

(44) 廃棄物処分場覆土における表面流の生成とその排除

Investigation of Surface Runoff and its Removal on Landfill Cover

東條安匡*, 田中信寿*, 松藤敏彦*, 松尾孝之*

Yasumasa Tojo*, Nobutoshi Tanaka*, Toshihiko Matsuto*, and Takayuki Matsuo*

ABSTRACT; In order to reduce leachate which is to reach to bottom of the landfill, diversion of rain at landfill surface must be indispensable. In this study, surface runoff over the cover soil and lateral flow within the cover were investigated to promote water removal from landfill surface. For the purpose, field measurement and laboratory experiment were conducted. From the result of field measurement and laboratory experiment, surface runoff were mainly dominated by hydraulic conductivity of cover soil. And lateral flow was generated at the condition that hydraulic conductivity of waste is lower than that of cover soil. However, even opposite condition of it, lateral flow derived by capillary barrier was generated at their boundary. Because of simulation results based on the theory of unsaturated flow and kinematic wave method were coincident with experimental results, runoff coefficients at steady state for various hydraulic conductivity were calculated and were summarized. Estimated runoff ratios gained from the simulation at varying slope length and rainfall pattern, designated that hydraulic conductivity lower than 10^{-5} cm/s was necessary for effective surface water removal.

Keywords; Landfill cover, Surface runoff, Hydraulic conductivity, Lateral flow, Capillary barrier

1. はじめに

地域住民が最終処分場からの浸出水漏洩や地下水汚染問題に対して抱く懸念は広がりを増し、処分場の立地はますます困難な事態となっている。浸出水の漏洩リスクを低減するには、処分場底部への水分貯留を回避することが重要である。そのためには不規則に変動する降雨を効果的に排除する機構を処分場内に築く必要がある。昨今では、不透水性のトップカバーの使用やクローズド型処分場の採用などによって積極的に浸出水を制御する方法が試みられているが、土質材料を覆土材として採用している処分場は依然として多く、効果的な水分排除がなされているとは言い難い状況にある。我が国では、処分場構造指針¹⁾においても覆土材と雨水の排除に関しては定性的記述がわずかに示されているにすぎず、覆土材の特性や構造と雨水の排除機構に関する定量的な知見は不足していると思われる。そこで本研究は最終処分場表面での表面流と覆土内側方流を対象に実験・数値解析を行い、覆土材の特性や構造が水分排除割合に与える影響について検討した。

2. 既往の研究

埋立地における表面流出水量の算定には古くから合理式が採用されている。しかし、合理式では降雨の継続時間、土壌の先行含水率、降雨の頻度、覆土材の透水性等と表面流出の関係を十分に考慮し得ないと言う問題が存在する²⁾。また、昨今の多層型覆土では、表面流だけではなく覆土内部の側方流も水分排除に重要

*北海道大学工学研究科

(Division of Environment and Resource Engineering, Hokkaido University)

な機能を果たしている。そのため、表面流だけでなく側方流も加味した検討が必要となる。表面流に関しては、長谷川^{3,4)}が大規模埋立槽を用いて2種の覆土材の表面流発生量を比較し、低透水性覆土の使用によって浸出水量だけでなく浸出水量変動も減少させることができることを示しているほか、土橋ら⁵⁾は水分収支モデルを用いて覆土材の透水係数と浸出水量の関係について検討し、覆土材の透水係数が $5 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 以下になると浸出水量が急激に減少し、 $ks=1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ でほぼゼロになるという結果を導き、最終覆土の透水係数として $ks=1 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ を施工上の目標値として提案している。しかしながら一方で、谷上⁶⁾は処分場原位置で表面流出水量の測定から、現実の覆土は植生により低い透水性を実現することが困難なために、表面流出率は20～30%が限界であるとしている。一方、覆土内における側方流に関しては、多層型覆土の排水層からの水分排除やキャピラリーバリア型覆土に関しての理論・実験的検討^{7~11)}が多数報告されているが、単層の覆土材と廃棄物層の境界での側方流に関しては、覆土(マサ土)と焼却灰層の水分特性の差によりキャピラリーバリア型の側方流が生ずることを井上¹²⁾、渡辺¹³⁾らが実験・数値解析をもとに報告しているのみである。

3. 研究の目的

処分場表面での効率的な水分排除を行うには、表面流に対する覆土透水係数・勾配・降雨強度・集排水溝配置間隔等の関係、及び下部が廃棄物層であるという特殊な条件での表面流と側方流の発生機構や水分排除のための必要条件等を明らかにすることが必要であると考えられる。そこで、本研究では、以下に示す4点を目的とした。

- 1) 最終処分場の原位置において表面流の測定を行い、覆土・廃棄物層という層構成で表面流・側方流のいずれが卓越した流れであるのかを確認する。
- 2) 実験室において、覆土単層、覆土／廃棄物互層の充填条件下で、透水係数、勾配、降雨強度を変化させた実験を行い、表面流・側方流生成に覆土の構成条件が与える影響を定量的に明らかにする。
- 3) 欧米で用いられている多層型覆土を模擬した実験を行い、その流出機構について検討する。
- 4) 覆土層内を飽和不飽和浸透理論、表面流を拡散波近似を用いて表現して覆土上の流出解析を行い、実験結果の再現を試みるとともに、覆土材における種々の条件と表面流出割合の関係を明らかにし、加えて表面排水溝の配置間隔に関して検討する。

