



# ハイパースペクトルデータを活用した太陽光パネル種類判別

Differentiation of solar photovoltaic types in hyper spectral data

畠田将貴<sup>\*1,2</sup> ・ 水落裕樹<sup>2</sup> ・ 竹内渉<sup>1</sup>

1 東京大学 生産技術研究所

2 産業技術総合研究所

# 背景（異なる種類の太陽光発電パネルの分別）

- 太陽光発電パネル（Photovoltaics, PV）は近年急速な普及が進んでいる。  
⇒衛星画像に代表されるリモートセンシングデータは、広域に分散した太陽光発電システムの情報を集める事に適している（Figure 1）。これらの情報は、太陽光発電量のシミュレーションなどに活用が期待される。
- 既存のリモートセンシングデータを利用したPVマップにおいて、PVは**単一カテゴリ**として扱われてきた。

## PVパネルの多様性

結晶シリコン（c-Si）型が現在主流のPV素材である。しかしながら、**素材・発電効率・物理的特性**の異なる様々な種類のPVがこれまでに開発されてきた（Figure 2）。

実用化された非結晶シリコンのPVパネル

- ❑ 薄膜アモルファスシリコン（Thin-film amorphous silicon）
- ❑ テルル化カドミウム（CdTe）
- ❑ Copper indium selenium (CIS)

仮説：これら異なる種類のPVは、特徴的な吸収・反射特性を持ち、相互に分別可能なのではないか？

⇒従来は大きさ・位置の情報のみであった衛星画像由来のPV分布図に『種類』の情報を付加可能となる可能性。

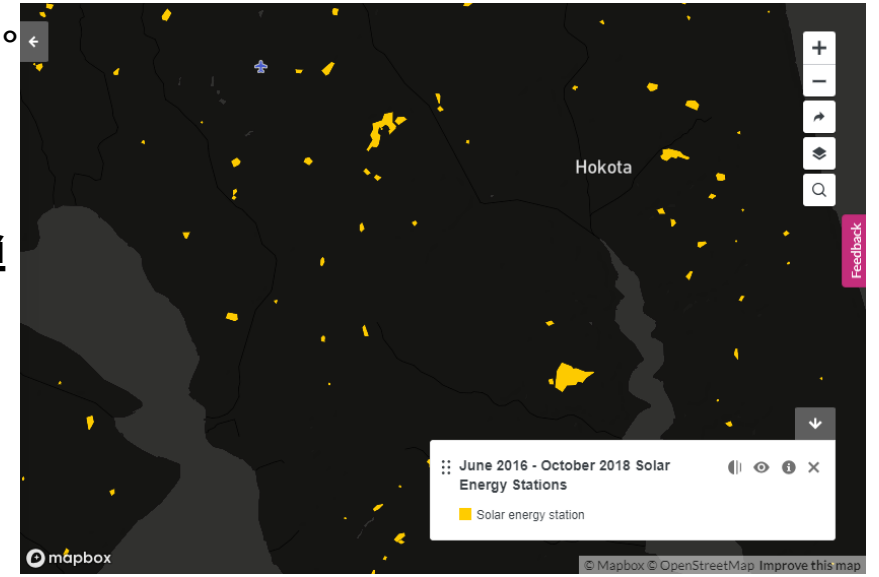


Figure 1. An example of a Remote Sensing based solar PV map [1]

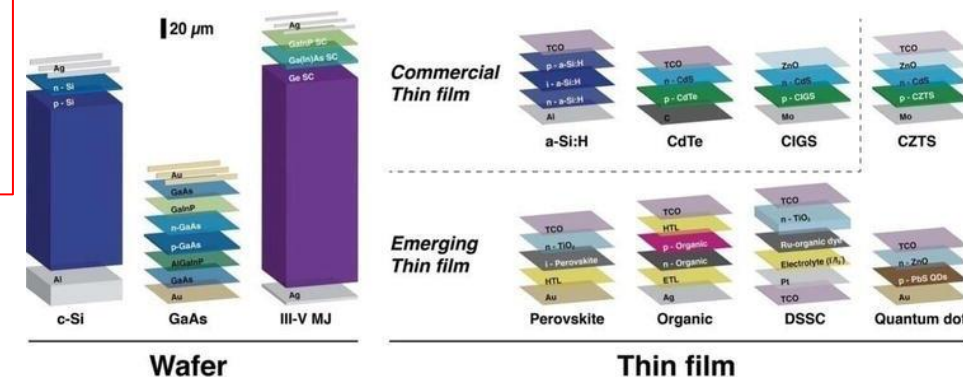


Figure 2. The common solar PVs, and new types of solar PVs [2]



