

令和 6 年 6 月 8 日現在

機関番号：10103

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03827

研究課題名（和文）トラクションドライブの転がり疲労損傷メカニズム解明と疲労強度予測式の導出

研究課題名（英文）Clarification of the rolling fatigue damage mechanism and derivation of a fatigue strength prediction formula of traction drives

研究代表者

成田 幸仁（NARITA, Yukihiro）

室蘭工業大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：90431519

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：EV用モータの高速化に対応可能な減速機の構成要素としてポテンシャルがあるトラクションドライブの転がり疲労強度設計の信頼性を高めるために、疲労損傷メカニズムを分析した。疲労試験途中のローラ内部を観察した結果、これまで非金属介在物等の内部起点損傷と考えられてきた原因が、ローラ表面からのき裂発生とローラ内部への進展であることが分かった。そこで、破壊力学のParis則と疲労寿命予測手法をトラクションドライブに適用したところ、予測寿命と疲労試験結果がおおむね一致した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

トラクションドライブには歯車等の他の伝動要素と比較して高速回転に適するという利点がある。これに破壊力学の疲労寿命予測式を適用した例は見られず、結果もおおむね一致したことは、良い成果と言える。ただし、精度向上の余地はあり、また、介在物がき裂進展速度に及ぼす影響も未解明である。これらをさらに解決出来れば、トラクションドライブの疲労強度設計の信頼性が高まり、EV用モータの高速化に対応可能な減速機の実現が可能となると思われる。

研究成果の概要（英文）：To improve the reliability of the rolling fatigue strength design of traction drives, which have potential as a component of reducers that can be adapted to the increased speed of EV motors, we analyzed the fatigue damage mechanism. Observation of the inside of the roller during fatigue testing revealed that the cause of damage, which had previously been thought to be internally initiated damage such as from non-metallic inclusions, was cracks initiating from the roller surface and propagating into the roller's interior. We then applied the Paris law of fracture mechanics and a fatigue life prediction method to the traction drive, and found that the predicted life and fatigue test results were generally in agreement.

研究分野：設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：機械要素 トラクションドライブ 疲労強度

1. 研究開始当初の背景

環境保護や省エネルギーが人類全体の問題として取り沙汰されるようになって久しく、世界各国では様々な環境規制が強力に実施されている。それに対応するため、自動車分野では、エンジンからモータへの動力源の転換が進められている。モータには最高回転速度がエンジンよりも速いという特性がある。そのため、大きな減速比を持った変速機が求められている。車両の軽量化を目的として、モータはさらに小型高速化すると予想されており、毎分 5 万回転超を目標に掲げるメーカーも存在する。この速度は伝動要素にとって未知の領域である。歯車では歯面の摩擦による動力損失や歯面損傷の増大、金属ベルト・チェーンでは遠心力によるトルク伝達に寄与しない張力の増大など、迅速な解決が難しい問題が生じる可能性が高い。

一方、伝動要素の一種にトラクションドライブがある。右図に示すように、ローラ間に存在する弾性流体潤滑油膜のせん断力で動力を伝達する機構である。CVT が構成可能であることが有名であるが、ローラが油膜に隔てられて直接接触しないことから高速回転に適するという隠れた利点もある。これを用いれば、EV に適した減速機が実現できると考えられる。

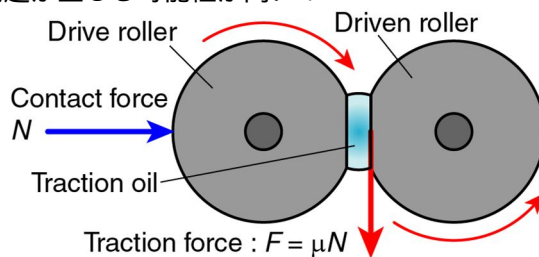


図1 トラクションドライブ

しかし、トラクションドライブには、信頼性の高い疲労強度設計方法が確立されていないという学術的な問題が存在する。

図1に示す油膜のトラクション係数 μ は高くても0.1前後であるため、動力伝達には強い押付力 N が必要である。それにより、転がり疲労損傷が生じる。そのため、設計段階における疲労強度の予測は必須である。疲労損傷の形態ははく離であり、強度はばらつく。き裂はローラ表面下を進展することから、これまでは材料内部に存在する非金属介在物が損傷起点となり、その介在物寸法によって強度のばらつきが生じると考えられてきた。申請者らは介在物を模した人工欠陥を内部に導入したローラで転がり疲労試験を行い、欠陥寸法を変数とする疲労強度予測式を導出した。その計算結果を人工欠陥の無い通常ローラを用いた疲労試験結果と比較したところ、疲労強度の標準偏差は一致したが、強度は実験結果の方が大幅に高かった。右図は疲労試験後のローラのはく離損傷部の写真である。損傷部周辺には数多くの表面き裂が見え、これらが結合してはく離損傷に至ったようにも見える。このことから、初期き裂の発生位置やき裂進展速度などのはく離損傷に至るまでのメカニズムを見直す必要があるというのが現状である。