4. 覆土上の表面流と側方流生成に関する実験的検討

4.1 処分場原位置における表面流測定

(1) 測定対象処分場

測定は札幌市近郊の処分場の最終覆土が終了した埋立区画において実施した。本処分場は焼却灰主体の埋立地で廃棄物層厚は約4m、覆土厚は20～40cmであった。平成7年に最終覆土施工が行われており、測定を行った平成10年には覆土表面にはわずかに植生が確認される程度で、ほとんどは裸地状態であった。表面はほぼ平坦であったが、わずかに不規則な起伏が認められた。覆土材には河川の浚渫土砂が使用されており、粒度分布及び代表径は図1に示したとおりである。同図中には、廃棄物層である焼却灰に関する粒度分布と代表径も示した。

(2) 測定装置・方法

図2に示すように1.5m四方の区画の3方向を鉄板によって仕切り、下流端には深さ60cm、幅80cmの測定

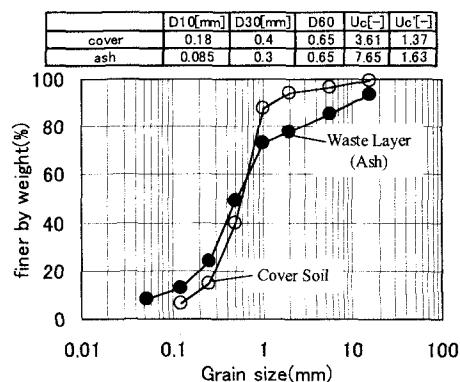


Fig.1 Grain size composition of cover soil and waste(ash)

溝を掘削した。測定溝では覆土と焼却灰層の境界面、及び表面にそれぞれに横向きに鉄板を差し込み、鉄板上に流出してきた表面流出水量と覆土内側方流を樋によって受け測定した。降雨は500lのタンクから水中ポンプで区画中央に設置したスプリンクラーへと送水して散水する形態とし、水量は水中ポンプとスプリンクラー間に設置したバルブによって調節した。流出水量の測定は降雨初期と終了時には2～10分間隔で、定常時は10～20分間隔で行った。測定前後には覆土層の含水率を測定するために表面、表面から5cm下、廃棄物層表面それぞれに試料円筒（直径5cm）を差し込んで試料を採取し、重量法で初期含水率、最終含水率を測定した。試料は1回の測定に付き2～3サンプルを採取した。また、同様に透水係数を測定するサンプルを採取し、実験室において変水位法で飽和透水係数を測定した。

(3)測定条件

流出測定は(Run1-1とRun1-2)、(Run1-3)、(Run1-4)の隣接した3箇所場所を変えて合計4回実施した。いずれの測定地点も覆土厚は20cm、勾配は測定溝に向かって1%の傾斜である。降雨強度、降水継続時間、初期含水率、終了時含水率、空隙率、透水係数を表1に示す。

(4)測定結果・考察

測定結果の例としてRun1-3、Run1-4での流出水量の経時変化を図3に示す。先行含水率はRun1-1、Run1-4がRun1-2、1-3と比較して若干低く乾燥が進行している傾向にあったが、いずれの測定でも降雨の開始後すぐに表面に水面が形成されて表面流が発生した。表面流は迅速に定常に達し、降雨を停止すると速やかに減少して水面も消失した。流出の傾向は他の測定においても概ね同様であったが、降水量が多いときほど流出応答が早い傾向にあった。一方、側方流は、Run1-4のみで供給水量の約0.2%(0.027mm/h)の水量が観測されたが、側壁の隙間からの漏洩が認められており、側方流とは見なし難いものであった。他のRunでも側方流は得られておらず、Run1-4での測定値も信頼性が低いことから、今回の測定において明瞭な側方流は確認できなかったものと思われる。測定前後の含水率変化は覆土表面で約5～19%、表面から5cm下で約1～11%、下部の焼却灰層で約5%(Run1-4)の上昇となっており、覆土内部での含水率変化は降水時間の長いRunほど大きくなる傾向にあった。

以上の結果に対して表面流出を評価するために流出係数(=定常時表面流出水量③/降雨強度①)、流出率(=総表面流出量④/総雨量②)を算出して比較した結果が表2である。全ての測定において表面流出係数は85%以上、表面流出率は70%以上となった。測定区画での透水係数が比較的良かったために、非常に高い表面

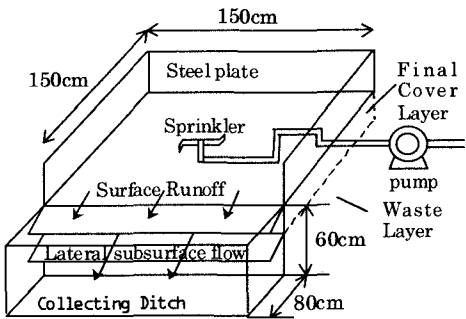


Fig.2 Installation of in-situ flow measurement

Table.1 Summary of in-situ experimental condition, characteristic of cover soil, given rainfall, and water content

Run No	Rainfall Intensity [mm/h]	Duration Time [min]	porosity (-)	density (g/cm3)	Hydraulic Conductivity (cm/s)	
1-1	58.2	95	0.39	1.61	2.6E-05	
1-2	53.3	60	0.39	1.61	3.4E-05	
1-3	35.6	240	0.40	1.59	4.3E-05	
1-4	12.9	1440	0.41	1.56	6.3E-05	
Volumetric Water Content						
Run No	Surface		5cm beneath surface		ash	
	initial [-]	final [-]	initial [-]	final [-]	initial [-]	final [-]
1-1	0.17	0.22	0.21	0.22	-	-
1-2	0.22	0.30	-	-	-	-
1-3	0.22	0.31	0.19	0.23	0.27	0.28
1-4	0.13	0.32	0.15	0.26	0.24	0.29

