

風洞を用いた蒸発量計測法による野外計測
Field measurement of evaporation by the use of a wind tunnel

埼玉大学 工学部	渡 辺 邦 夫	K. Watanabe
” ”	小 野 誠	M. Ono
” ”	藍 沢 稔 幸	T. Aizawa
住友セメント	玉 置 英 裕	H. Tamaki
東 京 計 測	神 田 信 之	N. Kanda

はじめに
流出現象や地表付近の水分移行現象を解明するにあたって、蒸発量を精度良く測定することが、極めて重要である。従来、蒸発量の計測は、日射量、風速など気象要素を測定して、それから推定する方法¹⁾もしくはライシメーターを用いて、その重量の変化から求める方法²⁾が主要であった。これらの方法により、蒸発量はかなり良く把握しうることが明かとなっている。しかし、従来の方法では大きな設備を必要とし、それゆえ一定場所ではしか測定しえないという点が問題であるとする。蒸発量は、土壌の性質や地形、表層土の含水量などによって大きく左右され、場所的、時間的、にかなり変化すると思われる。そのため、任意の場所での測定が、容易にできる方法が望ましい。この観点に立って、筆者らは、風洞を用いた蒸発量の直接測定法を提案し³⁾ ⁴⁾ 室内実験によって、この方法の妥当性を検討し、良い結果を得た。しかしながら、野外で本当にうまく測定しうるか、あるいは、野外測定で生ずる問題点は何かなどについては、まだ十分検討していなかった。今回の報告は、本蒸発量計測法の妥当性と問題点を、野外計測を行って考察したものである。

1 蒸発量測定法の考え方と室内実験による妥当性の検討
提案する蒸発量測定法の概念を図-1に示す。まず、地表面に透明アクリル製の小風洞を設置する。いま、風洞内を図中左側より右側に風が通過していると考え、この風洞内の2断面S1、S2を選び、各々の断面*i*を通過する水分量*Q_e(i)*, *i*=1,2 を以下の式により求める。

$$Q_e(i) = \frac{A}{n} \sum_{j=1}^n F(i,j) \quad \text{-----} \quad (1)$$
$$F(i,j) = v(i,j) \cdot M(i,j) ; \quad M(i,j) = Q(i,j) \cdot Sr(t(i,j)) \quad \text{-----} \quad (2)$$

ここに、図-2に示すように、*A*は風洞断面、*n*は断面内の測定点数、*j*は測定点番号、*F*は各点を通る水分フラックス、*M*は各点の水分量、*v*は風速、*θ* は相対湿度、*Sr(t)*は 温度*t*における絶対湿度である。2つの断面S1およびS2を通過する水分量*Q_e(1)*と*Q_e(2)*との差は、それら断面間の風洞下底面より蒸発する量に等しくなるはずである。そのため、(1)式により*Q_e(1)*と*Q_e(2)*を求めれば、蒸発量が計測しうることになる。この測定法の妥当性を、まず室内実験により検討した。

用いた室内実験装置の模式図を図-3に示す。この装置は、径20cmのアクリル円筒の下部を切断して作った風洞を、パニヤ合板の上に乗せたものである。風洞中央部付近に試験区間を設けている。試験区間には、長さ

