

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 3 月 7 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24550150

研究課題名(和文) 新奇な圧力誘起水素 - 炭素間相互作用の制御とその機構解明

研究課題名(英文) Control of novel pressure-induced interaction working between hydrogen and carbon, and evaluation of its mechanism

研究代表者

中山 敦子 (Nakayama, Atsuko)

新潟大学・研究推進機構 超域学院院・准教授

研究者番号：50399383

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円

研究成果の概要(和文)： 高圧下で生じる水素-炭素 電子系間の新規な圧力誘起相互作用をグラファイト構造を持つ物質全般で理解するために、数層グラフェン、類似構造をもつ六方晶窒化ホウ素をヘリウム中、水素中で加圧し、圧力誘起構造変化のその場観察をおこなった。高圧水素雰囲気下で加圧したグラファイト、六方晶窒化ホウ素では、ホストの電子構造が違ってもかかわらず、両者とも、水素の影響を受けた構造の圧力変化を示した。

一方で、DFT計算による高圧水素雰囲気下で加圧したグラファイト、六方晶窒化ホウ素の構造変化の検証からは、いずれも水素吸蔵されていないか、入ったとしても極少量でなければならないことが示唆された。

研究成果の概要(英文)： In order to understand the novel pressure-induced interaction between hydrogen and carbon electron system having graphite structure, few layer graphene and hexagonal boron nitride were pressurized in the helium or hydrogen gas and their pressure-induced structural-change were carried out in situ. The electronic structure has the large difference between graphite and hexagonal boron nitride, however, both structures were influenced by hydrogen under pressure up to 3 GPa.

We also tried the DFT calculations of the structures of graphite and hexagonal boron nitride pressurized under high pressure hydrogen atmosphere. The results showed that both did not show hydrogen stage or slightly small amount of hydrogen was accommodated in the inter layers.

研究分野：高圧物性

キーワード：高圧物性 炭素 電子系 水素 圧力有機構造変化 水素貯蔵 グラフェン グラファイト 窒化ホウ素

1. 研究開始当初の背景

シンプルなグラファイトの場合、低温では可逆的水素脱着が観測されて物理吸着が生じる。しかし、水素はイオン化エネルギーが大きい安定な物質で、炭素との電子親和力のギャップが小さいことから、これまでの実験方法(例えば気相反応法)ではインターカレーションは難しいとされた。

炭素材料の水素貯蔵の研究報告によれば、単層カーボンナノチューブ[例えば①]やグラファイトを水素中ですり潰したもの②において、10 wt%前後の水素吸蔵が報告されている。しかしながら、これらの水素の吸蔵サイトの特定、吸蔵水素-炭素間相互作用の本質など、水素貯蔵の物理に未解明な点が多い。

申請者らは、開口処理後の多層カーボンナノチューブ(MWCNT)を水素と共に常温で2 GPa(ギガパスカル、1 GPa=1 万気圧)まで加圧し、層間距離が単調な収縮を示す一方で、大きな線弾性率を示す炭素6員環の炭素間結合距離が等方的に伸びること、電荷移動量の大きさがアルカリ金属水素-グラファイト層間化合物に匹敵することを発見した③。その後、グラファイト構造をもつメソカーボンマイクロビーズ(MCMB)においても、0.7 GPa以下で炭素6員環の炭素間結合距離や水素核間距離が伸びることを明らかにした④。

MWCNTやMCMBで観測された炭素間結合距離、水素核間距離の伸張は、いずれも水素のインターカレーションにともなう水素-炭素間の圧力誘起電荷移動相互作用で生じると仮説を立てた。ホストとなるグラファイト構造をもつ炭素材料の種類によって、炭素間結合距離や水素核間距離の伸張の大きさと、これらの最大値を与える圧力に幅があることもわかってきた。

