

令和 元 年 6 月 17 日現在

機関番号：32613

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06049

研究課題名（和文）接触する大変形回転体の解析的摩耗進展モデルの開発と改良技術の提案

研究課題名（英文）Development of physical wear progress model of a largely deformed rolling contact body and the proposal for improvement of wear

研究代表者

中島 幸雄（Nakajima, Yukio）

工学院大学・先進工学部・教授

研究者番号：10594070

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,900,000 円

研究成果の概要（和文）：上記研究に関し次の3課題に取り組んだ。複合入力を考慮できるモデルへの拡張、接地圧分布、接触面の粗さの摩擦係数への影響の検討、開発モデルを用いて改良手法を提案。第一の課題では、予測した入力の時刻歴データを入力の変換率に変換する手法を開発した。第二の課題では、Archardの多重接触理論を用いて路面の複雑性による摩擦係数の接触圧力依存性を定性的に評価できることを実験的に確認した。第三の課題では、任意の路面での複合入力下の解析的摩耗モデルを開発し摩耗エネルギーを予測した。本モデルを用いてタイヤ偏摩耗改善への設計要因の寄与解析を行った。その結論は従来知見と合致しておりモデルの有効性が確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大変形回転体はプリンタのゴムローラ、タイヤなど多く製品に活用されている。それらの大変形回転体の摩耗は入力の時間変化、摩擦係数、接触面の粗さ、接地圧分布に関係している上に、摩耗が時間とともに進展（自励摩耗）する独特な現象があり、その解析は難しかった。従来研究では上記要因の一部しか考慮できておらず、自励摩耗のメカニズムが未解明という課題があった。今回の研究では上記の要因をすべて考慮できる解析的摩耗モデルを開発し、そのモデルを用いて自励摩耗のメカニズムを解明、摩耗の改良手法を提案した。上記製品の摩耗を改良できれば省資源化、エネルギーの有効活用が可能になり環境問題の解決への寄与が期待できる。

研究成果の概要（英文）：Three topics are studied in this research. (1) Extend the current wear model to be able to consider combined external force. (2) Consider the effect of pressure distribution and road roughness on the friction coefficient. (3) Propose the ways for improvement of wear. In the first topic, we developed the procedure to convert the external forces to a tire to a probability density function. In the second topic, we confirmed that the pressure dependency of friction coefficient can be qualitatively estimated by the multiple contact theory proposed by Archard. In the third topic, we developed the physical wear model that can consider the effect of combined external force and road roughness. Using this model, the contribution of tire design parameters to wear is analyzed. Since the conclusion of this analysis agrees with the current knowledge, the developed model is effective to improve tire wear.

研究分野：タイヤ力学

キーワード：摩耗モデル タイヤ 摩耗進展

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

大変形回転体はプリンタのゴムローラ、タイヤなど多く製品に活用されている。それらの摩擦を改良できれば省資源化、エネルギーの有効活用が可能になり環境問題の解決に寄与できる。特に、モータリゼーションの進展に伴い二酸化炭素を初めとした温室効果ガスの増加が懸念されている。今後のさらなるモータリゼーションの進展に対応するためには温室効果ガス排出の抑制や省資源化が必要とされている。そこでタイヤにおいては省燃費性能と耐摩耗性を両立することが求められている[1]。

2. 研究の目的

大変形回転体の摩耗はせん断力が摩擦力より大きくなり滑りが生じた時に発生し、接触面から離れる滑り域と呼ばれる狭い領域で生じる。その摩耗は通常の摩耗と異なり、すり減った部分がより摩耗しやすくなる自励摩耗と呼ばれる偏摩耗が発生することがある。偏摩耗が発生すると他の部分が正常でも使用できなくなるので、資源やエネルギーの損失につながる。

回転体の摩耗力学に関する研究は摩耗量と関連した摩耗エネルギーに関する解析的な研究[2]及び有限要素法（FEM）に代表される計算力学を用いた研究、摩耗の室内・実車評価法の研究などがある[3]。しかし、摩耗研究の多くは摩耗量のみを摩耗エネルギー（せん断力と滑り長さの積）から摩耗を検討していた。そのため偏摩耗、特に自励摩耗の検討例はほとんど無く、半坂・中島の研究[4]のみである。そして自励摩耗のメカニズムも明らかになっていない。

図1に示す彼らの研究では、幅方向と周方向応力によって生じる摩耗エネルギーが摩耗とともにどのように変化するかを検討された。最初は幅方向摩耗エネルギーが支配的であるが、次第に周方向摩耗エネルギーが支配的になり、特異的な段差摩耗が生じる様子が予測されている。しかし、このモデルは①自由回転時のみの入力であること、②接地圧分布を放物線と仮定していること、③摩擦係数の接地圧分布依存性を考慮しておらず一定であること、のために活用の範囲が狭く、予測精度に限界がある。

