



グリーンMEMSセンサ端末・ネットワークシステムを実現する共通基盤技術

# ナノファイバーを用いた軽量、 フレキシブルな高効率自立電源の開発

(東京工業大学・日清紡HD・住江織物・信州大学(再委託))

東京工業大学

松本 英俊



NMEMS 技術研究機構



1. 背景と目的
2. 開発テーマ概要・目標
3. 開発内容と取り組み
4. 開発内容
  - 有機半導体材料の開発
  - ナノファイバー構造型太陽電池の開発
  - 太陽電池繊維化・布帛(ファブリック)化技術開発
  - 自立電源モジュール開発
  - スマート植物工場での電源実証
5. ネットワーク・応用分野
6. まとめ

# 1. 背景と目的

- センサ使用環境中の**環境エネルギー(光エネルギー)**を効率良く捕集して電気エネルギーに変換する**発電機能**とセンサ端末に安定に電力を供給するための**蓄電機能**を持つ高効率小型自立電源の開発が必要。
- 有機材料を利用することで、**軽量、薄型、フレキシブル、低コスト**でどこにでも取り付けできる電源を実現する。

## NMEMS技術研究機構大岡山研究センター



住江織物株式会社



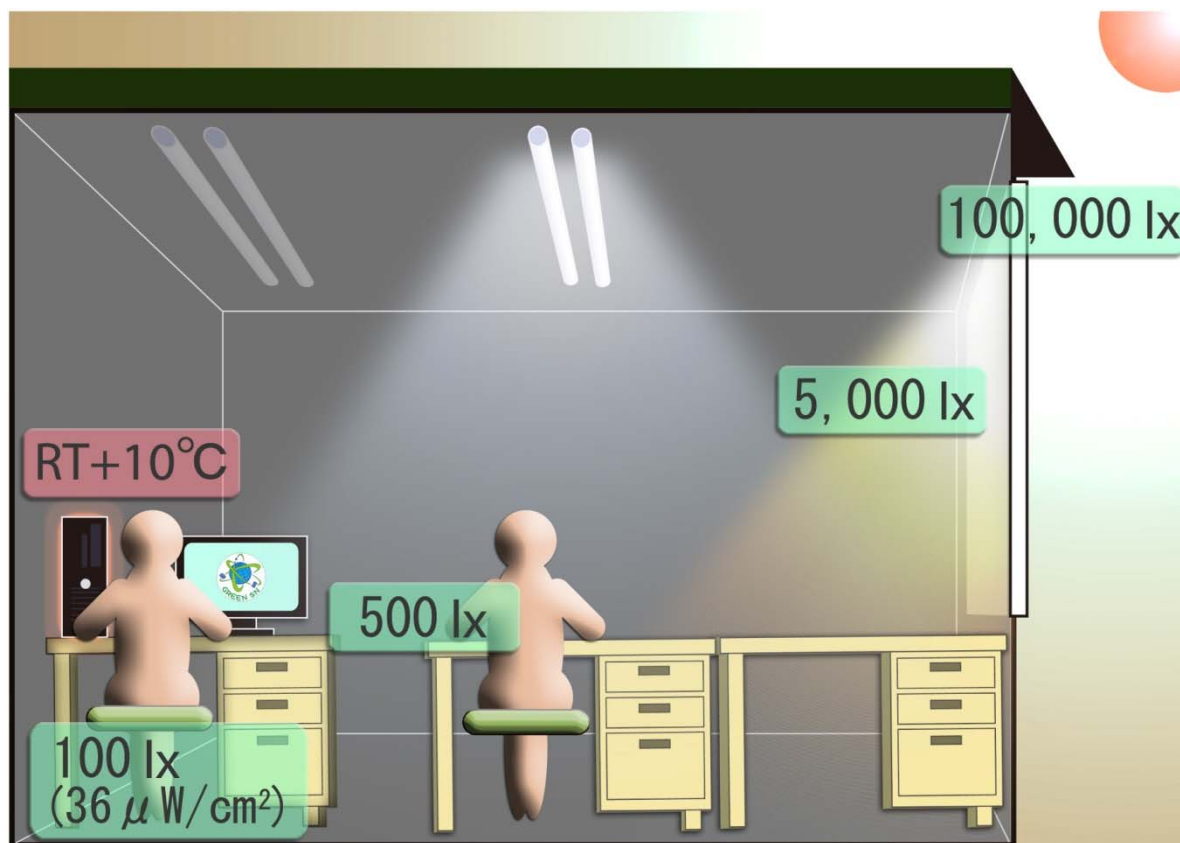
NMEMS 技術研究機構



# 1. 背景と目的

## センサ使用環境(室内)における環境エネルギー

- 太陽光、**室内照明**、温度差…

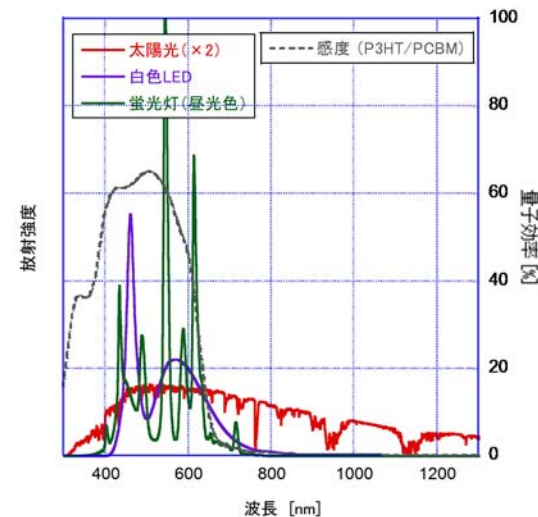


# 1. 背景と目的

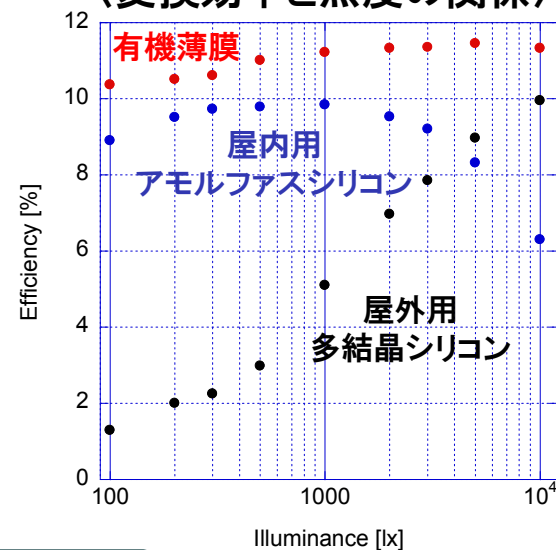
## 有機系太陽電池の強み

- **低コスト**  
原材料、製造(塗布)プロセス
- **軽量・薄型・フレキシブル**
- **可視光領域での光吸収**  
**室内照明とのマッチング**
- **分子設計が可能**  
**起電力・吸収特性の向上**

