液 晶 ポ リ マ 歯 車 の 研 究*

塚本 尚久^{*1}, 丸山 広樹^{*1}, 松本 透^{*2}

Study on Liquid Crystal-Polymer Gears

Naohisa TSUKAMOTO, Hiroki MARUYAMA and Toru MATSUMOTO

Attention has been paid to liquid-crystal polymers (hereinafter called LCP) as plastics of the next generation since these have features of high rigidity and small thermal expansion coefficient in addition to excellent heat resistance. Accordingly, in industry, application of LCP to gear materials has been attempted, but at present, data for investigation of its suitability are insufficient. From this fact, in this study, LCP gears were made by injection molding, and by performing experiments on them, gear life, tooth wear and change in tooth profile accompanying wear were examined and compared with those of polyacetal gears, for which there are actual results. In this way, the industrial applicability of LCP gears was confirmed.

Key Words: Machine Element, Tribology, Gear, Plastic Gear, Liquid-Crystal Polymer Gear, Life, Wear

1. 結 言

最近, プラスチックは金属の代替から高機能化や高付加価値化を目的とした使用へと用途を移行拡大し、それに伴って強度、剛性、耐熱性などの要求性能も厳しいものになってきている。

このような状況下で今日、次世代のプラスチックとして注目されているのが高分子液晶ポリマ(以下 LCP と呼ぶ)である。このプラスチックは他のエンジニアリングプラスチックと比較して高強度であることのほかに、特に耐熱性が優れ、剛性が高く、熱膨張率が小さい(アルミニウムと同程度)のが特長である。よってこれはプラスチックにとって過酷な用途である歯車にも適した材料と考えた。しかし、LCP については材料メーカーによってその特長の概要が示されてはいるものの、歯車材料として適用を検討できるほどの特性を明らかにした報告がまだ見られない。したがって LCP で歯車を設計しようとしても現今では困難であり、結局実験を行いつつ試行錯誤的な手法によって設計を行わざるを得ない。

上記の実情と産業界からの LCP 歯車の実用化の要望とがあって、まず本研究では LCP 歯車の寿命(疲労強さ)を調べるとともに摩耗の進行状態およびそれに伴う歯形変化の特徴等を明らかにした。そしてこれらを現在多用されているポリアセタール歯車のそれと比較し、LCP の歯車材としての実用性を検討した。

2. 歯元の曲げ疲労強さ

プラスチック歯車の歯の損傷は多くの場合、歯元における折損(含き裂)であることから本研究では最初に LCP 歯車の歯の曲げ疲労強さを実験によって調べた。

2・1 試験機 図1に実験に使用した試験機の略図を示す。この試験機は市販されている電気油圧サーボ式材料強度試験機である。ここでは①試験歯車とその対の②鋼歯車を④上部および⑤底部のフランジに取り付けられた治具に固定し、荷重(力)を試験歯車の歯先に作用させている。本研究では常温での実験と試験歯車に温風を送って歯の温度を 80°C にした実験を行っている。ここでの歯面温度の測定には赤外線放射温度計を用いている。

2・2 試験歯車の材種 LCP はその耐熱性によって I, II, III の 3 タイプに分類されて市販されている。本研究で用いた LCP はタイプ III である⁽¹⁾。これは主鎖

* 原稿受付 1995 年 2 月 1 日。

*¹ 正員, 千葉工業大学 (〒275 習志野市津田沼 2-17-1)。*² 正員, 千葉工業高等学校 (〒260 千葉市中央区今井町 1478)。

Fig. 1 Electric-oil-pressure-servo-type strength tester used in experiments

中に脂肪族を含んでいるためタイプ I および II より耐熱性が低い、成形加工温度が低いことが魅力である。

LCP は他のプラスチックよりも異方性が強いので、これを緩和するために一般に繊維を充てんしている。本研究でも材料入手の容易さから LCP に直径 6 μm 、長さ 0.15 mm のカーボン繊維を 20% (重量比) 充てんした市販グレードの LCP (以下 CF-LCP と呼ぶ) を用いた。表 1 にこの CF-LCP のおもな特性を示す⁽¹⁾。表 1 には直径 8 μm 、長さ 0.3 mm のカーボン繊維 20% (重量比) 充てんしたポリアセタール (以下これを CF-ポリアセタールと呼ぶ) のおもな特性⁽²⁾ も並記している。表 1 で注目されるのは CF-LCP のヤング率で、これは CF-ポリアセタールのヤング率の 1.38 倍である。前述のように LCP は耐熱性の高いプラスチックであるが、本研究で用いた CF-LCP の温度依存性の一例を示すと図 2⁽¹⁾ のようになる。

