第7回土砂災害に関するシンポジウム論文集，2014年9月

バルク法における蒸発効率βの水分依存性に関する室内試験

LABORATORY EXPERIMENT ON EVAPORATION PARAMETER β OF BULK METHOD

森岩寛稀[1]・酒匂一成[2]
Motoki MORIIWA and Kazunari SAKO

[1]鹿児島大学大学院理工学研究科（〒890-0065 鹿児島県鹿児島市郡元 1-21-40）
E-mail: k8643801@kadai.jp
[2]鹿児島大学大学院理工学研究科（〒890-0065 鹿児島県鹿児島市郡元 1-21-40）
E-mail: sako@oce.kagoshima-u.ac.jp

Key Words: *bulk method, evaporation parameter, unsaturated sandy soil*

1. はじめに

従来，降雨に対する斜面災害の防災対策として，降雨量に基づいた避難勧告・交通規制の基準設定に重点が置かれてきた．しかし，現在の降雨時の土砂災害に対する避難勧告や交通規制などの解除には明確な基準が無く，管理者にとって解除の判断は非常に難しいとされている．酒匂ら[1)]は，降雨時に表層すべり型崩壊に対して，斜面内の水分変動に着目した現地モニタリングと数値シミュレーション（飽和・不飽和浸透解析+斜面安定解析）による斜面防災システムの確立に取り組んでいる．この手法により，降雨後の斜面内の水分変動を計測シミュレーションし，規制解除に必要な情報を示すことが可能であると考えている．その中で重要となるのが，降雨後の斜面表層からの蒸発量の現地モニタリングである．そこで，一般的な気象観測データから蒸発量の推定を行うことのできるバルク法[2)]を用いることにした．バルク法では，気象データに加えて，蒸発効率βや交換速度g_aが必要であり，特に蒸発効率βは表層土の体積含水率や間隙径などに影響される[3)]．本論文では，まず，交換速度や蒸発効率の算定方法の概要を述べる．また，砂質土の体積含水率θと蒸発効率βの関係について実験データの整理法およびその特徴について述べる．そして，近藤らの提案する蒸発効率βの算定手法と著者らの提案する手法の違いを検討し，不飽和土中の水分状態と蒸発効率βについて考察を行う．

2. 交換速度g_aと蒸発効率βの算定方法

(1) バルク式の概要

蒸発量の算定方法としては，ライシメータ法[4)]，傾度法[5)]，バルク法などが挙げられるが，本研究では，一般的な気象データから蒸発量の推定のできるバルク法を用いる．バルク法における単位面積当たりの蒸発量（水蒸気の鉛直輸送量）Eは，次式のように表される．また，式(1)で用いられているパラメータについては，**表-1**に示す．

$$E = \rho \cdot g_a \cdot \beta \cdot [q_{sat} - q_a] \tag{1}$$

$$g_a = C_H U \tag{2}$$

表-1　バルク法で用いられるパラメータ

パラメータ		観測データ
空気密度	ρ [kg/m^3]	P：気圧 [hPa]
		T_a：気温 [℃]
		T_s：地表面温度 [℃]
		H_u：相対湿度 [%]
飽和比湿	q_{sat} [kg/kg]	P：気圧 [hPa]
		T_s：地表面温度 [℃]
比湿	q_a [kg/kg]	P：気圧 [hPa]
		T_a：気温 [℃]
		H_u：相対湿度 [%]
交換速度	g_a [m/s]	気象観測から直接算定不可
蒸発効率	β [-]	

