

令和元年6月17日現在

機関番号：33803

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06056

研究課題名(和文)新規駆動系実現のための超大偏心許容形等速軸継手の研究開発

研究課題名(英文) Research and development of ultra-large eccentricity amount permissible type constant velocity joint to realize a new drive system

研究代表者

野崎 孝志 (NOZAKI, TAKASHI)

静岡理科大学・理工学部・教授

研究者番号：20548888

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：新規駆動系を実現するための超大偏心量許容形等速軸継手の3次元非線形動力学解析モデルと、その等速性および動力伝達効率測定可能な試験機である微小な回転変動率の計測が可能な動力吸収型試験機が完成した。これらにより、等速性の指標である回転変動率の理論解析と実験による検証と限界特性の指標である内部に作用する力の理論解析による限界特性の推定を行い、通常使用時での十分な等速性と、さらなる耐久性向上策を具体的に見出すことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電気自動車などへの変革期にある自動車分野においては、本軸継手の持つ超大偏心量許容特性、等速性、及び軸方向の短さが、変速機や減速機などの小型軽量化などに利用される可能性が大きい。また、ヒューマノイドロボットや産業用ロボットの小形軽量化、あるいは本軸継手が有する等速性により、ごく狭い範囲での円滑な動力伝達を可能とする。摩擦損失の少ない円滑な作動性により、エネルギー効率を向上させることのできる駆動系を実現することができる。

研究成果の概要(英文)：Three-dimensional non-linear dynamics analysis model of ultra-large eccentricity amount permissible type constant velocity joint to realize a new drive system and power absorption type testing machine capable of measuring minute rotational fluctuation rates which is the test machine that can measure its constant velocity and transmission efficiency was completed. Since shaft connection performance was verified by theoretical analysis and experiment of rotational fluctuation rate for guidance of constant velocity, the limitation characteristics was estimated by theoretical analysis of the internal force, the sufficient constant velocity and the further improvement in durability could be found specifically in normal use.

研究分野：動力伝達系における機素潤滑、機構、設計、及び振動・騒音

キーワード：軸継手 等速 機素潤滑 駆動系 機構 ヘルツ接触 接触解析 摩擦

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

(1) 機械装置の2つの軸を連結して動力を伝達する軸継手は、2軸の位置関係によって構造が異なり、2軸が1直線上にあるもの、交差するもの、及び互いに平行な（かつ同心でない）ものに大別される。従前より互いに平行な（かつ同心でない）軸継手としては、オルダム形軸継手がよく知られている。しかし、オルダム形軸継手は、大きな偏心量を許容できないという課題がある。本研究の超大偏心量許容形等速軸継手（以下、本軸継手）は、従来の機構では実現できなかった2軸間の大きな偏心量を許容し、主要部はボールと溝の転がり伝達機構を用い、軸方向長さが短い構成で、等速性を確保しているという特長がある。さらに、動力伝達時の摩擦抵抗が少なく、大きな動力を伝達でき、主要部品が、2つの回転部材、ボール、及び保持器のため、製造コストが安く、組立性も良い等多くの特長を有している⁽¹⁾。

(2) 本軸継手には、軸心が平行な（かつ同心でない）2軸の動力を伝達する軸継手において、従来にはない特段の効果を有しており、自動車やロボット等の様々な駆動系への展開が期待されるが、発明（特許第4578111号及び特許第4656867号^{(2)・(3)}）されてからの期間が短く、その特性は定性的及び定量的に明確ではない。本軸継手を様々な駆動系の小型軽量化に寄与させるためには、その等速性及び限界特性を含めた内部に作用する力などを研究する必要がある。

2. 研究の目的

本軸継手の最大の特長は、従来の機構では実現できなかった超大偏心量を許容し、軸方向長さが短く、かつ摩擦抵抗の少ない円滑な等速伝達機構を可能としていることである。本軸継手は、特許公報(B2)特許第4578111号、および特許第4656867号を取得し、その新規性と進歩性が認められている。

本研究開発の目的は、本軸継手の部品間のすきまを考慮した理論解析と実験から、等速性（回転変動率）への影響を明らかにすることである。また、限界偏心時の特性を知るため、理論解析により内部に作用する力を理論的に把握することである。さらに、本研究開発において、理論解析の検証を行うための本軸継手内部に作用する力の実験装置を考案し、製作を行う。

