

《様式B》

研究テーマ	「新規インダクタンスの提案と実証」		
研究責任者	所属機関名	名古屋大学	
	官職又は役職	助教	
	氏名	田辺賢士	メールアドレス ktanabe@cc.nagoya-u.ac.jp
共同研究者	所属機関名		
	官職又は役職		
	氏名		

(平成 28 年度募集) 第 29 回 助成研究 完了報告書

上記様式記載後

1. 実施内容および成果ならびに今後予想される効果の概要 (1, 000 字程度)  
※産業技術として実用化の可能性や特許出願 (予定も含む) の有無についてもご記載ください。

本研究の目的は、コイルとは異なる新しい原理のインダクタ、非線形伝導由来のインダクタを実証することである。非線形伝導 (電圧印加に対して抵抗が減少する現象) を示す物質に電圧を印加すると、抵抗値が電圧印加に対して遅れて減少し、電流は抵抗値の変化に応じて、遅れて上昇する。この電圧と電流の関係はインダクタンスに他ならない。これまでの先行研究では  $\text{Ca}_2\text{RuO}_4$  を利用して、インダクティブな特性を実証してきた。しかしこの研究では非線形伝導の応答が極めて遅いため、実時間測定に頼った研究であり、また非線形伝導の応答が指数関数的単一緩和であると仮定して求めており、直接的な検証にはなっていなかった。本研究では非線形伝導の応答速度が比較的速いとされる  $\beta$ -(*meso*-DMBEDT-TTF) $_2$ PF $_6$  を利用して交流測定を行った。この物質は 70 K 近傍に相転移があり、これ以下の温度領域で非線形伝導が現れることが知られる。そこで本研究では冷凍機を用いて低温に下げ、50–70 K で実験した。その結果、この相転移温度以下でインダクタンスの直接観測に成功した。またこの時の周波数依存性は先行研究で考えていた、指数関数的単一緩和では議論できないことも明らかになった。そこで我々は誘電率を評価する際、電気分極の指数関数的単一緩和からのずれを Cole-Cole の式で評価する点を参考にして、インダクタンスのための修正 Cole-Cole の式を提案した。この式で実験データを解析すると見事に一致しており、本系の特徴的な時間や非単一緩和の度合いを指標が得られた。さらにこの物質では負性

微分抵抗が明らかに現れており、バイアス電圧を調整するとある周波数で、交流抵抗がゼロになり、インダクタの評価パラメータである Q 値が発散的に大きくなることが明らかになった。実験できた範囲では最大 3000 を超えた。これはこれまでのコイル型インダクタンスでは実現し得ない値である。

本研究はまだ原理の検証段階にとどまっているために、実用化の可能性は議論できない。また今のところ特許出願の予定はない。

## 2. 実施内容および成果の説明 (A 4 で、5 ページ以内)

### はじめに

現代のエレクトロニクス的发展において、デバイスの小型化は重要なファクターである。インダクタは 3 つの基本受動素子の 1 つであるにもかかわらず、100 年以上も前に開発されたコイル型構造をいまだに利用している。微細化に向かないコイル型構造を脱却するために新しい原理のインダクタの提案が切望されている。そこで私は物質の非線形伝導に関する新しい原理のインダクタを提案した。このインダクタは、微細化可能で、巨大なインダクタンス、巨大な Q 値 (インダクタンスの特性の目安であり、角周波数×インダクタンス/抵抗である。)、能動的素子特性を有することが期待される。これまでの研究で私は  $\text{Ca}_2\text{RuO}_4$  の単結晶を用いて 40 H を超えるインダクタンスの観測に成功している。しかしその周波数帯域は 1 Hz 程度と、極めて低い周波数にとどまっている。そこで本研究ではより高周波帯域までインダクタンスの発現を目指すことを目標とした。

インダクティブ特性をより高い周波数帯域までの伸ばすには非線形伝導の応答速度をより速くする必要がある。そこで私は非線形伝導を示す物質の中で、非線形伝導の応答速度が速い物質として  $\beta\text{-}(\text{meso-DMBEDT-TTF})_2\text{PF}_6$  に着目した。この物質は meso-DMBEDT-TTF というドナー分子と  $\text{PF}_6$  のアクセプター分子で構成された有機分子性結晶である。室温から 70 K までダイマーモット絶縁体と呼ばれる電子相関の強い系特有の絶縁体状態で、70 K 以下で電荷秩序状態の絶縁体に相転移することが知られている。 $\beta\text{-}(\text{meso-DMBEDT-TTF})_2\text{PF}_6$  はこの電荷秩序状態に電場を加えることで誘起される。これまでの研究では電圧パルスを印加することで非線形伝導の研究が行われており、温度やパルス電圧の大きさにもよるが、おおよそ 1 ms 程度の速さで非線形伝導が引き起こされる。これは  $\text{Ca}_2\text{RuO}_4$  に比べて 3 桁速い数字であり、より良好なインダクタンスの周波数特性が見込まれる。そこで私は  $\beta\text{-}(\text{meso-DMBEDT-TTF})_2\text{PF}_6$  を 70 K に冷やし、インダクタンス測定を行った。

