

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：33803

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04158

研究課題名(和文)新規駆動系実用化展開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 permissible type constant velocity joint for practical application of new drive trains

研究代表者

野崎 孝志 (Nozaki, Takashi)

静岡理工科大学・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) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：新規駆動系を実現するための新たな機械要素として、超大偏心量許容形等速軸継手(以下、軸継手)を研究開発した。この軸継手を実用化展開するためには、軸継手の設計指針となる耐久性を明確にする必要がある。本研究では、軸継手の主要な耐久性として、駆動軸側と従動軸側間に配置されたボールが転動する案内溝の寿命を考慮し、寿命理論を構築することで、理論計算により明確にした。これらの寿命理論の裏付けデータを取得するため、軸継手専用の寿命試験機を新たに開発設計し、寿命試験を実施した。現状は、フレーキング等の表面損傷には至っていないが、試験条件を変化させながらデータ取得数を増加させ、構築した寿命理論の精度向上を図る。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在自動車の電動化が積極的に推進され、さらに空飛ぶクルマなどが現実となりつつあるモビリティの変革期においては、新たな駆動系が求められている。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、これら駆動システムの小型軽量化などに寄与することができる。さらには、ヒューマノイドロボットや人間協調型ロボットの駆動システムにおいても、ごく狭い範囲で摩擦損失の少ない円滑な作動を可能とすることから、小型軽量化やエネルギー効率の向上を図ることができる。

研究成果の概要(英文)：As a new mechanical element to realize a new drive system, we have researched and developed ultra-large eccentricity permissible type constant velocity joint (hereinafter referred to as the joint). In order to put the joint into practical use, it is necessary to clarify the durability that serves as a design guideline for the joint. In this study, as one of the main durability of the joint, the life of the guide groove where the ball is placed between the drive shaft side and the driven shaft side rolls is considered, and the life theory of the joint is constructed and clarified by theoretical calculation. In order to obtain data to support these life theories, we have developed and designed a new life test rig dedicated to the joint and conducted life tests. At present, surface damage such as flaking has not been achieved, but the number of data acquisitions will be increased while changing the test conditions to improve the accuracy of the constructed life theory.

研究分野：動力伝達系における機素潤滑、機械要素、機構設計、及び振動・騒音

キーワード：軸継手 混合潤滑 微小滑り ヘルツ接触 接触解析 転がり疲労寿命 機構解析 振動

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、組立性も良い等多数の特長を有している<sup>(1)</sup>。

本軸継手の最大の特長は、両回転部材の案内溝が回転中は常に直交し、その直交位置にボールが配置されることにより、回転伝達機構の等速性が維持されることが、本軸継手の原理であり、従来の機構では実現できなかった超大偏心量を許容し、軸方向長さが短い構成で、円滑な等速伝達を可能としている。

