

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：10103

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820028

研究課題名(和文) 転がり疲労強度設計によるトラクションドライブ変速機のパワーウェイトレシオ向上

研究課題名(英文) Improvement of Power to Weight Ratio of Traction Drive Transmission by Design of Rolling Contact Fatigue Strength

研究代表者

成田 幸仁 (NARITA, Yukihiro)

室蘭工業大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：90431519

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：トラクションドライブ要素の転がり疲労強度シミュレーションを提案した。実験結果に基づき、ローラ材中の介在物面積と表面硬さにより現される、1千万転がりにおける転がり疲労強度推定式を導出した。材料観察により介在物の密度と寸法分布を決定し、それに基づいて仮想ローラを計算機上に作成してシミュレーションを行った。

100枚の仮想ローラによりシミュレーションを行ったところ、転がり疲労強度の平均値800MPaを得た。並行して14点S-N試験法を行い、これまでのところS-N曲線の概形を得た。その結果から転がり疲労強度を推定し、860MPaを得た。現状でのシミュレーションとの誤差8%となり、概ね良い結果を得た。

研究成果の概要(英文)：A simulation of the rolling contact fatigue strength of a traction drive element was proposed. The estimation formula of rolling contact fatigue strength at the 10 million cycles, which is calculated from the size of inclusions in the material and the hardness of roller, was obtained by the experiment. To create the virtual rollers which contains the inclusions on the computer, the distributions and the densities of inclusions were decided by the observation of specimens.

The simulation of rolling contact fatigue strength was carried out by comparing the estimation formula with stress distributions. After calculation of 100 rollers, 800 MPa of average rolling contact fatigue strength was estimated. In parallel, the 14 S-N rolling contact fatigue test are in progress. Up to this time, the outline of S-N curve is obtained. 860 MPa of rolling contact fatigue strength is predicted from this S-N curve. Comparing that result with the simulation, we find an error of 8%.

研究分野：機械工学、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

トラクションドライブは油膜のせん断力によって動力を伝達する機構であり、無段変速機 (CVT) が構成でき、振動や騒音が少ない等の利点がある。特に CVT は省エネに寄与する技術として注目されており、実用化例には金属ベルト式や日本精工・日産自動車により開発されたトロイダル方式(文献 1)がある。トラクションドライブ変速機の研究は活発に行われているが、高面圧高せん断力がローラの強度や寿命に及ぼす影響や、油膜のレオロジーがトルク容量や動力伝達効率に及ぼす影響等不明な点が多く、設計方法は十分に体系化されていない。にもかかわらず、コスト削減や軽量化による省エネ促進のための小型軽量化が要求されており、それにより増加する応力に対する疲労強度・寿命の確保という課題を突き付けられている。

トラクションドライブの動力伝達には押付力が必要であり、小型化するほど応力が增大する。転がり軸受と良く比較されるトラクションドライブでは Lundberg-Palmgren の軸受寿命予測理論が多く用いられるが、高強度材の使用、ローラ表面に働くせん断力による内部応力変化とそれによる評価応力の未定、強度が材料内の欠陥や介在物の影響を受ける等、軸受とは異なる取り扱いとすべきところが多い。しかも、運転状態やローラ形状による油膜せん断力の変化、材料中の欠陥や介在物等の影響因子により疲労強度も変化するため、設計変更のたびに実験が必要となり、多大な時間と労力が必要となる。

## 2. 研究の目的

上記背景を鑑み、各影響因子を考慮した転がり疲労強度推定式を求め、それをを用いてシミュレーションでトラクションドライブの転がり疲労強度を求める方法を開発することを目的として研究を行った。

## 3. 研究の方法

### (1) トラクションドライブの転がり疲労強度の導出

二円筒転がり疲労試験機を用いて実験を行い、評価応力が面圧かせん断応力を同定する。さらに、実験結果を解析し、油膜せん断力、材料中の欠陥や介在物等のトラクションドライブ特有の影響因子を考慮できる転がり疲労強度推定式を導出する。

### (2) 転がり疲労強度シミュレーション法の開発

ローラ材料の観察により欠陥や介在物の寸法や密度を測定し、それらの分布を統計学的に取り扱って計算機上でローラ材料を表現できるようにする。さらに、油膜せん断力が働くローラの内部応力を解析し、転がり疲

労強度推定式と比較して損傷の有無を判定する転がり疲労強度シミュレーションプログラムを開発する。

### (3) 転がり疲労試験機の改良と転がり疲労試験の実施

現有のトラクションドライブ用二円筒転がり疲労試験機はトルク容量不足であり、ローラを疲労損傷させるのに十分な押付力を与えることが出来なかった。本試験機のトルク容量を向上させる改良を行い、多数個の転がり疲労試験を実施する。