インダクティブ特性をより高い周波数帯域までの伸ばすには非線形伝導の応答速度をより速くする必要がある。そこで私は非線形伝導を示す物質の中で、非線形伝導の応答速度が速い物質として  $\beta\text{-}(\text{meso-DMBEDT-TTF})_2\text{PF}_6$  に着目した。この物質は meso-DMBEDT-TTF というドナー分子と  $\text{PF}_6$  のアクセプター分子で構成された有機分子性結晶である。室温から 70 K までダイマーモット絶縁体と呼ばれる電子相関の強い系特有の絶縁体状態で、70 K 以下で電荷秩序状態の絶縁体に相転移することが知られている。 $\beta\text{-}(\text{meso-DMBEDT-TTF})_2\text{PF}_6$  はこの電荷秩序状態に電場を加えることで誘起される。これまでの研究では電圧パルスを印加することで非線形伝導の研究が行われており、温度やパルス電圧の大きさにもよるが、おおよそ 1 ms 程度の速さで非線形伝導が引き起こされる。これは  $\text{Ca}_2\text{RuO}_4$  に比べて 3 桁速い数字であり、より良好なインダクタンスの周波数特性が見込まれる。そこで私は  $\beta\text{-}(\text{meso-DMBEDT-TTF})_2\text{PF}_6$  を 70 K に冷やし、インダクタンス測定を行った。

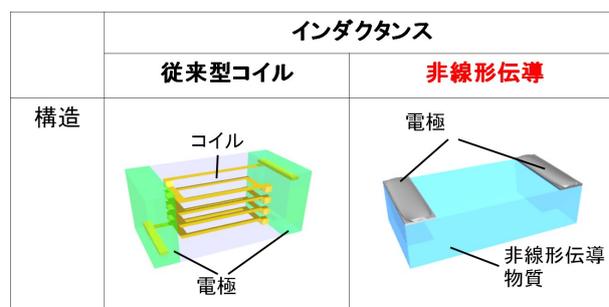


図1. 従来型構造との比較

コイルは複雑な構造を必要とするが、新しいインダクタンスは物性で決まるため極めてシンプルな構造である。

## 実験方法

実験では東大の森研究室から提供して頂いた $\beta$ -(*meso*-DMBEDT-TTF)<sub>2</sub>PF<sub>6</sub>の単結晶を利用した。分子性結晶は熱収縮率が、電極として一般的に利用する銀ペーストと比較して大きく、しばしば破損する可能性があるため、カーボンペーストを利用した。 $\beta$ -(*meso*-DMBEDT-TTF)<sub>2</sub>PF<sub>6</sub>は電流電圧特性を調べると70 K以下で負性微分抵抗が表れるため、電流値が電圧の多価関数となってしまい、電圧で制御することができない。しかし交流測定に利用する LCR メーターは電圧を制御変数としているため本実験ではサンプルの抵抗より十分大きな100 k $\Omega$ 抵抗を直列に挟んで測定を行い、最後にこの抵抗分を補正するという手法を用いた。温度制御には日本カンタムデザインの物理特性測定装置 (PPMS) を利用した。

## 実験結果

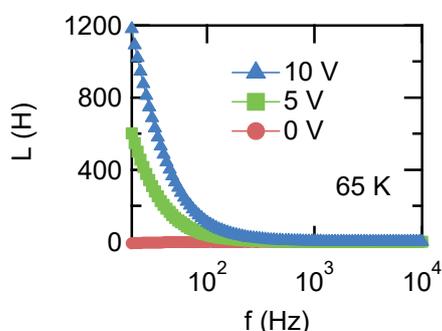


図2 インダクタンスの周波数依存性  
65 Kで、100 k $\Omega$ の標準抵抗を直列に繋いだ状態で測定されたインダクタンス成分。色の違いは印加した直流電圧の違いを表す。

