

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：13901

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2013～2017

課題番号：25107002

研究課題名(和文) グラフェン関連原子層の新規合成法および大面積合成法の開発

研究課題名(英文) Development of novel large-area synthetic methods of graphene-related atomic layers

研究代表者

楠 美智子(Kusunoki, Michiko)

名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授

研究者番号：10134818

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 209,500,000円

研究成果の概要(和文)：合成班内での徹底討論を通し、(1)化学気相蒸着法により、大面積化とともに高品質化(結晶サイズ5nm以上)、実用に向けた高速合成化を実現。h-BNを基板上、シャープな発光ピークを示す単層WS₂を直接成長。(2)SiC熱分解法による大面積グラフェン合成実現と、急冷法開発による基板からの自立化に成功。(3)h-BN膜上酸化グラフェンのメタンプラズマ照射による高移動度(4000-7000cm²/Vs)実現。(4)パラジウム触媒を用いた有機化学合成法により斬新なグラフェンリボン合成に続々成功し、近赤外光吸収の増強解明。国内・海外への活発なサンプル提供を行い、共同研究による論文成果130件。

研究成果の概要(英文)：Through deep discussion between synthetic researchers in the synthesis team, (1)Chemical vapor deposition groups attained synthesis of not only large-area but also high-quality graphene consisting of grains of over 5 nm, also did high speed synthesis for practical application, and single layer WS₂ on h-BN substrate showing photoluminescence with narrow width of 22 meV, (2)SiC thermal decomposition group succeeded in synthesizing graphene with wafer size and developed the Rapid cooling method for free standing of graphene on SiC substrate, (3) oxidized graphene films deposited on h-BN films was irradiated by methane plasma, which led to high mobility of 4000-7000cm²/Vs, (4)Organic synthesis group attained synthesis of novel graphene ribbons successively and increase of near infrared radiation. Active supplying these samples to researchers in the other teams and foreign countries led to publishing 130 papers due to the collaborating researches.

研究分野：ナノ材料結晶学

キーワード：炭化珪素熱分解法 酸化グラフェン還元法 化学気相蒸着法 アルコール科学気相蒸着法 有機合成法 遷移金属ダイカルコゲナイド

1. 研究開始当初の背景

フラーレン・ナノチューブの長期に渡るハイポテンシャルな研究を受けて、2004年にNovoselovらによるグラフェンの研究は世界的に広がった。研究当初はグラファイト結晶からの剥離法による試料を用いて始まったが、今後、工業化に繋げるためにはグラフェンの大面積・高品質化を実現する合成技術の確立がグラフェンの重要な課題である。さらに、エネルギーギャップの発現に向けた、ナノリボン化、端の構造制御、ヘテロ原子のドーピングによる電子変調、等の高機能化の実現が不可欠となる。既に、良質グラフェンの合成技術に関しても世界的に熾烈な競争が繰り広げられており、国内においても、これまでに培われた様々な合成技術を結集して、互いに共同し、また刺激し合うことで、革新的・高品質グラフェン合成を実現する必要に迫られている。

2. 研究の目的

合成班として、研究代表者と5名の研究分担者がそれぞれの独自の研究技術・合成技術を持ち寄って、綿密に情報交換して行く中で、国際的にも価値のある高品質・高機能グラフェンの合成技術を確立し、その評価も積極的に進める。得られた成果は、論文投稿、学会・国際会議に果敢に発表しつつ、プロジェクト前半までに、理論班の助けを借りながら合成技術に目途をつける。その後、物性班、応用班にサンプル提供することにより、本学術領域研究の統合的研究に貢献する。

3. 研究の方法

(1) 各独自合成技術の高度化

合成技術は(1)化学気相蒸着(CVD)法、(2)SiC熱分解法、(3)酸化グラフェン還元法、(4)有機合成法に集約し、独自の合成技術の高度化により、完成度を高める。そのため、班内の合成技術者間での徹底的討論と協力体制を組む。さらに、新たに加わった公募研究の新規合成法とも意識的に共同研究を推し進める。

