

小規模水面における水の蒸発メカニズム に関する基礎的実験

FUNDAMENTAL EXPERIMENT OF EVAPORATION MECHANISM
ON SMALL SCALE WATER SURFACE

加藤拓磨¹・中根和郎²・山田正³

Takuma KATO, Kazurou NAKANE and Tadashi YAMADA

¹正会員 工修 中央大学 理工学部土木工学科 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

²正会員 独立行政法人防災科学技術研究所 水・土砂防災研究部 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台 3 番地 1 号)

³フェロー会員 工博 中央大学 理工学部土木工学科 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

Evapotranspiration is usually determined by the heat budget based on air temperature, surface temperature, humidity and wind speed. Observing evapotranspiration directly is impossible therefore various methods for observing evapotranspiration indirectly are proposed. This value is important for clarifying the heat environment in urban areas. However the basic mechanism of evapotranspiration is still unknown. Therefore fundamental experiment of evaporation mechanism on small scale water surface was carried out. Through this experiment the followings was obtained. 1) From the vertical profile of air current temperature, specific humidity and $qSAT(T_w)-q_{air}$ water temperature decreased due to the latent heat release and the air current temperature decreased due to the sensible heat. 2) From the small scale experiment evaporation during development of boundary layer C_E is dependent on both wind speed and $qSAT(T_w)-q_{air}$. 3) Experiment during nonsteady state the bulk equation cannot be applied. .

Key Words: *Evaporation flux, Evaporation coefficient, Wind Tunnel*

1. はじめに

蒸発散量は日射・気温・湿度の気象因子、土壌・水面等の表面が織り成す熱収支バランスによって決まる。また蒸発散量は降水のように見ることはできず、直接測定することができない。これまでに蒸発散量の測定法¹⁾は水収支法として土壌水分減少法、ライシメータ法、微気象法として熱収支法、空気力学的方法、組み合わせ方法、渦相関法、補完法²⁾などが提案されており、それぞれの観測法は測定時間間隔、測定精度、測定装置の価格、測定の難易度がそれぞれ異なっており、場合によって最適な方法を選ばなくてはならない。蒸発散量の定量的な算出は土木、水文、気象、農業、環境さまざまな分野においては非常に重要であり、特に近年では熱環境問題で気化熱を利用した対策³⁾が多いため、その評価を行う研究が増えている。森林・水辺の増加による水の気化熱を誘い、熱環境を緩和させる試みが増えてきている。風の道の議論などもあり、気化熱発

生の効率が高い都市計画を考える上で小規模スケールの蒸発の挙動を理解する必要がある。

成田ら⁴⁾は新宿御苑にて熱収支観測、渦相関法により顕熱および潜熱フラックスの測定を行い、体感的に感じる涼しさは、気温差よりも放射量の差であることを定量に示した。神田ら⁵⁾⁶⁾は明治神宮の森、銀座オフィスビル街にて放射収支・熱収支を実測しボーエン比法、渦相関法から顕熱・潜熱フラックス算定し、森林内では正味放射量の約 7 割が蒸発潜熱に変換されていること、オフィス街では人工的な潜熱が存在することを明らかにした。これらの計測は微気象スケール、そして特に都市部においては熱源・冷源が様々入りこんでおり、渦相関法による蒸発フラックスが蒸発面からの影響のみだけではなくており、それぞれのもつ潜在的なフラックス量を算定するには困難となっている。

蒸発は水があれば至る所で起こる現象であるが海洋ならば水が無尽大にあるためポテンシャル蒸発量は安

定する．土壌環境を踏まえた蒸発量の算定には土壌の乾燥などで不確実性な要素がたくさんあるためにその算定は容易ではない．特に複雑な構造を持つ都市部における蒸発は小規模スケールにおける蒸発の足し合わせとみなすことができ，その算定は困難である．そこで本稿では蒸発の基本構造を理解するため，蒸発の問題をシンプルにし，水面のみが存在するときの小規模スケールでの水の蒸発の基本的な挙動・メカニズムの解明を行った．

蒸発速度 γ 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气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一般的に使われているバルク式⁸⁾が適応可能なのかを検証を行った．

