ガラス繊維充てんナイロンMXD 6 歯車の研究*

塚本 尚久^{*1}, 丸山 広樹^{*1}, 三村 博^{*2}

A study on Nylon MXD 6 gears Filled with Glass Fibers

Naohisa TSUKAMOTO, Hiroki MARUYAMA and Hiroshi MIMURA

To meet the demanded for increased load capability of plastic gears, practical application has been attempted using nylon MXD 6 filled with glass fibers which forms high strength and high rigidity plastic for use as gear material. In order to evaluate this plastic gear, first the bending fatigue strength is investigated. Then, operating tests are carried out on the plastic gears, and several characteristics such as state of wear progress and changes in its tooth profile accompanied with wear are clarified. Some investigations are also carried out concerning problems generated in this plastic gears.

Key Words: Machine Element, Tribology, Gear, Wear, Plastic Gear, Nylon MXD 6 Gear, Glass Fiber Filling Nylon MXD 6 Gear

1. 緒 言

ナイロンは高強度、高剛性のプラスチックで、ポリアセタールとともに今日歯車などの機械部品に多量に使用されている。しかしナイロンはポリアセタールなどよりも吸水性が高く、吸水にともなって強度、剛性などが低下することが欠点である。この欠点を補うナイロンとして市販されているのがナイロンMXD 6である。このナイロンの吸水率はナイロン6およびナイロン66の約1/4と小さい。

上記のほかにナイロンMXD 6には多量に繊維を充てんできる大きな特長がある。熱可塑性プラスチックの多くは繊維充てん率30%(重量比)程度が上限とされており、それ以上繊維を充てんしても母材(マトリックス)と繊維の接着強さの問題から補強効果が上がらない。しかしナイロンMXD 6はこの接着強さが大きいために、50%程度までは繊維充てん率が高いほど強度、剛性等が向上すると言われている。

最近プラスチック歯車においても負荷能力の増大が

求められていることを背景に、本研究ではガラス繊維を多量に充てんできるナイロンMXD 6を歯車材として実用化することを試みた。そしてこれを評価するために、まずこのプラスチック歯車の歯の曲げ疲労強さを調べた。続いてこの歯車の運転試験を行い、摩耗の進行状態およびそれに伴う歯形の変化などの諸特性を明らかにするとともに、ガラス繊維を多量に充てんしたために問題になると思われる点について若干の検討を行った。

2. 歯元の曲げ疲労強さ

繊維を充てんしたプラスチック歯車の歯の損傷は他の多くのプラスチック歯車と同じく、多くの場合歯元における折損(含き裂)であることから、最初にナイロンMXD 6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ジグに固定し、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60℃にした実験を行

* 原稿受付 1995年4月18日。

^{*1} 正員、千葉工業大学 (〒275 習志野市津田沼2-17-1)。

^{*2} 三菱エンジニアリングプラスチックス(株) (〒254 平塚市東八幡5-6-2)。

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 使用したナイロン MXD 6 はメタキシリレンジアミン(MXDA)と二塩基酸から得られる結晶性ポリアミドで、ナイロン 6 と同様に酸アミド結合を持っている。本研究ではこのナイロン MXD 6 に直径 10 μm 、長さ 0.3 mm のガラス繊維を

50%(重量比)充てんしたプラスチック(以下これを GF ナイロン MXD 6 と呼ぶ)を試験歯車の材料に、その相手歯車の材料には炭素鋼(S 45 C)を用いた。表 1 は GF ナイロン MXD 6 のおもな特性である⁽¹⁾。表 1 で注目されるのは強度と剛性が高いことであり、例えば曲げ強さは無充てんのナイロン MXD 6 の約 2.1 倍、ヤング率は約 3.5 倍強、またナイロン 6 との比較ではそれぞれ 2.5 倍、5.5 倍程度になっている。図 2 は GF ナイロン MXD 6 の曲げ強さの温度依存性を示したものである⁽¹⁾。

2・3 試験歯車 この歯の曲げ疲労強さの実験では表 2 に仕様を示す III 形歯車を試験歯車とした。III 形歯車は I 形および II 形歯車と同じく駆動歯車が GF ナイロン MXD 6 歯車で、相手歯車が炭素鋼歯車である。GF ナイロン MXD 6 歯車は射出成形した丸棒を