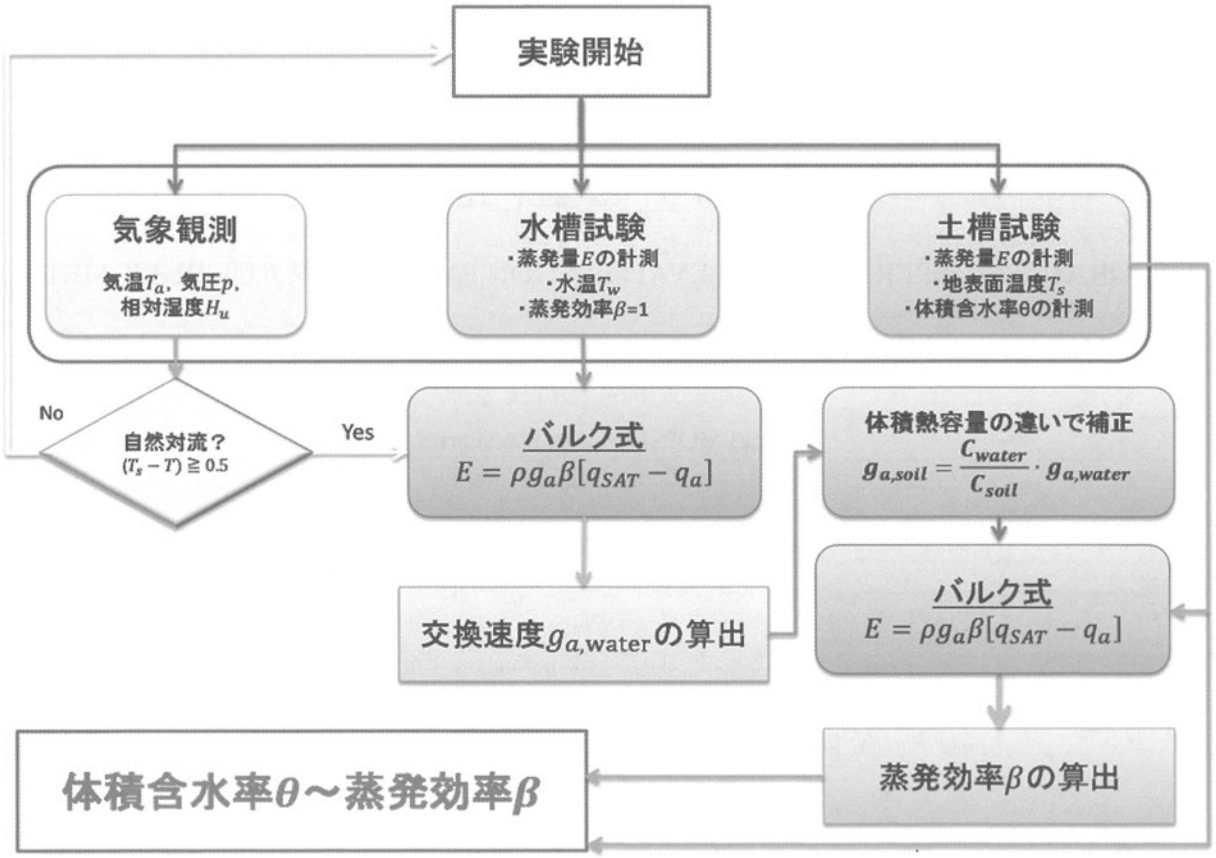


図-1　g_aとβの算定フロー

ここに，C_H：顕熱輸送に対するバルク輸送係数[-]，

U：風速[m/sec].

表-1に示されるように，バルク法で用いられるパラメータのほとんどは，1つの高度の気象観測データ（風速，気温，比湿）と地表面温度から得ることができる．しかし，交換速度g_aと蒸発効率βに関しては，事前に室内土槽試験で求めておく必要がある．交換速度は，地表面の空気塊と大気中の空気塊が交換される速度を表す．地表面の蒸発効率は，地表面からの蒸発のしやすさを表すパラメータであり，土の水分状態に対して0～1の値を取る（例えば，乾燥土であればβ=0，飽和土のとき，β=1）.

(2) 実験概要

図-1に交換速度g_aと蒸発効率βの算定フローを示す．本算定フローは主にKondoらの手法[3]を基礎としたものであり，交換速度の求め方については，地表面の体積熱容量を考慮した里見らの手法[6]を用いた．まず，気象観測装置により，気温T_a，気圧P，相対湿度H_uを計測する．同時に水槽試験および土槽試験を実施し，同じ気象条件下で交換速度と蒸発効率の算定を行う．水槽試験では，水面からの蒸発量の計測と水温T_wを計測し，土槽試験では，地表面からの蒸発量と地表面温度T_s，体積含水率θの計測を行う．また，式(1)で示される蒸発量は，水蒸気の鉛直蒸発量であり，地表面から大気への鉛直上向きの蒸発が生じる条件下において，交換速度と蒸発効率の算定を行う必要があるため，実施した試験結果の内，自然対流状態（$T_s - T_a \geqq 0.5$℃）となる条件のみで算定を行う．

