歯の加工法の違いによる ポリアセタール歯車の騒音比較*

塚本 尚久^{*1}, 丸山 広樹^{*1}, 三村 博^{*2}

Noise Comparison of Polyacetal Gears Based on Differences of Gear Processing Methods

Naohisa TSUKAMOTO, Hiroki MARUYAMA and Hiroshi MIMURA

The mass production of plastic gears by injection molding has many advantages; however, hobbing has been used in cases where injection molding could not be applied due to economical problems of mold shrinkage in the small-volume production of a wide variety of gears and technical problems in the processing of large-sized thick gears. It has been said that there are differences in the magnitude of noises between injection-molded plastic gears and hobbed plastic gears causing a difference in acoustic characteristics based on the difference of crystallinity of their gear surfaces. In this study, by using a polyacetal gear, and by measuring noises of both gears at each point of time when the properties of their gear surfaces were changed by the wear during a long period of operation, the difference of noises based on the difference of plastic gear processing methods was verified quantitatively based on experimental results.

Key Words: Machine Element, Gear, Plastic Gear, Polyacetal Gear, Injection Molding Gear, Noise

1. 緒 言

プラスチック歯車は素材費が高いものの、射出成形加工で量産できる有利な点があり、製品は安価になる利点がある。しかしながら多品種少量生産では金型代の関係から射出成形加工では生産できず、また大形厚肉歯車は技術的にも射出成形加工は困難である。このような場合には圧縮成形または射出成形加工された板材並びに棒材をホブ切り加工して歯車を製作することが多い。

プラスチック歯車はこのような加工法の違いによりその歯面の性状に違いが生じることがある。すなわち、射出成形歯車では金型に接する部分が急冷されるため、歯面表層の結晶化度が低くなり、丸棒をホブ切りした歯車では丸棒の表層の結晶化度の低い部分を切削で除去するため、結晶化度の高い部分が歯面になる。

ところで、プラスチック歯車は射出成形加工とホブ切り加工とでその騒音が聴覚で感覚的に異なることがわかる(ホブ切り歯車のほうが騒音が大きい)。著者ら

はこの騒音の違いが上記のような歯面表層の結晶化度の違いに起因するものと推測し、これを確認する実験を行った。実験ではポリアセタール歯車を射出成形とホブ切りで同程度の精度に加工し、新品の時点、運転により射出成形歯車とホブ切り歯車の歯面粗さが同程度になった時点および射出成形歯車の歯面の結晶化度の低い部分が摩耗により除去された時点において両歯車の騒音を測定した。本報ではこの実験結果を比較検討し、従来感覚的に論じられていた歯車の加工法の違いによる騒音の違いを定量的に検証した。

2. 実験装置および実験方法

2・1 歯車試験機 実験(運転試験)には図1に示す中心距離50 mmの動力循環式歯車試験機を用いた。

2・2 使用プラスチック プラスチックは多種多様であるが、試験歯車材には多用されている表1に示す特性のポリアセタール(コポリマ)⁽¹⁾を用いた。

2・3 試験歯車および相手歯車 試験歯車の仕様を表2、形状と主要部の寸法を図2に示す。①駆動、被動とも射出成形ポリアセタール歯車、②駆動、被動とも射出成形ポリアセタール丸棒からホブ切りした歯車(以下ホブ切りポリアセタール歯車と呼ぶ)、③駆動が

* 原稿受付 平成6年5月17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)。

射出成形ポリアセタール歯車で被動がホブ切りナイロン(表2に示すMCナイロン)⁽²⁾歯車, ④駆動がホブ切りポリアセタール歯車で被動がホブ切りナイロン歯車, ⑤駆動が射出成形ポリアセタール歯車で被動が研削炭素鋼(S 15 CK, HB=320)歯車, ⑥駆動がホブ切りポリアセタール歯車で被動が研削炭素鋼歯車の6とおりの組合せで実験を行っているので, 材種と加工法の違いで4種類の試験歯車を用いている。

射出成形ポリアセタール歯車の歯面粗さはJIS B 0601の十点平均粗さ(Rz)で1.4~1.6 μm , ホブ切りポリアセタール歯車およびナイロン歯車の歯面粗さは5~6 μm である。これらのプラスチック歯車の精度はいずれもJIS B 1702の4級である。研削炭素鋼歯車の歯面粗さは0.8~1.3 μm で, 精度は2級である。バックラッシュはホブ切りプラスチック歯車に0.075モジ

