

# 完全人工光型植物工場を対象とした 省エネ型植物栽培設備の開発研究

その1 省エネ型栽培設備の気流及び濃度分布の解析と  
植物栽培実験結果及び電力消費量の比較

# 研究目的



図 S社の完全人工光型植物工場

近年、自然環境から隔離された人工環境下で光、温湿度、気流速度、二酸化炭素濃度を制御し、高品質・高機能な植物を高密度で生産する手法として植物工場が注目されている。

その中でも完全密閉人工光型植物工場は、無菌・無農薬・ゼロベクレルの農作物を栽培可能な利点がある。

## 完全人工光型植物工場の課題

従来の農業生産方法と比較して生産コスト（照明・空調）が高い。

省エネによるコスト削減が大きな課題。

植物周囲の風速分布により、植物から発生する水蒸気・ $O_2$ ・ $CO_2$ の濃度分布が栽培棚内に形成される。

植物周囲の風速・濃度分布を栽培植物に対して適正に保つ空気環境制御方法の検討が不可欠。

## 省エネ型植物栽培設備を対象としたCFD解析

省エネ型植物栽培設備（光・空調制御ダクト型栽培設備）を新たに開発し、数値流体解析（CFD）を用いて、栽培設備モデル内の空気環境の解析を行う。

栽培設備を対象とした植物周囲の風速分布、濃度分布（湿度・ $O_2$ ・ $CO_2$ 濃度等）の解析を行う。



植物の栽培に適した空気環境を形成するための制御方法を検討する。

## リーフレタスを対象とした栽培実験

超高効率光反射材を設置した光・空調制御ダクト型栽培実験装置を作成し、実際にリーフレタスの栽培を行う。

栽培用照明条件をパラメータとして電力消費量、収穫重量、生育日数等を比較する。



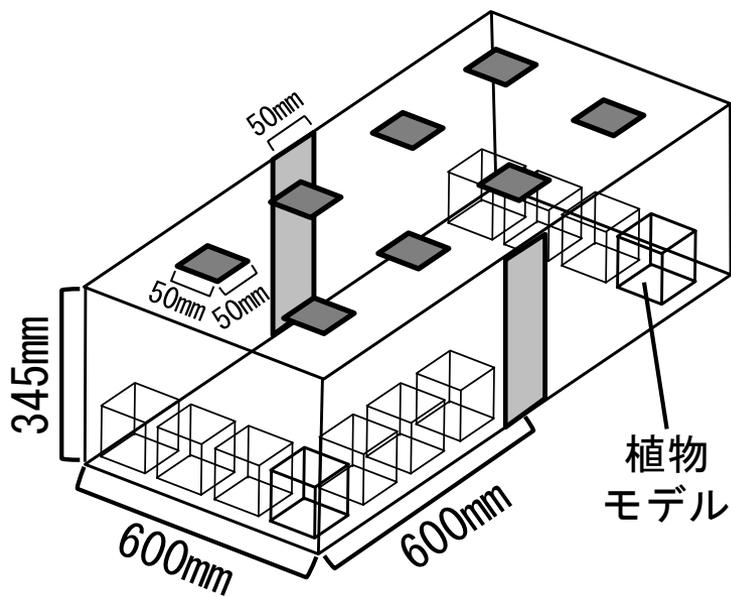
省エネ型植物栽培設備の性能を評価する。

# 省エネ型植物栽培設備を対象としたCFD解析

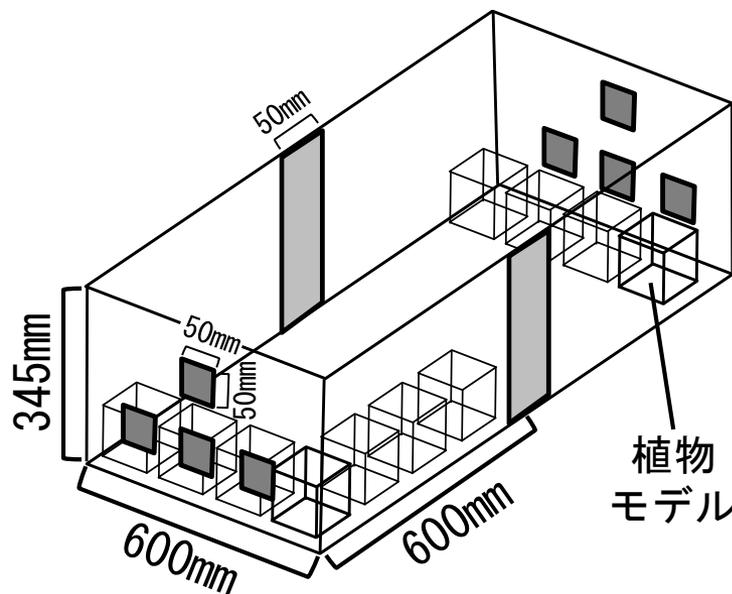
解析は汎用数値流体解析ソフトSTREAM Ver. 10を用いる。ダクト内には給気口(50mm×50mm) 8箇所と排気口(345mm×50mm) 2箇所を設け、給気口にファンを設置する。

表 CFD解析条件

乱流モデル	標準k-εモデル		
移流項	QUICK		
解析領域	1200 [mm] × 600 [mm] × 345 [mm]		
解析メッシュ数	20,691,720=306(x) × 490(y) × 138(z)		
給気開口サイズ	50 [mm] × 50 [mm]		
排気開口サイズ	345 [mm] × 50 [mm]		
境界条件	流入	流入風速 1.6 [m/s]	
	流出	表面圧力境界 (表面圧力 0.0 [pa])	
	壁境界	流体と接する全ての面	対数則
温度	等温		



(a) case1



(b) case2

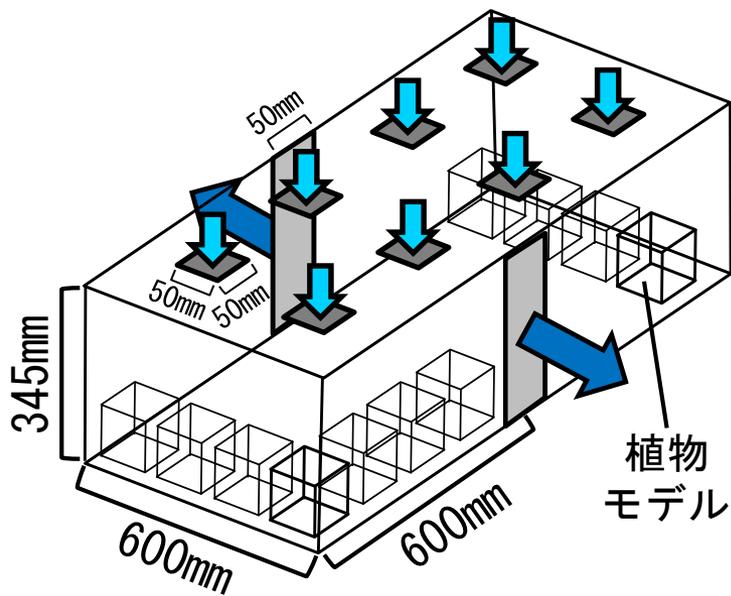
図 光・空調制御ダクト型栽培設備モデルの概要

# 省エネ型植物栽培設備を対象としたCFD解析

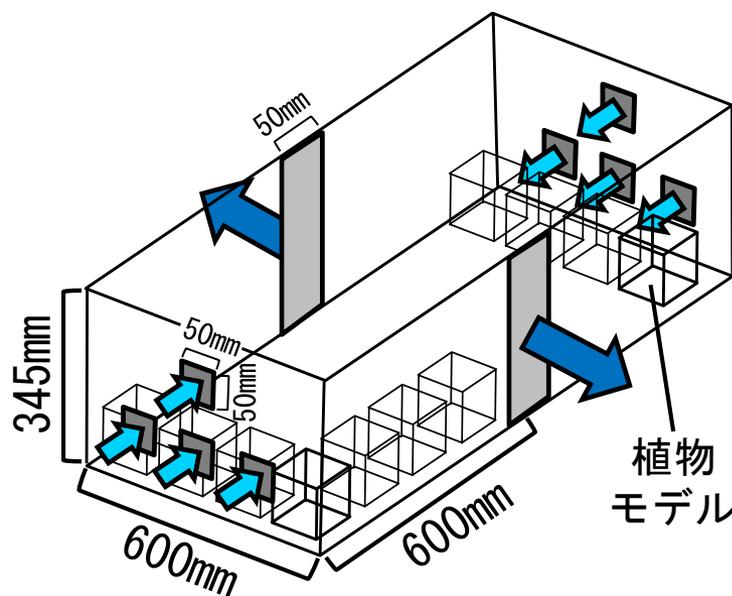
- case1では給気口を上面に設け、下向き（鉛直方向）に給気する。
- case2では給気口を側面に設け、横向き（水平方向）に給気する。
- 吹出風速は1.6m/sとする。排気口は両caseともダクトの長辺側の両側面中央部に設ける。

表 CFD解析条件

乱流モデル	標準k-εモデル		
移流項	QUICK		
解析領域	1200 [mm] × 600 [mm] × 345 [mm]		
解析メッシュ数	20,691,720=306(x) × 490(y) × 138(z)		
給気開口サイズ	50 [mm] × 50 [mm]		
排気開口サイズ	345 [mm] × 50 [mm]		
境界条件	流入	流入風速1.6 [m/s]	
	流出	表面圧力境界(表面圧力0.0 [pa])	
	壁境界	流体と接する全ての面	対数則
温度	等温		