# 課題と研究目的

## 課題

- “異なる種類のPVパネル”の衛星画像中での分離可能性はこれまで研究されていない。
- 既存のマルチスペクトルセンサの波長分解能では、細かな吸収・反射の特徴を詳しく調べられない。
- PVパネルの種類毎のスペクトル情報の違いや、パネル種類の分類に有用な波長帯・光学指標などについて十分に調べられてこなかった。

## PV反射率のIn-situ計測

結晶シリコン、薄膜アモルファスシリコン、CdTe、CISの種類のPV

地上で取得したPVの反射特性

## PV反射率の衛星センサからの測定

衛星ハイパースペクトルセンサ (HISUI)

宇宙から観測したPVの反射特性

## 研究目的

- In-situ計測と衛星センサから得られた反射率の相互比較
- 異なる種類のPVの吸収・反射特性の比較
- 衛星ハイパースペクトル画像中でPV分離を可能とする光学指標の提案

# データ (HISUI衛星ハイパースペクトルセンサ)

## HISUI (Hyperspectral Imager SUite)センサについて

- 搭載プラットフォーム : 国際宇宙ステーション
- 観測波長帯 : VNIR (400 ~ 970 nm), SWIR (900 nm ~ 2500 nm)
- 空間解像度 : 20 m ~ 30 m
- 波長解像度 : 10 nm (VNIR), 12.5 nm (SWIR)
- 観測幅 : 20 km

\*HISUIの観測幅・軌道・雲の影響と、非結晶シリコン製PVを使用する発電設備位置の制限により、本研究で用いたHISUIシーンの位置 (Figure 3) ・取得時期 (Table 1) はIn-Situ測定と同期計測ではない。

HISUIデータは大気上端放射輝度 (L1Gプロダクト) として取得したのち、地表面反射率 (Surface Reflectance, SR) へと6SVソフトウェアを利用して変換した。大気補正パラメータは各シーンに近接したAERONETデータベースに加えて、Google Earth Engine上からオゾン[3][4]・水蒸気[5]のデータを取得・使用した。

