

## 報告 (Note)

### 巻き付き登攀型壁面緑化のヒートアイランド緩和効果の検証

池貝隆宏  
(環境情報部)

#### Investigation of effects of heat island mitigation about wall greening of scroll ascent type

Takahiro IKEGAI  
(Environmental Information Division)

キーワード：壁面緑化，ヒートアイランド対策，室温低下効果，WBGT 指数

#### 1 はじめに

ヒートアイランドは、我が国では 1970 年代から顕在化し始めた都市特有の環境問題である。建築物や舗装などの人工構造物による土地被覆率の高い都市域では、熱帯夜の増加に象徴されるように、近年その激しさが増加している。ヒートアイランドの原因には、こうした自然的土地被覆の減少のほかに、人工排熱の増加も挙げられる。気温上昇に伴い、冷房のエネルギー使用量が増加し、その排熱によりヒートアイランドが加速する、という状況が各地で発生している。

ヒートアイランドの抜本的な対策は、都市の地表面被覆を改善することであるが、都市域では緑地の確保は簡単ではない。そこで、建物の屋上や壁面を利用した緑化が注目されている。このうち、壁面緑化は、緑被により室内への日射の侵入を抑制し、室温の上昇を抑制する効果を有する。これは、エアコン使用量の縮減にもつながることから、地球温暖化対策としても有効であるといえる。

神奈川県では、平成 19 年度にアサガオを用いた壁面緑化を県庁舎においてモデル的に実施し、一定の効果が確認されたことから<sup>1)</sup>、比較的手軽に作成できる「巻き付き登攀型」の壁面緑化の普及を行っている。巻き付き登攀型の壁面緑化は、壁面に園芸用ネットなどの支持体を設置し、これにつる性の植物を這わせるタイプの緑化手法である。平成 20 年度には、県内のいくつかの機関がこの巻き付き登攀型壁面緑化のモデル事業を実施し、その取組が拡大しつつある。

そこで、これらのモデル事業で作成された壁面緑化を対象に環境改善効果を評価したので、その結果を報告する。

#### 2 方法

##### 2. 1 対象施設

調査の対象としたモデル事業は、神奈川県湘南地域県政総合センター、伊勢原市及び秦野市が実施したものである。その対象施設は全部で 24 施設あり、内訳は学校が 17 施設、事務所建屋 7 施設である。このうち、調査対象とした施設は表 1 に示した 15 施設である。後述するように、調査は 2 通りの方法を併用したため、表には調査種別もあわせて記載した。

##### 2. 2 調査項目及び方法

壁面緑化の主要な効果は、前述のとおり室内

表 1 調査対象施設

施設名称	栽培種	種別
県立大原高校 <sup>1</sup>	ニガウリ	○
水道局茅ヶ崎営業所 <sup>1</sup>	ニガウリ, ヘチマ	○
県立伊志田高校 <sup>1</sup>	ニガウリ	
〃 大清水高校 <sup>1</sup>	ニガウリ, ヘチマ	
〃 体育センター <sup>1</sup>	ニガウリ, ヘチマ	
伊勢原市立山王中学校 <sup>2</sup>	アサガオ	○
〃 中沢中学校 <sup>2</sup>	アサガオ	○
〃 大田小学校 <sup>2</sup>	ヒョウタン, アサガオ	○
〃 伊勢原中学校 <sup>2</sup>	ニガウリ	
〃 大山小学校 <sup>2</sup>	ヒョウタン	
〃 高部屋小学校 <sup>2</sup>	ニガウリ	
〃 石田小学校 <sup>2</sup>	ヒョウタン, ニガウリ	
〃 成瀬小学校 <sup>2</sup>	ニガウリ	
秦野市役所本庁舎 <sup>3</sup>	ニガウリ	○
〃 西庁舎 <sup>3</sup>	ニガウリ	○

注1) 施設名の後ろの数字は、<sup>1</sup> が湘南地域県政総合センター、<sup>2</sup> が伊勢原市、<sup>3</sup> が秦野市のモデル事業の実施施設であることを示す。

