福井大学リポジトリ
UNIVERSITY OF FUKUI REPOSITORY

擬似非定常風速下の蒸発フラックス評価

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2013-08-09 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 寺崎, 寛章, 福原, 輝幸, 門野, 浩二, 中根, 和郎, TERASAKI, Hiroaki, FUKUHARA, Teruyuki, KADONO, Koji, NAKANE, Kazurou メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10098/7690

擬似非定常風速下の蒸発フラックス評価

EVALUATION OF EVAPORATION FLUX UNDER QUASI-UNSTEADY WIND VELOCITY

寺崎寛章[1]・福原輝幸[2]・門野浩二[3]・中根和郎[4]

Hiroaki TERASAKI, Teruyuki FUKUHARA, Koji KADONO and Kazurou NAKANE

[1]学生会員　工修　福井大学大学院　工学研究科博士後期課程（〒910-8507　福井県福井市文京３丁目９番地１号）
[2]正会員　工博　福井大学教授　工学部建築建設工学科（〒910-8507　福井県福井市文京３丁目９番地１号）
[3]正会員　工修　滋賀県警　滋賀県警察科学捜査研究所（〒520-0106　滋賀県大津市唐崎１丁目34番地３号）
[4]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）

The present paper describes a new method to precisely calculate hourly evaporation flux under quasi-unsteady wind velocity using the wind tunnel that can supply a set of high/low speed winds by turns for every set-up period. Soil columns was used for the evaporation experiment and Chao soil and Toyoura standard sand were used for the experiment. The difference in the hourly evaporation flux, E_{vh}, became no less than 12-18% by changing the combination of the high/low speed winds, regardless of the kind of soil, although the average wind velocity, V_{wm}, was the same for all the wind-velocity combinations. This fact is attributed to the nonlinearity of the relation between the evaporation coefficient, α_v, and wind velocity. It is found that E_{vh} calculated using α_v for the high and low wind velocities is more accurate than that calculated using α_v for V_{wm}.

Key Words： *quasi-unsteady wind，hourly evaporation flux，evaporation coefficient，chao soil*

１．はじめに

蒸発に関連する問題は土木工学に限っても，水資源の保全，農業用水の水管理，塩害，路面凍結，地球・都市の熱環境などの多岐に亘り，蒸発量を正確に評価することは，様々な分野に有益な情報をもたらすことが期待される．通常，蒸発量の直接測定（水収支法）にはライシメータや蒸発パンが用いられる．ライシメータによる計測は長期観測には有効であるが，齊藤・山中[1)]は降雨時や降雨直後の蒸発量は極端に上昇もしくは下降傾向があることを示した．また蒸発パンによる計測は，簡易かつ安価であるが，多くの人的労力を要する．

他の直接測定として，渦相関法[2)-5)]は乱流計測から得られる蒸発フラックス（瞬間値）の時間積分より蒸発量を計算し，陸(海)−大気間の顕熱・潜熱輸送のみならず，CO_2などの微量気体の輸送現象解明に利用されている．測定に際しては，2成分の風速を検出する必要があるので，1方向成分の風速計に比べて，風速計の据付調整が難しくなる．また，渦相関法による水蒸気輸送フラックスが，蒸発面からの蒸発量をどの程度まで反映しているかは検討の余地があり，精度向上のためには多点同時測定が必要となる．

実際には，種々の気象観測機器から得られるデータを基に，地表のエネルギー収支式より間接的に蒸発量を推定するのが一般的である[6)-7)]．この方法での蒸発量の精度は言うまでもなく，気象観測，地中熱伝導フラックスおよび顕熱の測定精度に依存する．

加えて，野外観測には多くの制約（電源の確保，電気の質，過酷な気象条件，地形，埃，観測機器の維持・管理）が付きものであり，長期に亘る正確な蒸発量測定は容易ではない．

さらに，野外では風速が瞬時に変化するため蒸発量の算定および誤差の評価を難しくさせる．例えば，著者らは豊浦標準砂を用いた擬似非定常風下（高速と低速の風を繰り返し送る）の蒸発実験[8)]により，平均風速は同じでも高−低風速の組み合わせにより，時間蒸発量に最大12%の違いが生じることを示した．

