

令和 6 年 6 月 2 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K05225

研究課題名（和文）金属性の金属酸ナノシートのボトムアップ合成とそれを用いた光学的異方性薄膜の作製

研究課題名（英文）Bottom-up synthesis of metalate nanosheets with metallic properties and the fabrication of thin films with highly anisotropic optical properties by using their nanosheets

研究代表者

伴 隆幸（Ban, Takayuki）

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号：70273125

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：厚さが1 nm程度の二次元材料であるフレーク状金属酸ナノシート（金属酸ナノフレーク）の合成法をこれまでに見出している。これまでに合成したものは絶縁性のものであったが、本研究では、高い電気伝導性のルテニウム酸ナノフレークが合成できることや、水の電気分解の電極にそれを用いると水素発生が促進することを見出した。

また、チタン酸ナノフレークゾルから層状チタン酸塩の配向薄膜を作製し、その構造異方性が、光学物性である屈折率に与える影響を調べた。層状チタン酸塩の層間が短いときは等方的であったが、層間距離が長くなるに従い、厚さ方向と表面方向で屈折率が異なる異方性が現れることが確かめられた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我々が見出した「金属酸ナノフレークのボトムアップ合成法」は、基礎科学的な「水溶液の化学」に基づいてみると、あまり用いられないpH調整剤を用いることで見出された、これまで見落とされていた化学的現象であると見ることができる。よって、この「化学的現象」を「機能性材料の合成」に展開することは、学術的に意義がある。

この合成法で得られるナノフレークは、面内サイズの小さい二次元構造をもつ。よって本研究では、ナノフレークの小さい形態を利用した触媒への応用と、ナノフレークの二次構造が作り出す「構造の異方性」が「物性の異方性」にどのように影響するのかを検討し、興味深い知見が得られた。

研究成果の概要（英文）：Previously, we found out the bottom-up synthesis of flake-like metalate nanosheets (metalate nanoflakes) by aqueous solution process. Until now, only insulative metalate nanoflakes have been synthesized by this method. In this study, ruthenate nanoflakes with a high electric conductivity were synthesized. Moreover, the catalytic properties of the ruthenate nanoflakes were also investigated. For electrochemical water-splitting, the ruthenate nanoflakes played an important role in the facilitation of hydrogen evolution reaction.

Layered titanate thin films with high orientations were fabricated from aqueous sols of titanate nanoflakes. The influence of highly anisotropic structures of the thin films on their properties was investigated. With increasing the interval of titanate layers, the difference in refractive index between in-plane direction and out-of-plane one became larger, resulting in highly anisotropic optical properties.

研究分野：無機材料化学

キーワード：ナノ材料合成 ナノシート 水溶液化学 薄膜 ゼルゲル法 ハイブリッド材料 ナノフレーク

1. 研究開始当初の背景

金属酸ナノシートは、層状金属酸塩の結晶構造中の金属酸層が層剥離によりナノシートとなったものである。多くの場合、厚さが1 nm程度しかなく、高い構造異方性をもつ二次元材料である。我々はこれまでに、フレーク状の金属酸ナノシート(金属酸ナノフレーク)のボトムアップ合成法を見出している。例えばチタン酸ナノフレークは、チタンアルコキシドと、嵩高い有機陽イオンの水酸化物である水酸化テトラアルキルアンモニウムを水溶液中で混合するだけで合成される。チタンアルコキシドが加水分解して生じた水酸化チタンがチタン酸として水酸化テトラアルキルアンモニウムと酸塩基反応することで、層間に嵩高い有機陽イオンをもつ層状チタン酸塩が合成される。層間陽イオンが嵩高い有機陽イオンだと水溶液中で容易に層剥離が起こり、チタン酸ナノフレークが生成する(図1)。しかし、これまで検討してきた金属酸ナノフレークは、絶縁性のものばかりであった。そこで、機能性材料への応用のために、高い電気伝導性をもつ金属酸ナノフレークのボトムアップ合成を検討することとした。

また、二次元材料をビルディングブロックとして作製した材料には、二次元材料の構造異方性に起因した物性の異方性を付与することができる。さらにその物性の異方性を利用した興味深い特性が生み出される可能性もある。これまでに、チタン酸ナノフレークのゾルを用いて高配向性の層状チタン酸塩薄膜をゾルゲル法で作製し、その屈折率の異方性を評価したところ、屈折率の異方性は認められず等方的な屈折率となった。そこで、金属酸ナノフレークの構造異方性を物性の異方性につなげるためには何が必要となるのかを明らかにすることも検討することとした。