〈光源スペクトルと有機材料の吸収域〉



〈変換効率と照度の関係〉



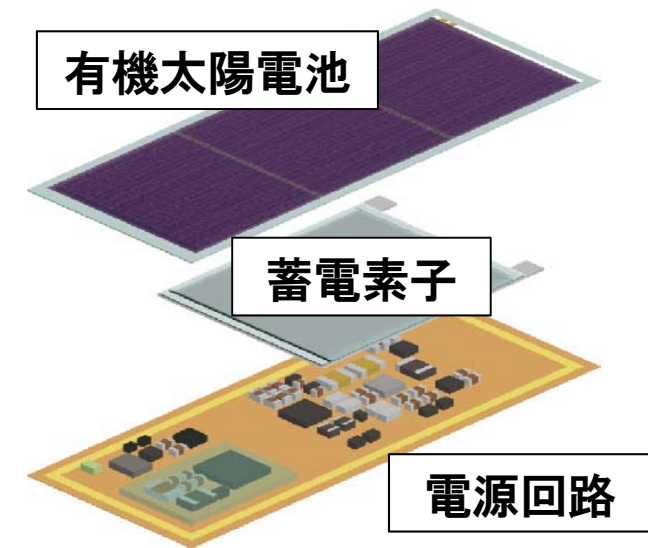
## 2. 開発テーマ概要・目的（大岡山研究センター）

- 室内環境中に希薄分散する低照度の光エネルギーを利用した、小型・低消費電力グリーンセンサ端末に安定に電力を供給できる、**メンテナンスフリー・レイアウトフリーな自立電源の開発**

### 〈目標値〉

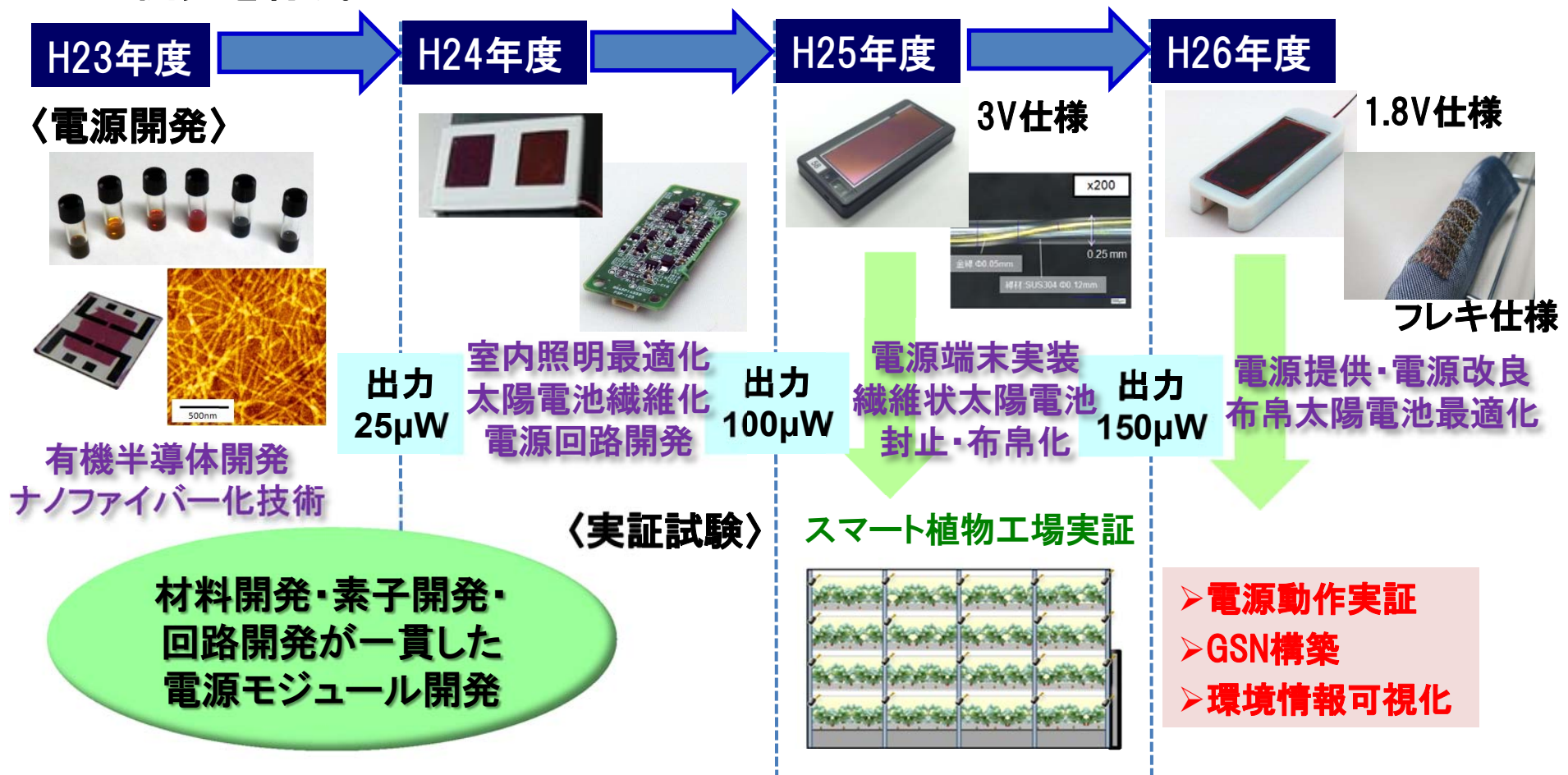
- ・サイズ：**5cm × 2cm**以下
- ・出力：室内照明下**150 $\mu$ W**以上

- ✓ 消費電力100 $\mu$ W以下の小型センサ端末の安定動作に十分な出力
- ✓ 室内照明の時間変化の影響を受けない  
**環境発電素子と蓄電素子の併用により完全に無給電で利用できる自立電源**



