

令和 2 年 6 月 19 日現在

機関番号：15401

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18826

研究課題名（和文）カーボンナノチューブ界面での電子輸送 - コピキタスガスセンサーへの道 -

研究課題名（英文）Electron transportation at the carbon nanotube interface -toward ubiquitous gas sensor-

研究代表者

井上 修平（Inoue, Shuhei）

広島大学・工学研究科・准教授

研究者番号：60379899

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：基板上に塗布されたCNT-CNT界面への分子吸着が近傍の誘電率に影響を与えることで薄膜の電気伝導性が変化することが実験的に確認された。薄膜の厚みがどの程度影響を与えるかを実験的に観察した。当初、CNTネットワークは空隙が大きく、分子スケールから考えると厚みはほとんど影響を与えないものと思われたが厚みを変化させてみると感度の低下が観測された。膜厚を細かく変化させて影響を観察することで吸着分子の実行浸透深さを求めることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在主流のガスセンサーは消費電力が大きく、電源から独立して使用することができない。カーボンナノチューブを利用した超低電力ガスセンサーを実現するためにガス分子吸着による応答メカニズムを解明することを目的とし、成果を得た。このセンサーは吸着ガスの物理特性が影響するため分子種の特定まで将来的に期待できる。ナノスケール界面での電子輸送を明らかにすることはエレクトロニクスや生体医工学の分野への波及・貢献において期待できる。

研究成果の概要（英文）：It was experimentally confirmed that the electrical conductivity of the thin film is changed by the adsorption of molecules on the CNT-CNT interface coated on the substrate, which affects the dielectric constant in the vicinity. We observed how the thickness of the thin film affects. Initially, the CNT network had large voids, and it was thought that the thickness had almost no effect on the molecular scale, but when the thickness was changed, a decrease in sensitivity was observed. We succeeded in obtaining the effective penetration depth of adsorbed molecules by observing the effect by finely changing the thickness of the membrane.

研究分野：マイクロナノ熱工学

キーワード：界面 マイクロナノ ガスセンサー

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

現在主流の半導体式ガスセンサーは吸着分子との応答性を高めるため 400 °C 程度に保つ必要がありユビキタ的な利用が不可能である。近年マイクロ加工技術の進歩による小型化やこれに伴う低熱容量を利用し検出時のみパルス加熱で高温にするなど省電力化が図られている。しかし既存技術の延長でありこれ以上の改善は見込めない。半導体式センサーの検出原理は分子吸着による酸化還元反応に伴うキャリア密度の増減なので、同じような酸化度を示す分子では区別することができない。従って図 1 に示すような選択的な透過膜などを用いる必要がある。CNT による応答原理は CNT-CNT 界面の誘電率の変化に伴うキャリア移動度の変化である。従って酸化・還元性の小さい分子に対しても圧倒的な感度で応答する。更に、電気伝導性の変化が被覆率と一致することが予測されており、CNT との吸着エネルギーの違いから平衡までの時間応答に分子依存が現れる。また、無極性分子の吸着では応答初期に過剰応答することが実験的に分かっている。このように CNT を利用すると吸着分子種の物理特性に依存した時間応答が得られるため分子種の判別が可能である。これは今までに実現されていない最先端の検出技術である。

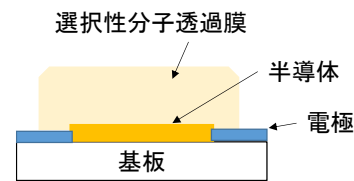


図 1 既存のガスセンサー

2. 研究の目的

この研究ではカーボンナノチューブ(CNT)の薄膜を合成し、CNT 表面の分子吸着が CNT の電気伝導特性に与える影響とそのメカニズムを明らかにすることを目的とする。これによりガスセンサーへの応用が期待できる。CNT はこれ以外にもナノエレクトロニクス・ナノバイオエンジニアリング分野への応用が期待されている。電気特性の変化は微小な領域の情報を取得することに向いているが、生体内部での利用を考えると環境分子との相互作用に関する知見は後回しにすることはできない。

以上のように本研究は CNT 界面への分子吸着が及ぼす影響を解明するだけでなく（科学的興味）、ユビキタスガスセンサーの開発（工学的な応用・進歩）、そして関連分野に貢献できる知見（波及効果）を包括した内容が含まれている。

