

[環境科学研究科ニュースレター]
News Letter

東北大学大学院環境科学研究科
Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University



特集

脱炭素化社会の太陽光発電
—「使う」と「捨てる」の観点から—



SolarEVシティー構想

先進社会環境学専攻 環境政策学講座
環境・エネルギー経済学分野 准教授 小端拓郎



廃太陽光パネル(PV)のリユース・リサイクル

先進社会環境学専攻 環境物質政策学講座(DOWA ホールディングス寄附講座)
環境循環政策学分野 客員教授 白鳥寿一 / 准教授 嘉藤優子



リサーチ・レポート
Research Report



サプライチェーンと環境問題

先進社会環境学専攻 環境政策学講座 産業エコロジー分野 准教授 金本圭一朗



ペロブスカイト太陽電池材料の合成法に新たな潮流を

先進社会環境学専攻 エネルギー資源学講座 環境共生機能学分野 助教 横山幸司

トピックス

Topics

「正藍冷染」の学章、
研究科ホールへ



SolarEVシティー構想

東北大学大学院環境科学研究科 准教授 小端拓郎

人為起源の温室効果ガスの排出による気候変動がますます深刻になる中、世界は漸く脱炭素化に向けて動き始めています。これは、太陽光発電や蓄電池など再生可能エネルギー関連技術の価格が大幅に下がり、化石燃料より安く電気を作り出せるようになりつつあることが大きな理由の一つになっています。人為起源の気候変動の社会への影響を最小限にするには2050年までにカーボンニュートラルを実現する必要があり、再エネの技術を活用しながらどのように効率よく脱炭素化を進めるかが課題です。そこで、私たちは屋根上太陽光発電(PV)と電気自動車(electric vehicle; EV)を活用した都市の脱炭素化「SolarEVシティー構想」の研究を進めて社会に貢献することを目指しています。

都市の脱炭素化

都市には多くの人々が集まり、様々なサービスを通じてエネルギーが消費されCO₂排出も大きくなっています。現在、世界の人口の55%が都市に住んでいますが、都市への移住が進み2050年には、世界の人口の70%近くが都市部に住むことになると言われてしています。その都市では、自動車や火力発電からの排気ガスによる大気汚染や騒音が深刻な問題となっており、都市の脱炭素化は気候変動対策のみならず、住民の生活にとっても大きなメリットがあるため、その重要性が高くなっています。

この都市の脱炭素化を進めるためには、屋根上PVの活用が有効です。再生可能エネルギーは、自然界に薄く広がる太陽エネルギーを集める必要があるため、化石燃料によるエネルギーシステムより広い場所が必要となります。日本の



図1 屋根上PVとEVを組み合わせることで家に電力を供給する

様に、土地の限られたところでは、大規模な土地を確保することが難しく、建物の屋根を活用することが必須です。都市の屋根は大きな面積が活用可能で、例えば、京都市の市街化区域150m²のほぼ3分の1が、屋根(50km²)となっています。この屋根をPVに使うことで、自然を犠牲にせず、効率の高い都市の脱炭素化が可能になります。

しかし、PVは、昼間にしか発電しないため屋根上PVの普及が進み始めると、昼間の時間の発電が余るようになり、何も行わなければそのまま無駄になってしまいます。そうすると、屋根上PVの経済性が見合わなくなり、それ以上の導入が難しくなります。そこで、蓄電池を導入し、昼間の電気をためて夕刻以降に使うようにすることができのですが、蓄電池は高額なため、経済性が担保できず、災害対応等の用途とあわせてのみ導入が可能となるため、必要なスケールアップが難しいと考えられます。そこで、日本でも、急速に普及が始まったEVと組み合わせること(図1)で、安価で脱炭素化効果の高い屋根上PVシステムを構築することができます。

SolarEVシティー

屋根上PVとEVを蓄電池として活用することで、どの程度、都市の脱炭素化ができるのでしょうか？これまで、京都市、東京都区部、仙台市、郡山市、札幌市、岡山市、新潟市、広島市、川崎市(図2)に技術経済性分析(図3)を行いました。分析では、屋根面積の70%にPVを敷設し、自家用乗用車を全てEVとし、そのバッテリーの半分をPVの蓄電池として活用することを想定しました。バッテリーの半分のみを使用することで、EVのオーナーはいつでも短時間の買い物にEVを活用することができ、また、蓄電池の劣化も最小限とすることができます。分析の結果、屋根上PVとEVのシステムにより、

