

ペロブスカイト 太陽電池の

耐久性・安定性・発電効率向上を実現する
層材料と成膜プロセス・デバイス設計

監修：池上 和志

AndTech

巻頭言

桐蔭横浜大学 池上 和志

本書籍をまとめている最中に、宮坂力先生の第 41 回京都賞受賞という極めて喜ばしいニュースが飛び込んできた。ペロブスカイト材料を太陽電池に応用する研究が始まってから 20 年以上の月日が流れたが、その間、さまざまな契機によって研究が加速度的に進展してきたことが、今回の栄えある受賞へとつながっている。また昨今では、急増する AI 需要の電力を賄うクリーンなエネルギー源として、あるいは宇宙空間での発電デバイスとしての可能性も大きく注目されている。

しかし、ペロブスカイト太陽電池の開発をめぐるロードマップには、材料の安全性とリサイクルの問題が常につきまとしてきた。RoHS 指令をはじめとする鉛使用規制は、本研究において長年ブレーキとなってきたことは事実であり、だからこそ我々自身も慎重に研究を重ねてきた。一方で、近年の「地球沸騰化」とも形容される猛暑や酷暑といった環境変化に加え、緊迫する中東情勢は、エネルギーの安定確保やサプライチェーンの強靱化という課題に、いや応なしに世間の注目を集めさせている。再生可能エネルギー導入に対する官民の強い期待が現在の研究開発を支えているが、「エネルギーインフラを再び日本国内で製造できるか」という点が、今まさに大きな試金石となっている。ペロブスカイト太陽電池の製造は、従来のシリコン太陽電池とは異なり、日本が培ってきた世界に誇るべき化学・材料系の製造技術が大いに活きる分野である。これらを基盤として、新たなエネルギー産業の創出と、軽量のペロブスカイト太陽電池が切り拓く新たなエネルギーインフラの可能性を、我々は今こそ真剣に模索しなければならない。

ペロブスカイト太陽電池に対する最大の期待は、これまで設置が不可能であった場所での活用である。ビルの壁面や窓だけでなく、農地（営農型太陽光発電）などへとその領域は広がっている。従来型のシリコン太陽電池は、いわば「適地」を選んで設置されてきたが、多種多様な場所への設置が進めば、その発電量は設置環境によってまちまちとなる。つまり、全体の発電量を一律に管理することは難しくなる。しかしその一方で、エネルギー需要の大きい都市部において、このような分散型かつ変動性のあるエネルギー源をいかに受け入れ、社会システムに組み込んでいくかという視点も不可欠である。ペロブスカイト太陽電池の導入は、単なるデバイスの置き換えにとどまらず、未来のエネルギー需給のあり方そのものを根本から見つめ直す契機になると私は考えている。

また、宇宙空間での活用は、本研究の開始当初からの大きなテーマの一つである。我々は 12 年前に、この材料が他の太陽電池よりも優れた放射線耐久性を持つ可能性を示したが、その宇宙への広がりは今や現実味を帯びている。さらに最近では、冒頭でも触れたように、膨大な AI のエネルギー需要を支える次世代のクリーン電源としても、活発な議論が交わされるようになった。

本書は、こうしたペロブスカイト太陽電池の研究開発が加速する中で、「国内製造の確立」と「日本国内の産業活力の創出」という観点に立ち、現在抱えている諸課題の解決に最前線で取り組む企業や大学の皆様に執筆を仰いだものである。海外で大型ペロブスカイト太陽電池の製造・量産化の報道が相次ぐ中、日本の優れた技術力を結集し、いかにして国内生産の課題を乗り越えていくか、本書がその一石を投じるものとなることを期待している。材料面、成膜技術、あるいはペロブスカイト太陽電池を支える周辺技術を融合させることで、日本国内に電力の地産地消を実現する、新たな分散型エネルギー社会が力強く誕生することを切に願うものである。

