

# IV特性の温度・照度依存性に 直列抵抗が及ぼす影響

国立研究開発法人 産業技術総合研究所

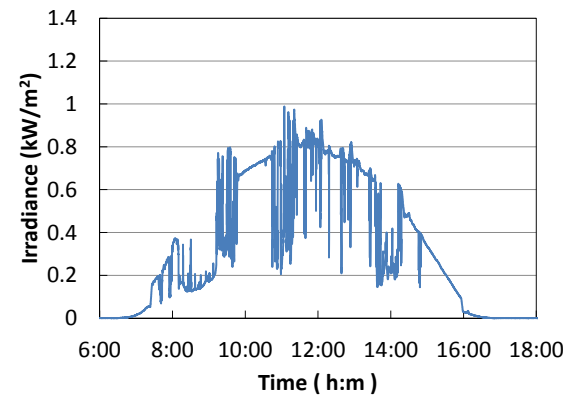
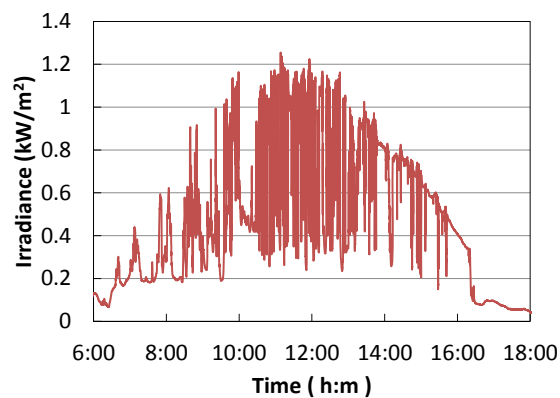
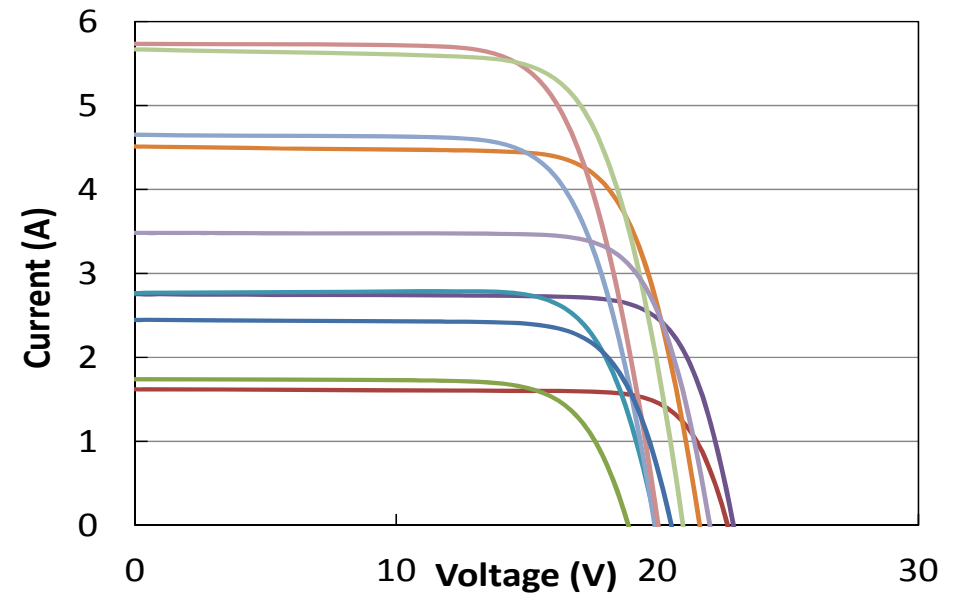
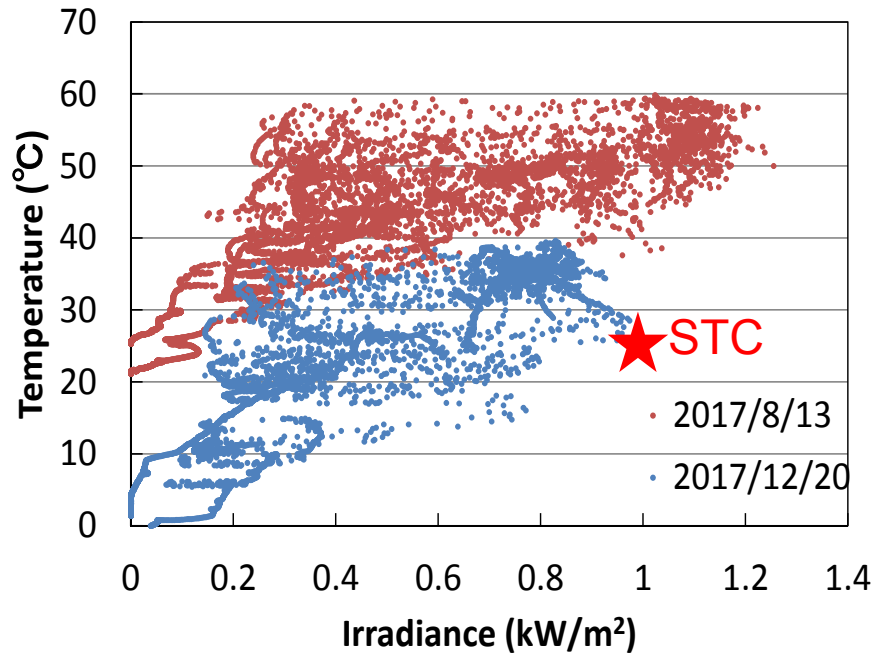
太陽光発電研究センター