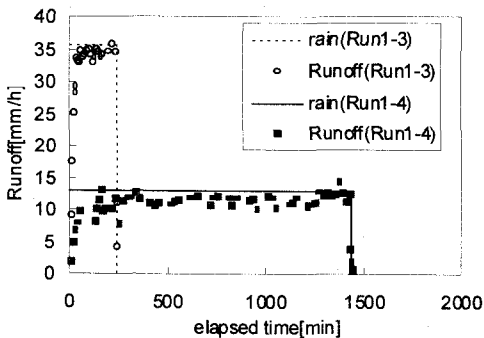


Fig.3 Surface runoff hydrograph for Run1-3 and Run1-4

Table.2 Surface runoff coefficient and Runoff Ratio obtained by in-situ flow measurement

	Rain [mm/h] ①	Σ Rain [mm] ②	Runoff [mm/h] ③	Σ Runoff [mm] ④	③/① [-]	④/② [-]
Run1-1	58.2	92.15	55.3	68.9	0.950	0.748
Run1-2	53.3	53.3	49.1	43.3	0.921	0.812
Run1-3	35.6	142.4	34.4	124.3	0.966	0.873
Run1-4	12.9	309.6	11.1	254.8	0.860	0.823

Runoff Coefficient=Runoff③/ Rain①
Runoff Ratio = Σ Runoff④/ Σ Rain②

流出割合となった。側方流の発生が確認されていないため、全供給水量の約13～25%の水分は覆土層内への保水や下方の廃棄物層への浸透に消費されたものと思われる。

4.2 覆土単層での表面流測定実験

現場測定では、覆土の透水性や勾配等に変化が与えられないことから実験的に種々の変化を与えて覆土特性と表面流出の関係について検討した。

(1) 実験装置

実験には図4に示すアクリル水槽(幅60cm, 高さ65cm, 奥行き15cm)を用いた。下端15cmは5cmごとに分割して12個の流出口を配置し、片側側面にも側方流出を測定するための9箇所の流出口を設けた。勾配はカラム底部の片側端点に設置したジャッキによって調節した。降雨は、液送ポンプで貯水タンクから装置上部のヘッドタンクへと送水し、ヘッドタンクから24本の注射針に分岐させてカラム上部から供給した。降雨強度はポンプの回転数により制御した。測定はカラム下端の各流出口及び充填した覆土の表面に一致する位置の側方流出口からの流出水量を一定時間ごとに測定した。

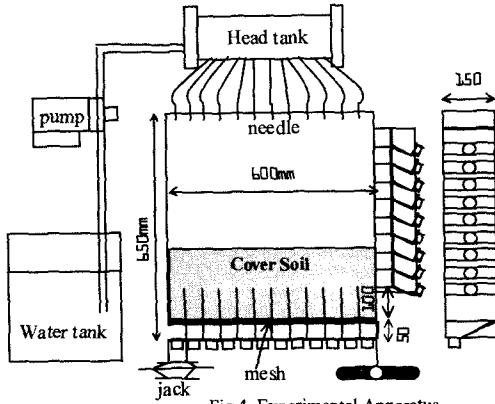


Fig.4 Experimental Apparatus

(2) 試料と充填方法

試料には現場測定を行った埋立地から採取した最終覆土材を使用した。カラム内への試料の充填は、含水率調整等を行わず、現地で採取した状態のまま用いた。これは予備実験において含水率調整して充填した結果、試料の性状がスラリー化し特性が著しく変化したためである。そのため、試料の透水性は締め固め強度を変化させることで変化した。また、覆土単層実験における試料の充填厚さは約20cmとした。

(3) 実験方法・実験条件

実施した各実験の実験条件を表3に示す。各実験ともに充填完了後にジャッキにより勾配を設定し、降水を開始した。同時に表面流出水とカラム下端からの浸透水量の測定を開始し、降雨停止後の排水が終了するまで連続測定(60秒間隔)した。ただしRun2-5以降は一定勾配のまま降雨強度を段階的に切り替える方式とし、各降雨強度において定常時の流出を一定時間測定した後に次の降雨強度に切り替えた。透水係数は充填密度により概ね3段階(低, 中, 高)の変化を与え、各条件において勾配を0, 1, 5, 10%に設定し、各勾配で3～5通りの降雨強度で測定を実施した。実験終了後、充填層表面の3～5箇所から直径5cmの試料円筒で試料を採取し、充填密度、透水係数を測定した。

Table.3 Experimental condition for runoff measurement on cover soil

Run No	Thickness H [cm]	Density ρ_d [g/cm ³]	Porosity n [-]	Conductivity Ks [cm/s]	Gradient θ [%]	Rainfall Intensity I [mm/h]
2-1	21	1.85	0.30	8.8E-06	1	6, 16, 32
2-2					10	6, 16, 32
2-3	21	1.60	0.40	5.0E-05	5	6, 12, 24, 78
2-4					10	6, 16, 28, 80
2-5	22	1.55	0.41	2.7E-04	0	16, 27, 48
2-6	22	1.46	0.45	8.0E-04	5	5, 15, 26
2-7						50, 85
2-8	22	1.54	0.42	6.3E-04	10	5, 15, 26
2-9						50, 84
2-10	22	1.51	0.43	5.1E-04	15	6, 16, 28
2-11						47, 80