AndTech

監修者紹介

池上 和志

桐蔭横浜大学 医用工学部 教授
ペクセル・テクノロジーズ株式会社 取締役を兼任
博士（理学）

【略 歴】

2002年筑波大学大学院化学研究科修了。博士（理学）。2002年筑波大学文部科学技官等を経て2005年に桐蔭横浜大学発ベンチャー企業・ペクセル・テクノロジーズ株式会社に博士研究員として入社。2006年より桐蔭横浜大学助手、講師、准教授を経て2020年より教授。2022年より大学院工学研究科・研究科長、2026年より医用工学部・学部長。2009年よりペクセル・テクノロジーズ株式会社取締役。

【専 門】

有機光化学、光電気化学、有機系太陽電池の測定法。ペロブスカイト太陽電池の研究では、スピンコート法、インクジェット法による成膜装置の開発および評価、鉛の回収技術、屋外耐久試験装置の設計・構築など、材料開発から評価技術まで幅広く従事している。

【主な業績】

監修『ペロブスカイト太陽電池の開発技術と最新実用化指針』（技術教育出版社,2025年）
監修『ペロブスカイト太陽電池の最新開発・製造・評価・応用技術：高効率化・大面積化/安定性・耐久性向上/環境対応』（AndTech 2023年）
受賞、第21回（2022年度）APEX/JJAP編集貢献賞, 応用物理学会
日本太陽光発電学会理事(2025年～2026年)

執筆者紹介

- 池上 和志 桐蔭横浜大学 医用工学部 教授 博士（理学）
 ・・・・（巻頭言、第5章 第1節 第1項、第5章 第2節 第2項）
- 須賀 健雄 早稲田大学 先進理工学部 応用化学科 准教授 博士（工学）
 ・・・・（第1章 第1節 第1項）
- 高橋 秀聡 保土谷化学工業株式会社 研究開発部 筑波研究所
 デバイス評価グループ ・・・・（第1章 第1節 第2項）
- 渡邊 恒暁 イムラ・ジャパン株式会社 研究開発部 次世代太陽電池研究室
 室長 博士（理学） ・・・・（第1章 第1節 第3項）
- 富田 大貴 埼玉大学大学院理工学研究科 博士前期課程 数理電子情報専攻
 電気電子物理工学PG 修士（工学） ・・・・（第1章 第2節 第1項）
- 石川 良 埼玉大学大学院理工学研究科 数理電子情報部門
 電気電子物理領域 准教授 博士（理学）
 ・・・・（第1章 第2節 第1項）
- チョン ミンアン 京都大学 化学研究所 助教 博士（工学）
 ・・・・（第1章 第2節 第2項）
- 若宮 淳志 京都大学 化学研究所 教授 博士（工学）
 ・・・・（第1章 第2節 第2項）
- 丸本 一弘 筑波大学 数理物質系 教授
 筑波大学 有機無機量子スピサイエンス・テクノロジー研究
 センター（OIQSST） センター長 博士（理学）
 ・・・・（第1章 第3節 第1項）
- 柳田 真利 国立研究開発法人物質・材料研究機構
 エネルギー・環境材料研究センター 太陽光発電材料グループ
 主幹研究員 博士（理学） ・・・・（第1章 第3節 第2項）
- 赤塚 有杜 千葉大学大学院 融合理工学府 先進理化学専攻
 大学院博士後期課程 日本学術振興会特別研究員（DC1） 修士
 ・・・・（第1章 第3節 第3項）

執筆者紹介

吉田 弘幸	千葉大学大学院 工学研究院 教授 博士（理学）（第1章 第3節 第3項）
西村 直之	国立研究開発法人産業技術総合研究所 主任研究員 博士（工学）（第1章 第4節 第1項）
林 靖彦	国立大学法人岡山大学 学術研究院環境生命自然科学学域 教授 博士（工学）（第1章 第4節 第2項）
奥田 篤	キヤノン株式会社 化成開発センター 主席（第1章 第4節 第3項）
松島 敏則	九州大学 カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所 准教授 博士（工学）（第2章 第1節）
來福 至	青山学院大学 理工学部 電気電子工学科 助教 博士（工学）（第2章 第2節）
石河 泰明	青山学院大学 理工学部 電気電子工学科 教授 博士（工学）（第2章 第2節）
白井 康裕	国立研究開発法人物質・材料研究機構 エネルギー・環境材料研究センター 太陽光発電材料グループ グループリーダー Ph.D.（第2章 第3節）
大平 圭介	北陸先端科学技術大学院大学 教授 博士（工学）（第2章 第4節）
竹岡 裕子	上智大学 理工学部 教授 博士（工学）.....（第3章 第1節）
浜本 伸夫	Roll To Roll研究会 代表.....（第4章 第1節）
前田 憲宏	株式会社マイクロジェット 営業部 主事.....（第4章 第2節）

