

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360074

研究課題名(和文) 接触域に生じる非定常マイクロ秒ダイナミクスの可視化と摺動面の起動停止モードの制御

研究課題名(英文) Visualization of high-speed transient dynamics of contact interface and control of start-and-stop modes of sliding surfaces

研究代表者

中野 健 (Nakano, Ken)

横浜国立大学・環境情報研究院・准教授

研究者番号：30292642

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,900,000円、(間接経費) 4,470,000円

研究成果の概要(和文)：すべり摩擦システムの固着すべり遷移の瞬間に生じる接触界面のダイナミクスを調べるために、撮影速度1,000,000 fpsでの面観察が可能な高速度ビデオカメラを導入して、ベルト-シリンダ型の実験装置を構築した。得られた光学像から真実接触面積の時間変化、得られた光弾性像からベルト内部の主応力差の時間変化を得た。時空間マップに現れる応力波の伝播から、固着すべり遷移にともない発生する振動と騒音の源を同定する手法を確立した。

研究成果の概要(英文)：To investigate the dynamics in the contact interface appearing at the stick-slip transition in sliding systems, we invented a belt-cylinder-type experimental apparatus employing a high-speed video that enables us to observe contact area at a rate of 1,000,000 frames per second. Temporal changes of the real contact area and the internal stress of the belt were obtained from the optical images and the photoelastic images, respectively. We established a method to identify when and where vibration and noise are generated, which is induced by the stick-slip transition.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：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：接触 界面 摩擦 振動 異音 弾性体 可視化 光弾性

## 1. 研究開始当初の背景

機械のエネルギー損失の多くは摺動面で発生し、機械の致命的な故障の多くは摺動面の起動停止の際に発生する。例えば産業機械の致命的な故障は、故障した機械そのものの修理に要するコストだけでなく、生産ラインの停止にともなう生産効率の低下をもたらす、全体として莫大なコスト高を招くことがある。また、次世代クリーンエネルギーとしての期待が高い風力発電では、無風時から微風時にかけて、風車が早期に回転する（すなわち微風が生み出す低トルクでも軸受が起動する）ことが、発電効率を大きく左右する。

以上のような摺動面の起動停止問題の特徴は、古典的な摩擦の法則に立脚すると、機械の休止時において摺動面に作用する静止摩擦力と、運転時において摺動面に作用する動摩擦力が、不連続な点にある。最大静止摩擦力は動摩擦力よりも大きいことは、多くの摺動面に成り立つ実験事実であるが、そのメカニズムは必ずしも明らかにされないまま、経験則としての立場を長年保ち続けてきた。

ここで主題となる静止摩擦力と動摩擦力の遷移に関する研究動向を振り返ると、そこに欠けていた学術的な知見は、「遷移の瞬間に何が起こるのか？」という最も根本的な問いに対する回答であった。しかし近年、アクリル製のスライダとベースブロックのすべり摩擦システムを対象として、瞬間とはいえども有限な時間に生じる高速かつ非正常なダイナミクスを、ファインバーグの研究グループが捉えることに成功した。その研究成果に触発されて、研究代表者のグループは、ファインバーグらの装置を拡張した摺動面可視化装置を開発して、摺動面の起動直前に発生する前兆現象のメカニズムを解明した。さらに、摺動面の潤滑状態に依存する2種類の起動モードの存在を発見し、剥離波の伝播による起動モードと破壊核の成長による起動モードの違いが、マクロな摩擦力の差を生み出すことを見出した。

しかし、対象とする高速な非正常現象はマイクロ秒オーダーの時間刻みで進行するので、撮影速度を優先するために、現実的な摺動面とは乖離した縦長な接触部の線観察に甘んじており、従来の装置の撮影速度と解像度では、現象のメカニズムの解明に必要な面情報を得ることができない状況にあった。

## 2. 研究の目的

以上の背景のもと、本研究では、1,000 kfpsでの面観察が可能な高速度ビデオカメラの導入により、上記の問題を解決し、従来の装置の性能を飛躍的に向上させた摺動面可視化装置を開発する。開発した装置を用いた実験と並行して、動的有限要素法を用いた数値解析を相補的に進めることにより、摺動面の起動停止の瞬間に生じる接触域のマイクロ

