

令和 2 年 6 月 11 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03186

研究課題名(和文)次世代エレクトロニクス熱物性の計測技術基盤

研究課題名(英文) Measurement techniques for thermophysical properties of low-dimensional materials for next-generation electronics

研究代表者

高橋 厚史 (Takahashi, Koji)

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号：10243924

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：2次元材料とその積層構造の熱物性について、ラマン分光法をもとに計測法を新規開発するとともに、従来のT字型熱センサ法を改良するなどの実験的研究を行った。T型法では3次元数値解析を併用してフッ化グラフェンの熱伝導率の計測精度を向上させ、スポットサイズ変化ラマン分光法の開発によってWS2単層膜が基板に支持された状態では懸架状態に比べて熱伝導率が大きく劣化することを明らかにした。また、レーザーフラッシュラマン分光法をMoS2へ応用したり、グラフェンナノリボンの熱電性能計測にも成功した。さらに、グラフェン上のナノオーダーの厚さの気相についてもAFMを用いて多くの知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

次世代のエレクトロニクスでは2次元材料とそのヘテロ構造が期待されているが、それらの熱物性は不明なことが多く正確な熱設計ができない原因となっている。本研究では各種2次元材料単体およびそれらを基板上に積層させた構造の熱伝導特性を計測可能な新規手法の開発に成功し、将来の2次元材料応用における基盤的知見となる熱工学的成果を得た。

研究成果の概要(英文)：From the viewpoint of next-generation electronics, thermophysical properties of low-dimensional materials are experimentally treated by using new measurement techniques. Variable-spot-size Raman method was developed and applied to WS2 and the effect of substrate was found to degrade the thermal conductivity to one third. Laser-flash Raman method was applied to MoS2. In addition, graphene nano ribbon was found to have very high thermoelectric performance. Nanobubbles at the graphene-liquid interface were also explored by using AFM.

研究分野：ナノマイクロ熱工学

キーワード：2次元材料 熱伝導率 界面熱抵抗 ラマン分光法

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2010年代の後半は、大規模集積回路の開発におけるムーアの法則が終焉を迎えたと言われ、その原因の一つが半導体デバイス内の高密度発熱にあるとされていた。その熱工学的問題を解決する一つの方策としてグラフェン等の2次元材料(1原子分程度の厚さのシート状材料)に期待が集まり始めていた。グラフェンは電気伝導率と熱伝導率の双方に優れていることに加え、究極の薄さでありながら強度と柔軟性に優れているという理想的な薄膜材料であり、半導体としてもCVD合成できる点に加えてナノリボン化や化学修飾等でバンドギャップの制御が可能であることから2010年のノーベル賞以降も引き続き精力的な研究が世界中で行われている。ただし、本研究が開始した2017年頃になるとグラフェン以外の種々の2次元材料が開発されるようになり、特に遷移金属カルコゲナイド(TMD: transition metal dichalcogenide)は1個の遷移金属元素Mと2個のカルコゲナイドXが結合した物質であるが、絶縁体・半導体・金属と様々な性質を示すMとXの組み合わせがMoS₂やWSe₂など多数存在し、グラフェン同様の究極に薄い構造と優れた電氣的・光学的性質が多く研究者を惹きつけるようになっていた。しかも、2次元であるということは、現在の薄膜デバイスを置き換えられるということにとどまらず、多種の材料が積層した層間ヘテロ構造(図1)や、同じ2次元内で接続した面内ヘテロ構造(図2)を取ることで新規物性の発現が期待され、センサや電気化学デバイスなどにおける次世代型エレクトロニクス材料として非常に高い注目を浴びている。しかしながら、性能向上に伴って増加する熱量を外部へ逃がすための熱輸送特性に関してはグラフェンでさえ研究の端緒についたばかりで、特に実験手法は手探りの段階であった。