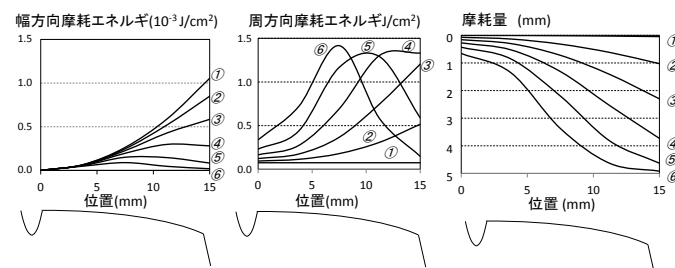


図1 摩耗進展モデル（番号は走行距離に相当）[4]

そこで、本研究ではこれらの課題を解決することによって、プリンタのゴムローラ、タイヤなど多く製品に活用されている大変形回転体の偏摩耗の進展に関する解析的摩耗モデルを確立することが目的である。このモデルによって自励摩耗のメカニズムが明確になるので、メカニズムを通して摩耗の改良手法を提案し産業界に貢献することが期待できる。

3. 研究の方法

(1) 回転体にかかる複合入力を考慮できるモデルへの拡張

時間とともに変化する回転体への複合入力を周方向、幅方向入力に分解し、周方向、幅方向に関する入力を2次元の確率密度関数に変換する手法を確立した。

(2) 接地圧分布、接触面の粗さ、それらの摩擦係数への影響の検討

大変形回転体の摩耗を解析的に予測するため、酒井[5]の操縦安定性のモデルを摩耗エネルギーを算出できるように拡張した。このとき従来の検討では放物線型の接地圧分布が用いられてきたが、本研究では実測の分布に近い一般化放物線型の関数で表現した。さらに、接地圧分布は摩耗量によって変化するので、大変形回転体の接地圧分布をFEMで予測するとともに本研究予算で購入した試験機で接地圧分布、接地長を計測し、摩耗量の関数である接地圧・接地長モデルを作成した。

また、摩耗現象に深く関係する摩擦係数は接触面の粗さや接地圧分布によって変化するが、路面粗さを考慮して摩耗エネルギーを解析的に求めることは困難である。しかし、Hertzの接触理論、Archardの多重接触理論[6]に基づく摩擦係数モデルと実測した摩擦係数は比較的良い一致が見られている。そこで、路面の影響を摩擦係数モデルで表現し、それを接地圧分布モデルと組み合わせて解析的に摩耗エネルギーを算出した。

(3) メカニズム解析を通して改良手法を提案

開発した解析的摩耗モデルを用いて摩耗進展メカニズムが明らかにし、それに従い改良手法を創出した。そのアイディアは企業の従来知見と一致し、解析的摩耗モデルの有効性を検証できた。

4. 研究成果

(1) 回転体にかかる複合入力 considering できるモデルへの拡張

図2に摩耗コースの入力データを確率密度分布に変換するまでの流れを示す. Step1 では摩耗コースを実車で走行した時のタイヤへの横方向・前後方向入力を計測, または CarSim 等の車両モデルを用いて予測することでタイヤへの入力データを取得する. Step2 でそれらの入力データを単位距離当たりに細分化する. Step3 では細分化した1つ1つのデータを対応するタイヤにかかる横力と前後力に関する座標にプロットし, 入力の頻度分布を求める. そして, Step4 においてこの時刻歴入力の頻度分布を F E M の形状関数を用いてタイヤ入力の確率密度分布に変換する.

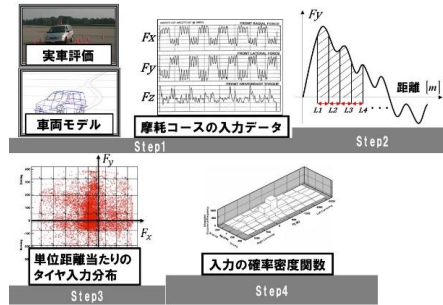


図2 入力データを確率密度分布に変換する手法

Step3 の時刻歴頻度分布から Step4 のタイヤの横力と前後力に関する確率密度分布へ変換するために, 入力の頻度分布をいくつかの格子状の領域に分割した後, それぞれの領域に有限要素法の形状関数を適用した[7].

これを各格子内のすべての点において行うことで, 数万点にのぼる入力の頻度分布のデータを, 数十点の3次元的確率密度分布のデータに変換可能となる.

