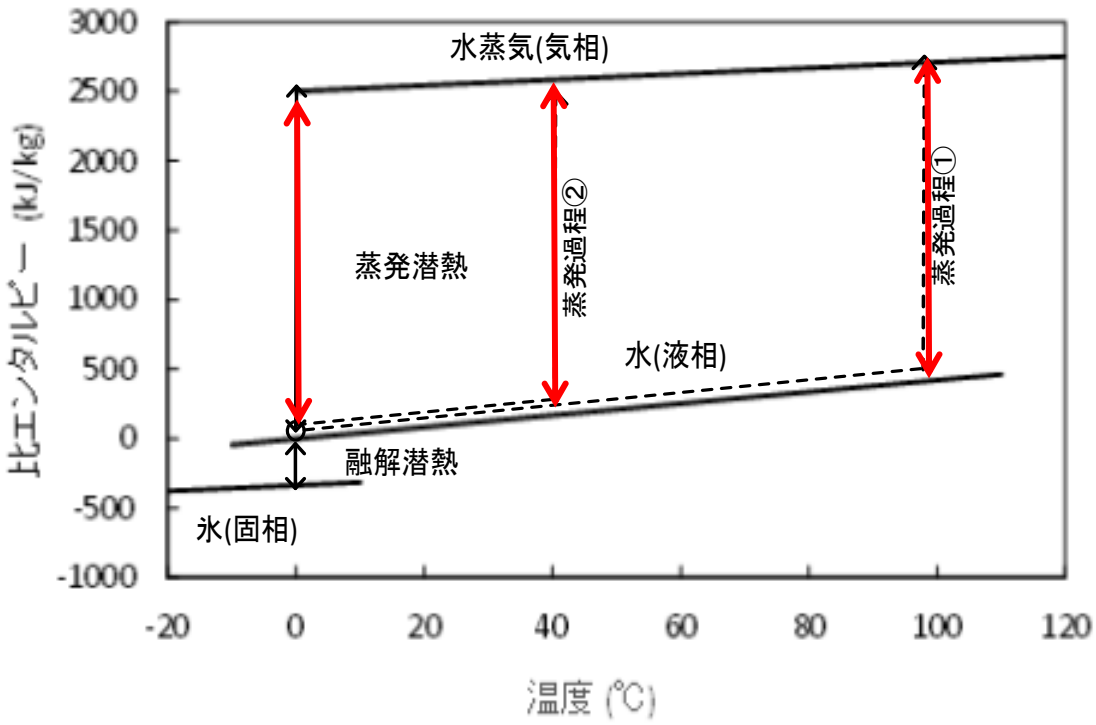
蒸発冷却を用いた
ヒートアイランド対策技術

大阪市立大学 大学院工学研究科　西岡　真稔

水分蒸発現象の基礎

水分蒸発と熱との関わり

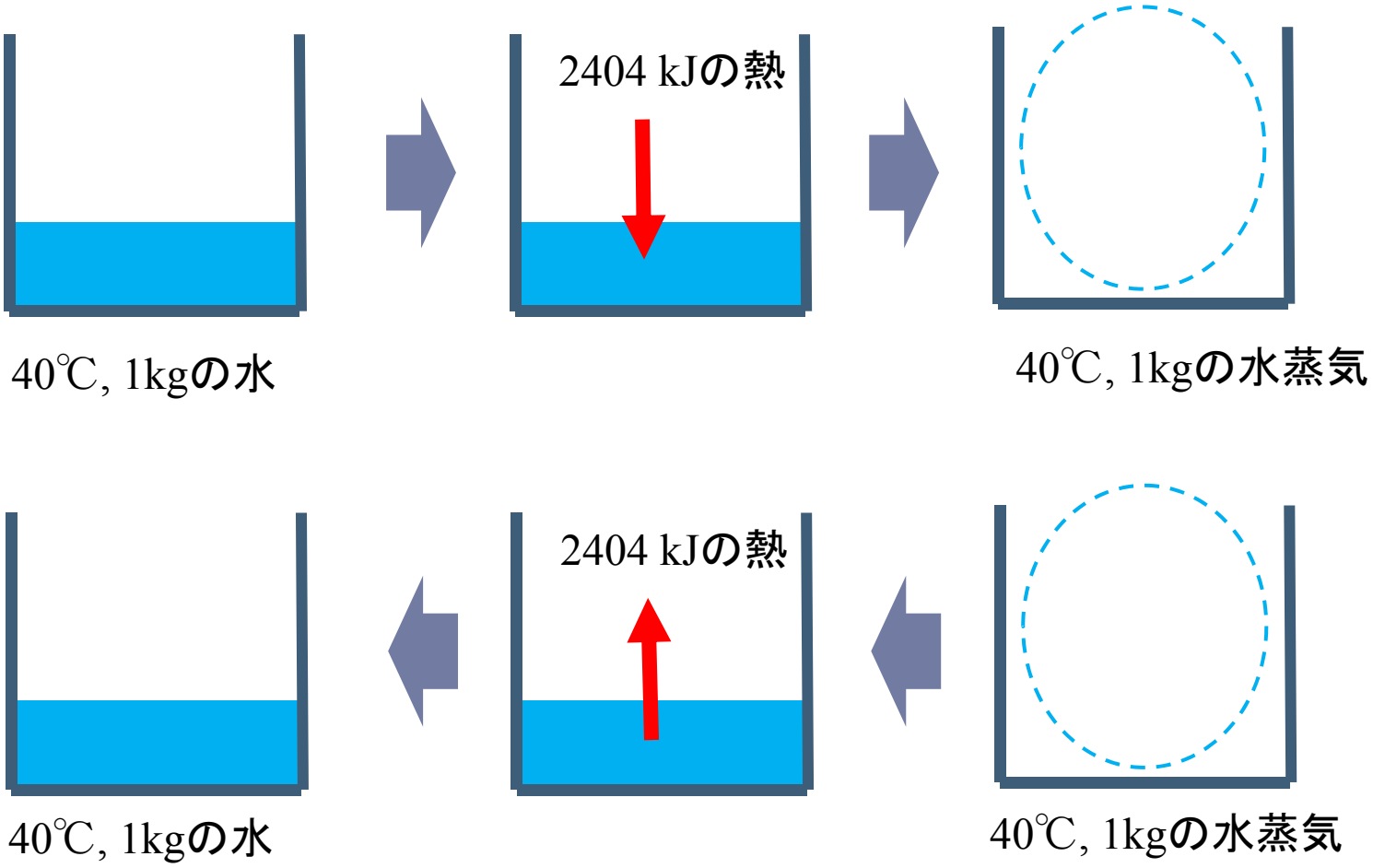


水の3相と比エンタルピー

蒸発
　水（液相）から水蒸気（気相）への状態変化

同じ温度の水から水蒸気への変化

0℃	2.498 kJ/g
40℃	2.404kJ/g
100℃	2.254 kJ/g

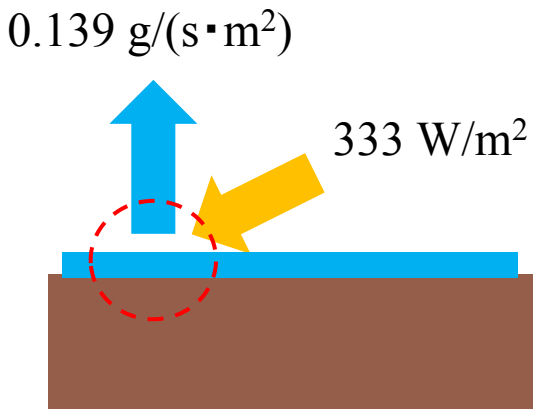

2404 kJの熱
40℃, 1kgの水
40℃, 1kgの水蒸気
2404 kJの熱
40℃, 1kgの水
40℃, 1kgの水蒸気

水(液体)が水蒸気に変わるときに必要な熱量

例えば　日中（6時間）に1㎡あたり　3kg　の蒸発が
あるとする

$$\frac{3000\ (\mathrm{g})}{6 \times 3600\ (\mathrm{s})} = 0.139 \qquad \mathrm{g/s}$$

