簡単な凍霜害発生箱

羽生寿郎・佐野誠一*・山中捷一郎・五十嵐大造・杉山茂久

(千葉大学園芸学部)

A Simple Frost-damage Box Utilizing Natural Radiative Cooling

Juro HANYU, Seiichi SANO*, Shoichiro YAMANAKA
Daizo IGARASHI and Shigehisa SUGIYAMA

(College of Horticulture, Chiba University,
648 Matsudo, Matsudo 271, JAPAN)

1. ま え が き

筆者らは放射冷却によって作物に結霜を起こし、凍霜害を与えることができる実験装置を考案・試作し(羽生ら, 1978), 凍霜害の実験を継続しているが, もっと簡単に霜害を与える方法を思いついた。

晴夜に地面(物体)の温度低下は有効放射による冷却と気層から地面への顕熱伝達によって左右され, 斉藤(1967)はこれらの関係について理論的考察をしている。また防風林などに囲まれた場所と開けた場所との夜間気温の比較はGeiger (1950)をはじめ多数報告されており, 最近では三原ら(1977)の報告が記憶に新しいところである。

このように, 囲いの内部や凹地では平坦地に比べて温度が低下するが, これらの場所でも内外空気の交換は行われており, 全くこれを断った場合には一層の温度低下が期待される。事実, プラスチックフィルム被覆のトンネル式畑苗代が登場した1950年代に, ポリエチレン(PE)被覆苗代で霜害が発生したことが報告されている。

そこで, 長波放射に透明なPEフィルムを上面に張って, その他の面を断熱した箱を晴夜, 外に水平に置いて放置すれば, 箱の内部は外気よりずっと冷えるはずであり, 春秋の適当に寒い晴夜に, この箱に入れた植物は, 外部の植物が霜害にかからない場合でも霜害を受けることが予想される。筆者らはこのような観点から実験を行ったので, その結果を報告する。

2. 実験装置と方法

実験に用いた箱の大きさは, 幅90 cm, 長さ180 cm, 高さ45 cmで, 上面はPEフィルム張り, 他の面は外壁がベニヤ板, 内側に断熱のため厚さ5 cmの発泡スチロール板を貼り, その表面(箱の内壁)に厚さ17 μ mのアルミニウム箔を貼って, 内面から放射される長波放射を少くした。底面に長波射出率の異なる薄板を敷くことによって, 箱内の微環境を変えることができる。箱は地上40 cmの高さに, 4本の脚柱で固定された。

風が弱いとPEフィルムが箱内の空気の冷却で冷やされ, その上面に結露しやすいので, 送風機でフィルム上面を常に外気で洗って, 結露を防いだ。

箱に入れた植物が凍霜害を受けるかどうかは気温でなく葉温による。水平に置いた葉の温度は, 葉の周囲の環境条件が等しくても, 箱内の葉面の高さ, 葉面の状態(気孔の数や形, 表皮細胞の状態, 毛の有無等), 葉の大きさ, 形, 厚さ, 含水量等によって変化するので, 箱の冷却能力をみようとする場合には実葉より模型葉の方が都合がよい。本実験では, 後述する理由からスライドグラスを模型葉として用いることにした。以後, これをモデル葉と称する。

モデル葉を空中に水平に置くため, 両端におもりを付けた直径0.3 mmのナイロン糸3本を水平に張り, その上に乗せるようにした。箱外のモデル葉も同様である。モデル葉は箱内のほぼ中央, PE面下20 cmの高さに置いた。

気温, 湿度は0.3 mm銅・コンスタンタン熱電対を乾湿球として, 箱内では非通風, 箱外では通風式にして測定した。地表面は0.3 mm熱電対で, 葉面, モデル葉面, PEフィルム内面, 箱の底面は0.3 mm熱電対の先端に0.1 mm熱電対を接続して測定した。モデル葉とPEフィル

昭和53年5月10日 関東支部会にて発表

昭和54年9月5日 受理

* 現在: 埼玉県春日部農林事務所, Present affiliation:
Kasukabe Branch of Dept. of Agriculture and Forestry,
Saitama Pref.

