



Rheometers

プリンのレオロジーとトライボロジーの評価

著者

Philipp Beutler
Thermo Fisher Scientific
Karlsruhe, Germany

キーワード

HAAKE MARS Rheometer、トライボロジー、レオロジー、食品、口当たり

はじめに

食感と口当たりはどちらも食品の微細構造と密接に関係しているため、消費者の選択と受容性にとって非常に重要です。したがって、生産者は消費者が受け入れられるように、配合と製造プロセス両方の流動特性、テクスチャー、および口当たりを達成するように適応させる必要があります。さらに、摂食と嚥下は動的なプロセスであり、口腔処理はさまざまな状態を経ます。初めはサンプルのバルク特性によって支配され、せん断、圧縮、伸びによる変形と流動が生じます。その後、口腔処理は、口腔表面の密接な相互作用と潤滑を特徴とする、表面特性が支配的な挙動に移行します^{1,2}。

レオロジーは、特にチョコレートおよび乳製品産業で広く使用されている技術であり、バルク特性が支配的な領域の評価に使用されています。しかし、口腔は潤滑食品の存在下で口蓋の上で舌が接触したり滑ったりするように構成されているため、食品の摩擦特性を定量化するにはトライボロジー測定技術が必要です。そのため、この手法は研究ツールとしてますます人気が高まっています。ただし、取得されたデータの評価についてはまだ議論の余地があります。

食感を定量化し比較するための工業的に関連するツールとしてのトライボロジーの使用を紹介するため、このアプリケーションノートでは、市販のプリンのさまざまな組成がレオロジー特性およびトライボレオロジー特性に及ぼす影響に焦点を当て通常の摩擦測定のシステムを備えたレオメーターを使用して、ストライベック曲線を生成し、各食品のそれぞれのレオロジー流動特性を測定しました。

材料と方法

今回調査したのは、市販の全乳プリン、クリームプリン、高タンパク質プリン、植物ベースプリンです。この実験では、空冷ペルチェ温度制御モジュールを備えたThermo Scientific™ HAAKE™ MARS™ 60レオメーターとサンプルフードを組み合わせました。図1はレオメーターの構成を示しています。

レオロジー測定は、35 mmのパラレルプレートを使用して実行しました。測定プログラムを開始する前に、温度を23 °Cに設定し、ギャップ1 mmにサンプルをセットし、トリミングした後、サンプル内を均一な温度分布に確保するために待ち時間を200秒間に設定しました。定常流の粘度測定は、0.01~1000 s⁻¹のせん断速度範囲を実施しました。図2は、Thermo Scientific™ HAAKE™ RheoWin™ソフトウェアの測定手順を示しています。

トライボロジー測定は、Ball-On-Three-Discsセットアップを使用して実行しました。この測定の幾何学形状と、比較のために実際の対応物である人間の口を図3に示します。