$$0.139(\mathrm{g/s}) \times 2.404(\mathrm{kJ/g}) = 0.333 \qquad \mathrm{kJ/s}$$



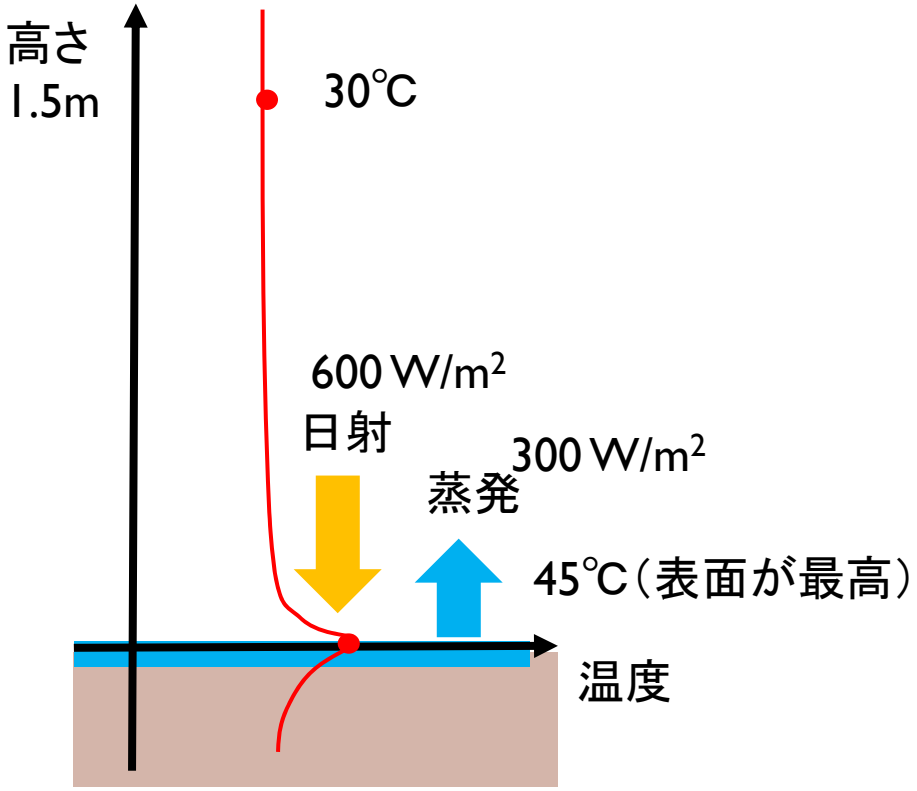
液体から水蒸気に変化する際に必要な熱量

333 J/s

≡ 333 W

夏の日射の最大値(1m^{2}あたり)
1000 W

蒸発に必要な熱はどこから得られるか？



夏季日中の晴天日の温度分布

- 日射の一部が蒸発に作用する
- 表面温度上昇に作用する日射は減少する
  表面温度低下

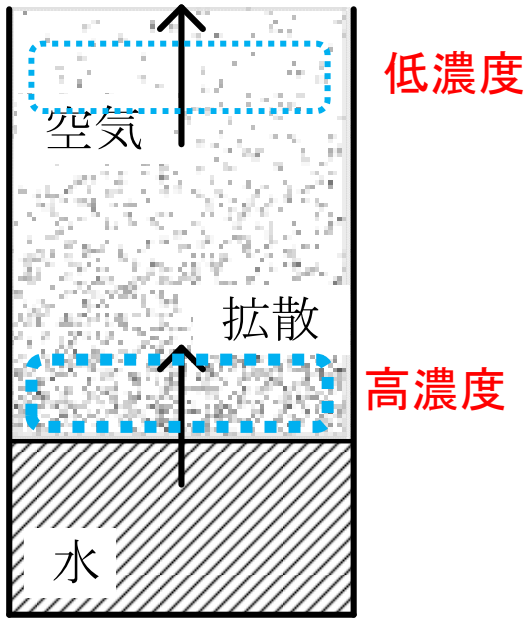
「蒸発冷却」というより、「蒸発による温度上昇抑制」という方が実態に合う

蒸発速度の大・小に関わる要因

蒸発速度:
単位面積(1m^2)において、単位時間(1 s) あたりに蒸発する水分質量
1 g/(s･m^2)

コップの水の蒸発

- コップの底の水分が、水蒸気として上部の空気に移動する現象
- 水付近の空気（水蒸気が高濃度）から上部空気（水蒸気が低濃度）へ移動する
- 水蒸気の拡散:
  水に垂らしたインクが、水中で広がり薄くなっていく現象と同じ



