

建物外皮の熱物性とシステムデザイン  
2007年9月6日（木）

# 蒸発特性の実測による評価手法について

ー ヒートアイランド対策としての  
表面被覆対策技術を中心として ー

三坂 育正（株竹中工務店技術研究所）

**S**USTAINABLE  
WORKS

# 1. はじめに

## 1. はじめに

建物緑化や特殊舗装といった対策技術に関しては、シミュレーションにおいて必要なパラメータが不足。特に蒸発特性を示すデータが不足しているのが現状。

### 計算に必要なパラメータ

**緑化技術** : 蒸発効率、日射反射率、含水率  
土壌の熱伝導率、熱容量など

**舗装技術** : 蒸発効率、日射反射率、  
道路材料の熱伝導率、熱容量など

まちに水とみどりを！

TAKENAKA Corporation, R&D institute

## 1. はじめに

建物緑化や特殊舗装によるヒートアイランド緩和効果に関して、熱収支特性や蒸発・蒸散特性を評価した試み

- 1) 屋上緑化技術の蒸発特性の評価（重量法）
- 2) 壁面緑化技術の蒸発特性の評価（SAT計）
- 3) 保水舗装技術の蒸発特性の評価（濾紙法）

対策技術の試験体を製作し、個々の対策技術に適応した実験・評価方法を検討し、熱収支解析や蒸発特性の評価

## 表面熱収支の考え方と蒸発特性指標としての 「蒸発効率」

①熱収支式： $Rn = H + G + IE$

$Rn$ ：正味放射量，  $H$ ,  $IE$ ,  $G$ ：顕熱・潜熱・伝導熱フラックス[W/m<sup>2</sup>]

②放射収支式： $Rn = (1-a)S\downarrow + L\downarrow - \varepsilon\sigma T_s^4$

$a$ ,  $\varepsilon$ ：アルベド、放射率，  $S\downarrow$ ,  $L\downarrow$ ：日射量，大気放射量[W/m<sup>2</sup>]

$\sigma$ ：ステファン-ボルツマン定数，  $T_s$ ：表面温度 [K]

③顕熱フラックス： $H = \alpha \cdot (T_s - T_a)$

$T_s$ ,  $T_a$ ：表面温度[°C]，外気温度 [°C] ，  $\alpha$ ：対流熱伝達率[W/m<sup>2</sup>·K]

④潜熱フラックス： $IE = L \times \beta \cdot k \cdot (x_s - x_a)$

$\beta$ ：蒸発効率，  $L$ ：気化の潜熱[J/kg]

$x_s$ ：表面の絶対湿度[kg/kg']，  $x_a$ ：外気の絶対湿度[kg/kg']，

⑤伝達率のアナロジー： $\alpha/Cp = 0.83 \times k$

$Cp$ ：湿り空気の比熱[J/kg·K]

## 2. 重量法による屋上緑化の熱収支特性の評価

### ◆研究の目的

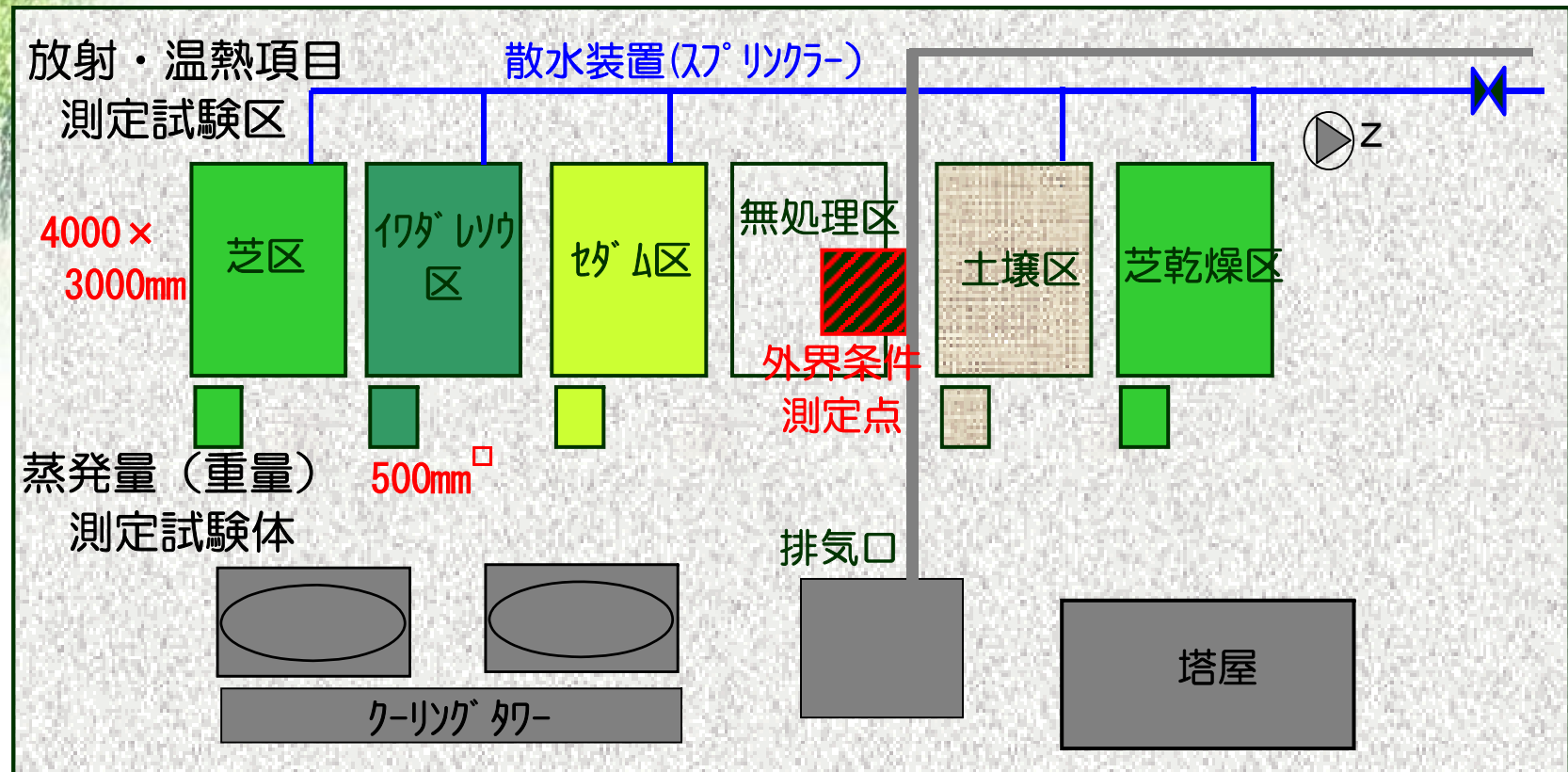
既存建物に適用可能な軽量・薄層型屋上緑化によるヒートアイランド緩和効果を定量的に評価する。

複数の緑化試験体による実験を行い、重量測定により蒸発散量を評価するとともに、熱収支特性や蒸発散特性を明らかにする。

## 2. 重量法による屋上緑化の熱収支特性の評価

### ◆実験概要

東京都江東区の建物上に試験区を設置（2003年7月）



まちに水とみどりを！

TAKENAKA Corporation, R&D institute

## 2. 重量法による屋上緑化の熱収支特性の評価

### ◆測定項目と測定方法・機器

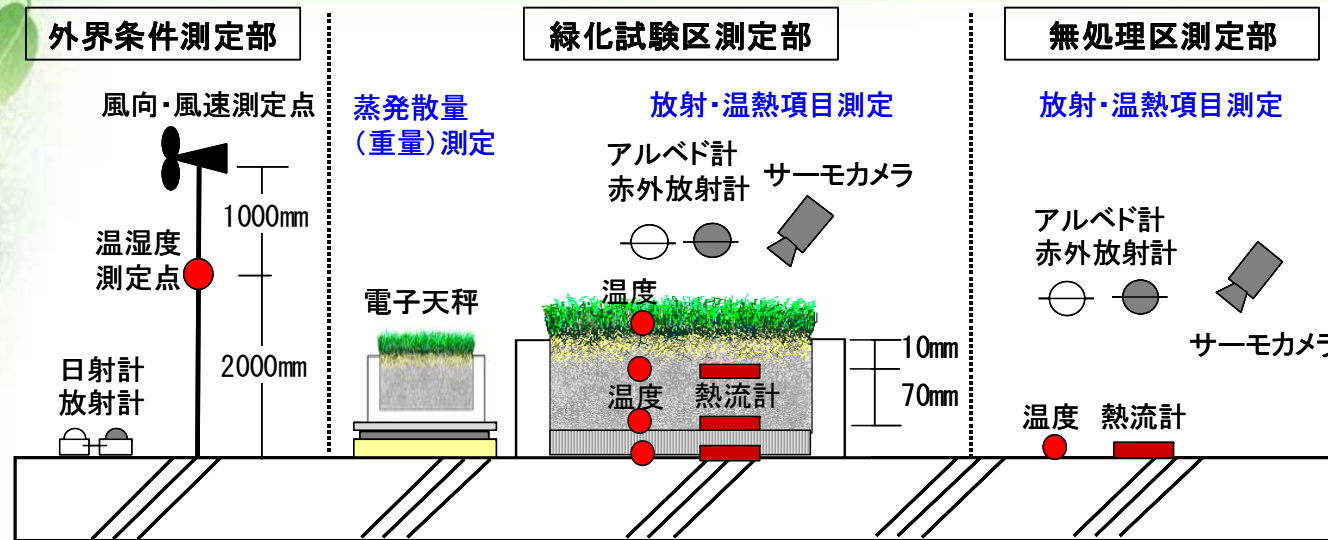
測定種類	測定項目	測定機器		点数	備考
外界条件	気温・湿度	温湿度計	CVS-HMP-45D	1	測定タワーを設置して計測
	風向・風速	風車型風速計	CVG-5103	1	
	日射計(全天日射量)	全天日射計	MS-402	1	
	大気放射(長波放射)	精密赤外放射計	MS-202	1	
	雨量(給水量)	転倒まず式雨量計	COT-34T	1	
蒸発量・含水量	重量	電子天秤	SB32000	1	無処理区除く5試験体
放射特性 温熱環境	アルベド(上下短波放射)	長短波放射計	MR-40	1	6試験区
	放射率(上下長波放射)				6試験区
	放射収支	放射収支計	CPR-Q7	1	6試験区
	表面温度	赤外線熱電対	iR-t/c. SV-T-80F	1	6試験区
			サーモカメラ	TH7102	1
	地中温度	T型熱電対	T-TCC	3	7試験体、土壌上・下部+躯体表面で3点
伝導熱量	熱流計	CPR-PHF-01	3	7試験体、土壌上・下部+躯体表面で3点	
データ収録	データロガー	マイクロガー	C-CR10X		
		データガー	サーモダックEF		