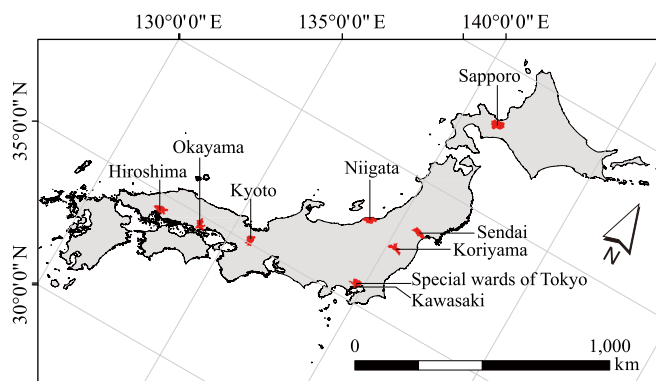
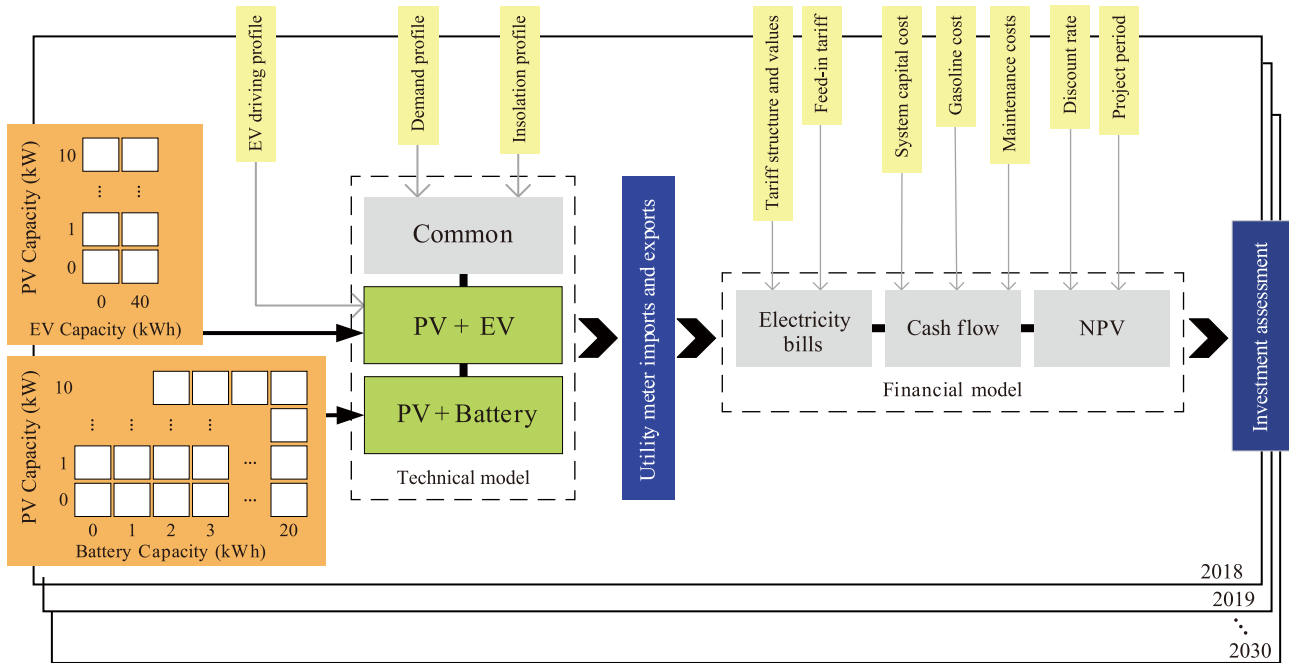


図2 日本の分析都市

図3 技術経済性分析



都市全体の電力消費と自動車の運転（ガソリン燃焼）からのCO₂排出の、54%-95%の削減に繋がることが分かりました（図4）。また、このシステムにより都市全体の53%-95%の電力供給が可能となります。2030年のPVとEVのコストを考えると、既存のエネルギーシステムのコストより、26%-41%のエネルギーコストの削減に繋がります。特に、岡山市のような地方の都市では、一人当たり屋根面積と自動車台数が大きく、PVとEVのシステムにより95%近い電力供給が可能となります。このシステムを実現するには、まず、屋根上PVとEVを個別に普及を進めます。そして、V2Hシステム等によりEVから都市への電力供給を可能とします。そして、屋根上PVとEVのシステムにより最大限の都市への電力供給を可能とすることで、自然への負荷を最小限としつつ、日本のカーボンニュートラル実現に繋げることができます。