(2) 領域内外へのサンプル提供

最終年度においては、均質・大面積の実現したサンプルを領域内の物性班、応用班に提供し、信頼性の高い特性評価を行うとともに、デバイス化による応用の可能性を探る。さらに、海外の研究機関・研究者にもサンプル提供をすすめ、国際共同研究を積極的に推進し、予想を上回る特性発現の可能性を探る。

4. 研究成果

初年度の合成班への予算重点導入の効果と、合成班内での徹底討論により、(1)化学気相蒸着法、(2)SiC熱分解法、(3)酸化グラフェン還元法、(4)有機化学合成法の各手法により、高品質、大面積合成を達成するとともに、更なる高機能化を果たし、国内外にお

いて公募班含め130件もの共同研究による論文発表を行った。以下に各合成技術の代表的成果を記載する。

(1) CVD 合成法

① グラフェンの実用的合成法開発

世界ではCu箔上でCH₄等を熱分解するCVD法でグラフェンの大面積合成が実現した。しかし1000°C以上の高温炉で前処理も含め数時間かけて1枚ずつ合成するのが一般的で生産性が低い。野田は30×5 cm²の銅箔をらせん状に巻き内径3.4 cmの小型反応管に設置、高活性なC₂H₄を原料に、短時間CVD(1.5分、ガス置換・還元込みで20分未満)でグラフェン連続膜を得た。ガラス転写後も透過率約96%、シート抵抗約300 Ω/sqと良質で、既存の報告を上回る反応器容積基準のグラフェン面積生産性を実現した(投稿中)。

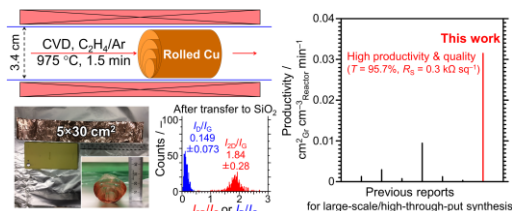


図1 CVD法による大面積合成の実用化

また、多くの用途ではグラフェンは誘電体基板上で用いるため、CVD法ではグラフェンの転写という欠点がある。我々は誘電体基板上にFe-C混合膜を形成、600-650°CでCl₂を流すことで、金属フリーの数層~多層グラフェンの連続膜を誘電体基板上に直接得る、独自のエッチング析出法を開発した(日米韓中欧独特許登録, Carbon 2015)。

② エタノールCVD法による高品質化

丸山は単層および二層積層した高品質なグラフェンの大面積化を目指し研究を進めた。単層グラフェンにおいては、銅箔を合成基板、エタノールを炭素源としたCVD法において、低圧エタノール条件において、10-20時間成長させ5 mmサイズの高品質なグラフェンを得ることに成功した。

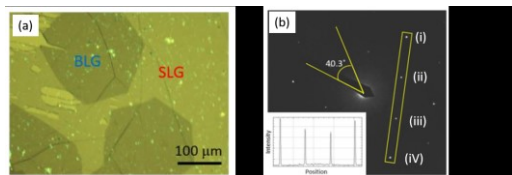


図2 アルコールCVD法を用いて合成したA-B積層二層グラフェンの(a)光学像および(b)SAED像。

さらに、二層積層グラフェンを合成することにも成功した。一層目が成長した後に、二層目の成長が始まることを同位体炭素(13C)からなるエタノールを炭素源して用いることで明らかにした。さらに、合成条件を制御することにより、一層目と二層目がA-B積層構造になることが電子顕微鏡観察によって明らかになった。また、合成したグラフェンサンプルの光緩和過程について、物性班との

