射出成形プラスチック鼓形ウォームホイールの強さに関する研究* (ガラス繊維強化ナイロンウォームホイールの強さ)

武士俣 貞助*¹, 大野 禎史*², 小島 英昭*³

Strength of Plastic Enveloping Wormwheel made by Injection Molding (Strength of Nylon Wormwheel Reinforced with Glass Fibers)

Teisuke BUSHIMATA, Tadafumi OHNO and Hideaki KOJIMA

Since it has been made possible to injection-molded plastic enveloping wormwheels monolithically, contributions of such products to many industrial fields are expected. However, since strength and other properties of injection-molded plastic enveloping wormwheels are so far little known, there is pressing need to clarify them. Experiments for durabilities were conducted in this work with using three samples in total, namely, monolithically injection-molded enveloping wormwheels made of Nylon 66 prepared by reinforcement glass fibers which improve high-temperature durability, glass fibers and inorganic materials, and unreinforced. Basing on the experimental results obtained, examinations were made of the effects of the reinforcing glass fibers on the load-carrying characteristics and wear resistance.

Key Words: Machine Element, Gear, Wear, Plastic Gear, Nylon Gear, Enveloping Wormwheel, Injection Molded Gear, Gear Strength

1. 緒 言

小形のプラスチックウォームギヤは、そのいくつかの利点が生かされ、自動車、介護および調理機器等多くの器機に用いられている。プラスチックウォームホイールは、価格、量産性から、射出成形品とするのが最も好ましいと考えられる。そして、歯の接触状態からみて、摩耗および強度的に、円筒(はすば)より鼓形のほうが、有利であると考えられる。しかし、射出成形による鼓形のプラスチックウォームホイールは、製品の金型からの取出しができず、これまで製作が不可能であったため、射出成形の円筒ウォームホイールが、おもに用いられてきている。

最近、プラスチック鼓形ウォームホイールの一体形での射出成形方法が、著者らによって、新しく開発され⁽¹⁾、製作が可能となり、多方面に寄与することが期待されるようになった。小形のプラスチックウォームホイールは、自動車を例にみられるように、過酷な環境条件下での、動力伝達用としての使用が多いが、研

究は少なく、数例みられる程度である^{(2)~(5)}。

本研究では、射出成形プラスチックの鼓形ウォームホイールの材質として、非強化ナイロン66、材料の強度、高温強度向上を目的としたガラス繊維強化ナイロン66、さらに高温での強度および剛性の向上のため、ガラス繊維と、無機物を強化したナイロン66の各鼓形ウォームホイールを用い、ガラス繊維等を強化した場合の負荷能力および耐摩耗性に及ぼす効果について、実験的に検討した。

2. 試料歯車

試料ウォームギヤのウォームは切削品とし、軸方向モジュール：1、条数：1、ピッチ円直径：16 mm、進み角3°34'35"、工具圧力角：20°のJIS 3形に準拠した円筒ウォームとした。鼓形ウォームホイール(ホイールという)の諸元は、歯数：30枚、ピッチ円直径：30 mm、歯幅：10 mmとした。ホイール材質は一般射出成形用の熱安定化処理をした非強化ナイロン66(ナイロン66：N 66、以下非強化ナイロンという)、ガラス短繊維を33 wt.%充てんして強化したナイロン66(ガラス繊維強化ナイロン)およびガラス短繊維を10 wt.%と無機物を30 wt.%を充てんし、強化したナイロン66(ガラス繊維および無機物強化ナイロン)の計

* 原稿受付 平成6年2月17日。

*¹ 正員、青山学院大学理工学部 (〒157 東京都世田谷区千歳台6-16-1)。

*² デュポン(株) (〒223 横浜市港北区新吉田町4997)。

*³ 三陽プレジジョン(株) (〒140 東京都大田区京浜島2-21-5)。

3種類とした。表1に、おもな機械的、熱的性質を示す。3種類の試料ホイールは、いずれも実験試料ホイール用に製作した同一金型により、射出成形して製作した。ウォームの材質はS45Cとし、実験前の切削時の油分を除去するため、アセトンにより入念に洗浄した。