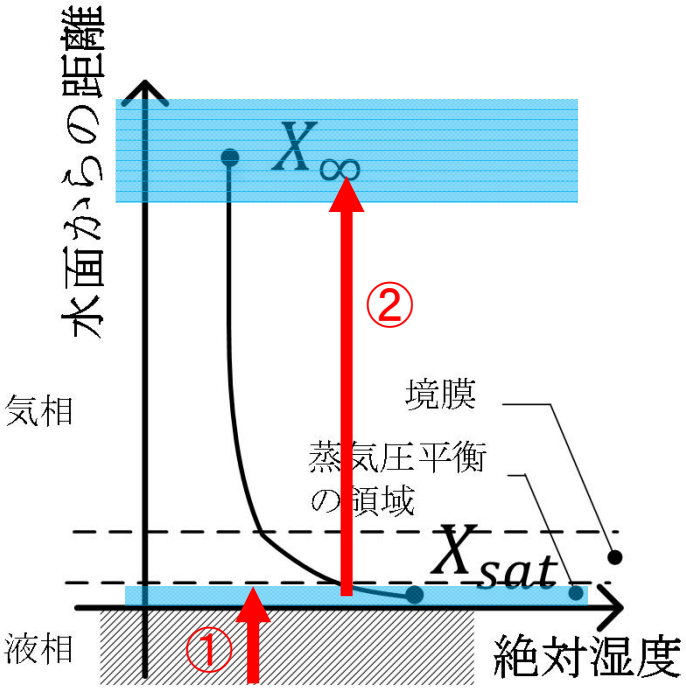
絶対湿度（水蒸気濃度の指標）

水蒸気を含む空気
$1 + X$ kg

乾燥空気 1 kg

水蒸気 X kg

この状態の空気
絶対湿度 X kg/kgDA

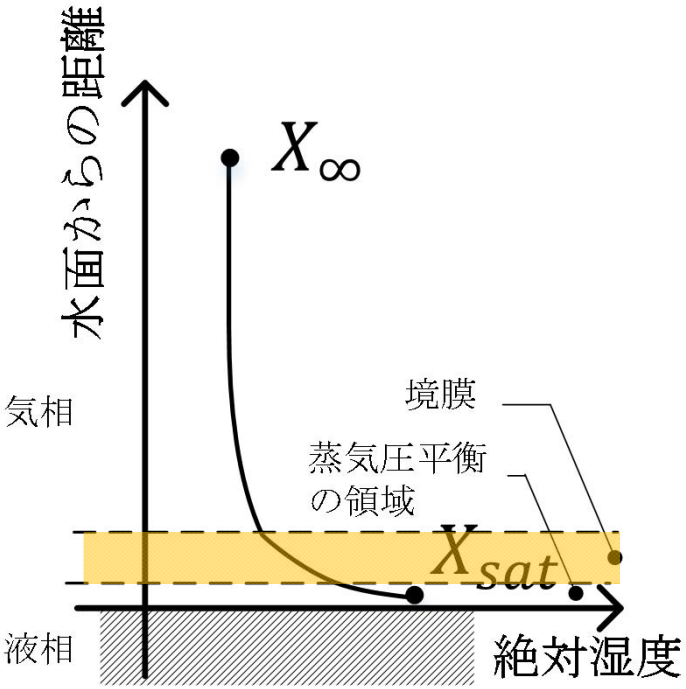


水面から離れた空気の絶対湿度
飽和時の20%～80%
（相対湿度　20%～80%）

水面のごく近傍
飽和絶対湿度
（空気の含むことのできる最大水分量）

蒸発では、①②が連続的に起こる
①水（液体）　→　水面近傍への水分移動
②水面近傍　→　上部への水分移動

蒸発速度と濃度差（湿度差）との関係



蒸発速度は、濃度差（湿度差）に比例する

$$E = k_w(X_{sat} - X_\infty)$$

蒸発速度　比例係数　濃度差

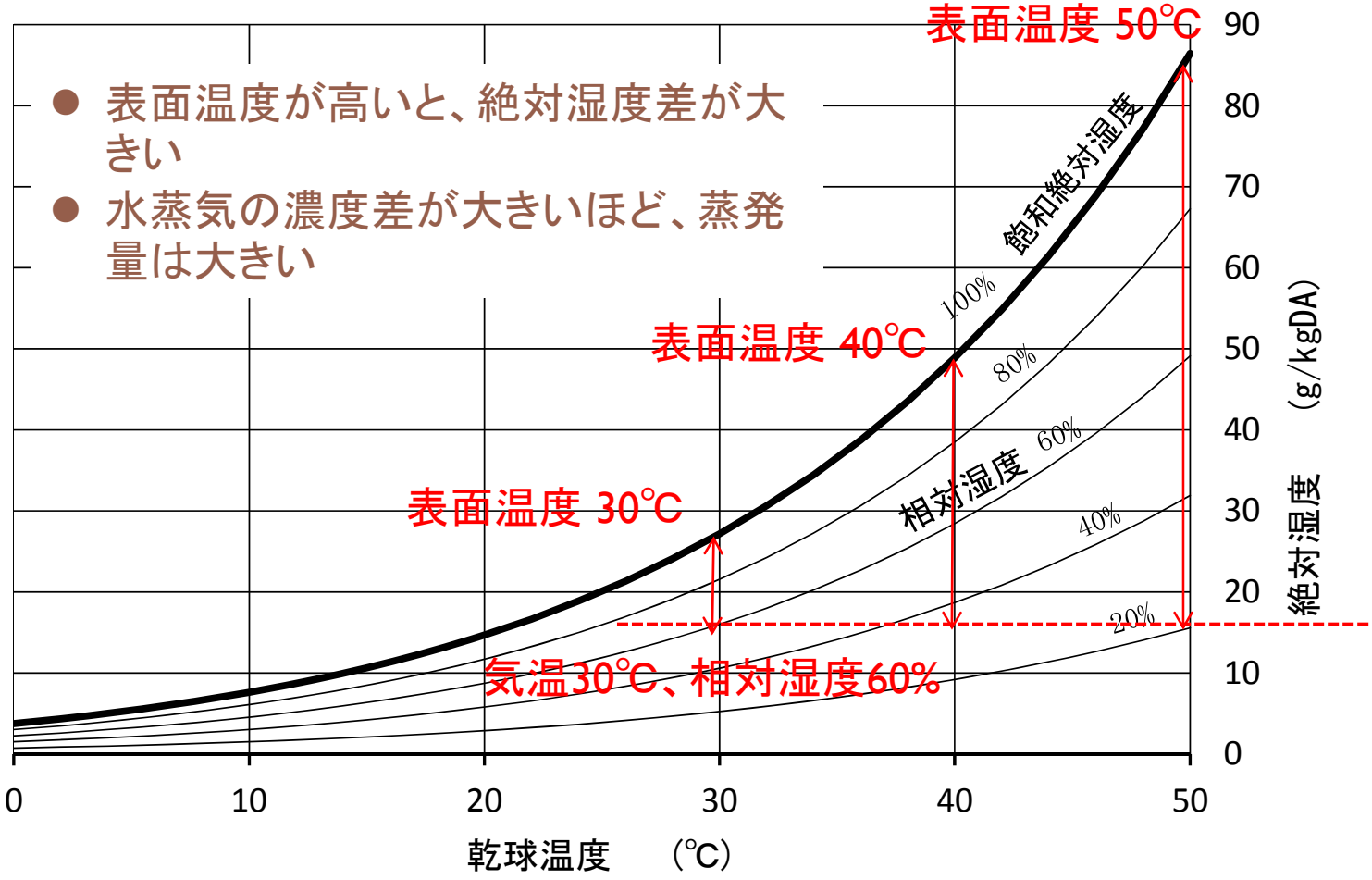
kg/(m^2・s)　kg/kgDA

比例係数

- 濃度差あたりの水蒸気の伝達係数
  例えば 25 kg/(m^2・s (kg/kgDA))