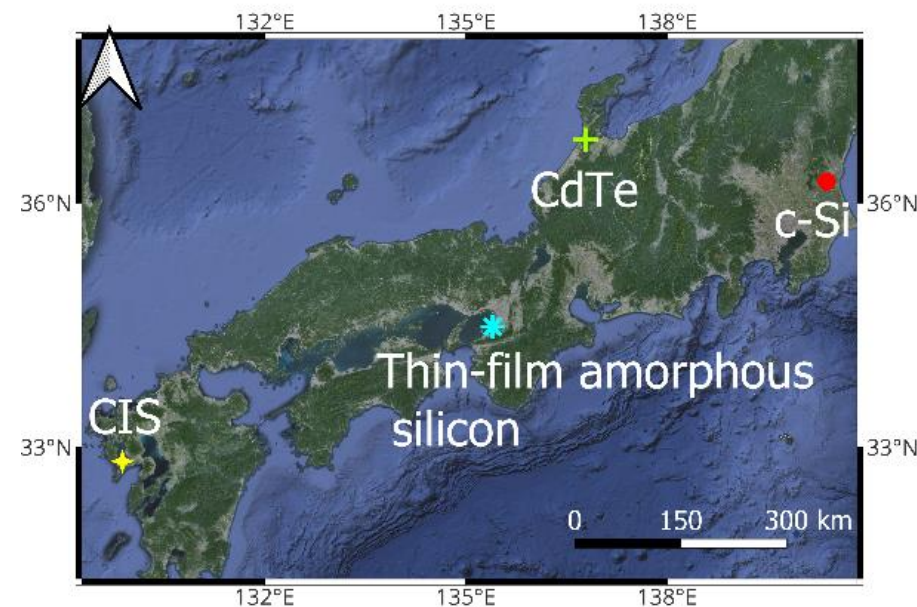


Figure 3. Four HISUI image locations

Table 1. The HISUI image acquisition date

Target PV type	Acquisition date (corresponding season in Japan)
<b>c-Si</b>	2022/01/31 (Winter)
<b>CdTe</b>	2021/04/27 (Spring)
<b>Thin-film amorphous silicon</b>	2020/10/27 (Late Autumn)
<b>CIS</b>	2021/05/03 (Spring)

# データ (In-Situ測定によるPV反射率データ取得)

計測実施日 : 2024/2/19・2024/2/20

天候 : 曇天 (一時的な降雨・晴天あり)

測定実施場所 : 屋外曝露サイト (産業技術総合研究所 九州センター)

測定機器 : FieldSpec 3

FieldSpec3の波長分解能 : 1.4 nm (350 ~ 1050 nm) & 2 nm (1000 ~ 2500 nm)