3. 実験装置と条件

実験には、図1に示す新しく設計製作した電気動力計を用いた動力吸収式ウォームギヤ強度試験機を用いた。本試験機の容量は、許容トルク約500 N・cm、回転数0～2500 rpmであり、中心間距離は、約20～50 mmの間で、任意に変えることができる。

実験における円筒ウォームと各材質の鼓形ホイールの中心間距離は、鼓形ホイールの熱膨張等を考慮し、23 mm+200 μ mとした。そして実験は、回転数2500 rpm、トルクは実用域に近い値の100 N・cm、50.0 N・cm、25.0 N・cm、12.5 N・cm、の4とおりについて、無潤滑の下で連続運転で行った。トルク100 N・cmについては、各材料とも2回の実験を行い、再現性を確認し、必要に応じて他の条件の下でも実験した。また実験は実際の使用状況等を考慮し、破壊の起こらない場合は、ウォームの積算回転数で 10^7 まで行った。運転中には、歯先面温度を赤外線放射温度計を用いて測定し、データレコーダに記録した。実験雰囲気温度は、

表1 試料ウォームホイール材料の熱的および機械的性質

	N 66	Glass fiber reinforced N66	Glass fiber & inorganic material reinforced N66
Melting point $^{\circ}$ C, ASTM D789, Dry as mold	255	255	259
Bending strength MPa, ASTM D790, 23 $^{\circ}$ C Dry as mold	127	262	204
Bending elastic modulus MPa, ASTM D790, 50%RH, 23 $^{\circ}$ C	1205	6200	4140

図1 動力吸収式ウォームギヤ強度試験機

23 $\pm$ 2 $^{\circ}$ Cとした。なお、ホイールの耐久性については、歯が破壊し動力が伝達されなくなった時点を寿命とし、各試料間の比較検討をした。

4. 実験結果と考察

4.1 歯先面温度 ウォームギヤの動力伝達機構は、おもに歯面の滑り接触によるため、プラスチックホイールでは、平歯車やはずば歯車等に比べ、歯の温度は、上昇しやすいことが考えられ、強度の低下が大きいことが予想される⁽⁶⁾。

図2に、非強化ナイロン鼓形ホイールのウォームの積算回転数に対する歯先面温度を各トルクについて示す。図2より、温度上昇は、トルク100、50、25 N・cmでは急激で、実験開始後間もなく170～190 $^{\circ}$ Cに達し、歯の軟化、溶融により、破壊した。12.5 N・cmでは、温度は約115 $^{\circ}$ Cに達した後、緩やかな上昇を続けた。破壊した場合の歯先面温度の、約170～190 $^{\circ}$ Cは、既報⁽⁷⁾のポリアセタール・ホモポリマの100 N・cmでは、140 $^{\circ}$ C付近で破壊したのに比べ高く、本試料は、高温強度に優るといえる。また、ポリアセタール・ホモポリマに比べ、温度上昇こう配は急であり、摩擦係数が高いことが推定できる⁽⁷⁾。

図3は、ガラス繊維強化ナイロンホイールの場合である。本試料での温度上昇は、非強化ナイロンホイールに比べ、非常に特徴的である。いずれのトルクでも、実験開始後間もなく、ウォーム積算回転数で、2～3 $\times 10^4$ 付近に温度のピークがあり、下降後ある一定区間ほぼ一定の温度となり、その後再び5～10 $^{\circ}$ C上昇した。また、このピークはトルクが大きいとわずかではあるが、早くなる傾向がみられた。ピーク時の温度は、各トルクとも、ほぼ同程度で、170～180 $^{\circ}$ Cの間であった。このおもな理由として、歯の表面近くのガラス繊維