ュール, 射出成形ポリアセタール歯車に0.08~0.1モジュール, 研削炭素鋼歯車に0.05モジュールそれぞれつけた。

2.4 測定項目と測定方法 歯車の騒音は自由音場⁽³⁾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 オクターブ分析器ならびに自動分析駆動装置によって周波数特性を調べるとともに, 全音圧

表2 試験歯車のおもな仕様

	Driving gear	Driven gear
Module	1	
Standard pressure angle	20°	
Number of teeth	50	50
Addendum modification coefficient	0	0
Diameter of standard pitch circle	50	50
Clearance coefficient	0.25	
Face width	5.5	
Center distance	50	

N.B) A unit of length is mm.

表1 使用プラスチックのおもな特性

Items	Units	Polyacetal	MC nylon
Melting point	°C	165	208
Specific gravity		1.41	1.16
Rockwell hardness	HRM	78	83
Coefficient of friction		0.31	0.17
Coefficient of linear expansion	K ⁻¹	13×10^{-5}	8×10^{-5}
Tensile strength	MPa (kgf/cm ²)	60.27 (615)	72.52 (740)
Bending strength	MPa (kgf/cm ²)	88.20 (900)	109.76 (1120)
Elongation	%	65	50
Young's modulus	GPa (kgf/mm ²)	2.57 (262)	2.84 (290)

表3 実験条件および記号

Number of rotations rpm		500	1000	1400
Materials & Processing				
Driving gear	Driven gear			
P-IM	P-IM	PIM-PIM-1	PIM-PIM-2	PIM-PIM-3
P-H	P-H	P H -P H -1	P H -P H -2	P H -P H -3
P-IM	N-H	PIM-N H -1	PIM-N H-2	PIM-N H -3
P-H	N-H	P H -N H -1	P H -N H-2	P H -N H -3
P-IM	S-G	PIM-S G -1	PIM-S G-2	PIM-S G -3
P-H	S-G	P H -S G -1	P H -S G-2	P H -S G -3

P: Polyacetal, N: Nylon, S: Carbon steel

IM: Injection molding, H: Hobbing, G: Grinding

① Test gear (Driving gear), ② Test gear (Driven gear), ③, ④ Circulating gear, ⑤ V-belt, ⑥ V-belt wheel, ⑦ Load coupling, ⑧ Slipping, ⑨ Bearing, ⑩ Surface plate

図1 歯車試験機

図2 試験歯車の形状および主要部の寸法

(All pass)を測定した⁽⁴⁾。

2・5 実験条件 各組合せの歯車ともトルク(入力)1.078 N・m(0.11 kgf・m)のもとに表3のように回転数(rpm)を3種類変えて実験を行った。騒音の測定は、各歯車とも新品の時点、射出成形ポリアセタール歯車とホブ切りポリアセタール歯車の歯面粗さが2.5 μm 程度になった時点および射出成形ポリアセタール歯車の結晶化度の低い部分が摩耗により除去された時点において行った。なお実験中の歯車の運転はすべて無潤滑で行っている。

3. 試験歯車の歯面を同状態にする運転

図3(a)の写真は射出成形ポリアセタール歯車の新品歯車を切断し、歯面から歯の内部にかけての結晶化

図3 射出成形ポリアセタール歯車の歯の結晶状態

の状態を顕微鏡で撮影したものである。ここでは、歯の表層部 H では結晶粒がよく確認できないが、ほぼ M より内部では明りょうに結晶粒が形成されていることがわかる。

図4はホブ切りポリアセタール歯車の新品歯車を上記の図3のように切断し、顕微鏡で撮影した写真である。この場合は図3と異なり歯の表層部でも結晶粒のはっきり確認できる。

本報では図3(a)の H および M 部の結晶化度の低い部分を摩耗させて除去するために、ポリアセタール歯車を無潤滑で長時間運転した。ここでの相手歯車にはホブ切り炭素鋼歯車(S45C, HB=180, 精度4級)をなじみ運転(ギヤ油使用)し、歯面粗さが2 μm 程度になったものを用いている。運転中のトルク(入力側)は0.249 N・m(0.03 kgf・m)、回転数は500 rpmである。この運転では歯が摩耗しても歯形誤差が生じないように注意している。なお、ホブ切りポリアセタール歯車も所定の歯面粗さと歯形誤差を得るために射出成形ポリアセタール歯車と同じように長時間運転を行った。

