

焼却灰層内の不飽和水分移動に関する 実験的研究

東條安匡¹・田中信寿²・松藤敏彦³・松尾孝之⁴

¹正会員 工修 北海道大学助手 工学研究科環境資源工学専攻(〒060-8628 札幌市北区北13西8)

²フェロー会員 工博 北海道大学教授 工学研究科環境資源工学専攻(〒060-8628 札幌市北区北13西8)

³正会員 工博 北海道大学助教授 工学研究科環境資源工学専攻(〒060-8628 札幌市北区北13西8)

⁴正会員 北海道大学技官 工学研究科環境資源工学専攻(〒060-8628 札幌市北区北13西8)

焼却灰層内の水分移動現象を明らかにするために一次元/二次元の不飽和浸透実験を行った。パルス状の降雨に対する焼却灰層からの一次元流出応答は早く、均質系媒体を対象とした不飽和浸透理論では、この実験結果を良好に再現し得なかった。一方、不飽和透水係数を測定するために実施した流束制御法では、流束と含水率の関係を定めることができなかったが、3ヶ月間の連続降水実験の結果から急速移動水が支配的であることを明らかにし、急激に増加する含水率を分離することで一次元の水分移動式を求め、パルス状降水実験の流出応答を再現した。二次元不飽和浸透においても急流水移動を対象とした横方向水分移動式を求める方法を示し、流出分布を再現できることを示した。

Key Words: *unsaturated water movement, landfill, incineration residue, multi-component flow*

1. はじめに

廃棄物埋立地内の水分移動現象の解明は、浸出水処理施設や浸出水調整池の設計・運転・管理だけでなく、廃棄物の安定化反応などにも関わるので極めて重要である。しかしながら、埋立地内の水分移動現象を定量的に取り扱う手法は確立されているとは言い難い。原因は、廃棄物の多様性や埋立地内の土、管そして廃棄物のそれぞれが相互に複雑な構造を形成していることなども考えられるが、廃棄物層そのものの不飽和浸透現象が明確でないという点も大きいと思われる。水分不飽和状態にある廃棄物層内の水分や溶質の移動現象に関する研究は国内外で数多く行われている。しかし、水分や溶質の移動が、単純にRichards型の水分移動式や移流分散型の溶質移動式で扱えるとする研究と、扱えないとする研究とがあり、はっきりしない。

2. 水分移動に関する基礎理論と既往の研究

水分不飽和な均質系多孔質媒体中の水分移動はRichards式で表され、一次元で、鉛直下方を正にとると、次式のようになる¹⁾。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(\theta) \frac{\partial \psi_m}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} K(\theta) \quad (1)$$

ここで、 θ : 体積含水率 [cm^3/cm^3]、 t : 時間 [s]、 $K(\theta)$: 不飽和透水係数 [cm/s]、 ψ_m : マトリックポテンシャル [cm] である。式(1)にKluteによる変形を用いて含水率の式に統一すると次式となる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} K(\theta) \quad (2)$$

ここで、 $D(\theta) = K(\theta) \partial \psi_m / \partial \theta$: 水分拡散係数 [cm^2/s] である。

廃棄物層の不飽和水分移動を対象とした研究で、式(1)や式(2)が適用できるとした研究にはStraub²⁾、Kortfiatis³⁾、Demetracopoulos⁴⁾らの報告がある。いずれも、不飽和な廃棄物層内の浸出水挙動や溶質移動を扱った実験結果に対して、Richards式を用いた解析を行い、浸出水の流出パターンは再現し得たと報告している。しかし、式中のパラメータ値は実測値に適合するように探索により求めている。

一方、田中⁵⁾は廃棄物層に対する一次元不飽和浸透実験の流出応答を、実測の水分特性曲線と不飽和透水係数を用い、Richards式で解析しているが、廃棄物層からのランダムな流出水量変動は、Richards式で表現

できないことや、Richards式の意味するマトリックポテンシャル勾配に比例する水分移動が灰やごみ層の基本的な水分移動機構であるかどうかについては研究が必要であることを述べている。島岡⁶⁾も、トリチウムをトレーサーとした一次元の浸透実験結果から、廃棄物層内の溶質移動が拡散方程式により支配される現象とは異なることを指摘し、流動域と非流動域に分離する2成分モデルの適用を提案している。寺島⁷⁾も焼却灰層の不均一性を考慮した場合には、焼却灰層内に偏り不飽和流が生じることを確認しており、それを表現するために水みちを考慮した浸透モデルを提案している。三谷^{8), 9), 10), 11)}によっても同様の検討がなされており、廃棄物層の水分流れに対して均質系媒体を対象としたRichards式を適用することは、流出応答を大まかには再現できるものの、迂回流や短絡流等に起因する不規則な流出応答の再現は困難であり、3成分流れモデル等の適用が必要であることが示されている。

こうした多成分流れを用いる場合、水分は、媒体に強く結合して動かない不動水、微細間隙中を毛管吸引力によって移動する緩流水、そして粗大間隙を重力により急速に移動する急流水とに分離し、それぞれを独立の移動式で捉える方法が採られる^{7), 8), 9), 12), 13)}が、廃棄物層内の水分移動を多成分流れで表す場合、各流れ成分に関するパラメータの決定法は明確にされておらず、前記した既往の研究^{6), 7), 8), 9)}においても、各流れ成分の割合や水みち割合は、実験値に適合するように探索して決定している。焼却灰層内の流れが多成分流れであるならば、現実的な降雨条件下での流れ成分が支配的なのかを明らかにし、さらに、その水分移動式とその式に必要なパラメータの決定法を確立することが必要である。

本研究では、焼却灰充填層に対して不飽和浸透実験を行い、①Richards式では焼却灰層内の不飽和浸透現象を表現することが困難であること確認し、②流束制御法から含水率と流束の関係を直接求めることを検討した。また、③長期連続降水試験から、焼却灰層内の不飽和浸透は急流水流れが支配的であることを確認し、④その移動式とパラメータ値を決定する方法を構築することを試みた。さらに、⑤Richards式が成立しないとすると、水平方向への水分移動式を開発する必要があるため、二次元の不飽和浸透実験を行い、水平方向水分移動式とパラメータを決定する方法についても検討した。

3. 実験に用いた焼却灰の基礎特性

実験に用いた焼却灰は、札幌市内の全連続式焼却炉

	Ash-A (n=12)		Ash-B (n=3)	
	min - max	平均	min - max	平均
D_{10} (mm)	0.13 - 0.55	0.41	0.13 - 0.25	0.18
D_{20} (mm)	0.84 - 2.04	1.62	0.75 - 1.64	1.22
D_{30} (mm)	1.97 - 5.49	4.11	2.00 - 3.18	2.68
D_{60} (mm)	3.06 - 7.03	5.77	2.95 - 4.22	3.72
U_c (mm)	6.47 - 22.8	15.3	16.6 - 25.5	21.7
U_c' (mm)	0.77 - 1.71	1.18	1.49 - 2.58	2.19