- 境膜の状態によって数値が変わる

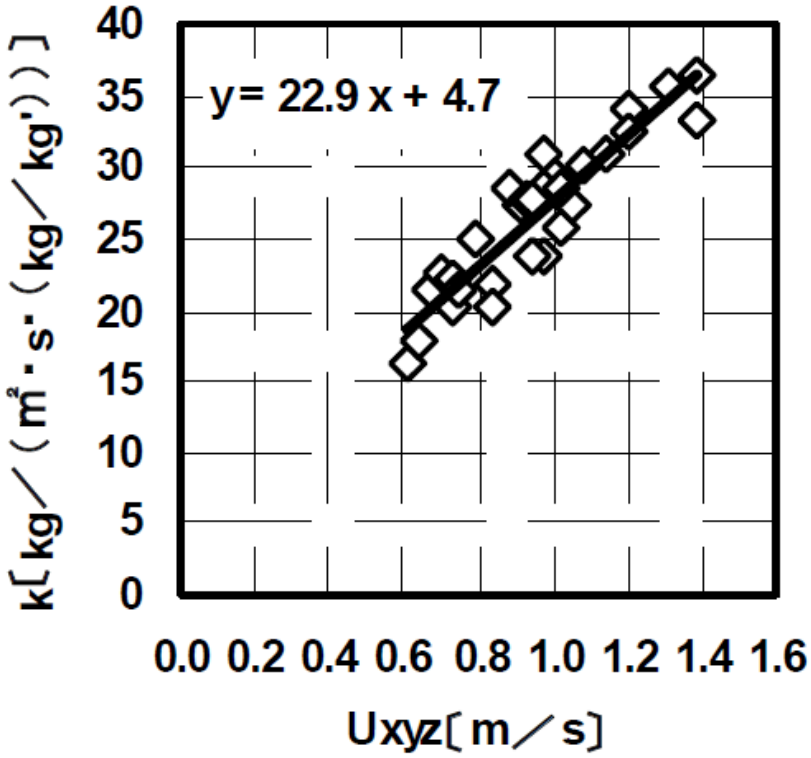
境膜（仮想の空気膜）

蒸発の大小を決める要因　－　表面温度



温度が高いと飽和水蒸気圧は大きい

蒸発の大小を決める要因　－　風速



湿気伝達率と風速との関係

成田ら、建築学会技術報告集(2004)

蒸発速度は、湿度差に比例する

$$E = k_w (X_{sat} - X_\infty)$$

蒸発速度　比例係数　濃度差

kg/(m²・s)　kg/kgDA

比例係数k_wが大きいほど蒸発量は大きい

（参考）ノズルによるミスト噴霧

ミスト（セミドライフォグ）
10～30 μm

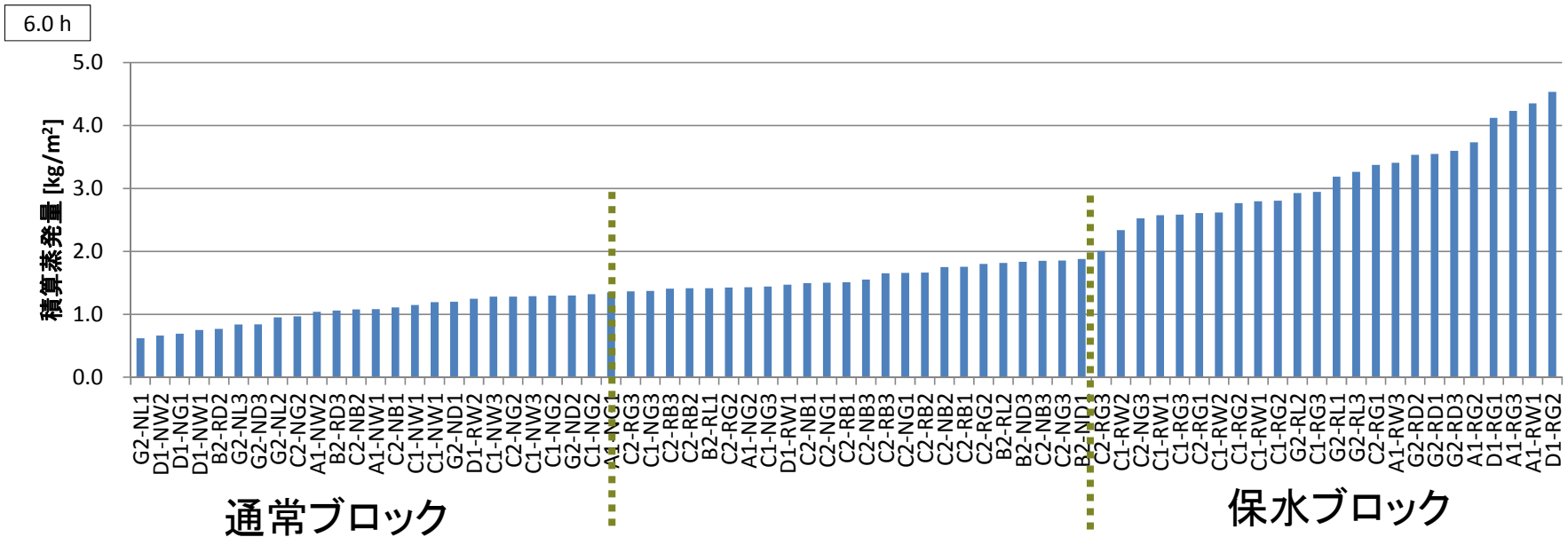
水1kgを構成する20μ粒子
- ●粒子個数　4.2×10^{11}個
- ●粒子の総表面積　533 m^2

蒸発面の面積が大きいので蒸発量が大きい

- ノズル80個で 188 L/hを噴霧
  ノズル1個で 0.65 g/sを噴霧
- 保水性舗装1m^2の一般的値0.139 g/sの4.7倍
- 周辺空気を3～5℃下げる