2.3 試験歯車 表 2 に試験歯車 (表 2 中の駆動歯車) と相手歯車 (表 2 中の被動歯車) のおもな仕様を示す。試験歯車が CF-LCP でその相手歯車は鋼 (S 45 C) 歯車である。CF-LCP 歯車は射出成形加工で、鋼歯車はホブ切り加工である。いずれの加工の歯車とも JIS 規格精度の 4 級である。後に示す運転試験を考慮してバックラッシュを付けるために CF-LCP 歯車では 0.075 モジュール、鋼歯車では 0.04 モジュールそれぞれマタギ歯厚を理論値より減少させている。

2.4 実験条件 実験は常温 (このとき試験 CF-

Table 1 Main characteristics of plastics used in experiments

Items	Units	CF-LCP	CF-polyacetal	MC nylon
Specific gravity		1.41	1.46	1.15~1.17
Deflection temperature under load (1.8 MPa)	°C	175	163	180
Thermal conductivity	W/(m·K) (kcal/(m·h·°C))	0.21 (0.18)	—	0.28 (0.24)
Coefficient of linear expansion	1/K	1.13×10^{-5}	1.5×10^{-5}	8×10^{-5}
Tensile strength	MPa (kgf/cm ²)	134.26 (1370)	137.20 (1400)	72.52 (740)
Bending strength	MPa (kgf/cm ²)	173.40 (1770)	264.60 (2700)	109.76 (1120)
Elongation	%	3.7	3	50
Young's modulus	GPa (kgf/mm ²)	19.60 (2000)	14.21 (1450)	2.84 (290)

Table 2 Main specifications of gears used in experiments

	Driving gear	Driven gear
Module	2	
Standard pressure angle	20°	
Number of teeth	30	40
Addendum modification coefficient	0	0
Clearance coefficient	0.25	
Face width	6	
Center distance	70	
Tooth finish	Injection molding	Hobbing

N.B.) A unit of length is mm.

Fig. 2 Temperature dependence on bending strength of CF-LCP

LCP 歯車の歯面温度は $23 \pm 0.5^\circ\text{C}$ と試験 CF-LCP 歯車の歯面温度が 80°C ($80 \pm 1^\circ\text{C}$) の二つの場合について行った。CF-LCP 歯車と鋼歯車を対にし、CF-LCP 歯車の一枚の歯の歯元曲げ応力⁽³⁾を常温の場合には 19.8~38.5 MPa の範囲で 11 種類変え、CF-LCP 歯車の歯面温度が 80°C の場合には 10.3~16.8 MPa の範囲で 5 種類変えて実験を行った。全実験とも負荷サイクルを 20 Hz (試験 CF-LCP 歯車の 1200 rpm の運

(a) $N_f = 2.86 \times 10^6$, crack in dedendum
($\sigma_b = 25.2$ MPa, 23°C) tooth surface temperature

(b) Breakage in dedendum
[Gear shown in (a) was operated till $N_f = 3.47 \times 10^6$]

Fig. 3 Crack of tooth and breakage states of CF-LCP gear

転に相当)にし、無潤滑で行っている。

2.5 実験結果および考察 本実験では積算負荷サイクル(積算繰返数) $N_f = 10^7$ で実験を打ち切っているが、 10^7 まで無損傷であったものは4実験であった。この歯車の損傷状態は歯元の折損で、き裂の発生位置は他の多くのプラスチック歯車の場合⁽⁴⁾と同じく、最大曲げ応力が作用すると予測される歯元すみ肉部近傍であった(図3参照)。

本実験におけるCF-LCP歯車の寿命の判定を図3(a)のように歯に目視で確認できるき裂が生じた時点とし、ここで本実験の結果を図4のように整理した。この図の横軸は寿命までの積算負荷サイクル、縦軸は[歯元曲げ応力 σ_b /各歯の温度(23°C および 80°C)におけるCF-LCPの強度(曲げ強さ) σ_0]である。このように縦軸を表したのはCF-LCPも他のプラスチックと同じく強度が温度に依存するからである。

