

令和 5 年 4 月 23 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H00862

研究課題名（和文）ナノ薄膜炭素材料のフォノン物性学理の深化

研究課題名（英文）Understanding of the phonon property of nano thin-film carbon materials

研究代表者

荻 博次 (Ogi, Hirotsugu)

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：90252626

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 34,800,000円

研究成果の概要（和文）：ダイヤモンド薄膜や多層グラフェン等のナノ炭素材料は、極めて高い弾性率や熱伝導率等の優れたフォノン物性を示し、超高周波共振電子デバイスや高効率ヒートシンク、超高感度バイオセンサーなどの応用を可能とする。一方で、ナノ炭素材料のフォノン物性の学理の進展は、計測の困難さのために、加速する実用化研究に追随しているとは言い難い。本研究では、高品質試料の作製を実現し、これらに対して独自の超高周波フォノン計測技術を適用し、第一原理計算等の理論計算を融合し、超格子ダイヤモンドやグラファイト、グラフェン等のフォノン物性に関する多くの新規知見を得ることに成功し、さらに、高感度バイオセンサーへの応用も実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ナノ炭素材料に対するフォノン物性の基礎的理解は、実用化研究に追随しておらず、フォノン物性の基礎的理解の深化の停滞は、デバイスの飛躍的な高機能化や新規デバイスの開拓の可能性を低減させていた。本研究では、同位体比を制御した高純度ナノ炭素薄膜 に対し独自の精密計測法を適用し、弾性率や熱伝導率の同位体効果、異方性等を系統的に探求し、既存モデルの検証および新たな理論モデルの提唱を行い、ナノ炭素材料のフォノン物性における新たな知見を見出すことができた。例えば、ダイヤモンド超格子における熱伝導率が広い範囲で制御可能であることを示し、また、高感度バイオセンサーとしての可能性を示すことができた。

研究成果の概要（英文）：Nano-carbon materials such as diamond thin films and multilayer graphene exhibit excellent phonon properties such as extremely high elasticity and thermal conductivity, allowing applications such as ultra-high frequency resonator devices, highly efficient heat sinks, and ultra-sensitive biosensors. On the other hand, understanding of their phonon properties is insignificant due to the difficulty of measurement. In this study, we succeeded in obtaining many new findings on phonon properties of superlattice diamonds, graphite, graphene, etc. by combining our original ultrahigh-frequency phonon measurement technique and theoretical calculations such as first-principles calculations. We have also realized the application to high-sensitivity biosensors.

研究分野：フォノン物性

キーワード：ピコ秒超音波 ダイヤモンド 超格子 グラファイト バイオセンサー ファンデルワールス力

1. 研究開始当初の背景

ダイヤモンド薄膜や多層グラフェン等のナノ炭素材料は、極めて高い弾性率や熱伝導率を示し、超高周波共振電子デバイスや高効率ヒートシンク、超高感度バイオセンサーなどの応用を可能とする。実際、本研究で使用した多層グラフェンナノ薄膜は、スマートフォン内のヒートシンク材料として採用されている。炭素の同位体比を制御することにより熱伝導率のさらなる向上も可能であり[1]、この発展として研究分担者の渡邊らは、同位体比を制御した単結晶ダイヤモンドナノ薄膜を合成する技術を確立した[2]。一方で、ナノ炭素材料のフォノン物性の学理の進展は、加速する実用化研究に追隨しているとは言い難い。第一に、ナノ炭素材料の弾性的性質に未解明な点が多い。例えば、熱伝導率への同位体効果は議論されてきたが、弾性率への同位体効果は明確にはされていない。我々が開発した精密計測法によりダイヤモンドの弾性率を計測し、その同位体比依存性を調べたところ、 ^{13}C 分率が50%において最大値を示す結果となった。従来理論によれば、重い ^{13}C の増加にともない格子振動振幅が減少し(温度低下に相当)、弾性率は単調に増加するはずであり、この現象は従来理論では説明することができない。また、グラファイトの層間相互作用にいたっては理論的枠組みの構築にすら及んでいない。例えば、Lechnerら[3]は第一原理計算により30種類を超えるポテンシャルの仮定のもとに層間相互作用を表す面外弾性率を計算したが、その値は2 GPaから71 GPaまで大きくばらつき、理論的予測が困難であることを示した。こういった場合、実験値と合致しない理論モデルが排除されるが、従来計測法が適用可能な厚さ(>~1 mm)において層間欠陥を含まないグラファイト単結晶が得られなかったため、純粋な層間結合力を反映した実験結果は存在しなかった。例えば、高配向性熱分解グラファイト(HOPG)は、一般的に高品質なグラファイトと考えられてきたが、それでも多数の結晶粒から成り、多くの結晶粒界が面外(c軸)方向の巨視的結合力を低下させるため、この材料を用いて結晶内のc軸方向の純粋な結合力を評価することは難しい。