評価・標準チーム

菱川善博、吉田正裕

# 太陽電池の屋外での動作状態

2017/8/13

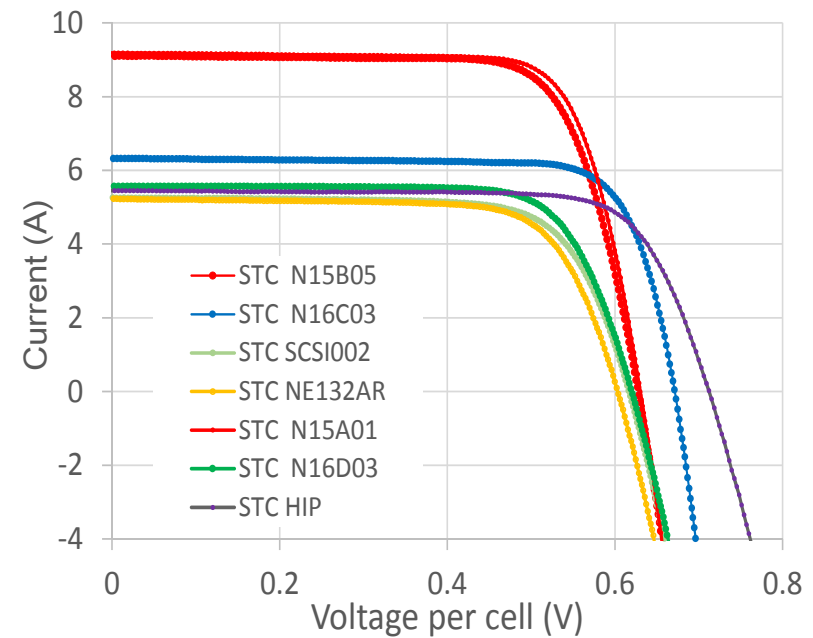
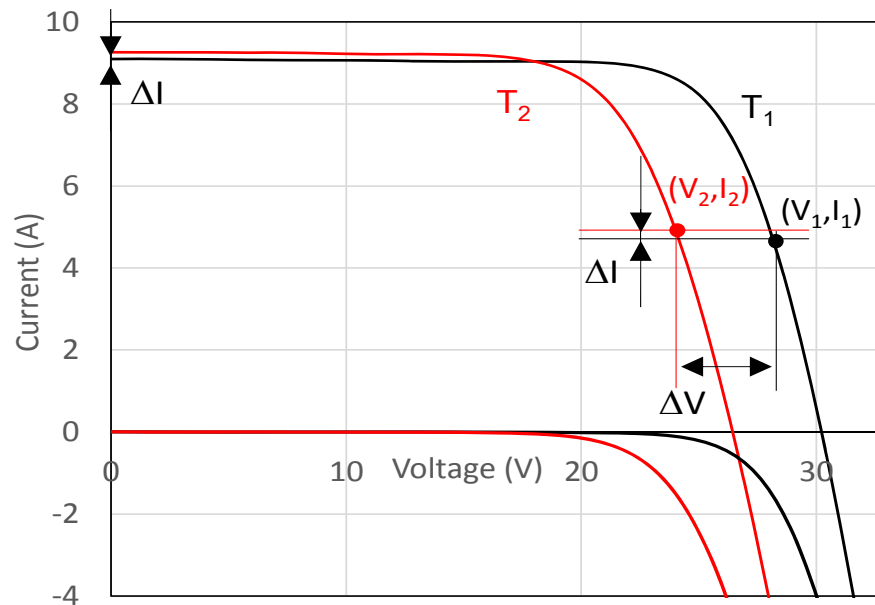


# これまでの結果: IV特性の各点で温度係数TCを定義

48

IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS, VOL. 8, NO. 1, JANUARY 2018

## Voltage-Dependent Temperature Coefficient of the $I-V$ Curves of Crystalline Silicon Photovoltaic Modules

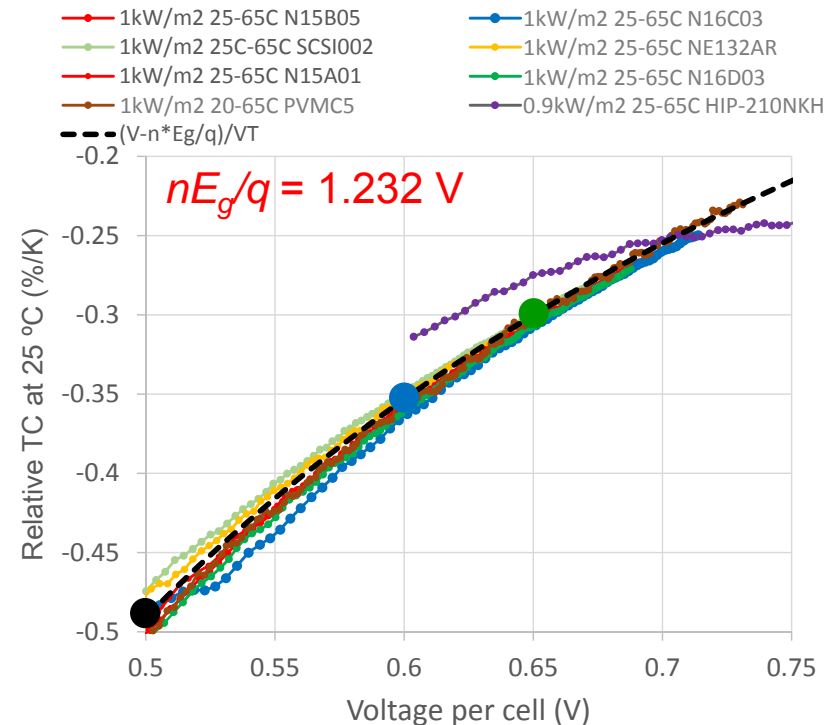
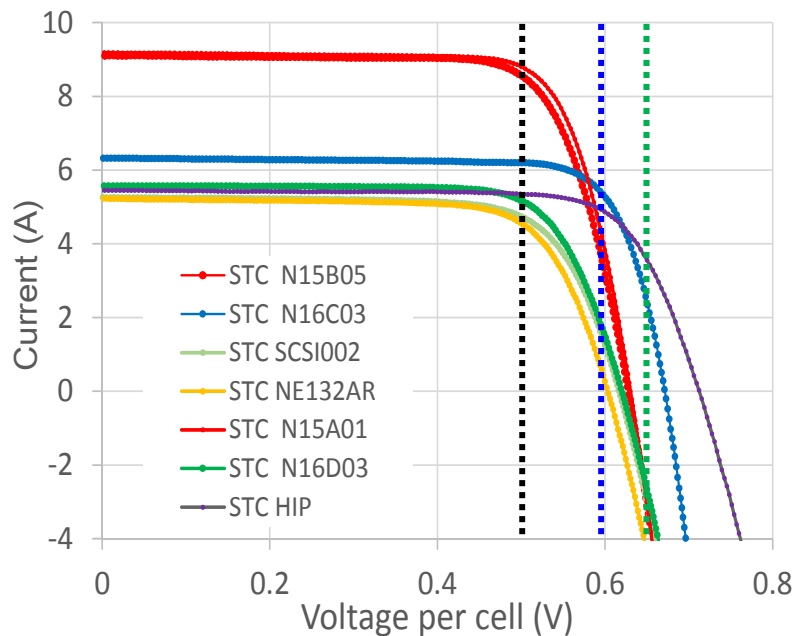
 Yoshihiro Hishikawa<sup>1</sup>, Takuya Doi, Michiya Higa, Kengo Yamagoe, Hironori Ohshima, Takakazu Takenouchi, and Masahiro Yoshita


Y. Hishikawa, T. Doi, M. Higa, K. Yamagoe, H. Ohshima, T. Takenouchi, and M. Yoshita, "Voltage-Dependent Temperature Coefficient of the  $I-V$  Curves of Crystalline Silicon Photovoltaic Modules", IEEE J. Photovol. 8-1 (2018) 48-53.