秒ダイナミクスの詳細を把握して、摺動面の起動停止メカニズムを直接的に解明することを目的とした。

## 3. 研究の方法

実験による検討では、研究代表者を中心に、平ベルトとシリンダの面接触を対象として、両者のすべり摩擦における振動と異音の発生に着目した実験装置を開発した。最大1,000 kfpsでの面観察が可能な高速度ビデオカメラを導入して、固着すべり遷移にともない生じる接触界面のダイナミクスを可視化した。数値解析による検討では、研究分担者を中心に、固着すべり遷移に先立ち発生する前兆現象を再現可能な有限要素法アルゴリズムを開発した。

## 4. 研究成果

### 4.1. 実験による検討

#### (1) 実験方法

開発した実験装置の概観写真を図1、同装置の概念図を図2に示す。本装置は、透明なPDMS製平ベルト(120 mm × 20 mm × 3 mm, ヤング率: 1.0 MPa)とガラス製シリンダ(外径: 60 mm、高さ: 40 mm)の面接触を利用している。ベルトの両端をホルダで固定し、それぞれロードセル(AとB)を介して支持台に固定した。支持台の位置を調整して、巻付角 $\varphi_0$ と初期張力 $T_0$ を設定した。騒音計を接触面から上方50 mmの位置に設置した。各支持台に設置したモータ駆動の直動ステージを用いて、両支持台を接線方向に一定速度( $V_A$ および $V_B$ )で駆動した。ロードセルによる張力と騒音計による音圧を同時計測し、それと同期して、高速度光弾性観察(最高撮影速度: 1550 kfps)が可能なカメラ(Photron社製SA5-P)と円偏光フィルタ内蔵の高輝度LED光源(波長 $\lambda$ : 520 nm)を用いて、接触面の光学像と光弾性像を同時に取得した。

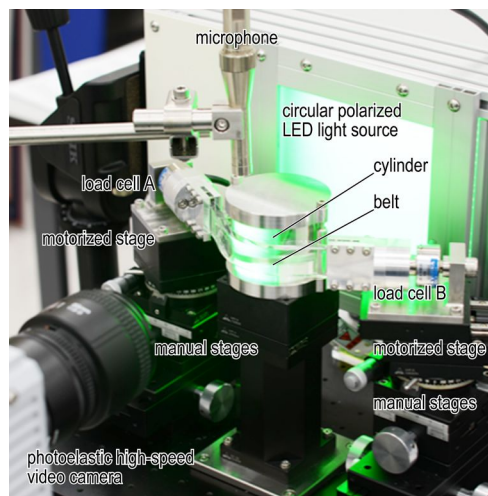


図1 実験装置の概観写真

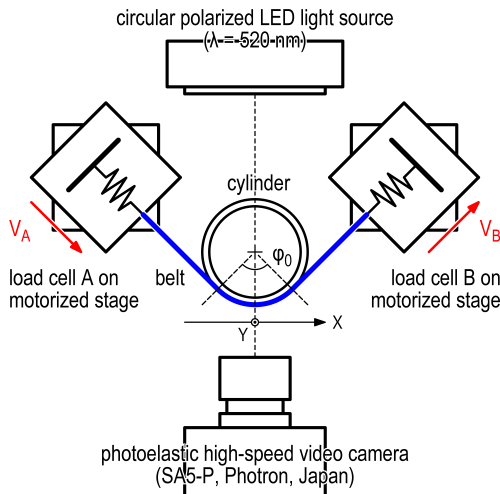


図2 実験装置の概念図

(2) 主な結果

実験条件を  $\phi_0 = 45^\circ$ ,  $T_0 = 30 \text{ N}$ ,  $V_1 = V_2 = 1 \text{ mm/s}$  とした場合について、ロードセル A と B により計測した張力  $T_A$  と  $T_B$ 、有効張力  $T_{\text{eff}} = T_B - T_A$ 、騒音計により計測した音圧  $P$  の時間変化を図3に示す。ただし、直動ステージの駆動開始時刻を  $t = 0$  とした。張力については、時間の経過にともないステージの駆動により初期張力  $T_0 = 30 \text{ N}$  から  $T_A$  は減少し、 $T_B$  は増大した。また、 $t = 15.8 \text{ s}$  のとき、 $T_A$  と  $T_B$  に急な増大と減少が現れた。 $T_{\text{eff}}$  の時間変化には、鋸歯波状の典型的な stick-slip の波形（最大値は  $T_{\text{eff}} = 105 \text{ N}$ ）が認められた。これらの変化は、この瞬間にスリップイベントが発生して、接触面が固着状態からすべり状態に遷移したことを意味している。また、それと同時に、 $P$  の大きな変化が認められた。

