

小スケールの蒸発に関する基礎的実験

中央大学大学院

学生会員 ○加藤拓磨

中央大学理工学部 フェロー会員 山田正

正会員 日野幹雄

1. はじめに：水文・気象学において蒸発散量の定量的評価は非常に重要であるが蒸発散量はその観測が困難であることからバルク法などで推定されることが多い。バルク理論は境界層が発達しているときに成立するものであるが多くの場合、例えば樹木の個葉からの潜熱・顕熱量を求めるため未成立条件下でも使用される。近年、ヒートアイランド現象緩和策として森林、水辺、打ち水など気化熱を利用したものも多くミクロスケールでの蒸発量の算定は今後の都市熱環境の問題解決にも一助となる。本研究では風洞実験施設を用いた基礎的な蒸発実験を行いバルク式から得られる蒸発量との比較し、微気象スケールでの蒸発について考察を行った。

2. 実験概要：実験は独立行政法人防災科学技術研究所(茨城県つくば市)内の地表面乱流実験施設の風洞で行った。図1に風洞の概略図を示す。風洞は幅1m、高さ1m、長さ3mで気流の温度、湿度、風速を制御することが可能である。風洞内にはX,Y,Z方向に稼動可能なトラバースがあり、風洞内の気流温度、湿度、風速の鉛直分布を計測できる。本研究では気流の温度、湿度、風速の変化により水の蒸発がどのように変化するかを検証するため風洞の底に2cm厚の水面を敷いた。表1に示す実験項目は流入部0cm地点、高度30cmの地点での設定した気象条件である。気流温度を変化させる場合、比湿を0.01kg/kg、風速を3m/sの一定とし、気流温度を20 から32 まで制御した。蒸発速度は風洞の底の下に搭載されているライシメータの計測データより算出した。本論文での理論蒸発量はバルク式を用いた。

$$E = \rho C_E U [q_{SAT}(T_s) - q_{air}] \quad (1)$$

ここで ρ ：空気密度(1.2kg/m³)、 C_E ：バルク輸送係数(一様水面で0.011)、 U ：風速、 q_{SAT} ：飽和比湿、 T_s ：水表面温度、 q_{air} ：比湿である。本実験では水表面温度を水温(水中の温度)として使用した。

3. 気象条件変化と蒸発速度の反応：図2に気流温度・水温・蒸発速度の時系列、図3に飽和比湿-比湿の差・蒸発速度の時系列を示す。4:00 頃に気流の温度を20 から30に制御することにより水面から高度300mm地点の気流温度と水温が上昇する。その後、定常状態になるのに2時間ほど要している。また気流温度が遷移する間に蒸発速度が瞬間的に増大し、オーバーシュートしていることがわかる。実現象では気象条件は変わり続けるため蒸発速度のこのような瞬間的挙動を把握するのは重要である。

4. 気象条件による蒸発速度・水温の変化：図4に気流温度制御による蒸発速度・水温変化を示す。ここで蒸発速度は「バルク理論で求めた蒸発速

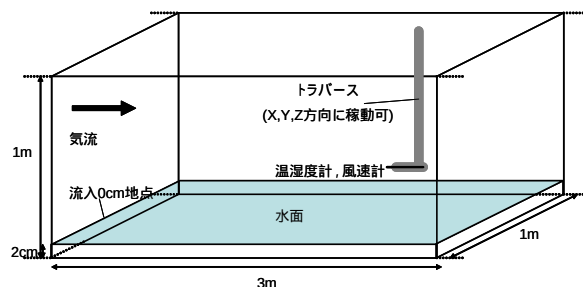


図1 風洞実験装置概略図

表1 実験項目

制御項目	温度(℃)	比湿(kg/kg)	風速(m/s)
温度	温度のみ変化 20・22・24・26・28・30・32	0.01(一定)	3(一定)
比湿	20(一定)	比湿のみ変化 0.006・0.007・0.008・0.009・0.01・0.011	3(一定)
風速	20(一定)	0.01(一定)	風速のみ変化 3・4・5・6・7・8