2．実験概要

(1) 実験施設

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，写真-1に実験の様子を示す．風洞はX方向に全長9m，測定部までの助走区間が3m，測定部は幅1m，高さ1m，長さ3mで送風・冷却・加熱・加湿機により気流の温度，湿度，風速を制御することが可能である．本研究では気流の温度，湿度，風速の変化による水の蒸発の挙動を捉えるため，風洞内の床に幅1m，長さ3m，高さ2cmの亚克力製のプールを敷いた．風洞内で風を発生させると水面が波打ち，水がこぼれるため実験条件における最大風速8m/s時にこぼれない限界水深1.8cmを実験水深とした．蒸発により水深が下らないよう実験CASE終了毎に水を注ぎ足した．

(2) 実験項目

風洞内では気流温度，湿度，風速が空間的に異なるため，実験項目は上流端からの距離0cm地点の高度30cm地点の値を気象条件として設定する．実験は定常実験と非定常実験を行なわれた．表-1に実験項目を示す．すべての定常実験は気象条件を気流温度20℃，比湿8g/kg，風速3m/s，水面の長さ300cmを基準とし気流温度，相対湿度，風速の気象因子の空間分布，蒸発量を計測した．気象因子の空間分布を計測する際にはこの基準とした条件で計測した．蒸発量の計測では気象条件による蒸発量の変化をみるため気流温度，湿度，風速を変化させた．例えば，気流温度を変化させる場合，比湿を8g/kg，風速を3m/sの一定とし，気流温度を16℃から30℃まで2℃ずつ制御した．ここで比湿は

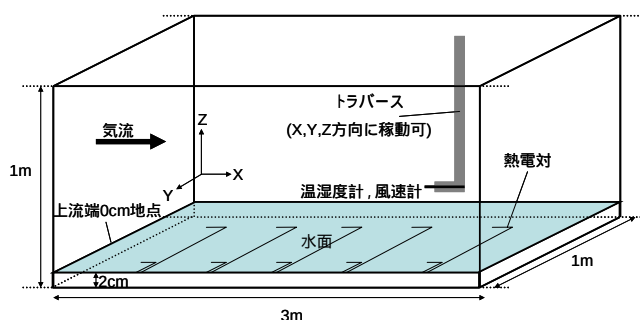


図1 風洞実験装置外略図

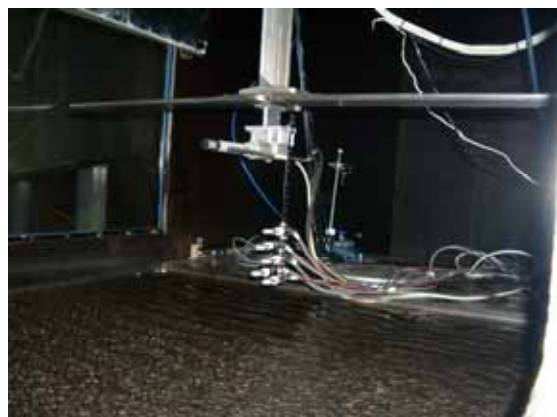


写真1 実験の様子

表-1 実験項目

	計測項目	条件制御項目			
		気流温度[℃]	湿度[g/kg]	風速[m/s]	水面の長さ[cm]
定常実験	気象因子の空間分布	20(一定)	8(一定)	3(一定)	300(一定)
	蒸発量(温度の変化)	16・18・20・22・24・26・28・30	8(一定)	3(一定)	300(一定)
	蒸発量(湿度の変化)	20(一定)	6・7・8・9・10・11	3(一定)	300(一定)
	蒸発量(風速の変化)	20(一定)	8(一定)	3・4・5・6・7・8	300(一定)
	蒸発量(水面面積の変化)	20(一定)	8(一定)	3(一定)	0・30・60・90・120・150・180・210・240・270・300
非定常実験	蒸発量(温度・湿度の変化)	ランダム	ランダム	3(一定)	300(一定)