執筆者紹介

船山 遼斗	紀州技研工業株式会社 開発本部 PE開発部 (第4章 第3節)
家永 隆史	紀州技研工業株式会社 開発本部 PE開発部 課長 工学博士 (第4章 第3節)
原田 光	紀州技研工業株式会社 開発本部 PE開発部 (第4章 第3節)
幾原 志郎	株式会社麗光 取締役 (第5章 第1節 第2項)
角田 恭彦	株式会社I.S.T 基礎研究部 第二研究 Manager (第5章 第1節 第3項)
西森 克吏	三菱ガス化学株式会社 東京研究所 主任研究員 (第5章 第1節 第4項)
硯里 善幸	山形大学 有機エレクトロニクスイノベーションセンター センター長 教授 山形大学 大学院理工学研究科化学・バイオ専攻 教授 博士 (工学) (第5章 第1節 第5項)
大和田 寛人	信越化学工業株式会社 シリコン電子材料技術研究所 主席研究員 修士 (第5章 第1節 第6項)
五反田 武志	株式会社東芝 主幹 博士 (工学) .. (第5章 第2節 第1項)
上岡 直樹	名古屋大学大学院工学研究科 化学システム工学専攻 助教 博士 (工学) (第5章 第2節 第3項)
松尾 豊	名古屋大学大学院工学研究科 化学システム工学専攻 教授 博士 (理学) (第5章 第2節 第3項)
森 弘樹	日本電気硝子株式会社 ディスプレイ事業部 TFT加工部 部長代理 (第5章 第3節)
上川路 優	化研テック株式会社 TK開発部 部長 (第5章 第4節)

執筆者紹介

石川 亮佑	東京都市大学 電気電子通信工学科 総合研究所 教授 東京大学 広域システム科学系 客員教授 博士（工学）（第6章 第1節）
小長井 誠	東京都市大学 総合研究所 特別教授 東京工業大学 名誉教授 工学博士（第6章 第1節）
瓦家 正英	国立研究開発法人産業技術総合研究所 招聘研究員 博士（学術） IEC TC82 WG2 エキスパート（第6章 第2節）
奥野 彰彦	SK弁理士法人（SKIP） 代表社員（特定侵害訴訟代理人） 弁理士（第6章 第3節）

目 次

巻頭言

桐蔭横浜大学 池上 和志

第 1 章 正孔輸送層	001
第 1 節 有機材料	002
第 1 項 タンデム素子に向けたドーパントフリーな高分子電荷輸送材料の開発	002
早稲田大学 須賀 健雄	
はじめに	002
1. ペロブスカイト太陽電池の素子構成と電荷輸送材料の設計	002
2. ドーパントフリーな高分子ホール輸送材料の開発動向	004
2.1 ドナー (D) - アクセプター (A) 型共役ポリマー	004
2.2 非D-A型共役ポリマーとポリ (3-アルキルチオフェン) の再考	004
2.3 その他のホール輸送ポリマー	005
3. タンデム型ペロブスカイト太陽電池の素子構成と高分子電荷輸送材料の開発動向	006
おわりに	009
第 2 項 ペロブスカイト太陽電池用正孔輸送材料の開発	011
保土谷化学工業株式会社 高橋 秀聡	
はじめに	011
1. ペロブスカイト太陽電池の素子構成と正孔輸送層	011
2. ペロブスカイト太陽電池用正孔輸送材料の課題	012
3. ペロブスカイト層のパッシベーション機能を有する正孔輸送材料	013
3.1 ペロブスカイト層のパッシベーション	013
3.2 正孔輸送材料PTBCの化学構造および物性	014
3.3 PTBCによるペロブスカイト層のパッシベーション	015
3.4 PTBCを用いたデバイスの耐久性	017
4. 正孔輸送材料のドーパントフリー化	019
4.1 ドーパントフリー化に向けた課題	019
4.2 正孔輸送材料AOCシリーズの化学構造および物性	019
4.3 ペロブスカイト層上におけるAOC分子の配向	020
4.4 AOCシリーズを用いたデバイスの耐久性	022
5. 新規材料の開発と耐久性評価	023
おわりに	024