3. 研究の方法

(1) 本軸継手の3次元非線形動力学解析基本モデルの作成と試作品の製作

本軸継手の3次元モデルの形状データをもとに、各部品間の接触条件や境界条件を仮定し、3次元非線形動力学解析モデルを作成する。境界条件の設定で困難な箇所は接触部である。接触部には、摩擦係数の速度依存性を考慮する。このモデルにより得られた内部に作用する力から、Hertzの接触理論による接触面圧計算を行い、限界偏心時などの特性を把握する。これは本継手の適切な可動範囲の決定に繋がる。限界偏心時の特性とは、ボールと案内溝、あるいはボールと保持器との間の永久変形、ボールの案内溝からの乗り上げや保持器からの逸脱、案内溝の損傷などのことである。これらを非線形動力学解析によるHertz接触面圧などを計算することで、予測し実験検証との整合性を確認することが可能になる。

また、この解析モデルを用いて、等速性及び動力損失の変動要因を抽出し、等速性の変動を抑制する最適形状を決定する。等速性の変動要因を抽出するための具体的なパラメータとして、保持器の孔とボールのすきま、保持器と回転部材の軸方向すきま、ボールと案内溝の回転時の接触角、ボールに対する案内溝の半径、および保持器の孔形状などが挙げられる。また、動力損失要因としては、摩擦係数の速度依存性を考慮して正確に把握する必要がある。揺動運動では、ボールが一旦停止し、速度の向きが変わることになり、静止摩擦が現れる。パラメータスタディの時点で、揺動運動による摩擦係数の速度依存性が動力損失に与える影響が大きいと判断される場合には、摩擦係数の速度依存性を実験的（あるいは経験的）に加味し、ストライベック線図から静止摩擦だけでなく、境界潤滑、混合潤滑、流体潤滑を考慮した摩擦係数変化を考慮した摩擦係数の同定を理論的に行う可能性も視野に入れている。

(2) 等速性及び動力伝達効率測定試験機の製作（動力吸収型試験機、以下 本試験機）

本試験機は、主に等速性、動力伝達率、および限界偏心時の特性把握に用いられる動力吸収型試験機である。動力吸収の基本仕様は、駆動力を作用するモータと駆動力を吸収する吸収体からなる。吸収体には当初パウダブレーキを選定したが、最終的にはトルク変動要因の小さなヒステリシスモータを採用した。動力源であるモータは、回転変動率を抑制するため、サーボモータを採用する。

計測系においては、本軸継手の両端にトルクメータとロータリーエンコーダをそれぞれ配置し、等速性と動力伝達率を計測する。本軸継手は等速性の指標である回転変動率が原理的に低く、および動力伝達効率が高い領域を計測する必要があり、トルクメータの精度およびロータリーエンコーダの分解能を上げる必要がある。等速性の計測としては、不等速性のオーダが数%程度と予測されるため、0.01%の分解能を有する計測が必要である。また、トルクメータの精度においても、本軸継手の動力伝達機構の主要部にボールを使用していることから、転がり動力伝達機構となり、99%以上となると予測される動力伝達率を計測する必要があるため、高精度のトルクメータが要求される。

(3) 等速性の指標である回転変動率の理論解析と実験による検証と限界特性の指標である内部

に作用する力の理論解析と限界特性の推定

パラメータスタディの一例として、非線形動力学解析と実験によるサーキュラーク溝とゴシックアーク溝の比較検証があげられる。図1にそれぞれの案内溝形状を示す。

ボールの案内溝に関しては、保持器とボール間のすきまをある程度許容し、回転部材間のすきまを小さくするゴシックアーク溝にする案が考えられる。しかしながら、ゴシックアーク溝を採用した場合には、接触点の直径 d_1 と d_2 の差により作動すべりが発生し、動力伝達効率の低下も懸念される。サーキュラーク溝の場合も、ボールの案内溝端付近に接触し接触角が大きくなると、スピンによる動力損失も考えられるので、これらを定量的に把握し、最適な組み合わせを非線形動力学解析と実験により考察する。

