

寒冷地における冬季ビニールハウス周りの熱移動に関する実験的研究

野田英彦*・及川 滋**・千坂博和***
山田純一****

Experimental Study on the Heat Transfer Around the Green House in Winter in the Cold District

Hidehiko NODA*, Shigeru OIKAWA**, Hirokazu CHISAKA***
and Junichi YAMADA****

Abstract

In winter in the cold district, agriculture is in dormant, because of the large heating load. However, even in winter, the radiation from the sun is a huge amount. It is thought that the temperature in the green house can be maintained the temperature in which agriculture can produce, if the green house is insulated effectively, by a little amount of heating load. This research has aimed to study the heat transfer between the green house and air, and to develop the effective insulation methods.

Key words : heat transfer, green house, transmissivity, emissivity

1. はじめに

北海道や東北のように、外気温が著しく低下する地域では、ガラス温室やビニールハウスなどの園芸施設が増加している。それらが大型化していくにつれ、冷暖房設備を備える温室空間が増加しつつある。冷暖房設備を備えていても冬季では、燃料代や電気等の加熱負荷が大きく、効果的に加熱するのが難しいので成長は芳しくない。加熱負荷が大きいことに加えて、収益率が悪いため、冬季農業は休止状態にあるのが現状である。

しかし、日射量は冬季でも莫大な量であり、効果的な断熱を行えば、少ない加熱量で農業生産が可能な温度を維持できると推察される。

これまで、ビニールハウス内外の温度差を予測する取り組みが多数なされている。高倉ら⁽¹⁾は、温室の熱収支について検討し、土壌面積とハウス表面積の比である保温比から、ハウス内外の温度差を予測する式を導出しているが、実験による裏付けは無い。

そこで、六戸町の青森県農林総合研究センター畑作園芸試験場に設置しているビニールハウスを用いて、無加温状態における温度変化を測定し、ビニールハウス内の熱量変化について実験的に検証した。

平成 15 年 12 月 19 日受理

* 大学院工学研究科機械システム工学専攻・教授

** 大学院工学研究科機械システム工学専攻博士前期課程・1 年

*** チサカファクトリ勤務

**** 三菱自動車エンジニアリング勤務

2. ビニールハウス素材の特性

2-1 透過率, 放射率および反射率の関係

放射エネルギーは電磁波の形態で伝達される。電磁波が物体に照射されると、一部は透過し、一部は反射し、残部は吸収される、同じ温度であれば吸収率と放射率はキルホッフの法則により同一の値となる。したがって、透光率を τ とし、反射率を γ 、吸収率(放射率)を ε とすると、次式が成り立つ。

$$\tau + \gamma + \varepsilon = 1 \dots\dots\dots(1)$$

また、電磁波の波長は温度によって変化し、次式で表される Wien の変移則によって最大波長 λ_{max} と物体温度 T の関係が与えられる。

$$\lambda_{max} T = 2897.5 [\mu\text{mK}] \dots\dots\dots(2)$$

太陽の表面温度は 6,000 K 程度であるので、太陽放射は $0.48 \mu\text{m}$ の波長の可視光線 ($0.72 \mu\text{m}$ 以下)、 15°C (288K) の物体からは $10.06 \mu\text{m}$ の波長の赤外線での放射となる。

物体の透過率、等は波長によって異なるので、太陽光に対応する短波長可視光領域および土壌等からの放射に対応する長波長赤外線領域について、それぞれ評価しなければならない。

フィルム素材の短波長透過率は、通常 40~60% との報告⁽²⁾がある。しかし、その後改善が進んで、現在は 80% 近くに上昇している。ハウス内に照射される日射量の予測は重要であり⁽³⁾、そのためには、フィルム素材の特性を把握することが必要である。そこで、短波長透過率および長波長放射率を計測した。

2-2 短波長透過率

農業用ハウスの外壁材は、外気の侵入を防止する目的に加えて、短波長である太陽光を透過し、長波長である赤外線を吸収する目的で用いられている。一般にガラスは高い短波長透過率と高い赤外線吸収率を有する物質であり、ハウス外壁として優れた特性を有している。しかし、