2. 研究の目的

水素の入り方にバリエーションを与える要因の一つとして、各炭素材料のもつグラフェンの積層数の違いが考えられる。圧力誘起水素-炭素相互作用の本質を、MWCNTやMCMBといった特別な炭素材料の物性として留めることなく、グラファイト構造を持つ物質全般で考える必要がある。数層グラフェンからグラファイトまでのより単純化したグラファイト構造をもつ炭素材料における水素-炭素間相互作用を系統的に理解するために、最近のグラフェンの剥離手法や積層数の分光学的な評価方法にヒントを得て、積層数を評価したグラフェンを用いる。グラフェン積層数、および、圧力によって制御された水素-グラフェンの分光学的観察、および、シミュレーションを通じて、新奇な水素-炭素間相互作用とその発現機構の解明を目的とした研究をおこなう。

比較研究として、類似構造をもつ六方晶窒化ホウ素(hBN)を水素中で加圧し、グラフェン同様、分光学的観察、シミュレーションを通じて水素が与えるBNへの影響を調べる。hBNはワイドギャップ半導体であり、その電子構造は、グラフェン、グラファイトとは違い、フェルミレベル付近に状態をもたないことから、仮に水素が層間に入ったとしても、水素が与えるホストへの電子的な影響は異なると予想される。

3. 研究の方法

(1) 水素-炭素間相互作用の制御

六方晶窒化ホウ素(hBN)単結晶は、数層グラフェンへの電子的な影響が少ないことから、現在では、物性実験時の基板材料としてよく用いられる。一方で、hBNは高圧水素中での安定性はわかっていない。また、hBNはグラファイトと類似構造を持ちながら、異なる電子状態をとるため、グラファイトとの比較実験としても、高圧水素の影響が興味深い。そこで、本研究では、粉末X線回折(XRD)により、高圧水素中でのhBNの構造変化を調べることで、高圧水素中でのhBNのグラフェンの基板としての適性を評価する。

また、ダイヤモンドアンビルに直接転写した数層グラフェンの積層数の評価方法も検討する。従来法によれば、ラマン分光法によるグラフェン2D(G')バンドの線形解析、反射光学顕微鏡によるコントラスト測定、電子顕微鏡、原子間力顕微鏡等による観察などがある。しかし、本研究では、ダイヤモンドの2次のピークと重なる2Dバンドのピーク解析が困難であること、積層数6層以上の評価は不可能であること、試料位置の確認が難しいなどの制約があることから、従来法が使用できない。そこで本研究では、既存のラマン分光装置を用いより簡単に正確な積層数決定方法を検討し、ダイヤモンド基板のラマンスペクトルを用いたグラフェン積層数の評価をおこなう。

数層グラフェンを水素中、および、ヘリウム中で加圧し、ラマン分光法により面内振動を観察する。グラフェンの格子振動をプローブとして、積層数の異なるグラフェンが高圧水素中、ヘリウム中におかれた場合、それぞれの条件で得られるグラフェンの格子振動の圧力変化は異なることが予想される。これらの圧力変化の違いを解析することで、グラフェン-水素間で生じる水素-炭素間相互作用を理解する。

(2) 水素の位置や配向の理論的予測、水素-炭素間相互作用発現の解明

MCMBの水素雰囲気下におけるX線回折(XRD)パターンから推察されたモデルには大別して2種類ある。一つ目はグラファイトのスタッキングが水素吸蔵に伴いABからAAに変化したものである。実験からは、水素分子の主軸がc軸方向にそろったモデルや、水素分子がグラファイトの六角形の穴に入ったモデルを提案した。二つ目は水素分子が2,3層おきに挿入されたステージング構造である。これはXRDパターンを比較的良く説明することができた。しかし水素吸蔵に伴う回折パターンの変化がわずかであるので、実験のみでは構造モデルを絞り込むことは難しい。そこで我々は各種モデルが合理的であるかどうかDFT計算により検証をおこなう。

グラファイトと類似する構造をもつ六方晶窒化ホウ素についても、水素雰囲気下での高圧XRD測定を行い、その格子定数の圧力変化を調べ、1,2 GPa付近の低い圧力で水素分子のインターカレーションを示唆する構造変化が起きた⑤。しかし、水素分子がhBNの層間に侵入しているかどうかは実験的に判断することは難しい。そこで今回純粋な窒化ホウ素の結晶構造モデルと、水素を吸蔵した