# (実験結果) TCは電圧により変化。同じ関係式に従う

$$TC_{rel} = \frac{1}{V_1} \left( \frac{V_2 - V_1}{T_2 - T_1} \right) = \frac{1}{T_1} \left( 1 - \frac{nE_g}{qV_1} \right)$$

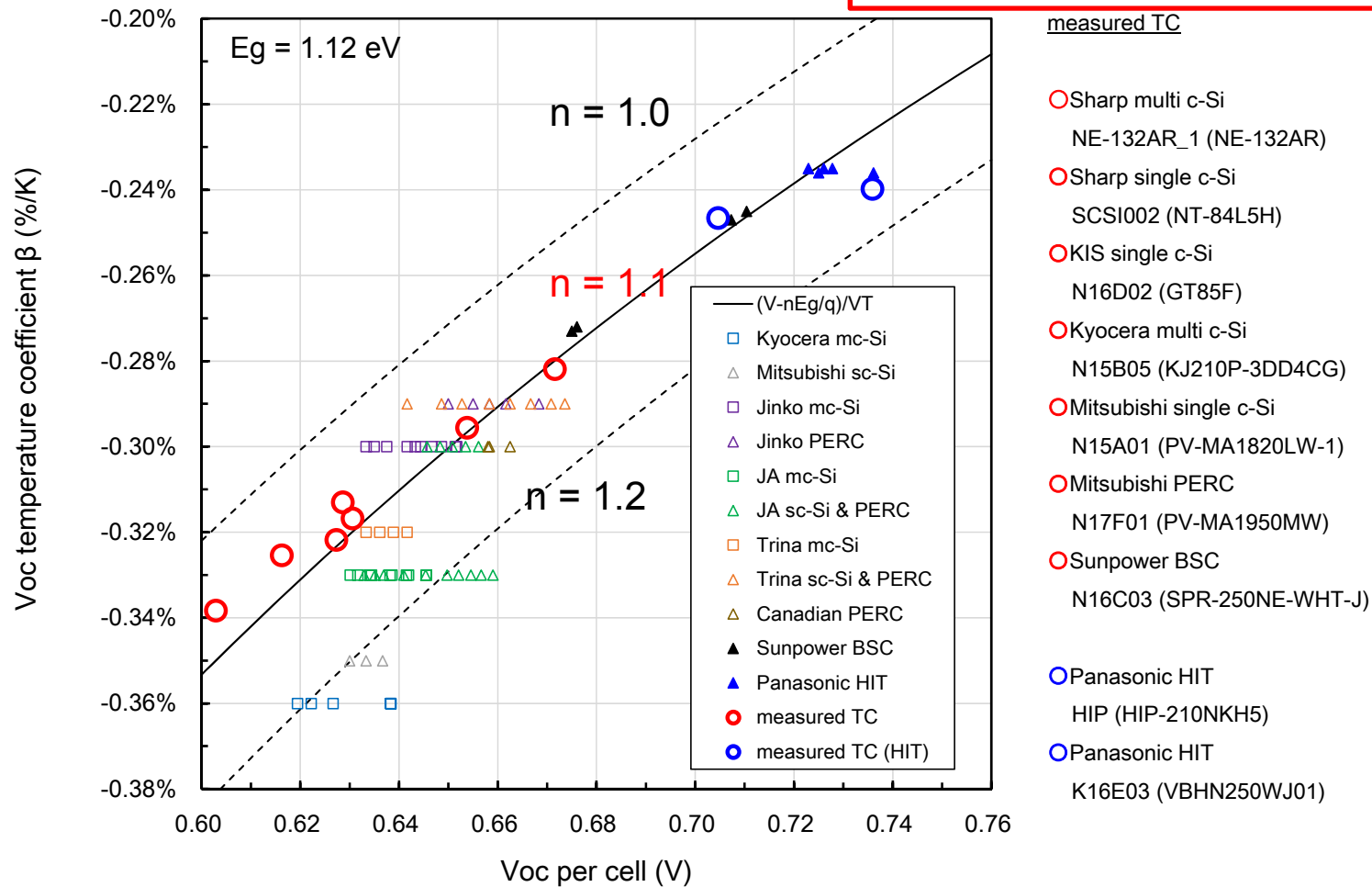
$TC_{cell}$  : 電圧温度係数/セル  
 $V_1, V_2$  : 電圧, 電圧/セル  
 $n$  : ダイオード理想係数  
 $E_g$  : バンドギャップ



Y. Hishikawa, T. Doi, M. Higa, K. Yamagoe, H. Ohshima, T. Takenouchi, and M. Yoshita, "Voltage-Dependent Temperature Coefficient of the I-V Curves of Crystalline Silicon Photovoltaic Modules", IEEE J. Photovol. 8-1 (2018) 48-53.