3. 研究の方法

本研究では、25 mm 四方のガラス基板上に、スピコート法を用いて薄膜を作製し、その上に電極を取り付けることで、CNT 薄膜ガスセンサーを作製した。まず、ガラス基板の濡れ性を向上させるため、アルゴンプラズマを用いてガラス基板を 20 分間洗浄することで、ガラス基板の濡れ性を向上させた。その後、ガラス基板をスピコーターにセットし、基板を回転させながら、上から MWCNT(MW: multi-walled, 多層のカーボンナノチューブ)分散液を滴下することで薄膜を成膜した。また、CNT 薄膜の膜厚に関しては、スピコートの際のガラス基板の回転数を 4000 rpm, 8000 rpm に設定することにより、異なる膜厚を持つ CNT 薄膜ガスセンサーを複作製した。作製した基板の膜厚は、透過率を測定することにより求めた。測定にはレーザーを使用し、基板ごとに異なる 3 か所の透過率を測定、その平均を膜厚の比較に用いた。

CNT 薄膜の電気抵抗を測定する場合、薄膜上に電極を置き、電極間の抵抗値を測定することになるが、そこで測定される抵抗には、CNT 薄膜自体のシート抵抗のほか、電極と薄膜間の接触抵抗も含まれている。そこで、シート抵抗と接触抵抗を分離して測定するため、本実験では伝送長法 (TLM 法) と呼ばれる方法を用いた。(1)式で表される抵抗の関係式と比較することにより、シート抵抗と接触抵抗を分離して求める方法である。

$$R_T = \frac{R_{sh}}{W} d + 2R_c \quad (1)$$

ここで、 R_T は接触抵抗とシート抵抗を合わせた抵抗値、 R_{sh} はシート抵抗、 R_c は接触抵抗、 d は電極間距離、 W は電極幅である。

図 2 に、本実験で用いた実験装置の概略図を示す。先ほど説明した方法で作製したガスセンサーにステンレス電極を取り付けたものをチャンパー内に置く。センサー応答の測定方法は、まずバルブ 2 を閉じ、バルブ 1 と 3 を開けた状態でロータリーバキュームポンプを用いて装置全体を真空に引く。装置全体の圧力が数 Pa 程度になるまで真空に引いたら、バルブ 1 と 3 を閉じ、バルブ 2 を開け、圧力差を利用して装置内に測定対象となるガスを所定の圧力になるまで導入する。その後、所定の圧力に達したら、バルブ 1 を解放してセンサーをガスに曝し、その時の抵抗を測定する。測定は、電極間距離 2 mm, 4 mm, 7 mm 部分でそれぞれ測定し、その結果から、TLM 法によってシート抵抗を算出した。

4. 研究成果

図 3 (a) に各水蒸気圧における MWCNT 薄膜の抵抗と電極間距離の関係を示す。水蒸気圧の上昇とともに直線の y 切片と傾きの両方が増加しており、水分子が接触抵抗の変化と CNT 薄膜の電気伝導率の変化に影響を与えたことがわかる。水蒸気圧に対する接触抵抗とシート抵抗の変

