

簡易蒸発散速度測定装置の開発と精度検証

前川 知士¹・山田 宏之²

¹大阪府立大学大学院 生命環境科学研究科 (〒599-5831 大阪府堺市中区学園町 1-1)

E-mail: swc03041@edu.osakafu-u.ac.jp

²大阪府立大学大学院教授 生命環境科学研究科 (〒599-5831 大阪府堺市中区学園町 1-1)

E-mail: yamada@envi.osakafu-u.ac.jp

屋外における蒸発散速度を非破壊で測定するための新しい装置が開発された。この装置の精度検証を行うために風速の補正係数を算出し、重量変化による蒸発速度と比較した。その結果、蒸発速度の補正は風速の補正だけでは不十分であることがわかり、回帰分析から算出した蒸発速度の測定値の補正式を用いた。その結果、真の蒸発速度に対し、誤差 $\pm 9.1\%$ 以内となる範囲は、蒸発散速度で $1.48 \times 10^{-2} \sim 3.60 \times 10^{-2} \text{ g s}^{-1}$ であることが確認された。本装置を使用する際に、装置周辺の環境、特に装置周辺の風の影響及び装置の空気流入口における水蒸気量の鉛直プロファイルの不均一性が蒸発速度の測定値に与える影響が大きいことを明らかにできた。

Key Words : *evapotranspiration, porometer, open chamber, measurement system*

1. はじめに

近年、都市化の進行に伴い都市ヒートアイランド現象が深刻化している¹⁾²⁾。それにより、夏季の熱帯夜の増加や冷房エネルギーの増大といった様々な問題が生じている³⁾。大阪府には、ヒートアイランド対策を目的として結成された大阪HITECという産学官民の連携団体がある³⁾。大阪 HITEC では 2012 年に、屋外の植表面等からの蒸発散速度を非破壊で測定するための新しい方式の蒸発散測定装置を開発した⁴⁾。

この装置は開放型チャンバーと同様の構造をもち、ポロメータ⁵⁾のような個葉スケールの蒸発散速度ではなく、一定規模の面スケールで生じる蒸発散速度を直接的に測定できるという特徴を有する。開放型チャンバー法は、チャンバー内に一方から外気を送り込み、もう一方から吸引し、チャンバーの通気流量と流入空気と流出空気の濃度差から測定を行う手法である⁵⁾⁶⁾。開放型チャンバーやポロメータは PP System 等のメーカーで実用化されており⁷⁾、実際にポロメータを使用した研究事例⁸⁾⁹⁾によると、個葉スケールではなく樹木のような一定規模以上を測定対象として蒸発散速度を測定する際には、個葉スケールで測定した蒸発散速度を樹木スケールにスケールアップして推定する方法が提唱されている。また、ポロメータの特徴として通気入口から乾燥空気を送り込むことが挙げられる⁵⁾。ポロメータによ

る測定の問題点としては、個体からの蒸散量を求めるためには非常に多くの葉を測定する必要があり、大きな労力を要することなどが指摘されている⁷⁾。それに対して本装置は、個葉スケールの蒸発散速度から全体の蒸発散速度を推定するものではなく、10~20 cm 程度までの高さを有する地被植物群落を対象として、その全体を覆うことで、その植物体を含む地表面全体から生じる蒸発散速度を測定できることが特徴である。

蒸発散速度を測る方法としては、蒸発散に伴う重量変化から算出する秤量法も提案されている⁷⁾。秤量法は最も基本的で精度が高い方法であるが、測定対象物の重量の測定を行うことが必須であり、測定対象物を個別に分離できない場合、現場から切り取るなどして重量を測定する必要がある。しかし、植物群落の場合、切り取ることで測定対象物の蒸散速度が変化してしまう、正確な測定ができないことが懸念される⁷⁾。

本装置は、ポロメータのように装置内部へと送り込まれる空気が乾燥空気ではなく測定対象面周辺の空気をそのまま使うことや、秤量法で測定できないような破壊不可能な蒸発面を対象として蒸発散速度を測定できることなどが特徴である。

