

令和 4 年 5 月 23 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H00832

研究課題名(和文)革新的sp3機能電極材料の創製

研究課題名(英文)Development of innovative sp3 functional electrode materials

研究代表者

栄長 泰明(Einaga, Yasuaki)

慶應義塾大学・理工学部(矢上)・教授

研究者番号：00322066

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,900,000円

研究成果の概要(和文)：研究代表者がこれまで開発してきた「ダイヤモンド電極」のさらなる機能向上を目指し、安定性・耐久性を兼ね備えた高機能の「革新的sp3機能電極材料」の開発を行った。具体的には、不純物ドーパド炭化ケイ素(SiC)電極の創製とともに、従来のダイヤモンド電極の優位性を最大限活かした「高機能性ダイヤモンド電極」の創製を行った。例えば、sp3ダイヤモンド電極において、不純物sp2炭素成分やボウ素濃度などの重要なパラメーターの影響を詳細に検討することで、機能発現におけるそれらの寄与について調べた。特に、CO₂の電解還元性能に関して、それらの要因について明らかにするとともに、応用展開への知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

新機能電極材料として期待されているダイヤモンド電極の高機能化は、その電気化学応用において、環境、エネルギー問題、あるいは安心安全を実現する医療応用への実用化が期待されている。本研究で明らかにした高機能電極は、界面物性を含む基礎知見への学術的意義はもちろん、これらの応用展開に有益であると考えられる。

研究成果の概要(英文)：In order to improve the functions of the "boron-doped diamond (BDD) electrodes", we have developed a highly functional "innovative sp3 functional electrode material". Here, in the present work, we have developed a boron-doped silicon carbide (SiC) electrode and a high-performance diamond electrodes. For example, in sp3 BDD electrodes, the effects of important parameters such as the containing sp2 carbon species and the boron concentration were investigated in detail to investigate their contribution to the electrochemical properties. Especially, we have studied those factors for the electrochemical CO₂ reduction reaction.

研究分野：機能材料化学・電気化学

キーワード：電極材料 ダイヤモンド

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

研究代表者がこれまで開発してきた「ダイヤモンド電極」は、新規電極材料として、さまざまな電気化学応用に展開できることが期待されている。例えば、ダイヤモンド電極は、従来の電極 (sp^2 炭素電極・金属電極) に比べて電位窓が広く ($-1.2\text{ V} \sim 2.0\text{ V vs. Ag/AgCl}$)、バックグラウンド電流が小さい ($\sim 100\text{ nA/cm}^2$)。これらの特性は、電気化学センサー用途において有利である。すなわち、通常電極では酸化還元電位が酸素発生や水素発生に重なる対象物質においても測定可能であることに加え、バックグラウンド電流が小さいことで、S/B (シグナル/バックグラウンド) 比が大きくなり、高感度を示す。これは、 sp^3 炭素からなるダイヤモンド電極の界面が電気化学的に不活性であることが原因であると考えられ、ダイヤモンドの材料としての特殊性が、その電極としての機能のポテンシャルを示している。さらに、ダイヤモンドの材料としての安定性、従来電極材料で常に問題となる「耐久性」「繰り返し性能」について非常に優位性がある。

しかしながら、電気化学センサーとして産業化へ展開するにあたって、他電極材料に比べては大きな優位性が認められるものの、例えば微弱な電流値の再現性に関して、期待の割には十分とは言えないという例がみられた。当初より、この原因が「ダイヤモンド電極の電極特性を決める要因が複数存在すること」であるとわかってきた。すなわち、電極界面の終端元素、ドーピングされているホウ素濃度、多結晶体の粒界に存在する微量の sp^2 不純物炭素・ホウ素、結晶面、などが複雑に影響しつつ電極特性を決定していると考えられてきた。しかしながら、当初応用用途に主に用いられていたダイヤモンド電極は「多結晶体」であり、粒径数 μm の凹凸をもち、さまざまな結晶面がランダムに露出、さらに粒界の存在もその性質を複雑化している。

例えば、意図的に、界面の終端元素、ホウ素濃度、 sp^2 不純物炭素の含有、粒子サイズや粒界、あるいは結晶面方位を制御できれば、所望の電気化学特性をもつ電極を自在に創製できることが期待される。