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

Table 1 Main characteristics of plastics used in experiments

Items	Units	GF-nylon MXD6	Nylon MXD6
Melting point	°C	243	243
Specific gravity		1.65	1.21
Rockwell hardness	HRM	111	107
Coefficient of friction		0.47	—
Coefficient of linear expansion	K ⁻¹	1.1×10^{-5}	7.2×10^{-5}
Tensile strength	MPa (kgf/cm ²)	215 (2190)	74.7 (762)
Bending strength	MPa (kgf/cm ²)	272 (2770)	127 (1300)
Elongation	%	2.1	2.0
Young's modulus	GPa (kgf/mm ²)	13.92 (1420)	3.95 (403)

Fig. 2 Temperature dependence on bending strength of GF nylon MXD 6

Table 2 Main specifications of gears used in experiments

	Type I gear		Type II gear		Type III gear	
	Driving gear	Driven gear	Driving gear	Driven gear	Driving gear	Driven gear
Module	1.25		2		2.5	
Standard pressure angle	20°		20°		20°	
Number of teeth	30	50	20	30	20	36
Addendum modification coefficient	0	0	0	0	0	0
Diameter of standard pitch circle	37.5	62.5	40	60	50	90
Clearance coefficient	0.25		0.25		0.25	
Face width	6		6		6	
Center distance	50		50		70	
Teeth finishing	Hobbing		Hobbing		Hobbing	

N.B) A unit of length is mm.

Fig. 6 Relation between σ_b/σ_0 value and life (bending fatigue strength) of GF nylon MXD 6 gears

6 はガラス繊維を 50% 充てんできるため、仮にガラス繊維 30% 充てんのポリアセタール歯車(ポリアセタールではガラス繊維の充てん効果は 30% 程度が限界)と負荷能力を比較したとすると GF ナイロン MXD 6 歯車のほうが若干大きくなる。

3. 運 転 試 験

第 2 章で GF ナイロン MXD 6 歯車の寿命(歯元の曲げ疲労強さ)を調べた結果、高負荷用プラスチック歯車として活用できる期待が持てたので、次にこの歯車の運転試験を行い、歯の摩耗、歯形の変化、歯面温度などプラスチック歯車として重要なしゅう動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⁽⁴⁾と同じ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 表 2 に示す I 形、II 形、III 形歯車を実験に用い、駆動側を GF ナイロン MXD 6 歯車、相手歯車を鋼歯車とした。歯車試験機の中心距離は I 形および II 形歯車の実験では 50 mm、III 形歯車の実験では 70 mm である。

3.3 測定項目および測定方法 実験では歯の摩耗、歯形の変化、歯面粗さを既報⁽⁵⁾⁽⁶⁾と同じ方法で測定し、歯面温度を図 7 に示すピッチ点より距離 S だけ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。 S は I 形歯車では 0.5 mm、II 形および III 形歯車では 1 mm である。

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(駆動側) 0.33 N·m が作用した場合の σ_b は I 形歯車では 5.9 MPa、II 形歯車では 3.8 MPa、III 形歯車では 2.5 MPa となる。またトルク 0.66 N·m が作用した場合の σ_b はそれぞれ 11.8、

Table 3 Experimental conditions and symbols

Torque N·m	Rotating speeds rpm		
	500	1000	1400
Type I gear			
0.33	I-A-5	I-A-10	I-A-14
0.66	I-B-5	I-B-10	I-B-14
Type II gear			
0.33	II-A-5	II-A-10	II-A-14
0.66	II-B-5	II-B-10	II-B-14
Type III gear			
0.33	III-A-5	III-A-10	III-A-14
0.66	III-B-5	III-B-10	III-B-14

Fig. 7 Position for measuring tooth surface temperature

7.7、5.0 MPa となる。回転数(駆動側) 500、1000、1400 rpm における歯形上の平均滑り速度は例えば I 形歯車ではそれぞれ 0.13、0.26、0.37 m/s となる。図 6 の結果によると本実験での表 3 のトルクは GF ナイロン MXD 6 歯車にとって小さい値であるが、歯車試験機の構造上のことと、後に示す PV 値で歯の摩耗および歯面温度が整理できることが推察できたことからこのような条件で実験を行った。なお本実験はすべて無潤滑運転で行っている。

