

令和 2 年 6 月 25 日現在

機関番号：51401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K06398

研究課題名(和文) 散乱電磁波を利用する流動液体の広帯域・低侵襲な動的 material 定数測定手法

研究課題名(英文) Broadband and low invasive dynamic material constant measurement method for flowing liquids using scattered electromagnetic waves

研究代表者

駒木根 隆士 (KOMAKINE, Takashi)

秋田工業高等専門学校・その他部局等・教授

研究者番号：40370241

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：配管中を流れる液体の性質や状態を、サンプリングや流路内センサ設置無しに、動的かつ低侵襲に評価する手法の確立を目的とする。

球状容器に封入した水に照射した単一周波マイクロ波の散乱波電力と誘電率の間の理論的關係を基に円筒容器内の水の散乱波電力を解析し、電波吸収体により一部を電波的に露出したパイプ中の水の分極分布を考慮した誘電特性の補正係数を実験的に導出した。

ポンプを用いた水循環機構の液体回路に設置した前記機構で測定した結果、照射電磁界の変化速度(周波数)が液体の流速より十分早い範囲で、静止した液体と流動液体の散乱波測定結果の間には有意な差がなく本測定法を液体循環系へ適用できることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

工業的に重要な液体材料の品質確保は安心・安全な社会の維持のため重要である。潤滑や油圧作動に用いる油試料に関して、本手法を拡張し広帯域連続スペクトラムを用いて評価を行い、加熱酸化試験による劣化や、水分および空気の混入による影響の評価実験の結果、特に加熱時間すなわち油劣化度と測定結果評価量の高い相関があることを確かめた。これにより、油の劣化状態の迅速な評価を非接触で実施できることが確かめられた。

研究成果の概要(英文)： The purpose is to establish a dynamic and low invasive evaluation method for the property and state of the flowing liquid without sampling or installing a sensor in the flow path.

The scattered wave power of water in a cylindrical container was analyzed based on the theoretical relationship between the permittivity and the scattered power irradiated on water in a spherical container. We experimentally derived a correction factor for the dielectric properties, which takes into account the polarization of water.

As a result of measurement with the water circulation mechanism using a pump, there is no significant difference between the scattered wave of the stationary liquid and the flowing liquid was obtained in the range where the changing speed (frequency) of the irradiation electromagnetic field was sufficiently faster than the flow velocity of the liquid. It was confirmed that this method can be applied to the liquid circulation system.

研究分野：電磁界計測

キーワード：物性分析 散乱波 誘電分極 誘電率測定

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

液体の高周波誘電率や誘電損失はその物質固有の値を持ち、温度や組成により比較的大きな変化を示すことが知られている。例えば水(H<sub>2</sub>O)では固体相から高温状態までの誘電率が塩分濃度をパラメータにして詳細に調べられている。一方、水環境の評価においては、有機物質との混合が問題となることからアルコール等との混合状態と誘電率の関係についても調べられている。この時の誘電率の評価法としては以下のような手法が用いられている[1]。

(1) 平行金属板法[2] サンプリングした液体の封入容器を金属電極で挟んでコンデンサを構成し、その静電容量から複素誘電率を求める方法

(2) 導波管法[3] 液体試料を導波管内に挿入し、定在波や反射・透過係数から複素誘電率を推定する方法

(3) 共振器法[4] 微小な被測定試料を挿入した共振器中に生じる共振周波数や Q 値の変化分から複素比誘電率を求める方法

これらの各方法には精度、運用性、系の複雑さに関連した特徴があるが、連続的かつ非侵襲的に測定することには適していなかった。そこで代表研究者らは新しい高周波誘電率測定法として、既知の電界中に置いた誘電体からの散乱波電界を計測して材料定数を推定する、自由空間法に[5]に分類される新しいカテゴリの材料定数測定方法として散乱波法[6]を提案してきた。