一般に、エレクトロニクスで用いられる薄膜の熱伝導率は3 ω 法やサーモリフレクタンス法を原理とする計測法が長らく開発されてきていたが、どちらも計測対象へ別の薄膜をヒーターやセンサとして堆積させる必要があり、その影響が2次元材料では無視できないほど大きいと予想されることから全く別の計測法が望まれていた。一方で、グラフェンより早く登場したカーボンナノチューブも熱輸送性能への期待が大きく、熱伝導率および接触熱抵抗に関する実験的研究が2000年頃より開始されていた。ただし、古い報告例であるが、理論的には数1000W/mKという高い熱伝導率が予測されていたにも関わらず、集合体で計測したところ2-3桁低いデータしか得られなかったことから、集合体でなく試料1本での計測が必要と認識され、MEMS技術を用いたパッド型やホットフィルム型の超小型熱センサの開発成功によってようやく信頼できるデータが得られるようになっていた。しかしながら、センサと試料の間には接触熱抵抗が常に存在することから、センサを使わない非接触式の計測技術もやや遅れて開発が始まり、カーボンナノチューブとグラフェンの双方でラマン散乱光の温度依存性(図3)を用いて熱伝導率を計測する研究が始まっていた。ただし、ラマン分光における試料の入射光の吸収係数(光吸収率)を1と仮定していたり、低い精度で推定していたりしたことから、例えば単層グラフェンの熱伝導率の場合に600~5300w/mKというような誤差の大きな結果しか得られていなかった。それに対して、連続発振を用いる通常のラマン分光法を改良し、吸収係数が未知であっても熱拡散率の正確な計測が可能となる新しい手法(レーザーフラッシュラマン分光法)が提案されていた。特に、ナノ材料の中でも2次元材料は基板と接触しているかどうかで自身の熱輸送性能が大きく変わることが予測されており、デバイスにおける設置状態や、上述した他の材料との積層状態および面内結合がどのように影響を及ぼすかなどの問いに早急に答えるための実験技術の確立が強く望まれていた。

2. 研究の目的

本研究では、上記の「レーザーフラッシュラマン分光法」と並行して「スポットサイズ変化ラマン分

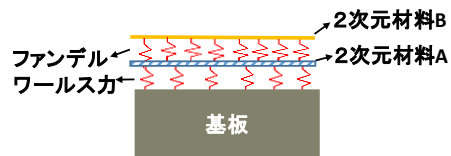


図1 異なる2次元材料が積層した層間ヘテロ構造

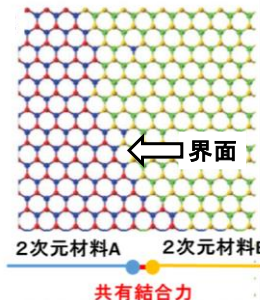


図2 異なる2次元材料の面内結合による面内ヘテロ構造

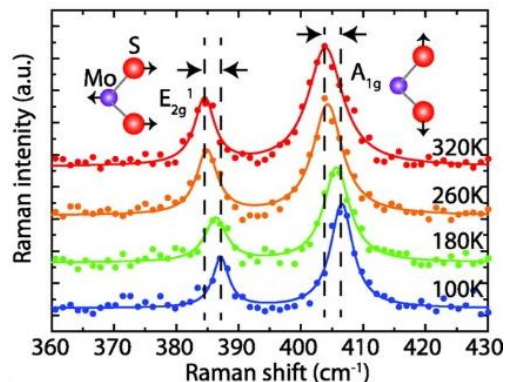
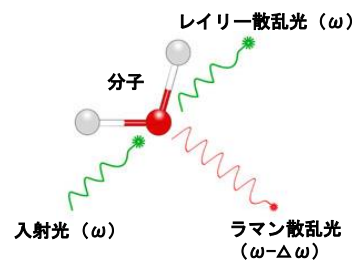


図3 ラマン散乱の原理(上)とMoS₂から得られるラマン信号の温度依存性の例(下、Yan, et al. ACS Nano (2014))

光法」を開発し、既存の「T型ホットフィルム法」とともに、次世代エレクトロニクスで要求される2次元材料の熱伝導性能を正しく計測するための基盤的手法の開発を目的とした。

まず、これらの手法を以下に説明する。

「T字型熱センサ法」(Fujii, et al. PRL(2005))は、ヒートシンク間に懸架した白金等のホットフィルムセンサをナノ材料と同等のサイズまで小型化した上で、そのホットフィルムの中央部ともう一つのヒートシンクとの間に細線状の試料を接合することで、ホットフィルムのジュール発熱の一部が試料を伝わって逃げる量をホットフィルムで計測し、試料の熱コンダクタンスを推定するものである。