モデルに対し DFT 計算により格子定数、状態方程式を推定し、実験によるそれらと比較することで水素が入っているかどうかを検証する。

XRD パターン、格子定数の圧力変化等は実験結果⑥を用いる。リートベルト解析には Accelrys 社の Materials Studio (MS) REFLEX を使用する。DFT 計算には MS CASTEP を使用する。汎関数には GGA-PB、分散力補正には Tkatchenko-Scheffler scheme⑦、擬ポテンシャルには Ultrasoft 型を用いる。

4. 研究成果

(1) 水素-炭素間相互作用の制御

高压水素中での hBN のグラフェンの基板としての適性を評価するため、ダイヤモンドアンビルセルを用いて水素中で hBN の加圧をおこない、放射光を用いた粉末 XRD をおこなった。Fig. 1 に水素中で加圧した hBN の構造の圧力変化を示す。2 回の実験のうち、1 回目は実験時間 (加圧-待機-測圧) を任意とし、2 回目は 20 分でおこなった。1 回目、2 回目とも、測定結果にばらつきはあるものの、1~1.5 GPa において格子パラメータや体積の圧力変化には特異点が見られた。面内構造は 1GPa 付近から膨張し 1.5 GPa 以上で再び収縮していることがわかった。また、この変化に対応する面間距離、体積の膨張が観察された。水素が単純に圧力媒体としてはたらく場合は、格子パラメータは単調に減少するはずだ。よって、これらの結果は、水素が層間に入り、hBN の構造に影響を与えていることを示唆する。一方で、水素中で加圧した hBN、水素のラマンスペクトルからは、振動状態に大きな変化は見られず、圧力増加にともない、ラマンシフトの値が増加する傾向がみられた。このことから、2 GPa 以下の圧力下では、hBN-水素間での電荷移動相互作用は生じていないこと、水素は hBN の層状構造を加圧するのではなく、hBN を 1 層ずつ加圧することが考えられる。高压水素中での加圧実験においては、hBN の構造変化を生じることから、hBN を基

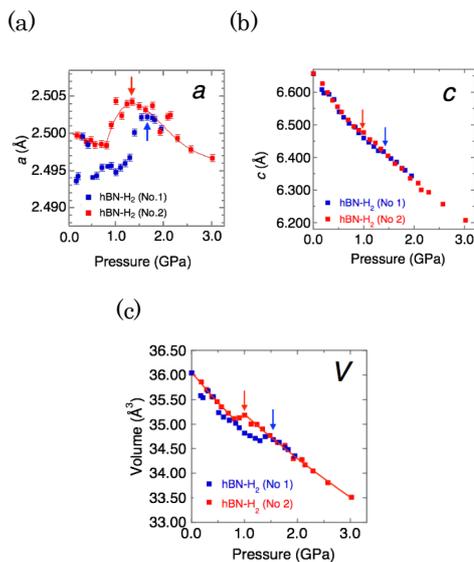


Fig. 1 水素中で加圧した hBN の格子パラメータの圧力変化. (a) a 軸長、(b) c 軸長、(c) 体積.

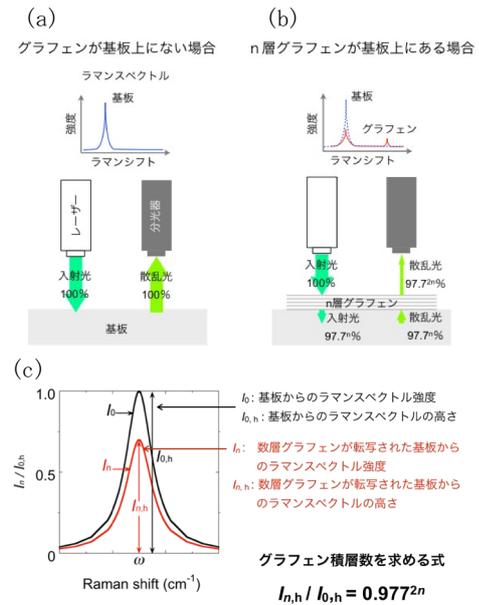


Fig. 2 基板上にグラフェンがない場合 (a)と基板上に n 層グラフェンがある場合 (b) の入射光とラマン散乱光、得られるラマンスペクトルのイメージ (c).