そこで，本論文ではこの時間蒸発量の違いの原因を明らかにするために，チャオソイル（代表的な中国塩害土壌の一種）および豊浦標準砂を対象として風速が変化する際の蒸発現象（蒸発の過渡現象）を詳細に調べるとともに，新たな時間蒸発フラックスモデルを提案する．

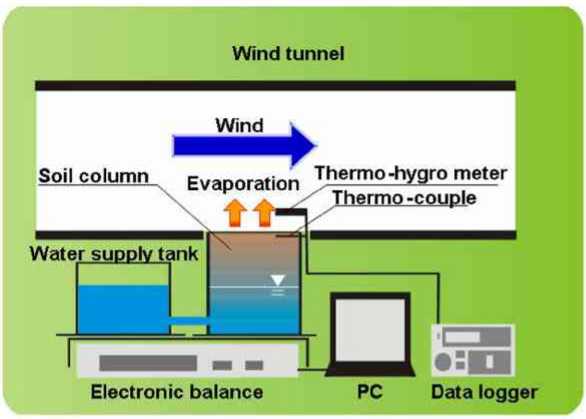

図-1　風洞実験概要

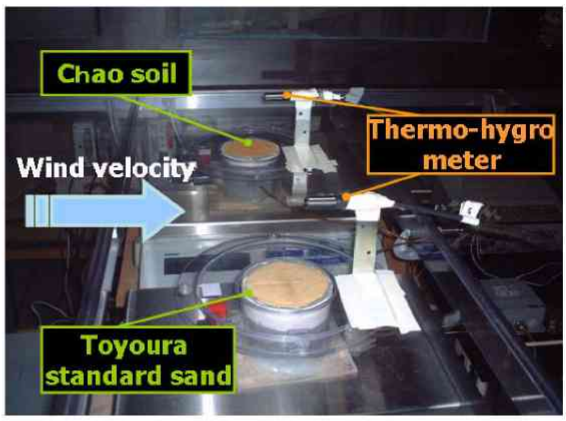

写真-1　実験状況

2．蒸発フラックスの算定

2．1 蒸発フラックスモデルの性質

蒸発フラックスの計算はバルク法[9]が一般的であり，式(1)が代表的である．

$$E_v = \rho C_E \left(q_s - q_a\right) V_w \tag{1}$$

ここに，E_v：質量蒸発フラックス(kg/m^2/s)，ρ：空気密度(kg/m^3)，C_E：水蒸気輸送バルク係数(-)，V_w：風速(m/s)，q_s：土壌表面の比湿(kg/kg)，q_a：大気の比湿(kg/kg)，である．式(1)から分かるようにC_Eが一定であれば，E_vはV_wに線形比例する．

筆者らは，式(1)の代わりに以下の式(2)を用いて，質量蒸発フラックス(以下，蒸発フラックス)を計算する．

$$E_v = \alpha_v D_{atm} \left(\rho_{v\,surf} - \rho_{v\,air}\right) \tag{2}$$

ここに，α_v：蒸発係数(1/m)，D_{atm}：水蒸気拡散係数(m^2/s)，$\rho_{v\,surf}$：土壌表面の水蒸気密度(kg/m^3)，$\rho_{v\,air}$：空気の水蒸気密度(kg/m^3)，である．なお$\rho_{v\,surf}$は地表面温度T_{surf}に対する飽和水蒸気密度を与える．またα_vは水蒸気密度境界層厚の逆数に関連するものであり，主流風速 V_{w0}(速度境界層外側の一様風速)を変数として与えられる．

さらに界面ダルトン数D_{a0}(-)を用いて，式(2)を次のように変形する．

$$E_v = D_{a0} u_* \left(\rho_{v\,surf} - \rho_{v\,air}\right) \tag{3}$$

ここに，u_*：摩擦速度(m/s)である．

なお，α_vおよびD_{a0}の性質については，後述の **4.2** で示す．

2．2 時間蒸発フラックス

野外の水収支は，単位時間および 1 日スケールで議論されることが多い．従来，筆者らが使用してきた時間蒸発フラックスE_{vh1}(kg/m^2/hr)は，以下の式(4)で計算される．

$$E_{vh1} = 3600\left(E_v\right)_{60} \tag{4}$$

ここに，$(E_v)_{60}$：式(2)のα_v，D_{atm}，$\rho_{v\,surf}$および$\rho_{v\,air}$に 1 時間に亘る風速の平均値を適用した時の蒸発フラックスである．

