

共同研究・受託研究名：最適化空調システムの研究  
 研究代表者（所属）：木下進一（大阪府大・工学）

## 同化箱法による生理応答評価と 環境因子を考慮した光合成モデルの構築

○密原秀真<sup>1</sup>，木下進一<sup>1</sup>，吉田篤正<sup>1</sup>，岡弘紀<sup>1</sup>  
 所属：<sup>1</sup>大阪府大・工学

キーワード：植物工場，同化箱法，光合成モデル，生理応答，生重量予測

### 要旨

完全人工光型植物工場は，閉鎖環境で安全に農作物を育成できるという利点がある一方で，高額な運転コストが課題となっている。本研究では完全人工光型植物工場の省電力化，作物の生産性向上を目的として，エネルギーを効率的に利用できる環境システムを検討する。まず，照明や空調の条件から植物栽培環境の温湿度・CO<sub>2</sub>濃度を解析するプログラムを作成する。次に，植物の生育予測モデルを適用し，植物の生産量と生育に必要な消費電力を算出する。その後，実際の栽培実験と比較して，植物生産量と消費電力の再現性を確認し，環境条件の変化による消費電力・生産性への影響評価を行い，効率的な制御条件を検討する。

## 研究背景・研究目的

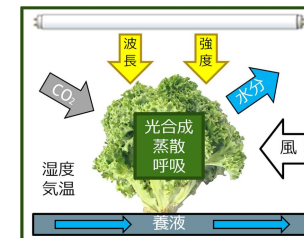
- ・気候変動による収穫量の不安定
- ・農業従事者の減少

### 植物工場

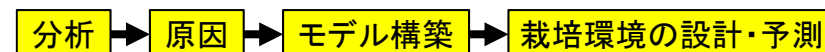


### 植物工場での問題点

- ・チップバーン
- ・イニシャルコスト，ランニングコストが高い
- ・生育の不揃い



目的：植物モデルの高精度化  
 同化箱法による生理応答測定

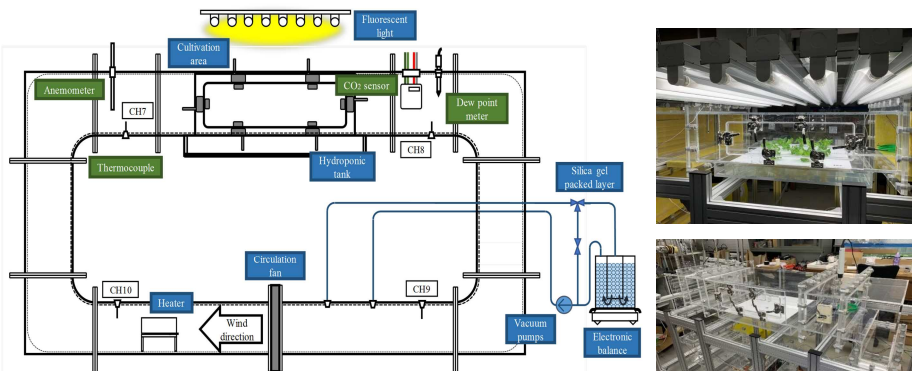


同化箱での生理応答測定  
 実栽培環境での環境測定

環境変数を含んだ光合成モデルの構築

## 同化箱について

閉鎖型の同化箱を使用  
 流路内のCO<sub>2</sub>および水分収支から生理応答を測定



### 制御項目

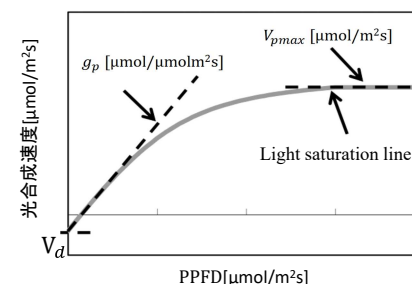
温度・相対湿度・CO<sub>2</sub>濃度・風速

### 測定項目

温度・相対湿度・CO<sub>2</sub>濃度・風速・葉温・pH・EC

## 光合成モデルの構築

光合成速度の推移



非直角双曲線式

$$V_p = V_d + \frac{g_p \cdot I_R + V_{pmax}}{2\varphi_p} - \frac{\sqrt{(g_p \cdot I_R + V_{pmax})^2 - 4g_p \cdot \varphi_p^2 \cdot V_{pmax} \cdot I_R}}{2\varphi_p}$$