図5および6に上記の実験結果の一例を示す。各図の(a)が騒音実験で使用する駆動歯車で、(b)が被動歯車である。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

図4 ホブ切りポリアセタール歯車の歯の結晶状態 ($N_T = 0$)

耗深さ(厚さ)を表している⁽⁵⁾。

総回転数(積算回転数) $N_T \approx 1.5 \times 10^6$ では射出成形およびホブ切りポリアセタール歯車はともに歯面粗さが $2.5 \mu\text{m}$ 程度になった。また総回転数に若干のばらつきはあるが、 $N_T \approx 6 \times 10^6$ で射出成形およびホブ切りポリアセタール歯車の歯先部分を除く歯面は $50 \mu\text{m}$ 強摩耗している(図5, 6)。この程度の摩耗量であれば、射出成形ポリアセタール歯車においては歯面表層の結晶化度の低い部分が除去される。これを確認したのが図3(b)である。これは射出成形ポリアセタール歯車の $N_T \approx 6 \times 10^6$ 時の写真である。図3(a)との比較でわかるように $N_T \approx 6 \times 10^6$ で結晶化度の低い部分が摩耗によりほとんど除去されている。しかしこの摩耗により射出成形ならびにホブ切りポリアセタール歯車の精度は5級になった。

図5 射出成形ポリアセタール歯車の摩耗深さおよび歯形変化

図6 ホブ切りポリアセタール歯車の摩耗深さおよび歯形変化

4. 実験結果および考察

4・1 新品歯車の騒音 図7(a)~(c)に新品射出成形ポリアセタール歯車同士の組合せおよび新品ホブ切りポリアセタール歯車同士の組合せで運転した場合の騒音(歯車音)の周波数特性を示す。各図には歯車のかみあい周波数 f_z とその倍音および全音圧レベルも示してある。

図7を見ると 0.2 kHz 以下の低周波数域では、射出成形ポリアセタール歯車同士の組合せとホブ切りポリアセタール歯車同士の組合せの騒音の音圧レベルに明確な差異が現れていない(プラスチック歯車では材質等が異なってもこのような低周波数域の騒音にあまり明確な差が現れない)⁽⁶⁾ が、 0.2 kHz 近傍を超える高周波数域では、各回転数ともほぼ全周波数域でホブ切りポリアセタール歯車同士の組合せよりも射出成形

(a) 500 rpm

(b) 1000 rpm

(c) 1400 rpm

図7 新品歯車の騒音の周波数特性

図 8 新品歯車の騒音の全音圧レベルの比較

ポリアセタール歯車同士の組合せのほうが明らかに音圧レベルは低くなっていることがわかる。

ただし、上記のように両者の音圧レベルの値に差は見られるが、騒音の周波数特性の定性的傾向にはほとんど違いは見られない。すなわち、両者ともいずれの回転数(rpm)においても f_z では音圧レベルが高く、それが顕著に現れ、また $2 \sim 3$ kHz を超える高周波数域の音圧レベルが著しく低くなっている。これはプラスチック歯車における騒音の周波数特性の特徴⁽⁶⁾であって、本研究においてもこのことについては同様の傾向が現れたということである。

次に図 8 (a) は図 7 における射出成形ポリアセタール歯車同士の組合せとホブ切りポリアセタール歯車同士の組合せの全音圧レベルを回転数で整理したものである。また図 8 (b) は射出成形ポリアセタール歯車とホブ切りナイロン歯車の組合せおよびホブ切りポリアセタール歯車とホブ切りナイロン歯車の組合せの全音圧レベルを、図 8 (c) は射出成形ポリアセタール歯車と研削炭素鋼歯車の組合せおよびホブ切りポリアセタール歯車と研削炭素鋼歯車の組合せの全音圧レベルを図 8 (a) と同様に整理したものである。

図 8 (a)～(c) のようにポリアセタール歯車の相手歯車の材種がいずれであっても、射出成形ポリアセタール歯車との組合せのほうがホブ切りポリアセタール歯車との組合せよりも全音圧レベルは低くなることがわかる。なお図 8 (b) および (c) の各歯車の組合せにおける騒音の周波数特性はいずれも図 7 と同じ傾向であったので、これらを本論では示さない。