本装置の実用化にあたり測定値の精度や誤差要因を認識しておくことは重要だが、これまでに本装置の実用上の精度検証を実施した事例は無い。そこで本研究では、装置による測定値と水分蒸発に伴う重量変化か

ら算出した真の蒸発速度を比較して、本装置の精度検証を行うこと、測定値の補正係数を算出すること、ならびに補正後の測定値を真の蒸発速度と比較すること、で、本装置の実用性を検証することを目的とした。

2. 研究方法

(1) 使用した測定装置の概要

本装置は比較的軽量で取手が付いており、容易に持ち運ぶことができる。構造としては、内部空間の底面が $51.3\text{ cm} \times 36.0\text{ cm}$ 、断面積は 961 cm^2 の箱型をしている¹⁰⁾。本装置は、空気流出口に設置されたファン(San Ace 120: 山洋電機)6 基によって、内部風速が概ね 1.0 m s^{-1} となるように設計されている¹⁰⁾。しかし実際の測定においては、接続電源の電圧等の影響により内部風速が 1.6 m s^{-1} 程度になった。空気の流入口及び流出口には温湿度センサー(データミニ 3641: HIOKI)が設置されている。センサー部分は、日射遮蔽のためにアルミニウムで上部を被覆してある。装置内部中央の高さ 14 cm の位置に、データロガー風速計(Ws-03SD: CUSTOM)を設置している。

本装置は、流出口に設置したファンによって装置内部へと空気を取り込み、流入空気と流出空気の絶対湿度差および装置内部の流速から蒸発散速度を測定するという原理になっている。装置天井部には、メタルハライドランプが取り付けられており、装置底面において放射強度が 350 W m^{-2} となるように設計されている¹⁰⁾。空気流出口には OPS 樹脂で作られた空気混合装置が設置されており、流出空気の水蒸気の不均一性を緩和するようになっている。装置の全体像および構造の概要をそれぞれ写真-1、図-1 に示す。

本装置を用いて蒸発散速度を測定する際には、予め温湿度センサーで測定される絶対湿度差の測定値の機差を調べておく必要がある。そのため、蒸発面で測定を行う前に蒸発量がゼロとなる面において本装置を稼働させ、流入口と流出口に設置した温湿度センサーの示度差を調べるようになっている。

(2) 測定場所

測定は、大阪府立大学中百舌鳥キャンパス B11 棟屋上および屋上エレベーターホールで行った。この 2 つの場所は容易に行き来ができ、気温や湿度に関して極端な気象条件の差がなく、屋外および屋内における作業実施の容易さから選択した。なお、屋上面には露出防水が施されている。

風速の鉛直プロファイルの測定はエレベーターホールでのみ、精度検証はエレベーターホールおよび屋外



写真-1 測定装置の全体像

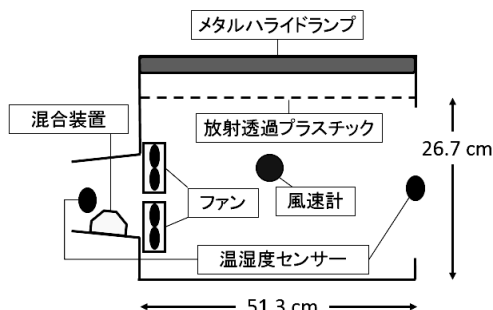


図-1 測定装置の構造概要

で、散水を伴う精度検証は屋外のみで行った。

(3) 内部風速の鉛直プロファイルの測定

本装置を稼働した際に測定される風速の値は、装置内部の中央付近における風速を記録しており、装置底面部分において生じる摩擦による風速の低下を考慮できていないと考えられる。そこで、装置内部風速の鉛直プロファイルを測定し、回帰分析から内部風速の補正係数を算出した。

内部風速の鉛直プロファイルの測定方法について説明する。まずゼロ検定板の上には木綿布を設置した。この木綿の布は、後述する蒸発速度の精度検証を行う際に使用するものである。その上に風速計センサーをスタンドで固定し、装置底面から装置天井部付近にかけて、内部風速の鉛直分布を測定した。