2. 研究の目的

以上のように、ナノ炭素材料に対するフォノン物性の基礎的理解は、実用化研究に追隨しておらず、フォノン物性の基礎的理解の深化の停滞は、デバイスの飛躍的な高機能化や新規デバイスの開拓の可能性を低減させていた。そこで、本研究課題では、同位体比を制御した高純度ナノ炭素薄膜に対し独自の精密計測法を適用し、弾性率や熱伝導率の同位体効果、異方性等を系統的に探求し、既存モデルの検証および新たな理論モデルの提唱を行い、ナノ炭素フォノン物性の学理の深化を図ることを目指して研究を開始した。

3. 研究の方法

作製する試料として、同位体比制御ダイヤモンド薄膜、同位体ホモ接合ダイヤモンド超格子、多層グラフェンナノ薄膜とし、計測対象物性として、弾性定数と熱伝導率を主対象とした。また、計測手段として、超高周波顕微レーザー超音波法を開発し、理論解析として、密度汎関数理論に基づいた第一原理計算法の開発を目指した。

例えば、図1は、マイクロ波プラズマCVD法により作製した同位体比制御ダイヤモンド薄膜試料の概略を示している。 ^{12}C および ^{13}C の炭素原子からなるメタンガスを準備し、それぞれの分圧比により同位体比を制御した。図1(a)は、ホモエピタキシャル同位体ダイヤ

モンド超格子であり、図 1(b)はそのどちらかの層の同位体比を制御した超格子、図 1(c)は、基板を除去して自立膜とした超格子薄膜である。

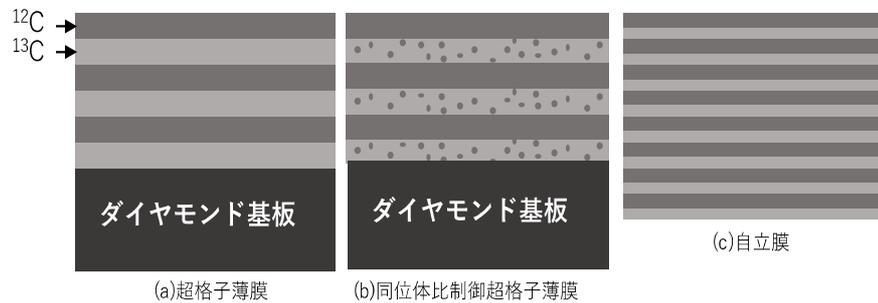


図 1 開発した試料の例。

計測法として、主に用いたのは、本研究において独自開発した顕微ピコ秒レーザー超音波計測システムである。1台あるいは2台のフェムト秒パルスレーザーを用いて、フォノン励起用の光源と検出用の光源に分離し、ディレイラインを用いてこれらの試料への到達時間を変化させることにより、フェムト秒オーダーの時間分解能を有するフォノン計測を可能とした[4]。さらに、2台のフェムト秒パルスレーザーを用いて、両者の発振周波数をわずかにずらすことにより、機械的ディレイラインを用いずに高速に計測を可能とする非同期システムを構築した[5]。