### 2. 研究の目的

管中を流動または管内に滞留する液体試料の高周波比誘電率および誘電損失を、連続的かつ非侵襲的に測定する測定手法の確立を目的とする。これにより、動的な液状物体の性質や状態をサンプリングや管内へのセンサの設置無しに評価できる。

これまでの配管中などを流動する水や作動油の意図しない混合物や劣化を評価する方法は、管内への侵襲的センサの設置や破壊的にサンプリングしてオフライン計測を行う必要があった。本研究では、電磁波透過性の管中の液体に照射した電磁波の散乱波を検出し、その周波数特性から液体の状態を評価する。これまで研究代表者らは、波長に比べ小さな誘電体へ照射した電磁波の散乱波強度と比誘電率の基本的な定量的関係について理論的解析および実験による検証を行い、また、棒状試料における分極を考慮した補正手法を理論的に明らかにしてきた。

本研究では、連続流体からの微弱な散乱波を測定できるシステムを構築し、液体試料の成分変化に対する散乱波の周波数特性の変化を検証することで、新規で簡便かつ設置性に優れた実証システムを構築する。

### 3. 研究の方法

液体を循環させる機構を備え、その液体回路の一部の管状部で電波照射と散乱波測定を実施できる散乱波測定系を構築する。この測定系により、流動および滞留液体の高周波誘電特性が測定できることを検証する。また、この測定において周波数を広帯域に掃引し、例えば 1 GHz から 10 GHz までの周波数プロファイルを取得し、液体試料の特性を詳細に知ることを狙う。

構築した測定系を用いて、種々の液体試料について混合比や劣化度などを変えた測定を行い、誘電率周波数プロファイルから原因を推定する手法を理論と合わせて検討する。

最終的に、測定値から、液体の混合比や劣化度を定量的に評価することが可能な、実用的な連続的かつ非侵襲的な比誘電率測定システムを構築する。

測定系の構築における検討事項は以下があげられる。

(1) 試料へ印加する放射電磁波が直接、受信センサ(アンテナ)に到達すると、微弱な散乱波検出系の信号対雑音比(SN比)を劣化させる。その際、電波吸収体敷設による直接波の抑圧以外に、電界計測法に用いる変調散乱手法、すなわち液体試料の流動を振動的に行って散乱波を変調し、それに同期した信号検出により直接波から分離する方法[7]の導入も検討する。

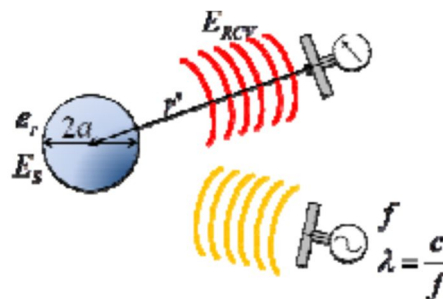
(2) 構築した測定系を用い、これまで測定を行った滞留した液体の測定値と、流動状態の液体の測定値の定量的比較を行う。両者の散乱波強度についての理論的検討を行い、補正値を導入して流動する液体の高周波誘電率評価法を確立する。

(3) 種々の混合比および劣化状態の液体試料に関し、散乱波強度の広帯域での周波数プロファイルの観測を行い、混合比あるいは劣化度と誘電率との関係を定量化するとともに、逆に測定値から混合比あるいは劣化度を推定する手順について検証を行う。このとき基本となる純粋試料のプロファイルデータベース化する。

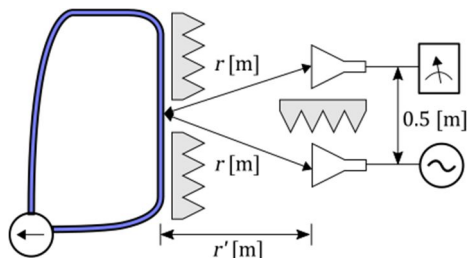
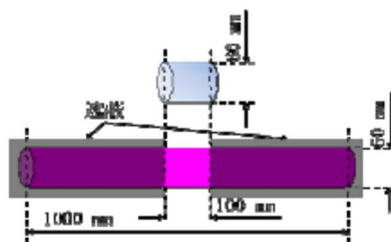
#### 4. 研究成果