ムへの熱電対の固定は細く切ったセロテープで、その他の面とは接着剤で固定した。

長波放射成分については、初め箱内にFunk型純放射計を挿入して箱内の純放射の測定を行ったが、精度に疑問があるので中止し、大気放射だけBeckman大気放射計で測定し、箱内の放射成分は、あらかじめ箱の各面の温度測定と大気放射計を用いた実験によって材料の放射特性値を求めておき (Table 4)、放射収支式によって計算した。ただし、ガラスの射出率は物性表 (甲藤, 1968) により、黒塗りアルミ面のそれは1に近い値として適当に設定した。

モデル葉面への結霜・結露量は、測定終了時にポリ袋にモデル葉を素早く入れ、重量法で求めた。その他、地上2m高の風速を記録した。

実験は1976年秋から1979年春まで3冬季間行ったが、被覆方法、箱の底面材料および観測者はTable 1のとおりである。PEフィルムの特徴を示すために塩化ビニールフィルムを対比させたほか、1枚張りとは2枚張り、底面射出率の箱内微気象への影響を明らかにしようとした。

Table 1. Experimental treatment. PE: polyethylene, PVC: polyvinyl chloride, A: aluminium, B: black-painted aluminium.

Winter season	Ceiling film		Bottom surface		Observer
	PE	PVC	A	B	
1976-1977	double	—	○	—	SANO, S.
1977-1978	single	—	○	○	"
"	single	single	○	—	SUGIYAMA, S.
"	double	double	○	—	"
1978-1979	single	—	○	○	IGARASHI, D.

3. 葉面の熱収支式

物質の放射の性質は、放射の透過率 τ 、吸収率 δ 、射出率 ϵ 、反射率 α とすると、 $\tau+\delta+\alpha=1$ 、 $\delta=\epsilon$ である。

さて、箱の中央に置かれた葉面と、箱の上面および下面との形態係数は武智 (1973) の式から計算すると0.89となるが、アルミ底面とアルミ張り側面の箱では各面間の温度差が小さく、かつ、上面のPEフィルムを通過した放射が側面でよく反射するので、実質的に形態係数を1とみなしても大きな誤りはないと考えられる。したがって、長波放射を L 、大気、葉面、フィルム面、底面の添字記号を $\downarrow$, L , 1, 2とすると、葉の上面が吸収する放射 L_{LU} は近似的に次式で表わされよう。

$$\begin{aligned} L_{LU} &= \delta_L [(\tau_1 L_{\downarrow} + L_1) + \alpha_1 \{L_2 + \alpha_2 (\tau_1 L_{\downarrow} + L_1)\}] \\ &= \delta_L [(1 + \alpha_1 \alpha_2) (\tau_1 L_{\downarrow} + L_1) + \alpha_1 L_2] \quad (1) \end{aligned}$$

ここで、 $L_1 = \epsilon_1 \sigma T_1^4$ 、 $L_2 = \epsilon_2 \sigma T_2^4$ 、 T は絶対温度、 σ はStefan-Boltzmann定数、各添字は前掲のとおりであ

る。同様に、葉の下面が吸収する放射 L_{LD} は、

$$L_{LD} = \delta_L [L_2 + \alpha_2 (\tau_1 L_{\downarrow} + L_1)] \quad (2)$$

葉の両面から射出される全放射 $L_{\uparrow}$ は、

$$L_{\uparrow} = 2 \epsilon_L \sigma T_L^4 \quad (3)$$

したがって、葉面の有効放射 L_{LN} は、

$$L_{LN} = L_{\uparrow} - (L_{LU} + L_{LD}) \quad (4)$$

凝結過程における葉面の熱収支式は次のようになる。

$$L_{LN} + B - Q - lE = 0 \quad (5)$$

ここで、 B は葉の貯熱変化量、 Q と lE は周りの空気からの顕熱、潜熱伝達量である。

$$B = c \rho d \frac{d\theta_L}{dt} \quad (6)$$

$$Q = 2h(\theta_a - \theta_L) \quad (7)$$

$$lE = 2k(e_a - e_{SL}) = 2 \frac{h}{\gamma}(e_a - e_{SL}) \quad (8)$$

$$Q + lE = 2h \{(\theta_a - \theta_L) + \frac{1}{\gamma}(e_a - e_{SL})\} \quad (9)$$

ここで、 c 、 ρ 、 d は葉の比熱、密度、厚さ、 θ_L 、 θ_a は葉温と気温、 e_a は周りの空気の水蒸気圧、 e_{SL} は葉面での飽和蒸気圧、 l は蒸発 (昇華) の潜熱、 $\gamma = h/k$ は乾湿計定数、 h 、 k は顕熱、潜熱伝達係数である。モデル葉では蒸発、凝結過程は結霜、結露後でないといと起こらない。

