

令和元年5月16日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K19087

研究課題名(和文) 廃棄木質資源をダイレクトに燃料として利用する革新的バイオマス燃料電池

研究課題名(英文) Innovative biomass fuel cells using waste woody biomass directly as fuel

研究代表者

日比野 高士 (Hibino, Takashi)

名古屋大学・環境学研究科・教授

研究者番号：10238321

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 5,000,000円

研究成果の概要(和文)：バイオマス、特に木質バイオマスは、再生可能エネルギー資源として大きな関心を集めている。しかし、木質の主成分であるセルロースはほとんどの溶媒に不溶であり、木質材料を液体および気体の燃料に変換するためには過剰のエネルギーおよび特殊な手順を必要とする。本報告では、鋸屑およびパルプを燃料として直接利用して10 mW cm⁻²の桁の出力密度を与えるバイオマス燃料電池について記述する。この燃料電池は単純なもので、H₃PO₄を含浸した原料をアノードに配置し、75～250℃の温度で作動する。セルロースまたはその分解生成物がH₂Oと反応してCO₂を生成し、クーロン効率は150%以上で約95%だった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来のバイオマス利用は食用資源を原料としていたため、食料と競合し穀物市場の高騰を招いた。これを解決するために廃材や古紙等の木質資源を利用する、新たなバイオマス利用の開発が進められている。本研究では、廃材や古紙をダイレクトに燃料として利用し、1cm²当たり数十ミリワット級の燃料電池を開発する。同様な研究として、ヘテロポリ酸をredox媒体として使用した燃料電池が報告されているが、外側に設けた反応槽でヘテロポリ酸をバイオマス燃料で予め還元処理する必要がある。これに対して、本研究での手法は、木質資源をオルトリン酸に混ぜ、75から250℃で作動する燃料電池に供給するといったシンプルな方法である。

研究成果の概要(英文)：Biomass is of significant interest in the field of advanced energy engineering, including the use of woody biomass as an energy source. However, because cellulose; the major component of wood; is insoluble in most solvents, an excessive amount of energy and special procedures are required to convert woody materials into liquid and gaseous fuel. This report describes a biomass fuel cell that provides power densities on the order of 10 mW cm⁻² by direct utilization of wood sawdust and pulp as fuel. The fuel cell is simple, with H₃PO₄-impregnated raw materials located at the anode, and is operated at temperatures between 75 and 250 °C. Cellulose or its decomposition products reacted with H₂O to form CO₂, where the coulombic yield was approximately 95% at 150 °C or higher. Notably, the cell performance was superior to that of fuel cells with fuels (partially oxidized or dehydrated mono- to tetrasaccharides) obtained by an external treatment of cellulose with H₃PO₄.

研究分野：環境化学

キーワード：木質バイオマス 燃料電池 再生可能エネルギー

1. 研究開始当初の背景

現在、ほぼすべてのバイオエタノールは、糖またはでんぷんに基づく原料から製造されている。しかし、これらの材料のエネルギー生成への使用は食料への使用と競合しており、穀物価格の上昇につながっている。木質原料を使用してエネルギーを生成する新技術の開発に多大な努力が払われている。セルロースは、新世代のバイオ燃料源として特に注目されている。でんぷん類とは異なり、ほとんどの溶媒でセルロースの溶解度は低い。通常、エタノールを得る過程では酵素分解によるグルコースの生成と、それに続いて微生物を使用したグルコースの発酵によるエタノールの生成が行われる。しかし、これらの過程には時間と労力、および多段階の作業が必要である。これらの障害を克服するため、セルロースからグルコース中間体を経由してエネルギーを抽出する方法として、微生物燃料電池および酵素燃料電池が提案されている。その他にも、光触媒と電荷担体の双方にポリ酸を使用する燃料電池がスイッチグラスまたは鋸屑との組み合わせで開発されている。