まちに水とみどりを！

TAKENAKA Corporation, R&D institute

## 2. 重量法による屋上緑化の熱収支特性の評価

### ◆測定機器と測定点



### 植栽への散水状況

試験区	8											9																		
	~18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15~	
芝区	■		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
イワダレソウ区	■		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
セダム区	■		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
土壌区	■		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
芝乾燥区	■																													
スラジライト区	■				■	■		■		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

まちに水とみどりを！

TAKENAKA Corporation, R&D institute

■ 手撒きによる散水(5mm)

■ スプリンクラーによる散水(5mm/日)

■ 降雨により散水無し

■ スプリンクラーによる散水(5mm/3日)

## 2. 重量法による屋上緑化の熱収支特性の評価

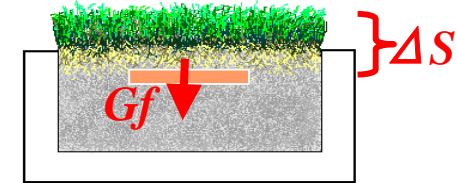
### ◆熱収支各項の算出

1) 正味放射量の算出 長短波放射計（正味放射計）による計測値

2) 伝導熱フラックスの算出

$$G = \Delta S + G_f$$

熱流計計測値  $G_f$ と  
表面蓄熱量  $\Delta S$ より算出



蓄熱量  $\Delta S$  :  $\Delta S = Cp \cdot \rho \cdot d \times \frac{\Delta T}{3600}$

3) 潜熱フラックスの算出

$$lE = l \times E (g / h \cdot m^2)$$

重量の計測から  
蒸発散量  $E$ を算出



4) 顕熱フラックスの算出

$$H = Rn - (lE + G)$$

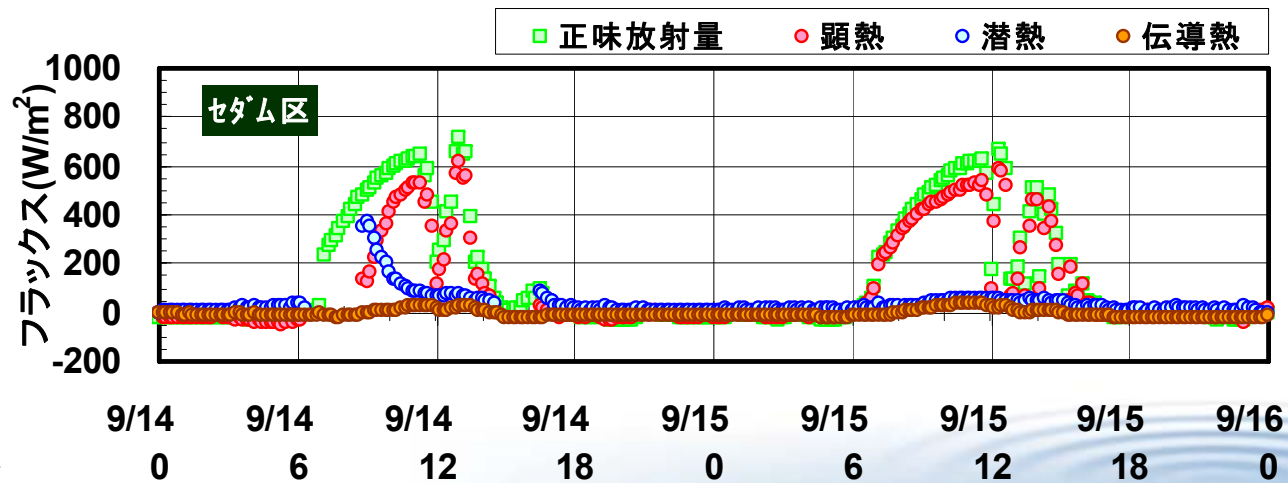
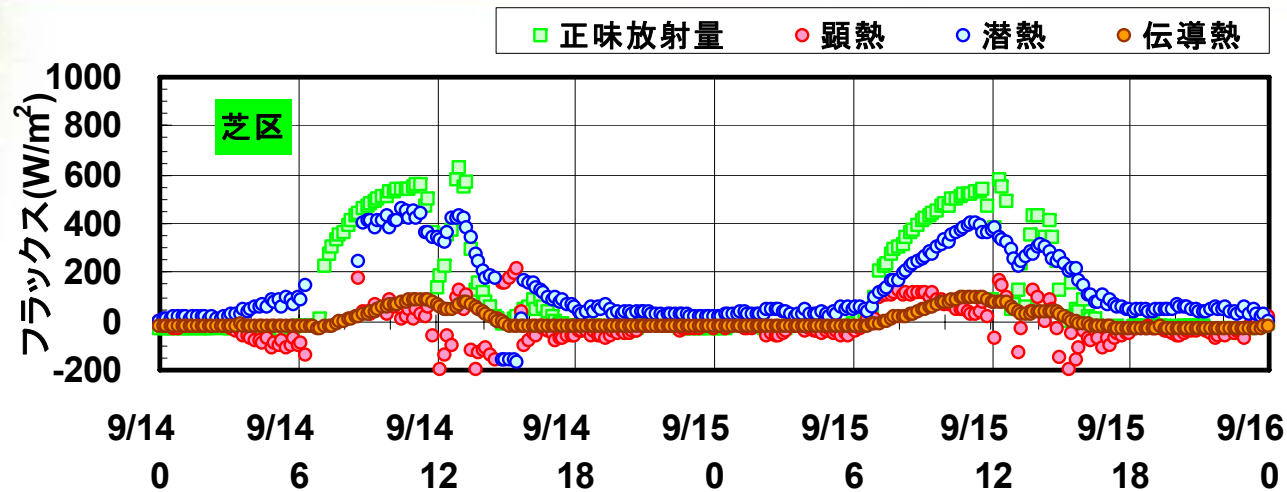
熱収支式の残差から算出

まちに水とみどりを！

TAKENAKA Corporation, R&D institute

## 2. 重量法による屋上緑化の熱収支特性の評価

### ◆熱収支各項の経時変化



まちに水とみどりを！

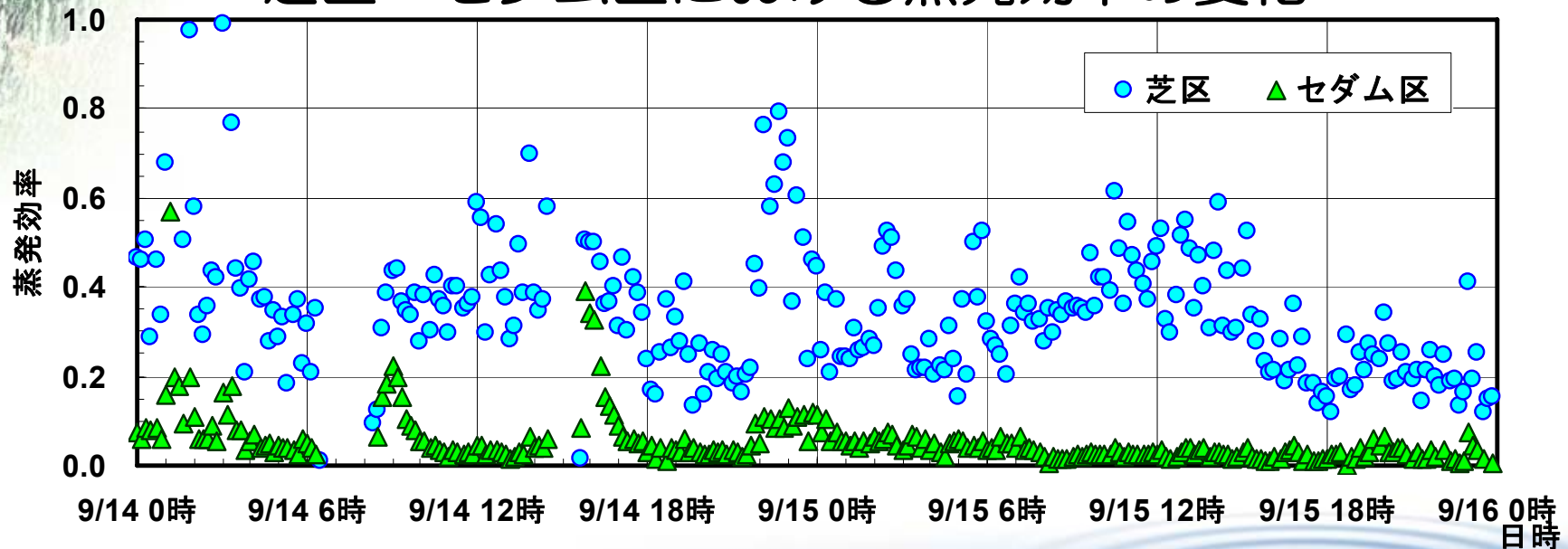
TAKENAKA Corporation, R&D institute

## 2. 重量法による屋上緑化の熱収支特性の評価

### ◆ 対流熱・物質伝達率および蒸発効率の算出

$$\alpha = \frac{\overset{\text{残差}}{H}}{\underset{\text{計測値}}{(T_s - T_a)}} \quad \rightarrow \quad kx = \frac{\alpha}{(C_p \times 0.83)} \quad \rightarrow \quad \beta = \frac{\overset{\text{重量測定から算出}}{E}}{\underset{\text{計測値}}{k \cdot (x_s - x_a)}}$$

