暖房デグリアワーの算定法について

—日本農業気象学会施設園芸研究部会からの提案—

施設園芸研究部会

A Proposal for the Method to Estimate
Greenhouse Heating Degree Hour

Commission for Protected Cultivation

1. はじめに

1982年5月11日に日本農業気象学会施設園芸研究部会が主催する第3回研究集会が開催され、暖房デグリアワーの算定法に関する話題提供および討論がなされた(日本農業気象学会施設園芸研究部会, 1982)。

本稿は、この時の議論にもとづいて、上記算定法に関する当部会としての現時点における意見を提案の形で取りまとめたものである。なお、取りまとめに当っては、取りまとめ方針について的小沢(副部会長)のメモをふまえて、古在(部会幹事)が第1次案を起草し、これを矢吹(部会長)・小沢・高倉(幹事)・内藤(幹事)の4名が検討、再三にわたる修正のあとででき上がったものが本稿である。したがって、本稿は部会名による公表になっているが、直接の責任は上記の部会5役員にあることを銘記しておく。また、上記集会においては、本稿で述べる提案の他に、三原(1978)または大原(1982)の方法を支持する意見もあり、我々もこれが最善のものとは思っていないが、現在実用に供するものとしては、比較的無難なものであるとの見解は持っている。

ところで、本稿で提案する算定法は、一定期間中における平均日暖房負荷を算定するという実用的目的のために考えられたものであり、一応の目安としては、暖房デグリアワーの算定誤差を実際の暖房デグリアワーの5%程度とすることを目標とした。

2. 暖房負荷算定法

暖房デグリアワーの算定は、暖房負荷の算定と密接な関連があるので、その取扱いに当っては、その前提として暖房負荷についてふれることが必要である。そこで、

まず暖房負荷算定法について述べることにするが、これら算定法の理論的または実験的根拠については簡単にふれるにとどめた。細部にわたる論議に関しては引用文献を参照されたい。

2.1 基本式

床面積当りの日暖房負荷(暖房必要熱量) q_g (kcal/m²/day)を次の式(1)~(3)で表わす(古在ら, 1982b)。

$$q_g = q_d + q_n \quad (1)$$

$$q_d = h_d \cdot DH_d / \beta - q_{solar} \quad (q_d \geq 0) \quad (2)$$

$$q_n = h_n \cdot DH_n / \beta - q_{soil} \quad (q_n \geq 0) \quad (3)$$

ここで、 q_d , q_n は、各々、昼間(日出から日没まで)暖房負荷、夜間暖房負荷である。 h_d , h_n は、各々、昼間および夜間の放熱係数(熱貫流率と換気伝熱係数の和、単位は kcal/m²/hr/°C)である。 DH_d , DH_n は、各々、昼間および夜間の暖房デグリアワー(°C・hr/day)である。 β は保温比(=床面積/壁面積)、 q_{solar} (kcal/m²/day)は温室内透過日射による取得熱量のうち昼間暖房負荷の減少に寄与する熱量、 q_{soil} (kcal/m²/day)は夜間地表熱流である。ただし、 q_d または q_n の値が負となった場合は、各々をゼロとする。なお、 q_{soil} は、従来、地中伝熱量、地熱流、地中熱流、地中熱流束などと呼ばれている。ここでは、 q_{soil} が「地中」ではなく、「地表」における熱流であること、また、単位面積当りの熱流量であることを明確にするために、「地表熱流」と呼ぶ。一般には、ここで言う「熱流」を「熱流束」と呼ぶことが多いが、「熱流束」は「熱流速」と間違われやすいので、単に、「熱流」と呼ぶことにする。

