

工場の二重化鋸屋根の自然換気による日射熱遮蔽効果

正会員 ○ 本間 宏 *1
正会員 仲井 善律 *2

鋸屋根 通気層 日射熱
自然換気 冷房負荷 数値予測

1. はじめに

我が国で戦後の高度成長期に建てられた工場の屋根葺き材は耐用年限に近づき、補修による維持が不経済な時期に入っている。しかしこれに使用されている材料は石綿スレート板が大部分で、交換のために取り外しても、環境問題上廃棄することは困難である。この現状に対処する手段として、現在の石綿スレート板はこのまま残し、この上に鋼板の屋根を置く改修を行うことによって使用を延長することが考えられる。

また我が国の北部を除く大部分の工場では夏季に温度が上昇しすぎるため、労働衛生および作業効率の悪化が問題となっている。この大きな原因として日射熱に照射される屋根面から工場内作業空間への放射熱があり、温熱環境改善のためには屋根下面の温度低下が効果的であると予想される。二重屋根下面の温度低下の手段として、屋根中にてできる空気層を換気することが考えられる。これによって通気層中の空気温度を低下させられること、通気層上面の材料の温度を低下させ、上面から下面への放射熱伝達を低下させる可能性が考えられる。工場の鋸屋根のような傾斜に沿った長さが長い二重屋根の通気層では換気の原動力として空気自身の浮力を効果的に利用できると思われる。太陽熱により温められた空気の浮力を利用する自然換気は小屋裏や外壁中空層の日射熱排除手法として従来から広く利用されている。

在来の石綿スレート板の上に鋼板を被せることにより危険材料の廃棄による環境問題を解決すると同時に、二重屋根の間の空気層の自然換気によって、工場の夏季の温熱環

境改善、冷房負荷低減を図れると予想されたので、この効果を次のような方法で試算した。

2. 予測対象

改修される屋根は広大な面積の工場を覆う屋根で、南向きの斜面と北向きの鉛直面をもつ鋸形をしている。この屋根の鋸の歯一枚に相当する部分は斜面に沿う長さ 10 m で、斜面の傾斜角は 30° である。この屋根は現在、厚さ 9 mm、波のピッチ 130 mm の石綿スレート板で葺かれている。改修のため、この上に背丈 25 mm の母屋を 850 mm ピッチで水平に置き、その上に厚さ 0.5 mm、波のピッチ 130 mm のアルミ合金鍍金鋼板（ガルバリウム鋼板、以下鋼板と表示）を乗せる構造である。この結果、通気層の構造は間隔が平均 100 mm の波打った形状で、850 mm ピッチで高さ 25 mm の障害が存在する。また屋根上端には雨仕舞いのため高さ 400 mm の折り下げが設けられる。この部分の開口は通気層の断面積の約 9% に絞られる。

3. 自然換気による日射熱排除効果の予測

通気層に生じる自然換気とそれによる日射熱排除効果の予測を次の方法で行った。

通気層は上下の面材の波が一致しているため、厚さ 100 mm の平らな通気層を仮定した。通気層を傾斜方向に沿って 20 区間に等分し、その各区間毎に図 1 に示すように屋根上面の鋼板への日射熱、外気温、屋根下面の室温、当該区間の下部（左）境界から流入する空気の流量とその温度を入力として、区間内の空気とそれが接する上面および下面との対流熱交換、上面および下面の放射熱交換、下部石

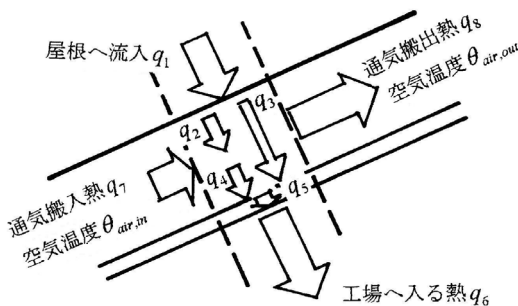


図 1 通気層の 1 区間における熱流要素

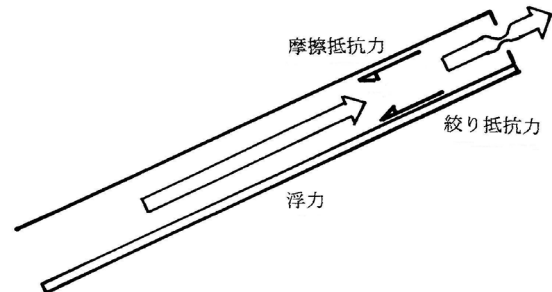


図 2 通気層の気流の浮力と抵抗力

綿スレート板の熱伝導抵抗を考慮した定常熱平衡式よりその区間の上部（右）境界を通過する空気の温度を求めた。

3.1 熱流と気流に関連する記号

通気層 厚さ D [m]

幅 B [m]

長さ L [m]

開口部面積 S_e [m²]

傾斜角度 A [rad.]