注2) 種別欄に○を付した施設は全項目の測定、他は表面温度と緑被率の測定のみを実施したことを示す。

への日射の侵入抑制であることから、表1に○で示した7施設では、室内窓際及び外壁の熱環境測定を緑化区と非緑化区においてそれぞれ実施した。また、全施設において外壁と植物の葉の表面温度の推移及び緑被率を測定した。測定方法は次のとおりである。

### (1) 室内及び外壁の熱環境測定方法

室温及び外気温 ; サーミスタセンサ内蔵温度ロガーを直径12cm、長さ30cmの白色塩化ビニル樹脂板製の日射遮蔽筒内に装着し、緑化区及び非緑化区の室内の窓際(ガラス面から20cm程度離れた位置)並びに屋外に設置し、15分間隔で測定を行った。

室内の黒球温度 ; グローブサーモメータにサーミスタセンサを装着し、緑化区及び非緑化区の室内窓際に設置し、ロガーにより15分間隔で測定を行った。

室内の湿球温度 ; サーミスタセンサに下端を水に浸したガーゼを巻き、これを緑化区及び非緑化区の室内の窓際に設置し、ロガーにより15分間隔で測定を行った。

壁面温度 ; サーミスタセンサを緑化区及び非緑化区の外壁に密着させ、外気側を0.6mm厚発泡スチロール紙で覆い、その上からアルミテープで貼り付け固定し、ロガーにより15分間隔で測定を行った。

測器は図1に示すように架台上に組み合わせ、上記の測定場所に固定した。

### (2) 表面温度の測定方法

赤外線サーモグラフィで熱画像撮影を約1時間ごとに行った。専用の解析ソフトウェアを使用して画像解析を行い、緑化区と非緑化区の建物壁面及び陰になっていない葉の表面の平均温度を算出した。

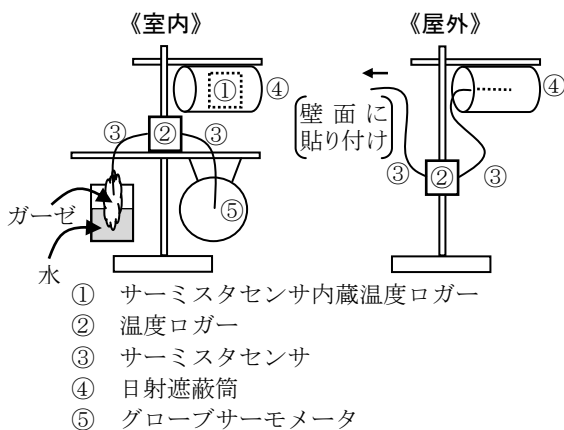


図1 温度関係測器の構成

### (3) 緑被率の測定方法

緑化区を正面から写真撮影し、画像解析により緑化区を覆っている植物体の面積比率を緑被率として算出した。施工区の高さは実施場所により異なっているが、つるの先端が施工区上端に届いていない場合も多く、壁面緑化が有効に機能する部位が建物の一階であることから、原則として一階部分の緑被率を算出した。

(1)で示した測定項目のうち、黒球温度と湿球温度を用いて(i)式によりWBGT指数(湿球黒球温度指数)を算出した。なお、(i)式は屋内のWBGT指数算出式である。また、室温と湿球温度にGoff-Gratch式<sup>2)</sup>及びSprung式<sup>2)</sup>をあてはめて測定温度における飽和蒸気圧及び蒸気圧を求め、これらの数値から相対湿度を算出し、室温と相対湿度から(ii)式により不快指数を算出した。

$$WBGT=0.7 \times \text{湿球温度} + 0.3 \times \text{黒球温度} \dots \dots \dots (i)$$

$$\text{不快指数} = 0.81 \times \text{乾球温度} + 0.01 \times$$

$$\text{相対湿度} \times (0.99 \times \text{乾球温度} - 14.3) + 46.3 \dots \dots (ii)$$

## 2. 3 測定時期及び条件

壁面緑化に供する苗の植え付けは、各施設で5月初旬頃に行われたが、ある程度の日射遮蔽効果が得られる緑被ができあがったのは、7月上旬から中旬以降であった。そのため、測定は7月25日から8月31日までの夏休み期間中に行った。室内及び外壁の熱環境測定は、1施設あたり10~15日連続で実施した。また、表面温度の測定は概ね9:00~17:00に行い、一日の推移を観測した。