設定する値に対して予め相対湿度を決めておく．水面面積のサイズによる蒸発量の変化を計測するため，水面をビニールシートで覆い水面の面積を広げるようにX方向に0cm，30cmと300cmまで30cmずつ変化させた．非定常実験では気象条件の変化に伴う蒸発量の変化をみるためにランダムに変化させた．

(3) 計測項目

風洞内にはX,Y,Z方向に移動可能なトラバースがあり，風洞内の気流温度，相対湿度，風速の空間分布を計測でき，上流端から25，75，125，175，225，275cmの地点で鉛直分布を水面から8mm間隔で計測した．プールの水の中に熱電対を10箇所に設置し，水温を計測した．蒸発量は風洞のプール下に搭載されているライ

シメータ(分解能 0.05kg)の1秒インターバルの計測データを15分間の移動平均し、算出した。定常実験では定常状態にするために実験条件に設定した後の2時間以上経過したときの計測データを使用する。

(4) バルク式

本論文での理論蒸発量としてバルク式⁸⁾を用いた。

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

ここで ρ : 空気密度(1.2kg/m³) , C_E : バルク交換係数(一様水面で 0.011) , U : 風速 , q_{SAT} : 飽和比湿 , T_w : 水表面温度 , q_{air} : 比湿である。バルク理論は十分に広く一様な地表面上で成立し、本実験においては未成立であるが比較対象として用いた。本実験の定常実験においては大気・水面が定常状態になるまで時間が経過させるため、プールの水がよく混合されているとみなし水表面温度ではなく水温(水中の温度)を使用した。本稿では以後 $q_{SAT}(T_w) - q_{air}$ を乾燥度と記す。

(5) 本実験の特性

図-2に風洞内の風速分布を示す。上流端からの距離によらず水面付近の風速は低く、100mm以上で一様の分布となり300mm以上から分布が乱れる。これは水面から600mm以上の高さにライトがあり気流が乱れるためである。このことから計測データは300mm付近までを使用することとする。レイノルズ数 Re は特性速度 U を 3m/s , 特性長さ L を 1m , 動粘性係数 ν を $1.8 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ (20 の空気) とすると 1.7×10^5 である。

図-3に各上流端からの距離の風速分布とその対数近似曲線を示す。上流端からの距離125cmまでは対数分布則⁹⁾が成立するが、それより下流では流速分布が対数分布則からはずれる。これは風洞全体の距離が十分ではないために風洞中央あたりから壁法則成分に後流則成分が合成された流速分布になっていると考えられる。

図-4に風速が主流 U_∞ (本実験では高さ30cm付近の風速)の95%に達する位置で境界層厚さ $\delta(X)$ を定義しプロットした風速分布を示す。 X とともに境界層厚さが高くなっており、十分に発達した流れになるまでの助走区間であることがわかる。

3. 実験結果

(1) 定常状態における気流温度・比湿の鉛直分布

図-5に気流温度の鉛直分布を示す。上流端からの距離によらず50mm以上の高度で温度が一様になっており、それ以下の高度では流入部からの距離に応じて温度が低くなっている。図-6に比湿の鉛直分布を示す。鉛直分布をみると、どの地点においても水面付近の比湿が最も高く、全体的にみれば上流端からの距離が短い地