4. 測定結果

4.1 葉とモデル葉の温度経過

前述の理由により、実葉の代りに模型葉を使うことにし、取り扱いの便宜上、スライドガラスと口紙を選び、大豆葉と温度変化を比較してみた。

口紙は長軸、短軸が5cmと3cmの楕円形 (面積11.8cm²) の2枚重ねとし、その間に熱電対を挟んだ。スライドガラスは7.62×2.63×0.14cm (面積20.04cm²) の大きさである。

口紙、スライドガラス、大豆葉 (面積16.4cm²) の表面温度の測定結果の1例をFig.1に示す。この夜は雲が時々出て有効放射は変動した。表面温度のうち、大豆葉とスライドガラスは有効放射の変化にはほぼ追従して併行的に変化したが、スライドガラスの方が大豆葉よりやや高温に経過した。口紙温度は両者の中間を示したが、時間的变化は前二者とやや異なる場合が時々みられた。これらの実験結果から、植物葉の代りにスライドガラスを用いてもさしつかえないと判断した。

4.2 箱内外の温湿度の比較

箱内気温と箱の近くの裸地上の気温の差をみると、晴

Fig. 1. Nocturnal changes in temperatures inside and outside the natural radiative cooling box (Dec. 19–20, 1977).

L_{No} : net long-wave radiation above the box

θ_{ao} : air temperature at 1 m height above ground

θ_p : surface temperature of the PE film covering the box

θ_A : temperature of the aluminium plate on the bottom of the box

θ_{ai} : air temperature in the box

θ_{Lf} : temperature of the oval-shaped filter paper (11.8cm²) in the box

θ_{Lg} : temperature of the slide glass (20.04 cm²) in the box

θ_{Ls} : leaf temperature of soybean (16.4cm²) in the box

夜の実験結果の多くは、箱内気温の方が裸地に比べて日没時に4℃内外低くなっており、日没から2時間経過した後はほぼ一定の温度差を保ち、日出まで続き、日出後箱内気温の上昇とともに急速に接近する。Fig. 2は若干の観測結果を示す。日没2時間後からの温度差は6~8℃、平均して約7℃に達する。一方気温の細かい時間的変化をみると、Fig. 1から明らかなように、外気温が乱れによって短周期の変動をするのに対し、箱内気温は滑らかな変化をしている。

Fig. 2には、PEフィルムを1枚張った場合(b)と2枚張った場合(a)の箱内外気温差が示されている。この図をみると、1枚張りの方が2枚張りよりも温度差の振れが大きく、前者は箱外の風の影響が大きく現われることを示唆している。Table 2には、箱内気温、モデル葉温の4夜の平均値と相互の温度を示す。PEフィルム箱内のモデル葉温は箱内気温より約2℃低い。また別の晴夜の観測では、裸地上のモデル葉温は気温より約1.5℃低い。したがって、箱内外のモデル葉温の差は平均して約7℃である。

Fig. 2. Changes in air temperature difference between the box and the open field after sunset. (a) PE double-filmed box, (b) PE single-filmed box.

Table 2. Four-days mean temperatures at various situations and their differences (a–b) in December, 1977. θ_a is open-air temperature. θ_{Pa} and θ_{PL} are air and leaf temperatures in the PE filmed box, θ_{Va} and θ_{VL} are air and leaf temperatures in the PVC filmed box, respectively.

a \ b	θ_a	θ_{Pa}	θ_{PL}	θ_{Va}	θ_{VL}
	+6.1℃	−0.6℃	−2.8℃	+3.0℃	+3.3℃
$\theta_a + 6.1℃$		−6.7	−8.9	−3.1	−2.8
$\theta_{Pa} - 0.6℃$			−2.2	+3.6	+3.9
$\theta_{PL} - 2.8℃$				+5.8	+6.0
$\theta_{Va} + 3.0℃$					+0.3

次に、箱内外の水蒸気圧と相対湿度の経過をみると、Fig. 3に例示するように、水蒸気圧は夜間漸減するが、相対湿度は気温の低下によって漸増している。なお、箱内の水蒸気圧や相対湿度は、空気を攪拌する通風式を採用できないので、精度に問題が残る。

4.3 箱底の射出率の影響

以上の実験では、箱の底にアルミニウム板(厚さ0.05 cm)を敷いた。アルミ板の長波放射の射出率は0.12である(Table 4)。これに対して、黒色エナメル塗料をスプレーしたアルミ板を敷いた箱を対比させた。この板の射出率は0.95と仮定した(Table 4)。

アルミ板を敷いた箱内の温度垂直分布の1例をFig. 4

Fig. 3. Nocturnal changes in vapor pressure and relative humidity inside (●) and outside (○) the box.