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) $N_T=10^7$ をもって実験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 GF ナイロン MXD 6 歯車の歯の摩耗を比摩耗量の意味を持たせて(摩耗重量/比重量)/(歯数×2 モジュール×歯幅×総回転数)と表し、PV [P: 鋼歯車相当ヘルツ応力(GF ナイロン MXD 6 歯車と鋼歯車のかみあいを鋼歯車同士のかみあいにみなして算出したヘルツの最大接触応力)⁽⁷⁾、V: GF ナイロン MXD 6 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8に示す。

図8では結果にばらつきはあるが、GFナイロンMXD6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8の各 N_T ごとの比摩耗量に実線を記入し、また表3の実験II B群と同じ条件で行った無充てんMXD6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。ナイロンMXD6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8を見て一見で判別できるように、GFナイロンMXD6歯車はナイロンMXD6歯車よりも著しく摩耗が少ない。両歯車のしゅう動特性の違いによることも考えなければならないが、これは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ていることがまず考えられる。すなわちGFナイロンMXD6歯車のほうがヤング率が高い(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、また後の図9を見るように、GFナイロンMXD6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⁽⁶⁾)と呼んでいるもので、その量はPV値と相関している)がナイロンMXD6歯車に比べて少なくなっている。

図8には参考のために $N_T=3 \times 10^6$ および 10^7 におけるガラス繊維30%充てんポリアセタール歯車の摩耗を二点鎖線で示した。これとGFナイロンMXD6

Fig. 8 Amount of specific wear of GF nylon MXD 6 gears

歯車の摩耗を比較するとGFナイロンMXD6歯車のほうがかなり多いことがわかる。多くの場合ガラス繊維を多量に充てんしたプラスチックは摩擦係数が大きく、摩耗が多い。相手が鋼の場合はガラス繊維30%充てんポリアセタールの摩擦係数は0.36程度で、GFナイロンMXD6は表1のように0.47であることから、単純にみてGFナイロンMXD6歯車のほうが摩耗が多くなってもやむを得ないものと思われる。

② 歯形変化の特徴 図9, 10にGFナイロンMXD6歯車およびナイロンMXD6歯車の運転経時に伴う歯形の変化例を示す。また図9の下方には歯形上の滑り速度の分布形態を示している。これは実験II B 10である。ナイロンMXD6歯車もII B 10と同条件で運転を行っている。図9, 10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。

ガラス繊維充てんの有無にかかわらず、基本的にはナイロンMXD6歯車の歯形変化の形態は、歯形上の滑り速度の分布形態と類似したV字形である。すなわち、ピッチ点を境に滑り速度が大きくなる歯先側と歯

Fig. 9 Tooth profile change of GF nylon MXD 6 gear (II B 10)

Fig. 10 Tooth profile change of nylon MXD 6 gear (same conditions as Fig. 7)

Fig. 11 Temperature rise of tooth surface of GF-nylon MXD 6 gears

元側に寄るほど歯形の変化は大きくなる。これは両歯車の摩耗が歯の滑り速度に依存し、摩耗傾向が歯形の変化形態を決定づけているためと考えられる。

ナイロン MXD 6 材の歯車では歯形変化の基本形態はガラス繊維充てんの有無にかかわらず同形を示した。しかしガラス繊維の有無により歯の変化量(図 9 および図 10 の Tn の部分)に大きな違いが見られる。例えば $N_T=10^7$ 時における GF ナイロン MXD 6 歯車とナイロン MXD 6 歯車の Tn の部分を比較すると前者は後者の約 67% 程度である。また図 9 および図 10 の $N_T=10^7$ 時において歯元の異常摩耗量分を含む Ts の部分を比較しても前者は後者の約 52% となり、GF ナイロン MXD 6 歯車のほうがかなり歯形の変化量が少ない。