(4) 実験結果・考察

実験結果の例として、Run2-2, 2-4, 2-8(勾配10%, 降雨強度約16mm/h)の流出応答を図5に示す。Run2-8は降雨強度を変化させているため、階段状の応答曲線となっている。図5は横軸を測定開始からの時間、縦軸を各流出量を装置断面積で除したフラックスとし、図中には降雨強度、表面流出量、底部排水量をプロットした。透水係数のもっとも低いRun2-2($K_s=8.8 \times 10^{-6}$ cm/s)では、降水を開始してすぐに表面流が生成し、迅速に供給水量と同等の水量に達した。100分間降雨を継続したが、底部からの流出は確認されず、100%が表面からの流出成分であった。一方、Run2-4はRun2-2よりも透水性を高くした充填であったが、表面流はRun2-2と同様に降雨開始後すぐに発生した。しかし、その流量は降水量の約90%程度のまま降雨終了まで

一定流量で推移した。底部からの流出は約70分後に開始し、その後は迅速に定常状態となった。また、ほとんど締め固めを行わなかったRun2-8は、5mm/h、16mm/hでは表面流は全く発生せず、全降水が覆土内に浸透した。降雨強度を26mm/hに切り替えて約20分経過した時点で湛水が生じ、表面流が発生した。他のRunに関してほぼ同様に、低透水性のRun2-1、2-2はほぼ100%が表面流出し、Run2-3、2-4はわずかに底部排水が認められたものの大半は表面流出であり、その割合は降雨強度を大きくするほど高くなる傾向にあった。いずれも 10^{-4} cm/sの透水係数のRun2-5～2-11は、透水係数が 5×10^{-4} cm/s以上のRun2-6～2-11では約30mm/h以上の強い降雨で表面流が発生したが、やや低い透水性のRun2-5 (2.7×10^{-4} cm/s)は16mm/hの降雨で約40%が表面流出し、透水係数の変化に対して表面流出の発生割合が鋭敏に変化した。この傾向は、土橋⁹⁾らがマクロモデルから得た 5×10^{-5} cm/sで浸出水量が急激に変化するという報告と類似であるが、提案される 1×10^{-4} cm/sという最終覆土施工管理目標値は、今回の実験では設定していないため、以降の数値解析で検討を行う。

各実験に関して表面流出係数を算出し、比較した結果を表4に示す。ここに示す表面流出係数とは、流出が定常に達した時点での降雨強度[mm/h]に対する表面流出水量[mm/h]の割合である。本表より表面流出係数は降雨強度が大きくなるほど増大しており、表面流出は覆土材の透水係数に強く依存しているという傾向を確認できる。一方、本実験においては勾配の変化が流出係数に与える影響はほとんど確認されなかった。これは、実験で設定した勾配が0～10%程度と狭い範囲であったことに起因すると考えられる。

4.3 覆土・廃棄物互層での表面流・側方流測定実験

覆土単層の実験結果は表面流出が覆土層の透水性に強く支配され、今日一般的に使用されている透水性の比較的高い覆土材では弱い降雨の大半が浸透する可能性が示された。しかし、この浸透した雨水の覆土内での移動および側方流の生成に関しては現場測定でも確認されなかったことから、再度、実験的に覆土／廃棄物という互層で境界面水分挙動と側方流について検討を試みた。

(1) 実験装置

実験装置は4.2と同一の装置を使用し、装置内には図6に示すように上部に覆土層、下部に廃棄物層という構造を模擬して試料を2層に充填した。

(2) 試料と充填方法

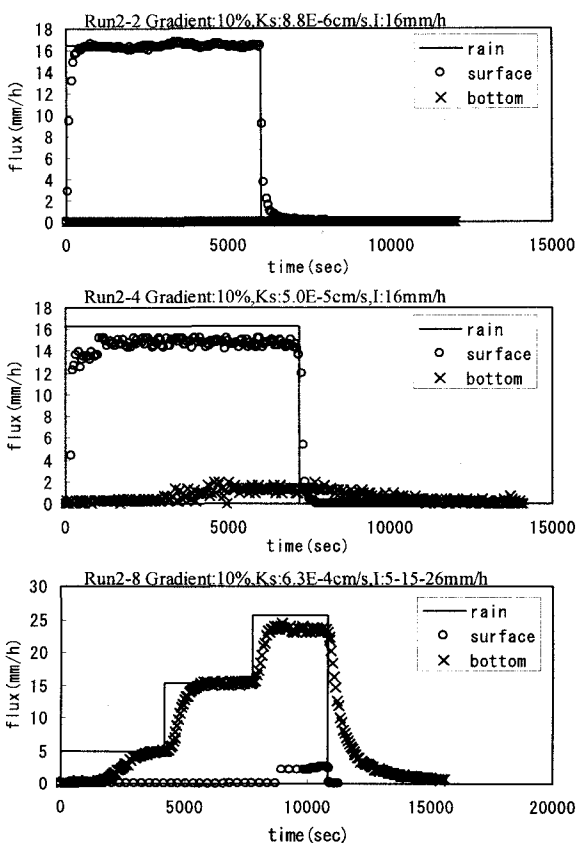


Fig.5 Hydrograph of surface runoff and discharge from the bottom of column for Run2-2, 2-4, and 2-8.