板に使用することは適当ではないと判断した。

hBN とグラファイトでは、構造は類似するが、電子構造は絶縁体と半金属であり、全く違う。にもかかわらず、両者とも水素の影響を受けた構造の圧力変化を示すことが明らかとなった。これについては、(2) 水素の位置や配向の理論的予測、水素-炭素間相互作用発現の解明で、理論計算をおこない、水素中で加圧したグラファイトおよび hBN で、何がおこっているのか議論する。

上記結果を受けて、ダイヤモンドアンビルにグラフェンを直接転写することにした。そこで、ダイヤモンドアンビルに直接転写した数層グラフェンの積層数の評価方法を検討した。グラフェンは自立した状態で扱うことは難しく、SiO₂/Si 基板などに転写した状態で用いる。単層のグラフェンは可視光に対してほぼ透明であり 97.7% の光を透過するが、2.3% の光は遮蔽される⑧。基板にラマン活性を示す物質を使用すれば、グラフェン、基板、双方のラマンスペクトルを得ることができる。本研究では、積層数が増えることでグラフェンを透過する光の強度が減少し、それに乗じて基板からのラマンスペクトルの強度も減少することを発見した。

ラマンスペクトルを測定するときの光の経路を模したものを Fig. 2 に示す。グラフェンを通じた後に基板に届く可視光の強度は、入射前の光の強度を 1 としたとき、 0.977^n の大きさに減少する。基板に届いた光によって、基板からのラマン散乱が生じる。基板からのラマン散乱光は、検出器に入る前にもう一度グラフェンを通るため、強度は $0.977^n \times 0.977^n = 0.977^{2n}$ の大きくなる。基板上にグラフェンがないときの基板からのラマン散乱強度を I_0 、基板上に n 層のグラフェンがあるときの基板からのラマン散乱強度を I_n としたとき、各ラマン散乱強度とグラフェン積層数の関係は

$I_n/I_0=0.977^{2n}$ で表されることを明らかにした。

本発明により簡便でありながら正確に積層数をもとめることができるようになった。さらに、既存の方法⑨、⑩では最大 6 層までしか評価できなかったが、この方法によって 30 層まで求めることができるようになった。また、基板の材質は SiO_2/Si や六方晶窒化ホウ素に限られていたが、本手法を用いることで、ラマン活性な物質（例えば、ダイヤモンド、GaAs など）を基板に使用してもグラフェン積層数の決定が可能であることもわかった。

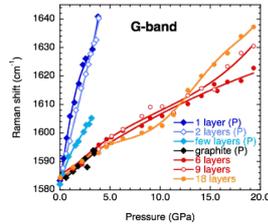


Fig. 3 多層グラフェンのラマンシフトの圧力変化、(P)はProctorらの結果⑩。

次に、ダイヤモンドアンビルに転写した積層数の異なる多層グラフェンの加圧をおこなった。始めに、圧媒体にメタノールエタノール混合液を、次に、ヘリウムを用いて加圧し、グラフェンGバンドのラマンシフト圧力変化について調べた。20 GPaまで加圧した6層、9層、18層グラフェンの結果をFig. 3に示す。3 GPa以下においては、Gバンドのラマンシフトの圧力依存性は積層数の影響を受けない。しかし、4 GPaを超えると、圧力依存性は、積層数による違いが生じた。圧力4 GPaから12 GPaにかけては、積層数18層において、ラマンシフトの変化量が最も小さいが、12 GPa上では挙動が大きく変化し、積層数が増えるにつれてラマンシフトの圧力変化が大きくなることがわかった。

今回の結果は、先に報告されたProctorらの結果⑩とは大きく異なる。Proctorらは、Gバンドのラマンシフトの圧力変化は、単層グラフェンが最も大きく、次いで、2層グラフェン、数層グラフェン、グラファイトとなっている。また、4 GPa以下で測定したグラファイトのGバンドのラマンシフトの圧力変化は、我々が測定した6、9、18層のグラフェンのGバンドのものとはほぼ同じであった。