共同研究により詳細に分析を行った。

③高品質 TMD 原子層の合成

北浦はポストグラフェン物質として大きな注目を集めている遷移金属ダイカルコゲナイド(TMD)原子層を対象に、その物性探索に資する高品質な試料の合成法を開発した。合成に用いた手法は、化学気相成長(CVD)法および分子線エピタキシー法である。化学気相成長法では、3つの電気炉を連結したマルチファーンズ熱CVD法を採用することで、原料の蒸発と結晶の成長をそれぞれ最適な温度に設定して結晶成長を行うことを可能とした。さらに、基板として一般的に用いられているサファイアおよびシリコンではなく、六方晶窒化ホウ素(hBN, 応用班 渡邊・谷口から提供を受けた)を基板として用いることで、TMD/hBN 積層構造を直接成長することに成功した。成長法によるTMD/hBNでは、高温かつドライなプロセスで試料が作製されるため、クリーンなTMDとhBN界面をもつ原子レベルで平坦な表面をもつ試料が得られる。TMD/hBNの発光スペクトルは、極めてシャープ(WS₂/hBNでは室温で22 meV程度の半値幅、サファイア上のWS₂の半分程度の値)な励起子発光に由来するピークを示し、成長した結晶が高品質であることが明らかとなった。また、低温における発光スペクトルには、弱励起下においても励起子分子に由来する発光ピークが観測されるなど、本手法で得られた高品質試料は、新たな多体励起状態の探索など基礎物性探索にも有効であることがわかった。

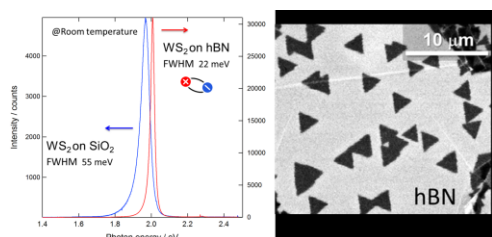


図3. hBNおよびSiO₂上における単層WS₂の発光スペクトルとhBN上に成長した単層WS₂のSEM像

(2) SiC 熱分解法によるグラフェン高機能化

楠はウェーハサイズの半絶縁性SiC基板上の96%以上に単層グラフェンの合成を実現。また、SiC上エピタキシャルグラフェンは半絶縁性基板上に直接形成させる手法として重要であるが、界面に存在する基板との結合を残したバッファ層の存在により、高い移動度を得ることを困難にしている。その解決法として、図4に示すような急冷法を開発した。グラフェン、SiC間の大きな熱膨張係数の違いに着目し、高温から液体窒素温度に急冷することにより、表面の形態を変化させることなくバッファ層と基板との結合を切断し、擬似的自立グラフェンに変化させることに成功した。(Phys. Rev. Lett. (2015)お

び特願 2015-35117) 今後のエピタキシャルグラフェン合成の可能性を広げるものである。

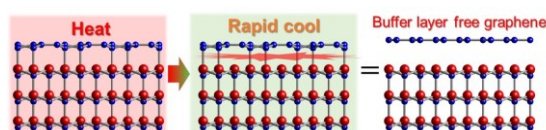


図4 急冷法による界面構造改質

(3) 酸化グラフェンからのグラフェン合成

酸化グラフェン(graphene oxide: GO)はグラフェン大量合成の有力な原料であり、多くの研究がおこなわれたが、多大な官能基の存在、還元後も残る多くの欠陥のため、電界効果移動度は $100 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ を超えることができず、グラフェン原料としての研究は頓挫していた。齊木は、Cuを近傍に置いたメタン水素の混合プラズマ照射により、従来にない高次の還元が起きることを見出した。(図5)

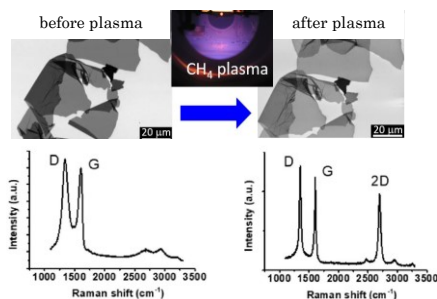


図5 酸化グラフェンの高次高機能化

この手法は、試料を載せている基板に依存しない、CVDやSiCからの合成に必要な 1000°C 以上の高温を必要としない、など多くのすぐれた特長を持つ。A03班との共同研究で、h-BN上に自己集積したGOに適用したところ、 $4000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ を超える移動度が観測され、グラフェン大量合成の途が拓かれた。