4. 研究成果

本研究の代表的な成果として、グラファイトの層間結合力を世界で初めて正確に評価し、そして、これを説明する理論モデルを構築することに成功したことである[4]。グラファイトはグラフェンが積層した物質で、層間はファンデルワールス力で弱く結合している。物質の結合力を表す指標が弾性定数であり、原子と原子とを繋ぐパネのバネ定数に相当する。これまで、グラファイトの層間結合力を表すこの弾性定数は 40 GPa を超えないとされていた[6-9]。それは、高配向性熱分解グラファイト(HOPG)の測定値が 40 GPa を超えないという実験結果が報告されていたことが主要因である。ところが、欠陥を含む結晶では見かけの結合力の低下が生じる。実は、HOPG の結晶には多数の欠陥が存在しており、このことは見逃されていた。本研では、ほぼ無欠陥の多層グラフェンを開発し、これに対して、本研究で独自開発したピコ秒レーザー超音波スペクトロスコピー法を適用し、世界で初めて単結晶のグラファイトの層間弾性定数を計測することに成功した。その結果、正しい弾性定数は 40 GPa を超え、50 GPa に迫ることが明らかとなった。この結果は、HOPG の実験データに近い 40 GPa を下回る値を与えてきた理論計算に、変更を迫ることを意味する。専門家の間で十分な精度が出せると信じられていた乱雑位相近似を用いる理論計算[10]を用いても 39 GPa を超えないと考えられてきた。このことは、電子の正しいエネルギーの記述が不十分であることを意味する。本研究で我々は、電子同士の距離が短いときに選択的に働く効果の一種から、バネの非調和な性質が強まることで、弾性定数が上昇することを示した。グラフェン面間が接近したときには、より強く反発する電子間相互作用の効果があり、この効果を考慮することにより、今回の実験結果を理論的に再現することに成功した[4]。

同位体比制御ホモペイタキシャルダイヤモンドの熱伝導率に関して、重要な知見を得ることができた。我々は、独自に格子力学計算モデルを構築し、 ^{12}C と ^{13}C のダイヤモンド層からなる同位体ダイヤモンド超格子の格子熱伝導率を、様々な超格子周期で調べた。その結果、超格子の熱伝導率は、ブリルアンゾーンの境界付近でフォノン群速度が低下するため、純粋なダイヤモンドの熱伝導率から大きく変化し得ることがわかった。さらに、 ^{12}C と ^{13}C

ダイヤモンドの層数が異なる非対称系の超格子においては、より高い熱伝導率を示し、これはフォノン比熱とフォノン群速度の熱伝導率への寄与に関するトレードオフによって説明できることがわかった。さらに、不純物や不完全な超格子構造も熱伝導率を大きく低下させることがわかり、これらの効果を利用して熱伝導率を広い範囲で制御できることをつきとめた[11]。

また、単層の厚さ 1, 30, 100 nm のエピタキシャル $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 超格子ダイヤモンドの面外熱伝導率と弾性定数を顕微ピコ秒超音波スペクトロスコピー法にて計測した。まず、超格子の弾性定数は、単層ダイヤモンド薄膜の弾性定数と同等であった。通常は、超格子材料においては、界面の不整合による界面欠陥が、巨視的な面外方向の弾性率を低下させるのであるが、 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 超格子ダイヤモンドにおいては、弾性率の低下が見られず、この結果は、界面にほとんど欠陥の無い超格子試料の合成に成功したことを裏付けるものである。したがって、フォノンの輸送挙動は、界面欠陥ではなく、質量差に支配されていることがわかる。 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 超格子ダイヤモンドの熱伝導率は、 ^{12}C 同位体ダイヤモンド単層薄膜の熱伝導率よりも低い値であった。我々は、格子力学計算を用いて熱伝導率を計算し、この超格子における熱伝導率の低下は、超格子におけるフォノン群速度の減少に起因するとした。さらに、熱伝導率の単層厚依存性が、超格子特有のミニ・ウムクラップ散乱の効果に起因することを突き止めた。通常、ミニ・ウムクラップ散乱が重要となるのは、極低温領域であるが、同位体超格子ダイヤモンドはデバイ温度が高く、かつ、相対質量差が大きいいため、ミニ・ウムクラップ散乱の影響が顕著になる稀有な物質であることを明らかにした[12]。

さらに、ダイヤモンド自立薄膜において、通常では起こり得ないフォノンとフォトンの相互作用が起こり、ブリルアン振動という現象を制御することに成功した。ブリルアン振動は、自立薄膜においてはノイズの源となる場合があり、例えば、センサーへの用途においては、消滅させたい現象であるが、これまでは、これを抑制することが困難であった。本研究にて考案した手法により、ブリルアン振動を制御し抑制することに成功し、実際に、ダイヤモンド自立膜振動子をバイオセンサーに用いて、標的タンパク質の高感度検出に成功した[13]。

