

令和 3 年 6 月 26 日現在

機関番号：12102

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K18989

研究課題名(和文)ホウ化水素シートを用いた新規触媒群の創出

研究課題名(英文)Creation of a new catalyst group using a hydrogen boride sheet

研究代表者

近藤 剛弘(Kondo, Takahiro)

筑波大学・数理物質系・准教授

研究者番号：70373305

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 4,900,000円

研究成果の概要(和文):ホウ化水素(HB)シートは金属や炭素を含まない固体酸触媒として機能することを世界で初めて示した。エタノールの脱水反応に関して調べた結果、HBシートはブレンステッド酸の役割の観点でH型ゼオライトと似た反応メカニズムであることがわかった。すなわち、HBシートを構成する水素がエタノールの脱水反応に参加し、格子水素欠損位置となるホウ素が中間生成物のメチル基部位から水素を引き抜いてエチレンが形成することが示された。本研究により、今後、さらに様々な反応に対するHBシートの触媒特性を調べることで既存の触媒を凌駕する活性や選択性が見出される可能性があることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、2017年に我々が世界で初めて合成に成功したホウ化水素(HB)シートが金属や炭素を含まない固体酸触媒として機能することが世界で初めて明らかとなった。HBシートはブレンステッド酸の役割の観点でH型ゼオライトと似た触媒特性を示すこともわかった。本研究により、今後、さらに様々な反応に対するHBシートの触媒特性を調べることで既存の触媒を凌駕する活性や選択性が見出される可能性があることが示された。

研究成果の概要(英文):Hydrogen boride (HB) sheet was found to act as a solid acid catalyst. As a result of investigating the dehydration reaction of ethanol, it was found that the HB sheet has a reaction mechanism similar to that of H-type zeolite in terms of the role of Bronsted acid. In other words, it was shown that the hydrogen that constitutes the HB sheet participates in the dehydration reaction of ethanol, and boron, which is the lattice hydrogen-deficient position, abstracts hydrogen from the methyl group of the intermediate product to form ethylene. From this study, it was shown that in the future, by investigating the catalytic properties of HB sheets for various reactions, it is possible to find activities and selectivity that surpass those of existing catalysts.

研究分野：ナノ物質科学

キーワード：ホウ化水素 二次元物質 シート物質 エタノール脱水反応 固体酸触媒 ホウ素 水素

1. 研究開始当初の背景

グラフェンに代表されるような、原子一層から数層の非常に薄い厚さで構成される二次元物質と呼ばれる物質群は、通常の三次元物質に比べて表面積が大きく、機械的柔軟性があり、特異な電子状態を持っている場合が多いため、新しい触媒材料や触媒微粒子を担持する担体材料として着目されている。我々は 2017 年に二ホウ化マグネシウム (MgB_2) と呼ばれる物質のマグネシウム正イオンを水素の正イオン (プロトン) とイオン交換して劈開することでホウ化水素シート (ポロファン) と呼ばれる新しい二次元物質を世界で初めて生成することに成功した[1]。この物質は触媒作用において有利となる高い表面積 (理論最大値: $4068 \text{ m}^2/\text{g}$) を有しており、水素がプロトンとして物質内に存在しているため、固体酸の性質を示すという特徴がある。実際、ごく最近の我々の実験では 300 においてエタノールを 10 時間以上連続で収率 92% 程度を維持しながらエチレンへと転換させる触媒能を持っていることがわかってきている。このようなホウ素を骨格とした固体物質による不均一系触媒作用はこれまでに報告が無く、ホウ化水素シートは新しい典型元素の触媒材料といえる。

2. 研究の目的

最近の我々の実験で見いだされたエタノールの転換触媒としての機能について、定量的にメカニズムを含めて厳密に解析を行い、ホウ化水素の触媒機能における特徴を明らかにすることが目的である。