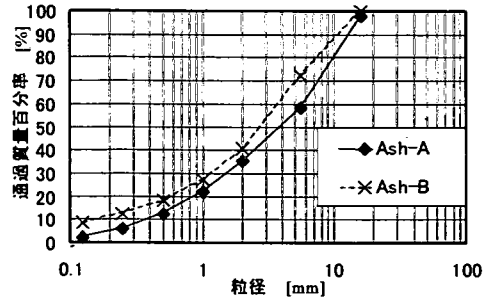


図-1 焼却灰の粒径加積曲線

表-1 焼却灰の比重

試料名	測定回数	比重測定結果 (単位[-])			
		最小値	最大値	平均値	標準偏差
Ash-A	7	2.38	3.26	2.86	0.311
Ash-B	30	2.26	2.95	2.49	0.147

(600t/day)の灰ピットより採取した底灰であり、飛灰は含まれていない。採取後の焼却灰は、乾燥器(約110℃, 24hr)で乾燥させ、15mmメッシュの篩いを用いて大きな不燃物等を除去した。本研究では、採取日の異なるAsh-A, Ash-Bの2種類の灰に対して検討をおこなった。

(1) 粒度分布

測定は、JIS-A-1204に従って実施した。測定はAsh-Aで12回(1回約200g)、Ash-Bで3回(1回約1000g)分析した(Ash-Aで12回の測定を実施したが、大きな差は認められなかったため、Ash-Bでは、測定回数を減らし、平均的な値を得るために試料量を増やして測定した)。各試料の粒径加積曲線(測定値の平均値)を図-1に示す。同図中には各代表径 D_x ($x\%$ 通過質量径)と均等係数 $U_c = D_{60}/D_{10}$ 、曲率係数 $U_c' = (D_{30})^2 / (D_{10}D_{60})$ も示した。使用した焼却灰はいずれも粒度分布が広範で、均等係数が15~20前後と大きい。

(2) 比重

実験方法はJIS-A-1202に従って行った。Ash-Aで7回、Ash-Bで30回測定した(Ash-Aで7回の測定を実施した結果、ばらつきが大きかったため、Ash-Bでは30回の測定とした)。試料の量は1回約5~10gとした。測定結果を表-1に示す。測定サンプル数を多くしたが、表に示すようにばらつきの大きい結果となった。

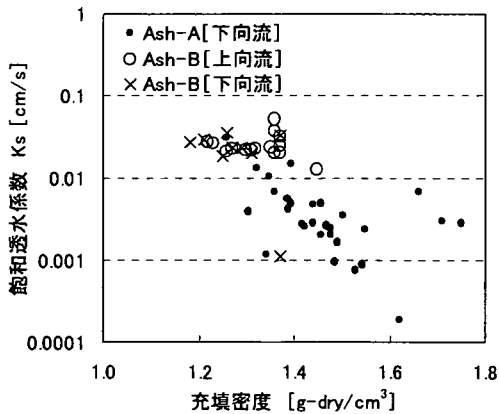


図-2 焼却灰の飽和透水係数

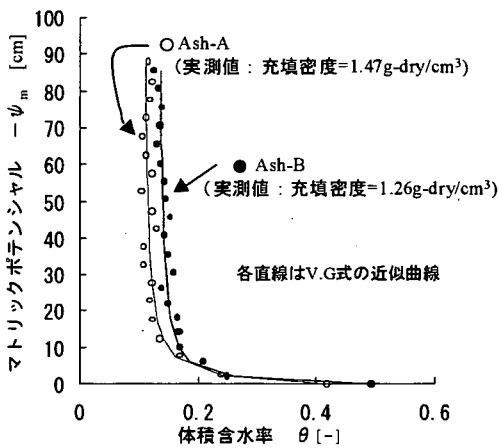


図-3 焼却灰の水分特性曲線

表-2 水分特性曲線から決定したVG式のパラメータ

灰種	K_s (cm/s)	α (-)	n (-)	m (-)	θ_s (-)	θ_r (-)
Ash-A	0.003	0.99	1.85	0.459	0.420	0.104
Ash-B	0.02	1.74	1.79	0.441	0.494	0.130

比重の平均値はAsh-Aで2.86, Ash-Bで2.49とAsh-Aが若干大きかった。

(3) 飽和透水係数

測定は, JIS-A-1218の定水位透水試験法に従って行った。透水方向はAsh-Aは下向流のみ, Ash-Bは両方で実施した。測定は, 充填密度を変えて多数回測定した。透水係数測定結果を充填密度を横軸として図-2に示す。なお, 焼却灰は水と接触することにより水素ガスが発生し, 透水性が試験中に低下していくことが報告されている¹⁴⁾。本研究でもそのような傾向が下向流において認められたため, 下向流の試験結果は, 参考値として示す。本結果より, Ash-Bの飽和透水係数

は(充填密度がAsh-B: 1.22~1.37g/cm³の範囲で), 充填密度によらず約0.02cm/sであった。一方, Ash-Aは, 粒径がAsh-Bよりも若干大きいにも関わらず, Ash-Bよりも一桁小さい結果となっている。これは, 下向流での測定のため, 間隙が発生ガスなどによって閉塞されたこと, 及び充填密度が大きくなるほど, その影響が強くなったためと考えられる。

(4) 水分特性曲線

焼却灰が比較的大きい径の粒子を含んでおり, 毛細管吸引力が低くなることが予想されたため, 測定には土柱法を採用した。また, 用いた焼却灰は水持性をもち, 浸潤過程の測定が困難だったため, 排水過程の水分特性曲線を測定した。Ash-A, Bの水分特性曲線の測定結果を図-3に示す。焼却灰の水分特性曲線には砂等で見られるような明瞭な毛管帯は確認し難く, 曲線はほぼ直線上に立ち上がる傾向を示している。なお, Ash-Aの残留水分率は約10%程度であり, Ash-Bの残留水分率は概ね12~13%程度であった。得られた各水分特性曲線に対してVan Genuchten式¹⁵⁾(以下ではVG式と記述する)を曲線近似して求めたパラメータを表-2に示した。ここで, VG式は以下の通りである。

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{1}{1 + (\alpha \psi_m)^n} \right)^m \quad (3)$$

Θ : 飽和度[-], θ : 体積含水率[cm³/cm³], θ_r : 残留水分率[cm³/cm³], θ_s : 飽和含水率[cm³/cm³], ψ_m : マトリックポテンシャル[cm], α, m, n , 定数 ($m=1-1/n$)。

また, VG式による水分特性曲線からの不飽和透水係数, 水分拡散係数の推定式は以下の通りである。

$$K(\theta) = K_s K_r = K_s \Theta^{0.5} \left(1 - \left(1 - \Theta^{\frac{1}{m}} \right)^m \right)^2 \quad (4)$$

ここで, K_s : 飽和透水係数[cm/s], K_r : 比透水係数[-]である。

$$D(\theta) = K_s \Theta^{0.5} \left(1 - \left(1 - \Theta^{\frac{1}{m}} \right)^m \right)^2 \left(-\frac{1}{\alpha m n} \left(\Theta^{-\frac{1}{m}} - 1 \right)^{\frac{1}{n}-1} \Theta^{-\frac{1}{m}-1} \right) \left(\frac{1}{\theta_s - \theta_r} \right) \quad (5)$$