2. 研究の目的

本研究では、上記に記した問題点を克服すべく、安定性・耐久性を兼ね備えた高機能の「革新的 sp^3 機能電極材料」開発を行う。その際、現状のダイヤモンド電極の優位性を最大限活かした「機能性ダイヤモンド電極」を開発するとともに、これまでに実現できなかった機能を発現する電極材料の開拓も行う。

所望の機能を発現する「機能電極」を創製するため、 sp^3 ダイヤモンド電極を基盤とし、実際にさまざまな機能発現に向けた計測を行う。

3. 研究の方法

(1) 不純物ドーピング炭化ケイ素 (SiC) 電極創製

製造プロセスを簡易化できる新電極材料創製の新しい試みとして、不純物ドーピング炭化ケイ素 (SiC) 電極、すなわち不純物ドーピングにより導電性を向上させた炭化ケイ素 (SiC) 電極の創製し、その電気化学特性を評価した。SiC は、ワイドギャップ半導体として、高い化学的安定性など、ダイヤモンドに類似の性質をもつ。これまで作製されてきた SiC は不純物ドーピングしておらず導電性が低いが、導電性が高い SiC を電極として利用できれば、ダイヤモンド電極と同等かそれを超える性能が期待できるのみならず、ダイヤモンドよりも製膜技術が確立されているため、製造プロセスの簡易化が期待できる。半導体としての SiC の研究例は多いが、導電性を向上させて電極として用いる試みは全く存在しないことから、その新機能の開拓を目指した。

具体的には、揮発性の液体原料テトラメチルシラン ($\text{Si}(\text{CH}_3)_4$) を気化することでマイクロ波プラズマ CVD 装置に導入して、Si 基板あるいは SiC 基板上に成長させる。この際、液体原料にホウ素源、例えば液体原料トリメトキシボロン ($\text{B}(\text{OCH}_3)_3$) を $\text{Si}(\text{CH}_3)_4$ に混合させることで合成を試みた。

(2) sp^2 不純物炭素含有ダイヤモンド電極

一般的に、ホウ素を高濃度に含むダイヤモンド電極は、 sp^2 不純物炭素が含まれるほど電位窓が狭くなり、充電電流も大きくなることで、ダイヤモンド電極としての優位な特徴が損なわれると考えられている。しかしながら、ホウ素を微量に含む ($\text{B/C} = 0.1\%$) ダイヤモンド電極では、その電気化学特性が異なる。本研究では、系統的に sp^2 不純物炭素を含ませたホウ素濃度 0.1% のダイヤモンド電極を作製し、その電気化学特性を評価した。

(3) 高機能ダイヤモンド電極による CO_2 電解還元

ホウ素濃度の異なるダイヤモンド電極

電気化学還元により CO_2 を原料として、これを有価物に変換する技術が求められている。研

究代表者らは、2018 年に、ダイヤモンド電極を用いることで、高効率にギ酸を生成することが可能であることを示してきたが (*Angew. Chem. Int. Ed.*2018) 本研究では、CO₂還元に対する高機能ダイヤモンド電極の探索として、ホウ素濃度制御による試み、それらを用いた CO₂還元性能について評価した。

電解質の制御

ダイヤモンド電極による CO₂の電解還元は、それまでの系では、主にギ酸が生成することがわかっていたが、反応系において電解質を変化させることによる CO₂還元性能について調べた。

4. 研究成果

(1) 不純物ドーパ炭化ケイ素 (SiC) 電極創製

炭素源およびケイ素源として メトキシトリメチルシラン、ホウ素源としてトリメチルボランを用いて MP-CVD による製膜を 3 時間行った結果、基板表面を粒径 20~100 nm の多結晶体が覆っていることが観察された。なお、このときの作製条件は、水素流量 500 sccm、チャンバー内圧力 55 Torr、マイクロ波出力 4 kW であり、基板温度は約 750°Cであった。ラマン分光において 800 cm⁻¹ 付近に 3C-SiC 由来のピークが観測されたこと、XRD において 35.6° と 60.7°にそれぞれ 3C-SiC の (111),(220) 面に対応する回折ピークが観測されたことから、生成物が 3C-SiC であることを確認した。また、GD-OES および SIMS から、ホウ素は薄膜の厚さ方向に均一に存在し、かつ濃度は合成時に導入した TMB 量に依存する ($\sim 2 \times 10^{22}$ cm⁻³) ことが明らかとなった。さらに、XRD においては、ホウ素濃度に依存して SiC の格子定数が変化することが確認された。以上より、ホウ素をドーパした SiC (SiC:B) の生成を確認した。