保水性舗装ブロック製品の
性能測定事例と認証基準

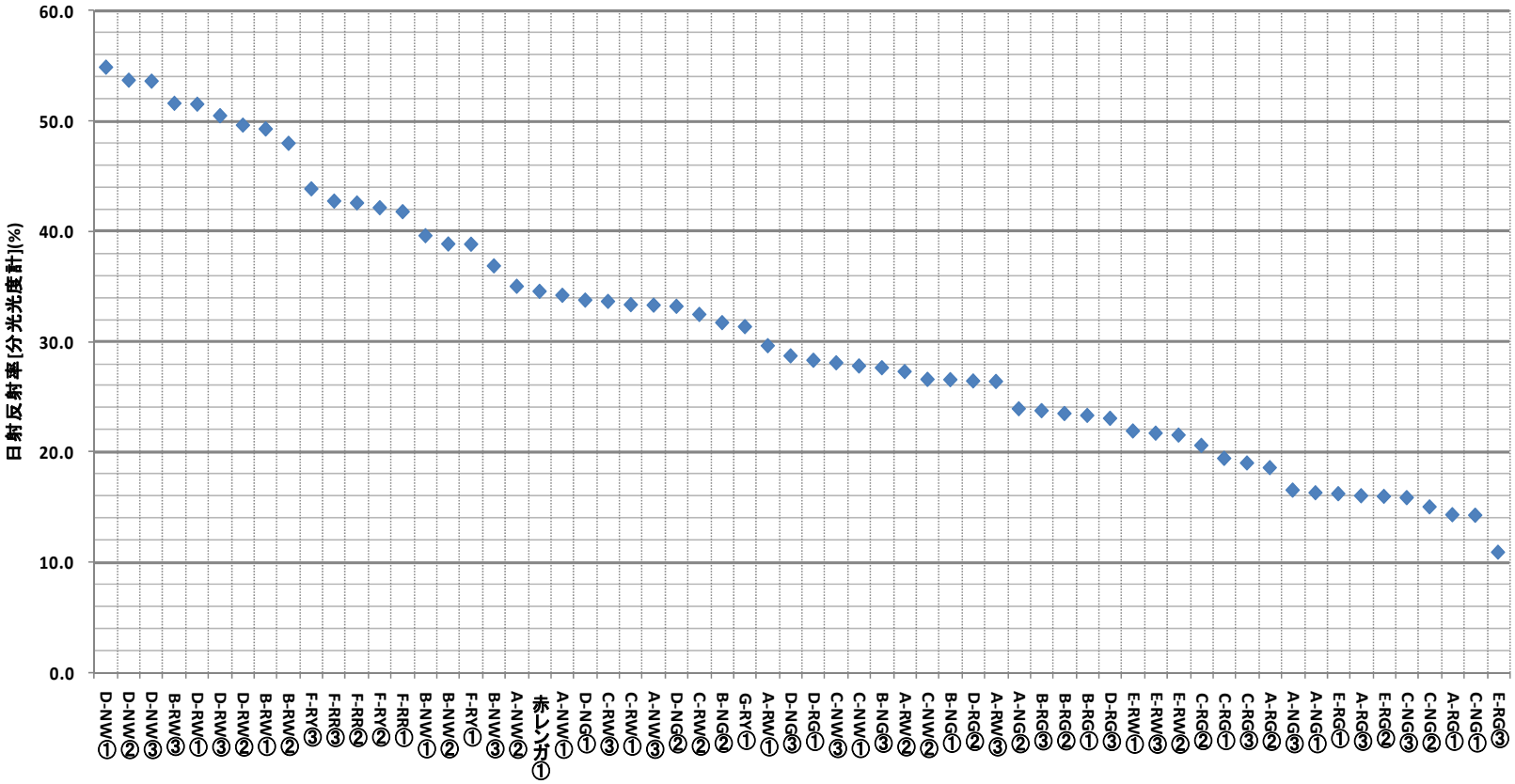
舗装ブロックの蒸発量



屋外暴露実験(2012)

・10時に蒸発開始、16時の積算蒸発量
・2012/9/28,10/16, 10/26の晴天日に実施

舗装ブロックの日射反射率



分光光度計による日射反射率の測定結果

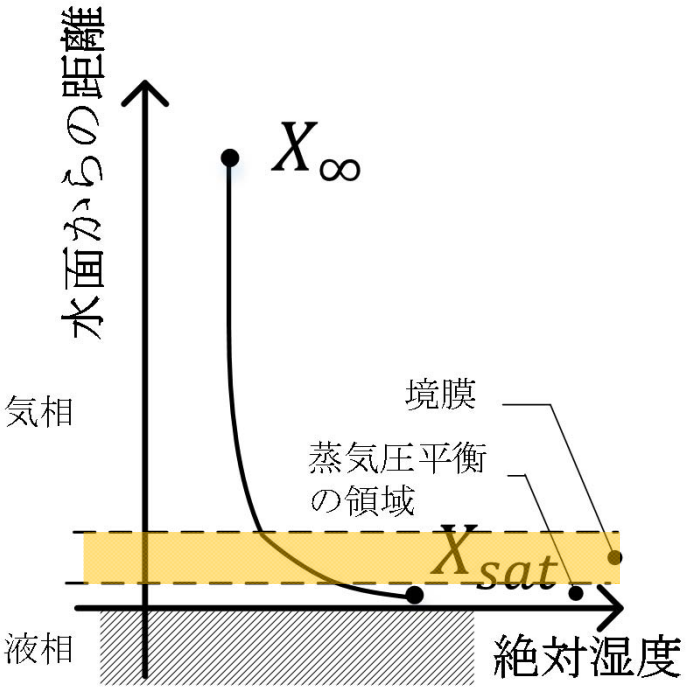
認証基準値の概要

- 蒸発性能＋日射反射率

	蒸発効率β	日射反射率
1	0.2未満	0.40以上
2	0.2≦β<0.3	0.28以上
3	0.3≦β<0.4	0.22以上
4	0.4≦β<0.5	0.15以上
5	0.5以上	下限なし