図1. プリンのレオロジー特性を測定するために構成したHAAKE MARS 60レオメーター

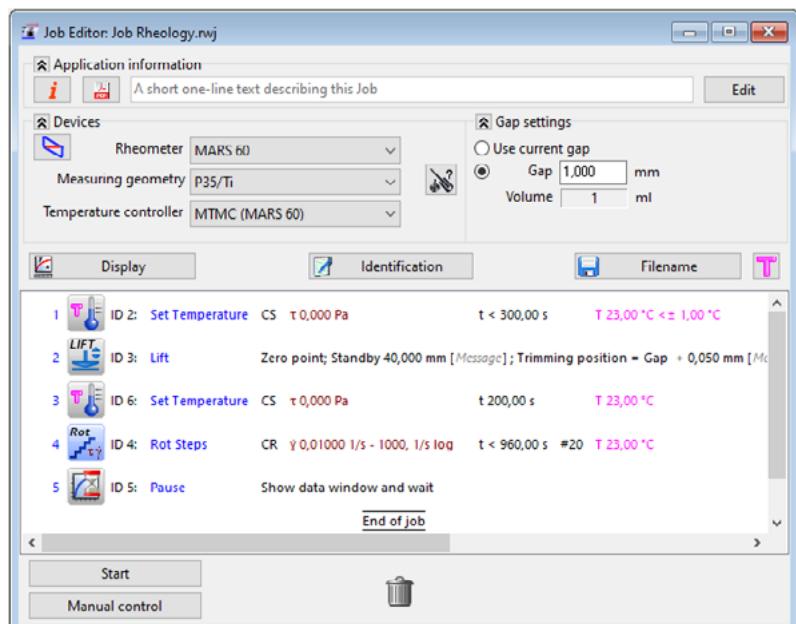


図2. レオロジー測定用HAAKE RheoWinソフトウェアを用いた測定プログラム

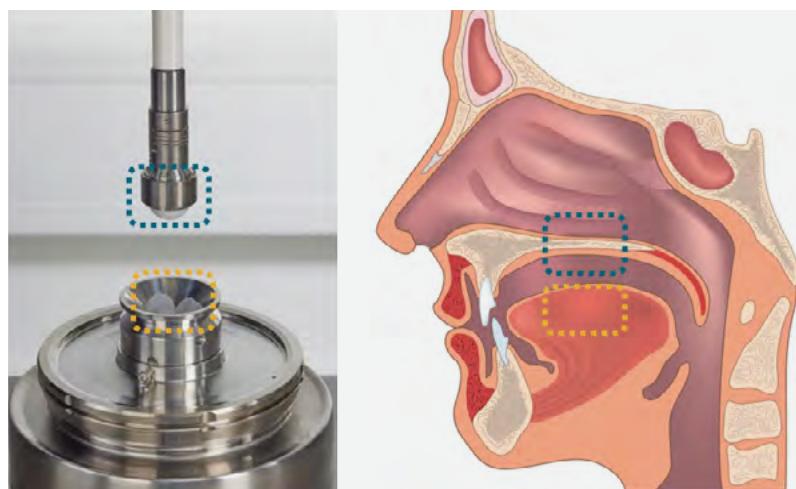


図3. Ball-On-Three-Discsセットアップ（左）および人間の口に対応するトライボシステム（舌-黄色の四角、口蓋-青い四角）（右）から構成されるトライボロジー測定システム

乳製品の嚥下プロセスを模倣するために、口蓋（トライボペアの上部）を表すためにガラスボールを使用し、舌（トライボペアの下部）を表すためにポリジメチルシロキサン（PDMS）ディスクを使用しました。

トライボロジー測定を実行中、物体は重力または外部から加えられた力によって表面に押し付けられます。物体が表面上で動かされるとすぐに、物体と表面の間の界面での摩擦によって生じる抵抗が発生します。このことは、式(1)に従って摩擦係数(COF) μ_f を計算することにより、摩擦を定量化できます。

$$\mu_f = \frac{F_f}{F_n} \quad (1)$$

潤滑剤だけでなく摩擦対トライボペアを含む摩擦システムでは、通常、摩擦特性の変化はいわゆるストライベック曲線で表されます³。このようなストライベック曲線の例を図4に示します。

低い滑り速度 v_R では、トライボペアの表面は互いに直接接触し、その結果、高い摩擦または高い摩擦係数が生じます。この範囲は一般に境界潤滑としても知られています。速度が増加すると、流体力学的な力によって潤滑剤が両方の表面の間で引きずられ、接触面積が減少し、摩擦が減少します。したがって、トライボシステムは境界潤滑を離れ、混合潤滑領域に入ります。トライボペアの間で引きずられる液体が増えるほど、これらの間のギャップは大きくなります。潤滑剤が両方の表面を完全に分離するとすぐに、摩擦は潤滑剤自体の粘度に対応する内部摩擦によってのみ発生します。この状態は、流体力学的潤滑状態と呼ばれることがよくあります。

潤滑剤の粘度もトライボロジー測定全体を通じて重要な役割を果たすため、同様に考慮する必要があります。これを考慮するために、ストライベック曲線では潤滑剤のせん断粘度 η と、軸受の接触単位長さあたりの垂直抗力として定義される適用荷重 P も考慮する必要があります。

