繊維充てんプラスチック歯車に関する研究*

(第 2 報, カーボン繊維を充てんしたプラスチック歯車の評価)

塚 本 尚 久^{*1}, 丸 山 広 樹^{*1}
寺 島 健 一^{*2}, 青 木 秀 哉^{*3}

A Study of Fiber-Filled Plastic Gears

(2nd Report, Evaluation of Plastic Gears Filled with Carbon Fibers)

Naohisa TSUKAMOTO, Hiroki MARUYAMA,
Kenichi TERASHIMA, and Hideya AOKI

In the previous report we examined the characteristics of composite plastic gears filled with glass fibers, and pointed out the existence of some defects in the gears in terms of abrasion resistance. In this study, we prepared composite plastic gears filled with carbon fibers for the same purpose as for the glass fibers, and made running tests to evaluate the gears in terms of abrasion of the teeth, temperature of the teeth, roughness of the tooth surface, change of the tooth profiles, and noise of the gears. Comparing with the test results of the other plastic gears we also studied the practicability of these gears.

Key Words: Gear, Plastic Gear, Nylon Gear, Carbon Fiber Gear, Tooth Profile, Wear, Sound

1. 緒 言

プラスチック歯車は機械的強度が低いこと, 耐熱性に劣ることなどが大きな欠点である。これらの欠点を補う目的で前報ではガラス繊維を充てんし複合強化したプラスチックを歯車材として用いた⁽¹⁾が, このプラスチックは摩耗が極めて著しかった。これは歯車のように滑りを伴った高い面圧で使用すると母材の摩耗につれて母材とガラス繊維の結合力が弱まり母材からガラス繊維が脱落し, それが砥粒の役目をなすためであった。そしてこの場合, 相手鋼歯車の摩耗も多かった。

一方ガラス繊維の充てんと同じ目的でカーボン繊維をプラスチックに充てんした複合プラスチックも最近多く市販されている。この複合プラスチックの基礎的な特性の研究もかなりなされているが, ガラス繊維を充てんしたプラスチック同様, 歯車として用いたときの諸特性はまだほとんど明らかにされていない。

著者らはこれまで動力伝達用歯車の材料として各種

のプラスチックの特性を調べ続けてきたが, いまひとつ満足する材料を見いだすことができなかった。そこで本報ではカーボン繊維を充てんしたプラスチックで歯車を製作して運転試験を行いこの歯車を歯の摩耗, 歯形の変化, 歯の温度, 騒音などの面から評価するとともにすでに試験を行って得た他のプラスチック歯車の結果⁽²⁾と比較し, この歯車の実用性を検討した。

2. 実験装置および実験方法

2・1 使用プラスチック 実験に用いたプラスチック歯車の材料はガラス繊維を充てんした場合と同じく寸法安定性などに優れている熱硬化性樹脂のポリアミノビスマレイミド (PABM)⁽³⁾を母材とし, これに直径約 7 μm , 長さ約 25.4 mm のカーボン繊維を重量比で 60 % 充てんしたものである (以下この複合プラスチックを CF60 と略称する)。製造は圧縮成形で, 金型温度は約 140°C, 成形圧力は 19.6 MPa {2 kgf/mm²}, 成形時間は約 20 min である。成形後はポストキュア (成形品をフリー加熱) を 200°C で約 60 min 行っている。なおここではカーボン繊維は約 12 000 本を 1 束に束ねて充てんしている。