本軸継手の構造を図1に示す。

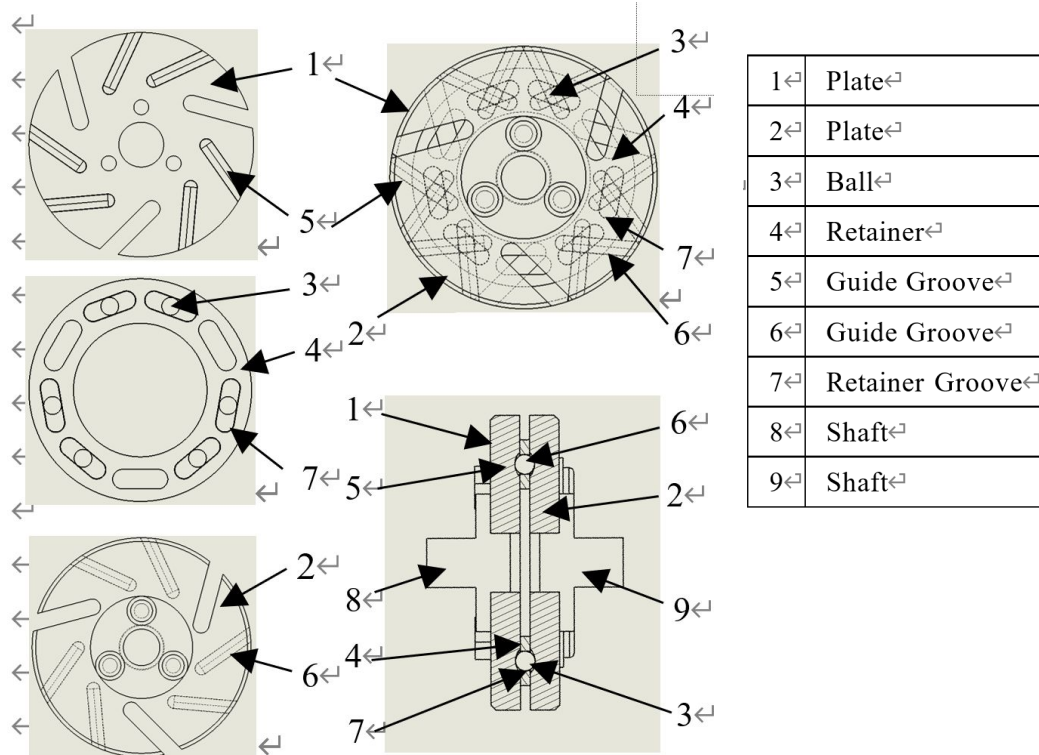


Fig.1 Structure of Ultra-large eccentricity amount permissible type constant velocity joint

(2) 本軸継手は、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<sup>(2),(3)</sup>)されてからの期間が短く、定性的及び定量的特性が明確ではない。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、等速性などの運動特性に関する内部機構の研究に加え、実用範囲を拡大するには、混合潤滑理論を適用した摩擦特性、及びフレーキングに代表されるはく離寿命を学術的に明確にする必要がある。

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、及び特許第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、転がりと微小滑りが混在する機構を有する本軸継手の疲労寿命を明確にし、実用化適用範囲を拡大することで、ロボティクス分野や自動車分野の駆動系などの新規駆動系の実現に寄与することである。加えて、本軸継手の摩擦特性を混合潤滑理論や転がり軸受のスピン・滑り機構の理論を適用することで機構の安定性や寿命の向上を達成する。

3. 研究の方法

(1) 駆動軸側と従動軸側の間に配置されたボールが転動する案内溝の寿命理論

本軸継手や転がり軸受のような転がり接触面では、ボールと案内溝との接触部に作用する繰返し荷重下では、潤滑が適切であっても材料表面下の介在物や金属学的転位によって、転が

り疲れによって“うろこ状”に転動面がはがれる現象が生じる、これはフレーキングと呼ばれる損傷であり、き裂を発生させるのは最大直角せん断応力  $\tau_0$  であると仮定した転がり接触の疲労現象として、Lundberg-Palmgren により統計学的な理論展開が確立されている。

本研究では、軸継手におけるボールと案内溝の接触部に転がり軸受で採用されている Lundberg-Palmgren 理論を応用することによって軸継手の寿命理論を構築し、寿命予測を行った。

Lundberg-Palmgren 理論は、“疲労破損の発生確率は、最も厳しいせん断応力が発生する負荷表面下深さ  $z_0$  の関数になる”ことを考慮し、“破損確率  $F(n)$  は、負荷を受けた材料の状態と負荷を受けた材料の状態変化及び応力体積に比例する”として理論展開している。

軸継手の疲労限を表現するためには統計的な扱いが必要なため、まず、1 個のボールとボールが転動するプレートの案内溝との接触部の転動疲労寿命分布にワイブル分布を適用する。ワイブル理論より、案内溝の深さ  $z$  の体積要素  $dv$  において破損確率  $F$  は式[1]のように表すことができる。

$$\ln(1 - F) = \int_v n(\sigma) dv \quad [1]$$

ここで、 $\sigma$  は応力、 $n(\sigma)$  は材料特性、 $v$  は体積である。負荷が  $n$  回作用したとき、負荷状態下の深さ  $z$  の体積要素  $\Delta v$  において、少なくとも  $n$  回の負荷に耐える残存確率を  $S(n)$  とする。少なくとも  $n + dn$  回耐える確率は、 $n$  回の荷重サイクルを耐えた確率と  $dF(n)$  の荷重状態変化に耐えた確率の積であることから、 $dn$  が零の極限を考えて  $0 \sim N$  回まで積分すると式[2]が得られる。

$$\ln \frac{1}{S} \sim \frac{T^c u^e L^e l}{\zeta^{h-1}} \left( \frac{Q}{ab^2} \right)^{\frac{c+h-1}{2}} \left( \frac{1}{a} \right)^{\frac{c-h-1}{2}} Q^{\frac{c-h+1}{2}} \quad [2]$$

