

# バーコート法を用いた有機無機ハライドペロブスカイト配向薄膜作製におけるNH<sub>4</sub>Cl添加効果と太陽電池応用に関する研究

大阪大学大学院工学研究科 電気電子情報工学専攻  
尾崎研究室 博士前期課程二年

村田 将司

## 1. 緒言

近年、エネルギー資源の確保や、低炭素社会実現の観点から、再生可能エネルギーの導入拡大が推進されている。その一翼を担う太陽光発電は、有限である石油や天然ガスなどの化石燃料を消費することなく、無限である太陽エネルギーから電力を創出することが可能であることから、持続可能な社会を実現するエネルギー源として注目されている。

現在、製品化され、実用に供している太陽電池パネルのほとんどは、無機半導体を光活性層として用いたものである。この中でもシリコン系太陽電池は最も長い歴史を持ち、家庭用、事業用を問わず広く普及している。しかし、それらの発電コストは、依然として火力発電や原子力発電と比較すると割高であることから、太陽光発電の大量導入社会を実現するためには、太陽電池パネルのさらなる低コスト化に向けた新材料・技術開発が必要とされている。

そこで近年、ペロブスカイト太陽電池と呼ばれる、有機無機ハイブリッドペロブスカイト材料を光活性層として用いた太陽電池が注目されている<sup>[1,2]</sup>。有機無機ハイブリッドペロブスカイトは、PbやSnなどの金属原子に加え、メチルアミン分子をはじめとする有機分子から構成される半導体材料であり、図1に示すようなペロブスカイト型構造を

有する。この材料は直接遷移型の電子遷移に由来する高い光吸収係数に加え、良好な光キャリア輸送特性を示すことから、ペロブスカイト太陽電池は無機系太陽電池と同等かそれを超える高い光電変換特性を示す。また、原材料となる物質が有機溶媒に可溶であることから、塗布法による低温環境下での薄膜作製が可能であり、ロールツーロール(Roll to Roll: R2R)プロセスなどの印刷技術を用いたフレキシブル基板上への太陽電池素子の作製も検討されている。このように、簡便な作製プロセスと高いエネルギー変換効率という特徴から、有機無機ハイブリッドペロブスカイトは、太陽電池パネルの低コスト化、引いては太陽光発電の発電コストの低減を実現する材料として注目を集めている。

高効率かつ低コスト製造可能な太陽電池として注目を集めるペロブスカイト太陽電池であるが、現状、素子寿命および安定性に問題を抱えており、実用化には至っていない。加えて、有機無機ハイブリッドペロブスカイトは化学反応によって合成され、その反応過程の制御が困難であることから、高品質な薄膜を得るためのプロセス開発が課題であった。現状、一様で高品質なペロブスカイト薄膜の作製には、図2に示すような貧溶媒滴下プロセス(アンチソルベントプロセス)を経由するスピコート法を用いた製膜が広く用いられているが<sup>[3]</sup>、大面積基板への適応が困難であることから、量産に適したプロセスの必要性が指摘されている。また、アンチソルベントプロセスにおいては、滴下する貧溶媒の量や滴下のタイミングに加え、滴下高さやスピードなど様々なパラメーターによって生成物の品質が変化するため、再現性の確保が問題となっている。そこで、本研究では、R2Rプロセスなどの量産化技術にも展開可能な印刷法の一つであるバーコート法に着目し、有機無機ハイブリッドペロブスカイトの代表的な材料であるCH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub>(MAPbI<sub>3</sub>)の簡易かつ大面積製膜可能なプロセスの開発に取り組んだ。その結果、先行研究では見られない、非常に高い結晶性を有したMAPbI<sub>3</sub>配向薄膜の作製に成功し、大面積塗布可能な手法によって良好な光電

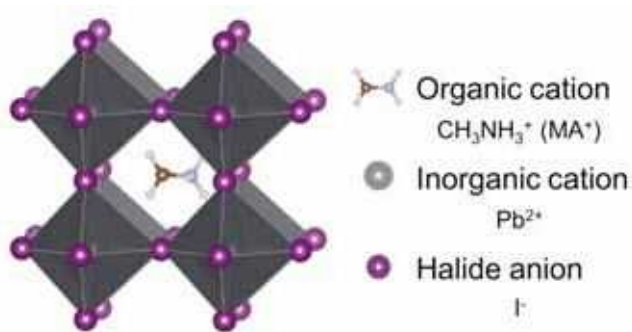


図1. 有機無機ハイブリッドペロブスカイトの代表的な材料であるCH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub>の結晶構造。