表 1 は CF60 とすでに歯車材として使用してきた GF65 (PABM の母材にガラス繊維を 65 % 充てんした

* 昭和 63 年 3 月 30 日 第 65 期通常総会講演会において講演, 原稿受付 昭和 62 年 8 月 24 日。

^{*1} 正員, 千葉工業大学 (〒275 習志野市津田沼 2-17-1)。

^{*2} 正員, 福井工業大学 (〒910 福井市学園 3-6-18)。

^{*3} 三井石油化学工業(株) (〒100 東京都千代田区霞が関 3-2-5)。

表 1 実験に用いたプラスチックの主な性質

Items	Units	MC nylon	GF65	CF60
Melting point	°C	208	—	—
Specific gravity		1.15~1.17	1.9	1.54
Rockwell hardness	HRM	21	120	116
Coefficient of friction		0.17~0.19	0.10~0.25	0.19~0.23
Specific heat	J/(kg K) [cal/(g °C)]	1926 (0.46)	—	—
Coefficient of linear expansion	K ⁻¹	8×10 ⁻⁵	1.4×10 ⁻⁵	0.15×10 ⁻⁵
Tensile strength	MPa [kgf/cm ²]	72.52 (740)	156.8 (1600)	274.4 (2800)
Compressive strength	MPa [kgf/cm ²]	32.32 (840)	225.4 (2300)	421.4 (4300)
Bending strength	MPa [kgf/cm ²]	109.76 (1120)	343 (3500)	303.8 (3100)
Elongation	%	50	—	—
Young's modulus	GPa [kgf/mm ²]	2.94 (290)	20.85 (2100)	24.50 (2500)

表 2 実験に用いた歯車の主な仕様

	Type I gear		Type II gear		Type III gear		Type IV gear	
	Driving gear	Driven gear	Driving gear	Driven gear	Driving gear	Driven gear	Driving gear	Driven gear
Module	3		4.5		5		5	
Standard pressure angle	20°		20°		20°		20°	
Number of teeth	30	60	25	35	17	37	34	64
Addendum modification coefficient	0	0	0	0	0	0	0	0
Diameter of standard pitch circle	90	180	112.5	157.5	85	185	170	320
Clearance coefficient	0.25		0.25		0.25		0.25	
Face width	10	10	10	10	10	10	20	20
Center distance	135		135		135		245.8	
Teeth finishing	Hobbing	Hobbing	Hobbing	Hobbing	Hobbing	Hobbing	Molding	Hobbing

N.B) A unit of module, diameter of standard pitch circle, face width and center distance is mm.

図 2 歯面粗さ ($N_T=0$)

もの) および MC ナイロン材の特性を示したものである。

2.2 試験歯車および相手歯車 実験 (運転試験) は歯車仕様が異なった場合の再現性を確認する意味で表 2 に示す I~IV 形の 4 仕様の歯車を用いた。I~III 形のプラスチック (CF60) 歯車および鋼 (S45C) 歯車と IV 形の鋼歯車はホブ切り (プラスチック歯車は圧縮成形で製造した板材をホブ切り) で、バックラッシは I~III 形歯車ではプラスチック歯車に 0.075 モジュール、鋼歯車に 0.04 モジュール、それぞれ歯切りの際に切込みを調整してつけている。IV 形歯車のバックラッシは中心距離を標準より 0.8 mm 増加させて与えた。なお IV 形のプラスチック歯車は 2.1 節の圧縮成形で歯

表 3 実験条件および記号

Torque N·m (kgf·m)	Number of rotations s ⁻¹ (rpm)	8.3	16.6	25
		(500)	(1000)	(1500)
Type I gear				
15.7 (1.6)		I-A-1	I-A-2	I-A-3
29.4 (3.0)		—	I-B-2	I-B-3
Type II gear				
15.7 (1.6)		II-A-1	II-A-2	II-A-3
29.4 (3.0)		—	II-B-2	II-B-3
Type III gear				
15.7 (1.6)		III-A-1	III-A-2	III-A-3
29.4 (3.0)		—	III-B-2	III-B-3

T_i : Tip of tooth, P : Pitch point, K : Starting point of action

図 1 歯形精度 ($N_T=0$)

車そのものを製作している (型成形)。各形のプラスチック歯車および鋼歯車は歯幅を厚みとする円板形状である。歯面粗さ (歯形方向) は JIS B 0601 の十点平均粗さ R_z で I~III 形のプラスチック歯車の場合 10~16 μm , I~IV 形の鋼歯車の場合 5.6~6.2 μm , IV 形プラスチック歯車の場合 1.5 μm 前後である。図 1 は I~IV 形プラスチック歯車の歯形誤差で、図 2 は同じく I~IV 形プラスチック歯車の歯面粗さである。

2.3 歯車試験機 実験には大形⁽⁴⁾と小形⁽²⁾の 2 種類の歯車試験機を用いた。両試験機とも動力循環式であるが、既報で述べたように大形試験機は中心距離を 190~300 mm の範囲で変えることができる。I~III 形歯車の実験は小形試験機を用い、IV 形歯車の実験は大形試験機を用いて行っている。

2.4 測定項目および測定方法 プラスチック歯車および鋼歯車の歯面温度は図 3 の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。実験では歯面温度のほかにプラスチック歯車および鋼歯車の摩耗、歯形の変化、