GF ナイロン MXD 6 は剛性が高いために歯のたわみが小さくなることから、 Ts の変化量はガラス繊維 30% 充てんポリアセタール歯車と同程度であるが、しゅう動特性が若干劣るために Tn の変化量はガラス繊維 30% 充てんポリアセタール歯車の 1.4 倍程度になる。

③ 歯面温度 図 11 に GF ナイロン MXD 6 歯車の歯面温度を示す。図の横軸は PV 値(図 8 に同じ)、縦軸は歯面の平衡温度から実験中の室温(22~24°C)を引いた値を歯面上昇温度として表している。また図中には比較のためにナイロン MXD 6 歯車の歯面上昇温度も実線で示している。

図 11 では結果に若干のばらつきは見られるが、GF

Fig. 12 Tooth surface roughness of GF nylon MXD 6 gears and mating steel gears

ナイロン MXD 6 歯車の歯面上昇温度は多く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面上昇温度は高くなっている。

一般にプラスチック歯車と鋼歯車の組合せでは発生熱は熱伝導性の高い鋼歯車側に伝わりやすいことから、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。このような歯面上昇温度の定性的な傾向は GF ナイロン MXD 6 歯車およびナイロン MXD 6 歯車においても同様に現れている。

図 11 では GF ナイロン MXD 6 歯車の歯面上昇温度はいずれの PV 値においてもナイロン MXD 6 歯車よりも高くなっているが、この違いはガラス繊維充てんの有無によるものである。なお参考までに、GF ナイロン MXD 6 歯車とガラス繊維 30% 充てんポリアセタール歯車の歯面上昇温度を比較すると、前者のほうが僅かに高くなる傾向にあった。

④ 歯面粗さ 図 12 に GF ナイロン MXD 6 歯車およびその相手鋼歯車の運転経時に伴う歯面粗さの変化の一例を示す。図のように GF ナイロン MXD 6 歯車は $N_T=6 \times 10^5 \sim 1.5 \times 10^6$ で $Rz=3.5 \mu m$ 程度まで歯面が滑らかになるが、歯面から欠落するガラス繊維の量が多くなったためか、その後は荒れ、 $N_T=10^7$ 時では $5.5 \mu m$ 程度になる。ナイロン MXD 6 歯車の $N_T=10^7$ 時の歯面粗さは $4 \mu m$ 強さであるので、GF ナイロン MXD 6 歯車のほうが粗さが大きくなる。

鋼歯車の歯面粗さは運転経時とともに小さくなり、 $N_T=10^7$ 時では $2 \mu m$ 弱になる。なおナイロン MXD 6 歯車およびガラス繊維 30% 充てんポリアセタール歯車との運転では $N_T=10^7$ 時の鋼歯車の歯面粗さはそれぞれ $3.8 \mu m$ 、 $2.2 \mu m$ になった。

Fig. 13 Wear of steel gears paired with GF nylon MXD 6 gears

4. GFナイロンMXD 6 歯車 の使用上の問題点

GF ナイロン MXD 6 歯車はプラスチック歯車としては大動力が伝達可能であるが、その運転に当たっては特に次の点が問題になる。

4・1 相手鋼歯車の摩耗 強度、熱伝導性、帯電防止、価格などの面からプラスチック歯車の相手に鋼歯車を用いることがしばしばある。一般に無充てんのナイロン歯車やポリアセタール歯車との対で鋼歯車を用いる場合には鋼歯車の摩耗は極めて微量であるため、その量を問題にする必要はない。しかし GF ナイロン MXD 6 歯車との対では図 13 に示すように鋼歯車が多量に摩耗するので、その量を知っておかなければならない。図 13 では鋼歯車の摩耗を摩耗重量/比重量で表しているが、例えば実験 II-B-14 の $N_f=10^7$ 時における鋼歯車の摩耗は約 15 mm^3 である。よってここで歯形上の摩耗が均一であると仮定すると、1 枚の歯の $N_f=10^7$ 時の摩耗深さは $20 \mu\text{m}$ 程度になる。

4・2 歯車騒音 プラスチック歯車は低騒音であることが特長である。しかし GF ナイロン MXD 6 歯車は図 14 のようにナイロン MXD 6 歯車と比較してわかるようにプラスチック歯車としては騒音が大きい。図 14 は実験 II-A 群の各新品歯車の騒音を運転開始直後に測定したものである。ここでは既報⁹⁾のように自由音場において運転している歯車の歯のかみあい部より軸方向に 0.15 m 離してマイクロホンを設置し、精密騒音計、1/3 オクターブ分析器および自動分析駆

