

第四章 舎内気温予測数学モデルに関する研究

1. はじめに

簡易で、かつ厳密に舎内環境を推定し、畜舎設計に役立つ方法として、数学モデルによるシミュレーションがある。シミュレーション結果と実物での現象とが一致すれば、シミュレーションに用いた数学モデルは有効であり、この数学モデルを通して畜舎の改善すべき点をみだすことが可能になる。

ここでは、土壌での熱移動のみを非定常状態と仮定し、1次元線形数学モデルを用いて、繰り返し計算を行なうことを条件に、非線形現象のシミュレーションとその結果の検討を行なうことにする。

2. 数学モデルの概要

壁体と空気の熱容量は、床部分の土壌熱容量と比較すると、非常に小さい。そのことから、壁体や空気での熱移動は定常状態、土壌での熱移動は非定常状態であると仮定した。

対象施設は、通風式二重被覆無窓豚舎とした。計算にはパーソナルコンピュータ（PC-9801、日本電気株式会社）、コンピュータ言語はBasicを用いた。なお、気象データはHASP気象データを用いた。

(1) フローチャート

数学モデルの計算方法の概略を図4-1のフローチャートで示してある。計算は設定条件、気象データの読み込みではじまり、気象データのスプライン補間、太陽位置、壁体取得日射量、外側壁体表面温度、通気層気温、内側壁体表面温度および舎内気

温の順に行ない、最後に収束条件を与え、満たしていなければ補正値を加えて、再度計算を行なう。そして、収束条件を満たしたら結果を出力し、非定常状態と仮定した土壌の温度計算をし、時間更新を行なう。

なお、空気状態値の計算は皆川(1987)⁴³⁾による式を用いた。以下に、詳しい計算方法をフローチャートの流れにしたがって説明する。

(2) 設定条件

対象豚舎はパイプハウス構造の南北棟である。計算を容易にするため、この豚舎は7平面で構成されているものとした。

壁体の面積は屋根面 29.7 m^2 、側壁 21.8 m^2 、妻面 15.0 m^2 となる。

壁体の傾斜角度は、水平面を 0 rad 、垂直面を $0.5\pi\text{ rad}$ とすると、屋根面 0.44 rad 、側壁 1.45 rad および妻面 1.57 rad となる。

天空に対する壁体の形態係数は屋根面 0.95 、側壁 0.55 および妻面 0.50 となる。

外側被覆材の熱抵抗は $0.16\text{ m}^2\text{ K/W}$ 、外表面反射率は 0.37 、内側被覆材の熱抵抗は $0.017\text{ m}^2\text{ K/W}$ である。表面熱伝達率は

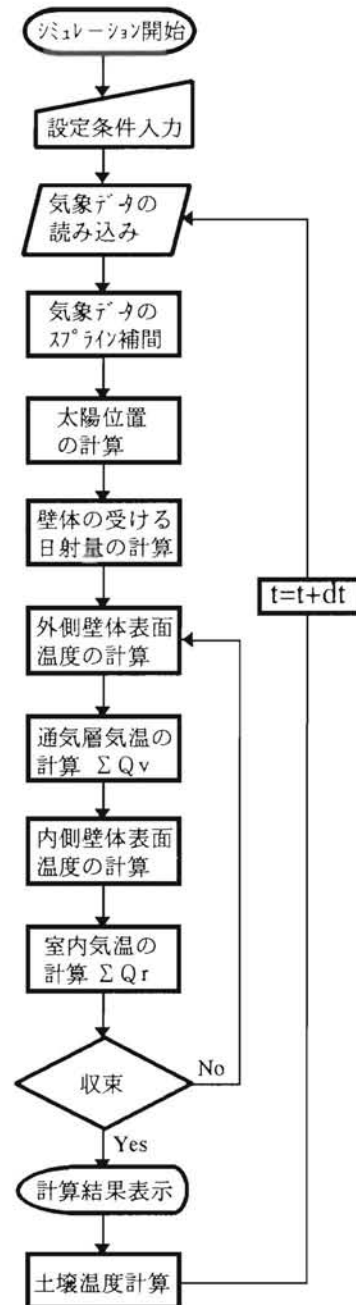


図4-1 計算方法のフローチャート

外側 23.3 W/m^2 、内側 9.3 W/m^2 、床面 7.0 W/m^2 とした。地面のアルベドは 0.20 とした。土壌の物性値は熱伝導率 2.3 W/mK 、比熱 1.47 kJ/kgK 、密度 2020 kg/m^3 とした。舎内における糞尿からの発生水蒸気の熱は照明およびその他機械からの顕熱によるとした。

(3) 気象データ

気象データには HASP 気象データを用いた。HASP 気象データとは、全国主要都市の1時間毎の気象データを1年間分収録したものである(石野、1988)³³⁾。データの種類、内容は外気乾球温度、外気湿度、法線面直達日射量、水平面天空日射量、雲量、風向および風速の7種類である。この気象データは平均年データと呼ばれ、地域の代表性を持った1年間8760時間分のデータである。これは、1年を12カ月に分割し、今までのデータから最も異常性のなかった年の月データを、平均月選定法で集め、境目に連続性があるように平滑化処理を行ったものである。

(4) 気象データの補間

気象データは、HASP 気象データを3次式でスプライン補間(市田ら、1990)²⁷⁾から算出した。

以下で用いる記号は4.使用記号にまとめて示してある。

(5) 太陽位置の計算方法

太陽高度 α および太陽方位角 β は次式によって与えられる(松浦、1974)³⁷⁾。

$$\sin \alpha = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega$$

$$\cos \beta = \frac{\sin \alpha \sin \phi - \sin \delta}{\cos \alpha \cos \phi}$$

この β を求めるためには、上式に付随した δ 、 B 、 ω 、 t_{AS} 、 E を知る必要がある。

δ は春分、秋分で $\delta = 0$ 、夏至で $\delta = 0.4093$ 、冬至で $\delta = -0.4093$ となる。なお、Collares-Pereiraら (1979)¹³⁾ (空気調和・衛生工学会、1972)³⁷⁾ による次の近似式から、 δ は求められる。

$$\sin \delta = \sin 0.4093 \sin B$$

$$\text{ただし } B = \frac{2\pi(n-81)}{365}$$

である。

ω は真太陽時の正午を0として、午前を負値、午後を正值に取り、1時間を0.2618に換算したもので、次式から求められる。

$$\omega = \frac{\pi}{12} (t_{AS} - 12)$$

$$t_{AS} = t + E + \frac{L - L_s}{12}$$

E は一般の時間である平均太陽時と真太陽時との差で、Duffieら (1980)¹⁷⁾ による、次式によって近似することができる。

$$E = \frac{1}{60} (9.87 \sin 2B - 7.53 \cos B - 1.5 \sin B)$$

以上のことから β は次式によって求められる。

$$\beta = \pm \cos^{-1} \left(\frac{\sin \alpha \sin \phi - \sin \delta}{\cos \alpha \cos \phi} \right)$$

ただし、符号は ω の符号と同じとする。また、昼夜の判定は $\sin \alpha$ を求め、その正負で判定した。

(6) 壁体取得日射量の計算方法

水平面における全天日射量は次式によって与えられる。

$$I_{hol} = I_{DN} \sin \alpha + I_d$$

また、壁体に入射する日射 I_1 は次式で示される。

$$I_t = I_D + (I_S + I_R)$$

反射日射は、散乱日射と同じ扱いをした。また、傾斜面に入射する直達日射量 I_D は法線面直達日射量 I_{DN} を用いて示される。

$$I_D = I_{DN} \cos \gamma$$

γ は壁体傾斜面に対する太陽光線の入射角で、次式によって計算できる。

$$\cos \gamma = \sin \alpha \cos W_\alpha + \cos \alpha \sin W_\alpha \cos (\beta - W_\beta)$$

傾斜面に入射する散乱日射は、散乱日射 I_d を用いて求められる。

$$I_S = F_S I_d$$

ただし、 F_S は傾斜面の天空に対する形態係数であり、次式によって求めた。

$$F_S = \frac{1 + \cos W_\alpha}{2}$$

反射日射は、傾斜面前面の地面に入射した日射が反射し、傾斜面に入射するものとして、次式によって求めた。

$$I_R = \rho_g F_g I_{hol}$$

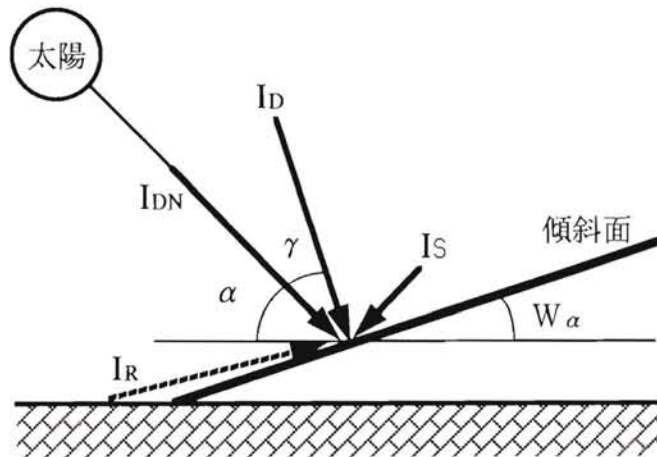
$$F_g = 1 - F_S$$

これらから、日中の各壁体の取得日射量が計算できる。

夜間放射量の算出には、全雲量を用いた Brunt の式と Philipps の式 (Philipps, 1940)⁵⁴⁾ より誘導された、次式を用いた。

$$I_{noc} = 5.67 \left(\frac{273.15 + t_o}{100} \right)^4 (1 - 0.062 C_c) \left(0.49 - 2.1 \sqrt{\frac{x_o}{x_o + 0.622}} \right)$$

ここで、夜間における外気温と各壁体表面温度とが等しいと仮定し、さらに、この夜間放射量に各壁体の天空に対する形態係数と外側被覆材外表面の放射率を乗じて、各壁体損失夜間放射量を求めた。



(7) 壁体温度および気温の計算方法

1) 外側壁体表面温度の計算方法

1-1) 日中の外表面温度

日中、外側被覆材全表面が受ける熱量 Q_1 は各方位壁体への日射量 I_1^n 、反射率 r および外気温 t_0 と壁体(外側被覆材)外表面温度 t_1^n との差に比例するとして次のように表される。

$$Q_1 = \sum_{n=1}^6 A_0^n \{ (1-r) I_1^n + h_0 (t_0 - t_1^n) \} \quad \text{----- (1)}$$

壁体内表面温度を t_2^n とすると、外被覆材内での熱流 Q_2 は(2)式で表され、定常条件から(1)式と等しい。いま t_2^n を既知とすると、

(1)、(2)式から t_1^n が(a)式で求まる。

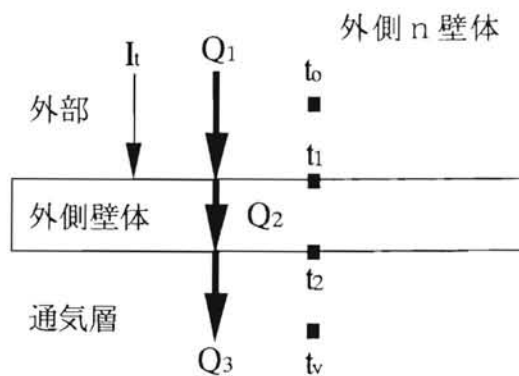
$$Q_2 = \sum_{n=1}^6 A_0^n \frac{\lambda_0}{l_0} (t_1^n - t_2^n) \quad \text{----- (2)}$$

$$t_1^n = \frac{(1-r) I_1^n + h_0 t_0 + \frac{\lambda_0}{l_0} t_2^n}{\frac{\lambda_0}{l_0} + h_0} \quad \text{----- (a)}$$

ただし、 A : 壁体面積 (m^2)、 h : 表面熱伝達率 (W/m^2K)、 l : 厚さ (m)、 λ : 熱伝導率 (W/mK)、下付き添字 o : 外気または外側被覆材、上付き添字 n : 壁体番号 (1: 西屋根 2: 東屋根 3: 南妻面 4: 西側壁 5: 北妻面 6: 東側壁を示す。)

1-2) 夜間の外表面温度

夜間における外側壁体表面の取得熱量は、夜間放射および外気と壁体表面との間の熱伝達によって表わすことができる。また、日中と同じく、ここでの熱移動を定常状態と仮定できるので、外表面温度は次のように表わすことができる。ただし、土壌表面と壁体表



面との間で、放射伝熱は行なわれていないものとした。

$$Q_1 = \sum_{n=1}^6 A_0^n \left\{ \varepsilon F_s^n I_{noc}^n + h_0 (t_0 - t_1^n) \right\}$$

$$Q_2 = \sum_{n=1}^6 A_0^n \frac{\lambda_0}{l_0} (t_1^n - t_2^n)$$

これらから、外表面温度 t_1^n は次のようになる。

$$t_1^n = \frac{\varepsilon F_s^n I_{noc}^n + h_0 t_0 + \frac{\lambda_0}{l_0} t_2^n}{\frac{\lambda_0}{l_0} + h_0}$$

1-3) 内表面温度

外側壁体の内表面温度は、壁体熱伝導量と内表面と通気層空気との間の熱伝達量 Q_3 が等しいと仮定し、次のように求めた。

$$Q_2 = \sum_{n=1}^6 A_0^n \frac{\lambda_0}{l_0} (t_1^n - t_2^n)$$

$$Q_3 = \sum_{n=1}^6 A_0^n h_i (t_2^n - t_v)$$

$Q_2 = Q_3$ と仮定すると、内表面温度 t_2^n はつぎのようになる。

$$t_2^n = \frac{\frac{\lambda_0}{l_0} t_1^n + h_i t_v}{\frac{\lambda_0}{l_0} + h_i}$$