図4では打点数が十分でないものの、CF-LCP歯車の寿命はポリアセタール歯車等の場合⁽⁴⁾と同じく、 σ_b/σ_0 値に相関している。結晶性プラスチックの特性⁽⁵⁾で、CF-LCP歯車にもはっきりした疲労限度は見られないが、この歯車で $N_f = 10^7$ を超える寿命を望むならば σ_b/σ_0 値が0.14近傍以下でなければならない。ポリアセタール歯車ではこの値が約0.27であることから、CF-LCP歯車の σ_b/σ_0 値はポリアセタール歯車の約52%と小さい値である。ただし、例えば表1に示すように熱変形温度はポリアセタール歯車よりもCF-LCP歯車のほうが高いので、真空中などのように温

Fig. 4 Relation between σ_b/σ_0 value and operation life of CF-LCP gears

度が高くなるところには活用できる歯車である。

3. 運 転 試 験

2章でCF-LCP歯車の寿命を調べた結果、動力伝達用歯車として活用できる範囲が存在することを確認できたので、次にこの歯車の運転試験を行い、歯の摩耗、歯形の変化、歯面温度などのプラスチック歯車として重要な特性を明らかにする。

3.1 歯車試験機 実験(運転試験)には既報⁽⁶⁾と同じ中心距離70 mmの動力循環式歯車試験機を用いた。

3.2 試験歯車および相手歯車 試験歯車および相手歯車には表2に示す仕様の歯車を用いた。駆動歯車は2.3節で述べたCF-LCP歯車で、被動歯車は2.3節で述べた炭素鋼歯車とホブ切りした精度4級のMCナイロン⁽⁷⁾(表1参照)歯車である。歯面粗さはJIS規格の十点平均粗さ(R_z)で、CF-LCP歯車が1.8~2.1 μm 、鋼歯車とMCナイロン歯車が5~6 μm である。図5はCF-LCP歯車およびその相手歯車の形状と主要部の寸法を示したものである。

3.3 測定項目および測定方法 実験ではCF-LCP歯車の摩耗、歯形の変化、歯面粗さを既報と同じ方法で測定した⁽⁸⁾⁽⁹⁾。歯面温度は図6に示すようにピッチ点より1 mm歯先側に寄った歯幅中央の位置に表面温度計を接触させて測定した。

3.4 実験条件 表3に実験の条件とその記号を示す。表中のトルク0.66, 0.21 N·mが作用した場合の歯元曲げ応力 σ_b はそれぞれ4.80, 1.47 MPaとなる。また回転数500, 1000, 1200, 1400 rpmにおける歯形上の平均滑り速度はそれぞれ0.23, 0.46, 0.55, 0.64 m/sである。なお表中の各実験はすべて無潤滑運

転である。

3・5 実験結果および考察

① 歯の摩耗 本実験では総回転数(積算回転数)

Fig. 5 Shapes and main dimensions of gears used in experiments

Fig. 6 Position for measuring tooth surface temperature

(a) Pair with steel gear

$N_T=10^7$ をもって実験を打ち切りと定めたが、すべての実験が $N_T=10^7$ まで無損傷で運転でき、またその後の運転も継続できる歯面状態であった。

ここでCF-LCP歯車の歯の摩耗を比摩耗量の意味を持たせて $[(\text{摩耗重量}/\text{比重量})/(\text{歯数} \times 2 \text{ モジュール} \times \text{歯幅} \times \text{総回転数})]$ と表し、PV [P : 鋼歯車相当ヘルツ応力(CF-LCP歯車と炭素鋼歯車並びにMCナイロン歯車のかみあいを炭素鋼歯車同士のかみあいにみなして算出したヘルツ応力)⁽¹⁰⁾, V : CF-LCP歯車の歯形上の平均滑り速度] 値との関係で整理したものを図7に示す。図7(a)が炭素鋼歯車との組合せで、図7(b)がMCナイロン歯車との組合せである。

図7では結果にばらつきはあるが、CF-LCP歯車の比摩耗量は他のプラスチック歯車と同じくPV値に相関することがまずわかる。次に図7の各 N_T ごとの比摩耗量に実線を記入し、また同様にCF-ポリアセタ