世界のSolarEVシティー研究

屋根上PVとEVを使った都市の脱炭素化は、世界の都市においても脱炭素化効率が高いことがわかってきました。これまで、ソウル市を含む韓国の都市、中国・深圳市、インドネシア・ジャカルタの分析結果を発表しました。これらの分析結果によると、高層ビルの立ち並ぶ都市においては屋根上面積がエネルギー需要に比べて小さく、十分な電力を供給することが難しいのですが、それでも、都市全体の電力需要の半分近くはPV+EVのシステムにより供給可能になりました。今後、屋根上PVとEVは、急速に普及することが予想されます。これらの技術と熱供給（ヒートポンプ等）を組み合わせることで、屋根上PVの経済性をさらに高め、都市の脱炭素化を加速していくことが可能になります。

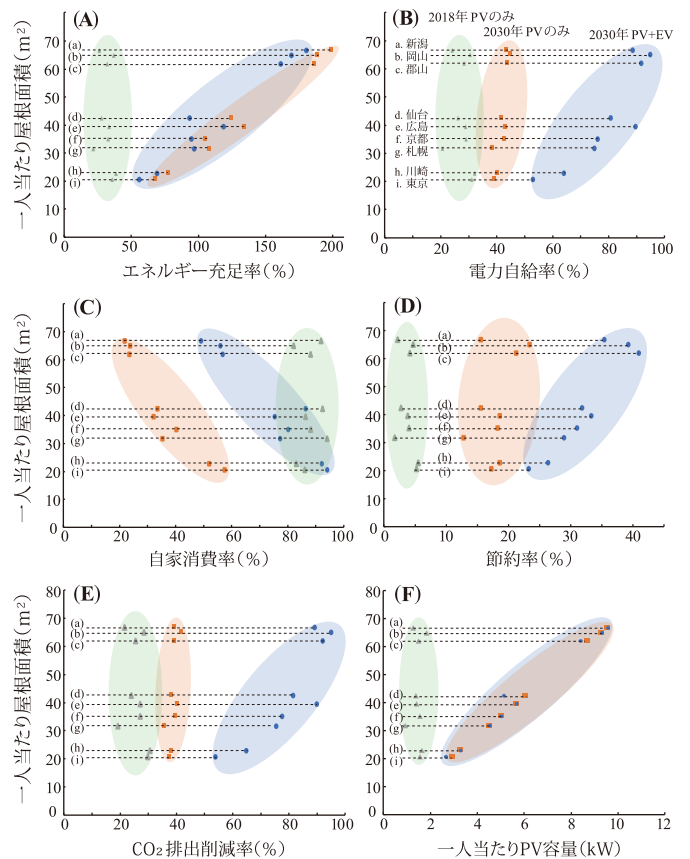


図4 SolarEVシティーの分析結果

東北大学大学院環境科学研究科
准教授 小端 拓郎 (こばし・たくろう)

北海道大学資源開発工学科を卒業後、テキサスA&M大学で修士号、カリフォルニア大学サンディエゴ校スクリプス海洋研究所にてPh.D.を取得。国立環境研究所等に勤務の後、2022年4月より現職。

住所：〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-20
電話：022-752-2259
E-mail：takuro.kobashi.e5@tohoku.ac.jp





廃太陽光パネル(PV)のリユース・リサイクル ～資源循環を目指した社会システムの研究例として～

東北大学大学院環境科学研究科 客員教授 白鳥寿一 / 准教授 齋藤優子

地球環境問題から見た 資源循環の進展

当研究室は、資源循環に関する研究を行っています。資源に関する従来の課題は、一次資源の採掘に伴う枯渇・自然破壊や人権、製品製造の際の原料供給不安、廃棄による最終処分場逼迫や、途上国への廃棄物移動と環境汚染、といったことでした。これらは生産者が安価なコストで原料を得て大量に生産・販売し、廃棄には関与しなかったことが要因ですが、理念や道徳観では解決できず、各種の法制度による制御が試みられてきました。しかし、資源循環は国際的に行われ、法律実行の単位は基本的に各国にあるため、今も十分機能しているとは言えません。すなわち、多くのモノを作って売って廃棄するという行為は、経済原則のもとに直線的に動くため、資源を循環することは経済的に成り立つ高価な素材等においてのみ行われてきました。