2) 通気層気温の計算方法

通気層気温に関する熱量は以下の式によって求められる。

$$Q_3 = \sum_{n=1}^6 A_0^n h_i (t_2^n - t_v)$$

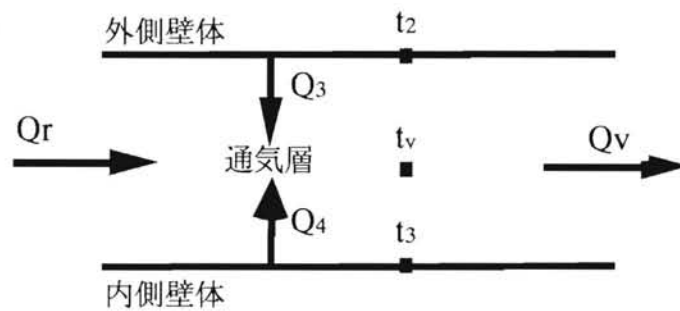
$$Q_4 = \sum_{n=1}^6 A_i^n h_i (t_3^n - t_v)$$

$$Q_r = H_r \rho_r V$$

$$Q_v = H_v \rho_v V$$

したがって、通気層での熱移動が定常状態であると仮定し、次の熱収支式が成立するものとして、通気層気温 t_v を求めた。

$$Q_3 + Q_4 + Q_r - Q_v = 0$$



しかし、 t_v は、他のすべての温度と関連していることから、一義的に計算できない。したがって、以下の手順で近似的に求めた。

$$t_v = t_v + dt_v$$

$$dt_v = \frac{Q_3 + Q_4 + Q_r - Q_v}{C_{sv} \rho_v V}$$

$$C_{sv} = C_a + C_v X_v$$

3) 内側壁体表面温度の計算方法

3-1) 外表面温度

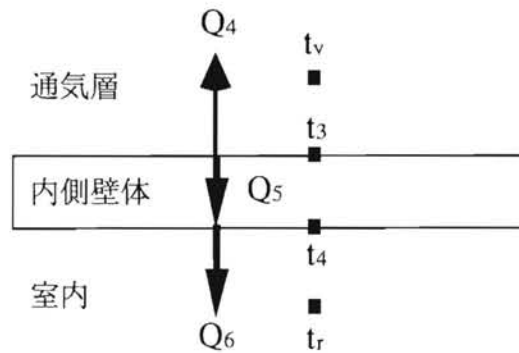
内側壁体の外表面温度は、通気層空気と外表面との間の熱伝達量と壁体熱伝導量が等しいと仮定して、次のように求められる。

$$Q_4 = \sum_{n=1}^6 A_i^n h_i (t_3^n - t_v)$$

$$Q_5 = \sum_{n=1}^6 A_i^n \frac{\lambda_i}{l_i} (t_3^n - t_4^n)$$

ここでの熱移動を定常状態と仮定すると、 $-Q_4 = Q_5$ となり外表面温度 t_3^n は次のようになる。

$$t_3^n = \frac{h_i t_v + \frac{\lambda_i}{l_i} t_4^n}{\frac{\lambda_i}{l_i} + h_i}$$



3-2) 内表面温度

内表面温度は、壁体の熱伝導量と内側表面と室内空気との間の熱伝達量が等しいとして、次のように求めた。

$$Q_5 = \sum_{n=1}^6 A_i^n \frac{\lambda_i}{l_i} (t_3^n - t_4^n)$$

$$Q_6 = \sum_{n=1}^6 A_i^n h_i (t_4^n - t_r)$$

熱移動を定常状態とすると、 $Q_5 = Q_6$ となり内表面温度 t_4^n は次のようになる。

$$t_4^n = \frac{\frac{\lambda_i}{l_i} t_3^n + h_i t_r}{\frac{\lambda_i}{l_i} + h_i}$$

4) 舎内気温の計算方法

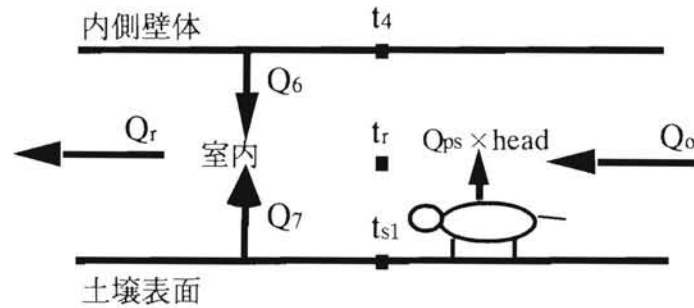
舎内空間に関する熱量は、次の式によって求められる。

$$Q_6 = \sum_{n=1}^6 A_i^n h_i (t_4^n - t_r)$$

$$Q_7 = A_s h_s (t_{s1} - t_r)$$

$$Q_0 = H_0 \rho_0 V$$

$$Q_r = H_r \rho_r V$$



ここで、土壌での熱移動を除いた、舎内での熱移動を定常状態とすると、豚からの発熱量を加えた次の熱収支式が成立するものとして舎内気温 t_r は求められる。

$$Q_6 + Q_7 + Q_0 - Q_r + Q_{ps} \times \text{head} = 0$$

しかし、通気層気温と同じく、 t_r は他の温度と関連しているので、一義的に求めることはできない。そこで、舎内気温の補正值 dt_r を加えながら、繰り返し計算を行なって舎内気温を近似的に求めた。

$$t_r = t_r + dt_r$$

$$dt_r = \frac{Q_6 + Q_7 + Q_0 - Q_r + Q_{ps} \times \text{head}}{C_{sr} \rho_r V}$$

$$C_{sr} = C_a + C_v X_r$$

5) 通気層気温および舎内気温の収束条件

通気層気温および舎内気温を近似的に求めている方法であることから、1) から 4) までフローチャートに示してある順に従って、この 2 つの気温についての次の収束条件を満たすまで反復計算する。

通気層気温および舎内気温に関する収束条件としては、通気層と舎内の熱収支から、次の条件を与えた。

i. 通気層収束条件 $|Q_3 + Q_4 + Q_r - Q_v| < 0.1 \text{ (W)}$

ii. 舎内収束条件 $|Q_6 + Q_7 + Q_o - Q_r + Q_{ps} \times \text{head}| < 0.1 \text{ (W)}$

6) 土壌温度分布の計算方法

6-1) 境界条件

境界条件として土壌表面温度と深さ1.5mの一定土壌温度を与えた。

i. 土壌表面温度

舎内への日射は小さいので無視した。土壌表面温度は舎内空気と土壌表面との間の熱伝達量、土壌表面と土壌内部からの熱伝導量とが等しいと仮定して求めた。

$$Q_7 = A_s h_s (t_{s1} - t_r)$$

$$Q_8 = A_s \frac{\lambda_s}{l_s} (t_{s2} - t_{s1})$$

$Q_7 = Q_8$ と仮定し、土壌表面温度 t_{s1} は次のようになる。

$$t_{s1} = \frac{\frac{\lambda_s}{l_s} t_{s2} + h_s t_r}{\frac{\lambda_s}{l_s} + h_s}$$

ただし、分割した土壌の厚さ $l_s = 0.15 \text{ m}$ とした。

ii. 深さZ (1.5 m) の土壌温度

半無限固体の周期的熱伝導の解を用いることによって、ある深さでの土壌温度の実用的な値を推定することができる(渡辺、1964)⁸²⁾。長谷川(1965)²¹⁾によれば、地表面温度の年間変動をcos曲線と仮定し、不易層温度を $\theta_{g,r}$ 、地表面温度の年較差を $\Delta \theta_{g,r}$ とすると、所与の日における深さZの地中温度 $\theta_{g,r,z}$ は次式によって求められる。

$$\theta_{grz} = \theta_{gro} + \frac{1}{2} \Delta\theta_{grs} A_z \cos \frac{2\pi(n - n_{mx} - B_z)}{365}$$

ただし、宇田川（宇田川、1986）⁷⁵⁾によれば、振幅減少率 A_z と時間遅れ B_z は、深さ Z としたとき、次式によって求められる。

$$A_z = e^{-CZ}$$

$$B_z = \frac{365 CZ}{2\pi}$$

ここで、

$$C = \sqrt{\frac{\pi}{a\tau}}$$

a は土の熱拡散率、 τ は周期で1年、また、 n_{mx} は年最高土壌表面温度を示す日で、便宜的に8月1日とした。

6-2) 土壌内部温度

土壌内部温度は、微分方程式を代数方程式に変換して計算する陽解法を用いた（藤川、1986）¹⁹⁾。1次元における非定常熱伝導方程式は、次のようになる。

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{\lambda_s}{C_p \rho_s} \frac{\partial^2\theta}{\partial x^2}$$

ただし、時間 t 、座標 x は $t = jk$ 、 $x = ih$ となる。これから、時間ステップを j 、時間刻みを k 、座標格子点を i および座標刻み幅を h とすると、座標格子 i 、時間 $j+1$ における土壌内部温度は次式から求められる。

$$\theta_{i,j+1} = \theta_{i,j} + \omega(\theta_{i-1,j} - 2\theta_{i,j} + \theta_{i+1,j})$$

ただし、 ω は次の通りである。

$$\omega = \frac{\lambda_s k}{C_p \rho_s h^2}$$

7) 豚体発生熱量

豚体等からの発生熱量と発生水分量の推定には、相原ら（1982）¹⁾が今までの文献値を再整理し、数式化したものを用いた。以下に発生熱量と発生水分量の計算式を示してある。

ただし、 W : 舎内気温、 t_r : 豚体重

i. 全熱発生量 :

$$Q_a = 1.163 \times 10 \left\{ 1.761 + 0.0335 \log_{10} W - 0.00414 t_r + 0.148 (\log_{10} W)^2 + 0.00023 t_r^2 - 0.00563 t_r \log_{10} W \right\}$$

ii. 全発生水分量 :

$$m_a = 60^{-2} \times 10 \left\{ -1.4147 + 0.00539 W + 0.00171 t_r - 0.0000579 W t_r - 0.0000141 W^2 + 0.000446 t_r^2 \right\}$$

iii. 豚体からの潜熱量 :

$$Q_{pl} = 1.163 \times 13.416 e^{0.0159 t_r} \quad (t_r < 15.6)$$

$$Q_{pl} = 1.163 \times 5.590 e^{0.0725 t_r} \quad (t_r \geq 15.6)$$

iv. 豚体からの水分発生量 :

$$m_p = \frac{Q_{pl}}{672.09 \times 60^2}$$

v. 糞尿等からの潜熱量 :

$$Q_{rl} = 1.163 m_a \left(597.1 - 0.555 t_r - 2.492 \times 10^{-4} t_r \right)$$

vi. 糞尿等からの発生水分量 :

$$m_r = m_a - m_p$$

vii. 全発生潜熱量 :

$$Q_{al} = Q_{pl} + Q_{rl}$$

viii. 豚体からの顕熱量 :

$$Q_{ps} = Q_a - Q_{pl}$$

3. 結果および考察

(1) 計算値と測定値との比較

数学モデルの検証を行なうために、1991年5月27日から28日までの2日間の1時間毎のデータを用い、計算値と測定値との比較を行なった。測定は気流誘導シート無し、吹出口1穴で、換気回数18.5回/h、70kgの豚30頭飼育、気温20℃における顕熱発生量2600W一定条件下で行なった。なお、舎内気温は71測定点の平均値を用いた。2日間の天気は第1日目が曇り、また、第2日目が晴れであった。外気温は19.4℃から8.8℃の間を変化し、平均13.8℃であった。直達日射量の最大値は815.5W/m²であった。

シミュレーションに際しての初期値に土壌温度（表面、深さ30cmおよび深さ50cm）を用い、これに気象データとして水平面直達日射量、水平面散乱日射量、外気乾球温度および外気湿球温度を与えた。なお、舎内および通気層において水分移動はないものと仮定し、舎内および通気層の絶対湿度は外気の絶対湿度と同じとした。

1) 舎内気温の比較

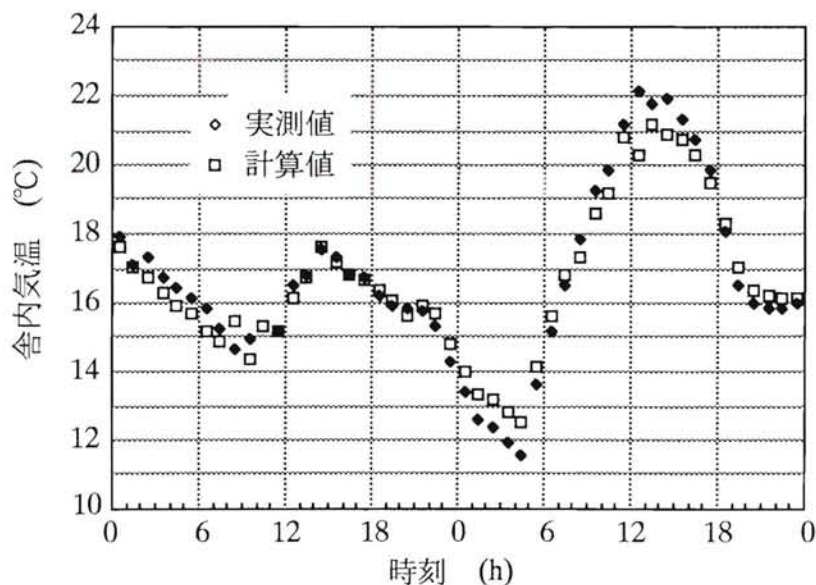


図4-2 舎内気温の計算値と測定値の比較

舎内気温の計算値と測定値の時間変化を図4-2に示した。図をみると、測定値と計算値の時間変化は、ほぼ、同じである。ただ、極値における測定値と計算値をみると、計算値が若干小さくなる傾向にある。次に、平均値と標準偏差を比較すると、測定値が舎内気温 $16.7 \pm 2.6 \text{ }^\circ\text{C}$ 、舎内外気温差 $2.9 \pm 0.5 \text{ K}$ （最大値 4.3 K 、最小値 1.9 K ）であったのに対し、計算値は舎内気温 $16.6 \pm 2.1 \text{ }^\circ\text{C}$ となり、その差は $0.1 \pm 0.6 \text{ K}$ となった。これから、測定値と計算値とで、極値において約 1 K から 2 K の差があるが、測定に用いた熱電対の誤差等を考慮すると、この両者の間で差がほとんどないといえる。これを別の角度から考察するため、図4-3に、先の測定値と計算値との対応関係を表わしてみた。