測定対象 : 結晶シリコン製PV、薄膜アモルファスシリコン製PV、CdTe製PV、CIS製PV、周辺の草本等

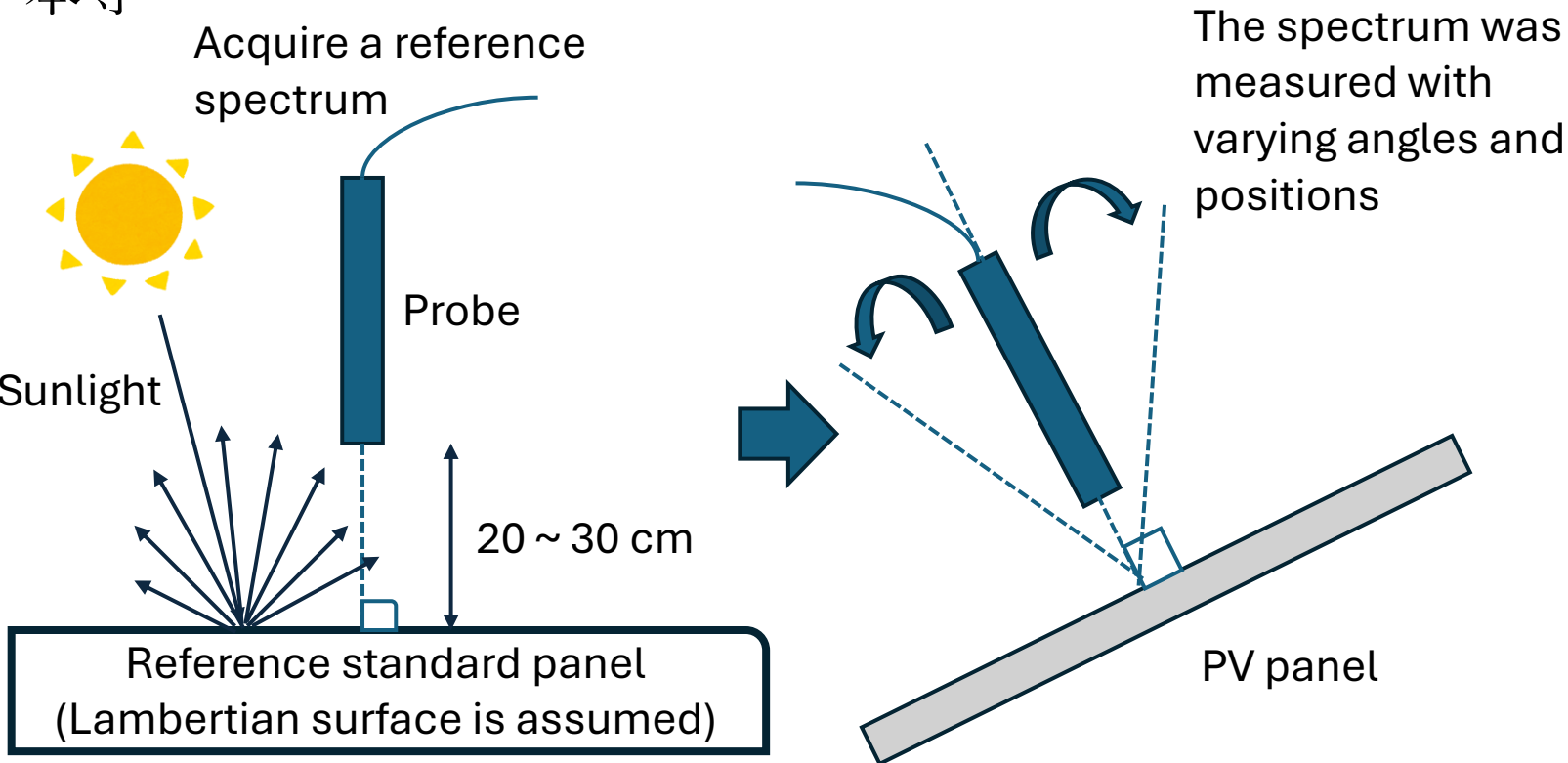


Figure 4. Solar PV spectral data collection procedures by using a spectrometer.

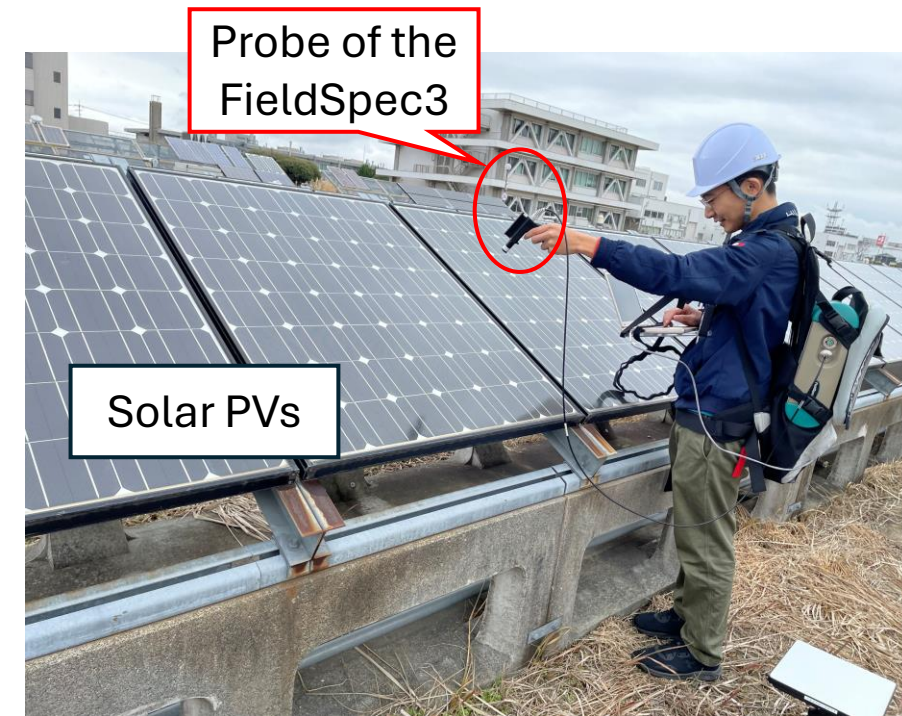


Figure 5. Exposed solar PVs at AIST Kyushu.