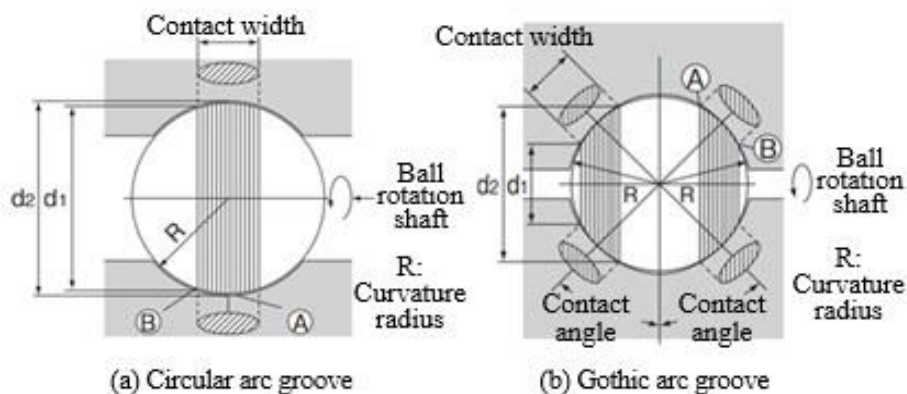


Fig.1 Type of guide groove⁽⁴⁾

(4) 内部に作用する力の測定装置の考案と製作

理論解析モデルモデルの精度をさらに向上させるため、当初の計画からさらに発展させた本軸継手の内部に作用する力を実験的に計測する装置を考案し製作した。本装置はボールと接触する溝部分を分離して、その間にピエゾ圧電素子を挿入し、ボールと案内溝間に作用する作用する3分力を測定するものである。これにより、内部に作用する力が実測できることにより、解析モデルの検証を実施することが可能となり、解析モデルの精度向上に寄与することができる。

4. 研究成果

(1) 本軸継手の3次元非線形動力学基本解析モデルと試作品の完成

本軸継手の理論解析として、3次元非線形動力学基本解析モデルを作成する。ソフトウェアは、機構解析ソフトウェア Adams (エムエスシーソフトウェア(株))を用いる。この3次元非線形動力学基本解析モデル軸継手の等速性や部品間に作用する力に関する解析を行った。

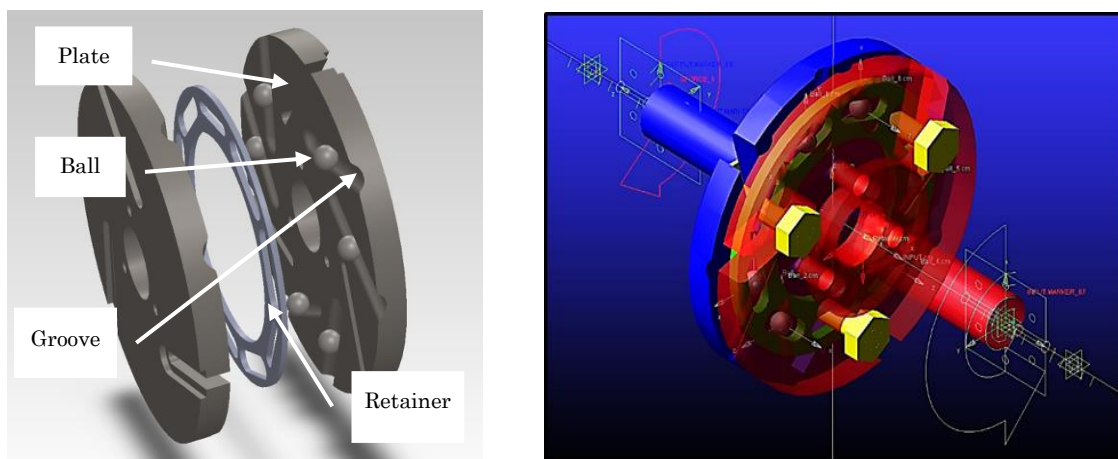


Fig.2 Structure and analysis model (Adams) of ultra-large eccentricity amount permissible type constant velocity joint

図2(左図)は本軸継手の構成を説明するための3次元モデル、及び図2(右図)には Adams を用いた3次元非線形動力学基本解析モデルを示す。軸継手の3次元モデルを3次元CADで作成し、Adams に読み込んだ上で、それぞれの部品の材料特性を設定し、部品間の自由度を拘束し、入力回転数、出力トルク、及び摩擦係数等の境界条件を設定する。本研究の解析のパラメータは、案内溝形状比較(サーキュラーク溝とゴシックアーク溝)、偏心量(3段階、0 mm, 1 mm, 2 mm)、入出力回転数、および入出力トルクとした。最大回転数 3000 min^{-1} までの解析を行った。また、無負荷と負荷状態(トルク $1 \sim 2 \text{ Nm}$)で解析を行った。Hertz の接触面圧は、部品間に作用する力を理論解析し、その値から算出した。その際に用いる第二種楕円積分は、Brewer and Hamrock^{(5)・(6)}の近似式を使用した。尚、解析の座標軸については、図4に示す。動力学解析のため、解析を開始後十分に解析結果の安定性を検証した上で、 $0 \sim 360 \text{ deg}$ の1回転を解析結果として示すこととした。図3に座標軸を示す。

