

# 緑化が空調システムの省エネルギー に及ぼす効果の予測法と検証に関する研究 Prediction and Verification of the Energy Saving of HVAC Systems Brought by Tree-planting

研究代表者 京都大学大学院工学研究科 助教 王福林

Kyoto University, Graduate school of Engineering, Assist. Prof. Fulin WANG

## 和文アブストラクト

環境問題・エネルギー問題は現在および将来にも非常に重要かつ厳しい問題である。本研究では建築物における環境改善・エネルギー削減に着目し、建物近傍にある樹木・屋上緑化などの日射遮蔽や蒸散が空調システムの熱負荷とシステムの効率に与える影響を明らかにし、緑の日射遮蔽や蒸散による空調システムのエネルギー削減効率予測法を開発した。つぎに、水気耕栽培屋上緑化と空調システムの冷房熱源と組み合わせ、気温冷却による効率向上効果を実測し、開発した手法の有効性を検証した。蒸散量の実測より、日積算蒸散量の期間平均は $6.3\text{kg/m}^2$ で、最大は $8.3\text{kg/m}^2$ であった。日積算蒸散量の期間最大値は灌水のあるセダムの1.8倍にあたり、単木に匹敵する程度であった。空気冷却温度差の実測より、散水実験日・降雨日を除いた期間の10:00～16:00の平均冷却温度差は $1.3^\circ\text{C}$ であり、散水実験日は $3.0^\circ\text{C}$ と約2.3倍になることがわかった。空調システムのエネルギー削減効率予測法を用いて、札幌・東京・大阪・那覇の気候異なる四地域での建物に水気耕屋上緑化の日射遮蔽・蒸散冷却効果を空調室外に適用する場合の省エネ効果を予測した。各地域で省エネルギー率は同程度であり、効率向上量の高・中・低の三グループ冷房熱源機において、それぞれ約8%、6%、1%であることがわかった。

## Abstract

Environmental and energy issues are very important and serious now and even in future. So this research focuses on improving the environment of buildings and reducing building energy consumption using the trees and other plants around a building to reduce the cooling load and improve the energy efficiency of air-conditioners. The mechanism of how plants transpiration and solar-shading influencing air-conditioners' energy efficiency is analyzed and a method is developed to predict the energy saving brought by plants transpiration and solar-shading. Then an experimental system was set up through combining a roof planting of hydroponic-cultivated sweat potato with an air-conditioner to verify the accuracy of the energy saving prediction method. The transpiration rate and air-cooling effect caused by the solar-shading and transpiration of roof planting were measured. The daily transpiration is  $6.3\text{kg/m}^2$  in average and  $8.3\text{kg/m}^2$  at the maximum, which is 1.8 times of well-sprinkled roof planting of Sedum, a commonly used roof planting type. The air temperature differences cooled down by the roof plant are  $1.3^\circ\text{C}$  in average for clear day, and  $3.0^\circ\text{C}$  in average by sprinkling water. After the energy saving prediction method accuracy is verified, it is used to check how much an air-conditioner's energy efficiency can be improved at four areas with different weather conditions of Sapporo, Tokyo, Osaka, and Naha. The energy saving ratios at four different areas are similar, which are 8%, 6% and 1% respectively for the air-conditioners with high, middle and low efficiency improvement rate accompanying to the decrease of outdoor air temperature.

## 1. 研究目的

環境問題・エネルギー問題は現在および将来にも非常に重要かつ厳しい問題である。一方、建築のエネルギー消費は全消費の約30%を占め、さらに空調設備システムは建築のエネルギー消費量の1/3~1/2と大きな割合を占めるため、その省エネルギーは地球温暖化防止とエネルギー削減に重要である。そこで、本研究は建物の近く間にある樹木や屋上緑化などの日射遮蔽や蒸散が、建物の熱負荷をどの程度削減できるか、建物の室内環境をどの程度改善でき、その結果どの程度の省エネルギーが達成できるか、空調システムの屋外機の効率上昇にどの程度貢献するのか、などを明らかにすることを目的とする。研究は、葉の気孔コンダクタンスを実測してモデルを作成すること、樹木の日射遮蔽や蒸散をシミュレーションで推定すること、それによって生ずる屋外温熱環境の変化と熱負荷をシミュレートすること、そして、緑化による省エネルギーの総合効果を推定すると共に実際の建物と空調システムを用いて実証することを目指している。

