無加温ハウスの純放射，地熱流の測定例

小 倉 祐 幸

(宇都宮大学農学部)

Some Results of Actual Observations of Net Radiation
and Soil Heat Transfer in Unheated Greenhouses

Yukoh OGURA

(Faculty of Agriculture, Utsunomiya University,)
Utsunomiya, Tochigi-ken 321

I. ま え が き

一般に暖房負荷の算出には暖房負荷係数が用いられてきた(高倉・岡田, 1972; 山本, 1973; 三原, 1980)。たとえば, 一重被覆で $5.5 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$, 二重被覆で $3.5 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$ といった値が示されている。これは, 最大負荷を概略的に算出する場合に有用であるが, より正確に暖房負荷を求めようとする場合には, 被覆材を通過する貫流熱量, すき間を介して放熱する換気熱量, 室内と土壌との熱交換による地中伝熱量などをそれぞれ積算する必要がある。

ところで, 現在, この地中伝熱量については, 暖房ハウスに対しての概略値が与えられているのみで(三原, 1980), その研究例にとぼしい。とくに, 無加温ハウスでは, 地熱の他に夜間の熱源はないので, 暖房負荷係数は用いられず, 保温性や熱収支の検討に当って, 地熱流の正確な値が不可欠である。そこで, 今回, いくつかのハウスで地熱流を測定し, 床面から室内への放射熱の比率や熱伝達率などを求めたので参考までに報告したい。

II. 測 定 方 法

ハウス内で日中, 床面に近い所で純放射を測定してえられる正の日積算純放射受熱量を S_d とする。また, 日中にハウス床面の浅い所で地中への熱流量を測定してえられる地中方向への日積算地熱流量を B_d とする。

これらの比, B_d/S_d を放射蓄熱比と名付けると, これはいわば受熱のうち, 地中に蓄熱される熱量の比率をあらわし, これが大きいハウスほど, 昼間の日射の床面への蓄熱の効率の良いことになり, 一種の日射蓄熱効率の指標として有用と考えられる。すでに岩切(1971)が

この測定例について報告しており, その他にも報告例が見られる(瀬尾, 1977)。

つぎに, 夜間, 地中から室内への放熱に向かう地熱流の一晚の積算地熱量を B_n とし, 夜間の室内純放射の積算放熱量を S_n とする。これらの比, S_n/B_n を放射放熱比と名付けると, これは床面放熱のうち放射の占める割合を示し, 残りは対流伝達熱とみこまれる。

また, 日中に地中に蓄えられた熱 B_d と, その晩に放出される地熱 B_n は, おおむね一致するものと予想されるが, 実際には地温上昇分や周辺からの散逸分あるいは深部土壌からの給熱等が影響を及ぼすようで, 個々に検討を要すると思われる。

測定ハウスとしては, 小型ビニールハウス(間口 45 cm, 奥行 45 cm, 側壁 45 cm, 高さ 60 cm 両屋根式・密閉・無栽植, 保温比 0.18)で床面の土壌や含水率を変えた場合, 一坪ビニールハウス(間口 1.84 m, 奥行 1.84 m, 側壁 1.62 m, 高さ 1.88 m, 無栽植, 保温比 0.21)で側壁や屋根を二重にした場合のほか, 各種連棟大型ビニールハウスで測定を行った。後者のうち, シンビジウム栽培ビニールハウスおよびトマト栽培ビニールハウスは, 井水散水二重屋根ハウス(小倉ら, 1981)で無加温であるが, イチゴハウスおよびブドウハウスでは冷え込みのきびしい夜に温風暖房機による加温が行われた。しかし, 著しい高室温にされるようなことはなかった。

純放射計(英弘精機)は地上約 50 cm で測定, 地熱流は熱流板(英弘精機)を床面下 0.5 cm に埋めて測定し, ともにレコーダーに連続記録した。測定は 1979 年 6 月より 1981 年 5 月に行った。

III. 測定結果および考察

(1) 土壌水分が放射蓄熱比におよぼす影響

一般に土壌の熱伝導率および熱容量は水分量の増加に

昭和 56 年 9 月 11 日 関東支部会にて発表

昭和 56 年 9 月 17 日 受理

よって著しく増大することが知られている。したがって、屋間の地中への蓄熱が床面の含水率によって影響されることが予想される。事実、岩切(1971)のビニールハウス(無栽植・密閉)の放射蓄熱比の測定でも、床にビニールフィルム・マルチをした時の0.23から、湿潤床で0.46、湛水床面の0.92まで、水分量の増大につれて明らかに放射蓄熱比増大の傾向が示されている。