これに対して，後述の **4.2** で示すように，非線形なα_vとV_{w0}の関係を考慮して，新しい時間蒸発フラックスE_{vh2}を提案する．E_{vh2}は一定風速期間Δt(分)毎に蒸発フラックスを計算し，それを 1 時間に亘り積算して得られる．すなわち，

$$E_{vh2} = 60\Delta t \sum_{i=1}^{n} \left(E_{vi}\right)_{\Delta t} \tag{5}$$

ここに，$n = 60/\Delta t$，$(E_{vi})_{\Delta t}$：式(2)のα_v，D_{atm}，$\rho_{v\,surf}$および$\rho_{v\,air}$にΔtに亘る風速の平均値を適用した時の蒸発フラックスである．

3．風洞実験概要

風洞実験は，防災科学技術研究所内の地表面乱流風洞実験装置(以下，風洞と記述)を用いて行った．本実験は，種々の定常風速における定常蒸発フラックスを求める定常風速蒸発実験と高風速と低風速を組み合わせた擬似非定常風速蒸発実験に大別される．

3．1 実験装置

風洞実験は，風洞(幅 1m，高さ 1m，長さ 3m)，風洞底面に設置された土壌カラム(内径 0.075m，高さ 0.08m の塩ビ製カラム)，0.01g 読みの電子重量計(METTLER TOLED 製)，温湿度計(VAISALA 製)，熱線風速計，熱電対および 2 種類の土壌(チャオソイルおよび豊浦標準砂)により構成される(**図-1** および**写真-1** を参照)．風速および温度・湿度は，地表から高さ 0.4m までの間で 0.005～0.05m の間隔で計測された．なお，風洞は風速，温度および湿度が自動制御可能である．

表-1　土壌の物理特性

	チャオソイル	豊浦標準砂
飽和透水係数 k_{sat}	9.42×10^{-5}(m/s)	2.04×10^{-2}(m/s)
平均粒径 D_{50}	0.017(mm)	0.183(mm)
間隙率 ε	0.40	0.39
土壌分類	シルト質粘土ローム	砂質土

表-2　実験条件一覧

対象土壌	チャオソイルおよび豊浦標準砂		
環境条件	温度 25℃　湿度 50%		
実験ケース	低風速 (m/s)	高風速 (m/s)	平均風速 (m/s)
Case-A	0.4	5.0	2.7
Case-B	0.9	4.5	2.7
Case-C	1.5	3.9	2.7

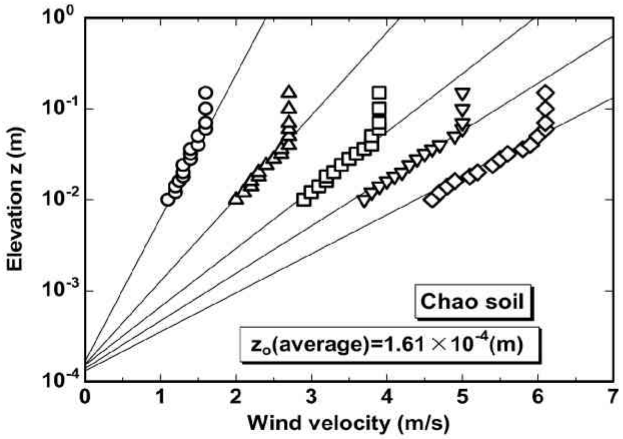

図-2　風速分布(チャオソイル)

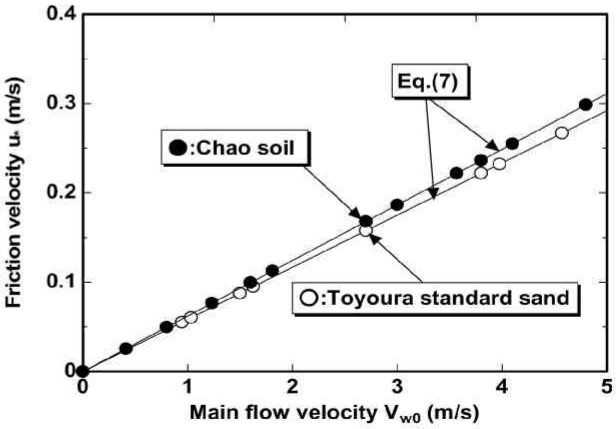

図-3　主流風速 V_{w0} と摩擦速度 u_* の関係
(チャオソイルおよび豊浦標準砂)