- 蒸発効率0, 反射率0.4の高反射舗装と同等以上の温度低下が期待される保水性舗装を、認証する。

蒸発速度と湿度差との関係



水面（理想的蒸発面）の蒸発

$$E_w = k_w(X_{sat} - X_\infty)$$

蒸発速度　比例係数　濃度差

kg/(m^2・s)　kg/kgDA

舗装ブロックでは蒸発速度が小さい

$$E_b = \beta \cdot k_w(X_{sat} - X_\infty)$$

β:　蒸発効率
（水面と比べた低減率）

$$0 \leq \beta \leq 1$$

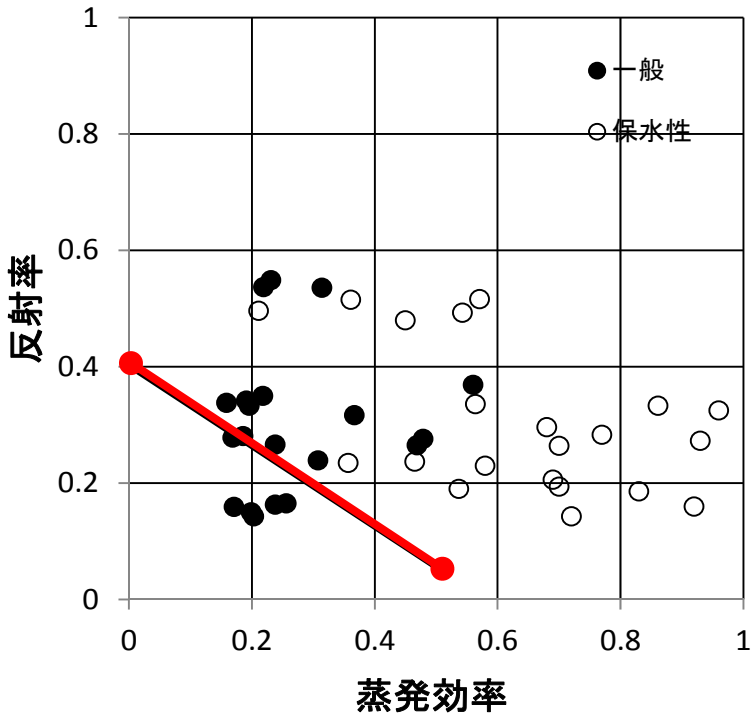
蒸発性能と日射反射性能の総合効果

舗装ブロックによるヒートアイランド抑制

表面温度の低減効果

- 水分蒸発による効果
- 日射反射による効果

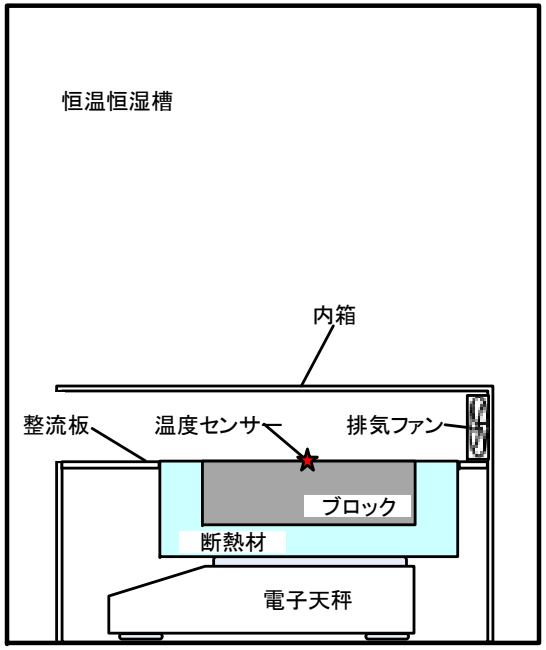
蒸発0 + 日射反射率40%
＝ 反射5% ＋ 蒸発効率0.5



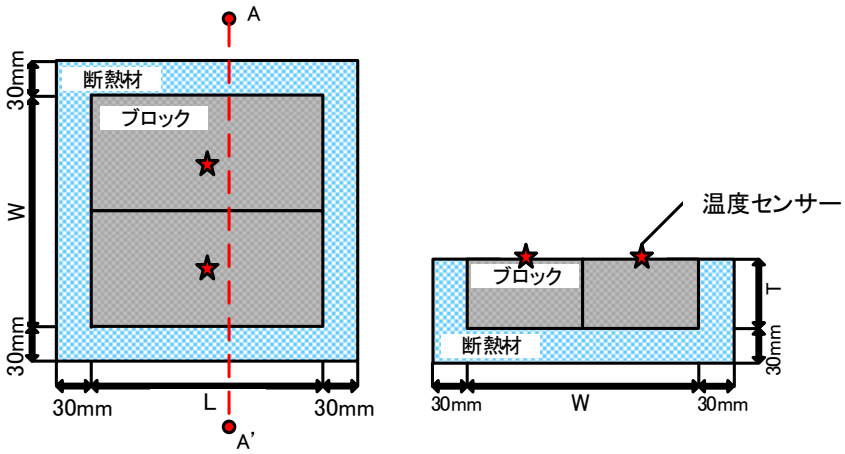
ブロックの蒸発効率と反射率

図中の実線は蒸発効率0・反射率0.4と蒸発効率0.6，反射率0を結ぶ直線である

蒸発効率の試験方法



試験装置の概要



断熱容器の例

$$\beta = \frac{E_b}{E_w} = \frac{\text{ブロックからの10時間蒸発量}}{\text{水面からの10時間蒸発量}}$$

- ブロックの蒸発量： 試験時間中の質量変化より求める