ここで、 $T = \tau_0 / \sigma_{\max}$ 、 $\sigma_{\max} = 3Q / (2\pi ab)$ 、 $Q$  は案内溝に作用する荷重、 $a$  は接触だ円の長軸、 $b$  は接触だ円の短軸、 $l$  は 1 回転当たりのボールの移動距離、 $u$  は 1 回転当たりの案内溝の 1 点にかかる負荷回数である。転がり軸受の耐久試験で得られた指数と材料定数を使うことで式[2]から式 [3]及び式[4]を誘導できる。

$$Q_c = A \Phi D^{1.8} \quad [3]$$

$$\Phi = \left( \frac{T_1}{T} \right)^{3.1} \left( \frac{\zeta}{\zeta_1} \right)^{0.4} \frac{(a^*)^{2.8} (b^*)^{3.5}}{(D \Sigma \rho)^{2.1}} \left( \frac{D}{l} \right)^{0.3} u^{-\frac{1}{3}} \quad [4]$$

ここで、 $A = 1102$ 、 $T_1$  は接触部が円接触 ( $b/a = 1$ ) のときの  $T$  の値、 $\zeta = z_0/b$ 、 $\zeta_1$  は接触部が円接触 ( $b/a = 1$ ) のときの  $\zeta$  の値、 $a^*$  は接触だ円の長軸の無次元量、 $b^*$  は接触だ円の短軸の無次元量、 $D$  はボール直径、 $\Sigma \rho$  は曲率和である。式[3]及び[4]から荷重  $Q$  が作用している時のボールと案内溝との接触部の 100 万回転あたりの疲労寿命を計算し、プレートの案内溝数及びプレートの数から本軸継手の総合疲労寿命を求めた。

## (2) 寿命試験用のテストピースと寿命試験機の設計・製作

寿命試験に使用した本軸継手を図 2 に示す。使用したテストピースの案内溝形状は、図 3 に示すような曲率半径を持つゴシックアーク溝<sup>(4)</sup>とし、接触角は  $30^\circ$  とした。

寿命試験機の全体図を図 4 に示す。

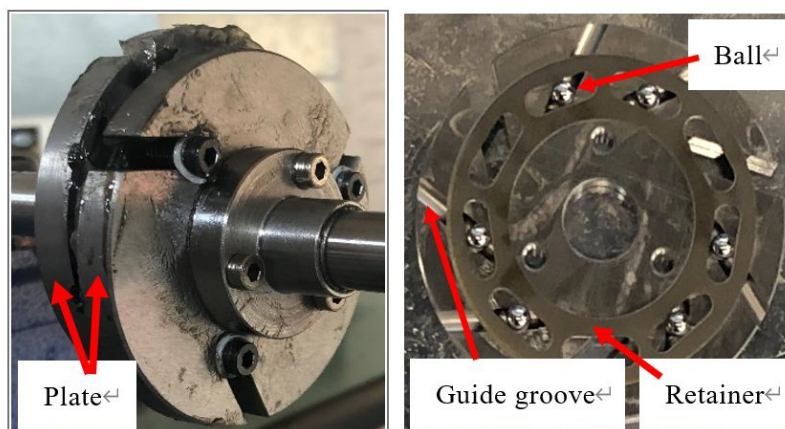


Fig.2 Test product of ultra-large eccentricity amount permissible type constant velocity joint for fatigue life test

ファンクションジェネレータの TTL 出力によるパルス信号をサーボドライバに入力し、バル

ス信号の周波数を変化させることにより、AC サーボモータの入力回転数を制御する。また、パウダブレーキの印加電流を変化させることで、トルクを作用させて負荷を与え、トルクメータによってトルクの測定を行った。

振動コンパレータにより、設定値以上の振動を検知した場合に AC サーボモータが自動停止することで、寿命時間を計測した。また、ペーパーレスレコーダによって、稼働時間、負荷トルク、軸継手温度、及び振動加速度を記録している。