このような違いの要因として、ひとつには、基板の違いが影響していると考えられる。Proctorらは同じヘリウムガスを圧媒体に使用しているが、基板には SiO_2/Si 基板を用いている。グラファイトは積層数が厚いため、 SiO_2/Si 基板の影響を殆ど受けない。それに対し、グラフェンの積層数が少ないほど、基板からの影響をうけて、グラファイトやダイヤモンド基板で測定した我々の結果から大きく外れているのだろう。

我々の結果は4 GPaまでは、グラファイトと同じ結果を示し、4 GPa以上から積層数によって変化の挙動が異なる。特に積層数の多い18層において、ラマンシフトの圧力変化が小さい。しかし、12 GPa以上では、積層数が増えるほど、変化量が大きくなっており、関係が逆転していることがわかる。18層グラフェンでは構造相転移のようなものも生じている可能性がある。このように、グラフェンGバン

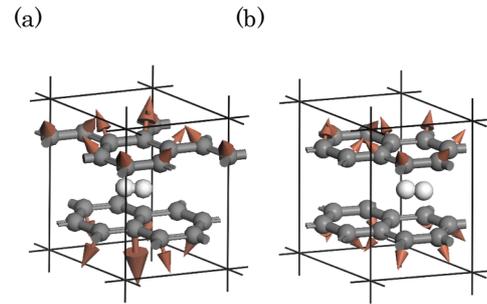


Fig. 4 水素が吸蔵された (a) ABスタッキングモデルと (b) AAスタッキングモデル。炭素骨格の格子定数、層間距離は実験値に固定してある。

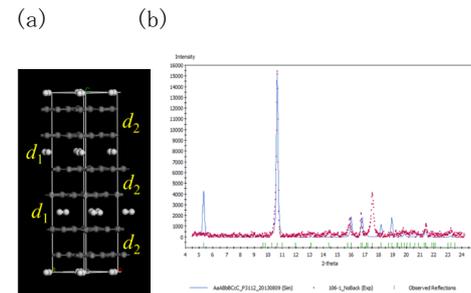


Fig. 5. (a) DFT計算で最適化後の水素が吸蔵されたステージ2モデルと、(b)それから計算されたX線回折プロファイル(青)と実験値(赤)との比較。

ドのラマンシフトの圧力変化は、積層数、基板の種類、圧力領域で、様々な特徴を示すことがわかった。今後は、圧力媒体を水素に変えて、高压下でのグラフェンの振動状態について探索を行う予定である。(2)水素の位置や配向の理論的予測、水素-炭素間相互作用発現の解明

<水素吸蔵メソカーボンマイクロピーズの内部ストレス計算>

実験で提唱された各種モデルを検証するため、実験で得られた2 GPaにおける層間距離に固定されたABスタッキングとAAスタッキングしたグラファイト骨格中に様々な位置、方位に水素分子を置いた初期モデルを作り、DFT計算による構造最適化を行った。その結果水素分子がc軸方向に立ったモデルと穴に入ったモデルの可能性は否定された。分子が層間に寝た状態に入ったABスタッキングとAAスタッキングモデルについて、それぞれの原子にどのぐらい力がかかっているか計算してみた。前者ではFig. 4 (a)のように水素の真下にある炭素原子に強い反発力が発生し、後者では芳香環の穴に水素が入ることでFig. 4 (b)のように反発力が緩和された。その結果ABスタッキングよりもAAスタッキングの方がエンタルピーは低くなった。それでもc軸方向にかかるストレスは(a)で18 GPa、(b)で16 GPaであり、どちらも実験値2 GPaとは大きくかけ離れていた。逆に言うと2 GPaで水素が入っているならば層間距離はもっと広がらなくてはならないことになる。