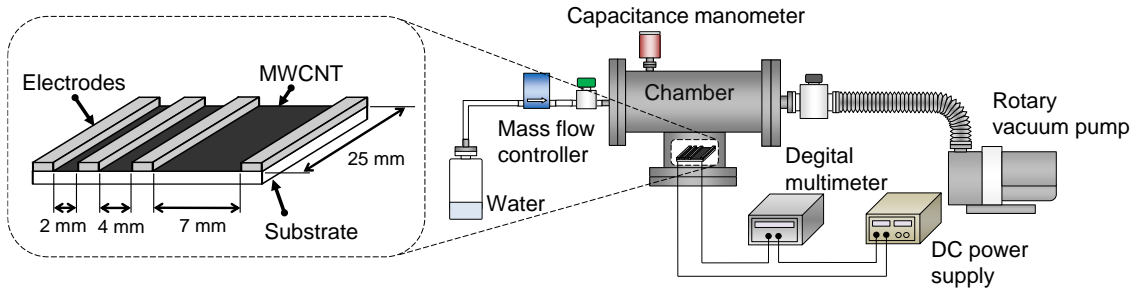


図2 実験装置図概略

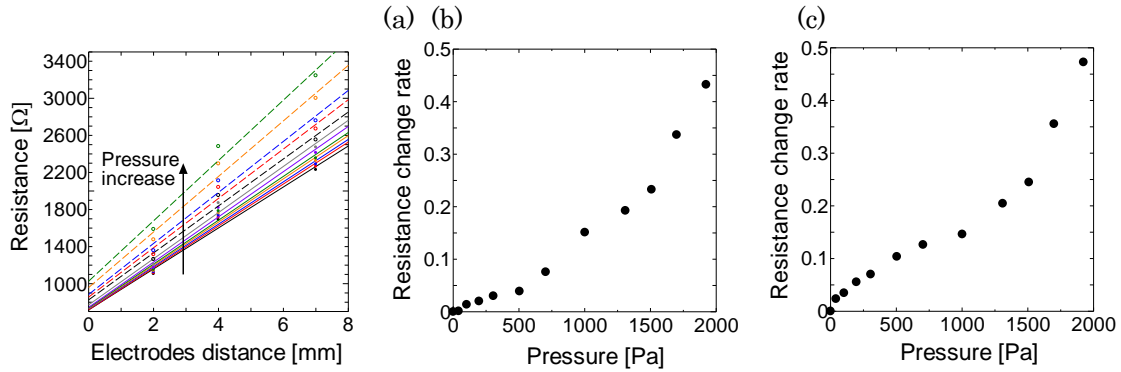


図3 CNT 薄膜の水蒸気圧による抵抗値の変化

化率 ΔR をそれぞれ図3(b)と(c)に示す。抵抗の変化率は式(2)で表される。

$$\Delta R = \frac{R - R_0}{R_0} \quad (2)$$

接触抵抗は水蒸気圧の上昇とともに指数関数的に増加しており、最大で約45%変化した。半導体性の単層CNT (SWCNT) と金属電極間の接触抵抗の変化は、金属の仕事関数と半導体のフェルミエネルギーの差によって生じるショットキー障壁の変化によって起こると報告されている。水分子の吸着によって電極付近のSWCNTのフェルミエネルギーが変化した結果、ショットキー障壁の高さが変化したと考えられる。接触抵抗はショットキー障壁の高さに対して指数関数的に増加するという報告があり、フェルミエネルギーの増加が吸着した水分子の数に比例すると仮定すると、得られた結果はこの報告と一致する。しかし、MWCNTは一般に金属性であると考えられており、この考察とは矛盾するため、MWCNT薄膜と電極間の接触抵抗の変化のメカニズムの解明にはさらなる取組みが必要である。シート抵抗は水蒸気圧の上昇にともない増加しており、最大で50%変化した。シート抵抗の変化のメカニズムは水分子とCNT間の電荷移動であると考えられている。既往の研究では、SWCNTに吸着した水分子は電子のドナーとしてふるまうことがわかっており、これは半導体、金属SWCNTともに同様である。水分子の吸着によってシート抵抗が増加していることはMWCNT薄膜のキャリアが正孔であることを示唆している。つまり、水分子の吸着によって正孔密度が低下し、シート抵抗が増加したと考えられる。これまでもMWCNTのキャリアが正孔であることは報告されているが、十分とは言えず、現段階では推測の域をでない。水分子がシート抵抗の変化に影響を及ぼしていることは明らかであるため、MWCNT薄膜のコンダクタンスの変化率と水蒸気圧の関係を吸着モデルで説明することを試みた。MWCNT薄膜のコンダクタンスの変化率 S_T は式(3)で表される。

$$S_T = \frac{G_0 - G}{G_0} \quad (3)$$

ここで、 G はある水蒸気圧におけるコンダクタンス、 G_0 は真空中におけるコンダクタンスである。CNT表面への水分子は多層に及ぶことが予測されたが結果的に吸着層は二層であることがモデルから予測された。偶然にも二層の水分子層が形成されることがこれまでに報告されている。結果的に一層目には式(4)のラングミュアの吸着モデル、二層目には式(5)の隣り合う水分子の相互作用をラングミュアの吸着モデルに加えたモデル (Fowler-Guggenheim) を用いることで実験結果を表すことが可能であった。

$$\frac{\theta_1}{1 - \theta_1} = K_1 P \left(\theta_1 = \frac{n_1}{N} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\theta_2}{1 - \theta_2} = K_2 P \exp\left(\frac{\theta_2 E}{k_B T}\right) \left(\theta_2 = \frac{n_2}{n_1} \right) \quad (5)$$

