

令和 3 年 6 月 9 日現在

機関番号：10103

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01357

研究課題名（和文）トラクションドライブの疲労強度シミュレーションの開発と高精度高信頼性設計の実現

研究課題名（英文）Realization of high precision and high reliability design of traction drive by development of simulation of rolling contact fatigue strength

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） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：油膜のせん断力によって動力を伝達するトラクションドライブの転がり疲労強度を予測できるシミュレーション手法を提案した。このシミュレーションはローラ材料中の非金属介在物の影響を考慮することで、疲労強度のばらつきも予測可能である。シミュレーション結果と多数個の転がり疲労試験結果を比較したところ、疲労強度とそのばらつきは概ね一致した。また、材料の介在物密度やローラクラウニング半径を変化させた実験結果とシミュレーション結果も一致した。これらにより、介在物がトラクションドライブの転がり疲労強度に影響を与えることと、それに基づくシミュレーションの有効性が明らかになった。

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の転がり疲労強度に関する研究は実験に基づく評価が中心であり、個々の設計事例に対して多数個の疲労試験が必要であった。それに対して、損傷メカニズムに基づいて転がり疲労強度を予測する本手法は、強度のばらつき予測に加えて、材料やローラ諸元の変更にも対応可能である。トラクションドライブは電気自動車に適する減速機の構成要素として期待されており、本研究の発展によって、その研究開発効率の向上と信頼性の高い装置設計が期待できる。

研究成果の概要（英文）：A simulation of the rolling contact fatigue strength of a traction drive was proposed. The simulation also can predict the scatter of fatigue strength by considering the distribution of sizes of inclusions in the element material. The calculated fatigue strength and its standard deviation was about equal to the experimental result. Furthermore, the calculated results were about equal to the experiment by changing the cleanliness of material and the curvature radius of test roller. As a result, the influence of inclusions on the rolling contact fatigue strength of a traction drive and the effectiveness of proposed simulation have become clear.

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毎分数千回転ほど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。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。

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(無段変速機)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。このトラクションドライブを用いれば、電動化した自動車により適した変速機が実現できると考えられる。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工学的な問題が存在する。

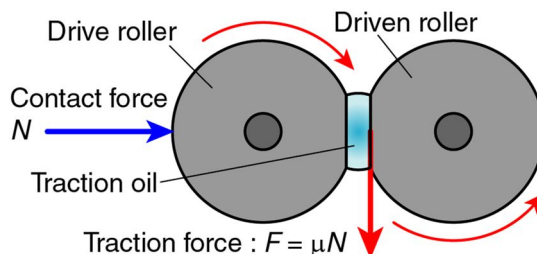


図1 トラクションドライブ

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。疲労損傷の形態は材料内部に存在する非金属介在物を起点とするはく離損傷であり、その介在物が大きいほど強度が低下することは分かっている。しかし、ローラ中の介在物は不可視である上に、数多く存在するそれらのどれが損傷起点になるかも予測できない。結果、ローラが壊れるまで強度が分からない上に、その値もばらつくというのが現状となっている。

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疲労強度とそのばらつきを推定するシミュレーション手法を提案することを目的とする。その達成のためには、これらの達成のためには、

- トラクションドライブの転がり疲労強度を支配する応力成分を特定すること
- 介在物寸法と転がり疲労強度の関係を定量的に明らかにすること
- ローラ中に多数含まれる介在物のどれが損傷起点となるかを予測すること
- 上記の損傷起点予測のために、実在の鋼材の介在物寸法分布をバーチャルに再現することが必要である。

3. 研究の方法

多数個の転がり疲労試験を行い、ローラのはく離損傷部を観察して疲労強度を支配する応力成分を特定する。同時に、上記実験と平行してローラ材料中の介在物の寸法と個数を分析し、計算機上に実際のローラを再現する。さらに、これまで導出した非金属介在物寸法に基づく疲労強度推定式により各介在物周りの強度とローラ内部応力を比較することで、損傷起点となる介在物と強度を計算機上で予測する。このプロセスを繰り返すことで、計算機上で多数個の疲労試験を再現する。得られた計算結果と実験結果を比較して、強度とそのばらつきの推定精度を検証する。さらに、鋼材(介在物の寸法分布)とローラ形状(内部応力)を変えて、同様の実験と計算を行い、それらの因子が転がり疲労強度に与える影響と、提案する手法の汎用性を検証する。