「スポットサイズ変化ラマン分光法」は、本来は固体の構造を調べる目的で使われるラマン分光法を非接触温度計測として利用するにあたり、2次元材料へのレーザー照射(図4)において照射面積(スポットサイズ)の変化(図5)を導入するものである。顕微ラマン分光で用いるレーザーは対物レンズによって集光されるが、試料の位置によってそのスポットサイズを変化させると熱の逃げ方が変わって試料の温度が変化する。この状態を軸対象の熱伝導問題として解いた解析解と実験で得られるラマンピークシフトから推測される温度(図3)とをフィッティングする。なお、ラマン信号は積層された異なる2次元材料の各々から同時に得られることから、各層の異なる温度が同時に得られる。ここで、温度上昇はスポットサイズと熱伝導率と界面熱抵抗を変数とする関数にレーザーの加熱量が掛けられた形であり、スポットサイズを変化させた場合の温度上昇の比を取れば加熱量がキャンセルされるというのが原理になっている。つまり、吸収係数という特定困難な物理量が未知であっても各々の2次元材料の熱伝導率と層間および層・基板間の界面熱抵抗が得られることになる。

「レーザーフラッシュラマン分光法」は、スポットサイズは一定で、レーザーの連続発振光をEOモジュレーターによって繰り返しパルス光へと変調させて試料を加熱する手法である。

(図6) その状態は軸対象の非定常加熱・熱伝導問題として解析することが可能で、その解析解とパルス幅を変化させた場合の実験データとの最小二乗フィッティングから、やはり吸収係数が未知なままで試料の熱拡散率を定量的に計測することが可能となる。

このように過去の計測法の問題点(センサとの接触熱抵抗、付加する薄膜の影響、加熱量の不確かさ)を解決する新しい計測法としてラマン分光法への期待は大きいですが、上記の説明はあくまでも原理的なものに過ぎず、実際の2次元材料を用いて計測を実施し、問題点を洗い出しながら多くの研究者が使える計測技術へと発展させることを本研究は目指す。

3. 研究の方法

本報告では「T字型熱センサ法」を用いてフッ化単層グラフェン(FSLG)を、「スポットサイズ変化ラマン分光法」を用いて二硫化タンゲステン(WS_2)を、「レーザーフラッシュラマン分光法」を用いて二硫化モリブデン(MoS_2)を計測