4.2 $N_T \approx 1.5 \times 10^6$ 時の騒音 射出成形ポリアセタール歯車およびホブ切りポリアセタール歯車の歯面

 図 9 $N_T \approx 1.5 \times 10^6$ 時の周波数特性の一例
(PIM-PIM および PH-PH, 1000 rpm)

粗さは $N_T \approx 1.5 \times 10^6$ の運転においていずれも $2.5 \mu\text{m}$ 程度になった。新品歯車と異なり両歯車の歯面粗さが同状態になったことから、この時点の騒音を新品歯車の場合と同じ条件で測定してみた。

図 9 に測定結果の一例として、射出成形ポリアセタール歯車同士の組合せとホブ切りポリアセタール歯車同士の組合せの 1000 rpm における騒音の周波数特性を示す。この図は図 7 (b) の運転を $N_T \approx 1.5 \times 10^6$ まで継続したときの騒音の測定結果であることから、ここで両図を比較してみる。いずれの歯車の組合せにおいても両図間で周波数特性の定性的傾向に特に違いは見られないが、それぞれの歯車の組合せにおける音圧レベルの差は新品のときよりも $N_T \approx 1.5 \times 10^6$ 時のほうが各周波数帯域において若干小さくなっていることがわかる。

次に表 3 に示したすべての歯車の組合せにおいて、それぞれの騒音の全音圧レベルを図 8 と同様に整理したものを図 10 に示す。図 10 の (a)～(c) はそれぞれ図 8 の (a)～(c) と対応している。これらの図の比較

図 10 $N_T \approx 1.5 \times 10^6$ 時の騒音の全音圧レベルの比較

より、相手歯車の材種がいずれであっても新品歯車の場合と同じく、射出成形ポリアセタール歯車との組合せのほうがホブ切りポリアセタール歯車との組合せよりも全音圧レベルは低いことが確認できる。ただし、その差は新品歯車の場合よりも小さくなっている。

4.3 $N_T \approx 6 \times 10^6$ 時の騒音 3章で述べたように射出成形ポリアセタール歯車を $N_T \approx 6 \times 10^6$ まで運転すると、歯は図5のように摩耗し、表層の結晶化度の低い部分がほとんど除去された状態になる。そこでこの時点のそれぞれの歯車の組合せにおける騒音を比較してみる。

図11(a)は射出成形ポリアセタール歯車同士の組合せとホブ切りポリアセタール歯車同士の組合せ、図11(b)は射出成形ポリアセタール歯車とホブ切りナイロン歯車の組合せおよびホブ切りポリアセタール歯車とホブ切りナイロン歯車の組合せ、図11(c)は射出成形ポリアセタール歯車と研削炭素鋼歯車の組合せおよびホブ切りポリアセタール歯車と研削炭素鋼歯車の組合せの1000 rpmにおける騒音の周波数特性を示したものである。図11(a)は図7(b)および図9と対応している。

これらの図の比較により、 $N_T \approx 6 \times 10^6$ のときの射出成形ポリアセタール歯車との組合せおよびホブ切りポリアセタール歯車との組合せの騒音の周波数特性の特徴がわかる。すなわち $N_T \approx 6 \times 10^6$ 時においても新品歯車および $N_T \approx 1.5 \times 10^6$ 時の騒音で述べたように、両者の周波数特性の定性的傾向に特に違いは見られない。ただし、この時点になると、図11(a)のように射出成形ポリアセタール歯車同士の組合せとホブ切りポリアセタール歯車同士の組合せとの音圧レベルの差が

図 11 $N_T \approx 6 \times 10^6$ 時の周波数特性の一例 (1000 rpm)

極めて小さくなり(周波数帯域によっては前者の音圧レベルのほうが後者のそれよりも高くなることもある), 新品歯車のように両者間に明確な優位差は現れてこない。このことは図 11(b), (c)を見てわかるように, 相手歯車の材種が違っていても同様のことがいえる。