ステージングモデルについては、格子定数を実験で得られた値に固定し、内部構造に問題がないか検証を行った。ステージ2モデルについて原子

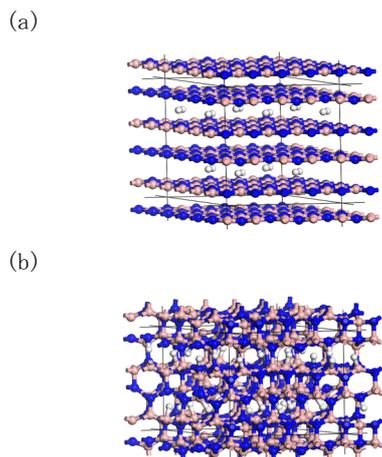


Fig. 6. (a) 水素吸蔵されたBNのステージ2モデル, (b) 50 GPa, 400 KにおけるMD計算終了後の構造.

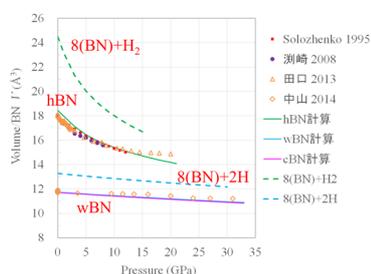


Fig. 7. hBNとwBNの状態方程式. 各種点は実験値, 実線と点線は今回行ったDFT計算値を示す.

位置の最適化を行ったところ、Fig. 5 (a) のように水素が挿入された層間距離 d_1 ($=3.781 \text{ \AA}$) と挿入されていない距離 d_2 ($=2.889 \text{ \AA}$) の間にかなり大きな差が生じた。そのモデルでX線回折パターンを計算してみると、Fig. 5 (b) のように実験で観測された 16° 付近の回折ピークは説明できるものの、 5.2° に実験では見られない強いピークが現れて、 17.5° のピークが消えてしまった。

DFT 計算による検証の結果として、過去に提唱された各種モデルについて、実験と計算はコンシステントにはならなかった。計算からは水素吸蔵されていないか、入ったとしても極少量でなければならぬことが示唆された。また実験で観測された新しい回折ピークは、水素吸蔵とは関係のない別の構造変化によるものと考えられるしかなく、新モデルの検討が今後必要である。

<DFT 計算による窒化ホウ素の状態方程式>

この計算条件でどのぐらい正確に hBN ならびに高压で転移したウルツ型 wBN の構造を再現できるかテストした。hBN については常圧での格子定数は文献値と a 軸長で 0.2% 、 c 軸長で 1.9% の範囲で一致した。計算された格子定数の圧力変化は、二つの実験結果(Solozhenko¹², Fuchizaki¹³)のほぼ中間を通った。wBN の格子定数については高压下での信頼できる実験値が見つからなかったが、常圧においては a 、 c 軸長とも 0.4% の範囲で一致した。よってこの計算条件で格子定数、状態方程式を精度よく推定できることが確かめられた。さらに 30 GPa, 400 K における DFT 計算による MD シミュレーション

を行ったところ、hBN から wBN への構造相転移を再現することができた。

次に Fig. 6 (a) に示す hBN の層間に水素分子が入ったと仮定したステージ2構造モデルを作成した。これが wBN へ相転移する際水素がどのように入るのか探るため、50 GPa, 400 K における MD シミュレーションを行った。その結果、Fig. 6 (b) のように水素分子が解離して BH, NH ボンドが形成されたモデルが得られた。

この結果から水素が入ったと仮定した場合の hBN, wBN モデルを作成し、それぞれの格子定数の圧力変化、状態方程式を計算した。その結果、水素が入った hBN と wBN のモデルの格子体積(Fig. 7 点線)は、入っていない場合(Fig. 7 実線)よりも大きく膨張していなければならないことが分かった。DFT 計算からは BN には水素吸蔵されていないか、入ったとしても極少量でなければならぬことが示唆された。