図 3 歯面温度の測定位置

歯車の発生音も測定したが、これらは既報⁽²⁾と同じ方法で測定した。

2・5 実験条件 表3にI～III形歯車の実験における回転数(駆動側)とトルク(駆動側)を示す。IV形歯車の回転数とトルクは後に示してある。これらの実験は無潤滑運転で、プラスチック歯車を駆動側に用いている。なお本実験の回転数と歯車仕様では歯形上の平均滑り速度は0.3～1.45 m/sの範囲内である。

3. 実験結果および考察

3・1 歯面粗さ 図4(a)は圧縮成形で製造したCF60の板材の写真である。模様のように見えているのがカーボン繊維である。この表面は極めて滑らかで $1.5\mu\text{m}$ 程度の粗さ R_z に仕上がっている。

図4(b)は図4(a)の板材を旋削加工後ホブ切りした歯車である。歯形に沿って多数見られる白い線状のものがカーボン繊維である。カーボン繊維を充てんしたPABMをホブ切りすると切削面(歯面)は滑らかに仕上がらない。これは硬いカーボン繊維と軟らかいPABMを同時に切削しているということと、結合し

図4 ホブ切りCF60歯車の運転経時に伴う歯面の変化(実験III-B-2)

ていたカーボン繊維とPABMが切削することにより微少ではあるがはがされるためのものと思われる。図2(b)がこの歯面の粗さ(歯形方向)である。図5の●印はこの歯面の歯車を鋼歯車との組合せで運転したときの経時に伴う粗さの変化を見たものである。運転前このCF60歯車の歯面粗さは $10.5\mu\text{m}$ 程度であったが、総回転数(積算回転数) $N_r=3\times 10^6$ 時では $5\mu\text{m}$ 弱になっている。このときの歯面の写真が図4(e)である。運転前($N_r=0$)のものと比較すると切削目がとれて光沢が現れてきている。運転を停止した $N_r=10^7$ 時では歯面粗さはさらに減少して $4\mu\text{m}$ 弱になった。

GF65歯車を運転したときにガラス繊維が母材から脱落した⁽¹⁾ようにCF60歯車においても母材からカーボン繊維が脱落する。図6はCF60歯車(実験III-B-2)の $N_r=1.5\times 10^6$ 時の歯面の顕微鏡写真であるが、縦に太い白線となって見えるのが脱落した跡である。

図7はホブ切りCF60歯車とかみあう鋼歯車(実験III-B-2)の歯面の写真である。運転経時に伴って歯面が黒く変化してきているのは歯面にCF60歯車の摩耗粉が移着してきているからである。この鋼歯車の歯面粗さを表すと図5の○印のようになる。運転開始当初($N_r=10^3$)粗さは小さくなるが、CF60歯車の摩耗粉が移着したと粗さは少し増す。しかしその後は摩耗粉が移着しても粗さは大きくならず、むしろ若干減少し $N_r=10^7$ 時では $3\mu\text{m}$ 弱になっている。

図8はIV形歯車の歯面の写真である。これはホブで歯切りしたものではなく型成形で歯車を製作したものである。このように製作した歯車の歯面は滑らかに仕上がりに、歯面の粗さは図2(c)のように $1.5\mu\text{m}$ 程度になる。歯形精度も図1のようにホブ切りした歯車に劣らない。この歯面は図5の▲印のように長時間運転(トルク49 N・m, 回転数1000 rpmで運転)してもほとんどあれない。またこの歯車とかみあうと鋼歯車の歯面粗さも小さくなり、 $N_r=10^7$ 時では $2\mu\text{m}$ 弱にな

図5 CF60歯車と相手鋼歯車の歯面粗さの変化

図6 CF60歯車の歯面の顕微鏡写真

った。図9はこのときの歯面の写真である。ホブ切りしたCF60歯車とのかみあいのように多量に摩耗粉が移着するようなことがないので歯面はあまり黒くなっていない。

3・2 摩耗 図10にトルク15.7 N・m {1.6 kgf・m} の場合のI形とIII形歯車の運転経時に伴う摩耗を示す。図10の縦軸はすでに実験を行った別の材料の歯