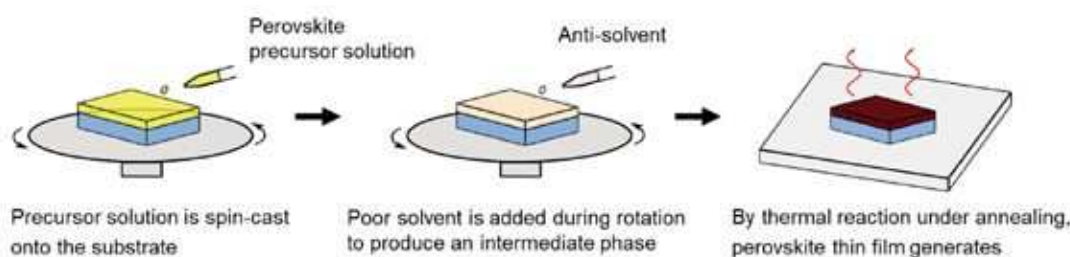


図2. スピコート法によるペロブスカイト薄膜作製プロセス。

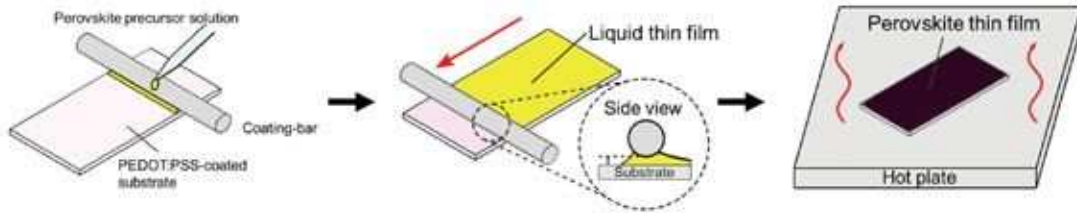


図3. 本実験で用いたバーコート法によるペロブスカイト薄膜作製プロセス.

変換特性を有する太陽電池素子の作製に成功した。

## 2. バーコート法によるMAPbI<sub>3</sub>薄膜の作製

図3にバーコート法によるMAPbI<sub>3</sub>薄膜作製の手順を示す。Dimethyl sulfoxide (DMSO) を溶媒とし、ペロブスカイト前駆体であるCH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>I (MAI), PbI<sub>2</sub>がそれぞれ1.3Mとなるような前駆体溶液を調製した。導電性高分子poly(3,4-ethylenedioxythiophene) doped with poly(4-styrenesulfonate) (PEDOT:PSS) が被覆された基板の上に、コーティングバーによって前駆体溶液を塗布し、液膜の載った基板に100℃、10 minのアニール処理を行うことで溶媒の蒸発と熱反応を引き起こし、MAPbI<sub>3</sub>薄膜を得た。作製した薄膜について吸収スペクトルの測定を行った結果、吸収端波長から計算したバンドギャップエネルギーは1.59 eVと過去の文献値と一致したことから<sup>[4]</sup>、本製膜手法によってMAPbI<sub>3</sub>薄膜が得られたことを確認した。

図4(a)(b)に、従来法であるスピコート法およびバーコート法によって作製を行ったMAPbI<sub>3</sub>薄膜の顕微鏡像を示す。均質で緻密なスピコート薄膜に対し、バーコート法によって作製したMAPbI<sub>3</sub>薄膜は、表面形状が粗く不均質となっていることが分かる。SEMによる高倍率での観察の結果、スピコート薄膜は数100 nmの微小なグレインが緻密に集合して薄膜を形成しているのに対し、バーコート薄膜は100 μm程度の巨大なグレインによって薄膜が構成されており、作製プロセスの違いによって薄膜の形態が大きく変化することが判った。これは、両者の製膜プロセスにおいて結晶成長様式が異なることを示唆している。