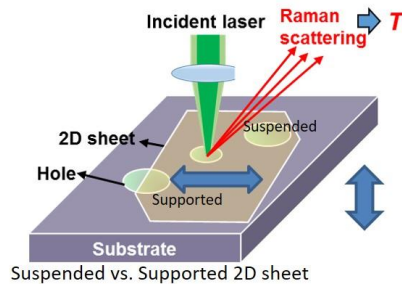


図4 基板に支持された2次元材料と穴の上で懸架状態の材料のラマン分光法の概略図

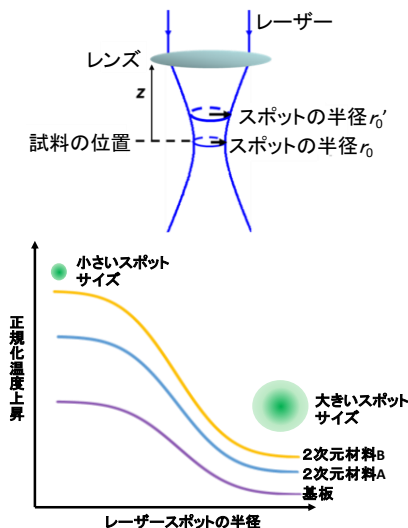


図5 スポットサイズの変化による試料の温度上昇の違いから熱物性を導出する原理

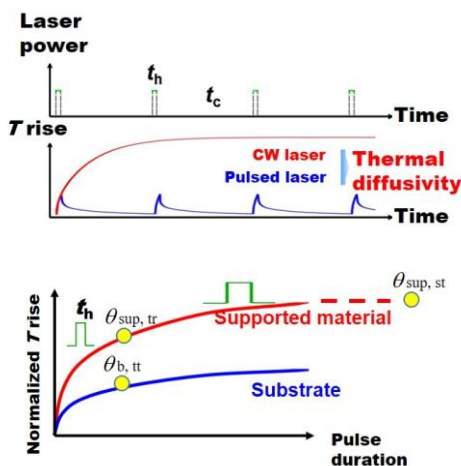


図6 周期加熱による温度上昇の違いから試料の熱物性を導出する原理図

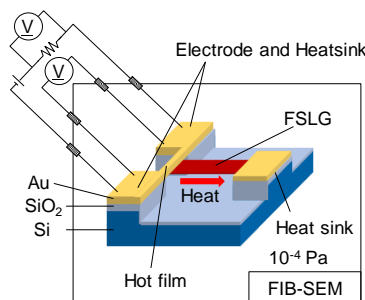


図7 T型ホットフィルム法による2次元材料の測定概略図

した実験について述べる。

3-1 T字型熱センサ法

T型法を2次元材料へ応用する場合の第一の困難は試料の設置方法にある。図7のようにFSLGをホットフィルムとヒートシンクの間で浮いた状態で設置する必要があるのだが、2次元材料はハンドリングが非常に困難で、多層カーボンナノチューブのようにマニピュレータで狙った場所へ置くことは非常に難しい。そこで、本研究ではSi基板に転写された単層グラフェンを購入し、MEMS技術によってグラフェンのパターニングとAuホットフィルムの作製を行った。この時、XeF₂ガスを使うことでグラフェンのフッ化も行える。図8には実際に測定する直前の試料とホットフィルムセンサのSEM像を載せた。ただし、第二の困難として、フッ化単層グラフェンのように熱コンダクタンスが非常に小さな試料の計測はホットフィルムセンサの信号が非常に小さくなってしまう問題がある。本研究では、1次元熱伝導を仮定して試料の熱コンダクタンスを得る通常のT型法を発展させ、図9のように汎用有限要素解析ソフトMSC Marc/Mematを用いた3次元熱伝導解析を行って熱伝導率を推測した。

3-2 スポットサイズ変化ラマン分光法

スポットサイズの正確な測定は、解析解との比較から熱物性値を導出する場合には、実験結果の信頼性に直結する課題である。本研究では、図10に示したように、Si基板上に直線の一片を持つようにパターニングされたAu薄膜(ラマン信号無し)を準備し、基板を平行移動させたときのSiから来るラマン信号の強度の変化からレーザースポットの大きさを調べる方法でスポットサイズを正確に決定できることを確認した。本研究では、図11に示したよう基板に接するように転写した単層WS₂のサンプルを3種類用意してスポットサイズ変化ラマン分光法を適用して熱伝導率と基板との間の界面熱コンダクタンスを計測した。

3-3 レーザーフラッシュラマン分光法

グラフェンで実績のある本手法であるが、他の2次元材料での計測例は非常に少ない。そこで、本研究ではCVD合成した単層MoS₂を孔の開いているSi基板に転写し、懸架状態での熱拡散率を計測することとした。(図12)なお、基板に支持された状態での計測も可能なのが本手法の特徴であるが、まずは他の手法で報告例のある懸架状態での結果から問題点を洗い出すこととした。

4. 研究成果

4-1 T字型熱センサ法

今回計測したFSLGの熱伝導率を以前計測したフッ化修飾していない単層グラフェン(SLG)のデータと併せて図13に示した。FSLG1とFSLG2は製作過程で生成したと思われる欠陥の状態が異なる試料である。この結果からフッ化した単層グラフェンはフッ化前の2000W/mK程度から80W/mKにまで熱伝導率が減少することや、フッ化後は熱伝導率が欠陥の密度に強く依存することはないことが明らかになった。な