滑り速度、粘度、加えられる荷重を組み合わせると、無次元のハーシー数 (He) が形成されます⁴。

実際のハーシー数の計算には、適用された荷重ではなく法線力 F_N が好まれることがよくあります⁵。したがって、HAAKE RheoWinソフトウェアには方程式(2)で説明されている、いわゆる単純化ハーシー数 (He-sim) のみが含まれています。

$$He - sim = \frac{v_R \cdot \eta}{F_n} \quad (2)$$

これに加えて、2つの潤滑剤が同様の粘度を特徴としており、一連の実験を通じて加えられる荷重が同じである場合、Heの代わりに滑り速度のみを表示することによってトライボロジー挙動を説明することもできます。

十分な量のサンプルを下部リザーバーのPDMSピンに加えた後、ローターを下げ、トライボペアを接触させました。完全なストライベック曲線を生成するために、3 Nの一定の垂直抗力を適用し、ボールの滑り速度を0.1から600 mm/sまで対数的に増加させました。

動作中、特に動作の開始時には、トライボシステムの接触面が摩耗しやすくなります。このいわゆるなじみ運転の一時的な特性は、時間の経過とともに摩擦が減少する、微細な表面凹凸の磨耗に由来します。通常、この現象は最初の測定実行中に観察されます。したがって、再現性のある測定データを取得するには、それぞれの実行後に新しい潤滑サンプルを再ロードし、事前にイソプロピルアルコールで表面を徹底的に洗浄したのち、同じトライボペアを使用して同じ実験を数回実行する必要があります。トライボロジーデータが大幅に変化しなくなり、曲線が重なると、慣らし運転期間の終了に達します。通常、これは2~3回の実行後に見られるため、この実験では、3回目の繰り返し実行を評価に使用しました。図5は、トライボロジー測定に使用される HAAKE RheoWinソフトウェアの測定手順を示しています。