## 2. 研究経過

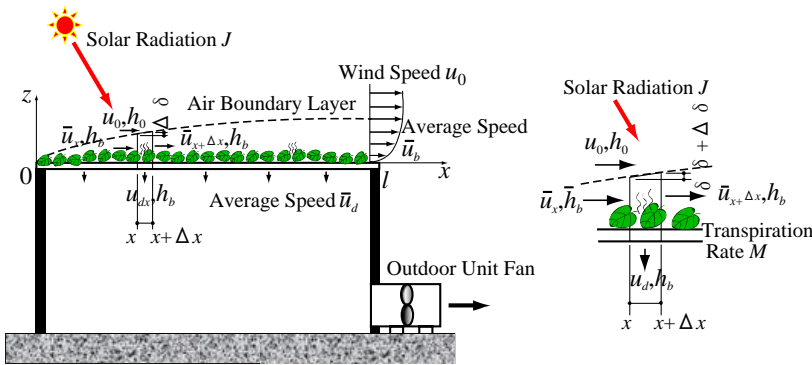


図2 境界層モデルで冷却温度差の推定

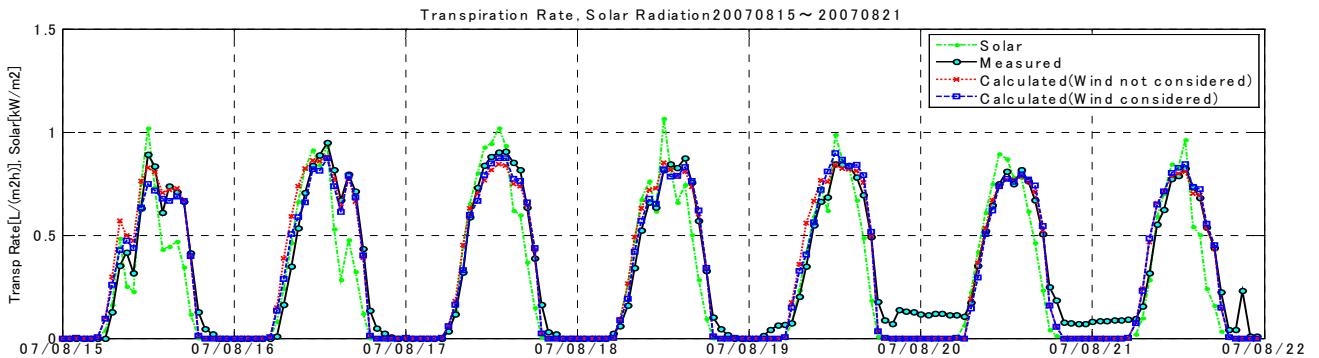


図1 蒸散量モデルの推定結果と実測値の比較

## 2.1 緑による空調システムのエネルギー削減効率予測法

植物葉の蒸散モデルを利用・改良し、空気冷却温度差を推定する物理モデルおよび冷房熱源のエネルギー消費量推定モデルを作成し、空気冷却からの冷房熱源効率向上予測法を開発する。

### 1) 気孔の蒸散制御仕組みを考慮した蒸散モデル

Jarvisの提案した式に基づき、小杉らが改良したモデル式を本研究で採用する。但し、この蒸散モデルでは空気境界層コンダクタンス $g_a$ が一定値と仮定して計算するが、本研究では外部風速を考慮した $g_a$ の計算式(式9)を導入し、蒸散量 $M$ を計算した。外部風速を考慮すると考慮しない場合に計算した蒸散速度と実測した値と比較した。二ヶ月の実測期間に亘って平均誤差は5.5%から3.0%に、%RMSEは20.3%から18.8%になり、モデル精度を向上することが確認した。その比較結果は図1に示す。

$$M = \frac{\rho_m(W_i - W_a)}{r_s + r_a} \quad (1)$$

$$\rho_m = \frac{P}{R(T + 273.15)} \quad (2)$$

$$r_s = \frac{1}{g_s} \quad (3) \quad r_a = \frac{1}{g_a} \quad (4)$$

$$g_s = g_{s \max} \cdot f(Q) \cdot f(T) \cdot f(D) \quad (5)$$

$$f(Q) = \frac{g_{s \max} \cdot Q}{Q + g_{s \max} / a} \quad (6)$$

$$f(T) = \left( \frac{T - T_l}{T_o - T_l} \right) \left\{ \left( \frac{T_h - T}{T_h - T_o} \right)^{\left( \frac{T_h - T_o}{T_o - T_l} \right)} \right\} \quad (7)$$

$$f(D) = \frac{1}{1 + (D/b_1)^{b_2}} \quad (8)$$

$$g_a = 0.189\sqrt{u/d} \quad (9)$$

## 2) 空気冷却温度差モデル

屋上緑化の蒸散により空気冷却効果は流体境界層理論を用いて解析する。境界層モデルは図2に示す。外部風速で空気が緑の架台に沿って流れる時に、緑の上で空気境界層が形成する。図2に示している  $x$  軸の座標  $x$  の地点で幅  $\Delta x$ ,  $y$  軸方向で単位長さ,  $z$  軸方向で境界層厚さ分の分析対象とすれば, 空気質量保守則・空気エネルギー保守則から, 緑を通した後の空気の平均比エンタルピー計算式(10, 11)を導き, 空気冷却温度差を式(12, 13)で計算する。