### 芝区・セダム区における蒸発効率の変化

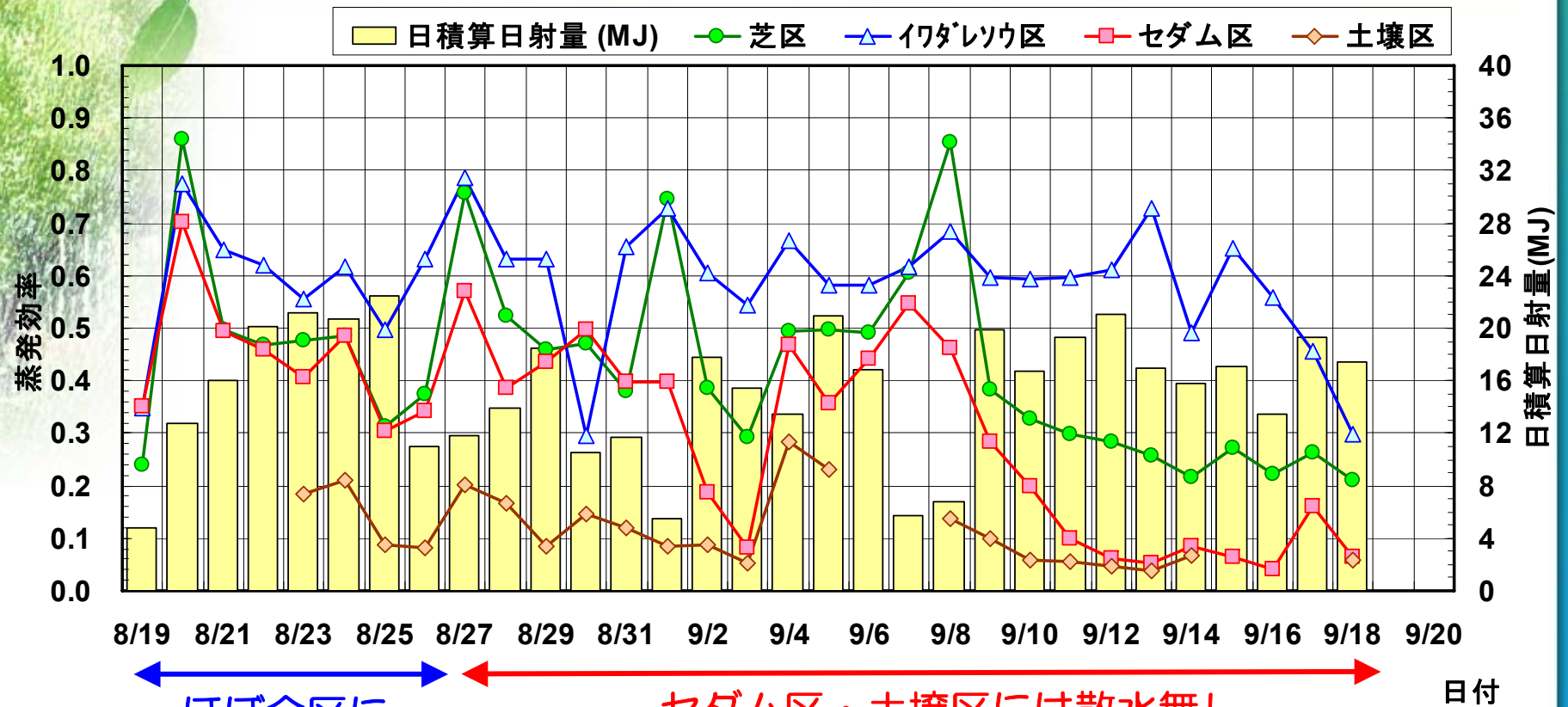


まちに水とみどりを！

TAKENAKA Corporation, R&D institute

## 2. 重量法による屋上緑化の熱収支特性の評価

### ◆ 長期（夏季）における蒸発効率の変化



まさに水とみどりを！  
 TAKENAKA Corporation, R&D institute

## 2. 重量法による屋上緑化の熱収支特性の評価

### ◆まとめ

既存建物に適用可能な軽量・薄層型屋上緑化によるヒートアイランド緩和効果に関する試験体実験から、

- 1) 植物の蒸発散によるヒートアイランド緩和効果が期待できる。
- 2) 緩和効果は植物の種類や散水の条件により違いがあることが確認できた。

◆蒸発効率を指標として、屋上緑化によるヒートアイランド緩和効果の評価が可能と考えられる。

### 3. SAT計を用いた壁面緑化の熱収支特性評価

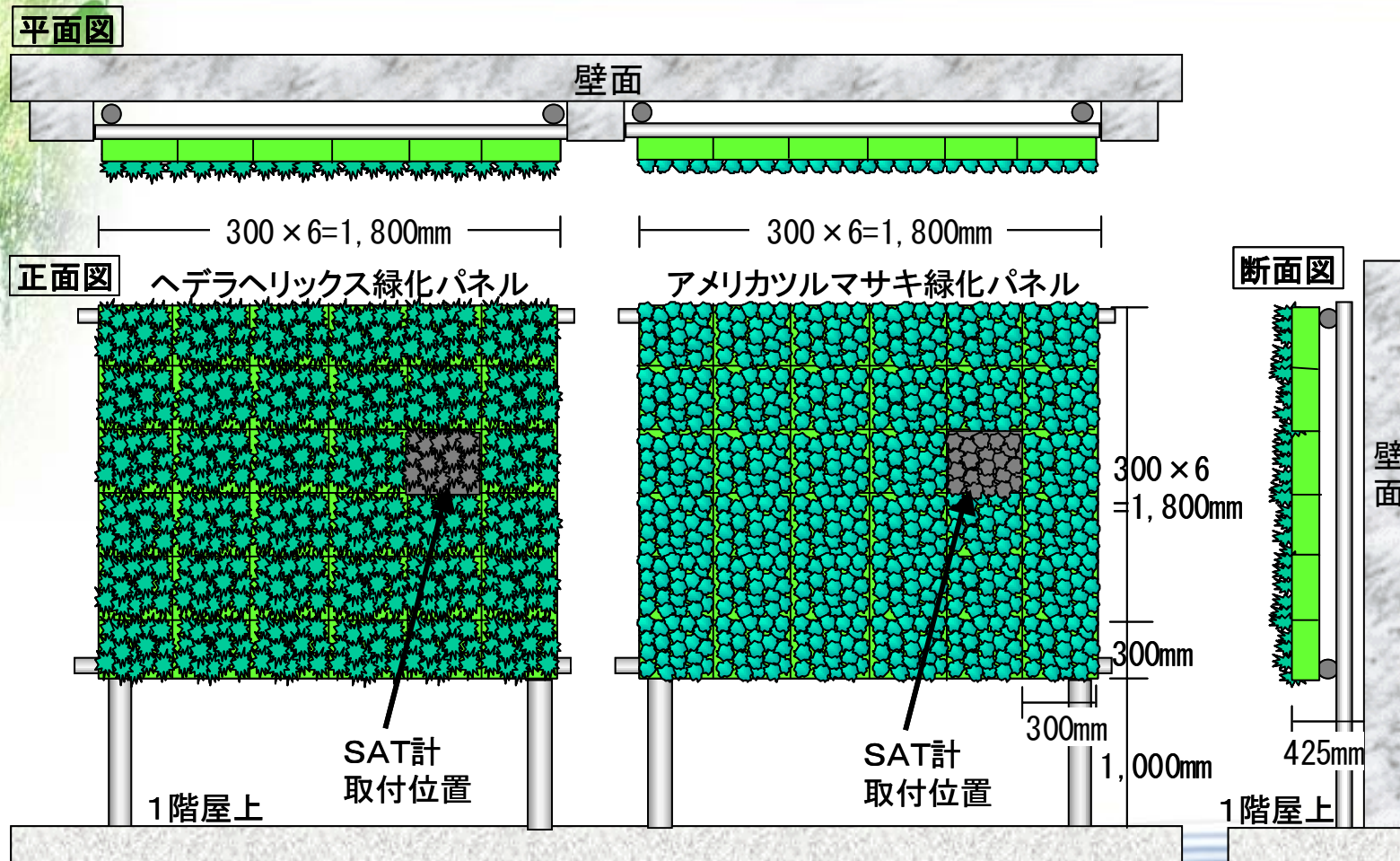
#### ◆研究の目的

壁面緑化によるヒートアイランド緩和効果を定量的に評価する。

緑化パネルによる試験体実験を行い、SAT計による表面の伝達率を算出する手法から、緑化の熱収支特性や蒸発散特性を明らかにする。

### 3. SAT計を用いた壁面緑化の熱収支特性評価

#### ◆ 壁面パネル試験体の概要（2005年8月設置）



まちに水とみどりを！

TAKENAKA Corporation, R&D institute

### 3. SAT計を用いた壁面緑化の熱収支特性評価

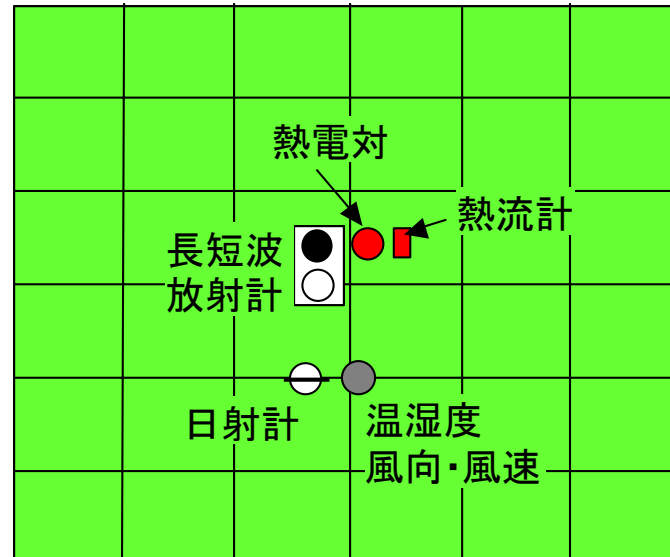
#### ◆測定項目と測定方法・機器

正面図

コンクリート  
壁面

長短波  
放射計  
熱電対  
熱流計

緑化パネル(×2体)