空気の密度(0°Cにおいて) ρ_0 [kg/m³]

比熱 C [J/kg K]

スレート板の厚さ D_s [m]

熱伝導率 λ_s [W/m K]

気流速 V [m/s]

摩擦係数 λ_f [non.]

温度 外気 θ_{out} [K]

工場内空気 θ_{in} [K]

鋼板 θ_1 [K]

スレート板上面 θ_2 [K]

下面 θ_3 [K]

通気層内空気 θ_{air} [K]

第2添字 *in*、*out* はそれぞれ入り口、出口を表す

日射熱量 J [W/m²]

日射熱吸収率 α [non]

対流熱伝達率 屋根上面 $\alpha_{c,t}$ [W/m² K]

屋根下面 $\alpha_{c,l}$ [W/m² K]

通気層内 $\alpha_{c,s}$ [W/m² K]

線形化放射熱伝達率 α_r [W/m² K]

3.2 熱流の要素

屋根の幅 1m について計算を行う。屋根に沿って通気層中に上昇気流が生じ、この空気は鋼板の下面および石綿スレート板の上面と熱を交換しながら進む。熱流計算は図1に示すように屋根を傾斜に沿って分割した1区間の長さを

dL とし、この区間について図1に示す各熱流要素を屋根上部から下部へ向かう方向を正として次のように表す。熱計算では通気層の流速を V と仮定する。

外気からおよび日射熱入射鉄板上面へ

$$q_1 = \alpha_{c,t} \left(\theta_{out} + \frac{\alpha J}{\alpha_{c,t}} - \theta_1 \right) BdLt \quad (1)$$

鉄板下面から通気層空気へ

$$q_2 = \alpha_{c,s} (\theta_1 - \theta_{air}) BdLt \quad (2)$$

鉄板下面からスレート板への放射熱

$$q_3 = \alpha_r (\theta_1 - \theta_2) BdLt \quad (3)$$

通気層空気からスレート板上面へ

$$q_4 = \alpha_{c,s} (\theta_{air} - \theta_2) BdLt \quad (4)$$

スレート板上面から下面へ

$$q_5 = \frac{\lambda_s}{D_s} (\theta_2 - \theta_3) BdLt \quad (5)$$

スレート板下面から工場へ

$$q_6 = \alpha_{c,l} (\theta_3 - \theta_{in}) BdLt \quad (6)$$

流入空気による搬入

$$q_7 = c\rho VBD \theta_{air,in} t \quad (7)$$

流出空気による搬出

$$q_8 = c\rho VBD (\theta_{air,out}) t \quad (8)$$

3.3 熱平衡式

これらの熱流の平衡状態はこの区間の各部について次のように表される。

鋼板の熱平衡： 鋼板は厚さ方向の温度分布を考慮せずに、上下表面が均一の温度に成ると仮定し、上面への日射熱入射、上面と外界との総合熱伝達率による熱交換、下面では通気層空気との対流熱交換、石綿スレート板上面との放射熱交換による熱平衡式を立てた。

$$q_1 = q_2 + q_3 \quad (9)$$

通気層の熱平衡： 通気層の熱平衡は各区間の下端から流入する空気が鋼板下面および石綿スレート板上面と対流熱交換を行いながらこの区間を通過し、上端に達する時の温度を求めた。

$$q_2 + q_7 = q_4 + q_8 \quad (10)$$

スレート板上面の熱平衡： 石綿スレート板は上面と下面のそれぞれに熱平衡式を立て、両者の温度を求めた。上面では鋼板との放射熱交換、通気層空気との対流熱交換、下面との伝導熱交換を平衡式に含めた。

$$q_3 + q_4 = q_5 \quad (11)$$

スレート板下面の熱平衡： 下面では上面との伝導熱交換と工場空間との総合熱交換を熱平衡式に含めた。

$$q_5 = q_6 \quad (12)$$

3.4 各部の温度の計算

ある区間の下端における流入空気の温度 $\theta_{air,in}$ および流速を既知とすれば、(9)~(11) の4熱平衡式を連立方程式として4未知数である鉄板の温度 θ_1 、スレート板上面の温度 θ_2 、スレート板下面の温度 θ_3 、区間 dL の上端の流出空気温度 $\theta_{air,out}$ を求めることができる。屋根下端において、流入空気温度が外気温度に等しいと仮定すれば、下端より距離 dL の境界の温度を決定でき、またこの区間の鉄板の温度 θ_1 、スレート板上面の温度 θ_2 、スレート板下面の温度 θ_3 も求まる。この操作を下端から順に繰り返すことによって20区間全体の各部の温度が求まる。