(4) 蒸発速度の測定値の精度検証

風速の補正係数を用いて求めた蒸発速度の精度検証を行うために、木綿布を測定対象として、本装置による蒸発速度の測定値と、蒸発に伴う重量変化から算出した真の蒸発速度を比較した。測定対象として木綿布を選択した理由は、非生物でありそれ自体の生理特性によって蒸発速度が変化しないと考えられるからである。本装置による測定時間は、機器の時定数等を考慮して 15 分間あるいは 20 分間とし、解析の際には測定

開始から 5 分間のデータは除いた。

精度検証は、まずゼロ検定板の上で装置を稼働させ、温湿度センサーで記録される絶対湿度差 AH_0 (g m^{-3}) を調べた。その後、木綿布を湿らせゼロ検定板上に広げ、重量計を用いてゼロ検定板と布の重量の合計 W_1 (g) を測定した。その後、布を置いたままの状態で測定装置を被せて蒸発速度を測定した。装置稼働時に測定される絶対湿度差 AH_1 (g m^{-3}) および装置の内部風速 v (m s^{-1}) と装置内部の断面積 S (m^2) より蒸発速度 E_e (g s^{-1}) を算出した。なお、測定時間内で測定された蒸発速度は平均し、測定時間内の蒸発速度とした。測定装置を用いた蒸発速度の算出には以下の式(1)を用いた。

$$E_e = (AH_1 - AH_0) \times v \times S \quad (1)$$

規定時間の測定後、再び重量計でゼロ検定板と布の重量の合計 W_2 (g) を測定した。測定前に測定した W_1 (g) と測定後に測定した W_2 (g) の重量差を測定時間内における蒸発量と見なして、装置稼働時間 t (s) より重量変化による真の蒸発速度 E_w (g s^{-1}) を算出し、装置で測定された蒸発速度と比較した。重量差から蒸発速度を算出する際には以下の式(2)を用いた。

$$E_w = \frac{W_1 - W_2}{t} \quad (2)$$

装置による蒸発速度の測定値を算出する際には、風速計で測定された風速の値に風速の補正係数を乗じた。

(5) 蒸発速度の補正式の算出

数回の試行の結果、風速の補正のみでは本装置の精度の補正として不十分であることが分かったため、実際の蒸発速度と測定された蒸発速度に対し回帰分析し、測定値を補正する回帰式を導いた。回帰分析では一次回帰、二次回帰、三次回帰、累乗回帰、対数回帰の計 5 種類の分析を行った。

(6) 装置周辺の環境が測定値に与える影響の検討

屋外で実際に測定を行なう際には、装置周辺の地面が湿潤していることが多く、装置周辺においても盛んな蒸発が生じていることが考えられる。そのため、地表面から装置に設置したセンサー位置までの高度別の水蒸気密度が不均一であると考えられる¹¹⁾。これは測定誤差に直結するため、このような状況下での精度検証を行うことが必要である。そこで、装置周辺の湿度環境が蒸発速度の測定値に与える影響を調べるために、装置周辺に散水を行った上で同様の測定を行い、装置周辺の湿度環境と測定値の関係性を調べた。

(7) 屋上緑化面における実測

本装置を用いた実測を大阪府立大学 B11 棟屋上緑化面で行った。屋上緑化面には、コウライシバ(*Zoysia matrella*)が植栽されており、部分的にクズ(*Pueraria lobate*)が繁殖していた。測定対象面は異なる蒸発散能力を持つと思われる、健全に生育していた芝面(健全芝区)、枯死した芝面(枯死芝区)、クズと芝が混在した面(クズ+芝区)を選択し、各面から生じる潜熱フラックスをそれぞれ測定した。測定期間は 2015 年 6 月 2 日~11 月 30 日であり、概ね月 1 回の頻度で行った。測定時には専用のアルミ製の枠を測定面に埋め込み、装置底面部と測定面の間に隙間を作らないようにした。測定された蒸発散速度から潜熱フラックス IE (W m^{-2}) を算出する際には以下の式(3)を用いた。

$$IE = \frac{E_e \times 2500}{S_b} \quad (3)$$

ここで、 E_e は測定された蒸発散速度 (g s^{-1})、 S_b は装置底面積 (m^2) である。水の気化潜熱は $2.5 \times 10^3 \text{ J g}^{-1}$ とした¹²⁾。