Table.4 Surface Runoff Coefficients obtained from Run2-1 to 2-11. These Coefficients are calculated from dividing runoff flux by rainfall intensity at steady state.

Run No	Permeability	Ks [cm/s]	gradient [%]	Rainfall Intensity(mm/h)				
				5~6	12~16	24~32	48	78~80
				Runoff Coefficient [-]				
2-1	low	8.8E-6	1	1	1	1	-	-
2-2	low	8.8E-6	10	1	1	1	-	-
2-3	medium	5.0E-5	5	0.66	0.84	0.91	-	0.99
2-4	medium	5.0E-5	10	0.90	0.92	0.96	-	0.99
2-5	high	2.7E-4	0	-	0.38	0.64	0.81	-
2-10, 11	high	5.1E-4	15	0	0	0.28	0.59	0.80
2-8, 9	high	6.3E-4	10	0	0	0.10	0.55	0.73
2-6, 7	high	8.0E-4	5	0	0	0	0.39	0.66

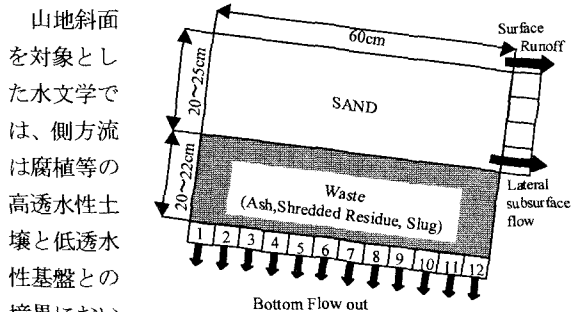


Fig.6 Layer arrangement for investigating lateral flow generation at the boundary between cover and waste layer.

言われている

る。そのため、実験では、側方流の発生をより明確に確認するために覆土層として透水性の高い2種類の砂を使用することとした。廃棄物層には、現場測定を実施した処分場から採取した焼却灰、破碎処理施設から採取した破碎ごみ不燃残渣および都市ごみ溶融スラグの3種類を用いた。試料の粒度と代表径を図7に示す。

(3) 実験方法・実験条件

実験条件は表5に示したように(砂・焼却灰[Run3-1, 3-2]), (砂・破碎残渣[Run3-3, 3-4]), (砂・スラグ[Run3-5, 3-6])の組み合わせとし、各充填条件で勾配を0, 5, 10%の3段階、各勾配において降雨強度を3~4段階に変化させて測定を行った。

(4) 実験結果・考察

各実験における表面、側方、底部からの定常時フラックス[mm/h]を降雨強度別に図8に示す。上部層の砂の透水係数が大きいので、すべての実験において表面流の発生は確認されず、設定した範囲の降雨はすべて砂層内に浸透した。しかし、砂層内に浸透した水分の流出の形態は、上部層と下部層の組み合わせにより2つのタイプに分類された。

一つは廃棄物層の透水性が上部砂層の透水性よりも低い場合(Run3-1, 3-2)で、砂層の側面からの流出が発生した。これらのRunでは、目視によっても砂層内に浸透した水分が焼却灰層との境界面上に滞留して側方へ移動している様子が認められた。図8の左側がRun3-1, 3-2の結果であるが、底部からの流出量は降雨強度を変化させてもおおむね一定水量で推

	D10[mm]	D30[mm]	D60	Uc[-]	Uc'[-]
sand I	0.55	0.61	0.8	1.45	0.85
sand II	0.18	0.28	0.36	2	1.21
Shredded Residue	2.6	6.25	15.32	5.89	0.98
MSW slug	0.63	1.19	1.86	2.95	1.21

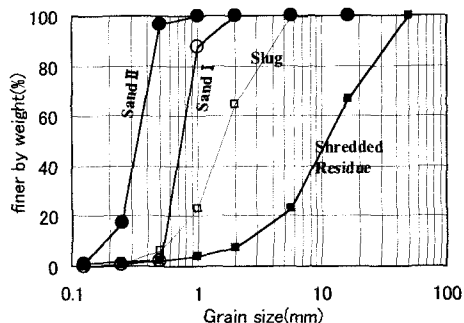


Fig.7 Grain size composition of two kinds of sand, shredded residue, and MSW slug

Table.5 Experimental condition and characteristics of each layer composing double layer

Run	media	H [cm]	ρd [g/cm ³]	n	ks [cm/s]	Gradient [%]	Rain [mm/h]
3-1	Sand I	25	1.59	0.40	3.1E-1	0%, 5%, 10%	20, 50, 100, 200
	ash	20	1.37	0.48	8.4E-4		
3-2	Sand II	20	1.65	0.39	4.2E-2	0%, 5%, 10%	20, 50, 100, 200
	ash	20	1.37	0.48	8.4E-4		
3-3	Sand I	20	1.56	0.41	3.1E-1	5%, 10%	4, 20, 40, 90
	Shredded	20	0.81	0.62	2.2E+0		
3-4	Sand II	20	1.66	0.39	4.2E-2	5%, 10%	5, 20, 40, 90
	Shredded	22	0.88	0.58	2.2E+0		
3-5	Sand I	20	1.56	0.41	3.1E-1	5%, 10%	5, 20, 40, 90
	slug	22	1.85	0.37	1.5E-1		
3-6	Sand II	20	1.58	0.41	4.2E-2	5%, 10%	5, 20, 40, 90
	slug	22	1.85	0.37	1.5E-1		

■ lateral discharge from side of upper layer □ discharge from bottom of lower layer
■ surface □ bottom ■ lateral