電気化学測定には、ホウ素濃度の異なる 3 種類の電極を用いた。ここでは、ホウ素をドーパしていない試料を SiC、ホウ素を低濃度 (10²¹cm⁻³) 含んだ試料を SiC:B-low、ホウ素を高濃度 (10²²cm⁻³)含んだ試料を SiC:B-high と表記する。

1 M の HClO₄ 水溶液を用いた測定では、広い電位窓や小さいバックグラウンド電流などが観測され、電気化学分析における電極材料としての有用性が示唆された。また、酸化還元物質として 1 mM の K₃[Fe(CN)₆] 水溶液を用いた測定では、ホウ素濃度が高いサンプルほど酸化還元電流が大きくなり、かつピーク間電位差が小さくなったことから (図 1a)、ホウ素をドーパすることによって電極としての反応性が向上していることが確認された。さらに、SiC:B-high 電極に関し、K₃[Fe(CN)₆] 水溶液の濃度と酸化ピークの電流値との関係をプロットしたところ、良好な直線関係が見られ (図 1b)、かつ 0.005 mM の濃度においても明瞭な酸化還元ピークが観測された

ことから、SiC:B-high 電極は電気化学分析において有用であることが示唆された。また、酸化還元物質として、[Ru(NH₃)₆]Cl₂ やドーパミンなどを用いた測定においても明瞭な酸化還元ピークが観測された。一連の電気化学測定から、作製した SiC:B-high 電極は汎用的な電極材料であるグラッシーカーボンと同程度の電気化学特性を示すことを明らかとした。

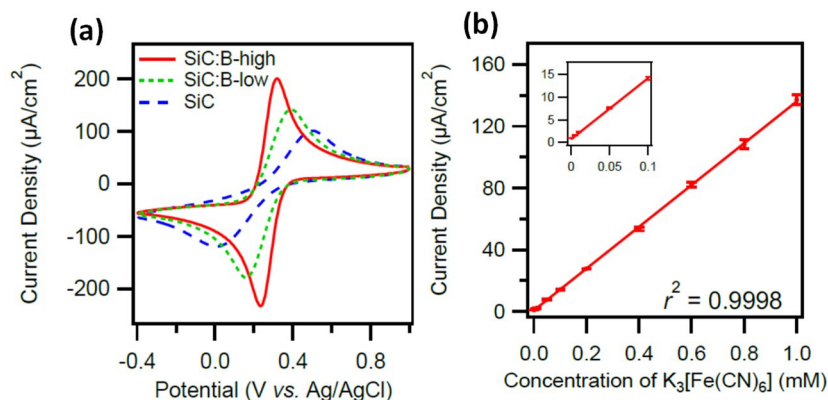


図 1 (a) [Fe(CN)₆]^{3-/4-} レドックス特性 (赤: SiC:B-high, 緑: SiC:B-low, 青: SiC) (b) K₃[Fe(CN)₆]濃度依存性 (SiC:B-high 電極)

(2) sp²不純物炭素含有ダイヤモンド電極

ホウ素を低濃度 (0.1%) にドーパしたダイヤモンド電極を作製する際、マイクロ波プラズマ CVD 装置による作製条件を制御することで、sp²不純物炭素成分を系統的に変化させた試料を作製した。すなわち、sp²成分を含まないもの、sp²成分をやや含むもの、sp²成分を多く含むもの、の 3 種類についてそれらの電気化学特性を評価した。

通常のダイヤモンド電極 (例えばホウ素濃度 1%) では、sp²不純物炭素成分を含むほど電位窓

は狭くなり、充電電流値も大きくなるなど、いわゆるダイヤモンド電極としての特徴から離れてゆく(図2b)。しかしながら、ホウ素を低濃度に含むダイヤモンド電極では、 sp^2 成分を多く含むものほど電位窓が広いという特徴を示した(図2a)。さまざまな酸化還元種のレドックスや、XPS/UPSによる表面解析などを行い、その詳細について議論した。低濃度にホウ素をドーブした半導体的なダイヤモンド電極は、表面の末端酸素が多くなること、キャリア密度が低いこと、非晶質炭素等の影響が大きくなることなどが原因であると考えられ、この特徴を活かした応用展開も期待される。