図2 非強化ナイロンウォームホイールの歯先面温度

維が摩擦により、あるいは摩擦発熱による母材の表面層の軟化により、トルクが大きいと早く、小さいと遅く表面に露出し、歯先面温度が $170\sim 180^{\circ}\text{C}$ 付近で繊維の露出が最も多くなり、摩擦はナイロンと鋼との凝着性の強い摩擦からガラスと鋼の摩擦へと移行し、摩擦係数が低下し、温度が急低下したものと考えられる(後述4・3節参照)。温度の低下後は、摩擦は、ガラス繊維とS45Cとの担う割合が多くなり、発生熱は、ナイロンを溶融するために消費され、また高温下での繰返し摩擦により、ナイロンが劣化し、摩擦係数が低くなること等により、温度上昇が起こらなくなったと考えられる。また温度上昇には、ホイール材の相手ウォーム歯への移着等による摩擦面性状の変化が、複雑に関与しているものと考えられる。この現象に関しては、本ホイールが実機に使用されていく場合の伝達効率、歯の摩耗および耐久性等を考慮したガラス繊維等の適正な充てん量を決定する上で、非常に重要であると考えられるが、現象が複雑であるため、本論文ではある程度の推論にとどめ、今後あらためて、詳細な検討を進める予定である。

図4は、ガラス繊維および無機物強化ナイロンホイールの温度上昇の状態を示す。 $100\text{ N}\cdot\text{cm}$ では、2回の実験とも、ウォーム積算回転数 $1\sim 3\times 10^4$ の間で 210°C を超えて破壊した。 $50\text{ N}\cdot\text{cm}$ では、最高 180°C を超えたが破壊せず、その後温度は急激に下降した後、細かい上昇、下降を繰返しており、不安定であった。これは、摩耗粉の生成、付着、離脱を繰返しているためと考えられる。 $25\text{ N}\cdot\text{cm}$ および $12.5\text{ N}\cdot\text{cm}$ では、約 3×10^4 付近で最高温度に達した後、緩やかな下降をし、 $4\sim 7\times 10^6$ 回付近から再び上昇した。 $100\text{ N}\cdot\text{cm}$ および $50\text{ N}\cdot\text{cm}$ の結果から、本材料の高温強度は高いことを示す。また、本材料は、図2の非強化ナイロンの場合

と同一トルクで比較すると、特に 12.5 および $25\text{ N}\cdot\text{cm}$ の低トルクで温度上昇は低く、低トルクでの摩擦係数は非強化ナイロンより小さいことが推定される。

以上、3種類の試料ホイールのウォームの積算回転数に対する温度上昇の過程をみると、各トルクとも積算回転数 1×10^5 付近まで温度は急激な上昇をし、上昇途中でいく例かは破壊した。破壊しなかった場合は、以後いったん下降し、あるいはそのまま緩やかな上昇または下降となった。この初期における温度上昇は、歯の摩擦発熱、歯およびホイール本体の蓄熱および放熱が関係したなじみの過程での現象と考えられる。

4・2 材料による耐久性比較 射出成形ポリアセタール・ホモポリマの鼓形および円筒形両ホイールの耐久性について比較すると、円筒形では、接触面積が小さく、高い接触応力を受け、かつ熱伝導率の低い材料であることから、接触面近傍の部分的な破壊が大きく影響し、トルクの大きいほうで、鼓形ホイールの耐久性が優ることが認められている⁽⁷⁾。