流動する液状物体の性質や状態を、サンプリングしてのオフライン計測や配管内へのセンサの侵襲的設置を行わずに動的に評価するため、管中を流動または滞留する液体試料の高周波比誘電率および誘電損失を、連続的かつ非侵襲に測定する測定手法の確立を目的としている。

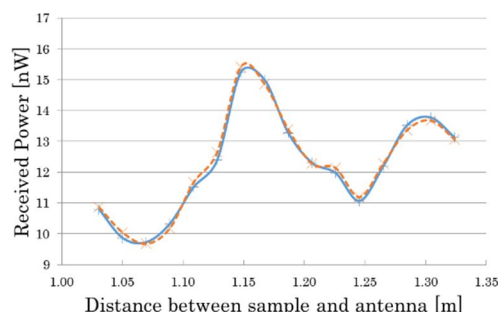
初めに、球状容器に封入した液体試料を用い、照射した単一周波マイクロ波の散乱波電力が試料の誘電率と強い相関があることを確認した。その後、この手法により、円筒状の容器内の液体の散乱波電力の理論的な解析を基に、液体試料を電波吸収体で遮蔽した長尺のパイプ中に封入した状態でその一部を電波的に露出した場合の測定結果に関して、分極の分布を考慮する誘電特性の補正係数を導出した。



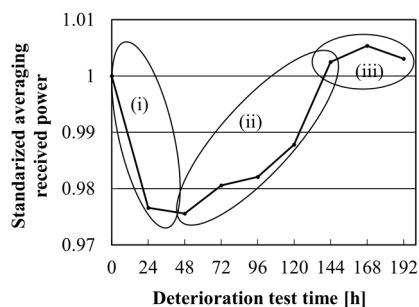
次に、液体循環系への適用の検証のため、ポンプによる液体循環機構を導入し、液体回路の一部の管状部に上記の領域制限構造を持たせて測定を行った。その結果、照射電磁界の変化速度（周波数）が液体の流速より十分早い範囲で、静止した液体から得られる散乱波スペクトラムの測定結果と流動する液体の散乱波測定結果の間に有意な差異はないことを確認した。本測定法が液体循環系へ適用できることが分かった。



Flow rate: 3.30 [m/s]  
 Frequency: 1 [GHz]  
 Flow rate  $\ll$  Polarization speed

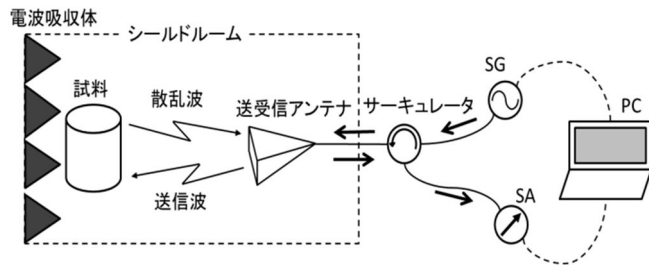


また、工業的に重要な潤滑や油圧作動に用いる油試料を測定対象とし、上記手法を拡張して広帯域の連続スペクトラムの差分評価を行う手法を開発した。加熱酸化試験による劣化や、水分および空気の混入による影響の評価実験を行い、その結果、特に加熱時間すなわち油劣化度と測定結果評価量の間に高い相関があることを確かめた。

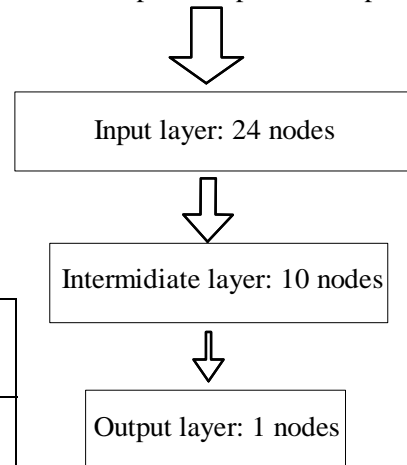


- (i) **Initial power reduction** by evaporation of residual water
- (ii) **Proportional increase** by deposition of oxide
- (iii) **Power saturation** by stopping precipitation