(2) 接地圧分布, 接触面の粗さの摩擦係数への影響を考慮した摩耗エネルギー算出モデルの開発

① 接触面の粗さの計測装置の開発

実路面の凹凸を計測できるポータブルな装置を開発した. 計測波形を高速フーリエ変換して, 波長成分ごとに分離して表面粗さをスペクトルで表現することで, マクロな粗さからミクロな粗さまでがどの程度含まれているのかを定量化した.

② 路面粗さの摩擦係数の接触圧力依存性への影響

Archard の多重接触理論によれば, 路面の複雑性が増すにつれて摩擦係数の接触圧力依存性が小さくなる. そこで, 表面の複雑性を変えた3種類の路面 (A, B, C) を作成し, ゴムの摩擦係数の接触圧力依存性を計測し多重接触理論と比較した. 3種類の路面の摩擦係数の接触圧力依存性を $\mu \propto P^{-n}$ でカーブフィットして n の値を求めたグラフを図3に示す. 実験結果は多重接触理論と同様に路面の複雑性が増すと, 摩擦係数 μ の接触圧力依存性が小さくなることを示した.

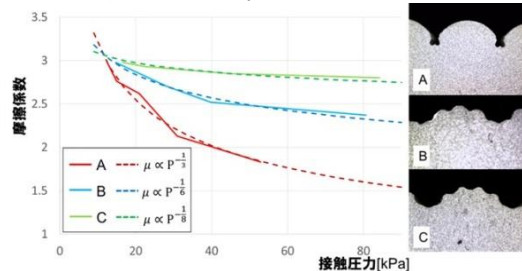


図3 複雑性を変えた路面の接触圧力依存性

摩擦係数の接地圧依存性は, 実接地面積の接触圧力依存性によって定まるので, 実接地面積の接触圧力依存性を計測した. 図4に示すように, 図3の摩擦係数の接触圧力依存性と図4は定性的に一致した.

次に, F E Mによる実接地面積の接触圧力依存性の計算をゴムブロックモデルを用いて行ない, 図3と比較した. 図3と図6は定性的に一致し, F E Mを用いて実接地面積の接触圧力依存性を予測することによって, 摩擦係数の接触圧力依存性が定性的に推定できそうなことがわかった.

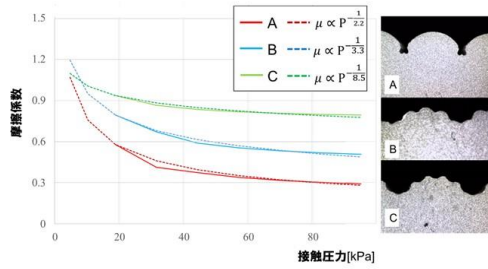


図4 実接地面積の接触圧力依存性（実測）

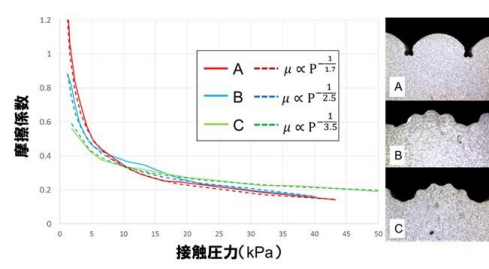


図5 実接地面積の接触圧力依存性（FEM）

③ 摩耗エネルギー算出モデル

タイヤの摩耗はせん断応力が摩擦力を超え、タイヤが滑った時に、タイヤの滑り出す点 l_h からタイヤの接地長 l までの滑り域という狭い範囲で起こる。この時、生じるせん断応力を $\bar{\tau}$ 、滑り距離を $\bar{S}$ とすると、タイヤが滑る時に生じる単位面積当たりのエネルギーは、摩耗エネルギー（摩擦エネルギー、摩耗仕事量ともいう）と呼ばれ式(1)で表される。

$$E^w = \int_0^l \bar{\tau} \cdot d\bar{S} = \int_0^l (\tau_x dS_x + \tau_y dS_y) \quad (1)$$

ここで、 τ_x, τ_y はそれぞれ前後方向、横方向のせん断応力、 S_x, S_y はそれぞれ前後方向、横方向の滑りである。

本研究では活用範囲の拡大と予測精度の向上を目指し、酒井の操縦安定性モデル[5]を用いて解析的摩耗進展モデルの開発を行った。従来の解析的摩耗モデルと本モデルの違いは以下の通りである。

