

緑化工法の開発 — ミドリンルーフSの開発 —

小河義郎* 茂木正史* 中村裕介*

1. まえがき

近年、都市部のヒートアイランド現象を緩和し、良好な自然環境を創る手段として屋上緑化が注目されている。屋上を緑化することにより直下階の空調エネルギーを削減することができ、省エネや環境問題の緩和策として期待されていることから、各行政が一定規模以上の敷地を有する建築物について屋上緑化を義務付ける指導が増えている。一方では、緑化することにより、建物の容積率が緩和できる等の種々の行政措置もある。また、平成16年3月に工場立地法の一部が改正され、敷地内に確保しなければならない緑地面積に屋上、壁面緑化を含めることが可能となり、敷地内により大きな建物の計画や既存建物の増改築ができ易くなった。

そのような背景から、当社でも顧客に積極的に提案できる屋上緑化技術を実用化するために、施工性が良く、移動性を考慮したRC造建物の屋上を対象とした緑化システム（以後ミドリンルーフRと称す）とS造建物の折板屋根を対象とした断熱効果を有する緑化システム（以後ミドリンルーフSと称す）の開発を行った。現在、ミドリンルーフRに関しては実建物に適用し、植物の生育状態や灌水機能の観察を行っている。また、ミドリンルーフSについては、技術研究所屋外に実大試験体を施工し、植物の生育状況を観察すると共に、緑化システムの各部の温度や日射量を計測し、システムの断熱性能の検証を行っている段階である。

ミドリンルーフRの植物の生育状況や断熱効果等の詳細については、年報No. 29の中で報告した。そのため本報では、ミドリンルーフSの概要と耐荷重性能（耐積載試験、耐風圧試験、シミュレーションの結果）や断熱性能（システム各部の温度測定結果）を実大試験を通して検証した内容について報告する。

2. 開発経緯

ミドリンルーフSを開発した主な経緯は、工場立地法（図-1）における緑地指導要綱の緩和規定による場所が大きい、同時に折板屋根の断熱性能を向上させるところにも重点を置いた。断熱二重工法（ダブルパック工法）の折板屋根もあるが、多くの場合、工場や倉庫等の屋根は結露防止用の断熱材（厚み5mm程度）が裏打ちされたものを使用している程度なので、RC造に比べ室内は外気に影響され易く、その環境を良好に維持するには多くの空調エネルギーを費やしていた。そのため、法規制の緩和に対応でき、環境問題にも貢献できる折板屋根を対象とした、ミドリンルーフSの開発を行った。

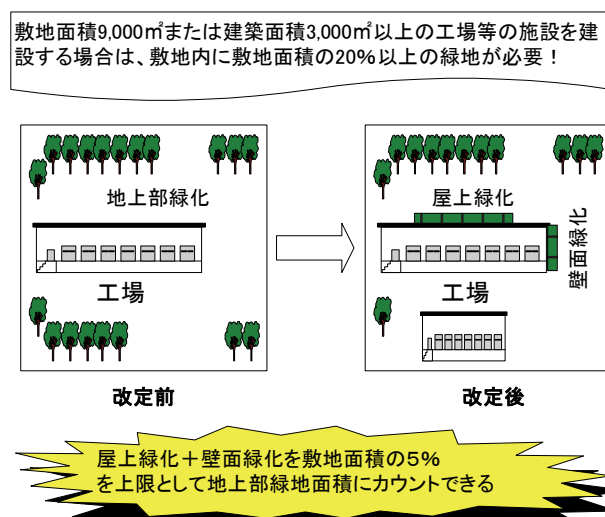


図-1 工場立地法の概要

3. システムの概要および特徴

3.1 システムの概要

開発した折板屋根を対象とした緑化システム（湿潤状態で約 490N/㎡(50kgf/㎡)）は、折板山部のほげや

*技術研究所

嵌合箇所に固定治具（取り付け金物、支持材）を用いて屋根を覆うように緑化基盤底板を設置し、その上に排水層としてのポリスチレンと土壌を混入し、上部を緑化する工法である。図－2にミドリンルーフSの概略パースを、写真－1にシステム全景を示す。

