

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 21 日現在

機関番号：12701

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2012

課題番号：23760090

研究課題名（和文） 内部状態変数に基づく速度依存性摩擦構成モデルの構築と有限要素解析への適用

研究課題名（英文） Proposal of rate-dependent friction model based on internal variable and its application to FE analysis

研究代表者

尾崎 伸吾 (OZAKI SHINGO)

横浜国立大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：20408727

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は速度依存性摩擦構成モデルの構築とそれを導入した有限要素法によるスティックスリップ運動の数値解析手法の提案である。まず、弾塑性論に基づいた速度依存性摩擦モデルを提案した。次に、種々の動的条件および材料条件下での実験結果との比較により、提案モデルの妥当性の検証を行った。その後、スティックスリップ運動を含む速度依存性すべり摩擦現象に及ぼす材料特性、幾何学的条件および境界条件の影響について、有限要素解析を実施した。提案数値解析手法によると接触面の摩擦条件や材料条件のみならず、境界条件の変動についても検討可能である。

研究成果の概要（英文）：The aim of this study is to propose a numerical approach for analyzing stick-slip motion; the approach is based on the finite element method implemented using a rate-dependent friction model. First, we propose the rate-dependent friction model based on the elastoplastic formulation. We then demonstrate the capability of the rate-dependent friction model by comparing its results with experimental results obtained under various material and dynamic conditions. Then, a finite element analysis of rate-dependent frictional sliding behavior, including stick-slip motion, is carried out to examine the effect of the material and geometric properties and boundary conditions on the numerical results. The present numerical approach can consider not only the properties of friction and materials but also variations in boundary conditions.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,500,000	750,000	3,250,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，機械材料・材料力学

キーワード：連続体力学，トライボロジー，接触問題，数値解析

1. 研究開始当初の背景

有限要素法は CAD データを容易に利用することができるため、部品単体に加え、アセンブリされたシステムの強度・動作解析などにも有効である。しかしながら、摺動面のすべり摩擦を考慮したアセンブリシステムの検討を行う場合、汎用ソフトの一般的な設定に基づく摩擦接触解析では対応できない点もある。例えば、幅広いスケール・分野において観察され、摺動システムの機能や安定性

を損なう主要因となるスティックスリップ運動や繰返し微小すべり現象については、既存の解析手法では最早対応できない。これらの速度・状態依存の不安定すべり摩擦現象は、システムの摩耗・疲労・騒音発生などはもちろん、寿命や故障発生率にも深刻な影響を与えることはいうまでもない。したがって、摺動面のすべり摩擦に関する構成モデルについて、物体内部の非弾性構成モデルと同等のレベルまで引き上げることができれば、これ

まで個別に検討されてきたシステムの強度・剛性と摺動面のトライボロジー特性を同時に検討することが可能となり、ひいては機械システムの設計・管理・制御手法のさらなる高度化が期待できる。

2. 研究の目的

本研究では、「マイクロマクロ」スケール間の動的摩擦試験結果を精査することで、すべり摩擦挙動の微視的プロセスを反映した内部状態変数とその発展則の基礎付けを行い、摺動面における速度・状態依存性摩擦構成モデルを構築することを目的とする。次に、構築した摩擦構成モデルを実装することで、有限自由度の材料の変形と摩擦接触挙動に関する動的連成有限要素解析手法の確立を目指す。

3. 研究の方法

実材料の微視的プロセスを反映した発展則の具体的な関数形を規定することで、摩擦構成モデルの構築を行う。また同時に、試験との比較による摩擦モデルの予測特性やパラメータのセンシティブネスなどの検証も行う。

まず、既に作製している摩擦試験装置を高精度化し、摺動面の材料特性・表面粗さ・すべり速度・負荷条件などがすべり摩擦挙動に与える影響について、乾燥条件下での動的摩擦試験を実施する。ここで対象とする材料には、工学の現場で振動や騒音、摩耗が問題となる鉄鋼類、ペーパー材、汎用エンジニアリングプラスチックを重点的に採用する。測定項目としては、摩擦力-すべり変位関係の経時変化を基本とし、スティックスリップ発生時の周期や振幅のデータの収集・整理に努める。