4. 一次元パルス状降水実験

(1) 実験装置と実験方法

実験装置を図-4に示した。カラムは内径124mm, 全

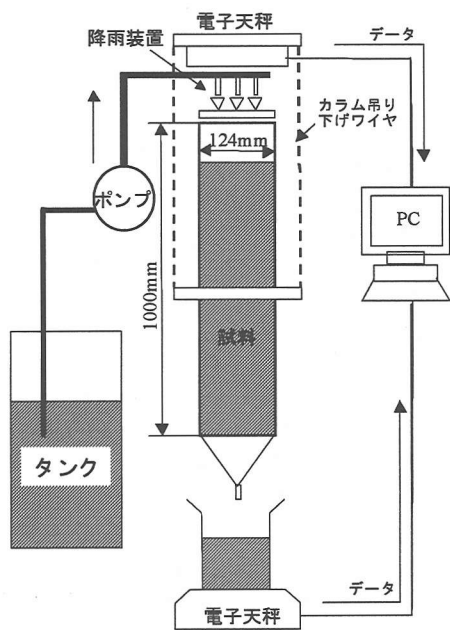


図-4 一次元実験装置

長 1000mm である。カラム底部に金網を接着し、試料を支えられるようにした。カラム上部には降水を供給するための 3 つの漏斗を付けた。カラムの質量変化(含水率変化)を経時的に測定するため、カラムをワイヤーで電子天秤に釣り下げた。流出水は、下部に設置した電子天秤上の 5 リットルポリエチレンビーカーに受け、その質量を計測した。降雨はチューブポンプにより、水道水をタンクから降雨装置の漏斗上に給水した。給水量はポンプの回転数により制御した。上下両天秤によって測定されるデータはコンピュータへと取り込み、データを随時ディスク上に記録した。

実験の手順は次のようにして行った。カラムに試料を充填して上部天秤に釣り下げた後、下端からゆっくりと飽和させた。試料上部まで水位を上昇させ、数日間水浸状態で放置した後、排水させた。排水が停止してから(約 3 日間を目安にした[この状態を以下では自然排水状態という]), 所定の強度で降水を開始した。本研究に用いた焼却灰は撥水性を示し、飽和排水によっても完全な浸潤状態とはならなかった。撥水性を有する焼却灰の場合、微細間隙中に水分が浸入して完全な浸潤状態となるのは、かなり長期間水分と接触する必要があると考えられる。実現象においても、乾燥を受けた焼却灰が撥水性を呈する場合、降雨によって微細間隙まで浸潤した状態となるには長期間を要すると予想される。本研究で行った飽和排水という操作は、3. (2) に述べた土柱法における自然排水状態、すなわち、水封した段階で、完全な浸潤(微細間隙にまで水

表-3 焼却灰の一次元ステップ降水実験の実験条件

灰種	Run No.	充填高さ	充填密度	間隙率	初期含水率	降雨強度	降雨継続時間
		(cm)	(g-dry/cm ³)	(-)	(-)	(mm/h)	(h)
Ash-A	A-1	90.0	1.47	0.508	0.101	12.5	12.6
Ash-A	A-2	90.0	1.47	0.508	0.132	24.3	11.8
Ash-B	B-1	90.0	1.24	0.502	0.162	10.8	21
Ash-B	B-2	90.0	1.24	0.502	0.150	20.5	12

分が浸入した)状態ではないが、浸潤しやすい間隙には水分が浸入し、排水によってそれがバランスした状態を想定して実施した。この操作は、乾燥灰のまま降水実験を行うと、保水によって消費される水分のために応答特性に差が生ずる可能性があったので、それを避けるためにも実施した。

降水開始と共に、全体質量、下部流出水量の計測を開始した。降雨は概ね 12 時間継続し、その後停止した。その後、排水が停止するまで計測を継続した。その後、同一充填条件のまま別の降雨強度で同様の測定を再度実施した。表-3 に各試料に関する実験条件を示した。

(2) 実験結果

各試料に関する一次元パルス状降水実験の結果を図-5 に示す。各図中の線は、破線が次項(3)で示す計算結果で、実線が 7. (2) で示す計算結果である。

いずれの焼却灰における結果も、パルス状の降雨に対する流出の応答は早く、流出開始後には迅速に流入降雨強度に等しくなる傾向にあった。Ash-A と Ash-B を比較すると Ash-A の方が僅かに応答が早い。Ash-A は、飽和透水係数測定値では Ash-B よりも小さくなっているが、この点については 3. (3) において述べたとおり、下向流による測定による問題であると考えられる。本不飽和浸透実験においては、Ash-B に比較して粒径の大きい Ash-A では、間隙径が大きいと考えられ、それを反映して応答が早くなつたと予想される。

(3) Richards 式と Van Genuchten 式による数値解析

式(2)を用いて焼却灰の一次元パルス状降水実験に対する数値計算を行い、実測の流出応答との比較を行った。計算は、カラムを鉛直一次元の N 個のコンパートメントに分割して RKG 法により解いた。式(2)の不飽和透水係数 $K(\theta)$ 、水分拡散係数 $D(\theta)$ は、式(3)、(4)、(5)の VG 式により水分特性曲線から推定する方法を採用した。この時、推定に用いたパラメータ値と飽和透水係数は表-2 に示した。

計算結果は図-5 に破線(cal (V.G)) で示した。いずれの実験結果に対しても、計算値が実測値に較べて著しく遅れることが確認できる。数値計算手法の妥当

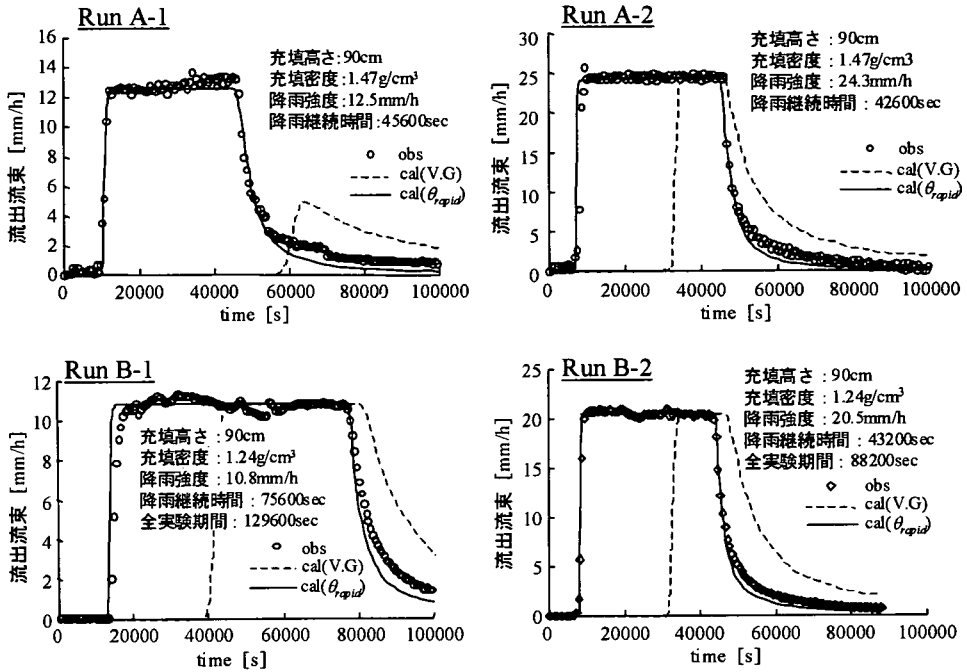


図-5 一次元パルス状降水実験結果(Ash-A, B)