本軸継手の試作品を設計し、試作品を製作した。製作した試作品を図4に示す。直径30mm、軸方向長さは入出力の円板間で8mmである。円板は軸受鋼(SUJ2)を用い焼入れ焼戻しを行い、硬度HRC58を得ている。保持器はS45Cにて製作し、ボールは転がり軸受用球(SUJ2)を用いた。円板の案内溝の加工精度や面粗度を向上させるため、焼入れ焼戻し後に再度加工を行い、溝曲率をボール半径の1.02倍とした。

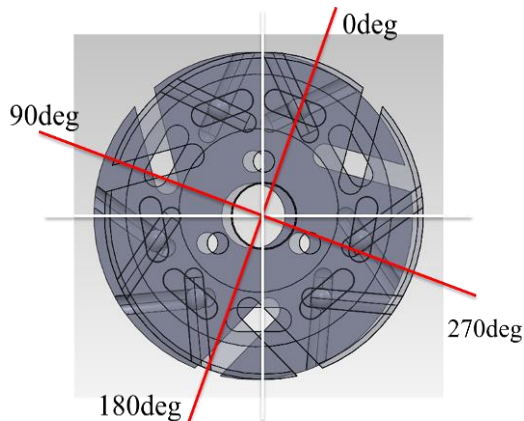


Fig.3 Coordinate axis of analysis

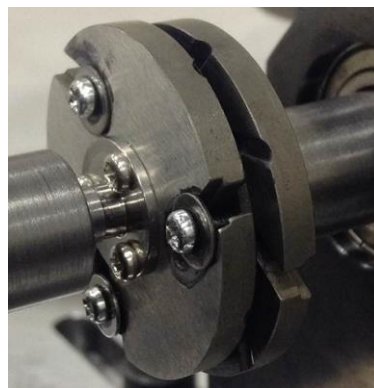


Fig.4 Ultra-large eccentricity amount permissible type constant velocity joint (photo)

(2) 本試験機の完成 (動力吸収型試験機)

本試験機は、無負荷と負荷状態での等速性と動力損失を測定する必要があるため、トルクメータとヒステリシスモータを使用した動力吸収型試験機の構成とし、設計製作を行った。図5に、本試験機を示す。本試験機は、台座を移動させることにより、試作した本軸継手に偏心を与えられる構成としている。

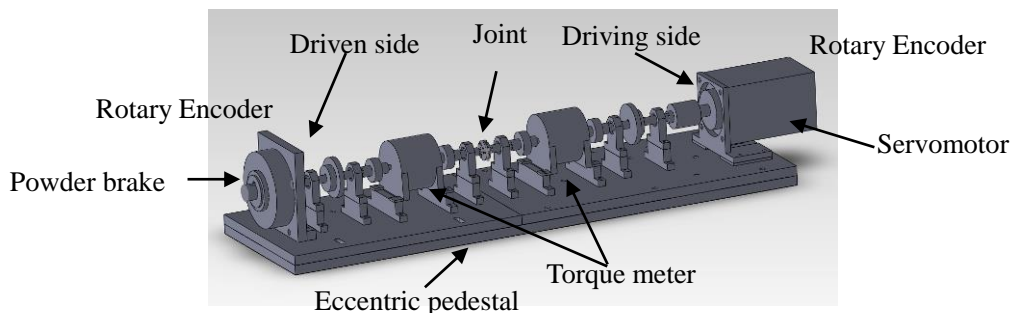


Fig.5 Test rig (power absorption type)

(3) 等速性の指標である回転変動率の理論解析と実験による検証結果と限界特性の指標である内部に作用する力の理論解析と限界特性の推定結果

① 等速性の指標である回転変動率の理論解析と実験による検証結果

理論解析と実験で用いた回転変動率(Rotational fluctuation rate)の定義式を式1に示す。

$$\text{回転変動率} = ((\text{最大出力回転数} - \text{最小出力回転数}) / \text{入力回転数}) \times 100\% \quad (\text{式} 1)$$

