

氏名	田辺 賢士
所属機関	名古屋大学
研究題目	新規インダクタンスの提案とその実証

### 1. 研究の目的

現代のエレクトロニクスの発展において、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Ca<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>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。

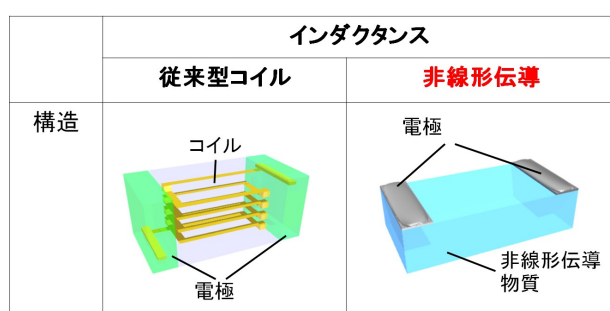


図1. 従来型構造との比較

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。

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 $\beta$ -(*meso*-DMBEDT-TTF)<sub>2</sub>PF<sub>6</sub>に着目した。この物質は*meso*-DMBEDT-TTFというドナー分子とPF<sub>6</sub>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。 $\beta$ -(*meso*-DMBEDT-TTF)<sub>2</sub>PF<sub>6</sub>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押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Ca<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>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 $\beta$ -(*meso*-DMBEDT-TTF)<sub>2</sub>PF<sub>6</sub>を70 Kに冷やし、インダクタンス測定を行った。

### 2. 研究の内容(手法、経過、評価など)

#### 手法

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う、電圧で制御することができない。しかし交流測定利用する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。

## 2. 研究の内容(続き)

### 結果

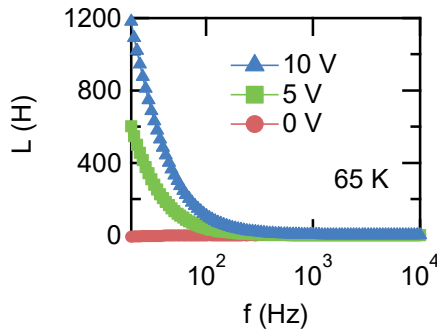


図2 インダクタンスの周波数依存性  
65 Kで、100 k $\Omega$ の標準抵抗を直列に繋いだ状態で測定されたインダクタンス成分。色の違いは印加した直流電圧の違いを表す。

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 $\mu\text{H}$ - $\text{mH}$ 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 $\text{Ca}_2\text{RuO}_4$ 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。

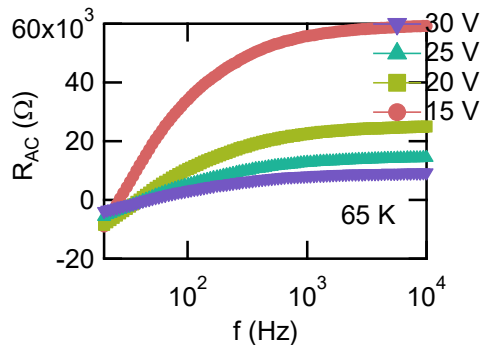


図3 交流抵抗の周波数依存性  
65 Kで、100 k $\Omega$ の標準抵抗を直列に繋いだ状態で測定された交流抵抗成分。標準抵抗分は測定後差し引かれた。色の違いは印加した直流電圧の違いを表す。

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かと予想される。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。

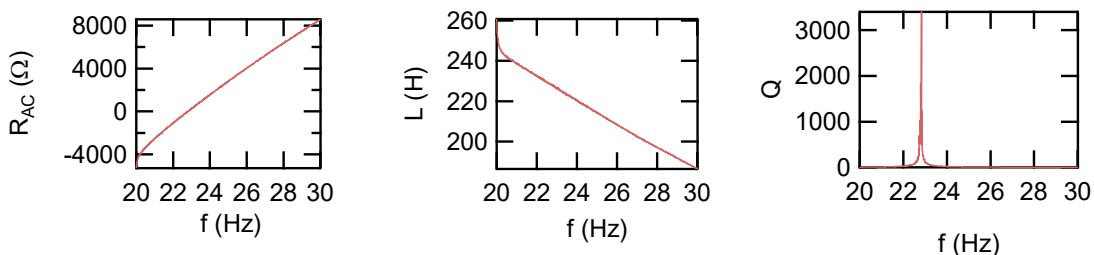


図4 20 - 30 Hzにおける交流抵抗、インダクタンス、Q値の周波数依存性

55 Kで、直流バイアス15 V印加下で100 k $\Omega$ 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。

## 2. 研究の内容(続き)

### 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、

$$\varepsilon' = \varepsilon_{\infty} + (\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}) \frac{1}{1 + i\omega\tau}$$