4. 研究成果

(1) 転がり疲労試験による疲労強度の取得

図2に示す二円筒試験機と試験ローラを用いて転がり疲労試験を行い、疲労強度を支配する応力成分を特定した。また、S-N試験法に基づき、 10^7 転がりにおける時間強度とばらつき(標準偏差)を求めた。試験ローラはSCM420浸炭焼入れ鋼で作成した。

疲労試験は、ローラに与える押付力 N を段階的に変化させて行った。ローラの損傷形態は、全てはく離であった。はく離損傷部を3Dデジタルマイクロスコープを用いて観察した一例を図3に示す。観察の結果、ローラ表面から約0.5mm程度の深さにおいて転がり方向とほぼ平行にはく離していることが分かった。このことから、疲労き裂は転がり方向に平行なせん断応力 τ_{zx} によって進展し、はく離損傷に至ることが分かった。

上記結果に基づき、評価すべき応力を τ_{zx} と定めた。市販境界要素プログラムを用いて実験時の各押付力 N におけるローラ内部の τ_{zx} 分布を計算し、はく離損傷部の観察で得られたき裂進展深さに生じる τ_{zx} を特定した。その結果をS-N曲線上にプロットしたものを図3に示す。疲労強

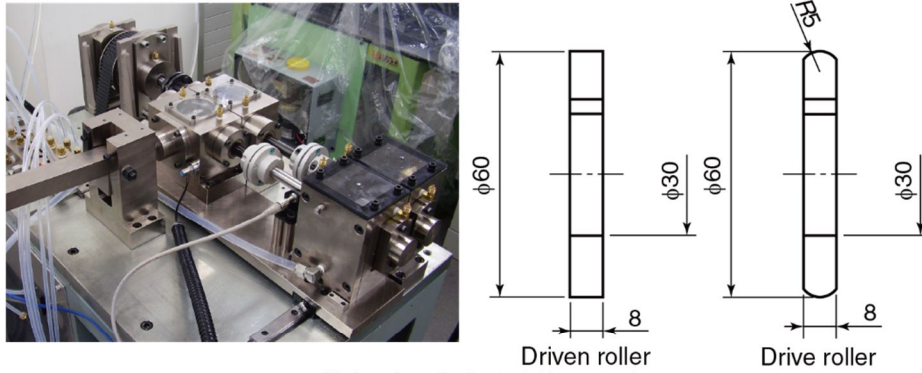


図2 二円筒転がり疲労試験機と試験ローラ

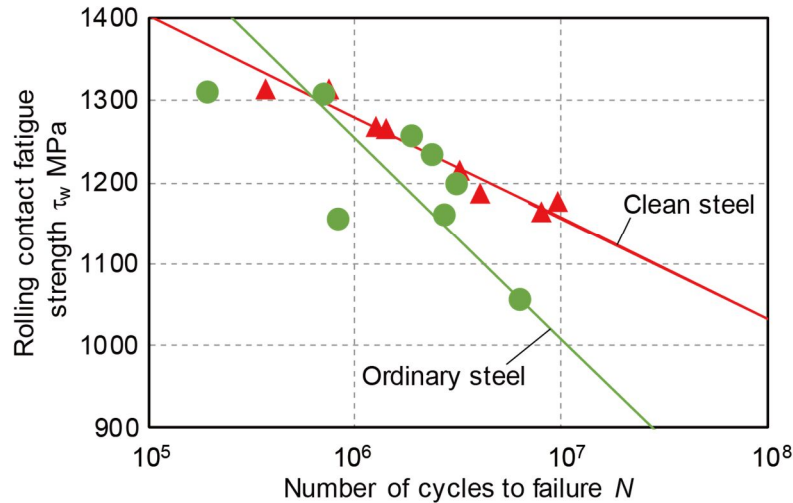


図3 疲労試験結果 (R5ローラ)

度 1009 MPa , 標準偏差 85.0MPa であった .

(2) 転がり疲労強度シミュレーションの構築と実験結果との比較

これまでの研究で , 次に示すトラクションドライブの 10^7 転がりにおける転がり疲労強度推定式が得られている . $area$ はローラ材料中の非金属介在物の転がり方向投影面積 , H_v は介在物が存在する位置でのローラ材料のビッカース硬さである .

$$\tau_w = 0.97 \times \frac{1.56(H_v + 120)}{(\sqrt{area})^{1/6}}$$

上式を用いて , 計算機上で多数個の疲労試験を再現するシミュレーション方法を構築した . まず , デジタルマイクロスコブを用いてローラ材料に含まれる介在物の寸法とその個数を測定した . 全観察面積 600 mm^2 における介在物寸法ヒストグラムを図 4 に示す . この結果に基づいて計算機上のローラ材料に介在物を分布させ , そこから図 2 に示した試験ローラ寸法と同じ仮想ローラを複数個作成した . その仮想ローラ中の各介在物回りの転がり疲労強度 τ_w を上記推定式を用いて求め , 各押付力 N におけるローラ内部の τ_{zx} 分布と比較して , 損傷の有無を判断した . 硬さ H_v には疲労試験後のローラの硬さの測定結果を与えた .