3. 研究の方法

(1) ホウ化水素 (HB) シートの固体酸触媒としての機能

ホウ化水素シートの触媒機能を評価するために固定床流通式反応装置 (自作) を用いて種々のエタノール流量およびホウ化水素温度条件におけるエタノールの転化率と選択率を定量的に求める。アレニウスプロットを行うことで活性化エネルギーと頻度因子を求めるほか、長時間測定を行うことで転換生成物の生成レートを算出する。

(2) ホウ化水素 (HB) 上でのエタノール転換反応のメカニズム

ホウ化水素シートでのエタノールの転換反応メカニズムを明らかにするため、種々の同位体エタノール ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, $\text{CD}_3\text{CH}_2\text{OH}$, 及び $\text{CH}_3\text{CD}_2\text{OH}$) を用いて赤外吸収分光によりホウ化水素の構造変化を測定する。具体的には、真空中の室温のホウ化水素シートへエタノール蒸気を曝露させた際、およびその後に加熱を行った際のホウ化水素シートの構造変化を赤外吸収分光により調べ、エタノールの転換生成物が放出されるまでの反応メカニズムを測定を基に明らかにする。

4. 研究成果

(1) ホウ化水素 (HB) シートの固体酸触媒としての機能

図 1(a) は、様々な W/F 条件 (触媒として用いた試料の質量 W をエタノール蒸気の流速 F で割った値 $\text{g}\cdot\text{min}/\text{mmol}$) におけるエタノールの転化率である。HB シートには明確なエタノール転換特性があることがわかる一方、HB 合成の際にスタート物質として用いた MgB_2 や酸化ホウ素 B_2O_3 (HB シート合成時の副生成物であるホウ酸を加熱すると生成する物質) ではエタノール転換が起きないこともわかる。転化率は W/F の増加と共に増加しており、長期間一定であることもわかった。一例として、反応時間の関数と

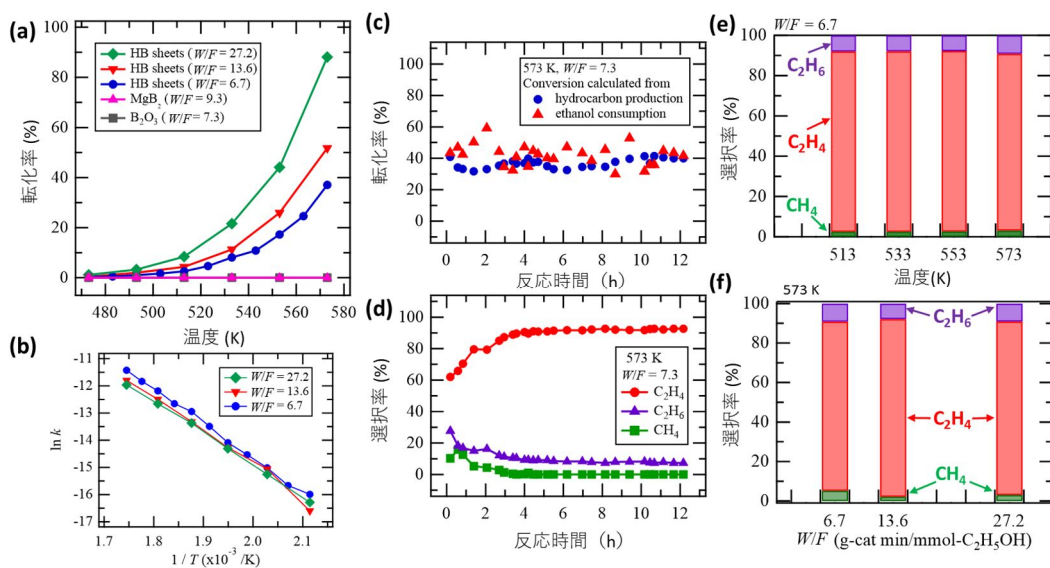


図 1 . HB シートの触媒特性 (a) エタノール転化率の温度依存性, (b) アレニウスプロット $k = (\text{C}_2\text{H}_5\text{OH 転化率}(\%))/100 \times (\text{C}_2\text{H}_5\text{OH 流速}(\text{mol/s})/(\text{HB 量}(\text{mol})))$, (c) エタノール転化率の反応時間依存性, (d) エタノール選択率の反応時間依存性, (e) エタノール選択率の温度依存性, (f) エタノール選択率の W/F 依存性 [8]