(a) 500rpm

(b) 1000rpm

(c) 1400rpm

Fig. 14 Frequency characteristics in noise of GF nylon MXD 6 gears

動装置によって全音圧 (All pass) を調べるとともに、周波数分析を行っている。

図 14 では 100 Hz 近傍以下の低周波数域では音圧レベルの差ははっきりしないが、高周波数域では GF ナイロン MXD 6 歯車のほうがナイロン MXD 6 歯車よりも音圧レベルが高いことがわかる。特に高速回転の 1400 rpm では両者の差は明確で、例えばかみあい周波数 f_z においては 6 dB 程度、全音圧では約 8 dB それぞれ GF ナイロン MXD 6 歯車のほうが高くなっている。

5. 結 言

最近プラスチック歯車においても負荷能力の増大が求められていることを背景に、ガラス繊維との接着性のよいナイロン MXD 6 を母材にガラス繊維を 50% 充てんした高強度、高剛性の GF ナイロン MXD 6 で

歯車を製作し、その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) GF ナイロン MXD 6 歯車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肉部近傍で折損した。

(2) GF ナイロン MXD 6 歯車の寿命(曲げ疲労強さ)は多くのプラスチック歯車の寿命と同じく σ_b/σ_0 値で整理できた。なお GF ナイロン MXD 6 歯車を $N_T=10^7$ を超えて長時間使用するならば σ_b/σ_0 値は 0.24 近傍以下でなければならなかった。

(3) GF ナイロン MXD 6 歯車の摩耗は無充てんのナイロン MXD 6 歯車の摩耗よりも少なかったが、ガラス繊維 30% 充てんのポリアセタール歯車の摩耗よりもかなり多かった。

(4) GF ナイロン MXD 6 歯車の歯形変化の形態はナイロン MXD 6 歯車を含む多くのプラスチック歯車の場合と同じく、歯形上の滑り速度の分布形態に類似した V 字形であった。ただし歯元の異常摩耗が少ないため鈍角の V 字形である。

(5) GF ナイロン MXD 6 歯車の歯面の上昇温度はナイロン MXD 6 歯車の歯面の上昇温度よりも高く、またガラス繊維 30% 充てんのポリアセタール歯車

のそれよりも僅かに高くなる傾向にあった。

(6) GF ナイロン MXD 6 歯車の $N_T=10^7$ 時の歯面粗さは $Rz=5.5\mu\text{m}$ 程度であった。なおその相手鋼歯車の $N_T=10^7$ 時の歯面粗さは $Rz=2\mu\text{m}$ 弱であった。

(7) GF ナイロン MXD 6 歯車と対の鋼歯車の歯は多量に摩耗した。例えば本実験の II B 14 では鋼歯車の歯は $N_T=10^7$ 時に $20\mu\text{m}$ 程度摩耗していた。

(8) GF ナイロン MXD 6 歯車はプラスチック歯車としては騒音が大きかった。例えば本実験の II A 14 のかみあい周波数での音圧レベルは 66 dB 程度であった。

文 献

- (1) 三菱ガス化学(株), Reny 技術資料, (1992), 28.
- (2) 中田孝・石川二郎, 歯車伝動, (1966), 47, 誠文堂新光社.
- (3) 塚本尚久・ほか 3 名, 機論, **58**-545, C(1992), 231-237.
- (4) 塚本尚久・ほか 2 名, 機論, **56**-527, C(1990), 262-269.
- (5) 塚本尚久, 機論, **49**-447, C(1983), 2048-2056.
- (6) 塚本尚久, 機講論, No. 800-15(1980-8), 55-61.
- (7) 塚本尚久, 機論, **46**-409, C(1980), 1116-1125.
- (8) 寺島健一・ほか 3 名, 機論, **51**-469, C(1985), 2309-2315.
- (9) 塚本尚久・ほか 2 名, 機論, **61**-582, C(1995), 441-448.