ここで、 θ_i は被覆率、 N はMWCNT薄膜の吸着サイト数、 n_i は各層の水分子の数、 P は水蒸気圧、 K_i は吸着平衡定数、 E は水分子間の相互作用エネルギー、 k_B はボルツマン定数、 T は水分子の温度、 i は各層に対応した番号である。つまりここで我々が置いた仮定はただ一つで、コンダクタンスの変化率が被覆率に相当するということである。

$$\frac{S_i}{S_{\max,i}} = \frac{n_i}{N} \quad (6)$$

ここで、 S_i は各層に吸着した水分子の影響によるコンダクタンスの変化率、 $S_{\max,i}$ は各層が水分子で埋めつくされたときのコンダクタンスの変化率である。最終的にMWCNT薄膜のコンダクタンスの変化率 S_T は式(7)で表される。

$$S_T = S_1 + S_2 = S_{1,\max} \frac{n_1}{N} + S_{2,\max} \frac{n_2}{N} = S_{1,\max} \theta_1 + S_{2,\max} \theta_1 \theta_2 \quad (7)$$

上の式を用いて、実験で得られた水蒸気圧に対するMWCNT膜のコンダクタンスの変化率をフィッティングした。フィッティングパラメータは K_1 、 K_2 、 $S_{\max,1}$ 、 $S_{\max,2}$ 、 E である。この結果を図4に示す。フィッティングで得られた曲線と実験値はよく一致していることがわかり、水分子がMWCNT膜のコンダクタンスに及ぼす影響を二層吸着モデルで説明することができた。二層目の水分子同士の相互作用エネルギーは水分子同士の水素結合エネルギー（約0.22 eV）に比べて半分ほどの値である。このことから二層目の水分子同士の距離は水素結合を形成するとき比べて大きいことが予想される。一層目に関していえば、相互作用エネルギーは無視できるほどの値であり、水分子同士はかなり離れていると考えられる。吸着平衡定数は式(8)で表すことができ、この式から吸着エネルギーを見積もることができる。

$$K_i = \frac{\sigma \tau_0}{\sqrt{2\pi m k_B T}} \exp\left(\frac{E_{a,i}}{k_B T}\right) \quad (8)$$

ここで、 $E_{a,i}$ は吸着エネルギー、 T は水分子の温度（290 K）、 m は水分子の質量（ 2.99×10^{-26} kg）、 τ_0 は吸着時間定数（ 10^{-12} s）は分子振動の時間スケールを、 σ は水分子の衝突断面積面積を用いた（ 1.0×10^{-19} m²）。一層目の吸着エネルギー $E_{a,1}$ 、つまりMWCNTと水分子間の吸着エネルギーはおおよそ0.35 eVであり、これは過去に行われたシミュレーションによって得られた値に比べて3倍弱大きい値である。過去の研究ではCNT表面よりCNT同士が形成する交差点にガス分子が吸着しやすいことがわかっており、また電荷移動にはこの交差点に吸着したガス分子が重要な役割を果たすことが示唆されている。今回の吸着モデルではコンダクタンス変化に寄与した水分子のみを考慮しているため、見積もられた一層目の吸着エネルギーは交差点に吸着したガス分子のものである可能性も十分にある。二層目の吸着エネルギー $E_{a,2}$ は約0.27 eVであった。これは一層目の水分子の上に吸着する水分子の吸着エネルギー、つまり水分子間の水素結合エネルギーに相当すると考えられ、実際に水分子同士の水素結合エネルギーに近い値である。この結果はこの吸着モデルの妥当性を示すと考えられる。

ここまで水蒸気を用いて、これらのガス圧力に対するシートコンダクタンスの変化率が吸着モデルで説明できることを確かめた。そして、実験結果を吸着モデルでフィッティングして得られる吸着平衡定数から吸着エネルギーを見積もり、これらの値が文献値よりも大きいことが明らかになった。このような結果になった理由はCNTジャンクションに吸着したガス分子がCNT膜の電気伝導の変化に寄与しており、そのCNTジャンクションに吸着したガス分子の吸着エネルギーを計測したからであると考えられる。またBoydらの研究によって、CNT膜ガスセンサーではCNTジャンクションがガスの検知に重要な役割を果たしていることがわかっており、今回の結果が妥当であることがわかる。しかし、CNTジャンクションに吸着したガス分子がどのようにCNT膜の電気伝導に影響を与えるのかははまだわかっていない。そこで、これまでは吸着モデルからCNT膜ガスセンサーの応答メカニズムの解明に取り組んできたが、この節からアプローチを変えて、CNT膜の電気伝導モデルから応答メカニズムについて考えていく。