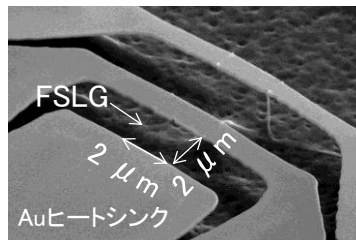


図8 ホットフィルムとヒートシンクの間に懸架されたFSLGのSEM像

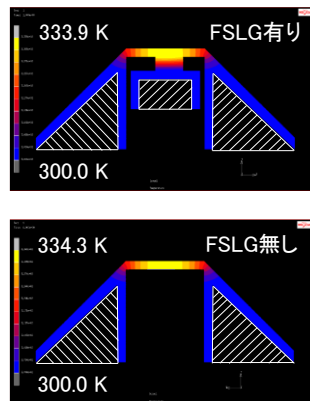


図9 MSC Marc/Mematによる熱伝導解析

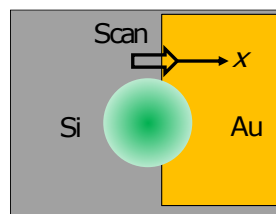


図10 レーザーのスポットサイズ計測の概略図

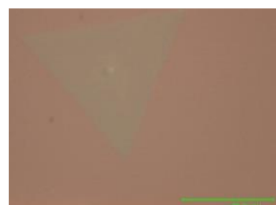


図11 単層WS₂を基板上に転写した試料、左上に薄く見える一辺30μm程度の三角形がWS₂

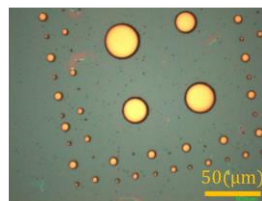


図12 色々な種類の孔が開けられたSi基板に転写された単層MoS₂

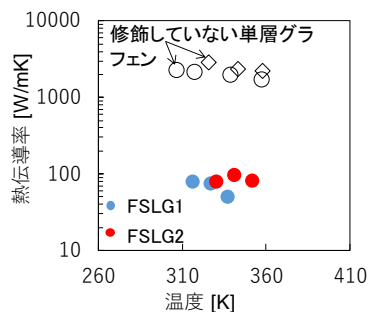


図13 FSLGの熱伝導率計測結果

お、この程度まで熱伝導率が下がったナノ材料を計測するためには、試料とセンサの正確な形状を用いた3次元数値解析の併用が不可欠であることもわかった。

4-2 スポットサイズ変化ラマン分光法

図14にスポットサイズを変化させた場合の基板支持状態の WS_2 の温度上昇のデータと、その軸対象熱伝導解析解のフィッティングの様子を示した。これから、計測した WS_2 の熱伝導率は $10.4W/mK$ から $14.4W/mK$ の間であること、基板との界面熱コンダクタンスは $3.14MW/m^2K$ から $3.45MW/m^2K$ の間であることが得られた。他で計測された懸架状態の WS_2 の熱伝導率として $30W/mK$ 程度が報告されているので、今回の試料のような基板と接触した状態では懸架状態の三分の一程度まで熱輸送性能が低下する可能性があることがわかった。

4-3 レーザーフラッシュラマン分光法

単層 MoS_2 の実験結果の例を図15に示した。実験データと解析解が良い一致を見せていることから正しく計測できていることが推察できる。ただし、このフィッティングから推定される懸架状態での単層 MoS_2 の熱伝導率は $5.6W/mK$ であり、過去に報告された計測値の $30W/mK$ あるいは $50W/mK$ と比べて大きく低下していた。この理由は試料の合成から計測まで数か月の時間が経過していたためと考えられ、酸化によって2次元材料の熱伝導率がこの程度まで低下するという知見は一つの有意義な結果と考えている。

なお、本研究の申請段階では2次元材料の面内ヘテロ構造に関して正確な熱輸送機構の解明のための新しい実験手法としてAFMを用いた「チップ増強ラマン分光法」についても計画していたが、空間解像度を上げた場合の信号増強が不十分でありAFMによる2次元材料の熱物性計測は现阶段では難しいことが明らかになった。一方でAFMは界面の形状計測には大きな力を発揮し、グラフェンと水との界面に生成されるナノオーダーの厚みの気相に関する実験的知見を多く得たことを付記しておく。