第3項 低コスト・高耐久性ホール輸送材料の開発とペロブスカイト太陽電池への適用	027
イムラ・ジャパン株式会社 渡邊 恒暁	
はじめに	027
1. ホール輸送層の基礎	027
2. 従来ホール輸送材料について	028
2.1 spiro-OMeTAD	028
2.2 P3HT	029
2.3 PTAA	029
3. ドーパント	030
4. 新材料の開発	031
4.1 フルオレン系	031
4.2 トリフェニルアミン系	034
おわりに	035
第2節 自己組織化単分子膜 (SAM)	039
第1項 多脚結合アンカー自己組織化単分子膜 (SAM) を用いた多層一括成膜によるペロブスカイト太陽電池	039
埼玉大学 富田 大貴・石川 良	
はじめに	039
1. p-i一括成膜プロセス	041
2. i-n一括成膜プロセス	048
3. p-i-n 3層一括成膜プロセス	053
おわりに	054
第2項 高性能ペロブスカイト太陽電池のための多脚型単分子膜材料の開発	057
京都大学 チョン ミンアン・若宮 淳志	
はじめに	057
1. ペロブスカイト太陽電池の正孔回収層材料の研究背景	057
2. 水平配向を制御した多脚型単分子膜材料の開発	058
3. ペロブスカイト前駆体溶液と高い親和性をもつ多脚型正孔回収層材料の開発	060
4. 共堆積法による製造工程数削減を可能とする多脚型正孔回収層材料の開発	062
おわりに	063

第 3 節 分析	065
第 1 項 電子スピン共鳴を用いたペロブスカイト太陽電池向け低コスト正孔輸送材料の性能低下の原因の解明	065
	筑波大学 丸本 一弘
はじめに	065
1. 実験	067
1.1 薄膜およびデバイスの構造	067
1.2 薄膜およびデバイスの作製	068
1.3 デバイスの特性評価	068
2. 結果と考察	068
2.1 HTM薄膜のESRスペクトル	068
2.2 ペロブスカイト/HTM積層膜のESRスペクトル	071
2.3 暗所条件下におけるHTMおよびペロブスカイト/HTM薄膜のラジカルカチオン状態	073
2.4 光照射下におけるペロブスカイト/HTM積層膜中のスピン数	075
2.5 短絡状態下におけるオペランドESRスペクトルとデバイス性能との相関	076
2.6 開放状態下におけるオペランドESRスペクトルとデバイス性能との相関	080
おわりに	080
第 2 項 NiO_x を正孔抽出層に用いたペロブスカイト太陽電池の開発および NiO_x 薄膜の特性分析	085
	国立研究開発法人物質・材料研究機構 柳田 真利
はじめに	085
1. NiO _x 薄膜	086
1.1 NiO _x 薄膜作製	086
1.2 NiO _x 薄膜特性	087
2. NiO _x 薄膜を正孔抽出層として用いたペロブスカイト太陽電池	089
2.1 NiO _x 表面処理	090
2.2 ペロブスカイト太陽電池の劣化プロセス	091
第 3 項 逆構造 (p-i-n 型) ペロブスカイト太陽電池の正孔回収単分子層の電子準位接続	095
	千葉大学 赤塚 有杜・吉田 弘幸
はじめに	095
1. 従来のモデル	096
1.1 従来モデルの概略	096
1.2 エネルギー指標の実験的決定	097
1.3 従来モデルの妥当性評価	098
2. 新たな電子準位接続モデルの構築	100