- ① 接地圧分布をラジアルタイヤに近い一般化放物線型で近似。
- ② 横力によるベルト全体の横変形を考慮。
- ③ セルフアライニングトルクによるベルト全体のねじれによる、実スリップ角の減少を考慮。
- ④ 動摩擦係数の滑り速度依存性、接触圧力依存性を考慮。
- ⑤ 制駆動力による周方向滑りと横力による横方向滑りを同時に考慮する複合滑りモデルを用いることによって、大きな入力時の摩耗も予測可能。
- ⑥ タイヤへの入力を詳細な頻度分布に変換。

④ 摩耗エネルギー計算結果

図6にスリップ角とスリップ率を変化させたときの摩耗エネルギーの計算例を示す。制動時の摩耗エネルギーの方が駆動時の摩耗エネルギーよりも若干大きい。これは制動時の滑り距離が駆動時よりも大きくなるためであり、微小入力を仮定した従来の理論式では、考慮できない。

鈴鹿サーキットを走行した時のタイヤの摩耗予測を例題に検討した。タイヤへの入力をCarSimで予測し、タイヤ入力を確率密度分布へ変換した（図7）。図8は図6と7を掛け合わせた摩耗エネルギー期待値である。図10は鈴鹿サーキットで走行するタイヤの摩耗進展の予測で、摩耗が進むにつれてタイヤのブロック剛性が増加するために摩耗し難くなることが予測されている。

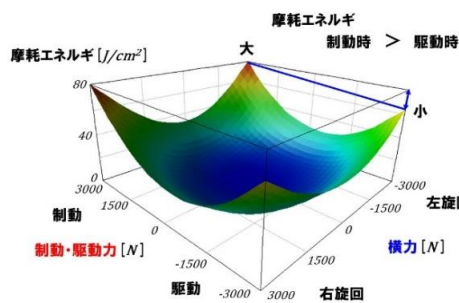


図6 複合入力における摩耗エネルギー分布

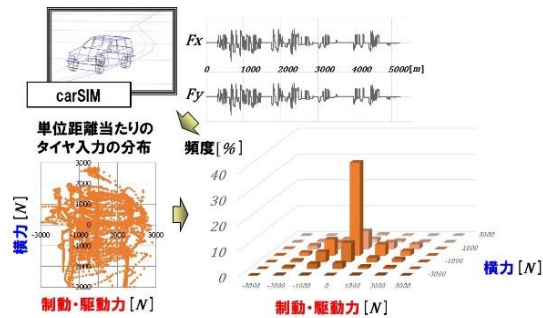


図7 タイヤ入力の確率密度分布への変換

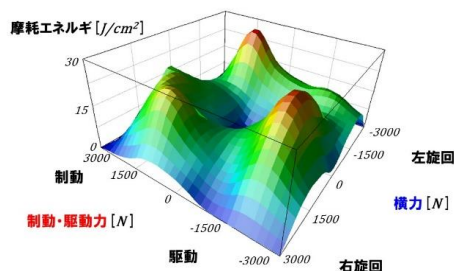


図8 摩耗エネルギー期待値計算例

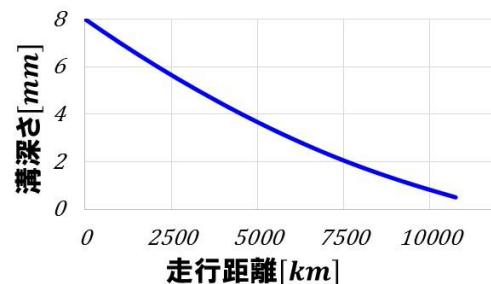


図9 鈴鹿サーキット走行時の摩耗進展

(3) 摩耗モデルを用いた改良手法の提案

摩耗進展モデルを用いて得られるタイヤの摩耗を改善する理想の姿を図10に示す。横軸は隣のリップとの偏摩耗段差、縦軸は偏摩耗したリップの摩耗エネルギーである。

理想の姿の1つ目は、摩耗エネルギー最大値が減少することである。摩耗エネルギーの大きさは摩耗の速さに対応しているため、最大値が減少すれば偏摩耗の進展を遅らせることができる。

2つ目は、偏摩耗段差の最大量である限界摩耗段差 δ_m が減少することである。 δ_m が減れば単純に見た目は良くなる。つまり図10に示すように、摩耗エネルギーの線図が縮小するような結果が望ましい。

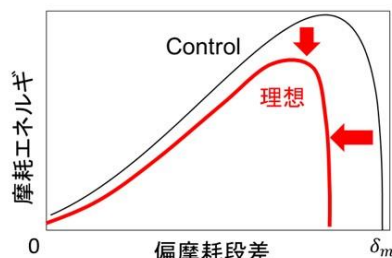


図10 偏摩耗改善の理想の姿

開発した摩耗進展モデルを用いて、偏摩耗改善への設計要因の寄与解析を行ない、偏摩耗の改善には次の手段が有効であることを明らかにした。図11に示すように、トレッドの弾性係数を増加させる。図12に示すように、タイヤ中心とエッジ部の径差を減少させる、もしくはトレッドの厚みを薄くする。