Table 3 Experimental conditions and symbols

Torque N·m(kgf·m)	Number of rotations s ⁻¹ (rpm)			
	8.3 (500)	16.6 (1000)	20.0 (1200)	23.3 (1400)
0.21 (0.021)	LCP-S-A-1	LCP-S-A-2	—	LCP-S-A-4
0.66 (0.067)	LCP-S-B-1	LCP-S-B-2	LCP-S-B-3	LCP-S-B-4
0.21	LCP-M-A-1	LCP-M-A-2	—	LCP-M-A-4
0.66	LCP-M-B-1	LCP-M-B-2	LCP-M-B-3	LCP-M-B-4

(b) Pair with MC nylon gear

Fig. 7 Amount of specific wear of CF-LCP gears

ール歯車の比摩耗量を破線で示し、両歯車の摩耗を比較してみる。CF-ポリアセタール歯車にもばらつきがあったので正確なことは言えないが、図7(a), (b)を見て一見で判別できるように、相手歯車が炭素鋼歯車、MCナイロン歯車のいずれであってもCF-LCP歯車はCF-ポリアセタール歯車よりも著しく摩耗が少ない。これは両歯車の摺動特性の違いによることも考えられるが、両歯車の剛性の違いによる歯のたわみの違いが摩耗に大きく影響したものととも考えられる。すなわちCF-LCP歯車のほうがヤング率大きい(表1参照)ために歯のたわみが小さく、そのため既報で再三述べてきたように⁽¹¹⁾、また後の図8を見るように、CF-LCP歯車はかみあい始めにおいて相手歯車の歯先稜(歯先の角)によってえぐり取られる歯元側の摩耗(歯元の異常摩耗と呼んできているもので、その量はPV値と相関している)がCF-ポリアセタール歯車に比べて少なくなっている。

② 歯形変化の特徴 図8, 9にCF-LCP歯車およびCF-ポリアセタール歯車の運転経時に伴う歯形変化の一例を示す。これらは基礎円板方式歯形測定機で測定した歯形の記録線図で、各線図間が運転経時に伴う摩耗厚さ(深さ)を表している。

図8と図9では $N_T=1.5 \times 10^6$ までは似たような歯形であるが、その後の運転では歯形に違いがみられる。剛性の低いCF-ポリアセタール歯車では図9のよ

Fig. 8 Tooth profile change of CF-LCP gear (LCP-S-B-4)

Fig. 9 Tooth profile change of CF-polyacetal gear (same conditions as Fig. 8)

うにかみあい起点(歯先側) K からピッチ点 P 近傍にかけて相手歯車の歯先稜によって著しくえぐり取られた部分(T_s の部分)が生じているが、図8のCF-LCP歯車ではそのような部分は比較的明確に現れていない。CF-LCP歯車の例えば $N_T=10^7$ 時の歯形の変化形態を見ると、図8の下方に示した歯の滑り速度分布の形態と類似している。すなわちCF-LCP歯車はその摩耗が歯の滑り速度に依存しており、この摩耗傾向が歯形の変化形態を決定しているように推察できる。なお図9のようにCF-ポリアセタール歯車においても相手歯車の歯先稜によってえぐり取られない点 P 近傍から歯先 T_i にかけての歯形変化の形態は滑り速度の分布形態と類似している。

③ 歯の温度 CF-LCP歯車と炭素鋼歯車およびMCナイロン歯車の組合せにおける両歯車対の歯面温度を図10(a), (b)に示す。図の横軸はPV値(図7に同じ)、縦軸は歯面の平衡温度から実験中の室温($22 \sim 24^\circ\text{C}$)を引いた値を歯面の上昇温度として表している。また各図中には比較のためにCF-ポリアセタール歯車の歯面の上昇温度も破線で示している。

図10では結果に若干のばらつきは見られるが、CF-LCP歯車の歯面の上昇温度は一般のプラスチック歯車と同じくPV値に相関し、PV値が増大するほど歯

(a) Pair with steel gear

(b) Pair with MC nylon gear

Fig. 10 Temperature rise of tooth surface of CF-LCP gears

Fig. 11 Tooth surface roughness of CF-LCP gear (LCP-S-B-4)