2.1	新しいモデルの提案	100
2.2	モデルの検証	101
2.3	多様な HCM/ペロブスカイト系への一般化	104
	おわりに	105
第4節	応用	109
第1項	正孔輸送材料への添加剤による新機能～自発的ペロブスカイト表面安定化～	109
	国立研究開発法人産業技術総合研究所 西村 直之	
	はじめに	109
1.	OA-TFSI添加剤の開発経緯	109
2.	OA-TFSIによる自発的ペロブスカイト表面安定化	111
3.	OA-TFSIの反応機構～効果的な利用にむけて～	112
4.	OA-TFSIの特異性と発展	114
	おわりに	115
第2項	添加剤アプローチによるペロブスカイト太陽電池発電層の結晶制御と耐環境性向上	117
	国立大学法人 岡山大学 林 靖彦	
	はじめに	117
1.	ペロブスカイト材料の劣化機構と課題解決へのアプローチ	117
2.	ベンゾフェノン添加剤導入したペロブスカイト太陽電池の作製	118
3.	ペロブスカイト太陽電池の特性	119
4.	ペロブスカイト発電層の表面状態と結晶化構造	120
5.	ペロブスカイト発電層の光学評価	122
6.	添加剤BPとペロブスカイト発電層の化学的相互作用	123
7.	ペロブスカイト発電層の欠陥密度評価	124
8.	BP添加によるFAPbI ₃ ペロブスカイト太陽電池の大気安定性評価	124
第3項	ペロブスカイト太陽電池の普及に向けた高機能材料の開発	127
	キヤノン株式会社 奥田 篤	
	はじめに	127
1.	順層型の耐久性の課題について	127
2.	耐久性と製造安定を両立した中間層の事例	129
3.	順層型裏面電極の開発	131
3.1	HTLレス・カーボン電極の背景と位置づけ	131
3.2	HTLレス・カーボン電極の開発コンセプト	132
3.3	HTLレス・カーボン電極の発電効率	133
3.4	今後の展望	133

4. 逆層型ETL材料の開発	134
4.1 ペロブスカイトのETLの状況	134
4.2 非フラーレン系ETL	135
4.3 リレン骨格（NDI誘導体、PDI誘導体）	136
4.4 リレン骨格材料を用いた架橋ETLの開発状況	136
おわりに	137
第2章 電子輸送層	143
第1節 ペロブスカイト太陽電池の高性能化に向けた SnO₂ ナノ粒子電子輸送層の凝集状態の制御	144
九州大学 松島 敏則	
はじめに	144
1. 湿度とSnO ₂ 凝集構造の影響	145
2. 湿度制御により作製したダブルSnO ₂ 層構造	147
3. 温度制御により作製したダブルSnO ₂ 層	148
おわりに	150
第2節 屋内用途に向けたペロブスカイト太陽電池の電子輸送層の検討	153
青山学院大学 来福 至・石河 泰明	
はじめに	153
1. ペロブスカイト太陽電池の優れた屋内発電特性を支える諸特性	153
1.1 バンドギャップ制御性	153
1.2 ハライドペロブスカイト化合物の材料物性	154
1.3 ペロブスカイト太陽電池のデバイス構造	154
2. 電子輸送層に着目したペロブスカイト太陽電池の低照度特性の改善	155
2.1 電子輸送層の構造に着目した検討例	155
2.2 電子輸送層の材料に着目した検討例	156
2.3 電子輸送材料の物性制御によるペロブスカイト太陽電池の低照度特性改善	157
おわりに	158
第3節 非鉛ペロブスカイト層／電荷輸送層界面処理によるスズ系ペロブスカイト太陽電池の高性能化 -1000 時間連続発電の実現 -	161
国立研究開発法人物質・材料研究機構 白井 康裕	
はじめに	161
1. ハロゲン化ペロブスカイト太陽電池の基本構造	162
2. 非鉛ペロブスカイト太陽電池の作製プロセス	163
3. 非鉛ペロブスカイト太陽電池の安定性	167
おわりに	167