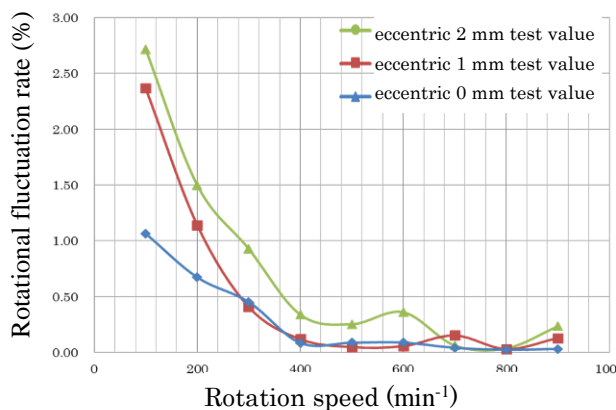


Fig.6 Rotational fluctuation rate at no load (0 Nm) (analysis)

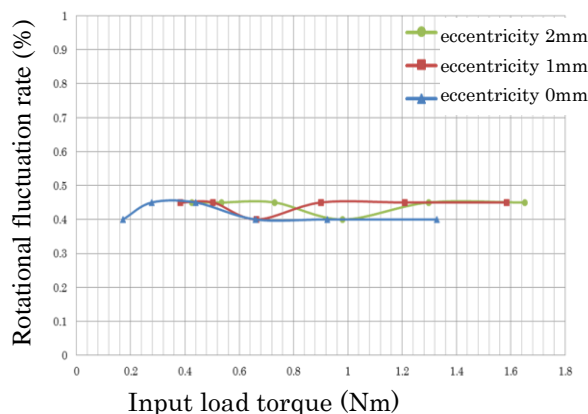


Fig.7 Rotational fluctuation rate under load (Rotation speed 100 min⁻¹) (analysis)

図 6 及び図 7 に、理論解析で求めた回転変動率を示す。解析は回転変動が十分に安定してから、回転変動率を求めている。無負荷 (0 Nm) 時の回転変動率の解析結果を図 6 に、負荷時の回転変動率の解析結果を図 7 に示す。低速回転時 (300 min^{-1} 以下)

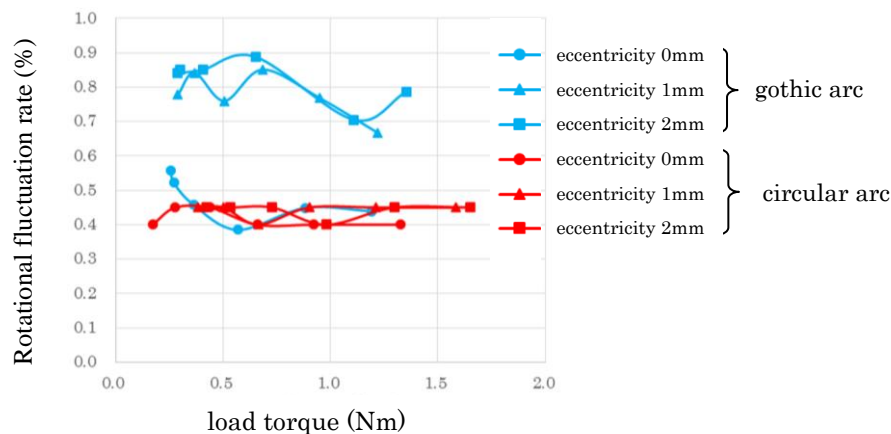


Fig.8 Rotational fluctuation rate under load (experiment)

には回転変動率は大きく、高速回転時 (400 min^{-1} 以上) には回転変動率は小さくなり、実用上問題の無い領域である 0.5% 以下であることがわかる。図 7 は低速回転 (100 min^{-1})、負荷 (0.2~1.6 Nm) 時の回転変動率であるが、小さな負荷を作用させれば、回転変動率は実用上問題の無い領域である 0.5% 以下であることがわかる。通常使用時は何らかの負荷が作用していると考えられることから、本軸継手が十分な等速性を有していることがわかる。