さらに、金属電導層と絶縁層との交互積層はハイパーポリックメタマテリアルと呼ばれる材料を与え、回折限界よりも高い分解能をもったレンズに応用できることが知られている。上に示した二つの検討をもとに、高い電気伝導性のナノフレークを用いて高配向性の層状金属酸塩薄膜を作製する。その層状金属酸塩では、金属酸層が高電導層に、層間が絶縁層になり、電導層と絶縁層の繰返し周期が非常に短いハイパーポリックメタマテリアルができる可能性がある。そこで、その可能性を検証することを考えた。

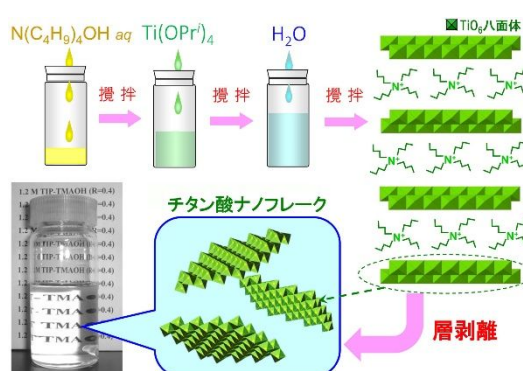


図1 チタン酸ナノフレークのボトムアップ合成法

2. 研究の目的

(1) ルテニウム酸ナノフレークやバナジン酸ナノフレークのボトムアップ合成

我々が見出した金属酸ナノフレークのボトムアップ合成法で、これまでに絶縁性の金属酸ナノフレークばかり合成してきた。そこで、この合成法を機能材料作製へ応用するために、高い電気伝導性を示すことが知られているルテニウム酸ナノシートや、高い電導性が期待される、混合原子価をもつバナジン酸ナノフレークをボトムアップ合成することを目的とした。

(2) チタン酸ナノフレークのコロイド水溶液を用いた層状チタン酸塩薄膜の作製と屈折率評価

予備実験として、層間陽イオンの多くが H^+ または H_3O^+ である層状チタン酸塩の薄膜の屈折率を評価した結果、高配向性という高い構造異方性にもかかわらず、光学物性である屈折率は等方的であった。そこで、種々の層間距離をもつ高配向性の層状チタン酸塩薄膜を、ナノフレークゾルから作製し、その層間距離と屈折率の異方性の関係を調べることにした。これにより、金属酸ナノフレークをビルディングブロックとした高配向性薄膜の構造異方性が、物性の異方性にどのように影響するのかを明らかにすることを目的とした。

(3) ルテニウム酸ナノフレークの触媒および助触媒特性

当初の予定では、(1)と(2)の結果を踏まえて、高い電気伝導性をもつ金属酸層からなる高配向性の層状金属酸塩の薄膜を作製し、その屈折率評価からハイパーポリックメタマテリアルへの応用の可能性を検討する予定であった。しかし、(2)の検討が予定より手間取ったため、(1)の検討で得られたルテニウム酸ナノフレークに対して、その二次元構造を生かした別の物性を評価することとした。

酸化ルテニウムは、光触媒の助触媒として用いた場合、水の酸素と水素への光分解において酸素発生を活性化することが知られている。そこで、二次元構造をもつ可視光応答型光触媒である $g-C_3N_4$ と、ルテニウム酸ナノフレークとの2D/2D ナノコンポジットを作製し、これを電極として用いた水の電気分解および光電気分解を検討することを新たな目的とした。ルテニウム酸ナノフレークの触媒や助触媒としての活性や、それに対するナノフレークの二次元構造の有効性を評価することとした。

3. 研究の方法

(1) ルテニウム酸ナノフレークやバナジウム酸ナノフレークのボトムアップ合成

金属源を変える以外は基本的に、上に示したチタン酸ナノフレークのボトムアップ合成法と同様の方法で、それぞれの金属酸ナノフレークの合成を検討した。必要に応じて、耐圧容器を用いて、反応ゾルの加熱も行った。