そうした中、いわゆる地球温暖化への問題の対応でより新しい考え方が入ってきました。サプライチェーン排出量(※1：環境省 HP)と言われ、事業者自らの排出だけでなく、事業活動に関係するあらゆる工程(原材料調達・製造・物流・販売・廃棄など)から発生する温室効果ガス(GHG)排出量のことです。Scope1～Scope3に分類されていますが、今まではScope3が考慮されていませんでした(図1)。製品として、一次資源の採掘・精製の部分や廃棄物の処理の仕方による排出量を考えていくため、製造者や使用者が従来は見えなかった環境側面も含めて評価・選択できるものです。資源の廃棄をせず再利用すれば一次資源の使用量は減らすこ

とができます。それらをGHGの指標からも評価できるため資源循環にも有益な考え方です。

こうした考え方を社会的に実装するためには、情報整理とコントロールを行う仕組みが必要です。環境影響は製品設計の時点で8割が決まるとも言われてきました。これらを考慮しEUでは、「エコデザイン規則」が以前の指令を廃止して新たに発効されます。そこでは製品にDPP(デジタル製品パスポート)を付与し、循環を行うための情報が加えられようとしています。この動きは既に電池規則でも始まりました。使用済み製品を集め処理する社会システムという点で、EUは既にWEEE(電気電子廃棄物)などで実施しています。責任は、EPR(拡大生産者責任)をベースとし、PRO(その責任実行機関：多くは非営利)が実行することが費用徴収の仕方や行政・個人の関与も含め根付いています。製品を核とするため、金融や消費者は各国の法律だけではなく、環境問題に関与することになります。

PV CYCLE JAPAN (PVCJ) の 組織化

このように、最近の資源循環は、かつての「なくなる」とか「もったいない」ではなく、地球環境問題の一環として社会でコントロールしていく方向性となっています。しかし、長年行われてきた事を変えていくにはかなりの時間と努力が必要です。逆に言えば新しい分野には今から新しい形を準備するのが得策です。廃太陽光パネル(PV)は将来の大量廃棄が懸念されるものの、廃棄物処理法で扱われ、個別の法律

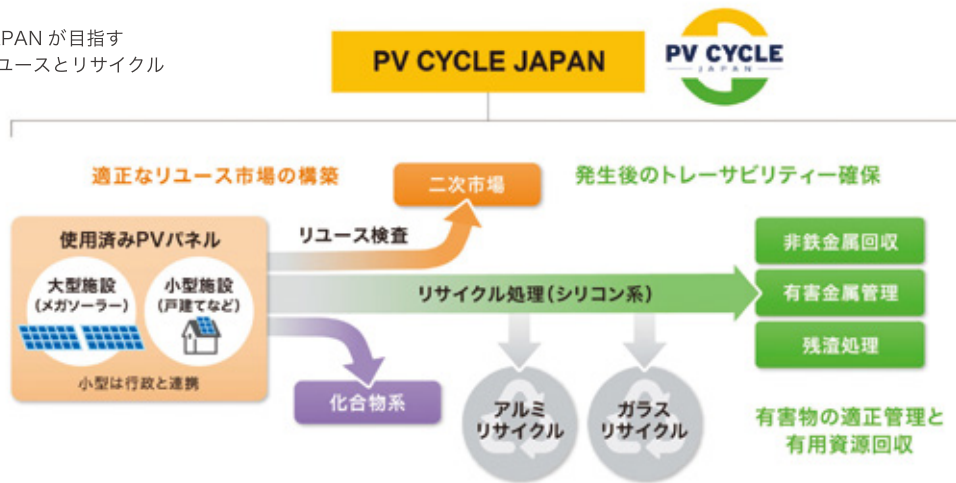


図1 サプライチェーン排出量

環境省『グリーン・バリューチェーンプラットフォーム』

https://www.env.go.jp/earth/ondanka/supply_chain/gvc/supply_chain.html 掲載の図を基に作成(閲覧：2023/02/14)

図2 PV CYCLE JAPANが目指す
PVパネルのリユースとリサイクル



- ① PVパネルの使用期間の最大化（リユースのための検査・二次市場とのマッチングによる促進）
- ② 最終処分量の最小化と資源回収量の最大化（非鉄金属の回収と有害物質の管理）
- ③ 大型施設だけではなく、小型施設にも、同様なサービスの提供
- ④ シリコン系だけではなく、化合物系の使用済みPVパネルの有害物質も管理