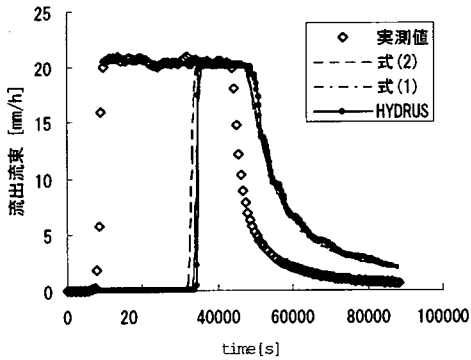


図-6(a) 数値計算方法による比較(Run B-2)

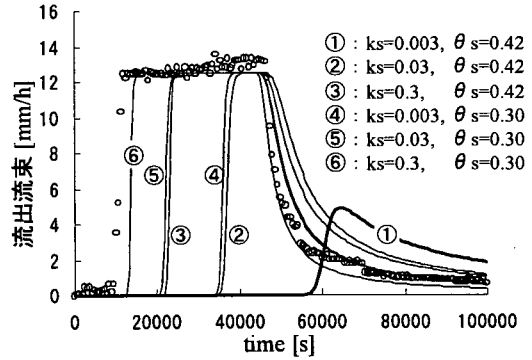


図-6(b) 飽和透水係数, 飽和含水率を変化させた場合の流出応答計算結果(Run A-1)

性を確認するために、式(1)を用いて圧力で解く方法、USSLの有限要素法モデルHYDRUS¹⁰⁾を用いた計算も行ったが、図-6(a)に示すように、式(2)を用いた計算結果と変化無く、いずれも流出応答は実測値に較べて遅れたものとなった。また、Ash-Aに関しては、飽和透水係数が下向流による測定であり、低すぎる値である可能性が高いため、飽和透水係数を変化させた計算も試みた。結果を図-6(b)に示すが、飽和透水係数を大きくするほど、実測値に近づくものの、測定値に対して100倍の飽和透水係数を与えても実測値の応答は再現し得なかった。

5. 流束制御法による層内水分量と移動流束の関係の実測

流束制御法¹⁷⁾は、定常流れ状態にある不飽和多孔質媒体中の移動水分流束と含水率(もしくはポテンシャル)を実測し、不飽和透水係数を得る方法である。流束制御法の理論は次の通りである。

不飽和浸透理論によれば、鉛直一次元の不飽和浸透流束は、

$$v_z = -D(\theta) \frac{d\theta}{dz} + K(\theta) \quad (6)$$

で表現される。層内の水分移動が定常状態にあるとき、図-4のような鉛直一次元カラム内の充填層上部におい

ては、一定含水率($\theta_z = \text{const}$)となる領域が上部に存在する。すなわち、カラム上部では上式の右辺第1項の含水率勾配は $d\theta_z/dz=0$ となり、式(6)は、

$$v_z = K(\theta_z) \quad (7)$$

となる。したがって、一次元の充填層内の流れが定常的に生じているならば、定常時の流量と上部の含水率の関係から不飽和透水係数 $K(\theta)$ を得ることができる。

西垣¹⁰⁾は、この方法において層内の増加水分量を重量測定から計測することで、テンシオメータなどを使用できない粗粒材の不飽和透水係数を決定できることを報告している。また、田中⁹⁾、島岡¹⁰⁾は、本方法を用いて焼却灰層の不飽和透水係数を決定している。

(1) 実験方法

実験は、次のような手順で行った。図-4の装置において自然排水状態にある状態から一定強度(本装置で設定可能な最小の降雨強度)の降水を開始させると同時に流出水量と全質量の計測を開始した。流出水量から算出される下端の流出流束が降雨強度と等しくなったら、その流束での定常状態と見なし、しばらくその状態で降水を続けた後、降雨強度を次の段階へと増大させた。この操作を繰り返し、装置で設定可能な最大の降雨強度に到達したら、逆に段階的に降雨強度を上げていった。得られた全実験期間のデータから各降雨段階の定常時の流束と全質量を取り出し、全質量データから層内の平均含水率を求め、流束との関係を得た。

(2) 結果と考察

流束制御法による測定結果の例として、Ash-Aに対して実施した流束制御法[供給降雨強度(5~25mm/h)、定常状態での降雨継続時間(10~20hr)]における流束と平均含水率の推移を図-7に示した。同様の測定を繰り返し行って求めた流束と平均体積含水率の関係を図-8に示した。この例では、Ash-Aに対して[降水の開始⇒段階的な降雨強度の増大⇒装置で供給可能な最大の降雨強度に到達⇒段階的な降雨強度の減少⇒降水の停止]を一つの実験とし、10回の測定を実施したものである。しかしながら、図-8に示すとおり、実験の繰り返しにともない、同一の流束であっても含水率が増大していく傾向が認められる。このため、流束制御法で得られた結果からでは、流束と含水率の関係を一对一の関数として定めることができない。

6. 一次元長期連続降水実験

流束制御法において認められた含水率の増大(図-8)は、実験の繰り返しに伴い焼却灰層内に浸潤が進行

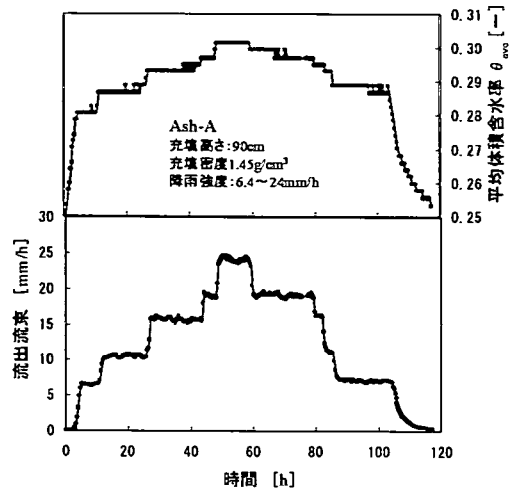


図-7 流束制御法による流出流束と層内平均含水率の時間変化 (Ash-A)

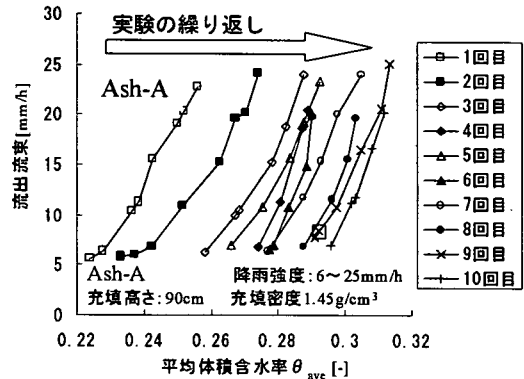


図-8 流束制御法による不飽和透水係数測定実験の繰り返しによる含水率の推移 (Ash-A)

していることを示すものである。そこで、この増加していく水分が焼却灰層内の不飽和浸透現象にどのような意味を持つのかを検討するために、Ash-Bを対象に一定強度の降雨を長期間与え、含水率の長期的変化を追跡した。

(1) 実験方法と実験条件

試料は乾燥状態のまま充填(充填高さ: 90cm、充填密度: 1.23g/cm³)した。充填後カラム下部より注水し、水面を試料表面まで上昇させ、2週間水浸状態で放置して水に馴染ませた。その後54日間排水し、実験を開始した。測定内容は一次元パルス状降水実験と同じである。ただし、長期の降水によって焼却灰中の溶解性成分が洗い出され、灰の質量が減少することが予想されたため、カラムから流出した水はすべてスチール容器に入れて100℃の乾燥器で蒸発させ、析出した成分の質量を計測した。含水率を算出するときの灰の