回転変動率の低減策のひとつとして、従来のサーキュラーク溝だけでなく、ゴシックアーク溝を有する本軸継手を試作し、回転変動率を計測した。従来のサーキュラーク溝 (グラフ赤色) とゴシックアーク溝 (グラフ青色) の回転変動率の実験結果を図 8 に示す。ゴシックアーク溝の方が 2 点接触のためボールの安定性が良く、回転変動率が低減できると予想したが、実験結果はサーキュラーク溝の方が、回転変動率が小さい結果となった。これはゴシックアーク溝の方が、ボールが拘束されるため、機構上両円板の案内溝中心の直交位置にボールが配置され難いと考えられる。

② 限界特性の指標である内部に作用する力の理論解析と限界特性の推定結果

部品間に作用する力の変化を示す。回転数を変化させても、作用する力にはあまり変化が見られなかったため、入力回転数は 1000 min^{-1} とし、負荷 2Nm 時のボールと案内溝間に作用する力の解析結果を図 9 から図 11 に示す。また、それぞれの結果から算出した、最大 Hertz 接触面圧を図 12 から図 14 に示す。

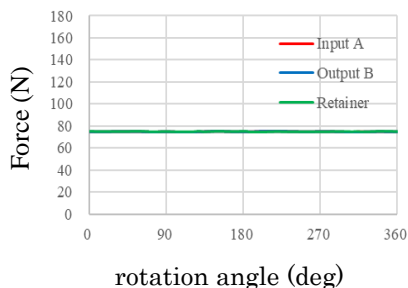


Fig.9 Force(Ball-Groove)

eccentricity 0 mm, load torque 2 Nm

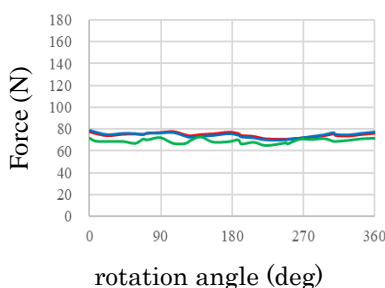


Fig.10 Force(Ball-Groove)

eccentricity 1 mm, load torque 2 Nm

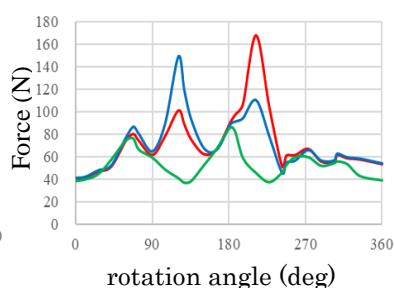


Fig.11 Force (Ball-Groove)

eccentricity 2 mm, load torque 2 Nm

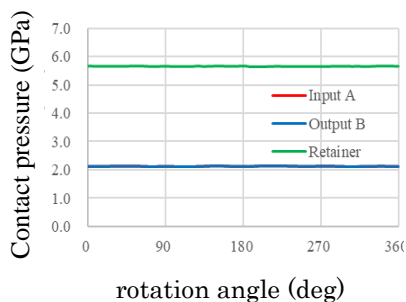


Fig.12 Max. Hertz contact pressure(Ball-Groove)

eccentricity 0 mm, load torque 2 Nm

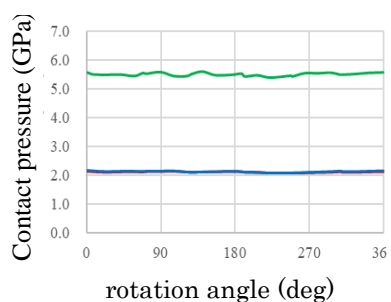


Fig.13 Max. Hertz contact pressure(Ball-Groove)

eccentricity 1 mm, load torque 2 Nm

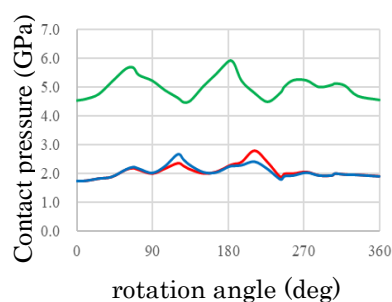


Fig.14 Max. Hertz contact pressure(Ball-Groove)

eccentricity 2 mm, load torque 2 Nm

図 11 より本軸継手のボールと案内溝に作用する力は、1 回転中に 2 回の力のピークが生じることがわかる。これらは、図 15 に保持器に作用する力の示すについても同様である。ボールと案内溝に作用する力ピークは、他の回転角(rotation angle)で定常的に生じる力の約 3 倍の力が生

