

ビニルハウスにおける葉菜類の生育環境に関する研究

-実測調査に基づく照度及び室温の推定-

STUDY ON GROWTH ENVIRONMENT OF LEAF VEGETABLES IN PLASTIC GREENHOUSE -ESTIMATION OF ILLUMINANCE AND ROOM TEMPERATURE BASED ON OBSERVED DATA-

地域環境計画分野 田中 千尋

Division of Regional Environmental Planning Chihiro TANAKA

近年、高床式砂栽培農業に IoT 技術を組み合わせた、シェアリング農業が注目されている。そこで初心者でも簡単に農業に取り組めるように環境条件の整理が必要である。本研究ではビニルハウス内外の光環境及び温度環境を実測し、屋外環境からハウス内環境を推定する方法を提案する。さらに、提案した推定式を用いて、5都市の外気温と日射量から植物の収穫日数を推定する。

In recent years sharing agriculture which combines IoT technology with high floored sand cultivation agriculture has attracted attention. Therefore, even for beginners, it is necessary to organize environmental conditions so that they can easily tackle agriculture. So we observe the light environment and temperature environment inside and outside the plastic greenhouse. And propose methods to estimate the environment in plastic greenhouse from the outside environment. Using the proposed estimation formula, the harvesting days of leaf vegetables are estimated from the outside air temperature and the solar radiation in 5 cities.

1. 研究背景・目的

1.1 研究背景

現在、農業用ビニルハウスでの高床式砂栽培農業が注目されており、西日本を中心に展開されている。この農法は、連作障害がほとんどなく生産性が高いことや栽培ベッドは建築現場で用いられている足場材でできているため施工性が高いこと、高さが可変であり車椅子やお年寄りの方でも容易に作業ができ、作業性が高いこと等が特徴として挙げられる。さらに、今後は高床式砂栽培に温度調節や水・肥料やりなどを自動化する IoT 技術を組み合わせたシェアリング農業が、地域雇用創出や地域活性化につながる新しい農業の形として、各地へ展開が見込まれている。しかし、高床式砂栽培農業に適した環境条件の情報は整備されておらず、環境条件を把握し、設計資料として整理することは有用である。

1.2 研究目的

これまで木村ら¹⁾は大阪府四条畷市にあるビニルハウスにて栽培ベッドが1段のビニルハウスの温度環境について整理し、松尾ら²⁾の伝熱モデルを用いてハウスの熱的特性を把握、寒冷地の外気温からハウス温度、砂層温度を推定し、必要加熱量を求めた。しかし、植

物の生育に欠かせない光合成や呼吸、細胞の伸長、分裂などには温度以外にも光、CO₂、湿度などが重要である。また高床式砂ベッドは多段積みにする事で農地面積を拡大することができるというメリットを持っている。しかし、多段積みにしたことによる下段への日照の影響などについては検討されていない。

そこで本研究では、温度環境だけでなく光環境にも着目し、光環境では実測データを用いて、温度環境では伝熱モデルを用いて屋外環境からハウス内環境の推定方法を提案する。さらに各地のハウス内環境を推定し、温度環境だけでなく光環境も組み合わせて作物の収穫に必要な日数を推定することを目的とする。

2. 光環境実測

2.1 実測概要

京都府相楽郡精華町にあるビニルハウスB棟及び屋外にて光環境の測定を行った。ビニルハウスの平面図を図1に、断面図を図2に示す。北側の中央2列が2段積みとなっている。また、ビニルハウス上部には遮光カーテンが取り付けられており、管理者が手動で開閉し、遮光開始時間は季節により異なる。測定項目及び測定期間を表1に示す。測定期間は測器によって異なる。測定間隔はいずれも5分とした。

2.2 測定項目同士の関係

測定結果を用いてビニルハウス内、屋外、ビニルハウス内外において8~16時における光の測定項目同士の相関関係を求めた。ビニルハウス内の照度と植物の光合成に必要な光の感度を持つ PAR、照度と日射量、屋外の照度と日射量、ハウス内外の照度、日射量にはそれぞれ線形関係がみられ、式1~式7を得た。照度は $PCL[kLx]$ 、日射量は $I[kW/m^2]$ で示しており、添え字の i はビニルハウス内、 o は屋外、数字は1階、2階を意味している。表2に式4、式5における係数A、Bを示す。遮光カーテンによる日射遮蔽の有無が月や時間帯により異なるため、2階におけるハウス内外の照度の関係を示す係数Aは月別時間帯別に整理した。また、多段積みの1階部分(以後、多段1階)では2階による影の影響が月ごとに変わるのでハウス内外の照度の関係を示す係数Bは月別日向日陰別で整理した。