(4) 有機合成法に依るグラフェンリボン合成

依光はパラジウムを触媒とする化学修飾により、正方形型巨大 18π 電子系原子層ユニットであるポルフィリンを基本骨格とする斬新な原子層状分子を創出し、その特異な光・電子機能を明らかにした。特に、 π 電子系が大きく広がった(1) デヒドロパープリン二量体、(2) ジフェニルアミン縮環ポルフィリンカチオンラジカル、(3) 二重ジフェニルボラン縮環ポルフィリン、(4) ジフェニルメタン縮環ポルフィリンラジカルなどの新規 π 拡張ポルフィリンを次々に合成した(図6)。また、光物理を専門とする韓国Yonsei大学 Dongho Kim ならびに公募班の田中との密な共同研究ならびに電気化学測定、計算化学により、その近赤外光応答特性と電子状態を明らかにした。

班内会議の情報交換をもとに、齊木と共同で、原料分子の選択により窒素ドープ位置を規定したグラフェン成長に成功した。

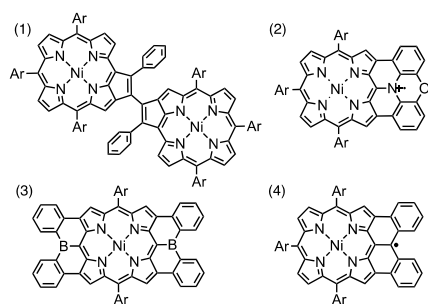


図6 新規π拡張ポルフィリン

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 169 件)

1. S. Obata, M. Sato, K. Akada and K. Saiki, High Degree Reduction and Restoration of Graphene Oxide on SiO₂ at low temperature via remote Cu-assisted Plasma Treatment, *Nanotechnology*, vol. 29, 2018, 245603. 査読有, DOI: 10.1088/1361-6528/aab73e
2. M. Okada, A. Kutana, Y. Kureishi, Y. Kobayashi, Y. Saito, T. Saito, K. Watanabe, T. Taniguchi, S. Gupta, Y. Miyata, B. I. Yacobson, H. Shinohara, and R. Kitaura, Direct and Indirect Interlayer Excitons in a van der Waals Heterostructure of hBN/WS₂/MoS₂/hBN, *ACS Nano*, 査読有, vol. 12, 2018, 2498. DOI:10.1021/acsnano.7b08253
3. K. Matsuda, W. Norimatsu, J. Bao, H. Kawarada, and M. Kusunoki, In-plane electrical conduction mechanisms of highly dense carbon nanotube forests on silicon carbide, *Journal of Applied Physics*, 査読有, vol.123, 2018, 045104. DOI:org/10.1063/1.5004507
4. M. Okada, Y. Miyauchi, K. Matsuda, T. Taniguchi, K. Watanabe, H. Shinohara and R. Kitaura, Observation of biexcitonic emission at extremely low power density in tungsten disulfide atomic layers grown on hexagonal boron nitride, *Sci. Rep.*, 査読有, vol. 7, 2017, 322. DOI:10.1038/s41598-017-00068-0
5. Y. Nagai, A. Okawa, T. Minamide, K. Hasegawa, H. Sugime, S. Noda*, Ten-second epitaxy of Cu on repeatedly used sapphire for practical production of high-quality graphene, *ACS Omega*, 査読有, vol.2, 2017, 3354. DOI:10.1021/acsomega.7b00509
6. H. Shirae, K. Hasegawa, H. Sugime, E. Yi, R. M. Laine, S. Noda*, Catalyst nucleation and carbon nanotube growth from flame-synthesized Co-Al-O nanopowders at ten-second time scale, *Carbon*, 査読有, vol. 114, 2017, 31. DOI:10.1016/j.carbon.2016.11.075
