

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560158

研究課題名(和文)非円形歯車の設計と運転性能向上の研究

研究課題名(英文)Study on Design and Driving Performance Improvement of Non-Circular Gears

研究代表者

永村 和照 (Nagamura, Kazuteru)

広島大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70108794

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：非円形歯車の高性能化，高速化を目的とし，2種類の楕円歯車について研究を行った．実験により楕円歯車の動特性を明らかにし，楕円歯車の振動を予測するプログラムを開発し，その妥当性を検証した．また，非円形歯車の振動低減方法についても検討を行った．その結果，次のことがわかった．1.楕円歯車の動荷重は円形歯車と比較すると極めて大きく，低速でも歯面分離を起こしやすい．2.楕円歯車の振動加速度は，ごく低速域を除いて円形歯車よりも著しく大きい．3.楕円歯車の振動予測プログラムによる計算結果と実験結果はよく一致した．4.ばね継手または摩擦ダンパを用いることにより，高速域での楕円歯車の振動を低減できる．

研究成果の概要(英文)：In this study, the vibrations on two elliptical gear pairs were investigated to improve the driving performance of the non-circular gear pairs. In the experiment, the torque of the shafts, the tooth root stress, and the vibration acceleration of the test gear were measured to clarify the vibration characteristics of the elliptical gears. A program to predict the vibration of the elliptical gear was developed. Then, the method to reduce the vibration of the non-circular gear pair was examined. The results in this study may be summarized as follows: The elliptical gears have significantly large dynamic load. The elliptical gears have larger vibration than the circular gears except for at very low gear speeds. The calculated results by the present method to estimate the vibration of the elliptical gear agree with the experimental results. The vibration of the elliptical gear can be reduced by attaching a spring coupling or a friction damper to the driving shaft of the elliptical gear.

研究分野：機械工学

キーワード：歯車 非円形歯車 楕円歯車 振動加速度 歯元応力 トルク変動 動荷重 歯面分離

1. 研究開始当初の背景

加工技術の発達に伴い、従来では理論上のものでしかなかった機械要素・機械部品の製作が可能となってきた。その中でも、非円形歯車はCAD/CAM技術とNC形削り盤の急速な発展により、自由形状のインポリュート歯車の製作が可能となり、近年になって注目を集めている。非円形歯車は歯車の回転伝達とカムの不等速運動の2つの働きを持つ優れた回転伝達機構である。機構学的には、非円形歯車は4節リンクやカムと同等な動きをする。4節リンクと比較すると、非円形歯車は伝達精度と伝達効率がよく、小型化が可能である。また、慣性トルクのバランスが容易であるなどの利点がある。一方、カムと比べると、非円形歯車は重負荷の伝達が可能で、摩耗が少なく耐久性に優れるなどの利点がある。そのため、非円形歯車は自動機械や搬送機械、印刷機械のみならず、近年では自動車の变速装置、ロボットの関節、田植機などに幅広く使用されている。非円形歯車は不等速回転運動を行うために慣性トルクが生じ、そしてそれは回転速度の上昇にしたがって大きくなり、振動・騒音の増加をもたらす。このため、非円形歯車を設計・製作し使用する際には、設計者は非円形歯車の振動・騒音特性や挙動についてよく理解しておくことが重要である。しかし、非円形歯車の振動・騒音の特性や挙動については未だ解明されていない点が多くある。非円形歯車についての研究は、その設計・製作に関するものは多い。ところが、非円形歯車を実際に運転した結果について言及した研究はほとんどない。また、上述したように非円形歯車はその不等速運動や形状のため、負荷トルクが一定でも、駆動トルクおよび回転速度が変わり、それに伴い歯面荷重、かみあい率などが複雑に変化する。そして、等速回転をする円形歯車と比較すると、振動や騒音が大きくなることが予想される。そのため、現在非円形歯車は高速回転域ではほとんど使用されておらず、騒音・振動が発生しにくい低速回転域のみで応用されている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、非円形歯車の運転性能を実験および理論の両方から明らかにし、運転性能の向上を図り、特に高速化を目的としている。そのために、非円形歯車の運転性能を明らかにする。具体的には非円形歯車の代表的なものであり最も基本的なものである楕円歯車を対称とし研究を進め、楕円歯車の運転性能について、理論的、実験的に明らかにする。そして、高速を可能にする方法を開発する。