<引用文献>

- ①. A. C. Dillon *et al.*, Nature **386**, 377 (1997).
- ②. S. Orimo *et al.*, Appl. Phys. Lett., **75**, 3093 (1999).
- ③. Y. Isurugi *et al.*, 50th EHPRG Meeting, Greece (2012).
- ④. A. Nakayama *et al.*, Dia. Related Mat., **17**, 548 (2008).
- ⑤. A. Nakayama *et al.*, J. Phys. Conf. Series, **215**, 012046 (2010).
- ⑥. 石動裕也ら、第52回高压討論会1C01, (2011).
- ⑦. A. Tkatchenko and M. Scheffler, Phys. Rev. Lett. **102**, 073005 (2009).
- ⑧. R. R. Nair *et al.*, Science **320**, 1308 (2008).
- ⑨. D. Graf *et al.*, Nano Lett., **7**, 238 (2007).
- ⑩. A. C. Ferrari *et al.*, Phys. Rev. Lett., **97**, 187401 (2006).
- ⑪. J. E. Proctor, *et al.*, Phys. Rev. B **80**, 073408 (2009).
- ⑫. V. L. Solozhenko *et al.*, Solid State Commun. **96**, 1 (1995).
- ⑬. K. Fuchizaki *et al.*, Solid State Commun. **148**, 390 (2008).

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)
[雑誌論文] (計 3 件)

- ① A. Nakayama, S. Hoshino, Y. Yamada, A. Ohmura, F. Ishikawa, Counting graphene layers, based on the light-shielding effect of Raman scattering from a substrate. Appl. Phys. Lett. **107**, 231604 (2015).
- ② M. Einaga, A. Ohmura, F. Ishikawa, A. Nakayama, Y. Yamada, S. Nakano, A. Matsushita, K. Shimizu, Pressure-induced superconductivity in non-stoichiometric bismuth telluride $\text{Bi}_{35}\text{Te}_{65}$, J. Phys.: Conf. Ser. **500**, 192003-1~5 (2014). DOI: 10.1088/1742-6596/500/19/192003
- ③ A. Nakayama, Y. Onda, S. Yamada, H. Fujihisa, M. Sakata, Y. Nakamoto, K. Shimizu, S. Nakano, A. Ohmura, F. Ishikawa, Y. Yamada, Collapse of CuO Double Chains and Suppression of Superconductivity in High-Pressure Phase of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$, J. Phys.

[学会発表] (計 15 件)

- ① A. Nakayama, S. Mitsuya, S. Nakano, T. Taniguchi, A. Ohmura, F. Ishikawa, Y. Yamada, In situ observation of generation of wBN by compression of hBN in single crystal at room temperature, Joint AIRAPT-25 & EHPRG-53, 2015年8月30日~9月4日、マドリード (スペイン).
- ② 佐藤貴明、中山敦子、中野智志、清水克哉、山田裕、大村彩子、石川文洋、グラフアイトC面に垂直な断面の作成とラマン測定、平成26年度日本物理学会新潟支部第43回例会、2014年12月13日、新潟市
- ③ 藤久裕司、中山敦子、田口翔太郎、山田裕、谷口尚、後藤義人、DFT計算による窒化ホウ素の状態方程式、第55回高圧討論会、2014年11月22日~11月24日、徳島市。
- ④ 中山敦子、田口翔太郎、三谷翔平、中野智志、谷口尚、大村彩子、石川文洋、山田裕、六方晶窒化ホウ素の水素中での加圧と圧力誘起構造相転移、第55回高圧討論会、2014年11月22日~11月24日、徳島市。
- ⑤ 星野豪、中山敦子、大村文子、石川文洋、山田裕、高圧ラマン分光法による数層グラフェンの振動状態の観察、第55回高圧討論会、2014年11月22日~11月24日、徳島市。
- ⑥ 三谷翔平、中山敦子、谷口尚、渡邊賢治、中野智志、石川文洋、大村彩子、山田裕、高圧下における六方晶窒化ホウ素の構造相転移-粉末と単結晶の違い、第55回高圧討論会、2014年11月22日~11月24日、徳島市。
- ⑦ 星野豪、中山敦子、大村文子、石川文洋、山田裕、ダイヤモンド基板のラマンスペクトルをもちたグラフェン積層数の評価、第28回ダイヤモンドシンポジウム、2014年11月19日~2014年11月21日、東京都
- ⑧ 藤久裕司、中山敦子、山田裕、山脇浩、竹谷敏、後藤義人、水素吸蔵メソカーボンマイクロピーズの内部ストレス計算、第54回高圧討論会、2013年11月14日~11月16日、新潟市。
- ⑨ 田口翔太郎、中山敦子、大村彩子、山田裕、石川文洋、谷口尚、中野智志、高圧水素中の六方晶窒化ホウ素の構造変化II、第54回高圧討論会、2013年11月14日~11月16日、新潟市。
- ⑩ A. Nakayama, S. Taguchi, S. Mitsuya, T. Taniguchi, S. Nakano, A. Ohmura, F. Ishikawa, Y. Yamada, Structure change in hBN coexisting with hydrogen gas under pressure, 24th AIRAPT (International Conference of the International Association for the Advancement of High Pressure Science & Technology), 2013年7月7日~7月12日, Seattle (USA).
- ⑪ A. Nakayama, S. Taguchi, S. Mitsuya, T. Taniguchi, S. Makano, A. Ohmura, F. Ishikawa, Y. Yamada, Pressure induced structural change in hBN coexisting with hydrogen gas at room temperature, 17th International Symposium on Intercalation Compounds, 2013年5月12日~5月16日, Sendai International Center, 仙台市 (日本)。
- ⑫ 中山敦子、田口翔太郎、三谷翔平、中野智志、谷口尚、大村彩子、石川文洋、山田裕、3 GPa以下での水素中の六方晶窒化ホウ素の振動状態と構造の変化、物構研サイエンスフェスタ (第30回PFシンポジウム、第1回KENSシンポジウム、第1回MSLシンポジウム)、2013年03月14日~2013年03月15日、つくば市。