室内の熱環境測定では、壁面緑化の効果のみを把握するため、ブラインドは上げた状態で固定し、窓及び出入口を閉め、人の出入りがほとんどない状態で測定を行った。

## 3 結果及び考察

室内の熱環境測定を実施した7施設のうち、環境改善効果が最も大きかったのは山王中学校、平均的な効果が得られたのは大原高校であった。以下の解析では、この2施設の結果を示す。

### 3. 1 緑被率

山王中学校のアサガオと大原高校のニガウリの緑化状況を図2と図3に示した。このときの



図2 山王中学校の状況 図3 大原高校の状況  
 緑被率は、山王中学校が 89%、大原高校が 56% であった。調査対象施設で栽培した植物は、表 1 に示したように 4 種類あったが、もっとも栽培数が多かったニガウリは、葉の面積が広く、量も多いため、高い緑被率が得やすい。これに対し、アサガオは緑被率が低くなりがちであるが、山王中学校ではプランターを 2 列に配置し、ネットに定着させる株数を通常の倍になるよう工夫していたため、高い緑被率が確保できた。

### 3. 2 壁面温度の低減効果

サーモグラフィで測定した山王中学校の壁面と葉の表面温度の推移を図 4 に示した。壁面温度の最大値は、外気温と同じく 14:00 頃に観測し、その後緩やかに減少した。緑化壁面の温度は非緑化壁面より平均で 1.9℃、最大で 2.5℃ (11:35) 低かった。アサガオは、日射が強い昼過ぎには葉がしおれた状態になり、葉の表面温度が上昇し、非緑化壁面の温度を上回った。このような状態では葉表面の蒸散作用が大きく低下していることが考えられる。しかし、緑被率が高いために日射の遮蔽効果は保たれており、

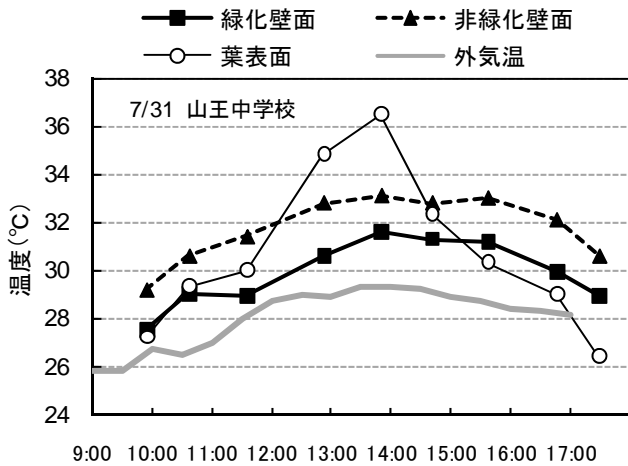


図4 日中の表面温度と外気温の推移

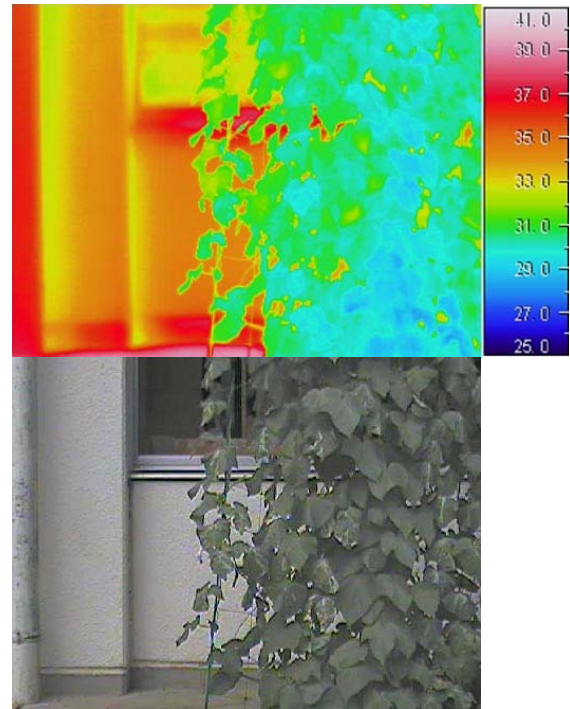


図5 15:37 の表面温度の状況

緑化壁面の温度は非緑化壁面より 1.5℃以上低い状態を保っていた。この日は、15 時過ぎに水やりを行っているが、その後は蒸散作用が回復して葉の表面温度は低下し、図 5 に示すように壁面温度より低い状態となった。