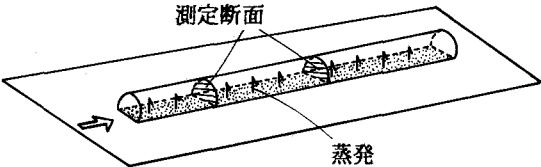


図-1 測定方法の概念図

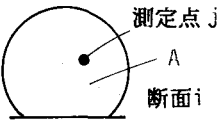


図-2 風洞断面

30cm、幅15cm、
深さ4cmの土
槽が2個電子
天秤の上に乘
せられている。
なお風を扇風
機を用いて風
洞内に送って
いる。土槽か
らの蒸発量は

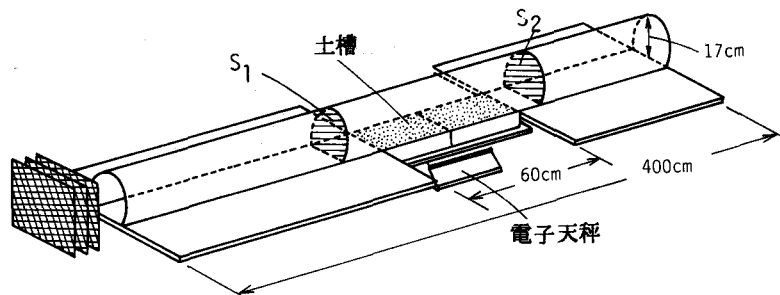


図-3 室内実験装置模式図

本計測法に従い、試験区間前後の測定断面S1、S2を通過する水分量の差から求める。また同時に、蒸発量は、電子天秤を用いて、土槽の重量変化から直接的に求められる。土槽重量は扇風機を止め、風がない状態で測定した。これら2つの測定結果を比較することによって、提案している計測法の妥当性が検証しうることになる。(1)式を計算するに必要な、各断面内風速分布、相対湿度分布、温度分布は、図-4に示す断面内28点の測定点で計測した。与えた平均風速は、ほぼ0.5~0.7m/sの範囲に設定した。なお、風速分布は、野外計測用の熱線風速計(アイ電子 VH-01-ANS)を用いて測った。また、相対湿度、温度を計測するセンサーの大きさは約5mm×1cm×1.5cmの直方体であり、風向に対して、5mm×1cmの面を向ける。この室内実験は、土槽の水分状態、風速状態を変えて7ケース行った。1つの実験ケースにおける実験結果例を図-5、図-6、図-7に示す。図-5は、風速分布を示しており、(a)はS1、(b)はS2断面をそれぞれ表している。両断面共、

図中の風洞断面左隅部に風速の小さい部分が存在しているが、これは風の与え方と、用いた風洞の特性によるものである。図-6は、(a)S1、(b)S2各断面の相対湿度分布を示している。