しての 573 K および $W/F = 7.3 \text{ g} \cdot \text{min}/\text{mmol}$ での転化率を図 1(c)に円印で示す .この場合, 13.4 時間における炭化水素の総量は 3.2 mmol であり, 使用した HB シートの全 B 原子数の約半分に相当する .また, 図 1(c)の三角印で示されるように, エタノール消費量から算出したエタノール転化率が炭化水素生成から算出された値とほぼ同じ (12 時間後に約 40%) であることもわかった .これは生成物の炭化水素が HB シート上に蓄積しないことを示している .これらの結果は, HB シートがエタノールを触媒的に変換していることを示している .なお, 573 K での前処理加熱を行っている為, HB シート内には不可避免的に水素空孔が形成されており, HB シートは水素含有量が減った状態となっている .詳細は省くが昇温脱離測定の結果より 573 K での放出水素の最大量は約 33-50 at% と推定できるため, 均一な構造ができていると仮定すると触媒特性を示している HB シートの化学量論は $\text{H} : \text{B} = 1 : 1$ ではなく, およそ $\text{H} : \text{B} = 1 : 2.5 \pm 0.5$ となる .HB シートにより触媒的に変換された生成物をガスクロマトグラフィーを用いて検出した結果を図 1(d)に示す .主にエチレンと水であり, 測定されたすべての温度と W/F 条件下で同じ特性が観察された (図 1(e)(f)) .すなわち, エチレンが常に主生成物であり, 得られた全炭化水素の選択率はほぼ同じであった .これらの結果は, HB シートによるエタノール改質の主な触媒反応が脱水反応 ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} \rightarrow \text{C}_2\text{H}_4 + \text{H}_2\text{O}$) であることを示している .一般的に, 触媒がエタノールの脱水反応を促進するならば, 触媒は固体酸触媒であり, 脱水素化反応によりアセトアルデヒド (CH_3CHO) を生成する場合は塩基触媒であることが知られている .従って HB シートは固体酸触媒であることが示された .アレニウスプロット (図 1(b)) から見積もった活性化エネルギーは $102.8 \pm 5.5 \text{ kJ/mol}$ であり, Al_2O_3 (53 ~ 155 kJ/mol) [2][3], ルイス酸性 Zr-KIT-6 触媒 (79 kJ/mol) [4], シリカ-アルミナ (125.5 kJ/mol) [5], および Fe-ZSM-5 (137.7-271.1 kJ/mol) [6]でのエタノールの接触脱水反応について報告されている活性化エネルギーと同程度である .また図 1(c)の結果よりエチレン生成速度を見積もると $2.4 \pm 0.1 \text{ mmol}/\text{g} \cdot \text{h}$ となり, 市販の SynDol ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}/\text{SiO}_2$) 触媒と同程度 (591 K で $7.8 \text{ mmol}/\text{g} \cdot \text{h}$) [7]であることがわかった .

(2) ホウ化水素 (HB) 上でのエタノール転換反応のメカニズム

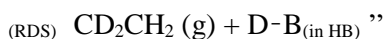
エタノール転換反応のメカニズムを明らかにするため、 C_2H_5OH 、 CD_3CH_2OH 、及び CH_3CD_2OH をそれぞれ真空中の HB シートに室温 (~ 300 K) で 1 時間曝露させた後、真空中で HB シートを加熱したときの変化を赤外吸収分光で調べた[9]。詳細は割愛するが、この結果導かれた反応メカニズムについて CD_3CH_2OH の場合を図 2 に示す。まずエタノールは室温で HB シートの BHB 結合 (3 中心 2 電子結合) を分解して BH 結合を生成すると共に吸着をする。反応式で書くと