図2に示しているのは65 Kで観測されたインダクタンスの周波数依存性である。理論計算が予想する通り、直流バイアスがゼロではインダクタンス成分は出現しないが、直流バイアスを上げていくとインダクタンス成分が発現しているのがわかる。またこのインダクタンスの大きさは1000 Hを超えている。この数字は通常のコイル型インダクタンスが $\mu$ H-mHであることを考えると飛躍的に大きい。一方でインダクタンス成分が周波数に依存して大きく変化してしまっているという欠点がある。これは先行研究で考えたように、非線形伝導の応答速度が遅いことと対応している。応答速度に関しては後に議論するが、先行研究のCa<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>よりも2桁程度速くなっているものの更なる応答速度の向上が望まれる結果である。

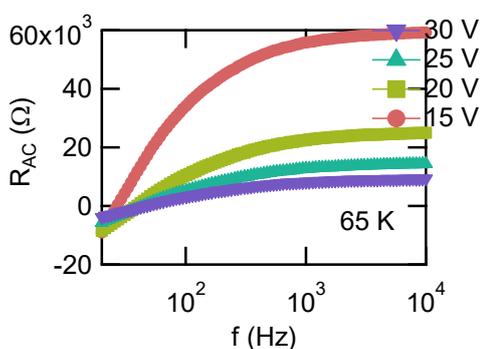


図3 交流抵抗の周波数依存性  
65 Kで、100 k $\Omega$ の標準抵抗を直列に繋いだ状態で測定された交流抵抗成分。標準抵抗分は測定後差し引かれた。色の違いは印加した直流電圧の違いを表す。

図3は交流抵抗の周波数依存性を示している。まず直流バイアス印加に対して交流抵抗が低下しているのが見て取れる。これは非線形伝導によって電圧印加に対して直流抵抗低下していることに対応する。また低周波域にかけて交流抵抗は低下しており、これはインダクタンスの

発生と対応している。それ故、交流抵抗が低下する典型的な周波数がより高周波域にあれば交流抵抗が十分下げることができると予想される。一方で交流抵抗はある周波数以下で負になっている点が見つかった。インダクタンスの特性が評価するパラメータ（Q 値）はインダクタンスの大きさと交流抵抗の比で評価されるために、ある周波数帯域で交流抵抗がゼロになり、Q が発散することを意味する。Q 値の発散現象を調べるために 20 – 30 Hz の領域の細かく測定した（図 4）。23 Hz 近傍で Q 値が飛躍的に上昇しているのがわかる。その最大値は 3000 を超えており、コイル型インダクタでは実現しえない数値となっている。

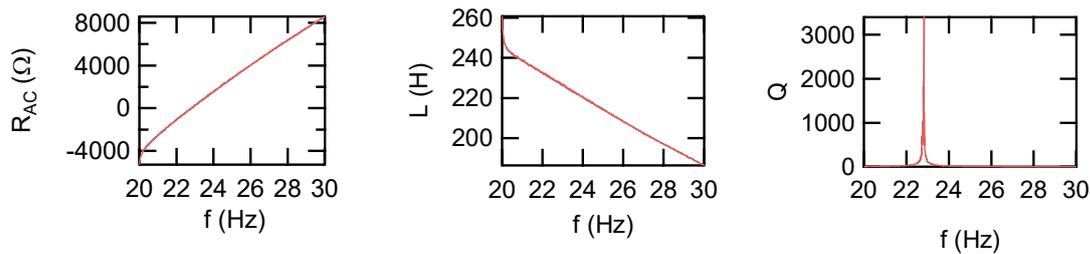


図 4 20 – 30 Hz における交流抵抗、インダクタンス、Q 値の周波数依存性

55 K で、直流バイアス 15 V 印加下で 100 kΩ の標準抵抗を直列に繋いだ状態で測定された。標準抵抗分は測定後差し引かれた。

## 考察

最後に非線形伝導の応答速度と単一緩和について考察する。先行研究では非線形伝導の応答が指数関数的単一緩和と仮定していた。このような単一緩和ではインピーダンスの実部と虚部表記（Cole-Cole plot）にすると半円が現れる。しかし図 5 のように実際のデータは半円ではなく、半円の一部である円弧の形をしている。我々は誘電率の緩和現象の議論を使ってこのインダクタンス特性を解析する。まず誘電率は印加する電場に対して電気双極子が応答し、電場方向に揃う。この時電気双極子の応答が指数関数的単一緩和である場合、

$$\epsilon' = \epsilon_{\infty} + (\epsilon_s - \epsilon_{\infty}) \frac{1}{1 + i\omega\tau}$$