はないままに進んでいます。本研究室では、アルミ枠以外の部材について埋め立て処分され循環処理が行われないことが多い廃PVモジュールについて、それが起こる理由や世界の制度例（PVも電化製品ですのでEUでは先述のWEEE指令に基づき回収・処理が行われています）などについて研究を行ってきました。研究成果について行政も含む多くの利害関係者とも対話し、社会システムはEU型の一定の処理方針に対して、認証された処理会社により実行する形式を推奨して、その具体策を支援してきました。技術上の課題については、環境省の実証試験を関係者と共同で行い、多くは廃棄されていた電極材料（非鉄原料）を含むセル/EVAシートについて、実は廃棄と同等費用で資源循環が行えることなどを証明しました。また、リユースに関する検討も行いました。社会のコントロールを我が国でも行えるように、EUのPVに関するPRO(責任実行機関)の一つであるPVCYCLEのトレードマークを旗印とし日本支社的な扱いで組織したPV CYCLE JAPAN (PVCJ、※2)が2021年から活動を始めています。処理方針は基本的にEUと同じで、有害物質管理、最終処分の最小化と循環資源の最大化です。(※3:パンフレット参照)

これを日本に応用していくためにはいくつかの課題がありました。廃PVは産業廃棄物として扱われますが、日本特有の

ルールとの調整が今も問題です。PVパネルの利用のされ方も異なりました。日本は戸建ての発電所も多く、パネル枚数では全体の半分、発電所の数では99%を占めます。そのような点をする小さな発電所にかに周知して、どのように集めるかも大きな課題でした。これを解決するために、東北大学、PVCJ、宮城県、仙台市、環境省東北地方環境事務所、東北経済産業局で協議し、宮城県での収集実証事業を始めました(※4:東北電力HP)。戸建てなどから集まったパネルは、異種パネルの選別やリユース可能性判定などを経てPVCJの適正ルート工場でリサイクル処理されます。実証事業のPVCJ内での主担当は会員である東北電力が担っています。

多くの廃棄物において従来は処理レベルの決定が排出者個人にゆだねられていました。廃棄後それらがどうなるかは見えにくいため、安価な単純廃棄が選ばれてきました。今回のPVCJのような方式は推奨すべき循環ルートを示し、公共的に重要なレベルとして皆で選択し、監視し、支えていくものです。日本では極めて珍しいやり方ですが、製品から廃棄物の流れを「一方向」から「循環」に変えていくためには、このように経済原則だけで終わらせられないような仕組みが必要と考えています。

(※1) https://www.env.go.jp/earth/ondanka/supply_chain/gvc/supply_chain.html (※2) <https://pvcj.jp/> (※3) https://pvcj.jp/wdpspvcj/wp-content/uploads/2023/01/pvcj_panf.pdf (※4) <https://www.tohoku-epco.co.jp/oshirase/newene/pdf/solar-panel.pdf>

東北大学大学院環境科学研究科
客員教授 白鳥 寿一 (しらとり・としかず)

専門は資源工学、廃棄物、リサイクル。大学修了後、同和鉱業(現:DOWAホールディングス)入社。2004年より寄附講座も担当、現在に至る。DOWA HD顧問、PVCJ顧問

住所: 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-20
電話: 022-795-7402
E-mail: toshikazu.shiratori.d1@tohoku.ac.jp



東北大学大学院環境科学研究科
准教授 齋藤 優子 (さいとう・ゆうこ)

専門は、資源循環技術と社会システム。日本学術振興会特別研究員(RPD)、東北大学大学院環境科学研究科特任助教を経て、2020年4月より現職。

住所: 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-20
電話: 022-795-3859
E-mail: yuko.saito.b1@tohoku.ac.jp





サプライチェーンと環境問題

東北大学大学院環境科学研究科 准教授 金本圭一郎

金本 圭一郎 (かねもと・けいいちろう)

東北大学大学院環境科学研究科博士後期課程終了(学術)。九州大学持続可能な社会のための決断科学センター講師、信州大学経済学部講師を経て、現在は総合地球環境学研究所准教授と東北大学大学院環境科学研究科准教授をクロスアポイントメントで兼任。専門は、産業エコロジー、計算サステナビリティ学、環境経済学、産業連関分析、ネットワーク。