始めにCNT膜の電気伝導モデルであるFluctuation Induced Tunneling (FIT)モデルを説明する。このモデルは、長く大きな導電材料が短く小さな絶縁材料で分離された媒質中の電気伝導モデルである。CNT膜の場合、CNTは非常によい伝導体である一方で、CNTジャンクションが形成されるため、CNT同士が接している部分にナノオーダーの隙間が存在する。この隙間が絶縁材料としてはたらき、CNT膜の電気伝導の律速段階となる。以下ではCNT膜を例にとってFITモデルを説明する。CNT膜のコンダクタンスは以下の式で表される。

$$G = G_0 \exp\left(-\frac{T_1}{T + T_0}\right) \quad (9)$$

この式において、 G はコンダクタンス[S]、 G_0 は温度が無限になったときのコンダクタンス[S]、 T は温度[K]、 T_0 はトンネル効果の影響を表す定数[K]、 T_1 はCNTジャンクションにおける静電ポテンシャルによって形成されるエネルギー障壁を表す定数[K]である。さらに、 T_0 と T_1 は以下

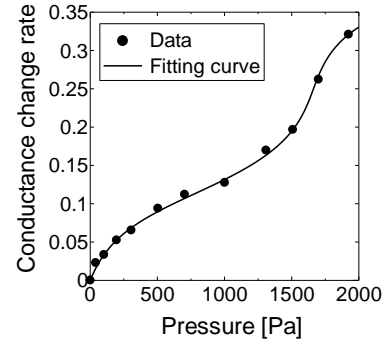


図4 二層吸着の様子

の式で表される。

$$T_0 = \frac{4\pi\alpha\epsilon_0}{k_B} \frac{wA}{8\pi} \left(\frac{4E_0}{ew} \right)^2 \frac{2}{\pi w} \frac{\hbar}{\sqrt{2mE_0}} \quad (10)$$

$$T_1 = \frac{4\pi\alpha\epsilon_0}{k_B} \frac{wA}{8\pi} \left(\frac{4E_0}{ew} \right)^2 \quad (11)$$

ここで、 α は比誘電率に関する定数、 ϵ_0 は真空の誘電率[F/m]、 w は CNT 同士の接触距離[m]、 A は面積[m²]、 k_B はボルツマン定数[J/K]、 E_0 は CNT 間の静電ポテンシャルの高さ[J]、 e は電気素量[C]、 m は電子の有効質量[kg]、 \hbar はプランク定数である[J s]。以下では、 T_1 、 T_0 について詳しく見ていく。FIT モデルでは、CNT 同士が接触する部分を理想的な平行平板キャパシタと見なしている。このキャパシタに蓄えられるエネルギーがガスの吸着により変化するという視点から考えるとガス分子が物理吸着することによる電気抵抗の変化であるとみなせる。

図 5 には 5 つのサンプルの MWCNT 膜のコンダクタンスと温度の関係を載せている。図中の Step1 は成膜直後の MWCNT 膜をチャンバーに入れて、真空してしばらくしてから測定したデータ、Step2 は Step1 が終わってから取ったデータをそれぞれ示している。Step1 と Step2 ではコンダクタンスの変化が異なっていることがわかる。これは真空にひいたときに取り除けなかったガス分子の影響であると考えられる。また、これと同様の結果が Zahab ら(2000)によって報告されている。この結果は CNT 膜内に残留しているガス分子の影響を受けず、CNT 本来の電気伝導性を調べるためには、真空下において CNT 膜を温めて残留物を除去しなければならないことを示唆している。そのため、図 5 では Step2 が本来の MWCNT 膜のコンダクタンスの温度依存性であると言える。そこで、Step2 のデータのみでフィッティングを行い、定数 T_0 、 T_1 を決定した。フィッティングパラメータは G_0 、 T_0 、 T_1 である。これまでに多くの研究者によって、CNT 膜の電気伝導の温度依存性が調べられ、定数 T_0 、 T_1 の報告例も多くある(Bekyarova et al., 2005; Kaiser et al., 2001; Kim et al., 2001; Salvato et al., 2008; Shiraiishi et al., 2002; Skakalova et al., 2006; Tanaka et al., 2012)。しかし、これらの研究ではシート抵抗ではなく、CNT 膜の全体抵抗を用いたり、CNT の複合材を用いたりするため、我々の研究と比較するのは難しい。一方、Kochilin ら(2010)によって CNT 膜のシート抵抗の温度依存性が調べられており、 T_1 が 289 ± 79 K、 T_0 が 87 ± 55 K と決定されている。この値は我々の実験結果とおおよそ一致していることがわかり、実験結果で得られた T_0 、 T_1 が妥当な値であることを示している。