7. N. Fukui, W. Cha, D. Shimizu, J. Oh, K. Furukawa, H. Yorimitsu, D. Kim, and A. Osuka, Highly planar diarylamine-fused porphyrins and their remarkably stable radical cations, *Chem. Sci.*, 査読有, vol.8, 2017, 189. DOI:10.1039/C6SC02721K
8. T. Taira, S. Obata, and K. Saiki, Nucleation site in CVD graphene growth investigated by radiation-mode optical microscopy, *Appl. Phys. Express*, 査読有, vol. 10, 2017, 55502. DOI:10.7567/APEX.10.055502
9. J. Bao, W. Norimatsu, H. Iwata, K. Matsuda, T. Ito, M. Kusunoki, Synthesis of Freestanding Graphene on SiC by a Rapid-Cooling Technique, *Phys. Rev. Lett.*, 査読有, vol.117, 2016, 205501. DOI:10.1103/PhysRevLett.117.205501
10. J. Bao, W. Norimatsu, K. Matsuda, M. Kusunoki, Sequential control of step-bunching during graphene growth on SiC (0001), *Appl. Phys. Lett.*, 査読有, vol. 109, 2016, 081602. DOI:10.1063/1.4961630
11. E. Muramoto, Y. Yamasaki, F. Wang, K. Hasegawa, K. Matsuda, S. Noda*, Carbon nanotube-silicon heterojunction solar cells with surface-textured Si and solution-processed carbon nanotube films, *RSC Adv.*, 査読有, vol. 6, 2016, 93575. DOI:10.1039/C6RA16132D
12. X. Chen, R. Xiang, P. Zhao, H. An, T. Inoue, S. Chiashi, and S. Maruyama, Chemical vapor deposition growth of large single-crystal bernal-stacked bilayer graphene from ethanol, *Carbon* 査読有, vol. 107, 2016, 852. DOI:10.1016/j.carbon.2016.06.078
13. Y. Song, J. Zhuang, M. Song, S. Yin, Y. Cheng, X. Zhang, M. Wang, R. Xiang, Y. Xia, S. Maruyama, P. Zhao, F. Ding, and H. Wang, "Epitaxial nucleation of CVD bilayer graphene on copper" *Nanoscale* 査読有, vol. 8, 2016, 20001. DOI:10.1039/C6NR04557J
14. T. Hotta, T. Tokuda, S. H. Zhao, K. Watanabe, T. Taniguchi, H. Shinohara, and R. Kitaura, Molecular beam epitaxy growth of monolayer niobium diselenide flakes, *Appl. Phys. Lett.*, 査読有, vol. 13 2016 DOI:10.1063/1.4963178
15. Q. Wang, R. Kitaura, S. Suzuki, Y. Miyauchi, K. Matsuda, Y. Yamamoto, S. Arai, and H. Shinohara, Fabrication and In Situ Transmission Electron Microscope Characterization of Free-Standing Graphene Nanoribbon Devices, *ACS Nano* 査読有, vol. 10, 2016, 1475. DOI:10.1021/acsnano.5b06975
16. K. Gao, N. Fukui, S. I. Jung, H. Yorimitsu, D. Kim, and A. Osuka, Pictet-Spengler Synthesis of Quinoline-Fused Porphyrins and Phenanthroline-Fused Diporphyrins,