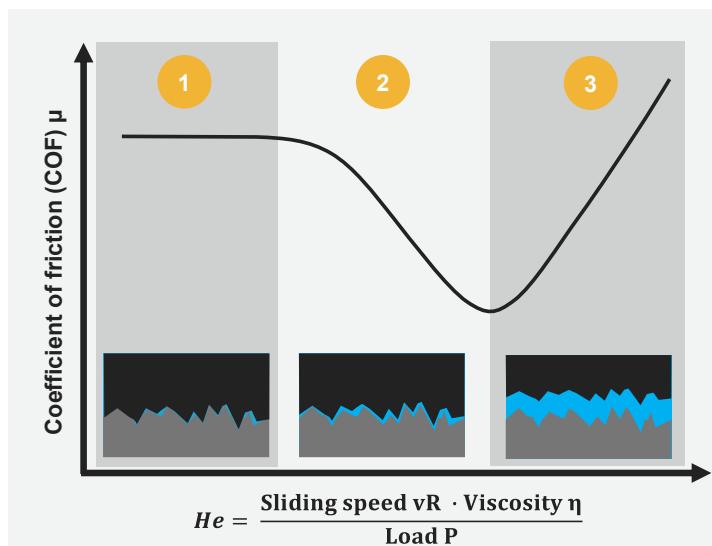


図4. 一般的なストライベック曲線の例

1 境界潤滑

表面の凹凸が直接接觸している

2 混合潤滑

潤滑剤は両方の表面の間で引きずられ、トライボペア間の摩擦を低下させる

3 流体潤滑

トライボペアは潤滑剤の膜によって分離されている摩擦は潤滑剤の粘度によって発生する

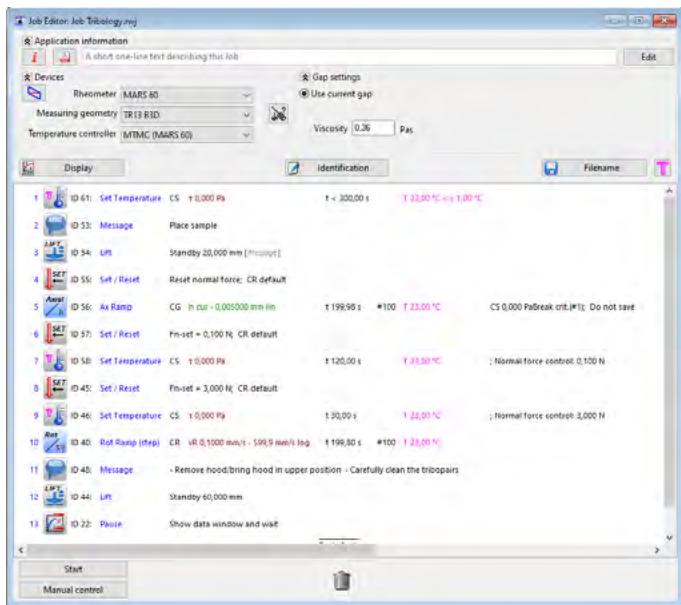


図5. トライボロジー測定用HAAKE RheoWinソフトウェアを用いた測定プログラム

結果と考察

図6は、この実験で調査したさまざまなプリンの粘度曲線を示し、それらの流動特性を表しています。4つのサンプルは全て、せん断速度の増加に伴ってせん断粘度が減少することを示しているため、非ニュートン材料として分類できます。せん断粘度 η に関する実際の違いはわずかであるため、全てのプリンサンプルは流動特性に関してほぼ同様の挙動を示しました。

乳製品サンプルを含む多くの材料は、せん断速度に対する粘度で非ニュートン挙動を示すため、粘度が異なるサンプルを使用する場合には、通常、せん断速度1000 1/sでの高せん断粘度 η_{1000} がストライベック曲線の作成に選択されます。このガイドラインに従って、表1に各プリンの η_{1000} を示します。

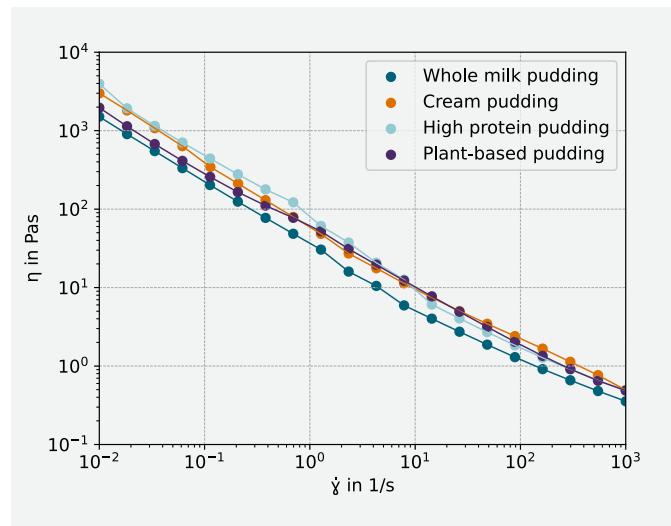


図6. 市販プリンの粘度曲線の比較

表1. 各プリンサンプルの高せん断時の粘度

サンプル	η_{1000} / Pas
Whole milk pudding	0.36
Cream pudding	0.49
High protein pudding	0.48
Plant-based pudding	0.49

簡略化されたハーシー数の概念を適用することで、全ての評価対象物質のトライボロジー特性を、図7に示されたストライベック曲線に基づいて把握できます。異なる栄養成分が摩擦特性に与える影響を関連付けて示すために、対応する棒グラフも併せて表示します。