# 各種市販モジュールの温度係数仕様 (V<sub>OC</sub>のみ)

$$TC_{rel} = \frac{1}{V_1} \left( \frac{V_2 - V_1}{T_2 - T_1} \right) = \frac{1}{T_1} \left( 1 - \frac{nE_g}{qv_1} \right)$$



# (解析) 1ダイオードモデル ( $R_s=0$ ) で説明できる

本研究 (pn接合の理論式に整合)

$$I_2 = I_1 + \alpha \cdot (T_2 - T_1)$$

$$V_2 = V_1 + (T_2 - T_1) \times \frac{1}{T_1} \left( V_1 - \frac{N_c n E_g}{q} \right)$$

$nE_g/q = 1.232$  V固定でほぼすべての市販  
結晶シリコンモジュールに適用可: 温度係数不要

屋外の様々な温度で測定したIV特性を、25°CのIV特性に正確に変換できる! (温度係数不要。ほぼすべての結晶シリコンモジュールに適用可)

pn接合のIV特性 (Shockley: 1949)

$$I \approx I_L - I_0 \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) = I_L - A \exp\left(\frac{qV}{nkT} - \frac{E_g}{kT}\right)$$

$$= I_L - A \exp\left\{\frac{q}{nkT} \left(V - \frac{nE_g}{q}\right)\right\}$$

温度で微分  $\therefore \frac{\partial V}{\partial T} = \frac{1}{T} \left( V - \frac{nE_g}{q} \right)$

$V_{oc}$ については既知の関係  
本研究: 他のVに拡張可能

$$\frac{\partial V_{oc}}{\partial T} = -\frac{\frac{E_g}{q} - V_{oc} + \gamma \frac{kT}{q}}{T} \quad \text{M. Green 1982}$$

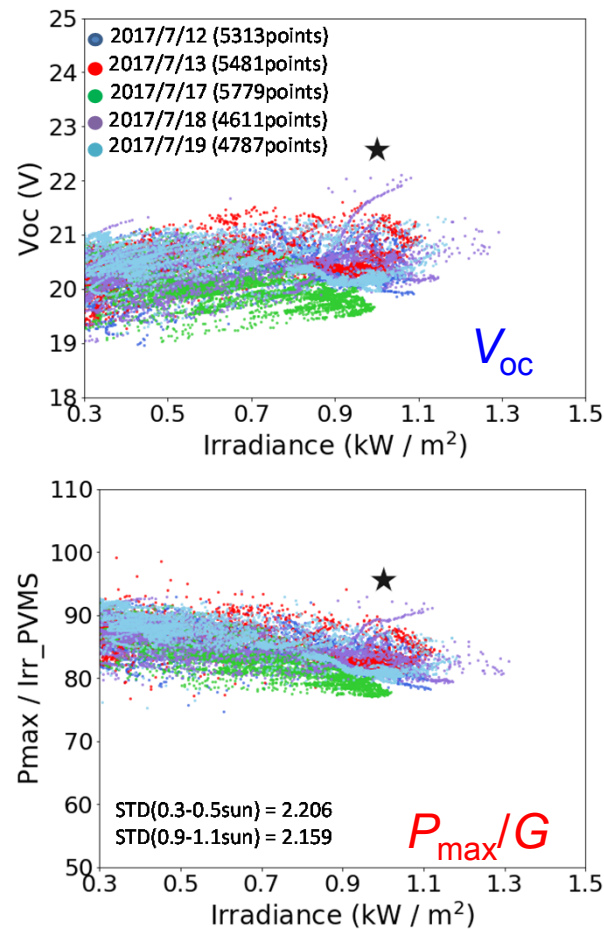
$$\frac{\partial V_{oc}}{\partial T} = \frac{1}{T} \left[ V_{oc} - \frac{AE_g}{mq} - \frac{3AkT}{nq} \right] + \frac{A}{mq} \frac{\partial E_g}{\partial T} + \frac{AkT}{qJ_{sc}} \frac{\partial J_{sc}}{\partial T}$$

J. C. C. Fan et al. 1986

Y. Hishikawa, T. Doi, M. Higa, K. Yamagoe, H. Ohshima, T. Takenouchi, and M. Yoshita, "Voltage-Dependent Temperature Coefficient of the I-V Curves of Crystalline Silicon Photovoltaic Modules", IEEE J. Photovoltaics, 8-1 (2018) 48-53.

# (応用例) 屋外IV特性を25°Cに補正

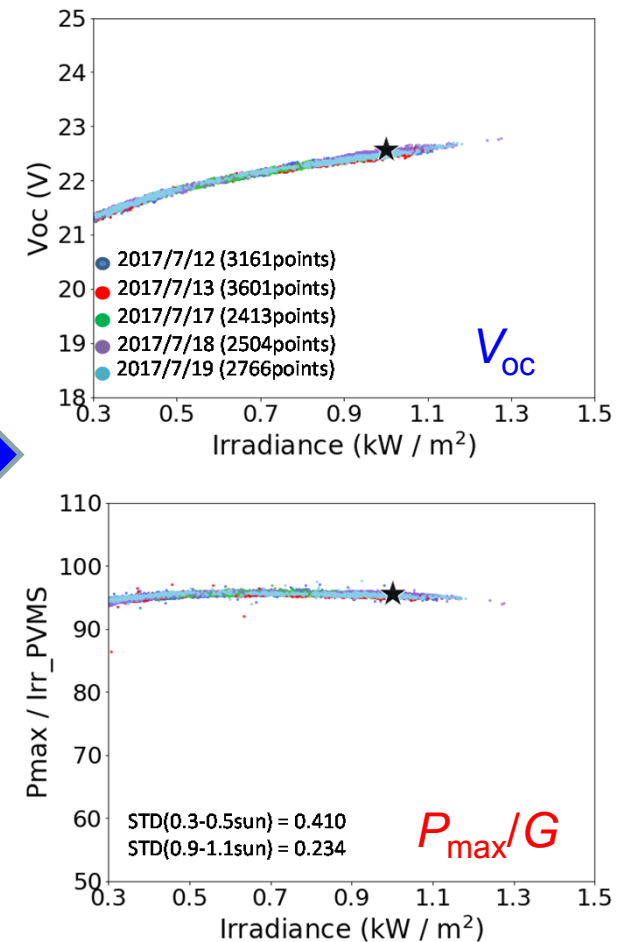
## 計測値



$$TC_{rel} = \frac{1}{V_1} \left( \frac{V_2 - V_1}{T_2 - T_1} \right) = \frac{1}{T_1} \left( 1 - \frac{nE_g}{qV_1} \right)$$