(a) case1



(b) case2

図 光・空調制御ダクト型栽培設備モデルの概要

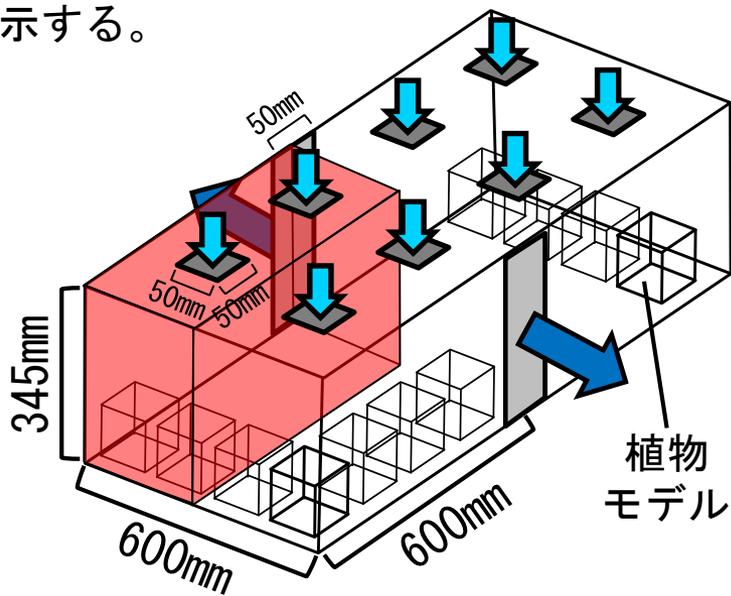
# 省エネ型植物栽培設備を対象としたCFD解析

栽培設備は点対称であるため、CFD解析結果は1/4の区画の風速分布と拡散物質濃度分布※1を示し、栽培パネル上の高さ40mmの水平断面を表示する。

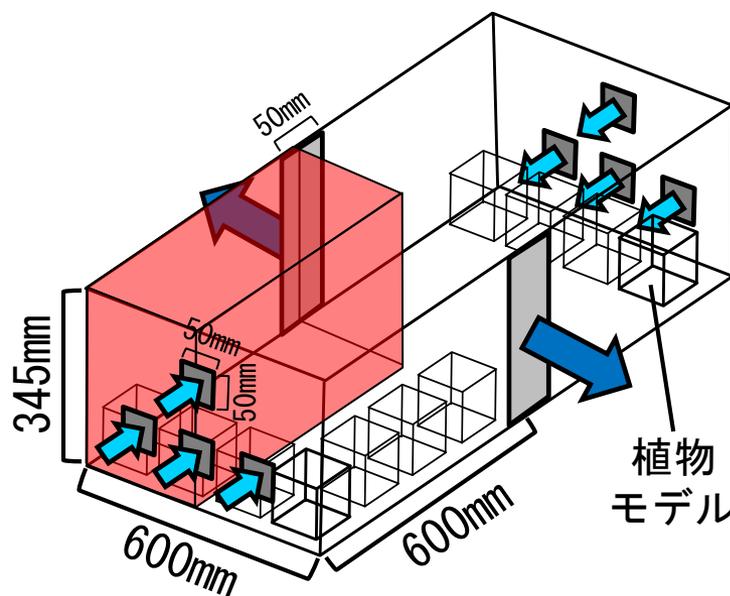
※1 濃度分布は拡散物質発生量とファンの給気風量により、完全拡散濃度で基準化して表示する。

表 CFD解析条件

乱流モデル	標準k-εモデル		
移流項	QUICK		
解析領域	1200 [mm] × 600 [mm] × 345 [mm]		
解析メッシュ数	20,691,720=306(x) × 490(y) × 138(z)		
給気開口サイズ	50 [mm] × 50 [mm]		
排気開口サイズ	345 [mm] × 50 [mm]		
境界条件	流入	流入風速 1.6 [m/s]	
	流出	表面圧力境界 (表面圧力 0.0 [pa])	
	壁境界	流体と接する全ての面	対数則
温度	等温		



(a) case1

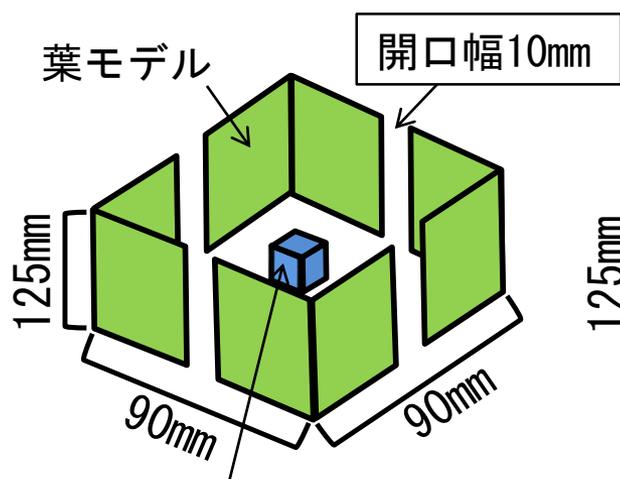


(b) case2

図 光・空調制御ダクト型栽培設備モデルの概要

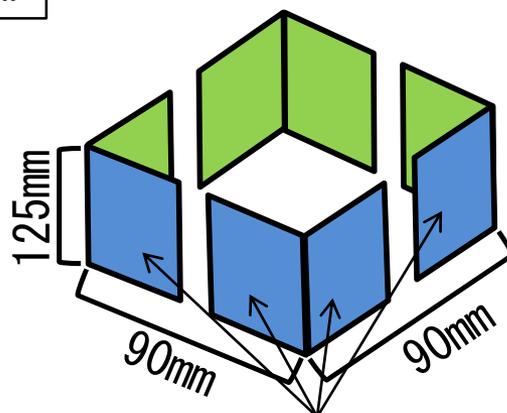
# 省エネ型植物栽培設備を対象としたCFD解析

- 植物モデルの高さは125mmとする。
- 拡散物質濃度分布の解析は、拡散物質が発生する位置を (a) 植物モデル中心、(b) 葉の表面、(c) 葉の裏面の場合の計3caseに分け、それぞれ解析を行い、濃度分布の比較を行う。



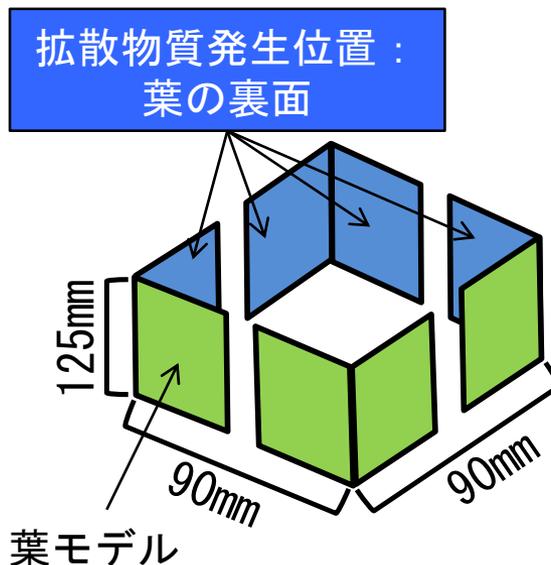
拡散物質発生位置：  
植物モデル中心 (10mm × 10mm × 10mm)

(a) 植物モデル中心



拡散物質発生位置：  
葉の表面

(b) 葉の表面



(c) 葉の裏面

図 拡散物質発生位置別の植物モデルの概要

# 省エネ型植物栽培設備を対象としたCFD解析

- 解析caseは給気方向、拡散物質発生位置を変化させた計6caseとする。各caseにおいて給気風速及び給気風量は同様として、給気風速は1.6m/sとし、合計給気風量は115.2m<sup>3</sup>/h、換気回数は463.8回/hとなる。
- 解析結果を拡散物質発生位置毎に比較し、栽培設備モデル内を効率良く換気することが可能な空調方式の検討を行う。

表 各解析caseの概要

解析case	給気方向	植物モデルの高さ [mm]	拡散物質発生位置	給気風速 [m/s]	合計給気風量 [m <sup>3</sup> /h]	換気回数 [回/h]
case1-1	鉛直	125	植物モデル中心	1.6	115.2	463.8
case1-2			葉の表面	1.6	115.2	463.8
case1-3			葉の裏面	1.6	115.2	463.8
case2-1	水平	125	植物モデル中心	1.6	115.2	463.8
case2-2			葉の表面	1.6	115.2	463.8
case2-3			葉の裏面	1.6	115.2	463.8

# リーフレタスを対象とした栽培実験

栽培室内には栽培棚、養液タンク、育苗棚、光・温熱空気環境の制御・実測機器等が設置されている。栽培棚は3段とし、1段に2種類の栽培装置を設け、合計6種類の栽培条件を設定する。



図 実験用栽培棚の外観

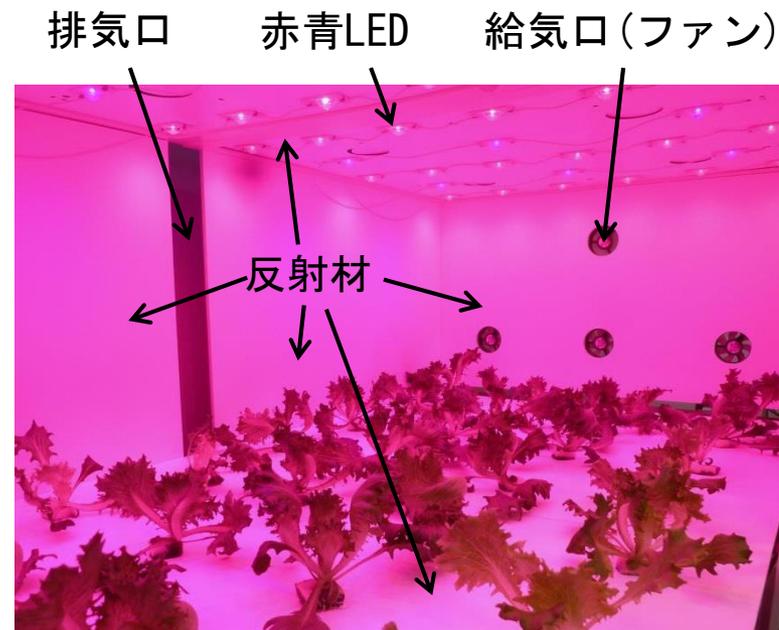


図 光・空調制御ダクト型  
栽培実験装置の内部

# リーフレタスを対象とした栽培実験

## 各栽培装置の照明条件

- ・ caseA: 蛍光灯 (Hf32W) × 4 本
- ・ caseB: 直管型LED (20W) × 4 本
- ・ caseC: 白色LED (点光源 : 48個)
- ・ caseD: 赤青LED (赤色点光源 : 36個、青色点光源 : 12個)
- ・ caseE: 赤青LED (caseDと同様)、ダクト壁面はA社製反射材仕様
- ・ caseF: 赤青LED (caseDと同様)、ダクト壁面はD社製反射材仕様