2. 研究の目的

環境およびエネルギー用途で木質バイオマス燃料電池にさらなる利点をもたらす可能性がある戦略の1つは、250 °C前後の温度で燃料電池を作動させることである。その理由は、500 °C以上の場合とは異なり、流れからの廃熱回収が250 °C未満の温度ではまだ確立されていないからである。(ほとんどの場合、低品位の熱は環境に排出される)。そのため、木質バイオマス燃料電池を中温で作動させることは有望な廃熱回収技術になると期待されており、温室効果ガスの全排出量のより大幅な削減やよりクリーンな形のエネルギーの生成に貢献できる可能性がある。本研究の目的は以下の通りである:(1)75~250 °Cの温度範囲で3種類の異なる原燃料(イトスギ材鋸屑、合板鋸屑、および薄葉紙)を使用して発電する、(2)モデル燃料としてセルロースを使用した燃料電池の電極反応速度論を記述する、ならびに(3)燃料電池で到達可能な開放電圧(OCV)について直接および非直接のセルロースの使用を比較し、この方法の妥当性を検討する。本研究では、中温での木質原料の溶媒としてリン酸(H_3PO_4)の使用に焦点を絞った。硫酸や塩酸と比較して H_3PO_4 の溶解力は低いが、温度を上げると線維組織を分解することができる。さらに、燃料電池を高温で作動させると、セルロースまたはその分解生成物のアノード反応が円滑に進行する。

3. 研究の方法

(1)材料 - $Sn_{0.9}In_{0.1}P_2O_7$ 粉末は、既報の手順に従って合成された。0.04 g のポリテトラフルオロエチレン (PTFE) 粉末を 1.00 g of $Sn_{0.9}In_{0.1}P_2O_7$ 粉末に加え、乳鉢と乳棒を使用して練り、実験室用圧延機を使用して 250 μm の厚さに冷間圧延した。Pt/C 電極(40 wt% Pt, ElectroChem社)のPt充填量は、別途の記載がない限り 2 $mg\ cm^{-2}$ だった。イトスギ材(ヒノキ)および合板からの鋸屑、ならびに5枚のキムワイプがバイオ燃料として使用された。セルロース、グルコース、およびリグニン、それぞれ和光ケミカル、Serva社、および東京化成工業から購入された。85% H_3PO_4 (和光ケミカル)および無水 H_3PO_4 (Aldrich社)は、さらなる精製を行わずに酸溶媒として使用された。ステンレス鋼板(SUS316、厚さ0.3 mm、宝泉)および環状PTFEシート(厚さ1.0 mm、日東電工)は、それぞれアノード集電体およびシール支持体として使用され、その外側を耐熱・耐薬品性PTFEテープ(日東電工)で包んだ。

(2)特性評価 - 木質原料の加熱後の形態変化は、試料の表面への堆積なしに走査電子顕微鏡法(SEM; キーエンス VE-8800)を使用して観察された。セルロースの重量平均分子量(M_w)および数平均分子量(M_n)は、ゲル浸透クロマトグラフィー(TRC GPC-10)を使用して決定された。 M_w および M_n の詳細な計算は補足情報に記述されている。 H_3PO_4 溶媒について、熱重量および示差熱分析(TG-DTA)曲線はShimadzu DTG-60装置を使用して、昇温速度 10 min^{-1} で空気流の下で室温から 275 °Cまで測定された。両電極からの CO_2 の濃度は、ThermoStar 質量分析計(MS、Pfeiffer Vacuum社)を使用して観測され、校正曲線から求められた。ろ液中の糖質およびその分解生成物の組成は、高速液体クロマトグラフィー-タンデム質量分析法(LC/MS Shimadzu LC-30AD)を使用して決定された。保持時間0~10分間の正負のイオンピークがMSを使用して分析された。さらなる詳細は補足情報に記述されている。残渣の官能基プロファイルは、フーリエ変換赤外分光計(FT-IR; Agilent Excalibur FTS-4000)を使用して求められた。データ点は分解能 8 cm^{-1} で64回のスキャンから得られた。C、O、およびPの重量比は、エネルギー分散型X線(EDX; Quantax, Bruker社)とSEM(FEI QuantaFEG 250)を併用して測定された。測定は、加速電圧 10 kV および EDX 収集時間 60 秒で行われた。X線回折(XRD)パターンは、回折装置(Miniflex II、リガク)を使用して、45 kV および 20 mA で Cu K α 線 ($\lambda = 1.5432 \text{ \AA}$) で収集された。