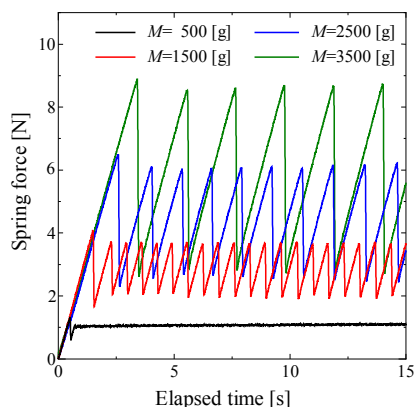
次に、人工的なテクスチャー加工や微小凹凸の大きさ・配向など、摺動面のモルフォロジー特性を反映した圧力依存性および異方性摩擦挙動について、摩擦基準と塑性ポテンシャル（非関連すべり流動則）を規定する。特に、多くの研究者が指摘しているように、異方性摩擦挙動では摩擦力とすべりが非共軸となるため、この点に関して重点的に検討を行う。

有限要素解析への適用については、二種類の接触境界値問題の解析に取り組む。一つは有限自由度の連続体のスティックスリップ運動の時系列解析であり、もう一つは異方性すべり摩擦現象の解析である。最終的に、実験結果および既往の報告との比較・検証を通じて、有限自由度の物体の変形現象といった材料力学特性とスティックスリップ運動を含む速度依存性すべり摩擦現象といったトライボロジー特性を同時に検討し得る動的連成有限要素解析手法として確立させる。

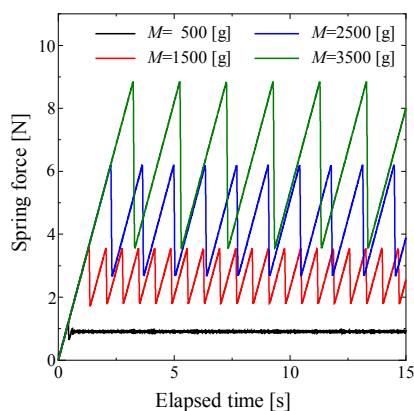
4. 研究成果

まず、「マイクロマクロ」スケール間の動的摩擦試験結果を精査することで、すべり摩擦挙動の微視的プロセスを反映した内部状態変数とその発展則の基礎付けを行い、摺動面における速度・状態依存性摩擦構成モデルを構築した。また、Coulombの摩擦基準などの具体的な関数形に基づいた接触応力速度-すべり速度関係式を導出した。通常、摩擦応力-すべり変位関係は1対1で対応させることはできないが、本モデルはそれぞれの速度どうしを1対1で対応付ける速度形の関係性を呈する。このため、静止-動摩擦遷移や摩擦抵抗の速度負勾配に加え、繰返しすべり現象にも対応し得る。さらに、摩擦基準の直交異方性と回転硬化の概念を導入することにより、微小表面のテクスチャー構造を反映した異方性摩擦モデルへの拡張にも成功した。

これらの提案モデルの妥当性は、ボード紙、各種鉄鋼材ならびに汎用エンジニアリングプラスチックなどを対象としたスティックスリップ運動の試験結果との比較や異方性すべり摩擦現象との比較を通して示された。



(a) POM-POM の実験結果

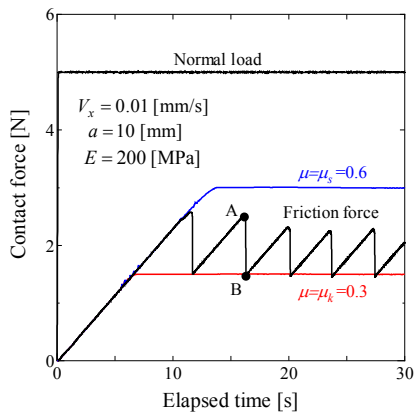


(b) 数値解析結果

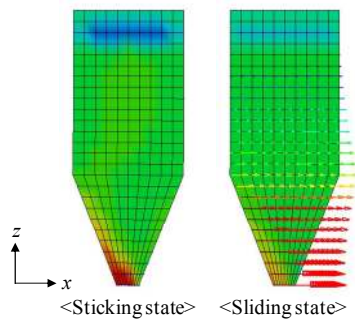
図1 提案モデルと試験結果との比較

次に、種々の供試材料の組合せを対象としたスティックスリップ運動の試験結果との比較を行い、提案摩擦モデル、ひいては提案モデルを用いた数値解析アプローチ手法の妥当性を検証した（図 1 参照）。また、異方性すべり摩擦現象に対する近似性能も検証した。その結果、供試材料、試験装置の動的条件および試験装置の種類によらずに提案アプローチ手法が適用できることを示した。