3. 結果及び考察

(1) 装置内部風速の鉛直プロファイル

装置内部風速の鉛直プロファイルの測定結果を図-2 に示す。図-2 に示した回帰式および風速計の設置高度 0.14 m から、風速の補正係数が 0.92 であることがわかった。すなわち測定時に記録された風速の測定値に対して 0.92 を乗じることで、摩擦を考慮した装置内部の平均的な風速の値に換算できることになる。しかしこの補正係数を実際に適用できる蒸発面は、木綿布のような平坦な面のみであり、草丈の高い植物が含まれるような面について用いることは適切ではないと考えられる。

(2) 風速の補正係数を用いた精度検証

装置で測定された蒸発速度と実際の蒸発速度の関係を図-3 に示す。解析には温度や湿度の異なる様々な条件下でのデータを対象とするために、2015 年 6 月 24 日~11 月 24 日の期間に屋外および屋内で測定した合計 103 個のデータを用いた。

この図より、風速の補正係数を適用したとき、真の蒸発速度に対して $\pm 20\%$ 以内に抑えられたものは 24 データのみであり、本装置で測定される蒸発速度を十分に補正できていないことが分かる。これは、今回測定を行った風速の鉛直プロファイル以外に、装置側面部

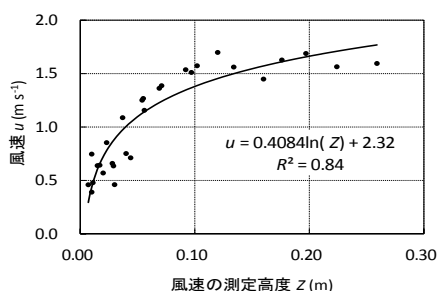


図-2 装置内部における風速の鉛直プロファイル
(2015年10月13日) (n=29)

分における摩擦による風速の低下や、流入口で生じる渦など様々な要因が影響しているものと考えられる。

さらに、屋外で精度検証を実施した際に、装置周辺で吹く風が装置内部の風速に影響し、装置内部風速が定常状態にならなかったことも影響したと考えられる。屋内で測定を行った場合と、屋外で測定を行った場合のそれぞれの装置内部風速の測定例を図-4に示す。測定時の内部風速の変動が屋内よりも著しい傾向は、この日以外の測定においても確認されている。屋内の測定で記録された風速の標準偏差は 0.017 m s^{-1} であったのに対して、屋外における風速の測定値の標準偏差は 0.100 m s^{-1} であった。これは、屋外で測定を行う際の流速の制御が不完全であったことを示唆している。これは開放系の測定装置を使用するうえで共通する、測定の誤差要因になると考えられる。

(3) 蒸発速度の補正式の算出および補正式の適用結果

風速の補正のみを行った蒸発速度の計算結果と、重量変化によって算出した真の蒸発速度との関係を回帰分析した結果を表-1に示す。表中には算出した全ての回帰式と、それぞれの回帰式を使用した際に、真の蒸発速度と比較して最大誤差が $\pm 20\%$ 以内に抑えられる

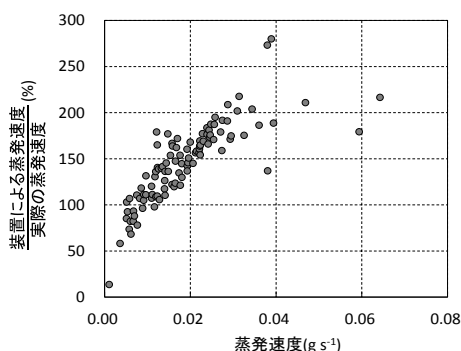


図-3 風速の補正を行った蒸発速度の測定値と実際の蒸発速度の比較 (n=103)