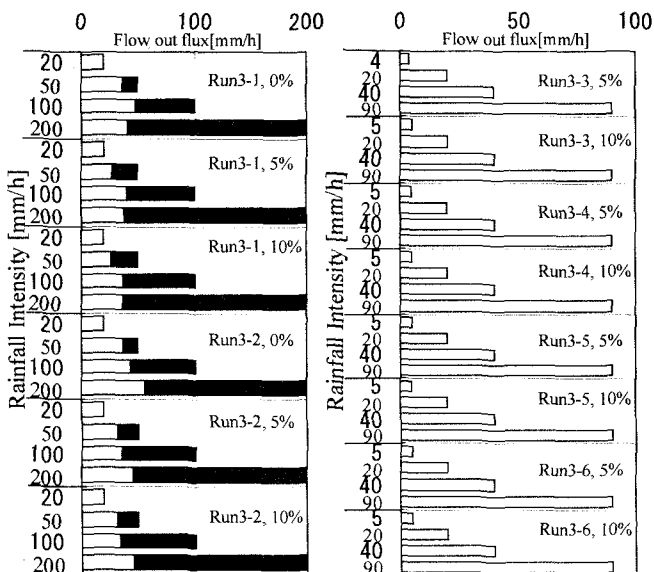


Fig.8 Lateral discharge from side of upper layer and discharge from bottom of the lower layer measured at each condition on double layer experiment.

移したのに対し、側方からの流出量は降雨強度の増大に従い増加した。この傾向は単層実験での表面流出と同様であり、下部層の透水係数により浸透を抑制された水分が砂層内を側方移動し、流出したものと考えられる。

一方もう一つの流出形態は、廃棄物層の透水性が上部砂層よりも大きい場合(Run3-3～3-6)であり、砂層側面からの流出は認められず、砂層に侵入した水分の全てが底部から流出した。砂層と廃棄物層の透水係数が設定した各降雨よりも大きく、下方への浸透を抑制する要素は無いことから底部から100%流出するという結果は当然であると考えられる。しかし、その底部からの流出分布は図9に示したRun3-3の例のように下流側に集中する傾向を呈しており、砂層内で水分が下流側に移動したことが推察される。流出分布の下流側への偏りは、勾配を大きくするほど明瞭に現れ、降雨強度の増大と共に減少し、その傾向はキャピラリーバリアと同様であった^{14,15)}。したがって、井上¹²⁾、渡辺¹³⁾が報告しているように覆土層(砂層)と廃棄物層の間においてキャピラリーバリアが形成されたものと考えられる。

両者を水分排除という点から考えると、前者のような側方流を対象とするには上部の覆土材よりも下部の廃棄物層の透水性が小さいという条件が必要となる。しかし、一般的には廃棄物層の透水性は覆土よりも大きい。既往の報告で焼却灰層の透水係数として 10^{-6} cm/s程度の値が報告されている¹⁶⁾例があるが、そのような低透水性の廃棄物層の上にそれよりも高い透水性の覆土を用いた場合にのみ側方排除が期待できるといえる。しかし、廃棄物層が低い透水性であっても侵入する水分はあり、その水分の下方浸透を阻止することはできない。一方、後者の流出過程を利用する場合、下流側に移動した水分の集水方法の問題と大量の水分侵入には効果を発揮できないと言う二つの問題が存在するが、降雨強度が小さいほど排除割合が高くなると言う点から、低透水性覆土の下に砂層などを配置し、その下に廃棄物層を配置することにより高い排除割合が期待できるようになると推察される。

4.4 多層型覆土材における排水層からの水分排除の検討

昨今では、多層型の覆土構造が採用される傾向にある。例えば、ドイツではクラスI型の埋立地において図10に示すような覆土を採用することが指示されている¹⁷⁾。そこで、こうした多層型覆土による水分排除機構に関して実験的に検討した。

(1) 実験装置

実験装置は4.2、4.3と同一の装置を用いた。

(2) 試料と充填方法

実験は表土(第1層)・排水層(第2層)・粘土層(第3層)という上部の三層を模擬するために、4.2で使用した覆土材を第1層と第3層に、そして4.3で用いた砂Iを排水層にして図11のような充填とした。第1層と第3層は同一の試料であるが締め固め強度を変化させて透水性が異なるように充填した。

(3) 実験方法・実験条件

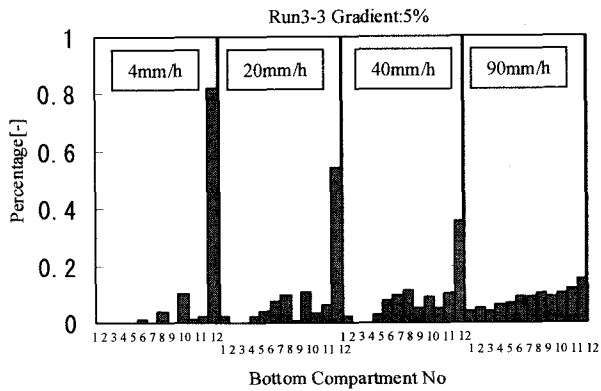


Fig.9 Partiality of each flux flowing out from the bottom of lower layer

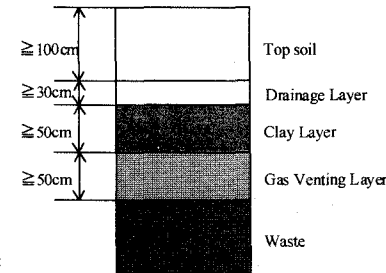


Fig.10 Schematic design of multiple layered cover in Germany

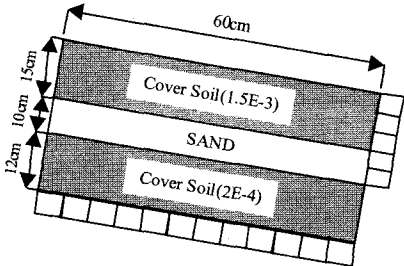


Fig.11 Layer arrangement of imitated multiple cover for investigating lateral flow from drainage layer.