第4節 非晶質シリコン薄膜のペロブスカイト太陽電池用電子輸送層への応用 171

北陸先端科学技術大学院大学 大平 圭介

はじめに	171
1. 研究背景	171
2. 実験手法	172
3. 結果と考察	173
おわりに	177

第3章 ペロブスカイト吸収層の材料設計と構造制御 179

第1節 有機-無機ペロブスカイト太陽電池への擬二次元ペロブスカイトの導入 180

上智大学 竹岡 裕子

はじめに	180
1. ペロブスカイト化合物の構造制御	180
1.1 三次元ペロブスカイト化合物	180
1.2 二次元ペロブスカイト化合物	181
2. 擬二次元ペロブスカイト化合物	181
2.1 擬二次元ペロブスカイト化合物の構造	181
2.2 擬二次元ペロブスカイト化合物の特徴	183
2.3 擬二次元ペロブスカイト化合物の配向性	183
2.4 擬二次元ペロブスカイト化合物の配向性制御	183
3. 非鉛ペロブスカイト太陽電池への擬二次元構造の導入	185
おわりに	187

第4章 大面積層の形成～塗布乾燥プロセス～ 189

第1節 ペロブスカイト太陽電池の Roll To Roll スケールアップにおけるプロセス要素技術 190

Roll To Roll研究会 浜本 伸夫

はじめに	190
1. 実験室からRoll To Roll工程へ	190
2. 塗工方法の分類と特徴（素材劣化を防ぐ密閉系）	191
3. スピン塗工によるサンプル作りについて	192
3.1 ペロブスカイト太陽電池の実験サンプル作製	192
3.2 塗膜厚の見積り方法	193
3.3 乾燥要因	194
4. スロット塗工	195
4.1 スロットダイの構造	195
4.2 薄層塗工の支配因子と最小膜厚の見積り方法	196
4.3 テンションドウェーブ方式（オフロール方式）	197

5. インクジェット塗工（密閉系）	198
5.1 ベタ塗りによる薄層塗工	198
5.2 濡れ性改善の目標と手段	199
5.3 インクジェット塗工の生産性見積もり	200
6. 熱風乾燥の基礎と実践	200
6.1 定率乾燥と膜面温度	200
6.2 膜面温度の溶媒依存性（DMF・DMA・DMSO）	202
6.3 ノズル構造と乾燥能力	203
7. 高膜温を実現する方法	204
7.1 ホットプレートによる乾燥	204
7.2 裏面熱風加熱による乾燥方法	205
7.3 近赤外線による乾燥	206
7.4 レーザー乾燥	206
おわりに	207
第2節 ペロブスカイト太陽電池製造におけるインクジェット技術の適用	209
株式会社マイクロジェット 前田 憲宏	
はじめに	209
1. インクジェット技術の原理と特徴	209
1.1 ピエゾ駆動ドロップオンデマンド方式の原理	209
1.2 他の塗工方式との比較	210
1.3 他産業における産業用インクジェット技術の実績	210
2. ペロブスカイト太陽電池各層へのインクジェット適用	211
2.1 ペロブスカイト発電層	212
2.2 電子輸送層（ETL）	212
2.3 正孔輸送層（HTL）	213
3. 課題と展望	213
3.1 技術課題	213
3.2 開発アプローチ	214
おわりに	215
第3節 ペロブスカイト層の一液法インクジェット成膜	217
紀州技研工業株式会社 船山 遼斗・家永 隆史・原田 光	
はじめに	217
1. インクジェット成膜	217
1.1 インクジェットの一般的な特徴	217
1.2 成膜における特異性	218