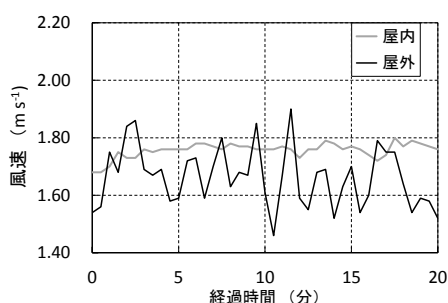


図-4 測定時間内における内部風速の変動
2015年9月2日 11:16~11:36 (屋内)
11:48~12:08 (屋外)

範囲、および回帰式の決定係数を示している。

一次回帰、二次回帰、三次回帰の間で決定係数の差は0.01未満であり、尚且つ適用できる範囲が等しい。そのため、最も単純な式として一次回帰式を選択した。この一次回帰式は原点を通らないので、蒸発量が小さな場合に用いるには不適切であるが、一定以上の蒸発速度で水蒸気が生じている面においては問題なく適用可能であると考えられる(図-5)。

(4) 補正式を用いた精度検証

補正後の蒸発速度の値と真の蒸発速度の比率(装置による蒸発速度/真の蒸発速度)と装置による蒸発速度

表-1 回帰分析で算出した回帰式、最大誤差が $\pm 20\%$ 以内に収まる下限と上限、回帰式の決定係数

回帰分析	回帰式	下限 ($\times 10^{-2} \text{ g s}^{-1}$)	上限 ($\times 10^{-2} \text{ g s}^{-1}$)	決定係数
一次回帰	$E_w = 0.3869E_e + 0.0049$	1.48	3.60	0.85
二次回帰	$E_w = 1.1968E_e^2 + 0.3233E_e + 0.0056$	1.48	3.60	0.85
三次回帰	$E_w = 65.287E_e^3 - 4.8195E_e^2 + 0.4684E_e + 0.0047$	1.48	3.60	0.86
累乗回帰	$E_w = 0.0829E_e^{0.4704}$	1.58	3.60	0.76
対数回帰	$E_w = 0.0059 \ln(E_e) + 0.0367$	1.74	3.60	0.67

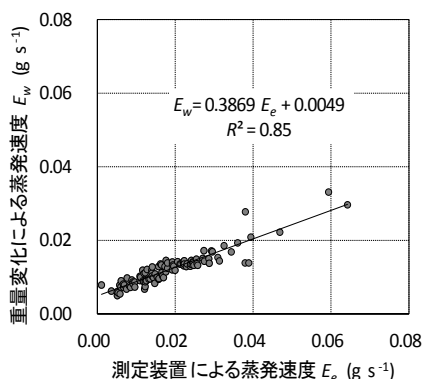


図-5 装置による蒸発速度の測定値と実際の蒸発速度の関係 (n=103)

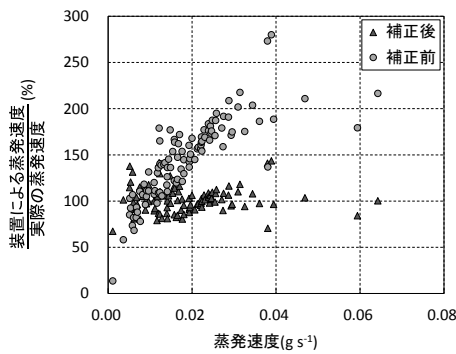


図-6 補正式を用いた蒸発速度の結果と重量変化によって算出した蒸発速度の比較 (n=103)

の測定値の関係を図-6 に示す。蒸発速度の補正を行っ

た結果、補正前の蒸発速度より補正後の蒸発速度の測定値の誤差が減少したのは全体の測定データの 89.3% であり、装置の蒸発速度の測定値が $1.06 \times 10^{-2} \text{ g s}^{-1}$ 以上の範囲では、すべての測定値について補正後の方が補正前と比較して誤差が小さくなる結果となった。

補正式によって求められる蒸発速度の最大誤差が $\pm 20\%$ 以内に抑えられる範囲は $1.48 \times 10^{-2} \sim 3.60 \times 10^{-2} \text{ g s}^{-1}$ であり、この範囲において誤差の標準偏差は 9.1% であった。全測定値に対して補正式を適用した場合の最大誤差は $\pm 44\%$ 、誤差の標準偏差は 14.2%、適用範囲は $0.11 \times 10^{-2} \sim 6.42 \times 10^{-2} \text{ g s}^{-1}$ であった。