(3)電気化学測定 - すべての測定は、Solatron 1287 および 1260 装置を使用して 4 プローブの DC または AC 法で行われた。電池性能は、定電位ではスキャン速度 20 mV sec^{-1} 、定電流ではスキャン速度 1 および 10 mA sec^{-1} で記録された。電流密度は、カソードの面積 (0.5 cm^2) に対して規格化された。in situ サイクリックボルタンメトリー (CV) プロファイルは、スキャン速度 25、50、および 75 mV sec^{-1} で収集された。5 回目の CV 曲線がデータとして記録された。各 OCV でのインピーダンススペクトルは、周波数 $0.1 \sim 10^6 \text{ Hz}$ の範囲で AC 振幅 10 mV で求められた。

4. 研究成果

(1)木質原料を使用する燃料電池の製作および

性 - $\text{Sn}_{0.9}\text{In}_{0.1}\text{P}_2\text{O}_7$ -PTFE 複合膜は、 $75 \sim 250$ の温度範囲で約 0.01 S cm^{-1} のプロトン伝導度があることから電解質として選択された^{19,20}。

Pt/C からなるアノードおよびカソードはガス拡散層に塗布された。イトスギ材の鋸屑、合板の鋸屑、および薄葉紙 (各 15 mg) に約 135 mg の $85\% \text{ H}_3\text{PO}_4$ を含浸した。この重量比は、現時点で最高の電池性能が得られている比である。ペースト状のサンプルをアノードの表面に堆積した後、電解質膜 (直径: 16 mm ; 面積: 2.0 cm^2) を燃料電極と空気電極の間に挟んだ (それぞれ 2.0 および 0.5 cm^2)。図 1a に示すように、燃料電極はステンレス鋼製の集電体に取り付け、環状 PTFE シートと PTFE テープで密封した。空気電極は、室温で H_2O 蒸気で飽和した大気を供給した。

燃料電池の OCV は、 $75 \sim 250$ の温度範囲で観測された。試験したすべての原料について、OCV は作動温度とともに、特に $100 \sim 250$ で大幅に増大した。原料なしのブランク実験で示されているように、この増大は H_3PO_4 の分解および脱水に起因するものではない (図 1b)。3 種類の原料は室温で植物線維であるが、 100 以上に加熱すると徐々に液化する (図 2)。そのため、温度が上昇すると植物線維が H_3PO_4 によって溶解または分解し、燃料電池の OCV を増大させる。

一般に、木質材料はセルロース、ヘミセルロース、およびリグニンからなるが、薄葉紙はリグニンをほとんど含まない。OCV を生成する成分を決定するため、燃料となっている可能性があるセルロースおよびリグニンについて上記と同様の方法で試験を行った。セルロースの OCV の温度依存性は 3 種類の原料の OCV の温度依存性に非常に類似していたが、試験を行った温度範囲でリグニンは燃料になることができなかった (図 1b)。したがって、この燃料電池ではセルロースまたはその分解生成物が燃料として消費されていることが強く推測される。ただし、グルコースを燃料として使用した場合の OCV が、3 種類の原料の場合の OCV と比較して 75 では遥かに大きく、 250 では遥かに小さくなる (図 1b) ことから、試験を行った温度でグルコース成分は主要な燃料源になっていないことが強く推測される。

3 種類の原料の $I-V$ および $I-P$ 特性が 250 で決定された。 $I-V$ の傾斜はイトスギまたは薄葉紙よりも合板の場合に大きく (図 1c)、おそらく合板に含まれる接着剤が Pt/C アノードを被毒するためだとみられる。この結果は、合板の場合のオーム抵抗および分極抵抗 (それぞれ 1.7 および 7.4 cm^2) によって裏付けられており、イトスギおよび薄葉紙の場合 (イトスギの場合の値はそれぞれ 1.1 および 5.8 cm^2) より大きかった。得られた最大出力密度は、薄葉紙で 26.6 mW cm^{-2} 、イトスギで 22.0 mW cm^{-2} 、合板で 14.6 mW cm^{-2} に到達した。注意すべき点として、すべての原料で得られる出力密度は作動温度に大きく依存したが、合板の場合は 225 と 250 の出力密度の差が非常に小さかった (図 S1)。