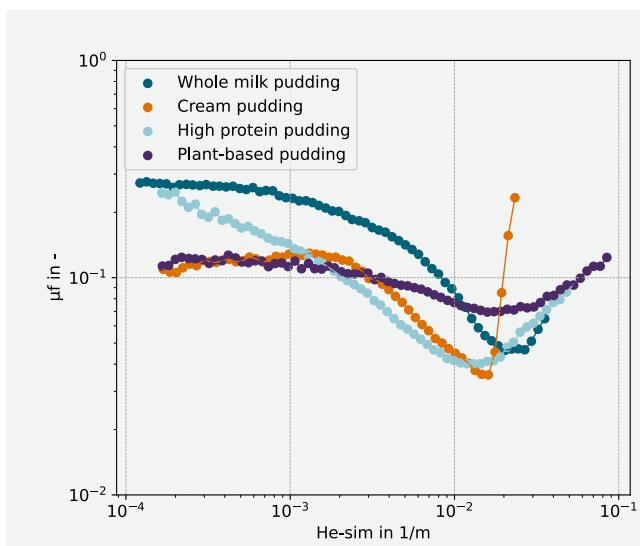


図7. この実験で使用されたプリンのトライボロジーデータと成分表

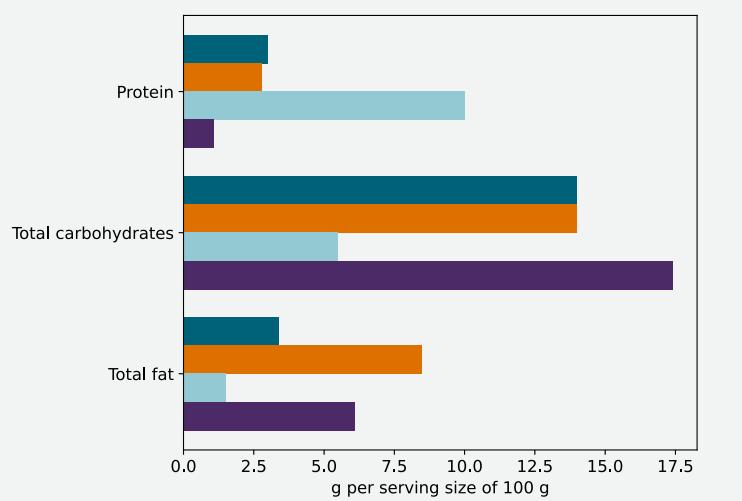


図6に示した粘度曲線とは対照的に、選別された物質の摩擦挙動ははるかに複雑です。これは主に、タンパク質、総炭水化物、総脂肪含量の違いに関係しています。これらの高分子の種類と構造に応じて、異なる生体潤滑機構が存在する可能性があります。これらのメカニズムの概要を図8に示します。

クリームプリン (8.5 g/100 g) と植物ベースのプリン (6.1 g/100 g) の総脂肪含有量は、全乳プリン (3.4 g/100 g) や高タンパク質プリン (1.5 g/100 g) と比較して高くなります。脂肪結晶は、ボールベアリング内でボールを転がすように作用して、潤滑を高められます。これにより、単純化されたハーシー数 10^{-3} 1/m を下回る植物ベースのプリンと同様に、クリームプリンの境界潤滑領域における全体的な摩擦が低下します。ただし、クリームプリンの総脂肪含有量が高いにもかかわらず、 μ_f は境界潤滑方式では植物ベースのプリンと大きく違いません。

これとは対照的に、両方のサンプルの摩擦特性は、混合潤滑方式と流体力学的潤滑方式で異なります。流体力学的潤滑方式は主にサンプルの粘度に影響され、図6によればさまざまなタイプのプリンが同様の流動特性を示すため、クリームプリンの場合、サンプルの大部分がサンプルの粘度の間の隙間から引きずり出されることが推測できます。非常に高い回転速度での遠心力により、2つの回転体が回転します。これにより、トライボシステム内の摩擦が大幅に増加します。滑り速度が大きくなるとせん断が大きくなるため、トライボシステムの表面境界に多くのエネルギーが導入されます。

これにより油滴が合体し、潤滑油膜が形成されます。したがって、混合潤滑領域では摩擦の減少が観察されます。ただし、植物ベースのプリンは、境界潤滑から混合潤滑への移行中に、それほど顕著ではない摩擦の減少を示しました。成分表によると、この製品にはヤシ油脂が使用されています。したがって、ヤシ油脂は、他の製品の動物性油脂に比べて、摺動体の潤滑効果がはるかに低いと考えられます。

