

# 屋上緑化による建物内外への熱環境改善効果に関する実験的研究

地域環境計画

森本 文

## 1. 研究の背景と目的

近年、屋上緑化による屋外微気象改善効果や、夏季における室内への熱流入の軽減効果が注目されている。また緑化には気温低減効果だけではなく、環境の快適性を高めたり癒しの空間を作り出す効果もあると考えられている。しかし一口に屋上緑化と言ってもその種類は多種多様で、現在より効果的な緑化材の開発が進められている。本研究では、4種類の緑化ユニットの物性値と、建物内外への熱環境改善効果を把握・検討することを目的とする。4種類の緑化ユニットは植物だけでなく、土壌層も異なっている。

## 2. 実測概要

大阪市立大学総合教育棟C棟屋上に図1のように設置された4種類の緑化ユニット（高麗芝、みさと芝、ヘデラ、セダム）と表面に熱線反射性塗装を施したセラミックタイルについて、表1の項目を計測している。緑化ユニットと屋上スラブの断面図を図2に示す。緑化ユニットの断面構造及び水やりスケジュールは表2に示す。セダムは乾燥に強いことが特長なので、灌水は行わない。

## 3 実測結果（熱物性値）

### 3.1 日射吸収率

日射吸収率は、太陽高度が高く日射量が最大になる日中（12:00～12:30）のデータをもとに決定する（表3）。参考値として、アスファルト防水の日射吸収率も示す。

表3 日射吸収率（2003年8月20日）

	高麗芝	みさと芝	ヘデラ	セダム	タイル	アスファルト防水
日射吸収率	0.79	0.79	0.87	0.83	0.74	0.87

表1 計測項目

	計測項目	測定機器（製造メーカー名）
気象条件	温湿度	温湿度計プローブ遮光ブレード付（キャンベル）
	風向	矢羽式風向計（キャンベル）
	風速	3杯式風速計（キャンベル）
緑化材周辺	温度	T型熱電対（自作）
	熱流	熱流計（英弘精機）
	土壌水分	土壌水分計（Decagon Devices）
	放射収支	放射収支計（キャンベル）
	アルベド	アルベドメーター（Kipp&Zonen）
	顕熱量	3次元超音波風向風速計（KAIJO）*1
室内	温度	T型熱電対（自作）

\*1 渦相関法による顕熱量測定は高麗芝が2003/8/22、みさと芝が8/23、ヘデラが9/9、セダムが12/5に実施している。

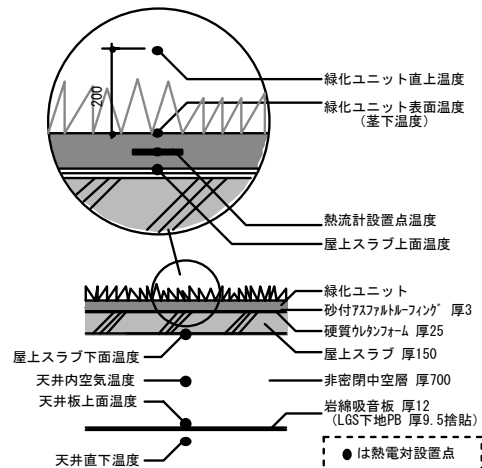


図2 緑化ユニット及び屋上スラブ断面図

表2 緑化ユニットの断面構造・水やりスケジュール

植物	高麗芝	みさと芝	ヘデラ	セダム
土壌	リサイクルロード ガーデンマット 絶縁シート	ポネG ソイル トレイ 防根シート	ウッドボートブロック 不織布袋 底面給水トレイ	ポリセグメント PG 耐根シート
厚み (m)	0.08	0.07	0.075	0.055
灌水時刻	6:00～6:30 18:00～18:30	6:00～6:30 18:00～18:30	6:00～7:00 18:00～19:00	なし

