

摩擦熱測定を利用した定常状態高せん断速度粘度計の開発

これまでの熱測定を利用した研究は、主に平衡系について行われてきました。それに比べて、非平衡系における実験的な研究は、あまり進んでいません。そのため、非平衡系における熱力学は、研究者にとって未開拓のフロンティアになっています。

わたしたちは、非平衡系の中の定常状態とよばれる系について注目しました。定常状態は、非平衡系の中でも平衡系に近い領域であり、平衡系における統計熱力学の手法の多くが適用可能です。本研究では、その中でも高せん断速度領域での定常状態を志向しました。つまり、物質が絶えず流れている状況です。このような状況で熱力学的状況がどう変わるか、ということ进行调查することを考えました。

物質が絶えず流れているということは、試料が流動相である必要があります。そして、そのような流動相に高せん断速度をかけると大きな粘性力がかかり、それによって摩擦熱が生じます。この摩擦熱は、高せん断速度領域においては、比熱どころか転移熱にも対応する大きさです。さらに、摩擦熱は試料の温度を上昇させます。したがって、試料の温度を正確に見積ることが困難になります。

わたしたちの研究グループは、そのような高せん断領域において擬等温壁型の熱量計を作製し、散逸する熱流から摩擦熱を測定し、そこから試料の粘度と温度を定常状態で精密に測定することを企画しました。Fig. 1 に、試料の概略図を示します。高せん断速度領域で発生する摩擦熱は厚さ 10 mm のステンレス製の側面カバーを通じて恒温槽へ拡散します。また、試料と回転体は銅の内部容器に囲まれていて、銅容器とステンレス側面の外側の間の温度差を熱電対で出力することで、拡散する熱流の大きさと試料の温度を見積もります。

今回、装置の動作確認も兼ねて市販潤滑油を用いて実験しました。試料に用いたのは出光興産製「ダフニーメカニックオイル 100」で、粘度は 40 °C で 88.9 mPa s、流動点は -15 °C です。試料に室温でせん断速度 $1.9 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ をかけると、熱電対の示す起電力はおよそ 1000 s 後、 $140 \pm 2 \text{ } \mu\text{V}$ の一定値に達しました。熱電対は 4 本直列でつないだ E 熱電対で、 $244 \text{ } \mu\text{V/K}$ の感度が期待できます。したがって、試料の温度は恒温槽に比べて $\Delta T = +0.57 \text{ K}$ で、ステンレスの熱伝導度を 20 とした場合、概算される熱流は 10.3 W で、粘度は $1.03 \times 10^3 \text{ mPa s}$ となります。この値は、潤滑油の粘度の温度依存性を考慮すると妥当な値です。また恒温槽として 5 L の水槽を用意しましたが、発生した摩擦熱によって、2 時間のせん断実験後、水槽温度が 3.4 °C ほど上昇しました。この熱量は、さきほど概算して求めた摩擦熱の結果とほぼ等しくなりました。したがって、高せん断速度領域の定常状態で発生する摩擦熱を精度よく測定することに成功し、また試料温度と粘度を見積もることに成功したと判断しました。Fig. 2 に、試料「ダフニーメカニックオイル 100」とその乳濁液の室温での粘度の測定結果を示します。狭いせん断速度範囲ですが、摩擦熱はせん断速度の 2 乗に比例するため、出力された起電力はせん断速度 $1.9 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ と $6.3 \times 10^2 \text{ s}^{-1}$ の間で 9 倍変わります。低せん断速度では小さな摩擦熱のため測定精度に問題がありますが、乳濁液の擬塑性流体としての傾向が多少観測されて興味深いです。これらの粘度は、40 °C での試料の測定結果から使用したステンレスの正確な熱伝導度を含めた装置定数を決定して、校正する必要があります。

今後の装置の改良点として、銅製の回転体の作成（平衡達成時間の減少）、試料を充填する隙間を現在の 0.5 mm から 0.2 mm への変更（せん断速度の増大）、ステンレス製の側面の厚みの変更（熱流の減少にともなう感度の増大）などが考えられます。

