

## 無潤滑低騒音歯車の開発\*

長屋幸助<sup>\*1</sup>, 高橋則昭<sup>\*2</sup>, 戸上和幸<sup>\*3</sup>  
久米原宏之<sup>\*1</sup>, 大西章雄<sup>\*4</sup>

## Low Noise Gears without Lubrication

Kosuke NAGAYA<sup>\*5</sup>, Noriaki TAKAHASHI, Kazuyuki TOGAMI,  
Hiroyuki KUMEHARA and Akio OHNISI<sup>\*5</sup> Department of Mechanical Engineering, Gunma University,  
1-5-1 Tenjincho, Kiryu-shi, Gunma, 376-8515 Japan

A low noise gear without lubrication is presented, which is made of COPNA material involving Graphite. The noise between steel gear and the present gear is investigated experimentally. The experiment is also performed to the gear mechanism using ordinary plastic gears. It is clarified that the noise from the gears is small as compared with ordinary plastic gears without lubrication. Especially, the noise of the present gear is significantly small when the gear is rotated under a load. The mechanism of noise suppression in our gear is investigated.

**Key Words:** Gear, Low Noise, Non-Lubrication, High Speed, Copna, Graphite, Plastic

## 1. 緒言

近年コンピュータ機器の発展に伴い, その周辺機器に用いられるプリンタをはじめとする事務用機器が急速に増加している。これらの機器は人間の居住する空間に置かれるため, 潤滑による環境汚染が極度に嫌われるため, 無潤滑である必要がある。そのため, ある程度潤滑性のあるプラスチック歯車が駆動装置の減速部に用いられている。しかし, 近時作業効率をあげるため, これら機器の駆動部速度の増大が求められている。機器の速度を増大した場合, 歯面摩擦により温度が増大する。プラスチック歯車は元来熱には弱いため, 温度が上昇すると変形が起こるのみならず, 接触部の摩耗が大きくなる。また, そこまでの温度にならない領域でも, 潤滑があまり良くないため, 歯面接触音が増大し, 騒音による環境破壊が著しい。したがって, プラスチック歯車は, 無潤滑で使用できるものの, 高速回転に使用することは困難である。

本研究は, 主として事務用機器に用いられる軽量高速低騒音無潤滑歯車を開発することを目的とする。従来のプラスチック歯車では, 前述のような欠点があり, それを用いた高速化は困難である。そこで, 本研究では, 新たに COPNA 樹脂に黒鉛を混合した炭素系樹脂に注目し, その材料により作られた歯車と鋼製歯車の組合せを用いることを提案する。本歯車は潤滑特性がプラスチックより良好であるので, もちろん無潤滑で用いることができ, また, 炭素と金属の接触音は耳に柔らかく, 潤滑特性がよいので, 騒音が極度に小さくなる。炭素系歯車については, すでに炭素繊維歯車が開発されているが<sup>(3)</sup>, その目的は強度増加に重点が置かれているため, 高速でかつ無潤滑で使用できるわけではなく, また騒音対策の面からも適切でない。本研究では, 高速で無潤滑, 低騒音の面から新たに COPNA 歯車を開発し, 実用性の観点から, プラスチック歯車との比較検討を行う。

## 2. 歯車の製作および実験装置

事務用機器に用いられる歯車は解放空間で用いられることが多いので, (1) 軽量, (2) 無潤滑, (3) 低騒音, (4) 実用上の強度が要求される。また, 高速化する場合には, これらに加えて, (5) 熱変形温度が大き

\* 原稿受付 2002年5月16日。

<sup>\*1</sup> 正員, 群馬大学工学部(☎376-8515 桐生市天神町1-5-1)。<sup>\*2</sup> 群馬大学大学院学生。<sup>\*3</sup> 群馬大学工学部学生。<sup>\*4</sup> (株)大西ライト工業所(☎379-2206 群馬県佐波郡赤堀町香林1284)。