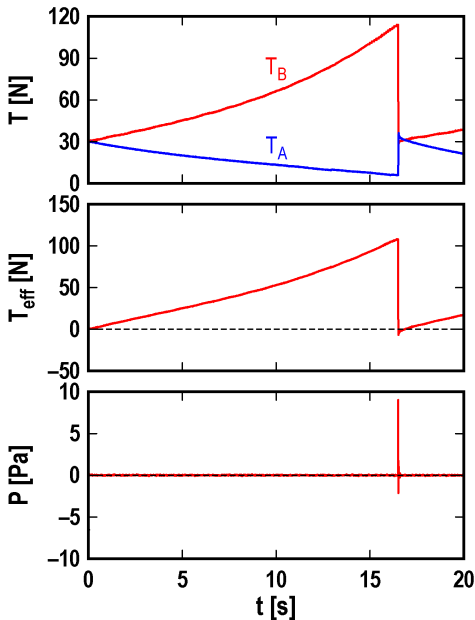


図3 張力と有効張力と音圧の時間変化

撮影速度 125 fps で得た光学像と光弾性像を図4に示す。ただし、以後に示す結果は、

スリップイベントの発生時刻  $t_{\text{GS}}$  ( $T_B$  が 1% 減少した時刻) を基準として表示している。視野サイズは、光学像および光弾性像ともに  $40 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$  である。同図の上4段が光学像、下4段が光弾性像のスナップショットである。

光学像には、接触部が比較的高い明度で現れている。接触部は、初期状態では長方形の面として画像中央に位置しており、スリップイベント直前 ( $t - t_{\text{GS}} = -8 \text{ ms}$ ) に左側から急速に縮小したことがわかる。光弾性像については、試験時に得た光弾性像  $\theta(X, Y, t)$  と、プーリのみを撮影して得た背景像  $\theta_0(X, Y)$  との差 ( $\Delta\theta = \theta - \theta_0$ ) を、RGB256 階調 (位相差との関係はカラーマップ参照) で表示している。初期状態では1次の青色 ( $0.5 \text{ MPa}$  相当) が現れており、ステージ駆動を開始すると左から0次の赤色の縞 ( $0.25 \text{ MPa}$  相当) と、右から1次の赤色の縞 ( $0.75 \text{ MPa}$  相当) が現れ、スリップイベント直前 ( $t - t_{\text{GS}} = -8 \text{ ms}$ ) に1次の青色の縞の領域が狭くなり、スリップイベント後は1次の青色に近い位相差分布が現れた。位相差として現れる内部応力は  $X$  方向の引張応力が主であり、スリップイベント以前に見られる縞の領域が狭い (次数の異なる縞が近い) ほど、引張応力の変化が大きく、接触面に作用する摩擦応力が大きいと解釈できる。

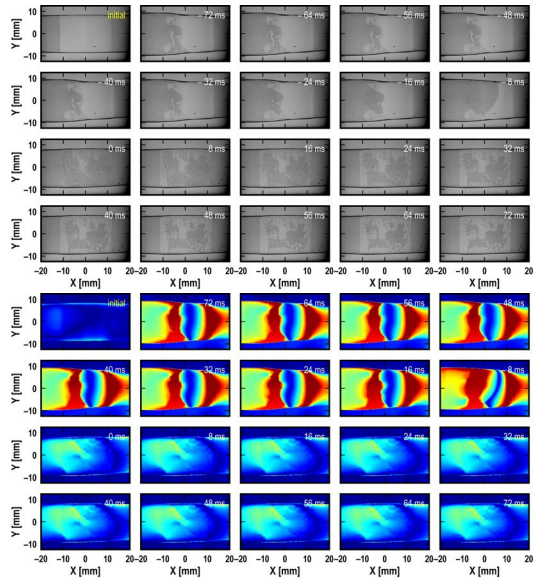


図4 固着すべり遷移における面接触部の光学像(上図)と光弾性像(下図)のスナップショット

スリップイベントの前後 2 ms に注目して、撮影速度 100 kfps で得た光弾性像の時空間マップを図5に示す。スリップイベント前後に、様々な速度の応力波の伝搬が認められる。同マップには、光学像の時空間マップから抽出した接触領域を重ね書きしており、 $t - t_{\text{GS}} = -0.07 \text{ ms}$  において、上流側に伝播する  $200 \text{ m/s}$  の応力波が断続的に現れた。この応力波が現れる周期は  $0.1 \text{ ms}$  であり、騒音計で計測された音圧の振動周期と一致したことから、光弾