3. 作物と生育環境の実験的検討

3.1 概要

環境予測をより実用的なものとするために、作物の生長により生育環境を評価する。Case1は図1に赤い横線で示す位置で2018年9月25日に定植し、10月20日に収穫した。Case2は青い縦線で示す位置で9月28日に定植し、草丈が約30cmまで成長したベッドから収穫した。各Caseそれぞれ図2に示す①~⑥の6つのベッドで栽培を行った。植物はコマツナを用い、各ベッド42株を定植した。栽培期間には、図2にTC1~TC18で示す熱電対を砂ベッド表面から50mmの位置に各ベッド3点ずつ設置し、砂層温度を測定した。①②の照度にはPCL①を、⑤は照度を測定していないので、東西対称であると考えてPCL②の照度を用いて分析を行った。

3.2 コマツナについて³⁾

コマツナの生育適温は15~20℃であり、生育限界温度は下限が5℃、上限が35℃で、これを超えると生育が抑制される。また、100g程度の小株を収穫するのに必要な日平均気温の積算温度は700℃・日前後である。光の強度がこれ以上増加しても光合成速度は増加しない点を意味する光飽和点は85kLxである。

3.3 結果

Case1の収穫重量を図3に、砂層の積算温度を図4に示す。2階の収穫重量は多段1階と比較して約5倍大きくなった。砂層の積算温度は1階で610℃・日程度、2階で570℃・日程度となり、最大で50℃・日、日平均にすると約2℃の差があった。積算照度と収穫重量の関係を図5に示す。本実験では光飽和点を超える照度は確認されなかったため、積算照度は実測した照度全てを用いて算出した。図5より照度が高いほど収穫重量は大きくなった。またCase2の収穫日数を図

6に、収穫重量を図7に示す。収穫日数は2階が最も早く、多段1階では定植から50日以上経過しても草丈が30cmに達さず、虫食いが多発したため収穫できなかった。収穫日数と収穫重量の関係を図8に積算照度と収穫重量の関係を図9に示す。収穫日数が長くなるほど収穫重量が大きくなるわけではないことが分かる。また、ビニルハウスの長軸は南北軸であるので、日照条件は東西でほぼ対称になるが、収穫重量及び収穫日数をみると、どの場合も東より西側の収穫重量が大きく、収穫日数も早かった。ここで、図10に示す西側の③と東側の⑥の照度及び砂層温度を比較すると、③は照度が大きい時間帯に砂層温度が高くなっていることが分かる。光の強度が大きい時に温度が高くなることで西側では植物の生育が促進したと考えられる。そこで、ビニルハウスを東西で分けた収穫重量と積算照度の関係を図11に示す。式8、式9に示す指数関数的な関係がみられた。一株当たりの収穫重量は $W[g/株]$ 、積算照度は $\sum PCL[kLx \cdot h]$ で示している。

表1 測定項目及び測定期間

	2月	~	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
照度					8/1	9/2			
PAR	2/3		7/20	8/29					12/31
B棟日射量						9/2			12/31
屋外日射量						9/29			12/31
屋外照度			6/7	6/29			10/11	12/4	12/31
砂層温度①						9/25	10/20		
砂層温度②						9/28		11/19	

表2 係数A、B

	係数A (2階)			係数B (多段1階)	
	8時-遮蔽*	遮蔽-14時	15-16時	日向	日陰
1月	-	-	-	-	-
2月	1.00	0.80	0.30	0.29	0.14
3月	0.74	0.47	0.29	0.18	0.09
4月	0.50	0.30	0.27	0.13	0.06
5月	0.57	0.30	0.27	0.13	0.06
6月	0.62	0.44	0.26	0.12	0.06
7月	0.53	0.27	0.22	0.09	0.05
8月	0.48	0.23	0.21	0.08	0.05
9月	0.62	0.41	0.28	0.13	0.07
10月	0.79	0.57	0.33	0.14	0.09
11月	-	-	-	-	-
12月	0.77	0.57	0.31	0.11	0.10