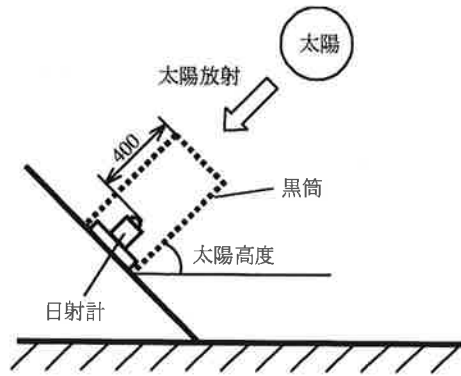


図1 透過率実験装置概略図

取扱が難しく、高価であるため、わずかな例を除いて利用例は少ない。一方、農業用ビニールは、製造が容易で取り扱いやすく安価であるため、ハウスの外壁材や内張り用に多く用いられている。そこで、外壁材に用いられることの多いポリオレフィン系フィルムの短波長透過率を計測した。

実験装置を図1に示す。黒色塗料を塗布した長さ 500 mm の円筒を太陽高度に傾け、その中に短波長可視光領域の放射熱量を計測する日射計を設置し、円筒入口にフィルムを設置した場合と設置しない場合との日射量で、透過率を評価した。外壁材のハウス内面には凝縮が生じ、凝縮液滴による曇りが発生するが、太陽からの放射が散乱することを防ぐために、防曇処理剤を塗布するのが通常である。そこで、透過率に及ぼす防曇処理の有無の影響も調査した。

実験結果を表1に示す。太陽光からの直達日射量は、大気に含まれる水蒸気量により大きく変化する。そこで、実験を連続して10回行った。直達日射量は、短時間のうちに大きく変動していることが分かる。また、ポリオレフィン系フィルムの短波長透過率は、いずれの直達日射量の場合も、防曇処理の有無に係わらず 85% であることが分かった。したがって、太陽からフィルムに放射される熱は、85% が透過し、残りの 15% が吸収あるいは反射されることになる。

表1 フィルムの短波長透過率

Run No.	日射量 [W/m ²]		短波長透過率 [%]
	未処理フィルム	直達	
1	75.6	94.5	80.0
2	69.3	81.9	84.6
3	55.4	63.0	88.0
4	46.6	55.4	84.1
5	127.2	152.4	83.5
6	139.8	165.0	84.7
7	137.3	167.5	82.0
8	143.6	166.2	86.4
9	157.4	186.4	84.5
10	156.2	178.8	87.3
		平均	84.5

表2 各資材における長波長放射率

用途	資材	長波長放射率 [%]
内張り材	a	85
	b	85
	c	84
	d	68
外壁材	e	82
	f	83
	g	82
	g (防曇処理)	82

Run No.	日射量 [W/m ²]		短波長透過率 [%]
	防曇処理フィルム	直達	
1	231.7	270.8	85.6
2	303.5	353.9	85.8
3	165.0	195.2	84.5
4	156.2	181.4	86.1
5	151.1	178.8	84.5
6	159.9	188.9	84.7
7	153.7	181.4	84.7
8	133.5	159.9	83.5
9	142.3	166.2	85.6
10	163.7	191.4	85.5
		平均	85.0

率は68%と小さい値になっている。a～cの内張り材の長波長放射率は、ほぼ85%と一定値であった。

外壁材gは、前節で短波長透過率を計測したビニールと同一素材であり、前節と同様に防曇処理の影響も調査した。その結果、いずれの外壁材も、放射率はほぼ82%となり、防曇処理の影響は無いことが分かった。

以上のことから、外壁材および内張り材のいずれも、短波長放射は85%透過し、長波長放射は82～85%吸収することが分かった。

2-3 長波長放射率

外壁材および内張り材に用いられるフィルムの、長波長赤外線領域の放射率を測定した。測定には長波長放射率計を用いた。実験には、ハウス内張り材4種類、外壁材3種類を用いた。実験は、それぞれのビニールに対して放射率を10回計測し、平均値を求めた。