図 6 にサーミスタセンサで連続測定した大原高校における壁面温度と外気温の測定結果を示した。図は、測定期間中の時刻別平均値の日変化を示しているが、日中は緑化壁面の温度は非緑化壁面より明らかに低く推移した。一方、夜間はその差がほとんど見られなくなった。山王中学校においてもほぼ同様の温度推移が観測された。表 2 にサーミスタセンサを用いた連続測定結果から求めた日最高と日最低温度の平均値

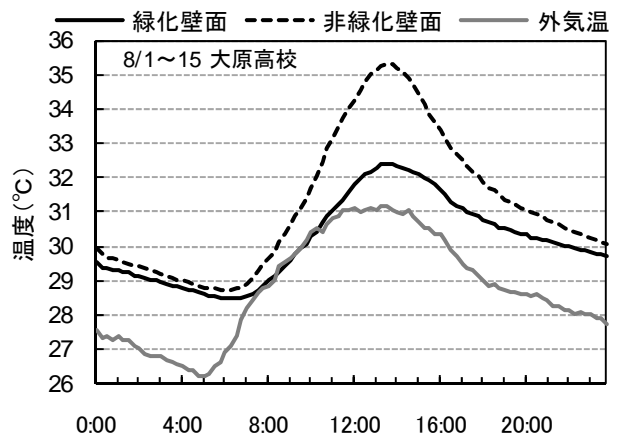


図6 壁面温度と外気温の日変化

表2 壁面温度の連続測定結果

	山王中	大原高
日最高温度平均値の差	5.1℃	3.4℃
日最低温度平均値の差	0.6℃	0.3℃
昼間の平均温度差	2.4℃	1.7℃

注1) 測定期間は、山王中 8/21~31, 大原高 8/1~15。昼間は、6:00~18:00をいう(以下同じ)。

を示した。なお、最高(最低)温度を観測する時刻は日によって異なるため、表2の日最高(最低)温度平均値の差は図6の時刻別平均温度の最大(最小)値の差とは一致しない。表2に示した数値の有意差(有意水準0.05。以下同じ。)を検定したところ、山王中学校、大原高校ともに日最高温度には有意差があり、日最低温度には有意差が認められなかった。すなわち、緑化による壁面温度低下の作用は日中に限られ、その効果が夜間に及ぶことはないといえる。

他の調査実施施設の結果も踏まえると、こうした壁面温度の低下効果は、緑被率が概ね40%を超えると発現した。

### 3.3 室温の低減効果

室温を測定した部屋は、山王中学校、大原高校とも冷房設備のない1階の教室である。図7にサーミスタセンサで連続測定した山王中学校における室温と外気温の連続測定結果を示した。図6と同様に測定期間中の時刻別平均値の日変化を示している。

緑化壁はやや西向きであるため、日差しが室内に差し込む午後から夕方にかけて室温差が広がる傾向が見られた。日中は非緑化室に比べて緑化室の室温の方が低く、深夜から早朝にかけてはその差が少なくなった。大原高校でも、ほ