蛍光灯  
: caseA

白色LED  
: caseC

赤青LED  
(A社製  
反射材)  
: caseE



直管型  
LED

: caseB

赤青LED

: caseD

赤青LED

(D社製

反射材)

: caseF

図 実験用栽培棚の外観

排気口 赤青LED 給気口(ファン)



図 光・空調制御ダクト型  
栽培実験装置の内部

# リーフレタスを対象とした栽培実験

光・空調制御ダクト型栽培実験装置は、ダクト内壁面の給気口と排気口を除く全てを **A社製超高効率正反射材** 及び **D社製超高効率拡散反射材** (それぞれ全反射率95及び99%) により覆う。

蛍光灯  
: caseA

白色LED  
: caseC

赤青LED  
(A社製  
反射材)  
: caseE



図 実験用栽培棚の外観

直管型  
LED

: caseB

赤青LED  
: caseD

赤青LED  
(D社製  
反射材)  
: caseF

排気口 赤青LED 給気口(ファン)



図 光・空調制御ダクト型  
栽培実験装置の内部

# リーフレタスを対象とした栽培実験

栽培棚には明期※<sup>2</sup>と暗期を設け、常時、養液ポンプで培養液※<sup>3, 4</sup>を循環させる。

- ※<sup>2</sup> 明期：植物に光を照射する時間（照明点灯時）。午前6時～午後10時（16時間）とし、その他の時間を暗期とする。
- ※<sup>3</sup> 養液の温度・pH・EC（電気伝導率）は、ポータブル電気伝導率・pH計を用いて栽培棚から養液タンクへの養液還り口付近において測定する。
- ※<sup>4</sup> 養液は循環式UV殺菌灯を用いて殺菌を行う。UV殺菌灯の稼働時間は午後8時～午後10時30分（2時間30分）とする。

蛍光灯  
: caseA

白色LED  
: caseC

赤青LED  
(A社製  
反射材)  
: caseE



直管型  
LED  
: caseB

赤青LED  
: caseD

赤青LED  
(D社製  
反射材)  
: caseF

図 実験用栽培棚の外観

排気口 赤青LED 給気口(ファン)

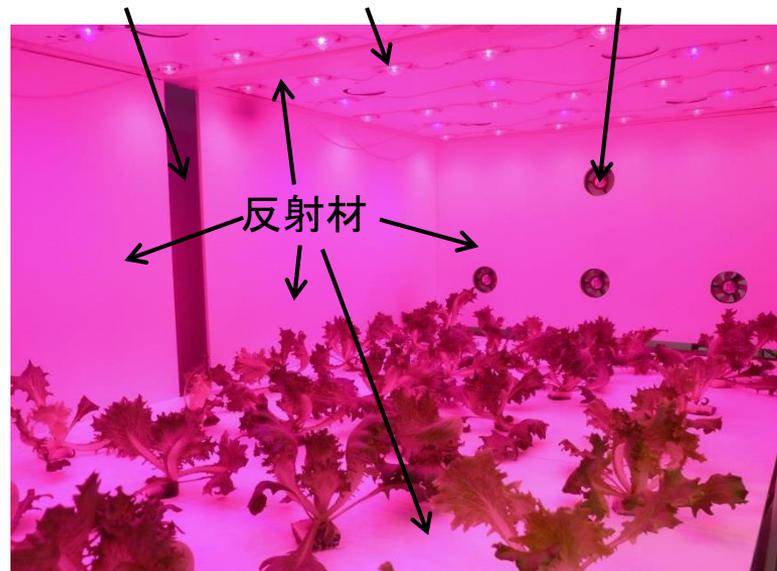


図 光・空調制御ダクト型  
栽培実験装置の内部

# リーフレタスを対象とした栽培実験

各栽培条件の光強度は、**光合成有効光量子束密度**を指標とする。

- ・ caseA, Bは成り行き ( $130, 160 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 程度)
- ・ caseC, Dは上面から  $200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 程度※
- ・ caseE, Fは照明用電力消費量をcaseDの約1/2に調整し、上面から  $300 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 程度

赤青LED(点光源)の**赤色光と青色光の比率(R/B比)**は6:1とする。

※  $\text{CO}_2$ 濃度が1000ppmのとき、光量子束密度が約  $200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ で飽和光合成速度となるため。

表 各栽培条件の光量子束密度とR/B比

		caseA	caseB	caseC		caseD		caseE	caseF
				パネル左	パネル右	パネル左	パネル右		
光量子束密度 [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]	上面	126	164	201	202	204	203	292	303
	12時方向	-	-	-	-	-	-	115	222
	3時方向	-	-	-	-	-	-	121	249
	6時方向	-	-	-	-	-	-	110	214
	9時方向	-	-	-	-	-	-	119	239
	合計	126	164	201	202	204	203	757	1227
R/B比		(0.21)	(0.49)	(0.58)	(0.57)	6.08	5.72	5.54	6.8

# リーフレタスを対象とした栽培実験

温熱空気環境の制御にはパッケージエアコン、CO<sub>2</sub>ボンベ、循環式紫外線殺菌灯、扇風機を用いる。実測にはデータロガー、T型熱電対、温湿度発信機、CO<sub>2</sub>濃度計を用いる。