また表-1 は，チャオソイルおよび豊浦標準砂の代表的な物理特性を示す．チャオソイルは豊浦標準砂と違って，シルト質粘度ロームであり，平均粒径は後者のおよそ 1/10 である．

3．2 実験手順および実験条件

本実験では，カラム内部にチャオソイルを充填密度 1500kg/m^3 で，豊浦標準砂を 1600kg/m^3 でそれぞれ均一に充填し，給水カラムを用いて飽和させた後，カラム頂面と風洞底面が一致するように調整した．カラム頂面から 5mm 下に熱電対を挿入し，カラムと電子重量計の上に固定することにより，土壌表面温度および蒸発量をそれぞれ測定する．また，温湿度計により風洞内の空気温度および相対湿度を，熱線風速計により風速を，それぞれ同時に測定する．

次に，実験条件を述べる．定常風速蒸発実験では 0～6m/s の任意の風速を，擬似非定常風速蒸発実験では，0.4m/s と 5.0m/s，0.9m/s と 4.5m/s および 1.5m/s と 3.9m/s の 3 組(それぞれ Case-A，Case-B，Case-C と呼称)の風速を選び，実験を行った(表-2 を参照)．なお，各 Case とも平均風速は同じ 2.7m/s であった．また実験では，各 Case とも高/低風速を 15 分または 30 分毎に瞬時に切り替え，風速，土壌表面温度および蒸発フラックスの挙動を同時に調べた．