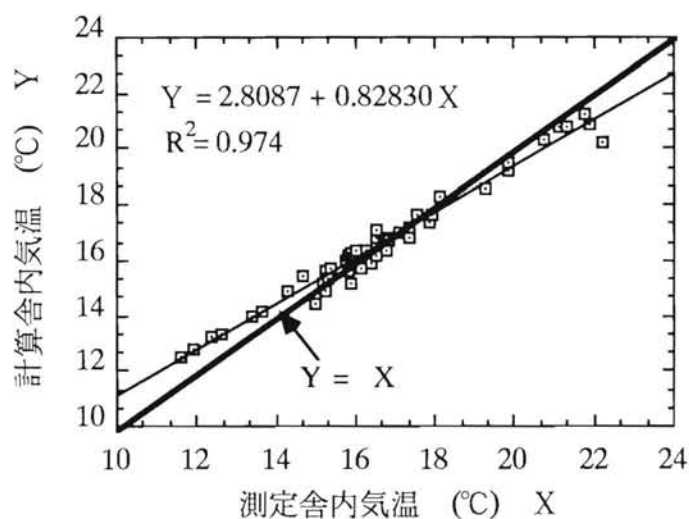


図4-3 舎内気温の測定値と計算値の関係

横軸 X に測定値、縦軸 Y に計算値をとり、両者の間の回帰式を求めた。その結果、この回帰式の決定係数は 0.97 となり、高い相関が得られた。したがって、このことから、舎内気温の測定値と計算値はほぼ一致しているといえる。X の係数が 0.82 と小さいのは、壁体での熱伝達係数を小さく、また土壌での熱伝達係数を大きく、見なしているためと推測される。

2) 舎内における熱量の比較

舎内での取得全熱量を100%、また、損失全熱量を-100%として、それに対して、舎内に影響する熱量各々の割合を図4-4に示してある。

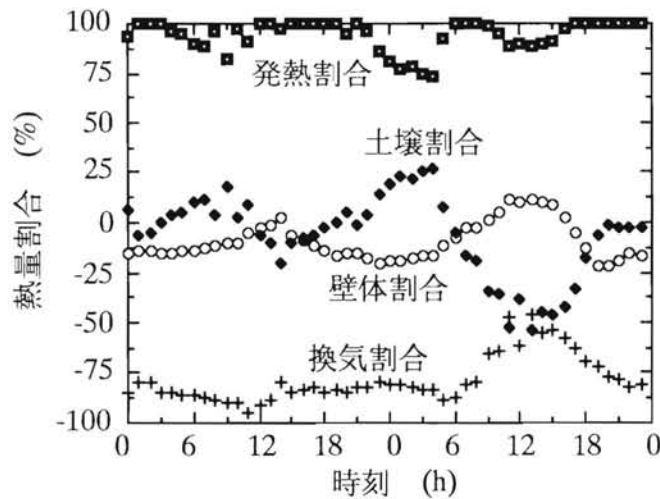


図4-4 舎内に影響する各熱量割合

図4-4をみると、取得熱量のほとんどが豚からの発熱量であることがわかる。また、損失熱量の多くが換気による熱量であることもわかる。2日間の平均で見ると、豚からの発熱量が94%、換気熱量が-78%となっていた。土壌表面からの伝達熱量は夜間に舎内へ熱を放出して取得熱量となるが、そのほかの時間はほとんど舎内から熱を奪う損失熱量となっている。たとえば、2日目の13:00には全損失熱量の54%、2日目の4:00には取得熱量の27%であり、これをみると、土壌表面からの伝達熱量は、舎内の日射がないこと、土壌の熱容量が大きいことの原因から、舎内気温を一定値にするような方向で発生・吸収していることがわかる。壁体からの伝達熱量は、日中、取得熱量となり、2日目13:00で最大11%を全取得熱量の中で占めていた。壁体からの伝達熱量を時間的にみると、2日目では、8時間ほどが取得熱量となり、あとは損失熱量となっている。この損失熱量で最大は、2日目20:00で、約22%であった。

以上をまとめると次のようになる。2日間平均で見ると、取得熱量となるのは発生熱量だけで94%、損失熱量は換気熱量78%、壁体表面伝達熱量9%および土壌表面伝達熱量7%であった。これらの数値から、舎内における温度環境は換気熱量と発生熱量によって決めることができるといえる。

壁体表面からの伝達熱量の時間変化を図4-5に示した。

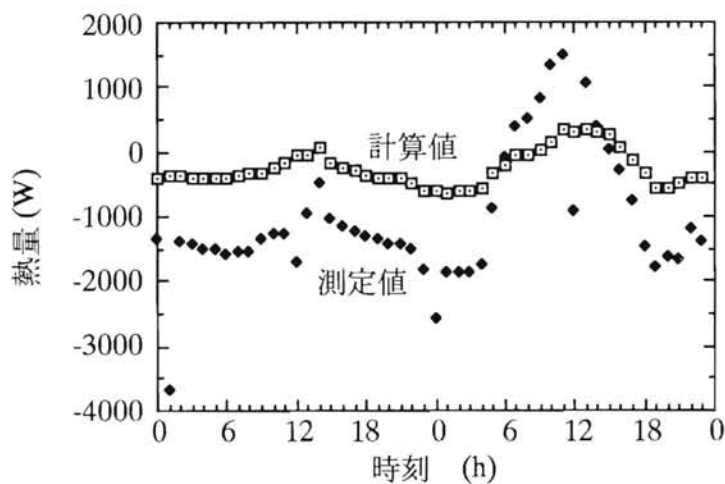


図4-5 壁体表面からの伝達熱量

図4-5をみると、壁体表面からの伝達熱量の計算値は0に近い値をとっている。ただ、晴れた2日目に、幾分、日変化に幅がみえる。これに対して、測定値の日変化は大きい。その理由は、内側壁体表面温度の計算値と測定値とで差が生じたことに原因があるとみられる。シミュレーションでは、舎内から排出される空気は内側壁体を覆っている通気層を通過して外部へ出ていく。しかし、実験では、外部の風が通気層に入り込んでくるために、通気層気温の測定値は計算値よりも低い。このために、壁体表面からの伝達熱量は温度差に関係することから計算値と測定値に差が生じたと推測される。なお、計算値と測定値との相関を求めると、その決定係数は0.63となった。

換気熱量の時間変化を図4-6に示した。

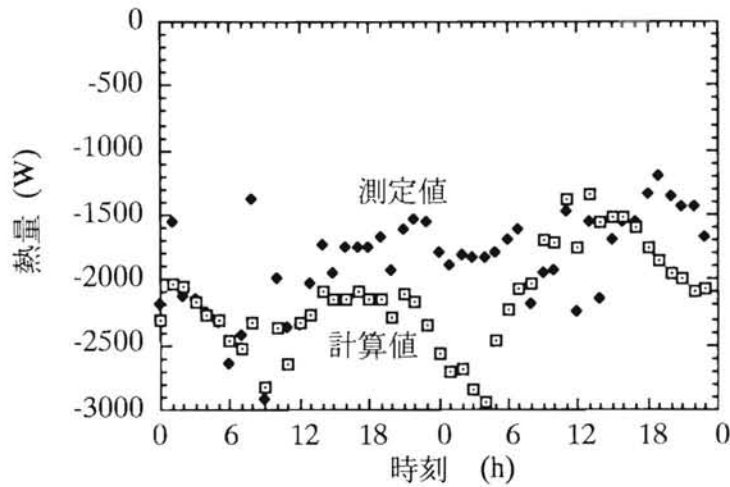


図4-6 換気熱量の比較

換気熱量は舎内から排出される空気の持つ熱量から舎内へ入って来る空気の持つ熱量を引いた値である。計算には外気温、外気絶対湿度および舎内気温を用いている。計算値と測定値とで差があるが、計算値と測定値との値の相関は、決定係数0.172であり、両者の間の関係はみいだせなかった。

土壌表面からの伝達熱量の時間変化を図4-7に示した。

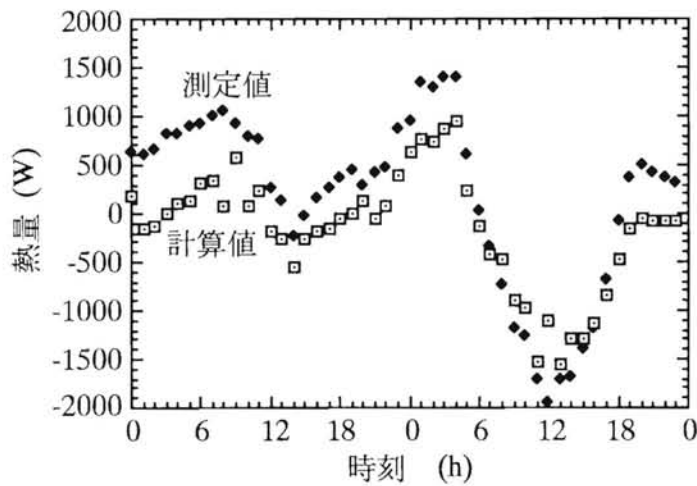


図4-7 土壌表面からの伝達熱量

図4-7をみると、計算値と測定値の時間変化の傾向および熱量ともに似ている。計算値と測定値の相関を求めると、その決定係数は0.921となり、高い相関がみられる。

シミュレーションモデルからの計算値と、実験からの測定値

とを比較しながら検討した結果、舎内気温の計算値と測定値とが、かなり良く、一致することがわかった。したがって、このモデルは舎内気温予測シミュレーションモデルとして十分有効であるといえる。

(2) 暑熱対策

この豚舎の暑熱対策として、どの部分を改良すれば遮熱効率が高まるか、シミュレーションモデルを用いて検討した。シミュレーションを行なうに際し、現実に近いものとするために、豚からの発熱量は気温で変化するとし、改良に影響する項目は換気回数、飼育頭数、外側壁体の反射率および内外壁体の熱抵抗とした。

1) 換気回数の影響

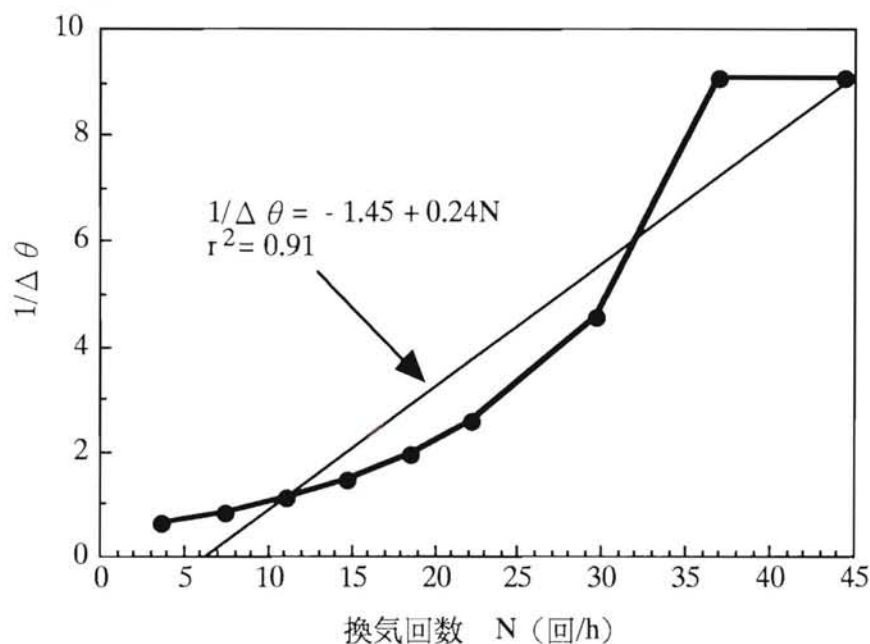


図4-8 換気回数と舎内外気温差の関係

換気回数3.7回/hから44.4回/hについて計算を行なった。日中の、換気回数と舎内外気温差の関係を図4-8に示してある。

舎内外気温差と換気回数との関係は直線で回帰でき、決定係

数0.91と高い相関が得られた。しかし、細かくみると計算結果は2次曲線的に変化する傾向を示している。しかも、1次回帰式をそのまま用いることは $\Delta\theta = \infty$ となる計算結果をもたらすおそれがあり、このまま現場で使用すべきものではない。なお、回帰式の検討は今後行う必要がある。

2) 飼育頭数の影響

飼育頭数の舎内外気温差に対する影響をみるために、一頭当たりの飼育面積が $1.3\text{ m}^2/\text{頭}$ 、 $1.0\text{ m}^2/\text{頭}$ および $0.8\text{ m}^2/\text{頭}$ にあたる、飼育頭数30頭、40頭および50頭を想定して計算を行ない、その結果の経時変化を図4-9に示してある。なお、換気回数は 25.9 回/h の一定値とした。

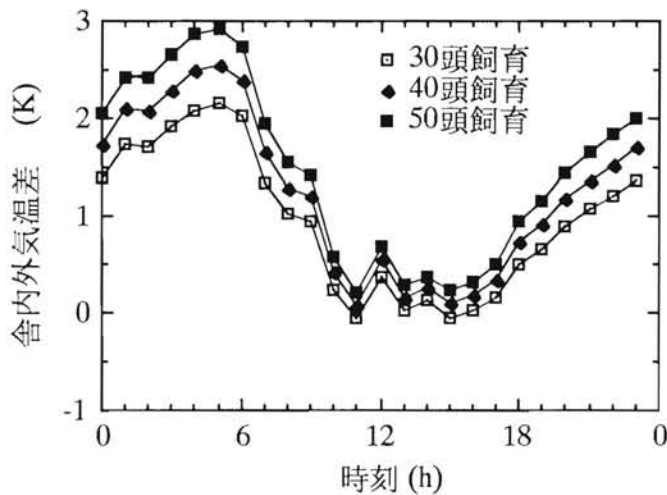


図4-9 飼育頭数と舎内外気温差の関係

飼育頭数が多いと、当然、舎内気温は上昇するが、気温上昇による豚からの顕熱発生量の低下にともなって、日中の高温時には頭数間の差は無視できる程度であった。これに対して、夜間は、頭数間で差が生じるが、それでも約1 Kである。したがって、日中高温時での飼育頭数による舎内外気温差の違いは小さいことから、この豚舎での飼育頭数は、従来型豚舎と同様な飼育密度で計算できるものといえる。