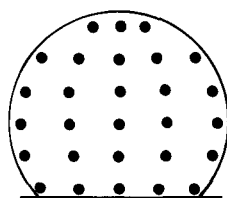


図-4 断面内測定点

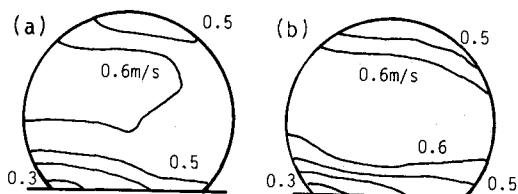


図-5 (a)上流、(b)下流側の風速分布

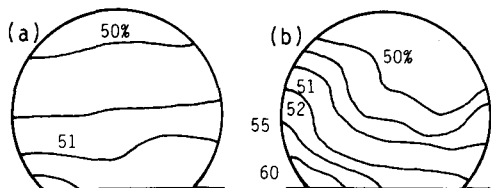


図-6 (a)上流、(b)下流側の相対湿度分布

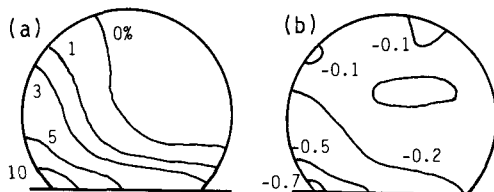


図-6 (a)相対湿度差、(b)温度差の分布

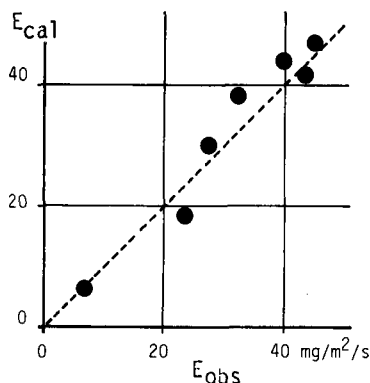


図-8 室内実験結果

この図から、下流側断面 S2の相対湿度分布が、S1断面内に比べてかなり大きくなっていることがわかる。とくに、風速の小さい風洞断面左下隅部で相対湿度の増加が著しい傾向が認められる。図-7 (a), (b)はそれぞれ各断面の同一位置における相対湿度と温度の差を示している。いずれも、S2断面内の値から、S1断面内の値を引いたものである。この図からも、風洞左下隅部で、相対湿度がとくに増加していることがわかる。また(b)から認められるように、その部分の温度も低くなっている。この温度低下は、蒸発で奪われる熱を反映したものと考えられる。すべての実験ケースについて、これらの量の計測を行い、(1)式に基づいて蒸発量を算定した。その値をEcalと書く。一方、土槽の重量変化から直接求められた値をEovsと書く。それらの比較を行った結果を図-8に示す。多少の誤差はあるものの、両者の値はかなり一致しており、この測定法の精度がかなり高いことを示している。

2 野外での蒸発量測定

2-1 測定方法

室内測定では、1つの定まった方向から、ほぼ一定風速で風を与えることができる。しかしながら、野外では、風速は時間によって変化し、風向も一定していない。したがって、風洞内の風速分布は時間的に大きく変動し、風洞断面内の風速 v の分布を求めるのは極めて困難となる。そのため、今回、図-9に模式的に示すように、風洞内の一点で基準風速 v_s を測定し、その値と断面内風速 v との比 r の分布を各断面内で求めることとした。この場合、(1)式を用いて各断面を通過する水分量 $Q_e(i)$ を求めるために必要な各測定点フラックス F は、近似的に次式で求めた。

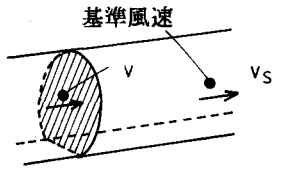


図-9 風速比の測定

$$F(i,j) = \bar{v}_s \cdot F'(i,j) ; F'(i,j) = r(i,j) \cdot M(i,j) \quad \text{-----} \quad (3)$$

ここに、 $\bar{v}_s$ は基準風速 v_s の時間平均値である。野外測定では、(2)式に変えてこの(3)式を用いて、蒸発量を求めることとした。(3)式を用いる場合、多く問題が生ずる。例えば、(3)式中の r が、基準風速 v_s によらず一定であるといえるか、相対湿度 θ や温度 t が、 v_s によってどのように影響されるかなどである。(3)式は、 r 、 θ 、 t が、 v_s によらず一定であることを仮定したものであり、それらが v_s に大きく依存するならば、この式の近似度は極めて悪くなるはずである。野外測定を行うにあたって、まずこれらの仮定が妥当であるかをよく検討しておかねばならない。測定点は、各断面共、図-4に示された28点とした。測定手順は、まず各断面の風速分布を測定し、ついで湿度温度分布を測定した。湿度分布は2断面同時に測定するが、風速分布は1つ1つの面ごとに測定した。各測定点における測定時間は、正確な風速比分布や平均的な温度湿度分布を得るために、少なくとも2～3分要した。この結果、一連の計測にかなり時間がかかることになる。そのため、実用的な観点からは、測定点数はなるべく少なくした方がよい。1つの方法は、測定点数を、断面全体的に減らすことである。また、他の方法は、風洞鉛直中心線上のみを測定する方法である。鉛直中心線上のみ測定した場合、各断面を通る水分量 $Q_e(i)$ は、図-10に示す記号を用いて、以下の式で算定する。

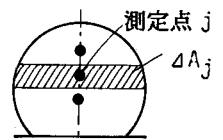


図-10

鉛直方向の測定

$$Q_e(i) = \sum_{j=1}^n F(i,j) \cdot \Delta A_j \quad \text{-----} \quad (4)$$

$F(i,j)$ は、(3)式により求められる。この方法を用いる場合、水分フラックス F の分布が、各断面内で水平方向に層状構造していることが必要である。野外計測では、これら(3)、(4)式を使って $Q_e(i)$ を求める方法および、全体的に測定点を減らす方法各々についても、妥当性を検討した。