交換速度の算定について，Kondoらは，現地で観測した気象データと蒸発量から蒸発効率をβ=1と仮定してg_aを求めている．交換速度は，地表面温度T_sと気温T_aの差との関係で表され，地表面温度と気温の差$T_s - T_a$が大きくなるほど交換速度が小さくなる（指数関数的減少）[7),8)]傾向を示す．

$$g_a \propto \frac{\kappa}{h} R_a^{1/3} \propto \frac{\kappa}{h}\left[\frac{g\beta_v h^3 (T_s - T_a)}{\kappa \nu}\right]^{1/3} = b(T_s - T_a)^{1/3} \qquad (3)$$

ここに，κ：温度伝導率 [m²/sec]，

h：代表長さ [m]，

R_a：レイノルズ数 [-]，

g：重力加速度 [m/sec²]，

β_v：体積膨張係数 [1/℃]，

T_s：地表面温度 [℃]，

b：植生状態による係数.

里見らは，これらのパラメータを検証するための土槽

試験を実施した[6]．その結果，現地気象データから交換速度を求めることは，現地における蒸発量計測を効率よく行うためには重要であるが，ばらつきが大きく，温度差のみで交換速度を表現することは非常に難しく，地表面の湿潤度に大きく影響されることが分かった．よって，本論文では，交換速度の算定条件を限定するため，気象観測と水槽試験から求めるようにした．水面からの蒸発のため，蒸発効率β=1と仮定することができるため，バルク式より，水槽試験中の水面における交換速度を算定することができる．ここで，水面における交換速度を$g_{a,water}$とする．

里見らの検証から，地表面における交換速度では地表面の状態が大きく影響するため，ここでは，水面からの交換速度の補正方法を提案する．まず，物体の持つ熱エネルギーに着目する．熱量Q[kJ]は，式(4)より体積熱容量C[kJ/m^3・K]と温度変化ΔT[K]で表され，同じ熱量が与えられると体積熱容量が大きいほど温度は小さくなる．

$$Q = C\Delta T = \rho c\Delta T \tag{4}$$

また，地表面の体積熱容量C_{soil}を土粒子，水，空気の割合を考慮した式として次式に示し，各相の物性値を**表-2**に示す．

$$C_{soil} = \frac{V_s}{V}\rho_s c_s + \frac{V_w}{V}\rho_w c_w + \frac{V_a}{V}\rho_a c_a$$

$$= \left\{\rho_d c_s + \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}\right)\rho_a c_a\right\} + \left(\rho_w c_w - \rho_a c_a\right)\theta \tag{5}$$

ここに，V：土の体積 [m^3]，
ρ：密度 [kg/m^3]，
c：質量比熱 [kJ/(kg・K)]，（添え字s，w，aはそれぞれ土粒子，水，空気），
ρ_d：土の乾燥密度，
θ：体積含水率．

表-2に示す物性からも推測できるように，熱量Qが同じ場合，湿潤土の方が乾燥土よりも体積熱容量は大きくなる．体積熱容量C_{soil}が大きい湿潤土では，温度が変化しにくくなる（温度伝導率κが低下する）ことを意味する．よって，式(3)より，温度伝導率κが大きくなると交換速度も大きくなることから，交換速度と

表-2　各相の密度と質量比熱

	密度	質量比熱
	ρ [kg/m^3]	c [kJ/(kg・K)]
土粒子	2,652	0.84
水	1,000	4.18
空気	1.293	1.000

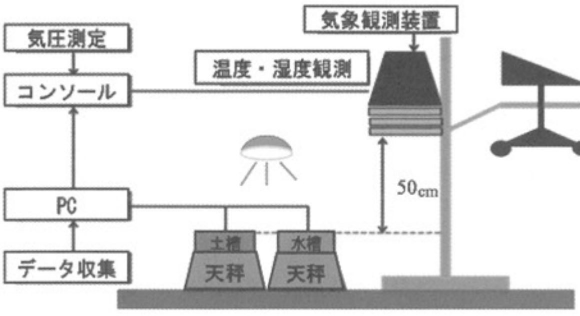


図-2　試験概要図

表-3　土槽試験の試験条件

	初期飽和度 [%]	体積含水率	実験回数
土槽試験	10	0.044	3
	20	0.088	4
	40	0.176	3
	60	0.264	6
	80	0.352	5

