熱的薄い壁体建物の屋上・壁面緑化による冷房負荷低減効果

COOLING LOAD REDUCTION EFFECT OF GREEN ROOF AND GREEN WALL IN THE CASE OF BUILDING WITH THERMAL THIN WALL

山崎真理子 — * 1 水谷章夫 — * 2
大澤徹夫 — * 3

Mariko YAMASAKI — * 1 Akio MIZUTANI — * 2
Tetsuo OHSAWA — * 3

キーワード：
熱的薄い壁体, 屋上緑化, 壁面緑化, 日射遮蔽効果, 冷房消費電力量, 熱貫流率

Keywords：
Thermal thin wall, Green roof, Green wall, Shading, Electrical power consumption for air conditioning, Coefficient of overall heat transmission

The thermal properties of the greening of the rooftop and walls were investigated through the comparison with non-green walls and walls covered by shade cloths in the experiment conducted using two experiment buildings with thermal thin walls. Also, the cooling load reduction effect of the green roof and walls was quantitatively evaluated. The obtained results were as followed. 1) The room temperature of the green building was lower than that of the non-green building because of the sun-shielding effect by plants. Electrical power consumption for air conditioning was also lower in the green building. With green roof and walls on the south and west sides, 40 to 45% energy was saved compared to the non-green building. 2) The coefficient of overall heat transmission of the green walls calculated with the power consumption by air conditioning was estimated 1.09 [W/m² K].

1. はじめに

一般に、工場や倉庫では鉄板を外装材とし、断熱材を用いていない壁体（熱的薄い壁体）が多く、熱損失が大きい。そのため、工場建築物においては、屋上・壁面緑化による熱損失軽減効果の積極的な活用が望まれる。2004年に工場立地法（工場敷地内の緑化を義務化）が改正され、建物の屋上・壁面緑化面積も緑地面積に算入することが可能となったことから、屋上・壁面緑化工法の普及がさらに進むものと期待される。緑化工法に関して、建築外部環境の植栽による熱環境緩和効果を検討する研究は数多く行われており、緑化の蒸散効果や日射遮蔽効果が言及されている^{1), 2), 3), 4)}など。しかし、これらの研究の多くは、ある程度の熱容量を有する建築物を対象としており、工場や倉庫のような熱的薄い壁体の建物についての緑化による熱環境緩和効果を検証した報告例はない。

そこで、本研究では、熱的薄い壁体の建物を対象として、屋上・壁面緑化による熱環境緩和効果を実験的に検討し、室内冷房負荷の低減効果の定量的把握を目的とした。すなわち、熱的薄い壁体の実験棟2棟を対象とし、屋上・壁面を緑化して室内流入熱量と冷房消費電力量を測定した。これと非緑化棟および寒冷紗覆面施工棟との比較から、屋上・壁面緑化による冷房消費電力量の低減率を求めた。

2. 実験棟および実験方法

実験棟は、工場建築と同様の壁面・構造仕様を有する床面積 9.1 m² (2.7m×3.6m) の鉄骨造平屋建2棟である。2棟は、同一構造・同一室容積であり、周囲に障害物の無い同一敷地内（愛知県西加茂郡三好町黒笹）に建築した。本報では、緑化無施工および寒冷紗覆面施工の実験棟をA棟、緑化施工の棟をB棟とする。図1に実験棟の施工概要を示す。壁は外側から角波鉄板（厚 0.8mm）、空気層（厚

115mm）、プラスターボード（厚 12.5mm）の構成とした。本壁体の熱貫流率は 2.58 [W/m² K] である。屋根はシート防水仕上の鉄板（厚 4.5mm）葺き、天井はプラスターボード（厚 12.5mm）仕上げとし、天井ふところは 200mm とした。なお、両棟のガラス面は十分な断熱を施した。壁面の緑化にあたっては、金属骨組みとヤシガラマット（厚 8mm）で構成されたパネルにヘデラを絡ませ、繁茂させた緑化パネルを密着するように設置した。緑化パネルの下部には、培養土の入った栽培容器を取り付けた。屋上の緑化は、防水層（厚 30mm）、培養土（厚 80mm）、芝生（厚 30mm、コウライシバ）により構成した。一方、寒冷紗覆面について、壁面では寒冷紗 3枚重ね（壁側から

図1 実験棟の概要

単位:mm

*1 岐阜工業高等専門学校建築学科 助教・博士(農学, 工学)
(〒501-0495 岐阜県本巣市上真桑2236-2)

*2 名古屋工業大学建築・デザイン工学科 教授・工博

*3 岐阜工業高等専門学校建築学科 名誉教授・工博

*1 Research Assoc., Department of Architecture, Gifu National College of Technology, Dr. Agr. and Dr. Eng.