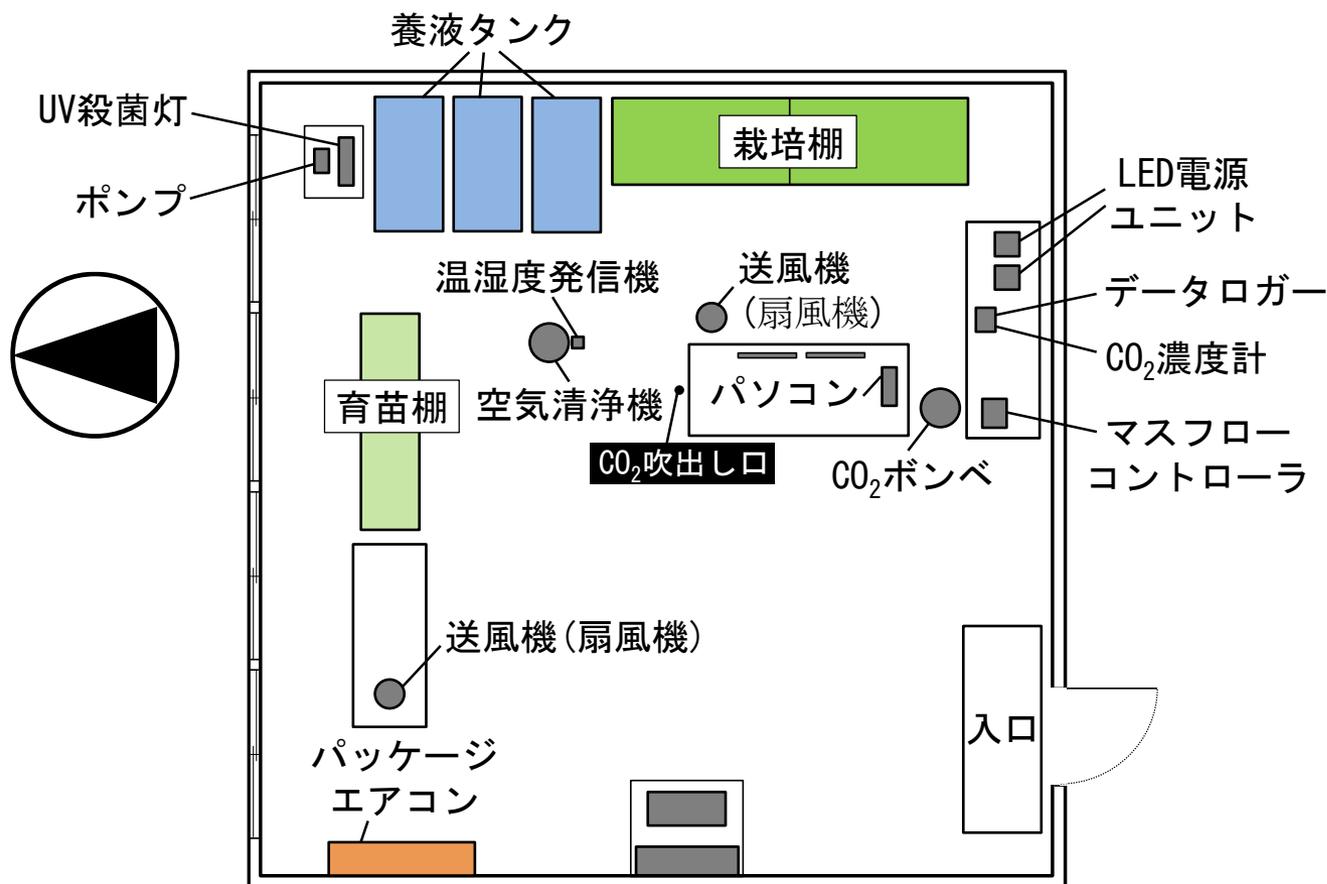


図 栽培室の平面図

# リーフレタスを対象とした栽培実験

各栽培棚の温度は概ね22～25℃に制御されている。  
 明期ではCO<sub>2</sub>濃度は約1600～2000ppmに保たれている。

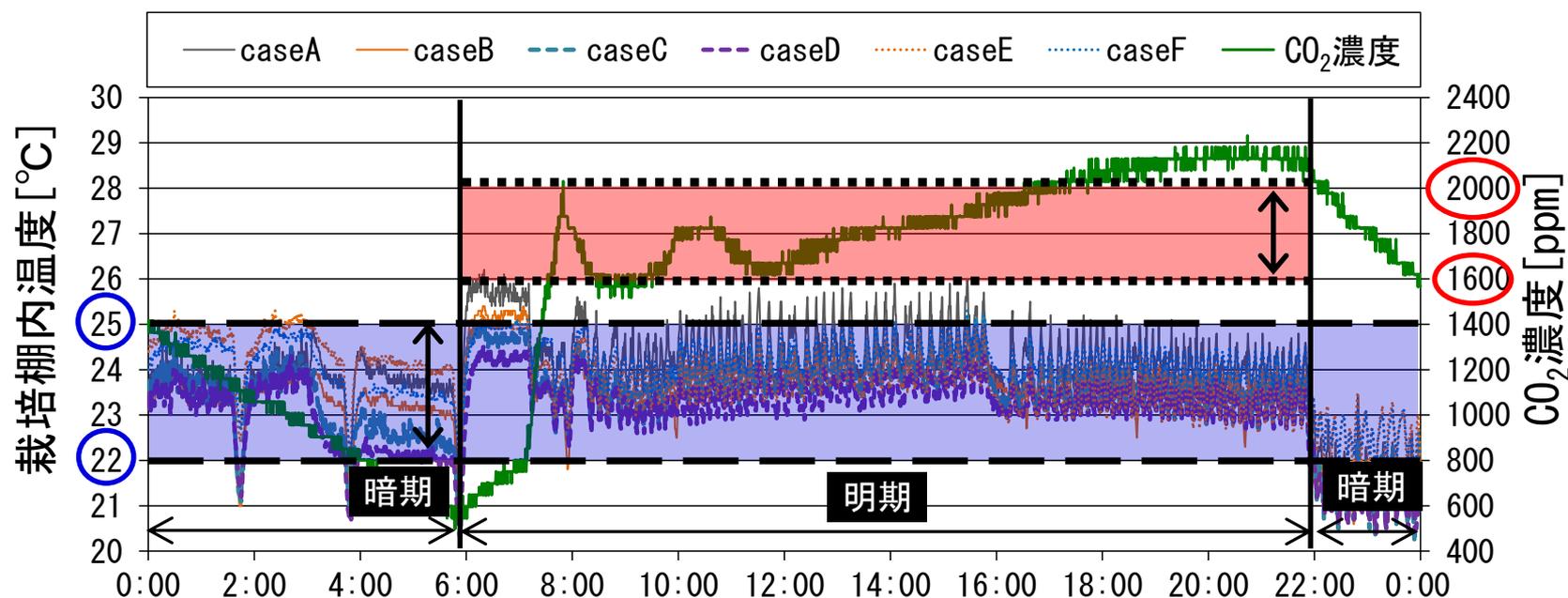
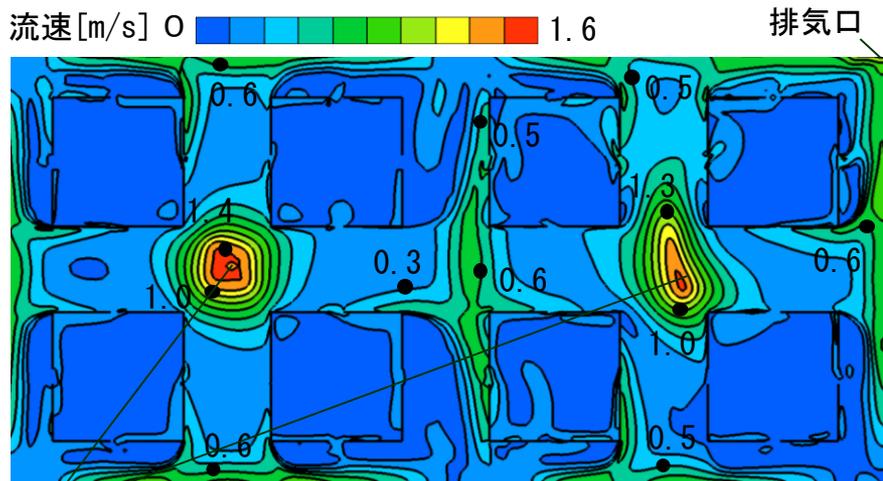


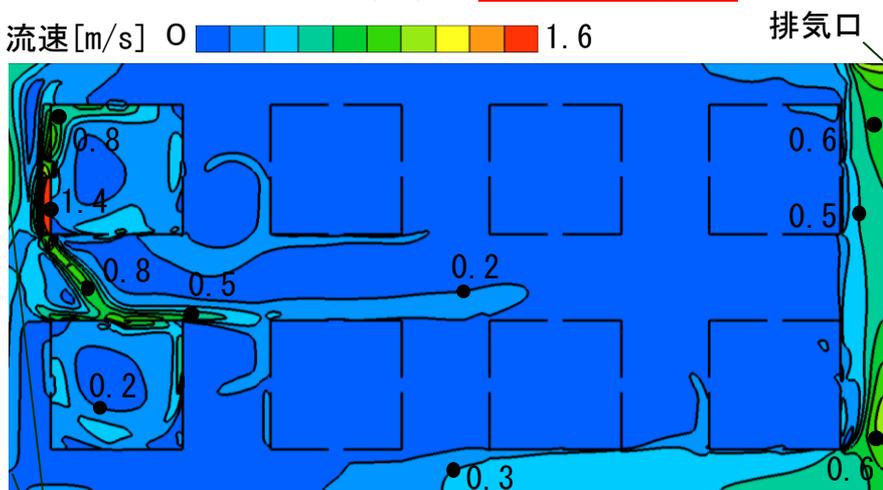
図 各栽培棚内の温度及び栽培室内のCO<sub>2</sub>濃度変化(1月24日)<sup>※6</sup>

※6 栽培棚の温度は上4棚は栽培面上250mm、下2棚(光・空調制御ダクト型栽培実験装置)は排気口付近、CO<sub>2</sub>濃度は栽培棚近傍において測定する。明期における温度とCO<sub>2</sub>濃度の目標値はそれぞれ、22～25℃、1800ppm程度とする。

# 省エネ型植物栽培設備を対象としたCFD解析結果



給気口(天井) (a) case1-1, 2, 3 (天井から給気)

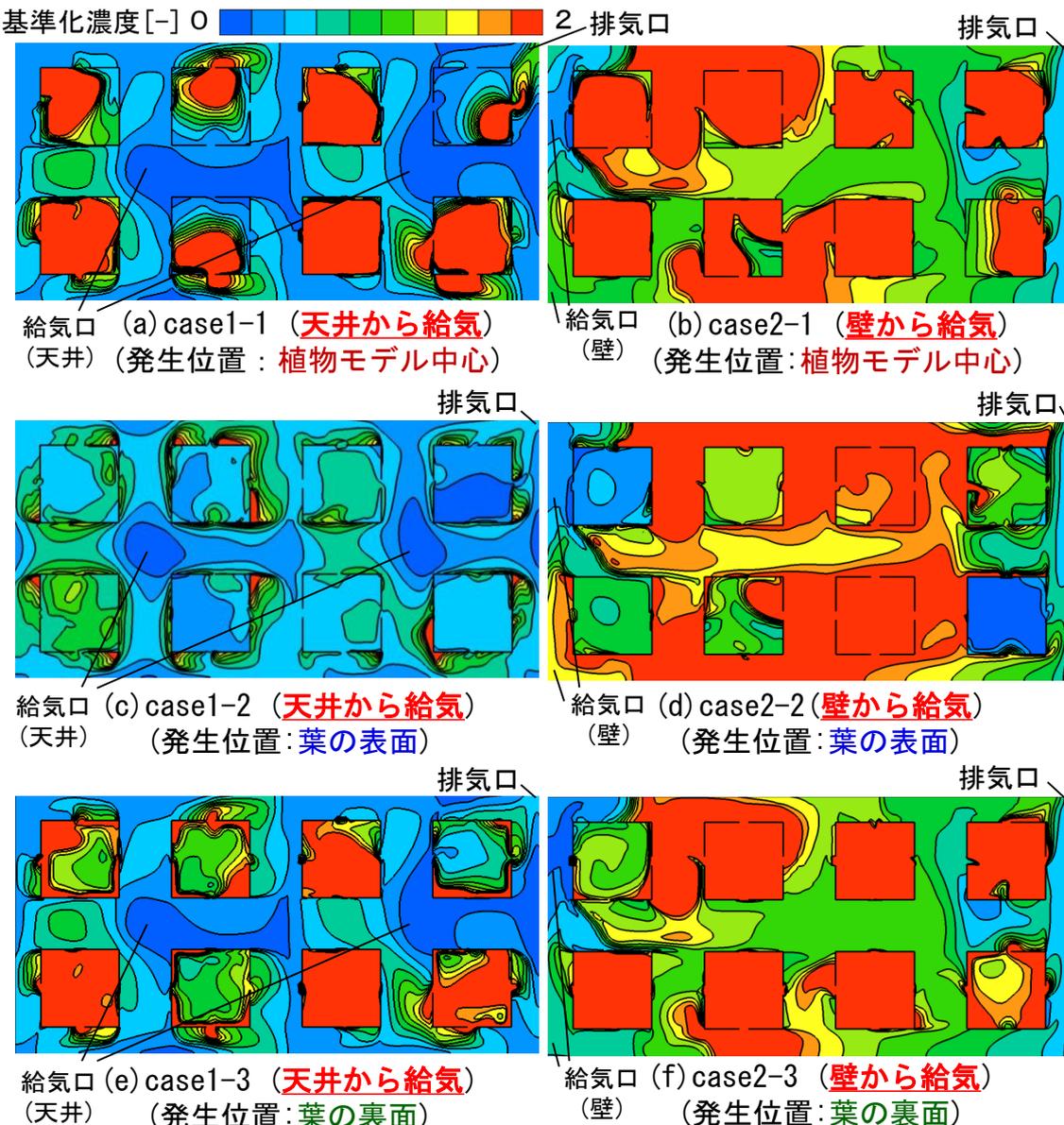


給気口(壁) (b) case2-1, 2, 3 (壁から給気)

- case1 (天井から給気) では給気風速により、植物モデルの間に約0.5m/s以上の比較的速い風速分布が形成されている。
- case2 (壁から給気) では植物モデルの間の風速分布が約0.5m/s以下と比較的遅く、給気風速が直接植物モデルに衝突している。
- case1とcase2を比較すると、case1では比較的速い風速分布が植物モデル周囲に形成されるが、case2では風速分布が0.2m/s以下となる箇所が多い。