Fig. 4. Vertical distribution of air temperature inside the box, Jan. 19–20, 1977.

Table 3. Effect of long-wave emissivity of the horizontal bottom surface on the inside temperature of the box. * and ** are the average values during 1900–2300 and 1800–0600 JST. A: aluminium surface, B: black-painted surface.

Date	Bottom temperature		Air temperature		Model leaf temp.	
	A	B	A	B	A	B
March 8, 1978*	1.8°C	−4.1°C	0.6°C	−1.2°C	−2.0°C	−2.6°C
Dec. 6, " **	−2.4	−9.5	−3.3	−3.5	−5.1	−5.2
Dec. 12, " **	−1.5	−8.4	−2.3	−2.7	−4.0	−4.2
Jan. 16, 1979**	−2.6	−11.0	−2.3	−3.1	−6.0	−6.5
Jan. 19, " **	−5.3	−15.4	−5.4	−6.3	−9.6	−10.2
Jan. 22, " **	−3.6	−11.4	−3.7	−4.5	−6.9	−7.5
Average	−2.3	−10.0	−2.7	−3.6	−5.6	−6.0
Difference	7.7		0.9		0.4	

に示す。気温の傾度は非常に小さく、底面は放射による冷却が小さいので、箱裏底からの顕熱の受熱によって箱内気温よりやや高い。黒色面の箱では、長波の放熱によってアルミ板より平均して約8℃低く、箱内気温より約6.5℃低い(Table 3)。この場合、気温の垂直分布の測定をしなかったが、Fig. 4の結果から類推すると気層はさらに安定しているものとみられる。

箱内気温は黒色面箱の方がアルミ面箱より平均して約1℃、モデル葉温は約0.5℃低温であり、底面は長波の射出率を大きくした方がよいことを示した。

4.4 PE フィルムと塩化ビニールフィルムの比較

塩化ビニール(PVC)フィルムは長波に対してある程度不透明であり、箱の上面にPVCフィルムを張った場合には、PEフィルムに比べて内部の気温や葉温は下がりにくいはずである。観測の結果によると(Table 2), PVC箱内温度はPE箱内気温に比べて平均約3.5℃高いが、外気温より約3℃低く、モデル葉温は両箱間で約6℃の差となっており、PVC被覆下の葉・気温差はほと

んどない。このように、PVCフィルムの長波放射遮断の効果は明瞭であった。2枚張りの場合には、両フィルムとも1枚の場合より葉・気温差は減少した。

4.5 箱内葉面の熱収支

葉面の熱収支の計算に使用した材料の物性値、関係定数をTable 4と5に示す。これらの数値と観測値を(1)～(4)式と(6)式に入れて、葉面における有効放射量 L_{LN} と葉の貯熱変化量 B を計算すると、(5)式より顕熱、潜熱伝達量の合計量が得られる。さらに(9)式から熱伝達係数 h が求められ、この h 値を(7), (8)式に入れること

Table 4. Radiative properties of the experimental box. Symbols are the same as those in Table 1.

	PVC	PE	A	B	Glass
Transmissivity τ	0.21	0.77	—	—	—
Emissivity ϵ	0.69	0.09	0.12	0.95	0.95
(Absorptivity) δ					
Reflectivity α	0.10	0.14	0.88	0.05	0.05
Total	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Table 5. Physical constants used for calculation of heat balance.

Stefan-Boltzmann constant	σ	8.125×10^{-11}	$\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{K}^{-4}$
Specific heat of glass	c	0.18	$\text{cal} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$
Density of glass	ρ	2.46	$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
Thickness of slide glass	d	0.14	cm
Latent heat of vaporization	l	594 (5°C)	$\text{cal} \cdot \text{g}^{-1}$
		597 (0°C)	"
Latent heat of ice sublimation	l	677 (0°C)	"
Psychrometer constant	γ	0.646 (0°C)	$\text{mb} \cdot \text{C}^{-1}$

Table 6. Some examples of heat balance at the horizontal model leaf surface ($\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$, †: $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$). $L_{\downarrow}$ is the atmospheric radiation, L_{LU} and L_{LD} are long-wave irradiances at the model leaf surfaces facing upward and downward, $L_{\uparrow}$ is the total long-wave radiation emitted from both surfaces, L_{LN} is net long-wave radiation at both surfaces, B is change of heat stored in leaf, Q and lE are sensible and latent heat fluxes, h and h_f are heat transfer coefficients under actual and free convection, respectively. $h=6.0 \times 10^{-3} \times (\Delta\theta/d) \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ (Gate and Benedict, 1963). * and ** are the average values during 2000–2100 and 1800–2400 JST.