(3) 高機能ダイヤモンド電極による CO_2 電解還元 ホウ素濃度の異なるダイヤモンド電極

ダイヤモンド電極は、含有するホウ素濃度により、電気化学特性が変化することが知られている。そこで、陰極として0.01%、0.1%、0.5%、1%、2%のダイヤモンド電極を作製し、印加電流密度 -2.0 mA cm^{-2} で1時間電解を行うことで、 CO_2 還元におけるホウ素濃度の影響を検討した。その結果、 CO_2 還元生成物として主にギ酸が得られ、少量の一酸化炭素生成と水素発生も見られた(図3)。ギ酸生成の電流効率は、ホウ素濃度が0.1%のときに最大となり、ホウ素濃度が増えるほど減少した。一方、一酸化炭素生成の電流効率は、ホウ素濃度が増えるとともに増加した。競合反応である水素発生は、ホウ素濃度が高いほど増加した。ダイヤモンド電極は、ホウ素濃度が高いほど、電位窓が狭くなるため、水素発生が起こりやすくなったと考えられる。また、一酸化炭素は CO_2 アニオンラジカルが吸着しやすい電極で生成しやすいことから、ホウ素濃度が高いダイヤモンド電極の方が中間体を吸着しやすかったことが示唆された。

以上より、ダイヤモンド電極での CO_2 還元においては、ホウ素濃度により生成物の電流効率が影響を受けることが見出された。特に、ギ酸生成には、ホウ素濃度0.1%のダイヤモンド電極が適することが示唆された。

電解質の制御：CO(一酸化炭素)の生成

これまで、電解質としてKClを主に用いてきたが、 $KClO_4$ を電解質とすると他の電解質を用いた場合に比べ一酸化炭素生成の電流効率が高かった。そこで、一酸化炭素生成の電流効率や選択性の向上を目指し、電解質を $KClO_4$ としたときの電解について詳細に検討した。

はじめに、陰極に0.1%ダイヤモンド電極、電解質に $KClO_4$ を用いて、印加電位依存性を検討したところ、一酸化炭素とギ酸が得られた。一酸化炭素生成の電流効率は、 -2.1 V (vs. Ag/AgCl)で最大となった。ここで、印加電位 -2.1 V (vs. Ag/AgCl)で、前節においてギ酸を高効率で生成していた電解質、KClを用いて電解を行い、比較した(図4a)。KClが電解質のときには、ギ酸生成の電流効率が非常に高かった。このことから、 $KClO_4$ が電解質のときには一酸化炭素が生成しやすく、KClが電解質のときにはギ酸が生成しやすいことが示唆された。一酸化炭素は CO_2^- が吸着する電極上で生成しやすく、ギ酸は CO_2^- が吸着しにくい電極で生成しやすいことをふまえると、電解質が $KClO_4$ のときには CO_2^- が電極に吸着しやすく、電解質がKClのときには CO_2^- が電極に吸着しにくいと考えられる。

そこで、 CO_2^- の存在状態を調べるため、反応その場での観測が可能な全反射測定赤外分光(ATR-IR)を行った。 CO_2 還元中のATR-IR測定を $KClO_4$ とKClの水溶液中でそれぞれ行ったところ、 1600 cm^{-1} 付近に CO_2^- のOCO逆対称伸縮振動に帰属されるピークが観測された。この