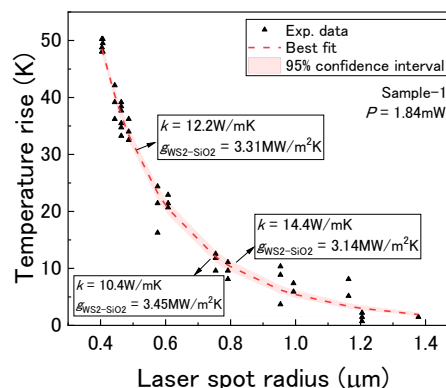


図14 スポットサイズ変化ラマン分光法で得られた温度上昇データと解析解のうちの最適フィッティングカーブから熱伝導率を推定する様子

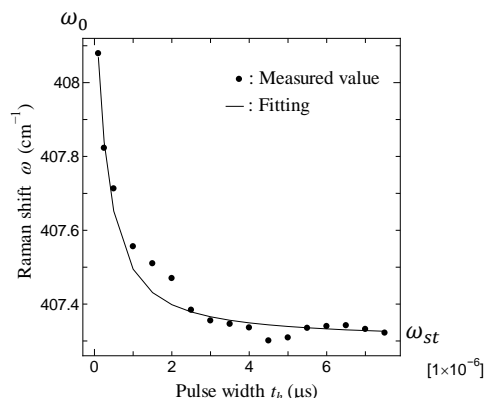


図15 レーザーフラッシュラマン分光法による MoS_2 のラマンピークのシフト量と解析解(実線)とのフィッティングの例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 5件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Li Qin-Yi, Zhang Xing, Takahashi Koji	4. 巻 125
2. 論文標題 Variable-spot-size laser-flash Raman method to measure in-plane and interfacial thermal properties of 2D van der Waals heterostructures	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 1230 ~ 1239
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.05.011	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 該当する
1. 著者名 Wang Haidong, Hu Shiqian, Takahashi Koji, Zhang Xing, Takamatsu Hiroshi, Chen Jie	4. 巻 8
2. 論文標題 Experimental study of thermal rectification in suspended monolayer graphene	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 15843 ~ 15843
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/ncomms15843	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Li Qin-Yi, Xia Kailun, Zhang Ji, Zhang Yingying, Li Qunyang, Takahashi Koji, Zhang Xing	4. 巻 9
2. 論文標題 Measurement of specific heat and thermal conductivity of supported and suspended graphene by a comprehensive Raman optothermal method	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nanoscale	6. 最初と最後の頁 10784 ~ 10793
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C7NR01695F	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 該当する
1. 著者名 Narasaki Masahiro, Wang Haidong, Nishiyama Takashi, Ikuta Tatsuya, Takahashi Koji	4. 巻 111
2. 論文標題 Experimental study on thermal conductivity of free-standing fluorinated single-layer graphene	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 093103 ~ 093103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5001169	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 Li Qin-Yi, Takahashi Koji, Zhang Xing	4. 巻 134
2. 論文標題 Frequency-domain Raman method to measure thermal diffusivity of one-dimensional microfibers and nanowires	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 539 ~ 546
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.ijheatmasstransfer.2019.01.057	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 該当する

1. 著者名 Li Qin-Yi, Matsushita Ryo, Tomo Yoko, Ikuta Tatsuya, Takahashi Koji	4. 巻 10
2. 論文標題 Water Confined in Hydrophobic Cup-Stacked Carbon Nanotubes beyond Surface-Tension Dominance	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 3744 ~ 3749
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) DOI:10.1021/acs.jpcllett.9b00718	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 Narasaki Masahiro, Li Qin-Yi, Ikuta Tatsuya, Miyawaki Jin, Takahashi Koji	4. 巻 153
2. 論文標題 Modification of thermal transport in an individual carbon nanofiber by focused ion beam irradiation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Carbon	6. 最初と最後の頁 539 ~ 544
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.carbon.2019.07.056	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 Teshima Hideaki, Takata Yasuyuki, Takahashi Koji	4. 巻 115
2. 論文標題 Adsorbed gas layers limit the mobility of micropancakes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 071603 ~ 071603
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) DOI: 10.1063/1.5113810	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 Li Qin-Yi, Feng Tianli, Okita Wakana, Komori Yohei, Suzuki Hiroo, Kato Toshiaki, Kaneko Toshiro, Ikuta Tatsuya, Ruan Xiulin, Takahashi Koji	4. 巻 13
2. 論文標題 Enhanced Thermoelectric Performance of As-Grown Suspended Graphene Nanoribbons	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Nano	6. 最初と最後の頁 9182 ~ 9189
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) DOI: 10.1021/acsnano.9b03521	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 該当する