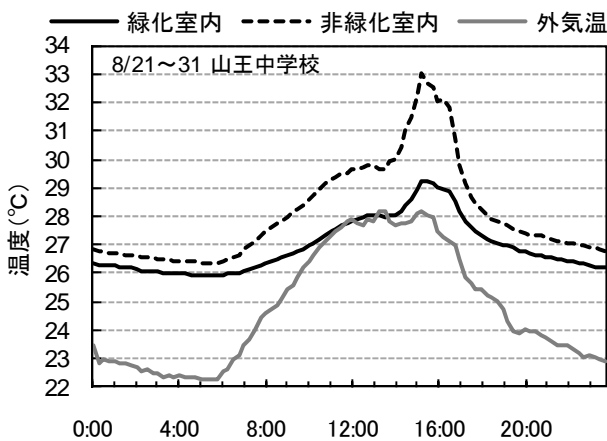


図7 室温と外気温の日変化

表3 室温の連続測定結果

	山王中	大原高
日最高温度平均値の差	4.1℃	1.7℃
日最低温度平均値の差	0.5℃	0.1℃
昼間の平均温度差	1.7℃	1.0℃

ぼ同様な室温推移が観測された。

壁面温度と同様に、連続測定結果から日最高と日最低室温を求めた結果を表3に示した。これらの数値の有意差を検定したところ、両校とも日最高温度には有意差があり、日最低温度には有意差が認められなかった。すなわち、緑化による室温低下の作用も、壁面温度の場合と同じく日中に限られ、その効果が夜間に及ぶことはないといえる。

### 3.4 体感指標の低減効果

本研究で評価した体感指標は、2.2で述べたとおり、WBGT指数と不快指数である。日本気象学会は、表4に示すように、WBGT指数を用いて熱中症予防のための評価値を定めている<sup>3)</sup>。また、不快指数は一般的に表5に示すような体感との関係があるといわれている。

山王中学校のWBGT指数及び不快指数の平均値の日変化を図8に示した。日常生活における熱中症予防指針値の「嚴重警戒」に相当するWBGT指数28を超える状態は、非緑化区では14:15から16:30まで約2時間継続したが、緑化

表4 日常生活における熱中症予防指針値

WBGT指数	判定	熱中症に注意すべき生活活動強度
31以上	危険	すべて
28以上31未満	嚴重警戒	
25以上28未満	警戒	中等度以上
25未満	注意	強い

生活活動強度の目安(例)  
 軽い ; 食事, 洗濯, 机上事務  
 中等度 ; 拭き掃除, 床磨き, 布団の上げ下ろし  
 強い ; 縄跳び, マラソン, 水泳

表5 不快指数と体感

不快指数	一般的な体感
65~70	快適
70~75	暑くない
75~80	やや暑い
80~85	暑くて汗が出る
85以上	暑くてたまらない

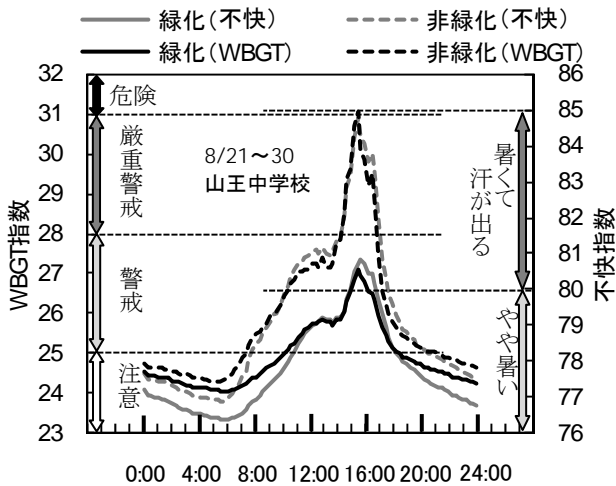


図8 体感指標の日変化

区では発生しなかった。また、「警戒」に相当する WBGT 指数 25 を超える状態は、非緑化区では 7:30 から 20:45 まで 13 時間以上継続したが、緑化区室内における継続時間は 10:15～18:00 までの約 8 時間であった。WBGT 指数の最大値は、緑化室内が 27.1°C、非緑化室内が 31.0°C であり、最大値で比較すると緑化により体感温度は 3.9°C (15:00) 低くなった。

一方、不快指数は、「暑くて汗が出る」に相当する不快指数 80 を超える状態は、非緑化区では 10:15～17:15 まで 7 時間継続したが、緑化区では 15:00～16:30 までの 1 時間半にとどまった。