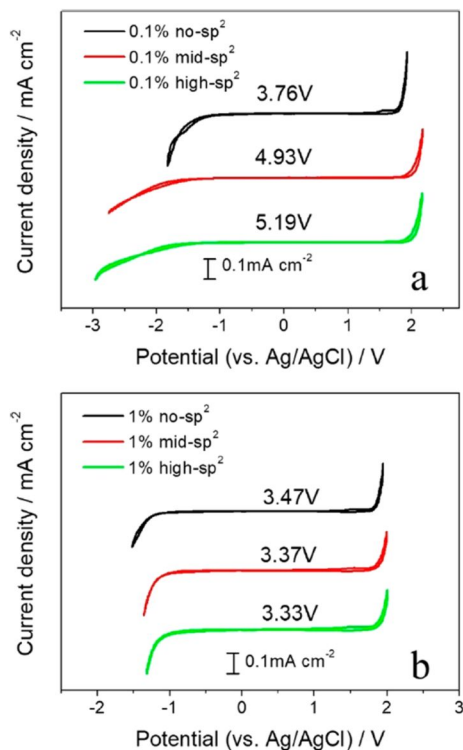


図2 電位窓：(a) 0.1%BDD,(b) 1%BDD

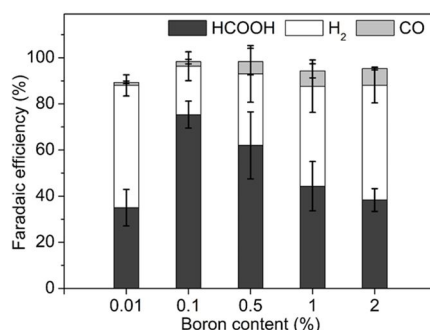


図3 CO_2 還元生成物のホウ素濃度依存性

化学種の波数を2種の溶液で比較すると、 KClO_4 水溶液中では 1634 cm^{-1} 、 KCl 水溶液中では 1616 cm^{-1} であった(図4b)。これは、 CO_2^- の存在状態が電解質により異なるためであると考えられる。

さらに CO_2^- の状態を検討するため、 $^{13}\text{CH}_4$ ガスを原料として成膜したダイヤモンド電極を用いた同様なATR-IR測定を行った。 CO_2^- に帰属されるピークは、 KClO_4 水溶液中でのみ 1634 cm^{-1} から 1624 cm^{-1} へのシフトが見られた。 KClO_4 水溶液中でのみ電極の同位体ラベリングの

影響が観測されたことから、 KClO_4 水溶液中では CO_2^- が電極に吸着し、 KCl 水溶液中では CO_2^- は遊離した状態で存在すると考えられる。このような反応中間体の存在状態の違いにより、生成物の選択性が制御されたと考えられる。

さらに、一酸化炭素生成の選択性や電流効率を向上させるため、ダイヤモンド電極のホウ素濃度や電解液の流速などの条件検討を行った。その結果、電解質は KClO_4 、陰極はホウ素濃度1%のダイヤモンド電極とすることで、一酸化炭素を最大68%の電流効率で生成することを達成した。