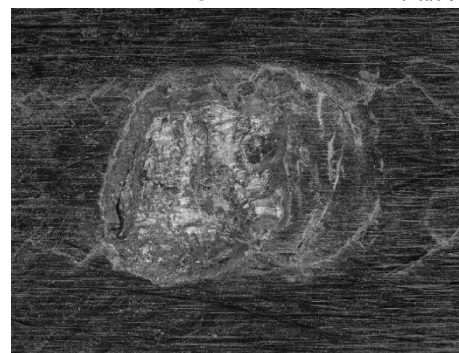


図2 ローラのはく離損傷部写真

2. 研究の目的

上記を受けて、本研究は、トラクションドライブの転がり疲労損傷メカニズム解明と疲労強度予測式の導出を目的とした。これらの達成のために、

- トラクションドライブにおける損傷起点の特定
- はく離損傷に至るまでのメカニズムの解明
- 上記に基づく疲労強度と寿命予測式の導出

という、これまでのトラクションドライブの研究に例が無い新しい取り組みを行った。

3. 研究の方法

初めに、右図に示すこれまでの研究で得られた多数個の転がり疲労試験結果と材料内部の欠陥寸法を変数とする疲労強度予測式を用いて、 10^7 回における時間強度から損傷起点となった介在物寸法を逆算して求めた。その結果、欠陥寸法は $5\mu\text{m}$ 程度となった。この程度の小さい介在物が損傷起点となる可能性は低いとされており、材料組織の強度そのものがローラの疲労強度を決定している可能性が高まった。

そこで、ローラの疲労き裂の進展を時系列で観察することにした。図4に本研究で使用している二円筒転がり試験機と試験ローラを示す。試験機中央部にローラ対があり、てこを用いてローラボックスを水平に押すことで押付力を与える。この状態で試験機内部のモータからベルトを介して駆動ローラを回転させ、その動力をローラボックス右側の

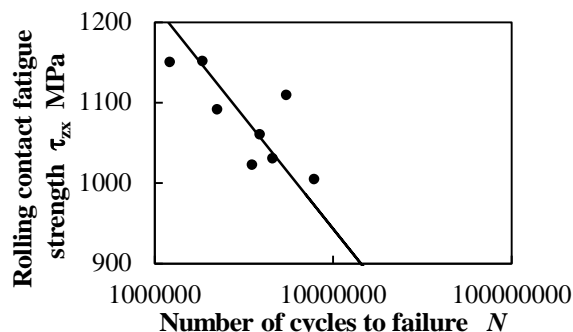


図3 疲労試験結果(R10ローラ)

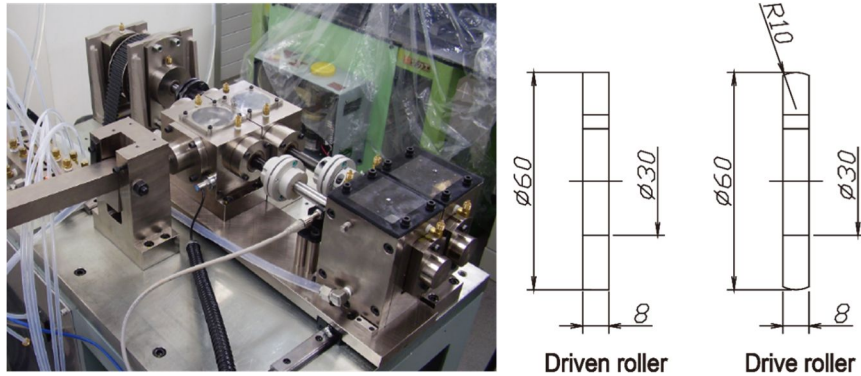


図4 二円筒転がり疲労試験機と試験ローラ

ギヤボックス内の歯車対により2%減速させて従動ローラ軸を駆動する．これによりローラ間に滑りを発生させ、トラクションドライブ状態を再現する．回転回数は従動ローラ軸の近接センサーでカウントする．ローラの損傷による振動を加速度ピックアップにより検知して試験機を自動停止させる．図3に示したこれまでのS-N線図を参考に、中程度の荷重となる押付力5675Nを与え、疲労寿命に至る途中の $N=10^6$ 、 2×10^6 、 2.7×10^6 回で試験機を停止して、得られたローラの内部を高速精密切断機で切断してデジタルマイクロスコブにより観察した．その結果から、ローラの損傷起点の特定とはく離損傷に至るまでのメカニズムの解明を試みた．さらに、この観察結果に基づいて破壊力学のParis則と疲労寿命予測式の各パラメータを求め、それにより得られた予測疲労寿命と実験結果を比較して、疲労寿命予測式の精度を確認した．