面の上昇温度は高くなっている。

一般にプラスチック歯車と炭素鋼歯車の組合せでは発生熱は熱伝導性の高い炭素鋼歯車側に伝わり易いことから、プラスチック歯車が稼働率の高い駆動歯車であっても歯面の温度はあまり上昇しない。一方プラスチック歯車同士の場合では駆動、被動歯車とも熱伝導性が低いために、稼働率の高い駆動歯車のほうが歯面の上昇温度は高くなる。しかし炭素鋼歯車との組合せに比べ摩擦係数は小さくなることから、摩擦による発生熱量自体は少なくなり、そのため炭素鋼歯車ほど歯面の上昇温度は高くない。

このような歯面の温度上昇の定性的な傾向は図10のようにCF-LCPにも現れている。なおCF-LCP歯車の歯面の上昇温度はCF-ポリアセタール歯車よりも若干低い。

④ 歯面粗さ 炭素鋼歯車とかみあうCF-LCP歯車の運転経時に伴う歯面粗さの変化の一例を図11に示す。同図中には参考のために同条件で運転したCF-ポリアセタール歯車の歯面粗さも示してある。

射出成形された $R_z \approx 2 \mu\text{m}$ のCF-LCP歯車の歯面は $N_T = 1.5 \times 10^6$ 時には $4 \mu\text{m}$ 弱まで荒れるが、その後の運転ではほとんど粗さは変化しない。このことはCF-ポリアセタール歯車についても同様であるが、CF-ポリアセタール歯車はCF-LCP歯車よりも歯面は若干荒れる傾向にある。ここには示していないが、相手歯車がMCナイロン歯車の場合は鋼歯車の場合よりもCF-LCP歯車およびCF-ポリアセタール歯車とも歯面粗さは小さく ($1 \mu\text{m}$ 前後) なるが、粗さの変化傾向はほとんど同じである。

4. 結 言

次世代のプラスチックとして注目されている高分子液晶ポリマにカーボン繊維を20%充てんしたプラスチック(CF-LCP)で歯車を製作し、その寿命(曲げ疲労強さ)と運転特性を調べた結果をまとめると次のようになる。

(1) CF-LCP歯車の損傷は歯元の折損で、き裂の発生位置は他のプラスチック歯車の場合と同じく、最大曲げ応力が作用すると予測される歯元すみ内部近傍であった。

(2) CF-LCP歯車の寿命は他のプラスチック歯車と同様に σ_b/σ_0 値と関係があり、 $N_T = 10^7$ を超える長時間運転を行う場合には σ_b/σ_0 値は0.14近傍以下でなければならないことがわかった。なおこの値はCF-ポリアセタール歯車の0.27に比べて低い値である。

(3) CF-LCP歯車の摩耗は相手歯車が鋼歯車、MCナイロン歯車のいずれの場合においてもCF-ポリアセタール歯車よりも少なく、例えば $PV = 60 \text{ MPa} \cdot \text{m/s}$ 、 $N_T = 10^7$ においてはそれぞれCF-ポリアセタール歯車の40%および65%程度であった。

(4) CF-LCP歯車の歯形変化の形態は歯形上の滑り速度の分布形態に類似していた。

(5) CF-LCP歯車の歯の上昇温度はCF-ポリアセタール歯車よりも若干低かった。

(6) CF-LCP歯車はCF-ポリアセタール歯車よりも歯面粗さが若干小さくなり、 $N_T = 10^7$ 時には $R_z \approx 4 \mu\text{m}$ であった。

文 献

- (1) 三菱化成(株), NOVACCURATE 技術資料, (1991), 4.
- (2) 三菱ガス化学(株), ユピタル FG グレード技術資料, (1988), 3.
- (3) 中田・石川, 歯車伝動, (1966), 47, 誠文堂新光社.
- (4) 塚本・ほか3名, 機論, 58-543, C(1992), 231-237.
- (5) 成沢, プラスチックの強度設計と選び方, (1986), 121, 工業調査会.
- (6) 塚本・ほか2名, 機論, 56-527, C(1990), 262-269.
- (7) 日本ポリベンコ(株), MC ナイロン技術資料, (1974), 3.
- (8) 塚本, 機論, 49-447, C(1983), 2048-2056.
- (9) 塚本, 機講論, No. 800-15(1980-8), 55-61.
- (10) 塚本, 機論, 46-409, C(1980), 1116-1125.
- (11) 例えば, 塚本, 機論, 57-533, C(1991), 236-241.