小型ビニールハウスでの遮光実験の結果をTable 1に示す。曇の日は晴の日よりも、それぞれ放射蓄熱比は僅かながら大となっている。さらに、晴天下で対照区よりも遮光区で著しく大となっている。これは、雲や遮光ネットにより日射がさえぎられる場合に S_d は小さくなるが、外気温や室温は、それほど低下しないで、 B_d への顕熱伝達が比較的盛んなことによると説明されよう。このことから、遮光ハウスなどでは放射蓄熱比だけで蓄熱性を判定することは無理があり、あわせて B_d や S_d の絶対値をもみる必要も生じるといえよう。また、このように保温比が0.18と小さいハウスでは、かなり湿潤な床面をもっていてなかなか0.4以上の大きな放射蓄熱比は示されないことが判った。

つぎに石英砂は通常の土壌よりも熱伝導率が高いので蓄熱に有利なものではないかと考えられ、床面を川砂に変えて測定してみた結果をTable 2に示す。7月19日は曇天のため放射蓄熱比の値がやや大となっていると考えられる。しかし、全体的に放射蓄熱比の値はかなり変動が大きいように思われる。それよりも、砂床に十分に水をまいて含水量を飽和に近くするように努めたにもかかわらず、とくに表面から乾き易く、0.4を越す高い放射

Table 1. Heat storage ratio of a miniature greenhouse with wet volcanic ash floor.

(unit of B_d and S_d ; cal/cm²)

	Control			Shade		
	B_d	S_d	B_d/S_d	B_d	S_d	B_d/S_d
Fine	62.6	210.0	0.30	34.3	48.0	0.71
Cloudy	34.3	100.5	0.34	18.4	24.7	0.74

June 23-27, 1979

Table 2. Heat storage ratio of a miniature greenhouse with very wet sandy floor.

(unit of B_d and S_d ; cal/cm²)

Date	July			Aug.		
	19	20	21	7	8	10
B_d	26.2	90.8	86.7	38.4	40.8	64.6
S_d	66.0	291.7	223.5	124.5	187.5	259.5
B_d/S_d	0.40	0.31	0.39	0.31	0.22	0.25

Table 3. Heat storage ratio of a small greenhouse covered with single and double layers of vinyl film.

(unit of B_d and S_d ; cal/cm²)

Date	Single		Double	
	Aug. 13	14	May 26	27
B_d	43.5	38.1	46.6	43.5
S_d	223.2	180.0	287.7	283.0
B_d/S_d	0.20	0.21	0.16	0.17

蓄熱比はえられなかった。したがって、砂を客土するだけで簡単に放射蓄熱比が大幅に改善されるというようなことは期待できそうにないと思われた。

また、無栽植の一坪ビニールハウスでの測定を、全ビニール面を間隔10 cm程の二重被覆とした場合をあわせてTable 3に示す。これから、二重にただけで放射蓄熱比が上昇するとは言えそうにない。

その他、1981年1月13日より4月8日までの各種大型ビニールハウスでの測定を通して、つぎのような結果がえられた。まず、床面が常に十分に湿っているシンビジウムハウスでは平均して0.55と高い値がえられ、トマトハウスは土壌水分が比較的少ないので0.30と小さく、イチゴハウスでは0.35~0.54の値が示され、ブドウハウスでは、床土の水分の多い時の0.54から、乾いてくると0.33にまで減少した。

これらを通じて、概して放射蓄熱比は土壌水分に主として支配され、乾いたハウスでは0.3以下であるが、湿ったハウスでは0.5以上にもなるようである。

(2) 放射放熱比

一坪二重被覆ハウスで、夜間の上向地熱流積算値 B_n および床面から屋根フィルムへ向かう純放射積算値 S_n を測定した。その結果、放射放熱比 S_n/B_n は0.4~0.9と大きいバラツキを示した。その他の大型ビニールハウスの測定結果では、 S_n/B_n は、シンビジウムハウスで0.78、トマトハウスで0.85、イチゴハウスで0.75~0.88、ブドウハウスで、0.77~0.88といった値がえられた。これらの測定結果から、大型ハウスでは放射放熱比は0.8前後であることが多く、したがって対流熱伝達分は0.2程度と小さいことが明らかである。これは、室内空気がほとんど静止していることなどによるものと考えられる。

早朝の最低気温時の瞬時値の s_n と b_n との関係を示したのがFig. 1で、放射放熱比は0.7~0.9である。放射放熱比の早朝の瞬時値として、このほかトマトハウスは平均0.94、イチゴハウスは0.74~0.93といった値が示され、概して積算値の場合と大差ない値となっているようである。

Fig. 1. Relation between the soil heat flux and the net radiation at dawn.