## 2. 開発テーマ概要・目的（大岡山研究センター）

有機半導体材料開発・ナノファイバー化技術開発により、室内の弱い光でも高効率な発電が可能な軽量・薄型・フレキシブルで低コストな自立電源の開発を行う。



NMEMS 技術研究機構



### 3. 開発内容と取り組み（大岡山研究センター）

#### ①有機半導体材料の開発（信州大学）

新規材料による室内照明の効率的な利用

#### ②ナノファイバー構造型太陽電池の開発（東京工業大学）

ナノファイバー利用による太陽電池の高出力化、耐久性向上

#### ③太陽電池繊維化・布帛（ファブリック）化技術開発（住江織物）

太陽電池のフレキシブル化

#### ④自立電源モジュール開発（日清紡HD・信州大学）

電源モジュールのロス低減

夜間を含む連続的な安定電力供給の実現

#### ⑤実証試験（日清紡HD）

自立電源の長期安定動作検証

自立電源搭載ワイヤレスセンサネットワークの実証




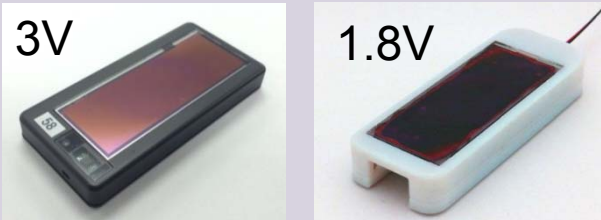
NMEMS 技術研究機構





### 3. 開発内容と取り組み（大岡山研究センター）

#### 自立電源搭載端末の比較

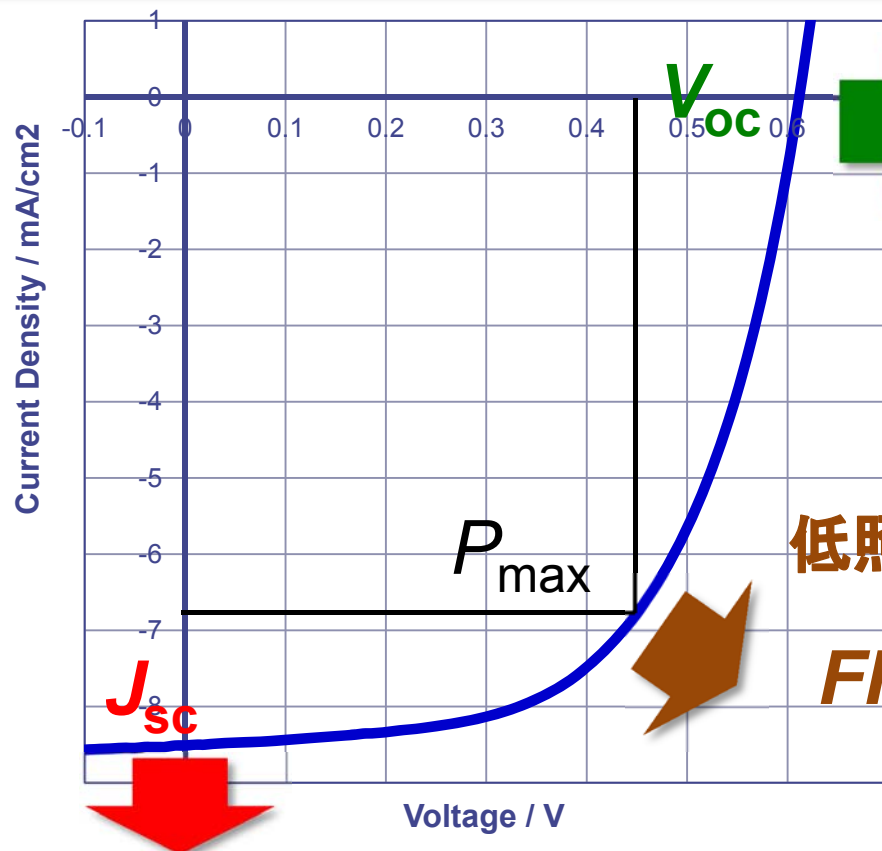
特徴	既存品 (SII, EnOceanなど)	プロジェクト開発品
原理	アモルファスシリコン太陽電池  <p>(写真は SII・Mr.省エネ)</p>	有機薄膜太陽電池 
特徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>・室内照明用のアモルファスシリコン太陽電池を搭載</li> <li>・環境発電と2次電池あるいはボタン電池の併用</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・室内照明下で高出力化した有機薄膜太陽電池を開発</li> <li>・環境発電を利用した完全無給電化を実現(実証環境で昼夜間連続動作) → メンテナンスフリー</li> <li>・有機系太陽電池の採用により軽量化を実現</li> <li>・さらに繊維状太陽電池を開発し、これを布帛状にすることで優れたフレキシブル性を実現 → レイアウトフリー</li> </ul>



## 4. 太陽電池の高出力化 担当:東京工業大学・信州大学(再委託先)

有機薄膜太陽電池の高出力化:

$$\text{セル効率: } \eta_{\text{cell}} = (J_{\text{sc}} \times V_{\text{oc}} \times FF) / E_{\text{in}}$$



①材料開発(信州大)

低照度最適化(東工大)

$$FF = P_{\text{max}} / (V_{\text{oc}} \times J_{\text{sc}})$$

②ナノファイバー構造導入(東工大)



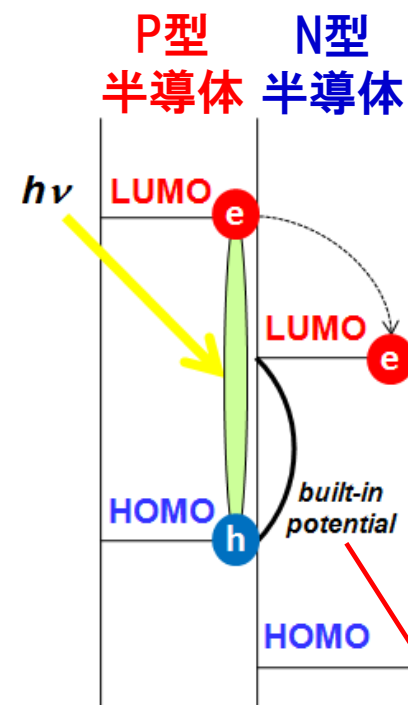
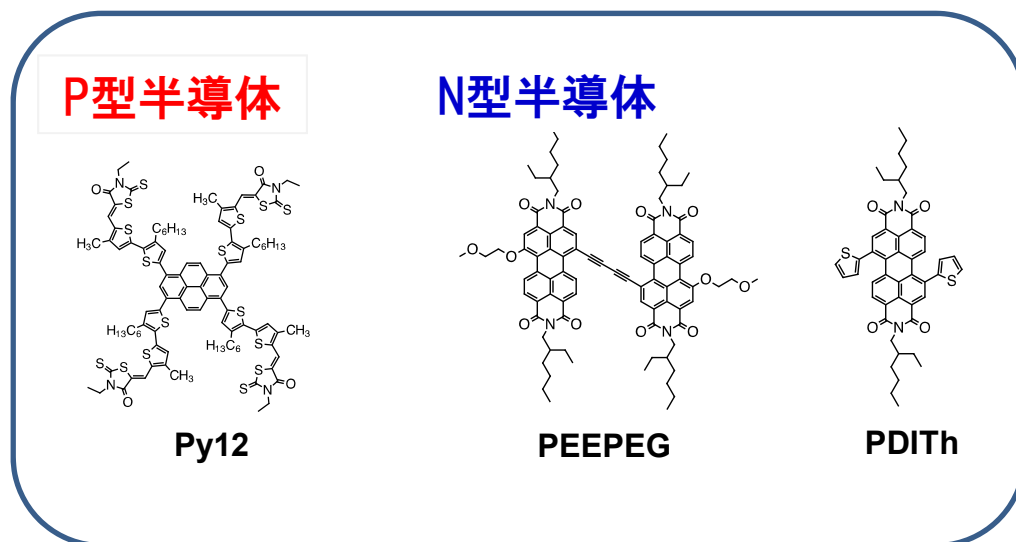
NMEMS 技術研究機構