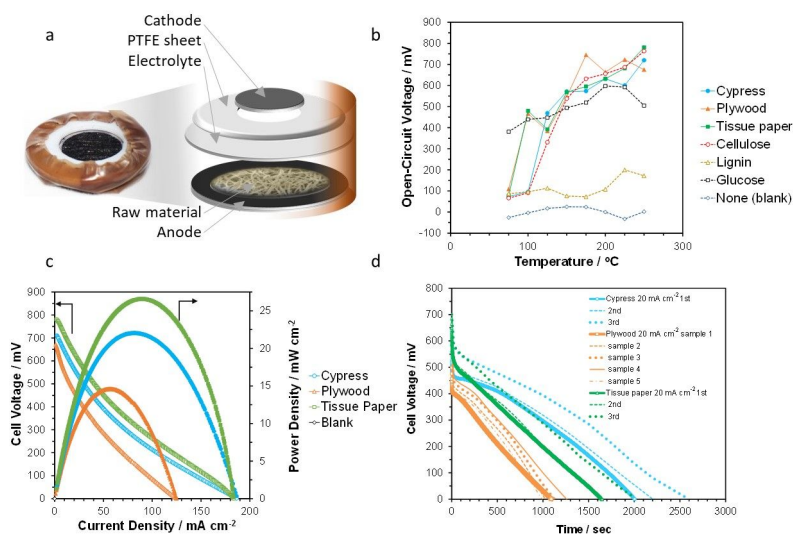


図 1 鋸屑およびパルプを燃料に使用した燃料電池の 250 における電気化学的性能: a) 燃料電池の写真および図解、b) 作動温度の関数としての OCV (比較のため、セルロース、リグニン、およびグルコースを使用した燃料電池のデータを含む)、c) $I-V$ および $I-P$ 特性、ならびに d) 電流密度 20 mA cm^{-2} における定電流放電特性。イトスギおよび薄葉紙の場合の耐久試験ならびに合板の場合の再現性試験は同一条件 (温度、電流密度、および燃料重量) で実施された。

燃料電池の定電流放電プロファイルは、電流密度 20 mA cm^{-2} で 250 で記録された。特にイトスギの場合に電圧の停滞が生じたが、電池電圧は徐々に減少した(図 1d)。燃料が電極内を流れる(フロー型)のではなく、電極に燃料が捕捉される(バッチ型)ことに注意されたい。そのため、利用可能な燃料の量は、電池の放電、アノードの分極および物質移動抵抗の増大によって、時間の経過とともに減少する。それでも、電圧-時間曲線の下面積を積分して計算されたエネルギー密度は、イトスギ、薄葉紙、および合板の場合にそれぞれ 103、79、および 40 Wh kg 原料^{-1} だった。さらに、毎サイクルの開始時に新しいイトスギおよび薄葉紙を補給して、サイクル放電特性が評価された。特にイトスギでは、サイクル回数とともに放電時間が増加した。この理由は、前回のサイクルにおいて未反応で残っている燃料が、新しく補給された燃料に再度追加されるためである。注意すべき点として、アノード電位がカソード電位に一致して電池電圧がゼロに到達したとき、追加された燃料のすべてが完全に消費されているわけではない。これらの結果は、少なくとも 3 回のサイクルでアノードの劣化がないことを強く示唆している。対照的に、合板は最初の放電後に固化したため、損傷を与えずにアノードから電解質膜を剥離することは不可能だった。それでも、5 台の同一の燃料電池サンプルから得られた放電時間が一致していることで示されているように、合板燃料電池は再現可能な放電特性を示した。