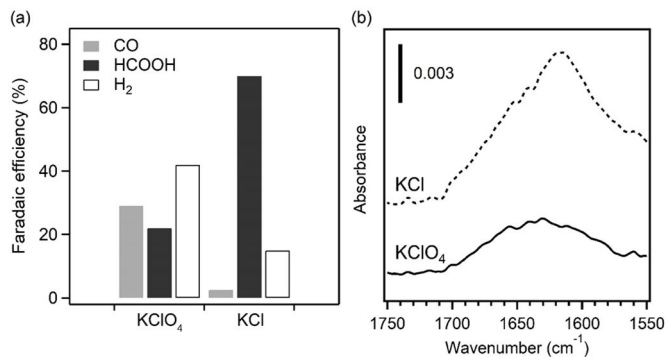


図4 (a) 電解質溶液による CO_2 還元生成物の
(b) CO_2 還元中の *in situ* ATR-IR 測定

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計30件（うち査読付論文 19件 / うち国際共著 5件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Triana Yunita, Ogata Genki, Tomisaki Mai, Irkham, Einaga Yasuaki	4. 巻 94
2. 論文標題 Blood Oxygen Sensor Using a Boron-Doped Diamond Electrode	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Analytical Chemistry	6. 最初と最後の頁 3948 ~ 3955
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.analchem.1c04999	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 Peng Zhen, Xu Jing, Kurihara Kaori, Tomisaki Mai, Einaga Yasuaki	4. 巻 120
2. 論文標題 Electrochemical CO2 reduction on sub-microcrystalline boron-doped diamond electrodes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Diamond and Related Materials	6. 最初と最後の頁 108608 ~ 108608
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.diamond.2021.108608	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 Ivandini Tribidasari A., Einaga Yasuaki	4. 巻 94
2. 論文標題 Electrochemical Sensing Applications Using Diamond Microelectrodes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Bulletin of the Chemical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 2838 ~ 2847
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/bcsj.20210296	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 Sakanoue Kohei, Fiorani Andrea, Irkham, Einaga Yasuaki	4. 巻 3
2. 論文標題 Effect of Boron-Doping Level and Surface Termination in Diamond on Electrogenenerated Chemiluminescence	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Applied Electronic Materials	6. 最初と最後の頁 4180 ~ 4188
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsaem.1c00620	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 Jiwanti Prastika Krisma, Sultana Sharmin, Wicaksono Wiyogo Prio, Einaga Yasuaki	4. 巻 898
2. 論文標題 Metal modified carbon-based electrode for CO2 electrochemical reduction: A review	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Electroanalytical Chemistry	6. 最初と最後の頁 115634 ~ 115634
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jelechem.2021.115634	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 Catalan Francesca Celine I., Anh Le The, Oh Junepyo, Kazuma Emiko, Hayazawa Norihiko, Ikemiya Norihito, Kamoshida Naoki, Tateyama Yoshitaka, Einaga Yasuaki, Kim Yousoo	4. 巻 33
2. 論文標題 Localized Graphitization on Diamond Surface as a Manifestation of Dopants	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advanced Materials	6. 最初と最後の頁 2103250 ~ 2103250
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adma.202103250	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 The Anh Le, Catalan Francesca Celine I., Kim Yousoo, Einaga Yasuaki, Tateyama Yoshitaka	4. 巻 23
2. 論文標題 Boron position-dependent surface reconstruction and electronic states of boron-doped diamond(111) surfaces: an ab initio study	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Chemistry Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 15628 ~ 15634
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d1cp00689d	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 Tomisaki Mai, Natsui Keisuke, Fujioka Satoko, Terasaka Koichi, Einaga Yasuaki	4. 巻 389
2. 論文標題 Unique properties of fine bubbles in the electrochemical reduction of carbon dioxide using boron-doped diamond electrodes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Electrochimica Acta	6. 最初と最後の頁 138769 ~ 138769
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.electacta.2021.138769	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 Ivandini Tribidasari A., Luhur Muhammad S. P., Khalil Munawar, Einaga Yasuaki	4. 巻 146
2. 論文標題 Modification of boron-doped diamond electrodes with gold-palladium nanoparticles for an oxygen sensor	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Analyst	6. 最初と最後の頁 2842 ~ 2850
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d0an02414g	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 Kuang Peijing, Natsui Keisuke, Einaga Yasuaki, Feng Chuanping, Cui Yubo, Zhang Wanjun, Deng Yang	4. 巻 114
2. 論文標題 Annealing enhancement in stability and performance of copper modified boron-doped diamond (Cu-BDD) electrode for electrochemical nitrate reduction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Diamond and Related Materials	6. 最初と最後の頁 108310 ~ 108310
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.diamond.2021.108310	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 Du Jinglun, Fiorani Andrea, Einaga Yasuaki	4. 巻 5
2. 論文標題 An efficient, formic acid selective CO2 electrolyzer with a boron-doped diamond cathode	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sustainable Energy & Fuels	6. 最初と最後の頁 2590 ~ 2594
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d1se00309g	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 Irkham, Nagashima Shinichi, Tomisaki Mai, Einaga Yasuaki	4. 巻 9
2. 論文標題 Enhancing the Electrochemical Reduction of CO2 by Controlling the Flow Conditions: An Intermittent Flow Reduction System with a Boron-Doped Diamond Electrode	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Sustainable Chemistry and Engineering	6. 最初と最後の頁 5298 ~ 5303
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acssuschemeng.0c08955	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 Uchiyama Kazuki, Yamamoto Takashi, Einaga Yasuaki	4. 巻 174
2. 論文標題 Fabrication and electrochemical properties of boron-doped SiC	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Carbon	6. 最初と最後の頁 240 ~ 247
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.carbon.2020.12.017	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 Asai Kai, Yamamoto Takashi, Nagashima Shinichi, Ogata Genki, Hibino Hiroshi, Einaga Yasuaki	4. 巻 145
2. 論文標題 An electrochemical aptamer-based sensor prepared by utilizing the strong interaction between a DNA aptamer and diamond	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Analyst	6. 最初と最後の頁 544 ~ 549
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9AN01976F	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 Xu Jing, Yokota Yasuyuki, Wong Raymond A., Kim Yousoo, Einaga Yasuaki	4. 巻 142
2. 論文標題 Unusual Electrochemical Properties of Low-Doped Boron-Doped Diamond Electrodes Containing sp ² Carbon	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the American Chemical Society	6. 最初と最後の頁 2310 ~ 2316