光合成速度の推移を  
 光強度に関する関数として表現

初期勾配  $g_p$ ，最大光合成速度  $V_{pmax}$

環境変数を含んだ形に拡張

環境因子の相互作用はないと仮定

$$g_p(T, c, H, u) = g_{pstd} \cdot f_1(T) \cdot f_2(c) \cdot f_3(H) \cdot f_4(u)$$

$$V_{pmax}(T, c, H, u) = V_{pmaxstd} \cdot f_5(T) \cdot f_6(c) \cdot f_7(H) \cdot f_8(u)$$

$$f_1(T) = \frac{g_p(T)}{g_p(T=23)} = \frac{E_1 \cdot T^2 + E_2 \cdot T + E_3}{g_p(T=23)}$$

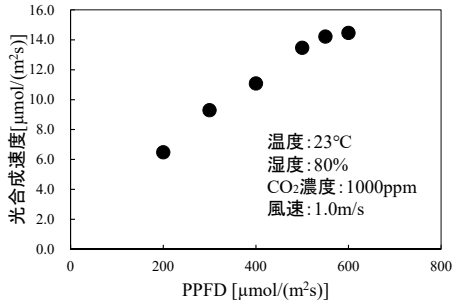
$$f_2(c) = \frac{g_p(c)}{g_p(c=1000)} = \frac{E_4 \cdot c^2 + E_5 \cdot c + E_6}{g_p(c=1000)}$$

$$f_3(H) = \frac{g_p(H)}{g_p(H=80)} = \frac{E_7 \cdot H + E_8}{g_p(H=80)}$$

$$f_4(u) = \frac{g_p(u)}{g_p(u=1.0)} = \frac{E_9 \cdot u^2 + E_{10} \cdot u + E_{11}}{g_p(u=1.0)}$$

## 測定項目

### 光合成飽和実験



光合成速度が飽和するPPFDを測定  
PPFDを200~600[μmol/m<sup>2</sup>s]の6段階で測定

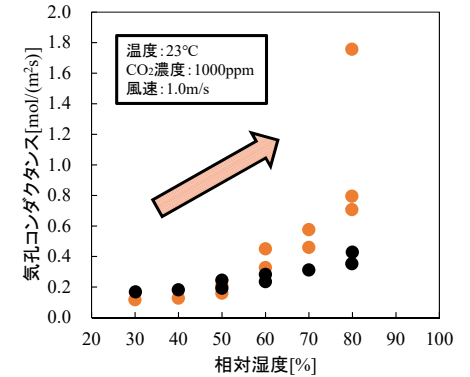
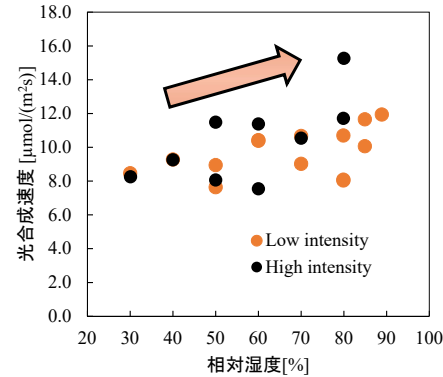
200~500[μmol/m<sup>2</sup>s]では線形的に変化  
550, 600[μmol/m<sup>2</sup>s]で一定値に収束

弱光条件: 250[μmol/m<sup>2</sup>s]  
強光条件: 600[μmol/m<sup>2</sup>s]

### 測定項目

	温度 [°C]	相対湿度 [%]	CO <sub>2</sub> 濃度 [ppm]	風速 [m/s]	PPFD [μmol/m <sup>2</sup> s]	
基準条件	23	80	1000	1.0	250, 600	
$g_p$	温度	15-35	1000	1.0	250	
	相対湿度	23	20-90	1000	1.0	250
	CO <sub>2</sub> 濃度	23	80	400-2000	1.0	250
	風速	23	80	1000	0.7-1.7	250
$V_{pmax}$	温度	15-35	1000	1.0	600	
	相対湿度	23	20-90	1000	1.0	600
	CO <sub>2</sub> 濃度	23	80	400-2000	1.0	600
	風速	23	80	1000	0.7-1.7	600