実験方法は4.2の3)で述べた方法と概ね同様であり、充填完了後に勾配を設定し、降雨は連続的に変化させた。実験条件を表6に示す。

(4) 実験結果・考察

各降雨段階の定常時における第2層(砂層)側面と第3層底部からの流出フラックス、および第2層からの流出割合を表7に示した。いずれの実験においても第1層覆土の透水係数が高いため、表面流が発生することはなく100%が浸透した。第1層覆土内へと浸透した水分は、Run4-1の1段目降雨(3.1mm/h)では第3層覆土層も通過して全てが下端から流出したものの、2段目以降の降雨およびRun4-2では大半の水分が第2層側面から流出した。底部からの流出量は降雨強度が増大しても概ね一定量で推移したのに対し、砂層からの流出量は降雨強度の増大に伴い増加した。したがって下部覆土層の透水性により下方浸透を制限された水分が側方へと移動して排除されていると考えられ、4.3で確認された前者の水分移動形態と同様である。そのため下部層の透水性に相当する水分は下方浸透することから、本構造で砂層排除割合を高めるには下部層の透水係数をかなり低くすることが必要となると考えられる。

Table.6 Experimental Condition for imitated multiple cover Layer Composition

Layer	medium	Thickness [cm]	Density [g/cm ³]	Porosity [-]	Ks [cm/s]
1st	Soil	15	1.15	0.57	1.47×10^{-3}
2nd	sand	10	1.57	0.41	3.10×10^{-1}
3rd	Soil	12	1.54	0.42	2.00×10^{-4}

Experimental Condition

Run No	gradient [%]	Rainfall Intensity [mm/h]	Duration Time of Rain [sec]
4-1	5	3.1	12000
		16.3	5340
		45.7	2340
		92.8	1740
4-2	10	16.4	6800
		46.0	2940
		97.1	2940

Table.7 Discharge flux from sand layer and Ratio of it to rainfall intensity in each experimental condition

Run No	Gradient [%]	Rainfall Intensity [mm/h]①	Flow out		Ratio from Sand Layer ②/① [-]
			from Sand Layer [mm/h]②	from bottom [mm/h]	
4-1	5	3.1	0.0	3.1	0.00
		16.3	10.8	5.5	0.66
		45.7	39.9	5.8	0.87
		92.8	86.3	6.5	0.93
4-2	10	16.4	13.4	3.0	0.82
		46.0	42.6	3.4	0.93
		97.1	93.2	3.9	0.96

5. 解析

覆土上の表面流を対象に数値解析を行い、表面流生成に与える覆土の影響について検討を行った。

5.1 解析に用いた理論

本研究では、覆土層上における表面流には(1)に示す開水路の非定常流に関する連続方程式を、そして覆土層内の水分移動に関しては、(2)の2次元飽和-不飽和水分移動の支配方程式を使用した。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_s}{\partial y} = \gamma_e - q_z \quad (1)$$

$$(S_w S_s + C(\Psi)) \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \quad (2)$$

ここで、 h ：表面流水深[L]、 t ：時間[T]、 q_s ：単位幅当たりの表面流流量[L²/T]、 γ_e ：有効降雨強度[L/T]、 y ：斜面方向の距離[L]、 S_w ：飽和度[-]、 S_s ：比貯留係数[1/L]、 $C(\Psi)$ ：比水分容量[1/L]、 Ψ ：圧力水頭[L]、 z ：斜面に対して鉛直方向の距離[L]である。

覆土層内の斜面方向及び斜面と直角方向の水分移動式 q_y 、 q_z は、覆土内が均質で等方性であり、流れがDarcy則に従うとすると、傾斜斜面での全水頭 ϕ は $\phi = \Psi - y \sin \alpha - z \cos \alpha$ と表されるから、それぞれ、

$$q_y = -K \frac{\partial \phi}{\partial y} = -K \frac{\partial \Psi}{\partial y} + K \sin \alpha \quad q_z = -K \frac{\partial \phi}{\partial z} = -K \frac{\partial \Psi}{\partial z} + K \cos \alpha \quad (3)$$

となる。ここで $K = K_r \cdot K_s$ 、 K_r ：比透水係数、 K_s ：飽和透水係数である。

表面における覆土層内への浸透フラックス q_{z0} が有効降雨強度 γ_e よりも大きければ層内への浸透が生じ、小さいときには表面に湛水が発生して勾配により斜面方向への表面流となる。このとき地表流の単位幅当たりの表面流流量 q_s は、開水路非定常流の運動量方程式における摩擦損失項 I_f がManningの粗度係数 n を用

いて、

$$I_f = \frac{2gn^2}{h^{4/3}} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (4)$$