また、グラフェンをバイオセンサーに利用する際に、グラフェン表面にリガンドタンパク質を固定化するためのリンカー分子が必要となる。リンカー分子とグラフェン表面の相互作用は未解明であり、高感度センサーの確立のためには、これを理解することが必要である。本研究では、密度汎関数法に基づき、グラフェン上のリンカーとして広く利用されている 1-ピレンブタン酸スクシンイミジルエステル (PASE) の吸着構造を調べた。その結果、ブタン酸スクシンイミジルエステル (BSE) の鎖状部分を寝かせた直線構造と、BSE 部分をグラフェンから遠ざけ、ピレン (Py) 部分をグラフェンに吸着させたまま曲げた構造の 2 つが局所的安定構造であることが判明した。次に、吸着メカニズムを解明するために、PASE 全体の吸着に対する Py 部と BSE 部の寄与を個別に見積もったところ、Py 部の吸着効果がより重要であることが判明した。次に、BSE 部の室温での可動性を、直線構造と屈曲構造の間の活性化エネルギーにより議論した。外部環境を考慮するため、3 次元 Reference Interaction Site Model (RISM) モデルにより、アミノ酸の存在と水和効果を考慮した。その結果、グリシン分子と溶媒環境の寄与が、真っ直ぐな PASE 構造に対して、屈曲した PASE 構造の安定化に寄与することがわかった。したがって、グラフェンからの BSE 部の立ち上げ過程を考える上で、PASE を取り巻く外部環境の影響は重要であることを明らかにした[14]。