2.2 夜間暖房負荷

式(3)の h_n の値は被覆材、被覆方法および気象条件などによって異なる。標準気象条件下における被覆材・

表1 被覆材の種類・被覆方法別の放熱係数値例
(岡田, 1980)を一部改変

被 覆 方 法	被 覆 材	放熱係数 (kcal/m ² /hr/°C)
固 定 一 重 被 覆	ガ ラ ス 室	5.3
	ビニールハウス	5.7
固 定 二 重 被 覆	ガラス, 塩化ビニールフィルム	3.2
	ポリエチレンフィルム	3.4
一層可動カーテン	ポリエチレンフィルム	3.7
	塩化ビニールフィルム	3.4
	不 織 布	4.0
	アルミ粉末混入フィルム	3.2
	アルミ蒸着フィルム	2.7
	アルミ箔ポリエチレンラミネートフィルム	2.7
二層可動カーテン	ポリエチレンフィルム二層	2.9
	ポリエチレンフィルム+アルミ蒸着フィルム	1.9
	ポリエチレンフィルム+アルミ箔ポリエチレンラミネートフィルム	1.9
外 面 被 覆(可動)	温室用ワラゴモ(メロン温室用)	2.1
ペレット被覆(可動)	発泡スチレンペレット(厚さ 10 cm)	0.39

注 1) 上記数値は最大暖房負荷算出用として提示されたものである。従って本稿で目的としている平均暖房負荷算出用の放熱係数の数値としては過大な値となる。

注 2) 放熱係数は設定気温・外部気象条件によっても可変のものであり、平均値としては上記の値に 0.8 を乗じて得られ数値がはば妥当であるという実測例がかなり多い。

被覆方法別の放熱係数の数値例を、表 1 に示す。 q_{soil} の値は、昼夜設定室温、地温、土壌の熱特性、植被状態、マルチの有無などによって異なる(岩切, 1971; 山本, 1973; 園芸施設複合環境調節研究会, 1980; 岡田, 1980; 関山ら, 1980; 橋本, 1982; 古在ら, 1982a; b; 小倉, 1982; 岡田, 1982; 大内, 1982; 関山, 1982; 関山ら, 1982; 武内ら, 1982)。 q_{soil} の概略の数値例を表 2 に示す。

2.3 夜間暖房負荷

式(2)の放熱係数 h_d の数値例は表 1 に示されている。昼夜共被覆方法が同じ場合は式(2), (3)の h_d と h_n は同一の値となる。

q_{solar} の数値例を屋外日積算全天日射量 $\int q_s dt$, 放熱係数, 夜間暖房デグリアワー, 保温比, 昼時間(日出から日没まで)の関数として図 1 に示す(古在ら, 1982b)。 h_d , β および T が一定であるとする, q_{solar}

表 2 夜間地表熱流 q_{soil} の数値例(関東地方)
(岡田, 1980; 関山ら, 1980; 橋本, 1982; 古在ら, 1982b; 大内, 1982; 関山ら, 1982)

作物名	夜間設定室温	時 期	q_{soil} (kcal/m ² /day)
ト マ ト	7-8°C	12月-2月	120-150
ト マ ト	7-8°C	11月, 3月	140-170
キ ュ ウ リ	11-12°C	12月-2月	100-130
キ ュ ウ リ	11-12°C	11月, 3月	130-160

図 1 q_{solar} におよぼす屋外日積算全天日射量 $\int q_s dt$ および $h_d \cdot DH_d / (\beta \cdot T)$ の影響(古在ら, 1982b)

は, DH_d が大であるほど大となり, その傾向は $\int q_s dt$ が大であるほど大となる。これは, DH_d の値が小さい場合は, 少ない $\int q_s dt$ のみで室温が容易に設定値以上となり, それ以上の $\int q_s dt$ の増大は暖房負荷の減少に寄与しないからである。

3. 暖房デグリアワー算定法

3.1 夜間暖房デグリアワー算定法

式(3)における夜間暖房デグリアワー DH_n は次式で

算定される(林・古在, 1982)。

$T_c \geq T_x$ のとき

$$DH_n = x \cdot \Delta\theta_{cl} - \frac{x^2}{48} \Delta\theta_{hl} \quad (4-1)$$