*2 Prof., Department of Architecture and Design, Nagoya Institute of Technology, Dr. Eng.

*3 Emeritus Prof., Department of Architecture, Gifu National College of Technology, Dr. Eng.

表 1 測定項目と測定機器

測定項目	測定機器
日射量	英弘精機 ネオ日射計 MS-42
相当外気温	SAT計 計6面 (上面, 東面, 南面, 西面, 北面, 下面)
熱流量	英弘精機 MF-200
表面温度	江藤電機 Thermodac-F model 5030A, 熱電対 (T)
グローブ温度	SHIBATA グローブサーモメーター
温湿度	ESPEC RS-11
電力量	HIOKI 電圧ロガー 3671 HIOKI コミュニケーションベース 3912

表 2 測定ケースと測定期間

実験①2006年度						
測定 ケース	測定期間	A棟		B棟	AC	
		緑化		緑化		
case 1	7/31 ~ 8/6	無		屋上・南・西	有 有 有 有 有 有 有	
case 2	8/7 ~ 8/10	無		屋上・南		
case 3	9/11 ~ 9/17	無		屋上・西		
case 4	8/11 ~ 8/20	無		屋上		
case 5	8/21 ~ 8/27	南		屋上		
case 6	8/28 ~ 9/3	南・西		屋上		
case 7	9/4 ~ 9/10	西		屋上		
case 7	9/18 ~ 9/24	無		屋上		
※冷房設定温度:25℃, 27℃						
実験②2007年度						
測定 ケース	測定期間	A棟		B棟		AC
		緑化	寒冷紗	緑化	寒冷紗	
case A	7/25 ~ 8/1	無	無	屋上・南・西	無	無 無 有 有 有 有 有 有 有 有 有 有 有
case B	8/1 ~ 8/6	無	無	屋上・南・西	東・北	
case C	8/6 ~ 8/10	無	無	屋上・南・西	東・北	
case D	8/10 ~ 8/14	無	東・南・西・北(屋上無)	屋上・南・西	東・北	
case E	8/14 ~ 8/17	無	東・西・北(屋上・南無)	屋上・南・西	東・北	
case F	8/17 ~ 8/21	無	屋上・東・西・北(南無)	屋上・南・西	東・北	
case G	8/21 ~ 8/28	無	屋上・東・南・西・北	屋上・南・西	東・北	
case H	8/28 ~ 9/4	無	屋上・東・南・北(西無)	屋上・南・西	東・北	
case I	9/4 ~ 9/7	無	屋上・東・北(南・西無)	屋上・南・西	東・北	
case J	9/7 ~ 9/14	無	屋上・南・西・北(東無)	屋上・南・西	北(東無)	
case K	9/14 ~ 9/19	無	屋上・東・南・西(北無)	屋上・南・西	東(北無)	
※冷房設定温度:25℃						

アルミ蒸着銀色 2 枚 + 最前面に黒色 1 枚)、屋上面では 4 枚重ね (全て黒色) とし、いずれも日射遮蔽率が 90% 以上になることを確認した。寒冷紗の設置に当たっては、壁面では建物から 100mm、屋上面では 200mm 離して取り付けけた。

表 1 に測定項目と測定機器を示す。測定間隔は 10 分とした。なお、冷房機は東芝製ルームエアコン (RAS-2855DV、エネルギー消費効率 COP=4.34) を使用した。表 2 に測定ケースと測定期間を示す。実験は 2006 年から 2007 年の 2 年間にわたって行った。1 年目の実験①では緑化による熱環境緩和効果を検証するために、緑化棟と非緑化棟の比較および緑化面の設置方位に関する検討を行い、また、2 年目の実験②では緑化の日射遮蔽効果を検証するために、緑化棟と寒冷紗覆面施工棟の比較を行った。