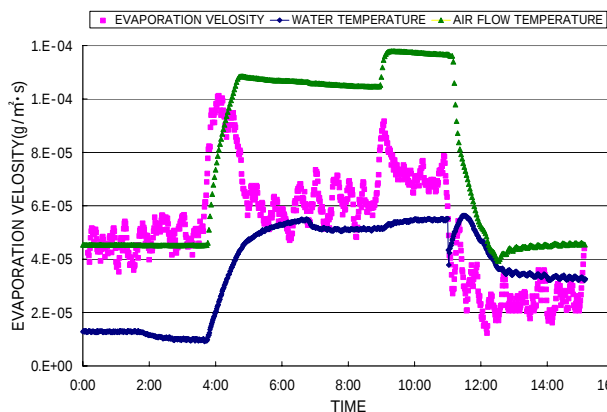


図2 気流温度・水温・蒸発速度の時系列

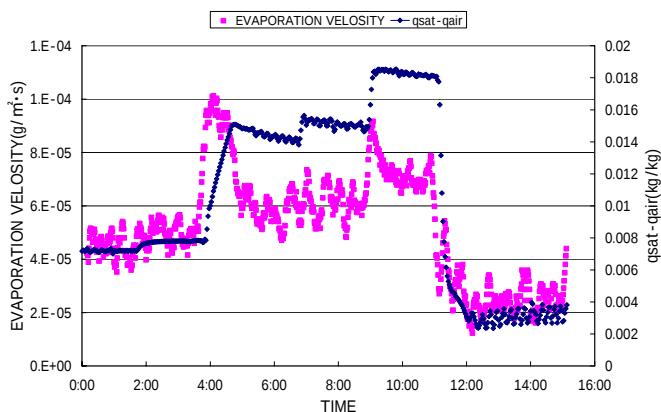


図3 飽和比湿-比湿の差・蒸発速度の時系列

キーワード 蒸発散, バルク式, 風洞実験

〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学大学院 TEL03-3817-1805 E-mail:takuma@civil.chuo-u.ac.jp