E-mail: nagaya@me.gunma-u.ac.jp

い、(6)摩擦係数が小さいなどの条件を兼ね備えていることが望ましい。COPNA樹脂は、大谷ら<sup>(1)</sup>により合成されたもので、ナフタレンおよびアルキルナフタレンのいずれか一方または両方が、1環以上の芳香族を介してメチレン結合により結合した基本構造を有する芳香族炭化水素樹脂である。これに黒鉛を添加し、熱硬化させると、極めて潤滑特性の良い材料が得られることが知られている<sup>(2)</sup>。この材料で、COPNA樹脂60重量%、黒鉛40重量%としたとき、摩擦係数は0.26、曲げ強度80.3MPa、熱変形温度は291°Cであり<sup>(2)</sup>、その潤滑特性の良さから、すでに無潤滑ピストンに用いられている。すなわち、本素材を樹脂歯車として用いる場合、上記の(2)、(4)~(6)の条件がほぼ満足されている。一方、密度はプラスチックとほぼ同程度で軽く、(1)の条件も満足する。したがって本研究では、この材料に着目し、主として騒音低減の見地から検討する。まず、COPNA樹脂(60重量%)に黒鉛(40重量%)を添加し、熱成形加工機で直径36mmの本樹脂の丸棒を製作し、それを歯切盤で歯切りした。歯車のモジュールは1.5、歯数は22枚である(以下この歯車をCOPNA歯車と称する)。これと同様の市販のプラスチック歯車と鋼製歯車を用意した。

Table 1 Dimensions of the gears

|                      | Steel gear | COPNA gear | Plastic gear |
|----------------------|------------|------------|--------------|
| Module [mm]          | 1.5        | 1.5        | 1.5          |
| Pressure angle [°]   | 20         | 20         | 20           |
| No. of teeth         | 22         | 22         | 22           |
| Facewidth [mm]       | 15         | 15         | 15           |
| Center distance [mm] | 66         | 66         | 66           |
| Shaft diameter[mm]   | 18         | 18         | 18           |
| Mass [kg]            | 10.2       | 1.8        | 1.4          |

Table 2 Gear profile error

| Material |                                         | Left | Right |
|----------|-----------------------------------------|------|-------|
| Steel    | Total tooth form error( $\mu\text{m}$ ) | 5.1  | 4.0   |
|          | Pressure angle error( $\mu\text{m}$ )   | 1.0  | 0.3   |
|          | Tooth profile error( $\mu\text{m}$ )    | 4.4  | 3.8   |
|          | Grade (JIS)                             | 2    | 1     |
| Plastics | Total tooth form error( $\mu\text{m}$ ) | 21.0 | 16.3  |
|          | Pressure angle error( $\mu\text{m}$ )   | 19.2 | 15.2  |
|          | Tooth profile error( $\mu\text{m}$ )    | 5.1  | 3.5   |
|          | Grade (JIS)                             | 6    | 5     |
| COPNA    | Total tooth form error( $\mu\text{m}$ ) | 14.4 | 17.7  |
|          | Pressure angle error( $\mu\text{m}$ )   | 8.3  | 17.7  |
|          | Tooth profile error( $\mu\text{m}$ )    | 10.4 | 7.7   |
|          | Grade (JIS)                             | 5    | 5     |

これらの歯車の諸元を表1に示した。また、これら歯車の歯形を歯形検査機で測定した結果を表2に示す。表中の誤差は基準となる理論曲線からのずれの平均値を表し、また、圧力角についても角度ではなく、基準線からのずれの距離の平均値を表している。表に示されるように鋼製歯車については、JIS 2級程度であり、プラスチック歯車とCOPNA歯車についての精度はほぼ同様で、JIS 5級程度である。

実験装置は図1に示すように、ドライバ軸Aと、従動軸Bに歯車を取付け、ドライバ側歯車とかみあわせ、それぞれの両端を玉軸受で支持した。ドライバ軸は速度可変の誘導モータで回転させ、非接触回転計により回転数を読み取り、また従動歯車の真横方向に距離20mmの位置に騒音計のマイクを設置し、騒音を測定する。騒音信号はFFTアナライザにも取り込まれ、周波数分析も行えるようにした。実験では、負荷がない場合のみならず、従動軸Bの先端に円板の負荷がある場合(慣性能率=16.32 kg $\cdot$ m<sup>2</sup>)の結果も求めた。

### 3. プラスチック歯車とCOPNA歯車の無負荷時の騒音特性

**3.1 騒音(音圧レベル)** 騒音測定では、プラスチック歯車と鋼製歯車およびCOPNA歯車と鋼製歯車の二つの組合せで行う。まず無負荷のときの騒音結果を測定した。

図2は新しい歯車同士を組合わせた場合についての騒音の測定結果である。図中SPL(Sound pressure level)は音圧レベル(A特性)であり、横軸は歯車の回転数である。図2からこの場合は、プラスチック歯車もCOPNA歯車もその騒音特性にとくに大きな違いが認められないことがわかる。一方、上記歯車をそれぞれ、1500rpmで100時間まで回転させたときの回転時間に対する騒音特性を図3に示す。図3からプラ