2,000mm

1階屋上

断面図

壁面

熱電対  
長短波  
放射計  
熱流計

日射計  
温湿度  
風向・風速

500mm

1,500mm

4,500mm

1階屋上

まちに水とみどりを！

TAKENAKA Corporation, R&D institute

### 3. SAT計を用いた壁面緑化の熱収支特性評価

#### ◆測定項目と測定方法・機器

測定種類	測定項目	測定機器		点数
外界条件	気温・湿度	温湿度計	VAISALA:HMP35D	1
	風向・風速	超音波風速計	栄弘精機:MA-130	1
	日射量	日射計	プリード:PCR-02	1
放射特性 温熱環境	入射・反射短波放射量	長短波放射計	英弘精機:MR-50	2×3
	入射・反射長波放射量			
	表面温度・地中温度	T型熱電対	T-TCC	3×3
	伝導熱量	熱流計	英弘精機:MF-9L	3×3
蒸発散量	重量(スポット)	電子天秤	A&D:GP-40K	2
SAT計実験	近傍風速	超音波風速計	DA600-3TV	1
	表面温度	T型熱電対	T-TCC	5

#### 測定期間中の散水および降雨量

	8月																															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
散水	◎			◎				◎				◎					◎					◎										
降雨量 (mm)								74		3		21	19		32											32	28					

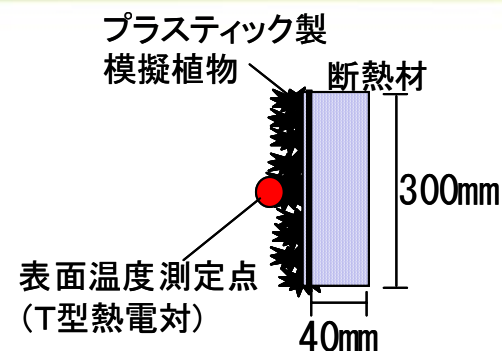
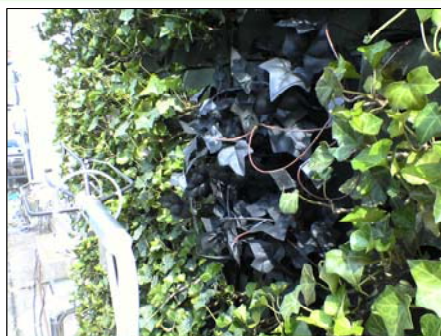
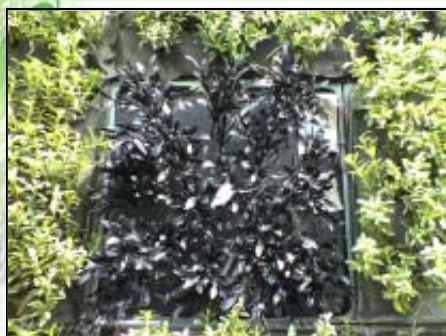
まちに水とみどりを！

TAKENAKA Corporation, R&D institute

◎ 自動灌水装置による散水(5mm)

### 3. SAT計を用いた壁面緑化の熱収支特性評価

#### ◆SAT計の測定概要と測定項目・測定点



#### SAT計による伝達率の算出方法

熱収支式  $R_n = H + LE + G$

放射収支式  $R_n = (1-a) \times S + L \downarrow - \varepsilon \sigma T_s^4$

SAT計では  $LE = G = 0$ 、表面が黒色のため  $a = \varepsilon = 1.0$  とすることで、顕熱フラックスが次式で得られる。

$H = R_n = S + L \downarrow - \sigma T_s^4$

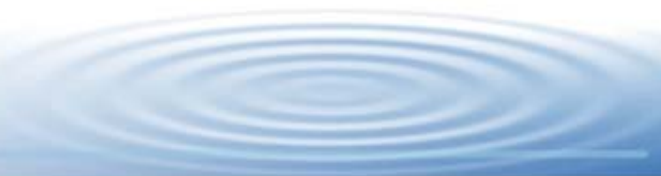
$$\alpha = \frac{H}{(T_s - T_a)}$$



$$k = \frac{\alpha}{(C_p \times 0.83)}$$

まさに水とみどりを！

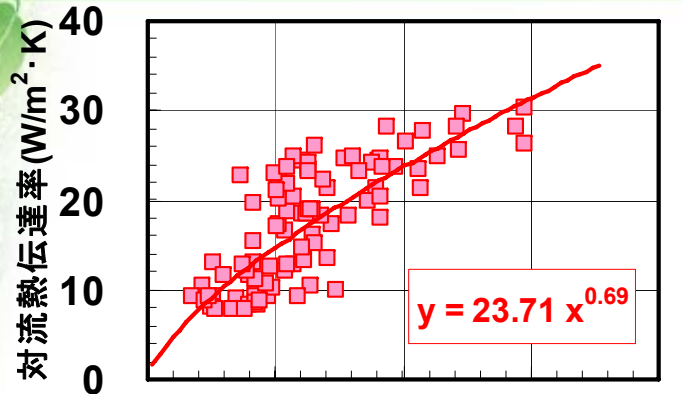
TAKENAKA Corporation, R&D institute



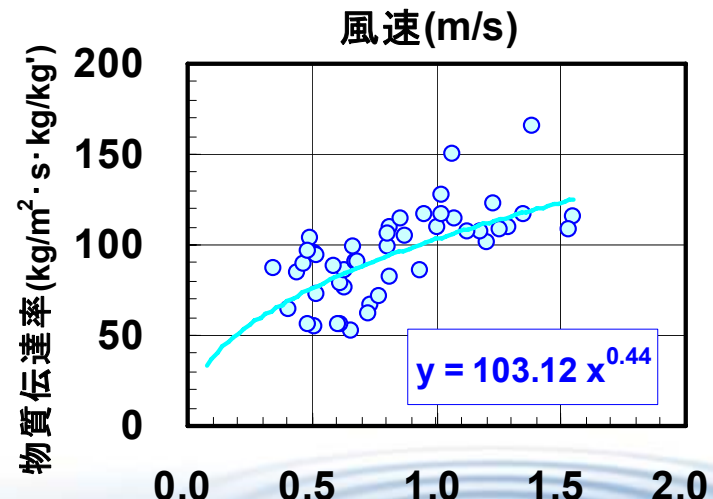
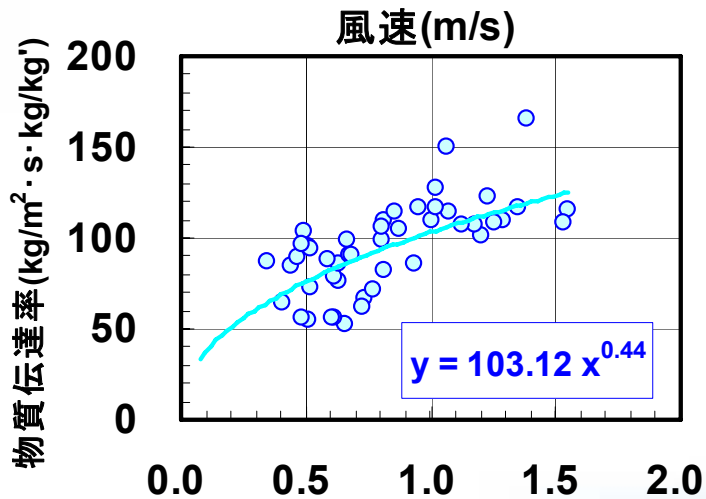
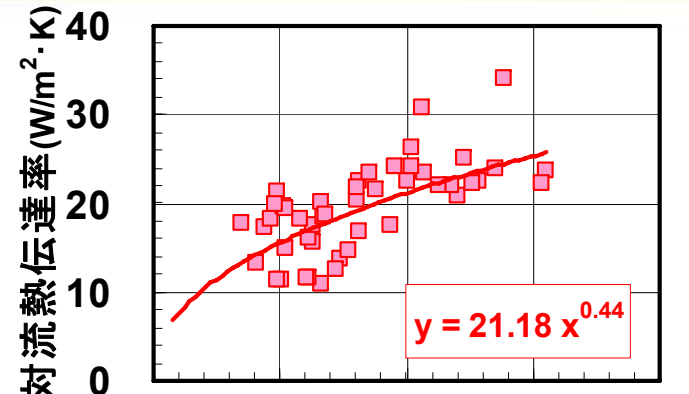
### 3. SAT計を用いた壁面緑化の熱収支特性評価