じている。これらの作用する力のピークから限界時の応力を推定すれば良いことがわかる。

偏心量と部品間に作用する力の関係の解析結果を示す。また、偏心量が大きくなるにしたがい、保持器とボール間の力が増加していることがわかる。これは回転変動率についても同様である。

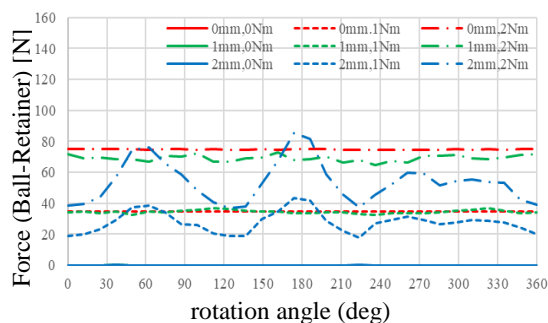
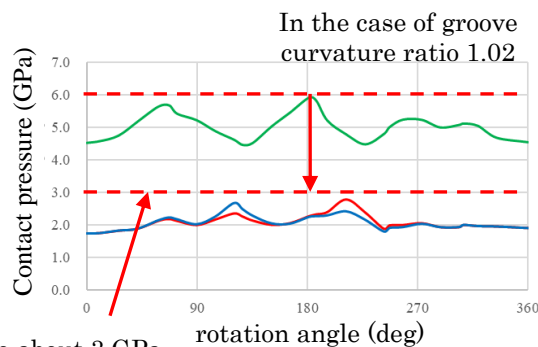
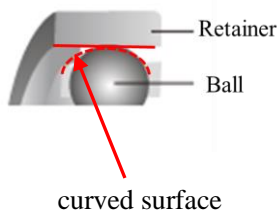


Fig.15 Force (Ball-Retainer)

③ ①と②の結果よりわかる限界偏心時の設計改良

①と②の結果から保持器に作用する面圧が大きく、負荷容量を低下させる要因となることがわかる。その改良設計策として保持器とボールの接触位置部を曲面とし、面圧を小さくすることがあげられる。図16には保持器孔内面を曲面とすることで、面圧を約半分に低下でき、耐久性向上に繋げることができることを示す。



Drop to about 3 GPa
Fig.16 Improvement idea of reducing pressure

参考文献

- (1) 野崎 孝志, 晁 会亮, 叶 慶澤, 日本機械学会 2015 年次大会講演論文集, 2015/9/13.
- (2) 特許公報第 4578111 号
- (3) 特許公報第 4656867 号
- (4) THK(株) ボールねじカタログ
- (5) B.J. Hamrock; D. Dowson: Ball Bearing Lubrication, John Wiley & Sons (1981)
- (6) B. J. Hamrock: Fundamentals of Fluid Film Lubrication, McGraw-Hill, Inc. (1994).

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 5 件)

- ① 野崎孝志, 晁会亮, 叶慶澤, 超大偏心量許容形等速軸継手の研究, 日本機械学会 2015 年次大会, 2015/9/13.
- ② 野崎孝志, 超大偏心量許容形等速軸継手の研究, 日本機械学会東海支部(TEC17), 2017/3/15.
- ③ 野崎孝志, 内野翔太, 超大偏心量許容形等速軸継手の研究, 日本機械学会 2017 年次大会, 2017/9/5.
- ④ 野崎孝志, 鈴木祥, 超大偏心量許容形等速軸継手の研究, 日本機械学会 2018 年次大会, 2018/9/12.
- ⑤ 鈴木祥, 野崎孝志, 超大偏心量許容形等速軸継手の研究, 日本機械学会東海学生会卒業研究発表会(TEC18), 2019/3/6. [Best presentation award 受賞]

[産業財産権]

○取得状況 (計 2 件)

①名称: 軸継手

発明者: 野崎孝志, 袴田博之, 葉山佳彦

権利者: NTN株式会社

種類: 特許

番号: 特許第 4578111 号

出願年: 平成 16 年 1 月 22 日

国内外の別: 国内

②名称: 軸継手

発明者: 野崎孝志, 袴田博之, 曾根啓助

権利者: NTN株式会社

種類: 特許

番号: 特許第 4656867 号

出願年: 平成 16 年 6 月 22 日

国内外の別: 国内