研究の背景と経緯

私たちの消費は、その製品・サービスが作られる過程で様々な環境負荷が排出されています。例えば、輸入された大豆はブラジルで森林を切り開かれて作られているものもあり、そこに住んでいる動植物を絶滅の危機に晒しています。サプライチェーンでの環境負荷は、人間活動が地球環境を踏みつけてきた足跡になぞらえて、環境フットプリントと呼ばれます。二酸化炭素はカーボンフットプリント、水はウォーターフットプリントなどと呼ばれます。このような様々な環境

フットプリントを大規模なコンピュータによる計算で明らかにしようとしています。

どの製品がどのように各国間をまたいで作られるのかは、各国の産業連関表と呼ばれる経済統計と各国間の貿易統計から作る方法を用いています。私はこれまで、シドニー大学への留学中に世界規模のサプライチェーンデータベースである Eora 多地域間産業連関表を開発、九州大学や信州大学、総合地球環境学研究所での研究を通じて様々な環境問題への応用に取り組んできました。

研究内容と進捗

最近の研究は、主に GIS とサプライチェーン分析と家庭・都市の環境フットプリント分析に取り組んでいます。

環境フットプリント分析は、各国間の貿易に伴う環境負荷を分析することが多いですが、国よりも細かな場所が重要となることも多々あります。例えば、インドネシアから日本への木材の輸出が生物多様性にとって悪いということが分かったとしても、日本はインドネシアからの木材の輸入をすべて停止するわけにはいきません。そこで、インドネシアのどこで伐採された木材が種を絶滅の危機に晒しているのかという地理情報をサプライチェーンと組み合わせる研究を行ってきました。地理情報は絶滅危惧種だけでなく、様々な情報が現在利用可能です。例えば、CO₂ 排出量、大気汚染物質、森林伐採などもサプライチェーン情報と組み合わせることで、各国の消費による環境影響を地図化することなどに拡張してきました。

各国の環境フットプリントの内大きな割合を家庭の消費が占めています。つまり、ライフスタイルを変えたり、消費活動を変化させると環境負荷を大きく減らす可能性があります。また、いくつかの地球環

境問題は各国間の環境負荷削減交渉が停滞しており、都市や企業などの自発的な行動の重要性が指摘されています。そこで、各家庭がどのようなライフスタイルをしているのか、そしてどのような消費をしているのかという家庭単位のマイクロ消費データとサプライチェーンに伴う環境負荷のデータを使って、どのような家庭がなぜ大きな環境フットプリントを出しているのかを明らかにする研究を進めています。そして、少数の家庭のライフスタイルや消費活動が問題なのか、それとも多くの家庭のそれらが問題なのかといった疑問にも答えようとしています。都市は消費活動の中心であり、都市の外側の生産活動に大きな依存をしています。例えば、大部分の電力や農作物が都市部の外で作られて、複雑なサプライチェーンを通じて都市の住民に消費されていることは想像がつくと思います。ただ、都市の環境フットプリントがどれだけ、どのように都市の環境フットプリントを減らせばよいのかは十分に分かっていません。そこで、各都市住民のマイクロ消費データとサプライチェーンに伴う環境負荷のデータから、都市の環境フットプリントを明らかにしようとしています。

今後の展開

TCFD (気候関連財務情報開示タスクフォース) や TNFD (自然関連財務情報開示タスクフォース) などの広がりから、企業を含めた様々な主体はサプライチェーンでの環境影響評価を求められています。このような中で、研究者として社会に貢献していきたいと思っています。



図1 森林伐採フットプリントの可視化

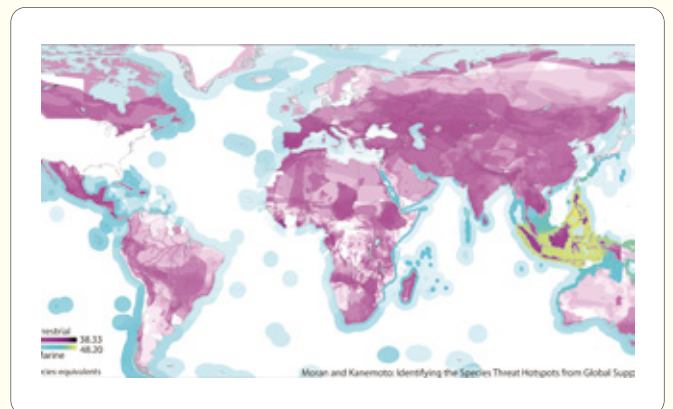


図2 米国の生物多様性フットプリント



ペロブスカイト太陽電池材料の合成法に新たな潮流を

東北大学大学院環境科学研究科 助教 横山幸司

横山 幸司 (よこやま・こうじ)