実験結果を表2に示す。内張り材dは、遮光用にアルミ蒸着の線が入っているもので、長波長に対しては反射率が大きいため、長波長放射

3. ハウス内温度の経時変化

3-1 ハウス形状および温度測定方法

ビニールハウスの熱収支を検討するために、平成14年3月上旬に、六戸町の畑作園芸試験場のビニールハウスを用いて、無加温ビニールハウス内温度および外気温の経時変化を計測した。このハウスは、全国的に最も普及している丸屋根型のパイプハウスで、栽培する作物に合わせて間口、軒高を比較的自由に選ぶことができるため、施工が容易で安価という利点がある。また、ビニールの素材はポリオレフィン系フィルムを使用しており、外壁材1重のみで、内張り無しの状態である。

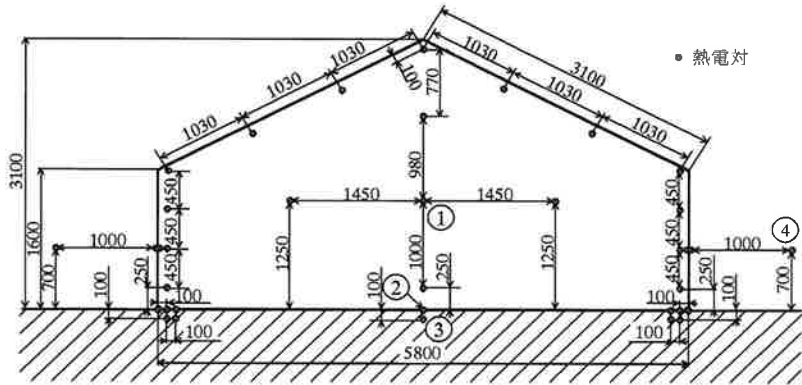


図2 ハウス形状と熱電対設置位置

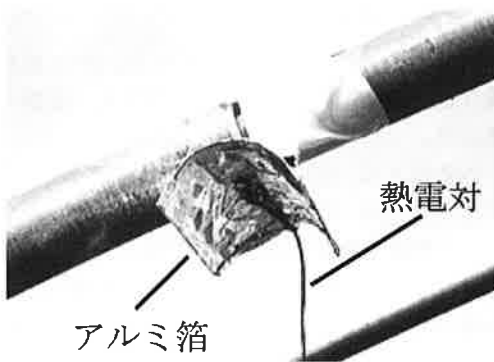


図3 アルミ箱製放射防御傘

3-2 温度経時変化

ビニールハウス中央部 ①, 中央部地表面 ②, ビニールハウス地中内部 ③, 外気温度 ④ の4箇所を代表ポイントとして選定し, 晴れた日の温度の経時変化を図4に示す。外気温は, 夜間は氷点下, 昼間は 3°C 程度の低温であった。

地表およびハウス中央気温は夜明けとともに太陽からの放射エネルギーを受けて敏感に反応し, 上昇している。一方, 地中100 mmの位置の温度は, 3時間程度の大きい時間遅れの後に上昇している。

昼間は, ハウス内温度は太陽放射の影響を鋭敏に受け, 大きく温度変化をしている。外気温が 5°C 前後にもかかわらず, ハウス内は 30°C 以上になることもしばしばである。したがって, 夜間の気温降下を防ぐことによって, 農産物を安定的に生産できることがわかる。

太陽高度が下がると, 太陽放射によるエネルギー供給量が減少するので, ハウス内気温は降下し, 日没後には急降下する。さらに, 日出直前には, ハウス内気温は外気温以下にまで降下している。これは, ハウスからの放射冷却によるものであると推察できる。したがって, 放射伝熱による熱流出に対処することが, 加熱負荷低減に大きく寄与できると推察される。

実験時のビニールハウス周辺の状況は, 30 mm~50 mm 程度雪が残っていた。所々雪が融けている箇所があり, 土がぬかるんでいる場所も幾つか見うけられた。また, ハウス内には農作物は栽培しておらず, 土壌表面が直接見える状態であった。