4．実験結果

4．1 風速分布

図-2 にチャオソイル上の風速分布を示す．高さ 0.05m までは以下の式(6)に示すような対数則が成立する．すなわち，

$$\frac{V_w}{u_*} = \frac{1}{\kappa}\ln\frac{z}{z_0} \qquad (6)$$

ここに，z：カラム頂上から鉛直上向きの高さ(m)，V_w：任意の高さの風速(m/s)，κ：カルマン定数(=0.4)，z_0：粗度高さ(m)，である．

チャオソイルおよび豊浦標準砂の z_0 はそれぞれ，1.61×10^{-4}m，1.06×10^{-4}m であり，大きな差はないことが知れる．

図-3 は V_{w0} と u_* の関係を示す．両者の間には，

$$u_* = AV_{w0} \qquad (7)$$

が成立する．ここに比例係数 A は，チャオソイルおよび豊浦標準砂でそれぞれ，6.22×10^{-2} および 5.84×10^{-2} であった．

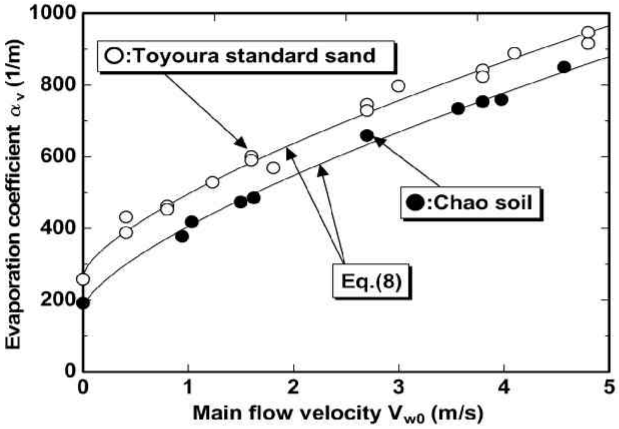

図-4　蒸発係数α_vと主流風速V_{w0}の関係
（チャオソイルおよび豊浦標準砂）

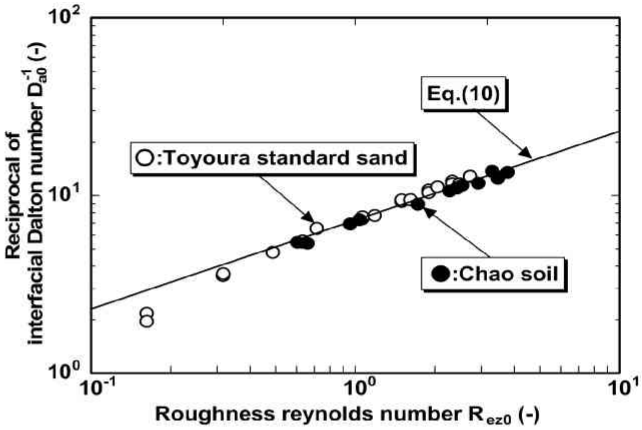

図-5　界面ダルトン数D_{a0}と粗度レイノルズ数R_{ez0}の関係
（チャオソイルおよび豊浦標準砂）

表-3　各土壌における係数の値

係数	チャオソイル	豊浦標準砂
a	227	221
b	178	274
c	162	153
d	184	275

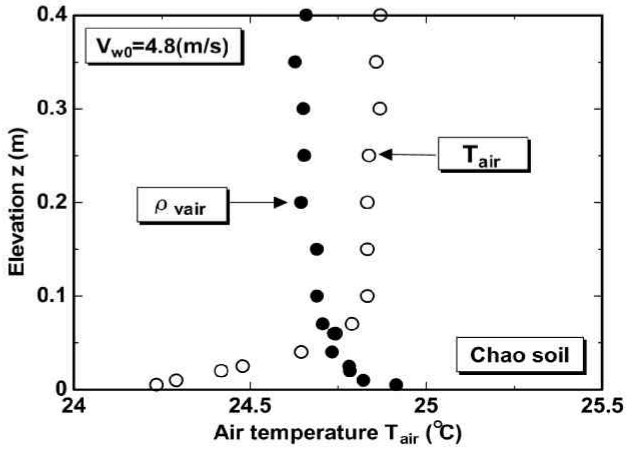

図-6　風洞内の空気温度T_{air}と水蒸気密度ρ_{vair}の鉛直分布
（チャオソイル）

4．2 蒸発係数と界面ダルトン数の性質

まず，蒸発係数について考察を行う．図-4はα_vとV_{w0}の関係を示したものである．チャオソイルおよび豊浦標準砂ともに，α_vはV_{w0}の低下とともに減少し，特に風速1m/s以下での減少割合が大きい．同じV_{w0}に対する豊浦標準砂のα_vはチャオソイルのそれより大きいが，両者のα_vは式(8)（図-4の実線）で表されるように，共に風速の0.7乗に比例する．

$$\alpha_v = aV_{w0}^{0.7} + b \qquad (8)$$

ここに，aおよびbは係数であり，各土壌に対して表-3に示すとおりである．このべき数の値(0.7)は，藤本ら[10]がアスファルト舗装上の蒸発フラックスと風速の関数で得られた値と一致する．また，式(1)に従えば，C_Eは約1.5m/s以下の風速では，もはや一定値にならないことが分かる．

また，α_vはu_*を用いても，式(8)と相似な相関式となる．すなわち，

$$\alpha_v = cu_*^{0.7} + d \qquad (9)$$

式中の係数cおよびdの値も表-3に示す．

次に，Brutsaert[11]に従って，D_{a0}と粗度レイノルズ数R_{ez0} ($=u_* z_0 / \nu$)の関係を調べた．その結果を図-5に示す．チャオソイルおよび豊浦標準砂ともD_{a0}は次式に従う．

$$D_{a0} = a_0 R_{ez0}^{-0.5} \qquad (10)$$

ここに，a_0は定数であり，a_0=7.27となる．ただし，図-5は慣例に従ってD_{a0}の逆数(D_{a0}^{-1})とR_{ez0}で表される．また，実験条件の多くは，滑面と粗面の遷移域(0.13＜R_{ez0}＜2)[11]に属する．

4．3 風洞内の空気温度および水蒸気密度

図-6はV_{w0}=4.8m/sでの風洞内の空気温度T_{air}と水蒸気密度ρ_{vair}の鉛直分布を示す．土壌表面近傍では，大気から土壌表面に向かってρ_{vair}は増加し，水面蒸発で観られる水蒸気密度分布と同じである．逆に，T_{air}は土壌表面に向かって減少し，土壌表面で最小となる．これは蒸発潜熱に起因する．またT_{air}とρ_{vair}の境界層（拡散層）厚は同程度であり，式(2)のバルク式には地表面より0.2m以上のρ_{vair}を代表値として用いる．また，ここには示さないが，ρ_{vair}は風速に依存することなく，どの実験ケースも概ね同じ値(1.13×10^{-2}kg/m^3)であった．