3. 結果と考察

3.1 室温および壁面温度における緑化の影響

緑化棟と非緑化棟の室温の違いを調べるために、caseB の晴天日における A 棟 (非緑化) および B 棟 (屋上・南・西面を緑化) の室温、水平面 SAT 計温度、外気温の経時変化を図 2 に示す。これより、外気温が 15 時から 16 時にかけて 35℃前後を推移した時、A 棟の室温は 15 時過ぎにピーク値を示し、46℃に達した。一方、緑化を施した B 棟では、日中の室温は外気温より低く推移し、16 時過ぎに示した最高温度 34℃は A 棟の最高温度と比べて 10℃以上低い。これに関して、図 3 に 5 面平均 SAT 計温度と A・B 各棟の室温の関係を示す。図 3 によれば、いずれの棟も、午前中は日射量に対して概ね比例的に室温が上昇しており、その傾向は A 棟でより顕著である。

図 2 非冷房時における温度の経時変化

図 3 非冷房時における 5 面平均 SAT 計温度と室温の関係

一方、午後になると、A 棟の室温は日射量に比例して低下するが、B 棟では 18 時頃まで室温が変化していない。これより、A 棟では日射の影響を強く受けて室温が変動するが、B 棟では緑化によりその影響が軽減され、また緑化層が保温層になっていることがわかる。

図 4 には、冷房時における A・B 各棟南面の外壁および内壁表面温度、南面 SAT 計温度の経時変化を示す。(a) には非緑化棟と緑化棟の比較を、(b) には寒冷紗覆面施工棟と緑化棟の比較を示す。図 4 (a) より、A 棟の外壁表面温度の変動パターンは南面 SAT 計温度と同様であり、両者の相関は強い。冷房により室温を 25℃に制御しているが、A 棟の内壁表面温度は最高 47℃ (12 時頃) まで上昇しており屋外からの熱の流入が認められる。一方、B 棟の外壁表面温度は A 棟と比べて明らかに低く、最高温度は 32℃ (15 時頃) であった。また、これに伴い、B 棟の内壁表面温度は室温と同じ 25℃付近で推移した。次に、日射遮蔽効果のある寒冷紗覆面について、図 4 (b) より寒冷紗覆面施工時の A 棟外壁表面温度は (a) に示した無施工時と比べて低く、最高温度は約 35℃ (13~14 時頃) であった。同じ日の B 棟と比べると、外壁、内壁いずれの表面温度についても、午前中は A・B 両棟間の差異が増加し、12 時頃の約 5℃の差を境に、午後はその差異が減少する傾向を示した。

そこで、屋上面、南面、西面の各面における外壁-内壁表面温度差について、A・B 両棟の比 (B 棟/A 棟) の経時変化を調べた (図 5)。図 5 (a)、(b) のいずれの図についても、屋上面における A・B 両棟の比が最も小さい。屋上面の緑化は土壌と芝生で構成されており、壁面の緑化パネルとの施工の違いのために緑化効果が顕著に現れたと考えられる。また、屋上面では時間とともに単調増加する傾向が見られるが、これは土壌の蓄熱の影響によるものと考えられる。図 5 (a) によれば、西面では日中を通じて B 棟の表面

(a) A棟（無施工）、B棟（緑化）

(b) A棟（寒冷紗）、B棟（緑化）

図4 冷房時における南面内壁・外壁表面温度の経時変化

図5 外壁－内壁表面温度差における緑化の影響

温度差はA棟の温度差の約4割であった。梅干野らは、建物の西壁にツタを這わせた場合、外壁表面の日射吸収率は非緑化の場合の約1/4になり、室内側熱流はほぼ零であることを示しているが¹⁾、本研究でもこれらの知見が実証された。これに対して、南面では日射熱を多く受ける午前中は両棟の違いが大きい、14時以降は時間とともにその差異が小さくなった。これは、図3、図4に示したように、A棟では日射量が減少すれば直ちに外壁表面温度が低下するのに対し、B棟では緩やかな温度上昇が続くことに因る。緑化棟で温度が低下しない理由として、緑化パネル内や緑化パネルと外壁間の空気層の保温、葉の蒸散作用の低下などが考えられる。一方、図5(b)によれば、南面、西面ともに午前中は緑化棟と寒冷紗覆面施工棟の間に若干の差異が見受けられるが、14時以降になると両棟の差異はほとんど見られない。以上より、緑化による熱環境緩和効果には日射遮蔽による影響が強いことが考察された。