ハウス形状および温度計測点を図2に示す。地中温度計測にはCA シース型熱電対を, その他の温度計測にはCC 熱電対を用い, 計36箇所設置した。気温計測用CC 熱電対には, 太陽放射の影響を防ぐために, 図3に示すアルミ箱製放射防御傘を付帯した。

以上の条件で, 2002年3月7日の15時39分から測定を開始し, 2002年3月11日の13時19分までの5日間測定を行った。

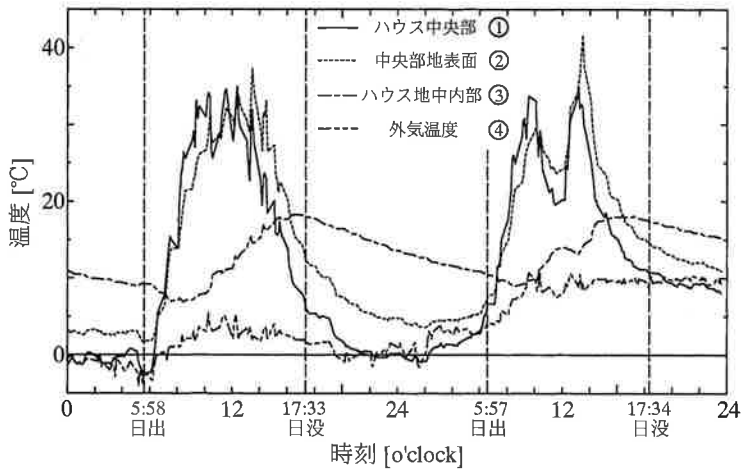


図4 ビニールハウス内外の温度経時変化

3-3 日射量変化

実験時の日射量の経時変化を図5に示す。実線はハウス外で、破線はハウス内で計測したデータである。実験時は晴れであったが、雲は存在していた。また、ハウス外の日射量は、供試ハウスから250m離れた場所で計測しているため、雲の影響が異なる。

太陽が雲にかかると、直達日射量がなくなるので、日射量は急激に減少している。ハウス内の日射量は、外壁材を通して入射するので、ハ

ウス外の日射量より15%~20%少ない値となっている。

3-4 熱収支

ハウスの熱収支は、およそ以下で与えられると推察される。ハウスへの熱入力について検討する。

太陽からの放射エネルギーは、周囲大気での放射熱流束 $q_{sun,0}$ にハウス壁材の短波長透過率 $\tau_{w,s}$ をかけて、

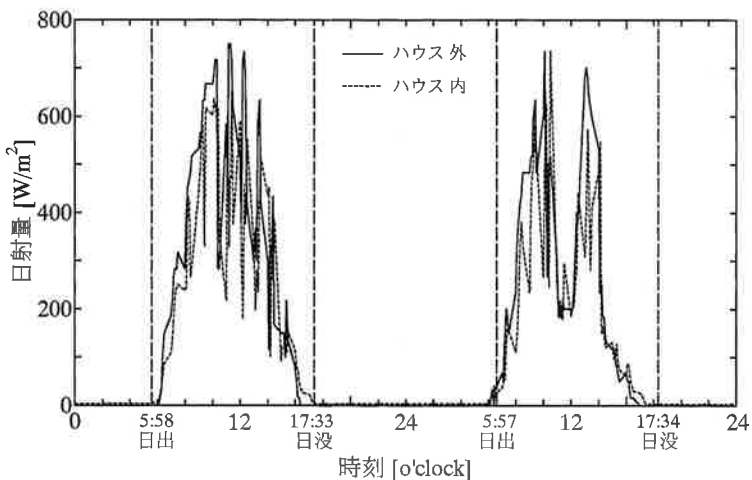


図5 ビニールハウス内外の日射量経時変化

$$q_{sun} = q_{sun,0} \tau_{w,s} \sin \phi \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 ϕ は太陽高度である。日射計の値は $q_{sun,0} \sin \phi$ を与えている。

壁材からの放射伝熱 $q_{rw,i}$ は、壁材、土表面の放射率をそれぞれ ϵ_w 、 ϵ_{soil} とおくと、

$$q_{rw,i} = \frac{\sigma(T_w^4 - T_{soil}^4)}{1/\epsilon_w + 1/\epsilon_{soil} - 1} \dots \dots \dots (4)$$