### (4) シミュレーション結果と実験結果の比較

(2)で提案するトラクションドライブの転がり疲労強度シミュレーションを実行し、その結果を(3)の実験結果と比較する。

## 4. 研究成果

### (1) トラクションドライブの転がり疲労強度の導出

材料中の非金属介在物が疲労損傷の起点となることが、これまでの様々な研究で報告されていたが、疲労強度に対する定量的な評価がなされていなかった。そこで、介在物を模した人工欠陥を放電加工によりローラに導入して転がり疲労試験を行った。その結果、図1に示すように、人工欠陥を起点としてはく離損傷が生じた。また、ローラの転がり方向に平行にき裂が進展したため、評価応力はせん断応力であると同定した。また、既知の寸法の人工欠陥をローラに導入して行った転がり疲労試験結果より、介在物の寸法とそれが存在する位置での表面硬さから表される、トラクションドライブの転がり疲労強度推定式を得た。

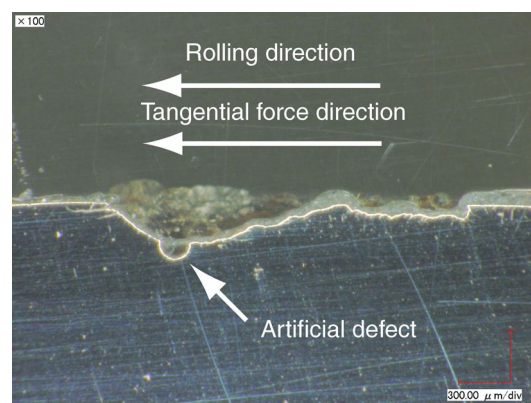


図1 人工欠陥から生じたはく離損傷

### (2) 転がり疲労強度シミュレーション法の開発

前述の通り、介在物寸法から表される疲労強度推定式は導出できたが、これだけではトラクションドライブの疲労強度を推定することはできない。それは、大小様々な大きさの非金属介在物がローラ中に大量に含まれ

ており、そのどれが損傷起点になるか分からないためである。しかも、ローラを破壊せずに介在物寸法を観察する方法は現在のところ存在しない。

そこで、ローラ材中に含まれる介在物の寸法と個数をマイクロSCOPEで測定し、その結果を統計処理することで、非金属介在物を含む実際の鋼材を計算機上に再現する方法を開発した。図2は介在物の測定結果であり、横軸は介在物寸法、縦軸はそれが材料中に存在する数である。

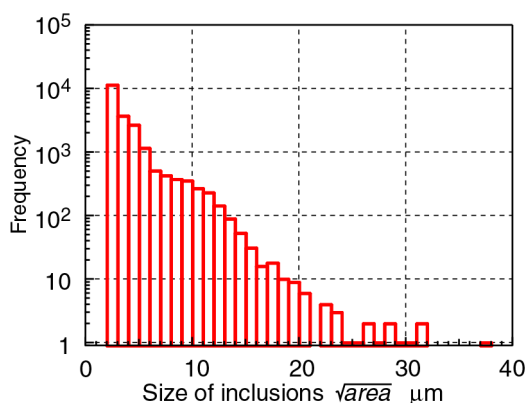


図2 介在物寸法ヒストグラム

この方法を用いて実際の介在物分布を有する仮想ローラを計算機上に再現し、ローラ内部の応力分布と各介在物周りの疲労強度を比較して損傷の有無を判断する転がり疲労強度シミュレーション法を開発した。ローラ内部の応力分布は、ローラ表面に働くトラクション力を考慮できる市販の境界要素法ソフトを用いて計算した。計算例を図3に示す。トラクション力の影響により、転がり方向に応力が増加していることが分かるこのシミュレーションを多数のローラで繰り返すことで、損傷起点となった介在物の寸法によるローラの強度の個体差（強度のばらつき）まで推定できるようになった。

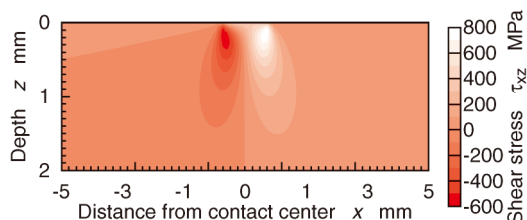


図3 ローラ内部応力

### (3) 転がり疲労試験機の改良と転がり疲労試験の実施

非力であった現有のトラクションドライブ用二円筒転がり疲労試験機を改良し、トルク容量を増加させた。これにより、ローラを疲労損傷させるのに十分な押付力を与えられるようになった。改良した試験機を図4に示す。テコに乗せる錘によって押付力を調節

する。テコがローラケース背面を押すことで、ローラ間に押付力が付与される。ローラ対は、モータとギヤボックスによって、疲労損傷するまで回転される。ローラが損傷すると振動が生じるため、それを加速度ピックアップにより検出してモータを自動停止させる。このときの回転回数を疲労損傷時の負荷繰り返し数とする。