図4 ガラス繊維および無機物強化ナイロン
ウォームホイールの歯先面温度

図3 ガラス繊維強化ナイロンウォーム
ホイールの歯先面温度

図5 各種材料ホイールの耐久性比較

図5に、実験による各材料のホイールの各トルクに対する歯の破壊点を、ウォームの積算回転数に対してプロットして示す。プロット点は図2～4に示した以外に再現性を確認するため、追加実験をした値も示してある。図5より、トルク $100 \text{ N}\cdot\text{cm}$ では、ガラス繊維強化ナイロンホイールが最も耐久性があり、続いてガラス繊維および無機物強化ホイールで、そして非強化ナイロンホイールの順であった。これら、材料間の耐久性の相違は、おもに実験における上昇温度と、高温における材料強度の違いによる。 $50 \text{ N}\cdot\text{cm}$ では、ガラス繊維および無機物強化ナイロンホイールの場合が、最も耐久性があり、続いてガラス繊維強化ナイロンホイールであった。実験後の両者の状態をみると、溶融あるいは、高温による劣化等により、側面に押出された(摩耗)量は、ガラス繊維および無機物強化ナイロンホイールのほうが少なかったことから、本材料の融点が高いこと、またこれによる高温での耐摩耗性が優れていることが、耐久性に有利に作用したものと考えられる。表1に示した融点は、フィッシャージョーンズ法で測定した値である。非強化ナイロンホイールでは、最も早く破壊した。強化材入り2種類のホイールでは、温度の高い高トルク側において、耐久性の向上が顕著に認められる。 $25 \text{ N}\cdot\text{cm}$ では、非強化ナイロンホイールのみが 10^7 以前に破壊した。 $12.5 \text{ N}\cdot\text{cm}$ では、すべての材料での実験とも、 10^7 を超えた。

図6(a), (b), (c)に各種材料によるホイールの実験後の状態を示す。図6(a)は非強化、図6(b)はガラス繊維強化、図6(c)はガラス繊維および無機物強化のおおののナイロンホイールである。上段に示

図6 実験後の試料ウォームホイール
(上段: $100 \text{ N}\cdot\text{cm}$, 3種類とも破壊,
下段: $12.5 \text{ N}\cdot\text{cm}$, 3種類とも破壊なし)

したトルク $100 \text{ N}\cdot\text{cm}$ では、すべて破壊した場合で、破壊の形態は、3種類とも、摩擦発熱による高温のため、歯は溶融し、側面に押出されての破壊であり、曲げによる破壊はみられなかった。下段の $12.5 \text{ N}\cdot\text{cm}$ では、 10^7 まで3種類とも、破壊しなかった場合である。非強化ナイロンホイールの $50 \text{ N}\cdot\text{cm}$ および $25 \text{ N}\cdot\text{cm}$ では溶融による破壊であった。強化材入りの2種類では、トルク $75 \text{ N}\cdot\text{cm}$ および $50 \text{ N}\cdot\text{cm}$ とも破壊した場合は、高温により摩耗が促進されたため、歯厚が減少し、これによる応力の増大および温度上昇による曲げ強さの低下等の複合的な破壊であった。

以上のことから、耐久性に及ぼす最も大きな要因として、本研究のような無潤滑で、連続運転による実験では、歯面の摩擦発熱による温度上昇が大きいと、特に高温における耐摩耗性があげられる。そして、高トルクにおいて、溶融破壊をした以外は、高温での曲げ強さおよび曲げ疲労強度等が、ホイールの耐久性に影響していると考えられる。

4.3 表面損傷および歯の摩耗 本実験の3種類の試料中最も特徴的な温度上昇がみられたガラス繊維強化ナイロンホイールの歯面を主に、摩擦回数を追って観察した。本実験は、トルク $12.5 \text{ N}\cdot\text{cm}$ 、回転数 2500 rpm とし、各実験とも、新しい試料を用いて行った。観察は、ノマルスキー形微分干涉顕微鏡により、各歯のピッチ線付近をねらって行った。