## 4. ①有機半導体材料の開発成果 担当:信州大学(再委託先)

- ・有機半導体のHOMO-LUMO最適化および狭バンドギャップ化により、可視光全体の利用が可能になり、さらに**1V以上の開放電圧  $V_{oc}$** を実現。(特許出願)
- ・グラムオーダーでの有機半導体合成。

### 開発した有機半導体



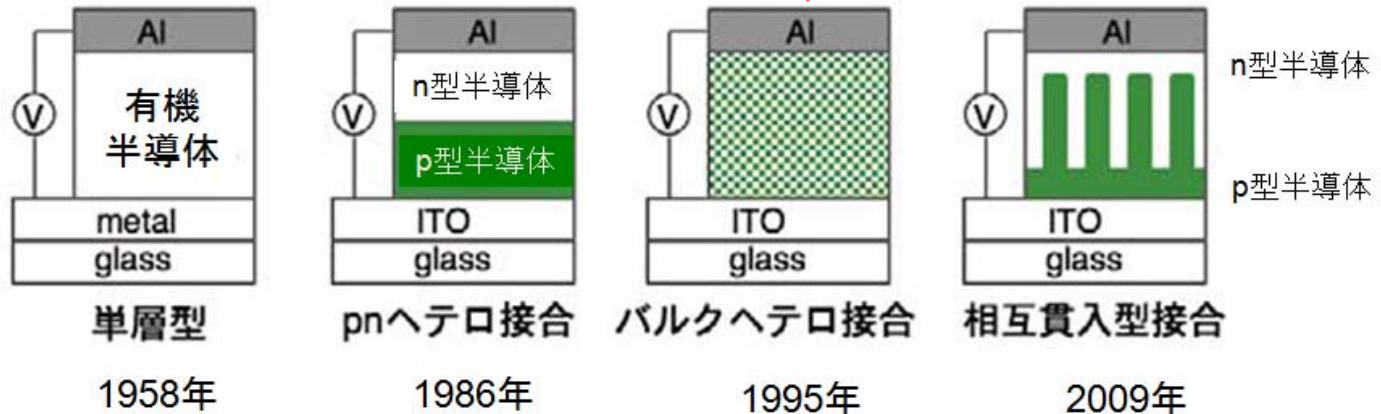
この差を大きくすると $V_{oc}$ が向上

# 4. ② ナノファイバー構造型太陽電池の開発 担当: 東京工業大学

## 有機薄膜太陽電池の構造

現在の主流

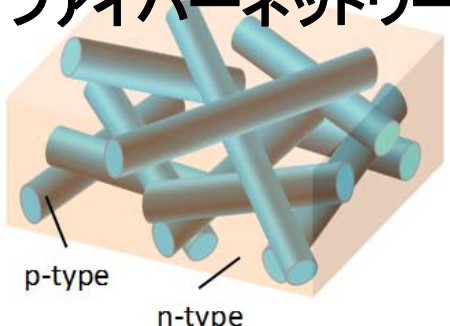
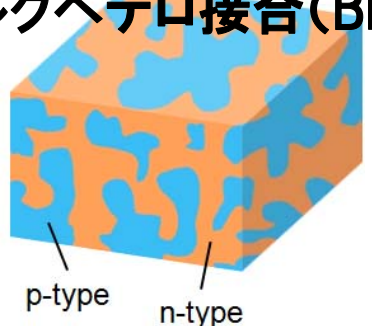
松尾豊『有機薄膜太陽電池の科学』



## ナノファイバー構造型太陽電池

バルクヘテロ接合(BHJ)

ナノファイバーネットワーク構造



p型/n型半導体界面の増大  
孤立ドメインが存在→キャリアが再結合

連続伝導パスの形成  
→ キャリア再結合の抑制



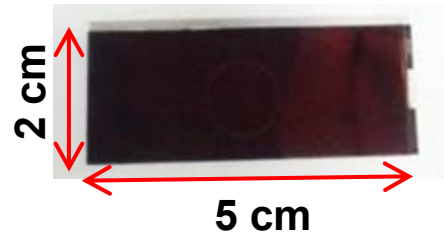
NMEMS 技術研究機構



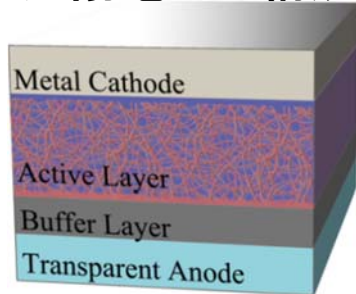
## 4. ②ナノファイバー構造型太陽電池の開発成果 担当:東京工業大学

低照度環境下で光を確実に補足するための有機太陽電池活性層の厚膜化と有機半導体のナノファイバー構造化による活性層内での電荷輸送ロスの低減によって高出力化を実現した。