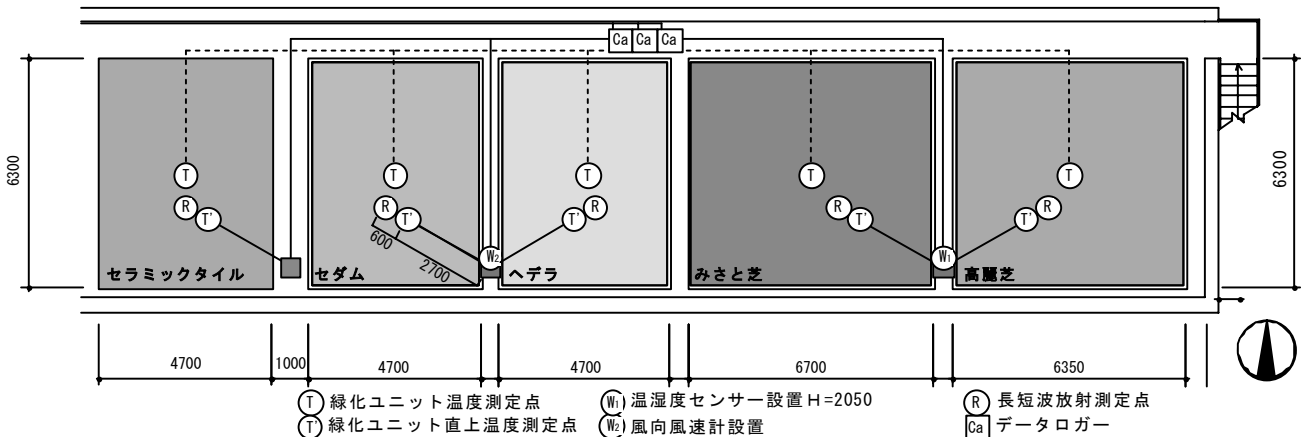


図1 緑化ユニット及び測定機器配置図

### 3.2 緑化材のみかけの日射吸収率

実測した正味放射量  $R_n$  と顕熱量  $H$  と地中伝導熱量  $G$  を放射収支式に代入し、その残差として緑化材の潜熱量  $\iota E$  を求める。

$$\iota E = R_n - H - G$$

潜熱量は日射量との相関が高いので、日射に乗ずる係数  $f$  (1)として表せる (図3 (1)式)。  $f$  は図4に示す相関図で近似式を描いた時の傾きとして得られる。

蒸発の冷却効果は、屋根面の日射吸収量の低減と等価とみなして、下式のように評価される。

$$\text{緑化材のみかけの日射吸収率} = \text{日射吸収率} - f$$

求められた緑化材のみかけの日射吸収率を表4に示す。

### 3.3 定常計算で求めた熱伝導率

緑化ユニットの熱伝導率  $\lambda$  は、図3の(2)式より算出する。計算に使用した各値は、晴天日が続いた2003年9月1日～7日のうち、温度変化が小さく熱流が安定している0:00～3:00の平均値を用いる。算出した熱伝導率  $\lambda$  と熱抵抗  $R$  を表5に示す。高麗芝ユニットとみさと芝ユニットの両芝は構成土壌が異なるため、熱抵抗の値が  $0.36[m^2 K/W]$  と  $0.18[m^2 K/W]$  で2倍の差がある。熱抵抗はセダムユニットの  $0.79[m^2 K/W]$  が最も大きい。

### 3.4 非定常計算で求めた熱伝導率と容積比熱

緑化ユニットの熱伝導率と容積比熱を差分法による非定常伝熱計算により推定する。数値計算の実行期間は2003年9月1日～7日である。境界条件は緑化材表面温度と屋上スラブ下面温度とし、ここに実測値を10分間隔で入力する。各種入力条件を表6に示す。緑化ユニットを除く各部材の値は文献値(3)を用いるものとする(表7)。図5のように緑化ユニットの熱伝導率と容積比熱の値を変化させて算出したスラブ上面温度と実測値との平均2乗誤差が最小となる熱伝導率を採用するが、定常計算による熱伝導率も勘案し、最終的に表8の値とする。