図7(a), (b), (c), (d), (e)に運転初期から、実験終了までの表面損傷、摩耗の進行状態およびガラス繊維の状態等を、図3のホイールの温度的に特徴のみられた積算回転数の位置について示す。図7(a)はホイール歯が33回(ウォームの積算回転数では 1×10^3)摩擦された歯面で、摩擦面および充てんされたガラス繊維とも、射出成形時とほとんど変わらない状態で観察されたが、若干の摩耗のこん跡が認められ、摩耗はすでに進行していることが確認された。図7(b)は同上333回(同 1×10^4)摩擦された歯面で、表面のナイロンは軟化し、ガラス繊維はナイロン表面に埋没し、摩擦はナイロンとS45Cウォームとで行われている。図7(c)の666回(同 2×10^4)の摩擦では、ごく表面層の温度はさらに上昇し、軟化するため、表面に非常に多くのガラス繊維が露出し、繊維は滑り方向に対し、直角に近い方向に配向していることが特に注目される。ここでは、温度上昇のほぼ最高点であり、温度は間もなく急激に低下するが、これは、摩擦はナイロンと鋼との凝着性の強い摩擦から、ガラスと鋼の摩擦へと移行し、摩擦係数が低下したためと考えられる。また、ガラス繊維は滑り方向に対し、直角に配向しているの

図7 ガラス繊維強化ホイール歯の摩擦回数と摩擦歯面の変化 [トルク: 12.5 N・cm]

で、ガラス繊維による転がり摩擦の影響も考えられる⁽⁸⁾。図7(d)の 3.33×10^4 回(同 1×10^6)の摩擦では、まだガラス繊維は多くみられるが、部分的に焼きつきが生じている。図7(e)の 3.33×10^5 回(同 1×10^7)の摩擦では、温度が安定した状態であり、ガラス繊維は砕かれ、母材ナイロンの表面層と混在している。これらのことから、初期においては、歯の摩擦面の状態は、充てんされたガラス繊維等により、刻々と変化しており、摩擦係数もこれにつれ、変化していることが推定できる。ガラス繊維および無機物強化ホイールでは、ガラス繊維は少なく、摩擦面のほぼ全面に、摩耗粉を巻込み、引き延ばされて付着しているのが観察された。以上の強化材入りの2種類では、歯面は高温下での繰返し摩擦のため、トルクにより差はあるが、部分的な焼き付きにより、茶褐色に変色していた。非強化ナイロン試料では、初期から終了まで、前二者に比べ、摩耗粉等の付着は少なく、肉眼では光沢があり、正常摩耗の様相であった。

図8(a), (b), (c)にトルク 25 N・cmの実験終了後の歯の中央部の歯直角断面をとり、摩耗による歯形のくずれ、摩耗深さ等をプロファイルプロジェクトで観察した結果を示す。各歯とも右側面が、摩擦された歯面である。図8はそれぞれ非強化、ガラス繊維強化、ガラス繊維および無機物強化のおおののナイロンホイールの歯形を示す。図8(a)では、ホイールはウォームの積算回転数で 10^7 以前の 9.3×10^4 で破壊した場合の破壊した部分以外の残存した歯で、歯は摩耗し、やせている。これは、トルクが大きき、温度が高くなり軟化、溶融し、摩耗進行が極端に早いことを示す。図8(b)は摩耗は少ないが、歯形のくずれは比較的大きい。図8(c)は図8(b)に比べ、摩耗量は多いが、歯形のくずれは少なく、原形の歯形に対して、ほぼ平行に摩耗している。このように、トルク 25 N・cmでは、

図8 実験終了後の歯形 [トルク: 25 N・cm]

図9 実験終了後の歯形 [トルク: 12.5 N・cm]

ガラス繊維強化ナイロンホイールが、最も耐摩耗性に優れており、続いてガラス繊維および無機物強化ホイールであり、非強化ナイロンホイールの摩耗が最も多い。

図9(a), (b), (c)に、図8の場合と同様トルク 12.5 N・cmの歯直角断面の摩耗歯形を示す。図9(a)では、わずかな摩耗が認められる。図9(b)は図9(a)と同様摩耗は少ないが、歯形のくずれがわずかに認められる。図9(c)では、摩耗は比較的多く、かつ歯形のくずれも大きい。