太陽電池外観

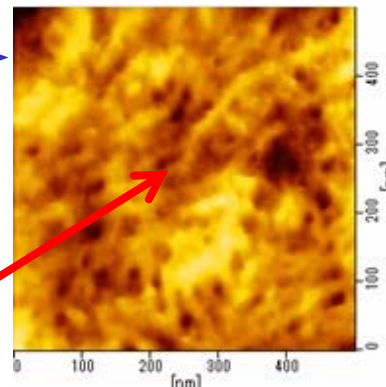


太陽電池の構成

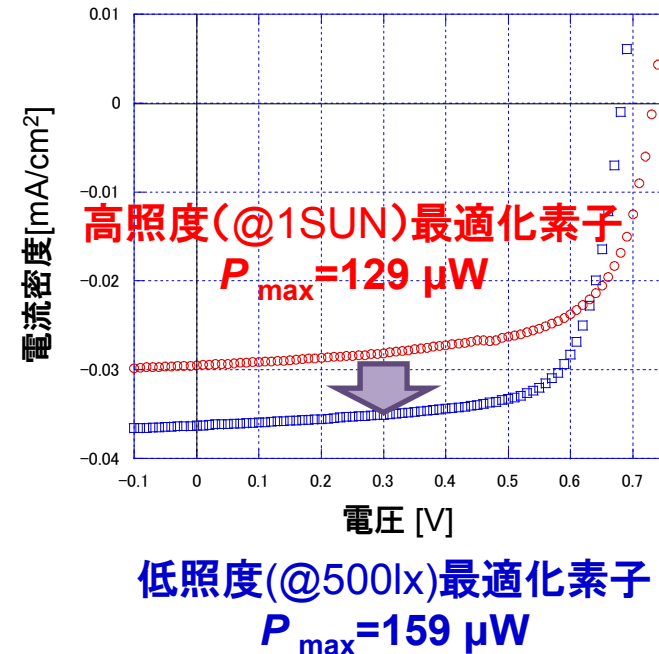


活性層

活性層内に直径20nmの有機半導体ナノファイバーを導入



発電特性



ナノファイバー構造の導入により出力は20%以上向上



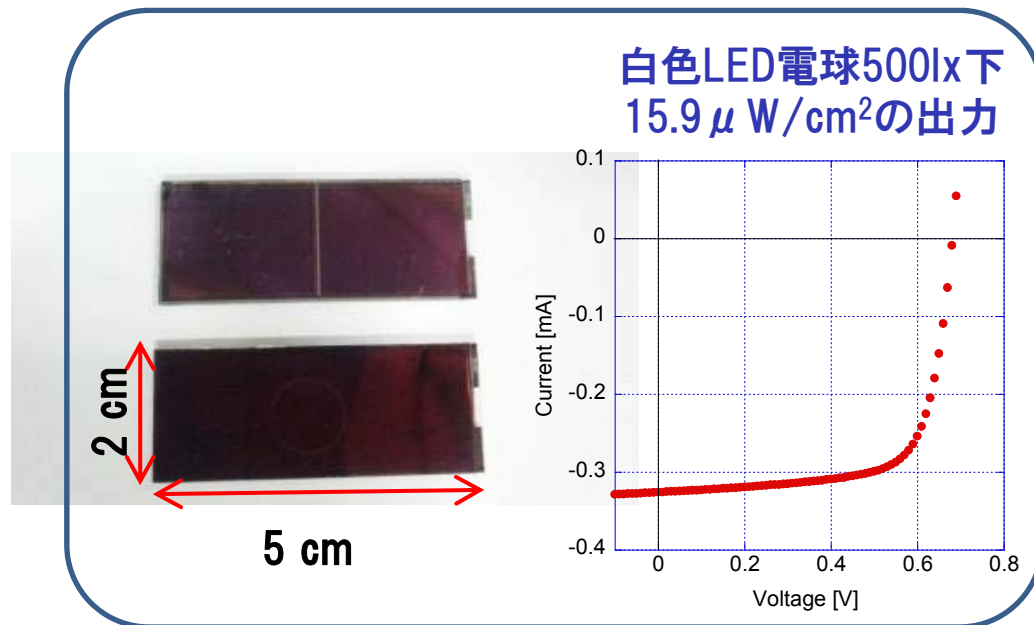
NMEMS 技術研究機構



## 4. ②ナノファイバー構造型太陽電池の開発成果 担当:東京工業大学

- ・ナノファイバー構造の導入によって、室内照明下で5cm×2cmのモジュールサイズで150  $\mu$  W以上の高出力化を達成。(特許出願)
- ・長期にわたって安定した出力を維持。

### 太陽電池外観と発電特性



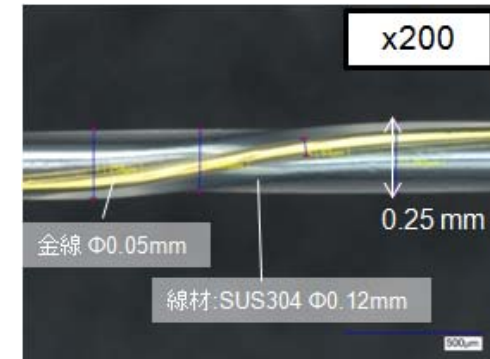
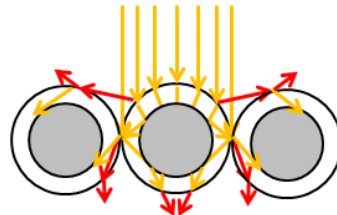
### 耐久性

- ・使用可能範囲:  
室温~60°C
- ・保存寿命:  
40°C, RH95%で2年以上  
高湿度環境の植物工場で  
5か月間以上安定動作(継続中)

## 4. ③有機薄膜太陽電池の繊維化・布帛化 担当:住江織物

### 繊維型・布帛型太陽電池の強み

- センサ端末の設置性向上  
「曲げられる」電源から「折り畳める」電源へ
- 電源の信頼性向上  
布帛型は多数の繊維状素子の集合体
- 室内照明(散乱光)に適した形状



繊維型太陽電池



布帛型太陽電池

## 4. ③有機薄膜太陽電池の繊維化・布帛化 担当:住江織物

### 有機薄膜太陽電池繊維化のための要素技術開発

#### 繊維基材に対する精密コーティング技術 (H24~H26年度)

メナスカス法による有機半導体の塗布



液面から繊維基材を引き上げるメナスカス法を用いることで100 nmオーダーでの均一塗布を実現

ノズル位置補正装置



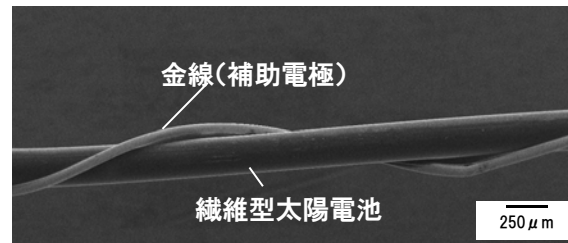
コーティングノズル位置補正装置の開発によるセンター出し機構の自動化

#### 補助電極を利用した繊維型太陽電池に対する素子構成の確立 (H25年度)

リード線巻き付け機



太陽電池を傷つけずに均一張力での補助電極取付けを実現



**大気条件下・全塗布プロセス**による  
繊維型有機薄膜太陽電池の作製技術を確立



NMEMS 技術研究機構

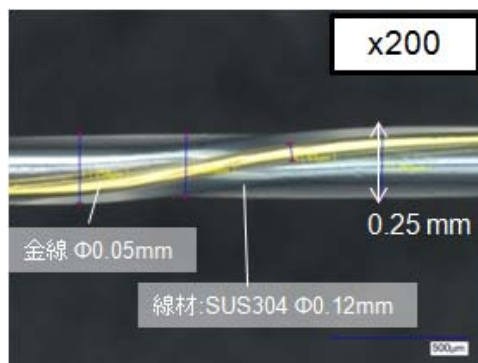




## 4. ③有機薄膜太陽電池の繊維化・布帛化成果 担当:住江織物

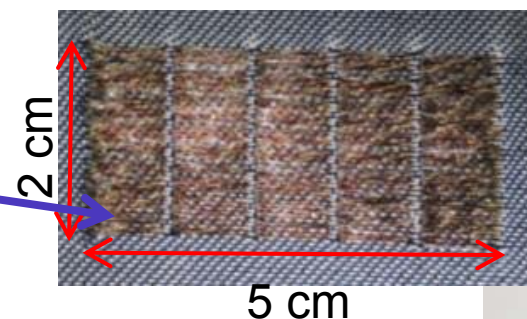
大気圧条件下・全塗布プロセスによる有機薄膜太陽電池の繊維化・布帛化技術の確立により、フレキシブル化を実現(特許出願)

