動力伝達用プラスチック歯車に関する研究*

(プラスチック歯車の各種寿命延長法とその効果)

塚本 尚久**, 寺島 健一***

Development of Plastic Gears for Power Transmission (Various Methods of Lengthening the Life of Plastic Gears and Their Effect)

by Naohisa TSUKAMOTO and Kenichi TERASHIMA

The life of plastic gears is shortened when they are used at a high temperature because they become less strong and vary in the way they mesh each other, causing them to be worn away at their root in an abnormal way. It is necessary for lengthening the life of plastic gears to take care not to generate heat in them and to keep them from rising in temperature by radiating heat quickly. The present report treats of various methods designed for lengthening the life of plastic gears having form and dimensions adapted to given operating conditions and inquiries made about whether the use of these methods can lengthening the life of plastic gears to a greater extent than anticipated at the time of designing.

Key Words: Gear, Plastic Gear, Nylon Gear, Tribology, Lubrication, Wear, Life of Gear,

1. 緒 言

プラスチック歯車は低騒音で無潤滑運転ができ、軽く耐食性があり、多量生産向きと多くの長所をもっている。しかし動力伝達用としてこれを無潤滑で使用するには負荷能力が足りない、寿命の予測がむずかしい、熱に弱いなどの欠点がある。

前報⁽¹⁾においては、これまで報告した研究から62の実験例を選び再整理することによって、全く同一寸法のプラスチック歯車を同一条件で運転しても半数近くに損傷がおき、その発生までの総回転数は(2~3)×10⁶から10⁷におよび、残りの半数は10⁷を超しても無損傷であったことを報告した。損傷の92%は歯の折損であり、この主な原因は歯の温度が上昇することによりプラスチックが軟化し曲げ疲れ限度が低下するためであることもわかった。

歯の温度は室温や歯形の摩耗状態で変化し、運転開始直後と平衡状態になったときによっても異なる。プラスチックは30~40°Cの温度上昇で疲れ限度や縦弾性係数が約65%に低下するので、歯の温度が変動す

ると歯への負荷状態や歯の許容曲げ強さも変動して折損が偶発的に発生することになる。したがってプラスチック歯車は温度管理が大切であり、発熱しないように、発生した熱は速やかに放出するようにして、歯の温度上昇を抑制するとともに温度幅を少なくすることが必要である。

本報においては以上の考察に従って、すでに形状・寸法および運転条件が決まっているプラスチック歯車の寿命を安定させるとともに、設計時に予想した以上に寿命をのばす各種方法を工夫し、その効果を実験によって確認した。

実験は歯車対の一方を鋼歯車(S45C)とし、室温をほぼ20°Cに保って行った。プラスチック歯車の材種は既報と同じMCナイロン⁽²⁾である。本文において添字 *p* はプラスチック、*s* は鋼である。

2. 各種寿命延長法とその効果

運転寿命をのばすため歯車の形状・寸法を変えなければならぬような改善を要するものは別報⁽³⁾に含めた。ここでは使用方法を工夫したり、加工を要するにしてもごくわずかな加工で効果があがるものに限った。また将来同じような失敗を繰返さないために誰もが思いつきそうな工夫で成功しなかった例も示す。

* 昭和60年4月1日 第62期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和59年10月26日。

** 正員、千葉工業大学(〒275 習志野市津田沼2-17-1)。

*** 正員、長崎大学工学部(〒852 長崎市文教町1-14)。

2.1 プラスチック歯車を工夫して寿命をのばす方法

2.1.1 冷却法 この方法は発生した熱を歯車の回転を利用して冷却するものである。図1において歯車本体の端面の空気は遠心力により、一部は歯みぞ下部の穴Aに圧入され、歯みぞ底の穴Bを通じて歯面に空気を吹きつけて冷却する。