3.2 システムの特長

システムの特長を下記に示す。

i. 耐候性の向上

屋根を覆うように緑化層を構築するので、屋根の耐候性（紫外線劣化等）が向上する。

ii. 雨仕舞が良い

灌水および雨水は緑化基盤底板の溝を伝わり折板の水下側に流出させるので雨仕舞いが良い（図－3、写真－2）。

iii. 荷重（積載）性能が高い

断面性能が高い緑化基盤底板（リブ形状）を使用していることや、支持材の間隔が自由に設定できるので比較的大きな土壌厚が必要な植物も植栽可能である（図－4、写真－3）。

iv. 飛散防止機能に優れている

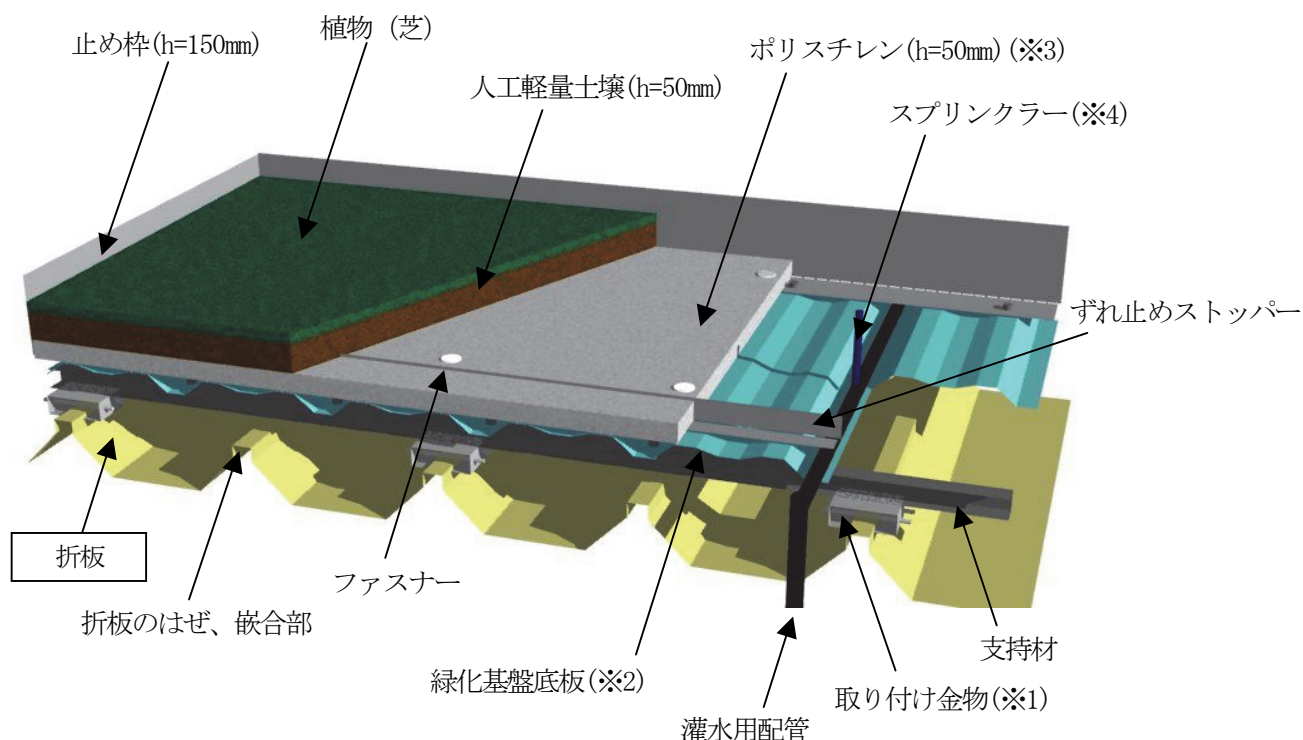
緑化基盤底板にファスナーで固定したポリスチレン空隙部に植物の根が侵入し、ポリスチレン＋土壌＋植物が一体化されるので、風等による緑化材の飛散を防止できる。また、ずれ止めストッパーを設置して土壌の横ずれを防止している（図－5）。