図6 室温・外気温・消費電力量の経時変化

図7 測定ケース間での消費電力量の比較

3.2 緑化による冷房消費電力量の低減効果

前節では、緑化や寒冷紗による日射遮蔽により室内流入熱量が軽減されることを示した。すなわち、緑化により冷房負荷の低減効果が期待できる。そこで、本節では、無施工時、緑化時、寒冷紗覆面時の消費電力積算量を比較し、その効果の程度について検討した。

図6に、外気温、A・B各棟の室温およびルームエアコンの冷房消費電力量の一例として、case1の晴天日における経時変化を示す。これより、外気温の変動に伴い両棟の室温が変動し、さらにその室温変動に応じて消費電力量が推移している。また、前節で述べたように緑化棟は非緑化棟と比べて室温の上昇幅が小さく、その結果、冷房で強制的に室温を制御した場合にも、その消費電力量は少なくなった。図6によれば、15時頃のピーク時におけるB棟の消費電力量はA棟の半分以下である。

そこで、8～18時の積算消費電力量についてA棟に対するB棟の比を調べ、図7に測定ケース毎の平均値を示した。まず、屋上・南・西面緑化のcase1は消費電力量比が0.53（設定温度25℃）であり、また東・北面を寒冷紗覆面したcaseCの場合は0.59である。両者間に大きな差がないことから、東・北面からの日射熱流入の影響は小さく、いずれの場合も、緑化により無施工時と比べて消費電力量が約6割に低減されることがわかる。次に、寒冷紗との比較では、全面寒冷紗と屋上・南・西面緑化（東・北面は寒冷紗）を比較したcaseGは、両者の消費電力量比が0.85であった。すなわち、冷房消費電力量の低減効果は緑化の方が全面寒冷紗覆面よりも若干大きいことが確かめられた。緑化面の設置方位の影響では、まず、屋上面のみを緑化したcase7では、非緑化に対して0.6程度の消費電力量比となり、屋上緑化のみでもかなりの日射遮蔽効果が期待できるものと考えられる。case4およびcase6の結果より南面と西面の効果を比較すると、case4

(南面／屋上面)が0.9前後であるのに対して、case6(西面／屋上面)は0.7程度であり、南面の緑化効果の方が西面の緑化効果より大きいと考えられる。ただし、実験期間の経過に伴って太陽高度が変動するために、定量的な結果を得るには更なる検討が必要である。

3.3 相当熱貫流率の算出

冷房消費電力量から相当熱貫流率(屋根面と壁面の合成値)を算出し、屋上・壁面緑化による冷房負荷低減効果の定量化を試みた。なお、消費電力積算量は、冷房消費電力量の増加が顕著である8～20時の間の積算値とした。まず、図9に示すように、5面平均SAT計温度と室温との気温差の総和と消費電力積算量の間には強い相関関係が認められる。すなわち、壁体の熱容量が小さいために両者間の時間遅れはほとんどなく、したがって、本実験結果に対しては定常状態としての取り扱いが可能とみなすことができる。そこで、①式を用いて各測定ケースの相当熱貫流率を算出し、これを表3に示す。

$$\Sigma W \times COP = K' \times \Sigma (\theta_{sat} - \theta_i) \times A \quad \cdots \textcircled{1}$$

①式中、K'：相当熱貫流率 [W/m²K]、W：冷房機の消費電力量 [W]、COP：冷房機のエネルギー消費効率 (=4.34)、 θ_{sat} ：平均SAT計温度 [°C]、 θ_i ：室温 [°C]、A：実験棟の表面積 39.9 [m²] である。

表3より、全面無施工の実験棟の相当熱貫流率は2.47(2006年)、2.54(2007年) [W/m²K]と定常状態での壁体設計値(K=2.58 [W/m²K])と同程度であり、算出結果は概ね妥当と考えられる。緑化棟の相当熱貫流率は、屋上・南・西面緑化の場合に1.09 [W/m²K]であり、全面寒冷紗の場合の1.52 [W/m²K]より小さい。したがって、緑化の方が寒冷紗より優れた断熱性能を有すると考えられる。