3. 研究の方法

研究は、楕円歯車の動特性の実験的解明、その動特性のシュミレーションプログラムの開発および高速運転の実現の3つに分けて

行った。

実験では、楕円歯車の動特性を調べるために図1に示す動力吸収式歯車運転試験機を用いて、歯車の歯元応力、振動加速度、軸トルクを測定した。この動力吸収式歯車運転試験機は、駆動モータ、2個のトルクメータ、試験歯車対および電磁パウダブレーキより成っている。振動加速度は、歯車本体に取り付けた2個の加速度ピックアップにより測定した。歯元応力は円形歯車では、全ての歯に同じ荷重が加わっているが、楕円歯車ではかみあい歯対によって加わる荷重が異なる。そのため、歯元応力の測定にあたっては、楕円歯車の3枚の歯にひずみゲージを貼り、歯元応力を測定し、それらの応力を比較することにより歯面の荷重を求めた。これらの振動加速度、騒音および軸トルクの解析には設備備品として購入したFFTアナライザを用いた。このFFTアナライザにより、振動加速度の実効値を算出するとともに、加速度、騒音、軸トルクの周波数分析を行い、振動を実証的かつ定量的に把握した。試験歯車対は楕円1葉

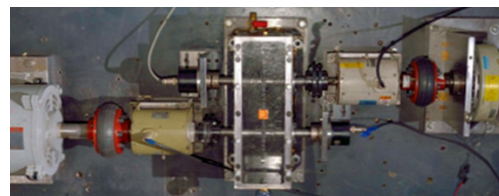
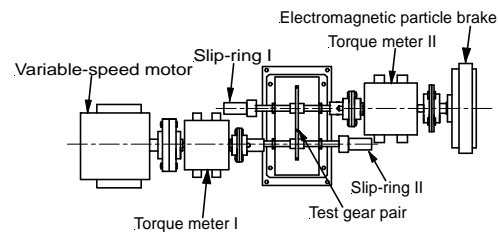


図1 動力吸収式歯車運転試験機



(a) 楕円1葉歯車 ($z_1/z_2 = 37/37$)



(b) 楕円2葉歯車 ($z_1/z_2 = 38/38$)

図2 試験歯車

歯車[図 2(a)]と楕円 2 葉歯車[図 2(b)]およびそれぞれに対応する同歯数の円形歯車である。これらの試験歯車対は、モジュール 4mm, 圧力角 20°, 歯数 $z_1/z_2 = 37/37$ および 38/38, 歯幅 10mm である。

また、楕円歯車の動特性を理論的に解明するために、楕円歯車の振動モデルを作成し、動特性のシミュレーションプログラムを開発した。図 1 に示す動力吸収式歯車運転試験機のねじり振動モデルを作り、振動解析を行った。このモデルでは、駆動モータ、継手、試験歯車および電磁パウダブレーキを慣性モーメントとし、それらをつなぐ軸などをばね要素として運動方程式を立てた。運動方程式では、歯車のかみあいにおける歯車対の歯のばね剛さは矩形状に変化するものとし、加えて楕円歯車では基礎円がかみあう歯対によって変化するものとした。そして、4 次の Runge-Kutta 法により運動方程式を解き、歯車の振動加速度およびトルクメータのトルクを求め、それらと実験結果を比較して、シミュレーションプログラムの妥当性を検証した。

さらに、開発したシミュレーションプログラムを用いて非円形歯車(楕円歯車)の高性能化・高速化に必要な振動を低減する方法について検討した。

4. 研究成果

本研究で行った非円形歯車(楕円歯車)の運転試験および理論解析は唯一無二のものであり、非常に工学的価値の高いものである。以下にその結果について説明する。

図 3 は歯元応力波形より算出した動荷重係数である。ここで動荷重係数は、各回転速度における歯元応力の最大値を、静的応力とみなした回転速度 $n_1=120\text{rpm}$ における歯元応力の最大値で割った値で定義する。図より、回転速度の上昇に伴い、角加速比が最大の歯では動荷重係数が増加し、角加速比が最小の歯では動荷重係数が減少していることがわかる。これは、角加速比が最大の歯では回転速