(5) 装置周辺環境と測定値の関係

屋内で測定した結果、および屋外で散水の有無ごとに比較した結果を図-7 に示す。ここでの蒸発量の算出には風速の補正係数のみを使用している。蒸発速度の測定値と真の蒸発速度を比べて最も誤差が大きくなるのは、装置の空気流入口側の屋上面に散水を行って測定した場合で、真の蒸発速度に比べて 2.7 倍の値となっ

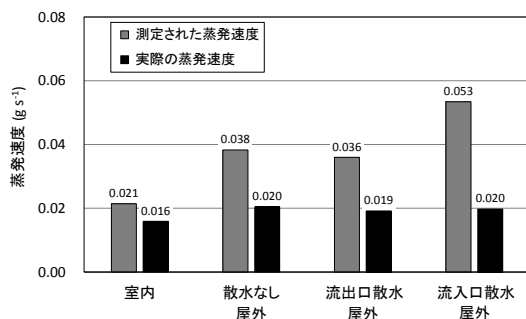


図-7 装置周辺の環境と装置の測定値の変化
(2015 年 9 月 2 日 10 : 40 ~ 13 : 10)

た。これは、流入空気の水蒸気の鉛直プロファイルの

不均一性が原因であると考えられる¹¹⁾。本装置を使用する際には流入空気と流出空気の水蒸気差を用いて蒸発速度の算出を行うが、流入空気の水蒸気差は、流入口に設置された温湿度センサー 1 点で測定している。しかし、流入口において流入空気の水蒸気量の鉛直プロファイルの不均一が生じている場合、流入口で温湿度センサーが感知できなかった水蒸気が装置に取り込まれ、装置内部で混合される。そのため装置内部で混合した空気が流出口の温湿度センサーで測定され、流入空気と流出空気の水蒸気差が増大したことが原因であると考えられる。この結果は、実際に屋外で本装置を使用する際に周辺環境を考慮する必要があることを示唆しており、特に流入口付近における水蒸気量の鉛直プロファイルの均一性を、ある程度保つ必要があると考えられる。

この対策としては、流入口付近に不透水性のシートを敷き、流入口側の地面蒸発の影響を受けないようにすることなどが考えられる。さらに屋外と屋内の結果を比較すると、屋外で測定した方の誤差が大きくなることが分かった。これは図-4 に示したように、装置内部風速が安定していなかったこと等が原因であると考えられる。

(6) 屋上緑化面における実測例

屋上緑化面における実測例として 2015 年 10 月 8 日の測定結果を図-8 に示す。この日の測定結果は、解析を行ったデータの中で各面の潜熱フラックスの大小関係が最も顕著に現われていた。全ての測定値には本研究で算出した補正式を適用した。図中のエラーバーは、図-6 の結果から得られた全ての蒸発速度の測定値に対する標準偏差 14.1% を使用した。これは、クズ+芝区の蒸発散速度が $3.60 \times 10^{-2} \text{ g s}^{-1}$ より大きく、誤差 9.1% 以内に補正できる範囲を外れてしまっているためである。

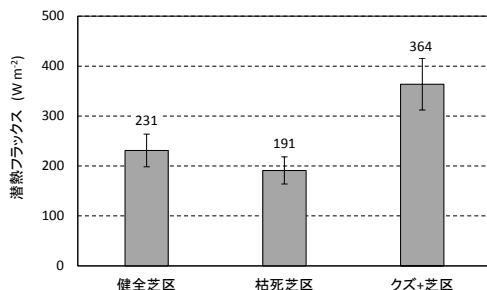


図-8 潜熱フラックスの測定結果 (2015 年 10 月 8 日)