車の摩耗と比較するために(摩耗重量/比重量)で表している。図10でまず注目されることはGF65歯車の摩耗に比べCF60歯車の摩耗が著しく少ないことである。回転数によって違いはあるが、GF65歯車の摩耗に対するCF60歯車の摩耗の割合は例えば $N_T=10^7$ においてはI形およびIII形歯車とも14~32%である。このように両者の摩耗に大差が生じるのはGF65歯車ではガラス繊維が母材から脱落した場合それが砥粒の役目をなすが、CF60歯車ではカーボン繊維が母材から脱落した場合それが潤滑剤のような役目をなすためであると思われる。

MCナイロン歯車とCF60歯車では後者のほうが若干摩耗が多い。これはCF60歯車の母材のPABMは熱硬化性樹脂で熱可塑性樹脂のMCナイロンよりも元来摩耗が多いこともあるが、ホブ切りのCF60歯車は前述のように母材からカーボン繊維がはがされて歯面があらえており、それが運転初期の段階で多量に摩耗するからである。図10にこのことが明りように現れており摩耗の大部分は歯面がなじむ $N_T=6 \times 10^5$ までのものである。いまIII形歯車の1500 rpmにおいて(実験III-A-3)、CF60歯車とMCナイロン歯車の摩耗を $N_T=6 \times 10^5 \sim 10^7$ 間で比較してみると両者にはほとんど差が見られない。

図11(a)はI, II, III形歯車の全実験における摩耗をPV値〔P:鋼歯車相当ヘルツ応力⁽²⁾ MPa {kgf/mm²}, V:歯形上の平均滑り速度 m/s}との関係で見たものである。ただし、縦軸は比摩耗量[(摩耗重量/比重量)/歯数/歯幅/(2×モジュール)/総回転数]にしている。ばらつきはあるが図11(a)のような直線を記入すると $N_T=1.5 \times 10^6$ 以後の運転における比摩耗量とPV値の関係は次の式(1)のようになる。

$$W_s = \alpha \cdot N_T^{17/18} \times 10^{2.5 \cdot N_T^{2/9} \cdot PV} \dots \dots \dots (1)$$

W_s : 比摩耗量 mm³/mm/mm

N_T : 総回転数

図7 ホブ切りCF60歯車とかみあう鋼歯車の歯面の変化

図8 型成形CF60歯車の運転経時に伴う歯面の変化 (トルク: 49 N・m, 回転数: 1000 rpm)

図9 型成形CF60歯車とかみあった鋼歯車の歯面 (実験条件は図8に同じ)

図 10 ホブ切り CF60 歯車の運転経時に伴う摩耗の一例

PV: PV 値 MPa·m/s

α : 定数 (ホブ切り CF60 歯車=0.025, 型成形 CF60 歯車=0.023 mm³/mm/mm)

β : 定数=2.4×10⁻⁵ 1/ MPa·m/s

図 12 は CF60 の IV 形歯車の運転経時に伴う摩耗である。この歯車は型成形歯車であり、図 8 の写真および図 5 の歯面粗さを見てわかるようにホブ切りしたものよりも歯面が滑らかであるため摩耗は極めて少ない。参考のためトルク 19.6 N·m {2 kgf·m}, 回転数 1000 rpm における MC ナイロン歯車の摩耗を図 12 中に示したが MC ナイロン歯車よりも型成形した CF60 歯車のほうが摩耗は少ない。ここで図 12 を図 11(a)と同じく整理してみると図 11(b)のようになる。この場合の比摩耗量と PV 値の関係も定数 α は異なるが I ~ III 形歯車と同様に式 (1) で表される。

3.3 歯形変化 図 13(c), (d) に MC ナイロン歯車と対比させながら CF60 歯車の運転経時に伴う歯形変化の一例 (実験 I-A-2) を示す。図 13 中の $N_T=0$ が運転前の歯形で、各 N_T における歯形は $N_T=0$ の歯形から摩耗分だけ移動させてかいてある。図 13(a), (b) の MC ナイロン歯車の歯形は既報で再三示した⁽²⁾⁽⁵⁾ものと同じくピッチ点 P 近傍から歯先 T_1 にか

(a) ホブ切り CF60 歯車

(b) 型成形 CF60 歯車

図 11 CF60 歯車の PV 値と比摩耗量

けての変化に比べ、かみあい起点 K から P 点近傍にかけて著しく変化している (この理由もすでに述べている)。これに比較すると CF60 歯車はかなり歯形上一

様に摩耗し、大きく変化している所がないことがわかる。この変化形態の違いは両者の歯のたわみ量の違いによるものと思われる。そこで両者のIV形歯車の歯先に静的に荷重をかけ瞬時の作用線方向の歯のたわみを測定し比較してみた。