#### ◆ 風速と伝達率の関係

ヘデラヘリックス



アメリカツルマサキ



まちに水とみどりを！

TAKENAKA Corporation, R&D institute

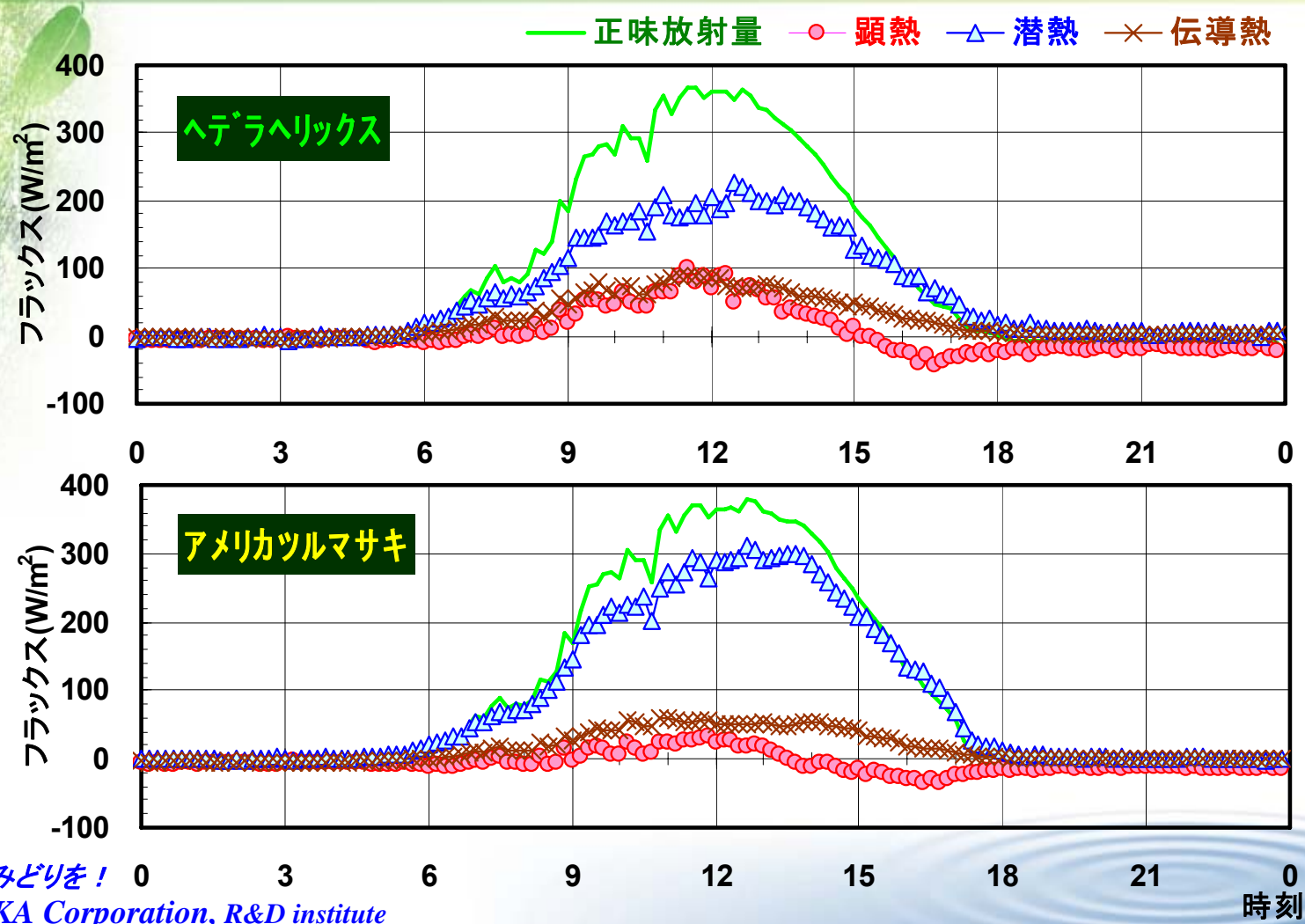
風速 (m/s)

風速 (m/s)

### 3. SAT計を用いた壁面緑化の熱収支特性評価

#### ◆熱収支の経時変化（8月21日）

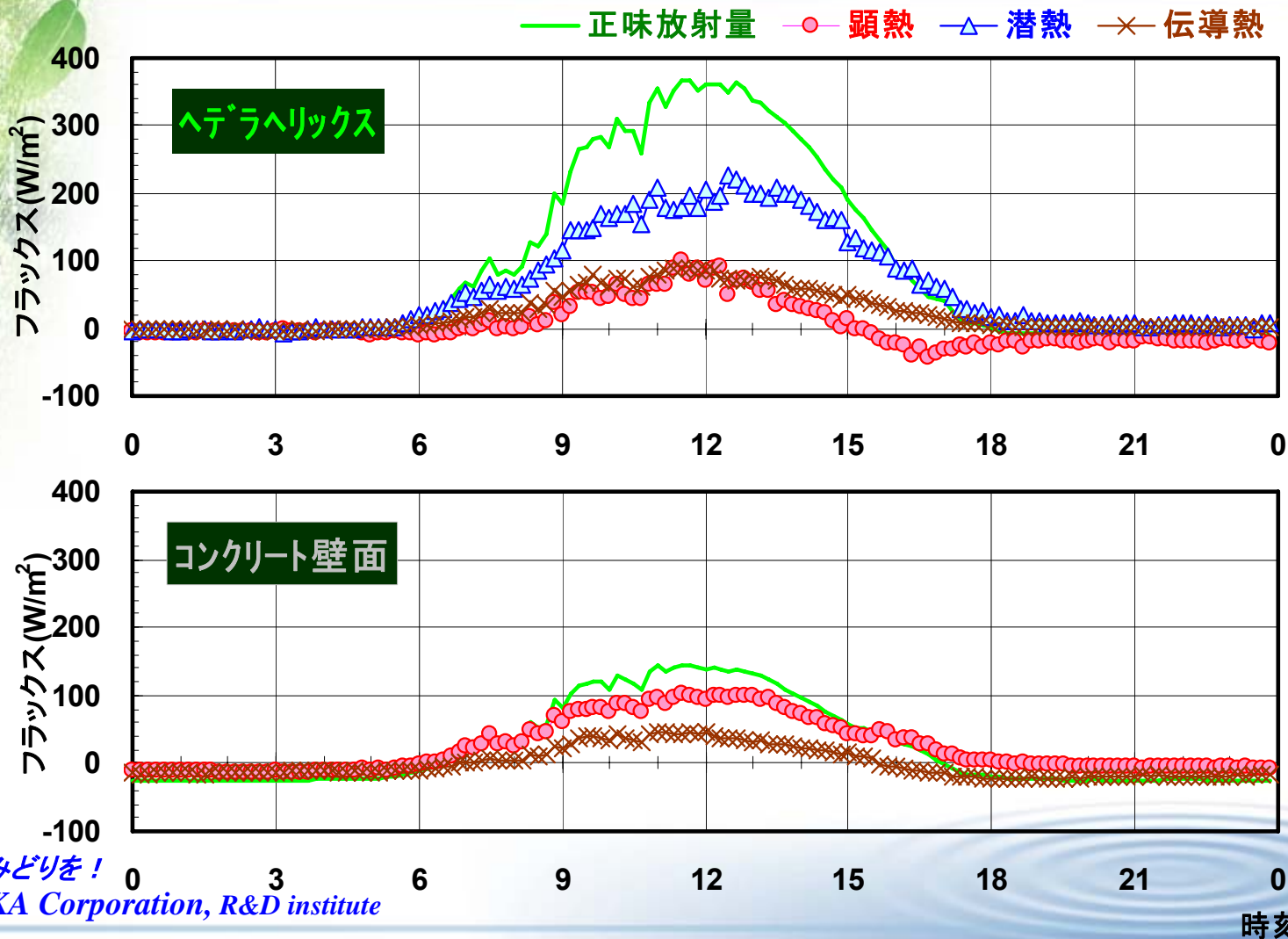
正味放射・伝導：計測値  
 顕熱フラックス： $\alpha \times (T_s - T_a)$   
 潜熱フラックス： $R_n - H - G$



### 3. SAT計を用いた壁面緑化の熱収支特性評価

#### ◆熱収支の経時変化（8月21日）

正味放射・伝導：計測値  
 顕熱フラックス： $\alpha \times (T_s - T_a)$   
 潜熱フラックス： $R_n - H - G$



まちに水とみどりを！  
 TAKENAKA Corporation, R&D institute

時刻

### 3. SAT計を用いた壁面緑化の熱収支特性評価

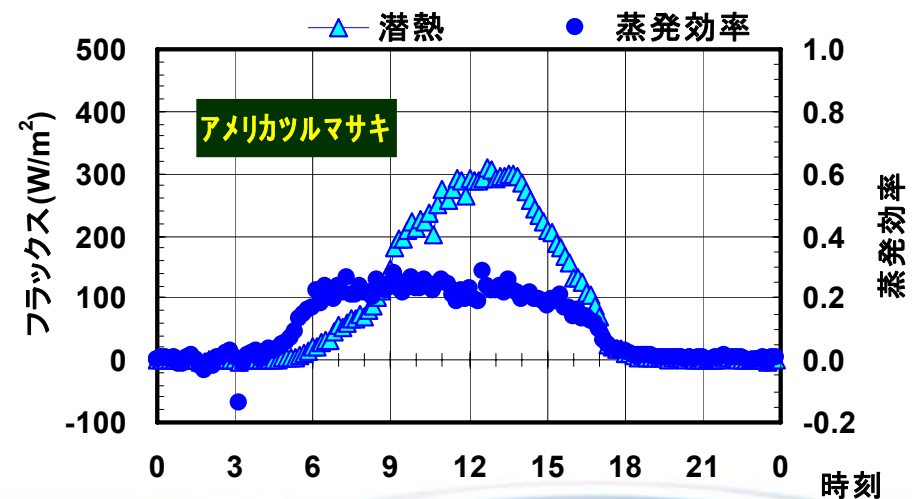
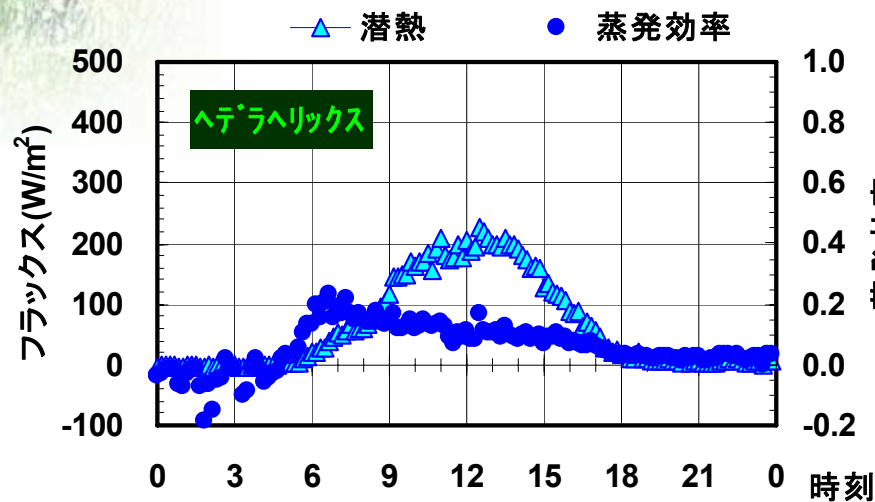
#### ◆ 蒸発効率の算出