作製したバーコート薄膜を光活性層として用いて、ITO/PEDOT:PSS/MAPbI<sub>3</sub>/[60]PCBM/Agの構造を有する逆構造型ペロブスカイト太陽電池素子を作製し太陽電池特性の測定を行った。その結果、順方向掃引時の短絡電流密度 $J_{sc}$ は17.1 [mA/cm<sup>2</sup>]、開放電圧 $V_{oc}$ は0.63 V、フィル

クター (Fill Factor: FF) は0.49であり、光電変換特性 (Power Conversion Efficiency: PCE) は5.3%と低い特性となった。 $V_{oc}$ とFFの値が低いことから、図4(b)で示したバーコート薄膜の不均一性が、光キャリアの失活と光活性層-電荷輸送層界面でのキャリア輸送障害を引き起こしていると考えられる。

## 3. バーコート製膜におけるMAPbI<sub>3</sub>薄膜の結晶成長メカニズムの検討

作製プロセスの変化によるMAPbI<sub>3</sub>薄膜の形態変化とバーコート薄膜の膜質向上について検討を行うため、両製膜プロセスにおける結晶成長メカニズムについて考察を行った。

スピコート法による薄膜作製においては、アンチソルベントプロセスにおける貧溶媒の滴下条件が、生成する薄膜の膜質に影響を与えることが知られている。滴下を行う貧溶媒として、ペロブスカイト前駆体に対して良溶媒であるDMSOやN,N-dimethylformamide (DMF) と混和性を有する溶媒が用いられる。スピコート最中に滴下された貧溶媒は、ペロブスカイト前駆体溶液と混ざり、前駆体から良溶媒を奪い取った後、回転遠心力によって良溶媒と共に取り除かれる。これにより、溶液中の濃度が急速に増大し、飽和状態となることで、結晶核が一気に析出した中間状態が生成する。生成された中間状態は、わずかに良溶媒を含む状態であるが、その後のアニール処理によって良溶媒は蒸発し、基板上の多数の結晶核から結晶が成長することで、図4(a)に示したような微結晶が密に詰まった薄膜が得られる<sup>[5]</sup>。

これに対し、本実験で用いたバーコート法による製膜においては、図2で示したように、コーティングバーを掃引して作製した液膜に対して直接アニール処理を行う。液膜中は良溶媒でかつ沸点の高いDMSOを豊富に含むことから、アニール処理直前の液膜には結晶核の生成はないと予想される。ゆえに、アニール処理の際に基板と前駆体溶液の固液界面で起きる不均質核生成が、バーコート製膜における結晶成長の主な駆動力であると考えられる。貧溶媒の滴下によって結晶核を一気に析出させるスピコート法と異なり、少数の結晶核から結晶成長が起きるため、バーコート法では図4(b)で示したように、巨大なグレインによって構成された薄膜が得られたと考えられる。一方で、アニール処理の際には、溶媒の蒸発による液膜の急激な体積減少と、溶液濃度増大による結晶核の生成および結晶成長が同時に進行するため<sup>[6]</sup>、表面形状が粗く不均質な薄膜が生成したと考えられる。