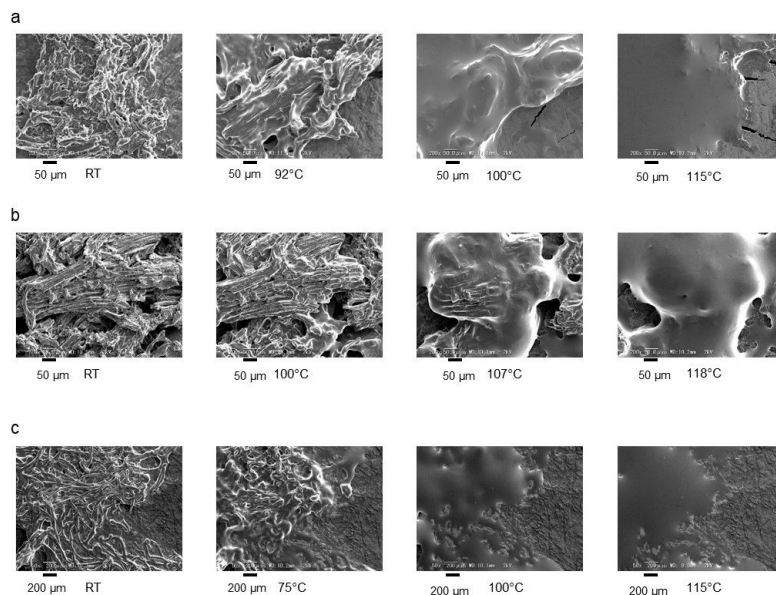


図 2 H_3PO_4 を含浸した後、電極に堆積した a) イトスギ、b) 合板、および c) 薄葉紙の SEM 画像。SEM 測定のため、燃料電池の外側に熱処理を施した。

(2) モデル燃料としてセルロースを使用した電池の性能

木質バイオマス中のセルロースの濃度、線維長、および分子量は、木材の供給源およびパルプ化工程に依存して変動するため、分子量分布 (Mw/Mn、図 S2) が 5.0 の純粋なセルロース (15 mg) がバイオマスを代表して使用された。OCV は 75 ~ 250 まで作動温度とともに増大したが、275 で急激に減少した(図 3a)。昇温酸化 (TPO) 測定では Pt/C の着火温度が約 275 であることが示されており(図 3b)、この燃料電池の劣化温度によく一致している。したがって、この燃料電池の作動温度の上限は、カソードの炭素支持体の燃焼によって決定されていた。この限界は、 IrO_2 および RuO_2 のような耐酸性の高い遷移金属酸化物を Pt/C の代わりに使用することで緩和できるかもしれない。(酸化還元反応におけるこれらの金属の活量は、室温では比較的低い、作動温度の上昇とともに徐々に増加する。)

これらの観測結果に基づき、75 ~ 250 の温度でセルロースを燃料として使用して、電池性能

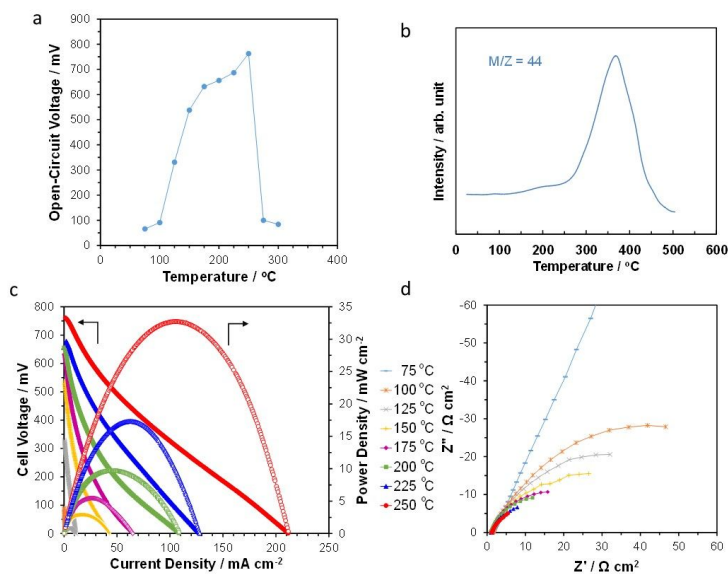


図 3 セルロースを燃料として使用した燃料電池の電気化学性能: a) 作動温度の関数としての OCV, b) Pt/C カソードについて、空気流下で昇温速度 10 min^{-1} の CO_2 ($m/z = 44$) の TPO プロファイル, c) 75 ~ 250 の $I-V$ および $I-P$ 特性、および d) 75 ~ 250 における各 OCV でのインピーダンススペクトル。