(2) チタン酸ナノフレークのコロイド水溶液を用いた層状チタン酸塩薄膜の作製と屈折率評価

層状チタン酸塩薄膜を、チタン酸ナノフレークのゾルを用いてスピンコーティング法により作製した。様々な層間距離をもつ層状チタン酸塩の薄膜を作製するために、ゾルの調製に用いる、嵩高い有機陽イオンの水酸化物の種類を変えることで、層状チタン酸塩の層間に入る陽イオンを変化させた。また、作製した薄膜の屈折率とその波長分散をエリブソメータで評価した。

より大きな屈折率の異方性が期待される、さらに大きな層間距離の層状チタン酸塩の薄膜を作製するために、層間陽イオンを、長鎖アルキル基をもつ陽イオン性界面活性剤とした薄膜の作製も検討した。界面活性剤とチタン酸ナノフレークがともに溶解および分散したゾルは沈殿生成により調製できないため、層状チタン酸塩薄膜をあらかじめ作製して層間陽イオンをイオン交換するなどの作製法を検討した。また、結果として得られる薄膜は凸凹した表面になるため、その改善法も検討した。

(3) ルテニウム酸ナノフレークの触媒および助触媒特性

二次元構造をもつ可視光応答型光触媒である $g\text{-C}_3\text{N}_4$ とルテニウム酸ナノフレークの 2D/2D ナノコンポジット粉末を含浸法で調製した。その粉末における $g\text{-C}_3\text{N}_4$ とルテニウム酸ナノフレークの相互作用について評価した。また、その粉末を用いて FTO 基板上に作製した薄膜を電極として、水の電気分解と光電気分解を検討した。電解液は、 Na_2SO_4 水溶液、 H_2SO_4 水溶液、 NaOH 水溶液などを用いて、その電気分解の pH の影響を調べた。また、ルテニウム酸ナノフレークの代わりに酸化ルテニウム RuO_2 ナノ粒子を用いて、ナノフレークの二次元構造や、 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ との 2D/2D ナノコンポジットの形成の有効性を調べた。

4. 研究成果

(1) ルテニウム酸ナノフレークやバナジウム酸ナノフレークのボトムアップ合成

まず、ルテニウム酸ナノフレークの合成を検討した。ナノフレーク生成には金属源が大きく影響した。塩化ルテニウム $\text{RuCl}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ を用いるとナノフレークが合成されるものの、 $\text{RuO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ や $(\text{NH}_4)_2\text{RuCl}_6$ ではナノフレークは生成しなかった。生成したナノフレーク中のルテニウムイオン Ru^{n+} の酸化数はほとんど +4 であったが、4 価より 3 価のルテニウムイオンを含む原料が有効であった。つまり層構造の形成において Ru^{3+} が重要な役割を担っていると考えられた。また、反応ゾルには酸化剤は添加していないものの、 $\text{N}(\text{CH}_3)_4\text{OH}$ や $\text{N}(\text{C}_4\text{H}_9)_4\text{OH}$ などの添加で反応溶液が塩基性になると、溶存酸素によるルテニウムイオンの酸化が起こることも分かった。

次に、ルテニウム酸ナノフレークの形態を観察した。面内サイズが 20 nm 程度の小さいフレーク状のものであった (図 2)。また、得られたナノフレークはゾル中で高い分散性を示すものの (図 2)、 $\text{N}(\text{CH}_3)_4\text{OH}$ を用いたゾルでは、ゾル中の Cl^- や過剰な $\text{N}(\text{CH}_3)_4\text{OH}$ を除去するためにナノフレークを 2-プロパノールで洗浄したり、ゾルを透析したりすると、沈殿中の $\text{N}(\text{CH}_3)_4\text{OH}$ が過度に除去されて水に再分散しにくくなることが分かった。これはチタン酸ナノフレークなどでは見られない現象であるが、薄膜作製やナノコンポジット作製においては有効に活用できると考えられる。