その他、GaN のフォノン物性や、フォノン結晶に関する多くの知見を得るなど、ナノ材料に関する多岐にわたるフォノン物性挙動を明らかにすることができた。

参考文献

- [1] L. Wei, P. K. Kuo, R. L. Thomas, T. R. Anthony, and W. F. Banholzer, *Phys. Rev. Lett.* **70**, 3764 (1993).
- [2] H. Watanabe, C. E. Nebel, and S. Shikata, *Science*, **324**, 1425 (2009).
- [3] C. Lechner, B. Pannier, P. Baranek, N. C. Forero-Martinez, and H. Vach, *J. Phys. Chem. C* **120**, 5083 (2016).
- [4] K. Kusakabe, A. Wake, A. Nagakubo, K. Murashima, M. Murakami, K. Adachi, and H. Ogi, *Phys. Rev. Mater.* **4**, 043603 (2020).
- [5] A. Nagakubo, K. Kanai, H. Tamura, A. Tange, and H. Ogi, *AIP Advances* **12**, 045323 (2022).
- [6] O. L. Blakslee, D. G. Proctor, E. J. Seldin, G. B. Spence, and T. Weng, *J. Appl. Phys.* **41**, 3373 (1970).
- [7] N. Wada, R. Clarke, and S. A. Solin, *Solid State Commun.* **35**, 675 (1980).
- [8] R. Nicklow, N. Wakabayashi, and H. G. Smith, *Phys. Rev. B* **5**, 4951 (1972).
- [9] A. Bosak, M. Krisch, M. Mohr, J. Maultzsch, and C. Thomsen, *Phys. Rev. B* **75**, 153408 (2007).
- [10] S. Lebégue, J. Harl, Tim Gould, J. G. Ángyán, G. Kresse, and J. F. Dobson, *Phys. Rev. Lett.* **105**, 196401 (2010).
- [11] H. K. Weng, N. Nagakubo, H. Watanabe, and H. Ogi, *Jpn. J. Appl. Phys.* **59**, SKKA04 (2020).
- [12] H. K. Weng, A. Nagakubo, H. Watanabe, and H. Ogi, *Phys. Rev. B* **104**, 054112 (2021).
- [13] H. K. Weng, A. Nagakubo, H. Watanabe, and H. Ogi, *Appl. Phys. Lett.* **120**, 112203 (2022).
- [14] Y. Oishi, H. Ogi, S. Hagiwara, M. Otani, and K. Kusakabe, *ACS Omega* **7**, 31120 (2022).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計26件（うち査読付論文 25件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yuan Wenlou, Nagakubo Akira, Wright Oliver B., Ogi Hirotsugu	4. 巻 62
2. 論文標題 High sensitivity biosensing scheme based on a GHz phononic crystal waveguide	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SJ1012 ~ SJ1012
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/acb2d6	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 Hsu Kai Weng, Akira Nagakubo, Hideyuki Watanabe, and Hirotsugu Ogi	4. 巻 120
2. 論文標題 Suppression of Brillouin oscillation in transparent free-standing diamond thin films in picosecond ultrasound	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Appl. Phys. Lett.	6. 最初と最後の頁 112203
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0087648	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 Tojo Kakeru, Nagakubo Akira, Ogi Hirotsugu	4. 巻 61
2. 論文標題 The angular dependence of magnetization dynamics induced by a GHz range strain pulse	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SG1007 ~ SG1007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac4a04	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 Weng Hsu Kai, Nagakubo Akira, Watanabe Hideyuki, Ogi Hirotsugu	4. 巻 61
2. 論文標題 Lattice thermal conductivity in isotope diamond asymmetric superlattices	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SG1004 ~ SG1004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac4304	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 Weng H. K., Nagakubo A., Ogi H., Watanabe H.	4. 巻 104
2. 論文標題 Phonon propagation in isotopic diamond superlattices	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 2Pb1-2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.054112	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 Kakeru Tojo, Akira Nagakubo, and Hirotsugu Ogi	4. 巻 42
2. 論文標題 Interaction between ultrasound and magnetization in ferromagnetic thin film studied by picosecond ultrasonics	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics	6. 最初と最後の頁 2Pb1-2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 Masato Kimoto, Akira Nagakubo, and Hirotsugu Ogi	4. 巻 42
2. 論文標題 Elastic constants of tungsten carbide single crystal studied by picosecond ultrasonics	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics	6. 最初と最後の頁 1Pa1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Akihiro Tange, Akira Nagakubo, and Hirotsugu Ogi	4. 巻 42
2. 論文標題 Development of nano-thin film biosensors using asynchronous picosecond ultrasound method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics	6. 最初と最後の頁 1Pb2-3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Takuya. Haraguchi, Akira. Nagakubo, Kensuke Murashima, Mitsuaki Murakami, Hirotsugu. Ogi	4. 巻 42
2. 論文標題 Development of 30-GHz phonon biosensor using graphite thin-film resonator	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics	6. 最初と最後の頁 3Pa2-2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Yuan Wenlou, Nagakubo Akira, Ogi Hirotsugu	4. 巻 131
2. 論文標題 Effect of interfacial damping on high-frequency surface wave resonance on a nanostrip-bonded substrate	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 015103 ~ 015103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0075585	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 Hiroki Fukuda, Akira Nagakubo, Masayuki Imanishi, Yusuke Mori, and Hirotsugu Ogi	4. 巻 42
2. 論文標題 Anelastic properties of gallium nitride studied by resonant ultrasound spectroscopy at elevated temperatures	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics	6. 最初と最後の頁 2Pa1-2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Wenlou Yuan, Nagakubo Akira, and Hirotsugu Ogi	4. 巻 42