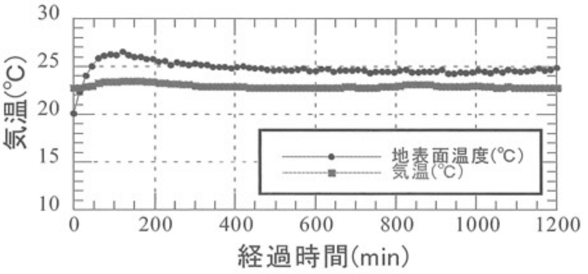
体積熱容量は反比例関係を持つと考えられる．よって，地表面からの交換速度を$g_{a,soil}$と定義し，水と土の体積熱容量C_{water}，C_{soil}を用いて次式のように示す．

$$g_{a,soil} = \frac{C_{water}}{C_{soil}} g_{a,water} \tag{6}$$

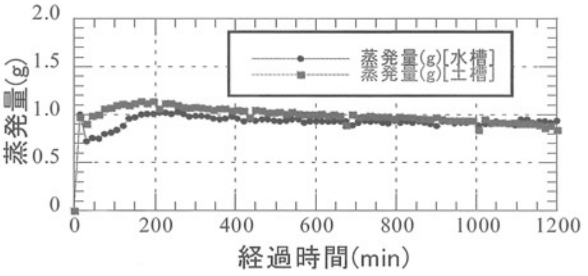
本論文では，式(6)で求まった交換速度を用いて，土槽試験結果とバルク式から，体積含水率と蒸発効率の関係を得ている．

(3)　室内水槽・土槽試験の概要

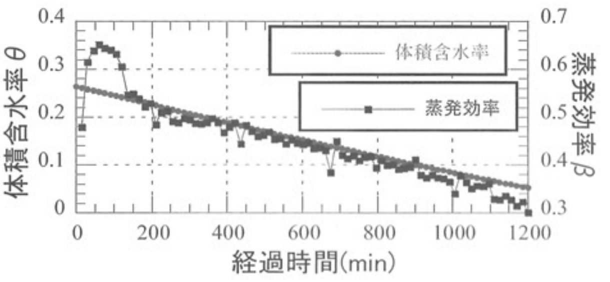
図-2に示すように試験装置は，気象観測装置，水槽試験装置，土槽試験装置で構成され，試験は無風状態で実施するため室内で行った．実験試料として豊浦砂を用い，内径15.5cm，外径16.5cm，高さ2cmの塩化ビニール製円筒容器に，間隙比e = 0.785になるように，底面から1cm，2cmごとに均一に締固めた．塩化ビニール円筒容器は表面からのみの熱伝導とするために，側面と底面に断熱シートを貼り付けた．土槽の表面に熱電対，土槽の表面から1cmの深さに熱電対と土壌水分計（静電容量法）を設置した．水槽実験では常温の水を用い，水表面の温度計測のために水面に熱電対を設置した．蒸発量の計測は，電子天秤（最大秤量3,200g，最小表示0.01g，標準偏差0.01g）で行った．体積含水率θと蒸発効率βの関係を求めるため，**表-3**に示すように初期の体積含水率として飽和度10，20，40，60，80%に相当する5ケースの体積含水率を設定し，それぞれ複数回実験を行った．計測間隔は15分とし，計測開始後1200分（約1日）経過したときに実験を終了と



(a)　気温と地表面温度の時系列変化



(b)　蒸発量の時系列変化



(c)　体積含水率と蒸発効率の時系列変化

図-3　計測結果（初期飽和度 60%，土壌水分計なし）

した．また，自然対流状態を起こすために，電気スタンド（電球 200W）を用いて強制的に自然対流状態を起こし実験を行った．

(4) 実験結果

図-3 に，今回初期飽和度 60%相当の実験より得られた計測結果を示す．**図-3** より，体積含水率の減少とともに，蒸発効率が減少することがわかる．その他の各初期飽和度でも同様の結果が得られた．**図-3** で得られたデータをもとに交換速度および蒸発効率が算定され，体積含水率との関係を示すことができる．しかし，試験中に体積含水率や蒸発効率は時々刻々と変化しているため，その算定方法により，結果に違いが出る可能性が考えられる．そこで，本論文では，体積含水率と蒸発効率の関係をどのように求めるかについて検討した．