この遠心ゼット冷却法はプラスチック歯車の寿命をのばすためにきわめて効果があり、プラスチック歯車のピッチ点における曲げ応力⁽¹⁾ $\sigma = 22.4 \text{ MPa}$ [2.3 kgf/mm^2]、回転数 $n_p = 1200 \text{ rpm}$ で運転した場合、何もしない円板状歯車では総回転数 $N_T \approx (2 \sim 3) \times 10^6$ 程度で図1のCに示すようにピッチ点近傍で折損するが、遠心ゼット冷却法では $N_T \geq 10^7$ でも何の損傷も発生しなかった。このほかに歯車軸に取付けたファンによる冷却も寿命をのばす効果がある⁽⁴⁾。

2.1.2 プラスチック歯車の歯形修整 プラスチック歯車の摩耗は急速に著しく摩耗するので少量の歯形修整では効果がないが、次の方法は有効である。

図2(a)はある程度なじんだときのプラスチック歯車の歯面の状態を示したものである。破線のだ円部分は発生した熱が放散しにくくて膨張し、歯の両端面は負荷時に肉が逃げやすいので歯面は中くぼみに摩耗する。また歯元の部分は鋼歯車の歯先かどでえぐられて深く摩耗する。したがって歯面は破線で示したような形でなじむ。

既報⁽⁴⁾で述べたように、このようになじむまでには鋼歯車の歯面で強くこすられて破線のだ円部分が高温になり、プラスチックが軟化し折損の原因になる。そこで歯形をなじんだ形に修正しておけば当初から安定した状態で運転ができるので比較的初期に発生する折損を防止できる。

図2(b)は逆クラウニング(歯幅中央部を凹にしたもの)を与えてなじんだ歯面に似せたものである。こ

図1 遠心ゼット冷却法による延命

のように修整した歯形では、 $\sigma = 22.4 \text{ MPa}$, $n_p = 1200 \text{ rpm}$ で運転した場合 $N_T = 10^7$ の寿命があったが、無修整歯形の場合には $N_T = (2 \sim 3) \times 10^6$ 程度で折損している。なお逆クラウニングを施したプラスチック歯車の強さについては既に報告済みである⁽⁵⁾。

図2(c)は歯元に発生する異常摩耗分を歯元修整によりあらかじめ加工したものである(修整量はいきなり起点で $120 \mu\text{m}$)。これを図2(b)の場合と同条件で運転したら $N_T \approx 8.7 \times 10^6$ までの回転を得た。図2(b), (c)は図2(a)のなじんだ歯面を一度に再現することが困難なので簡易的に修整したものであるが、上記からプラスチック歯車は歯面がなじむまでの間、歯面上の局部に負荷が集中することをさけると運転初期に発生する損傷を防止でき、かなり寿命がのびることがわかった。

荷重を受けてたわんだときのプラスチック歯車の圧力角が鋼歯車の圧力角に等しくなるようにすれば後続歯の歯元の異常摩耗が防止できると考えられるが、これは次に説明するような理由であまり成功しない。

鋼歯車およびプラスチック歯車の圧力角を α_c , α_{cp} とすれば後続歯間のすきま c (図3)は

$$c = \pi m (\cos \alpha_{cp} - \cos \alpha_c) \dots \dots \dots (1)$$

図3中の表に示すように α_{cp} をかえてプラスチック歯車を4種類つくり $\alpha_c = 20^\circ$ の鋼歯車とかみ合わせて $\sigma = 22.4 \text{ MPa}$, $n_p = 1200 \text{ rpm}$ で運転した結果が図3中の表の N_T である。

$\alpha_{cp} = 18^\circ$ の場合は前進歯の作用線方向のたわみがすきま c より小さいため前進歯は終始1対かみあいになり短命に終わったものと判断する。 $\alpha_{cp} = 19.5^\circ$ のものが最も寿命が長く $N_T = 2.9 \times 10^6$ である。このときの c は 0.046 mm であり、前進歯のたわみは

図2 なじんだ歯面に似せた歯形修整

0.05~0.127 mm 程度のものであるから、後続歯の歯元がえぐられる量が少なく、しかも荷重を分担するため、寿命がのびるものと思われる。しかしプラスチック歯車は摩耗しやすいので、その後歯元がえぐられるようになることにはかわりない。この方法による寿命延長はあまり期待できない。