つまり、ゾルをコーティングした後、または他のナノ粉末と混合して乾燥した後に、2-プロパノールで洗浄するだけで安定性が向上することが期待される。

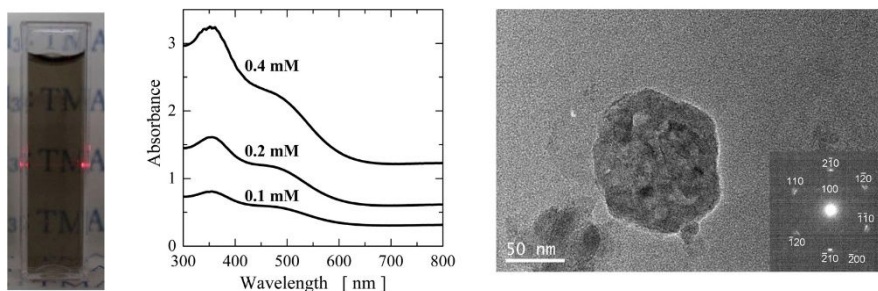


図 2 ルテニウム酸ナノフレークのゾルの外観と UV-vis スペクトルとルテニウム酸ナノフレークの凝集体の TEM 像

ルテニウム酸ナノフレークのゾルを用いて薄膜を作製して電気伝導度を評価した。フレーク状で面内サイズが小さいため、ナノフレーク間の電子移動に対する抵抗が大きくなり、これまでに報告されているルテニウム酸ナノシートに比べると電気伝導性は低かったものの、比較的高い電導性を示すことが確かめられた。

さらに、混合原子価のバナジウムイオンをもつバナジウム酸ナノフレークの合成も検討した。低い合成温度では高収率で合成することができなかったが、混合原子価の層状バナジウム酸塩は 180°C で水熱合成できた。しかし、層間に $\text{N}(\text{CH}_3)_4^+$ のような嵩高い有機陽イオンが存在するにもかかわらず、層剥離は起こらず、バナジウム酸ナノシートやナノフレークは生成しなかった。高

温での熱処理が影響していると考えられ、合成温度の低温化が必要と思われる。

この層状バナジウム酸塩の結晶化について詳しく調べた結果、面白い挙動が観察された。嵩高い有機陽イオンが層間に入ったものような、層間が非常に広い層状化合物の結晶は、層に水平な方向に大きく結晶成長し、積層方向にはあまり成長しない。しかしこの層状化合物は、結晶化の初期段階で積層方向に大きく成長した後、層と水平な方向に結晶成長することが分かった(図3)。このような結晶成長挙動は薄膜の配向制御に利用でき、層間を利用するリチウムイオン電池などへの応用において有効な配向性をもつ薄膜の作製に生かせる可能性がある。

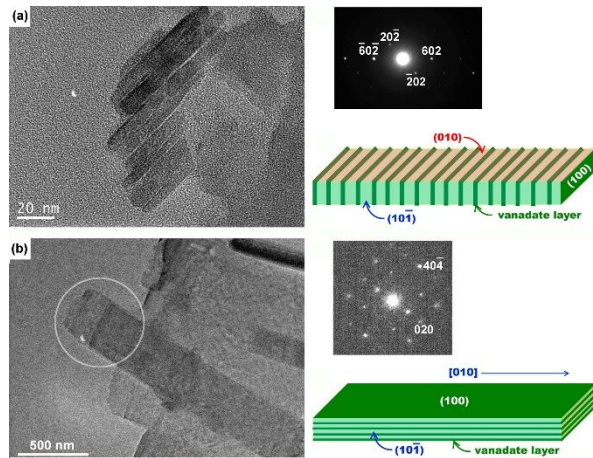


図3 (a)結晶化の初期段階と(b)結晶成長後の層状バナジウム酸塩結晶

(2) チタン酸ナノフレークのコロイド水溶液を用いた層状チタン酸塩薄膜の作製と屈折率評価

チタン酸ナノフレークゾルのスピニングにより、種々の層間距離をもつ高配向性の層状チタン酸塩の薄膜を作製した。層状チタン酸塩の層間距離は、ナノフレークゾルの調製に用いる嵩高い有機陽イオンの水酸化物の種類、合成したチタン酸ナノフレークの2-プロパノールでの洗浄、層状チタン酸塩の層間でネットワーク構造を形成して層間を広げる作用のある有機物の反応ゾルへの添加などのいくつかの方法を利用して変化させた。その結果、層状チタン酸塩の底面間隔を1.1 nmから2.2 nmまで変化させることができた(図4)。層状チタン酸塩のチタン酸層の厚さが約0.7 nmと考えると、層間の厚さは0.4 nmから1.5 nmまで4倍近く変化させることができた。