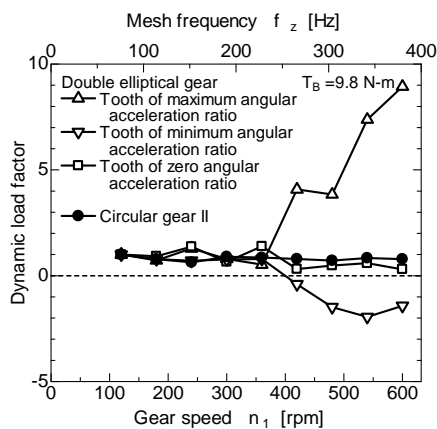
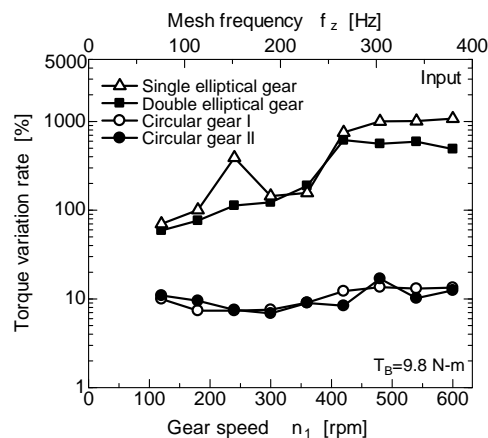


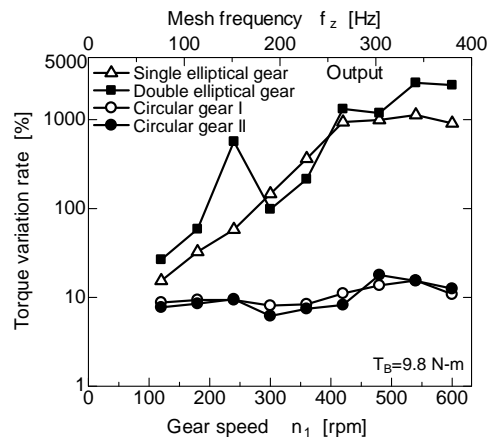
図 3 動荷重係数 (楕円 2 葉歯車)

度が上昇すると慣性力が大きくなるので歯にかかる荷重が大きくなること、しかし角加速比が最小の歯では、回転速度が上昇すると通常のかみあい時とは逆方向に慣性力が働き歯にかかる荷重が小さくなったためと考えられる。さらに、角加速比が最小の歯では回転速度 $n_1=400\text{rpm}$ 付近から動荷重係数が負の値を示している。これは、かみあい歯面の分離および非かみあい歯面への衝突が発生したためである。また、図には示していないが、楕円 2 葉歯車の動荷重係数のほうが楕円 1 葉歯車の動荷重係数より大きい。これは、楕円 1 葉歯車の速度変動が歯車 1 回転につき 1 回であるのに対し、楕円 2 葉歯車では歯車 1 回転につき 2 回速度変動するためである。このことより、楕円歯車の葉数が多いほど、動荷重係数も大きくなるものと推測される。

図 4 は駆動軸および被動軸のトルク変動率を示す。ここで、トルク変動率は歯車軸トルク変動波形の最大片振幅を 5 回転分について平均し、負荷トルクで割ったものである。円形歯車のトルク変動率は回転速度が上昇してもほぼ一定で 10%程度であるのに対し、楕円歯車のトルク変動率は円形歯車に比べて



(a) 駆動軸



(b) 被動軸

図 4 トルク変動率 ($T_B=9.8\text{N}\cdot\text{m}$)

非常に大きく、 $n_1=400\text{rpm}$ 付近で急激に増加し 10 倍近くになっている。これは、楕円歯車のかみあい側歯面の分離と非かみあい側歯面に衝突する現象が生じたため、慣性トルクの影響と考えられ、円形歯車では回転速度によらずほぼ等速回転するため歯車軸に慣性トルクが発生しないのに対し、楕円歯車