v. 断熱性能を有する

排水層に断熱性を有するポリスチレンを使用していることや、折板と緑化基盤底板間の通気層が断熱層となるので、室内の空調エネルギーが削減可能である（図－6）。



写真－1 システムの全景



※1: 折板山部の形状に合わせて製作（上部積載重量により取り付け金物を千鳥、基盤配置にするかを決定）

※2: 耐久性重視の塩ビ鋼板と安価なガルバニウム鋼板の選択が可能

※3: 排水層はポリスチレン（空隙部体積比18%）と緑化基盤底板溝部で構成されている

※4: 緑化端部は水の飛散防止のため埋設型の灌水チューブを使用

図－2 ミドリンルーフSの概略パース

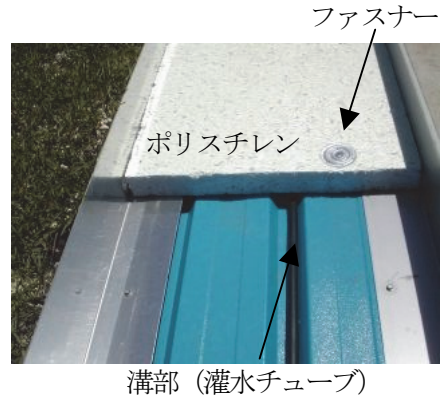
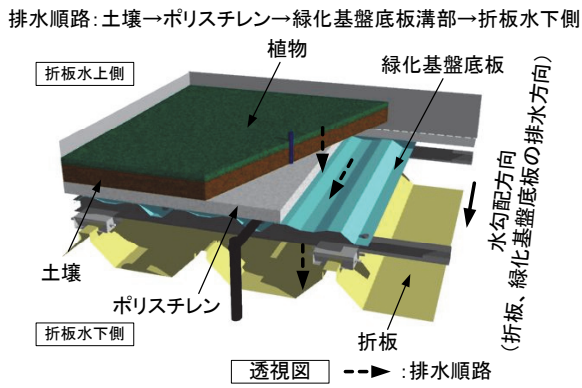


図-3、写真-2 排水構造

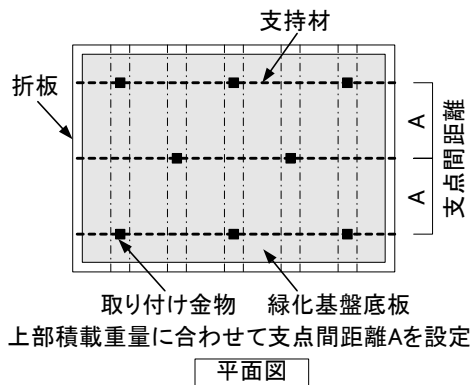


図-4、写真-3 取り付け金物、支持材の設置

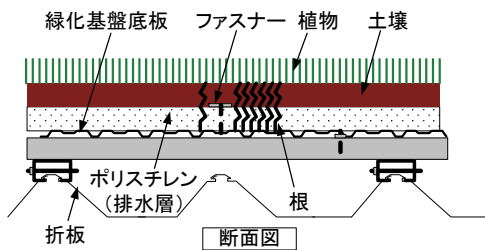


図-5 飛散防止構造

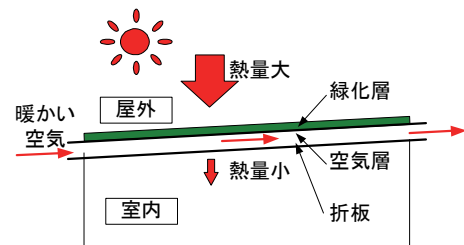


図-6 システムの断熱構造

4 性能確認試験

ミドリンルーフSの耐荷重性能、耐風圧性能および断熱性能を把握するために実大試験を行った。

4.1 耐荷重性能

積雪地方での施工を想定して、耐荷重性能を検証するために簡易な試験を行った。

折板の上に約 245N(25kgf)の重石を最大で 20 個 4900N (500kgf) 積載し、緑化基盤底板や支持材のたわみを変位計を用いて時系列に測定した。写真-4に試験状況を、図-7に重石、変位計の設置概要を、図-8、9に取り付け金物を千鳥状に設置した場合の緑