次に、作製した高配向性の層状チタン酸塩薄膜に対して屈折率とその波長分散をエリブソメータにより測定した。屈折率は、薄膜が等方的であると仮定して算出した。層状チタン酸塩の層間が短いときは、波長が長くなるにつれ屈折率が減少した。層間距離が長くなるにつれ、長波長側で波長の増加に伴い、屈折率も増加する現象がみられ、最も層間距離が長いものでは、短波長側でもそのような挙動が観察された(図4)。この挙動について確かめるために、ハロゲンランプを光源として可視光域全体に対して波長分散を、層間が最も長い試料と最も短い試料に対して測定した。その結果、波長の増加に対して屈折率は全く逆の変化を示すことが確かめられた。一般的なイオン結晶の絶縁体では、波長が長くなるにつれて屈折率は減少する。つまり、層間距離が長い試料では、あまり見られない屈折率の波長分散を示したことになる。

これは、薄膜を等方的と仮定して屈折率を算出したためであり、この薄膜は膜厚方向と表面方向で屈折率が異なる、異方的な屈折率をもつことが示唆された。よって、厚さ0.7 nmのチタン酸層と、有機物で構成された1~1.5 nmの厚さの層間の短い周期での繰返し構造をもつフレーク状結晶からなる薄膜でも光学物性に異方性を付与できることが確かめられた。

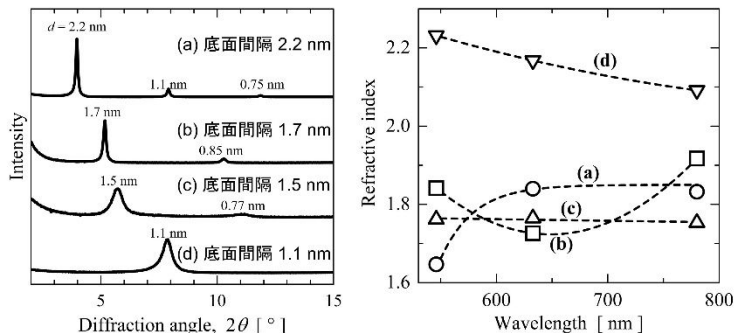


図4 種々の底面間隔をもつ層状チタン酸塩の薄膜のXRDパターンと屈折率の波長分散

さらに層間を広げた層状チタン酸塩の高配向性薄膜を作製することも検討した。層間陽イオンが、長鎖アルキル基をもつ陽イオン性界面活性剤 $C_nH_{2n+1}N(CH_3)_3^+$ ($n = 8, 12, 16$) であるハイブリッド薄膜の作製を考えた。しかし、この界面活性剤とチタン酸ナノフレークの混合ゾルでは、層間に界面活性剤が入った層状チタン酸塩の沈殿が速やかに生成するため、それらがともに溶解および分散したコーティングゾルは調製できなかった。そこで、層状チタン酸塩と界面活性剤のラメラ構造のいずれかの薄膜をあらかじめ作製して、その薄膜のイオン交換によりハイブリッド化することを検討した。界面活性剤のラメラ構造薄膜をナノフレークゾルで処理すると、界面活性剤はゾルにも溶解するため、あらかじめ作製した薄膜がイオン交換工程で容易に剥離してしまっただけであった。一方、層状チタン酸塩薄膜を界面活性剤のアルコール溶液で処理すると、イオン交換によるハイブリッド薄膜が作製できた。しかし、表面が凸凹した薄膜となってしまう、光学特性を評価できるような薄膜は作製できなかった。この凸凹な表面の形成は完全には改善できなかったものの、いくつかの検討を行った。例えば、層状チタン酸塩薄膜を界面活性剤溶液に浸漬するのではなく、過剰の界面活性剤を含む溶液を表面に塗布すると、イオン交換は容易に起こり、さらに過剰な界面活性剤は凸凹の隅間に入り込んで、平滑な表面の薄膜となった。この過剰な界

面活性剤をさらにチタン酸ナノフレークで処理すれば、凸凹の度合いが減少したハイブリッド薄膜となると考えられる。このように作製工程は複雑になるものの、多段階の処理により凸凹構造が改善できる可能性が示唆された。