繊維型太陽電池



長さ:4 cm (発電部)  
直径:250  $\mu$ m  
素子1本の出力: 3.3 $\mu$ W  
@室内照明下

布帛(ファブリック)型太陽電池



繊維型太陽電池を布帛状に織り込む(密度25本/cm)ことでこれまでの電源にないフレキシブル性を持つ

曲面への設置にも対応可能  
レイアウトフリーを実現



NMEMS 技術研究機構





## 4. ③有機薄膜太陽電池の繊維化・布帛化成果 担当:住江織物

動画再生  
(フレキシブル+発電)



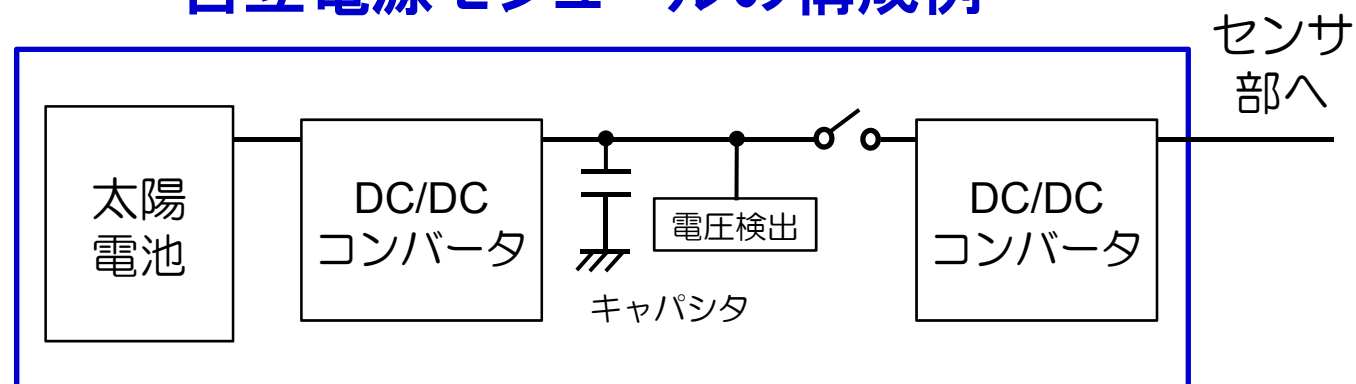
NMEMS 技術研究機構



## 4. ④ 自立電源モジュール開発 担当:日清紡HD

- ワイヤレスセンサ端末への安定な電力供給を可能にする出力の小さな環境発電技術に対応した消費電力の少ない電源モジュール技術の開発

### 自立電源モジュールの構成例



**開発ポイント:** 低損失化(DC/DC), 蓄電機能, 小型・薄型化  
センサ仕様に応じた電圧  
実証に応じた蓄電機能, 実証環境での安定動作

## 4. 自立電源モジュール開発成果 担当:日清紡HD

- 東工大で開発した太陽電池を利用した自立電源を開発。
  - 電力消費条件(無線、センサ等)に応じた仕様の電源を開発
  - 利用環境(植物工場)に適合した電源を開発
- 明暗の周期のある実証環境でも24時間以上連続で安定駆動し、低照度から起動可能。さらに高湿度環境にも適合。