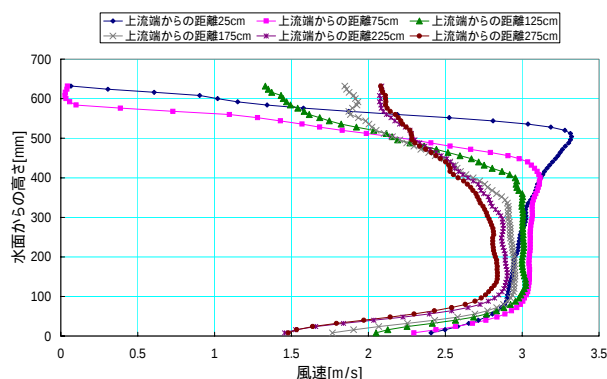


図-2 風洞内の風速分布

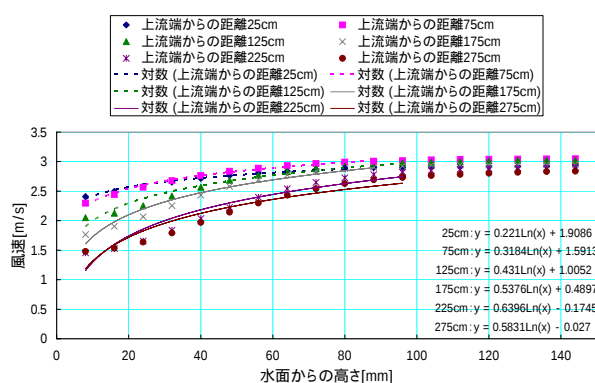


図-3 各上流端からの距離の風速分布とその対数近似曲線

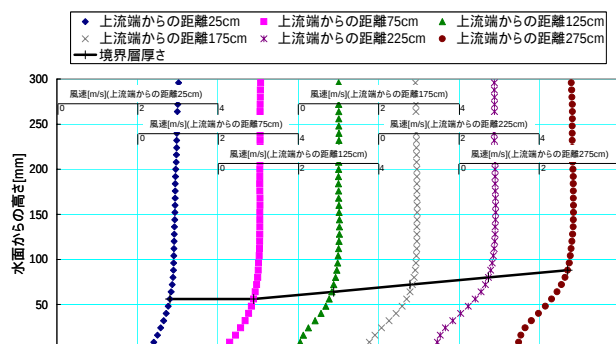


図-4 各上流端からの距離の風速分布と境界層厚さ

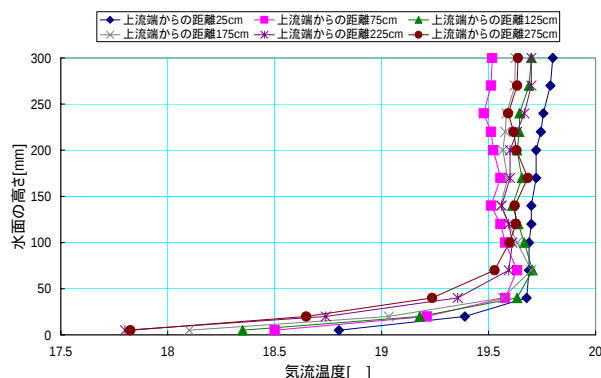


図-5 気流温度の鉛直分布

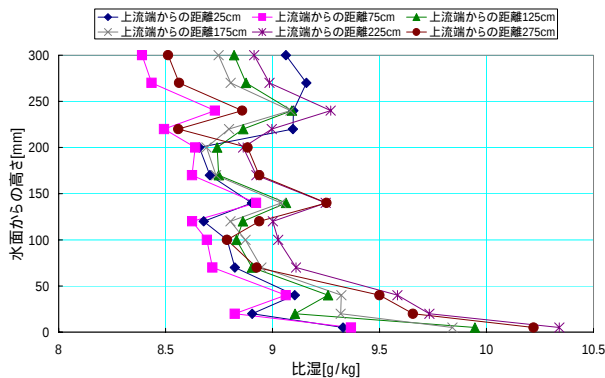


図-6 比湿の鉛直分布

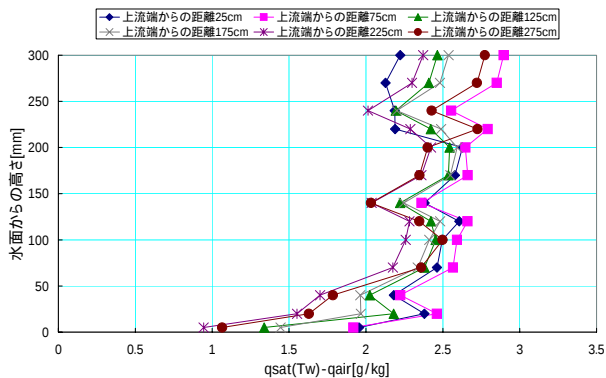


図-7 乾燥度(qSAT(TW) - qair)の鉛直分布

点は比湿の値が低く、下流に向かうほど値が大きい。

図-7 に乾燥度($q_{SAT}(T_w) - q_{air}$)の鉛直分布を示す。水面付近の乾燥度は上流で高く、下流で低い。これらのことから流入部からの気流が水面で潜熱放出を促し、蒸発するとともに水表面温度を低下させ、蒸発は比湿を増加、乾燥度を低下させ、低下した水表面温度は気流温度を低下させていると考える。