化基盤底板や支持材の変位測定結果を示す。

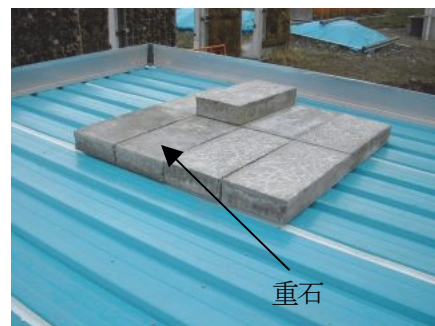


写真-4 試験状況 (積載試験)

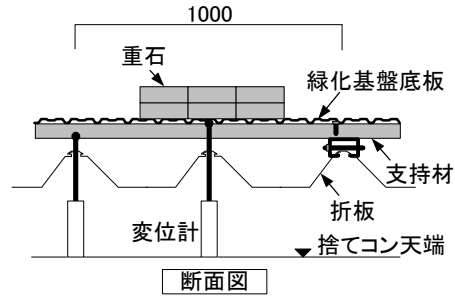
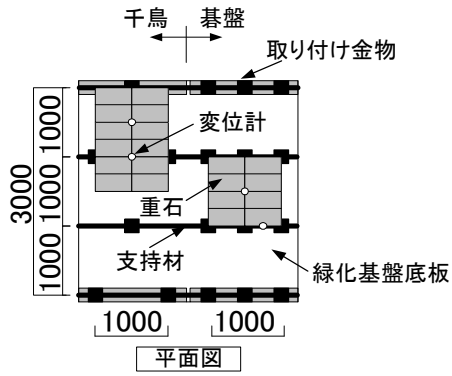


写真-7 重石、変位計の設置概要

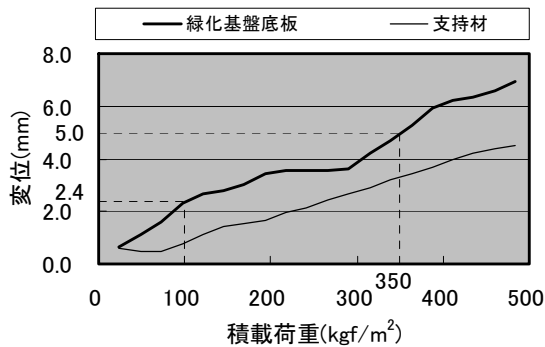


図-8 積載荷重—変位関係

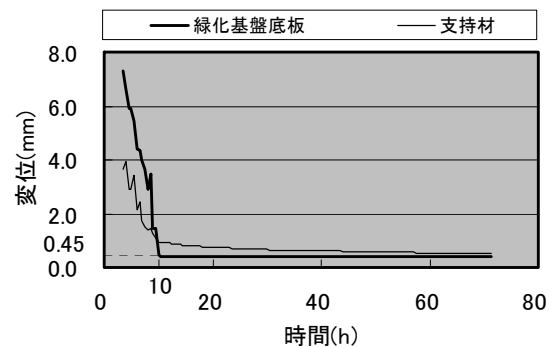


図-9 荷重除去後の時間—変位関係

積載荷重 $980\text{N}/\text{m}^2$ ($100\text{kgf}/\text{m}^2$) での緑化基盤底版の中央の変位は約 2.4mm と小さく、メンテナンス作業をする際に緑化層を歩行しても支障ない。また、構造部材に適用される長期たわみ $L(=1000\text{mm})/200$ (5.0mm) を許容限界とすると、 1m 程度の積雪量に相当する約 $3430\text{N}/\text{m}^2$ ($350\text{kgf}/\text{m}^2$) まで積載可能である。荷重除去の変位については 0.45mm と僅かながら残留するが、ポリスチレンが損傷する等の問題は見られなかった。また、計算により算出した変位量は試験値と良い対応を示していた。当システムを適用するに当たって植栽を変えることによる上載荷重に対する安全性は机上で確認できることが分かった。

以下に計算により求めた緑化材のたわみ量を示す。

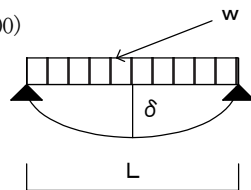
【たわみ量の計算結果】

$$\delta = 5/384 \times w \times L^4 / (E \times I)$$

$$= 5/384 \times 2.57 \times 1000^4 / (2.0 \times 10^5 \times 37000)$$

$$= 4.5\text{mm} \doteq 4.6 \text{ (実験値)}$$

$< 5\text{mm}$ (長期許容たわみ) OK!