### センサ仕様への対応



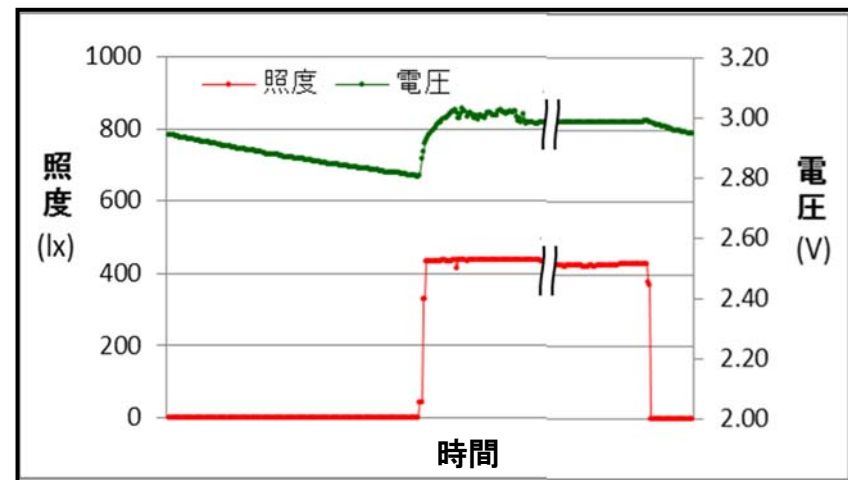
3V電源  
植物工場実証用



1.8V電源  
オリンパス  
VOCセンサ実証用

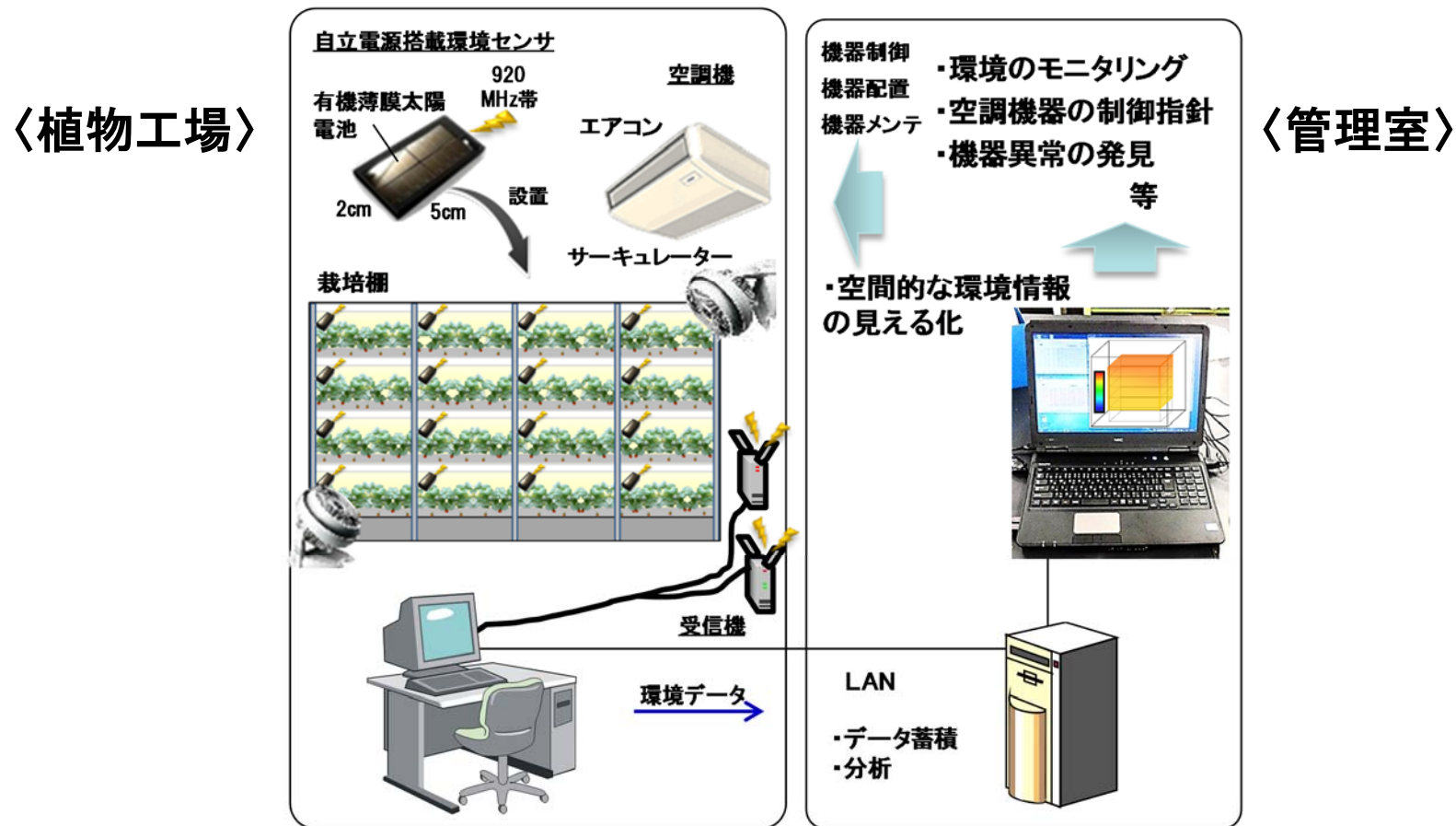
### 実証環境への対応例@植物工場

#### 昼夜間連続動作



## 4. ⑤スマート植物工場での実証 担当:日清紡HD

・開発した自立電源を搭載した、ワイヤレスセンサ端末を試作し、実証環境(スマート植物工場)での自立電源の動作検証と植物工場の環境可視化・省エネ化の検証を行った。

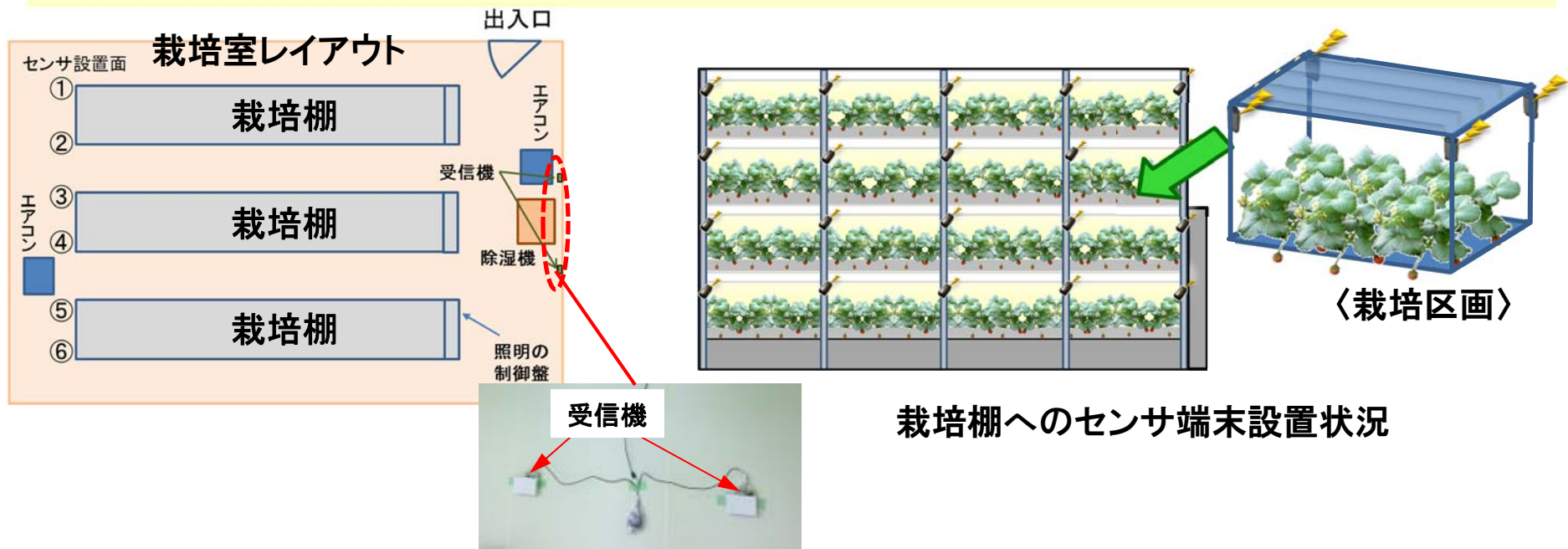


## 4. スマート植物工場での実証成果 担当:日清紡HD

### 自立電源搭載ワイヤレスセンサーシステムによる実証

実証場所:日清紡HD徳島事業所

- ・イチゴ栽培棚に1段あたり両面で10台(約0.5m<sup>2</sup>/台)のセンサ端末(計110台)を設置し、**栽培棚区画の温湿度情報をきめ細く可視化**。
- ・金属製の栽培棚は電波障害となるため、受信機を2台設置しデータを補完することで**95%以上の安定した受信率**を達成。
- ・データ送信間隔は、工場内の室温変動時間を考慮し3分に設定。



NMEMS 技術研究機構



# 4. スマート植物工場での実証成果 担当:日清紡HD

## 実証環境の可視化および対策

- 植物の成長に応じて環境が変化する植物工場内にセンサ端末をきめ細かく設置することにより栽培区画毎の環境情報を可視化し、**栽培区画毎のばらつきを正確に把握**。
- 栽培室内における空調の最適制御条件を再検討
- 生育条件の均一化と過剰制御の改善(消費電力低減)