(2) 定常状態における気象条件の違いによる蒸発フラックス・水温の変化

図-8 に気流温度制御による蒸発フラックス・水温変化を示す。ここで蒸発フラックスは「バルク式で求めた蒸発フラックス」と「実験蒸発フラックス」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・実験蒸発フラックスは増加する。風洞内で境界層が成立していないこの本実験でバルク式のバルク交換係数を一様水面での一般的な値 0.011 を使用しているため、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、実験蒸発フラックスはバルク理論の蒸発速度の2~3.5倍となっている。水温は気流温度上昇とともに上昇し、気流温度が16 から30 で14 上昇しているのに対して水温は4.5 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が、水温上昇により $q_{SAT}(T_w)$ が上昇し、乾燥度($q_{SAT}(T_w) - q_{air}$)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ためである。図-9 に比湿制御による蒸発速度・水温変化を示す。比湿増加とともに乾燥度が減少し蒸発ポテンシャルが低下する。蒸発フラックスの低下により水温は上昇する。図-10 に風速制御による蒸発フラックス・水温変化を示す。風速増加に伴い線形的に実験・理論蒸発フラックスが上昇する。

(3) 定常状態におけるバルク交換係数の変化

図-11 に風速 U と乾燥度($q_{SAT}(T_s) - q_{air}$)を乗じたものとバルク交換係数 C_E の関係を示す。ここでバルク交換係数 C_E は本実験における小スケールの蒸発がバルク理論に則ると仮定し、実験蒸発フラックス E とバルク式から算出したものである。風速 U と乾燥度($q_{SAT}(T_s)$

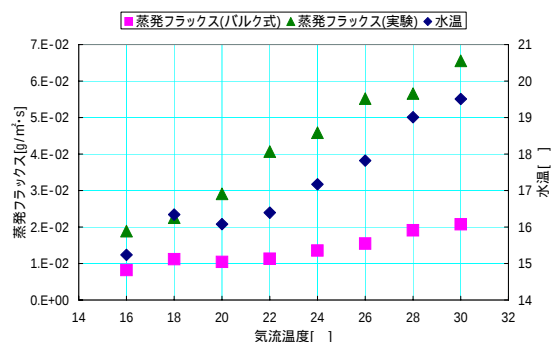


図-8 気流温度制御による蒸発速度・水温変化

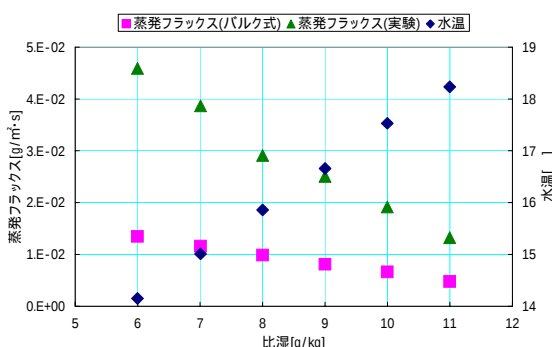


図-9 比湿制御による蒸発速度・水温変化

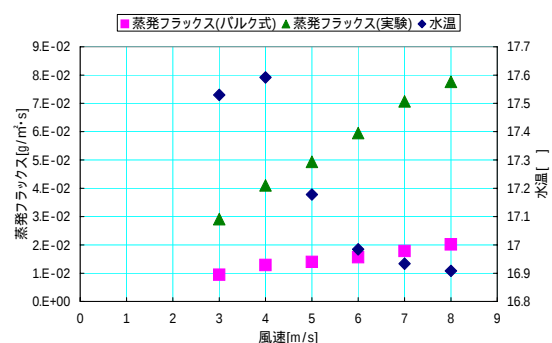


図-10 風速制御による蒸発フラックス・水温変化

- q_{air})を乗じたものが増加する、つまり蒸発フラックスが増加しやすい条件になるとバルク交換係数 C_E が増加する。このことから本実験のような小スケールで境界層が発達中の蒸発はバルク交換係数 C_E が風速と乾