3) 外側壁体反射率の影響

壁体材料の反射率の影響をみるために、反射率が0%から100%の部材を想定して検討した。計算結果の経時変化を図4-10に示してある。

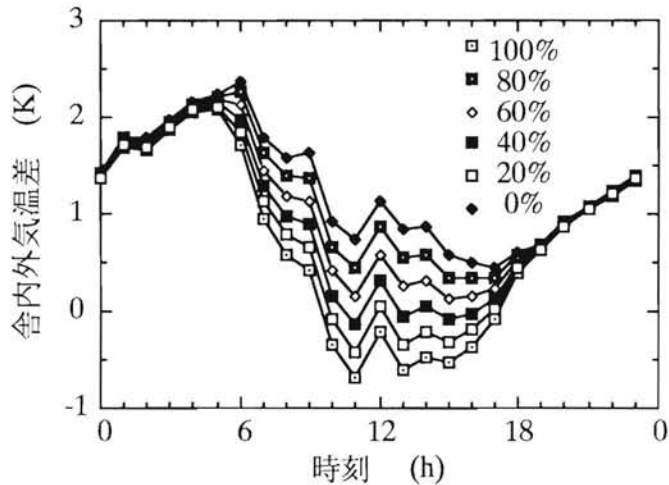


図4-10 舎内外気温差に及ぼす反射率の影響

反射率0%と100%とを比較すると、夜間両者に差は認められないが、日射がある場合、両者の差は最大約1.4 Kである。図4-11に、日射が強い場合における、舎内外気温差と反射率の関係を示してある。

これをみると、舎内外気温差と反射率との関係は負の直線関係である。したがって、暑熱対策としては壁体にはできるだけ反射率の大きいものを用いることが良い。

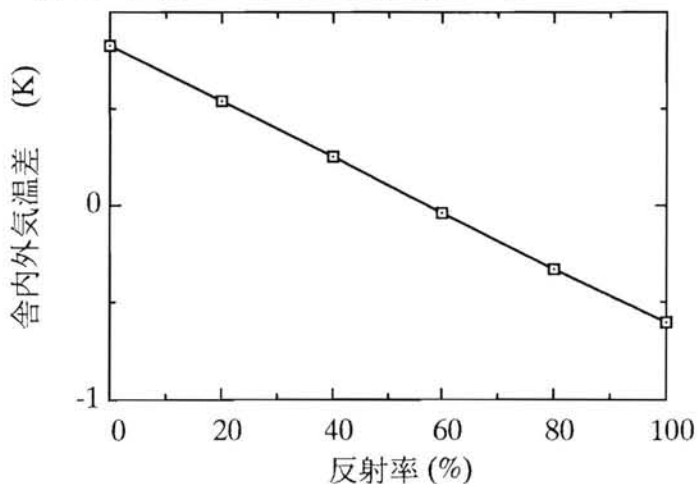


図4-11 反射率と舎内外気温差の関係

4) 壁体熱抵抗の影響

内側壁体、外側壁体いずれの壁体の断熱性を高めたのが良いか検討するため、両者の熱抵抗値を取りかえて、それぞれ計算を行ない、その結果を図4-12に示してある。

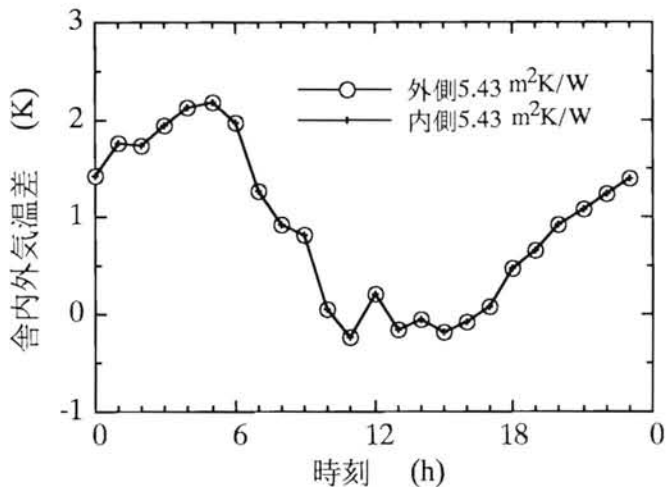


図4-12 内外被覆材熱抵抗値の違いによる
舍内外温度差の経時変化

図をみると、計算で得られた舍内外気温差の経時変化は両方とも同じであることがわかる。したがって、内側壁体および外側壁体の熱抵抗値は、舍内気温に同じ割合で影響するといえる。

次に、日射の多い時、熱抵抗値の舍内外気温差に対する影響をみるために、熱抵抗値を $6.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ K/W}$ から $6.0 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ K/W}$ の間で変化させて計算を行なった。

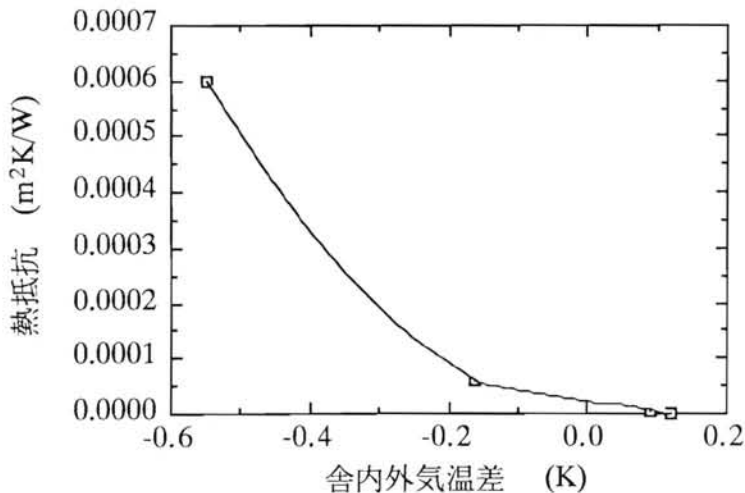


図4-13 被覆材熱抵抗と舍内外気温差の関係

その計算結果を図4-13に表わしてある。

$6.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ K/W}$ と $6.0 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ K/W}$ の間で約0.7 Kの差がある。また、熱抵抗値と舎内外気温差は直線的な関係ではないことがわかる。一般に、市販されている被覆材の熱抵抗値が、これほど広い範囲にわたった種類の製品はない。なるべく断熱性の高い部材を用いるべきであるが、断熱性を格別考慮する必要はないといえる。

(3) 冬期対策

本研究対象の通風式二重被覆無窓豚舎は、夏期における暑熱対策を第一目標にして、考案したものである。しかし、養豚経営は年間を通して行なわれるものであり、冬期の低温環境に対する考慮も必要である。そこで、シミュレーションを通して、冬期における問題を検討することにした。

通風式二重被覆無窓豚舎は、外側被覆材等に反射率の大きい部材を用いていることから、日射の影響を受けにくいことは、すでに、考察した。冬期、この豚舎構造での舎内気温を上昇させる熱源は、豚体からの発熱量にしか期待できないので、さらに舎内気温を上昇させるには外部からエネルギーを投入する必要がある。そこで、豚舎の東側壁の外側および内側被覆材を透明フィルムにかえて、日射を舎内に入れ、土壌温度を上昇させながら、舎内気温を高める方法を取ることにした。

1) 透過日射有りの場合の計算方法

透明フィルムからの全取得熱量 Q_g は、透過日射量 Q_{g1} 、透明フィルムの吸収熱量 Q_{g2} 、および貫流熱量 Q_{g3} で次のように表すことができる。

$$Q_g = Q_{gt} + Q_{ga} + Q_{go}$$

この内、透過日射量 Q_{gt} および透明フィルムの吸収熱量 Q_{ga} はそれぞれ次のように表すことができる。

$$Q_{gt}^n = A_{gs}^n \{ (1 - F_p^n) \tau_D I_D + \tau_d I_d \}$$

$$Q_{ga}^n = A_{gs}^n \{ (1 - F_p^n) B_D I_D + B_d I_d \}$$

ここで、添字 n は壁体番号で、1：西屋根 2：東屋根 3：南妻面 4：西側壁 5：北妻面 6：東側壁をそれぞれ示す。 F_p は透明フィルム面積 A_{gs} に対する透明フィルムの日影面積の割合であるが、豚舎周囲に日影となるものが無いと仮定して0とした。 τ_D 、 τ_d はそれぞれ直達日射および散乱日射に対する透明フィルムの透過率、また B_D 、 B_d はそれぞれ直達日射および散乱日射に対する透明フィルムの日射吸収率である。 τ_d および B_d は、散乱日射が透明フィルムに均一に入射するものと仮定すれば入射角特性を考慮する必要はない。 τ_D および B_D については入射角特性を考慮する必要があり、太陽位置の変化に伴って値が変化する。しかし、入射角特性が与えられていることはまれであるので、ここでは一般化した特性（板硝子協会編、1985）³⁴⁾ を用いた。この方法は実用的な熱負荷計算法であると報告されている（空気調和・衛生工学会編、1971、1972、1981）^{36, 38, 39)}、（日本建築学会編、1969）⁴⁸⁾ および（ASHRAE、1968、1976、1985）^{5, 6, 7)}。

τ_d および B_d の標準入射角特性を CI_d 、垂直入射時の時の τ_d および B_d をそれぞれ τ_v および B_v 、また τ_d と τ_v の比を C_d ($C_d = 0.91$) とすると Q_{gt} および Q_{ga} は次のようになる。ただし、 CI_d には次の近似式を用いた。

$$CI_d^n = 3.4167 \cos \gamma - 4.3890 \cos^2 \gamma + 2.4948 \cos^3 \gamma - 0.5224 \cos^4 \gamma$$

$$Q_{gt}^n = A_{gs}^n \tau_v \{ (1 - F_p^n) CI_D^n I_D + C_d I_d \}$$

$$Q_{ga}^n = A_{gs}^n B_v \{ (1 - F_p^n) C I_D^n I_D + C_d I_d \}$$

また、外側透明フィルムおよび内側透明フィルムに、同じ部材を用いた場合の二重透明フィルムにおける透過率、吸収率および反射率は以下のようにそれぞれなる。ただし、透過率 $\tau = 0.78$ 、反射率 $\rho = 0.10$ および吸収率 $a = 0.12$ とした。

二重透明フィルムの総合透過率 τ_0 。

$$\tau_0 = \frac{\tau^2}{1 - \rho^2} = 0.61$$

二重透明フィルムの総合反射率 ρ_0 。

$$\rho_0 = \rho + \frac{\tau^2 \rho}{1 - \rho^2} = 0.16$$

外側透明フィルムの吸収率 a_1

$$a_1 = a + \frac{a \tau \rho}{1 - \rho^2} = 0.13$$

内側透明フィルムの吸収率 a_2

$$a_2 = \frac{a \tau}{1 - \rho^2} = 0.10$$

これらより外側透明フィルムおよび内側透明フィルムの各壁体における吸収熱量をそれぞれ Q_{ga1}^n 、 Q_{ga2}^n とすると次のようになる。

$$Q_{ga1}^n = A_{gs}^n a_1 \{ (1 - F_p^n) C I_D^n I_D + C_d I_d \}$$

$$Q_{ga2}^n = A_{gs}^n a_2 \{ (1 - F_p^n) C I_D^n I_D + C_d I_d \}$$

ただし、夜間においては $I_D = 0$ また $I_d = I_{n.o.c}$ として扱った。

したがって、外側透明フィルムの各壁体の取得熱量 Q_{p1}^n は次のようになる。

$$Q_{p1}^n = Q_{ga1}^n + A_{gs}^n h_o (t_o - t_{p1}^n)$$

また、透明フィルムの伝導熱量を Q_{p2}^n とすると次のようになる。

$$Q_{p2}^n = A_{gs}^n \frac{\lambda_p}{l_p} (t_{p1}^n - t_{p2}^n)$$

Q_{p1}^n と Q_{p2}^n が等しいとできるので、外側透明フィルムの外表面温度 t_{p1}^n は次のようになる。

$$t_{p1}^n = \frac{\frac{Q_{ga1}^n}{A_{gs}^n} + h_o t_o + \frac{\lambda_p}{l_p} t_{p2}^n}{\frac{\lambda_p}{l_p} + h_o}$$

また、内側透明フィルムの外表面温度 t_{p3}^n は次のようになる。

$$t_{p3}^n = \frac{\frac{Q_{ga2}^n}{A_{gs}^n} + h_i t_v + \frac{\lambda_p}{l_p} t_{p4}^n}{\frac{\lambda_p}{l_p} + h_i}$$

透明フィルムにおける外側透明フィルムの内側表面温度および通気層気温は、熱移動が定常状態として、求めた。

また、舎内への透過日射量 Q_{gt} は次式で与えられる。

$$Q_{gt} = \sum_{n=1}^6 A_{gs}^n \tau_o \{ (1 - F_p^n) C I_D^n I_D + C_d I_d \}$$

ここで、舎内地面に透過した日射量は、床面と内側壁体との間で反射、吸収が繰り返し行なわれる。計算上、内側壁体の内表面温度は均一として扱っているので、この反射吸収が、無限に広い平行平板と同様な形態で行なわれていると仮定すると、床面および内側壁体の透過してきた日射の吸収率は次のようになる。