*遮蔽とは遮光ネットの使用開始時刻(推定)

$$I_{i,2} = 0.010 \times PCL_{i,2} \quad \text{式1}$$

$$I_{i,1} = 0.011 \times PCL_{i,1} \quad \text{式2}$$

$$I_o = 0.0076 \times PCL_o \quad \text{式3}$$

$$PCL_{i,2} = A \times PCL_o \quad \text{式4}$$

$$PCL_{i,1} = B \times PCL_o \quad \text{式5}$$

$$I_{i,2} = 0.59 \times I_o \quad \text{式6}$$

$$I_{i,1} = 0.10 \times I_o \quad \text{式7}$$

$$W_{east} = 5.32e^{0.0005 \sum PCL} \quad \text{式8}$$

$$W_{west} = 14.39e^{0.0004 \sum PCL} \quad \text{式9}$$

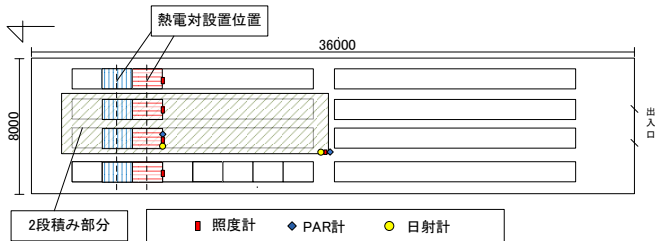


図 1 ビニルハウス B 棟平面図

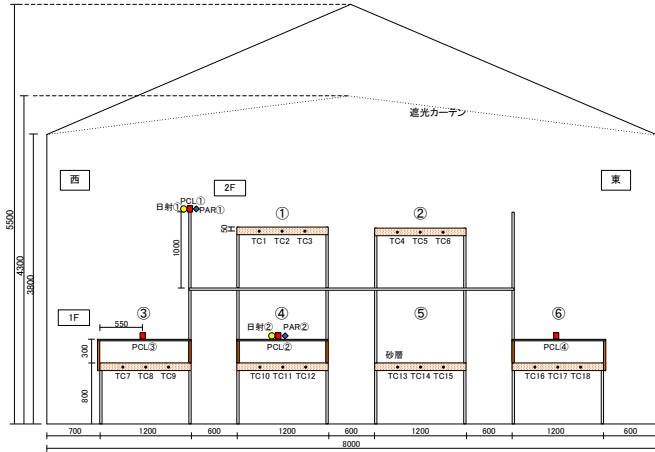


図 2 ビニルハウス B 棟断面図

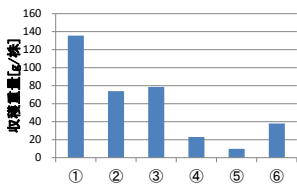


図 3 Case1 収穫重量

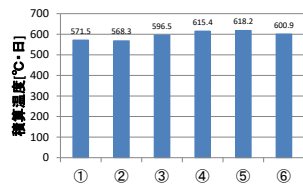


図 4 Case1 積算砂層温度

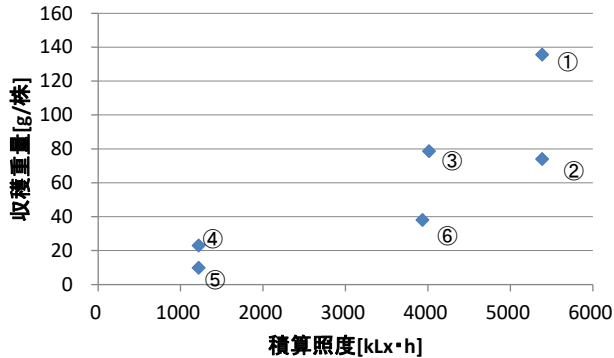


図 5 Case1 積算照度と収穫重量の関係

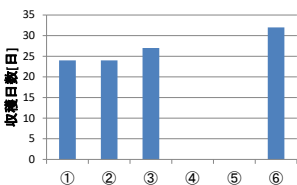


図 6 Case2 収穫日数

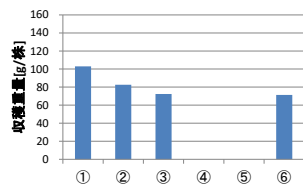


図 7 Case2 収穫重量

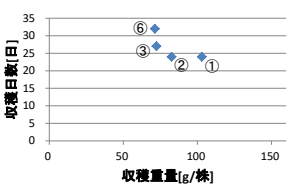


図 8 Case2 収穫日数と収穫重量の関係

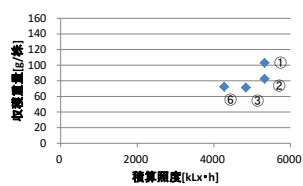


図 9 Case2 積算照度と収穫重量の関係

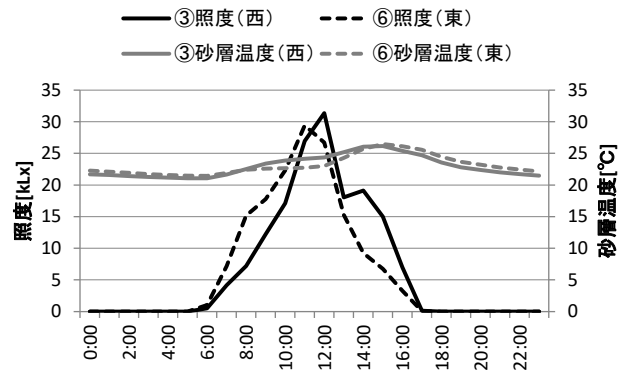


図 10 ③⑥の照度及び砂層温度

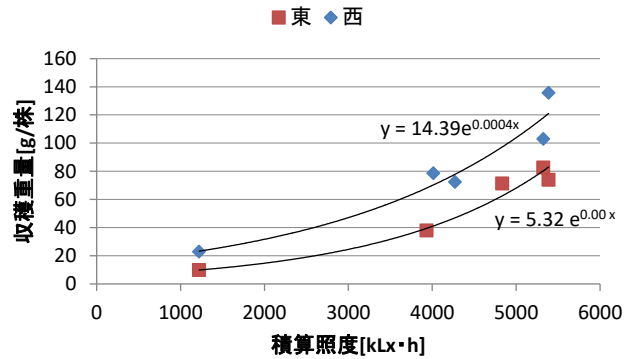


図 11 収穫重量と積算照度の関係

4. 温度環境推定

4.1 伝熱モデルを用いたハウス温度推定

