

トライボロジーにおける非定常問題

Unsteady problems in tribology

横国大(正)中野 健

Ken Nakano

Yokohama National University

1. 定常と非定常

定常と非定常は、時間経過にともなう変化の有無を表す用語である。定常は時間が経過しても変化しない状態を指し、非定常は時間とともに変化する状態を指す。数学的には、微分演算子 $d/dt = 0$ の場合を定常、 $d/dt \neq 0$ の場合を非定常と呼ぶ。例えば、トライボロジーの主役をなす摩擦力 F が時間によらず一定であれば定常問題 ($dF/dt = 0$) だが、時間とともに変化する場合は非定常問題 ($dF/dt \neq 0$) になる。

2. 摩擦試験における非定常問題

材料や潤滑剤の摩擦特性の把握を目的とする摩擦試験は、定常であることを前提とした試験である。しかし、実験的に得られる時系列信号が一定値を示し続けることはむしろ稀である。そこで、摩擦力の計測中に摩擦力が時間変化することを仮定して、一般的な摩擦試験機が一自由度振動系であることを考慮すると、任意の瞬間における系の状態は次の運動方程式で記述される：

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = F_x \quad \text{or} \quad m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_x \quad (1)$$

ただし、従属変数 $x = x(t)$ は系に取り付けた試験体の位置を表す。左辺のパラメータ m と c と k は系の実効的な質量と減衰係数と剛性、右辺の $F_x = F_x(t)$ は試験体に働く摩擦力ベクトルの x 成分を表す。ここで、一般的な摩擦試験機が計測する量は、我々が知りたい摩擦力 F ではなく、力覚センサが計測する復元力 $F_{\text{meas}} = kx$ であることに注意を要する。つまり、任意の瞬間における摩擦試験機の計測値は：

$$F_{\text{meas}}(t) = F_x(t) - m\ddot{x}(t) - c\dot{x}(t) \quad (2)$$

となり、その瞬間に働く慣性力と減衰力の影響を避けることはできない。さらに、一般的な摩擦試験機では、試験体の運動方向と駆動方向の間に有限な角度のずれ(ミスアライメント)があることを考慮すると、試験体の運動にともない摩擦力ベクトルが回転するので、厳密には摩擦力ベクトルの向き $\theta = \theta(t)$ を計測しなければ、摩擦力の大きさの真値：

$$F(t) = \frac{F_x(t)}{\cos \theta(t)} = \frac{F_{\text{meas}}(t) + m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t)}{\cos \theta(t)} \quad (3)$$

を知ることにはできない。例えば、摩擦力の計測中に振幅の大きな振動が発生すると、計測値は真値を著しく過小評価することが実験的に示されている[1]。また、非零で微小なミスアライメントを有する系の動態を詳しく調べると、動摩擦ベクトルの回転により疑似的な固着状態が生まれ、実はこの疑似的な固着状態が、トライボロジーの難問として古くから残る静摩擦のパラドックス(静摩擦が作用しているように見える固着状態で極低速な滑りが生じていることを示唆する実験事実[2-4])を無理なく説明できることが理論的に示されている[5]。つまり、日頃のトライボロジー研究を支えるありふれた摩擦試験の中にさえ、重要な非定常問題が存在する。

3. 非定常問題のタイムスケール

トライボロジー会議 2025 秋函館で開催されるシンポジウム「トライボロジーにおける非定常問題」では、トライボロジーの最前線で活躍する研究者が、それぞれの視点から眺める非定常問題を議論する。そこではおそらく、原子や分子が運動する微視的な時間から、摺動を繰り返して進行する巨視的な摩擦の時間まで、様々なトライボロジー現象を支配する様々な時間の尺度(タイムスケール)が登場することになると思う。非定常問題を論じるとき、鍵になるのはタイムスケールであることに留意しつつ、同シンポジウムの主催者の一人として、有意義な議論が展開されるよう努めたい。なお、同一の系を研究対象としても、図 1 の材料技術者と機械技術者のように、着目する時間スケールが異なる場合もある。さらには、系に共存する複数のタイムスケールが競合するとき、興味深い臨界現象が生まれる場合もある。多様な非定常問題の議論を通して、学際領域であるトライボロジーの醍醐味を満喫できる場になることを期待したい。

謝辞

本研究は CREST (JPMJCR2193) と ERATO (JPMJER2401) の助成を受けて実施した。

文献

- [1] 角直広, 田所千治, 中野健: 摩擦振動が生む動摩擦係数の計測誤差, 日本機械学会論文集 C 編, **79**, 2635 (2013).
- [2] J. H. Dieterich: Modeling of rock friction: 1: Experimental results and constitutive equations, Journal of Geophysical Research, **84**, 2161 (1979).
- [3] F. Heslot, T. Baumberger, B. Perrin, B. Caroli, C. Caroli: Creep, stick-slip, and dry-friction dynamics: Experiments and a heuristic model, Physical Review E, **49**, 4973 (1994).
- [4] V. L. Popov, B. Grzempa, J. Starcevic, M. Popov: Rate and state dependent friction laws and the prediction of earthquakes: What can we learn from laboratory models?, Tectonophysics, **532**, 291 (2012).
- [5] K. Nakano, V. L. Popov: Dynamic stiction without static friction: The role of friction vector rotation, Physical Review E, **102**, 063001 (2020).

Q. Find the timescale.

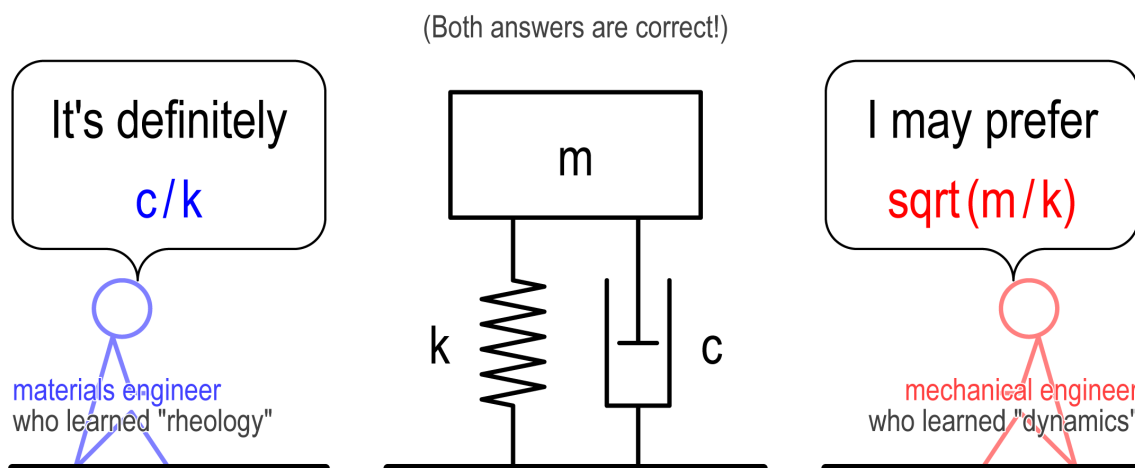


図 1 レオロジーを学んだ材料技術者(左)とダイナミクスを学んだ機械技術者(右)が重視する MCK 系のタイムスケール。ちなみにどちらの答も正しい。系に共存する二種類のタイムスケールの競合により、過減衰と不足減衰の間の状態間遷移が生じ、系の運動性が劇的に変化する。このようなタイムスケールの競合こそが、静摩擦のパラドックスの本質のひとつと考えられている[5]。