## 実験結果(相対湿度)

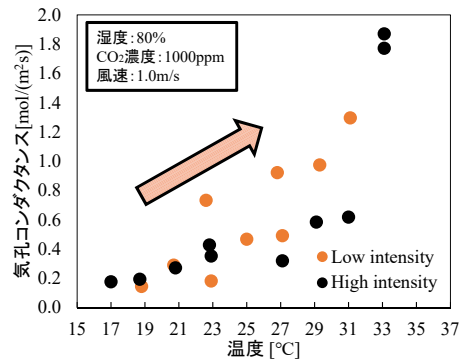
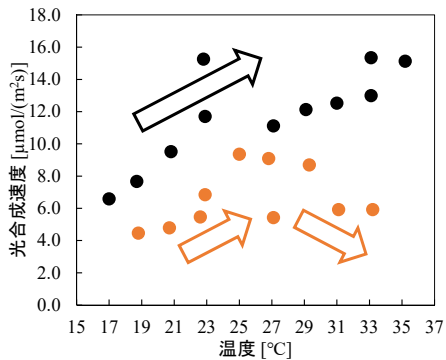


相対湿度が増加するにつれて光合成速度,  
気孔コンダクタンスは両条件で増加傾向。

【弱光条件・強光条件】

低湿度条件では蒸散を防ぐために気孔を閉じることで  
光合成が阻害されていると考えられる。

## 実験結果(温度)



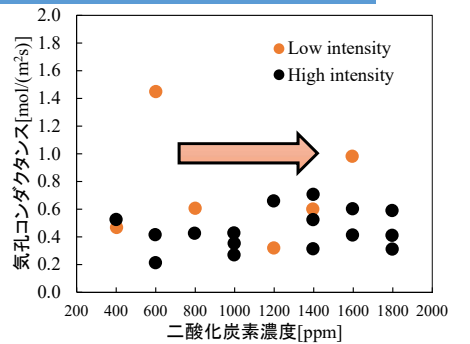
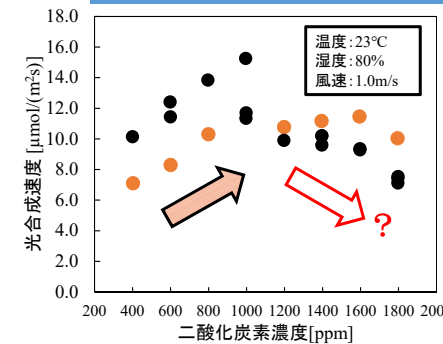
【弱光条件】

高温域で気孔コンダクタンスが増加しているも、  
光合成速度が低いことから気孔開度に依存していない。

【強光条件】

温度上昇に伴い光合成速度, 気孔コンダクタンスがともに増加。  
光合成速度は気孔でのCO<sub>2</sub>の吸収しやすさに律速されている。

## 実験結果(二酸化炭素濃度)



【気孔コンダクタンス】

CO<sub>2</sub>濃度変化の影響は見られなかった。  
葉周辺空気の水環境の影響が大きい。

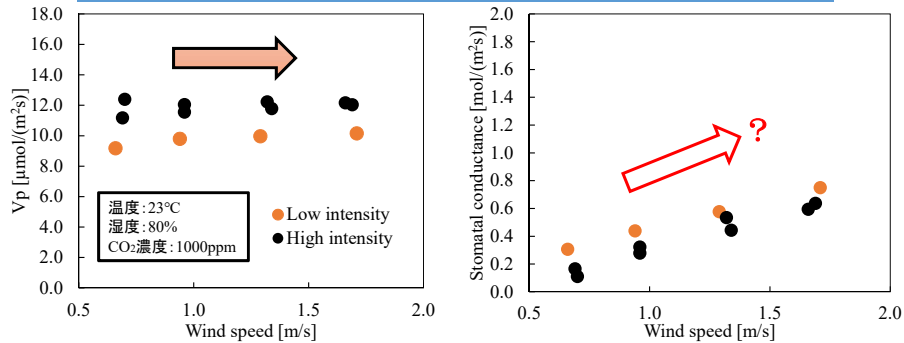
【光合成速度】

両光条件で上に凸となる傾向が得られた。

原因

- ・大気CO<sub>2</sub>濃度が上昇することで呼吸が阻害され、ストレスになる(仮説)。
- ・高CO<sub>2</sub>濃度域での実験では栽培装置からのCO<sub>2</sub>の漏れにより、  
光合成速度が正しく評価できていない。