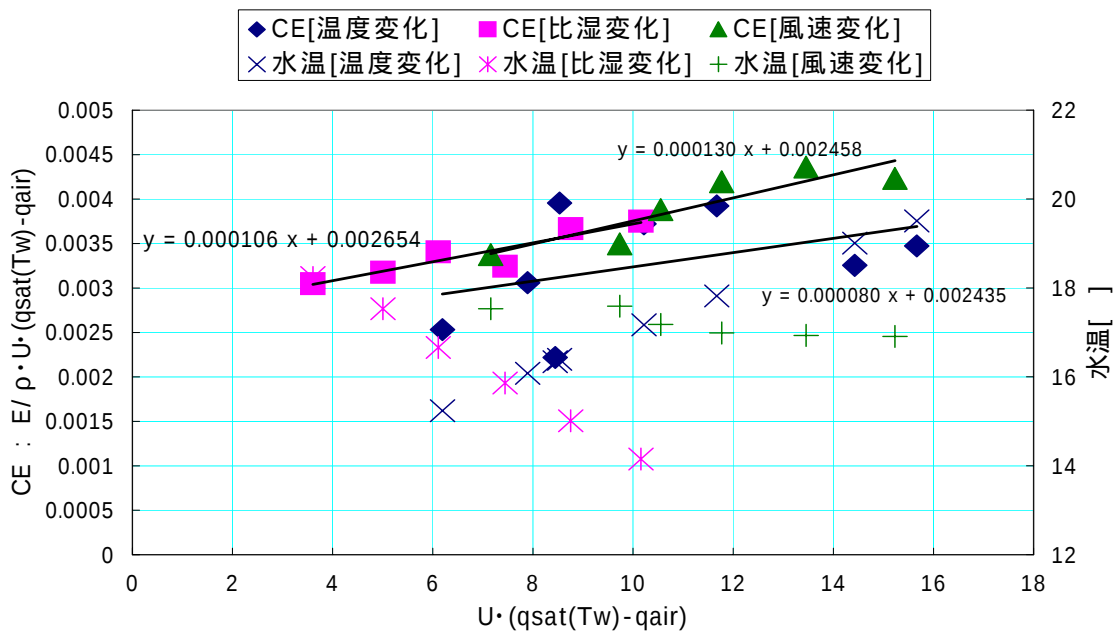


図-11 $U \cdot (q_{\text{SAT}}(T_s) - q_{\text{air}})$ とバルク輸送係数 CE ・水温の関係

燥度に依存することがわかる．つまり大気安定度に依存すると考えられる．

(4) 定常状態における水面の長さの違いによる蒸発フラックスの変化

図-12 に流入部からの水面の長さとの蒸発フラックスの関係を示す．流入部からの水面の距離を 30cm ずつ拡大して蒸発面が長くなることで 1 秒あたりの蒸発量が上昇する．図-13 に水面区間と蒸発フラックスの関係を示す．ここで各区間の蒸発フラックスは図-12 の蒸発フラックスの差分から求めた．各水面区間の単位面積あたりの蒸発フラックスをみると上流から下流方向に蒸発フラックスが減少している．これは図-7 で示すように気流が下流に行くに従い、乾燥度が低くなっていることから leading-edge 効果^{10)・11)}の現象が起こっていると考えられる．図-14 に風速の積算値と蒸発フラックスの積算値の関係を示す．ここで蒸発フラックスは 30cm ごとの各区間の蒸発フラックスを 50cm の水面サイズに計測データを線形補間したものである．ここで横軸は図-4 における風速の鉛直分布を上端からの距離 25cm から 275cm まで積算していった値である．縦軸は水面長さ 50cm から 300cm の蒸発フラックスを積算したものである．この図より各区間の蒸発フラックスは使われる風速が水面に近ければ近いほど直線に近い分布になることがわかる．そして本実験において計測された最も水面に近い 8mm の風速が最も比例関係にあることがわかる．バルク式では代表風速を使用し、その量を算出するが境界層が発達中の条件では水面ギリギリの風速に依存していることが示された．