質量はすべてこの溶解性成分の質量を補正して行った。

実験を開始した時点での層内の平均体積含水率は20.7%であった。降雨は降雨強度10.7mm/hとし、実験は約125日間継続した。

(2) 実験結果と考察

実験開始後30時間の流出流束と平均体積含水率の変化を図-9に、また、全実験期間である125日間の変化を図-10に示した。それぞれ、横軸に実験を開始してからの経過時間(日数)、下段に流出流束(mm/h)、上段に含水率を示した。なお、溶解性成分量は3ヶ月間で約120gで、灰の総重量(14500g)に対して、約0.8%であった。

図-9に示すとおり、降雨開始後約4時間で流出が開始し、5時間後にはほぼ流入水量に等しい流出水量(10mm/h程度)となった。同時に含水率も、実験開始時には20.7%であったものが5時間後には25.8%まで急激に増大した。しかし、その後の長期的変化は図-10に示す様に、流出流束が10mm/h前後で推移したのに対し、含水率は約3ヵ月後にほぼ一定値に達するまで緩慢な上昇を続けた。一定に達した時の含水率は30.3%であった。この結果から、焼却灰層内における含水率の変化は、初期の急激な含水率の増大とその後の緩慢な含水率の増大の2つに分けることができる。しかし、緩慢に含水率が増大しても、流束にはほとんど変化が見られないことから、緩慢に増大した含水率が支配的な流束に与える寄与は小さく、流束には初期に急激に増大した含水率が関係していると考えられる。

ここで、既往の研究でも述べられているように焼却灰層内の不飽和水分移動が多成分流れであるとする、緩慢に増大した含水率が緩流水に、急激に増大した含水率が急流水に対応すると考えられる。

さらに、与えた全流入水量は、年間1600mm/年の降雨の半分が廃棄物層に侵入したときの約35年分(=115days×24cm/day÷800mm)に相当するが、この全流入水量(333L=115days×24cm/day× $\pi/4$ ×(12.4cm)²)に対して、含水率が25.8%から30.3%へ増加したときの層内水分量の増加(0.49L= $\pi/4$ ×(12.4cm)²×90cm×0.045)は、わずかに0.15%にすぎない。

すなわち、以上のことから、焼却灰層内における不飽和水分移動は、急流水移動によって支配されていると考えることができる。そしてその流れは、水分特性曲線にも見られたように、大量に存在する毛管吸引力を持たない粗大間隙を重力を駆動力として移動していると予想される。

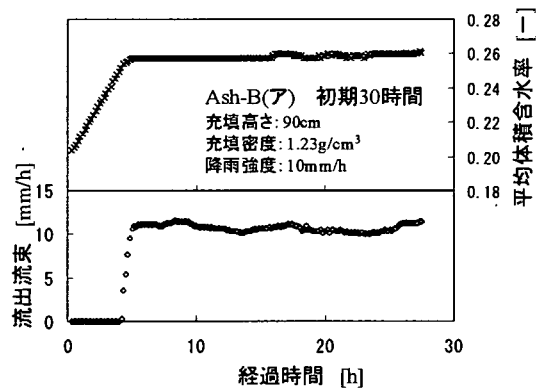


図-9 長期連続降水実験における流出流束と充填層平均含水率の変化 [初期30時間] (Ash-B)

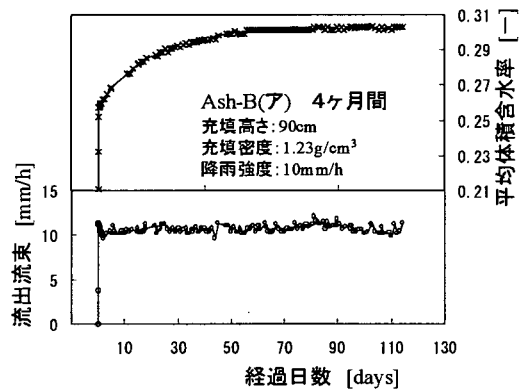


図-10 長期連続降水実験における流出流束と充填層平均含水率の変化 [4ヶ月時間] (Ash-B)

7. 焼却灰層における移動水分式の定式化

緩慢に含水率が変化しても移動水分量がほとんど一定であったことは、移動水分量に直接関わっているのが急激に流れる水分に対して増大した含水率であることを意味する。そこで、これらの含水率を分離して考え、急激に増大する含水率のみによって水分移動を表現することを検討する。

(1) 急流水に着目した移動水分流束と増加含水率の関係

例として、Ash-Bの流束制御法測定結果を対象とした増加含水率と流束の関係の求め方を示す。Ash-Bでは、(ア)長期降水実験後に行った(Run1～4)[充填高さ:90cm, 充填密度:1.23g/cm³]と(イ)乾燥充填した試料で実施した(Run1～5)[充填高さ:80cm, 充填密度:1.12g/cm³]の2つのカラムで流束制御法を実施し

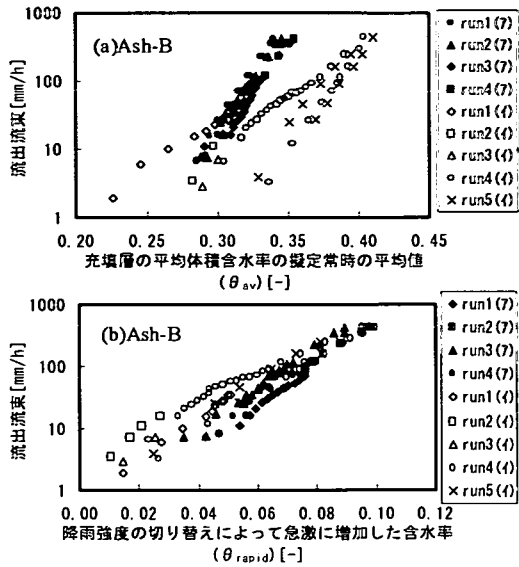


図-11 流束制御法の結果からの含水率の分離(ash-B)

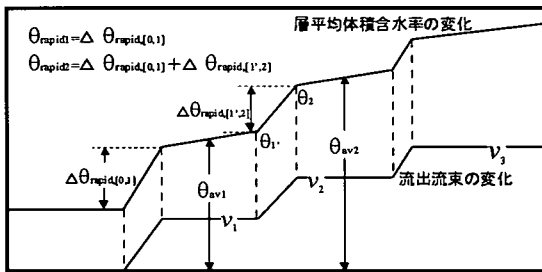


図-12 流束制御法の結果からの含水率の分離

た. まず, 流束制御法から得られた平均体積含水率と擬定常時の流量の関係を図-11 (a) に示す. また, 図-12には, 各降雨段階の擬定常時における含水率と流束の分離過程を模式的に示した.