# 手法（光学指標の提案と性能の定量評価）

- In-Situ計測による各PVの反射特性と、HISUIセンサから得られた地表面反射率データを比較し、これらに共通する吸収・反射特性を各PVを特徴づける光学指標の提案に使用した（Figure 6）。
- 提案した光学指標の分離性能を定量化するため、シルエットスコアを算出した（Figure 7）。

\* シルエットスコアは-1から1までの値を取る統計的指標であり、1に近いほど良好なクラスタリング性能を示す[6]。本指標はGaussian Mixture Modelなどと異なり特定の統計分布を仮定しないため、光学指標の統計分布が不明な本研究ではクラスタリング・分離度の指標として採用した。

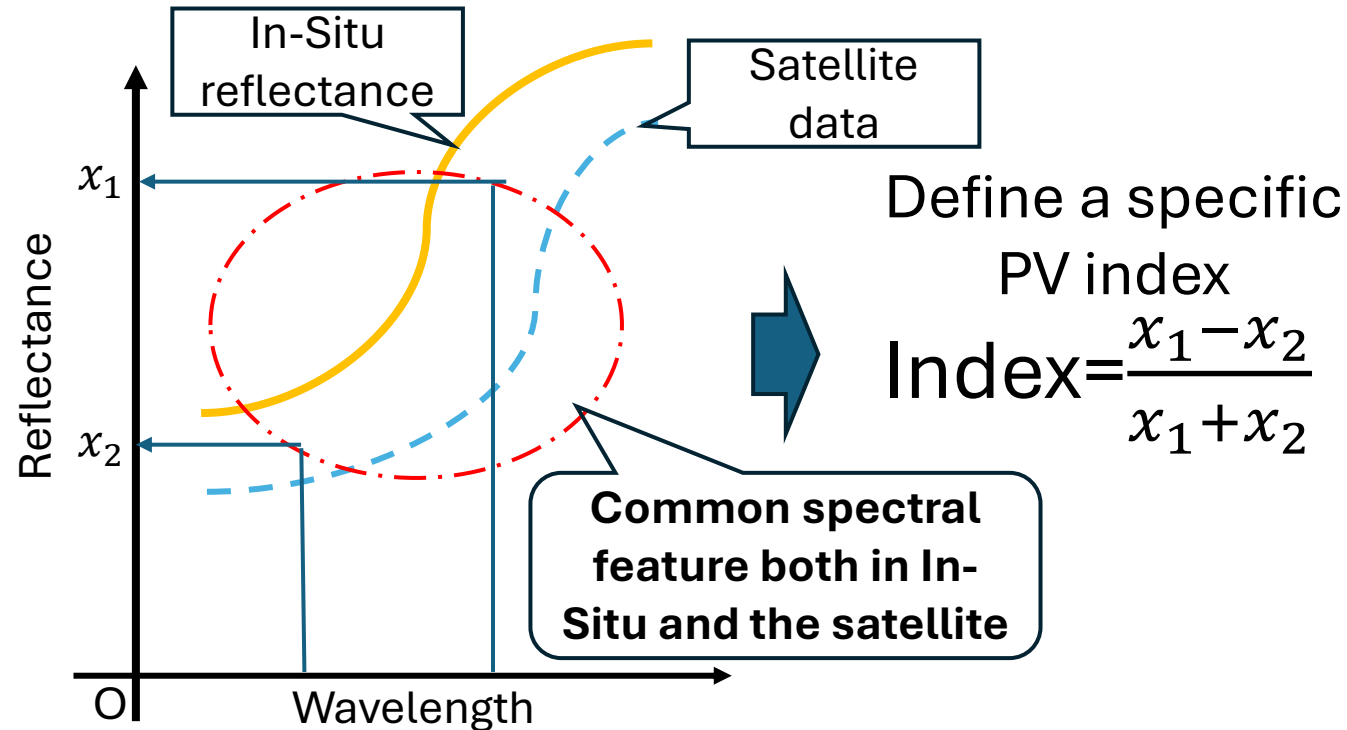


Figure 6. The comparison of In-Situ and the satellite HS data to find common features useful for defining a spectral index.

$$a(i) = \frac{1}{|C_i| - 1} \sum_{j \in C_i, i \neq j} d(i, j)$$
$$b(i) = \min_{k \neq i} \frac{1}{|C_k|} \sum_{j \in C_k} d(i, j)$$
$$s(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max\{a(i), b(i)\}}, \quad \text{if } |C_i| > 1$$
$$0 \quad \text{otherwise}$$