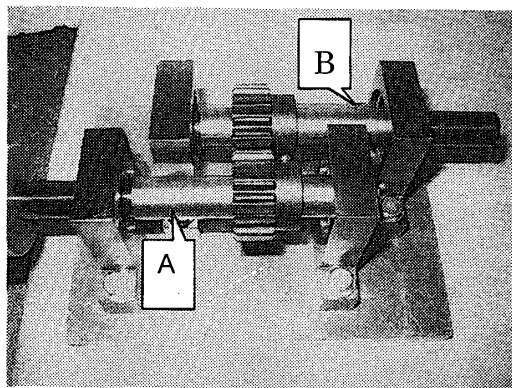


Fig. 1 Experimental apparatus for the gear

スチック歯車は使用時間とともに騒音が若干増加し、60時間程度で一定の騒音となる。一方、COPNA歯車は使用し始めるとまもなく騒音が減少し、40時間までは相当に騒音が減少するが、その後騒音が大きくなり、60時間程度で一定の騒音に近づく。このときの騒音の違いは約8 dB(A)であり、COPNA歯車のほうの騒音が小さくなるのがわかる。すなわち、プラスチック歯車とCOPNA歯車の騒音は、使い始めではほぼ同じであるが、使用時間が経過するにつれてCOPNA歯車の騒音は小さくなるのに対し、プラスチック歯車はほとんど変わらないことがわかる。

図4は100時間の回転を各歯車に与えた後の音圧の周波数(回転数)に対する変化を示したものである。図4から当然のことであるが、歯車の回転数とともに騒音は増大し、5 rpsでは65 dB(A)であったものが、35 rpsでは90 dB(A)程度になっている。このとき、COPNA歯車とプラスチック歯車の騒音の差は約8 dB(A)であり、騒音の差に回転数依存性はほとんど認められない。

3・2 音質 これらの図から、COPNA歯車の騒

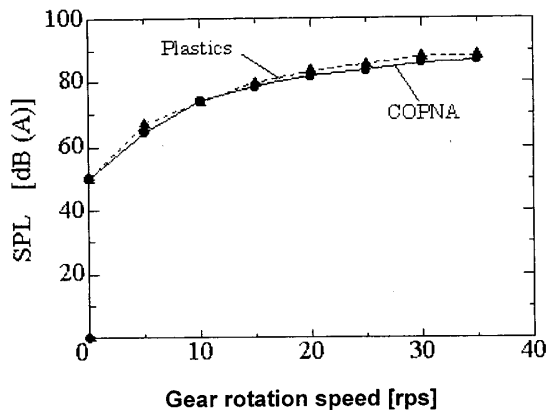


Fig. 2 Sound pressure level (SPL) versus gear rotation speed

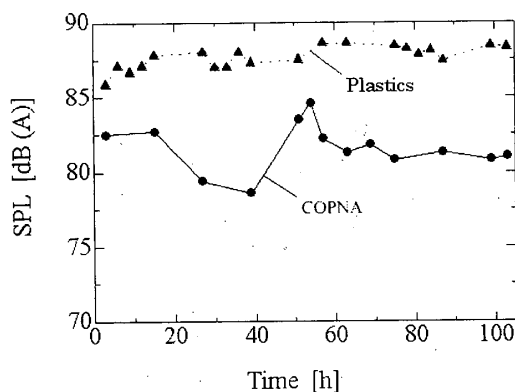


Fig. 3 Variation of sound pressure level with time

音がプラスチック歯車の場合より小さいことがわかるものの騒音そのものの差は8 dB(A)程度であり、必ずしも大きな騒音低減ではないが、音質に大きな差がある。人間の耳には同じ大きさの騒音でも比較的気にならない音がある。プラスチック歯車の摩擦音はキーキーという高分子材料特有の騒音に対し、COPNA歯車の摩擦音はサーという音で、不快感が少ない。そこで、12人の人間にプラスチック歯車とCOPNA歯車の騒音を聴き比べてもらい、その差をグラフにしてみた。この感性測定では、非常に気になる音を-2点、気になる音を-1点、気になるか気にならないかの境目を0点、ほとんど気にならない音を1点、全く気にならないを2点として、全被験者の得点を総合した。結果を図5に示す。図5で15 rps(900 rpm)が特徴的で、この回転数ではCOPNA歯車では、まだ気にならないという人のほうが多いのに対し(黒い棒グラフの正の領域)、プラスチック歯車では、気になる人のほうが多くなっている(白い棒グラフの負の領域)。またすべての回転数に対し、プラスチック歯車のほうがうるさいという結果がでている。この実験結果から、