宮城県出身。2019年東北大学大学院環境科学研究科博士課程後期3年の課程修了。博士(学術)。日本学術振興会特別研究員(DC2)、パナソニック株式会社にて光・電子・創蓄電デバイスの研究開発・製造支援に従事したのち、2021年より現職。専門は無機材料化学、電気化学。



研究の背景と経緯

ペロブスカイト太陽電池は、原料溶液を塗るだけで作製できる、高効率で軽量・フレキシブルな太陽電池であり、シリコン系太陽電池では想像もし得なかった全く新しい利用シーンの創出が期待されます。ペロブスカイト太陽電池の光電変換層の候補材料としてヨウ化スズペロブスカイト材料が注目されていますが、酸素や水分に弱いという欠点があります。このため、ペロブスカイト材料の合成には、厳密な無酸素・禁水設備と非水系有機溶媒の使用が必須でした。しかし、実用

化を見据えた製造段階では、これらの使用は投入コストやエネルギーを増大させ、作業有害性の問題をも引き起こします。私は民間企業時代に、防毒マスクと保護衣を纏って過酷な製造現場に携わった経験から、「真に持続可能なモノづくりの姿とは？」を問い続けてきました。この問いに対する私なりの答えは、「特殊な設備や危険な試薬を使わずに、誰もが簡単に扱えるグリーンなプロセスに基づくこと」です。そこで現在は、酸素や水分に弱いペロブスカイト材料を、大気中で、しかも水中で作るという、一見不可能とも思える「究極のグリーン合成法」の開発に挑戦しています。

研究内容と進捗

大気中・水中でペロブスカイト材料を合成するにはまず、大気中で安定な原料水溶液の調製が必須です。しかし、原料のヨウ化スズは、酸化しやすく不安定な上、水にも溶けにくい厄介者です。これまでに、ヨウ化スズの酸化を防ぐ還元剤としてホスフィン酸、ヨウ化スズを水に溶かす錯化剤としてヨウ化水素酸が有用であることは見出されましたが、実はこれら自身も不安定で、大気中に転用すると原料水溶液は瞬時に濁り、劣化してしまいます(図1a)。さらにこれらの試薬は劇物でもあり、安全とは言えません。私は、大気中でも安定かつ安全な物質のみで、合成プロセスを構築することを試みました。試行錯誤の結果、①アスコルビン酸(ビタミンC)が大気中・水中でも有効に働く安全な還元剤であること、②ヨウ化水素酸よりも大気中で安定なヨウ化ナトリウムを錯化剤としてアスコルビン酸とともに用いると、原料水溶液が全く劣化しないこと、を新たに見出しました(図1b)。さらに興味深いことに、得られたペロブスカイト材料は、既存の材料

と比較しても、大気や水分に対して劣化しにくいことが分かりました(図2)。この安定性の起源はまだ明らかではありませんが、合成時に共存しているアスコルビン酸、ナトリウムイオンおよび水が、個別に、あるいは相乗的に作用した結果と考えられます。