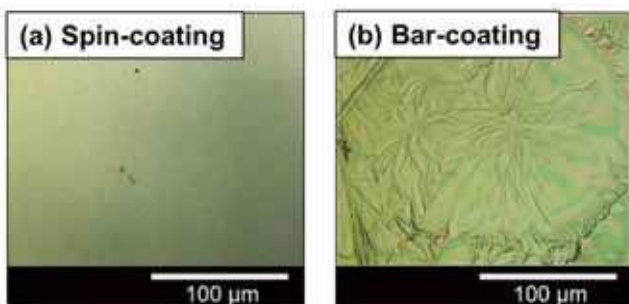


図4. (a)スピコート薄膜および(b)バーコート薄膜の顕微鏡像

#### 4. NH<sub>4</sub>Clの添加による反応プロセスの最適化

検討した結晶成長メカニズムをもとに、反応プロセスの最適化を行いバーコート薄膜の膜質の改善を試みた。プロセスの最適化には、アンチソルベント法に代表される結晶核の生成および結晶成長を急速に進行させる手法に加えて、それとは対照的に、極性の高い溶媒や、添加物を前駆体溶液に加えることで反応および結晶成長速度を低減させる手法が報告されている。添加物として用いられる物質の一つであるNH<sub>4</sub>Clは、溶液中でPbI<sub>2</sub>と中間体を生成しMAIとPbI<sub>2</sub>間の反応を妨げる働きが報告されている<sup>[7,8]</sup>。従って、前駆体溶液中にNH<sub>4</sub>Clを添加することで、溶媒蒸発に対して核生成および結晶成長速度を抑制し、バーコート薄膜作製の反応過程の制御が可能であると考えた。

実験として、前述の前駆体溶液の作製時に所定量のNH<sub>4</sub>Clを添加して調製した溶液を用いてバーコート製膜を行った。NH<sub>4</sub>Clの添加濃度は0.1Mから0.4Mまで0.1Mごとに变化させた。図5(a)-(d)に所定濃度のNH<sub>4</sub>Clを添加して作製したバーコート薄膜の顕微鏡像を示す。NH<sub>4</sub>Clの添加濃度に依存して、バーコート薄膜の表面形状が大きく変化した。NH<sub>4</sub>Clを0.1M添加した場合には、図5(a)に示すように、薄膜の不均一性が緩和され、100μmを超える巨大なグレインと結晶粒界に存在する微結晶で構成された薄膜が得られた。NH<sub>4</sub>Clを0.2M添加した場合は、図5(b)に示すように結晶粒界が抑制され巨大なグレインのみで構成された一様で高品質な薄膜が得られた。一方で、NH<sub>4</sub>Clの添加濃度が0.3M, 0.4Mの場合には、図5(c)(d)のように微結晶が析出し、不均質な薄膜が得られた。NH<sub>4</sub>Clを0.2M添加した場合は、核生成が効果的に抑制され、少数の結晶核から結晶成長が起こったため、巨大なグレインのみで構成された薄膜が生成したと考えられる。一方で、NH<sub>4</sub>Clを0.3M, 0.4M添加した場合には、過剰な量のNH<sub>4</sub>Clにより結晶成長が阻まれ、溶媒が蒸発するまでにMAIとPbI<sub>2</sub>間の反応が終了しなかったため不均質な薄膜が生成したと推測

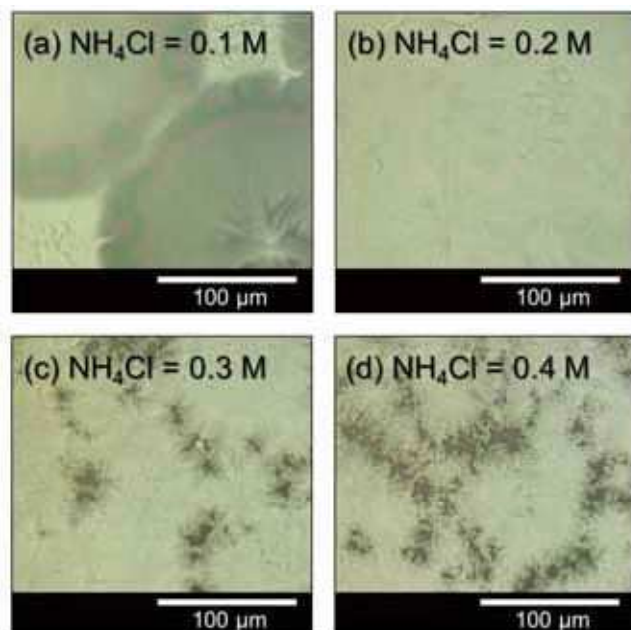


図5. NH<sub>4</sub>Cl添加時のバーコート薄膜の顕微鏡像 (a)0.1M添加時. (b)0.2M添加時. (c)0.3M添加時. (d)0.4M添加時.