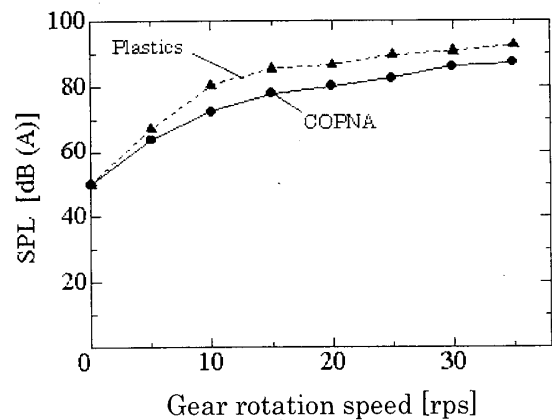


Fig. 4 Variation of sound pressure level with gear rotation speed after 100 hours

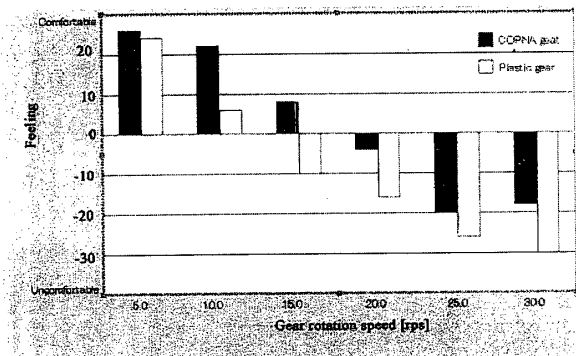


Fig. 5 Feeling tests in two cases of the steel-COPNA gear and steel-plastic gear after a hundred hours rotations

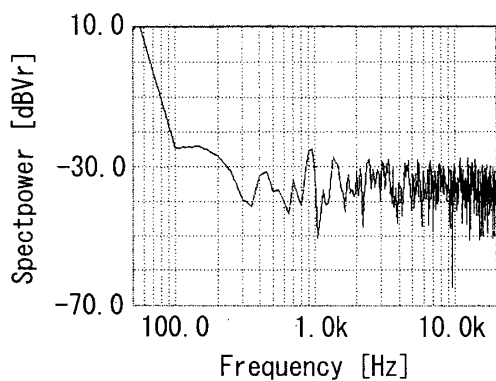
COPNA 歯車の騒音が小さいのみならず、比較的耳に優しい音であることがわかる。

**3・3 COPNA 歯車の低騒音高音質のメカニズムの考察** 前述のように COPNA 歯車は騒音も小さく、音質も良いが、そのメカニズムを以下で考察する。

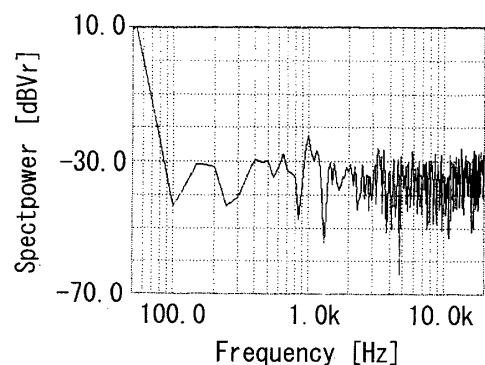
COPNA 歯車はプラスチック歯車に比べ、硬いといわれており、また、密度はほぼ同様に、鋼に比べ相当に軽い(表1参照)。このことを振動の面から考えると、COPNA 歯車とプラスチック歯車に固有振動数の差はほとんどないが、かみあい時の振動振幅は COPNA 歯車のほうが若干小さくなると推定される。そこで、歯車の騒音の支配的な要因が歯車の弾性振動であるかどうかを調べるため、聴き比べ試験でよし悪しの評価が分かれる 15 rps について、FFT 解析を行った。図6は COPNA 歯車とプラスチック歯車から発する騒音(C特性)のFFT解析の結果を示したものである。このとき、歯車回転のかみあい周波数は 330 Hz であり、400 Hz 近傍の小さなピークがそれに相当する。また図6(a)(COPNA 歯車)と図6(b)(プラスチック歯車)のスペクトルの 1 kHz 近傍に若干大きなピークが両曲線に認められる。本ピークは歯車の弾性振動による第1次の固有振動数かと考え、他の回転数