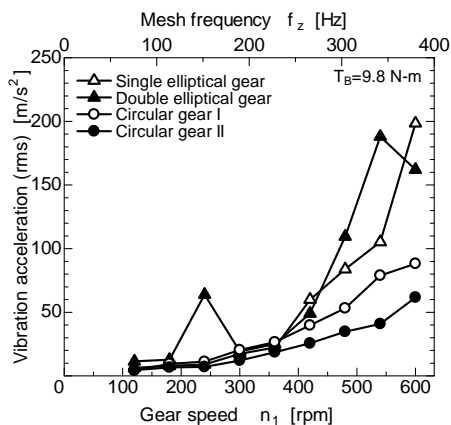
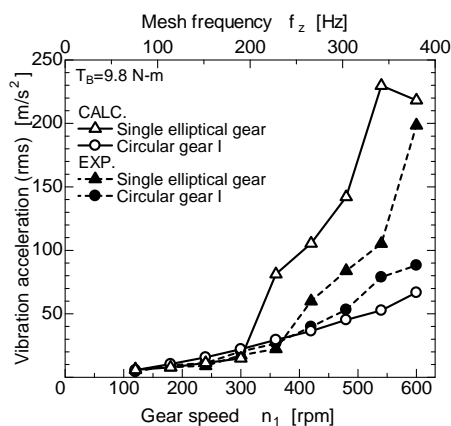
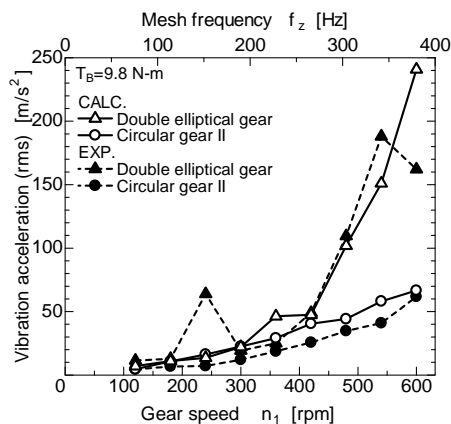


図5 円周方向振動加速度 ($T_B=9.8\text{N}\cdot\text{m}$)



(a) 楕円1葉歯車



(b) 楕円2葉歯車

図6 円周方向振動加速度の計算結果 ($T_B=9.8\text{N}\cdot\text{m}$)

の場合には半径比の変わる不等速回転運動を行うので歯車の角加速度が大きくなり、慣性トルクが大きくなるためである。また、楕円1葉歯車よりも楕円2葉歯車のほうがトルク変動率が大きい。これは、楕円2葉歯車の角加速比の変化が楕円1葉歯車に比べて非常に大きく、その変動回数も多いためと考えられる。

図5は楕円歯車と円形歯車の円周方向振動加速度の実効値を示したものである。歯車の回転速度の低い領域では楕円歯車と円形歯車の振動加速度にあまり差はないが、歯車回転速度 $n_1=400\text{rpm}$ 以上では楕円歯車の振動加速度が急速に増大する。これは、楕円歯車が高速回転域でかみあい側歯面の分離および非かみあい側歯面への衝突を起こしたためと考えられる。また、楕円1葉歯車と楕円2葉歯車の振動加速度を比較すると、楕円2葉歯車の振動加速度が楕円1葉歯車よりも大きい。これは、楕円1葉歯車の速度変動が歯車1回転につき1回であるのに対し楕円2葉歯車では歯車1回転につき2回速度変動するためと考えられる。

図6は歯車の円周方向振動加速度実効値の計算結果である。実験結果と計算結果を比較すると、回転速度の上昇に伴い、いずれの歯車も円周方向振動加速度実効値が増加し、円形歯車の円周方向振動加速度実効値よりも

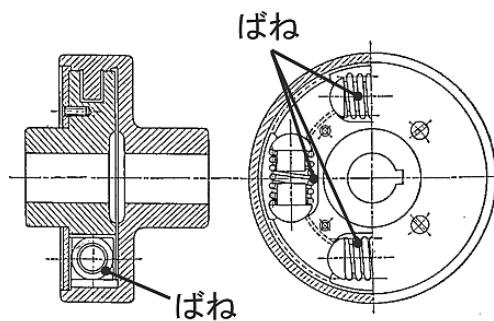


図7 ばね継手

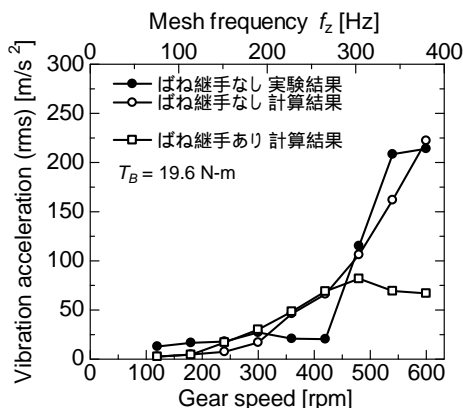


図8 ばね継手による振動低減 (楕円2葉歯車)