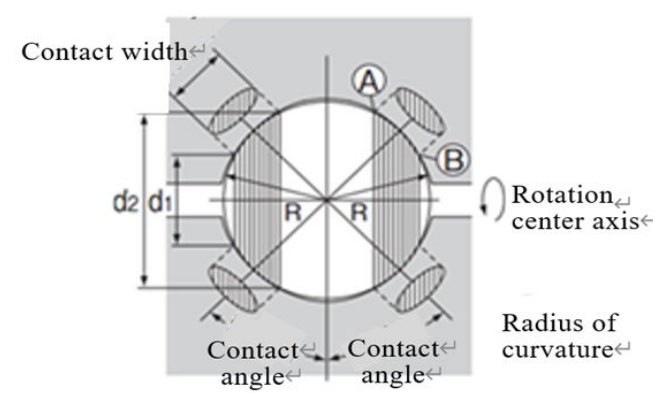


Fig.3 Gothic arc of plate guide groove

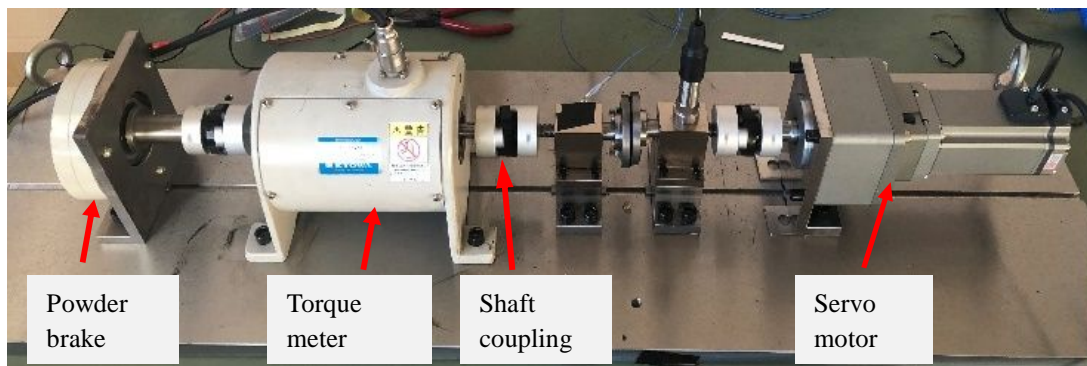


Fig.4 Test rig for fatigue life

#### 4. 研究成果

(1) 駆動軸側と従動軸側の間に配置されたボールが転動する案内溝の寿命理論<sup>(7)</sup>

ヘルツ接触面圧<sup>(5),(6)</sup>を 1.5 ~ 3.0 GPa (伝達トルク, 5.59 ~ 44.7 Nm に相当) とした場合の 10% 破損寿命の計算結果を時間と日数で求めた結果を図 5 及び表 1 に示す。

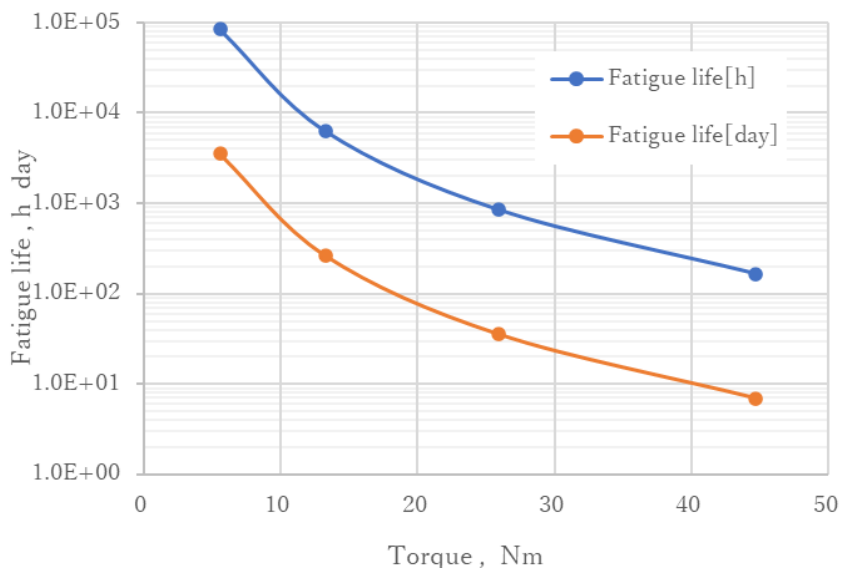


Fig.5 Calculation result of fatigue life

Table 1 Calculation result of fatigue life

Torque[Nm]	Hertzian pressure[GPa]	Fatigue life[h]	Fatigue life[day]
5.59	1.5	$8.46 \times 10^4$	3 526
13.3	2.0	$6.35 \times 10^3$	265
25.9	2.5	$8.54 \times 10^2$	36
44.7	3.0	$1.65 \times 10^2$	7