される。

ペロブスカイト前駆体であるMAIとPbI<sub>2</sub>以外に、塩素原子を含むNH<sub>4</sub>Clを添加したことにより、MAPbI<sub>3</sub>のヨウ素原子の一部が置換され、薄膜中にヨウ化物および塩化物の混晶であるMAPbI<sub>x</sub>Cl<sub>3-x</sub>が存在している可能性が考えられるが、XPSによって薄膜表面および内部の構成元素を分析したところ、いずれの添加条件下においてもCl原子に対応するスペクトルピークは確認されなかった。また、AサイトカチオンがNH<sub>4</sub><sup>+</sup>イオンに置換され、NH<sub>4</sub>PbI<sub>3</sub>が生成している可能性も考えられるが、薄膜の吸収スペクトルにおいて吸収端波長のシフトが確認されなかったことから組成の変化は生じておらず、NH<sub>4</sub>Clは溶媒の蒸発と共に取り除かれたと推測される。

#### 5. 作製した薄膜の結晶構造解析

作製した薄膜の結晶性および配向を調べるため、XRD out-of-plane測定を行った。図6(a)(b)にスピコート法およびバーコート法により作製したMAPbI<sub>3</sub>薄膜の面外XRDパターンを示す。

スピコート薄膜の場合、回折角 $2\theta$ が14.1°, 20.0°, 28.5°, 31.9°, 40.7°のときに回折ピークが観測された。これらのピークは正方晶のMAPbI<sub>3</sub>において、それぞれ(110), (200), (220), (310), (400)からの回折に対応する<sup>[9]</sup>。スピコート薄膜では、(110), (220)に由来する回折ピークが比較的大きく、これは過去に報告されたXRDパターンに類似している<sup>[3]</sup>。複数の結晶面に由来する回折ピークが確認されたことに加えて、ガラス基板のハローパターンが観察されることから、スピコート薄膜は、基板面外方向に対する結晶性が低いことが判る。これは顕微鏡観察の結果において、スピコート薄膜が微結晶から構成され、長周期構造を有していないことに一致している。貧溶媒滴下によって結晶核の析出を促すスピコート法による製膜では、結晶性の高い薄膜を製膜することは原理上困難であると予想される。

バーコート薄膜の場合、NH<sub>4</sub>Cl無添加時には回折角 $2\theta$ が14.1°, 20.0°, 28.4°, 40.5°のときに回折ピークが観測された。これらのピークは1.4.1節で示した正方晶のMAPbI<sub>3</sub>において、(110), (200), (220), (400)からの回折に対応する。スピコート薄膜とは異なり、(200), (400)に由来する回折ピークが大きく、基板のハローパターンは確認されなかった。NH<sub>4</sub>Clを0.2M添加した場合には、(200), (400)に由来する回折ピークの強度がさらに増大し、(110), (220)の回折に由来するピークは確認されなかった。従って、NH<sub>4</sub>Clを0.2M添加して作製したバーコート薄膜は、図6(c)で示すように、正方晶のMAPbI<sub>3</sub>において、結晶方位[100]が基板面外方向に高度に配向していることが明らかになった。

先行研究では、MAPbI<sub>3</sub>の製膜において、基板の種類や下地層、薄膜の製膜手法(液相成長, 気相成長)に依らず、結晶方位[110]が基板面外方向に配向する傾向にあることが報告されているが、本研究で作製したバーコート薄膜は、図6(b)(c)に示したように、結晶方位[100]が基板面外方向に配向していた。分子軌道計算の結果より、MAPbI<sub>3</sub>と