$T_c < T_x$ のとき

$$DH_n = 12 \frac{\Delta\theta_{cl}^2}{\Delta\theta_{hl}} \quad (4-2)$$

ただし、

$$T_x = \frac{1}{24} \{ x \cdot T_h + (24-x) \cdot T_l \}$$

である。

ここで、 T_c は設定室温、 x は夜時間(日没から日出まで)、 T_h は日最高外気温、 T_l は日最低外気温、 $\Delta\theta_{cl} = (T_c - T_l)$ 、 $\Delta\theta_{hl} = (T_h - T_l)$ である。また、 T_x はほぼ日平均気温に近い値を示す。

DH_n の算定式が条件によって二つに分けられているのは、図2に示した理由による。

上式において、夜時間 x を 14 時間と仮定し、 DH_n を $\Delta\theta_{cl}$ と $\Delta\theta_{hl}$ の関数として表わしたのが図3である。図3において、横軸は外気温日較差 $\Delta\theta_{hl}$ (日最高外気温と日最低外気温の差) であり、たて軸は暖房デグリアワー ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{hr/day}$) である。図中の右下りの実線および破線に付された数字は設定室温と日最低外気温の差 $\Delta\theta_{cl}$ を示す。夜間暖房デグリアワー DH_n を求めるには実線を用いる。たとえば、 $\Delta\theta_{hl}$ が 15°C 、 $\Delta\theta_{cl}$ が 20°C のとき、 DH_n は約 $220^{\circ}\text{C} \cdot \text{hr/day}$ となる。

3.2 昼間暖房デグリアワー

式(4)において、 $x=24$ とすると、全日(24時間)に関する暖房デグリアワー DH_o が求まる。したがって DH_o

から夜間暖房デグリアワー DH_n を差引くと、昼間暖房デグリアワー DH_d が求まる。すなわち、

$$DH_d = DH_o - DH_n \quad (5)$$

図3において、破線の $\Delta\theta_{cl}$ の値に対応させてたて軸上の値を求めると、それは全日に関する暖房デグリアワー DH_o となる。したがって、同一の $\Delta\theta_{hl}$ に関する破線と実線の $\Delta\theta_{cl}$ に対応するたて軸上の値の差 ($DH_o - DH_n$) から、昼間暖房デグリアワー DH_d を求めることができる。たとえば、 $\Delta\theta_{hl} = 15^{\circ}\text{C}$ 、昼間の $\Delta\theta_{cl} = 20^{\circ}\text{C}$ のとき、全日の DH_o は $300^{\circ}\text{C} \cdot \text{hr/day}$ となる。他方、 DH_n は上述の通り、 $220^{\circ}\text{C} \cdot \text{hr/day}$ であるから、式(5)から、 $DH_d = 80^{\circ}\text{C} \cdot \text{hr/day}$ が求められる。

4. 解 説

4.1 基本式

熱収支的立場から式(1)～(3)を解釈すると図4のようである。同図において、温室と外界との境界は壁面および床面で分けられていると考える。室温が設定値に維持され、かつ、室温が外気温より高いとき、温室から外界へ失われる熱量は、昼間は q_d 、夜間は q_n となる。暖房負荷 q_g 以外に外界から温室内へ投入される熱量は、主に、昼間は q_{solar} 、夜間は q_{soil} である(古在ら, 1982b)。

式(1)～(3)における q_{solar} 、 q_{soil} が種々の条件下でどのような値となるかに関する測定例は少ない。図1、表2の数値例は暫定的なものである。これらに関しては早急に事例測定の蓄積とその整理が必要である。