松尾ら²⁾の伝熱モデルを用いて外気温からハウス温度の推定を行った。松尾らは暖房を行った時の住宅の自然室温を推定するために、外気温の変化の応答及び暖房の変化の応答、室温の初期値からある時刻の室温を求めた。外気温及び暖房による室温のステップ応答を式 10、式 11 に示す簡単な指数関数で近似し、外気温から室温の三角波応答時系列を式 12 で、暖房による室温の矩形波応答時系列を式 13 で求め、各応答時系列の合成積から式 14 に示す室温を求める式を得た。未定係数 r, b_0, b は実測値を代入し、両辺の残差に対して最小二乗法を適用することで推定可能である。

本研究では住宅に代わって図 12 に示すようにビニルハウスにおけるハウス内温度を推定した。ビニルハウスは日射の影響を受けるので、外気温は式 15 に示す相当外気温を用い、対流熱伝達率は $9.24W/(m^2 \cdot K)$ とした。

4.2 精華町ビニルハウス B 棟の熱的特性の把握

伝熱モデルを用いて精華町ビニルハウス B 棟の熱的特性を把握した。このハウスでは暖房を行っていないため、暖房による応答は無視した。2018 年 9 月 29 日～10 月 11 日の期間に実測したデータを用いてハウスの熱的特性を求めた。実測値と推定値の平均二乗誤差を式 16 から算出すると、日射吸収率 $a=0.1, r=0.68$ の時に $1.85K$ で最小となった。ビニルハウスのステップ応

答を図 13 に示す。既往研究で用いた四条畷のビニルハウスで 2015 年 1 月 1 日～1 月 13 日の期間で求めたステップ応答と比較して、精華町のビニルハウスの方が、応答が早かった。

$$\varphi(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad \text{式 10}$$

$$\psi(t) = b_0 - be^{-\lambda t} \quad \text{式 11}$$

$$\varphi_0 = 1 - \frac{1}{\lambda \Delta t} (1 - r)$$

$$\varphi_j = \frac{1}{\lambda \Delta t} (1 - r)^2 r^{j-1} \quad \text{式 12}$$

$$r = e^{-\lambda \Delta t}$$

$$\psi_0 = b_0 - br$$

$$\psi_j = b(1 - r)r^j \quad \text{式 13}$$

$$\theta_{R,n} = \varphi_0(\theta_{o,n} - r^n \theta_{o,0})$$

$$+ \varphi_1 \sum_{j=1}^n \theta_{o,n-j} r^{j-1} + (b_0 - br)H_n \quad \text{式 14}$$