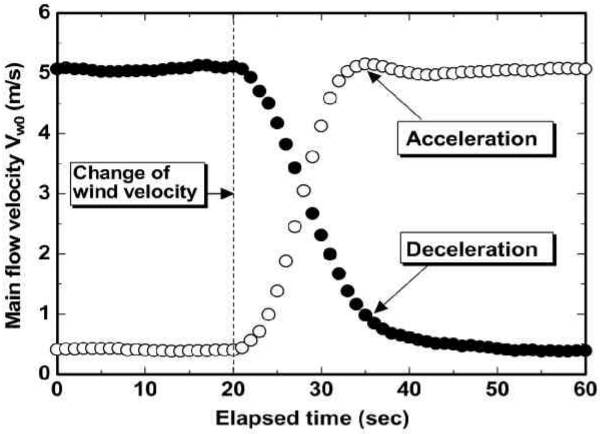

図-7　風速の過渡変化(Case-A)

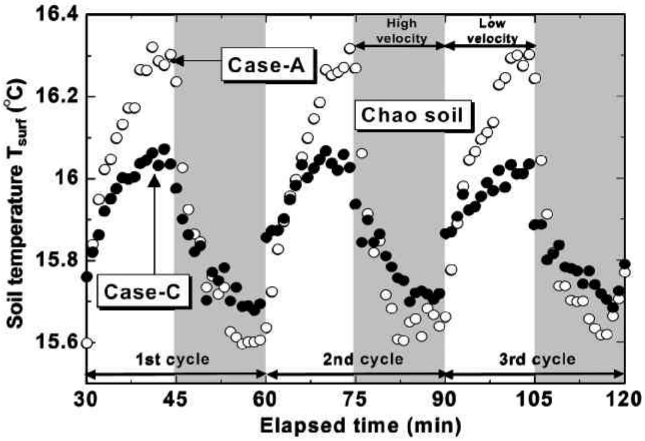

図-8　地表面温度 T_{surf} の経時変化(Case-A および Case-C)(チャオソイル)

4．4 擬似非定常蒸発の過渡現象

図-7 はチャオソイルの Case-A の実験において，経過時間20秒の時点で瞬時に風速を切り替えた時の風速の経時変化(風速の過渡変化)を表す．なお，計測位置は地表面から 0.1m の高さである．風速の回復は減速よりも加速の方で少し速いようであるが，せいぜい 30 秒以内である．

図-8 は，Δt=15 分における実験開始 30 分から 120 分までの 3 サイクルに亘るチャオソイルの T_{surf} の経時変化を，Case-A および Case-C に対してそれぞれ示したものである．T_{surf} は低風速期間より高風速期間で低温となる．これは蒸発潜熱が高風速期間で大きいことに起因する．従って，風速差 ΔV_w の大きな Case-A (ΔV_w=4.6m/s) の T_{surf} の振幅は，ΔV_w の小さな Case-C (ΔV_w=2.4m/s) のそれより大きくなる．

また加速および減速に関係なく，風速が変化した直後に T_{surf} は急激に変化し，その後は徐々に一定値に漸近する．T_{surf} が一定値に達する時間すなわち回復時間は，温度振幅の小さな Case-C の方で早く，約 8 分である．一方，Case-A の回復時間は約 10 分となる．

以上より，T_{surf} の回復時間は風速のそれに比べて 1 オーダ長い．

4．5 積算蒸発量

図-9 は，Δt=30 分におけるチャオソイルの Case-A および Case-C に対する単位面積当たりの積算蒸発量 ΣQ_{ev} (kg/m^2) の経時変化を，実験開始から 150 分に亘り示したものである．ΣQ_{ev} の勾配(蒸発フラックス)は低風速期間よりも高風速期間で相対的に大きい．また，Case-C の ΣQ_{ev} は，Case-A のそれより大きく，2 つの ΣQ_{ev} の差は時間とともに広がる．この ΣQ_{ev} の差の広がりは低風速期間で顕著である．他のケースも含め Case-A のように風速振幅の大きな場合(その際，低風速が 1.0m/s 以下)の ΣQ_{ev} は，Case-C のように風速振幅の小さな場合(その際，高/低風速が共に 1.5m/s 以上)のそれより小さくなる．ちなみに図-9 の場合，経過時間 150 分における Case-A の ΣQ_{ev} は，Case-C のそれの 0.82 となる．結果として，チャオソイルの E_{vh} は平均風速が同じでも，最大で 18%の違いがあり，豊浦標準砂のそれ(12%)以上となった．