試験が実施された。最大出力密度は、作動温度が 75 から 250 に上昇するのにともない、燃料電池の OCV の増大および I-V の傾斜の減少を受けて、 $2.6 \mu\text{W cm}^{-2}$ から 32.7mW cm^{-2} に増加し (図 3c)、これは温度上昇にともなうオーム抵抗よりも分極抵抗の減少に起因するとされた (図 3d)。これは、温度が上昇したときのセルロースの溶解および分解に反映されている。ただし、グルコースを使用した燃料電池でも温度に強く依存した最大出力密度が得られているように (75 で 0.7mW cm^{-2} 、250 で 8.8mW cm^{-2})、高温でアノードの速度論が改善することも優れた電池性能に貢献する重要な要素の 1 つである。

セルロースを使用して得られた出力密度は、おそらくセルロースの純度が高く分子量が小さいという理由で、原料を使用して観測された出力密度よりも大幅に高かった。

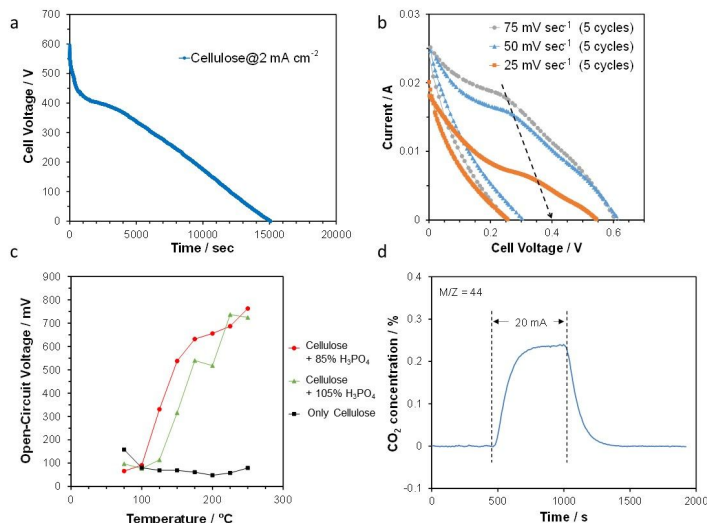
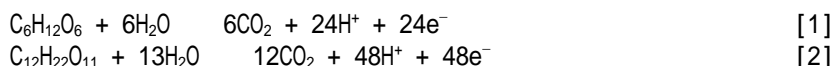


図 4 セルロースを燃料として使用した燃料電池の 150 における電気化学的特性: a) 電流密度 2mA cm^{-2} での定電流放電特性、b) スキャン速度 75、50、および 25mV s^{-1} 、スキャン回数 5 サイクルの in situ CV プロファイル、c) $85\% \text{H}_3\text{PO}_4$ 、無水 H_3PO_4 を使用した場合および酸溶媒を使用しない場合に記録された温度の関数としての OCV、ならびに d) 燃料電池を電流 20mA で連続放電した際の CO_2 ($m/z = 44$) の質量分析スペクトル。