- W: 上載荷重 $3430\text{N}/\text{m}^2$
上載荷重 $2.57\text{N}/\text{mm}$ (750mm 当たり)
- L: 支持材間隔 (1000mm)
- E: 緑化基盤底版のヤング係数 ($2.0 \times 10^5\text{N}/\text{mm}^2$)
- I: 緑化基盤底版の断面 2 次モーメント (37000mm^4 (750mm 当たり))

4.2 耐風圧性能

屋根に作用する吹き上げ風 (負風圧力) に対して当システムが飛散しないことを検証するために、日鉄鋼板 (株) の場内試験場にて取り付け金物の引張試験を行った。

折板山部に設置した取り付け金物試験体を支持材を介して引張試験機にて、引張と荷重除去を繰り返しながら徐々に載荷した。取り付け金物の残留変位が 0 となる最大の荷重を引張耐力とした。弾性変形内の限界荷重が 3920N (400kgf) であった。本結果と目視による観察から取り付け金物 1 個当たりの引張耐力を $1960\text{N}/\text{個}$ ($200\text{kgf}/\text{個}$) とした。写真-5 に試験状況を示す。

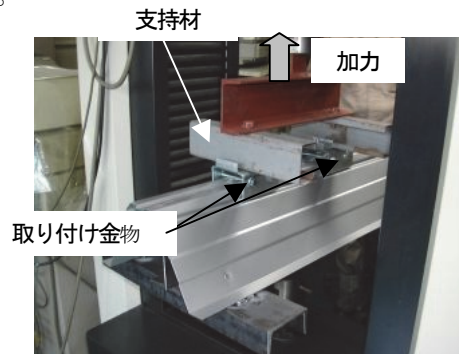


写真-5 試験状況 (引張試験)

a. 屋根に作用する吹き上げ風の影響

屋根に作用する吹き上げ風（負風圧力）を文献式¹⁾より算出し、取り付け金物の引張耐力と比較した。取り付け金物の引張耐力 1960N/個(200kgf/個)に対し、本設定条件のもとでは一般部は1山おきに千鳥状（1個/m²）に、外周部は風圧力が大きいので折板の山ごとに（2個/m²）取り付け金物を配置すれば負の風圧力に対して問題ないことが確認できた。以下に風圧力の算出結果を示す。

【風圧力の計算結果】

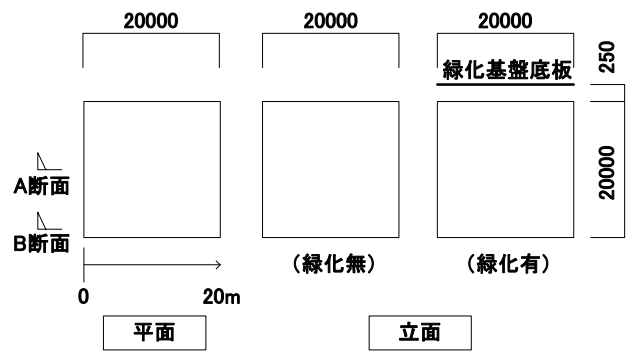
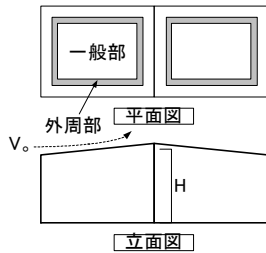
（設定条件）

- ・建設場所：千葉県
- ・屋根形状：切妻屋根
- ・建物高：20m
- ・屋根勾配：4/100 勾配

（風圧力）

$W=q \times Cf = 1800\text{N/m}^2 (185\text{kgf/m}^2)$ (一般部)
 $2300\text{N/m}^2 (235\text{kgf/m}^2)$ (外周部)

