

ジュール熱を利用した革新的インダクタ開発

Development of novel inductance induced by Joule heating

研究代表者 豊田工業大学 准教授 田辺賢士*

Kenji Tanabe

The resistor, capacitor, and inductor are essential passive elements in modern electronic circuits. The resistor and capacitor, related to microscopic electronic states, have been explored in the fields of both fundamental and applied physics as a conductivity and permittivity, respectively. However, the inductor, which is composed of a coil, has progressed little since more than one hundred years ago and requires relatively large volume. Therefore, a breakthrough allowing the replacement of coil-type inductors has been desired, just as the discovery of the giant magnetoresistance allows the replacement of coil-type magnetic sensors in hard disk drives. We proposed a novel method of producing inductance in non-ohmic conductor and demonstrated a giant inductance of 38 H in Ca_2RuO_4 at 1 Hz at room temperature. The quality (Q) factor, defined as the ratio of the imaginary and real parts of impedance, exceeds 20 at 1 Hz and approaches infinity in the static limit. However, the large inductance disappears in high-frequency region owing to slow response. Here we study a colossal inductance induced by nonlinear conduction in the molecular crystal, β -(*meso*-DMBEDT-TTF) $_2\text{PF}_6$. The detected inductance and the Q factor at 23 Hz exceed 200 H and 3000, respectively, whose values are significantly large, comparing to the conventional coil-type inductors. Moreover, the frequency band is extended to 100 Hz. Owing to practical applications, further development of the inductor in higher frequency is required.

要旨

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。そこで我々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：角周波数×インダクタンス/抵抗。）、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 Ca_2RuO_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。

周波数帯域が低周波でとどまっていたのは Ca_2RuO_4 の非線形伝導の応答速度が飛躍的に遅かったためである。そこで本研究ではより速い応答が期待できる分子性結晶 β -(*meso*-DMBEDT-TTF) $_2\text{PF}_6$ を用いて実験を行った。その結果、23 Hzにおいて200 H

を超えるインダクタンスと3000を超えるQ値を獲得した。これらの値は既存のコイル型インダクタに比べると飛躍的に大きい。またその周波数帯域は100 Hz程度まで伸ばすことに成功した。しかし100 Hzという周波数はまだ実用には十分とは言えずより高周波で発現するインダクタ開発が求められる。

1. まえがき

抵抗、キャパシタ、インダクタは電気回路の基本受動素子である。抵抗やキャパシタは物質中の電子状態の顕著に依存し、電気伝導率や誘電率といった物質固有の示強変数と結びつき、基礎物理、応用物理の両面から活発に研究されている。一方でインダ

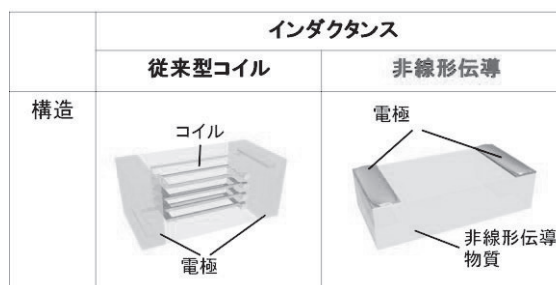


図1. 従来型構造との比較

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。

* 名古屋大学大学院理学研究科 助教

クタは、古典電磁気学に基づいたコイル型構造から大きな進展はなく、基礎物理からの発展はほぼない。しかし今後、ウェアラブルデバイスなどの超小型デバイスの増加に伴い、一定以上の容積を必要とするコイル型構造を脱するインダクタの新しい原理が求められる。

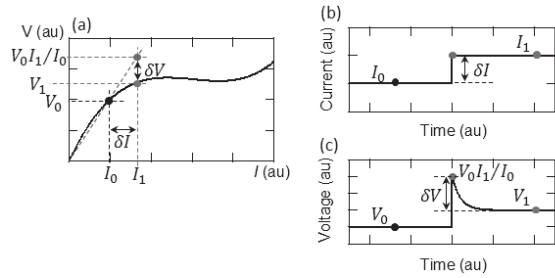


図2. 非線形伝導の電気応答

(a) 非線形伝導のIV特性の一例。(b) 印加する電流形状。(c) 電圧応答。一般的な指数関数的な応答の例を示している。

物質に電圧印加した際、抵抗値が低下する現象を非線形伝導と呼ぶ（抵抗値が変化しない場合はオームの法則そのもの）⁽¹⁾⁻⁽⁷⁾。この応答は必ず一定時間遅れるために、電圧印加に対して抵抗値が遅れて低下し、同時に電流が遅れて上昇することになる。この振る舞いはインダクタンスに他ならない。そこで我々はこの非線形伝導の振る舞いを新たにインダクタンス発現の原理として提案した。まず我々が考えたのはステップ状の電流を非線形伝導が起きる物質に印加した際の応答である。図2(a)のようなIV特性を持つ物質に電流 I_0 を印加している状態から電流値 $I_1 (= I_0 + \delta I)$ に変化させたとすると、電圧値は V_0 から $(V_0/I_0)I_1$ に変化する。これは因果律の関係から、時間遅れなしで非線形伝導の応答ができないためである。一方しばらくすると非線形伝導が生じIV曲線上の点 V_1 に変化することが予想できる。このときこの電流印加に対する電圧応答の関係