● Cymbidium house, ○ Grape house.

(3) 地中への流入出熱量の比較

他にとくに原因がなければ，日中床面に貯えられた熱量に等しい熱量が夜間に放出されて，地中への流入量は収支つぐなわれている筈である。そこで B_d と，その夜間の B_n とを比較してみた。

一般に，熱流板の測定では測定誤差が大きいと考えられるので，わずかな差を論じるのは困難なようであるが，長期連続の測定では，ある程度の信頼性がおけよう。そこで，シンビジウムハウスの連続 10 日間の測定の平均でみると， $B_d=28.6$ ， $B_n=35.6$ で B_n の方が 1 日につき 7.0 cal/cm^2 大であった。ちなみにトマトハウスでは $B_d=26.7$ ， $B_n=31.1$ で B_n が 4.4 cal/cm^2 大であった。しか

し，トマトハウスはわずか 2 日の測定なので，シンビジウムハウスについてみると，日平均地表温が $13\sim 14^\circ\text{C}$ で地下水温が 16°C 程度であるから，一部は地下水からの熱と思われるが，その他，深部土壌からの熱補給あるいは土壌有機物の分解による発熱も考えられるのではないかと推定された。

イチゴハウス，ブドウハウスでは地熱流の他に，地表と 5 cm 深さの地温を測定したので，これらの 2 時間毎の温度差から，日中の地中への熱量のデグリーアワー ($D_d \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{hr}$)，および，夜間の地中から地表への熱量のデグリーアワー ($D_n \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{hr}$) を求め，それぞれ， B_d や B_n と対比してみた (Table 4)。

この結果，2 月のイチゴハウスでは通常の晴天日には D_d と D_n ， B_d と B_n は概略一致した。しかし，日中晴で夜間曇の日では当然 $D_d > D_n$ ， $B_d > B_n$ となり，反対に日中曇で夜晴れた日には $D_d < D_n$ ， $B_d < B_n$ となる傾向がみられた。このことは山本 (1973) や瀬尾 (1977) によっても指摘されている。また，逆に 3 月のブドウハウスでは春の昇温期に当り，夜間の冷えこみは，すっかりゆるんだため $B_d > B_n$ となったのではないかと推定された。その他の測定例もあわせて図示したのが Fig. 2 である。

これで見ると， B_d/D_d の方が B_n/D_n よりも少し大となっている。これは D_d がやや過小に測定されていることによるのではないかと推定された。すなわち，昼間の地中への温度勾配は，地表に近い所で，かなり急勾配になっているため，熱流板は地表近くの急勾配の所にあるのに対し，地表と -5 cm の温度でみたデグリーアワーは過小にみつめられるためであろう。

したがって，つぎに二重被覆一坪ビニールハウスで地温を地表と -1 cm とで測定し，これからデグリーアワーを求めた場合を Fig. 2 に白丸で示した。勾配が急なのは間隔が 5 cm から 1 cm に減じたことから当然であるが，

Table 4. Comparison of degree hour and soil heat flux.

	Strawberry house						Grape house		
	Feb. 11	12	13	14	15	17	Mar. 16	18	19
Weather	fine	fine	fine	fine	rainy	rainy	fine	fine	fine
$D_d \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{hr}$	34.4	32.0	30.0	25.4	6.0	0.4	85.2	68.8	58.8
$B_d \text{ cal/cm}^2$	55.5	48.1	44.0	38.7	13.4	2.3	81.9	80.5	73.4
	Feb. 11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	17-18	Mar. 16-17	18-19	19-20
Weather	fine	fine	cloudy	cloudy	fine	fine	fine	cloudy	cloudy
$D_n \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{hr}$	37.0	34.6	20.6	17.6	20.6	31.6	80.4	57.2	39.0
$B_n \text{ cal/cm}^2$	45.3	41.3	22.7	22.7	27.1	27.7	45.9	52.7	36.3
	$D_d \leq D_n$ $B_d \geq B_n$		$D_d \gg D_n$ $B_d \gg B_n$		$D_d \ll D_n$ $B_d \ll B_n$		$D_d > D_n$ $B_d \gg B_n$

Fig. 2. Relation between the soil heat flux (B) and the degree-hour (D).

