

摩擦係数の釣鐘型速度依存性を生む二つの機構

Two origins for bell-shaped velocity-dependent friction coefficient:
Kelvin-Voigt or standard linear solid viscoelasticity

横国大(学)※渡辺 稔紀, (正)中野 健

Toshiki Watanabe¹, Ken Nakano¹

¹Yokohama National University

1. 緒言

ゴムやゲルなどの柔軟な材料に共通する摩擦特性として、摩擦係数をすべり速度に対して片対数でプロットすると、中速域に極大値を持つ「釣鐘型」になることが知られている[1]。このような釣鐘型の摩擦特性が現れる機構として、これまで二通りの説明がなされている。ひとつは「材料特性」に着目する考え方である。材料の損失正接の周波数依存性が釣鐘型を示すとき、摩擦係数が損失正接に比例すると考えれば、摩擦中の材料の変形周波数がすべり速度に比例することを加味して、釣鐘型の摩擦特性を説明できる[2]。もうひとつは「力学応答」に着目する考え方である。低速域では接触状態に変化がなく、高速域では対向面が浮上して接触勾配が減少すると考えれば、やはり釣鐘型の摩擦特性を説明できる[3]。本研究では、明示的な摩擦則が不要なミニマルモデルに基づき、これら二種類の仮説の妥当性と両者の関係を検討した[4]。

2. 方法

二種類の仮説を検討するために、「材料特性」の視点から二種類の粘弾性、「力学応答」の視点から二種類の拘束条件を設定した。二種類の粘弾性には、損失正接の周波数依存性が釣鐘型にならない Kelvin-Voigt(KV)粘弾性(図 1(a))と、釣鐘型になる standard-linear-solid(SLS)粘弾性(図 1(b)と(c))を用いた。SLS 粘弾性は、同図に示すように二つの形式があるが、どちらも物理的に等価である。二種類の拘束条件には、粘弾性ファンデーションモデルにおいて、剛体圧子の浮上が不可能な固定圧子(図 2(a))と、可能な可動圧子(図 2(b))を用いた。本モデルでは、円柱状の剛体圧子(曲率半径: R , 質量: M)が、互いに独立な粘弾性要素(KV 粘弾性または SLS 粘弾性)の配列と接触し、粘弾性ファンデーションが一定速度 V で駆動する。固定圧子モデルでは剛体圧子の貫入量 δ を一定とし、可動圧子モデルでは剛体圧子の接触荷重 $W (= Mg)$ を一定とした。

3. 結果および考察

まず、二種類の粘弾性と二種類の拘束条件の組み合わせからなる全四条件について、定常状態の摩擦係数の速度依存性を数値的に計算した。次に、理論的に導出した漸近解に基づき、速度と摩擦係数の両軸を無次元化した。図 3(a)は KV 粘弾性と固定圧子、図 3(b)は KV 粘弾性と可動圧子、図 3(c)は SLS 粘弾性と固定圧子、図 3(d)は SLS 粘弾性と可動圧子の組み合わせの結果である。SLS 粘弾性の無次元数は、KV 粘弾性の無次元数に補正係数 $\varepsilon (= t_M/t_V = k_V/(k_V + k_2) = k_M/(k_M + k_2) < 1)$ を加えた形式になることがわかった。なお、KV 粘弾性には二つの漸近解、SLS 粘弾性には三つの漸近解が存在する。SLS 粘弾性の三つの漸近解のうち、低速域(青色の破線)と中速域(緑色の破線)のものは、KV 粘弾性と同一の解になった。したがって、SLS 粘弾性に特有な摩擦特性は高速域にのみ現れることがわかった。

図 3 から、KV 粘弾性と固定圧子の組み合わせを除く三条件では、摩擦係数の速度依存性は釣鐘型となることがわかる。つまり、釣鐘型の摩擦特性が発現する機構として「釣鐘型の粘弾性」と「対向面の浮上」はどちらも妥当であり、どちらか一方が現れる系であれば、摩擦特性は釣鐘型となる。また、両者が共存する SLS 粘弾性と可動圧子の組み合わせ(図 3(d))では、対向面の浮上の効果(緑色の破線)が優勢に現れ、釣鐘型の粘弾性の影響(赤色の破線)は二次的となり、高速域に限定される。

4. 結言

本研究では、明示的な摩擦則が不要なミニマルモデルを用いて、摩擦係数の釣鐘型速度依存性を生む二つの機構について検討した。その結果、「釣鐘型の粘弾性」と「対向面の浮上」はどちらも妥当であることに加え、両者が共存する場合は「対向面の浮上」の効果が優勢に現れることがわかった。これは、一般に材料特性に帰着されがちな摩擦特性に対して、トライボシステムの力学的な拘束条件が決定的な影響を及ぼす場合があることを示唆している。特に、摩擦特性を調査するための計測や計算では、マイクロからマクロまでスケールによらず、対向面の背面剛性をはじめとする力学的な拘束条件に十分な注意を払う必要がある。