本研究成果をまとめると、水蒸気圧に対する MWCNT 膜のシートコンダクタンスの変化率を Langmuir の吸着モデルと Fowler-Guggenheim の吸着モデルを組み合わせた二層吸着モデルで説明することができた。Fluctuation Induced Tunneling (FIT) モデルから、CNT 膜に吸着したガス分子が CNT ジャンクションにおける比誘電率を変化させ、その結果 CNT 膜のコンダクタンスが変化することが予測された。これを踏まえて、FIT モデルに吸着モデルを組み込み、ガス分子吸着による比誘電率の変化を考慮した新たな FIT モデルを提案した。

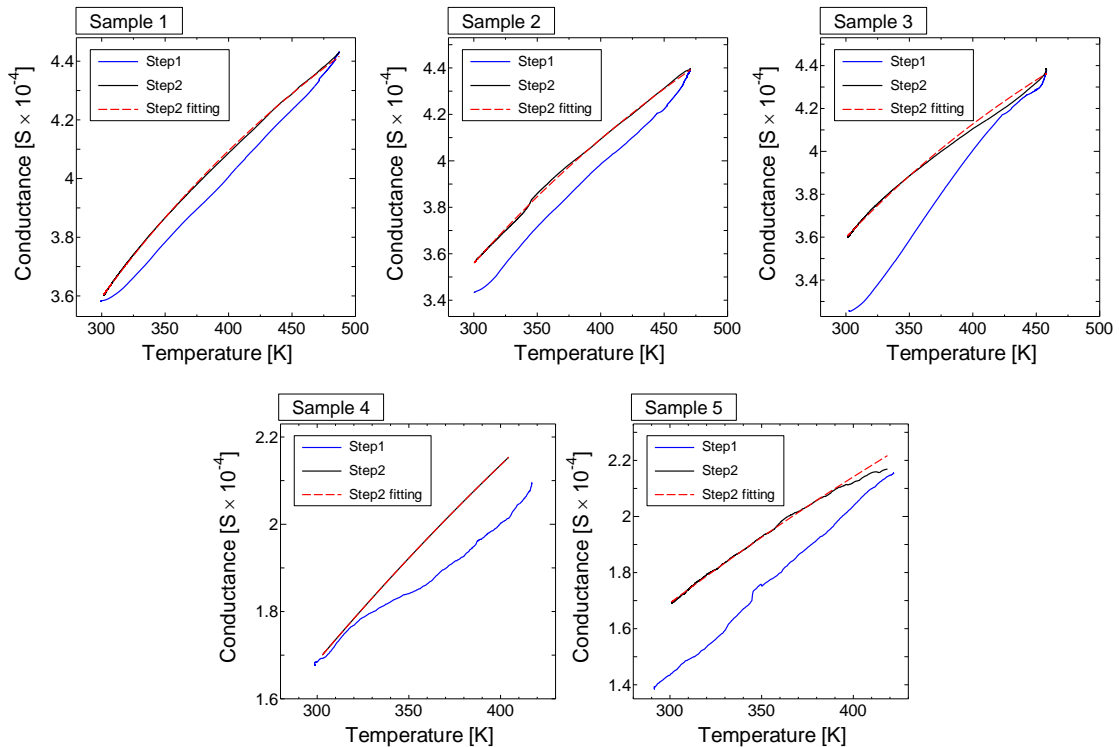


図 5 薄膜の温度依存

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Inoue, Shuhei; Yoshihiro, Tomita; Takuya, Kokabu, Matsumura, Yukihiko	4. 巻 709
2. 論文標題 Principles of detection mechanism for adsorbed gases using carbon nanotube nanomat	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Chemical Physics Letters	6. 最初と最後の頁 77-81
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1016/j.cpllett.2018.08.040	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Takezaki Hiroki, Inoue Taiki, Xiang Rong, Chiashi Shohei, Maruyama Shigeo	4. 巻 96
2. 論文標題 Growth of single-walled carbon nanotubes by alcohol chemical vapor deposition with water vapor addition: Narrowing the diameter and chiral angle distributions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Diamond and Related Materials	6. 最初と最後の頁 160 ~ 166
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.diamond.2019.05.009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Koyano Bunsho, Inoue Taiki, Yamamoto Shun, Otsuka Keigo, Xiang Rong, Chiashi Shohei, Maruyama Shigeo	4. 巻 155
2. 論文標題 Regrowth and catalytic etching of individual single-walled carbon nanotubes studied by isotope labeling and growth interruption	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Carbon	6. 最初と最後の頁 635 ~ 642
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.carbon.2019.09.031	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Inoue Shuhei, Tomita Yoshihiro, Matsumura Yukihiko	4. 巻 734
2. 論文標題 Effect of thickness of carbon nanotube films on enhancement of sensor response	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Chemical Physics Letters	6. 最初と最後の頁 136730 ~ 136730
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1016/j.cpllett.2019.136730	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Zhang Mengli、Inoue Shuhei、Matsumura Yukihiro	4. 巻 747
2. 論文標題 Light and flexible gas sensors made of free-standing carbon nanotube paper	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemical Physics Letters	6. 最初と最後の頁 137367 ~ 137367