$$+ br(1 - r) \sum_{j=1}^n H_{n-j} r^{j-1} + r^n \theta_{R,0}$$

$$\theta_{o,SAT} = \theta_o + \frac{\alpha_{OR} \times J}{\alpha_{OR}} \quad \text{式 15}$$

$$\delta = \sqrt{\sum_{k=1}^n (\hat{y}_k - y_k)^2 / n} \quad \text{式 16}$$

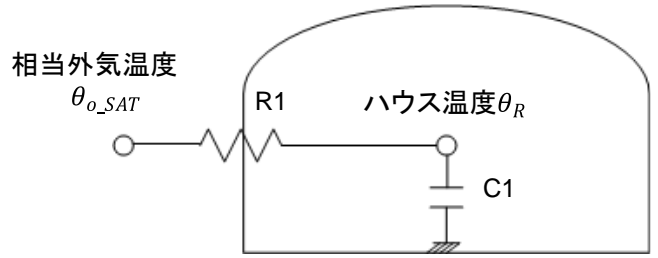


図 12 等価電気回路

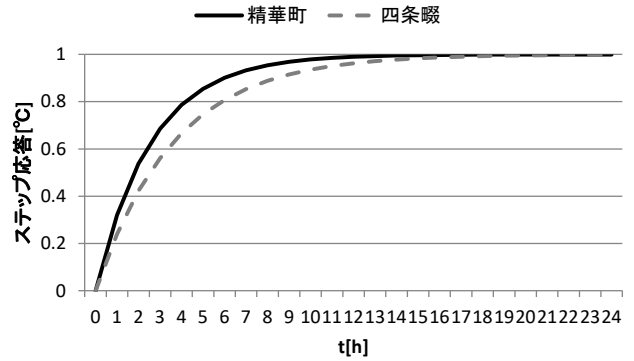


図 13 ビニルハウスのステップ応答

5. コマツナの収穫日数の推定

2 に示した屋外日射量から照度の推定方法及び 4 に示した屋外環境からハウス温度の推定方法を用い、各地で 100g のコマツナを収穫するのに必要な日数を算出した。対象地は奈良、札幌、仙台、東京、那覇の 5 地点で、2018 年 1 月 1 日～12 月 31 日の気象庁のデータを用いた。

5.1 照度を用いた収穫日数の推定

5.1.1 屋外日射量からハウス内照度の推定方法

屋外日射量からハウス内照度の推定方法を、精華町における 2018 年 9 月 28 日～12 月 31 日の 8～16 時の実測値を用いて検討した。日射量から照度への変換を屋外で行う場合の推定式は式 17、式 18 となり、式 16 で求める平均二乗誤差は 2 階で 12.1kLx、多段 1 階で 2.6kLx となった。一方で、日射量からの変換をハウス内で行う場合には推定式は式 19、式 20 となり、平均二乗誤差は 2 階で 6.2kLx、多段 1 階で 2.5kLx となった。よってハウス内照度の推定には平均二乗誤差の小さい式 19、式 20 を用いた。

5.1.2 各地のハウス照度の推定

1 時間毎の日射量データより各地のハウス照度を推定した。推定した照度を月平均日積算値とした結果を図 14、図 15 に示す。2 階では地域により積算照度に差が確認されたが、多段 1 階はどの地域も 50kLx・h 以下となった。

5.1.3 各地のコマツナの収穫日数の推定

3 で述べた収穫重量と積算照度の関係より 100g のコマツナの収穫に必要な積算照度はビニルハウス東側で 5866.9kLx・h、西側で 4846kLx・h であった。よって推

$\varphi(t)$	外気温による室温のステップ応答[°C]
$\psi(t)$	暖房による室温のステップ応答[°C]
λ	$= 1/T$
T	C_1 に関する時定数
t	時刻
Δt	時間刻み[h]
φ_j	外気温による室温の三角波応答時系列[°C]
ψ_j	暖房による室温の矩形波応答時系列[°C]
r	C_1 に関する未定係数
b_0, b	未定係数
θ_R	室温[°C]
n	時刻
θ_o	外気温[°C]
H_n	暖房量[J/h]
$\theta_{o,SAT}$	相当外気温度[°C]
α_{OR}	ハウス表面の日射吸収率[-]
J	日射量[W/m ²]
α_{OR}	ビニルハウス屋外表面の総合熱伝達率 [W/(m ² ・K)]
δ	平均二乗誤差
n	データ数[個]
\hat{y}	実測値
y	推定値