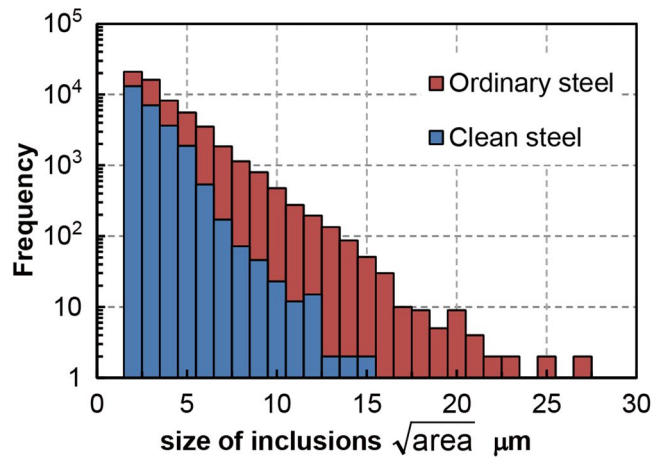


図4 介在物寸法ヒストグラム

1000 枚の仮想ローラから得られたシミュレーション結果と前述の実験結果との比較を図 5 に示す . シミュレーションでは転がり疲労強度 850 MPa , 標準偏差 35 MPa が得られた . 前述の実験結果と比較すると概ね一致していると言える . シミュレーションの方が 250 MPa ほど高いが ,

それは浸炭焼入れによって試験ローラに導入される圧縮残留応力の影響が考慮されていないためと考えられる。これを考慮することで、シミュレーション結果は実験結果にさらに近づくと考えている。

(3) 清浄鋼ローラによる転がり疲労試験

近年、介在物の小径化と数量低減を図った清浄鋼が普及し始めている。図4に清浄鋼をデジタルマイクロスコープを用いて観察した結果から得られた介在物寸法ヒストグラムを合わせて示す。全観察面積は前述と同様の600mm²である。介在物の単位面積あたりの個数は通常鋼が100個/mm²、清浄鋼が44個/mm²であった。また、観察された介在物の中で最大のものは、通常鋼で33.6μm、清浄鋼で15.1μmであった。

この清浄鋼をトラクションドライブのローラ材料に用いることで、疲労強度の向上とばらつき低減が期待できる可能性がある。そこで、清浄鋼を用いて図2に示した試験ローラを作成し、疲労試験を行った。得られた試験結果を図3に合わせて示す。清浄鋼ローラの転がり疲労強度1156MPa、標準偏差15.4MPaであった。前述の通常鋼ローラと比較すると、転がり疲労強度は14.6%向上し、標準偏差は69.6MPa減少した。図4の清浄鋼の介在物寸法ヒストグラムを前述の転がり疲労強度シミュレーションに与えて計算したところ、転がり疲労強度936MPaとなった。通常鋼ローラのシミュレーション結果と比較して強度は10.0%向上し、実験と同様の結果が得られた。また、シミュレーションの標準偏差は37.3MPaとなり、実験と概ね等しかった。このことから、介在物の小径化と数量低減はトラクションドライブの転がり疲労強度向上とばらつき低減に有効であり、提案したシミュレーションもそれを再現できることが分かった。

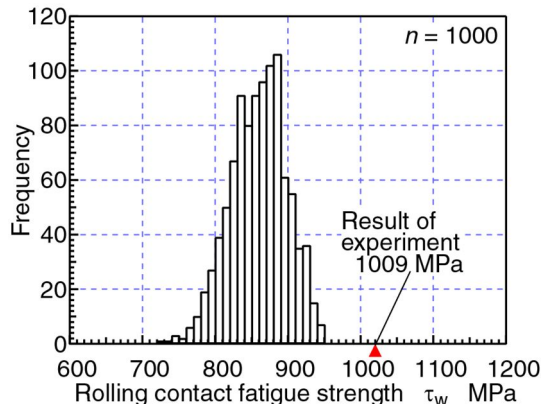


図5 疲労強度シミュレーション結果

(4) ローラ形状と転がり疲労強度の関係の評価

トラクションドライブのトルク容量の増加には、図1に示した押付力Nの増加が必要である。このときローラ間の接触面圧が上昇して、ローラの塑性変形や油膜切れによる焼き付き発生などの危険性が高まる。これら为了避免するために、ローラのクラウニング半径を増加させて面圧を低減する方法がよく用いられる。この時、ローラ間の弾性接触面積が増加して、高応力下に置かれるローラ内部体積は増加する。それにより、その領域内に含まれる介在物数が増加し、それに合わせて強度に影響を及ぼすほどの比較的大きな介在物が存在する可能性も増加する。これによって、トラクションドライブの転がり疲労強度も低下する可能性がある。