流束の切り替えによって急激に増大した含水率 $\Delta\theta_{rapid}$ のみを算出し, それらの和を初期含水率を基準に求め, これを θ_{rapid} とする. すなわち, 前段の流束 v_i において流入流束を v_{i+1} に切り替えた時点の含水率を θ_i とし, 流出流束が v_{i+1} に達した時点の含水率を θ_{i+1} とすれば

$$\Delta\theta_{rapid}(i, i+1) = \theta_{i+1} - \theta_i \quad (8)$$

であるとする. したがってある任意の流束 v_i では

$$\theta_{rapid, i} = \sum_{\xi=1}^i (\Delta\theta_{rapid, [\xi, \xi+1]}) \quad (9)$$

この θ_{rapid} を横軸にとり, 各流出流束を縦軸にとって表すと図-11 (b) となる. θ_{rapid} を用いることで, (ア), (イ) いずれもそれぞれのデータが近い値に集まってくる事が確認できる. こうして求めた各灰に関する増

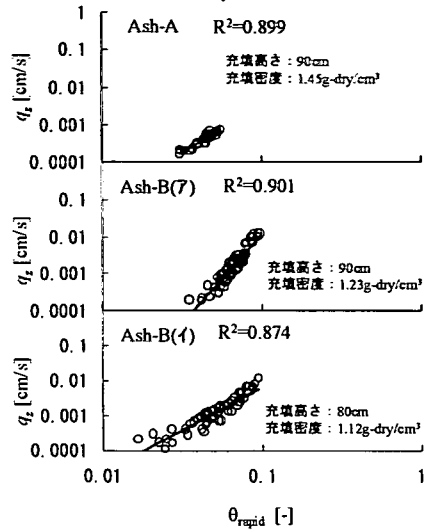


図-13 流束制御法により得られた急激に増大する含水率 θ_{rapid} と流束の関係

加含水率 (θ_{rapid}) と流束の関係を, 両軸対数として図示すると図-13のように, ほぼ直線関係にあることがわかる. そこで, 鉛直方向流束 v_z を以下のようにして表現した.

$$v_z = a\theta_{rapid}^b \quad (10)$$

得られた θ_{rapid} と流束 v_z の関係を整理すると以下になる.

$$\text{Ash-A} : v_z = 0.725\theta_{rapid}^{2.40} \quad (11)$$

$$\text{Ash-B(ア)} : v_z = 687\theta_{rapid}^{4.78} \quad (12)$$

$$\text{Ash-B(イ)} : v_z = 1.69\theta_{rapid}^{2.42} \quad (13)$$

(2) 急速増加含水率を用いた一次元不飽和浸透実験結果の数値解析

実験によって得られた急激に増加した含水率 (θ_{rapid}) と移動水分量の関係を用いて, 4. に示した一次元パルス状降水実験に対する数値計算を行った. 計算は, 4. (3) で述べたコンパートメントモデルを用い, 鉛直方向流束は式(11)~(13)で表現した.

計算結果を, 図-5 に $\text{cal}(\theta_{rapid})$ として示した. 本関数系を用いた計算結果は, VG式を用いた計算結果よりも実測値への適合が良好である事を確認できる. 式(10)は, 鉛直方向の流束を不飽和透水係数とポテンシャル勾配の積という形ではなく, 含水率のみの関数として表している. しかし, 例えば, Beven⁽¹²⁾ は, 粗大間隙(マクロポア)中の流れは重力支配であるとして, その流束を $v_z = a\theta^b$ (θ : 粗大間隙中の含水率 [cm^3/cm^3], a, b : 定数) で表現していることや, 例えば, Bird⁽¹⁹⁾ の傾斜壁面の薄層流の式を用いて, 粗大間隙中の流れが

間隙壁面を液膜となって流れると仮定して導出される式は、重力を含む比例定数に膜状含水率のべき乗関数を乗じた形となる²⁰⁾ことなどから、式(10)は、重力支配で生ずる急流水を表しているものと考えられる。そして、式(11)～(13)式で焼却灰の一次元降水実験の流出応答が良好に再現できたことは、急流水のみに着目した鉛直方向水分移動式で焼却灰層内の不飽和水分移動を十分に表現できることを示していると考えられる。

8. 二次元水分移動実験

(1) 実験装置と実験方法

実験には図-14に示す直方体の二次元実験装置を使用した。装置は、高さ800mm、幅320mm、奥行き60mmの上部と、深さ200mm(または150mm)、幅320mm、奥行き60mmの下部構造をフランジで連結したもので、装置下部は横方向流れを阻止するために仕切板を入れて7つに分割している。下部5cmは金網を入れ試料を支えられるようにした。降雨は、ポンプで試料上部表面の中央に敷いたガーゼ上に供給し、一様に浸透するようにした。

各実験の前には装置下部より給水して試料上部にまで水面を上昇させ、一旦飽和してから排水を行い、約2日間放置し、下部からの流出が停止してから実験を開始した。この操作は充填層内の初期含水率を一様にするために各実験毎に行った。測定は、10分間隔でメスシリンダーに溜まった水量を計測した。Ash-AとBに対して実施した実験の条件を表-4に示す。

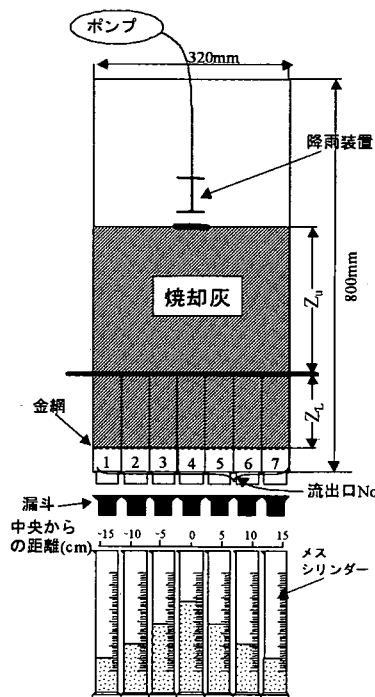


図-14 二次元実験装置

表-4 二次元実験条件

ash	Run	Z _u	Z _L	Q _{in}	ρ _d	ash	Run	Z _u	Z _L	Q _{in}	ρ _d
Ash-A	A-1	100	150	5.29	1.44	Ash-B	B-1	200	150	4.80	1.27
	A-2	100	150	3.56	1.44		B-2	200	150	5.19	1.27
	A-3	100	150	1.78	1.44		B-3	200	150	4.77	1.27
	A-4	200	150	5.29	1.40		B-4	200	150	3.33	1.27
	A-5	200	150	3.56	1.40		B-5	200	150	3.24	1.27
	A-6	200	150	1.78	1.40		B-6	200	150	3.56	1.27
	A-7	300	150	5.29	1.43		B-7	200	150	1.56	1.27
	A-8	300	150	3.56	1.43		B-8	200	150	1.74	1.27
	A-9	300	150	1.78	1.43						

Z_u: 充填高さ(上部) [mm] Q_{in}: 供給水量 [mL/min]
 Z_L: 充填高さ(下部) [mm] ρ_d: 充填密度 [g-dry/cm³]

(2) 実験結果

図-15にAsh-AのRunA-8, 9, Ash-BのRun B-6, 8の定常時の流出分布を示した。定常時の横方向流出分布は、Ash-Aでは横方向への水分移動が進行する傾向にあったが、Ash-Bでは、横方向移動(拡散)の進行の程度は弱く、中央付近からの流出が優勢であった。他の各Runにおいても同様の流出分布が確認された。