となる。次に温度増加に伴い (本研究の実験条件では約 450 K までの間で)、吸着エタノールの OH が HB シートを構成する水素原子と反応する下記の脱水反応が起こる。これにより、エトキシ基が中間生成物として生成する。



この際、C-OH の結合解離と共に BC 結合の生成が協奏的に起きると考えられる。例えば図 2(a)(b) の 1 や 2 で示したホウ素と相互作用していたエタノールの炭素原子が 3 で示すホウ素と結合するとともに C-OH が切れて OH が HB シートの H と反応すると考えられる。その後、更なる温度増加により (本研究の実験条件では 440 K 以上で) エトキシ基のメチル基内の水素を HB シートのホウ素が引き抜く反応が BC 結合の開裂と共に協奏的に起こる。この過程が全体の律速である。



これらの一連の反応メカニズムはいわゆる分子内脱水反応と呼ばれるエタノールの脱水反応[11]とは異なるメカニズムであり、HB シートの格子水素を伴った反応となっている。一方で H 型ゼオライトでは分子状に吸着したエタノールが H 型ゼオライトの水素と反応して脱水反応をした後に H 型ゼオライトの格子酸素と結合した中間体 $C_2H_5-O(\text{lattice})$ を形成し、その後メチル基の H を隣の O 上に残して気相中にエチレンが生成することが示されており[12][13]、ブレンステッド酸の役割としては H

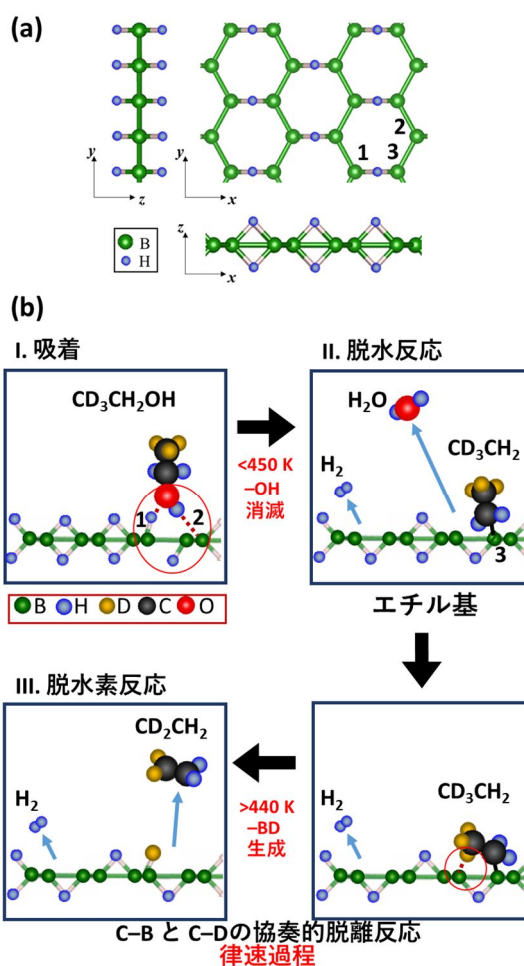


図 2. HB シート上でのエタノールの脱水反応メカニズム。(a) HB シートのモデル構造 (実際の構造は基本構造のホウ素の六員環はあるものの水素の結合が不規則なために非晶質で BH と BHB の両方の結合で構成されていることが最近の解析で示されている[10]), (b) CD_3CH_2OH の場合の反応素過程の概略図 (エタノールの吸着構造は BHB を崩して BH が形成されること以外は不明であるため可能性のある 1 つの吸着構造のみを示している) [9]。

エチレンが生成することが示されており[12][13]、ブレンステッド酸の役割としては H

型ゼオライトと HB シートが似ており , 多段階の同様な反応メカニズムを示している
と見ることができる .