定したハウス照度から収穫に必要な日数を算出した。代表してビニルハウス東側における収穫日数の推定結果を図 16、図 17 に示す。2 階では札幌以外の 4 都市では夏季に 20~30 日、冬季に 40~50 日前後となった。札幌は夏季に 30 日前後、冬季に 50~80 日必要となった。多段 1 階ではどの地域も日積算照度が低いため、収穫日数は 100 日を超えてしまい、コマツナの生育には実用的でないため、人工的な照射などが必要であると考える。東西では月により 3~14 日の差が確認され、西側の方が収穫日数は短かった。

5.2 室温を用いた収穫日数の推定

5.2.1 伝熱モデルを用いた室温の推定

伝熱モデルを用いて気象庁の気温、日射量データよりハウス温度を推定した。ハウスの初期温度が与える影響を考慮し、助走期間は 7 日間とした。推定結果から各月の日平均ハウス温度を求めると図 18 になる。夏季にコマツナの生育限界である 35℃を超える地域は見られなかったが、冬季に奈良、札幌、仙台では生育限界である 5℃を下回った。

5.2.2 収穫日数の推定

3.2 より、100g のコマツナの収穫に必要な日平均ハウス温度の積算値は 700℃・日である。よって求めた各地の日平均ハウス温度から、100g のコマツナの収穫に必要な日数を算出した結果を図 19 に示す。コマツナの生育限界 5℃を下回った地域ではコマツナは栽培できないと考える。また、下回らなかった場合でも、那覇以外では冬季に収穫日数が 80 日を超えてしまい収益を求めたコマツナの栽培は難しいと考える。そこで、コマツナの生育促進のためにハウス温度が 15℃未満の場合に、15℃に暖房したと仮定した場合の収穫日数を求めた。図 20 に暖房を行った場合の収穫日数を示す。暖房を行った場合、収穫日数は那覇以外の 4 地域で最大 47 日となった。暖房を行わなかった場合と比較して、暖房を行った場合は那覇以外の 4 地域で 50~80 日程度収穫日数を短縮することができた。那覇では暖房を行わない冬季でも日平均ハウス温度は 15℃を下回らなかったため暖房は不要であった。

5.2.3 必要な暖房負荷

5.2.2 で想定した条件での暖房の暖房負荷を求めた。暖房負荷の推定には 1 時間毎のハウス温度の推定結果を用いた。暖房負荷は式 21~式 23 で求める。精華町ビニルハウス B 棟を想定したので温室被覆面積 A_g は 661.2 m²、温室床面積 A_s は 288m²、風速に関する補正係数 f_w は 1.0、熱貫流係数 h_t は 6.4 W/(m²・K)、隙間換気伝熱係数 h_v は 0.35 W/(m²・K)、暖房設定温度 θ_c は 15℃とした。札幌、仙台は寒地、東京、奈良、那覇は暖地とし、単位床面積当たりの地表面熱伝導は表 3 を用いた。ハウス温度推定値が 15℃未満の時の負荷を算出し、

正の値となった負荷を暖房負荷として考えた。

結果を図 21 に示す。各地の暖房負荷をみると札幌、仙台、奈良、東京の順に高く、那覇は一年を通して暖房負荷がほとんどなかった。1 月の暖房負荷をみると奈良は 16,060kWh、札幌は 28,857kWh、仙台は 21,173kWh、東京は 14,159kWh、那覇は 184kWh となり、札幌、仙台、東京、那覇はそれぞれ奈良の 1.8 倍、1.3 倍、0.9 倍、0.01 倍となった。