2-2 野外測定

野外測定は、埼玉大学構内、岡山県人形峠、茨城県大洗海岸付近の丘陵地の3ヶ所で、各々異なった観点でおこなった。埼玉大学構内では、とくに、実際の風の条件下でも精度良く蒸発量測定ができるかを調べることを主目的とした。そのため図-3に示した実験装置を野外に設置し、装置内試験区間の土槽からの蒸発量を測定した。なお、実際の蒸発量は、土槽の重量変化から求めるが、電子天秤の値は風により強く影響されるため、電子天秤を室内に置き、土槽を運んで蒸発量を測定した。人形峠は、瀬戸内海と日本海との間に位置し、風向が極めて変化しやすい場所である。このような場所でも、どの程度正確に蒸発量が測定しうるかを目的に設定した。茨城県大洗付近の丘陵地では、パン型蒸発計との対応を調べて、本方法の妥当性を検討した。以下、各々の地点について測定結果を述べる。

埼玉大学構内では、季節の異なる6月12日と10月31日に測定した例を示す。まず、基準風速 v_s と、各断面内の測定点風速 v との関係を調べた。基準風速は図-3中を示す下流側測定断面の約50cm後方の、風洞中心付近の風速とした。図-11は、同図中に示す下流側断面内のA, B, 2点の風速 v と、 v_s との関係をみたものである。図から、多少のバラつきはあるものの、断面内風速 v と基準風速 v_s がほぼ線形関係をもっていることが読み取れる。従って、 v_s の大きさが、この程度の範囲であれば、風速比分布により、平均的な風速分布が表現しうるということがわかる。次に、相対湿度および温度と基準風速との関係について調べた。その結果、例えば、早朝みられる露の蒸発時など、空気水分の場所的変化の大きい時を除けば、この程度の風速差による影響は小さいことがわかった。そのため、これらについては、2～3分間の平均値をとれば、風速には影響されないものと考えた。図-12(a), (b)に、10月31日測定の、それぞれ上流、下流側断面内風速比分布を示す。風速比パターンは両断面でやや異なるものの、いずれも、風洞中心部に風速の大きい部分が存在していることがわかる。図-13は、2断面の温度差を示している。図-6に示した室内実験とは異なり、

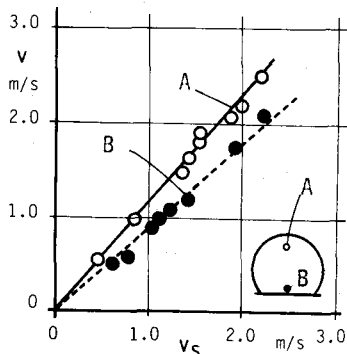


図-11 基準風速と断面内風速

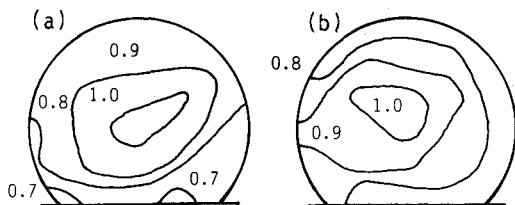


図-12 (a)上流、(b)下流断面風速比分布

温度が低下した範囲がかなり不規則に分布していることがわかる。図-14は、上、下流断面における、水分量 M の差の分布を示している。値は、下流断面の値 $M(2, j)$ から、上流断面の値 $M(1, j)$ を引いたものである。一方、図-15は、各断面内の水分フラックス F の差 ($F(2, j) - F(1, j)$) の分布をみたものである。この図から、断面左上部にかなり大きな水分フラックスの増加が認められる。これは、風洞下面からの蒸発で増加した水分量が、かなり速く上方に運ばれることを示している。

埼玉大学構内と同様な計測を8月6～8日人形峠で行った。ただし、人形峠では裸地上にそのまま風洞を設置し、1mはなれた風洞内2断面で測定した。なお、実際の蒸発量を把握するため、室内実験測定および