図 光・空調制御ダクト型栽培設備の風速分布

# 省エネ型植物栽培設備を対象としたCFD解析結果



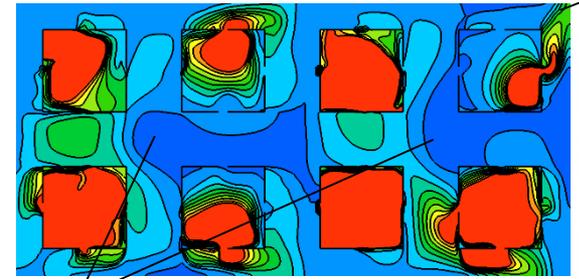
どの拡散物質発生位置においても、case2(壁から給気)と比較してcase1(天井から給気)の方が、植物周囲の濃度が低い。

図 光・空調制御ダクト型栽培設備の拡散物質濃度分布

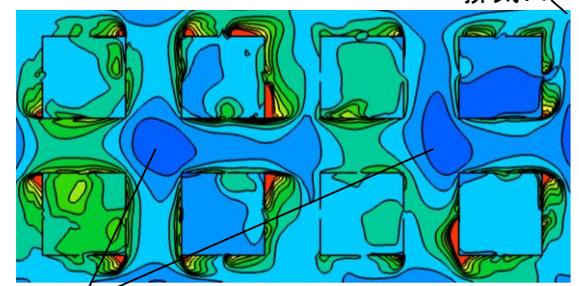
# 省エネ型植物栽培設備を対象としたCFD解析結果

基準化濃度 [-] 0 2 排気口

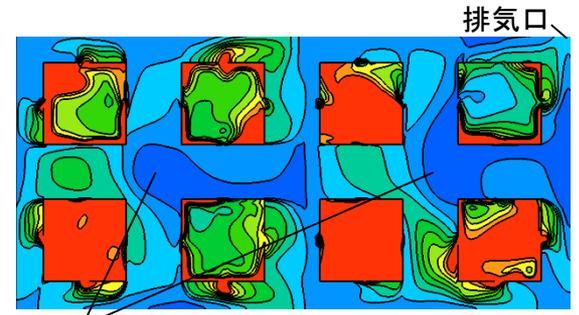
栽培設備ダクト内において植物から発生する水蒸気等が栽培棚内に滞ることなく、比較的効率良く換気されるのはダクト型栽培設備の上面から下向き(鉛直方向)に給気するcase1の方式であると考えられる。



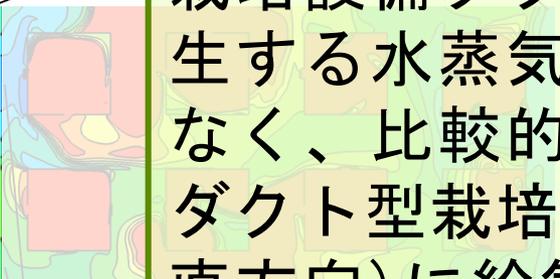
給気口 (a) case1-1 (天井から給気) (天井) (発生位置: 植物モデル中心)



給気口 (c) case1-2 (天井から給気) (天井) (発生位置: 葉の表面)



給気口 (e) case1-3 (天井から給気) (天井) (発生位置: 葉の裏面)



給気口 (b) case2-2 (壁から給気) (壁) (発生位置: 葉の表面)



給気口 (d) case2-3 (壁から給気) (壁) (発生位置: 葉の裏面)



給気口 (f) case2-3 (壁から給気) (壁) (発生位置: 葉の裏面)

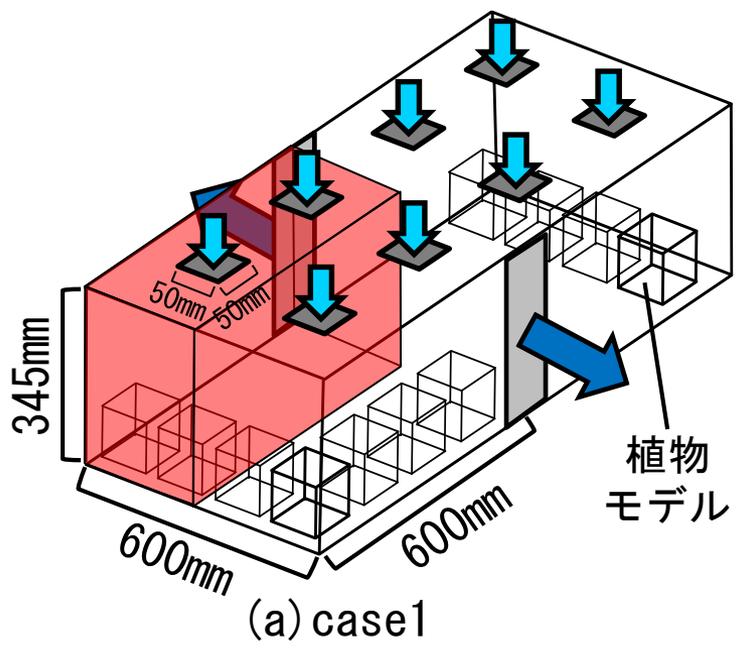


図 光・空調制御ダクト型栽培設備モデルの概要

図 光・空調制御ダクト型栽培設備の拡散物質濃度分布

# リーフレタスを対象とした栽培実験結果

caseE, Fの照明用電力消費量はそれぞれ約46Wであり、caseDと比較して約1/2に設定されている。

表 各設備機器の電力消費量

(a) 各栽培条件における照明用電力消費量

(b) その他の各設備機器の電力消費量

	caseA	caseB	caseC		caseD		caseE		caseF	
			①	②	①	②	①	②	①	②
電力消費量 [W]	142	79.0	52.3	55.8	44.0	44.5	23.0	23.0	23.0	23.0
合計 [W]	142	79.0	108		88.5		46.0		46.0	

	ファン	扇風機	殺菌灯(空気)	養液ポンプ	殺菌灯(水)
電力消費量 [W]	27.5	67.8	47.2	26.5	23.0

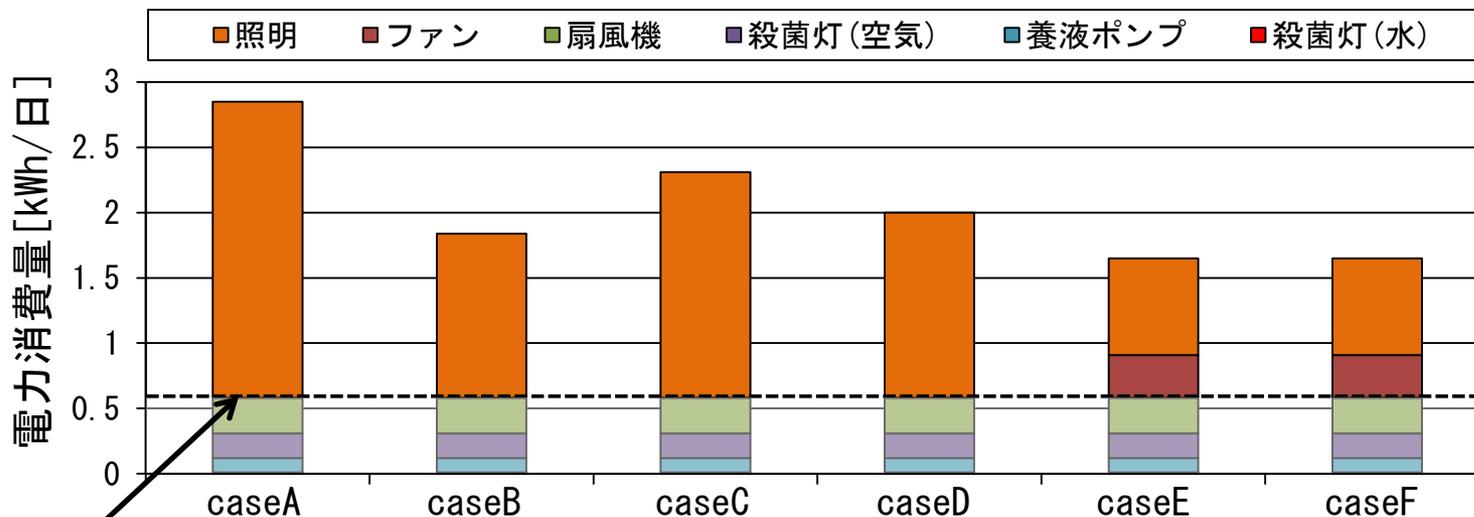


図 各栽培条件における1日当たりの電力消費量

照明とファン以外の1日当たりの電力消費量は、全栽培条件とも同じ値である。

# リーフレタスを対象とした栽培実験結果

caseE, Fの電力消費量は、1日当たりの電力消費量が最も多い条件であるcaseA(蛍光灯)と比較して、約43% (約1.2kWh/日)少ない。

表 各設備機器の電力消費量

(a) 各栽培条件における照明用電力消費量

(b) その他の各設備機器の電力消費量

	caseA	caseB	caseC		caseD		caseE		caseF	
			①	②	①	②	①	②	①	②
電力消費量 [W]	142	79.0	52.3	55.8	44.0	44.5	23.0	23.0	23.0	23.0
合計 [W]	142	79.0	108		88.5		46.0		46.0	