Date	$L_{\downarrow}$	$L_{LU}+L_{LD}$	$L_{\uparrow}$	L_{LN}	B	Q	lE	$h^{\dagger}$	$h_f^{\dagger}$	Surface
					$\times 10^{-3}$			$\times 10^{-2}$	$\times 10^{-3}$	
Dec. 9, 1977*	0.119	0.320	0.842	0.523	1.1	0.442	0.082	8.33	5.09	A
Jan. 16, 1979**	0.192	0.418	0.799	0.381	0.5	0.381	—	4.90	5.60	A
" 19, " **	0.152	0.364	0.750	0.386	0.4	0.386	—	4.48	5.75	A
" 16, " **	0.192	0.591	0.793	0.202	0.6	0.203	—	2.86	5.48	B
" 19, " **	0.152	0.529	0.743	0.214	0.4	0.202	0.012	2.51	5.66	B

によって顕熱，潜熱が求められる。計算結果の数例を Table 6 に示す。

h の値は $2.5 \sim 8.3 \times 10^{-2}$ の範囲をとっており，本表に記載しなかった他の観測結果の多くも $3 \sim 6 \times 10^{-2}$ の範囲にある。この値を自由対流熱伝達係数 h_f と比較してみよう。Gate & Benedict (1963) は， h_f を次の簡単な式で表わしている。

$$h_f = a \times 10^{-3} \left(\frac{\Delta\theta}{d} \right)^{1/4} \quad (10)$$

ここで， $\Delta\theta$ は葉・気温差， d は葉の代表的長さ，円筒状の場合は直径を表す。 a として，暖かい水平正方形板の上面または冷たい水平正方形板の下面の場合 7.86，暖かい水平正方形板の下面または冷たい水平正方形板の上面の場合 3.87 を与えている。また垂直正方形板と垂直円筒の場合には 6.04 と 6.00 を与えている。本実験で得られる h の値は上下両面の平均値である。したがって比較する h_f は， $a=6.0$ として計算した。 h の値は h_f より 1 けた大きな値を示している。

4.6 箱内外の各温度の経過

晴夜における箱内外の気温，モデル葉面，底面温度（アルミ面と黒色面）の日没後の観測結果の 1 例を Fig. 5 に示す。外に置いたアルミ面と黒色面の構造は，箱底と同じで，同高度に設置された。この両面は共に比較的大

Fig. 5. Temperature changes in air, horizontal model leaf and horizontal plates inside and outside the box, Jan. 19–20, 1979. ●: air, □: model leaf, ○: aluminium plate, △: black-painted plate, ----: outside the box, - - -: inside the aluminium box, —: inside the black-painted box.

きな時間的变化を示したが、その他の温度は18時以降併行的に降下し、6時までには3~5℃下った。

外に水平に置かれた面の温度の大きな変動(この図は各1時間ごとの温度を結んだもので、中間の変動を省略している)は、主として風速の変動に対応するものと思われるが、風杯式風速計の電接記録からは、はっきりしなかった。この面と箱の底面との温度差は7.5~10.5℃、モデル葉温差は7.5~8.5℃あるが、これは面上の顕熱、潜熱受熱量の違いによるものであろう。

外気温と箱の黒色底面との温度差は、日没時刻(17時30分)からわずかに30分後の18時に、約15℃に達している。

5. あとがき

側面と底面を断熱し、上面にPEフィルムを張った箱を晴夜、外に水平に置くと、長波放射によってよく冷却し、内部の気温は外気温より6~8℃も低下することが認められた。PEフィルムを二重に張った箱の場合には外気の影響が少なく、安定した温度差を保つことが知られた。したがって、通常霜害が発生しない場所でも、この箱内の植物は霜害を受けることが可能であることがわかった。

箱の大きさは任意に作るができるから、植物の大きさに応じて箱を作ればよい。ただし、箱の底面の大きさは高さに対して十分大きくとる必要があり、また底面は長波放射率の大きい方がよく冷える。