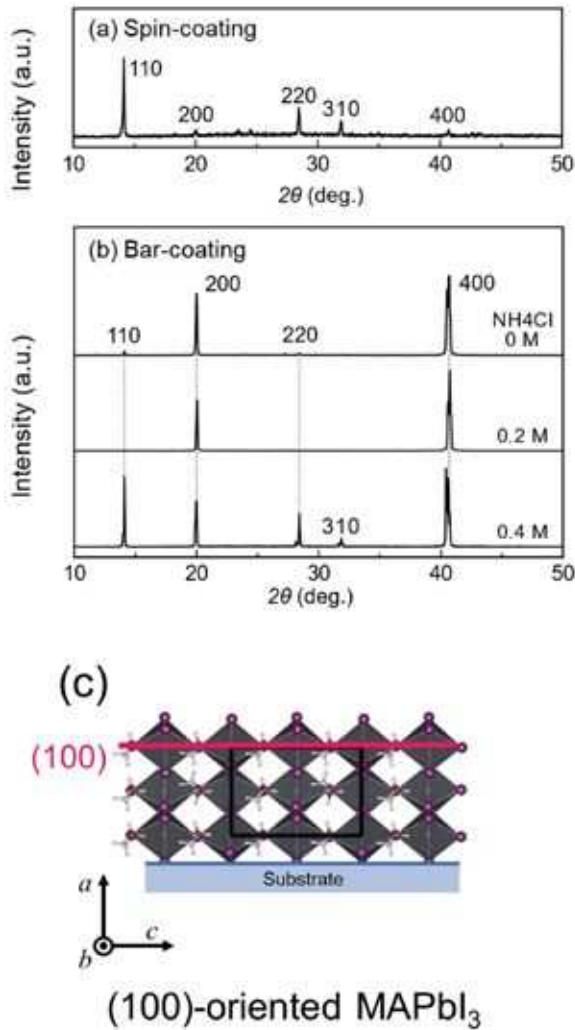


図6. スピンコート法およびバーコート法により作製したMAPbI<sub>3</sub>薄膜のXRDパターン(Out-of-plane). (a)スピンコート薄膜. (b)バーコート薄膜. (c)(100)が基板面外方向に配向したMAPbI<sub>3</sub>の概念図

PCBMのヘテロ界面において、MAPbI<sub>3</sub>-(100)とPCBMの界面は、MAPbI<sub>3</sub>-(110)との界面と比較して効率的に電荷輸送が生じることが報告されていることから<sup>[10]</sup>、バーコート法による製膜およびNH<sub>4</sub>Clの添加効果による結晶軸[100]の高配向の実現は、逆構造型ペロブスカイト太陽電池の光電変換特性の向上に重要な知見を与えるものと考えられる。

このバーコート薄膜の結晶性について詳しく評価を行うため、基板面外方向の結晶方位の傾き(チルト分布)をXRDロックンクカーブ測定によって評価を行った。NH<sub>4</sub>Clを0.2M添加して作製したMAPbI<sub>3</sub>薄膜の200反射および400反射のロックンクカーブ測定結果を図7(a)(b)に示す。MAPbI<sub>3</sub>薄膜の200反射および400反射のロックンクカーブの半値幅は、それぞれ、0.207°、0.301°と見積もられ、MAPbI<sub>3</sub>の単結晶の合成例と同等の半値幅であることが分かった<sup>[11]</sup>。すなわち、NH<sub>4</sub>Clの添加による結晶成長の制御によって、極めて簡便な液相プロセスで単結晶に匹敵する高い結晶性を有するMAPbI<sub>3</sub>薄膜を作製することに成功した。

MAPbI<sub>3</sub>単結晶中のキャリア移動度およびキャリア寿命

は多結晶薄膜中の特性より著しく優れていることが知られており、結晶性の高い薄膜の作製は、デバイス特性の向上において重要であると考えられる<sup>[12]</sup>。加えて、太陽電池素子のデバイス構造上、キャリアは基板に対して垂直方向に輸送されるため、基板面外方向に著しく結晶性の高いパーコート薄膜は、太陽電池デバイスへの応用に好都合であり、光キャリアの輸送および光電変換特性の向上に寄与することが期待される。

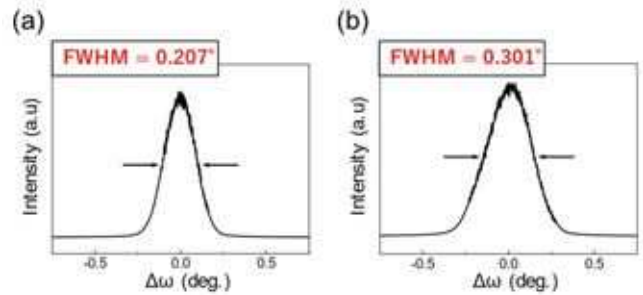


図7. NH<sub>4</sub>Clを0.2M添加して作製したMAPbI<sub>3</sub>薄膜のXRDロックンクカーブ測定結果. (a)200反射ロックンクカーブ. (b)400反射ロックンクカーブ.