T_w はハウス壁温、 T_{soil} は土の表面温度である。また、土表面はハウス壁に覆われているので形態係数は1と見なすことができる。

外気温 T_∞ がハウス壁温 T_w より高い夜間では、外気から対流伝熱 q_{cw} が供給される。

$$q_{cw} = h(T_\infty - T_w) \dots \dots \dots (5)$$

h は熱伝達係数であり、風速や気温（空気の物性）によって異なる値となる。

一方、ハウスからの熱出力について検討すると、まずハウス壁からの放射伝熱 $q_{rw,o}$ は、放射伝熱の相手の天空温度 T_a を特定できていないが、

$$q_{rw,o} = \epsilon_w \tau_{w,l} \sigma(T_w^4 - T_a^4) \dots \dots \dots (6)$$

また、土表面から壁材を透過して外部へ逃げる放射伝熱 q_{rsoil} は、

$$q_{rsoil} = \epsilon_{soil} \sigma(T_{soil}^4 - T_a^4) \dots \dots \dots (7)$$

したがって、熱収支を大まかに表すと、ハウス内の内部エネルギーの変化量 ΔU は、

$$\Delta U = (A_{soil} q_{sun} + A_{soil} q_{rw,i} + A_w q_{cw}) \dots (8) - (A_w q_{rw,o} + A_{soil} q_{rsoil})$$

ここで、 A はそれぞれの伝熱に対応する伝熱面積である。

ハウス内の温度変化は、内部エネルギーの変化量に依存しているため、ハウス内気温の変化 ΔT は、次式で与えられる。

$$\Delta T = \frac{\Delta U - \Delta U_{soil}}{\rho C V} \dots \dots \dots (9)$$

ΔU_{soil} は、土の温度上昇に伴う内部エネルギー増分。 ρ 、 C 、 V はそれぞれ空気の密度、比熱、

体積である。

放射率 ϵ あるいは透過率 τ は物性値であるので計測可能である。また、天空の温度 T_a を除く各温度も計測可能である。しかし、ハウス壁から周囲空気への熱伝達係数 h は、予測できない状況にある。また、土の内部エネルギー上昇 ΔU_{soil} も、非定常な問題であり複雑である。

したがって、熱収支を正確に把握するには、熱伝達係数と風速の関係を明確にすること、土内部の伝熱現象把握、蒸発の影響を把握することが重要となる。

4. おわりに

六戸の畑作園芸試験場の無加温ビニールハウスを用いて、ハウス内外の温度経時変化を測定し、以下のことが判明した。

まず、農業用ビニールハウスに用いるフィルムの特性について調査した結果、外壁材の短波長透過率は、防曇処理の有無に係わらず85%であることがわかった。また、長波長放射率は、内張り材では85%、外壁材では82%であり、防曇処理の影響はないことが判明した。

次に、ハウス内温度の経時変化計測結果から、放射伝熱による熱流出に対処することが、加熱負荷低減に大きく寄与できると推察される。また、ハウスの熱収支を正確に把握するには、熱伝達係数、土内部の伝熱現象、蒸発の影響を把握することが必要であることがわかった。

謝 辞

本研究は青森県農林総合研究センター畑作園芸試験場との共同研究で行われたものである。関係各位に感謝の意を表す。また、実験を遂行するに当たり、八戸工業大学の若松信吾、長田貴正、倉重直明の諸氏に実験を補助して頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 高倉 直, 立花一雄, 古在豊樹, 碓宏八郎 ; “温室の熱収支”, 農業気象, 24-3, (1968 年 12 月), pp. 115-118
- 2) 古在豊樹 ; “温室内の日射量に関する研究 (1)”, 農業気象, 26-3, (1970 年 12 月), pp. 123-130
- 3) 古在豊樹, 杉 二郎 ; “温室内の日射量に関する研究 (2)”, 農業気象, 27-3, (1972 年 3 月), pp. 105-114