- q: 速度圧 ($0.6 \times Er^2 \times V_0^2$)
- Er^2 : 高さ方向の分布を表す係数(0.91)
- V_0 : 風速(38m/s)
- Cf : ピーク風力係数(-2.5 (一般部)、-3.2 (外周部))



【シミュレーション概要】

・風速: $V_z = V_r (Z_z / Z_r)^n$

V_z : 高さ z m の風速, V_r : 基準高さにおける風速(38m/s)

Z_z : 高さ, Z_r : 基準高さ(20m)

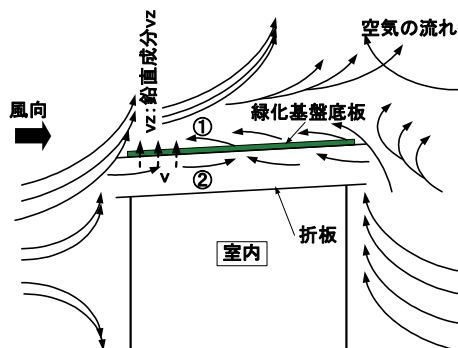
n: べき指数 (0.2: 森林、高い建物のない市街地、住宅地)

図-11 シミュレーション概要

屋根面直上には負の静圧が作用するが、折板-緑化基盤底板間は水平方向の風が生じ、風上から 2m 程度以外は風の鉛直成分による動圧はほとんど作用しない。2重屋根構造（折板+緑化基盤底板）にすることで、大幅な負圧力の増大とはならないことが分かった。図-12 に風速ベクトル立面図を、図-13 に屋根面直上の風圧力（全圧）を示す。

b. 折板-緑化基盤底板間の通気層による影響

当システムは折板と緑化基盤底板間に通気層を有する構造である。直接折板屋根に緑化する場合に比べ、通気層からの吹き上げ風（動圧）が作用し、緑化基盤底板が飛散するのではないかと懸念された。そのため、三次元流体解析プログラム「STREAM」によりシミュレーションを行い、安全性を確認した。図-10 に緑化基盤底板に作用する圧力の状態を、図-11 にシミュレーション概要を示す。



【緑化面（緑化基盤底板）に作用する圧力】

当システムに作用する圧力は静圧 (P_s : $P① - P②$ の差圧) と上向きに働く動圧 ($1/2 \times \rho \times v_z^2$) の和 (全圧) である。折板に直接緑化する場合は、静圧のみ作用する。 (P_s : $P①$) (ρ : 空気密度)