床面の透過日射吸収率 a_s 、

$$a_s = \frac{1 - \text{albedo}}{1 - \text{albedo} \rho_4}$$

内側壁体の透過日射吸収率 a_4

$$a_4 = \frac{\text{albedo} (1 - \rho_4)}{1 - \text{albedo} \rho_4}$$

これらから内側透明フィルムの内表面温度 t_4^n および床表面温度 $t_{s,1}$ はそれぞれ次のようになる。

$$t_4^n = \frac{\frac{\sum_{n=1}^6 A_i^n a_s Q_{gt}^n}{A_s} + \frac{\lambda_i}{l_i} t_3^n + h_i t_r}{\frac{\lambda_i}{l_i} + h_i}$$

$$t_{s1} = \frac{\sum_{n=1}^6 a_s Q_{gt}^n}{A_s} + \frac{\lambda_s}{l_s} t_{s2} + h_s t_r$$

$$\frac{\lambda_s}{l_s} + h_s$$

次に、床面と舎内空気との間の水分移動は、床面における水蒸気分圧と舎内空気における水蒸気分圧の差に比例して、分圧の高い方から低い方へ移動する。舎内空気に床面から加わる水蒸気量は次式によって与えられる（塘，1990）⁷³⁾。ただし、床面においては飽和水蒸気圧の状態にあるものと仮定した。

$$W_{vap} = A_s p_i (f_s - f_r)$$

ここで、 W_{vap} :水蒸気移動量 p_i :透湿率 f_s :床面飽和水蒸気分圧 f_r :舎内水蒸気分圧

しかし、土壌表面からの水蒸気移動量が、舎内の分布の問題から全て舎内空気に均一に含まれないので、実験で得た補正係数 M で補正する必要がある。したがって、計算では次の式を用いた。

$$W_{vap} = M A_s p_i (f_s - f_r)$$

図4-14に補正係数の経時変化を示した。

補正係数は、第三章、3-8.透過日射有りの場合における、1992年4月17日から18日の測定結果から求めた。舎内床面には十分散水を行い、床表面が飽和状態と仮定できるようにした。日中、舎内には日射がある時、舎内での日射を受ける部分と受けない部分が生じ、このため舎内床面温度に分布ができる。よって、日中には補正係数が大きくなる傾向があり、2日での平均値は 0.0005 ± 0.0001 となった。ここでは、この平均値を用いた。

$$M = 0.0005$$

舎内における絶対湿度は次のようになる。

$$X_r = X_0 + \frac{p_r(W_{\text{pig}} + W_{\text{vap}})}{\text{Volume}}$$

ただし、 p_r : 舍内空気の比容積 (m^3/kg)、 W : 水分量 (kg/h)

Volume : 換気量 (m^3/h)

また、 p_i は次のように近似式で与えられる。

$$p_i = 13.532 + 12.078 \text{Volume} \quad (\text{g}/\text{m}^2 \text{hmmHg})$$

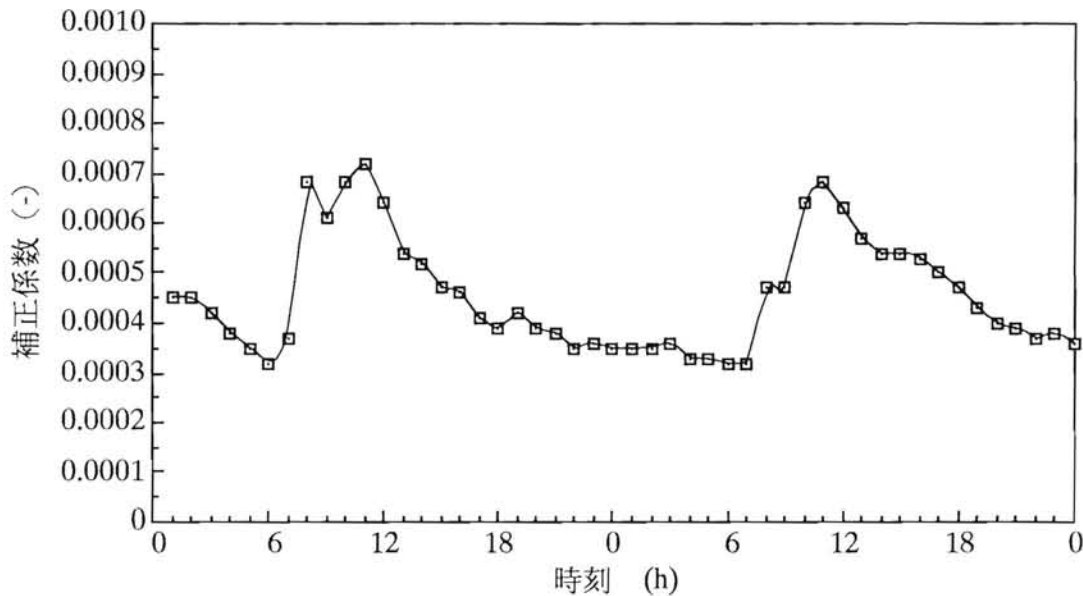


図4-14 床表面からの水蒸気発生補正係数

2) 透過日射の舍内気温への影響

豚舎壁体の一部を透明にして、日射を舍内に取り込んだ場合の、冬期の舍内気温への影響を検討した。計算は、東京の気象データを用いて、1月2日から90日間行った。収容豚は、初期体重30kgの30頭収容で、90日後には体重52.5kgとなるようにした。

東側側壁（面積 21.8m^2 ）に透過性のある部材を用いて日射を舍内に透過させた場合と、透過日射を用いない場合を比較した。期間中の換気回数は6回/hであった。シミュレーションの積算日数87日から90日の舍内気温の経時変化を図4-15に示してある。また、同期間の透過日射無しの舍内気温と透過日射有りの

舎内気温との差（透過日射無し舎内気温－透過日射有り舎内気温）を、図4-16に示してある。

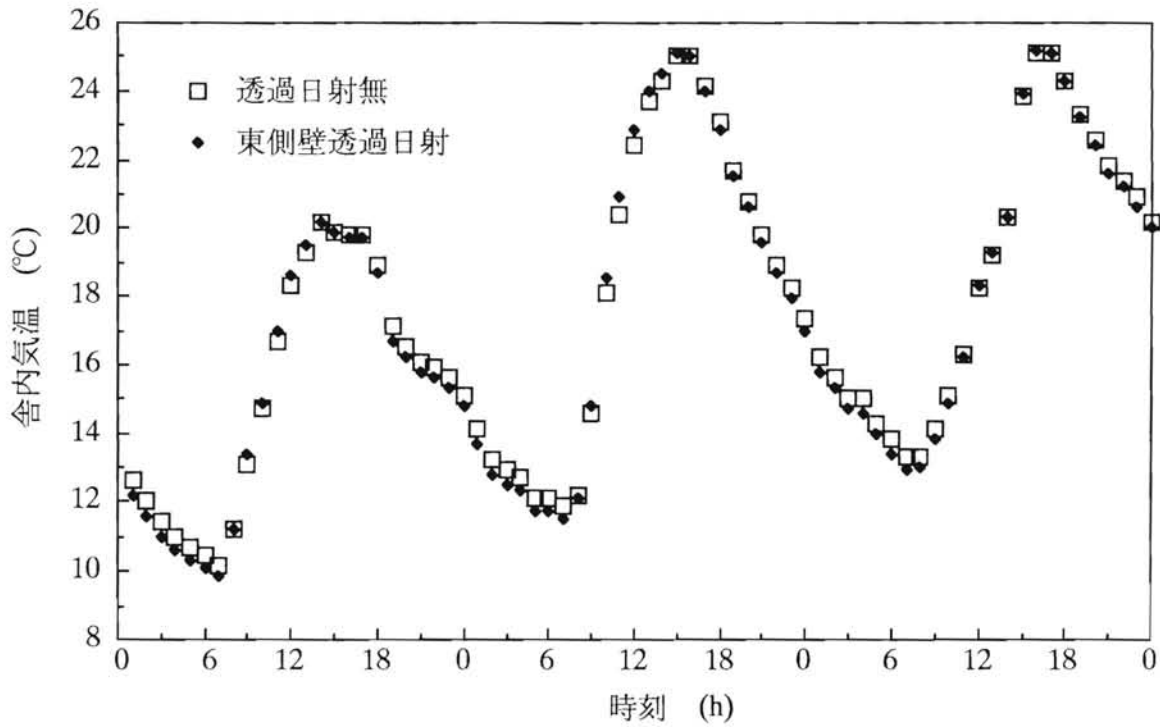


図4-15 透過日射の舎内気温におよぼす影響

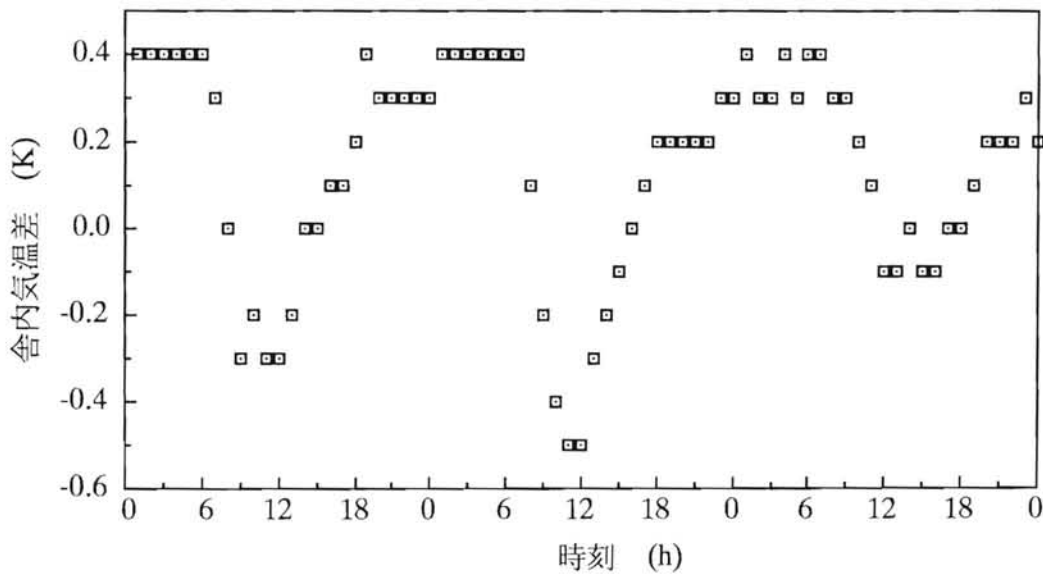


図4-16 透過日射無しの舎内気温－透過日射有りの舎内気温の経時変化

図4-15および図4-16をみると、東側側壁を透明にして日射を舎内に入れた場合、午前8時から約3時間は、透過日射無しと比べて、舎内気温は高くなる。その差は大きいときで約0.5 K

である。逆に夜間、透明壁体を用いたことにより、放射冷却にともなう舎内気温の低下は約0.4Kの影響を受ける。

図4-17に、舎内熱収支の経時変化を示してある。

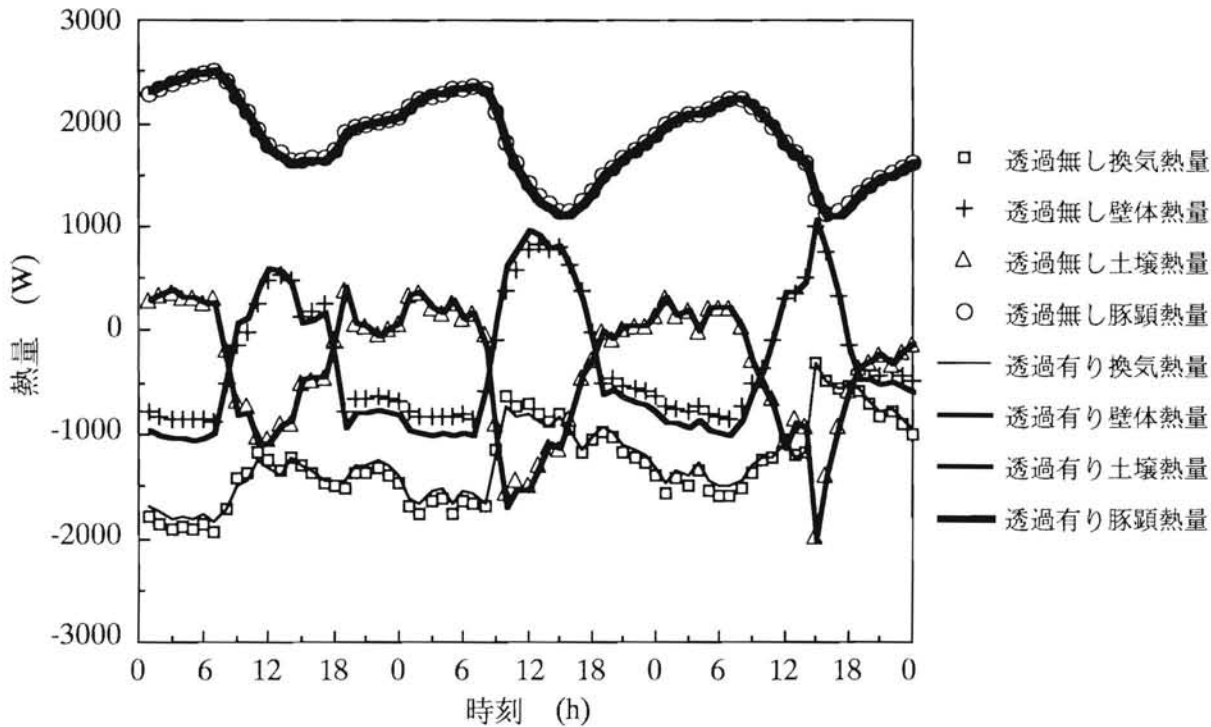


図4-17 透過日射有りおよび無しの場合の舎内熱収支の経時変化

これから、夜間および透過日射が有る場合と無い場合とでの違いは、壁体からの伝達熱量にみられる。東側壁が透過性の被覆材の場合、夜間放射が舎内気温に影響するため、透過日射無しの場合と比べて、熱損失が大きい。しかし、午前8時から12時にかけては、舎内に日射が差し込むために、舎内気温は高くなる。

壁体の一部を透明にして日射を舎内に導入する目的は、日射エネルギーを土壌に蓄積することである。土壌表面からの伝達熱量を比べると、日射の有無で大きな違いはみられない。すなわち、透過日射は、土壌表面で反射し、被覆材に一部吸収され壁体温度を高めるが、土壌にはあまり蓄積されないといえる。