$$I[t] = I_0 + \delta I \theta[t]$$

$$V[t] = V_0 + (V_1 - V_0)\theta[t] + \delta V f[t]$$

を利用することでフーリエ変換によって交流抵抗とインダクタンスを計算することが可能になる。ここで $\theta[t]$ はステップ関数で、 $f[t]$ は非線形伝導の応答関数である。これらをフーリエ変換してまとめると

$$L[\omega] = \left(\frac{\delta V}{\delta I}\right) \cdot \text{Re} \left(\int_{-\infty}^{\infty} f[t] e^{-i\omega t} dt \right)$$

$$R_{ac}[\omega] = \frac{V_1 - V_0}{\delta I} - \omega \left(\frac{\delta V}{\delta I}\right) \cdot \text{Im} \left(\int_{-\infty}^{\infty} f[t] e^{-i\omega t} dt \right)$$

となる。非線形伝導の応答関数 $f[t]$ が指数関数で表現でき($f[t] = \exp(-t/\tau)$)、微分抵抗がゼロになるように調整できればこれらの式は、

$$L[\omega] = R_{dc} \left(\frac{\tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \right)$$

$$R_{ac}[\omega] = R_{dc} \left(\frac{\omega^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2} \right)$$

と極めてシンプルな形に書き換えることができる。さらにインダクタンスを評価するQ値は

$$Q[\omega] = \frac{1}{\omega \tau}$$

となる。この結果はインダクタンスが非線形伝導の応答速度 τ^{-1} より低い周波数領域で周波数に依存しない大きなインダクタンスが発現すること、周波数が低ければ低いほど大きなQ値を手に入れることができることを表している。そこで我々は非線形伝導が発現することで知られる Ca_2RuO_4 を用いて本予測の実証実験を行い、38 Hに達する巨大なインダクタンスと、20を超えるQ値を手に入れることに成功している^[1]。

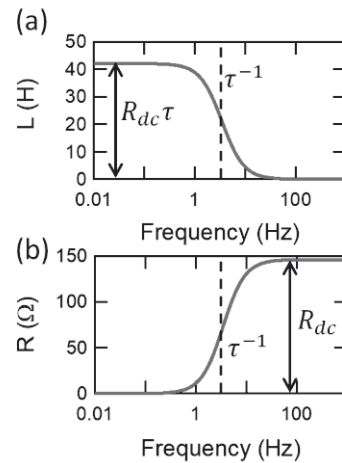


図3. Ca_2RuO_4 で得られたインダクタンスと交流抵抗

(a) インダクタンスの周波数依存性。(b) 交流抵抗の周波数依存性。

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ります。そこで我々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 β -

(meso-DMBEDT-TTF)₂PF₆に着目した⁸⁾。この物質は meso-DMBEDT-TTF というドナー分子と PF₆ 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。 β -(meso-DMBEDT-TTF)₂PF₆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 Ca₂RuO₄ 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。そこで我々は β -(meso-DMBEDT-TTF)₂PF₆を 70 K に冷やし、インダクタンス測定を行った。

2. 実験

2.1 手法

実験では東大の森研究室から提供して頂いた β -(meso-DMBEDT-TTF)₂PF₆の単結晶を利用した(図4参照)。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。 β -(meso-DMBEDT-TTF)₂PF₆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 Ω 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。

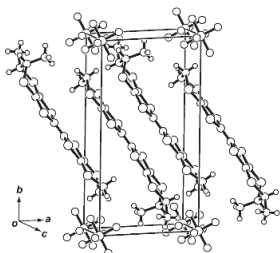


図4 β -(meso-DMBEDT-TTF)₂PF₆の結晶構造

meso-DMBEDT-TTF 分子が層状に積層しており、この方向に電子は伝導する。図は Chemical Communication から転載した⁹⁾。

2.2 結果

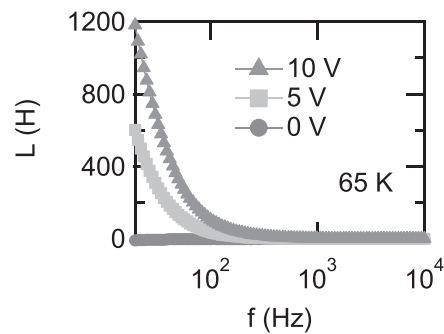


図5 インダクタンスの周波数依存性

65 K で、100 k Ω 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5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 μ 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 Ca₂RuO₄ 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。