さらに、研究計画にあるように、構築した摩擦構成モデルを実装することで、有限自由度の材料の変形と摩擦接触挙動に関する動的連成有限要素解析手法の確立にも取り組んだ。速度・状態依存性すべり摩擦現象の有限要素解析では、安定すべりとスティックスリップ運動の両方を条件に応じて検討し得ることを示した。特に、スティックスリップ運動の解析では、動的条件の影響のみならず、バネ-質点系の解析では困難であった接触物体の材料特性や幾何学的特性を容易に考慮できることを示した（図 2 参照）。したがって、提案アプローチ手法により、有限自由度の物体の変形現象といった材料力学特性とスティックスリップ運動を含む速度依存性すべり摩擦現象といったトライボロジー特性を同時に検討し得る可能性が示された。



(a) 接触力の経時変化



(b) せん断応力と速度場の分布

図2 スティックスリップ運動のFE解析

また、異方性すべり摩擦現象の有限要素解析では、提案アプローチ手法により、典型的な異方性すべり摩擦現象の境界値問題の数値解析例を通して、摩擦抵抗の方向依存性や摩擦力ベクトルとすべり速度ベクトルの非共軸性を検討し得ることを示した。以上のように、本研究は、非古典弾塑性論に基づき定式化された速度・状態依存性摩擦モデルを有限要素法に実装することにより、微小すべりの集積現象やすべりモードの分岐現象、あるいは異方性すべり摩擦現象など、一般的な汎用ソフトの設定では検討し得ない現象についても有限自由度の連続体の枠組みの中で解析し得ることを示したものである。ここで問題となるのは、乾燥あるいは境界潤滑条件下でのすべり摩擦現象は、物理的素過程と化学的素過程とが連成して複雑な挙動を示すとともに、システム依存性や雰囲気環境依存性を示す場合が多々あることである。そのため、すべり摩擦現象への CAE 利用の有効性については、別途、議論の必要があろう。ただし、現段階においても、システムの材料力学的特性とトライボロジー特性の同時検討に対する CAE の有効な利用法はあると考えられる。例えば、トライボロジー特性を入力条件として、材料強度の問題を予測することや、あるいはその逆パターンに主眼を置くことではなく、簡便なモデルよりも、寧ろ多少複雑でも汎用的な摩擦モデルを用いて材料条件・幾何条件・運動条件・摩擦条件に対する系統的な検討を行い、その結果を摺動面設計や機構設計へとフィードバックさせるバックキャスト型の設計・開発を行うことは一つの CAE 活用法であると考えられる。

5. 主な発表論文等

(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)

① Ozaki, S., Ito, C., Hashiguchi, K., Experimental verification of rate-dependent elastoplastic analogy friction model and its application to FE analysis, Tribology International, Vol.64, pp.164-177, (2013). 査読有り

DOI: 10.1016/j.triboint.2013.03.016

② Ozaki, S., Hikida, S., Hashiguchi, K., Elastoplastic formulation for friction with orthotropic anisotropy and rotational hardening, International Journal of Solids and Structures, Vol.49, pp.648-657, (2011). 査読有り

DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2011.11.010

[学会発表] (計 2 件)

- ① Ozaki, S., Elastoplastic analogy constitutive equation for rate-dependent frictional sliding, International Conference on Advanced Dynamics and Model Based Control of Structures and Machines, 2012年7月2日, ロシア ポリテクニック大学
- ② 尾崎伸吾, 速度依存性すべり摩擦の測定と摩擦モデルについて, 第17回計算工学講演会, 2012年5月28日, 京都教育文化センター

[その他]

ホームページ等

<http://www.ozaki-lab.ynu.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

尾崎 伸吾 (OZAKI SHINGO)

横浜国立大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：20408727