+ 日射変動フィルタ

## 補正後

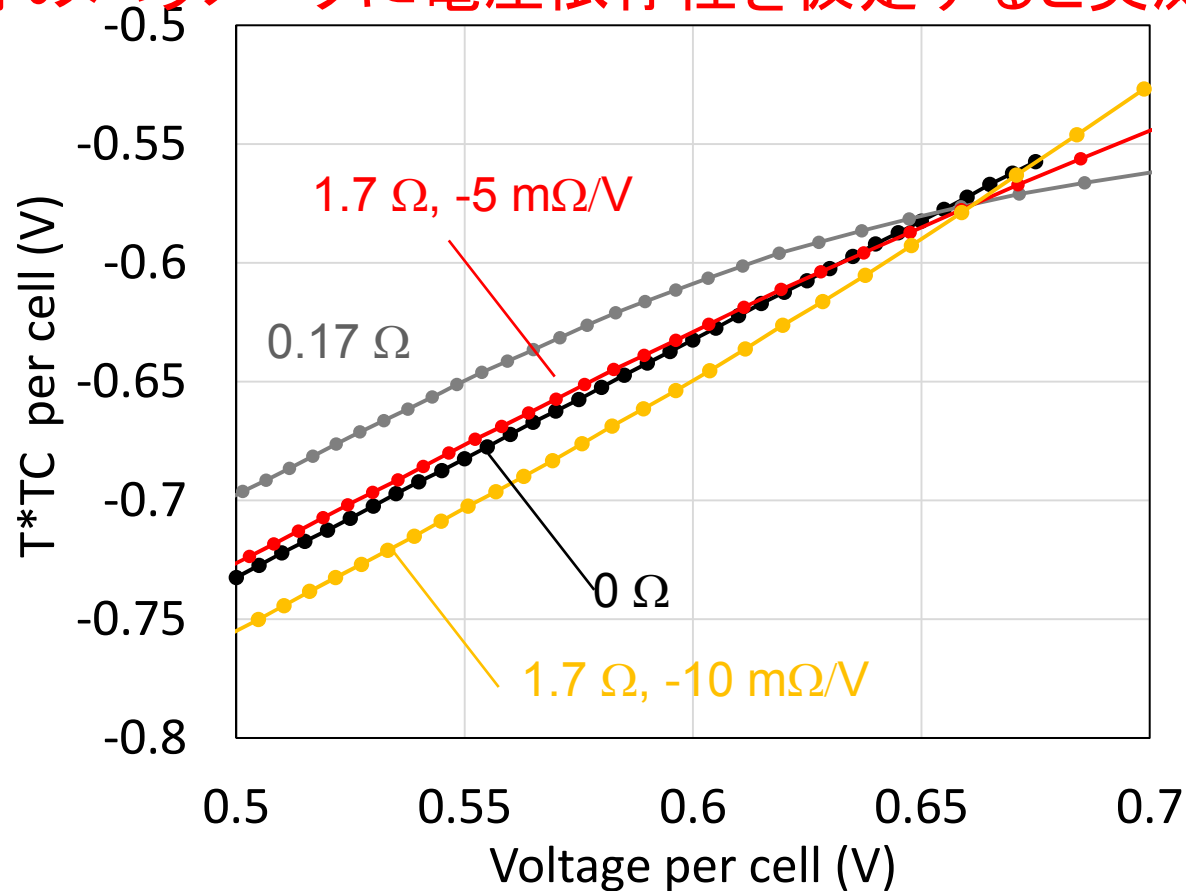


# (考察)なぜ $R_s = 0$ の式で実測に合うのか？

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{q(V + R_s I)}{nkT} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}}$$

モジュールでは  $0.1 \sim 0.3 \Omega$   
 (1セルあたり  $2 \sim 5 \text{ m}\Omega$ )

$R_s$  等のパラメータに電圧依存性を仮定すると実測と合う！

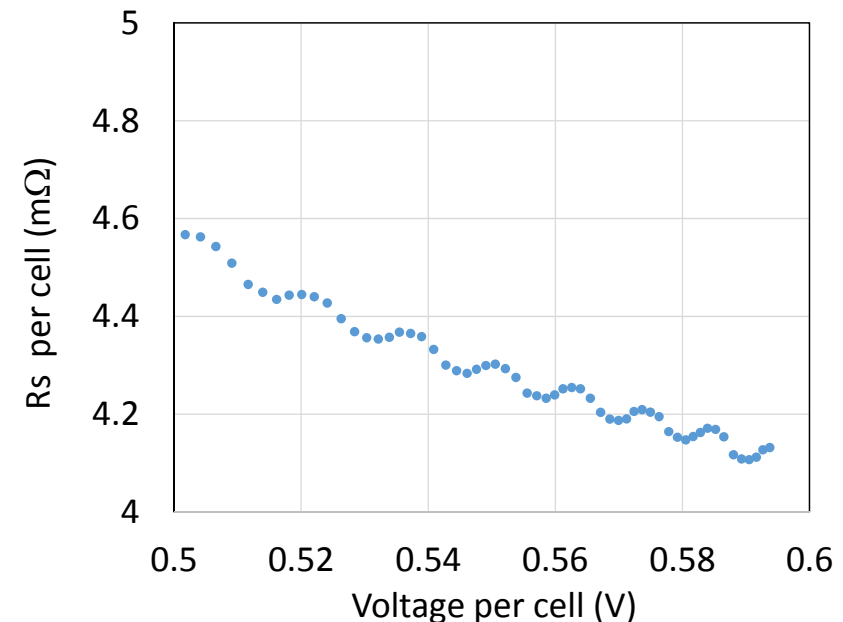
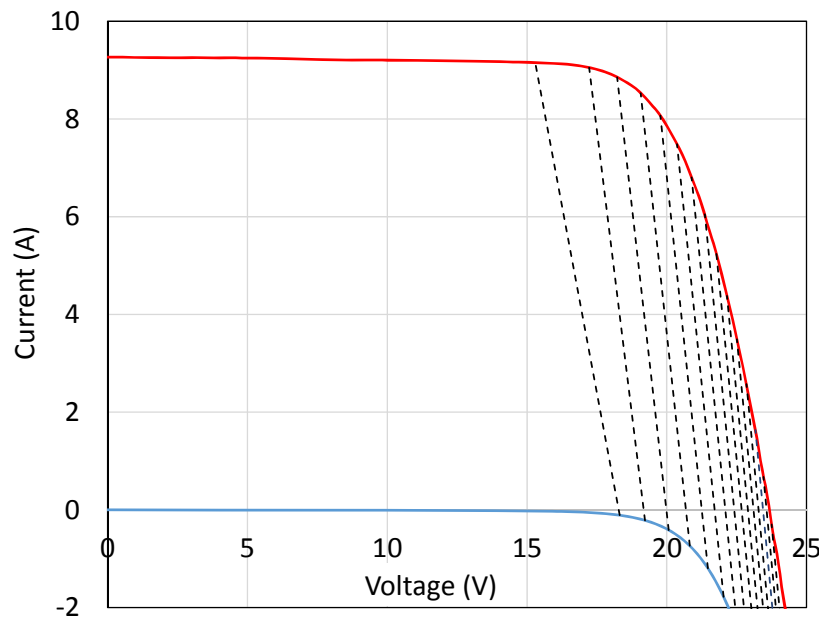