なお、本実験を行うにあたり、出光興産様には試料として潤滑油「ダフニーメカニックオイル 100」を提供していただきました。この場を借りてお礼を述べさせていただきます。

(名越篤史)

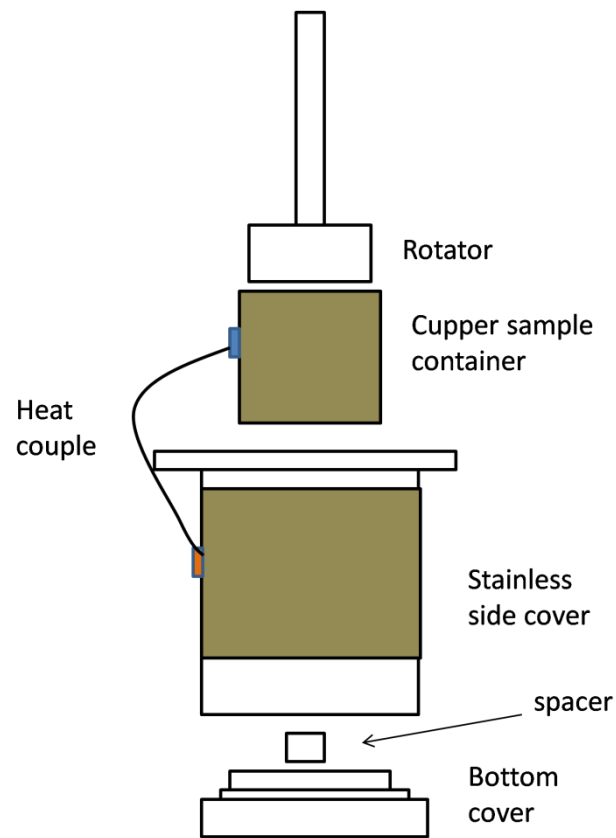


Fig. 1. Schematic illustration of a viscometer determining fictional heat.

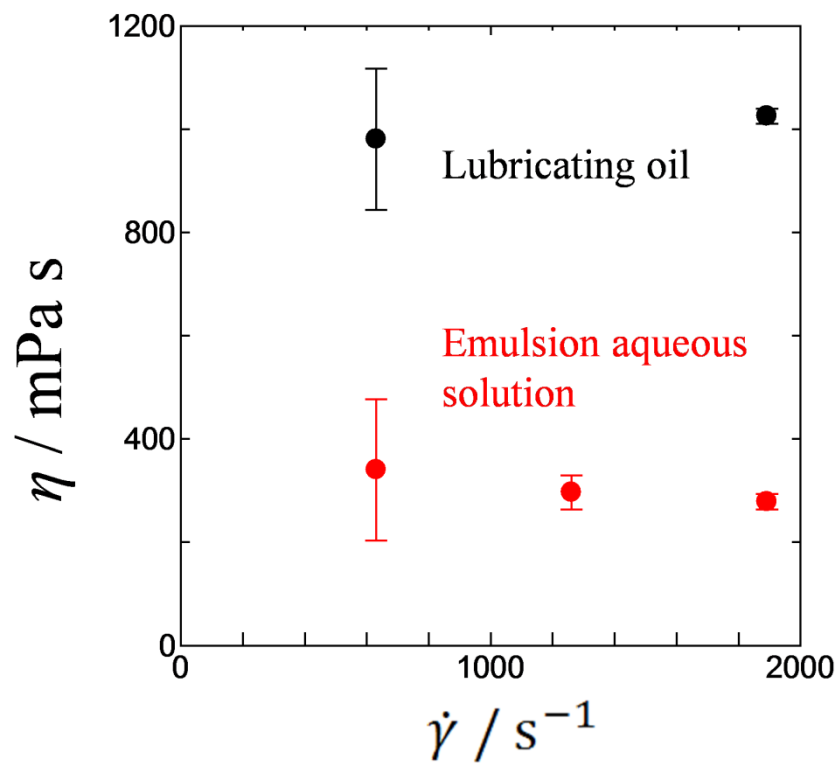


Fig. 2. Viscosity of lubricating oil and its emulsion aqueous solution as a function of shear rate.