## 6. バーコート薄膜を用いた太陽電池の光電変換特性

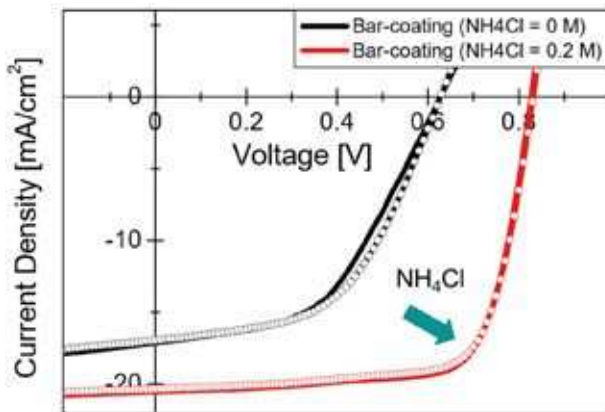
NH<sub>4</sub>Clの添加による結晶成長の抑制によってMAPbI<sub>3</sub>パーコート薄膜の形態が大幅に変化することを示した。特にNH<sub>4</sub>Clを0.2M添加条件下では、結晶粒界が抑制され、100μmの巨大なグレインで構成されたような薄膜が得られた。また、結晶構造解析の結果から、この薄膜は基板面外方向に結晶方位[100]軸が高度に配向していることが明らかになった。これらの特徴は、スピンコート法による製膜では発現しなかった性質であり、薄膜内の構造欠陥の減少によるキャリア輸送特性の向上が期待できる。

NH<sub>4</sub>Clが無添加の場合と、0.2M添加した場合のMAPbI<sub>3</sub>パーコート薄膜を活性層として用いた太陽電池特性を測定し、比較を行った。両者のJ-V特性を図8に、また順方向掃引時および逆方向掃引時に測定された評価パラメータを表1に示す。NH<sub>4</sub>Clの添加により、順方向掃引時のJ<sub>sc</sub>が17.1から20.6[mA/cm<sup>2</sup>]、V<sub>oc</sub>についても0.63から0.83[V]に大幅に増大したことが確認された。FFは0.49から0.73まで向上し、その結果、光電変換効率は5.3%から12.5%とNH<sub>4</sub>Clが無添加の場合と比較して大幅に向上した。また、無添加時に存在していたJ-V特性のヒステリシス(掃引方向間での特性のずれ)は解消され、良好な太陽特性を示した。

NH<sub>4</sub>Clを0.2M添加した場合の直列抵抗値R<sub>s</sub>は無添加時よりも大幅に減少しているが、これは、MAPbI<sub>3</sub>薄膜とPCBM層とのヘテロ界面、およびPCBMとAg電極間のヘテロ界面での接触抵抗が、平坦な薄膜の生成により減少したことを示している。加えて、図6で示した結晶性向上による薄膜内のキャリア移動度の増大が、J<sub>sc</sub>およびFFの向上に寄与したと考えられる。また、V<sub>oc</sub>の増大は、逆方向飽和電流I<sub>0</sub>の減少によるものであり、MAPbI<sub>3</sub>薄膜内の再結合中心となる欠陥準位の減少と、それによる電子正孔対の消滅が緩和されたことを示している。先行研究では、

表1. NH<sub>4</sub>Clが無添加の場合と、0.2M添加した場合のMAPbI<sub>3</sub>パーコート薄膜を活性層とする太陽電池素子の光電変換パラメーター

Additive	Sweep direction	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (V)	FF	PCE (%)	$R_s$ (Ω)	$R_{sh}$ (kΩ)
w/o NH <sub>4</sub> Cl	Forward	17.1	0.63	0.49	5.3	393	5.68
	Reverse	17.0	0.63	0.52	5.6	314	6.40
w/ 0.2 M NH <sub>4</sub> Cl	Forward	20.6	0.83	0.73	12.5	127	20.3
	Reverse	20.3	0.83	0.73	12.3	126	19.3

図8. NH<sub>4</sub>Clが無添加の場合と、0.2M添加した場合のMAPbI<sub>3</sub>パーコート薄膜を活性層とする太陽電池素子のJ-V特性。