次にそれぞれの歯車の組合せにおける騒音の全音圧レベルを図 12(a)~(c)のように回転数で整理し, これらの各図をそれぞれ図 8(a)~(c)および図

10(a)~(c)と対比させてみると, 射出成形ポリアセタール歯車との組合せとホブ切りポリアセタール歯車との組合せの全音圧レベルの差は相手歯車の材種の違いに関係なく, $N_T \approx 6 \times 10^6$ 時になるとほとんどなくなっていることがわかる。つまり, 射出成形ポリアセタール歯車の騒音は歯面表層の結晶化度の低い部分が除去されてしまうと, ホブ切りポリアセタール歯車の騒音と同レベルになるということである。

ここで図 13 のように各歯車の組合せにおける運

図 12 $N_T \approx 6 \times 10^6$ 時の騒音の全音圧レベルの比較

図 13 運転経時と騒音の全音圧レベルの変化率

経時に伴う全音圧レベルの変化を比較してみる。この図 13 の縦軸は新品歯車の全音圧レベル(S_0)から各 N_T 時の全音圧レベル(S_n)に変化した量を全音圧レベルの変化率 $\lambda = [(S_n - S_0)/S_0] \times 100(\%)$ として表している。

図 13 では 1 000 rpm の $N_T \approx 1.5 \times 10^6$ 時のように一部に若干異なるところもあるが、全音圧レベルの変化率 λ が最も大きいのは射出成形ポリアセタール歯車同士の組合せである。射出成形ポリアセタール歯車は新品時には歯面粗さが小さく、しかも歯面表層に結晶化度の低い部分が存在する。しかしこれを長時間運転すると歯面は荒れ、また結晶化度の低い部分も摩耗により除去される。このような歯面の性状の変化が騒音を増大させる要因になっており、この組合せのように駆動、被動の両歯車において歯面の性状が変化する場合に λ の値が最も大きくなったものと考えられる。

次に λ の値が大きいのは射出成形ポリアセタール歯車とホブ切りナイロン歯車および研削炭素鋼歯車の組合せである。これらの場合も上記と同じ理由で λ の値は大きくなるが、これらの組合せにおいては相手歯車の歯面の性状が新品時とほとんど変わらないことから、 λ の値は射出成形ポリアセタール歯車同士の組合せほど大きくならない。

ホブ切りポリアセタール歯車との組合せの場合はいずれの材種の歯車においても射出成形ポリアセタール歯車との組合せの場合に比べ λ の値は極めて小さい。すなわち、この歯車との組合せにおいては長時間運転しても全音圧レベルは新品時とあまり変わらないということである。

5. 結 言

従来聴覚での感覚で論じていた射出成形プラスチック

歯車とホブ切りプラスチック歯車の騒音の違いをポリアセタール歯車を用いて実験によって検証した結果を要約すると次のようになる。

(1) 射出成形ポリアセタール歯車とホブ切りポリアセタール歯車の騒音の周波数特性の定性的傾向にはほとんど違いが見られなかった。このことは組合せの歯車の材種が変わっても、また長時間運転を行った時点でも同様であった。

(2) 運転初期の時点ではいずれの材種の歯車との組合せにおいても射出成形ポリアセタール歯車はホブ切りポリアセタール歯車よりも全音圧レベルが小さくなった。しかし長時間運転し、歯面表層の結晶化度の低い部分が摩耗により除去された時点では全音圧レベルはホブ切りポリアセタール歯車とほとんど同程度になった。

(3) 射出成形ポリアセタール歯車は歯面表層の結晶化度の低い部分が摩耗により除去されると全音圧レベルが大きくなったが、その変化率 λ は例えば本実験の $N_T \approx 6 \times 10^6$ 時におけるポリアセタール歯車同士の組合せの 500, 1 000, 1 400 rpm の場合ではそれぞれ 6% 強, 8% 弱, 14% 強であった。

(4) ホブ切りポリアセタール歯車との組合せでは長時間運転しても λ の値は小さかった(歯車精度の低下によるもの、または測定のはらつきの程度)。

文 献

- (1) 三菱ガス化学(株), ユピタル技術資料, (1988), 8.
- (2) 日本ポリベンコ(株), MC ナイロン技術資料, (1974), 3.
- (3) 日本工業規格協会編, 騒音レベル測定法解説, (1966), 5.
- (4) 塚本・ほか 2 名, 機論, 56-527, C(1990), 1906.
- (5) 塚本, 機講論, No. 800-15(1980-8), 55.
- (6) 塚本・ほか 2 名, 機論, 59-558, C(1993), 548.