2.2 相手金属歯車に工夫してプラスチック歯車の寿命をのばす方法

2.2.1 相手金属歯車の材質の影響⁽⁶⁾ プラスチック歯車の相手歯車の材種として鋼が用いられることが多いが、鋼は無潤滑運転においてはさびる。したがって防せいや耐食性を必要とする場合には鋼以外の材種を選ぶことがおきてくる。このようなとき、プラスチック歯車が特に嫌う金属の材種があるのか、また金属の材種の違いによって、プラスチック歯車の摩耗がどのように違ってくるのか明らかにしておく必要がある。

$m=3$, $\alpha_c=20^\circ$, Z_s (金属歯車の歯数)=30, $Z_p=60$ (被動側), $b=10$ mm, ホブ切, JIS B 1702 歯車精度 4 級の歯車対において、金属歯車の材質としてねずみ鋳鉄 (FC 20, $H_B=200$), ステンレス鋼 (SUS 304, $H_B=175$), 黄銅 (BsB 2, $H_B=90$), 機械構造用炭素鋼 (S 45 C, $H_B=185$) を選び駆動側金属歯車の回転数を 1500 rpm, σ を 14.1 MPa {1.44 kgf/mm²} として被動ナイロン歯車の摩耗試験を行った。各金属歯車の運転前の歯面あらさは JIS 10 点平均あらさ $R_z=4.5$

~5.5 μ m である。

図 4 および図 5 に運転経時に伴うナイロン歯車の摩耗と金属歯車の歯面あらさの変化を示す。最も摩耗が多いのは BsB 2 との組合せのときである。軟らかい黄銅歯車は相手がプラスチックでも摩耗が多く、この摩耗粉がプラスチック歯面にくい込み、これがと粒となって黄銅歯面を傷つける。荒れた黄銅歯面はまたプラスチック歯面を摩耗させ、黄銅歯面はいつまでもなめらかにならない。

FC 20 は $H_B=200$ と硬いので表面の突起が摩耗しにくい。そのためプラスチックの摩耗が多い。S 45 C の場合も FC 20 に準じた考えをすることができる。最も摩耗が少ない場合は SUS 304 との組合せのときで、ステンレス鋼のように適度の延性と硬さであるとプラスチック歯面の摩耗も少なくなる。

2.2.2 相手鋼歯車の歯面あらさの影響⁽⁷⁾ 歯車はピッチ点以外はすべり接触をするので相手鋼歯車の歯面あらさがプラスチック歯車の摩耗に影響するはずである。このことを確認するために 2.2.1 項の実験と同仕様の歯車対でナイロン歯車を駆動側に使用して摩耗試験を行った。

図 6 はその結果である。ここで、A は図 7 に示すように鋼歯車の歯面を精密研削したものであり、B は普通研削、H・G はホブ切歯面である。プラスチック歯車の摩耗は鋼歯車の歯面あらさが小さいほど少ない。しかし、 $N_T=10^7$ 時の精密研削歯面による摩耗量はホブ

図 3 圧力角の異なる歯車のかみあい

図 4 金属歯車の材質によるプラスチック歯車の摩耗

図 5 金属歯車の歯面あらさ

図 6 鋼歯車の歯面あらさの違いによるプラスチック歯車の摩耗

切歯面による摩耗量の85%程度にすぎない。

2・2・3 鋼歯車の歯形修整による方法 すでに述べている⁽⁷⁾ように鋼歯車とプラスチック歯車のかみあい(プラスチック歯車駆動)では、前進歯のプラスチック歯の大きなたわみによって鋼歯車に回転遅れが生じ、後続歯のプラスチック歯の歯元が相手鋼歯の歯先かどでえぐり取られる現象(歯元の異常摩耗)が起こる。これは前進歯のプラスチック歯のたわみに相当する量だけ鋼歯の最悪荷重点から歯先にかけて歯形を修整すれば防止できる。