3.4 気流に作用する諸力

自然換気は通気層内空気に働く浮力の通気層に平行方向の成分によって生じ、この空気の流れに対する抵抗力として通気層開口部の構造によって生じる形状抵抗と通気層上下面と空気との摩擦抵抗を考慮し、図2に示すように浮力と抵抗力が平衡する速度を求めた。浮力は3.3で求めた20区間の通気層内空気温度と外気の温度、通気層の鉛直方向の距離より求めた。通気層内気流の摩擦抵抗はダクトの摩擦係数を用いて計算した。開口部の形状抵抗は開口部の面積に流量係数を0.6と仮定して計算した。通気層内空気に作用する浮力は次式によった。

$$P_b = g\rho_0 \left(\frac{273}{273 + \theta_{air,out}} - \frac{273}{273 + \theta_{air}} \right) L \sin A \cos A \quad (12)$$

出口動圧損失は次式によった。

$$P_a = \rho_0 \frac{273}{273 + \theta_{air,out}} \left(\frac{DB}{S_e} V \right)^2 \quad (13)$$

通気層内摩擦損失は次式によった。

$$P_f = \frac{\lambda_f L}{2D_e} \rho_0 \frac{273}{273 + \theta_{air,out}} V^2 \quad (14)$$

3.66 力の平衡式

浮力、形状損失、摩擦損失の関係は次のようになる。

$$P_{b=} = P_a + P_f \quad (15)$$

通気層が幅1mと仮定して、その相当直径を使用し、気流のレイノルズ数を試算すると、流速0.2 m/sの時、約2400、流速0.5 m/sでは約6100であるので、対流熱伝達率は乱流時の値を用いた。

鋼板と石綿セメント板上面との放射熱交換は両面の間で、線形化放射熱伝達率を用いて計算した。

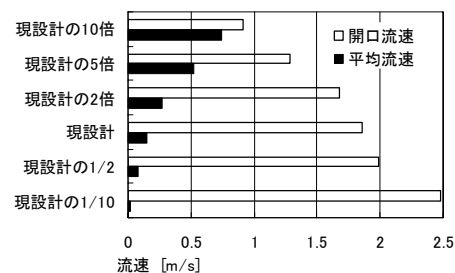
熱量の平衡式に通気量が含まれ、換気量の平衡式には各区間の温度が含まれるので、両方程式を交互に、逐次修正しながら平衡する温度と流速を決定する方法を採った。

4. 予測結果 本改修工事の現設計では通気層の上端の開口は雨仕舞い対策のため通気層の断面積の約9%になった。そこでこの開口面積を中心に開口部面積を段階的に変化させて自然換気の効果調べた。

屋根の周辺条件は東海地方の夏の状態を想定し、外気温度30℃、屋根面への日射熱入射量500 W/m²、工場内温度26℃を仮定して計算した。

図3は開口面積を変化させて、通気層内と開口部に生じる気流速度を求めた結果を示す。原設計では開口部における平均流速は約2 m/sに達し、通気層平均流速は約0.2 m/sに留まる。開口を原設計の10倍（開口は通気層面積の約90%）では通気槽内流速は約0.7 m/sとなる。開口面積を現設計の1/10に制限すると、開口部流速は約2.5 m/sに達する。この時、通気槽内流速は約0.02 m/sに低下するが、この速度を時速に換算すると72 m/sであり、この開口面積でも通気層は1時間当たり約7回の換気が行われることになる。

図4は開口部面積を現設計の1/10（通気層断面の約0.9%）から10倍（90%）まで変化させた場合の通気層中空気温度の流路に沿った温度変化を示す。開口部が現設計の1/10の場合、下部から空気が流入するとすぐに約43℃まで上昇し、そのまま出口へ向かう。この状



通気層内平均流速および開口部流速

態では換気の効果は現れず、換気を含めない熱平衡式の温度とほぼ同じになる。現設計の開口の場合、流路のほぼ中間点で空気温度は 42℃を越え、以降あまり変化しなくなる。開口面積が現設計の 10 倍に拡大されると、空気温度は流路に沿ってほぼ直線的に上昇し、出口では約 38℃と、外気温から約 8℃の上昇に留まり、原設計の 1/10 の場合より約 7℃の低下となった。

図 5 は石綿スレート板下面の温度分布を示す。平均温度は開口が通気層断面の 1/100 から原設計まで増加すると 36.4℃から 35.4℃まで低下し、100%開口では更に 34℃まで低下する。同じ周辺条件で石綿スレート板単板の場合、屋根下面温度は約 44℃である。