(5)　データ整理手法の検討

体積含水率と蒸発効率の関係を求める方法として，以下に示す 3 つの方法を用いた．

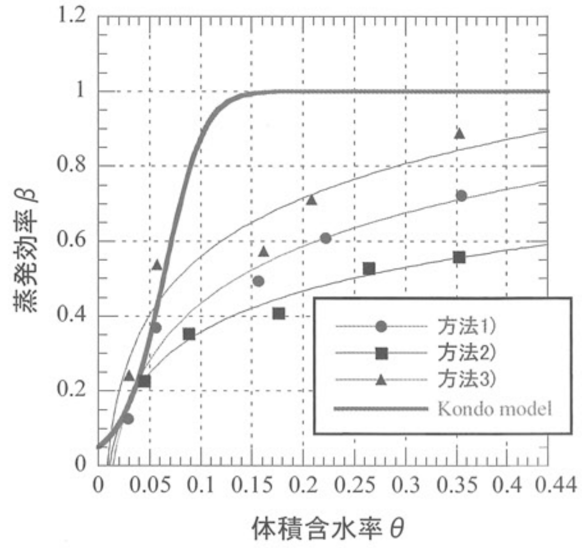


図-4　θ と β の関係

方法 1）蒸発効率を 1 時間ごとに算定する方法．
（飽和度が 5%低下するまでの範囲を考慮）

方法 2）各時間における体積含水率の計測値と蒸発効率を各飽和度における体積含水率ごとに算定する方法．

方法 3）初期体積含水率と計測開始直後の蒸発効率のみを考慮した方法．

今回，以上の方法で各実験から算定し，その平均値を図-4 に示し，回帰曲線を記載した．また，Kondo ら[3)]が提案する体積含水率 θ と蒸発効率 β の関係のモデルを示した．式(7)に近藤らのモデル式を示す．

$$\beta = \frac{1}{1 + C_H U \cdot F(\theta) / D_{atm}} \tag{7}$$

ここに，$F(\theta)$：土壌間隙の奥から地表面までの水蒸気の流れに対する距離[m]，
D_{atm}：水蒸気の分子拡散係数．

図-4 より，体積含水率が増加すると蒸発効率が増加する傾向を示しており，地表面に水が多いと蒸発がしやすくなることを表している．また，それぞれの方法における算定結果を見ると，方法 3)の場合に，ばらつきが大きくなっていることが分かる．方法 3)は，計測開始直後の蒸発効率を用いたため，**図-3** (c) に示すように計測開始直後は，計測データが不安定であることが算定結果のばらつきに影響しているものと考えられる．実験結果と Kondo model とを比較すると，体積含水率が大きくなるほど蒸発効率の差が大きくなる．これは，本実験では式(6)で表される土の体積熱容量を考慮した交換速度を用いて，蒸発効率を求めているが，Kondo model は，式(3)で表される交換速度を用いて得られた実験結果をもとに提案されたモデルであることによるものと考えられる．

以上のことから，本章で提案した 3 つのデータ整理手法では，室内実験で求められた体積含水率と蒸発効率の算定値の平均をとって，データ整理を行ったが，Kondo model の結果のように，体積含水率が大きくなると蒸発効率が β=1.0 に漸近するという一般的な傾向とは異なる結果が得られた．これは，異なる定義の交換速度から得られた体積含水率と蒸発効率の関係が原因の一つと考えられるが，明確にその違いを考察することが本章における 3 つの方法ではできなかった．よって，室内実験から求められた体積含水率と蒸発効率の算定結果をすべて図示することにより，異なる定義の交換速度から得られた体積含水率と蒸発効率の関係について考察するとともに，より合理的なデータ整理手法について検討する．

3. 体積含水率と蒸発効率の関係に関する考察

(1) データ整理手法と試験方法の改良

体積含水率と蒸発効率の関係についてより詳細に考察するため，**図-3 (c)** に示すような実験から算定されたすべての結果を**図-5** に示す．図より，体積含水率と蒸発効率の算定結果が非常にばらついていることがわかる．また，体積含水率が負となっている結果も見られる．これらの原因として，試験中の観察とデータの確認より，電子天秤の値が微小な時間間隔において大きく増減しており，空調などは停止していたことから，電子天秤に置かれた土槽の表面 1cm 部分に設置した土壌水分計のコードの振動や引張等で電子天秤の値が増減したものと考えられる．そこで，それらの影響を無くすため，土槽内に土壌水分計を設置せず，実験で計測した土槽からの蒸発量と土槽の体積より，土槽内の体積含水率を算定することにし，**表-3** に示すような 5 ケースの初期体積含水率における実験を再度設定し，それぞれ複数回，再実験した．