### 3.5 バルク輸送係数と顕熱量

算出には図3の(3)式を用いる。表面温度は、図3の(4)式で定義する放射温度を用いる。放射率  $\epsilon$  とバルク輸送係数  $C_H$  は  $9.0 \leq \epsilon \leq 9.9$ 、 $0.0015 \leq C_H \leq 0.0060$  の範囲で変化させて算出した顕熱量と、実測から得られた顕熱量の平均二乗誤差が最小となる値を採用する(表9)。表9の値を用いて算出した顕熱量を図5に示す。タイルは日射反射率が大きいために正味放射量が小さいが、潜熱移動がないため顕熱量が大きくなっている。高麗芝とみさと芝は似た値を示し、セダムの顕熱量は降雨直後は小さいが、灌水を行っていないため晴天日が続く増加していく傾向がある。

表9 放射率とバルク輸送係数  $C_H$  の組み合わせ

	高麗芝	みさと芝	ヘデラ	セダム
放射率 $\epsilon$	0.96	0.96	0.97	0.98
バルク輸送係数 $C_H$	0.0028	0.0028	0.0041	0.0022

$\iota E = f \times J$  . . . (1)

$\iota E$ : 蒸発潜熱[W/m<sup>2</sup>]  $J$ : 日射量[W/m<sup>2</sup>]  $f$ : 日射吸収率低減値

$\lambda = Q / \{ (T_1 - T_2) \cdot \Delta x \}$  . . . (2)

$\lambda$ : 熱伝導率[W/mK]  $T_1$ : 緑化材表面温度[K]

$T_2$ : 屋上スラブ上面温度[K]  $Q$ : 地中伝導熱流[W/m<sup>2</sup>]

$H = C_p \rho C_H U (T_s - T)$  . . . (3)

$H$ : 顕熱輸送量[W/m<sup>2</sup>]  $C_H$ : バルク輸送係数  $C_p$ : 定圧比熱

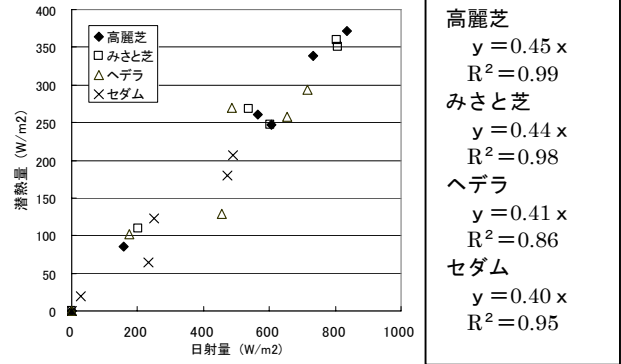
$T_s$ : 表面温度[K]  $\rho$ : 空気密度[kg/m<sup>3</sup>]  $T$ : 大気温度[K]

$T_s = \sqrt[4]{L \uparrow / \epsilon \sigma}$  . . . (4)

$L \uparrow$ : 上向き長波放射量[W/m<sup>2</sup>] (実測値)

$\epsilon$ : 放射率  $\sigma$ : ステファン・ボルツマン定数(=5.67×10<sup>-8</sup>)

図3 計算式



日射量、潜熱量は 6:00～8:00, 8:00～10:00, 10:00～12:00, 12:00～14:00, 14:00～16:00の2時間平均値である

図4 日射量と潜熱量の相関図

表4 日射吸収率低減値と日射吸収率

	高麗芝	みさと芝	ヘデラ	セダム
日射吸収率	0.79	0.79	0.87	0.83
日射吸収率低減値	0.45	0.44	0.41	0.40
緑化材のみかけの日射吸収率	0.34	0.35	0.46	0.43

表5 定常計算で求めた熱伝導率と熱抵抗

	高麗芝	みさと芝	ヘデラ	セダム
熱伝導率 $\lambda$ [W/mK]	0.22	0.38	0.14	0.07
熱抵抗 $R$ [m <sup>2</sup> K/W]	0.36	0.18	0.54	0.79