1.3	成膜パラメータと生産性	218
1.4	安定運用と保守	219
2.	研究用インクジェット装置	220
2.1	装置コンセプト	220
2.2	制御パラメータ	221
2.3	一液成膜におけるパラメータ調整	222
2.4	量産に向けた注意点	222
3.	ペロブスカイト太陽電池の構成	222
3.1	太陽電池構造と選定理由	222
3.2	インクジェット法における上下層への影響	223
4.	インクジェット成膜された太陽電池特性と考察	224
4.1	モルフォロジー	224
4.2	電気特性	226
4.3	製造方法による違い	227
	おわりに	228
第5章 その他補助部材（フィルム、バリア・封止材、ガラス、電極材料等）		231
第1節 フィルム・樹脂・封止		232
第1項 ペロブスカイト太陽電池の信頼性向上・劣化対策のキーとなる構成部材		232
	桐蔭横浜大学 池上 和志	
	はじめに	232
1.	界面処理の役割と効果：パッシベーションと結晶性制御	232
2.	劣化メカニズムの解明と耐久性向上の指針	234
3.	界面制御による耐湿性と長期安定性の改善	235
4.	モジュール作製時の孔埋め層導入による性能向上	236
	おわりに	238
第2項 ペロブスカイト太陽電池の透明電極フィルムの開発		241
	株式会社麗光 幾原 志郎	
	はじめに	241
1.	フィルム型PSC用透明電極の要求特性	241
2.	膜構造（結晶状態）による特性比較と課題	242
3.	微結晶ITOフィルムの加工プロセスにおける課題	242
4.	レーザー加工適性のある新型結晶ITOフィルムの開発	243
5.	15Ω/□の新型結晶ITOフィルムと微結晶ITOフィルムの比較	244
5.1	全光線透過率の比較	244
5.2	曲げ特性の比較	244

5.3 表面モルフォロジーの比較	245
5.4 環境信頼性の比較	246
おわりに	246
第3項 透明ポリイミドフィルム「TORMED®」の特性とペロブスカイト太陽電池への適用	249
株式会社I.S.T 角田 恭彦	
はじめに	249
1. 透明ポリイミドフィルム「TORMED®」について	249
1.1 TORMED® の概要	249
1.2 特長と物性	250
1.2.1 耐熱性	251
1.2.2 透明性	252
1.2.3 耐薬品性	252
2. TORMED®を基材としたフィルム型ペロブスカイト太陽電池	253
2.1 フィルム型ペロブスカイト太陽電池の現状と開発の背景	253
2.2 光電変換層の高温熱処理プロセスの実証	253
2.2.1 電子輸送層およびペロブスカイト層の高温熱処理の実施	253
2.3 TORMED®基板によるフィルム型ペロブスカイト太陽電池の開発	255
2.3.1 開発の経緯	255
2.3.2 耐熱性を示すTORMED®型ペロブスカイト太陽電池の試作	256
3. 耐久テストの実施と結果	256
おわりに	256
第4項 ペロブスカイト太陽電池実装に向けた透明ポリカーボネート系材料	259
三菱ガス化学株式会社 西森 克吏	
はじめに	259
1. PSCの社会実装における材料設計の要件	259
2. 透明ポリカーボネート系材料の材料設計	261
3. 薄膜デバイス実装における構造設計	262
4. 透明構造材料によるPSC実装設計	263
おわりに	265

第5項 低コスト化に向けた塗布型ハイバリア構造の開発と太陽電池への応用	267
国立大学法人山形大学 硯里 善幸	
はじめに	267
1. 有機エレクトロニクスが有する価値	267
2. バリア技術	268
3. 真空成膜と塗布成膜	270
4. ウェットプロセスx光緻密化によるウルトラ・ハイバリア	270
おわりに	274
第6項 シリコン封止材を用いた太陽電池、ならびに次世代電池への適用	277
信越化学工業株式会社 大和田 寛人	
はじめに	277
1. 太陽電池モジュール用シリコンゴムシート封止材	280
1.1 シリコンゴムシート封止材の硬化	280
1.2 ペロブスカイト太陽電池用シリコンゴムシート封止材	281
1.3 シリコンゴムシート封止材のフィルム積層	281
1.4 シリコンゴムシート封止材の光学特性	282
1.5 シリコンゴムシート封止材のセル界面充填	282
1.6 シリコンゴムシート封止材の動的粘弾性	283
1.7 シリコンゴムシートの耐圧特性	283
1.8 シリコンゴムシートの耐燃焼性	284
おわりに	284
第2節 透明電極	287
第1項 ペロブスカイト太陽電池、ペロブスカイト/シリコンタンデム太陽電池の 開発とスパッタ成膜技術	287
株式会社東芝 五反田 武志	
はじめに	287
1. スパッタ成膜後の効率変化	288
2. ペロブスカイト太陽電池単体のIVカーブ変化	289
3. 寿命の現状	291
おわりに	291