さらに、測定系の実用性を高めるために、送受信アンテナの兼用化を行い、また周囲環境からの反射の影響を改善するためニューラルネットを用いたスペクトラム分析手法を導入した。



Selected spectrum power : 24 points



Deterioration time[h]	24	48	72	96	120	144	168	192
Output score	0	0	0	0.13	0.53	1	1	1

以上の成果により、パイプライン等の循環系において、動的かつ低侵襲で、照射マイクロ波の散乱波スペクトラムを測定することで、液体の特性や状態を評価する方法を実用的に構築できることを確認・実証した。

#### 引用文献

- [1] “高周波領域における材料定数測定法”，橋本修，森北出版，2003。
- [2] “誘電率測定用平行平板コンデンサの数値電界解析による測定原理の検証”，相知政司，古川達也，電気学会論文誌 A, Vol.119 A, No.6, 764-769, 1999.
- [3] “空洞共振器を用いた非破壊誘電率測定に関する検討”，阿部琢美，橋本修，高橋毅，三浦太郎，電子情報通信学会技術研究報告，SAT96-168, 45-51, 1996.
- [4] “Measurement of complex permittivity tensor by standing wave method on rectangular waveguide”，O. Hashimoto and Y. Simizu, IEEE Trans. EMC-29, No.2, 141-149, 1987.
- [5] “A Free-Space Method for Measurement of Dielectric Constant and Loss Tangent at Microwave Frequencies”，D. K. Ghodgaonkar, V. V. Varadan and V. K. Varadan, IEEE Trans. Instrument. Meas., vol.37, No.3, 789-793, 1989.
- [6] “A Novel Estimation Method of Dielectric Permittivity by using Scattered Waves”，T. Komakine, T. Kurosawa, K. Miyanaga and H. Inoue, 電気学会論文誌 131-A(4), 277-282, 2011.
- [7] “A Novel Estimation Method of Dielectric Permittivity by using Scattered Waves”，T. Komakine, T. Kurosawa, K. Miyanaga and H. Inoue, 電気学会論文誌 131-A(4), 277-282, 2011.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 T. Komakine, T. Takahashi, K. Sato, E. Sugawara and T. Kurosawa
2. 発表標題 A Novel Evaluation Method of Degraded Oil by using Scattering Microwave Spectrum
3. 学会等名 2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and URSI Radio Science Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤可奈, 高橋徹, 菅原英子, 駒木根隆士
2. 発表標題 散乱マイクロ波スペクトラムを用いた油劣化評価のためのニューラルネットワーク識別法
3. 学会等名 2018年 電子情報通信学会 通信ソサイエティ大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 渡辺智章, 黒澤孝裕, 駒木根隆士
2. 発表標題 散乱マイクロ波測定による電解質の濃度推定
3. 学会等名 2019年 電子情報通信学会 総合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋徹, 佐藤可奈, 菅原英子, 黒澤孝裕, 駒木根隆士
2. 発表標題 モノスタティック配置による散乱マイクロ波スペクトルを用いた油劣化評価系
3. 学会等名 2018年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木耕也, 駒木根隆士, 黒澤孝裕
2. 発表標題 液体試料中の混入物に対する散乱マイクロ波応答スペクトラム
3. 学会等名 2016年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 駒木根隆士, 鈴木耕也
2. 発表標題 散乱波法による広帯域誘電率測定における直接波干渉のスペクトル構造への影響
3. 学会等名 2017年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	高橋 徹  (TAKAHASHI Toru)		
研究協力者	佐藤 可奈  (SATO Kana)		
研究協力者	渡辺 智章  (WATANABE Tomoaki)		