$$u_b > 0 \text{ の時: } \bar{h}_b = \frac{h_0 \rho_0 u_0 \delta_l + \alpha J}{\rho_b u_0 \delta_l} \quad (10)$$

$$u_b < 0 \text{ の時: } \bar{h}_b = \frac{h_0 \rho_0 \bar{u}_d + \alpha J}{\rho_b \bar{u}_d} \quad (11)$$

$$\bar{\theta}_b = \frac{\bar{h}_b - \bar{x}_b r_{w0}}{C_{pa} + \bar{x}_b C_{pw}} \quad (12)$$

$$\Delta\theta_r = \theta_0 - \bar{\theta}_b \quad (13)$$

## 3) 冷房熱源のエネルギー消費量推定モデル

熱負荷シミュレートして, これと前述の方法で求めた冷却された空気温度を冷房熱源の消費エネルギー推定モデル(式14)に入力して, 効率向上量(省エネ量)を推定する。

$$RE = (a_1 T_o^2 + b_1 T_o + c_1)(a_2 T_i^2 + b_2 T_i + c_2)(a_3 CA^2 + b_3 CA + c_3) + d \quad (14)$$

## 2.2 実測よりエネルギー削減効率予測法の検証

図3に示すような水気耕栽培屋上緑化と空調システムの冷房熱源と組み合わせた実験装置を作成し,

気温冷却による効率向上効果を実測し, 開発したエネルギー削減効率予測法の有効性を検証した。



図3 水気耕栽培屋上緑化実験装置

### 1) 日積算蒸散量の実測結果

散水実験日と降雨日を除いた日の日積算蒸散量の平均は6.3kg/m<sup>2</sup>であり, 期間最大値は8.3kg/m<sup>2</sup>であった(図4)。既往研究と比較すると, 期間最大の日積算蒸散量は灌水のない屋上緑化(セダム)の13.8倍, 灌水のある屋上緑化(セダム)の1.8倍にあたり, 単木にも匹敵する値であるということがわかった。

### 2) 冷却温度差の実測結果

冷却温度差日射量が十分にある10:00~16:00の冷却温度差は, 散水実験日・降雨日を除いた期間の平均で1.3°Cであり, 散水実験日の平均冷値が3.0°Cと, 約2.3倍になっている(図5)。

### 3) エネルギー削減効率予測法の精度検証

8月15日から9月23日に実測期間において, 空気の冷却温度差が計算し, 実測値と比較した。8月15日から22日の一週間の比較は図6に示す。期間全体の平均推定誤差は3.3%, %RMSEは94.0%であった。

## 2.3 異なる地域でのエネルギー削減効率の予測

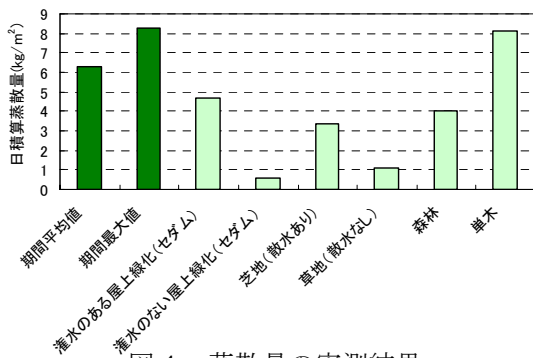


図4. 蒸散量の実測結果

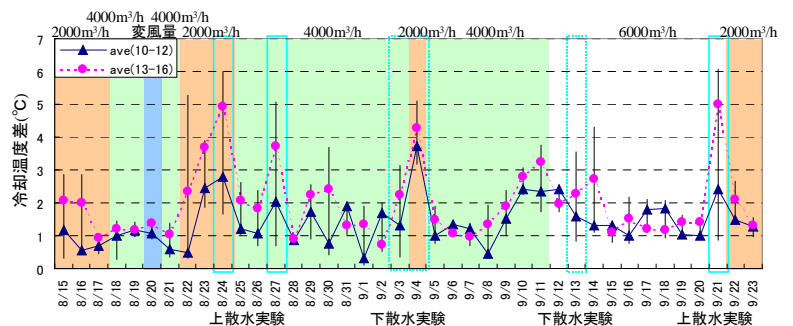


図5. 冷却温度差の実測結果

オフィス用標準問題に準じ、簡略化した建物モデルを作成し、札幌・東京・大阪・那覇の四地域での建物の熱負荷をシミュレートし、各地域でそれぞれの程度省エネ効果を得られるかを検討した。その結果をTable.1に示す。二ヶ月間の積算エネルギー消費量は、空調熱源機の効率向上率が小のグループで約1%、中のグループで約6%、高のグループで約8%のエネルギー削減できることがわかった。