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。最も一般的なものは、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

$$\varepsilon' = \varepsilon_{\infty} + (\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}) \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^{1-\alpha}}$$

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。

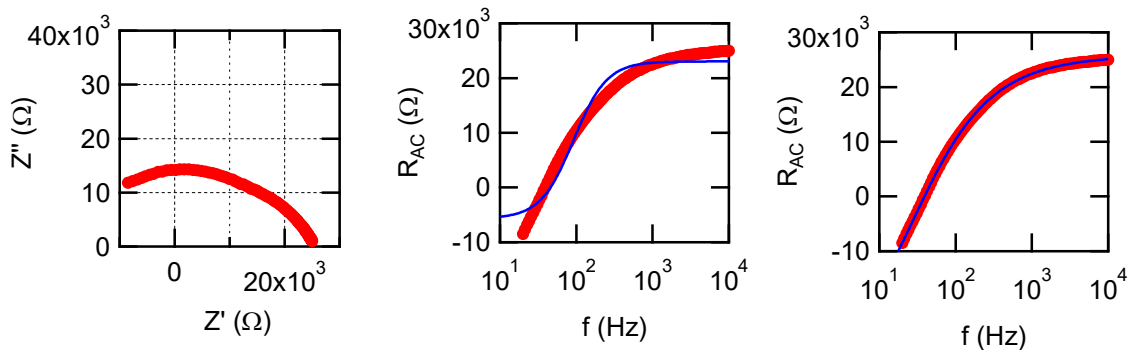


図 5 Cole-Cole plot、単一緩和モデルを用いた時と修正 Cole-Cole の式を用いて時のフィッティング結果

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。

### 3. 研究の結論、今後の課題

我々は $\beta$ -(*meso*-DMBEDT-TTF)<sub>2</sub>PF<sub>6</sub>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 Ca<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> 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。

### 4. 成果の価値(とくに判りやすく書いて下さい)

#### 4. 1. 社会的価値

本研究では、これまでコイル構造に頼ってきたインダクタを、まったく別の新しい原理に基づくインダクタの提案し研究を進めている。特にこの 1 年間で明らかになったのは、先行研究で示してきた Ca<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> のような近年研究が始まった特殊な物質だけでなく、 $\beta$ -(*meso*-DMBEDT-TTF)<sub>2</sub>PF<sub>6</sub> のような 10 年以上も前から研究が行われている物質の非線形伝導を利用して発現する事が示せた点である。またこの物質は Ca<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> より非線形伝導の応答速度が速いために、より広帯域までインダクタンスが発現した。数値で言えばインダクタンスとして 100 以上、負性微分抵抗を利用することで Q 値としては 1000 を超えた。この数値はこれまでのコイル型インダクタでは絶対に実現しえない値となっている。これらの結果は今後産業界へのインダクタ開発に変革をもたらす可能性がある。

#### 4. 2. 学術的価値

本研究の学術的価値は $\beta$ -(*meso*-DMBEDT-TTF)<sub>2</sub>PF<sub>6</sub> の電荷秩序層で現れる非線形伝導を利用することで、先行研究と比較して周波数帯域の広いインダクタンスを得ることに成功した点である。また先行研究では非線形伝導の応答が指数関数的な単一緩和を仮定していたが、本研究では新たに複数緩和における解析手法、修正 Cole-Cole の式の利用を提案し、実際に実験データとの一致を示した。この点はインダクタ研究の中で単一緩和から任意の緩和モデルへの第一歩である。

#### 4. 3. 成果論文(本研究で得られた論文等を年代順に書いて下さい。未発表のものは公表予定を書いて下さい)

公表済

K. Tanabe et al., "Giant inductance in non-ohmic conductor"

Applied Physics Express **10**, 081801 (2017).

公表予定

D. Sato, K. Tanabe et al., "Nonlinear-conduction-induced inductance and Cole-Cole equation"