

氏名	安立隆陽		
学位の種類	博士(工学)		
学位記番号	博甲第9002号		
学位授与年月日	平成31年3月25日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当		
審査研究科	システム情報工学研究科		
学位論文題目	圧電振動子の横効果を用いる等価回路モデルに基づく粘度測定に関する研究		
主査	筑波大学 教授	工学博士	水谷孝一
副査	筑波大学 准教授	博士(工学)	若槻尚斗
副査	筑波大学 准教授	博士(工学)	海老原格
副査	筑波大学 助教	博士(工学)	前田祐佳
副査	筑波大学 教授	博士(農学)	北村豊
	(生命環境科学研究科)		
副査	農業・食品産業技術総合研究機構・研究員	博士(工学)	安藤泰雅

論文の要旨

本論文は、圧電振動子における電気-機械エネルギー変換機能を利用し、同振動子を液体に接触させて振動させた際の電気端側からの等価回路の変化から、機械系である粘度に依存するずり応力の変化を電氣的に検出し粘度を測定する手法について述べている。粘度の測定は、食品、機械油、樹脂など様々な液体に対して行われており、製造ラインにおいて抜き取り検査のように試料を取り分けての測定が行われている。粘度測定には、従来は液体中にプローブを挿入して測定する回転式粘度計や振動式粘度計が用いられており、少量試料の測定や粘度密度の同時計測という観点から研究が行われてきた。近年では、より簡便に測定できる手法が望まれており、試料の取り分けから測定後の装置の洗浄まで測定に関する一連の作業を容易に行える装置や、製造工場においてオンラインで使用できる装置が求められている。これらの要求に対し、粘度計の構造上、液体中に突出するプローブが破損しやすいことが取り扱いを難しくする一因であると考え、本研究では、液体中に突出しないプローブを持つ粘度計を実現することを目的としている。そのために、試料を入れる容器の底面にプローブとなる圧電振動子を試料と接触するように埋め込むことを提案し、この状態で圧電振動子の電氣的等価回路解析を行うことにより、少量の試料に対して広い粘度範囲において粘度によるずり応力を検出可能な振動モードを提案している。提案手法については、シミュレーションと実験により提案する振動モードが励起可能であることを検討し、ニュートン性の液体に対して粘度測定が可能であることを実験に

より検証している。

第1章では、本研究の背景と研究目的について述べている。従来の粘度計測手法を示し、その特徴を整理している。本研究では取り扱いの容易な粘度計を実現するために、液体中にプローブが突出せず、少量の試料を測定可能であり、広範な粘度を測定可能な粘度計を実現することを目的としている。

第2章では、圧電振動子の電氣的等価回路の解析により粘度を測定する原理について、測定対象をニュートン性の液体と非ニュートン性の液体に分けてそれぞれ説明している。ニュートン性の液体では、圧電振動子が液体の粘性による作用力を受ける場合における力学モデルと電氣的等価回路モデルの対応を示しており、圧電振動子の電氣的等価回路における抵抗成分が、密度と粘度の積の二乗根に比例して増加することから、電気インピーダンス測定に基づく等価回路解析により抵抗成分から粘度を算出できることを説明している。非ニュートン性の液体については、これをケルビン・フォークトモデルで表せる粘弾性体と見做して、圧電振動子が粘弾性体から作用力を受ける場合における力学モデルと電氣的等価回路モデルの対応を示している。このとき、電氣的等価回路における抵抗成分の変化が粘弾性体の減衰係数に比例し、容量成分の変化が粘弾性体のばね定数に相当する係数に比例することを示し、等価回路解析により粘弾性に関わる係数を算出できることを説明している。

第3章では、提案する横効果中央部振動方式の圧電式粘度計について、提案する振動モードとこれを励起するための電極配置を提案している。そして、有限要素法によるシミュレーションにより円板状の圧電振動子と提案する電極配置を用いて横効果中央部振動の振動モードが励起されることを確認し、加えて、この振動モードは概ね面内振動するため測定原理を適用できることを示している。そして、圧電振動式粘度計を作製して電気インピーダンスを測定し、シミュレーションと同様の直列共振周波数を確認することで、作製した圧電振動式粘度計においても横効果中央部振動の振動モードが励起されることを示している。

第4章では、ニュートン性の液体に対して、作成した圧電振動式粘度計による粘度の測定を試みている。その結果、横効果中央部振動を用いることで、10 mL の試料に対して 4.7-985 (mPa·s) の粘度範囲において、圧電振動子の等価回路の抵抗成分の変化が試料の密度と粘度の積の二乗根に比例しており、測定原理に基づく粘度測定が可能であることを示唆している。このとき、測定精度は粘度の真値に対して -1% から +24% である。市販の振動式粘度計の測定精度は ±3% 程度のため、本実験では測定精度の要求を満たすことはできていないが、提案する圧電振動子の振動モードと構造により、プローブが試料中に突出しない状態において、少量の試料に対して広い粘度範囲で測定原理に基づく粘度測定を行えることを示している。

第5章では、非ニュートン性の液体に対して、圧電振動子の電氣的等価回路の測定を行った。その結果、アドミタンス円が真円近いことから単一の振動モードであり、非ニュートン流体に接する場合も共振周波数付近における等価回路解析を行えることを示している。しかし、試料の濃度が大きい場合は、濃度増加に伴い粘性と弾性に対応する等価回路成分が減少する傾向であり、試料をケルビン・フォークトモデルで表せる粘弾性体と見做しただけでは測定できないことを示している。

第6章では、本研究の成果をまとめている。すなわち、提案する横効果中央部振動を用いることで、プローブが試料中に突出しない粘度計を実現でき、ニュートン性の液体に対しては、圧電振動子の電氣的等価回路解析により、少量の試料に対して広い粘度範囲の測定を実現できることを述べている。

審査の要旨

【批評】

本論文は、食品や機械油、樹脂など、様々な分野で液体の品質評価指標として用いられる粘度の計測手法に関するものである。本手法では、液体中にプローブを突出させないために、プローブとなる圧電振動子を容器底面に埋め込んで使用できる振動方法を提案している。これにより、従来の回転式・振動式粘度計と異なり、液体中にプローブが突出しない構造であり、かつ、少量の試料を広い粘度範囲で測定できる粘度計を実現している点が画期的である。また食品工業分野への応用では、突起物がないことから洗浄が容易となり、Hazard Analysis and Critical Control Point (HACCP)にも対応が容易であると考えられる。これらの特徴により粘度計測が簡便に行えると期待され、粘度計測を必要とする幅広い分野において研究活動の迅速化や、製品の製造管理における省力化への貢献が期待できる。

【最終試験の結果】

平成31年2月6日、システム情報工学研究科において、学位論文審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、学位論文審査委員全員によって、合格と判定された。

【結論】

上記の学位論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。