2. 論文標題 Impact of interface damping in high-frequency surface-wave resonances on nanostrip-attached substrates	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics	6. 最初と最後の頁 2E5-1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Hsu Kai Weng, Akira Nagakubo, Hideyuki Watanabe, Hirotsugu Ogi	4. 巻 42
2. 論文標題 Lattice thermal conductivity in isotope diamond asymmetric superlattices	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics	6. 最初と最後の頁 1Pb1-3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Morishita Naoki, Kusakabe Koichi	4. 巻 408
2. 論文標題 Zero-energy modes in a super-chiral nanographene network of phenalenyl-tessellation molecules	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics Letters A	6. 最初と最後の頁 127462 ~ 127462
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physleta.2021.127462	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 Harfah Halimah, Wicaksono Yusuf, Sunnardianto Gagus Ketut, Majidi Muhammad Aziz, Kusakabe Koichi	4. 巻 4
2. 論文標題 High magnetoresistance of a hexagonal boron nitride/graphene heterostructure-based MTJ through excited-electron transmission	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nanoscale Advances	6. 最初と最後の頁 117 ~ 124
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D1NA00272D	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 Morishita Naoki, Oishi Yasuhiro, Yamaguchi Terufumi, Kusakabe Koichi	4. 巻 14
2. 論文標題 S = 1 antiferromagnetic electron-spin systems on hydrogenated phenalenyl-tessellation molecules for material-based quantum-computation resources	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 121005 ~ 121005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ac3b9d	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 Teranishi Shingo, Nishiguchi Kazutaka, Yunoki Seiji, Kusakabe Koichi	4. 巻 90
2. 論文標題 Effect of On-site Coulomb Repulsion on Ferromagnetic Fluctuations in Heavily Overdoped Cuprates	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 094707 ~ 094707
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.094707	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 Teranishi Shingo, Nishiguchi Kazutaka, Kusakabe Koichi	4. 巻 90
2. 論文標題 Material Optimization of Potential High-Tc Superconducting Single-Layer Cuprates	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 054705 ~ 054705
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.054705	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 Fukuda Hiroki, Nagakubo Akira, Ogi Hirotsugu	4. 巻 60
2. 論文標題 Elastic constant of dielectric nano-thin films using three-layer resonance studied by picosecond ultrasonics	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SDDA05 ~ SDDA05
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abec5a	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 Hiroki Fukuda, Akira Nagakubo, and Hirotsugu Ogi	4. 巻 41
2. 論文標題 Acoustic properties of metal/antiferromagnet epitaxial multilayers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics	6. 最初と最後の頁 3Pa1-3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 Hsu Kai Weng, Lianjie Zhou, Akira Nagakubo, Hideyuki Watanabe, Hirotsugu Ogi	4. 巻 41
2. 論文標題 Detection of IgG by ultrasonic attenuation of free standing 12C diamond thin film studied by picosecond ultrasonics	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics	6. 最初と最後の頁 3Pb1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 S. Teranishi, K. Nishiguchi, K. Kusakabe	4. 巻 -
2. 論文標題 Material Optimization of Potentia High-Tc Superconducting Single- layer Cuprates	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Jpn.	6. 最初と最後の頁 in press
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 H. Harfah, Y. Wicaksono, M.A. Majidi, and K. Kusakabe	4. 巻 2
2. 論文標題 Spin-current control by induced electric-polarization reversal in Ni/ hBN/Ni: A cross-correlation material	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Appl. Elec. Materials	6. 最初と最後の頁 1689-1699
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsaem.0c00238	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 K. Kusakabe, A. Wake, A. Nagakubo, K. Murashima, M. Murakami, K. Adachi, and H. Ogi	4. 巻 4
2. 論文標題 Interplanar stiffness in defect-free monocrystalline graphite	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 43603
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevMaterials.4.043603	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 H. K. Weng, N. Nagakubo, H. Watanabe, and H. Ogi	4. 巻 59
2. 論文標題 Thermal conduction in isotope diamond thin films studied by pump-probe laser reflectivity measurement	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Jpn. J. Appl. Phys.	6. 最初と最後の頁 SKKA04
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ab7c0f	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 Hsu Kai Weng, Akira Nagakubo, Hideyuki Watanabe, Hirotugu Ogi	4. 巻 40
2. 論文標題 Phonon propagation in isotope diamond thin films studied by pump-probe laser reflectivity measurement	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics	6. 最初と最後の頁 2E1-1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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33件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 12件)