# $R_s$ の電圧依存性(結晶シリコンモジュール)\*

$$I \cong I_{sc} - I_0 \exp\left\{\frac{q(V + R_s I)}{nkT}\right\} = I_{sc} - A \exp\left\{\frac{q(V + R_s I)}{nkT} - \frac{E_g}{kT}\right\} = I_{sc} - A \exp\left[\frac{q}{nkT}\left\{(V + R_s I) - \frac{nE_g}{q}\right\}\right].$$

太陽電池の $R_s$ は実際に電圧によって変化\*

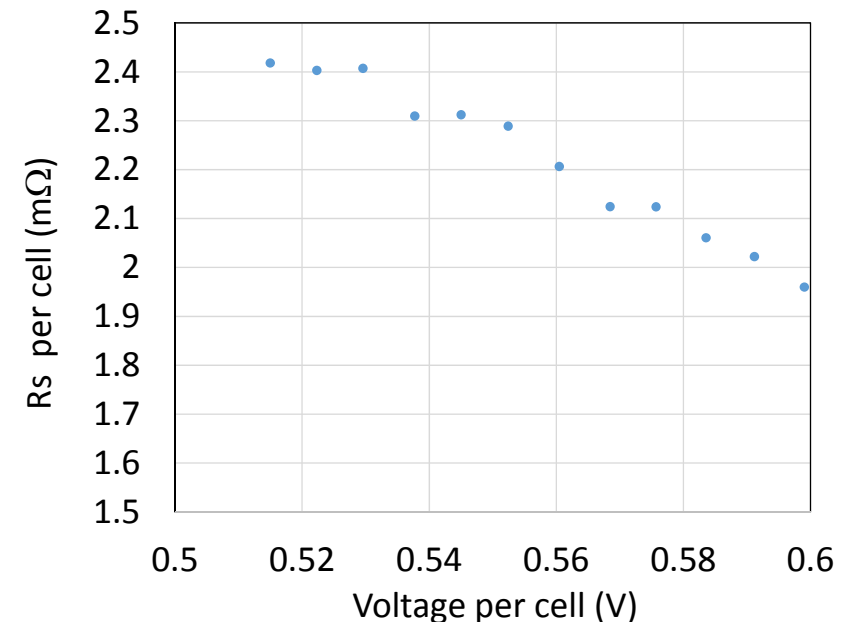
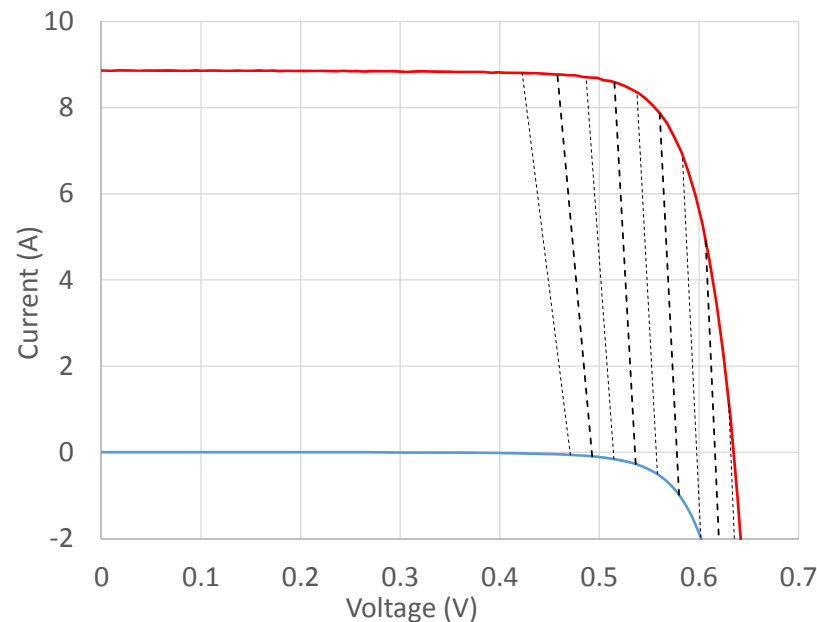


\* $R_s$ の値は上記の方法(2照度法)で求めた値で定義

# 直列抵抗 $R_s$ の電圧依存性 (結晶シリコンセル) \*

$$I \cong I_{sc} - I_0 \exp\left\{\frac{q(V + R_s I)}{nkT}\right\} = I_{sc} - A \exp\left\{\frac{q(V + R_s I)}{nkT} - \frac{E_g}{kT}\right\} = I_{sc} - A \exp\left[\frac{q}{nkT} \left\{(V + R_s I) - \frac{nE_g}{q}\right\}\right].$$