山王中学校と大原高校の WBGT 指数の連続測定結果を表 6 に示した。壁面緑化を行うと、最も暑いときで山王中学校では 3.9°C、大原高校でも 1.4°C 涼しく感じられる、という結果が得られた。

### 3. 5 ヒートアイランド及び地球温暖化対策としての効果

ヒートアイランドの原因の一つは、1 で述べたように熱容量の大きな建築物などからの夜間の放熱である。壁面温度が外気温より高いときに、(iii) 式に示す熱 (顕熱フラックス) が空気を暖める。空気の対流熱伝達率は風速に依存するが、一定期間の平均値を仮定すれば、壁面か

表6 WBGT指数の連続測定結果

	山王中	大原高
緑化室最大値	27.1°C (15:15)	33.3°C (12:45)
非緑化室最大値	31.0°C (15:15)	34.7°C (12:30)
最大値の差	3.9°C	1.4°C

注) 最大値は、時刻別平均値の最大値を表す。

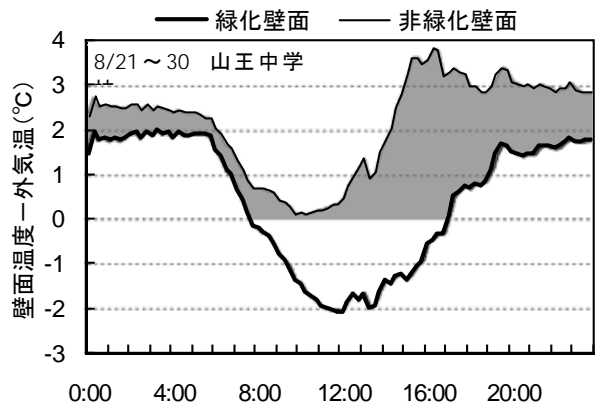


図9 壁面と外気の温度差の日変化

ら空気に移動する熱量は、壁面と外気の温度差に比例するとみなせる。図 9 に山王中学校における壁面と外気の温度差の日変化を示した。図の灰色で示した部分が放熱の削減分に相当する。本研究では、非緑化壁面の放熱量に対するこの削減分の比率を壁面温度低下によるヒートアイランド緩和効果として算出した。

顕熱フラックス=空気の対流熱伝達率

$$\times (\text{壁面温度} - \text{外気温}) \dots (iii)$$

ヒートアイランドのもう一つの原因である人工排熱の増加についても、その削減効果の推定を試みた。壁面緑化を行えばエアコンを使用せずに室温を下げられるので、この分の人工排熱を壁面緑化による削減分とみなし、評価を行った。3. 3 で示した室温は、窓際の室温であることから、室温の代表値として教室中央の室温を求めため、山王中学校において次により温度勾配の測定を行った。教室の窓側と廊下側の室温 (測定高さ 1.5m) をサーミスタセンサで測定し、その差から教室横方向 (窓-廊下方向) の温度勾配を求めた。なお、教室縦方向の温度勾配は無視できるものと仮定している。

その結果、緑化室内では 10:30～17:15 までの時間帯に窓側の室温が高くなり、非緑化室内では窓側の室温が高くなる時間が長く 8:45～18:45 であった。また、どちらも夜間は外気温低下の影響を受けやすい窓側の室温が廊下側より低くなった。

以上のように、昼間と夜間で窓側と廊下側の室温推移の傾向が明確に異なることから、6:00 から 18:00 までの昼間及び 18:00 から翌 6:00 までの夜間の二期の時間帯に分けて窓側と廊下側の平均室温差を求めた。この室温差を窓側と廊下側の測定点間の距離 (7m) で除し、室内の温度勾配を求めたところ、表 7 のとおりとなった。

表7 室内の温度勾配

(単位;°C/m)