1. 発表者名 荻 博次
2. 発表標題 ピコ秒超音波による薄膜材料の非破壊評価:100GHz を 超える超音波スペクトロスコーピー
3. 学会等名 圧電材料・デバイスシンポジウム2022 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kakeru Tojo, Akira Nagakubo, and Hirotugu Ogi
2. 発表標題 Interaction between ultrasound and magnetization in ferromagnetic thin film studied by picosecond ultrasonics
3. 学会等名 The 42nd Symposium on Ultrasonic Electronics (USE2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masato Kimoto, Akira Nagakubo, and Hirotugu Ogi
2. 発表標題 Elastic constants of tungsten carbide single crystal studied by picosecond ultrasonics
3. 学会等名 The 42nd Symposium on Ultrasonic Electronics (USE2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Akihiro Tange, Akira Nagakubo, and Hirotugu Ogi
2. 発表標題 Development of nano-thin film biosensors using asynchronous picosecond ultrasound method
3. 学会等名 The 42nd Symposium on Ultrasonic Electronics (USE2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takuya. Haraguchi, Akira. Nagakubo, Kensuke Murashima, Mitsuaki Murakami, and Hirotugu Ogi
2. 発表標題 Development of 30-GHz phonon biosensor using graphite thin-film resonator
3. 学会等名 The 42nd Symposium on Ultrasonic Electronics (USE2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroki Fukuda, Akira Nagakubo, Masayuki Imanishi, Yusuke Mori, and Hirotugu Ogi
2. 発表標題 Anelastic properties of gallium nitride studied by resonant ultrasound spectroscopy at elevated temperatures
3. 学会等名 The 42nd Symposium on Ultrasonic Electronics (USE2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Wenlou Yuan, Nagakubo Akira, and Hirotsugu Ogi
2. 発表標題 Impact of interface damping in high-frequency surface-wave resonances on nanostrip-attached substrates
3. 学会等名 The 42nd Symposium on Ultrasonic Electronics (USE2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hsu Kai Weng, Akira Nagakubo, Hideyuk Watanabe, and Hirotsugu Ogi
2. 発表標題 Lattice thermal conductivity in isotope diamond asymmetric superlattices
3. 学会等名 The 42nd Symposium on Ultrasonic Electronics (USE2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡辺 幸志、根本 一正、居村 史人、三浦 典子、谷島 孝、野田 周一、梅澤 仁、クンプアン ソマワン、原 史朗
2. 発表標題 ミニマルファブによるダイヤモンドデバイスのためのプロセス技術開発
3. 学会等名 第69回 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森下直樹, 草部浩一
2. 発表標題 フェナレニル充填型分子に基づくナノグラフェン構造における有効量子多体模 型
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 永井 正也, 東谷悠平, 芦田昌明, 草部浩一, 新岡宏彦, 服部梓, 田中秀和, 磯山悟朗, 尾崎典雅
2. 発表標題 正方晶ジルコニアのTHz 誘起相変態: 紫外・中赤外光励起での照射効果
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大内涼雅, 草部浩一, 福本恵紀, 石田邦夫
2. 発表標題 第一原理計算に基づくGaAs表面における1次過程光電子放出強度の評価の理論的検証
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Halimah Harfah, Yusuf Wicaksono, Gagus K. Sunnardianto, Muhammad A. Majidi, Koichi Kusakabe
2. 発表標題 High magnetoresistance of hexagonal boron nitride-graphene heterostructure-based MTJ through excited-electron transmission
3. 学会等名 2022年第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yusuf Wicaksono, Halimah Harfah, Gagus K. Sunnardianto, Muhammad A. Majidi, Koichi Kusakabe
2. 発表標題 The Importance of Interface in Controlling Mass Gapped Dirac Cone of Graphene Through Pseudospin via Magnetic Proximity Effect
3. 学会等名 2022年第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大内涼雅, 草部 浩一
2. 発表標題 第一原理計算に基づくGaAs表面における1次過程光電子放出強度の評価の理論的検
3. 学会等名 応用物理学会関西支部 2021年度 第2回講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hsu Kai Weng, Lianjie Zhou, Akira Nagakubo, Hideyuki Watanabe, Hirotsugu Ogi
2. 発表標題 Detection of IgG by ultrasonic attenuation of free standing 12C diamond thin film studied by picosecond ultrasonics