3.4 壁面周辺の輻射温度

寒冷紗覆面および緑化した壁体からの輻射温度を測定するために、グローブ温度計を建物南面に設置した。図10に測定結果の一例として、A棟南面を寒冷紗覆面、B棟南面を緑化した場合の輻射温度の経時変化を示す。図10より、寒冷紗覆面からの輻射温度は南面SAT計とほぼ同等であり、特に9～13時は緑化面からの輻射温度より5℃以上高かった。これより、寒冷紗覆面は、室内に対しては緑化面に準ずる熱環境緩和効果を有するものの、建築外部環境に対する熱負荷は緑化面よりやや大きいといえる。

4. まとめ

本報では、熱的薄い壁体を有する実験棟2棟を対象とした実験を行い、屋上・壁面緑化の熱的特性を非緑化面および寒冷紗覆面との比較から調べた。さらに、屋上・壁面緑化による冷房負荷低減効果を定量的に評価した。得られた知見は次の通りである。

- 1) 緑化による日射遮蔽効果により、緑化棟の室温は非緑化棟と比べて低く、冷房した場合には消費電力量の大幅な低減効果が認められた。特に、屋上・南・西面を緑化した場合には非緑化棟と比べて40～45%減となり、大きな省エネルギー効果が得られた。
- 2) 寒冷紗覆面した場合にも緑化と同様に日射遮蔽効果が認められたが、壁体表面温度において両者の間に違いが見られた。また、屋上・南・西面を緑化した場合の消費電力量は全面寒冷紗覆面と比べて約15%減となった。
- 3) 屋上・南・西面緑化の場合の相当熱貫流率は1.09 [W/m²K]と試算され、壁体の熱貫流率に比べて大幅に小さくなった。

図9 Σ(θ_{SAT} - θ_i)と消費電力積算量の関係

表3 熱貫流率の算出結果

実験① 2006年度 実験棟の壁面状況	熱貫流率 K [W/m²K]	実験② 2007年度 実験棟の壁面状況	熱貫流率 K [W/m²K]
B棟:屋上・南・西面緑化	1.09	B棟:屋上・南・西面緑化, 東・北面寒冷紗	1.09
B棟:屋上面緑化	1.52	B棟:屋上・南・西面緑化, 北面寒冷紗	1.27
B棟:屋上・南面緑化	1.63	B棟:屋上・南・西面緑化, 東面寒冷紗	1.31
B棟:屋上・西面緑化	1.77	A棟:屋上・東・南・西・北面寒冷紗	1.52
A棟:南・西面緑化	1.81	A棟:屋上・南・西・北面寒冷紗	1.85
A棟:南面緑化	1.90	A棟:東・南・西・北面寒冷紗	2.03
A棟:西面緑化	2.18	A棟:屋上・東・北面寒冷紗	2.18
A棟:緑化面なし	2.47	A棟:緑化面なし, 寒冷紗なし	2.54

図10 寒冷紗覆面あるいは緑化した南壁面周辺の輻射温度

謝辞

本研究の遂行に際し、トヨタ自動車(株)バイオ緑化事業部松井邦夫氏、仲田義弘氏、ならびに嵯峨崎千尋氏(当時院生)の全面的なご協力を頂いた。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 梅干野, 茶谷, 八木: ツタの西日遮蔽効果に関する研究, 日本建築学会計画系論文報告集, 第351号, pp.11～17, 1985.5
- 2) 萩島, 成田, 谷本, 三坂, 松嶋, 尾之上: 大規模な階段状緑化屋根を有する建築物周辺の微気象に関する実測調査, 日本建築学会環境系論文集, 第577号, pp.47～54, 2004.3
- 3) ノ瀬, 石野, 郡, 永田: ヒートアイランド低減化手法としての屋上緑化の実測調査, 日本建築学会環境系論文集, 第605号, pp.47～54, 2006.7
- 4) 吉永, 比留間, 奥宮: 多変量解析手法を用いた薄層屋上緑化の夏期蒸発散特性の分析, 日本建築学会環境系論文集, 第622号, pp101～106, 2007.12

[2008年6月20日原稿受理 2008年7月9日採用決定]