- Strawberry house, × Grape house,
- Double-layer house.

今回の方がおおむね直線状に分布するので測定精度は向上したといえるようである。すなわち、地熱流にあわせて地温を測定する場合は、なるべく熱流板の上下で温度勾配が等しくなるように測点を選ぶのがよいといえよう。

白丸全体について平均的な熱伝導率を求めると、温度勾配 $20^{\circ}\text{C} \cdot \text{hr}/0.01\text{ m}$ で熱流量 $60\text{ cal}/\text{cm}^2$ 程度であるから $0.3\text{ kcal}/\text{m} \cdot \text{hr} \cdot ^{\circ}\text{C}$ がえられる。イチゴハウスとブドウハウスについては、夜間の測定値 (D_n , B_n) を用いて同様に平均的な熱伝導率を求め、それぞれ $0.625\text{ kcal}/\text{m} \cdot \text{hr} \cdot ^{\circ}\text{C}$ および $0.50\text{ kcal}/\text{m} \cdot \text{hr} \cdot ^{\circ}\text{C}$ をえた。しかし、地中 $0 \sim 5\text{ cm}$ の温度勾配は $0 \sim 1\text{ cm}$ の温度勾配より小さいことから、これらの値は概して 20% 過大なことが推察され(原, 1981), より正確な値として、それぞれ 0.5 および $0.4\text{ kcal}/\text{m} \cdot \text{hr} \cdot ^{\circ}\text{C}$ が見込まれた。

(4) 夜間床面の熱伝達率

夜間の地熱流速度から純放射強度を差引いた残りは対流熱伝達速度と見込まれる。これを地表温と室温との温度差 $\Delta\theta$ で除して床面から室内への熱伝達率を推定した。室温としては、できるだけ地表に近い所の気温とした。すなわち、シンビジウムハウスは地上 40 cm , トマトハウスは 50 cm , イチゴハウスは 40 cm , ブドウハウスは 85 cm の室温を用いた。また、測定時刻としては、できるだけ日出前の安定した最低温時として 6 時をえらんだ。しかし、ブドウハウスでは 3 月で、6 時では日の出の影響をうけるので 4 時の値を用いた。また、シンビジウムハウスでは諸条件が安定していたので 20 時から 6 時ま

Fig. 3. Relation between the temperature difference ($\Delta\theta$) and the convective heat transfer ($b_n - s_n$).

- ◎ Sayama glasshouse, ◎ Takamatsu glasshouse,
- × Grape house, ▽ Cymbidium house,
- Tomato house, • Strawberry house.

での値を用いた。これらの結果を瀬尾(1977)のガラス室の例もあわせて、Fig. 3 に示した。

各測点は条件の違いの大きいことを反映して大きくバラツキており、最大は佐山ガラス室の 5.0 から最小はイチゴハウスの $0.09\text{ [kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^{\circ}\text{C}]$ に広く分布している。イチゴハウスは天候や暖房の有無など、条件がまちまちなことから、かなりバラツキが大きい。トマトハウスでは著しく小さい。これは B_n の測定値が過小であることを示すようにも考えられ、更に検討を要する。シンビジウムハウスの熱伝達率は平均 $1.68\text{ kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^{\circ}\text{C}$ を示した。

ブドウハウスでは平均 $2.54\text{ kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^{\circ}\text{C}$ で今回の測定例中では最も大きい。これは天候が不安定で風速の影響も加わり、また、ハウスの密閉度・カーテンの密閉度もおとることなどによるものと推察された。大型二重被覆ビニールハウスとしてシンビジウムハウスの値が代表的ではないかと思われた。

(5) 内外気温差と地中伝熱量

ハウスの暖房計画に、内外気温差などとの関係で地中伝熱量が与えられることが望ましい。そこで、最低温時の測定値について総括的に横軸に内外温度差 Δt をとり、縦軸に地熱流 b_n をとり図示したのが Fig. 4 である。

図で白丸はトマトハウスの例を、点入り白丸はブドウハウスの例を、三角はシンビジウムハウス、黒点はイチ

Fig. 4. Relation between the soil heat flux and the air temperature difference.

+ Yamamoto's house, × Seo's glasshouse,
⊙ Grape house, ▽ Symbidium house,
○ Tomato house, ● Strawberry house.