更に、式(2)～(3)におけるような地表熱流、日射量の扱いは必ずしも最善とは言えないであろう。今回は実

図2 (4)式から求まる夜間暖房 DH を示す図

外気温の日変化は日最高気温 (T_h) と日最低気温 (T_l) を結ぶ直線で近似されている。式(4)は設定室温 T_c が T_x より高い場合と低い場合の二通りに分けられる。ここで T_x は、 T_h と T_l の間を昼時間対夜時間の比で内分した温度である。夜時間が 14 時間の場合 $T_x = \frac{7}{12} T_h + \frac{5}{12} T_l$ となる。式(4)から求まる夜間暖房 DH (夜時間 14 時間の場合) は $T_c \geq T_x$ となる前者の場合、すなわち、(a) の場合には斜線で示す三角形 A と長方形 B の面積の和となる。後者、すなわち、 $T_c < T_x$ の (b) の場合には斜線の三角形の面積となる。

図3 DH推定線図(林・古在, 1982)

設定室温(T_c), 日最高外気温(T_h), 日最低外気温(T_l)から $\Delta\theta_{hl}$, $\Delta\theta_{cl}$ を定める。破線は一日(24時間)のDH, 実線の斜線は夜間(14時間)のDHである。

図4 暖房温室における熱収支基本要素

用の便を第1としたが, 測定例の整理と併せて, 将来は, 式(2)~(3)の改良が必要となる可能性もある。

たとえば, 室温の高低ばかりでなく, 地温, 土壌の熱的特性, 作物繁茂状態なども地表熱流 q_{soil} に影響を及ぼすであろう。

4.2 昼夜の暖房負荷の分離

従来, 暖房負荷算定式が全日に関するものか, 夜間のみにに関するものかは明示されない場合が多かった。

式(1)において q_g を q_d と q_n に分離したのは次の理由による(古在ら, 1982b)。第1に, 実際栽培においては, 夜は保温カーテンを閉じるが昼はそれを開けておく方が多い。この場合, 昼夜の放熱係数が等しい($h_d = h_n$)と仮定すると壁面放熱量の算定誤差が大となる。第2に, 変温管理装置を用いる実際においては, 昼の暖房設定室温を夜のそれより5~10℃高くするのが普通である。たとえば, トマトとキュウリでは夜間設定室温は, それぞれ, 7℃, 11℃程度であるが, 昼のそれは15℃程度とすることが多い。この場合, 昼夜の平均設定室温に関する暖房デグリアワーに放熱係数, および保温比の逆数を乗じて求めた床面積当りの壁面放熱量は実際の放熱量と多少異なると考えられる。

以上により, 関東以西の太平洋沿岸地方などのように経験的に q_g に対する q_d の占める割合が5~10%以下であることが知られている場合は, 式(3)で求めた q_n をもって q_g に代える, または, DH_n を求める際の夜時間を実際より1時間程度長くし, その DH_n にもとづいて求めた q_n をもって q_g に代えることができよう。

逆に, q_d が q_g に比して無視できない場合は, q_d と q_n を別々に求めて, 両者の和として q_g を求める。

昼間暖房負荷 q_d を求める式(2)において, q_{soil} の項を無視したのは, その値が, 一般に, q_{solar} のそれに比して小さい(5~10%以下)と考えたからである(古在ら, 1982b)。

4.3 従来法との関係

(1) 夜間暖房負荷

夜間暖房負荷 q_n の算定式としては, 従来, 式(2)の他に, 次の二つの形式で表わされている(古在, 1981; 林,

1982)。

$$q_n = U_n \cdot DH_n / \beta \quad (6)$$

$$q_n = h_n \cdot DH'_n / \beta \quad (7)$$

U_n は、通常、暖房負荷係数と呼ばれている。式(3)における地表熱流 q_{soil} は、式(6)では U_n の中で、また、式(7)では DH'_n の中で考慮されている。すなわち、式(3)と式(6)、(7)を比較すると、

$$U_n = h_n - \beta \cdot q_{soil} / DH_n \quad (8)$$

$$DH'_n = DH_n - \beta \cdot q_{soil} / h_n \quad (9)$$

の関係があることがわかる。

以上のように、 q_n を算定するために式(6)、(7)を用いるにしても、本来は式(3)の場合と同様に、 h_n 、 β 、 q_{soil} および DH_n の値が必要である。すなわち、式(3)、(6)および(7)の三つの式は、基本的には同じである。