(3)分解したセルロースの酸化反応の反応速度研究 - 多様な金属/C アノードを用いた燃料電池を使用した予備実験では、OCV が金属種に強く依存することが示された。250 で記録された OCV は、 $\text{Pt} (763 \text{mV}) > \text{Pd} (687 \text{mV}) > \text{Rh} (640 \text{mV}) > \text{なし} (599 \text{mV}) > \text{Ru} (530 \text{mV})$ の順に減少した。また、以下のように、Pt/C アノードの Pt 充填量が増加すると燃料電池の分極抵抗が減少することも観測された: $0.0, 0.6, 2.0, \text{および} 3.2 \text{mg cm}^{-2}$ において、それぞれ $14.9, 7.1, 5.5, \text{および} 4.3 \text{cm}^2$ 。したがって、最も重要な速度論的要素はアノード反応の活性化だった。Pt/C 電極におけるセルロースのアノード反応の理解を深めるため、 2mA cm^{-2} の非常に小さい電流密度で 150 における電池放電の間の電圧が記録された。約 400mV で明確な電圧の停滞状態が観測され (図 4a)、この電圧で酸化反応が支配的であることが示唆された。これを裏付ける証拠が、同条件下の燃料電池の in situ CV プロファイルで示された。小さく幅広い酸化ピークが、スキャン速度 $75, 50, \text{および} 25 \text{mV sec}^{-1}$ でそれぞれ約 $0.24, 0.30, \text{および} 0.34 \text{V}$ に現れた (図 4b)。スキャン速度にともなうこのピークシフトは、この酸化反応の速度論が質量移動よりも電荷移動に支配されていることによるものである。したがって、さらに遅い速度ではピーク位置が 0.4V まで移動したが、ピーク電流は検出不可能な値まで減少した。セルロースの酸溶媒として H_3PO_4 を使用しない燃料電池または無水 H_3PO_4 を使用する燃料電池を製作することで、アノード反応に関するさらに詳細な情報が得られた。 H_3PO_4 が存在しない場合に観測された OCV は非常に低く (図 4c)、固体のセルロースは高温でも燃料にならないことが示唆された。 $85\% \text{H}_3\text{PO}_4$ と比較して、無水 H_3PO_4 を使用した場合、関与および生成する H_2O の量の差異のため、 $100 \sim 200$ で OCV は低くなった (図 S3)。これらの結果は、セルロースの分解に H_2O が必要であることを示している。150 までの温度で無水 H_3PO_4 の場合に観測される OCV は、電解質または電極材料に不純物として含まれる H_2O によってセルロースの一部が分解されることで生成するという仮説が立てられた。

グルコース、スクロース、セロピオース、およびその他の炭水化物のアノード反応において、水は反応物になることができる²⁸⁻³¹。これらの成分は以下のように H_2O と反応して CO_2 を生成する:



オンライン MS ガス分析システムを使用して、アノードおよびカソードの双方の出口ガス中の二酸化炭素が 150 で観測された。(アノードで生成した CO_2 の一部が電解質膜を透過してカソードに達していた。) ステンレス鋼の代わりに金メッシュを集電体として使用し、Ar キャリアガスをアノード内に流した。

電流 20mA で電池を放電中に、 CO_2 濃度の明確な増加が確認された (図 4d)。ファラデーの法則に従って計算されたクーロン効率は 94.9% だった (単糖および二糖についてはそれぞれ式 1 および 2 に基づき³²、その他の糖質については対応する反応式に基づく (補足情報を参照))。電池の放電中に CO 、 HCOH 、または HCOOH は検出されなかった。同様に、作動温度が 200 およ

び 250 °C でも高いクーロン効率が観測された。

(4)OCV に関するセルロースの直接および非直接の使用の比較 - この燃料電池の利点を明確にするため、 H_3PO_4 を用いたセルロースの外部処理によるセルロースの溶解および分解が行われた。得られた分解生成物を使用して燃料電池を作動し、その OCV 特性を、セルロースを燃料として直接使用した燃料電池の特性と比較した。アノード材料の調製に複数の変更が加えられた：セルロース (0.1 g) と 85% H_3PO_4 (0.9 g) の混合物をガラス容器に加え、室温で真空中に引いた後、目標温度まで加熱した；各温度での処理時間は約 30 分だった；懸濁液を直ちに少量 (20 mL) の脱イオン水と攪拌し、ろ過して可能な限り高い濃度のろ液を得た；残渣は大量の脱イオン水で洗浄した。ろ液と残渣の双方について、多様な方法で別個に特性評価を行った。