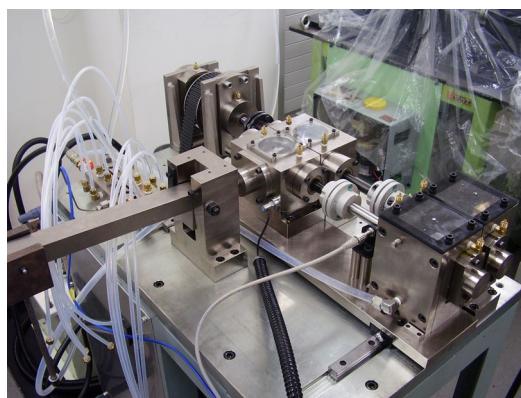


図4 二円筒転がり疲労試験機

### (4) シミュレーション結果と実験結果の比較

(2)のシミュレーションを実行した結果を図5に示す。仮想ローラ枚数は100枚である。図のように疲労強度のばらつきも推定できていることが分かる。破壊確率50%の強度は約800MPa、標準偏差は40MPaと推定された。

(3)の試験機を用いて14点S-N試験法により転がり疲労試験を行い、助成期間終了までに4対のローラが疲労損傷した。その平均値は860MPaである。本実験結果とシミュレーション結果を比較すると、誤差8%となり、概ね一致している。標準偏差については実験点数が不足しており、シミュレーションの推定精度の評価が出来ていない。助成期間終了後も疲労試験を継続し、強度とばらつきの推定精度をさらに検証する。

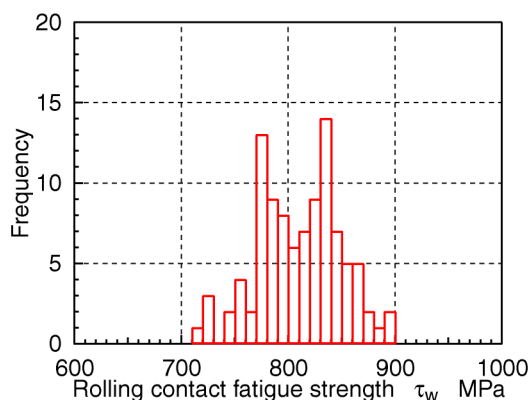


図5 シミュレーションによる疲労強度ヒストグラム

(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2件)

Yukihito NARITA, Naoto KATO, Masashi YAMANAKA, Toshiharu KAZAMA, Yasuhiro OSAFUNE, Tomoya MASUYAMA, Effect of crowning radius on rolling contact fatigue strength for traction drive elements (Evaluation by simulation), Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 査読有, Vol.8 No.6, 2014, pp.1-13, 10.1299/jamdsm.2014jamdsm0081

Yukihito NARITA, Masashi YAMANAKA, Toshiharu KAZAMA, Yasuhiro OSAFUNE, Tomoya MASUYAMA, Simulation of Rolling Contact Fatigue Strength for Traction Drive Elements, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 査読有, Vol.7, No.3, 2013, pp.432-447, 10.1299/jamdsm.7.432

[学会発表](計7件)

高木佑太, 佐藤亮介, 笹川竜哉, 成田幸仁, 風間俊治, トラクションドライブ要素の転がり疲労強度評価, 日本機械学会北海道学生会第45回学生員卒業研究発表講演会, 2016.3.7, 函館高専(北海道・函館市).

山本大平, 笹川竜哉, 佐藤亮介, 成田幸仁, 風間俊治, シミュレーションによるトラクションドライブの転がり疲労強度推定, 日本機械学会北海道学生会第45回学生員卒業研究発表講演会, 2016.3.7, 函館高専(北海道・函館市).

加藤直人, 成田幸仁, 山中将, 風間俊治, トラクションドライブ要素の転がり疲労強度シミュレーション(仮想ローラの多層化による計算精度向上), 日本機械学会東北支部第50期講演会, 2015.3.13, 東北大学(宮城県・仙台市).

佐藤亮介, 成田幸仁, 加藤直人, 風間俊治, トラクションドライブ用二円筒転がり疲労試験機の設計, 日本機械学会北海道学生会第44回学生員卒業研究発表講演会, 2015.3.7, 北海道科学大学(北海道・札幌市).

笹川竜哉, 成田幸仁, 加藤直人, 風間俊治, トラクションドライブ要素の転がり疲労強度シミュレーション(清浄鋼の疲労強度), 日本機械学会北海道学生会第44回学生員卒業研究発表講演会, 2015.3.7, 北海道科学大学(北海道・札幌市).

成田幸仁, 加藤直人, ムハマド ハフィズ, 山中将, 風間俊治, トラクションドライブ要素の転がり疲労強度シミュレーション(第3報, クラウニング半径の影響), 日本機械学会 MPT2013 シンポジ

ウム 伝動装置, 2013.11.14, 宮日会館(宮城県・宮崎市).

Yukihito Narita, Toshiharu Kazama, Masashi Yamanaka, Rolling Contact Fatigue Strength Simulation for Traction Drive Elements, International Conference on Gears, 2013.10.8, ガーHING・バイ・ミュンヘン(ドイツ).

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

成田 幸仁(NARITA, Yukihito)  
室蘭工業大学・工学研究科・准教授  
研究者番号: 90431519