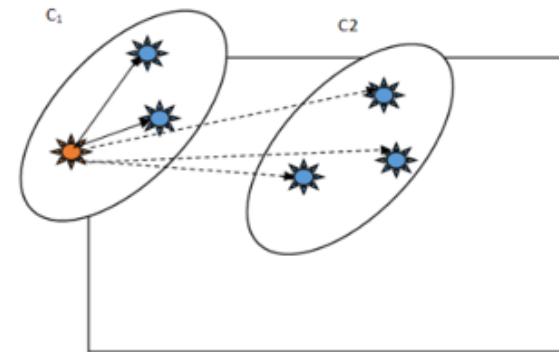


Figure 7. Schematic representation of cluster-separability in silhouette score [6]



# 結果と考察

- 異なる素材・製法で作られたPVは、相互に異なる吸収・反射特性を示した。このことは既存のマルチスペクトルセンサによるPV検出（単一カテゴリ）において教師点が多様なPVを網羅してない場合には、PV検出が不成功となる原因の一つである可能性がある。
- 詳細な吸収・反射の違いに着目した光学指標によって、異なる種類のPVが相互分離できる可能性が示されたことから、ハイパースペクトルセンサはPVの種類分析においてマルチスペクトルセンサと比較した際に利点を持つと考えられる。
- 結晶シリコン製PV・薄膜アモルファスシリコン製PVでは衛星観測結果とIn-Situ計測結果の間に類似した吸収・反射の傾向が見られた一方で、CdTe製PV・CIS製PVでは明瞭な差異が存在した。この差異の原因について、以下に考察を述べる。
  - （1）CdTe製PV・CIS製PVのHISUIシーンはそれぞれ4月末・5月初めの植生活性が高い時期に取得された。そのため、**観測データが植生とのミクセルとなっている。**
  - （2）AERONET等から取得した大気補正のパラメータが距離的差異などから適切でなく、**大気補正が不完全である。**
  - （3）In-Situ計測の対象はHISUIが観測したPVと同一のメーカーであるとは限らないことから、**製法の違いなどに由来する反射特性の違いが存在する。**

# 今後の課題

- In-Situ計測・HISUIシーン共にサンプル数が限られており、本研究の結果の一般性の保証の為に今後より多くの検証データを収集する事が望ましい。
- 光学指標についても、より多くのサンプルで得られた結果や季節による影響を考慮した上で、使用する波長や定義式については今後も改善の余地が存在する。
- 本研究では衛星観測とIn-Situ計測の間に時期・空間の両者についてズレがある。よって、これらの同期性を保った測定を行う必要がある。
- 本研究の成果を基にして、既存の単一カテゴリのPVマップに対して『PV種類』を付加するため、（1）光学指標によるPV分類手法の確立、（2）PV分類手法の横展開による解析範囲の拡大について取り組む。



- [1] Kruitwagen, L., et al. "A global inventory of photovoltaic solar energy generating units." *Nature* 598.7882 (2021): 604-610.
- [2] Zendehtel, Mahmoud, Narges Yaghoobi Nia, and Mohammadreza Yaghoobinia. "Emerging thin film solar panels." *Reliability and Ecological Aspects of Photovoltaic Modules*. IntechOpen, 2020.
- [3] NASA/GSFC, Greenbelt, MD, USA, NASA Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), TOMS and OMI Merged Ozone Data, 2013
- [4] Benedetti, A., and Coauthors, 2009: Aerosol analysis and forecast in the ECMWF Integrated Forecast System. Part II : Data assimilation, *J. Geophys. Res.*, 114, D13205 doi:10.1029/2008JD011115.
- [5] Kalnay et al., 1996, The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437-471. doi:10.1175/1520-0477(1996)0770437:TNYRP¥2.0.CO;2.
- [6] K. R. Shahapure and C. Nicholas, "Cluster Quality Analysis Using Silhouette Score," 2020 IEEE 7th International Conference on Data Science and Advanced Analytics (DSAA), Sydney, NSW, Australia, 2020, pp. 747-748, doi: 10.1109/DSAA49011.2020.00096.