に対しても FFT 解析を行ってみたところ、そのピークは小さくなり、移動することがわかった。すなわち、このピークはかみあい音の3倍の高次成分と考えられる。したがって、このピークは弾性振動によるものではない。

図7は騒音(C特性)の時刻歴応答を計測したものである。図7を見ると、COPNA 歯車の騒音 [図7(a)] のほうがプラスチック歯車の騒音 [図7(b)] より小さいことが認められるが、その差はそう大きなものではない。しかし、本回転数での聴き比べでは、よし悪しがはっきり分かれているところであるので、単にこのわずかな騒音圧の違いで評価が大幅に分かれたとは考えづらい。そこで、図7の波形の高周波成分を取り去った波形(グラフの中心線)を求めたところ、図8のような曲線が得られた。図8で、COPNA 歯車の場合 [図8(a)]、騒音の中心線はほぼ零である。このことは COPNA 歯車の騒音が柔らかい連続音であることに一致している。一方、プラスチック歯車のそれ [図8(b)] はかなり揺らいだ曲線となっている。このことは、プラスチック歯車の音がキーキーという断続的な不快な音となっている現象と一致してい

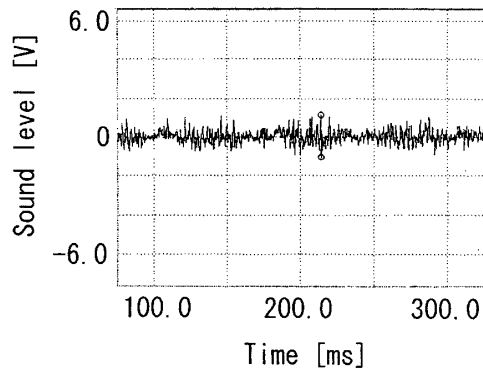


(a) COPNA gear

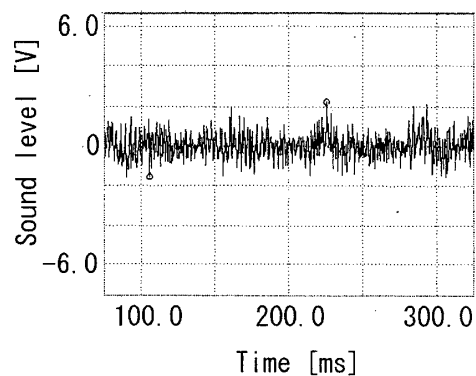


(b) Plastic gear

Fig. 6 Frequency spectrum for the sound levels



(a) COPNA gear



(b) Plastic gear

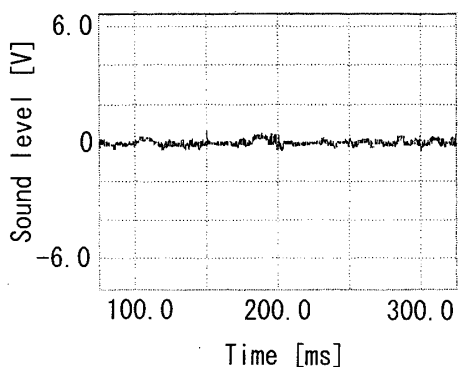
Fig. 7 Time response of the sound level (Rotation speed = 15 cps)

る。

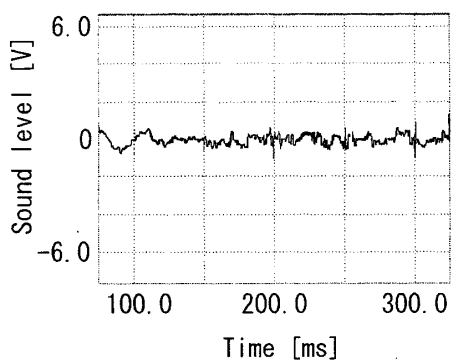
以上より歯車騒音の主要因は歯面摩擦により発生したものと考えられる。そこで、以下に歯車の使用前と100時間使用後の歯面粗さを測定してみた。測定では、各歯車からひとつの歯を切り出し、三次元表面粗さ試験装置で歯元付近から歯先方向(高さ方向)への表面粗さを測定した。図9(a)はCOPNA歯車の使用前の粗さ測定の結果を表す。粗さ試験装置で得られる結果は、歯のインボリュート曲線に粗さが乗っているの、粗さの部分のみを取り出したものを示した。COPNA歯車に対しては、ホブ盤を用いて歯を切ったため、歯先付近の粗さが大きくなっていることがわかる。一方、図9(b)は鋼製歯車と組合わせ100時間使用した後の同じ方向のCOPNA歯車の粗さを示したものである。図9(a)と(b)を比較したとき、明らかに使用後の粗さが小さくなっていることがわかる。これは、COPNA歯車の場合、潤滑剤としての黒鉛をCOPNA樹脂に添加しているの、圧力作用下で黒鉛の移動が可能であるため、黒鉛が歯車同士のかみあい接触時にすきまのあるところに充てんされ、表面が平滑化され