$$\beta = \frac{E}{k \cdot (x_s - x_a)}$$

熱収支式の残差で得られた潜熱より算出した蒸発速度

SAT計による物質伝達率から算出

#### 潜熱フラックスと蒸発効率の経時変化（8月21日）

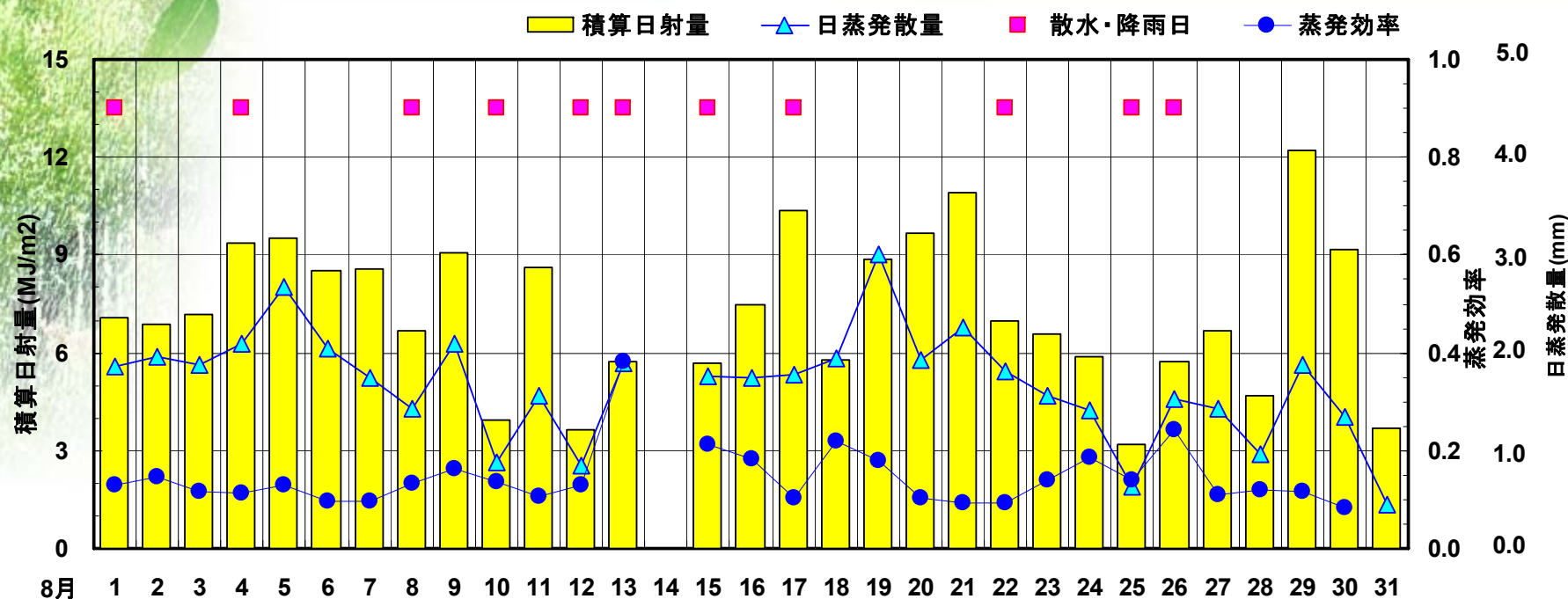


まちに水とみどりを！

TAKENAKA Corporation, R&D institute

### 3. SAT計を用いた壁面緑化の熱収支特性評価

#### ◆日積算日射量と日蒸発散量、蒸発効率：ヘデラヘリックス



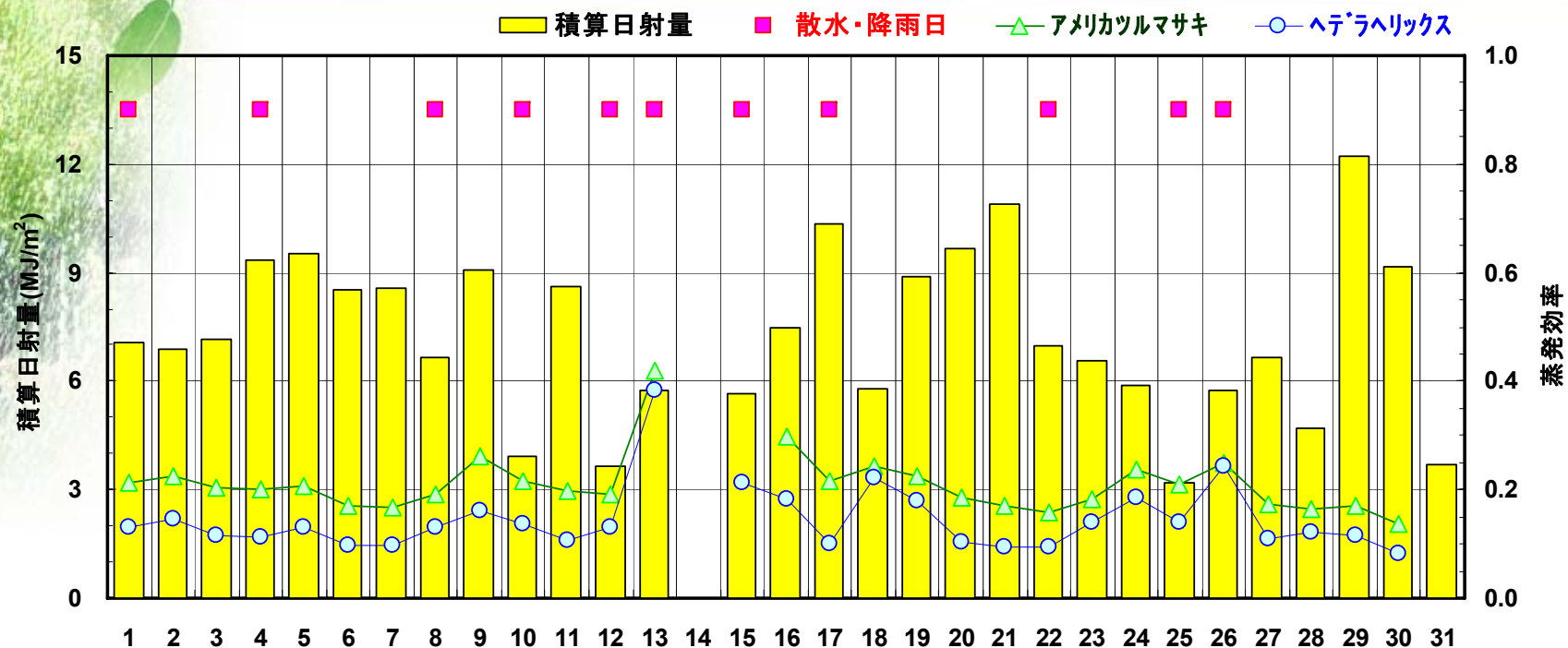
- ◆日蒸発散量は2mm程度、蒸発効率の平均は0.15
- ◆日蒸発散量は日射量との対応が良い。
- ◆蒸発効率は降雨・散水後に高くなる傾向が見られる。

まさに水とみどりを！

TAKENAKA Corporation, R&D institute

### 3. SAT計を用いた壁面緑化の熱収支特性評価

#### ◆日積算日射量と蒸発効率



◆蒸発効率は、アメリカツルマサキで0.20，ヘデラヘリックスで0.15程度でほぼ安定して推移している。

◆蒸発効率は降雨・散水後に高くなる傾向が見られる。

まちに水とみどりを！

TAKENAKA Corporation, R&D institute

### 3. SAT計を用いた壁面緑化の熱収支特性評価

#### ◆まとめ

- 壁面緑化によるヒートアイランド緩和に関して、SAT計による表面伝達率の評価を行うことにより、熱収支特性や蒸発散特性の指標である蒸発効率を算出することができた。
- パネル型壁面緑化の蒸発効率は0.15~0.20程度で、植物種類（植物の状態？）による差異が見られた。散水や降雨の影響により変化する傾向も見られた。
- 壁面緑化のヒートアイランド緩和効果についても、蒸発効率を指標として評価が可能と考えられる。