表6 各種入力条件

入力項目	高麗芝	みさと芝	ヘデラ	セダム
節点数[個]	21	20	18	18
計算間隔[h]	1/6	1/6	1/6	1/6
境界条件の温度[°C]	実測値を10分間隔で入力			

表7 各種部材の熱伝導率・熱容量・厚み (文献値(3))

部材	熱伝導率 [W/mK]	容積比熱 [kJ/m <sup>3</sup> K]	厚み [m]
コンクリート	1.00	1900	0.15
硬質ウレタンフォーム	0.03	220	0.025
アスファルトフイック <sup>®</sup>	0.11	920	0.013

表8 非定常計算で求めた熱伝導率と容積比熱

	高麗芝	みさと芝	ヘデラ	セダム
熱伝導率[W/mK]	0.22	0.38	0.27	0.20
容積比熱[kJ/m <sup>3</sup> K]	3700	2300	1200	1300

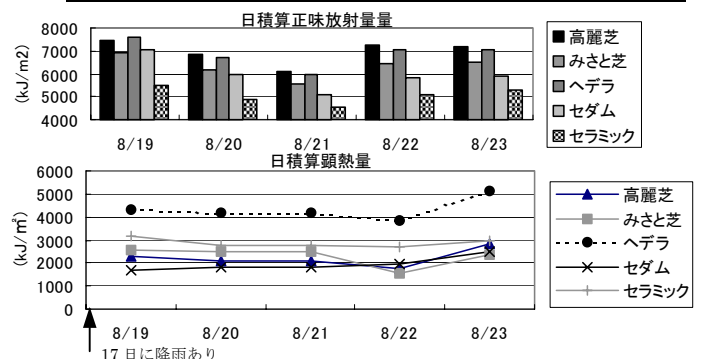


図5 日積算顕熱量の推移 (参考値として正味放射量も示す)

## 4. 熱負荷計算シミュレーション

### 4.1 シミュレーション目的

実行プログラムには「HASP/ACLD/YH」<sup>(4)</sup>を用いる。大学屋上における実験では、各緑化ユニットの直下の階の居室の面積、使用スケジュールが異なっており、各緑化ユニットが屋内に及ぼす影響を比較分析することが難しい。そこで、各緑化ユニットの直下の階の居室を統一し、緑化ユニットの熱物性値の違いによる最上階室への熱的影響を調べるためのシミュレーションを行うこととする。

### 4.2 シミュレーション概要

#### (1) シミュレーション対象室

シミュレーション対象室となる講義室の平面図を図6に、対象室の設定条件を表10に示す。対象室は9:00～18:00まで在室者がいる設定とし、この間に照明と空調を使用する。

#### (2) 気象データ

気象データにはシミュレーション空気調和・衛生工学会様式の大阪の標準年気象データを用いる。シミュレーション対象期間は夏季：8月18日～24日（助走開始日：8月3日）、冬季2月23日～28日（助走開始日：2月16日～）とする。

#### (3) シミュレーションの視点

次の3つの視点でシミュレーションを行う。

視点1 [断熱材]と[緑化ユニット]の比較 (夏季)

視点2 [断熱材]と[緑化ユニット]の比較 (冬季)

視点3 [断熱材のみ]と[断熱材+緑化ユニット]の比較

各視点の屋上スラブ断面図を図7に、グラフの凡例の対応表を表11に示す。

### 4.3 シミュレーション結果

#### 視点1：夏季の冷房負荷削減効果

まず、断熱材と緑化ユニットの夏季の冷房負荷削減効果を比較する（ここでいう冷房負荷とは、室負荷と外気負荷を足し合わせた顕熱負荷のことである）。図8より、夜間の室温を見ると、[N-0]と比較して、[N-1]で約-0.9℃、[K-0]で約-1.4℃温度差が生じている。図9より、断熱材も緑化ユニットも日中の入射日射を抑え、室内に流入してくる熱流を抑えていることがわかる。