- Angew. Chem. Int. Ed.*, 査読有, vol.55, 2016, 13038. DOI:10.1002/anie.201606293
17. K. Fujimoto, J. Oh, H. Yorimitsu, D. Kim, and A. Osuka, Directly Diphenylborane-fused Porphyrins, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 査読有, vol.55, 2016, 3196. DOI:10.1002/anie.201511981
 18. N. Fukui, S.-K. Lee, K. Kato, D. Shimizu, T. Tanaka, S. Lee, H. Yorimitsu, D. Kim, and A. Osuka, Regioselective phenylene-fusion reactions of Ni(II)-porphyrins controlled by an electron-withdrawing meso-substituent, *Chem. Sci.*, 査読有, vol.7, 2016, 4059. DOI:10.1039/C5SC04748J
 19. K. Kato, W. Kim, J. Oh, K. Furukawa, H. Yorimitsu, D. Kim, and A. Osuka, Spontaneous Formation of an Air-Stable Radical upon the Direct Fusion of Diphenylmethane to a Triarylporphyrin, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 査読有, vol.55, 2016, 8711. DOI:10.1002/anie.201602683
 20. Y. Masuda, W. Norimatsu, and M. Kusunoki, Formation of a nitride interface in epitaxial graphene on SiC (0001), *Phys. Rev. B*, 査読有, vol. 91, 2015, 075421. DOI:10.1103/PhysRevB.91.075421
 21. S. Obata, K. Saiki, T. Taniguchi, T. Ihara, Y. Kitamura, and Y. Matsumoto, Graphene Oxide: A Fertile Nanosheet for Various Applications, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 査読有, vol. 84, 2015, 121012. DOI:10.7566/JPSJ.84.121012
 22. T. Katoh, G. Imamura, S. Obata, M. Bhanuchandra, G. Copley, H. Yorimitsu and K. Saiki, The Influence of Source Molecule Structure on Low Temperature Growth of Nitrogen-doped Graphene, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 査読有, vol. 17, 2015, 14115. DOI:10.1039/C5CP02032H
 23. T. Terasawa and K. Saiki, Radiation Mode Optical Microscopy on the Growth of Graphene, *Nat. Commun.*, 査読有, vol. 6, 2015, 6834. DOI:10.1038/ncomms7834
 24. H. Shirae, D.Y. Kim, K. Hasegawa, T. Takenobu, Y. Ohno, S. Noda*, Overcoming the quality-quantity tradeoff in dispersion and printing of carbon nanotubes by a repetitive dispersion-extraction process, *Carbon*, 査読有, 91, 2015, 20. DOI:10.1016/j.carbon.2015.04.033
 25. M. Kosaka, S. Takano, K. Hasegawa, S. Noda*, Direct synthesis of few- and multi-layer graphene films on dielectric substrates by "etching-precipitation" method, *Carbon*, 査読有, vol. 82, 2015, 254. DOI:10.1016/j.carbon.2014.10.069
 26. X. Chen, P. Zhao, R. Xiang, S. Kim, J. H. Cha, S. Chiashi, and S. Maruyama, "Chemical Vapor Deposition Growth of 5 mm Hexagonal Single-Crystal Graphene from Ethanol," *Carbon*, 査読有, vol. 94, 2015, 810. DOI:10.1016/j.carbon.2015.07.045
 27. N. Ogasawara, W. Norimatsu, S. Irle and M. Kusunoki, Growth mechanisms and selectivity for graphene or carbon nanotube formation on SiC (000-1): A density-functional tight-binding molecular dynamics study, *Chem. Phys. Lett.*, 査読有, vol.595-596, 2014, 266. DOI:10.1016/j.cplett.2014.02.019
 28. M. Okada, T. Sawazaki, K. Watanabe, T. Taniguchi, H. Hibino, H. Shinohara, and R. Kitaura, Direct Chemical Vapor Deposition Growth of WS₂ Atomic Layers on Hexagonal Boron Nitride, *ACS Nano*, 査読有, vol. 8, 2014, 8273. DOI:10.1021/nn503093k
 29. P. Zhao, B. Hou, X. Chen, S. Kim, S. Chiashi, E. Einarsson, and S. Maruyama, "Investigation of Non-Segregation Graphene Growth on Ni via Isotope-Labeled Alcohol Catalytic Chemical Vapor Deposition" *Nanoscale*, 査読有, vol. 5, 2013, 6530. DOI: 10.1039/c3nr01080e
 30. P. Zhao, A. Kumamoto, S. Kim, X. Chen, B. Hou, S. Chiashi, E. Einarsson, Y. Ikuhara, and S. Maruyama, "Self-Limiting Chemical Vapor Deposition Growth of Monolayer Graphene from Ethanol," *J. Phys. Chem., C* 査読有, vol. 117, 2013 10755. DOI: 10.1021/jp400996s
- [学会発表] (計 171 件)
- ① 斉木幸一朗, リアルタイム測定で探るグラフェン成長の活性サイト、応用物理学会シンポジウム「先端3D原子イメージングが拓く新しい材料・デバイス技術」、2018年
 - ② M. Kusunoki, Exploitation of High Quality Graphene and Novel Atomic Layers, The 5th Ito International Research Conference (IIRC5), 2017
 - ③ S. Noda, Single-wall carbon nanotubes from supported and floating catalysts on substrates, in fluidized bed, and in gas-phase, Guadalupe Workshop VIII: Workshop on Nucleation and Growth Mechanisms of Single Wall Carbon Nanotubes, 2017
 - ④ S. Maruyama, Carbon Nanotubes and Graphene for Perovskite Solar Cells, 2017 International Conference on Functional Carbons (ICFC), Taipei, Taiwan, Nov. 3, 2017
 - ⑤ R. Kitaura, Transition metal dichalcogenides based van der Waals heterostacks: fabrication and properties, 18th International Conference on the Science and Application of Nanotubes and