References

- [1] H. Nishino, T. Kondo*, et al., *J. Am. Chem. Soc.*, **139**, 13761 (2017).
- [2] D. N. Bakoyannakis, et al., *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, **76**, 1159 (2001).
- [3] M. A. Christiansen, G. Mpourmpakis, D. G. Vlachos, *ACS Catal.*, **3**, 1965 (2013).
- [4] Q. Pan, A. Ramanathan, W. K. Snavely, et al., *Top. Catal.*, **57**, 1407 (2014).
- [5] F. Roca, L. De Mourgues, Y. Trambouze, *J. Catal.*, **14**, 107 (1969).
- [6] T. Maihom, P. Khongpracha, J. Sirijaraensre, J. Limtrakul, *ChemPhysChem*, **14**, 101 (2013).
- [7] G. Chen, A. Li, F. Jiao, Q. Yuan, *Catal. Today*, **125**, 111 (2007).
- [8] A. Fujino, S. Ito, T. Goto, R. Ishibiki, T. Kondo*, et al., *ACS Omega*, **4**, 14100 (2019).
- [9] A. Fujino, S. Ito, T. Goto, T. Kondo*, et al., *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **23**, 7724 (2021).
- [10] S. Tominaka*, T. Kondo*, et al., *Chem*, **6**, 406 (2020).
- [11] M. Zhang, Y. Yu, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **52**, 9505 (2013).
- [12] J. N. Kondo, H. Yamazaki, et al., *J. Phys. Chem. Lett.*, **6**, 2243 (2015).
- [13] J. N. Kondo, K. Ito, E. Yoda, et al., *J. Phys. Chem. B*, **109**, 10969 (2005).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Asahi Fujino, Shin-ichi Ito, Taiga Goto, Ryota Ishibiki, Junko Kondo, Tadahiro Fujitani, Junji Nakamura, Hideo Hosono, Takahiro Kondo	4. 巻 4
2. 論文標題 Hydrogenated Borophene Shows Catalytic Activity as Solid Acid	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Omega	6. 最初と最後の頁 14100-14104
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acsomega.9b02020	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 近藤 剛弘	4. 巻 89
2. 論文標題 ボロンを用いた新規2次元物質の創製	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 応用物理	6. 最初と最後の頁 152-156
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11470/oubutsu.89.3_152	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 Asahi Fujino, Shin-ichi Ito, Taiga Goto, Ryota Ishibiki, Ryota Osuga, Junko Kondo, Tadahiro Fujitani, Junji Nakamura, Hideo Hosono, Takahiro Kondo	4. 巻 23
2. 論文標題 Ethanol-ethylene conversion mechanism on hydrogen boride sheets probed by in situ infrared absorption spectroscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Phys. Chem. Chem. Phys.	6. 最初と最後の頁 7724-7734
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1039/D0CP03079A	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 近藤剛弘	4. 巻
2. 論文標題 ホウ化水素シート（ボロファン）	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 「触媒技術の動向と展望」（触媒年鑑）	6. 最初と最後の頁 143-152
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 Josep M Oliva-Enrich, Takahiro Kondo, Ibon Alkorta, Jose Elguero, Douglas Klein	4. 巻 21
2. 論文標題 Diborane concatenation Leads to New Planar Boron Chemistry	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ChemPhysChem	6. 最初と最後の頁 2460-2467
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/cphc.202000554	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 Reiya Kawamura, Akira Yamaguchi, Chika Shimada, Ryota Ishibiki, Takeshi Fujita, Takahiro Kondo, Masahiro Miyauchi	4. 巻 49
2. 論文標題 Acid assisted synthesis of HB sheets through exfoliation of MgB ₂ bulk in organic media	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chem. Lett.	6. 最初と最後の頁 1194-1196
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/cl.200203	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 Shin-ichi Ito, Toru Hirabayashi, Ryota Ishibiki, Reiya Kawamura, Taiga Goto, Takeshi Fujita, Akira Yamaguchi, Hideo Hosono, Masahiro Miyauchi, Takahiro Kondo	4. 巻 49
2. 論文標題 Hydrogen Boride Sheets as Reductants and the Formation of Nanocomposites with Metal Nanoparticles	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chem. Lett.	6. 最初と最後の頁 789-793
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/cl.200206	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 近藤 剛弘, 宮内 雅浩	4. 巻 63
2. 論文標題 ホウ化水素シートへの紫外光照射が誘起する水素発生	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 表面と真空	6. 最初と最後の頁 352-357
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1380/vss.63.352	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 宮内 雅浩, 近藤 剛弘	4. 巻 55
2. 論文標題 ホウ化水素シートの光機能 軽量・安全・光応答性の水素キャリア材料	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 セラミックス	6. 最初と最後の頁 591-594
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35件 (うち招待講演 10件 / うち国際学会 21件)