興味深いことに、高タンパク質プリンは、他のプリンとは対照的に、境界摩擦プラトーを示しませんでした。これは形状が高分子であることが関係している可能性があります。摩擦学的接触では、非球形のタンパク質分子は滑りますが、球状のタンパク質分子は回転します。これに加えて、多糖類とタンパク質の複合体の形成も摩擦挙動に影響を与えた可能性もあります。

全乳はタンパク質含量が低く、脂肪含量も最も低いという特徴がありますが、全体的な摩擦が最も高くなります。さらに、タンパク質含有量が低いため、複雑な潤滑を可能にする多糖類とタンパク質の複合体が形成される可能性は低く、これが全体的な摩擦の高さを証明している可能性があります。

トライボロジーは、食品の潤滑挙動を評価するためのさまざまな可能性を提供します。ただし、正しく解釈するには、モデル表面上のさまざまな高分子の吸着挙動を関連する潤滑機構に結び付けるために、水晶微量天秤を使用するなどの追加の特性評価手法が必要です⁸。

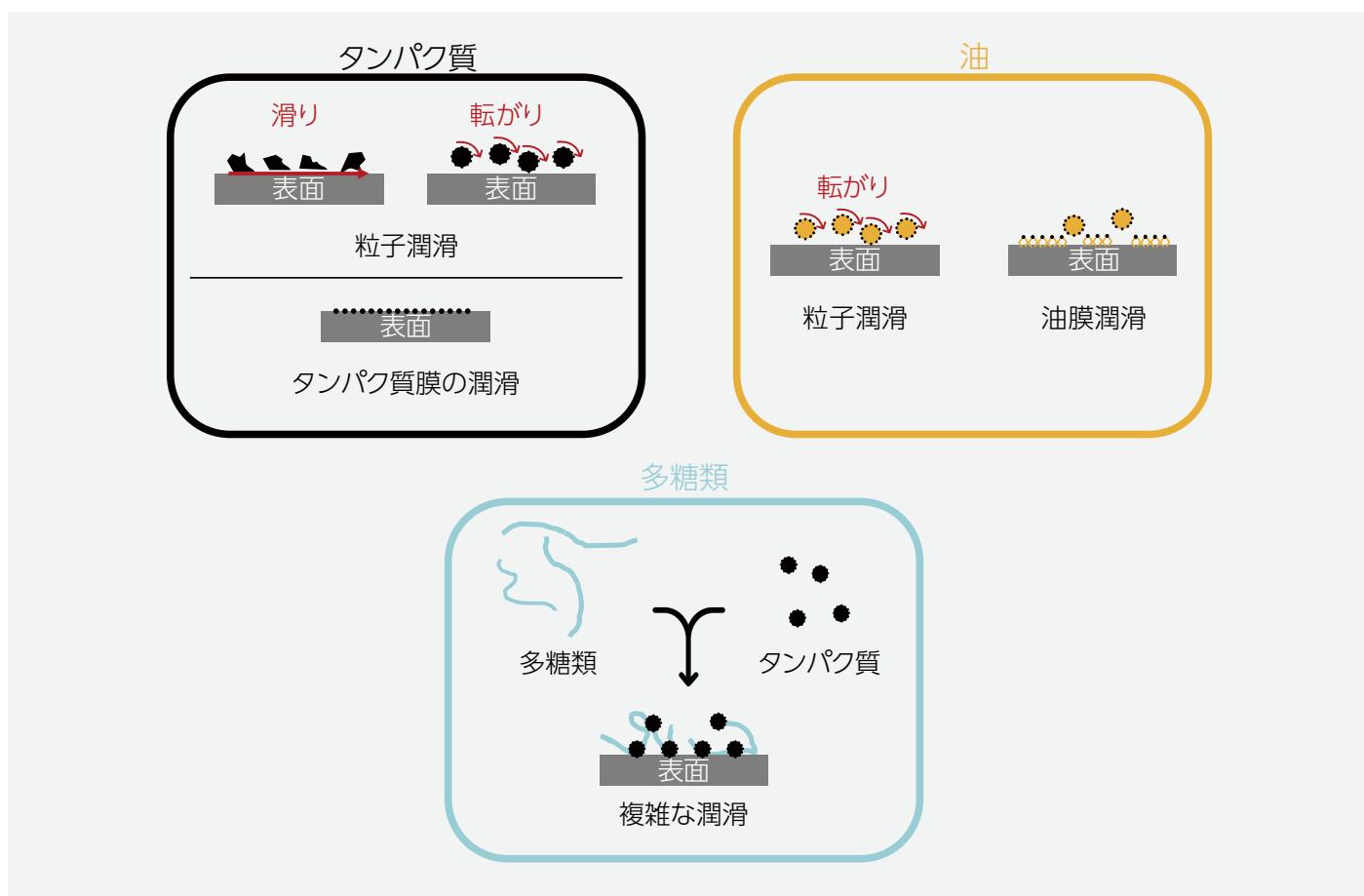


図8. タンパク質、油、多糖類の生体潤滑機構

まとめ

このレポートでは、さまざまなタイプのプリンをその流動特性と潤滑特性の観点から評価しました。流動特性のわずかな違いにもかかわらず、全ての食品の摩擦特性には大きな違いが見られました。タンパク質、脂肪、炭水化物の含有量がトライボシステムの「ガラス球体-PDMSディスク」の潤滑に影響を与える可能性があるため、これらの違いはそれぞれの栄養価に関係している可能性があります。このような発見に基づいて、例えば植物ベースの食品の微細構造の影響を乳製品ベースの食品と比較でき、消費者の期待に応えるために製品の改良と新しい配合の両方を加速することができます。

参考文献

1. Sarkar, A., Andablo-Reyes, E., Bryant, M. G., Neville, A. – Lubrication of soft oral surfaces. *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.* 2019 (39), 61–75
2. Stokes, J.R., Boehm, M.W., Baier, S.K. – Oral processing, texture and mouthfeel: From rheology to tribology and beyond. *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.* 2013 (18), 349–359
3. Bushan, B. – Introduction to Tribology, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Ltd (2013)