(2) DH_n 算定のための経験式

式(3)、(6)における DH_n の算定式としては、従来、以下に示すような形の経験式が提案されている(中川、1972; 内嶋、1978; 関山ら、1980)。

$$DH_n = a \cdot \Delta\theta_{cl}^b \quad (10)$$

ここで、 a 、 b は定数、 $\Delta\theta_{cl}$ は夜間室温設定値と日最低外気温の差である。式(10)のべき乗式では、外気温日較差の大小が DH_n におよぼす影響は定数 a 、 b によって、一応、考慮されているが、当然、定数 a 、 b の値を決めるには実測値にもとづいた統計処理が必要となる。ところが、これらの定数は地域や時期によって異なるので、決定された定数による算定式を未知の地点に適用すると、かなり大きな誤差がでることが多い(林・古在、1982)。この点、式(4)を用いれば、誤差約5%以下の精度で算定しうるので、式(10)がより簡便であることは認められるが、式(10)を用いなければならない必要性はあまり高くないと判断されるのである。

(3) DH_o と DH_n の算定式

三原(1978)が提案した暖房デグリアワー算定式を以下に示す。

$T_c \geq T_h$ のとき

$$DH_m = 24(T_c - T_m) - S(T_c - \frac{T_h + T_m}{2}) \quad (11-1)$$

$T_c < T_h$ のとき

$$DH_m = 24(T_h - T_m) \frac{(T_c - T_l)^2}{(T_h - T_l)^2} - 0.5S \frac{(T_c - T_m)^2}{T_h - T_m} \quad (11-2)$$

ただし、

$T_c < T_m$ のときは $(T_c - T_m) = 0$

ここで、 T_c は設定室温、 T_h は日最高外気温、 T_m は日平均気温、 S は日照時間、 T_l は日最低外気温である。なお、後述するように、上式の DH_m は、式(5)の DH_o

や式(4)の DH_n と同じものではない。

さて、前述した式(4)において夜時間 $x=12$ と仮定すると、式(11)において $T_m = (T_l + T_h)/2$ 、かつ、 $S=12$ と仮定した式とおおむね一致する。正確に言えば、式(4)および式(11)に対し上記の仮定をすれば式(11-1)および $T_c \geq T_m$ のときの式(11-2)は式(4-1)に一致し、 $T_c < T_m$ のときの式(11-2)が式(4-2)に一致する。つまり、式(11)においては夜時間 x を12時間と固定し、また、 $T_m = (T_l + T_h)/2$ と仮定しているのを、式(4)では $x=0 \sim 24$ 時間、 $T_m = (T_l + T_h)/2$ と仮定して、式(11)を一般化かつ簡略化していることを意味する。

実際問題として、 $T_m = (T_l + T_h)/2$ という仮定をしないと、図2のような線図の作成がむずかしいし、またこの仮定による DH_n の算定誤差は2~5%であるので、実用的にそれ程無理な仮定ではない。

(4) 昼間暖房負荷におよぼす日射量の影響

式(11)においては、昼間暖房負荷におよぼす日射量の影響を DH_m によって考慮している。この考え方は、式(7)において、地表熱流の影響を DH'_n によって考慮しようとする考え方と同様である。

ただし、式(11)では、日照がある時間帯においては、日射量、内外気温差、放熱係数、および保温比の大小によらず、暖房を必要としないとしている。しかし、関東地方においては快晴と言えども、日出後1時間以内は暖房を必要とし、また、曇雨天時と言えども正午前後は暖房を必要としないことが知られている(古在ら、1982b)。更に、東北、北陸、北海道地方では晴天のときでも昼間に暖房を必要とする場合もあることが経験的に知られている。

以上のことから、当部会としては、昼間暖房負荷に及ぼす日射量の影響は、暖房デグリアワーに含めて考慮するよりも、夜間の地表熱流の取扱いと同様に、暖房デグリアワーとは切り離して取扱った方が良いとの結論に達した。