(3) 急速に増加する含水率による水平方向移動式の決定

二次元浸透においても、まず、式(2)による解析方法(4. (3)の解析法)を二次元に拡張して実測値の再現を試みた。定常時の流出分布を図-15に破線で、また、非定常の流出応答をAsh-BのRun B-6を例として図-16(a)に示した。定常時の横方向流出分布は、Ash-Bについては比較的よく一致しているが、Ash-Aに関しては、計算値が実測値に比べ中央側に集中する傾向が顕著で

ある。一方、非定常の流出応答は、一次元の結果と同じように実測値に比較して応答が遅れる結果となった。

一次元では焼却灰層内の水分移動を急流水に着目して表現した。そこで、横方向水分移動は、毛管吸引力によらず、水分勾配に比例して生ずると仮定し、以下のように表現した。

$$v_y = -D_H(\theta_{rapid}) d\theta/dy \quad (14)$$

ここで、横方向水分拡散係数D_Hは以下のように表現できるとした。

$$D_H(\theta_{rapid}) = c\theta_{rapid}^d \quad (15)$$

そして、実測の定常時流出分布を最も良好に表現し得る最適な横方向水分拡散係数のパラメーターc, dを各実験ごとに探索した。パラメーター探索は、実測の定常時流出分布を目的値として、Simplex法による繰り返し計算を行い、最適値を探索した。探索されたc, dによる定常時流出分布を図-15中に実線(探索D)で示した。定常時流出分布を実験結果に一致するように

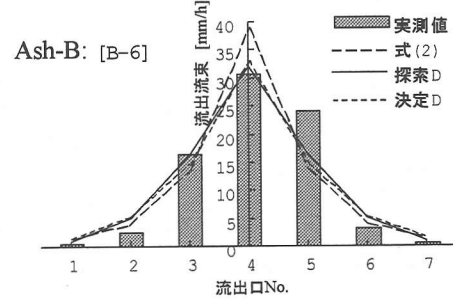
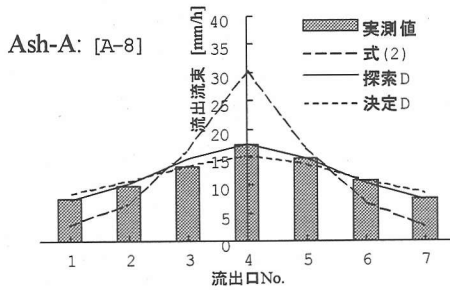
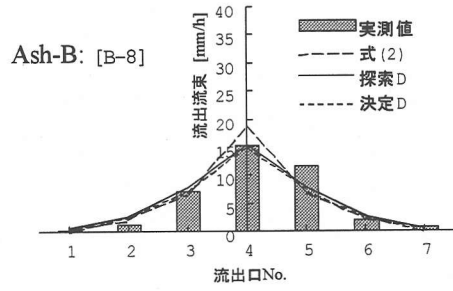
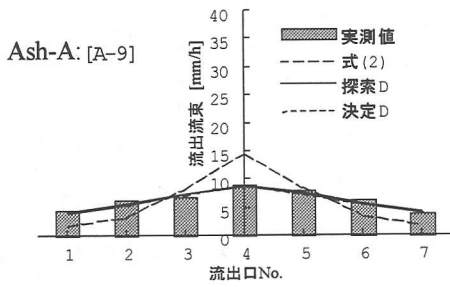


図-15 二次元浸透実験における定常時の流出分布

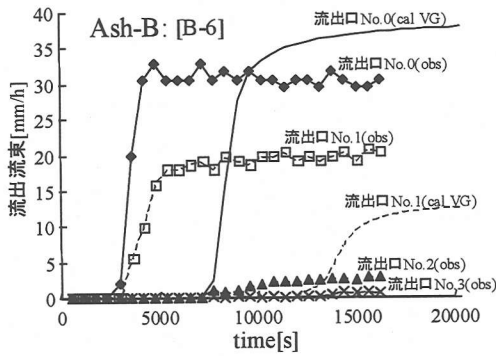


図-16(a) 二次元浸透実験における非定常流出応答 (実測値と式(2)による計算結果) [Ash-B Run B-6]

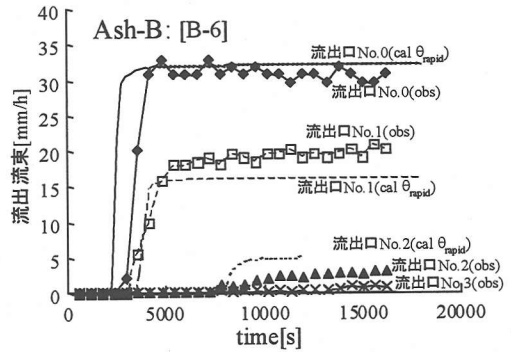


図-16(b) 二次元浸透実験における非定常流出応答 (実測値と θ_{rapid} による計算結果) [Ash-B Run B-6]

探索したパラメーターであるため、当然流出分布との良好な一致が得られた。同様の探索を各Runの実験結果毎に行い、得られた横方向水分拡散係数を増加含水率の関数として図示すると図-17のようになり、各Runから求められた横方向水分拡散係数の曲線はほぼ同じ曲線を描く結果となった。この各Runに関して求めたパラメータ値を平均し、Ash-A, Ash-Bそれぞれの横方向水分拡散係数のパラメータを以下のように決定した。

Ash-A : $D_H(\theta_{rapid}) = 9.9\theta_{rapid}^{1.76}$ (16)

Ash-B : $D_H(\theta_{rapid}) = 172\theta_{rapid}^{2.00}$ (17)

この D_H を用いて計算した結果が、図-15中に決定Dとして示す点線である。探索Dによる結果とほぼ同様で、実測値とはよい一致が見られる。また、Ash-BのRun B-6を例に非定常応答の計算結果を図-16(b)に示すが、非定常応答も概ね良好に再現し得た。

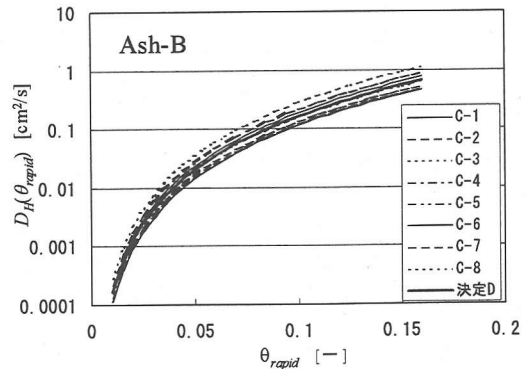


図-17 得られた横方向水分移動係数 $D(\theta_{rapid})$

本来、こうした係数の関数型は、物理的機構に基づいて導出されるべきであるが、本研究においては、上式の物理的意味に関する十分な検討にまで至らなかった。従って、上式を実験式として位置づけた。拡散係数の関数型の検討にあたっては、定数拡散係数を用いたパラメータ探索も行ったが、流量や充填高さを変化させた各実験結果を単一の係数で再現することが困難であった²⁾ため、式(15)を仮定した。従って、式(15)の物理的意味に関しては、今後十分に検討する必要があると考えられる。

9. まとめ

焼却灰充填層を対象に、一次元と二次元の不飽和浸透実験を行った。その結果以下のような知見を得た。

(1)一次元パルス状降水実験の結果から、焼却灰層からの応答は早く、Richards式とVan Genuchten式を用いた数値計算(毛管吸引力による不飽和水分移動理論)では再現することができなかった。