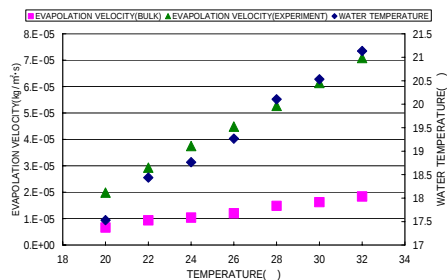


図4 気流温度制御による
蒸発速度・水温変化

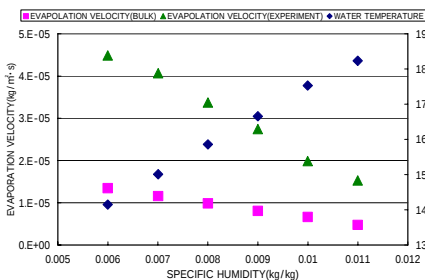


図5 比湿制御による
蒸発速度・水温変化

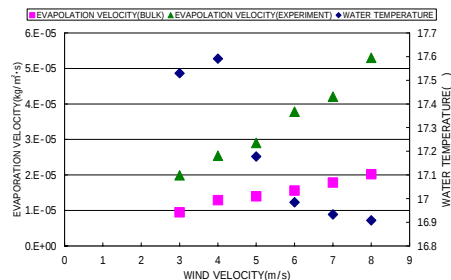


図6 風速制御による
蒸発速度・水温変化

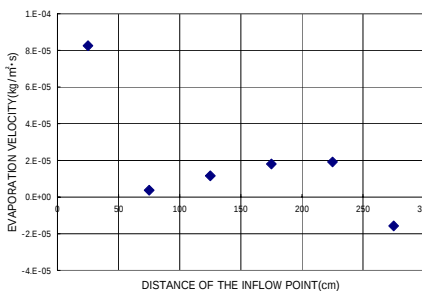


図7 流入部からの距離
と蒸発速度

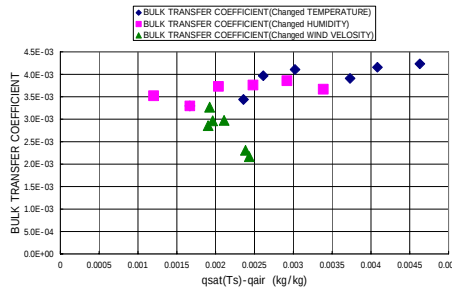


図8 飽和比湿-比湿の差
とバルク輸送係数の関係

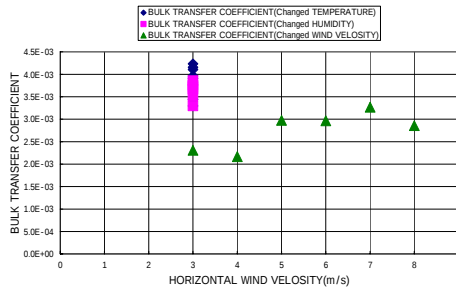


図9 水平風速
とバルク輸送係数の関係

度」と「実験蒸発速度」の2種類をプロットしている。気流温度上昇とともに線形的に理論・実験蒸発速度は増加する。バルク理論と実験の値は異なるが同様の傾向を示しており実験蒸発速度はバルク理論の蒸発速度の3倍から4倍となっている。これは風洞のサイズが小さいためバルク理論が適用できるような境界層の発達ができないためである。水温は気流温度上昇とともに上昇する。気流温度が20 から32 の12 上昇に対して水温は2.5 と温度変化は小さい。これは水面が気流と顕熱交換し水温が上昇すること、水温上昇により $q_{SAT}(T_s)$ が上昇し飽差 ($q_{SAT}(T_s) - q_{air}$) が大きくなることで蒸発ポテンシャルが増加し潜熱が放出され水温が低下すること、この二つの作用バランスがもたらしたためであると考えられる。比湿制御下(図5)では比湿増加とともに蒸発ポテンシャルが減少し蒸発速度は低下する。蒸発速度の低下により水温は上昇する。風速制御下(図6)では風速増加に伴い線形的に実験・理論蒸発速度が上昇する。

図7に流入部からの距離と蒸発速度の関係を示す。これは水面の一部分を覆い隠しその差分から求めたものである。流入部から50cmまでの蒸発速度が特に多く、それより下流では大きくない。本実験では一番下流では蒸発がマイナスとなってしまったがそれほどわずかな蒸発であったといえる。蒸発速度は蒸発面の水蒸気圧と空気の水蒸気圧の勾配に関する拡散層の有効厚さで決まる。流入部では拡散層が薄いため水面の水分子は空気中に蒸発しやすくなる。すなわち蒸発面先端がもっとも蒸発しやすいため蒸発面の距離が短いほど単位面積あたりの蒸発速度が大きいということになる。本研究ではこのようなスケールにおいてもバルク式が適用可能なのかを検証するものである。同様の傾向であることから小スケールの蒸発にバルク式の適応がある程度可能であることが実証された。

5. バルク輸送係数の変化: 図7に飽和比湿-比湿の差とバルク輸送係数の関係を示す。ここでバルク輸送係数は本実験における小スケールの蒸発がバルク理論にのっとると仮定し、実験蒸発速度とバルク理論と比較して算出したものである。気流温度、比湿、水平風速それぞれを制御したときの実験値をプロットしたものである。飽和比湿-比湿の差とバルク輸送係数には線形関係が見られるため気流上昇によりバルク輸送係数が増加することがわかる。図8の水平風速とバルク輸送係数の関係も同様の傾向となっている。(1)式よりバルク理論としては気流温度上昇、比湿低下による $[q_{sat}(T_s) - q_{air}]$ の増加と風速の増加のみで蒸発ポテンシャルを増加させると説明される。しかし本実験では蒸発ポテンシャル増加に伴いバルク輸送係数も上昇している。本実験のような小スケールにおいては気象条件に伴いバルク輸送係数が変化することから小スケールの蒸発ではバルク輸送係数の補正が必要であることを明らかにした。

6. まとめ: 一様水面の蒸発メカニズム解明のため風洞実験を行い、以下の知見を得た。1)気象条件が変化する瞬間に蒸発速度が瞬間的に上昇する。2)様々な気象条件で計測した結果、バルク理論より3倍から4倍の蒸発速度であった。これは境界層が発達過程の中であるため拡散層の有効厚さが薄く水分子が蒸発しやすい状態であるためからである。3)蒸発ポテンシャルの増加に伴いバルク輸送係数が増加した。本実験により小スケールの蒸発においては気象条件とバルク輸送係数に関係性があるが証明された。これらのことより小スケールの蒸発ではバルク輸送係数の補正の必要があるといえる。

参考文献: 1)近藤純正：水環境の気象学 - 地表面の水収支・熱収支 - , 朝倉書店, 1996 .

2)上田政文：湿度と蒸発 - 基礎から計測技術まで - , pp.89, 2000 .