

一様水面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
防災科学技術研究所 非会員 中根和郎

(独) 土木研究所 正会員 手計太一
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. 目的 : 水の蒸発による気化熱はものから熱を奪い、蒸発した水蒸気は凝結し、ときには雨へと変化する。水文学において蒸発散量の定量的評価は気象の熱環境問題緩和策としての森林、河川、打ち水など気化熱を利用した対策や気象予測をするうえで非常に重要である。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。バルク理論は乱流状態であるときに成立するものであるが多くの数値計算では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。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。

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

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・蒸発速度の時系列を示す。4:00頃に気象条件として制御した気流の温度を20から30に変化することにより流入部から250cm、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。また気象条件が遷移する間には蒸発速度が瞬間的に大きくなるのがわかる。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と考ええる。

4. 気流温度・比湿・風速鉛直分布 : 水面の蒸発メカニズム解明のため気流温度、比湿、水平風速の鉛直プロファイルを計測した。設定した気象条件は気流温度20、比湿0.01kg/kg、風速3m/sである。温度の鉛直分布(図3)は50mm

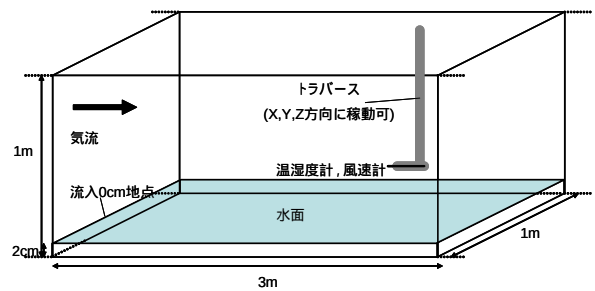


図1 風洞実験装置概略図

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

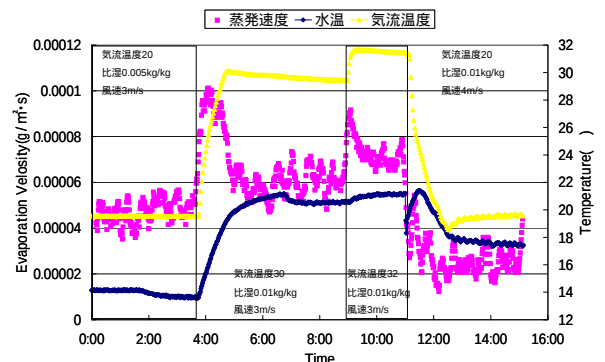


図2 気流温度・水温・蒸発速度の時系列

キーワード 蒸発散, バルク式, 風洞実験

連絡先 〒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

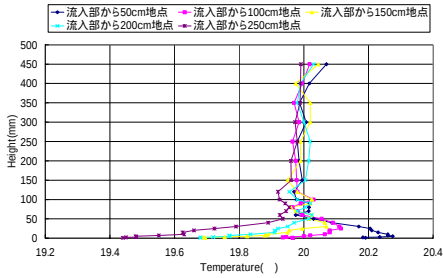


図3 気流温度鉛直分布

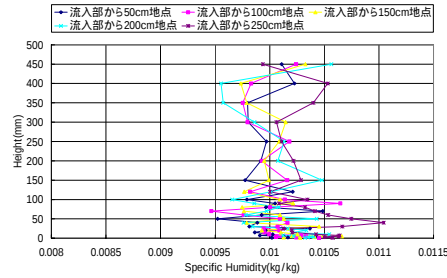


図4 比湿鉛直分布

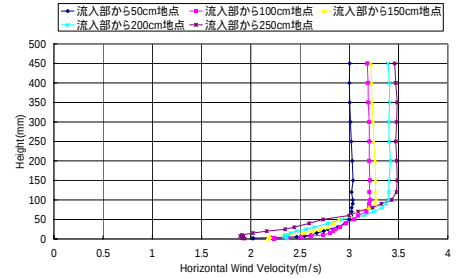


図5 水平風速鉛直分布

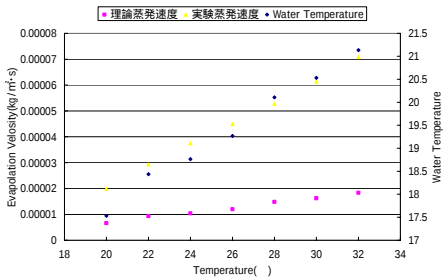


図6 気流温度制御による
蒸発速度・水温変化

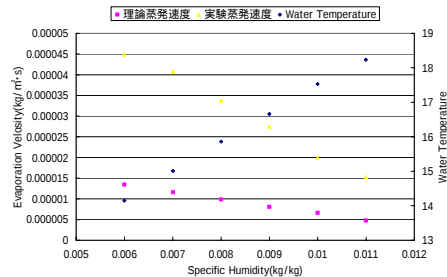


図7 比湿制御による
蒸発速度・水温変化

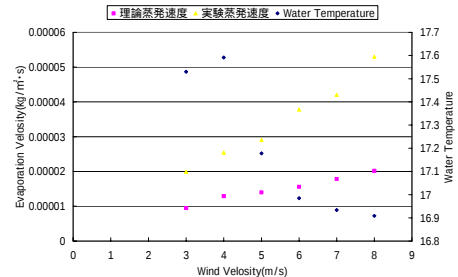


図8 風速制御による
蒸発速度・水温変化

以上の高度で温度が一樣になっておりそれ以下の高度では流入部からの距離に応じて温度分布が低くなっている。これは流入部手前の風洞の床の温度が気流温度より高く約 22℃ ということと、水面と気流間の顕熱作用により流入部から距離があるほど温度が下がるためである。比湿の鉛直分布(図4)は鉛直方向、水平方向とも概ね一樣になっている。水の蒸発による影響は鉛直分布には見られない。水平風速(図5)は水面付近で高度が上がるにつれ対数的に上昇し、ある高度から一樣となる。流入部から 50cm 地点においては高度 50mm 以上で一樣でそれ以下の高度で対数的な分布となっている。流入部からの距離が増すにつれ風速分布が一樣となる高度が高くなる。

5. 気象条件による蒸発速度・水温の変化: 図6に気流温度制御による蒸発速度・水温変化を示す。気温が上昇すると線形的に理論・実験蒸発速度ともに上昇する。実験蒸発速度は理論蒸発速度の約3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と考えられる。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。図7に比湿制御による蒸発速度・水温変化を示す。比湿が増加するにつれ飽差が小さくなるため蒸発速度は低下する。蒸発速度の低下は潜熱の低下であるため水温は上昇する。実験蒸発速度は理論蒸発速度に比べ約3倍である。図8に風速制御による蒸発速度・水温変化を示す。風速上昇とともに線形的に実験蒸発速度、理論蒸発速度ともに上昇する。本実験においては気流温度制御、比湿制御時と同様、実験蒸発速度は理論蒸発速度の約3倍であった。

6. まとめ: 一樣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) 気流温度の鉛直分布から気流と水面間で潜熱・顕熱作用が働き、気流温度と水温に互いに影響を与えることを捉えた。風速分布は水面付近で対数分布となる。3) 気象条件が変化することによる蒸発速度の挙動を計測した。本実験ではバルク理論より約3倍の蒸発速度の蒸発している。

参考文献: 1) 加藤拓磨・手計太一・山田正・日野幹雄: 林内における熱収支・微気象の理論計算, 第17回数値流体力学シンポジウム, E1-4, 2003. 2) 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, pp.350, 1996.