ゴハウスを示す。クロスは瀬尾(1977)のブドウ温室の測定値および山本(1973)の測定値をあわせてのせた。

白丸のトマトハウスおよび、点入り白丸のブドウハウスの測点は、左上から右下への帯状に分布している。すなわち、ある特定のハウスをとると、室内気温は日々なるべく変化しないように管理される。しかし、外気温が下れば Δt は大となり、それにつれて室温は低目になりやすく、一方、深部地温は急には変化しないので地熱流は大きくなり易い。反対に外気温が上がれば Δt は小となり、室温が高目に経過し、地熱流は小さめに止まる傾向がある。したがって、このように一つのハウスで種々の外気条件下の測定結果をみると、左上から右下への帯状に分布するのである。

ところで、暖房計画では最も外気温の下がる場合が問題となるのであるから、この分布帯の右下端あたりが重要となる。このような端を結べば、左下から右上へ向かう直線状の境界域として設計条件が考えられる。図の右上がりの直線(実線)は、三原(1980)(岡田)の安全率を見込んだ提案値であるが、この線はやや安全率が大きすぎるようで、二重被覆ハウスなどに対しては少なくとも、設計地熱流をさらに $10 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{hr}$ 程度ずつ増し、Fig. 4 の点線としてもよいのではないかと考えられる。

IV. 摘 要

連棟ハウスの昼夜の純放射および地熱流を測定した。

(1) 放射蓄熱比：日中の地中への熱流の純放射に対する比は遮光下で大きくなる傾向を示し、土壤水分が多い場合に 0.5 以上の高い値がえられた。

(2) 放射放熱比：夜間の純放射の地中からの熱流に対する比はおおむね 0.8 前後を示し、対流熱伝達率は 0.2 程度と比較的少ないことが推定された。

(3) 地熱流量と、地表と -1 cm の地温差とは比較的良好な比例関係にあることが判った。湿潤な火山灰床土の熱伝導率として $0.4 \sim 0.5 \text{ kcal/m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$ がえられた。

(4) 夜間、床面の対流熱伝達率を、地表温と室温との温度差と、純放射と地熱流との差から求めた対流熱とにより求めた。二重被覆連棟ハ

ウスの代表的な値として $1.7 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$ がえられた。

(5) 内外気温差と地熱流の関係図から、設計地熱流を若干大きく見直すことを提案した。

引用文献

- 1) 岩切 敏, 1971: 栽培用ハウス内温度環境の予測と制御に関する研究, 防災センター研報, **6**, 1~139.
- 2) 原 道宏, 1982: 井水散水 2 重被覆ハウスにおける温度環境の形成機構(2) 冬期夜間における床土表面温度形成機構の解析, 生物環境調節, 投稿中.
- 3) 三原義秋著, 1980: 温室設計の基礎と実際, 地中伝熱量, 養賢堂, 東京, p.184.
- 4) 小倉祐幸, 河又虎好, 竹永 博, 中島教博, 1982: 二重屋根ハウスの井水散水による加温性, 農業施設, 投稿中.
- 5) 瀬尾琢郎, 1977: 加温温室における 地中伝熱—岡山マスカット温室の場合, 農学研究, **56**, 85~94.
- 6) 高倉 直, 岡田益己, 1972: 実測による温室暖房負荷係数の決定, 農業気象, **27** (3), 93~98.
- 7) 山本雄二郎, 1973: 暖房ハウスにおける 地中伝熱観測例, 農業気象, **28** (3), 173~180.

Summary

The net radiation and soil heat transfer have been measured day and night in multi-span greenhouses.

(1) The heat storage ratio: The ratio of the soil heat transfer to the net radiation in the daytime became larger under the shade and the high value of larger than 0.5 was obtained in the case with high soil moisture.

(2) The radiant heat ratio: The ratio of the net radiation to the soil heat transfer in the night-time was about 0.8, therefore the ratio of heat convection was estimated so small as about 0.2.

(3) The good proportional relation was found between the soil heat transfer and the soil temperature difference from the floor surface to the depth of 1 cm. The thermal conductivity of 0.4–0.5 kcal/m·hr·°C was obtained for the wet volcanic ash floor.

(4) The convection heat transfer coefficient of floor surface in the night-time was calculated from the temperature difference between soil surface and room air, and the convective heat flux which was obtained from the difference between net radiation and soil heat transfer.

The typical value of 1.7 kcal/m²·hr·°C was obtained for the double-roofed multi-span greenhouse.

(5) The design values of soil heat transfer should be modified a little larger than the present values, in reference to the temperature difference between inside and outside as shown in the figure.