	ファン	扇風機	殺菌灯(空気)	養液ポンプ	殺菌灯(水)
電力消費量 [W]	27.5	67.8	47.2	26.5	23.0

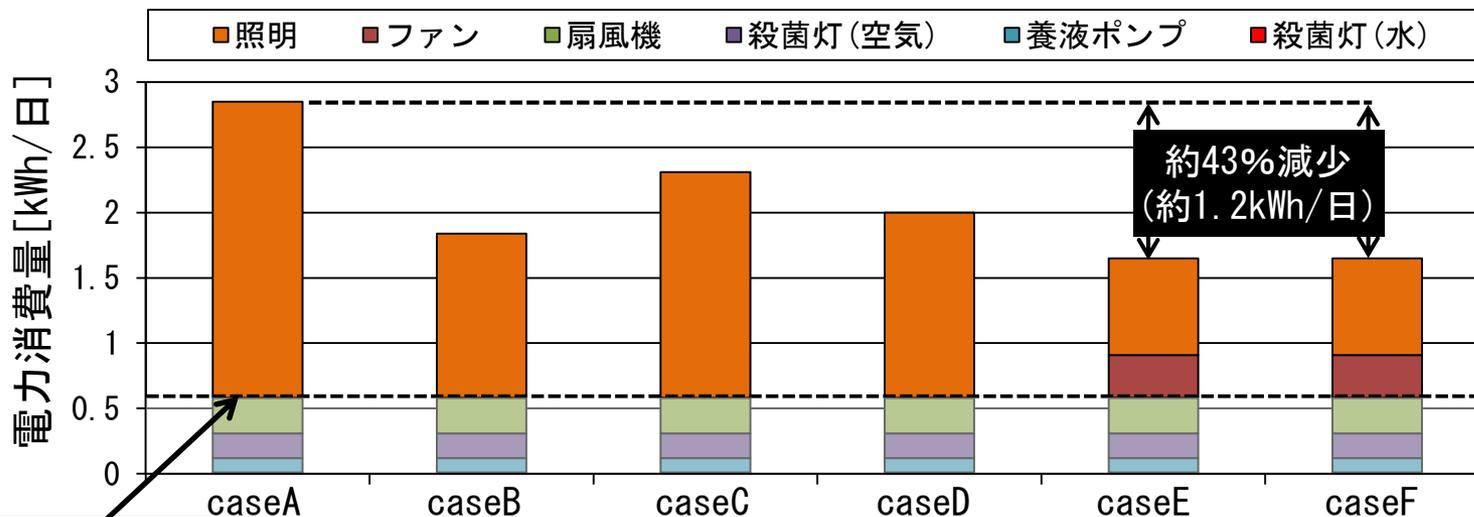


図 各栽培条件における1日当たりの電力消費量

照明とファン以外の1日当たりの電力消費量は、全栽培条件とも同じ値である。

# リーフレタスを対象とした栽培実験結果

caseE, Fではダクト内の換気用に設置されているファンの電力消費量が全体の約20%を占めている。

表 各設備機器の電力消費量

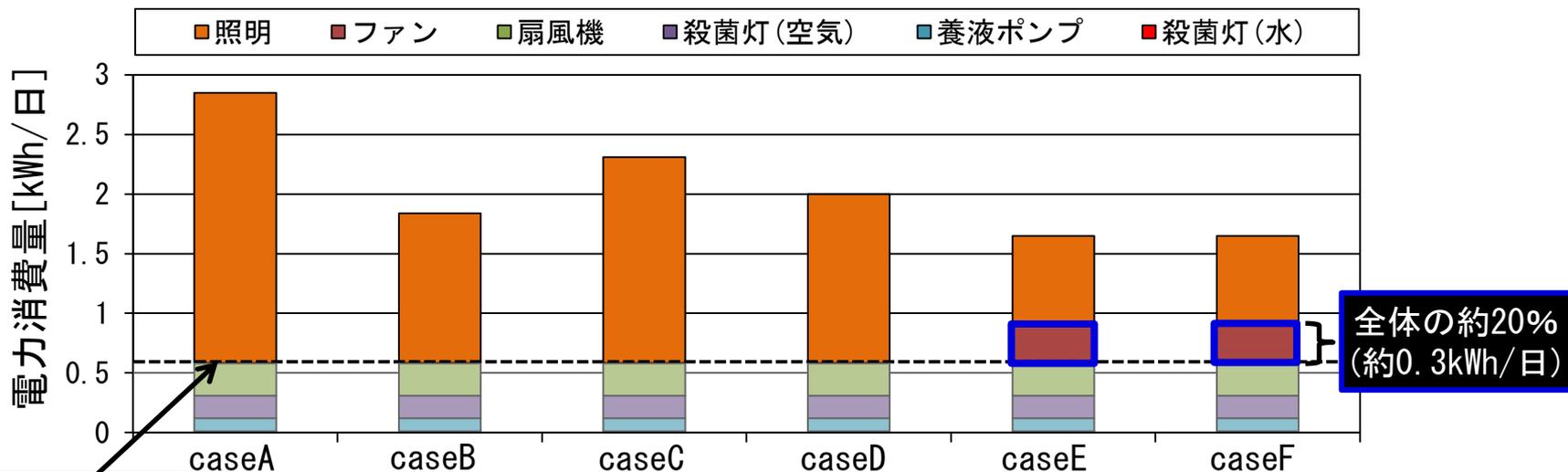
(a) 各栽培条件における照明用電力消費量

(b) その他の各設備機器の電力消費量

	caseA	caseB	caseC		caseD		caseE		caseF	
			①	②	①	②	①	②	①	②
電力消費量 [W]	142	79.0	52.3	55.8	44.0	44.5	23.0	23.0	23.0	23.0
合計 [W]	142	79.0	108		88.5		46.0		46.0	

	ファン	扇風機	殺菌灯(空気)	養液ポンプ	殺菌灯(水)
電力消費量 [W]	27.5	67.8	47.2	26.5	23.0



照明とファン以外の1日当たりの電力消費量は、全栽培条件とも同じ値である。

図 各栽培条件における1日当たりの電力消費量

# リーフレタス栽培動画(約33日間・32株定植時)

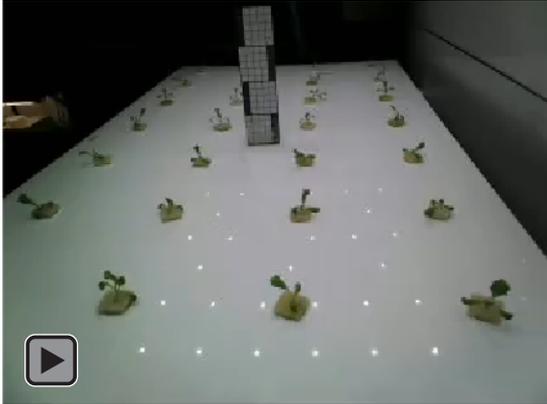
Case A  
(蛍光灯)



Case B  
(直管型LED)



Case C  
(白色LED)



Case D  
(赤青LED)



Case E  
(赤青LED・  
A社製  
反射材)



Case F  
(赤青LED・  
D社製  
反射材)



図 各栽培条件のリーフレタス栽培動画(約33日間・32株定植時)

# リーフレタスを対象とした栽培実験結果

収穫重量は、各栽培条件ともリーフレタス 8 株 (全定植時は各条件32株) を収穫した結果である。

表 各栽培条件の収穫重量※7

	caseA	caseB	caseC	caseD	caseE	caseF
最大重量[g]	119	134	202	189	170	206
最小重量[g]	54.4	26.0	66.1	76.6	93.0	116
平均重量[g]	83.4	89.3	136	119	129	140
総重量[g]	500	536	815	714	771	839
標準偏差[g]	18.9	33.8	40.1	37.1	23.4	29.3

※7 平均重量と総重量は、各栽培条件で収穫した株の中で重量が最も大きい株と小さい株の2株を除いて算出する。

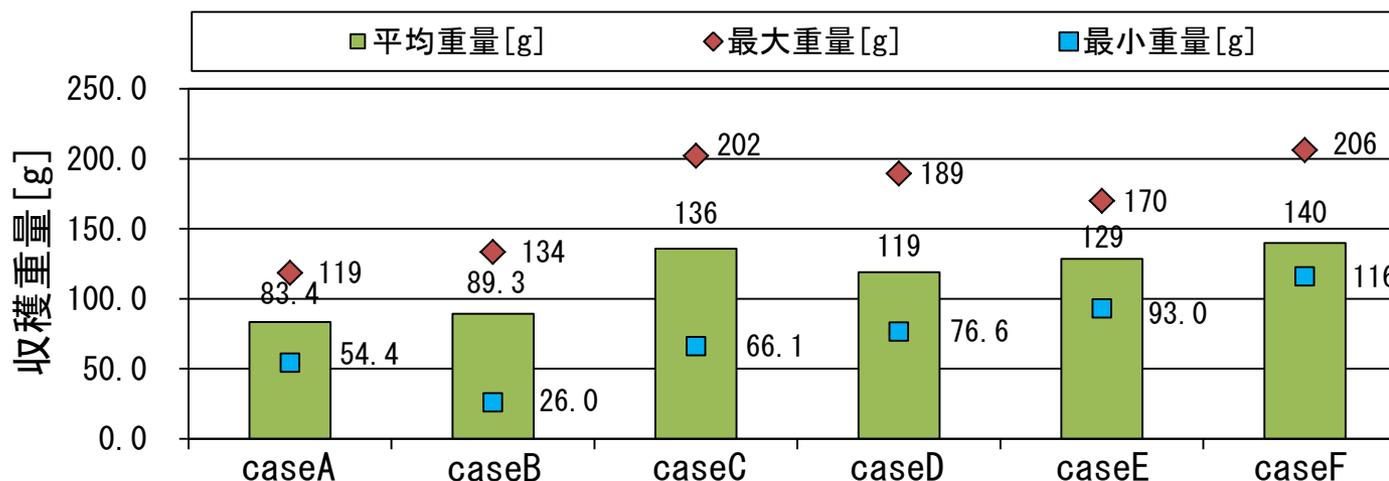


図 各栽培条件の平均重量、最大重量及び最小重量

# リーフレタスを対象とした栽培実験結果

最大重量、最小重量、平均重量、総重量ともにcaseFが最も多く、最大重量は206g、最小重量は116g、平均重量は140g、総重量は839gである。

表 各栽培条件の収穫重量※7

	caseA	caseB	caseC	caseD	caseE	caseF
最大重量[g]	119	134	202	189	170	206
最小重量[g]	54.4	26.0	66.1	76.6	93.0	116
平均重量[g]	83.4	89.3	136	119	129	140
総重量[g]	500	536	815	714	771	839
標準偏差[g]	18.9	33.8	40.1	37.1	23.4	29.3