たものと解釈できる。すなわち、歯がなじんだためと考えられる。このとき、歯面曲線に局部的ダメージはもちろん認められない。かみあい時に歯面表面が平滑化されれば、局部的な接触力が小さくなるので、摩擦音は減少する。したがって、図3でCOPNA歯車の騒音が使用時間とともに減少するのは、このためと考えられる。また、40時間程度で極端に騒音が下がり、その後増加するのは、上述の黒鉛の移動、鋼製歯車への移着脱落等のテンポラリーな影響と考えられる。しかし、80時間経過後は、その移着脱落が完了し、一定の状態になったものと考えられる。さらに、COPNA歯車は多孔質であるので、高周波音を吸収する性質があり、また、接触圧力を均等化するように黒鉛が移動し、歯面を相手方の歯形曲線(インボリュート曲線)に整形すると考えることができるので、接触音の揺らぎが小さくなったものと考えられる。

一方、プラスチック歯車の歯面粗さを測定したものが図10である。この歯車は市販のものであり、使用前にわずかな粗さが認められるもののその大きさは小さい[図10(a)]。それに対し、100時間使用後の粗さには特に目立った変化が見られない[図10(b)]。したがって、プラスチック歯車では、使用時間とも

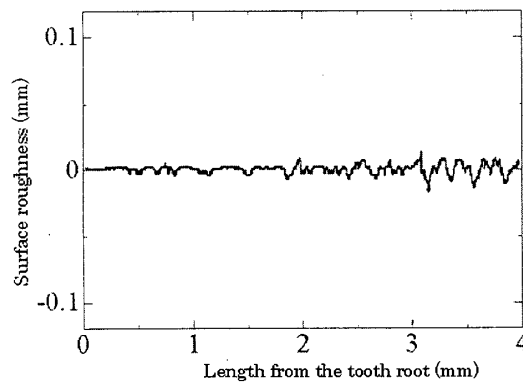


(a) COPNA gear

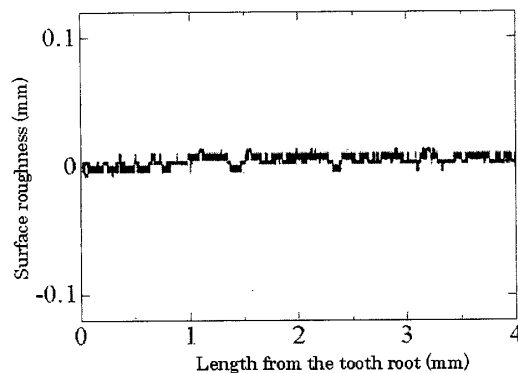


(b) Plastic gear

Fig. 8 Time response of the sound levels when high frequency components are removed (Rotation speed = 15 cps)



(a) Before rotation



(b) After 100 hours rotations

Fig. 9 Surface roughness for the steel-COPNA gear

に騒音の変化に大きな差がないものと思われる。しかし、上述の結果よりプラスチック歯車では使用とともに若干ではあるが、騒音が増加している。この原因は以上の実験からは定かではないものの、図8(b)に示したように、騒音に揺らぎがあることから、プラスチックの各歯が完全なインボリュート曲線とはなっておらず、不整があったとき、その部分をこすって連続接触を行うインボリュート曲線を壊してしまうことがひとつの要因と考えられる。