この結果、本稿で提案する日暖房デグリアワー算定式は、外気温が暖房設定室温より低い時間帯における外気温と設定室温との差の積算値の算出式となり、得られる暖房デグリアワーはその言葉のもつ元来の意味に合致することになる。しかし、暖房負荷の算定に当っては、地表熱流や日射量の影響を別途考慮しなければならない訳である。

引用文献

- 1) 園芸施設複合環境調節研究会、1980：施設園芸ハウスにおける環境調節方式に関する研究、第5報、

- 地域を異にしたトマト栽培のエネルギー消費と生産諸元, 電力中研研報, **480014**, 48 p.
- 2) 橋本博好, 1982: 地中伝熱量の観測事例, 文献 12).
- 3) 林 真紀夫, 1982: 暖房デグリアワーの評価について, 文献 12).
- 4) 林 真紀夫・古在豊樹, 1982: 各種暖房デグリアワー算定値と実測値の比較および暖房デグリアワー線図の提案, 農業気象, **38** (1), 29-36.
- 5) 岩切 敏, 1971: 栽培用ハウス内温度環境の予測制御に関する研究, 防災センター研報, **6**, 139 p.
- 6) 川勝義夫, 1962: 温室暖房計画の理論と実際, 農及園, **37**, 1792-1798, 1923-1928.
- 7) 古在豊樹, 1981: 暖房負荷の算定法と伝熱諸元間の関係, 農及園, **56** (3), 623-628.
- 8) 古在豊樹・郡司智子・伊東 正・林 真紀夫, 1982 a: 大型ガラス室における暖房負荷の実態, 昭和 57 年度日本農業気象学会大会講演要旨, 48.
- 9) 古在豊樹・郡司智子・渡部一郎・林 真紀夫・伊東正, 1982 b: 温室の日暖房負荷に関する測定と解析, 農業気象, **38** (3), 279-285.
- 10) 三原義秋, 1978: 日照を考察した温室暖房デグリアワーの算定式, 農業気象, **34** (2), 83-85.
- 11) 中川行夫, 1972: 施設内の環境と調節(施設園芸の基礎技術, 清水 茂編), 誠文堂新光社, 182-191.
- 12) 日本農業気象学会施設園芸研究部会, 1982: 温室熱収支関係量の評価について(第 3 回研究集会講演要旨), 58 p.
- 13) 小倉祐幸, 1982: 無加温ハウスの純放射・地熱流の測定, 農業気象, **37** (4), 303-307.
- 14) 大原源二, 1982: 暖房デグリアワーの推定, 文献 12).
- 15) 岡田益己, 1980: 暖房(温室設計の基礎と実際, 三原義秋編者), 養賢堂, 東京, 184.
- 16) 岡田益己, 1982: 地中伝熱量の評価について, 文献 12).
- 17) 大内良実, 1982: 地中伝熱量の評価, 埼玉県のキュウリ栽培における実測事例, 文献 12).
- 18) 関山哲雄・岡部勝美・藤原徹夫・古館敬一・吉岡邦夫・松崎 治, 1980: 暖房デグリアワーと燃料消費量との関係の実測結果, 昭和 55 年度日本農業気象学会大会講演要旨, 46.
- 19) 関山哲雄, 1982: 気象環境条件と地中伝熱量との相互関係, 文献 12).
- 20) 関山哲雄・岡部勝美, 羽生広道, 1982: 加温および無加温温室における地中伝熱量, 関東の農業気象, **2**, 29.
- 21) 武内英雄・古在豊樹・林 真紀夫・渡部一郎・原道宏, 1982: 温室内の空気流動が地中伝熱量におよぼす影響, 昭和 57 年度日本農業気象学会大会講演要旨, 47.
- 22) 内嶋善兵衛, 1978: 最大暖房デグリアワーの地理的分布と変動特性, 農技研報 A, **25**, 1-31.
- 23) 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.