※7 平均重量と総重量は、各栽培条件で収穫した株の中で重量が最も大きい株と小さい株の2株を除いて算出する。

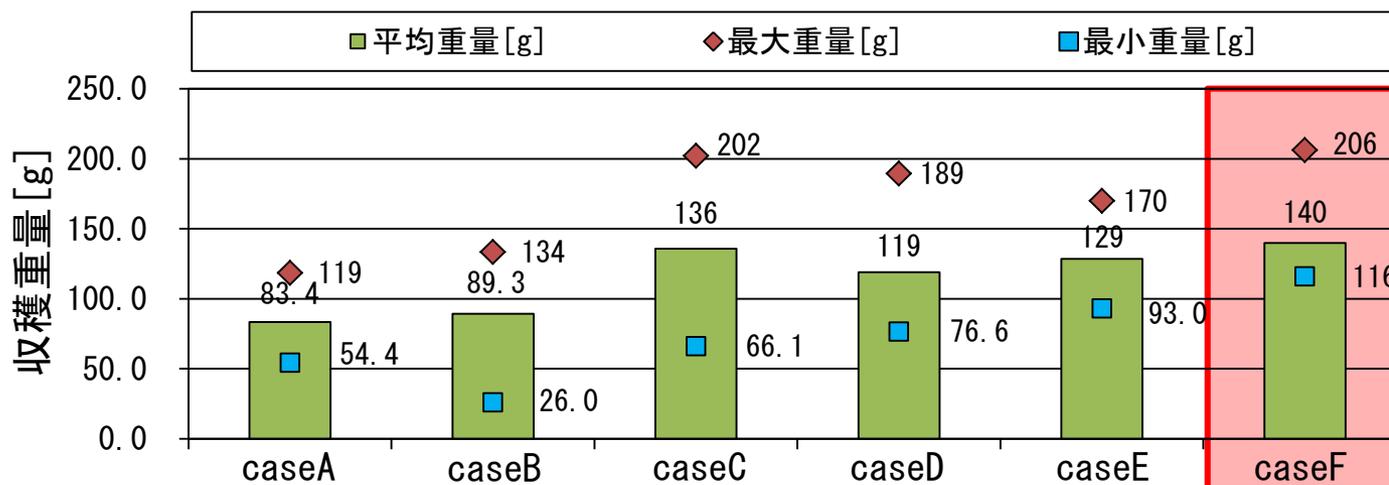


図 各栽培条件の平均重量、最大重量及び最小重量

# リーフレタスを対象とした栽培実験結果

標準偏差はcaseE, Fがそれぞれ23.4、29.3gとなり、caseC, D(それぞれ40.1、37.1g)と比較すると約11~17g少なく、栽培位置による収穫重量のばらつきが少ない。

表 各栽培条件の収穫重量※7

	caseA	caseB	caseC	caseD	caseE	caseF
最大重量[g]	119	134	202	189	170	206
最小重量[g]	54.4	26.0	66.1	76.6	93.0	116
平均重量[g]	83.4	89.3	136	119	129	140
総重量[g]	500	536	815	714	771	839
標準偏差[g]	18.9	33.8	40.1	37.1	23.4	29.3

※7 平均重量と総重量は、各栽培条件で収穫した株の中で重量が最も大きい株と小さい株の2株を除いて算出する。

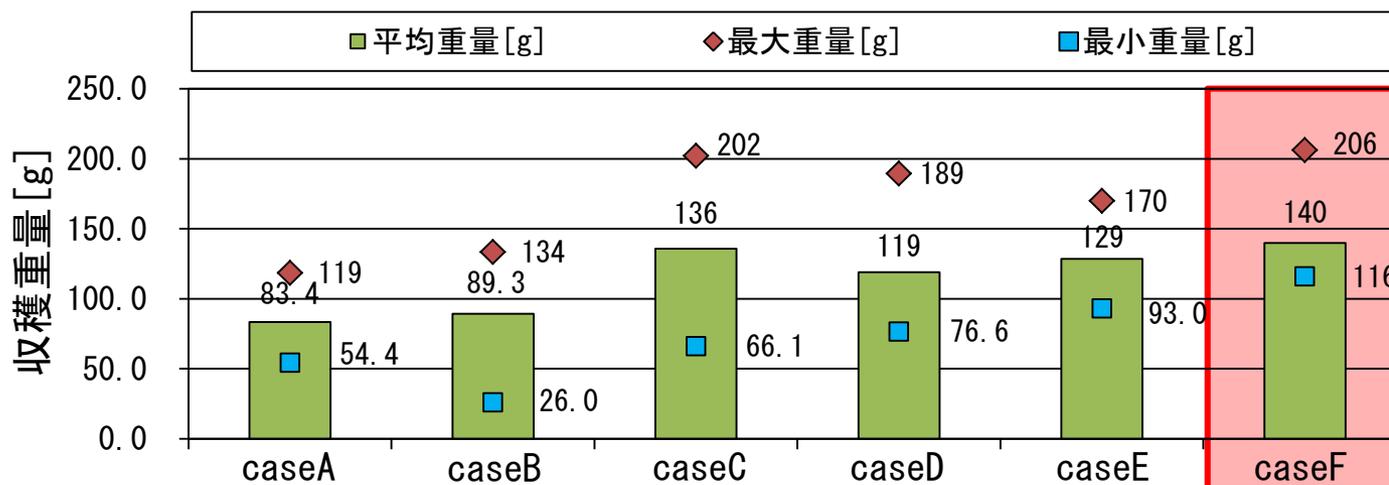


図 各栽培条件の平均重量、最大重量及び最小重量

# リーフレタスを対象とした栽培実験結果

■ caseE, Fの**単位照明用電力消費量当たりの収穫重量**(それぞれ35.9、39.1g/kWh)は、caseA(7.6g/kWh)と比較すると約30g/kWh(**約5倍**)多い。

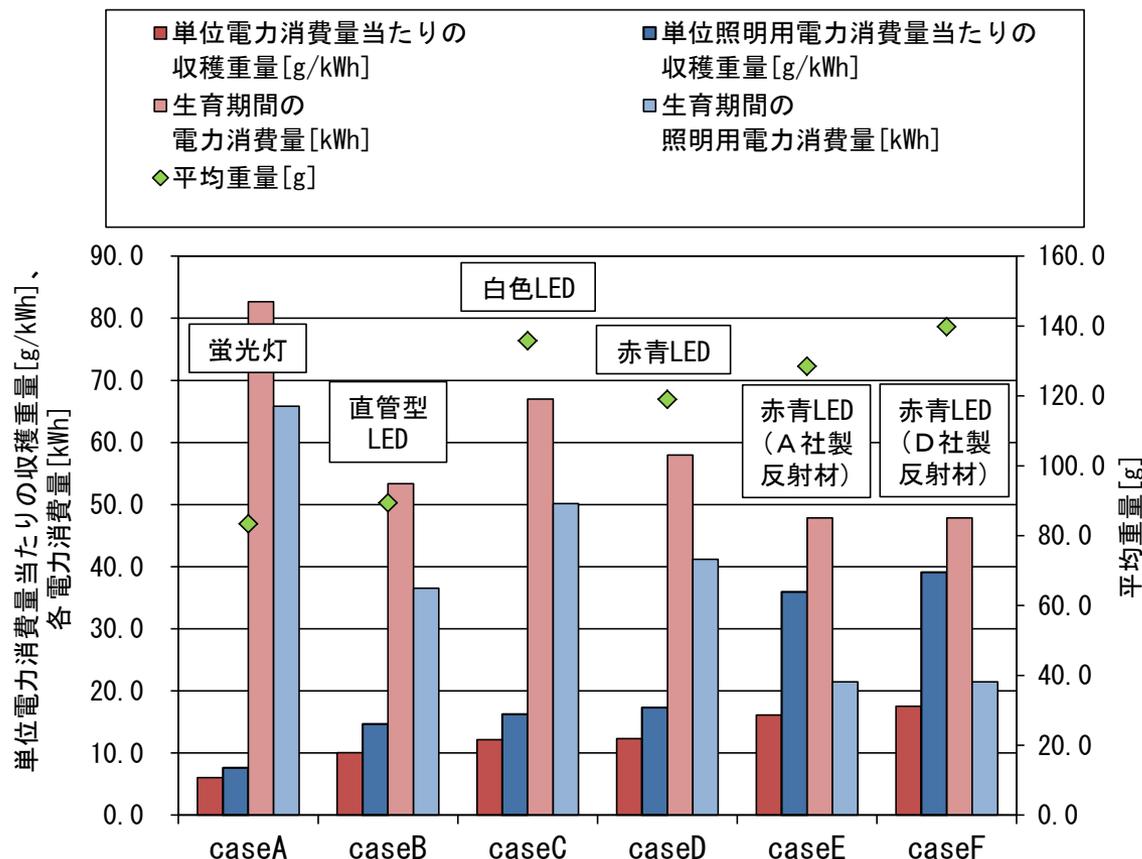


図 各栽培条件の単位電力消費量当たりの収穫重量、生育期間の電力消費量及び平均重量

# リーフレタスを対象とした栽培実験結果

■ caseE, Fの**単位照明用電力消費量当たりの収穫重量**(それぞれ35.9、39.1g/kWh)は、caseA(7.6g/kWh)と比較すると約30g/kWh(**約5倍**)多い。