- ⑬ 三谷翔平、田口翔太郎、中山敦子、山田裕、石川文洋、大村彩子、谷口尚、高圧下における窒化ホウ素の振動状態、平成24年度日本物理学会新潟支部 第41回例会、2012年12月08日、日本歯科大 (新潟市)。
- ⑭ 田口翔太郎、副田大介、中山敦子、中野智志、谷口尚、大村彩子、石川文洋、山田裕、2GPa以下での水素中の六方晶窒化ホウ素の構造変化、第53回高圧討論会、2012年11月07日~2012年11月09日、(豊中市)。
- ⑮ Y. Isurugi, A. Nakayama, S. Taguchi, A. Kiryu, A. Ohmura, F. Ishikawa, Y. Yamada, S. Nakano, H. Fujihisa, Pressure-induced phase separation of graphite observed in spherulitic-graphitic nanoparticles under hydrogen atmosphere, 50th European High Pressure Research Group Meeting, 2012年9月16日~9月21日、テッサロニキ (ギリシャ)。

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 絶縁体材料のラマン散乱スペクトルを用いた2次元薄膜原子の積層数決定装置および積層数決定方法

発明者: 中山敦子、星野豪、山田裕

権利者: 国立大学法人新潟大学

種類: 特許

番号: 特願2014-189349

出願年月日: 2014年9月17日

国内外の別: 国内

[報道関連情報]

- ① プレスリリース: 工業製品の品質向上とコストダウンに大きく貢献! グラフェンを支持する基板からのラマン散乱光をもちたグラフェン積層数の決定方法を明らかにしました、2015年12月15日、新潟大学. (<http://www.niigata-u.ac.jp/research/study/271215.pdf>)
- ② 新聞報道: 新素材グラフェン、新しい計測法開発、レーザー当て散乱光から算定、製品の品質向上期待、2016年1月22日、新潟日報。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中山 敦子 (NAKAYAMA, Atsuko)

新潟大学・研究推進機構・超域学術院・准教授

研究者番号: 50399383

(2) 研究分担者

山田 裕 (YAMADA, Yuh)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号: 10242835

藤久 裕司 (FUJIHISA, Hiroshi)

独立行政法人・産業技術総合研究所

計測フロンティア研究部門・主任研究員

研究者番号: 90357913