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.9b11183	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 Jiwanti Prastika Krisma, Einaga Yasuaki	4. 巻 15
2. 論文標題 Further Study of CO ₂ Electrochemical Reduction on Palladium Modified BDD Electrode: Influence of Electrolyte	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemistry An Asian Journal	6. 最初と最後の頁 910 ~ 914
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/asia.201901669	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 Agustiany Tia, Khalil Munawar, Einaga Yasuaki, Jiwanti Prastika K., Ivandini Tribidasari A.	4. 巻 244
2. 論文標題 Stable iridium-modified boron-doped diamond electrode for the application in electrochemical detection of arsenic (III)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Materials Chemistry and Physics	6. 最初と最後の頁 122723 ~ 122723
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.matchemphys.2020.122723	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 Matsubara Teruhiko, Ujie Michiko, Yamamoto Takashi, Einaga Yasuaki, Daidoji Tomo, Nakaya Takaaki, Sato Toshinori	4. 巻 5
2. 論文標題 Avian Influenza Virus Detection by Optimized Peptide Termination on a Boron-Doped Diamond Electrode	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Sensors	6. 最初と最後の頁 431 ~ 439
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acssensors.9b02126	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 Kuang Peijing, Natsui Keisuke, Feng Chuanping, Einaga Yasuaki	4. 巻 251
2. 論文標題 Electrochemical reduction of nitrate on boron-doped diamond electrodes: Effects of surface termination and boron-doping level	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemosphere	6. 最初と最後の頁 126364 ~ 126364
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.chemosphere.2020.126364	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 Xu Jing, Einaga Yasuaki	4. 巻 115
2. 論文標題 Effect of sp ² species in a boron-doped diamond electrode on the electrochemical reduction of CO ₂	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Electrochemistry Communications	6. 最初と最後の頁 106731 ~ 106731
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.elecom.2020.106731	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 Jiwanti Prastika K., Ichzan Andi M., Dewandaru Respati K.P., Atriardi Shafrizal R., Einaga Yasuaki, Ivandini Tribidasari A.	4. 巻 106
2. 論文標題 Improving the CO ₂ electrochemical reduction to formic acid using iridium-oxide-modified boron-doped diamond electrodes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Diamond and Related Materials	6. 最初と最後の頁 107874 ~ 107874
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.diamond.2020.107874	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 Fiorani Andrea, Valenti Giovanni, Irkham, Paolucci Francesco, Einaga Yasuaki	4. 巻 22
2. 論文標題 Quantification of electrogenerated chemiluminescence from tris(bipyridine)ruthenium(ii) and hydroxyl ions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Chemistry Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 15413 ~ 15417
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0CP02005B	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 Triana Yunita, Tomisaki Mai, Einaga Yasuaki	4. 巻 873
2. 論文標題 Oxidation reaction of dissolved hydrogen sulfide using boron doped diamond	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Electroanalytical Chemistry	6. 最初と最後の頁 114411 ~ 114411
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jelechem.2020.114411	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 Jiwanti Prastika Krisma, Einaga Yasuaki	4. 巻 21
2. 論文標題 Electrochemical reduction of CO ₂ using palladium modified boron-doped diamond electrodes: enhancing the production of CO	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Chemistry Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 15297 ~ 15301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9CP01409H	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 Tomisaki Mai, Kasahara Seiji, Natsui Keisuke, Ikemiya Norihito, Einaga Yasuaki	4. 巻 141
2. 論文標題 Switchable Product Selectivity in the Electrochemical Reduction of Carbon Dioxide Using Boron-Doped Diamond Electrodes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the American Chemical Society	6. 最初と最後の頁 7414 ~ 7420
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.9b01773	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 Verlato Enrico, Barison Simona, Einaga Yasuaki, Fasolin Stefano, Musiani Marco, Nasi Lucia, Natsui Keisuke, Paolucci Francesco, Valenti Giovanni	4. 巻 7
2. 論文標題 CO2 reduction to formic acid at low overpotential on BDD electrodes modified with nanostructured CeO2	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Materials Chemistry A	6. 最初と最後の頁 17896 ~ 17905
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/c9ta01000a	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 Irkham Irkham, Einaga Yasuaki	4. 巻 144
2. 論文標題 Oxidation of hydroxide ions in weak basic solutions using boron-doped diamond electrodes: effect of the buffer capacity	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Analyst	6. 最初と最後の頁 4499 ~ 4504
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/c9an00505f	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 Yamaguchi Chizu, Natsui Keisuke, Iizuka Shota, Tateyama Yoshitaka, Einaga Yasuaki	4. 巻 21
2. 論文標題 Electrochemical properties of fluorinated boron-doped diamond electrodes via fluorine-containing plasma treatment	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Chemistry Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 13788 ~ 13794
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C8CP07402J	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 Natsui Keisuke, Hosomi Tomoko, Ikemiya Norihito, Einaga Yasuaki	4. 巻 15
2. 論文標題 Electrochemical mineralization of dimethyl sulfoxide on boron-doped diamond electrodes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Environmental Technology & Innovation	6. 最初と最後の頁 100409 ~ 100409
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.eti.2019.100409	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 Muharam Salih, Jiwanti Prastika K., Irkham, Gunlazuardi Jarnuzi, Einaga Yasuaki, Ivandini Tribidasari A.	4. 巻 99
2. 論文標題 Electrochemical oxidation of palmitic acid solution using boron-doped diamond electrodes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Diamond and Related Materials	6. 最初と最後の頁 107464 ~ 107464
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.diamond.2019.107464	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 -