図8は同図の下方に示す仕様の歯車対において鋼歯車の歯形を歯先から $u \div 9\text{mm}$ の位置にかけて $40\mu\text{m}$ 修整したものである。図9(a)は図8の下方に示す運転条件で無修整歯形の鋼歯車とかみあったときのプラスチック歯車の摩耗(歯形の記録線図間が摩耗)で、図9(b)は修整歯形の鋼歯車とかみあったときのプラスチック歯車の摩耗である。図9(a)では $N_T = 6 \times 10^6$ 運転時の歯元側の摩耗深さは $160\mu\text{m}$ 程度である。この摩耗深さから歯先部の摩耗深さ $50\mu\text{m}$ を自然摩耗とみなして差引くと $110\mu\text{m}$ となり、1対かみあいの終点(最悪荷重点)に図8の下方に示す法線荷重 $P_n = 220.89\text{N}$ が作用したときの作用線方向の歯のたわみの計算値 $117\mu\text{m}$ にほぼ等しい。すなわちプラスチック歯車の最悪荷重点におけるたわみ量 $117\mu\text{m}$ だけ鋼

歯車の歯形を修整すればプラスチック歯車の歯の摩耗はほぼ均等になるはずである。

図9(b)では摩耗深さ $113\mu\text{m}$ から歯先側の摩耗 $43\mu\text{m}$ を差引くと $70\mu\text{m}$ 程度となり、図9(a)の場合よりほぼ $40\mu\text{m}$ 減少している。これは鋼歯車の歯形修整量 $40\mu\text{m}$ に等しい。このように鋼歯車の歯形を修整すればプラスチック歯車の歯元の異常摩耗が少なくなり寿命はのびる。しかしプラスチック歯車は運転経時に伴って摩耗が進行することと、プラスチック歯車の歯のたわみは温度によって大きく変わるので歯形修整量を一定の値に決められない不便がある。

2・2・4 冷却法 プラスチック歯車の歯面と鋼歯車の歯面とのすべり接触により発生する摩擦熱はプラスチックの熱伝導が悪いのでほとんど鋼歯車側に流れる。したがって、運転中の鋼歯車の歯面温度はプラスチック歯車のそれよりも $5 \sim 10^\circ\text{C}$ ほど高いのが普通である。

鋼歯車の温度を下げると発生熱はさらに鋼歯車側に吸収しやすくなりプラスチック歯車の温度上昇が抑制されて寿命がのびる。

図10はプラスチック歯車に適用して寿命延長に効果があった遠心ゼット冷却法(図1)を鋼歯車側にも応用したものである。歯車の回転が遅いときや冷却不足のときは歯車の端面に羽根付ファンを取りつけて取入口口に空気を強制的に入れるのもよい。図10に示す歯車対の寸法は図1のそれと同じである。これを図1より荷重を増し σ を図1の1.25倍の 28.0MPa (2.9kgf/mm^2) にして $n_p = 1200\text{rpm}$ で運転したが、歯面温度が図1の場合より 4°C 程度低下し、 N_T も 10^7 を超した。

2・3 歯車対としての寿命延長法 いま対象としている歯車は一つがプラスチック歯車で他方が金属歯

図7 相手鋼歯車の歯面あらさ

Specifications

$m=5$, $\alpha_c=20^\circ$, $z_p=17$ (Driver), $z_s=37$,
 $n_p=1500\text{rpm}$, $b=10\text{mm}$,
 $\sigma=20.2\text{MPa}$ (2.1kgf/mm^2)
Normal road $P_n=220.89\text{N}$ (22.54kgf)

図8 鋼歯車の歯形修整とその運転条件

f: Starting point of action
Specifications are shown in Fig.8

図9 鋼歯車の歯形修整の有無によるプラスチック歯車の歯の摩耗

車である。ここでは歯車対としての寿命をのばすことを考える。

2・3・1 大歯車側（低速側）への使用 歯数 Z_1 の小歯車と歯数 Z_2 の大歯車の対において、材料費が高くなることを許すならば大歯車にプラスチック歯車を使うと小歯車に使う場合より単純に考えて歯数比 i ($=Z_2/Z_1$) 倍だけ寿命がのびることが期待できる。