セルロースは H_3PO_4 を用いて 100、150、および 200 °C で処理された。これらの処理方法の結果では、100 °C で収集されたる液にセルロース由来の生成物は含まれておらず、150 °C および 200 °C で収集されたる液は部分的に酸化または脱水された単糖、二糖、三糖、四糖であることが示された (150 °C のろ液を図 S4 に示す；ろ液と残渣の双方の全成分を表 S1 に要約する)。

またこれらの結果は、100 °C で処理された残渣の C、O、および P の重量比がセルロースと類似していることを示しており、150 °C および 200 °C で処理された残渣の組成は C が豊富で P が微量であることが示されている (図 S5)。FT-IR スペクトルおよび XRD パターンでも同様の結果が得られている。100 °C で処理された残渣は、セルロースとほぼ同一の官能基および構造相 (図 S6) を持っていた。対照的に、150 °C および 200 °C で処理された残渣は、IR スペクトルに $C=O$ (1700 cm^{-1}) バンドおよび $C=C$ (1600 cm^{-1}) バンドの新しい特徴があり、 $O-H$ (3300 cm^{-1}) バンドの強度が低下し、無定形炭素に帰属される XRD パターンを示した (図 S6)。したがって、組成および構造の特性に基づき、分解残渣はバイオコークスからなる。

ろ液および残渣を燃料に使用して 75 ~ 250 °C の温度で生成された OCV を、セルロースを燃料として使用した燃料電池の OCV と比較した。予想される通り、150 °C および 200 °C で処理された残渣から得られた OCV は著しく低かった。150 °C および 200 °C で処理されたる液から得られた OCV は、75 °C および 100 °C で処理されたる液から得られた OCV よりも大きかったが、150 ~ 250 °C の間の温度で処理された場合よりも遥かに低かった。

この予想外の結果は、最初のろ過過程の際に生成物が脱イオン水で希釈されたことや、残渣の表面に強く吸着した生成物を収集できなかったことで、生成物の回収が影響を受けたとして説明できる。さらに、ガラス容器からのナトリウムの混入がアノード反応に影響を及ぼしているおそれがある。対照的に、セルロースを燃料として直接使用した場合はこれらの影響を回避することができ、高温での OCV が増大する。この利点は、多段階の処理を必要とする木質バイオマスでさらに重要になることが予想される。

(* 図 S1-6 および表 S1 は doi: 10.1149/2.0511706jes にて公開中。)

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 7 件)

Intermediate-temperature electrolysis of energy grass *Miscanthus sinensis* for sustainable hydrogen production, Masaya Ito, Tetsuya Hori, Shinya Teranishi, Masahiro Nagao, Takashi Hibino, Scientific Reports, 8 巻 (頁 : 16186) , 2018 年, 査読あり, doi.org/10.1038/s41598-018-34544-y

Direct electrolysis of waste newspaper for sustainable hydrogen production: an oxygen-functionalized porous carbon anode, Takashi Hibino, Kazuyo Kobayashi, Masaya Ito, Masahiro Nagao, Mai Fukui, Shinya Teranishi, Applied Catalysis B : Environmental, 231 巻 5 号 (頁 : 191-199) , 2018 年, 査読あり, doi.org/10.1016/j.apcatb.2018.03.021

An intermediate-temperature biomass fuel cell using wood sawdust and pulp directly as fuel, Takashi Hibino, Kazuyo Kobayashi, Peiling Lv, Masahiro Nagao, Shinya Teranishi, Toshiyuki Mori, Journal of The Electrochemical Society, 164 巻 6 号 (頁 : F557-F563) , 2017 年, 査読あり, doi: 10.1149/2.0511706jes

[学会発表] (計 4 件)

堀 哲也, 伊藤雅哉, 寺西真哉, 長尾征洋, 日比野高士, 廃棄プラスチックを直接使用した燃料電池発電, 電気化学会第 86 回大会, 2019 年

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

出願状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

http://www.urban.env.nagoya-u.ac.jp/~hibino/

6 . 研究組織

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。