1. 発表者名 近藤剛弘
2. 発表標題 ホウ素と水素で構成される二次元物質ホウ化水素シートの特性
3. 学会等名 第4回固体化学フォーラム研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Kondo, A. Fujino, R. Ishibiki, S. Ito, J. N. Kondo, T. Fujitani, J. Nakamura, H. Hosono
2. 発表標題 Hydrogen boride sheet shows catalytic activity as solid acid
3. 学会等名 8th European Conference on Boron chemistry (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Ishibiki, I. Matsuda, A. Fujino, S. Ito, M. Miyauchi, J. Nakamura, H. Hosono, T. Kondo
2. 発表標題 Thermal and chemical stabilities of hydrogen boride sheet
3. 学会等名 8th European Conference on Boron chemistry (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Taiga Goto, Ryota Ishibiki, Shinichi Ito, Hideo Hosono, Takahiro Kondo
2. 発表標題 Adsorption Property of CO ₂ on Hydrogen Boride Sheets with H-vacancy Defects
3. 学会等名 The 11th International Conference on the Science and Technology for Advanced Ceramics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Fujino, R. Ishibiki, S. Ito, J. N. Kondo, T. Fujitani, J. Nakamura, H. Hosono, T. Kondo
2. 発表標題 A new solid acid catalyst of hydrogen boride sheets
3. 学会等名 The 11th International Conference on the Science and Technology for Advanced Ceramics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryota Ishibiki, Iwao Matsuda, Shin-ichi Ito, Junji Nakamura, Hideo Hosono, Takahiro Kondo
2. 発表標題 Thermal Stability of Two-dimensional Hydrogen Boride Sheets
3. 学会等名 The 11th International Conference on the Science and Technology for Advanced Ceramics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takahiro Kondo
2. 発表標題 New two-dimensional material: Borophane, synthesis, characterization, and application
3. 学会等名 ICAT/ETH Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takahiro Kondo
2. 発表標題 Hydrogen Boride Sheets: Synthesis, Characterization, and Application
3. 学会等名 0th International Symposium on Boron, Borides and Related Materials (ISBB 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Goto, R. Ishibiki, S. Ito, H. Hosono, and T. Kondo
2. 発表標題 CO ₂ Adsorption on Hydrogen Boride Sheets with H-vacancy Defects
3. 学会等名 0th International Symposium on Boron, Borides and Related Materials (ISBB 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Ishibiki, I. Matsuda, S. Ito, J. Nakamura, H. Hosono, and T. Kondo
2. 発表標題 Structure and Electronic States Variations of Hydrogen Boride Nanosheets with Heating
3. 学会等名 0th International Symposium on Boron, Borides and Related Materials (ISBB 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 近藤剛弘
2. 発表標題 二次元物質ホウ化水素シートの生成、特性、機能
3. 学会等名 2019年日本表面真空学会学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takahiro Kondo
2. 発表標題 Hydrogenated borophene Sheets: Synthesis, Characterization, and Application
3. 学会等名 Joint Symposium on Nanomaterials for Energy Applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 近藤剛弘
2. 発表標題 水素とホウ素のみで構成される二次元物質ホウ化水素
3. 学会等名 第2回ハイドロジェノミクス研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takahiro KONDO, Yoshitaka FUJIMOTO, Ryota ISHIBIKI, Taiga GOTO, Shin-ichi ITO, Takeshi FUJITA, Akiyasu YAMAMOTO, Susumu SAITO, Hideo HOSONO
2. 発表標題 Carbon Doping of Hydrogen Boride Sheet Reduces H ₂ Release Temperature
3. 学会等名 MATERIALS RESEARCH MEETING 2019 Materials Innovation for Sustainable Development Goals (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takahiro KONDO, Asahi FUJINO, Shin-ichi ITO, Taiga GOTO, Ryota ISHIBIKI, Junko N KONDO, Tadahiyo FUJITANI, Junji NAKAMURA, Hideo HOSONO
2. 発表標題 Hydrogenated Borophene Shows Catalytic Activity as Solid Acid
3. 学会等名 MATERIALS RESEARCH MEETING 2019 Materials Innovation for Sustainable Development Goals (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Taiga GOTO, Ryota ISHIBIKI, Shin-ichi ITO, Hideo HOSONO, Takahiro KONDO
2. 発表標題 Adsorption of CO ₂ on Hydrogen Boride Sheets with H-vacancy Defects