これは歯の負荷回数が大歯車では小歯車より $1/i$ へるからであり、さらに一度かみあって次のかみあいまでの冷却時間が i 倍にのびるので、温度上昇によるプラスチック材の機械的強度の低下を防止することになるからである。

図1に示す歯車仕様において歯数37の低速側をプラスチック歯車とし、何ら寿命延長の工夫をせずに図1に示す条件で運転した結果、鋼歯車の総回転数（駆動側の総回転数）で 7.9×10^6 を得た（この時点でピッチングが大きく成長したので運転を中止した）。

これは駆動側にプラスチック歯車を使用した場合の寿命 $(2 \sim 3) \times 10^6$ を $i = 37/17$ 倍したものより大きい。これは大歯車にプラスチック歯車を用いた効果以外に、次に述べる被動側に用いたための延命効果が追加されたものと思われる。

2・3・2 被動側への使用 プラスチック歯車を被動側に使えば、かみあい始めるときたわみやすいプラスチック歯車の歯先が鋼歯車の歯元に侵入することになるので干渉による衝撃が緩和される。また歯のすべりが歯先側と歯元側からピッチ点の方に向かうので、折損の誘因となるみぞが発生しない。さらにプラスチ

ック歯車の歯元がスクレーパ（鋼歯車の歯先かど）を押すのではなく引いてかけるようになるので歯元の異常摩耗が少ないはずである。

このことを確認するため歯数比が1:1のプラスチック歯車と鋼歯車を駆動側および被動側におのおの使ってみて摩耗状態を比べてみた。図11(a)は被動側に使ったときのプラスチック歯車の摩耗状態で、図11(b)は駆動側に使ったときのものである。両図の比較でわかるように駆動側にプラスチック歯車を使うと歯元の異常摩耗が特に大きく、また図11(c)に示すように歯面温度も数度高い。騒音も被動側にプラスチック歯車を使うと低下することが聴覚でもわかる。このようにプラスチック歯車を被動側を使うことは有利である。

2・3・3 潤滑による寿命延長法 プラスチック歯車は自己潤滑性があることを特色の一つとしているが、もし許されるなら潤滑して使用すると歯面のすべりはさらに円滑となり、発熱が減少し歯車の寿命を確実に2~3倍にのばすきわめて有効な延命法である。

図12(a)は同図中に示す条件で運転したときのプラスチック歯車の摩耗状態である。これは室温20°Cで無潤滑運転したもので歯面温度は最終的には50°Cを若干超え $N_T = 2.8 \times 10^6$ で折損した。このとき歯車の騒音も著しく増大している。

図12(b)は同じ歯車対を歯車箱で囲み、 10^{-3} m³{1L}程度の歯車油（ダフニス-パマルチ68）を箱の底部に入れ、はねかけ給油をしたものである。ここで

図10 ファン付遠心ゼット冷却法

図11 プラスチック歯車を被動側および駆動側に用いた時の歯の摩耗と温度

$m=5$, $\alpha_c=20^\circ$, $z_p=17$ (Driver), $z_s=37$, $b=10\text{mm}$

t:Tip, w:Worst point, p:Pitch point,
i:Inner worst point, f:Starting point
of action

図 12 油潤滑の有無によるプラスチック歯車の摩耗

は寿命がのびることを予測して σ が図 12(a) の場合の 50% 増しになるように負荷を大きくした。

このように油潤滑した場合は負荷を大きくしたにもかかわらず寿命は総回転数で 10^7 を超し、歯面温度も 33°C と低かった。また運転音もかなり低下した。油潤滑した場合の $N_T=10^7$ 時の歯の摩耗は図 12(a) と図 12(b) の比較でもわかるように無潤滑の場合の $N_T=2 \times 10^5$ 時よりも若干少なくなっている。なお無潤滑運転の場合でもプラスチック歯車がなじむまでの間グリースかワセリンを塗布すると無理になじみ具合がよい。無潤滑運転の途中で歯面が荒れた場合でもグリースかワセリンを短時間塗布すると歯面がもとのように滑らかになる。