以上のことから、直達日射が差し込まなくなったら、不透過性の部材で覆う方法が有効である。しかし、透過日射を導入す

ると豚の尾かじりなどの習癖がつくということもあり、舎内気温上昇にそれほどの効果がみられないことから、壁体に透明部材を用いる有利性はないと考えられる。

3) 透過日射の舎内相対湿度への影響

図4-18に透過日射有りおよび無しの場合の舎内相対湿度を示してある。図をみると、透過日射有り・無しとも、夜間相対湿度が高く、日中低くなることがわかる。これは、豚体からの水分発生と土壌からの水蒸気に起因している。しかし、透過日射の有無による相対湿度の差は約1%と小さく、両者の間に差は無いといえる。したがって、透過日射の影響は、舎内気温へのそれと同程度にない。

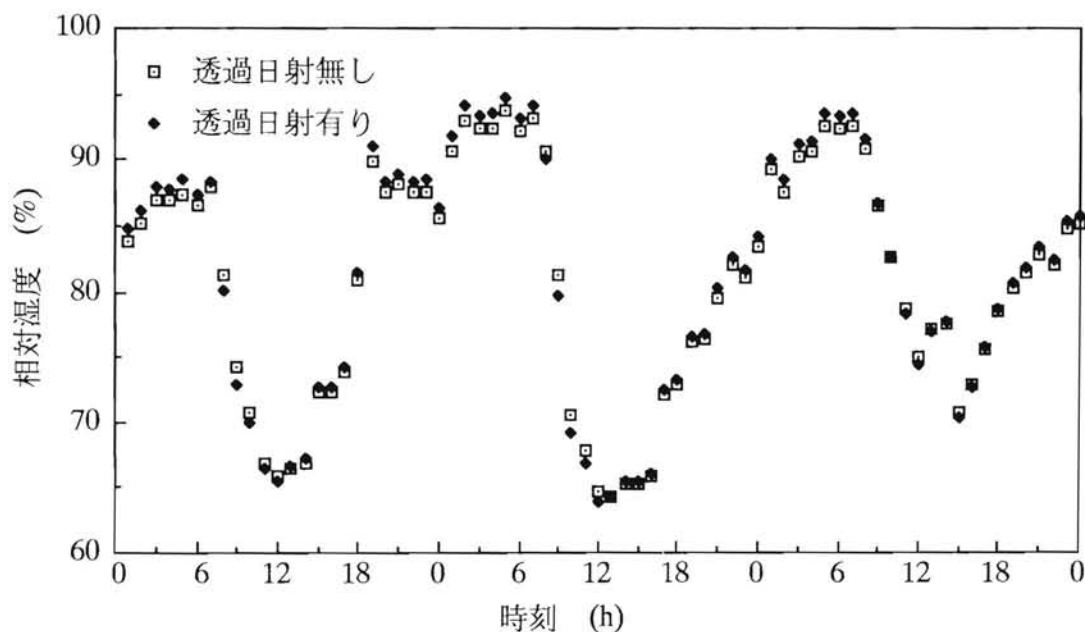


図4-18 透過日射有りおよび無しの場合の舎内相対湿度の経時変化

(4) 舎内気温の年間シミュレーション

年間を通じた長期的な展望から、本対象豚舎についての検討を行う。

1) 計算条件

豚の飼育方法として、初期体重30kgの肥育豚を導入し、100kgまで121日間で飼育するものとした。また、豚の日増体量は、体重変化に関わらず、0.58kg/日の一定とし、次式から計算した。

$$W=30+\frac{70}{121}\text{Pigday (kg)}$$

ただし、W:豚体重、Pigday:飼育日数

豚の導入は、積算日数1日、123日および245日に30kg肥育豚を導入する、年3回転方式とした。飼育密度は、短辺4m、長辺10mの豚房に30頭飼育としたので、1.33頭/m²である。夏期の許容換気量および冬期の必要換気量については豚の体重が70kgにおける設計値を用いた。また、換気量は、換気扇が舎内気温によってインバータ制御されていると仮定し、必要換気回数と許容換気回数の間で変化するものとした。図4-19にその概要を示してある。

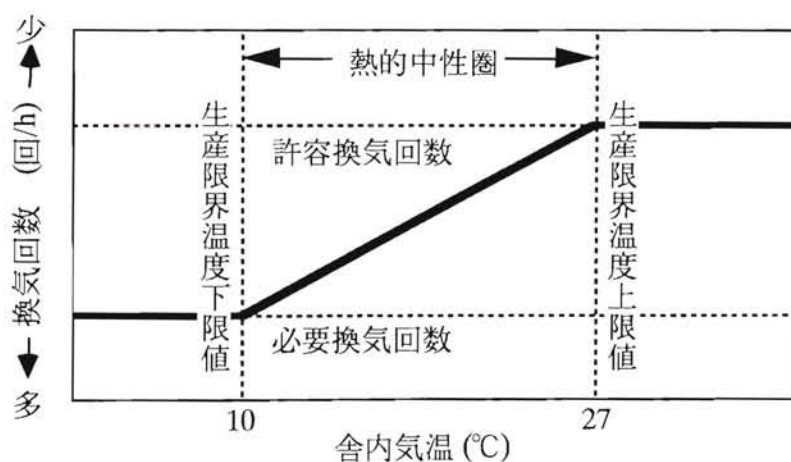


図4-19 舎内気温と換気回数の関係

肥育豚の生産環境限界温度の上限値は27℃、下限値は10℃とされている（相原，1984）²⁾。そこで、換気回数を調節して、舎内気温が熱的中性圏の範囲に可能な限り入り、なおかつ経済的である制御方法が望まれる。換気回数の制御方法を次に示してある。

換気回数制御方法

外気温 t_o 、舎内気温 t_r 、目標舎内気温 t_r' 、運転換気回数 N 、必要換気回数 N_{max} および許容換気回数 N_{min} とすると、最初の計算は、 $N = N_{min}$ で行なう。そして、その時の計算舎内気温から、次の換気回数をどのように変化させるか決める。

i) $t_r < 10^\circ\text{C}$ の場合、

$$N = N_{min}$$

ii) $10^\circ\text{C} \leq t_r \leq 27^\circ\text{C}$ の場合、

$$N = N_{min}$$

iii) $27^\circ\text{C} < t_r$ の場合、

$$N_{min} \leq N \leq N_{max}$$

i) の許容換気回数で舎内気温が10℃未満の時、これ以上、換気回数を少なくできない。よって、舎内気温は10℃未満であるが、この換気回数を、運転換気回数とする。

ii) の許容換気回数で、舎内気温が10℃から27℃の時は、最も電気代が少ない状態で舎内気温が熱的中性圏にある。したがって、運転換気回数に許容換気回数を用いる。

iii) の許容換気回数で舎内気温が27℃より高い時は、運転換気回数を、舎内気温が27℃になるように制御する必要がある。そこで、次の式から適正な運転換気回数を求める。

$$dQ = C_p \rho V (t_r - t_r')$$

$$dV = \frac{dQ}{C_p \rho (t_r - t_o)}$$

$$V = V + dV$$

ここで、必要除去熱量 dQ 、換気変化量 dV 、舎内空気比熱 C_p 、舎内空気密度 ρ 、換気量 V

ただし、計算運転換気回数が必要換気回数より大きくなった時には、運転換気回数として必要換気回数を用いる。

計算は12月31日から予備計算を行ない、1月1日の午前0時から本計算を行なった。

2) 棟方向の舎内気温へおよぼす影響

壁体を一重被覆構造とし、通気層をなくした場合、南北棟および東西棟による棟方向がどのように舎内気温に影響するか検討した。図4-20に日平均舎内気温の経時変化、図4-21に日最高舎内気温の経時変化、また、図4-22に日最低舎内気温の経時変化を示してある。

東西棟の日平均舎内気温の年平均は $19.1 \pm 6.1^\circ\text{C}$ 、最高値は 29.8°C および最低値は 5.8°C となった。また、南北棟の日平均舎内気温の年平均は $19.2 \pm 6.1^\circ\text{C}$ 、最高値は 29.9°C および最低値は 5.8°C となった。

東西棟および南北棟で、日最高舎内気温の年平均は $23.4 \pm 6.0^\circ\text{C}$ 、最高値は 34.7°C および最低値は 6.7°C となった。また、東西棟および南北棟で、日最低舎内気温の年平均は $15.7 \pm 6.5^\circ\text{C}$ 、最高値は 26.6°C および最低値は 3.2°C となった。

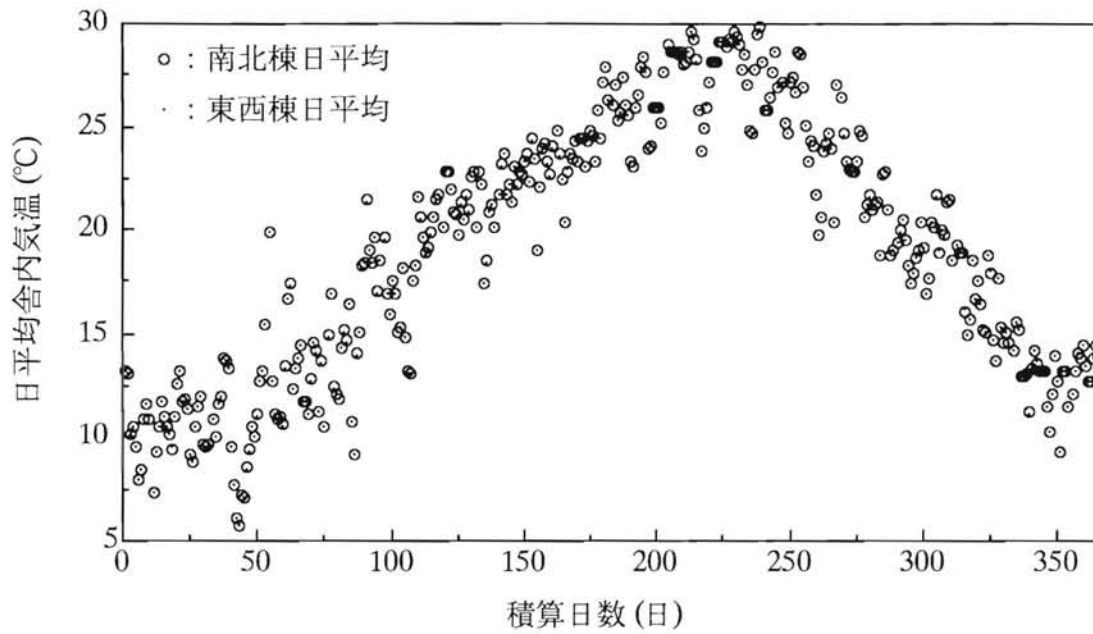


図4-20 一重被覆構造における南北棟と東西棟の違いが日平均舎内気温に与える影響

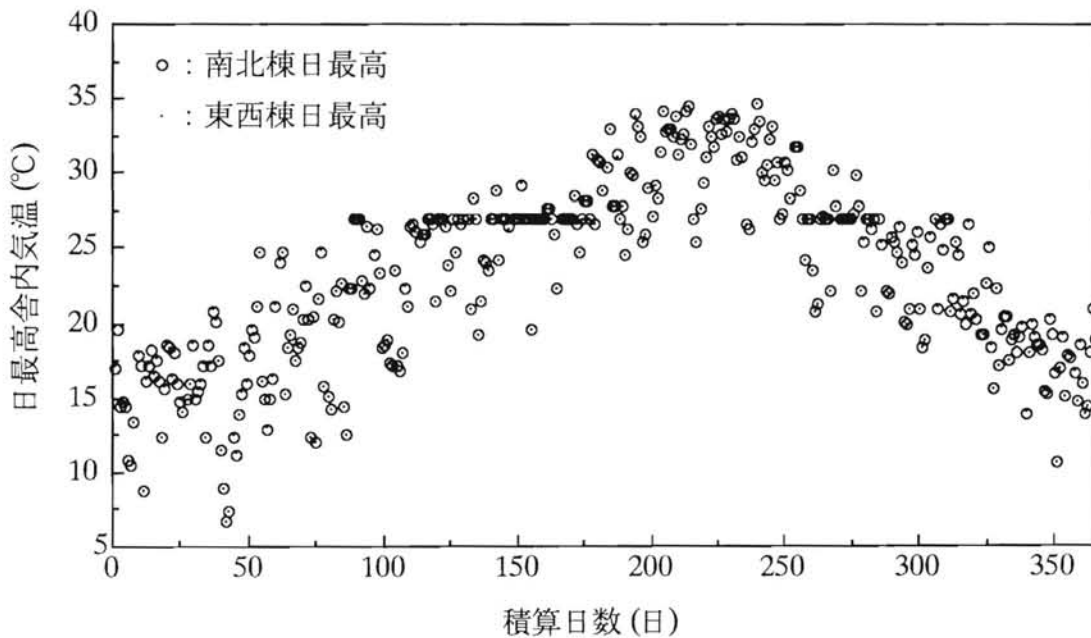


図4-21 一重被覆構造における南北棟と東西棟の違いが舎内日最高気温に与える影響

日平均舎内気温は、南北棟で東西棟に比べて、若干暖かくなるがほぼ同じである。本対象豚舎の舎内気温は、外側に反射フィルムを用いているため、日射および夜間放射にあまり影響されない。したがって、東西棟と南北棟で同じ舎内気温を示すもの