図-10 緑化基盤底板に作用する圧力の状態

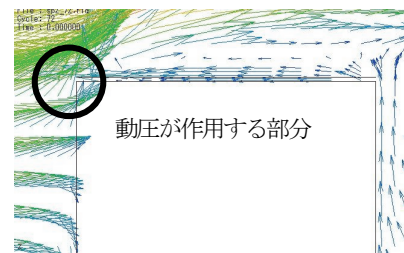


図-12 風速ベクトル立面図（緑化有）

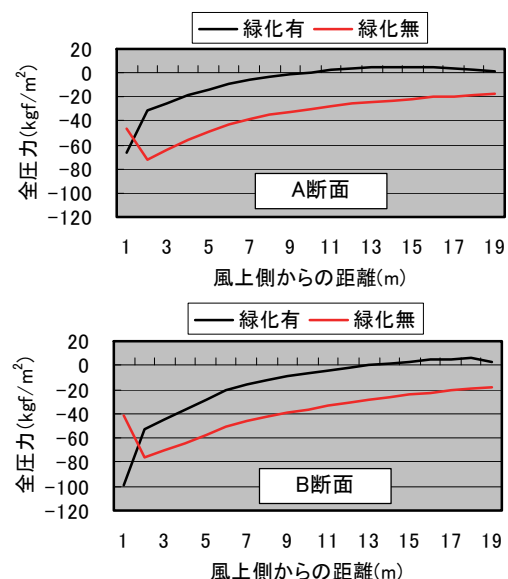


図-13 屋根面直上の風圧力（全圧）

4.3 断熱性能

システムの各部に熱電対や日射計を設置し、温度および日射量の測定を行い、断熱および日除け効果を検討した。図-14に温度測定位置を示す。

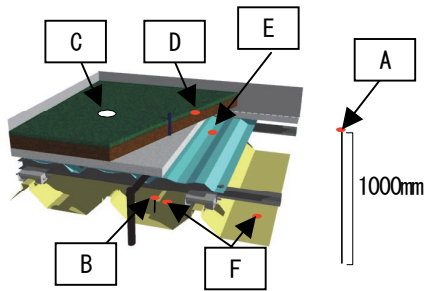


図-14 温度測定位置

夏期の（曇り）測定データを見てみると、日射量の上昇に伴い外気温度(A)は午前11時頃にピークを迎え35°Cに達した。しかしながら、システム下部の折板上150mmの気中温度(B)は30°C迄しか上昇しておらず、緑化層と折板間は空気の通り道となり、熱がこもらないことが確認できた。

次にシステムの各部の温度を見てみると、土壌表面温度(D)に対し緑化基盤底板下面温度(E)は5°C低下していた。この温度差はシステムの断熱効果（土壌+ポリスチレン）と考えられる。また、システム有無の折板上表面温度(F)差の20°Cから、システムの断熱効果を差し引いた約15°Cが、植物や土壌から水が蒸発する際、表面の熱（潜熱）を奪い緑化周辺の温度を下げるクールダウン効果と日除け効果であると推測できる。

晴天でない場合であっても当システムで緑化すれば、断熱効果が見込めることが確認できた。図-15(1)、(2)にシステム各部の測定結果を示す。

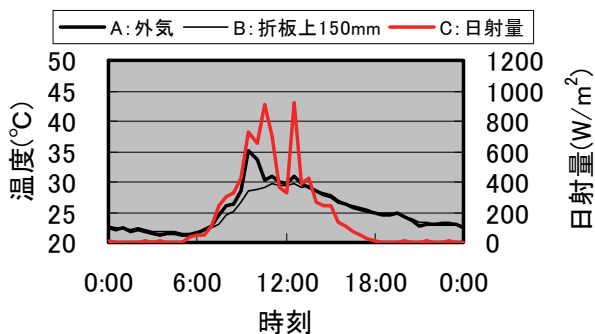


図-15(1) システム各部の測定結果

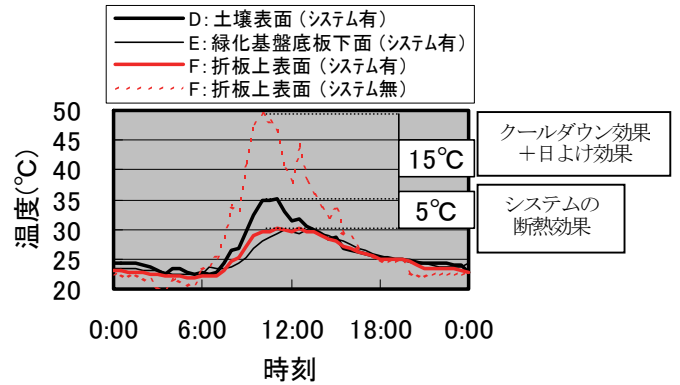


図-15(2) システム各部の測定結果

5. まとめ

ミドリンルーフSの性能について、実大試験を通して得られた知見を下記に示す。

i. 耐荷重性能

1m程度の積雪量に相当する3430N/m² (350kgf/m²)まで積載可能であることが確認できた。

ii. 耐風圧性能

2重屋根構造（折板+緑化基盤底板）にすることで、大幅な負圧力の増大とはならず、取り付け金物や支持材を適正に配置することで、風に対してシステムが飛散しないことが確認できた。

iii. 断熱性能

当システムを用いて折板屋根を緑化すれば、緑化しないものに比べ、折板上表面温度が約20°Cの温度低減効果が見込めることが確認できた。

6. あとがき

今後は、システムの断熱性能から空調エネルギー削減効果をシミュレーションで明確にし、実際の物件に積極的に提案していく予定である。

【参考文献】

- 1) (財)日本建築センター、「建築物の構造関係技術基準解説書」、工学図書、p296~301、2001