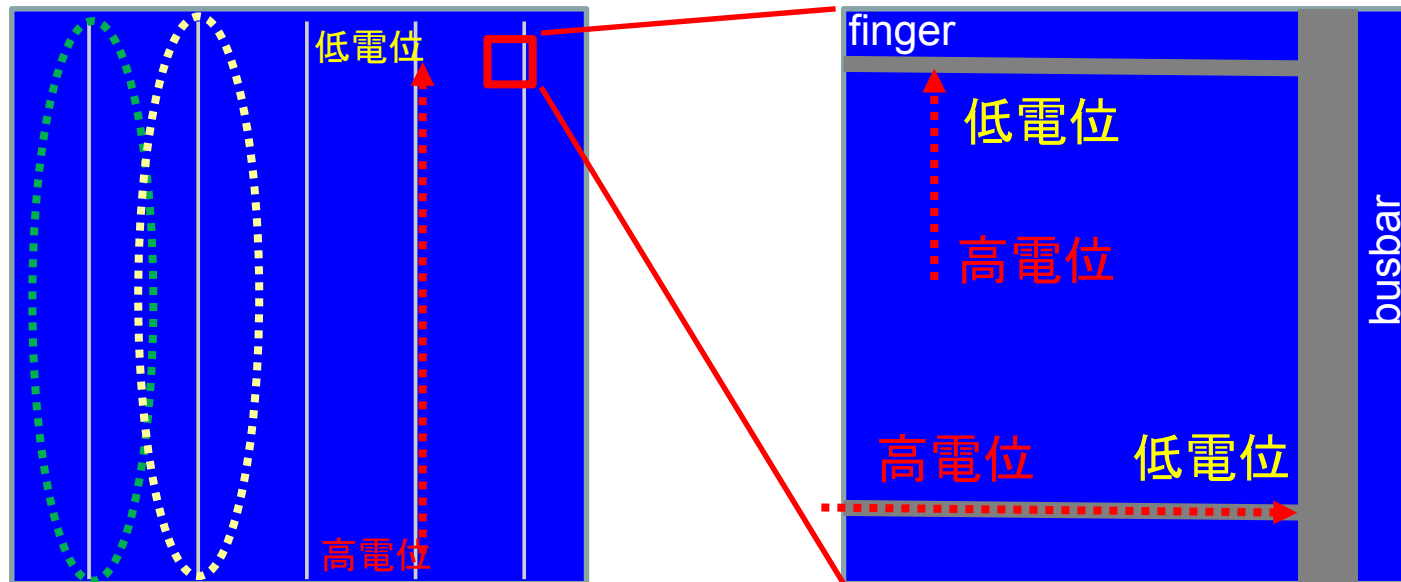
太陽電池の  $R_s$  は実際に電圧によって変化\*



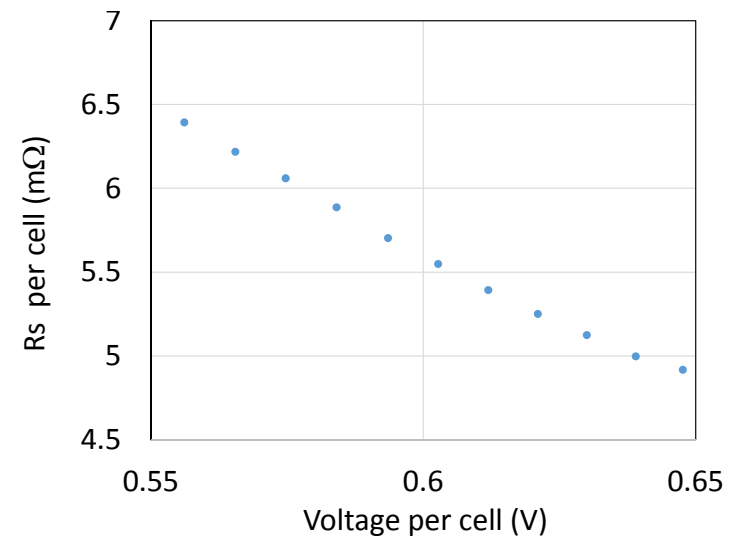
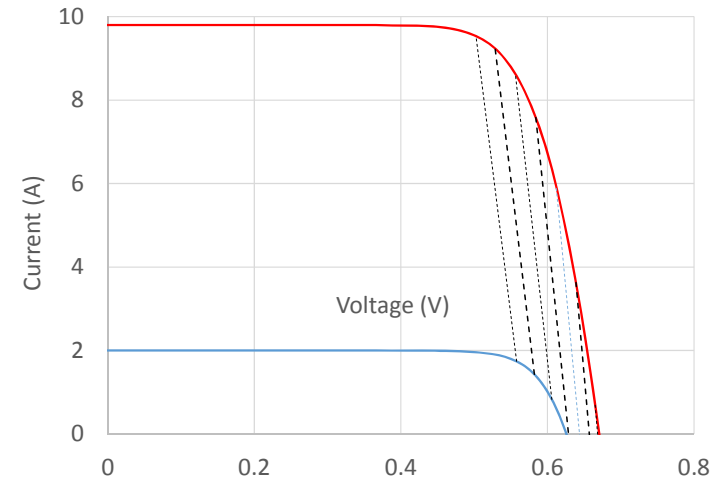
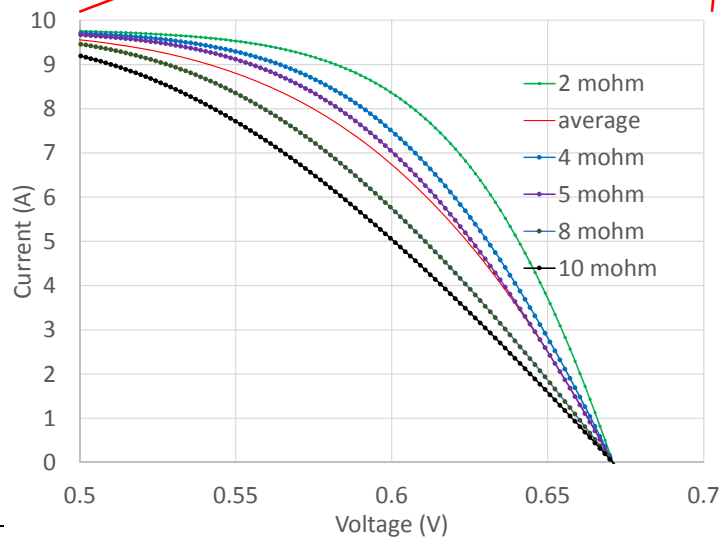
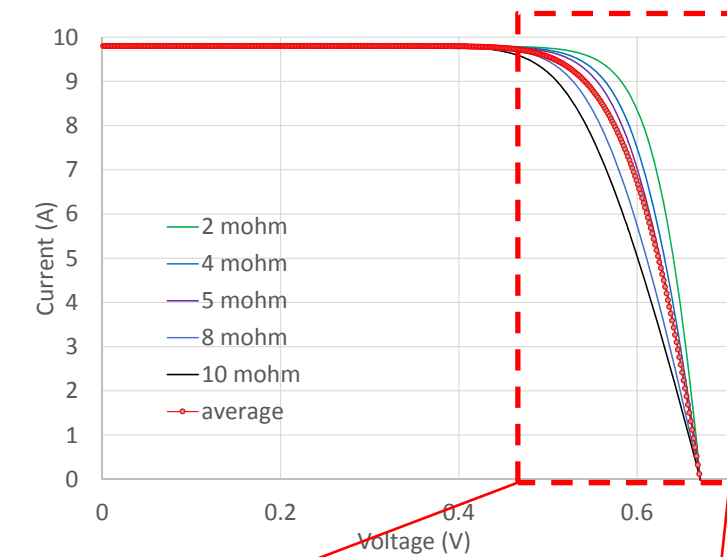
\*  $R_s$  の値は上記の方法 (2照度法) で求めたものとして定義

