=9.24 \times 10^4$ で、MC-6 が $N_T=13.8 \times 10^4$ で破損した。それぞれの破損状態を図 8 に示す。GF 10 の破損はガラス球を 60 % も充てんしたことやガラス球と PABM が元来結合しづらいところに図 7 で示したような高い温度上昇により母材と球の熱膨張に大差

図 6 鋼の摩耗

図 7 プラスチックおよび鋼の表面温度

図 8 プラスチックの破損状態

図 9 摩擦係数の変化

が生じ、母材と球のはく離による強度劣化が原因となったと思われる。MC ナイロンの破損は接触面の温度上昇による溶融である。本実験では PE ナイロンは無損傷であったがこの材料も MC ナイロンのように表面温度が 70 °C を超えるような運転条件になれば損傷するものと推察された。

3・5 摩擦係数 図 9 は運転経時に伴う摩擦係数の変化を示したものである。各プラスチックとも荷重の違いによる摩擦係数の差は明りように現れていない。GF 10 では摩擦係数は運転開始から $N_T=5 \times 10^4$ 近傍まで急激に増加し、その後も緩やかながら増え続け $N_T=15 \times 10^4$ では 0.8 程度にもなる(損傷する場合は別)。これに対して他のプラスチックは MC-6 を除けば総回転数とともに増加するようなことはなく、実験条件により若干違いはあるが摩擦係数は CF 60 で 0.25~0.4, MC ナイロンで 0.18~0.22, PE ナイロンで 0.1~0.18 程度である。

4. 結 言

ウォームギヤに適するプラスチック材を見いだす目的で基礎実験を行った結果、各材料について次のよう

なことがわかった。

(1) はん用エンジニアリングプラスチックの MC ナイロンは平歯車の場合動力伝達用に使用できたが、ウォームギヤではわずかの荷重でも溶融する。

(2) PE ナイロンは MC ナイロンより大きな荷重に耐えられるが、表面温度が 70 °C 程度を超える運転条件では破損するように思われる。

(3) GF 10 はその表面が溶融するようなことはないが、温度が高くなると母材と充てんしたガラス繊維や球のはく離して強度が劣化するような現象が生じる。

(4) CF 60 は摩擦係数および上昇温度が MC ナイロンに比べ大きく現れたものの摩耗量は同程度であり、耐熱性は明らかに優位であったことからウォームギヤ材として十分使用に供する材料であると思われる。

文 献

- (1) 上野, 潤滑, 20-4(1975), 237.
- (2) 三井石油化学工業(株), PABM 資料, No5(1982), 3.
- (3) 日本ポリベンコ(株), 技術資料, (1981), 3.