6. 収穫日数の比較

5.1 において照度から推定したビニルハウス東側の 100g のコマツナの収穫日数と、5.2 において 15℃未満の場合に暖房を行ったハウス温度から推定した収穫日数の差を図 22 に示す。差が正の場合は照度から求めた収穫日数が、差が負の場合は室温から求めた収穫日数が長いことを示す。夏季は収穫日数の差がほとんどなく、冬季は奈良、仙台、東京は室温から求めた収穫日数が、札幌、那覇では照度から求めた収穫日数が長くなった。これにより、植物の生長には一定の照度が必要となり、一定の照度がある場合には暖房を行うことで、植物の収穫日数を短縮できることがわかった。一方で札幌のように照度が低い場合や、那覇のように温度が高い場合には照度の向上を行うことで収穫日数を短縮できることがわかった。

$$PCL_{i,2} = (A/0.0076) \times I_o \quad \text{式 17}$$

$$PCL_{i,1} = (B/0.0076) \times I_o \quad \text{式 18}$$

$$PCL_{i,2} = 59 \times I_o \quad \text{式 19}$$

$$PCL_{i,1} = 9.1 \times I_o \quad \text{式 20}$$

$$Q = \{A_g(q_t + q_v) + A_s \cdot q_s\}f_w \quad \text{式 21}$$

$$q_t = h_t(\theta_c - \theta_o) \quad \text{式 22}$$

$$q_v = h_v(\theta_c - \theta_o) \quad \text{式 23}$$

Q	暖房負荷[W]
A_g	温室被覆面積[m ²]
A_s	温室床面積[m ²]
q_t	単位被覆面積当たりの貫流熱負荷[W/ m ²]
q_v	単位被覆面積当たりの隙間換気伝熱負荷[W/ m ²]
q_s	単位床面積当たりの地表伝熱負荷[W/ m ²]
f_w	風速に関する補正係数
h_t	熱貫流係数[W/ (m ² ・K)]
h_v	隙間換気伝熱係数[W/ (m ² ・K)]
θ_c	暖房設定温度[℃]
θ_o	外気温[℃]

表 3 単位床面積当たりの地表伝熱負荷 q_s [W/ m²]