〔学会発表〕 計21件 (うち招待講演 20件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 栄長泰明
2. 発表標題 ダイヤモンドマイクロ電極のリアルタイム生体計測への応用
3. 学会等名 電気化学会第88回大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 栄長泰明
2. 発表標題 ダイヤモンド電極を用いた薬物・生体内物質の生体内リアルタイム計測
3. 学会等名 第1回領域融合セミナー (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宋長泰明
2. 発表標題 ダイヤモンド電極の応用展開
3. 学会等名 第 59 回センサ&アクチュエータ技術シンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasuaki Einaga
2. 発表標題 Electrochemical Application on Boron-doped Diamond Electrodes
3. 学会等名 The 18th International Symposium on Electroanalytical Chemistry (ISEAC) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasuaki Einaga
2. 発表標題 Electrochemical CO2 reduction using boron-doped diamond electrodes
3. 学会等名 2d Workshop Nanotechnologies for 21st Century (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasuaki Einaga
2. 発表標題 Electrochemical Application on Boron-doped Diamond Electrodes
3. 学会等名 Asianalysis XV (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 栄長 泰明
2. 発表標題 ダイヤモンド電極の最近の展開と電気化学センサーへの応用
3. 学会等名 日本機能水学会第19回学術大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasuaki Einaga
2. 発表標題 Development of electrochemical application on boron-doped diamond electrodes
3. 学会等名 2021 MRS Fall Meeting（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 栄長 泰明
2. 発表標題 ダイヤモンド電極の応用
3. 学会等名 新規事業研究会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 栄長 泰明
2. 発表標題 Electrochemical application of boron-doped diamond electrodes
3. 学会等名 NANOTECHNOLOGIES FOR 21st CENTURY COOPERATION EVENT BETWEEN ALBANIA（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宋長泰明
2. 発表標題 ダイヤモンド電極でのCO2還元による有用物質生成
3. 学会等名 第25回シンポジウム光触媒反応の最近の展開（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宋長泰明
2. 発表標題 ダイヤモンド電極でのCO2還元による有用物質生成
3. 学会等名 第44回電解技術討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宋長泰明
2. 発表標題 次世代電極材料：ダイヤモンド電極を利用した環境改善・医療応用への展開
3. 学会等名 ナノ茶論第1回セミナー（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宋長泰明
2. 発表標題 ダイヤモンド電極を用いた CO2還元による有機物生成
3. 学会等名 CCTワークショップ2019（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasuaki Einaga
2. 発表標題 Electrochemical application of boron-doped diamond electrodes
3. 学会等名 The Seventeenth International Symposium on Electroanalytical Chemistry & The Third International Meeting on Electrogenerated Chemiluminescence (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宋長泰明
2. 発表標題 ダイヤモンド電極による環境計測および生体計測
3. 学会等名 日本分析化学会第68年会研究懇談会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宋長泰明
2. 発表標題 ダイヤモンド電極の機能と応用
3. 学会等名 日本機能水学会第18回学術大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宋長泰明
2. 発表標題 Application of boron-doped diamond electrodes
3. 学会等名 International Symposium on Carbon Materials in Energy and Environment Field, Mianyang (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宋長泰明
2. 発表標題 ダイヤモンド電極を用いたCO2の電解還元
3. 学会等名 太陽エネルギー化学研究センターシンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasuaki Einaga
2. 発表標題 Boron-doped diamond electrodes for CO2 reduction
3. 学会等名 The 3rd International Symposium on Recent Progress of Energy and Environmental Photocatalysis (Photocatalysis 3) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasuaki Einaga
2. 発表標題 Electrochemical application on boron-doped diamond electrodes
3. 学会等名 Materials Research Meeting (MRM) 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Yasuaki Einaga	4. 発行年 2022年
2. 出版社 Springer Nature	5. 総ページ数 248
3. 書名 Diamond Electrodes	

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------