# (考察)セル全体のlumped $R_s$ 電圧依存性の原因

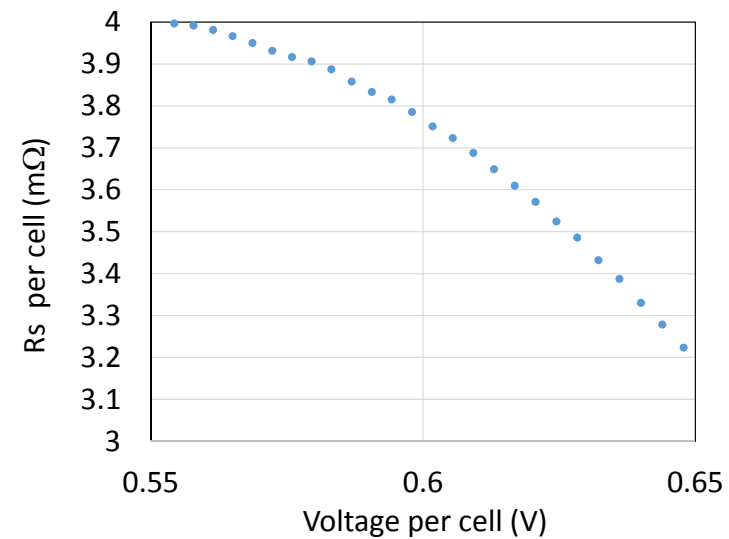
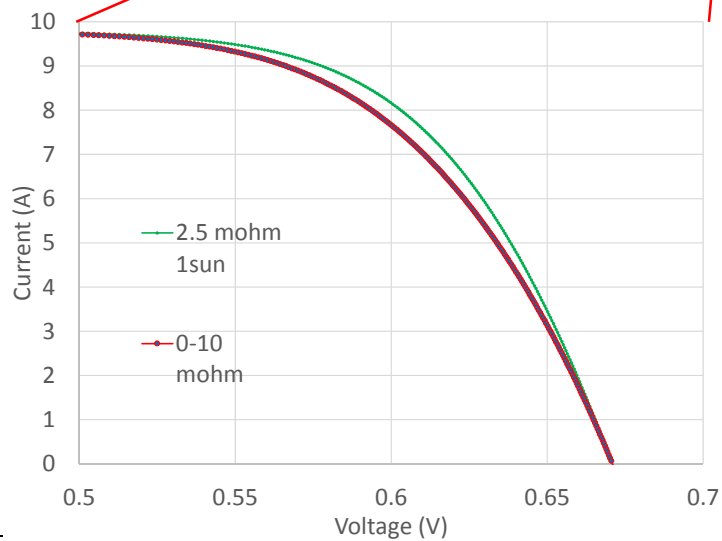
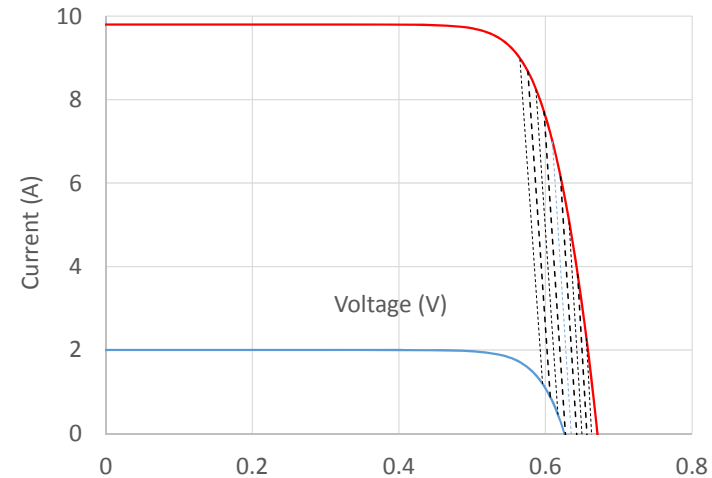
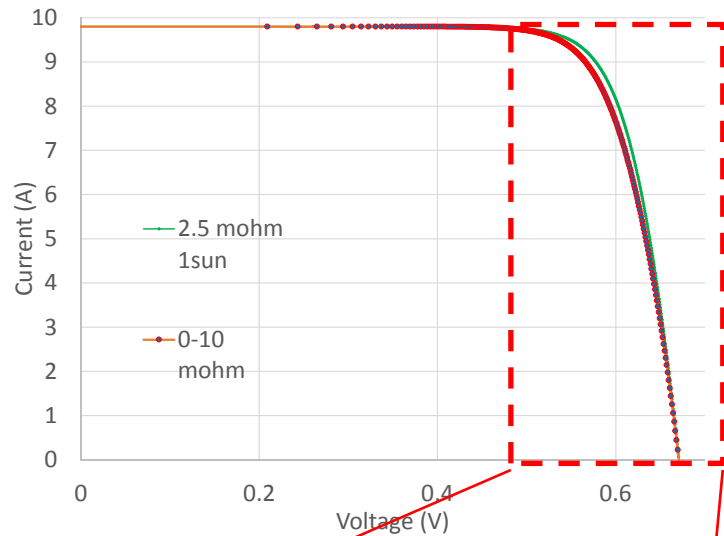
可能な要因:セル内の不均一性



# シミュレーション例: $R_s$ の異なる部分の並列接続



# シミュレーション例：電位の連続変化



## 結論

- ・結晶シリコン太陽電池のIV特性全体に応用できる温度依存を考慮したTC式がセル、モジュールともに適用できることを確認できた(高精度)。STC補正としてIECに提案中。

$$TC_{rel} = \frac{1}{V_1} \left( \frac{V_2 - V_1}{T_2 - T_1} \right) = \frac{1}{T_1} \left( 1 - \frac{nE_g}{qv_1} \right)$$

- ・ $R_s \neq 0$ のデバイスでも成立(汎用性)。 $R_s^*$ の電圧依存。
- ・セル内の面内不均一性(電位、 $R_s$ )を考慮すると、セル全体としての $R_s^*$ の電圧依存、温度特性、照度特性共に実験結果を説明できる。(ただし他の要素も有り得る)
- ・(応用)IV温度照度補正(屋外・屋内)、シミュレーション高度化

\*セル全体の $R_s$ の値は2照度法で求めた値で定義

謝辞: 本研究はNEDO委託研究の一環として実施したものであり、関係各位に感謝いたします。