(3) ルテニウム酸ナノフレークの触媒および助触媒特性

(1)で合成したルテニウム酸ナノフレークと、二次元構造をもつ可視光応答型光触媒である $g\text{-C}_3\text{N}_4$ のナノコンポジットを作製し、それを電極として用いた水の電気分解や光電気分解に対するルテニウム酸ナノフレークの効果を調べることにした。まず、ルテニウム酸ナノフレークと $g\text{-C}_3\text{N}_4$ のナノコンポジットを含浸法で作製し、それらの間での相互作用について調べた。ルテニウム酸ナノフレークの担持量は $0.18 \sim 0.70 \text{ wt}\%$ とした。それらのナノコンポジットを XPS 測定した結果、 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ のみのスペクトルに比べ $\text{N } 1s$ ピークは結合エネルギーが小さい方にシフトした。また、 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ の蛍光スペクトルを測定すると、 440 nm と 460 nm の波長の蛍光が観察されるが、ルテニウム酸ナノフレークを担持すると、それらの蛍光の相対的強度が変化した。つまり、ルテニウム酸ナノフレークの担持量は比較的少ないものの、 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ と 2D/2D ナノコンポジットを形成すると、 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ の電子状態に大きく影響を与えることが分かった。

次に、そのナノコンポジット粉末から薄膜を作製して作用極とし、対極を白金、参照極をカロメル電極とした 3 電極系で、 Na_2SO_4 水溶液を電解液とした電気分解のサイクリックボルタモグラムを測定した。ナノコンポジットの光応答を観察するために、チョッパーを用いて作用極に断続的に光照射を行い、光電流を測定した。 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ のみからなる薄膜を作用極とすると、カソード電流もアノード電流も観察され、真性半導体的な挙動を示した。ナノコンポジット薄膜を用いた場合も、カソード電流とアノード電流がともに観察されたものの、それらの大きさは $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 電極のときと比べてともに小さくなった。つまり、ルテニウム酸ナノフレークの担持は、光電気分解による酸素発生を促進することが期待されたものの、ナノフレークの吸着が $g\text{-C}_3\text{N}_4$ の光吸収を阻害してしまい、光電流を減少させてしまったと考えられる。

また、ナノコンポジットを水の電気分解の電極としたときのルテニウム酸ナノフレークの効果を調べた。比較のために RuO_2 ナノ粒子と $g\text{-C}_3\text{N}_4$ の混合粉末から作製した電極を用いた測定も行った。酸素発生反応においては、ルテニウム酸ナノフレークの担持は酸素発生量を増加させるものの、過電圧などに対する影響はなかった。また、 RuO_2 担持試料と比べて、酸素発生量の増加量は大きいものの、サイクリックボルタモグラムの形状などは似ていた。つまり、酸素発生に対する効果は、ルテニウム酸ナノフレークの二次元構造や $g\text{-C}_3\text{N}_4$ との 2D/2D コンポジット形成に起因するものではないと考えられた。一方、水素発生に対しては、ナノフレーク担持は、水素発生量を増加させるだけでなく、酸性水溶液においても塩基性水溶液においても水素発生の過電圧を大きく減少させた (図 5 a, b)。また、これらの効果は RuO_2 担持試料では認められなかった。さらに、2 電極系で Nyquist とプロット測定した結果、 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 電極や RuO_2 担持電極に比べ、ナノフレーク担持電極の電気抵抗が大きく減少していることも分かった (図 5 c)。つまり、ルテニウム酸ナノフレークの二次元構造や $g\text{-C}_3\text{N}_4$ との 2D/2D ナノコンポジット形成が、水素発生反応に対する触媒作用を活性化するだけでなく、ナノフレーク担持による電極の電気抵抗の減少も水素発生反応の促進に大きく寄与することが分かった。

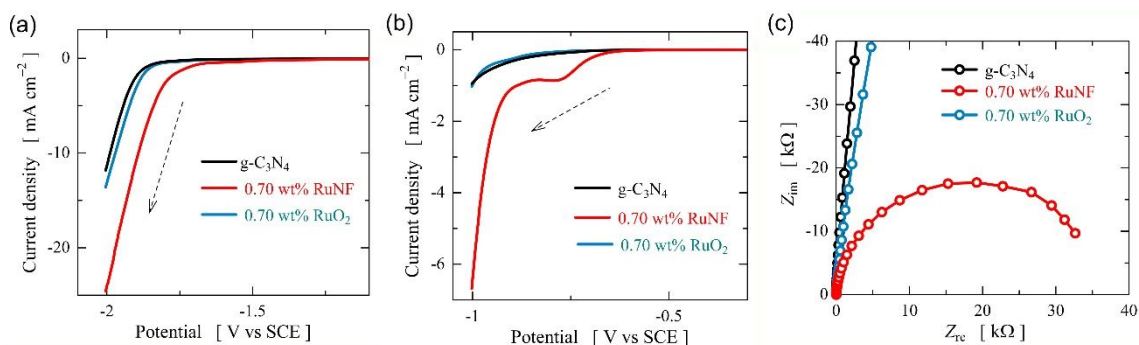


図5 (a) 0.5 M NaOH 水溶液や(b) 0.5 M H₂SO₄ 水溶液を電解液に用いた水の電気分解のサイクリックボルタモグラムと(c) 0.5 M H₂SO₄ 水溶液を電解液に用いて測定した Nyquist プロット (RuNF : ルテニウム酸ナノフレーク)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