図14はその結果である。MCナイロン歯車は大きな荷重になると歯形の変形が著しくなるために小荷重でしか測定できなかったが、この荷重の範囲内ではMCナイロン歯車の歯のたわみはCF60歯車のその9～12倍程度となっている。したがって図13のように両者の歯形変化の形態が違うのも理解できよう。

3.4 運転寿命 I～III形歯車の運転においてはすべて $N_T=10^7$ まで無損傷であり、その後の運転も十分に可能な状態であった。IV形歯車は回転数を 675

rpm と 1000 rpm の 2 種類にし、トルクを各種変えながら運転を行ったが両回転数ともトルク 98 N・m {10 kgf・m} までは $N_T=10^7$ まで無損傷で運転ができ、I～III形歯車と同じく、それらの歯車の歯はその後の運転も十分可能なものであった。このような結果を得たので次にIV形歯車を 1000, 137.2 N・m {14 kgf・m} で運転したところ $N_T=1.2 \times 10^6$ で歯の温度を測定するときに図15(a)のようなき裂(矢印の部分)を発見した。さらにこの状態の歯車を注意しながら継続運転したところ $N_T=2.7 \times 10^6$ のときに図15(b)のように折損した。このときのき裂は理論的に予測されている歯元すみ肉部ではなく一枚かみあい領域内であり、高いせん断応力によるものと思われる。なおき裂は母材のPABMとカーボン繊維の結合力の弱い方向に進展する。

図15(c)はMCナイロン歯車をトルク 29.4 N・m {3 kgf・m}、回転数 1000 rpm で運転し $N_T=3.6 \times 10^5$ で損傷(溶融)した歯面の写真である。MCナイロン歯車とCF60歯車は損傷形態は異なるが、CF60歯車の運転寿命はMCナイロン歯車の4～5倍程度あると考えられそうである。

3.5 歯の温度 歯の温度はMCナイロン歯車の場合熱電対を歯に埋め込んで測定した⁽²⁾のものであり、CF60歯車は表面温度計を歯面にあて測定したものである。両者の歯の温度は厳密には比較できないが、本実験に用いたI～III形歯車においてMCナイロン歯車の歯の温度に対しCF60歯車の歯の温度はトルク 15.7 N・m の場合回転数 500 rpm のとき 90% 前後、1000 rpm のとき 76% 前後、1500 rpm のとき 58% 前後であった。

3.6 歯車の騒音 I～III形のCF60歯車を運転終了 ($N_T=10^7$) 後にトルク 15.7 N・m、回転数 500, 1000, 1500 rpm で運転し歯車の騒音を測定した。図16はその一例を示したものである。図16には比較のためにMCナイロン歯車の騒音も示しておいた。この

図12 型成形CF60歯車の摩耗

図13 CF60歯車の歯形変化の一例

図14 CF60歯車の歯のたわみ

(a) $N_T = 1.2 \times 10^5$ (b) $N_T = 2.7 \times 10^5$ (c) $N_T = 3.6 \times 10^5$
(CF60 gear, 137.2 N·m) (MC nylon gear, 29.4 N·m)

図 15 CF60 歯車の歯の損傷 (1 000 rpm)

MC ナイロン歯車は摩耗実験に用いたものと同仕様であるが摩耗実験に用いたものではなく新品の歯車である。

図 16 のように CF60 歯車はカーボン繊維を 60 % 充てんしているにもかかわらず MC ナイロン歯車よりも若干高い程度の騒音である。両歯車の騒音の特徴としては低周波数域では CF60 歯車のほうが、高周波数域では MC ナイロン歯車のほうが若干 (2~3 dB) 低騒音といえる。低周波数域で MC ナイロン歯車の音圧レベルが高いのは相手鋼歯車の歯先りょうが強く当たり歯元がえぐり取られる⁽⁹⁾ためのものである。予想したものより CF60 歯車が低騒音なのは CF60 歯車の母材の PABM とカーボン繊維との結合度がまだ完全ではなく極めて微小の空洞が材料内に多数存在しているためのものであると思われる。

4. 結 言

PABM 樹脂にカーボン繊維を 60 % (重量比) 充てんした複合プラスチック歯車 (CF60 歯車) を製作し鋼 (S45C) 歯車との組合せで運転試験を行った結果をまとめると次のようになる。