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.cplett.2020.137367	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計9件(うち招待講演 0件/うち国際学会 7件)

1. 発表者名 富田 圭裕 井上 修平 松村 幸彦
2. 発表標題 カーボンナノチューブ薄膜のガス分子に対する応答特性
3. 学会等名 第55回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshihiro Tomita Shuhei Inoue Yukihiro Matsumura
2. 発表標題 Development of high response carbon nanotube gas sensor
3. 学会等名 International Conference on Diamond and Carbon Materials 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shuhei INOUE, Mengli ZHANG, Yukihiro MATSUMURA
2. 発表標題 Fabrication of uniform multi-walled carbon nanotube film as a sensing material
3. 学会等名 International Conference on Diamond and Carbon Materials 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 aiki Inoue, Bunsho Koyano, Shun Yamamoto, Shota Hiraoka, Keigo Otsuka, Rong Xiang, Shohei Chiashi, Shigeo Maruyama
2. 発表標題 Growth process of individual single-walled carbon nanotubes analyzed by isotope labelling
3. 学会等名 20th International Conference on the Science and Application of Nanotubes and Low-dimensional Materials (NT19) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小矢野 文章, 山元 隼, 大塚 慶吾, 井ノ上 泰輝, 項 栄, 千足 昇平, 丸山 茂夫
2. 発表標題 同位体ラベルによる単層カーボンナノチューブの再成長の分析
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mengli ZHANG, Shuhei INOUE, Yukihiro MATSUMURA
2. 発表標題 Enhancing sensitivity of multi-walled carbon nanotube sensors for gas detection
3. 学会等名 International Symposium on Fuel and Energy 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shuhei INOUE, Yoshihiro TOMITA, Yukihiro MATSUMURA
2. 発表標題 Effect of film thickness on responsivity of carbon nanotube sensor
3. 学会等名 International Conference on Diamond and Carbon Materials 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mengli ZHANG, Shuhei INOUE, Yukihiro MATSUMURA
2. 発表標題 The Characteristics of Multi-walled Carbon Nanotubes Based Gas Sensors
3. 学会等名 International Conference on Diamond and Carbon Materials 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shuhei Inoue, Mengli Zhang, Yoshihiro Tomita, and Yukihiro Matsumura
2. 発表標題 Molecular Physisorption on Carbon Nanotube Film
3. 学会等名 Advanced Nano and Energy Materials, ANEM2019 (国際学会)
4. 発表年 2019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
研究分担者	千足 昇平 (Chiashi Shohei) (50434022)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授 (12601)	
研究分担者	井ノ上 泰輝 (Inoue Taiki) (00748949)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・助教 (12601)	