1. 著者名 Hirokawa Sota, Teshima Hideaki, Sols-Fernndez Pablo, Ago Hiroki, Tomo Yoko, Li Qin-Yi, Takahashi Koji	4. 巻 5
2. 論文標題 Nanoscale Bubble Dynamics Induced by Damage of Graphene Liquid Cells	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Omega	6. 最初と最後の頁 11180 ~ 11185
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsomega.0c01207	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計18件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 Haidong Wang, Xing Zhang, Hiroshi Takamatsu, Koji Takahashi
2. 発表標題 Effective thermal rectification in suspended monolayer graphene
3. 学会等名 The 16th International Heat Transfer Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Qinyi Li, Koji Takahashi, Xing Zhang
2. 発表標題 Heater assisted Raman method to measure interfacial thermal conductance in van der Waals heterostructures
3. 学会等名 The 16th International Heat Transfer Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Koji Takahashi
2. 発表標題 Nanomaterials and Nanobubbles for Heat Transfer
3. 学会等名 The 6th UK Japan Engineering Education League Workshop 2018, 3-5 September 2018, Fukuoka, Japan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 李秦宜, 高橋厚史, 張興
2. 発表標題 2次元材料とヘテロ構造の熱物性を計測する周波数領域ラマン分光法の開発
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 李秦宜, 張興, 高橋厚史
2. 発表標題 非定常ラマン光熱法とその応用
3. 学会等名 第39回日本熱物性シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小森陽平, 李秦宜, 大北若奈, 加藤俊顕, 高橋厚史
2. 発表標題 幅40nmの懸架されたグラフェンナノリボンの熱伝導率計測
3. 学会等名 日本機械学会 熱工学コンファレンス2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Li Q Y, Zhang X, Takahashi K.
2. 発表標題 Dual-mode Raman method to measure in-plane and interfacial thermophysical properties of 2D van der Waals heterostructures
3. 学会等名 2017 MRS Spring Meeting. Apr. 17-21, 2017, Phoenix, Arizona, US. (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 植崎将弘、王海東、生田竜也、西山貴史、高橋厚史
2. 発表標題 フッ化単層グラフェンの熱伝導率計測
3. 学会等名 第54回伝熱シンポジウム. 2017年5月24日-26日,大宮
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 李 秦宜, 張 興, 高橋 厚史
2. 発表標題 2次元材料のヘテロ構造の熱物性を計測するデュアルモードラマン分光法の開発
3. 学会等名 第54回伝熱シンポジウム. 2017年5月24日-26日,大宮
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Li Q Y, Zhang X, Takahashi K.
2. 発表標題 Dual-mode Raman method to measure thermal transport properties of 2D materials and van der Waals heterostructures
3. 学会等名 The 9th US-Japan Joint Seminar on Nanoscale Transport Phenomena, July 2-5, 2017, Tokyo, Japan. (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masahiro Narasaki, Haidong Wang, Tatsuya Ikuta, Takashi Nishiyama, Koji Takahashi
2. 発表標題 Thermal Transport of Fluorinated Single-Layer Graphene
3. 学会等名 The 9th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, 13th June, 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masahiro Narasaki, Haidong Wang, Yasuyuki Takata, Tatsuya Ikuta, Koji Takahashi
2. 発表標題 Experimental Approach to Control the Thermal Conductivity of Single-Layer Graphene by Fluorination
3. 学会等名 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 8th November, 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Koki Katakami, Qinyi Li, Tatsuya Ikuta, Koji Takahashi
2. 発表標題 Simultaneous measurement of thermal contact resistance between individual carbon fibers and their thermal diffusivity using a laser-flash Raman mapping method
3. 学会等名 3rd Thermal and Fluids Engineering Conference (TFEC) March 4-7, 2018, Ft. Lauderdale, FL, USA (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 赤山直哉、李秦宜、吾郷浩樹、高橋厚史、河野正道
2. 発表標題 レーザーフラッシュラマン分光法によるMoS ₂ 薄膜の熱拡散率計測
3. 学会等名 第40回日本熱物性シンポジウム、長崎市
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 植崎将弘, 李秦宜, 宮脇仁, 生田竜也, 高橋厚史
2. 発表標題 欠陥を有するカーボンナノファイバーのMEMSセンサによる熱計測
3. 学会等名 第56回日本伝熱シンポジウム、徳島市
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 李秦宜, 高橋厚史
2. 発表標題 グラフェンリボンの熱伝導計測及びサイズ効果
3. 学会等名 第56回日本伝熱シンポジウム、徳島市
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Qin-Yi Li, Koki Katakami, Tatsuya Ikuta, Xing Zhang, Koji Takahashi
2. 発表標題 Measurement of thermal contact resistance between individual carbon fibers using a transient Raman mapping method
3. 学会等名 The 7th International Symposium on Micro and Nano Technology (ISMNT-7), Qingdao, China (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Qin-Yi Li, Toshiaki Kato, Xiulin Ruan, Koji Takahashi
2. 発表標題 Record-high thermoelectric performance of graphene
3. 学会等名 The 12th Asian Thermophysical Properties Conference (ATPC2019), Xi'an, China (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	李 秦宜 (Li Qin-Yi) (60792041)	九州大学・工学研究院・助教 (17102)	
研究分担者	生田 竜也 (Ikuta Tatsuya) (70532331)	九州大学・工学研究院・技術専門職員 (17102)	
研究分担者	西山 貴史 (Nishiyama Takashi) (80363381)	福岡大学・工学部・助教 (37111)	