#### 4. プラスチック歯車と COPNA 歯車の 負荷時の騒音特性

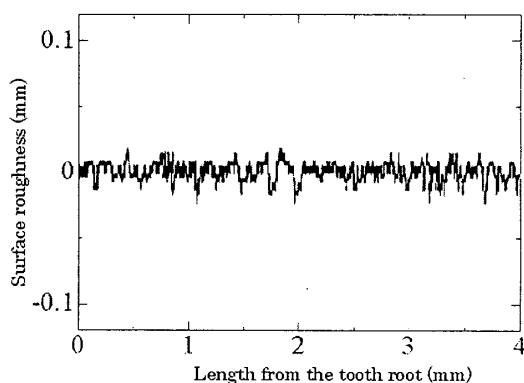
**4.1 騒音** 本歯車が実際に機器に組込まれたときは負荷を受けるので、以下負荷を受けたときの騒音について検討する。実験装置および実験方法は無負荷時と同じであるが、従動軸には  $16.32 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$  の慣性能率を有する円板が取付けられている。このときの騒音圧と軸回転数の関係を図11に示す。この場合のプラスチック歯車の騒音は負荷のないとき(図4)とほぼ同様であるが、COPNA 歯車では騒音が無負荷のとき(図4)よりかなり小さくなっていることが特徴的であり、COPNA 歯車の騒音のほうがプラスチック歯

車のそれに比べ、約  $15 \text{ dB(A)}$  程度小さくなっている。

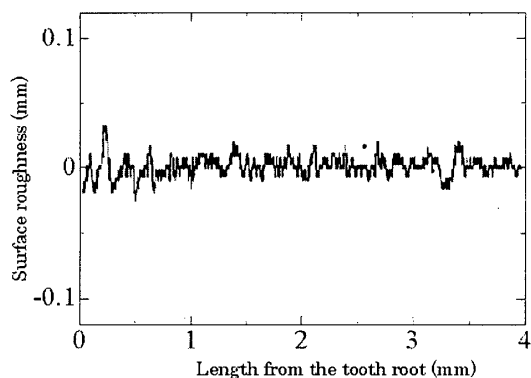
**4.2 聴き比べ試験** 負荷がある場合についても、無負荷のときと同様に聴き比べ試験を行った。実験方法と整理の方法は無負荷のときと同様である。結果を図12に示す。図12よりこの場合は、 $20 \text{ rps}$  で不快度の正負が逆転しており、またそれより高い周波数でも COPNA 歯車の不快度はプラスチック歯車のそれに比べ、極端に小さいことがわかる。

図13は不快度の正負の分かれる  $20 \text{ rps}$  の軸回転数に対する騒音の時刻歴応答を示したものである。COPNA 歯車の騒音 [図13(a)] の騒音振幅がプラスチックの騒音振幅に比べ極端に小さいことがわかる。COPNA 歯車が負荷を有する場合に騒音が小さくなる理由は、負荷の存在により歯車表面を平滑化する力が大きくなるためと思われる。プラスチックについては、前述のようにその機能がないため、騒音が減少しないと考えられる。

以上よりプラスチック歯車は負荷のあるなしにかかわらず騒音は変わらないが、COPNA 歯車は負荷がある場合に騒音が減少するということがわかる。



(a) Before rotations



(b) After 100 hours rotations

Fig. 10 Surface roughness for the steel-plastic gear

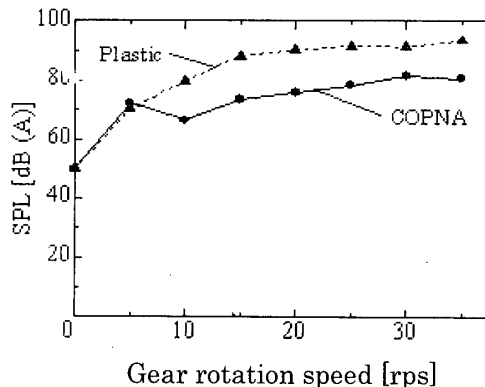


Fig. 11 Sound pressure level versus gear rotation speed when carrying the inertia load