### 3. 研究成果

緑の日射遮蔽や蒸散による空調システムのエネルギー削減効率予測法を開発した。それから、水気耕栽培屋上緑化と空調システムの冷房熱源と組み合わせた実験装置を用いて開発した手法の有効性を検証した。この手法を用いて異なる地域での省エネ効果を予測した。結果、各地域で空調熱源機の効率向上率の大、中、小の8%、6%、1%程度の省エネ効果が得られることがわかった。

### 4. 今後の課題と発展

今後の研究としては、樹木と空調室外機との配置よい測定・実験対象を見つげなかつたため、十分の研究費を確保することでできれば、樹木と空調室外機と組み合わせた実験装置を作成して、樹木の空調システム効率に与える影響と省エネルギー効果を解明するのは、この研究の継続と補足と考える。研究の発展としては、水気耕栽培屋上緑化と空調室外機と組

み合わせた装置を実用化することが考えられる。

### 5. 発表論文リスト (印刷中も含む)

1 Fulin Wang, Harunori Yoshida, Satoshi Masuhara1, Hiroaki Kitagawa, and Kyoko Goto, Simulation-Based Automated Commissioning Method for Air-Conditioning Systems and Its Application Case Study, Proceedings of the 9th International Building Performance Simulation Association Conference, Building Simulation 2005 (BS2005), Montreal, Canada, pp. 1307-1314, 2005

2 Fulin Wang, Harunori Yoshida, Hiroaki Kitagawa, Keiji Matsumoto, Kyoko Goto, Model-based Commissioning for Filters of Room Air-conditioner, International Journal of Energy and Buildings, Vol. 37/12, pp. 1225-1233, 2005

3 F. Wang, H. Yoshida, K. Matsumoto: Energy Consumption Estimation for Room Air-conditioners Using Room Temperature Simulation with One-Minute Intervals, Journal of Harbin Institute of Technology, Vol.13, 2006.9, pp. 341-347

4 山下道子, 吉田治典, 王福林, 水気耕栽培屋上緑化を利用した冷房熱源の効率向上に関する研究, (その1) 水気耕栽培屋上緑化の冷却効果の実測および解析, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, 2008.3, pp.161-164, (その2) 冷房熱源の効率向上予測, pp.253-256

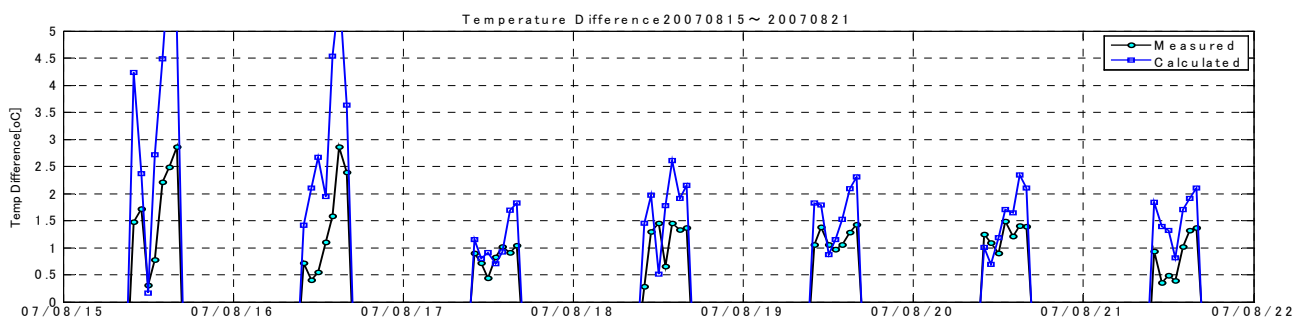


図6 冷却温度の推定値と実測値との比較

Table.1 Energy saving estimation for four cities from August 1st to September 30th

Manufacturer	Group 1		Group 2			Group 3						
	A		E			C		D				
	Energy consumption [kWh]		Energy consumption [kWh]		Energy saving rate	Energy consumption [kWh]		Energy saving rate	Energy consumption [kWh]			
Use	Not Use	Use	Not Use	Use		Not Use	Use		Not Use			
Sapporo	32396.30	32449.91	0.2%	26876.48	28371.19	5.3%	24250.59	26250.85	7.6%	24733.34	26492.37	6.6%
Tokyo	6353.16	6430.23	1.2%	5396.26	5726.88	5.8%	5252.81	5690.67	7.7%	4970.74	5355.23	7.2%
Osaka	10314.08	10438.78	1.2%	9595.27	10211.44	6.0%	8669.72	9465.12	8.4%	9089.36	9880.86	8.0%
Naha	12675.15	12801.64	1.0%	12050.77	12845.89	6.2%	10430.95	11445.15	8.9%	11388.72	12430.08	8.4%