(1) CF60 の板材をホブ切りした場合歯面はあれ、仕上がった粗さは $R_a = 10 \sim 16 \mu\text{m}$ となった。型成形で CF60 歯車を製作した場合歯面粗さは $1.5 \mu\text{m}$ 、歯形精度は JIS B 1702 の 4 級内となった。

(2) $N_T = 10^7$ 終了時の歯面粗さはホブ切り CF60 歯車の場合 $4 \mu\text{m}$ 弱、型成形 CF60 歯車の場合 $2 \mu\text{m}$ 程度であった。なお、ホブ切り CF60 歯車は型成形 CF60 歯車よりもその摩耗粉が鋼歯車に多く移着した。

図 16 CF60 歯車の騒音

(3) ホブ切り CF60 歯車は歯面がなじむ $N_T = 6 \times 10^5$ 程度までの摩耗は著しいが、その後の運転では MC ナイロン歯車と同程度であった。型成形 CF60 歯車は運転当初より摩耗は少なく、 $N_T = 10^7$ でも MC ナイロン歯車より摩耗が少なかった。

(4) GF65 歯車の摩耗に対する CF60 歯車の摩耗の割合は歯車の仕様や運転条件によって異なるが、例えば $N_T = 10^7$ において 14~32 % であった。なお CF60 歯車 (ホブ切り、型成形の両方を含む) とかみあう鋼歯車は GF65 歯車とかみあったときのように摩耗はしなかった。

(5) CF60 歯車は長時間運転しても歯形上ほぼ均一に摩耗し歯形の変化はほとんどなかった。

(6) CF60 歯車の歯の温度は MC ナイロン歯車の歯の温度に対して 500 rpm のとき 90 % 前後、1 000 rpm のとき 76 % 前後、1 500 rpm のとき 58 % 前後であった。

(7) CF60 歯車の運転寿命 (負荷能力) は MC ナイロン歯車の 4~5 倍程度であった。

(8) CF60 歯車の騒音は低周波数帯域では MC ナイロンよりやや低かったが 1 kHz を超える高い周波数帯域で MC ナイロン歯車より 2~3 dB 音圧レベルが高かった。

以上を評価して CF60 歯車は動力伝達用歯車として実用に供する優れたプラスチック歯車と判断できた。

文 献

- (1) 塚本・ほか 3 名, 機論, 53-491, C (昭 62), 1544.
- (2) 塚本・ほか 2 名, 機論, 48-425, C (昭 57), 95.
- (3) 三井石油化学工業(株), PABM 資料, No.5 (昭 57), 3.
- (4) 塚本, 機論, 45-391, C (昭 54), 382.
- (5) 塚本, 機論, No.800-15 (昭 55-8), 55.
- (6) 塚本・寺島, 機論, 51-463, C (昭 60), 622.

討 論

〔質問〕 庄 司 彰〔宮城工業高等専門学校〕
複合プラスチック歯車の研究に対して敬意を表する。

(1) カーボン繊維歯車 CF 60 はカーボン繊維を1束に束ねて充てんしているが、1束に束ねて充てんした理由は何か。任意に混入したほうが強度的にも強いと思われるがいかがか。

(2) 歯車試験機は動力循環式を使用されているが、プラスチック歯車のように比較的摩耗の多い歯車の試験では運転中にトルク変動が起こると思われるがどうか。

〔回答〕 (1) 市販のカーボン繊維の標準品は何かの繊維を束ねたものである。本研究ではそれをそ

のまま利用したものだが、仮に束ねないでカーボン繊維を長繊維で利用すると非常にかさだかになり取扱いが大変困難になる。なお繊維の長さを1mm以下の短繊維にすれば束ねなくても充てんできる。

(2) プラスチック歯車は鋼歯車に比べて摩耗が多いうえに歯が塑性的な後倒れをするため本研究で用いた動力循環式歯車試験機では若干運転初期の段階で循環動力が減少する。この減少動力(トルク)については文献(付1)の図11と文献(付2)の図6にいくつかの例を示して説明してある。なお CF 60 歯車は本実験の条件内では循環動力の減少は認められなかった。

(付1) 塚本, 機論, 46-409, C (昭55), 1122.

(付2) 塚本, 機論, 52-481, C (昭61), 2494.