以上、トルク 25 N・cm および 12.5 N・cm の2例について、摩耗歯形を観察した結果、耐摩耗性に対しての強化材の充てん効果は、トルクが大きいくほど顕著であった。また、低トルクでは、ガラス繊維および無機物強化ナイロンホイールの摩耗は、非強化ナイロンホイールより多く、低トルクでは、ガラス繊維および無機物で強化することは、本実験に用いた試料の充てん量では、耐摩耗性の向上に対しては逆効果となる。

図10(a), (b), (c)にトルク 12.5 N・cmのS45

図 10 実験終了後の S 45 C 円筒ウォーム歯の摩擦面 [トルク: 12.5 N・cm]

C 円筒ウォーム歯作用歯面の摩擦面を示す。各図とも縦方向全体が全歯丈を示す。図 10(a) は非強化ナイロンホイールを相手とした場合で、肉眼では光沢のある表面であり、損傷はほとんど生じていない。図 10(b) はガラス繊維強化ナイロンを相手としたときの摩擦面で、ガラス繊維強化ナイロンが歯のほぼ全面に移着・溶着している。また移着・溶着のない部分をみると、摩擦歯面は、相手ホイールの充てんされた硬いガラス繊維のため、激しい損傷をうけ、深い摩耗こんが生じている。図 10(c) はガラス繊維および無機物強化ナイロンホイールを相手とした場合で、移着・溶着は図 10(b) よりも少ないが、ウォームは図 10(b) の場合と同様の激しい損傷をうけ、深い摩耗こんが生じている。図 10(b), (c) から、ホイール強化のため、充てんしたガラス繊維および無機物は、歯自体の耐久性向上の効果は大きいですが、S 45 C ウォームを損傷し、ホイールの摩耗を促進させ、またウォーム歯への移着・溶着が多く、ホイールの歯形のくずれの原因ともなっていることがわかる。

5. 結 言

新しく開発された一体形射出成形プラスチック鼓形ウォームホイールの歯の温度上昇、耐久性および摩耗等に関して、非強化ナイロン 66 試料、ナイロン 66 にガラス繊維を 33 wt.% 充てんし、強化した試料およびナイロン 66 にガラス繊維を 10 wt.% と無機物を 30 wt.% 充てんし、強化した 3 種類のおおのの鼓形ウォームホイールを S 45 C 円筒ウォームで駆動し、回転数を一定とし、トルクを種々変えて無潤滑の下で、連続運転により実験を行った。その結果以下のようなことがわかった。

(1) ウォームホイール歯の温度上昇には、強化のため充てんしたガラス繊維および無機物等の影響は大きい。

(2) 非強化のナイロン 66 ホイールでは、低トルクで摩耗は少なく、耐久性もあるが、高トルクで、温度が高いと摩耗は急激に多くなり、耐久性に劣る。

(3) ナイロン 66 にガラス繊維を充てんし、強化すると、耐久性、高温強度は大きく向上し、その充てん効果は大きいですが、摩耗は比較的多い。

最後に、本研究遂行に当たり、多大なご協力をいただいたデュポン(株)および三陽プレジジョン(株)、また金型製作に当たり、多くの助言をいただいたチバダイス(株)上野清氏に深謝す。

文 献

- (1) 小島・小島, 公開特許公報(A), 特開平 6-87141(1994).
- (2) Gebhard, E., ほか 1 名, *AANDRIJFTECHNIKE*, 4 (1989), 34.
- (3) Schmidt, H., *Antriebstechnik*, 24-3(1985), 61.
- (4) MARSHEK, K. M., ほか 1 名, *Wear*, 66(1981), 261.
- (5) 大柳・ほか 4 名, 工学院大学研究報告, 58(1985), 1.
- (6) Bushimata, T. and Iwi, M., *JSPE*, 24-1(1990), 9.
- (7) 武士俣・小島・赤羽, 機講論, No. 933-2(1993-7), 77.
- (8) 武士俣・岩井, 潤滑, 24-7(1979), 56.