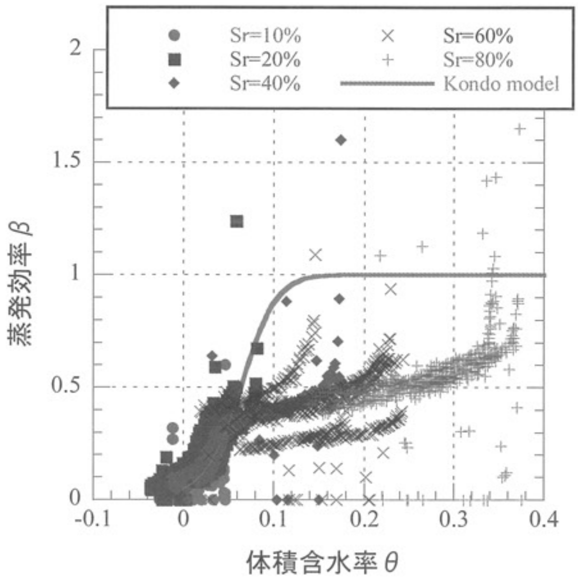


図-5 θとβの関係（土壌水分計あり）

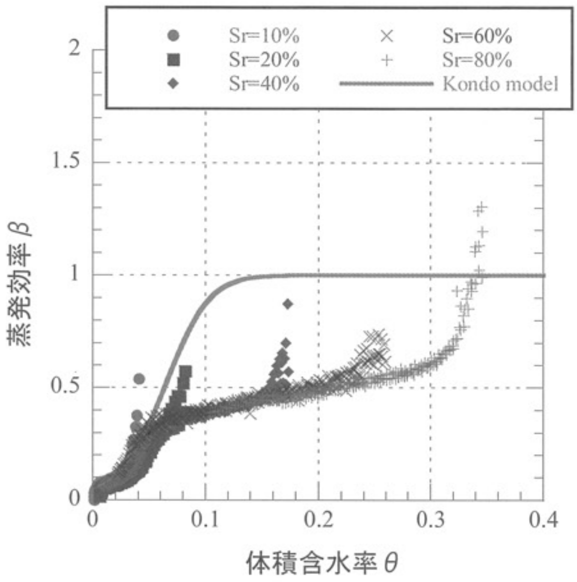


図-6 θとβの関係（土壌水分計なし，自然対流状態）

(2) 再実験結果

図-6 に土壌水分計を設置せずに行った室内実験における体積含水率と蒸発効率の全算定結果を示す．**図-5，6** より，土壌水分計を除いた実験の方が蒸発効率 β のばらつきが小さくなったことが見て取れる．また，体積含水率 θ が負となることもなくなった．
以上のことから，試験方法として，体積含水率を設置せずに，初期体積含水率と電子天秤の値から土の体積含水率を求める方法の方がより合理的ではないかと考えられる．

(3) 体積含水率と蒸発効率の関係

土壌水分計を用いずに実施した土槽実験により得られた**図-6** においても，実験結果と Kondo model とでは，大きくその傾向は異なっている．これは，上述のように，蒸発効率を算定するための交換速度が異なるためと考えられる．本論文での交換速度は，$g_{a,soil}$ として，地表面の土粒子，水や空気の体積熱容量の違いを考慮し，$g_{a,,water}$ を補正して求めたものである．そこで，今回の実験結果を $g_{a,waterl}$ で計算し直した結果を**図-7** に示す．

図-7 より，算定値の実験結果と Kondo らのモデルがより近い傾向を示していることがわかる．しかし，蒸発効率が β=1.0 を超える部分も見られる．そこで，算定値において，①蒸発効率が 1.0 を超える部分，②蒸発効率がほぼ β=1.0 である部分，③蒸発効率が β<1.0 である部分に分けて考察を行った．