性像の時空間マップの円(内側に 10 kHz と記載)で示した位置と時刻が騒音の発生源であることがわかる。また、1 次の青色の縞に注目すると、スリップイベント後に 1 kHz で左右に変動している。これが張力  $T_B$  に見られる振動数と一致することから、光弾性像の時空間マップの円(内側に 1 kHz と記載)で示した位置と時刻が振動の発生源であることがわかる。

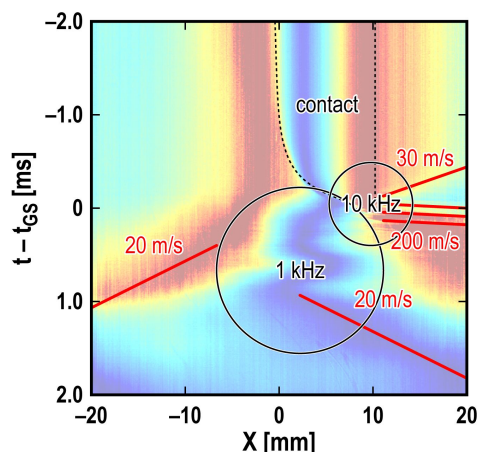


図 5 ベルト内部の主応力差に関する光弾性像の時空間マップ

以上の例のように、すべり摩擦面の固着すべり遷移にともない生じる接触界面のダイナミクスをリアルタイムに捉え、それらを分析する手法を確立した。

#### 4.2. 数値解析による検討

アクリル製のスライダとベースブロックのすべり摩擦システムを対象として、独自のアルゴリズムを用いた有限要素法により、固着すべり遷移に先立ち生じる前兆現象を、十分な精度で再現できることがわかった。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

Shingo Ozaki, Chihiro Inanobe, Ken Nakano, 「Finite element analysis of precursors to macroscopic stick-slip motion in elastic materials: analysis of friction test as a boundary value problem」, Tribology Letters, 印刷中. (査読有)

中野 健, 「接触界面のダイナミクスと可視化技術」, トライボロジスト, 59 巻, 2014 年, 277-282 頁. (査読有)

前川 覚, 糸魚川 文広, 新吉 隆利, 鈴木 厚, 田所 千治, 中野 健, 「弾性体の実効的な静摩擦係数に関する設計指針」, 日本機械学会論文集 C 編, 79 巻, 2013 年, 2622-2634 頁. (査読有)

中野 健, 田所 千治, 前川 覚, 「弾性体の摩擦振動と接触面の可視化」, 日本ゴム協

会誌, 85 巻, 2012 年, 313-318 頁. (査読有)

〔学会発表〕(計 6 件)

田所 千治, 竹島 一帆, 中野 健, 「すべり面の高速度光弾性観察による振動源と騒音源の時空間特定」, トライボロジー会議, 2014 年 5 月, 東京.

田所 千治, 竹島 一帆, 東福寺 智子, 中野 健, 「摩擦ベルト伝動面における固着すべり遷移の高速度光弾性観察: 水膜の影響」, トライボロジー会議, 2013 年 10 月, 福岡.

Ken Nakano, Chiharu Tadokoro, Naohiro Kado, 「Photoelastic observations of fast transient behaviors of contact area between an elastic belt and a pulley」, World Tribology Congress, 2013 年 9 月, イタリア.

田所 千治, 角 直広, 星 啓太, 中野 健, 「摩擦ベルト伝動面における固着すべり遷移の高速度光弾性観察」, トライボロジー会議, 2013 年 5 月, 東京.

稲野辺 知礼, 前川 覚, 尾崎 伸吾, 中野 健, 「弾性体における摩擦前兆現象の有限要素解析」, 2012 年 9 月, 室蘭.

中野 健, 「ソフトマテリアルと摩擦振動」, ゴム技術シンポジウム, 2012 年 1 月, 東京 (招待講演).

〔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〕無

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

中野 健 (NAKANO, Ken)

横浜国立大学・環境情報研究院・准教授

研究者番号: 30292642

(2) 研究分担者

尾崎 伸吾 (OZAKI, Shingo)

横浜国立大学・工学研究院・准教授

研究者番号: 20408027

(3) 連携研究者 無