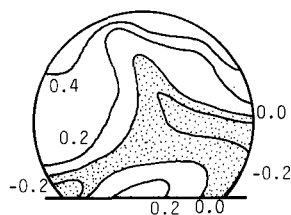


図-13 温度差分布

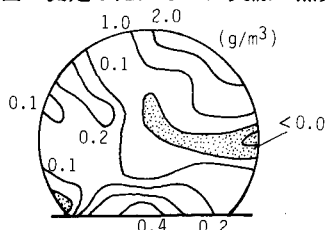


図-14 水分量差の分布

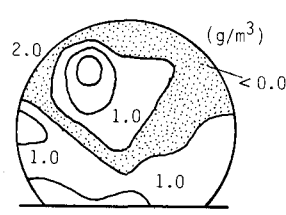


図-15 フラックスの差分布

埼玉大学構内での測定に用いた2個の土槽に付近の第三紀砂層の風化した砂をつめ、その重量変化を調べた。試料は攪乱されることになるが蒸発量の一つの目安になると考えた。風洞は南北方向に設置した。風向が変化しやすいため、北からの風が吹く時のみに測定した。この期間内では8月7日に1ケース測定しえた。図-16に基準風速と、下流側断面内の同図中に示す2点での測定風速との関係を示す。風向がかなり変化する場合であったが、ほぼ線形関係があることがわかる。図-17 (a)、(b)に、上流、下流断面内風速比分布を示す。図-18、図-19は、各々水分量差 ($M(2,j)-M(1,j)$) の分布及び水分フラックス差 ($F'(2,j)-F'(1,j)$) の分布を示す。とくに図-16から、水分フラックスが、風洞底面付近で低下していることが認められる。これは、蒸発により下面から供給される水分が、極めて速く上方に運ばれていくことを意味している。このことは、風向、風速の変化が激しい場の特徴と思われる。

大洗では、人形峠と同様な測定を11月24日～26日にかけ試みた。この場所でも、人形峠と同様、室内実験で用いた土槽に攪乱土（ローム）をつめ、その重量変化を測定することで、蒸発量の目安とした。また、パン蒸発量も測定した。しかしながら、大洗では、風が吹いた時間が短く、断面内風速分布と風洞中心線鉛直方向6点の相対湿度、温度のみ計測しえた。したがって蒸発量は(4)、(5)式に基づいて算定することになる。図-20 (a)、(b)、(c)に上、下流断面鉛直中心線上の風速分布および水分フラックスの差の分布を示す。

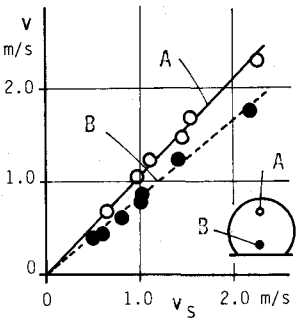


図-16 基準風速と断面内風速

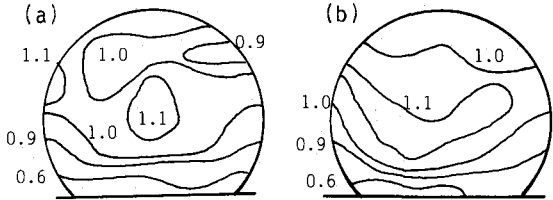


図-17 (a) 上流、(b) 下流側風速比分布

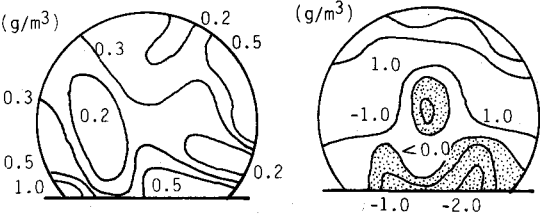


図-18 水分量の差分布 図-19 フラックスの差分布

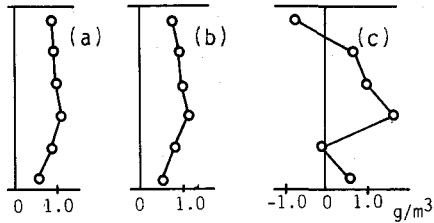


図-20 (a) 上流、(b) 下流側風速比分布、(c) フラックスの差

図-21 測定点分布(a)16点、(b)10点

表-1 測定結果

測定場所	E obs	E pan	測定値			
			E cal (28)	E cal (16)	E cal (10)	E cal (6)
埼玉大学 (6/12)	53	—	46	41	66	4
(10/31)	22	—	29	30	29	17
人形峠	55-80	—	47	58	56	負値
大洗	30-60	42	—	—	—	33