| | |
|---|---------------------------|
| 1. 著者名 Ban Takayuki, Inukai Kazuki, Hattori Taiki, Nagata Takeshi, Takai-Yamashita Chika, Ohya Yutaka | 4. 巻 104 |
| 2. 論文標題 Bottom-up synthesis of ruthenate nanosheets by aqueous solution process | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Sol-Gel Science and Technology | 6. 最初と最後の頁 536 ~ 547 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10971-022-05887-w | 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 Ban Takayuki, Konishi Karin, Mizuno Motoki, Takai Yamashita Chika, Ohya Yutaka | 4. 巻 58 |
| 2. 論文標題 Anisotropic Crystal Growth of Layered Vanadates with Bulky Interlayer Cations | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Crystal Research and Technology | 6. 最初と最後の頁 2200198 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/crat.202200198 | 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 Ban Takayuki | 4. 巻 59 |
| 2. 論文標題 Bottom-up Synthesis of Metalate Nanosheets by Aqueous Solution Process | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Journal of the Society of Powder Technology, Japan | 6. 最初と最後の頁 348 ~ 355 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4164/sptj.59.348 | 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 Takayuki Ban, Ami Hamajima, Naoya Akao, Chika Takai-Yamashita, Yutaka Ohya | 4. 巻 32 |
| 2. 論文標題 Hydrothermal synthesis of highly pure brookite-type titanium oxide powder from aqueous sols of titanate nanosheets | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Advanced Powder Technology | 6. 最初と最後の頁 3601 ~ 3609 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.appt.2021.08.014 | 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 Ban Takayuki, Hirose Seiya, Konishi Karin, Nakagawa Takuya, Takai-Yamashita Chika, Ohya Yutaka | 4. 巻 25 |
| 2. 論文標題 Bottom-up synthesis of titanate nanoflakes with euhedral shapes by aqueous solution process | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 CrystEngComm | 6. 最初と最後の頁 4960 ~ 4967 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d3ce00731f | 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 伴 隆幸 | 4. 巻 58 |
| 2. 論文標題 水溶液プロセスによる金属酸ナノシートのボトムアップ合成 | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 セラミックス | 6. 最初と最後の頁 437 ~ 440 |
| 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 - |

〔学会発表〕 計19件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 0件)