ことによって、打ち水による蒸発速度を直接的に測定することなどが考えられるだろう。

4. 総合考察

本研究で得られた成果と課題を以下に示す。

- (1) 風速の補正係数を装置内部の風速の鉛直プロファイルを測定することで算出できた。ここで求めた補正係数は、極端な凹凸の無い平坦な面において有効に機能すると考えられる。
- (2) 蒸発速度全体の補正式を算出できた。この補正式によって蒸発速度の測定値を補正した結果、最大の誤差範囲が $\pm 20\%$ 以内に抑えられる測定値の範囲が $1.48 \times 10^{-2} \sim 3.60 \times 10^{-2} \text{ g s}^{-1}$ であることが明らかになった。この範囲内で誤差の標準偏差は9.1%だった。
- (3) 装置周辺の環境によって本装置の測定値が大きな影響を受けることが確認された。本研究では、装置の流入口における水蒸気量の不均一性および装置周辺を吹く風によって内部風速の定常性を保てなかったことが、誤差が増大した大きな要因であると考えられる。

今後の課題としては、より精度の高い蒸発速度の補正式の導出を行うためのデータの充実、及び流量の制御方法の改良を行い、より高精度で測定できる範囲や条件を拡大することが重要であると考えられる。また、使用した温湿度センサーの精度も今回の測定値の結果に大きく影響している可能性があり、高精度のセンサ

ーを採用することで更なる精度向上が望めるだろう。

今後、本装置の精度が向上し、十分な実用精度が得られるようになった段階での活用例としては、複数種の植物種が混在した蒸発散面における蒸発散能力の比較や、打ち水を行った各種舗装面に本装置を設置する

参考文献

- 1) 文字信貴他：農学・生態学のための気象環境学, pp.139-141, 丸善株式会社, 2008
- 2) 環境省：ヒートアイランド対策ガイドライン平成24年度版, pp1-3, p15, 2013年3月
- 3) 大阪ヒートアイランド対策技術コンソーシアム：設立について：<http://www.osakahitec.com/active/setsuritsu.html>
- 4) 大阪HITEC事務局, 大阪HITEC NEWS Vol. 10, pp.6-7, 2013年12月20日, 大阪HITEC
- 5) 日本農業気象学会関東支部：農業気象の測器と測定法, pp.247-272, 1988年, (財)農業技術協会
- 6) 木部剛, 鞠子茂：土壌呼吸の測定と炭素循環, 地球環境, Vol. 9, No.2, pp.203-212, 2004
- 7) PP Systems ホームページ：<http://ppsystems.com/>
- 8) 角張嘉孝, 細川和弘：スーパーポロメータと生態・生理学的シミュレーション・モデルを用いたブナ林分蒸散量の推定法：日本林学会誌, Vol74, No.4, pp.263-272, 1992
- 9) 野島義照, 長谷川秀三：夏期における各種造園植物の葉面からの蒸散量, ランドスケープ研究, Vol. 58, No.5, pp.97-100, 1994
- 10) 株式会社森生テクノ：「簡易蒸発散測定装置を使用した実証実験」に関する業務報告書, 2015年2月12日, 大阪HITEC資料
- 11) 羽生寿郎, 中川行夫, 山本良三, 坂上務, 矢吹万寿, 堂腰純：農業気象学, p.30, 1984年3月30日, 文永堂
- 12) 近藤純正：水環境の気象学 - 地表面の水収支・熱収支 -, p.24, 1994年12月10日, 朝倉書店

(2016. 8. 26 受付)

THE DEVELOPMENT AND ACCURACY VERIFICATION OF BIG CHAMBER TO MEASURE EVAPOTRANSPIRATION RATES

Kazuma MAEKAWA and Hiroyuki YAMADA

A new type big chamber was made to measure the evapotranspiration rates in the field without destroy objects. To conduct accuracy verifications, we calculated the corrective coefficient of velocity, and made comparisons the water transpiration rates between the real rates from weight change and the measurement of this equipment. In result, the correction of the measurement value needs also another corrective coefficient calculated by regression analysis. As a result, the measurement value is confirmed that as long as the range of evapotranspiration measurement value is $1.48 \times 10^{-2} \sim 3.60 \times 10^{-2} \text{ g s}^{-1}$, it has margin error within 9.1% with the corrective coefficient. When using this chamber in outdoors, we should consider the effect on surround condition, especially the wind around chamber and the vapor vertical profile, which cause large measurement errors.