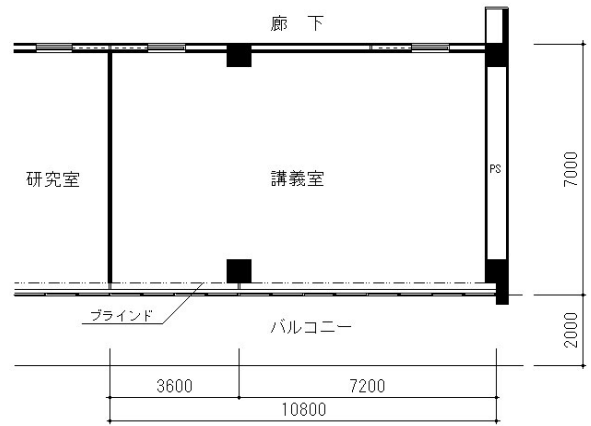


図6 講義室平面図

表10 シミュレーション対象室の設定条件

室面積	75.6 m <sup>2</sup>
階高	4.05m
窓	普通ガラス6mm、中等色ブラインドつき
照明	蛍光灯1本32W型を22本(0.7kW)
在室人数	44人(8時～18時の10時間在室)
作業指数	軽作業をしている状態(91kcal/h人)
空調の設定温湿度	夏季27℃,冬季20℃,室温度40～50%
空調の運転時間	8時～18時(換気もこの間だけ行う)
外気導入量	174 [m <sup>3</sup> /h]

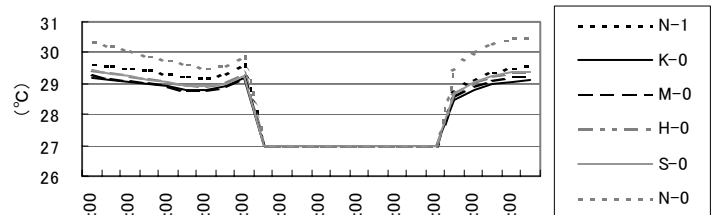


図8 視点1の夏季室温変動

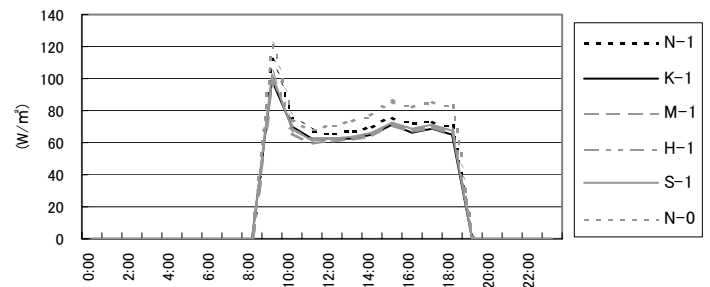


図9 視点1の夏季冷房負荷変動 (+:冷房)