## 実験結果(風速)



### 【光合成速度】

両条件において光合成速度はほとんど変化がみられない。  
周辺空気が湿潤であるため乾燥ストレスを受けなかった。

### 【気孔コンダクタンス】

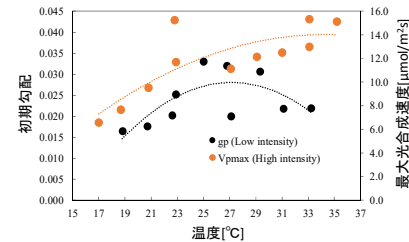
両光条件において増加した。  
乾燥ストレスが大きくなることで低下、または変化しない(仮定)。

原因

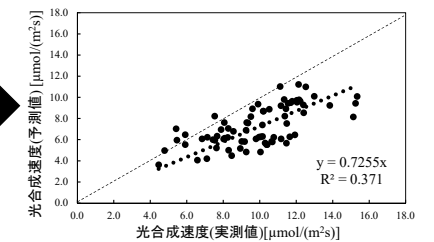
- 環境変化の履歴の影響を受けている(仮定)。
- 境界層コンダクタンスの影響を受けている可能性がある。

## 光合成モデルの精度検証

係数の同定



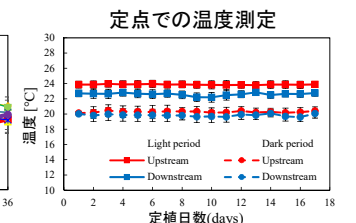
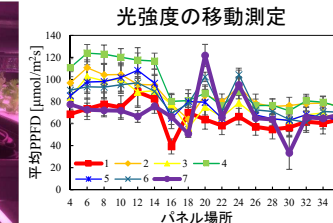
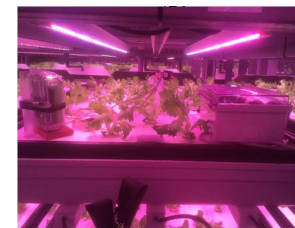
実測値と予測値の比較



上図のように最小二乗近似により  
gp, Vpmaxに関する拡張式の係数を決定す

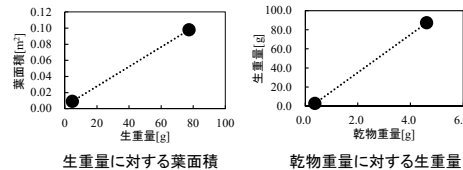
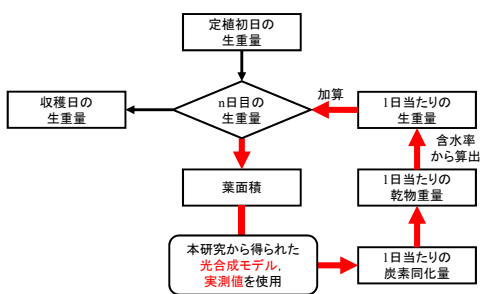
モデル式に環境因子の値を代入(予測値)  
その予測値と実測値を比較。

現場測定での環境条件を代入し、  
予測される光合成速度から**生重量**を予

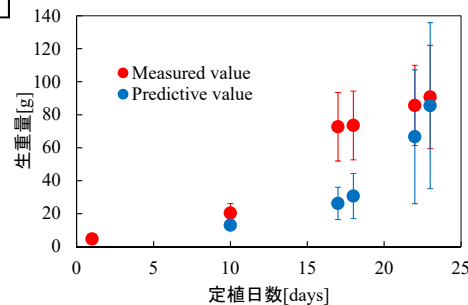


## 生重量の予測

生重量予測フローチャート



実栽培環境での予測光合成速度を用いて1日当たりの生重量を積算。



### 重量予測の結果

- 重量算出時にPPFDの影響を強く受けることからばらつきが大きくなった。
- 生育後期での**周辺株との接触**の影響, **複合的な環境変化**の影響を考慮すべき。

## 結言・今後の課題

- 環境変化に対する生理応答を測定したが、風速・CO<sub>2</sub>濃度変化の実験等で既往研究と異なる傾向が得られた。  
→測定を連続的に行っているため環境履歴の影響を受けていると考え、非連続的な条件で実験した場合と生理応答を比較しようと考えている。
- 光合成モデルによる予測値は過小評価する結果となった。  
→測定点数の少なさが問題であると考えられ、多くの測定をしたのち、より適切な近似式を用いる必要がある。
- 環境因子を複数変化させた場合や株間距離の影響を考慮しなかった。  
→環境因子を複数変化させた場合に光合成速度の予測が正しく行えるかや、株間距離が小さいパネルを用いて生理応答に与える影響を調べる。