と書け、この式をデバイの式と呼ぶ。Cole-Cole plot を行えば、完全な半円になる。一方、単一緩和でない場合、この半円からずれ、修正されたデバイの式が多数提案されている。最も一般的なのは、Cole-Cole plot が円弧になる Cole-Cole の式である。この式はデバイの式を

$$\epsilon' = \epsilon_{\infty} + (\epsilon_s - \epsilon_{\infty}) \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^{1-\alpha}}$$

と修正したものであり、 $\alpha$  が単一緩和モデルからのずれを示すパラメータである。そこでこの誘電率の議論をインダクタンスに適用してみる。インダクタンスの単一緩和モデルの式は

$$Z = Z_0 + Z_1 \frac{i\omega\tau}{1 + i\omega\tau}$$

と書けるため、この式を Cole-Cole の式に習って

$$Z = Z_0 + Z_1 \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^{1-\alpha}}$$

と修正する。ただし  $\alpha$  が単一緩和モデルからのずれを示すパラメータであり、 $\alpha$  が 2 からずれるほど単一緩和モデルからずれることを意味する。実際に交流抵抗の実験データを使って、単一緩和モデルの式

$$R = R_0 + R_1 \frac{\omega^2\tau^2}{1 + \omega^2\tau^2}$$

と修正 Cole-Cole の式

$$R = R_0 + R_1 \frac{[1 + (\omega\tau)^{1-\alpha} \sin(\alpha\pi/2)]}{1 + 2(\omega\tau)^{1-\alpha} \sin(\alpha\pi/2) + (\omega\tau)^{2(1-\alpha)}}$$

でフィッティングを試みた。実際の結果が図 4 に示されている。図から明らかなように修正 Cole-Cole の式の式で見事に一致していることがわかる。このフィッティング結果から得られた非線形伝導の応答時間 $\tau$ は 5.99 ms である。この値は先行研究で用いた  $\text{Ca}_2\text{RuO}_4$  の応答速度より 2 桁程度速いが応用に向けてさらなる向上が求められる。

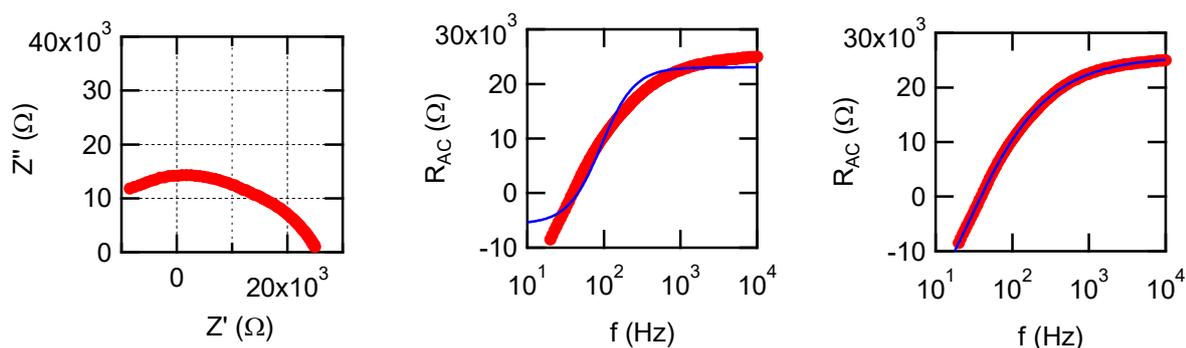


図 5 Cole-Cole plot、単一緩和モデルを用いた時と修正 Cole-Cole の式を用いて時のフィッティング結果

Cole-Cole plot は縦軸と横軸の 1 メモリの大きさを合わせている。フィッティング曲線は青線で、実験結果は赤で示されている。

### まとめ

我々は $\beta(\text{meso-DMBEDT-TTF})_2\text{PF}_6$ を用いて 70 K 以下の温度領域で交流応答測定を行った。その結果、非線形伝導由来のインダクタンスの観測に成功した。その値は最大で 1000 H を超え、3000 を超える Q 値を獲得した。また先行研究では非線形伝導の応答が指数関数的単一緩和を仮定したものであったが、本物質では単一緩和ではなかったために新しいモデルが必要となり、我々は誘電体での議論を使って、修正 Cole-Cole の式を提案した。この式を使ってフィッティングを行ったところ、見事に一致し、非線形伝導の典型的な応答速度は 5 ms 程度であった。この時間スケールは先行研究の  $\text{Ca}_2\text{RuO}_4$  よりも 2 桁程度速くなっている。しかし、インダクタンスの発現が未だ低周波部分にとどまっており、更なる応答速度の向上が望まれる。