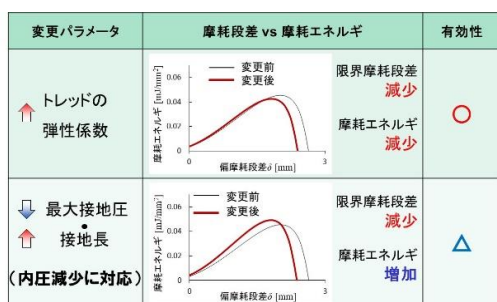


図11 偏摩耗改善への設計要因の寄与解析(1)

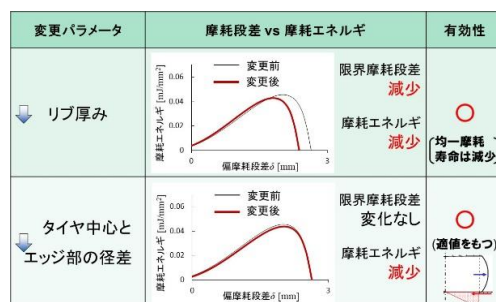


図12 偏摩耗改善への設計要因の寄与解析(2)

<参考文献>

- [1] 産業構造審議会環境部会地球環境小委員会科学・非鉄金属ワーキンググループ, “タイヤ・ゴム業界の地球温暖化への対応”, 2008.
- [2] A. Schallamach and D.M. Turner, “Wear of slipping wheels”, Wear, Vol.3, 1-25(1960)
- [3] 中島幸雄, “タイヤの摩耗力学研究の現状”, 日本ゴム協会, Vol.88, 31-36(2015)
- [4] 半坂 剛志, 中島幸雄, “タイヤの偏摩耗の解析的研究”, 第25回設計工学・システム部門講演会(2015)
- [5] 酒井秀男, タイヤ工学, グランプリ出版(1987)
- [6] J.R. Archard, “Contact and rubbing of flat surfaces”, Journal of Applied Physics. Vol.24, No.8, 981-988(1953)
- [7] J. C. Cho and B. C. Jung, “Prediction of Tread Pattern Wear by an Explicit Finite Element Model”, Tire Science and Technology, Vol.35, .4, 276-299 (2007)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計8件)

- ① 中島幸雄, “タイヤの摩耗力学とタイヤの将来像について”, エラストマーの補強研究分科会, 東京, 2018
- ② 肥田野峻哉, 中島幸雄, 土谷慶, 瀬田英介, “タイヤ力学に基づく簡易性能予測ツールの開発”, 工学教育協会 第66回年次大会, 2018
- ③ S. Hidano and Y. Nakajima, “Development on tire performance prediction tool based on tire mechanics”, The 17th International Symposium on Advanced Technology, Danang, 2018
- ④ K. Omura and Y. Nakajima, “Influence of tire wear from road surface having a minute roughness”, The 17th International Symposium on Advanced Technology, Danang, 2018

- ⑤ 石渡 淳恭, 中島 幸雄, “タイヤの解析的摩耗進展モデルの開発と改良技術の提案”, 第26回 交通・物流部門大会・物流部門大会 (TRANSLOG2017), 2017
- ⑥ 中島幸雄, “接触する大変形回転体の計算力学と解析モデルの開発及び改良技術の提案”, Innovation Big -west (IFAEE4th), Tokyo, 2017
- ⑦ Y. Ishiwata and Y. Nakajima, “Development of the analytical wear model of tire and proposal of improved technology”, The 16th International Symposium on Advanced Technology, Tokyo, 2017
- ⑧ T. Hanzaka and Y. Nakajima, “Physical Wear Model on Wear Progress of Irregular Wear of Tires (Case of River Wear of Truck & Bus Tires)”, FISITA World Automotive Congress, Busan, 2016

〔図書〕(計2件)

- ① Y. Nakajima, Springer Nature, Advanced Tire Mechanics, 2019, 1284 page
- ② Y. Ikeda, A. Kato, S. Kohjiya, Y. Nakajima, Springer Nature, Chapter 5 Pneumatic Tire Technology, Rubber Science: A Modern Approach, 2017, 155-192 page

〔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) 研究分担者

研究分担者氏名:

ローマ字氏名:

所属研究機関名:

部局名:

職名:

研究者番号 (8桁):

(2) 研究協力者

研究協力者氏名:

ローマ字氏名:

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。