単位 $\text{mg}/\text{m}^2/\text{s}$

以上、埧大構内、人形峠、大洗での測定結果と、土槽の重量変化測定による結果を表-1にまとめて示す。なお、蒸発量算定に用いた各断面内測定点数は、図-4に示した28点の他、図-2 1中に示すそれぞれ16点、10点および風洞中心鉛直6点の4ケースとした。各ケースの測定蒸発量値を、それぞれEcal(28)、Ecal(16)、Ecal(10)、Ecal(6)と書く。また、Eobsとは、土槽重量変化により求められた蒸発量である。ただし、人形峠、大洗では、攪乱試料を用いており、実際の値とは多少異なっていることが考えられる。概して、攪乱試料を充填した直後の蒸発量はかなり大きく、5～6時間後からほぼ一定値で安定する傾向が見られた。表中には、得られた値の範囲を示しているが、全体に大きめの値となっていると思われる。また、Epanはパン蒸発量の値である。この表から、断面内の28点での測定を行った場合、かなり良い値となっていることがわかる。測定点を、16点、10点と減少させても、ある程度満足しうる値が得られている。しかしながら、鉛直6点を測定したケースでは、実測値に近い値となっている場合（埧大構内10月31日、大洗）もあるが、かなり異なる結果となる場合が多い。以上の結果をまとめると、(1)断面内に28点程度の測定点を配置すれば、蒸発量はかなり良く測定しうる。(2)測定点が10～16点程度と少なくなっても、ある程度満足しうる結果が得られる。(3)風洞中心鉛直線上の測定は問題がある、といえる。

3 測定の問題点と今後の発展

以上述べたように、断面内28点程度の測定点を設ければ、蒸発量はかなり精度良く測定しうる。測定機器は持ち運びが可能であり、任意地点での測定ができる。その点、本測定法は有用といえる。しかしながら問題は測定時間である。現状では、断面内28点の測定に要する時間は5～6時間である。一方、この方法は風がなければ使えないし、また風があっても、経験的に言って、ある程度安定した風がふくのは季節によっても異なるが3～4時間程度である。そのため、28点計測は、データをえられるのが困難であり、実際、今回の研究においてもすべてのデータが得られたケースは少なかった。このことから、測定点を10～16程度に減ずる必要がある。この程度に測定点数を減ずれば、測定時間を1/2から1/3にしえ、十分実用性があると考ええる。前述の表-1によれば、測定点を減じてもある程度満足しうる結果が得られており、測定点を減じても良いと思われる。今後、この点について、さらに検討してゆきたいと考える。また、風速が極めて小さい場合には、本方法による蒸発量の測定は不可能である。この場合には別の測定方法が必要である。この方法を考えるために、筆者らは、地表付近の湿度分布を極めて正確に測定しているが、今のところまだ、測定法を提案するまでに至っていない。今後、風速の小さい場合にも測定しうる方法をさらに検討してゆくつもりである。いづれにせよ、今回述べたことにより、風洞を用いる蒸発量測定が、ある程度以上の風速下では、十分用いることが明らかになったと考える。

謝辞

本研究をすすめるにあたり御教示いただいた、研究グループ ANARC (Archaeological Natural Analogue Research Group)のメンバーの方々に記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 例えば、砂田 憲吾、池淵 周一、林地流域における日蒸発散量の推定、土木学会論文集、no.387, pp. 247-254, 1987
- 2) 例えば、福岡 正巳、今村 芳徳、原 忠、地面蒸発散に関する実験的研究、第42回土木学会年講、Ⅱ, pp. 94-95, 1987
- 3) Watanabe, K., Tamaki, K., Matsushima, S., "New technique for measuring evaporation from the ground surface", 2nd. Int. Symp. Field Meas. Geomech., pp. 816-825, 1987
- 4) 渡辺 邦夫、野本 博幸、玉置 英裕、松島庄一、風洞を用いた地表面からの蒸発の直接測定、第42回土木学会年講Ⅱ, pp. 92-93, 1987