グレインサイズの増大による構造欠陥の抑制が、深い準位を形成する欠陥の密度を減少させ、薄膜内のSRH再結合を抑制することが報告されており<sup>[13,14]</sup>、NH<sub>4</sub>Clの添加による膜質の向上とグレインサイズの増大が $V_{oc}$ の向上に寄与したと考えられる。

## 7. 結言

大面積塗布可能なパーコート法によるMAPbI<sub>3</sub>薄膜の製膜において、NH<sub>4</sub>Clの添加による結晶成長の制御によって、100 μmの巨大なグレインで構成され、結晶粒界が抑制された一様なMAPbI<sub>3</sub>薄膜の作製に成功した。また、作製した薄膜は、結晶方位[100]が基板面外方向に高度に配向しており、MAPbI<sub>3</sub>単結晶と同等の結晶性を有する等、スピンコート法による製膜では発現しなかった性質を有していた。この薄膜を活性層として用いることで、良好な光電変換効率が確認された。本研究で得られた知見は、[CH(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>]PbI<sub>3</sub>(FAPbI<sub>3</sub>)や、FA<sub>1-x</sub>MA<sub>x</sub>PbI<sub>3</sub>、FA<sub>1-x</sub>Cs<sub>x</sub>I<sub>3</sub>など、現在研究が進められている他の有機無機ハイブリッドペロブスカイトの製膜にも有効であると考えられ、ペロブスカイト太陽電池の大面積化のみならず、さらなる光電変換特性の向上と安定性の向上に繋がるものであると考えられる。

## 8. 謝辞

本研究を遂行するにあたり、終始手厚い御指導と御鞭撻を賜り、数多くの御教授、御助言を頂きました大阪大学の

尾崎雅則教授と藤井彰彦准教授に衷心より感謝の意と御礼の言葉を申し上げます。また、本研究を遂行するにあたり、数多くの御指導、御厚意を賜りました、大阪大学の吉田浩之講師、久保等助教に深く感謝の意を表します。日々の研究遂行にあたり、数々のご指導、御助言を賜りました株式会社カネカの辻良太郎博士に心より感謝申し上げます。

## 投稿論文

M. Murata, T. Oizumi, M. Gi, R. Tsuji, M. Arita, A. Fujii and M. Ozaki

“Highly (100)-oriented CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> thin film fabricated by bar-coating method and its additive effect of ammonium chloride” *Solar Energy Materials and Solar Cells* **208**, 110409 (2020).

## 参考文献

- [1] A. Kojima *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.* **131**, 6050-6051 (2009).
- [2] M. M. Lee *et al.*, *Science* **338**, 643-647 (2012).
- [3] N. J. Jeon *et al.*, *Nat. Mater.* **13**, 897-903 (2014).
- [4] S. De Wolf *et al.*, *J. Phys. Chem. Lett.* **5**, 1035-1039 (2014).
- [5] M. Konstantakou *et al.*, *Crystals* **7**, 291-311 (2017).
- [6] Y. Zhao *et al.*, *Chem. Soc. Rev.* **45**, 655-689 (2016).
- [7] C. Zuo *et al.*, *Nanoscale* **6**, 9935-9938 (2014).
- [8] Y. Rong *et al.*, *Nat. Commun.* **8**, 1-8 (2017).
- [9] T. Baikie *et al.*, *J. Mater. Chem. A* **1**, 5628-5641 (2013).
- [10] J. Yin *et al.*, *J. Phys. Chem. Lett.* **6**, 1396-1402 (2015).
- [11] Y. Liu *et al.*, *Adv. Mater.* **27**, 5176-5183 (2015).
- [12] F. Maddalena *et al.*, In *Organic-Inorganic Halide Perovskite Photovoltaics: From Fundamentals to Device Architectures*, Springer, pp 201-222 (2016).
- [13] H. D. Kim *et al.*, *Adv. Mater.* **28**, 917-922 (2016).
- [14] W. Nie *et al.*, *Science* **347**, 522-525 (2015).



株式会社 村田製作所  
技術・事業開発本部  
共通基盤技術センター  
分析センタ 勤務

セラミックス原料の組成分析  
および分析技術の開発に従事  
(電気電子 令和2年前期)