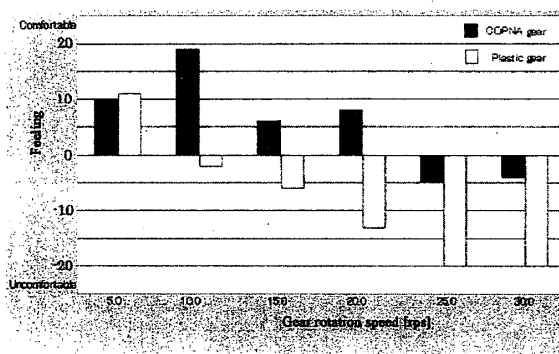
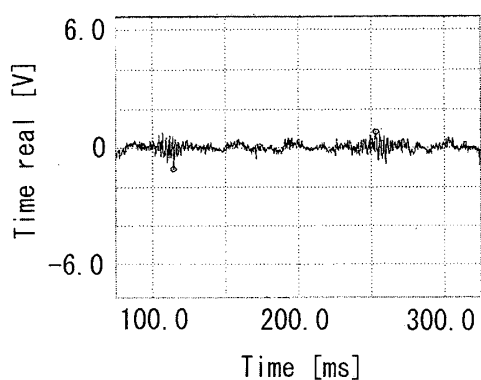
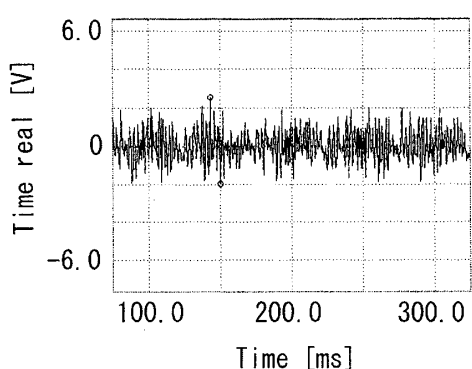


Fig. 12 Feeling tests in two cases the steel-COPNA gear and steel-plastic gear with a loads



(a) COPNA gear



(b) Plastic gear

Fig. 13 Time response of the sound levels

### 5. 歯車材の組合せによる騒音の検討

以上で考察したように、歯車から発せられる騒音はその材料の組合せで大きく変わる。そこで、プラスチック歯車-COPNA歯車(P-C)、鋼製歯車-COPNA歯車(S-C)、プラスチック歯車-プラスチック歯車(P-P)、鋼製歯車-プラスチック歯車(S-P)の各組合せについての騒音測定を行った。結果を図14に示す。図14より、鋼製歯車とCOPNA歯車の組合せがもっとも騒音が少なく、他の組合せの場合はあまり変わらないことがわかる。

### 6. 結 言

本研究は、事務機器に用いられる歯車機構について、無潤滑でかつ騒音の少ない歯車機構として、COPNA歯車と鋼製歯車の組合せを提案し、その騒音特性を騒

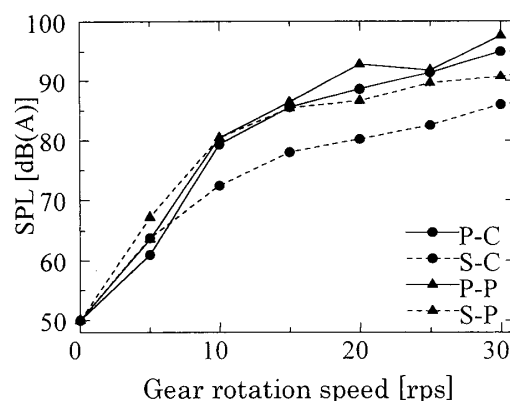


Fig. 14 Comparison among sound pressure levels for various combinations of gear materials

音圧および感性の両面から考察したものである。結果を要約すると次のようである。

(1) 試作したCOPNA歯車と従来用いられているプラスチック歯車について、騒音特性を調べたところ、COPNA歯車の騒音はプラスチック歯車のそれに比べかなり小さく、かつ音質が良く、不快感が少ないことがわかった。

(2) プラスチック歯車は使用時間に無関係に騒音は一定であるのに対し、COPNA歯車は使用時間の経過とともに騒音が減少し、ある一定の状態に近づく。

(3) プラスチック歯車は負荷があってもなくても騒音に変化がないのに対し、COPNA歯車は負荷があったほうが、騒音は減少する。

(4) 鋼製歯車、COPNA歯車、プラスチック歯車の種々の組合せに対し、騒音を検討したところ、鋼製歯車とCOPNA歯車を組合せた場合がもっとも騒音が小さくなることがわかった。

### 文 献

- (1) 大谷杉郎・佐々木雅美・野村一樹, グラファイト充填・縮合多環多核芳香族樹脂複合材のトライボロジー特性, 東海大学紀要 開発工学部(JPN), No. 7 (1997), 159-170.
- (2) 熱硬化性樹脂組成物, 特許公報, (1999-4), 第2879150号.
- (3) Kurokawa, M., Uchiyama, Y. and Nagai, S., Performance of plastic gear made of carbon fiber reinforced poly-ether-ether-ketone: Part 2, *Tribology Int.*, **10** (2000), 715-721.