4. 研究成果

(1) 損傷起点の特定とはく離損傷に至るまでのメカニズムの解明

実験で得られたローラ疲労き裂の一例を図4に示す．ローラ表面の矢印はトラクション力の作用方向を示す．どの観察においてもき裂はローラ表面から発生し、材料内部の介在物から発生したものは観察されなかった．また、ローラ表面からのき裂が介在物に引き寄せられ、接続している例も多く見つかった．このことから、ローラ表面に初期き裂が発生し、それがローラ内部へと進展してはく離損傷に至ること、及び、介在物がき裂進展に影響して疲労強度や寿命のばらつきに影響を与える可能性があることが明らかとなった．



図4 ローラ表面からのき裂 ($N=10^6$)

(2) 破壊力学理論に基づく疲労強度と寿命予測式の導出

上記の結果から、破壊力学における疲労寿命予測式がトラクションドライブにも適用できる可能性が高まった．そこで、実験で観察されたき裂長さとし荷繰返し数との間に下記に示すParis則の関係が成り立つかを確認した．

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$$

ここで、 a はき裂長さ、 ΔK は応力拡大係数、 C と m は実験定数である．実験で得られたき裂長さとし荷繰返し数の関係を図5に示す．時間経過によりき裂の個数と長さが増加しており、トラクションドライブにおいてもParis則が成り立つことが分かった．また、この結果から実験定数 C と m を求めることが出来た．得られた結果を用いて、下記に示す破壊力学の疲労寿命予測式から疲労寿命 N_p を予測した．

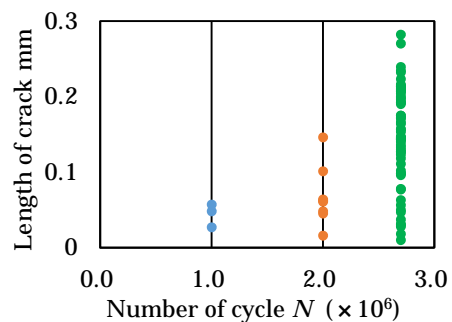


図5 負荷繰返し数とき裂長さ

$$\Delta K_0^m N_p = \frac{2a_0}{(m-2)C}$$

ここで、 ΔK_0 と a_0 は初期応力拡大係数と初期き裂長さである．予測寿命 $N_p = 6.4 \times 10^6$ を得、実験値の $N = 4 \times 10^6$ とおおむね一致した．

トラクションドライブに破壊力学の疲労寿命予測式を適用した例は見られず、結果もおおむね一致したことは、良い成果と言える．しかしながら、さらなる精度向上の余地はある．一番の要因は、疲労寿命直前のローラのき裂観察結果が得られていないことである．また、介在物がき裂進展速度に及ぼす影響も未解明である．これらを解決出来れば、トラクションドライブの疲労寿命予測精度が高まり、EV用モータの高速化に対応可能な減速機の実現が可能となると思われる．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 藤原涼雅, 伊藤光生, 成田幸仁, 藤井正浩, 風間俊治, 長船康裕, 増山知也	4. 巻 No.21-61
2. 論文標題 トラクションドライブの転がり疲労強度評価(非金属介在物の影響)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本機械学会第20回機素潤滑設計部門講演会予稿集	6. 最初と最後の頁 1105(PDF)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 平井公望, 伊藤隼一, 佐々木颯人, 桑田晶大, 山田琉世, 成田幸仁, 風間俊治	4. 巻 242-1
2. 論文標題 トラクションドライブの転がり疲労き裂の観察と損傷起点の推定	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 日本機械学会北海道学生会第53回学生員卒業研究発表講演会予稿集	6. 最初と最後の頁 119(PDF)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 藤原涼雅, 伊藤光生, 成田幸仁, 藤井正浩, 風間俊治, 長船康裕, 増山知也
2. 発表標題 トラクションドライブの転がり疲労強度評価(非金属介在物の影響)
3. 学会等名 日本機械学会第20回機素潤滑設計部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平井公望, 伊藤隼一, 佐々木颯人, 桑田晶大, 山田琉世, 成田幸仁, 風間俊治
2. 発表標題 トラクションドライブの転がり疲労き裂の観察と損傷起点の推定
3. 学会等名 日本機械学会北海道学生会第53回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------	---------