図 6 は工場内温度を 26℃に維持するときの天井表面温度の低下による冷房負荷の変化を示す。冷房負荷は傾斜方向の天井長さ 10 m、幅 1 m について計算したものである。これを単位面積あたりに換算すると石綿スレート板単板の場合、186 W/m² であり、二重屋根で自然換気を行わない場合には 139 W/m² までしか減少しないが、現設計の開口を設けることにより 96 W/m² に低下することがわかった。しかし、開口部をさらに広げても低減の効果の傾斜は次第に緩くなった。

非常に広い工場の中央付近の作業員に対して、天井と床の形態係数が 50%づつであると仮定すれば、天井温度が 44℃から 36℃まで 8℃低下すれば、人体に対する平均放射温度の低下は 4℃になる。更に作用温度が空気温度と平

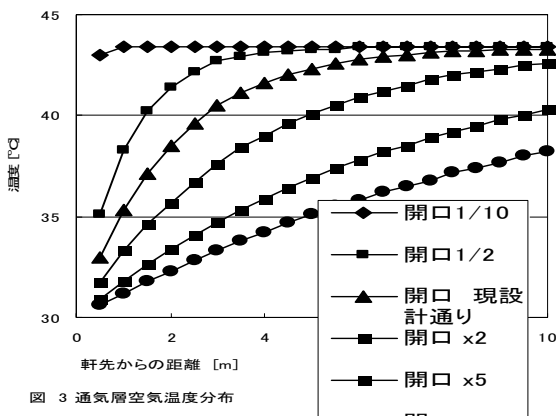


図 3 通気層空気温度分布

均放射温度の単純平均で表されるとすれば、現設計の開口を設けた二重屋根の工場では、空気温度がこのままでも作業員は作用温度を 2℃低く感じながら作業出来ると思われる。本計算は天井面より下は空気温度、表面放射温度ともに 26℃と仮定した結果である。大規模工場で周囲の壁の外界との熱交換が無視できるような場合の夏季の温熱環境は天井から床面への放射熱が大きな役割を持ち、これにより熱容量の大きい床の温度は梅雨以降、上昇を始め、夏の終わり頃には相当上昇し、作業員の温熱環境を悪化させ、冷房を行っている場合には負荷が上昇していることが予想される。二重天井の換気による温度低下の効果はこのような非定常計算を行えば、より大きな効果になって表れるものと思われる。

まとめ 現在の石綿スレートの屋根板を撤去せずに、アルミニウム合金鍍金鋼板を乗せ、そこに出来る通気層を自然換気することによって屋根面に生じる冷房負荷を約半分まで減らす事が出来、また作業員の体感温度も 2℃程度低下出来ると予測される。この予測は単純な計算によったものであるため、特に気流に対してはより詳細な計算を行い、また実測によって効果を確認することによって、実用性の高い通気屋根に発展させられると思われる。

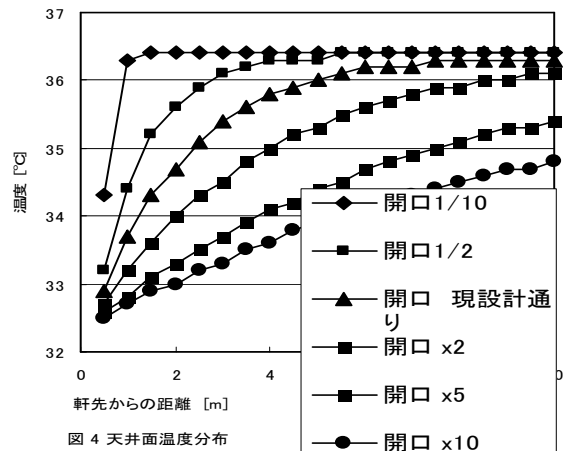


図 4 天井面温度分布

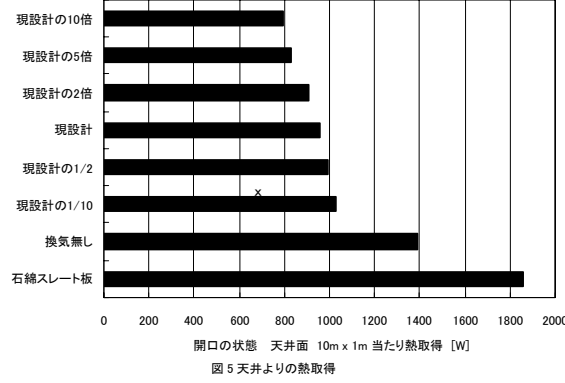


図 5 天井よりの熱取得

*1 豊橋技術科学大学
*2 (株) 仲井

*1 Toyohashi University of Technology
*2 Nakai Inc.