とみられる。

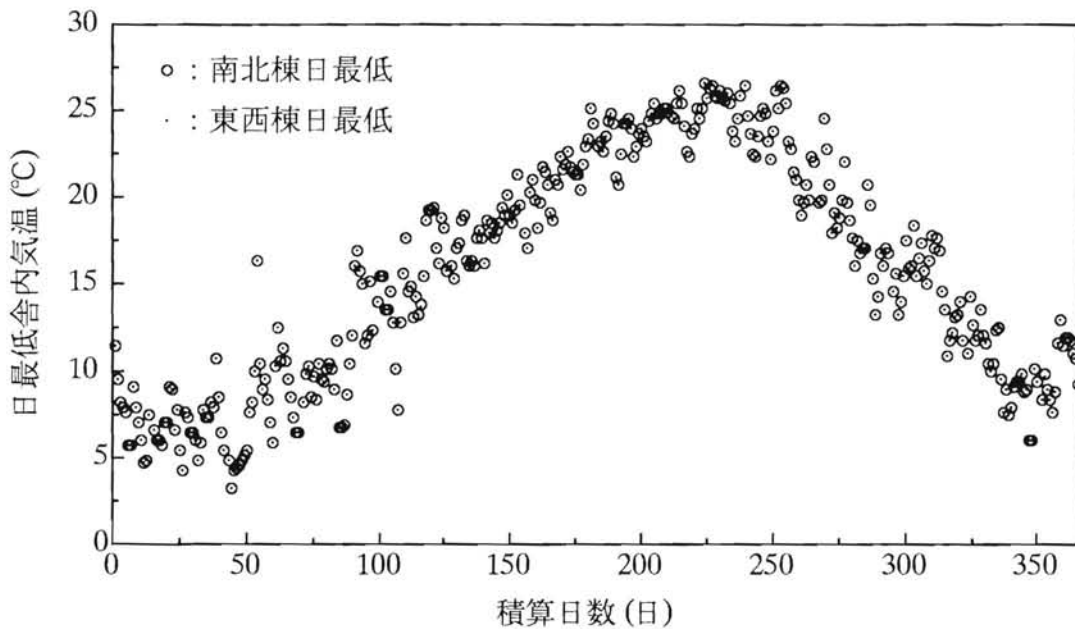


図4-22 一重被覆構造における南北棟と東西棟の違いが舎内日最低気温に与える影響

また、二重被覆構造の時の、南北棟と東西棟の舎内気温を比べた結果、両者に差はみられなかった。これは、通気層を有しているため、二重被覆構造の舎内気温は、一重被覆構造のそれよりも、さらに日射および夜間放射による影響を受けにくいからといえる。したがって、本対象豚舎を建設する場合、舎内気温にとらわれずに地形に合わせて豚舎の方位を決定して良いといえる。

3) 被覆構造の舎内気温へおよぼす影響

二重被覆構造と一重被覆構造が舎内気温へおよぼす影響について検討を行なった。図4-23に日平均舎内気温の経時変化、図4-24に日最高舎内気温の経時変化および図4-25に日最低舎内気温の経時変化を示してある。また、表4-1に計算結果を示してある。

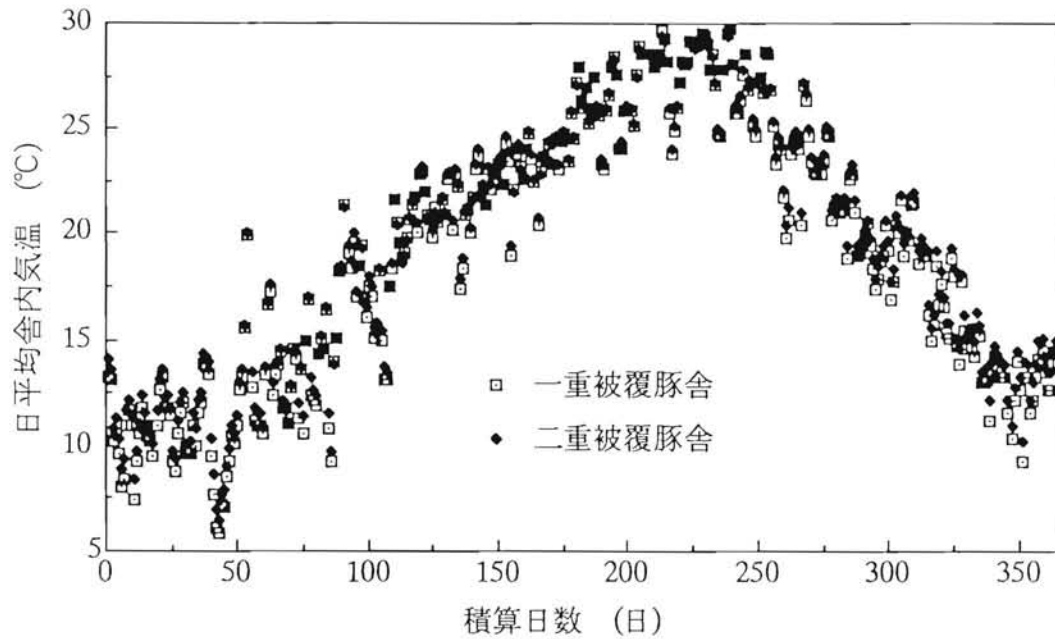


図4-23 一重被覆豚舎と二重被覆豚舎の日平均舎内気温の経時変化

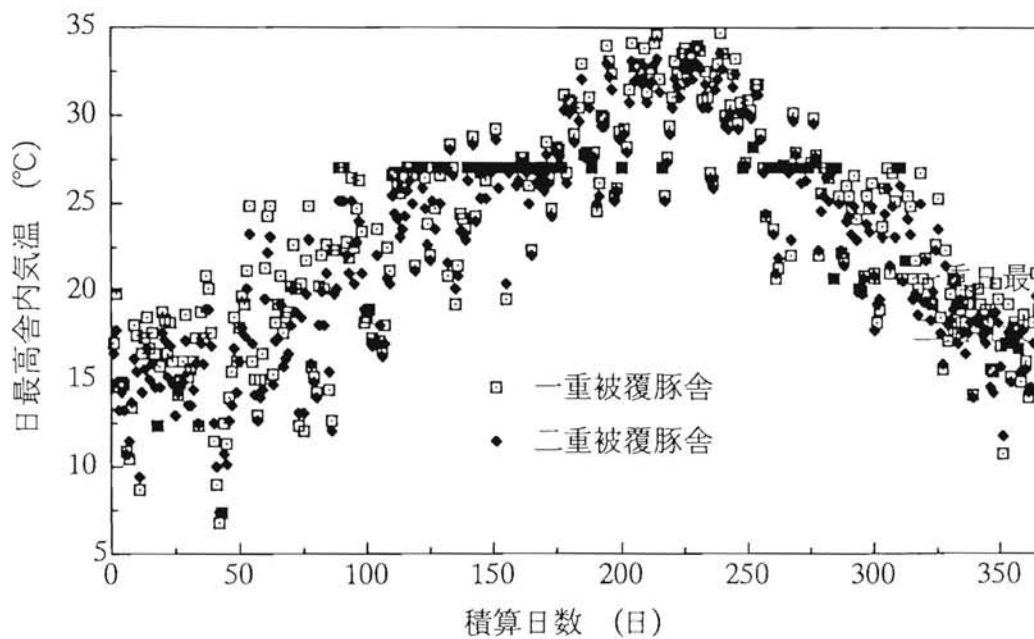


図4-24 一重被覆豚舎と二重被覆豚舎の日最高舎内気温の経時変化

表4-1から、二重被覆構造豚舎は一重被覆構造豚舎より日平均舎内気温は0.4K高く、平均日最高舎内気温は0.8K低く、また、平均日最低舎内気温は0.9K高くなっている。

日最高舎内気温の年間最高値は、二重被覆構造豚舎が33.6℃、一重被覆構造豚舎が34.7℃であることから、夏期の高温時に、

二重被覆構造は舎内気温を低くしている。また、日最低舎内気温の年間最低値は二重被覆構造豚舎が4.8℃、一重被覆構造豚舎が3.2℃であり、冬期でも二重被覆構造は舎内気温を高くしている。このように、二重被覆構造豚舎は、冬期暖かく、夏期涼しくすることが可能である。

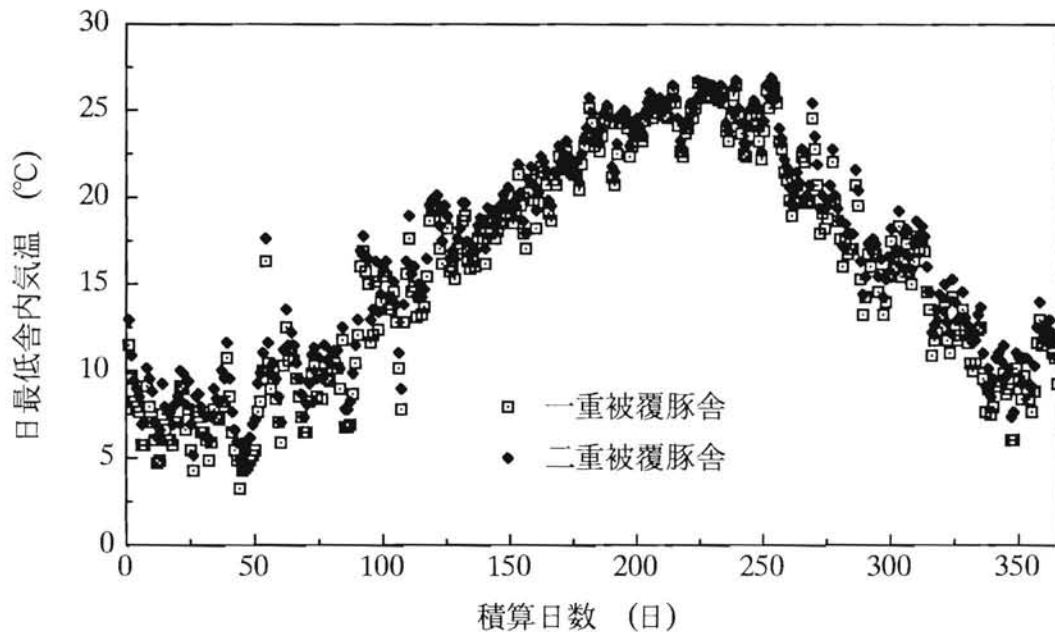


図4-25 一重被覆豚舎と二重被覆豚舎の日最低舎内気温の経時変化

表4-1 一重被覆構造と二重被覆構造の違いが舎内気温におよぼす影響

	一重被覆構造豚舎			二重被覆構造豚舎		
	日平均 (°C)	日最高 (°C)	日最低 (°C)	日平均 (°C)	日最高 (°C)	日最低 (°C)
平均値	19.1 ± 6.1	23.4 ± 6.0	15.7 ± 6.5	19.5 ± 5.9	22.6 ± 6.0	16.6 ± 6.2
最高値	29.8	34.7	26.6	29.7	33.7	26.9
最低値	5.8	6.7	3.2	6.5	7.4	4.8

換気回数は、一重被覆構造豚舎の許容換気回数が2.3回/h、必要換気回数が66.1回/hであるのに対して、二重被覆構造豚舎の許容換気回数は6.0回/h、必要換気回数は24.5回/hであった。年間の平均換気回数は一重被覆構造豚舎が9.2回/h、二重被覆構造豚舎が8.0回/hであった。したがって、二重被覆構造

豚舎での換気扇に要する電気代が安く、また、許容換気回数と必要換気回数との差が小さいことから、冬期と夏期とで同一換気扇台数を用いて豚舎の環境管理を行うことができる。

換気回数22.6回/h、豚体重70kg、30頭飼育の場合での、積算日数124日から128日の4日間の舎内気温の経時変化を、図4-26に示してある。

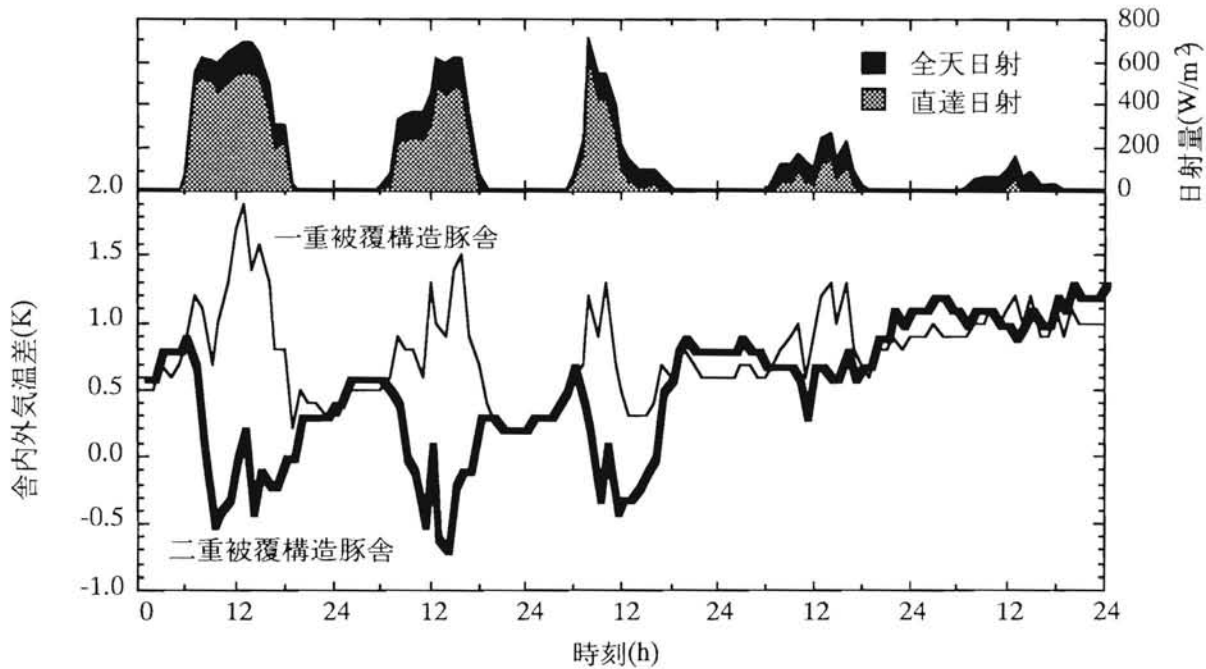


図4-26 一重被覆および二重被覆豚舎の舎内外気温差の経時変化

図をみると、二重被覆構造は、水平面全天日射量が約 700 W/m^2 の時、一重被覆構造と比較して約 1.9 K 低くなる。このように、日射量が大きくなるほど、二重被覆構造と一重被覆構造との舎内気温差が顕著になる。熱量的には、一重被覆構造の壁体表面と舎内空気との間の伝達熱量を100%とすると、二重被覆構造のそれは約35%で、日中この値はほぼ一定であった。また、夜間のような舎内から舎外へ熱が流れる時、その断熱性から、一重被覆構造の方が、逆に、舎内気温で約 0.2 K 低くなるが、その差は小さく無視できる程度であった。これらのことから、舎内気温は夏期低く、冬期高くなること、換気回数