(2) 寿命試験結果<sup>(7)</sup>

寿命試験結果の一例として、案内溝の試験前と試運転後のボールの”あたり”がついた状態の案内溝拡大写真を図6に示す。(a)は試験前の案内溝、(b)は試運転後の案内溝転動面の状態を示す。

次に、回転数 =  $400 \text{ min}^{-1}$ 、偏心量 = 3 mm、接触面圧 = 1.2 GPa の条件で、130 h 運転後の案内溝部の状態を図7に示す。テストピースに大きな温度上昇がみられないこと及びボールにテーパーカラーが発生していないことから焼付きの発生はなく、またフレーキング等の表面損傷も生じていないことから疲労寿命には至っておらず、運転の継続は可能と判断できる。

今後、試験条件を変更してデータ取得数を増加し、寿命理論の精度向上を図る。

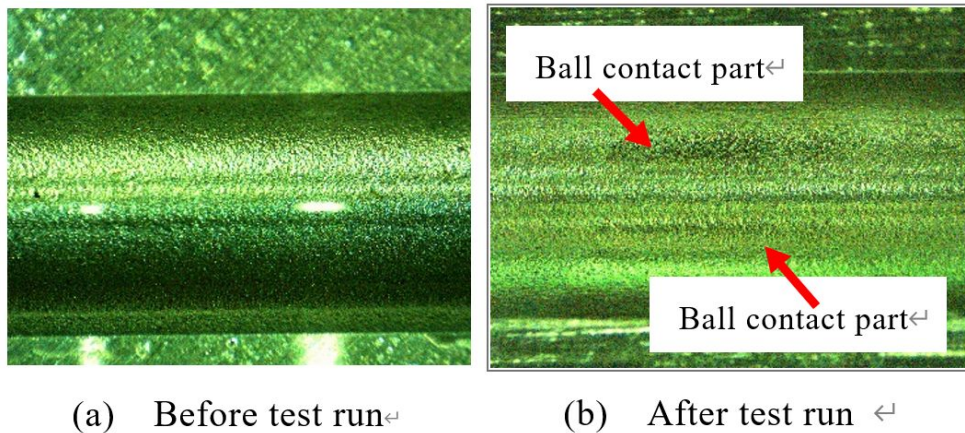


Fig.6 Test results of guide groove after familiar driving

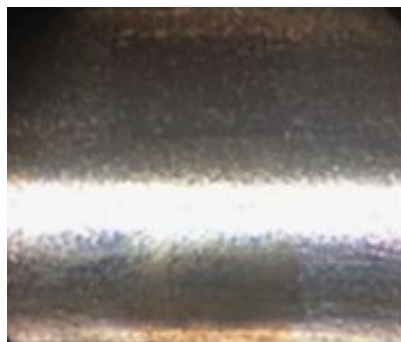


Fig.7 Test results of guide groove after 130 h driving

< 引用文献 >

- (1) 野崎孝志, 白井康介, 村上広希, 超大偏心量許容形等速軸継手の研究, 日本機械学会年次大会講演論文集(2019.9.11).
- (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).
- (7) 鈴木碧唯, 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学生員卒業研究発表講演会(2022.3.4-9).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 鈴木祥, 野崎孝志
2. 発表標題 超大偏心量許容形等速軸継手の研究
3. 学会等名 日本機械学会 東海支部
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野崎孝志, 白井康介, 村上広希
2. 発表標題 超大偏心量許容形等速軸継手の研究
3. 学会等名 日本機械学会 年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木碧唯, 野崎孝志
2. 発表標題 超大偏心量許容形等速軸継手の研究
3. 学会等名 日本機械学会 東海支部
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

静岡理科大学ヴェークル工学研究室  
<https://www.sist.ac.jp/me/nozaki/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------