3. 学会等名 The 4th Symposium on Ultrasonic Electronics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroki Fukuda, Akira Nagakubo, and Hirotsugu Ogi
2. 発表標題 Acoustic properties of metal/antiferromagnet epitaxial multilayers
3. 学会等名 The 4th Symposium on Ultrasonic Electronics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡邊 幸志, 根本 一正, 谷島 孝, 野田 周一, 居村 史人, Mickael Lozach, 梅澤 仁, クンプアン ソマワン, 原 史朗
2. 発表標題 ダイヤモンドデバイスのためのプロセス技術開発
3. 学会等名 第34回ダイヤモンドシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Koichi Kusakabe, Akira Nagakubo, Hirotsugu Ogi, Kensuke Murashima, Mutsuaki Murakami
2. 発表標題 Unharmonic adiabatic potential by short-range correlation effect enlarging C33 of crystalline graphite
3. 学会等名 APS March Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yusuf Wicaksono, Halimah Harfah, Koichi Kusakabe
2. 発表標題 High Magnetoresistance Ratio on the In-plane Conductance of Graphene in Ni/Graphene/Ni Nanostructure
3. 学会等名 2021年第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Koichi Kusakabe, Takahiro Ishikawa, Yuto Makino, Satoshi Sakamoto
2. 発表標題 Simulation for detonation process of TNT/RDX by an evolutionary algorithm
3. 学会等名 2020年第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yusuf Wicaksono, Halimah Harfah, Muhammad Aziz Majidi, Koichi Kusakabe
2. 発表標題 Theoretical Study on Optical-induced Magnetic Tunnel Junction based on Gr-hBN Heterostructure
3. 学会等名 応用物理学会関西支部2020年度第1回 + 第2回合同講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大内 涼雅, 草部浩一
2. 発表標題 第一原理計算に基づくGaAsにおける1次過程光電子放出強度評価の理論
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大石泰弘, 草部浩一
2. 発表標題 グラフェン上吸着芳香族分子における電子相関効果による断熱ポテンシャル面 の理論的評価
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 秋山尚平, 草部浩一, Yusuf Wicaksono
2. 発表標題 窒素・燐ドーピングした欠陥構造を有するグラフェンのプロパン脱水素触媒効果
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 草部浩一
2. 発表標題 進化論的アルゴリズムを用いた固体中の物質輸送シミュレーション加速化方法
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 寺西慎伍, 西口和孝, 柚木清司, 草部浩一
2. 発表標題 過剰ドーブされた銅酸化物における電子相関起源強磁性揺らぎの理論
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 草部浩一
2. 発表標題 多配置参照法による+U計算からの断熱接続計算理論
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 草部浩一
2. 発表標題 非酸化的脱水素触媒としての爆轟スス(欠陥含有グラフェン)に関する基礎研究
3. 学会等名 弊衝撃科学共同研究講座報告会(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 草部浩一
2. 発表標題 情報理論に駆動されたマテリアルズインフォマティクスの展開
3. 学会等名 兵庫県立大学大学院物質理学研究科・マテリアルズインフォマティクス研究会(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 奥山直人, 草部浩一
2. 発表標題 衝撃科学共同研究講座2020年度の活動
3. 学会等名 第4回豊中地区共同研究講座交流会(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hsu Kai Weng, Akira Nagakubo, Hideyuki Watanabe, and Hirotsugu Ogi
2. 発表標題 Phonon propagation in isotope diamond thin films studied by pump-probe laser reflectivity measurement
3. 学会等名 The 40th Symposium on Ultrasonic Electronics(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. K. Weng, A. Nagakubo, H. Ogi, H. Watanabe
2. 発表標題 Study on Phonon Propagation in Isotope Diamond Superlattice
3. 学会等名 The 2019 International Congress on Ultrasonics(国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 萩 博次	4. 発行年 2021年
2. 出版社 共立出版	5. 総ページ数 208
3. 書名 超音波工学	

1. 著者名 安田幸二, 井上雅博, 宇川仁太, 下池田勇一, 河野慎一郎, 葛西卓磨, 岩橋槇夫, 岩路仁, 亀谷俊輔, 菊地淳, 吉水広明, 吉村倫一, 久住亮介, 宮内康次, 橋本康博, 桑原和弘, 犬飼宗弘, 原英之, 渡邊幸志 他 41名	4. 発行年 2021年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 676
3. 書名 NMRによる有機材料分析とその試料前処理、データ解釈	

〔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	草部 浩一 (Kusakabe Koichi) (10262164)	兵庫県立大学・理学研究科・教授 (24506)	
研究分担者	渡邊 幸志 (Watanabe Hideyuki) (50392684)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・主任研究員 (82626)	
研究分担者	長久保 白 (Nagakubo Akira) (70751113)	大阪大学・工学研究科・助教 (14401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------