を少なくすることができることなどから、二重被覆構造豚舎は、一重被覆構造豚舎と比較して、優れていると結論づけられる。

4)各地におけるシミュレーション

二重被覆構造東西棟豚舎を、各地に設置した場合、どのような舎内気温を示すか考察する。許容換気回数および必要換気回数は各地の気象データから算出した値を用いた。各地での、日平均舎内気温の生産限界気温以上、以下および範囲内の各日数を図4-27に示してある。日最高気温および日最低気温の生産限界気温以上または以下の日数を図4-28に示してある。

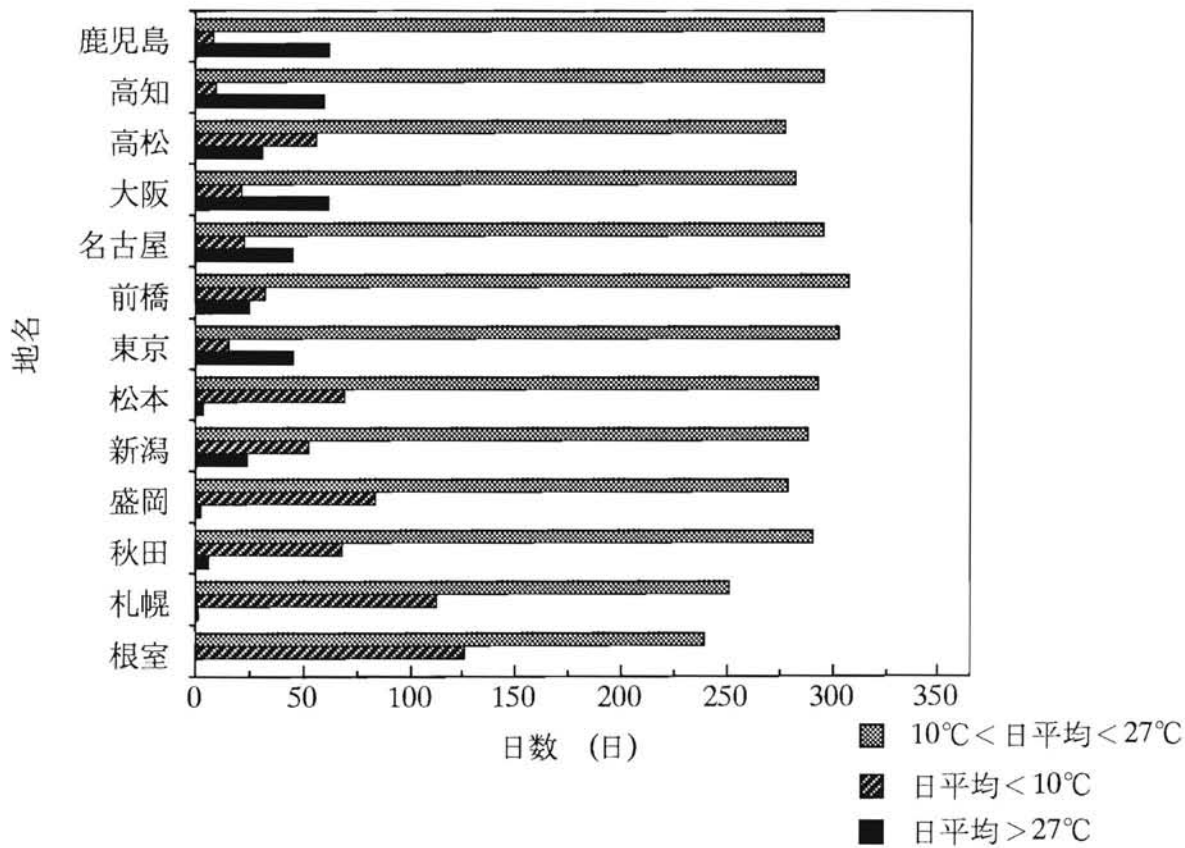


図4-27 日平均舎内気温の年間シミュレーション結果

これらの図をみると、日平均舎内気温が10℃から27℃の範囲に入る日数は、前橋で一番多く303日、一番少ないのは、根室で、239日であった。北海道では平均245日、その他の地域

では約291日となり、各地域間で大きな差はなかった。

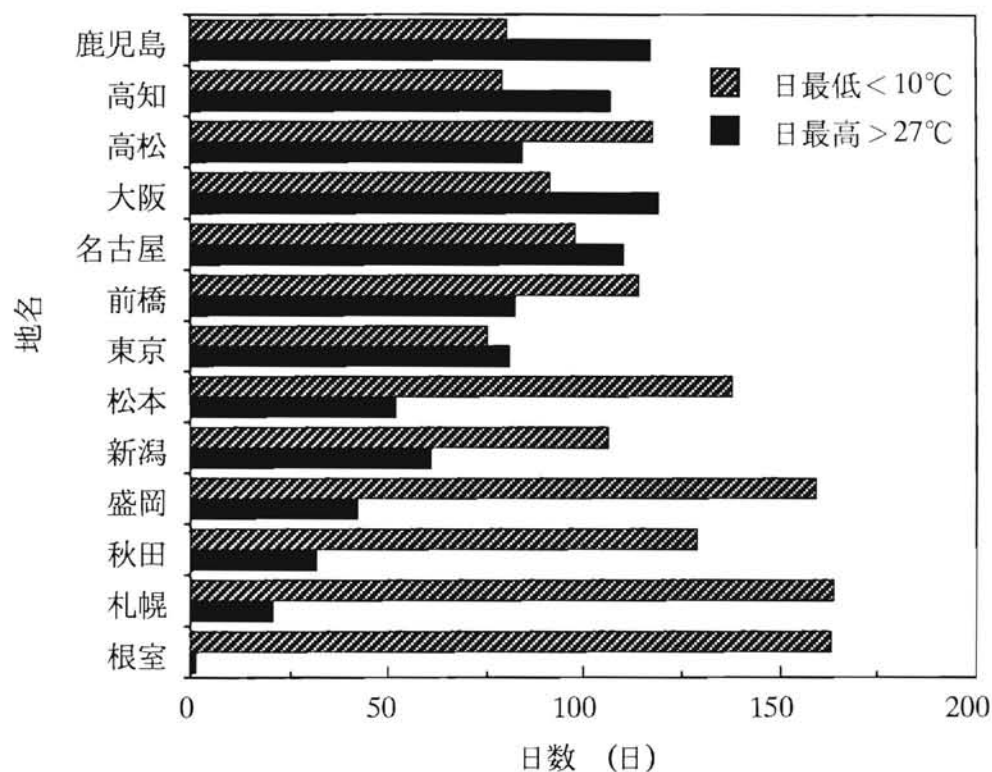


図4-28 日最高・最低舎内気温の年間シミュレーション結果

冬期の舎内気温が問題となる北海道、東北地方における日平均舎内気温が10℃以下になる日は、北海道約120日、東北76日となっていた。特に冬期に冷え込む根室における最低舎内気温は-1.3℃であった。また、夏期の最高舎内気温は30.4℃、舎内気温の年平均は 13.3 ± 5.5 ℃であった。冬期の最低舎内気温は根室-1.3℃、札幌-2.8℃および盛岡-0.9℃とマイナスになった。また、秋田においてその値は1.2℃となった。その他の地域での値は約5℃以上であった。したがって、北海道および東北地方では、冬期、補助暖房を行なう必要がある。ただ、日平均舎内気温が10℃以下になる日が、北海道の約120日と、長期の場合、この豚舎をそのような地方で用いるにはかなりの暖房費がかかるものと考えられる。東北地方および新潟、松本、高松では、補助暖房の必要期間は約60日程度であり、それ以

外の地域では、補助暖房は特別必要ないと推論される。

夏期の暑熱対策面では、北海道および東北地方はほとんど問題にならないが、関東以南地方、特に大阪地方で問題となる。大阪では、日平均舎内気温が 27°C を越える日は62日、最高舎内気温が 27°C を越える日は119日であった。

夏期に舎内気温を外気温以下にすることは、噴霧冷却等の設備が必要である。一般に、外気温が 27°C 以上となる地域では、換気回数をできるだけ少なくして舎内気温を外気温に近づけることが望ましく、その点、この二重被覆構造の豚舎は優位であるといえる。

4. 使用記号

- A_i : 内側壁体面積 (m^2)
- A_o : 外側壁体面積 (m^2)
- C : 土壌の熱容量 (W/K)
- C_a : 乾き空気の定圧比熱 (J/kg K)
- C_c : 雲量 (-)
- C_v : 水蒸気の定圧比熱 (J/kg K)
- C_s : 単位体積当たりの土壌熱容量 ($\text{J/m}^3 \text{K}$)
- $C_{s,r}$: 舎内空気の湿り比熱 (J/kg K)
- $C_{s,v}$: 通気層空気の湿り比熱 (J/kg K)
- E : 均時差 (h)
- F_g : 傾斜面の地面に対する形態係数 (-)
- F_s : 傾斜面の天空に対する形態係数 (-)
- H_o : 外部湿り空気のエンタルピ (J/kg)
- H_i : 舎内湿り空気のエンタルピ (J/kg)
- H_v : 通気層湿り空気のエンタルピ (J/kg)

- $head$: 飼育頭数 (head)
 h_o : 外側表面の熱伝達率 (W/m^2K)
 h_i : 内側表面の熱伝達率 (W/m^2K)
 $I_{h_{oi}}$: 水平面全天日射量 (W/m^2)
 I_{DN} : 法線面直達日射量 (W/m^2)
 I_t : 壁体外表面に入射する日射量 (W/m^2)
 I_s : 傾斜面入射散乱日射量 (W/m^2)
 I_d : 散乱日射量 (W/m^2)
 I_D : 直達日射量 (W/m^2)
 I_R : 反射日射 (W/m^2)
 $I_{n_{oc}}$: 水平面夜間放射量 (W/m^2)
 L : 緯度 (rad)
 L_s : 標準子午線 (rad)
 l_i : 内側被覆材の厚さ (m)
 l_o : 外側被覆材の厚さ (m)
 l_s : 分割した土壌の厚さ (m)
 m_a : 舎内における全発生水分量 ($kg/s\ head$)
 m_p : 豚体からの発生水分量 ($kg/s\ head$)
 m_r : 糞尿等からの発生水分量 ($kg/s\ head$)
 n : 積算日数、または1月1日からの経過日数 (-)
 n_{mx} : 年最高地表面温度の生じる通日 (-)
 Q_a : 舎内における全発生熱量 ($W/head$)
 Q_{al} : 全発生潜熱量 ($W/head$)
 Q_o : 舎内へ入った外気の持つ熱量 (W)
 Q_{pl} : 豚からの潜熱量 ($W/head$)
 Q_{ps} : 豚からの顕熱量 ($W/head$)
 Q_r : 舎内から排出された空気の持つ熱量 (W)

- Q_{r1} : 糞尿からの潜熱量 (W/head)
 Q_v : 通気層から外部へ排出される空気の持つ熱量 (W)
 Q_1 : 外部と外側壁体との間の熱伝達量 (W)
 Q_2 : 外側壁体の熱伝導量 (W)
 Q_3 : 通気層と外側壁体との間の熱伝達量 (W)
 Q_4 : 通気層と内側壁体との間の熱伝達量 (W)
 Q_5 : 内側壁体の熱伝導量 (W)
 Q_6 : 内側壁体と舎内との間の熱伝達量 (W)
 Q_7 : 舎内空気と土壌との間の熱伝達量 (W)
 t : 標準時 (h)
 t_{AS} : 真太陽時 (h)
 t_o : 外気温 ($^{\circ}\text{C}$)
 t_r : 舎内気温 ($^{\circ}\text{C}$)
 t_{s1} : 土壌表面温度 ($^{\circ}\text{C}$)
 t_v : 通気層気温 ($^{\circ}\text{C}$)
 t_1 : 外側壁体の外表面温度 ($^{\circ}\text{C}$)
 t_2 : 外側壁体の内表面温度 ($^{\circ}\text{C}$)
 t_3 : 内側壁体の外表面温度 ($^{\circ}\text{C}$)
 t_4 : 内側壁体の内表面温度 ($^{\circ}\text{C}$)
 V : 換気量 (m^3/s)
 W_{α} : 傾斜面の傾斜角 (rad)
 W_{β} : 傾斜面の方位角 (rad)
 X_o : 外気絶対湿度 (kg/kg')
 X_r : 舎内絶対湿度 (kg/kg')
 X_v : 通気層絶対湿度 (kg/kg')
 α : 太陽高度 (rad)
 β : 太陽方位角 (rad)

γ : 壁体傾斜面に対する太陽光線の入射角 (rad)

$\Delta \theta_{g, s}$: 地表面温度の年較差 ($^{\circ}\text{C}$)

ε : 外側被覆材外表面の放射率 (-)

δ : 太陽赤緯 (rad)

θ : 土壌内部温度 ($^{\circ}\text{C}$)

$\theta_{g, 10}$: 不易層温度 ($^{\circ}\text{C}$)

$\theta_{g, r z}$: 長谷川の式からの土壌内部温度 ($^{\circ}\text{C}$)

λ_o : 外側壁体の熱伝導率 (W/mK)

λ_i : 内側壁体の熱伝導率 (W/mK)

ρ_g : 地面の日射反射率 (-)

ρ_s : 壁体の日射反射率 (-)

ρ_o : 外気密度 (kg/m^3)

ρ_r : 舎内空気密度 (kg/m^3)

ρ_v : 通気層空気密度 (kg/m^3)

Φ : 緯度 (rad)

ω : 時角 (rad)

変数の添え字 n は壁体番号で、1 : 西屋根 2 : 東屋根 3 : 南妻面 4 : 西側壁 5 : 北妻面 6 : 東側壁をそれぞれ示す。