| |
|---|
| 1. 発表者名 伴 隆幸 |
| 2. 発表標題 金属酸ナノシートの透明コロイド水溶液のボトムアップ合成 |
| 3. 学会等名 日本セラミックス協会 第35回秋季シンポジウム (招待講演) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 犬飼 和希, 服部 太貴, 永田 武史, 高井 千加, 大矢 豊, 伴 隆幸 |
| 2. 発表標題 水溶液プロセスによるルテニウム酸ナノシートのボトムアップ合成 |
| 3. 学会等名 日本ゾル-ゲル学会 第20回討論会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 廣瀬 晟也, 小西 花林, 濱島 杏実, 中川 拓也, 高井 千加, 大矢 豊, 伴 隆幸 |
| 2. 発表標題 チタン酸ナノシートのボトムアップ合成における結晶化挙動 |
| 3. 学会等名 日本ソル-ゲル学会 第20回討論会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 犬飼 和希, 服部 太貴, 永田 武史, 高井 千加, 大矢 豊, 伴 隆幸 |
| 2. 発表標題 ルテニウム酸ナノシートの水溶液プロセスによるボトムアップ合成 |
| 3. 学会等名 第62回 東海若手セラミスト懇話会 2022年 夏期セミナー |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 廣瀬 晟也, 小西 花林, 濱島 杏実, 中川 拓也, 高井 千加, 大矢 豊, 伴 隆幸 |
| 2. 発表標題 チタン酸ナノシートのボトムアップ合成における結晶化挙動 |
| 3. 学会等名 第62回 東海若手セラミスト懇話会 2022年 夏期セミナー |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 大竹 宏祐, 池田 典生, 高井 千加, 大矢 豊, 伴 隆幸 |
| 2. 発表標題 チタン酸ナノシート薄膜の界面活性剤とのハイブリッド化 |
| 3. 学会等名 日本セラミックス協会 第35回秋季シンポジウム |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名 水野元貴, 高井千加, 大矢 豊, 伴 隆幸 |
| 2. 発表標題 バナジン酸ナノシートのボトムアップ合成 |
| 3. 学会等名 日本ゾル-ゲル学会 第19回討論会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 小西花林, 高井千加, 大矢 豊, 伴 隆幸 |
| 2. 発表標題 チタン酸ナノシートのボトムアップ合成における結晶化挙動 |
| 3. 学会等名 日本ゾル-ゲル学会 第19回討論会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 廣瀬晟也, 小西花林, 濱島杏実, 高井千加, 大矢 豊, 伴 隆幸 |
| 2. 発表標題 チタン酸ナノシートのボトムアップ合成における結晶化挙動 |
| 3. 学会等名 日本セラミックス協会 第34回秋季シンポジウム |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 池田典生, 高井千加, 大矢 豊, 伴 隆幸 |
| 2. 発表標題 チタン酸ナノシート/界面活性剤ハイブリッド薄膜のゾルゲル法による作製 |
| 3. 学会等名 日本セラミックス協会 第34回秋季シンポジウム |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 伴 隆幸, 池田 典生, 水野 元貴, 犬飼 和希, 高井 千加, 大矢 豊 |
| 2. 発表標題 様々な金属酸ナノシートの合成と界面活性剤とのハイブリッド薄膜の作製 |
| 3. 学会等名 日本複合材料学会 第46回複合材料シンポジウム |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名 水野元貴, 高井千加, 大矢 豊, 伴 隆幸 |
| 2. 発表標題 バナジン酸ナノシートのボトムアップ合成 |
| 3. 学会等名 第60回セラミックス基礎科学討論会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 小西花林, 水野元貴, 高井千加, 大矢 豊, 伴 隆幸 |
| 2. 発表標題 ボトムアップ合成した金属酸ナノシートゾルの液晶挙動 |
| 3. 学会等名 第60回セラミックス基礎科学討論会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 犬飼和希, 服部太貴, 永田武史, 高井千加, 大矢 豊, 伴 隆幸 |
| 2. 発表標題 ルテニウム酸ナノシートのボトムアップ合成 |
| 3. 学会等名 日本セラミックス協会 2022年 年会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 伴 隆幸 |
| 2. 発表標題 二次元構造およびナノ結晶に注目した水溶液プロセスによる環境材料の合成 |
| 3. 学会等名 日本セラミックス協会 第36回秋季シンポジウム（招待講演） |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 廣瀬 晟也, 小西 花林, 中川 拓也, 高井 千加, 大矢 豊, 伴 隆幸 |
| 2. 発表標題 自形形態をもつチタン酸ナノシートの水溶液プロセスによるボトムアップ合成 |
| 3. 学会等名 日本セラミックス協会 第36回秋季シンポジウム |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 大竹 宏祐, 池田 典生, 高井 千加, 大矢 豊, 伴 隆幸 |
| 2. 発表標題 ボトムアップ合成した金属酸ナノシートと界面活性剤による屈折率異方性薄膜の作製 |
| 3. 学会等名 日本セラミックス協会 東海支部 第64回 東海若手セラミスト懇話会 2023年 夏期セミナー |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 大竹 宏祐, 池田 典生, 高井 千加, 大矢 豊, 伴 隆幸 |
| 2. 発表標題 ボトムアップ合成したチタン酸ナノシートと界面活性剤のハイブリッド薄膜の作製 |
| 3. 学会等名 日本ゾルゲル学会 第21回討論会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 犬飼 和希, 高井 千加, 伴 隆幸 |
| 2. 発表標題 ルテニウム酸ナノフレークとg-C3N4の複合材料の調製と光電気化学特性 |
| 3. 学会等名 第62回セラミックス基礎科学討論会 |
| 4. 発表年 2024年 |

〔図書〕 計0件

〔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 |
|---------|---------|
|---------|---------|