3. 学会等名 MATERIALS RESEARCH MEETING 2019 Materials Innovation for Sustainable Development Goals (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryota ISHIBIKI, Iwao MATSUDA, Shin-ichi ITO, Hideo HOSONO, Takahiro KONDO
2. 発表標題 Structure and Electronic States Changes of Hydrogen Boride Sheets with Heating
3. 学会等名 MATERIALS RESEARCH MEETING 2019 Materials Innovation for Sustainable Development Goals (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Kondo, Y. Fujimoto, R. Ishibiki, T. Goto, S. Ito, T. Fujita, A. Yamamoto, S. Saito, and H. Hosono
2. 発表標題 Carbon doping of hydrogen boride sheet reduces H ₂ release temperature
3. 学会等名 1st International Symposium Hydrogenomics combined with 14th International Symposium Hydrogen & Energy (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川村陸, 藤本義隆, 石引涼太, 後藤大河, 伊藤伸一, 藤田武志, 徳永智春, 宮内雅浩, 飯村莊史, 山本明保, 斎藤晋, 細野秀雄, 近藤剛弘
2. 発表標題 炭素ドーピングホウ化水素シートの合成と評価
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Asahi FUJINO, Hiroaki NISHINO, Ryota ISHIBIKI, Shin-ichi ITO, Tadahiro FUJITANI, Junji NAKAMURA, Hideo HOSONO, Takahiro KONDO
2. 発表標題 Catalytic property of hydrogen boride sheets
3. 学会等名 The 8th Tokyo Conference on Advanced Catalytic Science and Technology (TOCAT8) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤野朝日, 石引涼太, 西野弘晃, 伊藤伸一, 藤谷忠博, 中村潤児, 細野秀雄, 近藤剛弘
2. 発表標題 ホウ化水素シートの触媒特性
3. 学会等名 第122回触媒討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石引涼太, 藤田武志, 藤野朝日, 伊藤伸一, 宮内雅浩, 中村潤児, 細野秀雄, 近藤剛弘
2. 発表標題 ホウ化水素シート上に担持した銅ナノ粒子触媒の調製
3. 学会等名 第122回触媒討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Kondo
2. 発表標題 Hydrogen Boride Sheets Derived from MgB ₂ by Cation Exchange
3. 学会等名 Materials Science & Technology 2018 Conference & Exhibition (MS&T'18) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 A. Fujino, H. Nisino, R. Ishibiki, S. Ito, T. Fujitani J. Nakamura, H. Hosono, T. Kondo
2. 発表標題 Hydrogen Boride Sheets Showing Catalytic Activity As Solid Acid Catalyst
3. 学会等名 31st International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 R. Ishibiki, A. Fujino, T. Goto, H. Nishino, S. Ito, N.T. Cuong, M. Miyauchi, J. Nakamura, H. Hosono, and T. Kondo
2. 発表標題 Thermal Stability and Chemical Stability of Hydrogen Boride Sheets
3. 学会等名 31st International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石引涼太, 藤田武志, 藤野朝日, 伊藤伸一, 宮内雅浩, 中村潤児, 細野秀雄, 近藤剛弘
2. 発表標題 ホウ化水素シート上に担持した銅ナノ粒子触媒の調製
3. 学会等名 表面界面スペクトロスコピー2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤野朝日, 伊藤伸一, 西野弘晃, 中村潤児, 細野秀雄, 近藤剛弘
2. 発表標題 ホウ化水素シートの触媒特性解明
3. 学会等名 表面界面スペクトロスコピー2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takahiro Kondo
2. 発表標題 Hydrogen boride and boron monosulfide
3. 学会等名 First annual symposium of Tokyo Tech- UCL- McGill core-to-core collaboration, Defect Functionalized Sustainable Energy Materials: From Design to Devices Application (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 近藤剛弘
2. 発表標題 ～優れた水素吸蔵性能を有する新材料～新規二次元物質ボロファンの合成を実現
3. 学会等名 第1回筑波大学産学連携シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 近藤剛弘
2. 発表標題 新物質ホウ化水素シートの生成と機能
3. 学会等名 東京大学物性研究所ワークショップ「ナノスケール物性科学の最先端と新展開」(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 後藤大河, 伊藤伸一, 近藤剛弘
2. 発表標題 ホウ化水素シート上へのCO ₂ の吸着と水素化反応
3. 学会等名 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 近藤剛弘
2. 発表標題 様々な用途が見えてきた新材料ボロファン(ホウ化水素)
3. 学会等名 イノベーションジャパン2020大学見本市
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Goto, S. Ito, T. Kondo
2. 発表標題 Adsorption and Hydrogenation of CO ₂ on Heat-Treated Hydrogen Boride Sheets
3. 学会等名 33rd International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 後藤大河, 伊藤伸一, 近藤剛弘
2. 発表標題 ホウ化水素シート上へのCO ₂ の吸着と水素化反応
3. 学会等名 2020年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takahiro Kondo
2. 発表標題 Boron-based new two-dimensional materials: synthesis, characterization, and application
3. 学会等名 第60回 フラールン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計6件