(2)焼却灰に関しては、流束制御法による測定結果から直接、層内水分量と移動流束の関係を求めることは、焼却灰層内の含水率が単一の移動流束に対して様々な値をとるために困難であった。

(3)長期間の一定降雨実験から、焼却灰層では、流入水と直接関係して急激に増加する含水率と、極めてゆっくりと増加していく含水率が存在することを確認した。こうした特殊な含水率の変化は、焼却灰層内の間隙構造によるものと考えられ、急激に増加する含水率が粗大間隙中を移動する水分によるものであり、緩速で増大する含水率が微細間隙中を移動するものであると考えられる。そして、前者の流れが圧倒的に大きい。

(4)流束制御法の結果から、急激に増加する含水率のみを分離し、それによって移動流束との関係を求めた結果、両者は両対数軸上で直線関係となり、Bevenらのマクロポア内の流れと同じ特徴を有していた。そのため、べき乗関数型で流束と含水率の関係を表現し、パルス状降水実験の解析に用いたところ、流出応答を良好に再現し得た。

(5)二次元の横方向水分移動式についても、Richards式とVan Genuchten式では、流出分布を再現することが困難であった。そのため、一次元と同様に、急流水に着目した水分移動式で表現することを試み、二次元の不飽和浸透実験の流出分布結果に対してパラメータ探索を行って横方向水分移動式、及び横方向水分拡散係数を決定したが、得られた関係式は流出分布と流出応答を再現することができた。

焼却灰の特性は、炉形式、焼却対象ごみ種、分別の状況等によって変化すると考えられ、焼却灰によっては、一般の不飽和土に適用される浸透理論や測定法を採用する方が望ましい場合もある。本研究で用いた焼却灰は、比較的粒径が大きく、撥水性を呈するものであった。したがって、そのような特性を有する灰であれば、本研究で採用したような方法が適用できると考えられる。

参考文献

- 1) 日野幹雄, 太田猛彦, 砂田憲悟, 渡辺邦夫: 洪水の数値予報<その第一歩>, 森北出版株式会社, pp. 47-51, 1989.
- 2) Straub, W. A. and Lynch, D. R.: Models of Landfill Leaching: Moisture flow and inorganic strength, *Journal of environmental engineering division, ASCE*, Vol. 108, No. 223, pp. 231-250, 1982.
- 3) Korfiatis, G. P., Demetropoulos, A. C., Bourodimos, L. and Nawy, E. G.: Moisture Transport In A Solid Waste Column, *Journal of environmental engineering division, ASCE*, Vol. 110, No. 4, pp. 780-796, 1984.
- 4) Demetropoulos, A. C., Sehayek, L. and Erdogan, H.: Modeling leachate production from municipal landfills, *Journal of environmental engineering division, ASCE*, Vol. 112, No. 5, pp. 849-866, 1986.
- 5) 田中信寿, 松藤敏彦: 廃棄物埋立層における不飽和水分移動特性とその測定法に関する研究, 廃棄物学会論文誌, Vol. 4, No. 3, pp. 107-115, 1993.
- 6) 島岡隆行, 栗谷陽一, 花嶋正孝, 松藤康司, 柳瀬龍二: 廃棄物層における水分および溶質の移動に関する研究, 衛生工学研究論文集, Vol. 24, pp. 167-175, 1988.
- 7) 寺島 泰, 内藤茂喜: 廃棄物埋立層内における水と汚濁物質の挙動とその予測方法—埋立地浸出水量・水質予測の基礎として—, 衛生工学研究論文集, Vol. 25, pp. 1-13, 1989.
- 8) 三谷紀行, 田中信寿, 神山桂一: 廃棄物充填層内の不飽和流れにおける非反応性物質の移動特性について (第3報), 土木学会第43回年次学術講演会講演概要集, II-449, pp. 934-935, 1988.
- 9) 熊野顕生, 田中信寿, 神山桂一: 廃棄物充填層内の不飽和流れにおける非反応性物質の移動特性について (第4報), 土木学会第44回年次学術講演会講演概要集, II-435, pp. 940-941, 1989.
- 10) 高村和典, 田中信寿, 神山桂一: 廃棄物充填層内の定常不飽和流における非反応性物質の移動特性について, 土木学会第41回年次学術講演会講演概要集, II-437, pp. 873-874, 1986.
- 11) 田中信寿, 神山桂一, 宇野 晋: 廃棄物充填層内の不飽和流れにおける非反応性物質の移動特性について (第2報), 土木学会第42回年次学術講演会講演概要集, II-469, pp. 968-969, 1988.
- 12) Germann, P. F. and Beven, K.: Kinematic Wave

- Approximation to Infiltration into Soils with sorbing Macropores, *Water Resources Research*, Vol. 21, No. 7, pp. 990-996, 1985.
- 13) 森澤真輔, 堀内将人, 山岡泰治, 井上頼輝: 多成分流れモデルによる通気層内物質移動の解析, 衛生工学研究論文集, 第22巻, pp. 9-21, 1986.
- 14) 島岡隆行: 循環式準好気性埋立に関する研究, 平成元年九州大学博士論文, 1989.
- 15) Vogel, T., Huang, K., Zhang, R. and van Genuchten, M. Th.: The HYDRUS Code for Simulating One-Dimensional Water Flow, Solute Transport, and Heat Movement in Variably-Saturated Media, *Research Report No. 140, U. S. Salinity Laboratory*, 1996.
- 16) van Genuchten, M. Th.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 44, pp. 892-898, 1980.
- 17) 中野政詩, 宮崎 毅, 塩沢 昌, 西村 拓: 土壌物理環境測定法, 東京大学出版会, 1995.
- 18) 西垣 誠, 梅田美彦, 河野伊一郎: 高透水性材料の不飽和浸透特性の測定法, 地下水学会誌, Vol. 35, No. 2, pp. 113-122, 1993.
- 19) Bird, R. B.: TRANSPORT PHENOMENA, John Wiley & Sons, 1960.
- 20) 東條安匡, 田中信寿, 松藤敏彦, 松尾孝之: キャピラリーバリアを用いた廃棄物埋立地底部集排水構造の排水効率に関する研究-数値解析-, 土木学会論文集, No. 692/VII-21, pp. 41-52, 2001.
- 21) 東條安匡, 松藤敏彦, 田中信壽, 松尾孝之, 森田祥子: 焼却灰充填層の2次元不飽和水分移動とそのモデル化, 第8回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp. 735-737, 1997

(2002. 1. 16 受付)

AN EXPERIMENTAL STUDY OF UNSATURATED WATER MOVEMENT IN INCINERATION RESIDUE LAYER

Yasumasa TOJO, Nobutoshi TANAKA, Toshihiko MATSUTO and Takayuki MATSUO

Experiments had been conducted for investigating unsaturated water movement in incineration residue layer. Outflow responses were so rapid that they could not be expressed by Richards theory which developed for uniform porous media. Although the flux control method was adopted to measure unsaturated hydraulic conductivity of incineration residue, it was difficult to obtain the relationships between water content and flux. The results of long term continuous rainfall experiment exhibit, that water movement in incineration residue is dominated by rapid gravity flow. The power function between flux and rapidly increased water content was derived from results of flux control method. And calculation carried out by using these functions showed good agreement with observed outflow results.