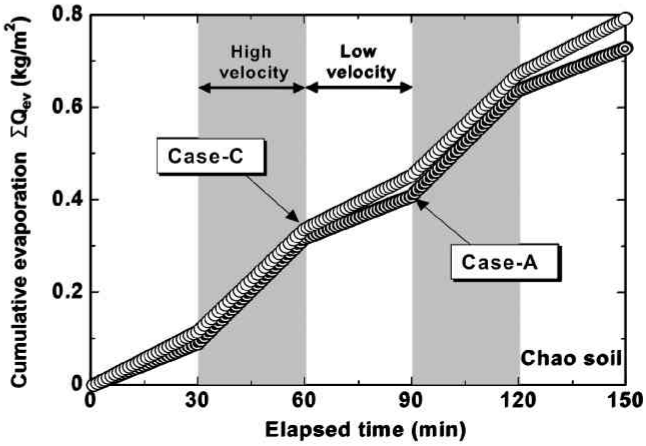

図-9　積算蒸発量の経時変化(Case-A および Case-C)(チャオソイル)

5．時間蒸発フラックスの計算値と実測値の比較

図-10 は，時間蒸発フラックスの計算値 E_{vh1} (式(4))および E_{vh2} (式(5))と実測値 E_{vobs} (最終 ΣQ_{ev}/経過時間(分)×60)の比較結果を示す．なお，同図には，Δt=15分および Δt=30 分の結果が併示される．

土壌に関係なく，全てのケースで E_{vh2} は E_{vh1} よりも E_{vobs} に近い値となる．E_{vh1} と E_{vobs} の最大誤差はチャオソイルで 12%，豊浦標準砂で 8%であるが，E_{vh2} と E_{vobs} の最大誤差はチャオソイルで 4%，豊浦標準砂で 3%であり，E_{vh2} の最大誤差は E_{vh1} のそれより小さい．なお，E_{vh2} の誤差の原因は風速変化に伴う T_{surf} の過渡現象が，式(5)に組み込まれていないことに起因すると考えられる．

また，E_{vh1} と E_{vh2} の差が大きいのは，高風速と低風速の風速差が大きく，かつ 1.0m/s 以下の低風速を含む場合

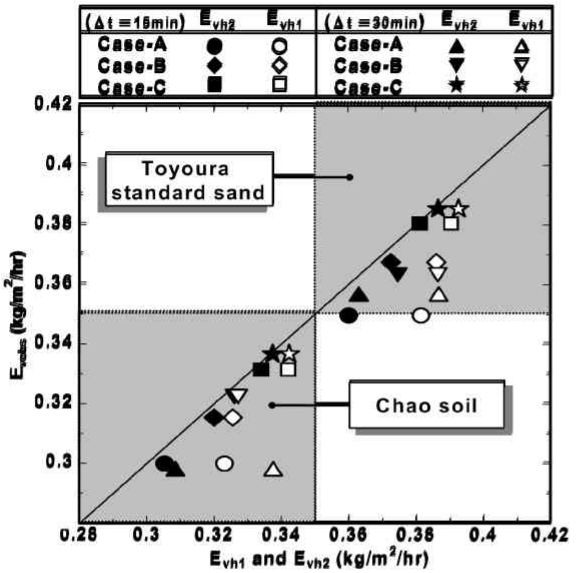

図-10　時間蒸発フラックスの計算値E_{vh1}およびE_{vh2}と実測値E_{vobs}の関係(チャオソイルおよび豊浦標準砂)

(Case-A：●と○，▲と△)である．この原因は図-4 に示したようなα_vとV_{w0}の非線形性にある．従って，α_vとV_{w0}の関係が線形に近いV_{w0}>1.5m/s の高風速と低風速の組み合わせ(Case-C：■と□，★と☆)の時，E_{vh1}とE_{vh2}の差は小さくなる．