〈栽培棚区画(約0.5m<sup>2</sup>)あたりの温度情報の可視化例〉

①	1.42	2.71	2.25	2.11	0.08
	1.85	4.44	4.80	4.06	2.07
	2.10	4.59	5.33	4.95	2.32
	2.13	4.29	4.11	4.53	2.23

②	1.98	2.28	1.17	0.16	0.00
	2.24	3.95	4.53	3.93	2.41
	2.37	4.77	4.52	4.95	3.01
	2.14	4.62	4.38	4.51	2.50

③	2.87	4.35	4.26	3.71	2.39
	2.49	4.17	3.78	3.23	2.50
	2.91	3.99	4.44	3.02	2.38
	2.28	3.55	3.28	2.89	2.05

④	3.51	4.96	4.42	3.30	1.64
	3.30	5.35	4.86	4.09	2.89
	3.23	5.65	6.03	3.38	3.57
	2.01	3.77	4.40	2.83	2.94

⑤					
	3.85	4.84	5.64	5.64	3.31
	3.05	4.98	5.66	5.44	3.27
	1.19	3.51	3.21	3.48	1.61

⑥					
	2.98	4.45	5.16	5.45	3.26
	2.06	4.90	4.71	5.50	3.68
	0.54	3.82	4.04	4.06	1.88



〈対策例〉  
 ・温湿度設定変更  
 温度 -1℃  
 湿度 +10%  
 ・栽培室内での  
 空気循環

①	0.65	1.24	1.41	1.43	0.23
	0.91	2.23	2.41	2.33	1.13
	0.93	2.47	2.66	2.53	1.22
	0.83	2.02	2.10	1.91	1.01

②	0.76	0.95	0.58	0.22	0.00
	0.88	1.90	1.93	1.83	1.02
	0.96	2.30	2.35	2.17	1.37
	0.86	2.14	2.19	2.04	1.45

③	1.38	1.89	1.71	1.28	1.06
	1.40	2.23	1.94	1.62	1.00
	1.53	2.56	2.42	1.83	0.97
	1.33	1.90	2.27	1.92	1.10

④	1.64	2.14	1.87	1.48	0.89
	1.75	2.15	2.23	2.06	1.27
	1.78	2.31	2.68	2.52	1.56
	1.17	1.89	2.14	1.61	1.12

⑤					
	1.62	2.11	2.35	2.48	1.22
	1.31	1.84	2.24	2.45	1.32
	0.49	1.52	1.57	1.62	0.61

⑥					
	1.27	1.88	2.26	2.38	1.33
	0.94	1.81	2.44	2.59	1.53
	0.23	1.75	1.83	1.73	0.69

最大温度差:6.03℃

生育条件の均一化  
 と過剰制御の改善(～12%消費電力低減)

最大温度差:2.68℃



NMEMS 技術研究機構



## 5. ネットワーク・応用分野①

センサネットワークシステムとしての展開(日清紡HD)

■ 自立電源搭載ワイヤレスセンサネットワークシステムとして展開。

搭載するセンサの種類を多様化して、可視化された栽培環境情報と育種の収量・品質などの関係をビッグデータとして解析し、コストパフォーマンスの高い栽培を実現できるようなシステムへと展開する。

現在のセンサ端末



・照度, 温度(気温), 湿度

端末搭載センサの多様化

・CO<sub>2</sub>濃度, 養液(土壌)温度,  
養液濃度・pH, 気圧など

ビッグデータの収集・解析

生育環境条件を最適制御

育種の品質管理および生産性の向上



NMEMS 技術研究機構





## 5. ネットワーク・応用分野②

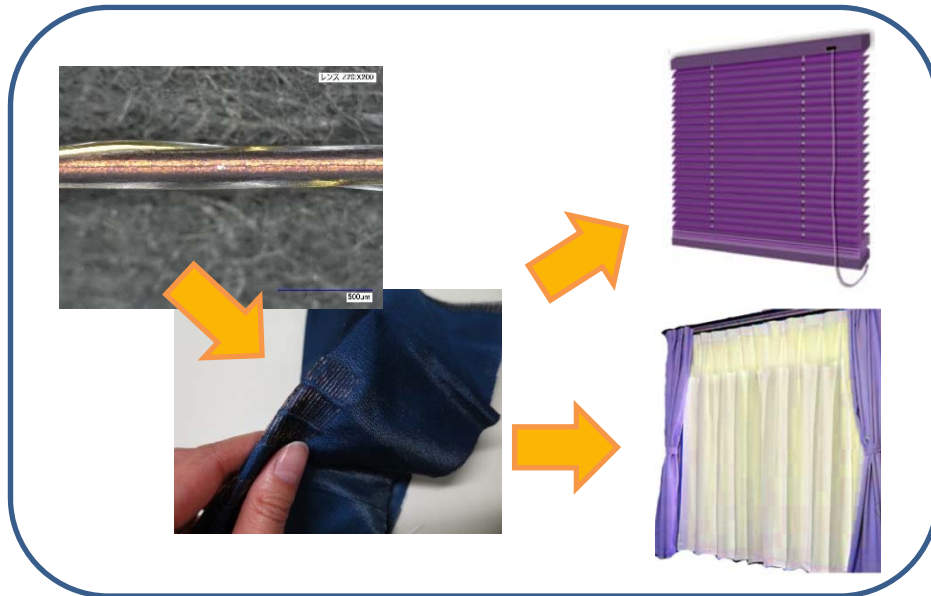
### 自立電源としての展開

- 室内光照明用高効率有機薄膜太陽電池を搭載した自立電源モジュールの低消費電力電子デバイス用電源としての展開

(日清紡HD)

- 布帛型有機薄膜太陽電池パネルをロールスクリーンやカーテンなどに組み込み、電源として利用できるインテリアへ展開

(住江織物)



繊維状・ファブリック状  
有機太陽電池

テキスタイル・インテリア・  
産業資材用途

## 6. まとめ

- 有機半導体の利用により、センサ端末の使用環境に適した、軽量、フレキシブル、低コストな高効率自立電源を開発。  
(5cm×2cmサイズで出力150  $\mu$ Wを達成)
- 新規有機半導体材料の開発により、室内光源に適した光吸収特性と起電力の向上を実現。
- ナノファイバー構造太陽電池の開発により高効率化を実現。  
繊維化・布帛(ファブリック)化技術開発により、これまでにない太陽電池のフレキシブル化を実現。
- スマート植物工場において、開発自立電源を搭載したセンサ端末を用いた実証試験を行い自立電源の長期安定動作を確認。併せて、植物工場における環境情報(温湿照度)を可視化。
- 今後は自立電源をモバイル・ウェアラブル電源として展開。