まちに水とみどりを！

TAKENAKA Corporation, R&D institute

## 4. 保水舗装の効果評価

### ◆研究の目的

蒸発効果により路面温度上昇を抑制する保水性舗装技術。  
しかしながら・・・性能や効果に関する評価が不十分

保水性舗装による効果を定量的に評価できる手法の確立

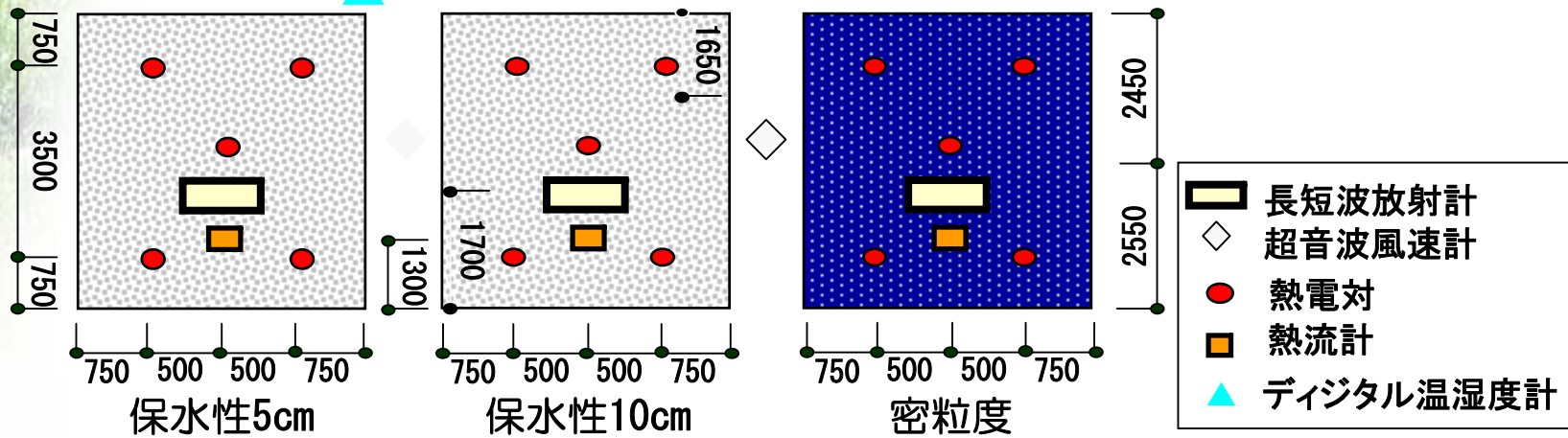
- 蒸発効果を直接表す「蒸発効率」を指標にした評価
- 効果の持続性を施工現場で確認できる評価手法

# 4. 保水舗装の効果評価

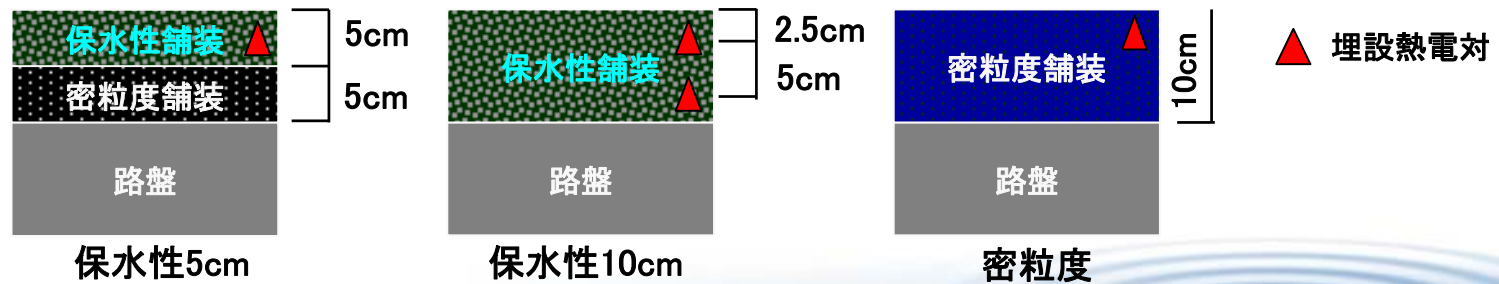
## ◆ 試験体と測定の概要 (2003年8月設置)

計測場所の平面図

事務所



各試験体の断面図



まさに水とみどりを!

TAKENAKA Corporation, R&D institute



## 4. 保水舗装の効果評価

### ◆評価方法：熱収支各項の算出

$$k = E / \Delta x$$

E：蒸発速度 [kg/m<sup>2</sup>・s]：濾紙の重量変化より

Δx：表面と大気の絶対湿度の差 [kg/kg']

$$\alpha / C_p = 0.83 \cdot k$$

C<sub>p</sub>：湿り空気の比熱 [J/kg・K]

$$H = \alpha \cdot (T_s - T_a)$$

H：顕熱輸送量 [W/m<sup>2</sup>]

T<sub>s</sub>, T<sub>a</sub>：表面, 外気温度 [°C]

$$\overset{\text{実測}}{Rn} = \overset{\text{計算}}{H} + \overset{\text{実測}}{G} + \overset{\text{残差}}{LE}$$

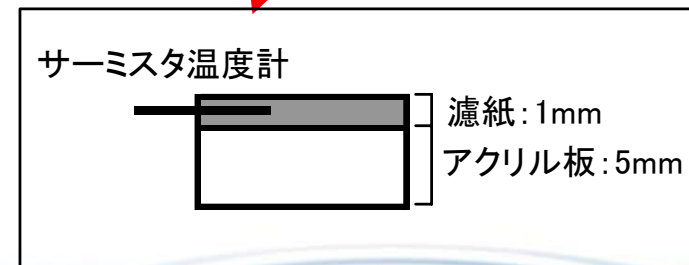
$$E = \beta \times k(x_s - x_a)$$

x<sub>s</sub>：表面の絶対湿度[kg/kg']