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] K. A. Grosch: "The relation between the friction and visco-elastic properties of rubber", Proceedings of the Royal Society of London Series A, 274, 21-39 (1963).
- [2] D. F. Moore: "A review of hysteresis theories for elastomers", Wear, 30, 1-34 (1974).
- [3] T. Watanabe, S. Hatanaka, K. Nakano: "Dimensionless numbers and master curves for sliding friction from the Kelvin-Voigt viscoelasticity of solids", Tribology Online, 18, 406-416 (2023).
- [4] T. Watanabe, K. Nakano: "Two origins for bell-shaped velocity-dependent friction coefficient: Kelvin-Voigt or standard linear solid viscoelasticity", Tribology Online, 19, 167-177 (2024).

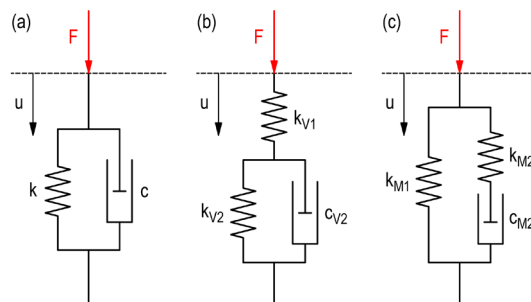


図1 粘弾性モデル((a):KV 粘弾性, (b):Voigt 型 SLS 粘弾性, (c):Maxwell 型 SLS 粘弾性)

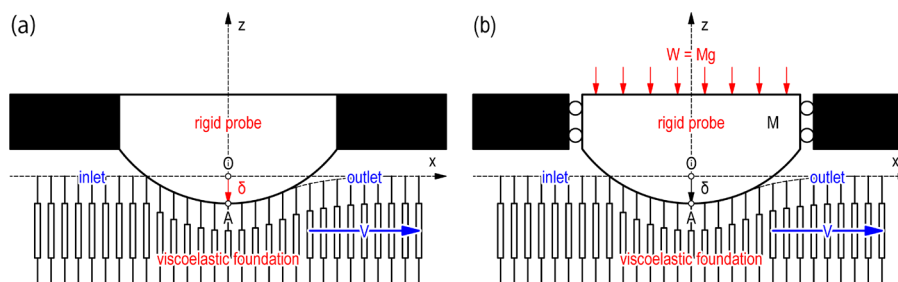


図2 摩擦モデル((a):固定圧子, (b):可動圧子)

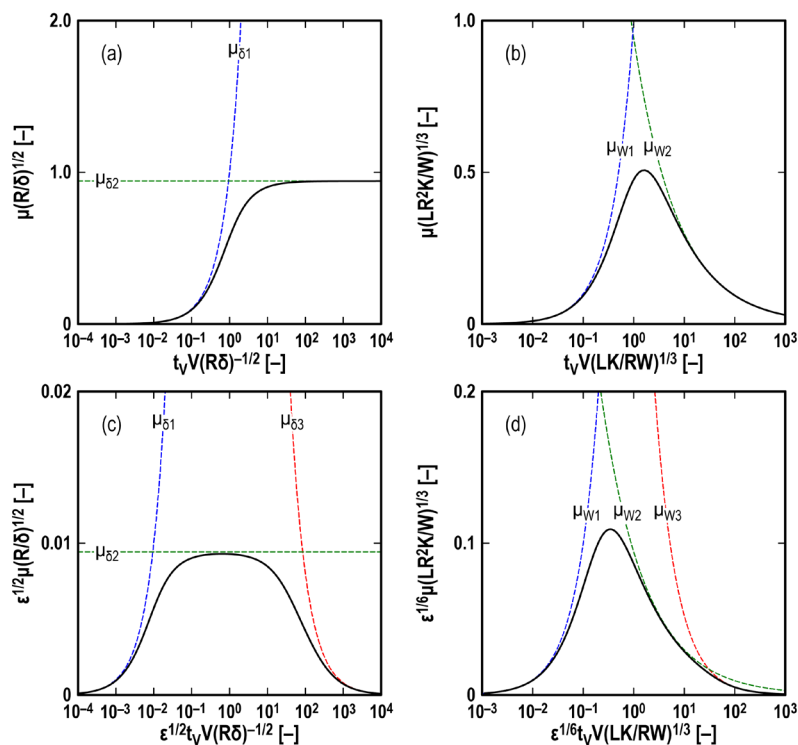


図3 摩擦係数の速度依存性((a):KV 粘弾性と固定圧子, (b):KV 粘弾性と可動圧子, (c):SLS 粘弾性と固定圧子, (d):SLS 粘弾性と可動圧子)[4]