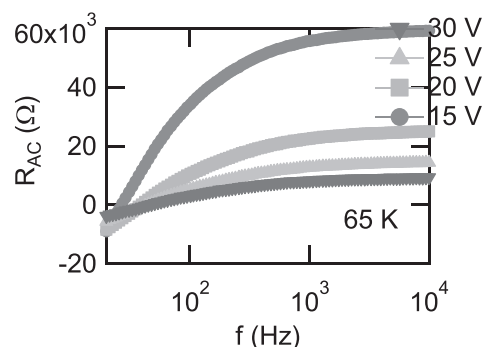


図6 交流抵抗の周波数依存性

65 K で、100 k Ω 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 6 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 7)。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。

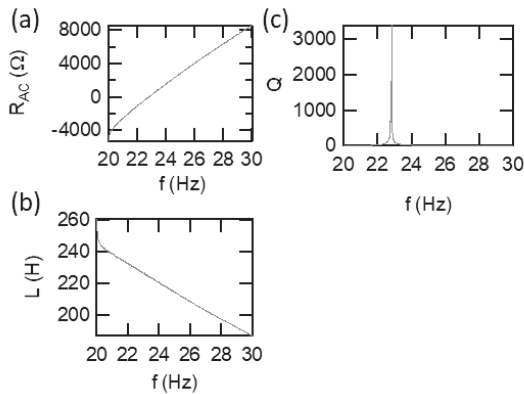


図 7 20 - 30 Hz における交流抵抗(a)、インダクタンス(b)、Q 値(c)の周波数依存性

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。

3. 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 8 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、 α 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 α が単一緩和モデルからのずれを示すパラメータであり、 α 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 8 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 τ は 5.99 ms である。この値は先行研究で用いた Ca_2RuO_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。

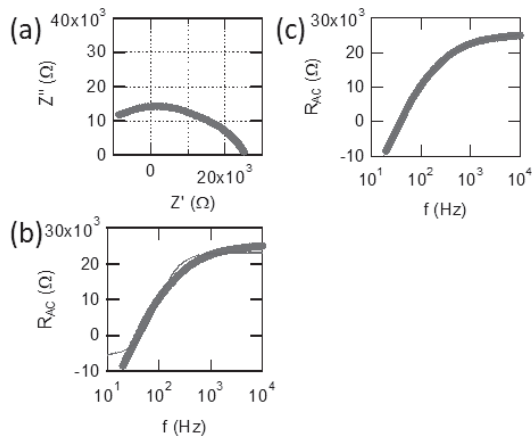


図8 (a)Cole-Cole plot, (b)単一緩和モデルを用いた時と(c)修正Cole-Coleの式を用いて時のフィッティング結果
Cole-Cole plotは縦軸と横軸の1メモリの大きさを合わせている。フィッティング曲線は青線で、実験結果は赤で示されている。

4. まとめ

我々は β -(meso-DMBEDT-TTF)₂PF₆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Ca₂RuO₄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き、更なる応答速度の向上が望まれる。

発表論文

- [1] K. Tanabe, H. Taniguchi, F. Nakamura, and I. Terasaki, Applied Physics Express **10**, 081801 (2017).

参考文献

- (1) G. Grüner, The dynamics of charge-density waves, Rev. Mod. Phys. Vol.60(1988)p.1129.
(2) Y. Iwasa et al., Switching effect in organic

charge transfer complex crystals, Appl. Phys. Lett. Vol.55(1989)p.2111.

- (3) R. Kumai, Y. Okimoto, and Y. Tokura, Current-Induced Insulator-Metal Transition and Pattern Formation in an Organic Charge-Transfer Complex. Science Vol.284(1999)p.1645.
(4) F. Sawano et al., An organic thyristor, Nature Vol.437(2005)p.522.
(5) V. Guiot et al., Avalanche breakdown in GaTa₄Se_{8-x}Te_x narrow-gap Mott insulators, Nature Communications Vol.4(2013)p.1722.
(6) F. Nakamura et al., Electric-field-induced metal maintained by current of the Mott insulator Ca₂RuO₄, Scientific Reports Vol.3,(2013)p.2536.
(7) R. Okazaki et al., Current-Induced Gap Suppression in the Mott Insulator Ca₂RuO₄, J. Phys. Soc. Jpn. Vol.82(2013)p.103702.
(8) S. Niizeki et al. Dielectric Response and Electric-Field-Induced Metastable State in an Organic Conductor β -(meso-DMBEDT-TTF)₂PF₆, J. Phys. Soc. Jpn. Vol.77(2018)p.073710.
(9) S. Kimura et al., A new organic superconductor β -(meso-DMBEDT-TTF)₂PF₆, Chem. Commun. Vol.21(2004) p.2454-2455.