- 水面の蒸発量： 試験条件下の理論値

試験条件と屋外暴露条件との比較

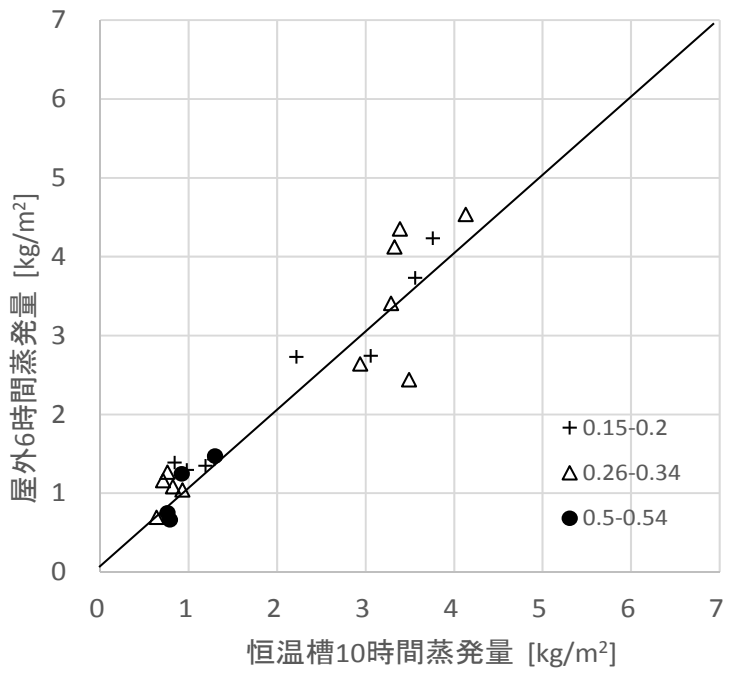
試験条件の違い

本認証の試験条件
- 日射・ランプなし
- 気温　40℃
- 湿度 50%

屋外暴露試験
- 晴天日　日射あり
- 気温　25℃～35℃
- 湿度60～80%

ランプ照射試験（路面温度上昇抑制舗装研究会～
- 試験室温度: 20℃
- 湿度60%
- ランプ照射条件
- 試験開始後3時間±1時間で、60℃に達すること

本認証の試験時間10時間
≒　屋外暴露6時間



恒温恒温槽と屋外暴露実験による蒸発量の比較

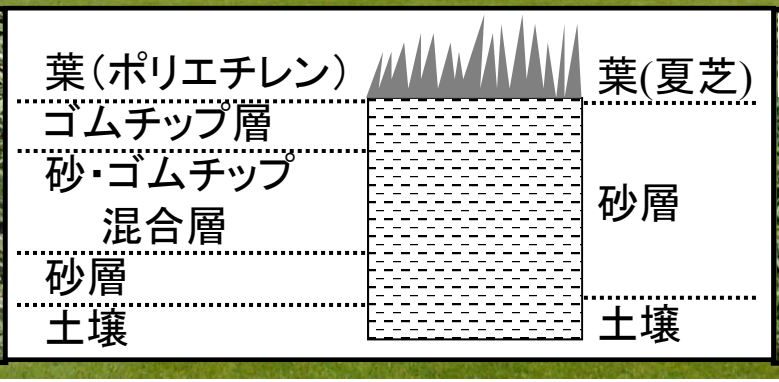
屋外での蒸発量計測は，2012年9月13日に実施し，恒温恒湿槽試験と同様の試験体(ブロックは，表面を除き5面を断湿・断熱)した．通常ブロック6種(11個体)，保水性ブロック6種(12個体)である．日射反射率は3区分(0.15～0.2, 0,26～0.34, 0.5～0.54)して示した

おわりに

表面温度低減効果と気温低減効果

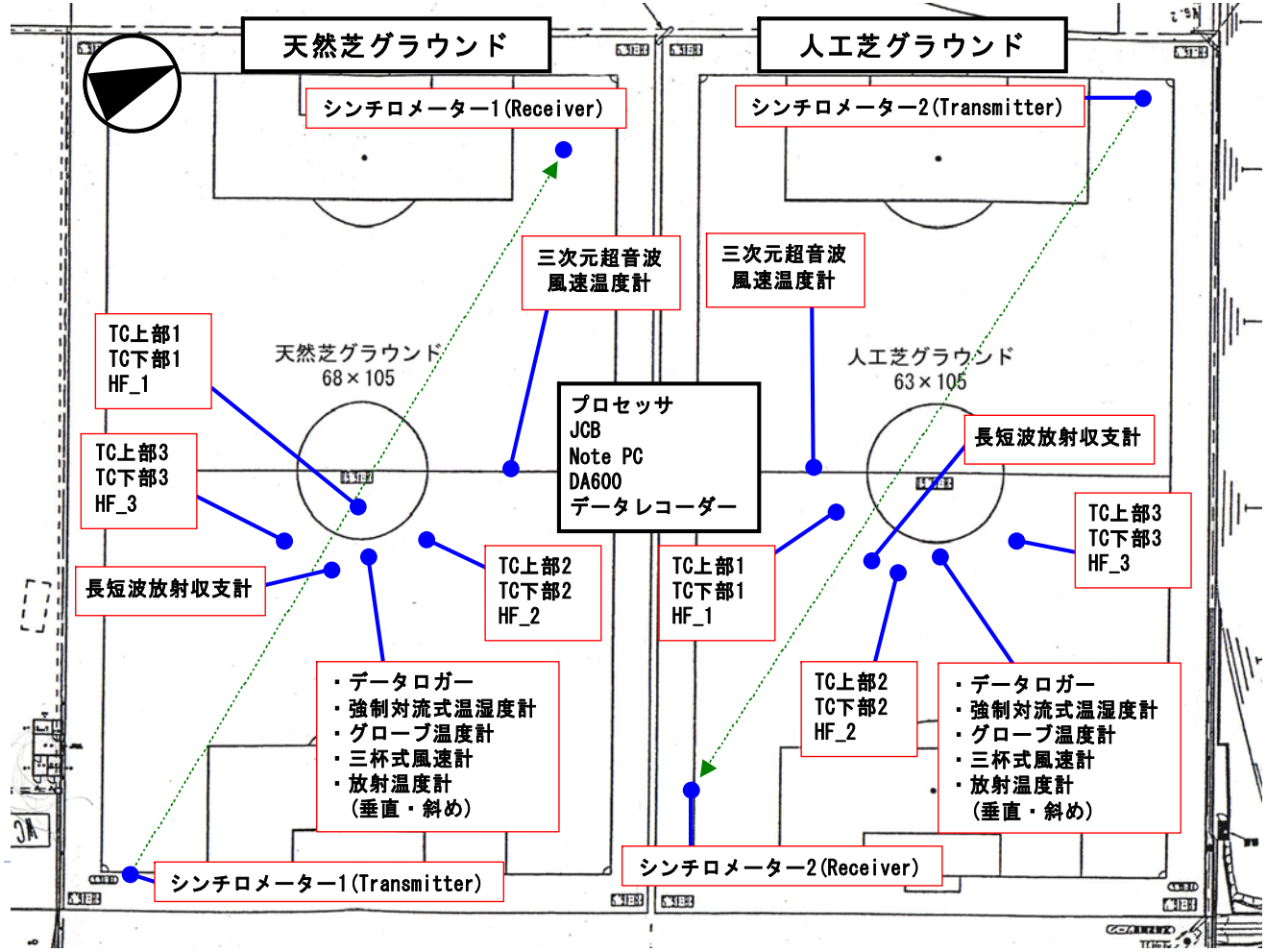
実測概要

期間：2004/9/12（20:00）～9/13（17:00）
場所：万博記念公園スポーツ広場
　　人工芝（63m×105m）・天然芝（ 68m×105m ）
天然芝潅水：9/13（7:30~8:00,12:00~13:00,15:30~16:30）