表11 グラフの凡例の対応表

	緑化なし	高麗芝	みさと芝	ヘデラ	セダム
断熱材なし	N-0	K-0	M-0	H-0	S-0
断熱材あり	N-1	K-1	M-1	H-1	S-1

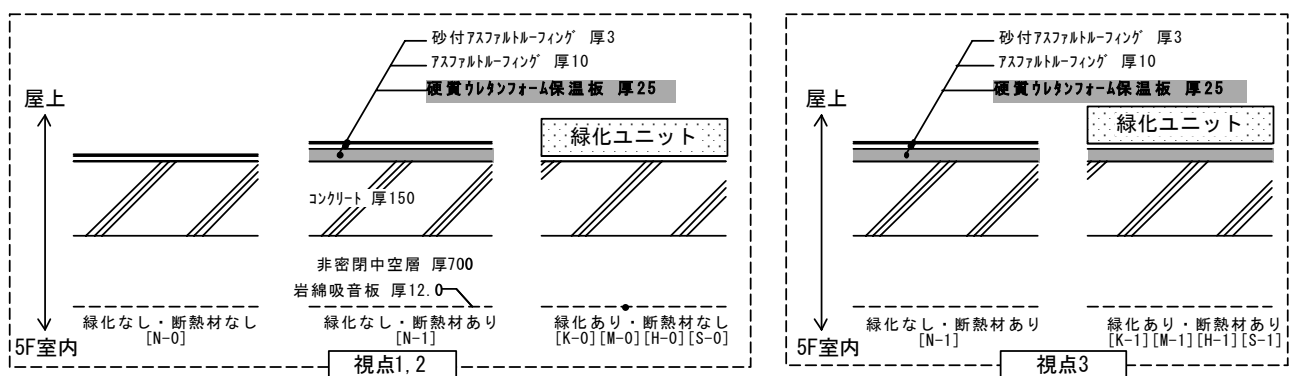


図7 各視点の屋上スラブ断面図

図 10 は、夏季の冷房負荷の 9:00～ 18:00 の積算値を示している。[N-0]と比較して[N-1]で 8.7%、[K-0]で 16.1%、[M-0]で 16.3%、[H-0]で 13.8%、[S-0]で 14.4% の冷房負荷の減少が見られる。緑化ユニットの冷房負荷は断熱材より小さくなっているが、これは緑化ユニットを屋上スラブ上に設置することで、日中の屋上コンクリートスラブへの日射による熱の流入が抑制されているためだと考えられる。

### 視点 2：冬季の暖房負荷削減効果

次に、断熱材と緑化ユニットの冬季の暖房負荷削減効果を比較する。図 11 より、夜間に室内の熱が流出するので、空調をかける直前の 8:00 に室温が一番低くなる。8:00 の時点における[N-0]との温度差は[N-1]で+1.5℃、[H-0]で+0.85℃となっている。図 12 より、9:00 に暖房をつけた瞬間の暖房負荷は、[N-0]と比較して、[N-1]で -67.36[W/m<sup>2</sup>]、[K-0]で -43.42 [W/m<sup>2</sup>]となっている。

図 13 より、断熱材は緑化ユニットよりも断熱性能があり冬季の暖房負荷を低減していることがわかる。

### 視点 3：[断熱材+緑化ユニット]の冷房負荷削減効果

既に断熱材が入っている屋上スラブに緑化ユニットを設置した場合の冷房負荷低減効果を調べる。図 14 より、夜間の室温は[N-1]と比較して[K-1]で約 -0.4℃の差が出ていることがわかる。図 15 より、緑化ユニットの冷房負荷は削減されているが、その効果は視点 1 で示した効果の約 1/2 となっている。

[断熱材+緑化ユニット]（[K-1][M-1][H-1][S-1]）と[緑化ユニットのみ]（[K-0][M-0][H-0][S-0]）を比較してみると、冷房負荷の差はほとんど見られない。これは冷房負荷削減効果が緑化ユニットによるものであり、断熱材がほとんど寄与していないことを意味する。

## 5 まとめ

屋外への影響として、緑化ユニットは熱線反射性塗料を施したセラミックタイルより顕熱量を低減する効果があることがわかった。また、屋上緑化実測により求めた緑化ユニットの熱物性値を用いてシミュレーションを行った結果、緑化ユニットは夏季には断熱材と比べ、より効果的に日射侵入を防ぎ、冷房負荷を低減することがわかった。また冬季の暖房負荷を低減するには、断熱材が最も効果的であるが、断熱材のない屋根に緑化ユニットを設置すると、断熱を補強する効果があることがわかった。

### <参考文献>

- (1) 清水 孝, 吉永 美香, 天野 大志, 奥宮 正哉: 屋上緑化による空調負荷低減効果に関する研究 その 1 SMASH シミュレーションによる屋上芝生植栽の効果推定, 日本建築学会学術講演梗概集, pp653-654, 2003
- (2) 田中 稲子, 梅干野 晃, 平松 利治, 光藤 智雄, 石川 嘉崇: 軽量薄型屋上植栽システムの CO2 排出量によるライフサイクル評価 その 1 年間必要散水量及び年間室内空調負荷の定量化, 日本建築学会学術講演梗概集, pp853-854, 2002