- Low-dimensional Materials (NT17), 2017
- ⑥ H. Yorimitsu, Synthesis of Nitrogen-Containing Atomic Layers at the Molecular Level, 2014 Taiwan-Japan Symposium of Frontier Research on Applications of Organometallics and Atomic Layers, 2014

〔図書〕(計17件)

- ① 楠美智子、乗松航、社団法人日本顕微鏡学会、顕微鏡、2017、11p
- ② T. Terasawa and K. Saiki, Springer, Graphene: Synthesis and Functionalization, Inorganic Nanosheets and Nanosheet-Based Materials, 2017, 32p
- ③ 北浦良、日本化学会、二次元物質の化学、2017、7p
- ④ 依光英樹、化学同人、二次元物質の科学、2017、Chapter 14
- ⑤ 野田優、エヌ・ティー・エス、カーボンナノチューブ・グラフェンの応用研究最前線、2016、7p
- ⑥ 丸山茂夫、エヌティーエス、カーボンナノチューブ・グラフェンの応用研究最前線、2016、7p

〔産業財産権〕

○出願状況(計2件)

名称: グラフェン/SiC複合材料の製造方法
発明者: 楠美智子, 乗松航, 包建峰
権利者: 名古屋大学総長
種類: 特許
番号: 特願 2015-35117
出願年月日: 2015年2月25日
国内外の別: 国内、国外

名称: カーボンナノチューブアレイ, 材料, 電子機器, カーボンナノチューブアレイの製造方法および電界効果トランジスタの製造方法

発明者: 丸山茂夫, 千足昇平, 大塚慶吾, 井ノ上泰輝
権利者: 同上
種類: 特許
番号: 特願 2014-040003
出願年月日: 2015年2月25日
国内外の別: 国内

○取得状況(計1件)

名称: 基板上グラフェンの製造方法、基板上グラフェンならびにグラフェンデバイス
発明者: 野田優, 高野宗一郎
権利者: 科学技術振興機構
種類: 特許
・番号: US Patent No.8772181
取得年月日: 2014年7月8日
国内外の別: 国外
・番号: 大韓民国特許第 10-1396419 号
取得年月日: 2014年5月12日

国内外の別: 国外

- ・番号: 中国特許第 ZL201280010466.9 号
取得年月日: 2015年11月25日
国内外の別: 国外
・欧州特許第 2682366 号,
2016年11月2日登録
国内外の別: 国外
・独国特許第 60 2012 024 868.8 号,
2017年2月5日登録
国内外の別: 国外

〔その他〕

- ①合成班グラフェンミニ講演会・見学会開催、2014年2月、名古屋大学、80人。
②プレスリリース: 乗松航、楠美智子
「負の熱膨張を利用したグラフェン化に成功」
2016/11/9.

6. 研究組織

(1)研究代表者

楠美智子 (KUSUNOKI, Michiko)
名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授
研究者番号: 10134818

(2)研究分担者

斉木幸一朗 (SAIKI, Koichiro)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科教授
研究者番号: 70143394

野田優 (NODA, Suguru)
早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号: 50312997

丸山茂夫 (MARUYAMA, Shigeo)
東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授
研究者番号: 90209700

北浦良 (KITAURA, Ryo)
名古屋大学・理学研究科・准教授
研究者番号: 50394903

依光英樹 (YORIMITSU, Hideki)
京都大学・理学研究科・教授
研究者番号: 00372566

(3)連携研究者

篠原久典 (SHINOHARA, Hisanori)
名古屋大学・理学研究科・教授
研究者番号: 50132725

大野雄高 (OHNO, Yutaka)
名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授
研究者番号: 10324451
(平成26年度より公募研究者)