濾紙を用いた物質伝達率の測定



ろ紙試料の断面



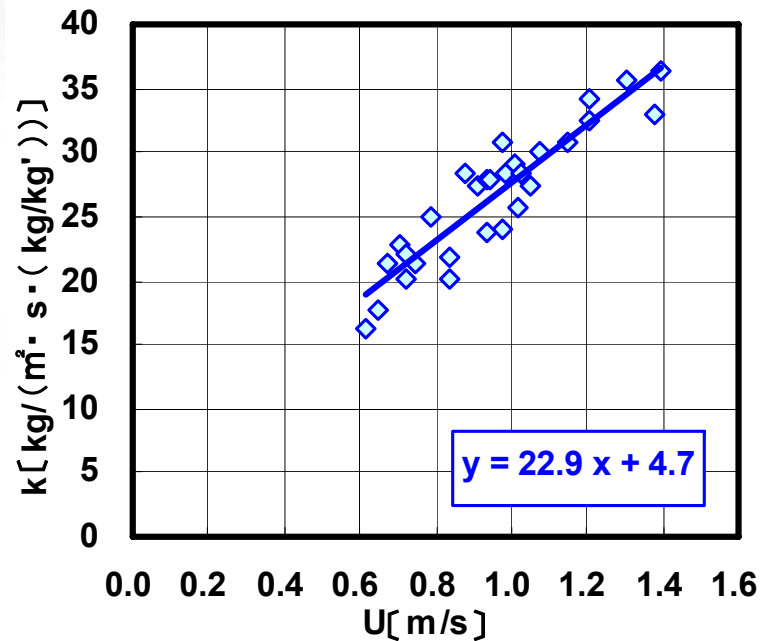
まちに水とみどりを！

TAKENAKA Corporation, R&D institute

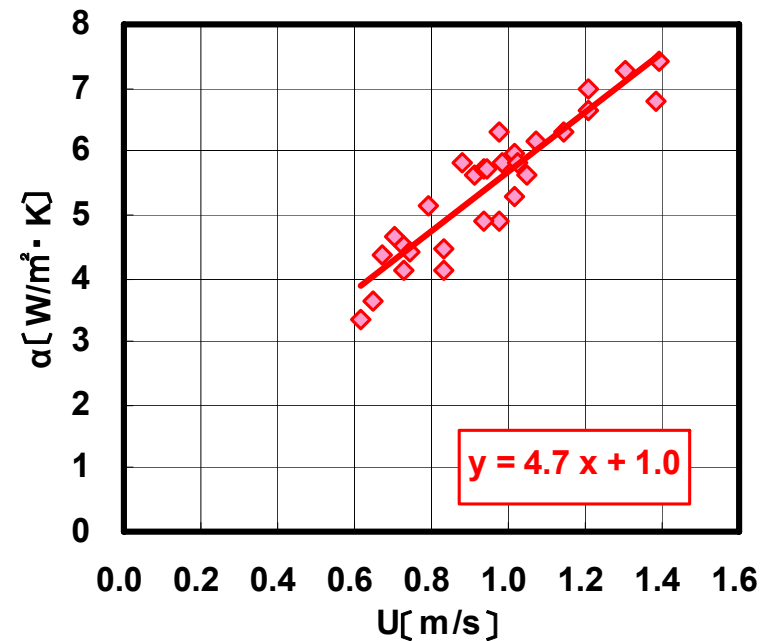
## 4. 保水舗装の効果評価

### ◆ 濾紙面における物質伝達率、対流熱伝達率と風速の関係

物質伝達率と風速の関係



対流熱伝達率と風速の関係



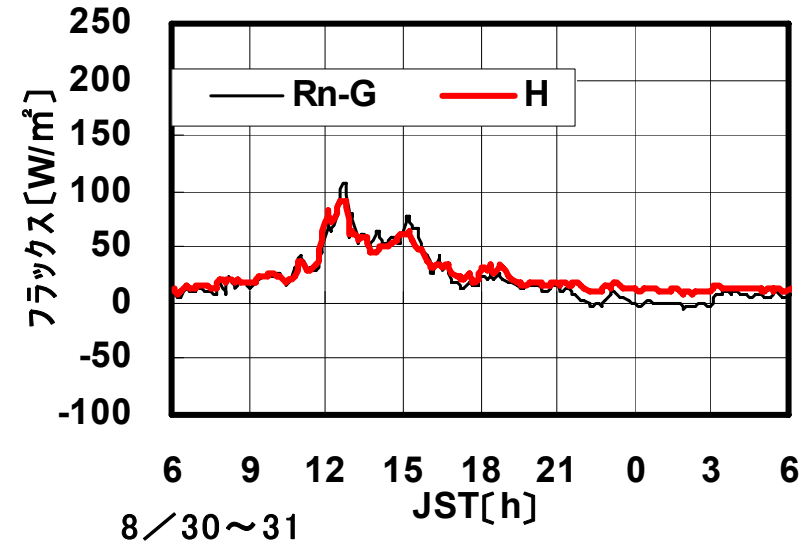
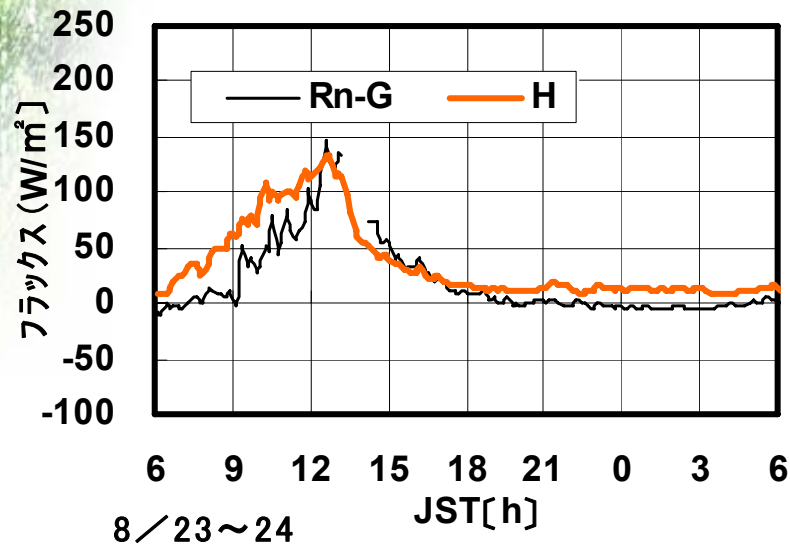
まちに水とみどりを！

TAKENAKA Corporation, R&D institute

## 4. 保水舗装の効果評価

### ◆ 評価方法の検証

Rn-G とH の関係（密粒度舗装、散水無し）



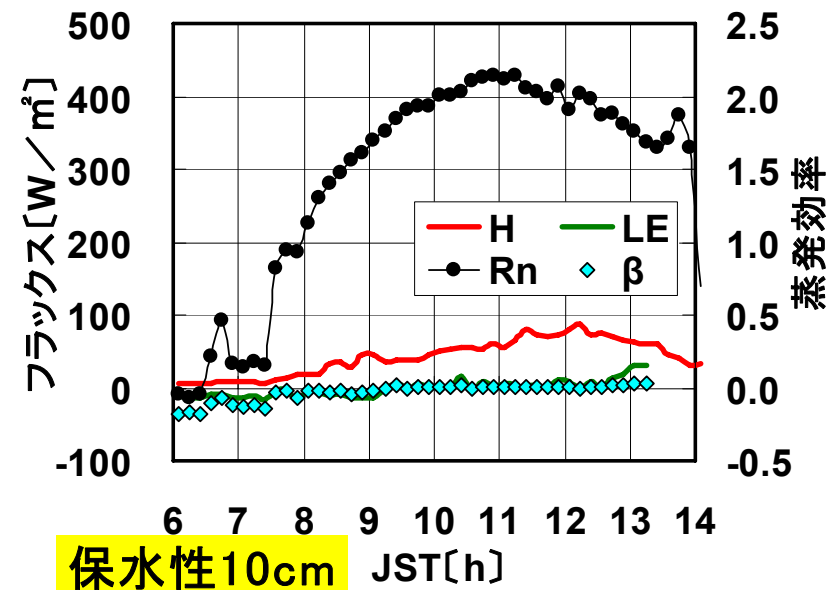
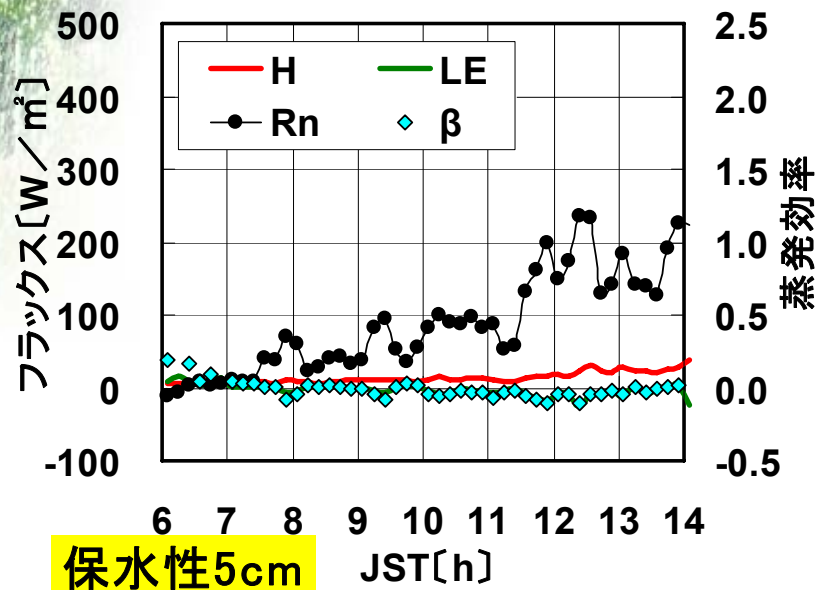
まちに水とみどりを！

TAKENAKA Corporation, R&D institute

## 4. 保水舗装の効果評価

### ◆ 評価方法の検証

○ 散水を実施しない日における保水性舗装の熱収支と蒸発効率



まちに水とみどりを！

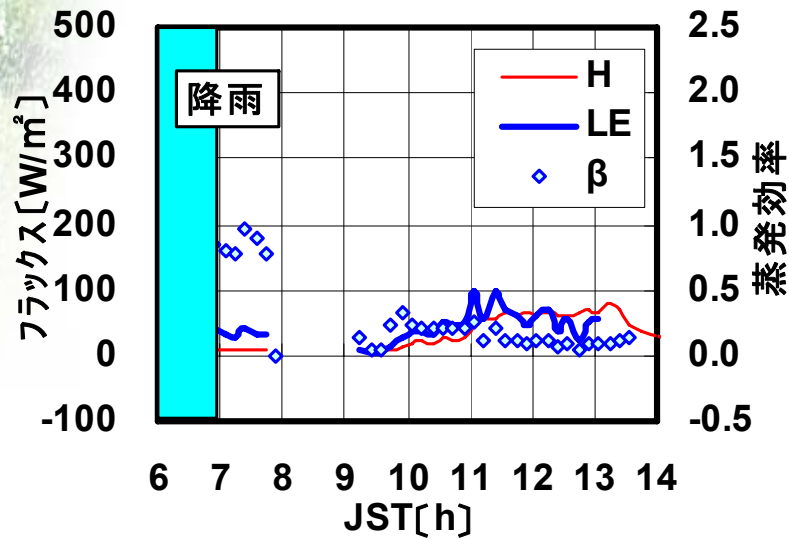
TAKENAKA Corporation, R&D institute



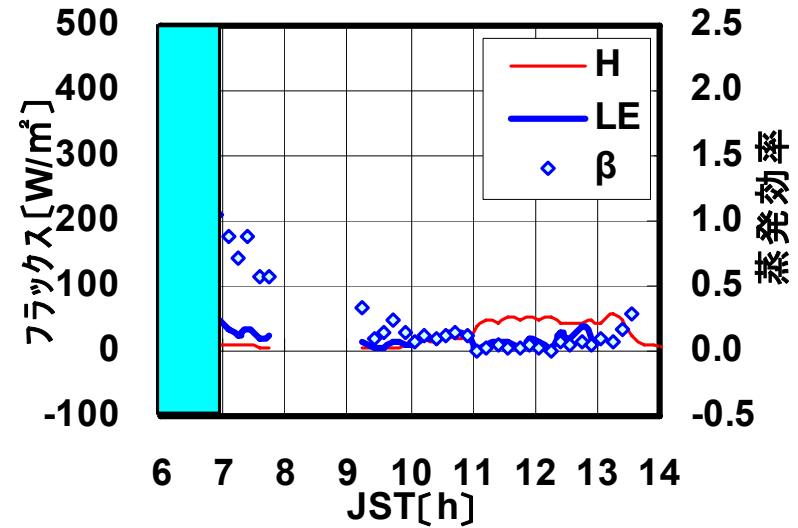
## 4. 保水舗装の効果評価

### ◆ 蒸発効果の変化：降雨日

保水性10cm



保水性5cm



まちに水とみどりを！

TAKENAKA Corporation, R&D institute

## 4. 保水舗装の効果評価

### ◆まとめ

保水性舗装によるヒートアイランド緩和に関して、  
効果の持続性を施工現場で確認できる評価法として、  
「蒸発効率」を指標とする性能・効果の評価手法を  
確立した。

## ■ 発表のまとめ

- ヒートアイランド対策として推進される建物緑化や保水性舗装といった技術の効果として、「蒸発効率」を指標とした評価が可能と考えられる。
- 蒸発効率の算出には、それぞれの対策技術に対応した手法を用いて行う必要がある。
- 対策技術の蒸発特性に関するデータの充実と、効果に応じたラインナップや支援策が求められる。

今回の報告内容は、東京都環境科学研究所、日本工業大学、建築研究所と共同で実施したものである。

まちに水とみどりを！

TAKENAKA Corporation, R&D institute