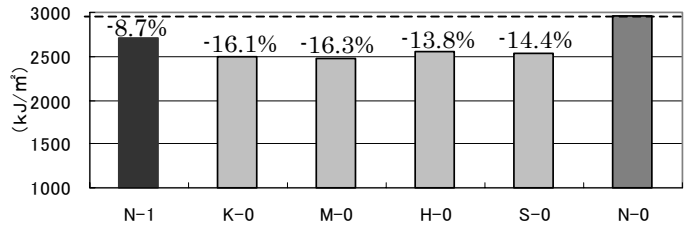


図 10 視点 1 の夏季日積算冷房負荷

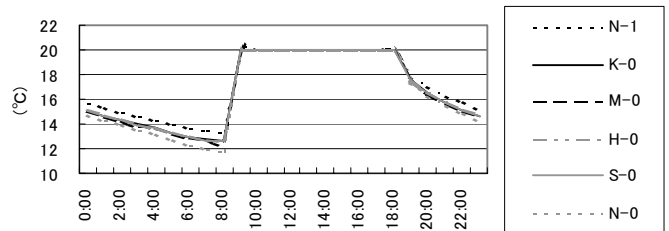


図 11 視点 2 の冬季室温変動

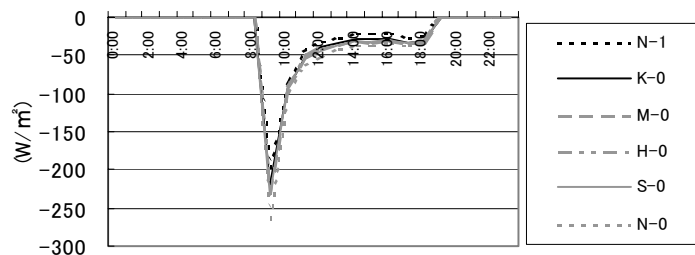


図 12 視点 2 の冬季暖房負荷変動 (-:暖房)

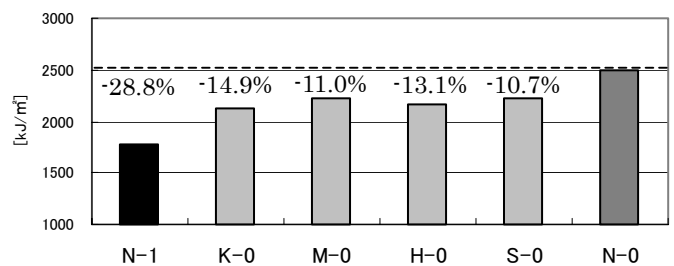


図 13 視点 2 の冬季日積算暖房負荷

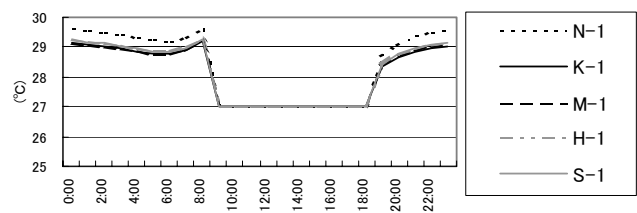


図 14 視点 3 の夏季室温変動

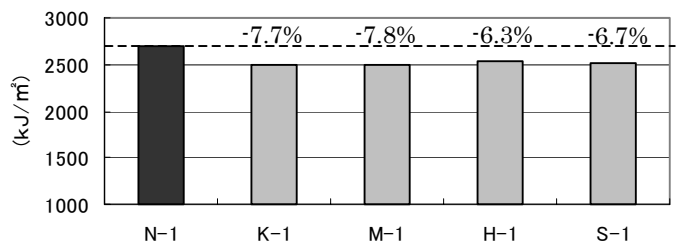


図 15 視点 3 の夏季日積算冷房負荷

- (3) 浦野良美, 中村洋編著: 「建築環境工学」 森北出版 (株), 1999
- (4) 坂本雄三, 西岡真稔, 永田明寛, 神村一幸, 陳向陽: 計算時間間隔を任意定数とした空調負荷計算プログラムの開発, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 1997.8, B-31