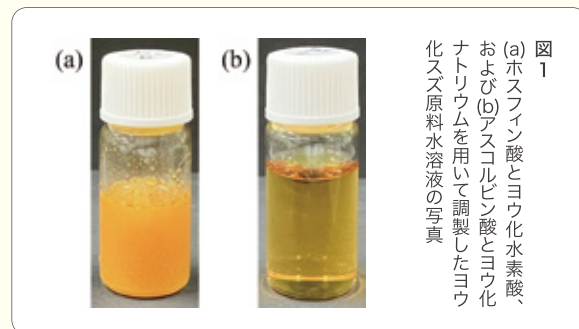


図1
(a)ホスフィン酸とヨウ化水素酸、および(b)アスコルビン酸とヨウ化ナトリウムを用いて調製したヨウ化スズ原料水溶液の写真

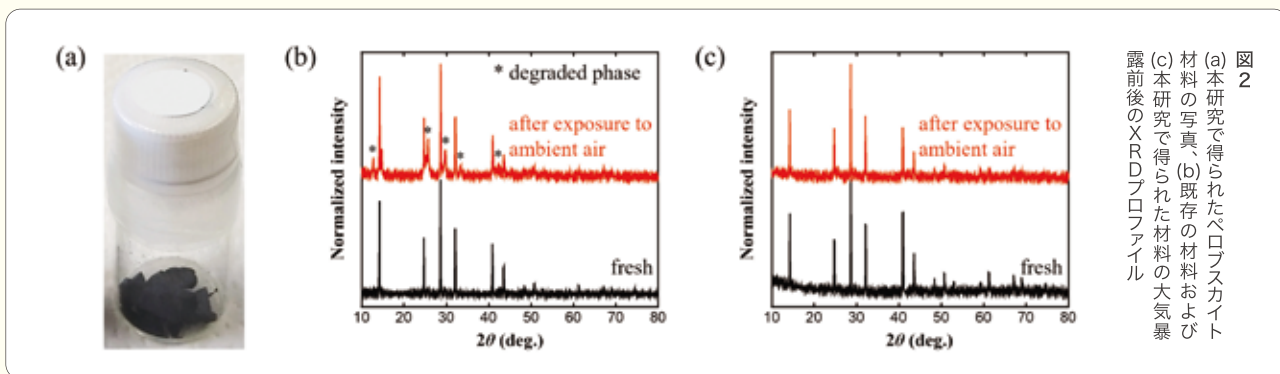


図2
(a)本研究で得られたペロブスカイト材料の写真、(b)既存の材料および(c)本研究で得られた材料の大気暴露前後のXRDプロファイル

今後の展開

グリーンな合成法で、既存の材料をも凌ぐ高品質・高安定なペロブスカイト材料を合成できたことは、ペロブスカイト太陽電池の実用化に向けた材料研究の大きな転換点となり得ます。本合成法をベースとすれば、究極的には、誰もが簡単にペロブスカイト太陽電池を作製で

きます。今後は、本合成法を基軸としたプロセス革新を牽引するべく、機器分析を駆使して合成反応機構や安定性の起源の解明を進めます。同時に、前人未達の「原料水溶液の塗布によるペロブスカイト光電変換層の大気中成膜」にも応用展開していきたいと考えています。

「正藍冷染」の学章、研究科ホールへ

環境科学研究科では、研究科本館内において、宮城県内に伝承されている伝統技法や国内産の木材を用いた作品の展示等を進めてきました。これは「開かれた大学」として一般の方も多く訪れるキャンパスで、学内外の方々に土地に根差した技法や自然素材を通じて地域文化に接していただくことを目的とした、環境科学研究科と地域との共同による取組です。2018年完成の壁面オブジェ「いろいろな樹」（写真参照、ニュースレター No.20で紹介）の設置以降、白石和紙への揮毫作品「環境科学」の展示（2020年、写真参照）、白石和紙と県内産木材を用いた大会議室

壁面整備（2020年、ニュースレター No.21で紹介）、応接室壁面木製地図設置（2021年）と続き、このほど、宮城県栗原市文字地区の千葉家が継承し、日本最古の藍染め技法と言われる「正藍冷染」による東北大学の学章が完成しました。

この完成を一区切りとして、一連の作品制作と展示に携わってくださった方々や、制作者様をご紹介いただいた山田裕一白石市長などをお招きし、大隅典子副学長（広報担当）にもご参加いただいで、2022年3月9日にお披露目を催しました。これらの作品は木工、和紙製作、染め、縫製等、様々な分野の方々それぞれに培ってこられた技術と知識を集わせることで完成したものです。製作工程の数々や技術が伝承されてきた歴史と背景に触れ、作品の「厚み」を共有した会となりました。なおこの時の様子は、東北放送のニュースや河北新報などでも紹介されました。



ホール展示作品との記念撮影



「お披露目会」の様子

アクセス Access

青葉山新キャンパス

【JR 仙台駅からのアクセス】
 仙台市営地下鉄 東西線「八木山動物公園駅」にて9分
 「青葉山」で下車（250円）南1出口 徒歩5分

青葉山東キャンパス

【JR 仙台駅からのアクセス】
 仙台市営地下鉄 東西線「八木山動物公園駅」にて9分
 「青葉山」で下車（250円）北1出口 徒歩10分

News Letter

環境科学研究科ニュースレター NO.24 / 2023年3月発行
 表紙：「東北電力 仙台太陽光発電所（宮城郡七ヶ浜町）」
 平成24年5月に運転開始、発電所出力2,000kW。
 仙台火力発電所構内に設置。

東北大学大学院環境科学研究科

Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University

【環境科学研究科本館】〒980-8572 仙台市青葉区荒巻字青葉468-1
 TEL 022-752-2233（総務係） FAX 022-752-2236
<https://www.kankyo.tohoku.ac.jp/>