産業財産権の名称 水素貯蔵放出材料およびその製造方法	発明者 近藤剛弘, 石引涼太, 後藤大河, 伊藤伸一, 木下喜裕	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-207861	出願年 2019年	国内・外国の別 国内
産業財産権の名称 二次元ホウ化水素含有シートの製造方法、二次元ホウ化水素含有シート組成物およびその製造方法	発明者 宮内雅浩, 河村玲哉, 近藤剛弘, 石引涼太	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-207081	出願年 2019年	国内・外国の別 国内
産業財産権の名称 層状ホウ化水素	発明者 近藤剛弘, 富中悟史	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-148099	出願年 2019年	国内・外国の別 国内
産業財産権の名称 水素貯蔵ならびに放出材料	発明者 宮内雅浩, 河村玲哉, 近藤剛弘	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2018-118560	出願年 2018年	国内・外国の別 国内
産業財産権の名称 二酸化炭素貯蔵ならびに放出材料	発明者 近藤剛弘, 藤野朝日, 石引涼太, 後藤大河, 伊藤伸一	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2018-204785	出願年 2018年	国内・外国の別 国内
産業財産権の名称 還元材料、複合体、還元方法	発明者 近藤剛弘, 藤野朝日, 石引涼太, 後藤大河, (他4名)	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-42011	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
研究協力者	中村 潤児 (Nakamura Junji) (40227905)	筑波大学・数理物質系・教授 (12102)	
研究協力者	藤田 武志 (Fujita Takeshi) (90363382)	高知工科大学・環境理工学群・教授 (26402)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	岡田 晋 (Okada Susumu) (70302388)	筑波大学・数理物質系・教授 (12102)	

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			
スペイン	CSIC			