4. Wand, Q.J., Chung, Y. – Encyclopedia of Tribology, Springer New York (2013)
5. Veltkamp, B., Velikov, K.P., Venner, C.H., Bonn, D. – Lubricated Friction and the Hersey Number. *PhysRevLett.* 2021 (126)
6. Ji, L., Conacchia, L., Sala, G., Scholten, E. – Lubrication properties of model dairy beverages: Effect of the characteristics of protein dispersions and emulsions. *Food Res. Int.* 2022 (157): 111209
7. Rodrigues, S.A., Pradal, C., Yu, L., Steadman, K.J., Stokes, J.R., Yakubov, G.E. – Creating polysaccharide-protein complexes to control aqueous lubrication. *Food Hydrocoll.* 2021 (119), 106826
8. Zembyla, M., Lamas, E., Andablo-Reyes, E., Krop, E.M., Kew, B., Sarkar, A. – Surface adsorption and lubrication properties of plant and dairy proteins: A comparative study. *Food Hydr. coll.* 2021 (111): 106364

■ 詳細はこちらをご覧ください thermofisher.com/rheometers

研究用にのみ使用できます。診断用には使用いただけません。

© 2025 Thermo Fisher Scientific Inc. All rights reserved.

All trademarks are the property of Thermo Fisher Scientific and its subsidiaries unless otherwise specified.

実際の価格は、弊社販売代理店までお問い合わせください。

価格、製品の仕様、外観、記載内容は予告なしに変更する場合がありますのであらかじめご了承ください。

標準販売条件はこちらをご覧ください。 thermofisher.com/jp-tc MC509-A25060B

サーモフィッシャーサイエンティフィック株式会社

お問い合わせはこちら thermofisher.com/contact

thermo scientific