①の部分は，実験開始直後の土槽からの蒸発量が多い時点での蒸発効率を示している．土と水では，体積熱容

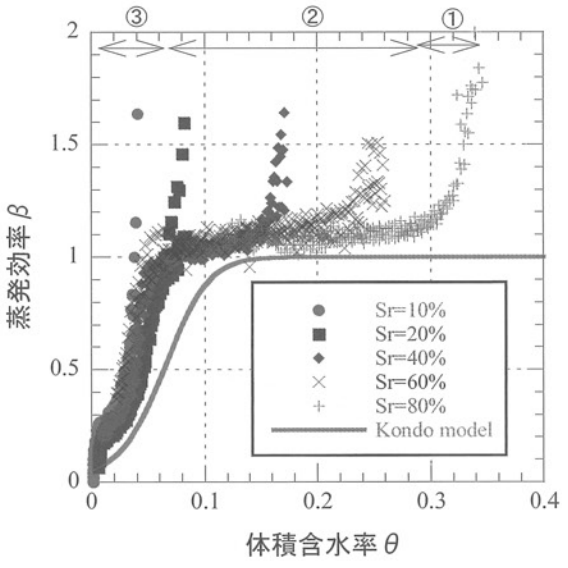


図-7 θとβの関係（$g_{a,water}$で算定）

量が異なるため，実験開始後 1 時間程度は土表面のほうが温まりやすくなっている．しかし，前述したように，近藤らのモデルでは，土と水の体積熱容量の差を考慮していないため，θ と β との関係が①の部分のような算定値を示していると考えられる．

②の部分は，土槽からの蒸発量と水槽からの蒸発量がほぼ一致している時点での蒸発効率を示している．時間経過とともに，土槽からの蒸発量は徐々に減少するが，水槽からの蒸発量は増加する．すると，土槽と水槽の蒸発量がほぼ同様の測定値を示すようになる．その土槽と水槽の蒸発量がほぼ同様の測定値を示す結果（図-3 参照）の時 β=1.0 となっていると考えられる．

③の部分は，②の状態からさらに時間が経過すると，土槽からの蒸発により，土槽内の水分が蒸発することで，蒸発するポテンシャルが低下し，土の含水量に応じて，土の間隙構造などの影響で蒸発量が減少している時点での蒸発効率を示していると考えられる．

以上のことから，体積含水率と蒸発効率の関係について，その傾向をより詳細に考察することができた．

4. おわりに

本論文では，土の体積熱容量を考慮した交換速度を用いた蒸発効率の算定方法について述べ，砂質土の体積含水率と蒸発効率の関係について考察した．本論文で，得られた知見を以下に示す．

(1) 体積含水率によって，蒸発効率の変化率が異なるため，データ整理の際に，ある区間の値の平均値を用いると結果にばらつきが生じやすいことが分かった．
(2) 蒸発効率を求める土槽実験において，土壌水分計を用いない簡易な方法で，体積含水率と蒸発効率の関係を求めることができた．
(3) 蒸発効率を算定する際に用いる交換速度の定義の違いを考慮することで，土槽表面における蒸発効率について，地表面の温まり易さや含水状態との関係を明確に考察することができた．

今後，蒸発効率 β<1.0 部分の体積含水率との関係は，土の間隙比や粒度に依存していることから，様々な種類の土を用いて実験を行い，体積含水率と蒸発効率のモデル化を行っていきたい．

謝辞：本研究は，科研費（若手 A，課題番号：24686056，代表：酒匂）の援助を受けた．ここに謝意を示す．

参考文献

1) 酒匂一成・里見知昭・菅野智之・深川良一・安川郁夫：降雨時の斜面崩壊に対する防災システムの確立に関する研究,歴史都市防災論文集，Vol.1，pp.167-174，2007.
2) 近藤純正：水環境の気象学，朝倉書店，pp.108-109，1994.
3) J. Kondo, N. Saigusa and T. Sato: A parameterization of evaporation from bares soil surfaces, J. Appl. Meteor, Vol.29, pp.385-389, 1990.
4) 日本気象学会：気象研究ノート，地表面フラックス測定法，第 199 号，pp.98-104，2001.
5) C. W. Thornthwaite and B. Holzman: The determination of evaporation from land and water surfaces, Monthly Weather Review, Vol. 67(1), pp.4-11, 1939.
6) 里見知昭・酒匂一成・吉留花江・深川良一：最表層土の水分変動を考慮したバルク法による蒸発量推定手法の改良，応用力学論文集，Vol.13，pp.525-534，2010.
7) J. Kondo and S. Ishida: Sensible heat flux from the earth's surface under natural convective conditions, J. Appl. Meteor., Vol. 54, p.501, 1997.
8) J. Kondo and T. Watanabe: Studies on the bulk transfer coefficients over a vegetated surface with a multilayer energy budget model, Journal of the Atmospheric Sciences, pp.2183-2199, 1992.

（2014. 5. 9 受付）