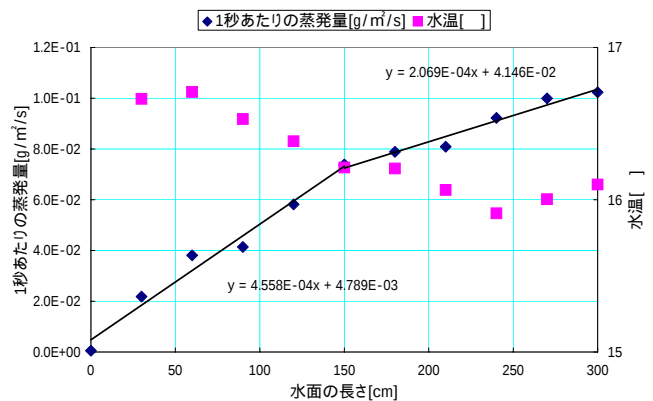


図-12 流入部からの水面の長さとの 1 秒あたりの蒸発量の関係

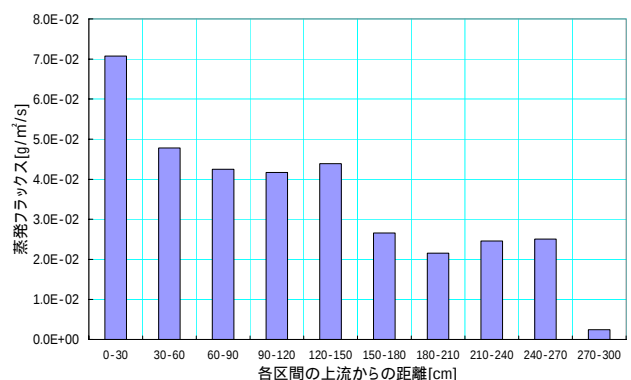


図-13 各水面区間と蒸発フラックスの関係

(5) 非定常状態における気象条件変化と水温・蒸発フラックスの反応

図-15 に気流温度・水温・蒸発フラックスの時系列

s]とマイナスを示しており、水面温度と気流温度の関係によっては凝結が起こりえる現象を捉えた。

4. まとめ

小規模スケールの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) 定常実験において気流温度・比湿・風速を制御し、蒸発フラックス変化をみるとパルク式で算出した蒸発フラックスと同様の傾向を示した。
- 2) 小規模で境界層が発達中時の蒸発ではパルク交換係数 C_E が風速と乾燥度に依存した傾向を示した。
- 3) 上流端から各区間で蒸発フラックスを算出すると上流から下流方向に蒸発フラックスが減少している。各区間の蒸発フラックスは各区間の水面から付近の風速と線形的な関係にある。
- 4) 非定常状態における蒸発実験では蒸発フラックスがオーバーシュートし、パルク式では適応できない。

謝辞：本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金基盤研究(B)及び中央大学共同研究プロジェクトの助成を受け実施された。ここに感謝の意を記す。

参考文献

- 1) 矢野友久：蒸発散(その4) - 蒸発散量の測定法 - , 農業土木学会論文集, 57(7), pp.623-628, 1989.
- 2) 金子大二郎・日野幹雄：リモートセンシングを用いた分布型広域補完法の提案 - 気温推定法を応用した補完法による広域実蒸発散量の算定 - , 水文・水資源学会誌, 10(4), pp.337-348, 1997.
- 3) ヒートアイランド対策関係府省連絡会議：ヒートアイランド対策大綱, 2008.
- 4) 成田健一・三上岳彦・菅原広史・本條毅：新宿御苑における蒸発効果と温熱環境の実測, 環境情報科学論文集, Vol.18, pp.253-258, 2004.11
- 5) 神田学・森脇亮・高柳百合子・横山仁・浜田崇：明治神宮の森の気候緩和機能・大気浄化機能の評価 (1)1996年夏期集中観測, 天気44(10), pp.713-722, 1997.
- 6) 神田学・高柳百合子・横山仁・森脇亮：銀座オフィス街における熱収支特性, 水文・水資源学会誌, Vol.10 No.10, 1997.
- 7) 上田政文：湿度と蒸発 - 基礎から計測技術まで - , pp.89, 2000.
- 8) 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.
- 9) 日野幹雄：流体力学, 朝倉書店, 1992.
- 10) Oke, T., R.,: Boundary Layer Climate, Methun & CoLTD, 1978.
- 11) 近藤由美, 神田学：気象モデルのための都市植生のオアシス効果のモデリング, 第62回年次学術講演会プログラム, 2-085, 169-170, 2007.