第2項 透明導電フィルムを活用する熱圧着によるフィルム型ペロブスカイト太陽電池の作製コンセプト	293
桐蔭横浜大学 池上 和志	
はじめに	293
1. デバイス構造の基本と透明電極基板の役割	293
2. 順構造型ペロブスカイト太陽電池における熱圧着工程についての検討	295
3. ペロブスカイト太陽電池における熱圧着の問題点	296
4. ペロブスカイト層の圧着による新構造の提案	297
おわりに	298
第2節 透明電極	301
第3項 フッ素系ドーパントを添加したカーボンナノチューブ薄膜電極を用いたペロブスカイト太陽電池	301
名古屋大学 上岡 直樹・松尾 豊	
はじめに	301
1. 単層カーボンナノチューブの合成方法	302
1.1 単層カーボンナノチューブの半導体解析	302
1.2 乾式SWCNT薄膜電極を用いたペロブスカイト太陽電池の作製方法	303
1.3 実験結果	303
1.3.1 太陽電池素子の J - V 特性結果	303
1.3.2 2,2,2-トリフルオロエタノール (TFE) のドーブ効果	304
1.3.3 太陽電池素子の安定性評価	306
おわりに	308
第3節 ロール・ツー・ロール (R2R) に適用できる「超薄板ガラス」とその可能性	311
日本電気硝子株式会社 森 弘樹	
はじめに	311
1. 超薄板ガラスの特長	311
1.1 フレキシブル性	311
1.2 ガスバリア性	312
1.3 その他の特長	313
2. 超薄板ガラスの種類	313
3. 超薄板ガラスの製法	313
4. 超薄板ガラスの用途	314
5. 超薄板ガラスロール品の形態と取り扱い	316
5.1 超薄板ガラスロール品の形態	316
5.2 超薄板ガラスロール搬送時の推奨条件	316

6. 超薄板ガラスのロール・ツー・ロールプロセスへの適用事例	317
6.1 超薄板ガラス偏光板	317
6.2 有機EL照明	317
6.3 タッチセンサー	318
7. 超薄板ガラス-樹脂積層体「Lamion」	318
おわりに	319
 第4節 フィルム型ペロブスカイト太陽電池用外部取出し電極材料の開発	321
化研テック株式会社 上川路 優	
はじめに	321
1. 外部取出し電極に対する課題	321
2. 低温熱圧着電極 TKSシート	324
3. TKSシートを用いた外部取出し電極の形成事例	327
4. TKSシート加熱圧着装置の開発	328
おわりに	329
 第6章 耐久性評価・劣化分析・計測技術および特許動向	331
第1節 ペロブスカイト太陽電池の屋外発電特性と劣化機構	332
東京都市大学 石川 亮佑・小長井 誠	
概要	332
はじめに	332
1. 長期屋外劣化挙動	333
2. I-V カーブ測定とMPPT測定と比較	334
3. 温度依存性	334
4. セル温度の推定	335
5. 劣化による構造的変化	336
おわりに	338
 第2節 ペロブスカイト太陽電池計測法の課題と国際標準化の現状	341
国立研究開発法人 産業技術総合研究所 瓦家 正英	
はじめに	341
1. ペロブスカイト太陽電池の概要	341
1.1 セルおよびモジュールの基本構造	341
1.2 基本組成	342
2. ペロブスカイト太陽電池の性能評価	343
2.1 光電変換効率測定	343
2.2 I-V特性測定	344

2.3 MPPT法測定	346
3. 国際標準化活動	348
3.1 IEC規格	348
3.2 ペロブスカイト太陽電池のIEC活動	350
おわりに	351
第3節 ペロブスカイト太陽電池の部材における特許動向	357
	SK弁理士法人 奥野 彰彦
はじめに	357
1. カーボンニュートラル宣言とGX政策の進展	358
2. ペロブスカイト太陽電池に関する特許出願と論文の動向	358
3. 適用分野と技術区分ごとの日本の立ち位置	361
4. 経済安全保障と知財権侵害を意識した出願戦略	363
5. 待ち伏せ特許戦略とオープンイノベーション	364

第 1 章

正孔輸送層