	昼間	夜間
緑化室内	0.02	-0.08
非緑化室内	0.21	-0.07

注) 窓側を基準とする。

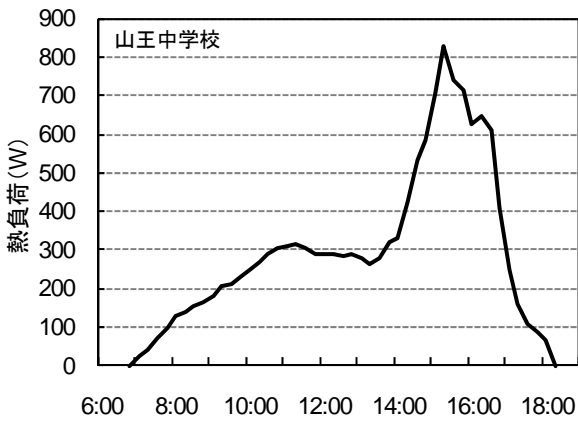


図10 壁面緑化により除去された熱負荷

この温度勾配と窓際における室温の測定結果から教室中央(高さ1.5m)の室温を算出し、これを室温の代表値として緑化室温と非緑化室温の差を求めた。これに部屋の容積、空気の密度、空気の定積比熱を乗じて山王中学校における除去すべき熱量負荷の推移を求めたものが図10である。

この熱負荷をエアコンで除去した場合には二酸化炭素が発生する。これを壁面緑化による二酸化炭素の削減相当量とみなし、COP(エネルギー消費効率;消費電力に対する冷房能力の比率)が5のエアコンで除去した場合を仮定して二酸化炭素排出量を算出した。

以上の推定値を壁面緑化のヒートアイランドと地球温暖化対策としての効果として、表8にまとめた。

表8 壁面緑化のヒートアイランド・地球温暖化対策としての効果

		山王中	大原高
ヒートアイランド緩和効果	放熱削減率	57%	43%
	人工排熱削減量	12.7 MJ/日	1.7 MJ/日
地球温暖化防止効果	CO <sub>2</sub> 削減量(1日)	262 g/日	35 g/日
	〃 (夏期)	15 kg	1.7 kg

注) 放熱削減率は、非緑化壁面に対する比率。

夏期のCO<sub>2</sub>削減量は、最高気温平年値が28°C以上の日をエアコン稼働日として計算(山王中58日(海老名AMeDAS)、大原高50日(辻堂AMeDAS))。緑化室の容積は、山王中が284m<sup>3</sup>、大原高が140m<sup>3</sup>。

#### 4 まとめ

神奈川県湘南地域県政総合センター、伊勢原市及び秦野市が実施した壁面緑化事業の実施施設で壁面緑化による環境改善効果の検証調査を行った。その結果、最も条件がよい場合には、次のような環境改善効果が認められた。

1) 昼間の壁面の平均温度は2.4°C低くなり、日最高温度は最大5.1°C低下した。なお、夜間は壁面温度差に統計的に有意な差は見られなくなる。

2) 昼間の室温の平均温度は1.7°C低くなり、日最高温度は最大4.1°C低下した。なお、夜間は室温差に統計的に有意な差は見られなくなる。

3) WBGT指数から体感温度差を評価すると、最も暑いと感じられる時間帯の体感温度は、最大3.9°C低下した。

4) 壁面緑化によるヒートアイランド緩和効果は、放熱削減率が57%、人工排熱削減量が12.7MJ/日であった。この人工排熱削減量から地球温暖化対策としての効果を求めると、二酸化炭素排出量262g/日に相当し、夏期を通じた二酸化炭素排出削減量は15kgとなった。

モデル事業に参加した学校のうち、大清水高校ではエコ委員会が壁面緑化の管理を行うとともに、独自に環境改善効果の調査を行い、その結果を文化祭で発表した。壁面緑化は比較的簡単に取り組める環境対策なので、環境教育のツールの一つとして活用することができるものと考えられる。

#### 参考文献

- 1) 池貝隆宏, 原田進, 内藤智子, 斉藤邦彦, 石井進, 堀江裕一: アサガオを用いた壁面緑化の効果測定, 神奈川県環境科学センター研究報告第31号, 86-89 (2008)
- 2) 気象ハンドブック編集委員会: 気象ハンドブック, 217-218 (1979)
- 3) 日本生気象学会: 日常生活における熱中症予防指針 Ver.1, 1-9 (2008)

プロジェクト研究 [平成19~21年度]  
 課題名: 地球温暖化及びヒートアイランド対策のための技術支援に関する調査研究