(2008年9月30日 受付)

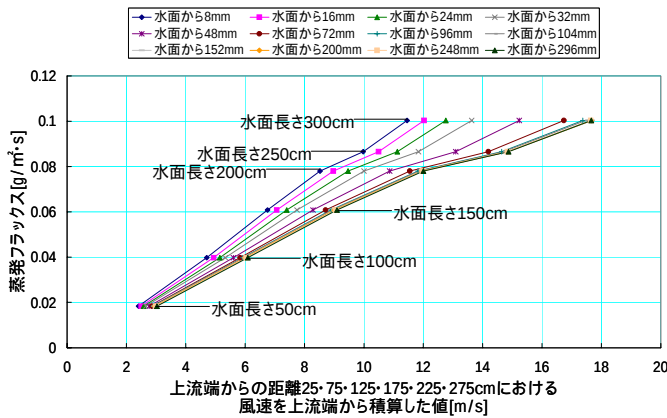


図-14 風速の積算値と蒸発フラックスの積算値の関係

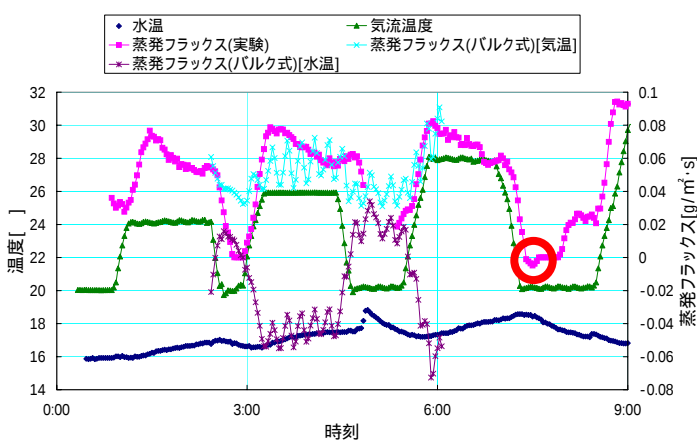


図-15 気流温度・水温・蒸発フラックスの時系列

を示す。参考として蒸発フラックス(パルク式) [気温・水温]は図-11で得られたUに乾燥度をかけたものとパルク交換係数 C_E の関係から求めたものをプロットしているが湿度を一部欠測したため図面中の前半と後半が欠けている。気流温度を20度から30度にランダムに制御することにより水温はその気流温度の挙動にあわせて変化する。しかし水温はプールの水の熱容量が大きいため、気流温度に対してゆっくりと変化するためパルク式(水温)では蒸発を全く表現することができない。水温が安定する定常実験では表現できたが、非定常の実験では水温ではなく水面温度を計測しなければならないと考えられる。またパルク式(気温)と比較すると実測とのオーダーは一致する。しかし気流温度が急激に上がるとそれに合わせ蒸発フラックス(実験)が上昇し、気流温度が急激に下がると蒸発フラックス(実験)が急激に低下するというのはパルク式(気温)では表現不可能であり、蒸発フラックスの変動がオーバーシュートしていることがわかる。気流温度が急激に低下することで気流の比湿が飽和状態になり、蒸発ではなく凝結している可能性がある。特に赤丸で示した部分では蒸発フラックスが最小値-0.049[g/m²・