また，チャオソイルでは Case-B および Case-C において，豊浦標準砂では Case-A および Case-C において，Δt=30 分のE_{vobs}の方がΔt=15 分のそれより僅かに大きいが，実験の精度を考慮すれば無視できる程度である．チャオソイルの場合，Δt=15 分におけるE_{vh2}とE_{vobs}の最大誤差は 2%(Case-A)で，Δt=30 分のそれは 4%(Case-A)であり，両者の差異はそれぞれ小さい．従って本実験においては，ΔtがE_{vh2}に及ぼす影響は小さいと考えられる．なお，豊浦標準砂においても同様の傾向が認められる．

6．おわりに

非定常風速下の蒸発量の評価方法を構築する前段階として，高風速と低風速が繰り返し発生するような擬似非定常風速下の蒸発フラックスの特性を明らかにするために，風洞内で蒸発実験を行った．この実験結果を基に，時間蒸発フラックスの計算精度を上げるための新モデル(式(5))を提案し，従来モデル(式(4))と比較を行った．本研究で得られた主要な結論を以下に列挙する．

(1) 土壌の種類に関わらず，高風速と低風速を繰り返し受ける際の時間蒸発フラックスは，たとえ同じ平均風速であっても，風速の組み合わせによっては 10%以上の差異が生じる．

(2) (1)の原因は蒸発係数と主流風速の非線形な関係に起因する．特に，この非線形性は主流風速が 1.5m/s 以下で顕著となる．

(3) チャオソイルおよび豊浦標準砂に関して，界面ダルトン数D_{a0}と粗度レイノルズ数$R_{e\pm0}$の関係は，同じ相関式で与えられ，本実験内の範囲内においてD_{a0}は$R_{e\pm0}$の-0.5 乗に比例する．

(4) 風速変化に伴う蒸発フラックスの過渡変化は，風速よりも地表面温度の回復時間に規定される．

(5) 高風速と低風速毎に蒸発フラックスを積算していく新モデルは，単純に時間平均風速を用いて蒸発フラックスを計算する従来モデルよりも，時間蒸発フラックスの計算精度が良い(誤差は約1/3～1/2 になる)．

(6) 従来モデルでは，1.0m/s 以下の低風速と 1.5m/s 以上の高風速が繰り返し発生するような場合，時間蒸発フラックスは，土壌の種類に関わらず 10%以上の誤差が生じる可能性がある．

参考文献

1) 齊藤誠，山中勤：ウェイングライシメータによる蒸発散量長期観測データの解析とクオリティーコントロール，筑波大学陸域環境研究センター報告，No.6, pp.53-62, 2005.

2) 玉川一郎：渦相関法での乱流フラックス観測=実例と解析法=，超音波，Vol.10, No.11, pp.24-27, 1998.

3) 成松明，田中健路，森本剣，滝川清：乱流渦相関法を用いた有明干潟上の地表面フラックス直接観測，海岸工学論文集，Vol.52, No.2, pp.1081-1085, 2005.

4) 町村尚：細線熱電対乾湿計を用いた渦相関法による降雨時の顕熱・潜熱フラックス測定，農業気象，Vol.54, No.4, pp.315-322, 1998.

5) 三枝信子，村山昌平，山本晋，近藤裕昭：渦相関法によるCO_2・H_2O フラックスの長期測定，日本気象学会大会講演予稿集，No.74, pp.146, 1998.

6) 近藤純正：裸地面蒸発の季節変化，水文・水資源学会誌，Vol.7, No.5, pp.378-385, 1994.

7) 木村玲二，高山成，神近牧男，松岡延浩：黄土高原における土壌水分と熱収支-土壌 3 層モデル内のパラメーターの決定とモデル計算の結果-，農業気象，No.60(1)，pp.55-65, 2004.

8) 門野浩二，福原輝幸，寺崎寛章，中根和郎：擬似非定常送風下における土壌表面からの時間蒸発フラックス-豊浦標準砂の場合-，第 60 回土木学会年次学術講演会講演概要集，II-028, 2005.

9) 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.108-109, 1994.

10) 藤本明宏，福原輝幸，渡邊洋，佐藤威，根本征樹，望月重人，岸井徳雄：乾燥，湿潤，氷板および圧雪路面と大気との間の熱・水蒸気移動，日本雪工学会誌，Vol.22, No.3, pp.14-22, 2006.

11) Brutsaert, W : Evaporation into the Atmosphere, Kluwer Academic publishers, Netherlands, pp.92-95,1991.

(2007.9.30 受付)