2.4 各種寿命延長法の併用効果 これまで提案したいいくつかの寿命延長法を併用したとき、例えば A の寿命延長法で何もしないときより 3 倍に寿命がのび、B の延長法で 2 倍、C の延長法で 1.5 倍ののびるものとすれば、これら A, B, C を同時に併用すると、相乗効果があって $3 \times 2 \times 1.5 = 9$ 倍にのびるのか、相加効果があって $3 + 2 + 1.5 = 6.5$ 倍にのびるのかというと、そのような効果は期待できない。

このことについては今後研究を要するが、一応の目安としては 3 倍以上になることは間違いないが、この 3 倍が確実になるという程度に考えてよいだろう。画期的な寿命延長法が見いだされないかぎり、少しでも有効と思われる方法を併用して寿命延長をはかるべきである。

3. 結 言

プラスチック歯車は熱に弱いので発熱しないように、発生した熱は放熱させるように、また発熱の原因となる歯元の異常摩耗の発生を抑制すればよい。本研

究で寿命延長に効果のあった方法を列記すると次のようになる。

(1) 歯底に小穴をあけ、歯車の回転による遠心力で空気を吹出し、歯面を冷却する方法は鋼歯車およびプラスチック歯車の両方に用いて有効である。

(2) プラスチック歯車の歯は歯幅方向では中央部が、歯たけ方向では歯元近傍が摩耗してなじむ。このなじんだ歯面に似せて歯形を修整しておく、運転初期によく発生する歯の折損を防止するのに有効である。

(3) プラスチック歯車の歯の摩耗に相手金属歯車の硬さが影響する。 $H_B=160 \sim 180$ ぐらいのとき摩耗が少ない。

(4) 相手鋼歯車の歯面あらさが小さいほどプラスチック歯車の歯の摩耗は少ないが、研削仕上げして手間をかけたわりには摩耗は減らない。

(5) プラスチック歯車の歯が負荷でたわむ量だけ鋼歯車の歯形を修整するとプラスチック歯車の歯元の異常摩耗は防止できる。

(6) 1 対の歯車においてプラスチック歯車を大歯車に使用すると歯の負荷回数が少なく、冷却期間も増すので経済が許すなら寿命をのばすのに有効な方法である。

(7) 被動側にプラスチック歯車を使うと、駆動側に使う場合よりかみあいが円滑になり、また歯元の異常摩耗も少なくなり寿命がのびる。

(8) もし油潤滑が許されるならば、摩擦熱の発生を軽減し、長寿命になる。プラスチック歯車の歯がなじむ運転初期やプラスチック歯車の歯面が荒れたときにグリースまたはワセリンを少量塗布することは有効的で寿命延長につながる。

(9) 各種の寿命延長法を併用しても相乗効果や相加効果は期待できない。しかし少しでも有効な方法を併用することで延命措置の効果の信頼性が増す。

終わりに本研究において長崎大学 西田助教授、日本ポリベンコ(株)の協力を得たことを記し、感謝します。

文 献

- (1) 寺島・塚本・西田, 機械前刷 (昭 60-4), No. 84-0454 B.
- (2) 寺島・塚本・石, 機論, 50-449, C (昭 59), 204.
- (3) 寺島・塚本・西田, 機械前刷 (昭 60-4), No. 84-0456 B.
- (4) 寺島・塚本・西田・石, 機講論, No. 830-8 (昭 58), 124.
- (5) 塚本, 機論, 45-391, C (昭 54), 382.
- (6) 塚本, 機講論, No. 820-10 (昭 57), 144.
- (7) 塚本, 機論, 49-447, C (昭 58), 2048.