内外温度差	暖地	寒地
10℃	-24	-18
15℃	-12	-6
20℃	0	6

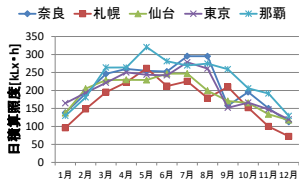


図 14 2階日積算照度

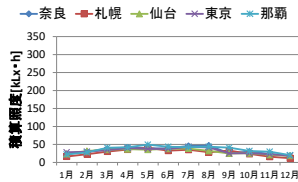


図 15 多段1階日積算照度

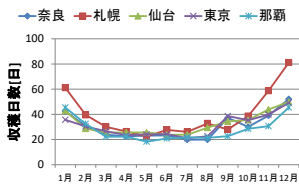


図 16 2階収穫日数

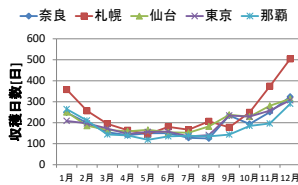


図 17 多段1階収穫日数

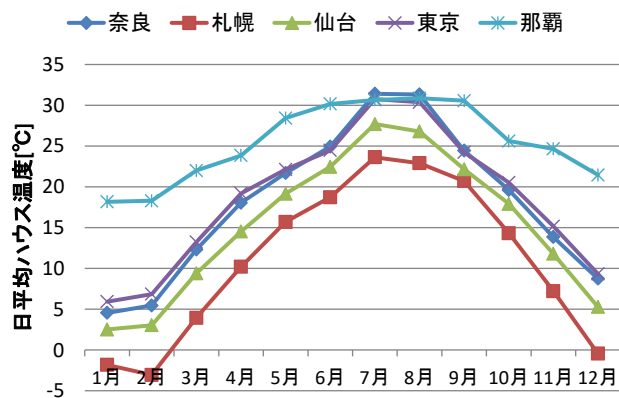


図 18 日平均ハウス温度

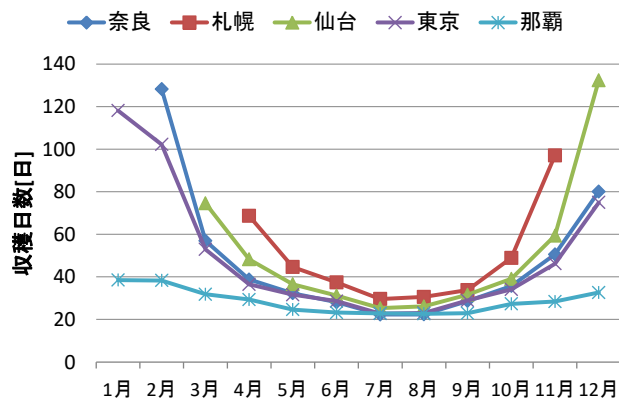


図 19 室温から推定した収穫日数

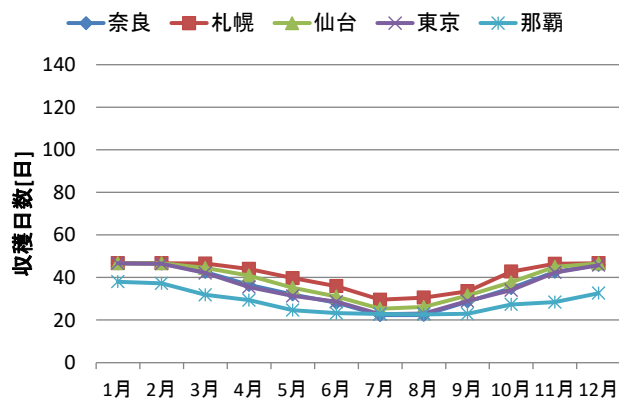


図 20 室温から推定した収穫日数(暖房した場合)

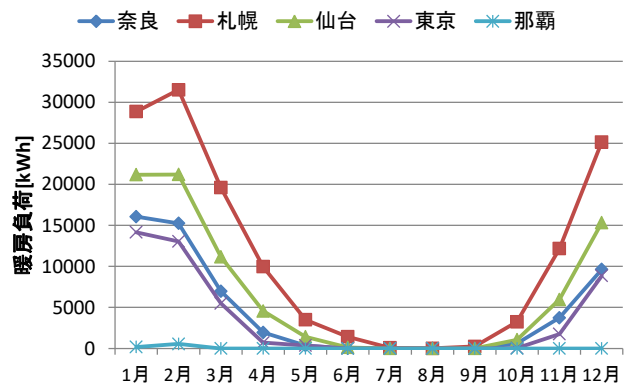


図 21 暖房負荷

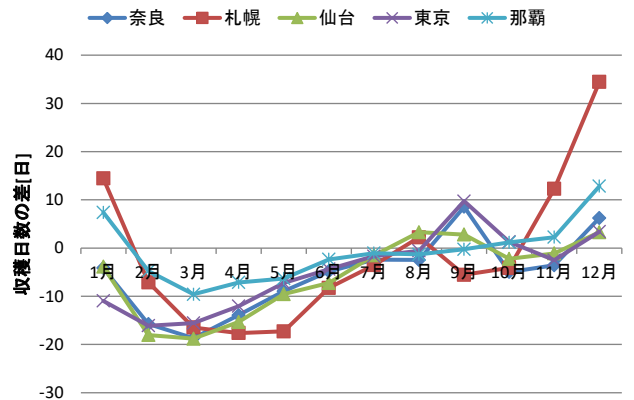


図 22 推定方法による収穫日数の差

7. まとめ

- ・京都府相楽群精華町のビニルハウス B 棟での実測データを用いて光環境についてそれぞれ測定項目ごとの関係を整理し、屋外日射量からハウス内照度の推定式を提案し、5 都市のハウス内照度を推定した。
- ・伝熱モデルを用いてハウスの熱的特性を求め、5 都市のハウス温度を推定した。
- ・推定した 5 都市のハウス内環境より、100g のコマツナを収穫するのに必要な日数を算出し、比較した。
- ・今後の課題として、本研究では限られた実測、実験のデータを元にして推定を行ったので、データを増やして推定精度を高める必要がある。

【参考文献】

- 1) 木村駿介ら：冬期における農業用ビニルハウスの効率的な暖房方式に関する研究(第 5 報) 屋外空気温度を用いた高床式砂ベッド砂層温度推定, 空気調和衛生工学会近畿支部論文集,2018.3
- 2) 松尾陽ら：現場測定にもとづく住宅熱特性の推定, 日本建築学会建築環境工学論文集 pp.13-18, 1981.4
- 3) 一般社団法人熊本県野菜振興協会「熊本の野菜<播種基準(平成 24 年 3 月 31 日)>」, [online] http://www.k-engei.net/contents/koushu_standard/131%E3%82%B3%E3%83%9E%E3%83%84%E3%83%8A.pdf (参照 2018-11-28)