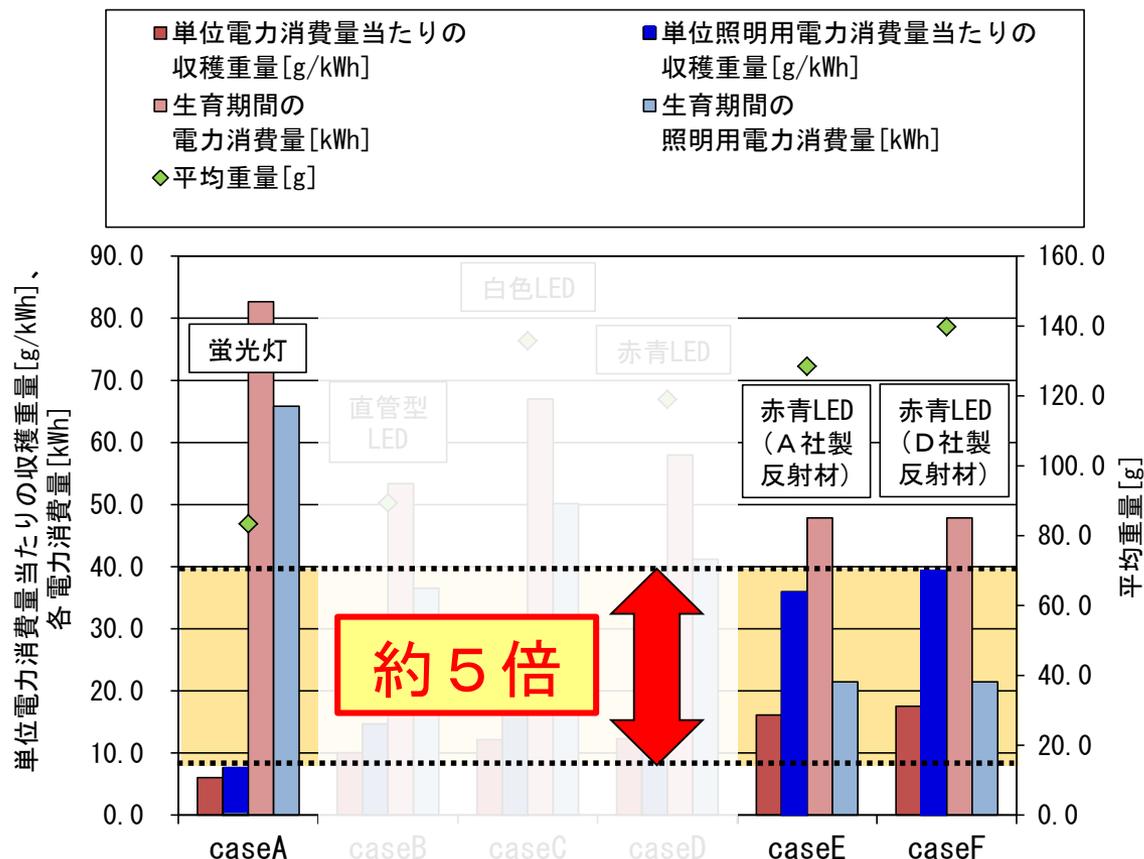


図 各栽培条件の単位電力消費量当たりの収穫重量、生育期間の電力消費量及び平均重量

# リーフレタスを対象とした栽培実験結果

■ caseB, C, D(それぞれ14.7、16.2、17.3g/kWh)と比較すると約19~24g/kWh(約2~2.5倍)多い。

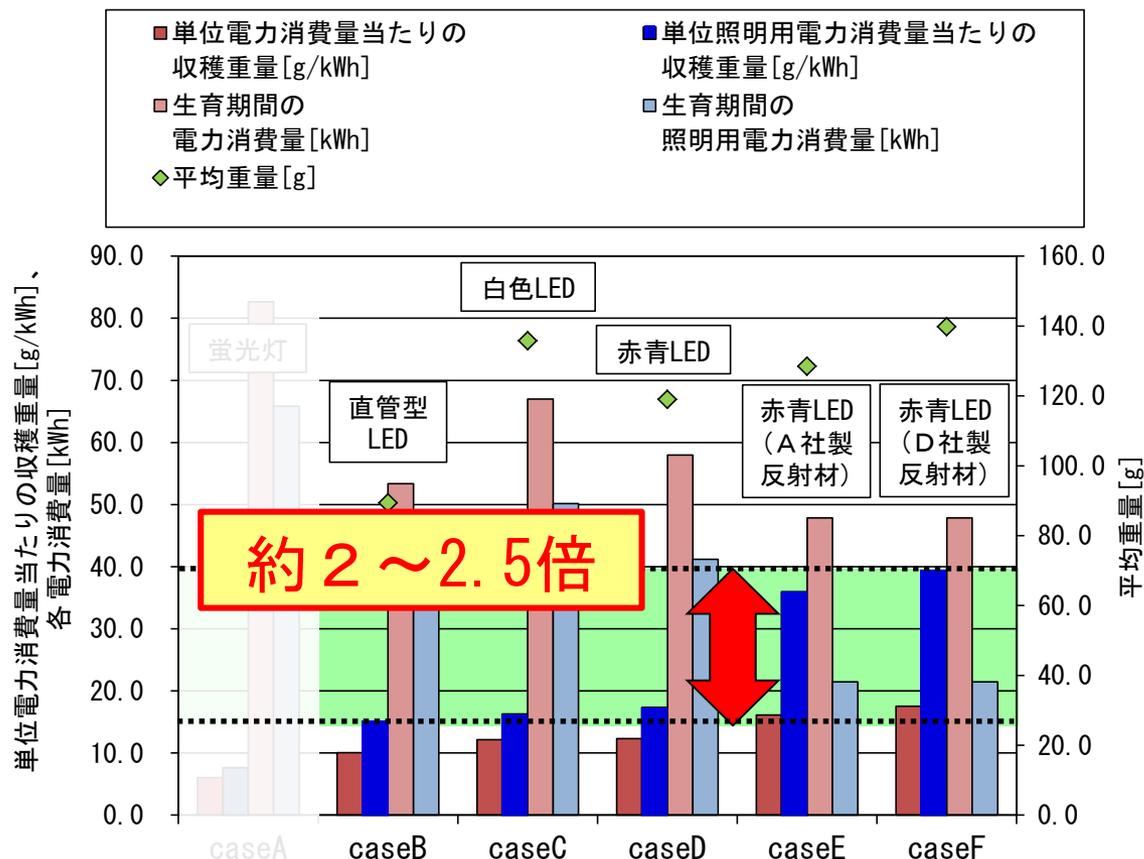


図 各栽培条件の単位電力消費量当たりの収穫重量、生育期間の電力消費量及び平均重量

# リーフレタスを対象とした栽培実験結果

■ 全栽培条件では、**単位照明用電力消費量当たりの収穫重量はcaseFが39.1g/kWhと最も多い。**

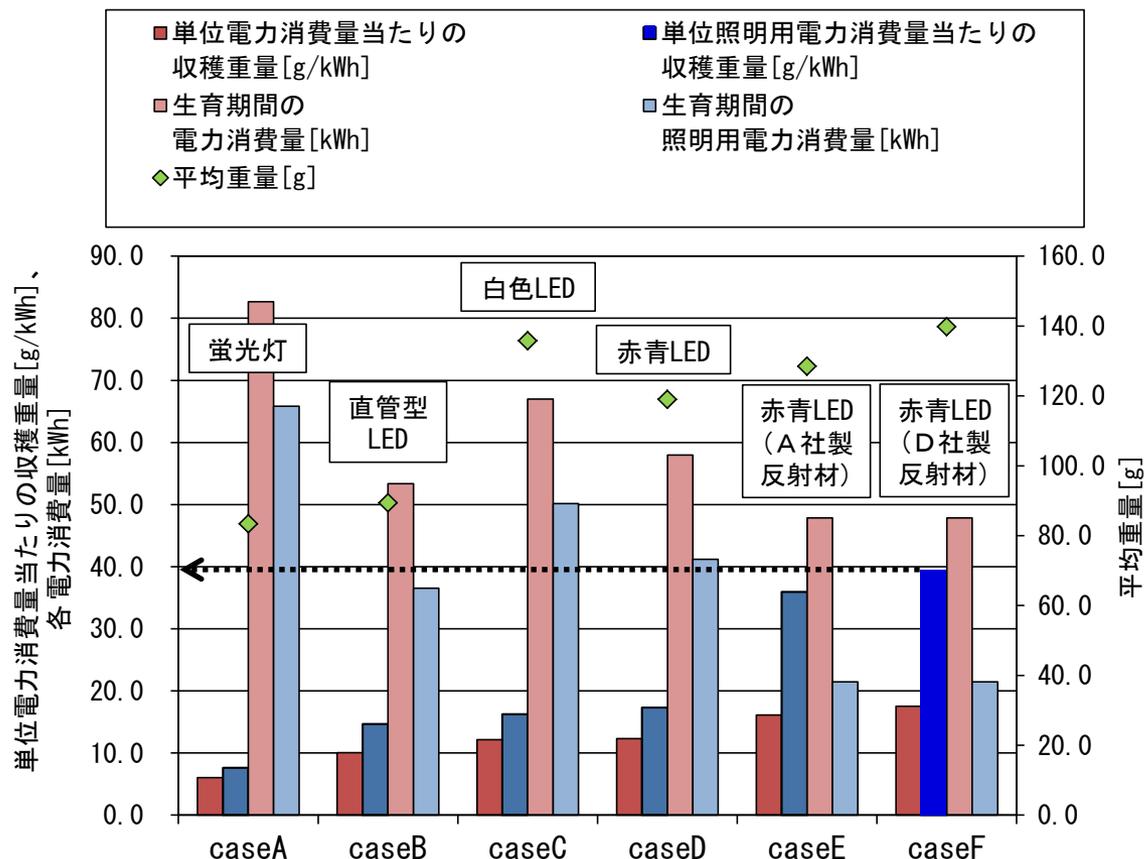


図 各栽培条件の単位電力消費量当たりの収穫重量、生育期間の電力消費量及び平均重量

## ■省エネ型植物栽培設備を対象としたCFD解析結果

光・空調制御ダクト型栽培設備は、給気口を上面に8箇所、排気口を長辺側の両側面中央部に設け、鉛直下向きに給気することによって、ダクト内において比較的効率良く水蒸気等を換気することができる。

## ■リーフレタスを対象とした栽培実験結果

caseE, Fの照明用電力消費量をcaseDの約1/2、R/B比を6:1とした栽培実験の単位照明用電力消費量当たりの収穫重量は以下の通りである。

- ①超高効率光反射材を設置したcaseE, F(それぞれ35.9, 39.1g/kWh)は、caseA(蛍光灯, 7.6g/kWh)と比較すると約30g/kWh(約5倍)多い。
- ②caseE, Fは、caseB(直管型LED, 14.7g/kWh), C(白色LED(点光源), 16.2g/kWh), D(赤青LED(点光源), 17.3g/kWh)と比較すると約19~24g/kWh(約2~2.5倍)多い。
- ③全栽培条件ではcaseF(赤青LED(点光源), D社製超高効率拡散反射材:全反射率99%)が39.1g/kWhと最も多く、caseE(赤青LED(点光源), A社製超高効率正反射材:全反射率95%, 35.9g/kWh)とcaseFを比較すると、caseFの方が3.2g/kWh多い。

超高効率光反射材を用いた光・空調制御ダクト型植物栽培設備を用いることにより、照明用電力消費量を約半分としても同等の収穫重量を得ることが出来ると考えられる。

今後は、数値流体解析(CFD)を用いて光・空調制御ダクト型栽培設備内の**温度分布の解析**を行い、引き続き植物の栽培に適した空気環境を形成するための換気方法の検討を行う。更に、**実在の完全人工光型植物工場内に光・空調制御ダクト型植物栽培設備を設置し、栽培用照明条件が同様で反射材を設置しない栽培装置との比較実験**を行う。