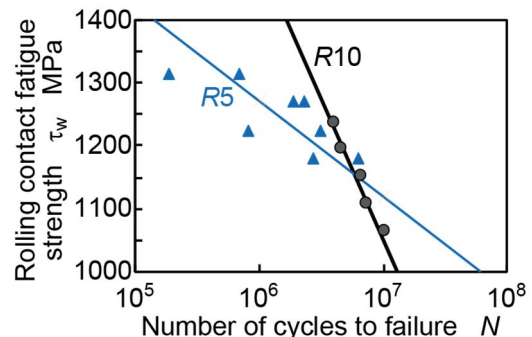


図6 クラウニング半径と転がり疲労強度の関係

上記を評価するために、図2に示した駆動ローラのクラウニング半径をR5からR10に増加させて、多数個の転がり疲労試験を行った。使用したローラ材料はR5通常鋼ローラと同じSCM420浸炭焼入れ鋼である。これまでのところ、必要な実験回数の半分程度まで実験が進行している。その結果を図6に示す。き裂進展深さの測定が完了していないため、実験時の各押付力Nにおけるローラ内部の最大せん断応力 $\tau_{zx \max}$ で整理している。公平な比較とするためにR5ローラの転がり疲労強度も $\tau_{zx \max}$ で示してあり、そのため疲労強度1121MPaは図3に比べて大きくなっている。R10ローラの転がり疲労強度は1051MPaであり、R5ローラと比較して6.3%減少した。前述の転がり疲労強度シミュレーションの結果は782MPaとなり、R5ローラのシミュレーション結果に対する減少量8.0%は実験と近い値を示した。以上により、クラウニング半径の増加によってトラクションドライブの転がり疲労強度は低下し、提案したシミュレーションもそれを再現できることが分かった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3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 村井翔, 人見祐輝, 中澤健介, 井上滉希, 成田幸仁, 風間俊治	4. 巻 No.192-1
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（損傷起点深さの影響）	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本機械学会北海道学生会第48回学生員卒業研究発表講演会講演論文集	6. 最初と最後の頁 343-344
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 中澤健介, 井上滉希, 人見祐輝, 村井翔, 成田幸仁, 風間俊治	4. 巻 No.2019-1
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（通常鋼と清浄鋼の比較）	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本機械学会東北支部第54期講演会講演論文集	6. 最初と最後の頁 88-89
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 伊藤光生, 藤原涼雅, 村井翔, 成田幸仁, 風間俊治	4. 巻 No.212-1
2. 論文標題 トラクションドライブのクラウニング半径が転がり疲労強度に与える影響の評価	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本機械学会北海道学生会第50回学生員卒業研究発表講演会講演論文集	6. 最初と最後の頁 149-150
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3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 村井翔, 人見祐輝, 中澤健介, 井上滉希, 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強度評価（損傷起点深さの影響）
3. 学会等名 日本機械学会北海道学生会第48回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中澤建介, 井上滉希, 人見祐輝, 村井翔, 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強度評価 (通常鋼と清浄鋼の比較)
3. 学会等名 日本機械学会東北支部第54期講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤光生, 藤原涼雅, 村井翔, 成田幸仁, 風間俊治
2. 発表標題 トラクションドライブのクラウニング半径が転がり疲労強度に与える影響の評価
3. 学会等名 日本機械学会北海道学生会第50回学生会卒業研究発表講演会
4. 発表年 2021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
研究分担者	藤井 正浩 (Fujii Masahiro) (80209014)	岡山大学・自然科学研究科・教授 (15301)	
研究分担者	風間 俊治 (Kazama Toshiharu) (20211154)	室蘭工業大学・大学院工学研究科・教授 (10103)	
研究分担者	増山 知也 (Masuyama Tomoya) (80282094)	小山工業高等専門学校・機械工学科・教授 (52201)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究 分 担 者	長船 康裕 (Osafune Yasuhiro) (30241409)	室蘭工業大学・大学院工学研究科・講師 (10103)	

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