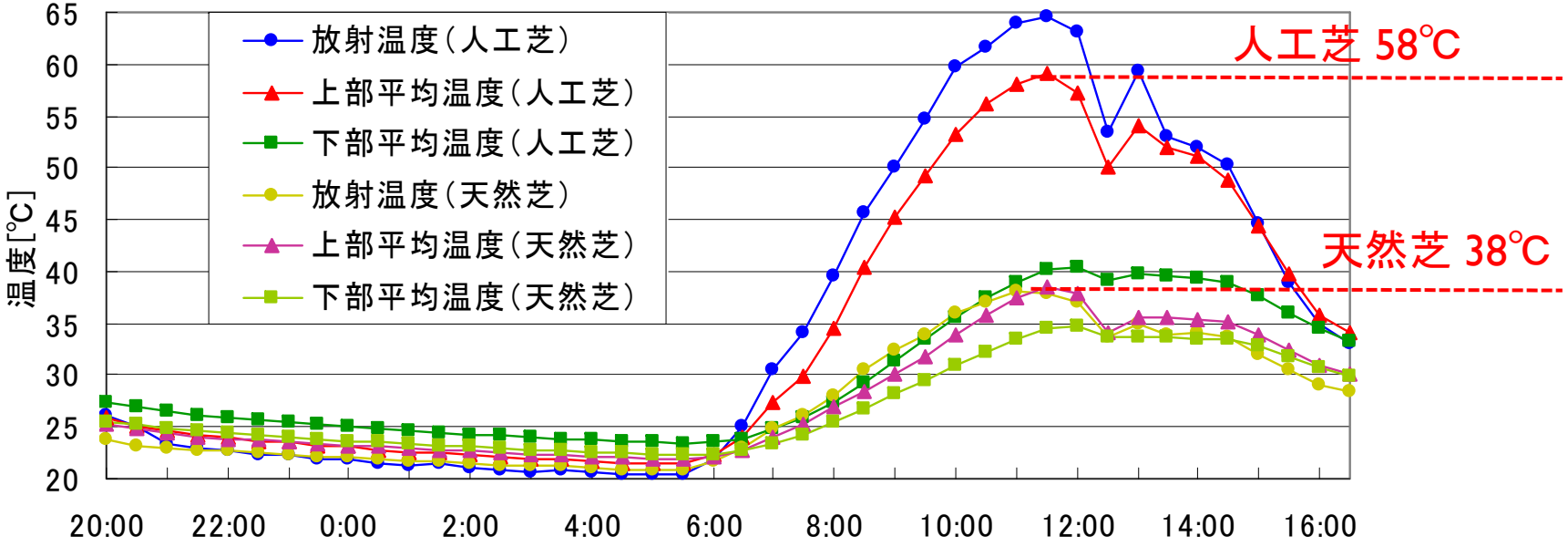


測定項目

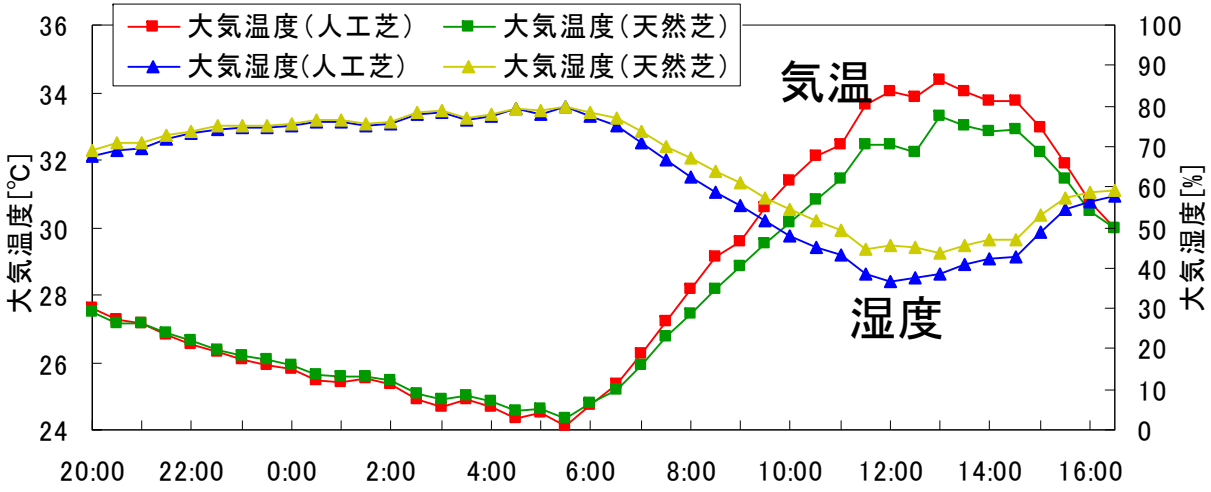
- ◇長短波放射量
- ◇風向
- ◇風速
- ◇顕熱量
- ◇地中伝導熱流量
- ◇大気温度
- ◇大気湿度
- ◇地中温度
- ◇表面放射温度
- ◇グローブ温度



人工芝と天然芝の表面温度

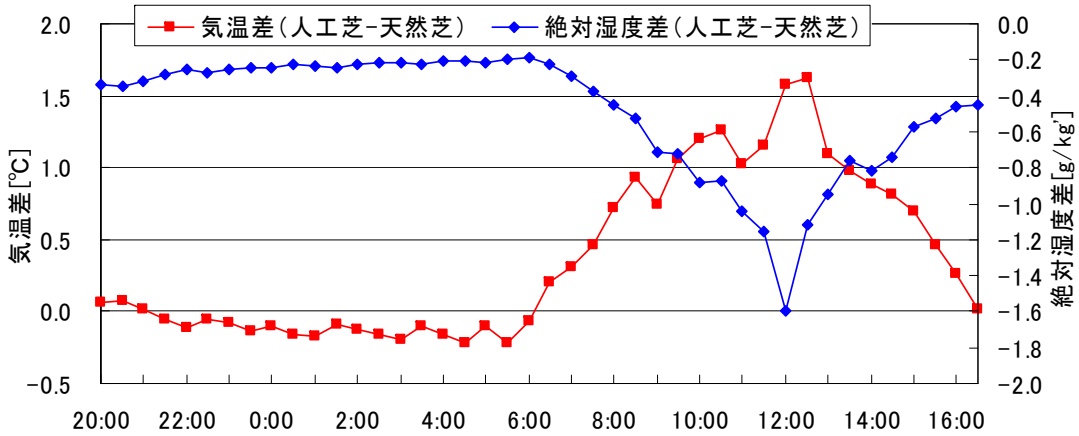


大気温度・湿度



◇天然芝の蒸散作用
◇日中3回の潅水

◇気温・・・・最大約1.5℃
◇絶対湿度・・約1.6g/kg'



- 60m×100mの空間スケール
- 表面温度差20℃:　気温差 1.5℃
- 気温低下と同時に湿度上昇