楕円歯車の円周方向振動加速度実効値のほうがかなり大きくなっており、これらの結果は実験値と計算値でほぼ一致している。

本研究では、楕円歯車（非円形歯車）装置に、ばね継手（図 7）や摩擦ダンパ（図 9）を使用することより振動を低減し、高速運転を可能にすることを試みた。図 7 のばね継手は、円周上に配置されたコイルばねによってトルクを伝えるとともにばねの変形によりねじり振動を低減するものである。図 8 は、楕円歯車装置の駆動軸にばね継手を用いた場合の振動加速度の計算結果である。図に示すようにばね継手を用いることにより、 $n_1=450\text{rpm}$ 以上の回転数において振動加速度を減少させることができる。図 9 に示す摩擦ダンパは、フランジを数本のリーマボルトで結合し、リーマボルトのせん断力によってトルクを伝え、接触面の摩擦により振動を低減ものである。図 10 は、楕円歯車装置の駆動軸に摩擦ダンパを用いた場合の振動加速度の計算結果である。この場合もばね継手を用いた場合と同様に $n_1=450\text{rpm}$ 以上の回転数において振動加速度を減少させることができるものと予測される。

なお、これらの振動低減装置は、すでに詳細設計を終えており、平成 27 年度に実証実験を行う予定である。

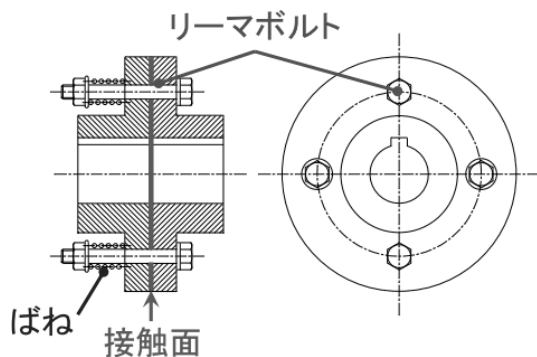


図 9 摩擦ダンパ

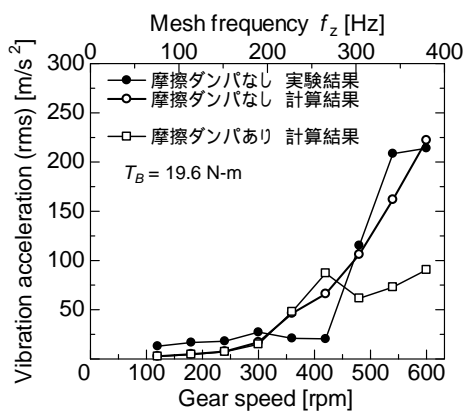


図 10 摩擦ダンパによる振動低減（楕円 2 葉歯車）

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計 4 件)

- 楕円歯車の動特性 池条清隆 永村和照, 設計工学, 50 巻, 6 号, (2015-6), 掲載決定, 査読有.
- Analysis of Torsional Vibration in Elliptical Gears, Kazuteru Nagamura and Kiyotaka Ikejo, Proceedings of The 3rd International Conference on Design Engineering and Science, ICDES 2014, Pilsen, Czech Republic, August 31-September 3, 2014, Vol. 3, pp. 38-43, 査読有.
- Vibration Characteristics of Elliptical Gears, K. Ikejo and K. Nagamura, Proceedings of International Conference on Gears Europe invites the World, October 7th to 9th, 2013, Technical University of Munich (TUM) Garhing (near Munch), Germany, VDI-Berichte 2199.2, (2013), pp.1505-1508, 査読有.
- Simulation on the vibration characteristics of elliptical gears, Xing Liu, Kazuteru Nagamura and Kiyotaka Ikejo, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science Vol.227 No.4, April 2013, pp.819-830, DOI: 10.1177 / 0954406212454372, 査読有.

〔学会発表〕(計 1 件)

- 楕円歯車の振動解析, 船越健太, 永村和照, 池条清隆, 吉永智, 日本機械学会 2013 年度年次大会論文集(2013.9.8-11, 岡山), No.13-1, (2013), S112043.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

永村 和照 (NAGAMURA KAZUTERU)
 広島大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号: 70108794