箱の内部の冷却の程度は、箱内の空気の安定性と箱の断熱性にかかわる。PEフィルムを上面に張る意味は、長波放射収支への影響を少くして箱内外空気の交換を避けることであり、箱を地上から離して固定したのは、箱内への雨水の浸入を防ぐことと、掃除や点検作業を容易にするためであった。

この箱で注意すべきことは、PEフィルム内外面の結露・結霜を防ぐことである。外面の結露は、フィルム面が内部空気によって冷却されることによって起こるので、送風機により表面に風を吹きつけ、気温に近づけることによって避けることができる。したがって、二重被覆の方が結露しにくい。内面の結露は滅多にないが、内部の多湿によって生じるので、箱の内部を日中乾かしておき、植物の鉢は日没頃箱内に設置するとよい。

なお、朝日がさす状態で放置すると、内部の気温は急激に上昇するので、速かに実験植物を取り出すか、自動カーテンで遮光する必要がある。

PVCフィルムも長波放射を約2割通すので、野外で若干の風がある場合にはPVCフィルム被覆下の葉温、気温は外部より低下する。このことについても認識しておく必要がある。

引用文献

- 1) Gate, D. M. and Benedict, C. M., 1963: Convection phenomena from plants in still air, *Amer. J. Bot.*, **50**, 563-573.
- 2) Geiger, R., 1950: *The climate near the ground*, Harvard University Press, Cambridge, 352-353.
- 3) 羽生寿郎, 山中捷一郎, 西山 司, 中山敬一, 1978: 霜害研究用の放射型霜実験装置について, *農業気象*, **34**, 7-12.
- 4) 甲藤好郎, 1968: 伝熱概論, 養賢堂, 342.
- 5) 三原義秋, 鶴田孝一, 根本 修, 1977: 防風施設によって助長される霜害, *農業気象*, **33**, 67-74.
- 6) 斉藤隆幸, 1967: 植物群落の夜間冷却におよぼす放射量および風速の影響について, *農業気象*, **32**, 65-74.
- 7) 武智 修, 1973: みかん園の微細気象と葉の熱収支に関する研究, *愛媛大農紀要*, **17**, 2, 51-184.

Summary

The present paper deals with a box which can easily cause frost damage to plants by utilizing natural radiative cooling.

One or two sheets of polyethylene (PE) film were spread on the top of the box, while the four sides and the bottom of the box were insulated with insulator boards (5cm thick). The inside surfaces of the box except the top were covered with aluminium foil (17 μ m thick) in order to reduce long-wave radiation emitted from them. The box was set up at 40cm-height above the ground. The size of the box could be changed according to the size of plants being tested. For maximizing the cooling effect of the box, however, it is necessary to make the bottom area large enough compared to the height of the box. As shown in Fig. 1, a microscope slide glass was used as a model leaf. A difference in air temperature between outside and inside the box was observed before sunset, and it reached an average of approximately 7℃ at one and a half hour after sunset (Fig. 2, Table 2). The model leaf temperature was approximately 2℃ higher than the air temperature in the box.

When the effect of a new aluminium plate covering the bottom of the box was compared with that of an aluminium plate painted black, the former resulted in a higher temperature, *i.e.* 4°C at the bottom surface and 1°C in the air (Table 3). A comparison was also made between polyvinyl chloride (PVC) film and PE film with respect to its effect on the interception of the long-wave radiation, and the result is presented in Table 2.

Data obtained with a Beckman-type atmospheric radiometer as well as the physical values of the materials of the box which were given in Tables 4 and 5 were used to calculate the heat balance on the model leaf surface. The results are shown in Table 6. The heat transfer coefficient, h , obtained from the heat balance calculation was compared with the free convection coefficient, h_f (Gate and Benedict, 1963), and was discussed for the error. The mean range of h values obtained was 3 to $6 \times 10^{-2} \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$.

Items of special notice from the use of this box are as follows:

- (1) A box with double PE layers reduces, more effectively than that with a single PE layer, the variation of the difference in the air temperature between outside and inside the box. Therefore, the former is more superior than the latter.
- (2) The greater the long-wave emissivity of the bottom surface, the cooler the box is.
- (3) Wind should be blown on the PE film from the outside of the box to prevent the condensation of dew or the sublimation of frost on the film.
- (4) The plant should be taken out of the box or shaded by an automatic shading sheet fitted on the box after sunrise, since the air temperature in the box may rise quickly due to solar radiation in the morning.