と表され、斜面が緩勾配(斜面勾配: i_0) の場合には $I_f = i_0 - (\partial h / \partial y)$ の拡散波近似が仮定できる¹⁸⁾ことから、単位幅当たりの表面流量は下式となる。

$$q_s = vh = \frac{\sqrt{i_0 - (\partial h / \partial y)}}{n} \cdot h^{5/3} \quad (5)$$

以上の、(1)(2)式を収支式とし、各流量を(3)(5)式で表現して解析を行った。なお、本研究は裸地表面を対象としているため有効降雨強度 γ は降雨強度、またマンングの粗度係数は0.02(土、直線で一樣な場合)¹⁹⁾とした。計算は覆土層を格子状に分割し、差分法を用いて解いた。覆土層内の不飽和浸透に関わる各種パラメーターは、水分特性曲線をもとに不飽和透水係数、比水分容量を van Genuchten の推定式により算出した。

5.2 表面流出に関する実験結果と計算結果の比較

上記の計算モデルを用いて現場測定及び覆土単層の各実験条件に対する計算を行った。図12には現場測定、及び覆土単層実験の各条件を元に計算を実施し、定常時の流出係数を算出した結果を示す。図中の各点が実測値であり、各曲線が計算結果である。計算は各実験の勾配も考慮しているが、ほとんどその影響は反映されず、透水係数が同一であれば同じ曲線上に収束した。これは前述したように本研究での勾配の変化範囲が小さいことによるものと思われる。同図より

各実験値と計算による曲線は良好に一致しているものと思われる。そこで、本シミュレーションモデルを用いて、種々の透水係数の範囲で計算を行い覆土の透水係数、降雨強度と表面流出係数の関係を求めた。勾配5%のケースを図13に示す。透水係数は $10^{-8} \sim 10^{-3} \text{ cm/s}$ で与えた。裸地斜面で定常時という限定ではあるが、本計算結果より覆土材の透水係数が低いほど表面排除係数が高くなるということを定量的に確認できる。但し、0.1mm/h以下の降雨条件に関しては実現象においては蒸発の影響を強く受けると考えられ、蒸発を考慮していない本計算による結果は実現象と乖離している可能性がある。そのため0.1mm/h以下の条件での計算結果は、参考値として波線で示すこととした。図からは透水係数が 10^{-7} cm/s 程度にまで低ければ(例えば粘土)、1mm/h以下の降雨でも90%以上を表面排除することが可能であるが、 10^{-4} cm/s では約2mm/h以下、 10^{-3} cm/s では約20mm/h以下の降雨は100%が覆土内に浸透することが確認できる。すなわち、日常的な降雨(1~10mm/h)の浸透を抑制するためには、 10^{-5} cm/s 程度の低透水性が必要であるといえる。前述の $1 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ という覆土は10mm/h以上の降雨で60%以上の排除効率を示すようになることから、処分場内への厳密な浸透抑制でなく、比較的大きな

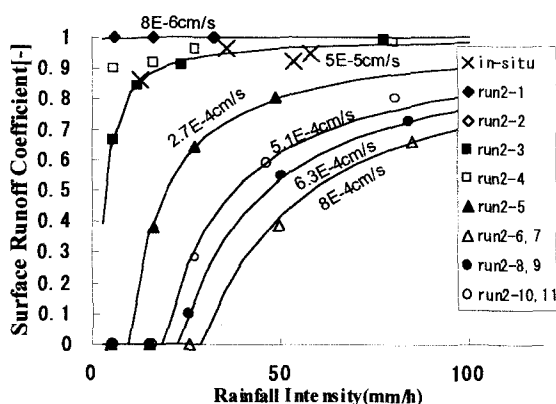


Fig.12 Comparison between observed and calculated surface Runoff coefficient for in-situ measurement and experiments from Run2-1 to Run2-11.

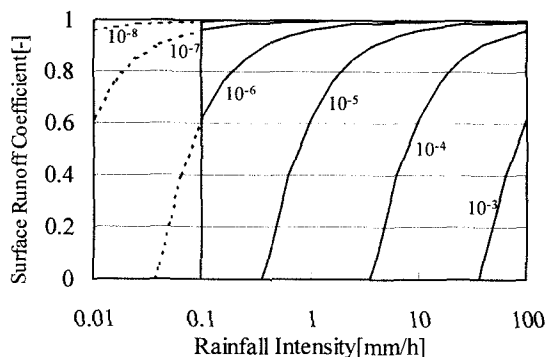


Fig.13 Estimated surface runoff coefficient for various Hydraulic Conductivity of Landfill Cover

水分の侵入を防ぎ、浸出水量の急激な増大を防ぐために有効であると考えられる。

5.3 表面集水溝間隔の検討

上記の検討では、定常に達した時点での降雨に対する表面流出水量の比率である表面流出係数を求めた。しかし現実には降雨継続時間が短い場合や断続降雨等で流出が定常に達する前に降雨が停止するため、表面流が形成される前の層内に水分が蓄積される過程の影響が大きくなり、表面流出する割合が低下すると考えられる。また、定常状態の流出係数の検討のみでは斜面長に影響されるはずの表面流の消失等を考慮し得ない。そのため集排水溝間隔の検討に際しては非定常で検討を行い、結果は全表面流出水量[mm]を全降水量[mm]で除した表面流出率で比較した。

降雨パターンは図14 上段に示す2通りの間欠降雨を与え、斜面距離(排水溝配置間隔)を0.5, 5, 10, 15, 20, 25, 30mに変化させた。透水係数は 10^{-4} 、 10^{-5} cm/s、勾配は5%とした。図14 下段に各計算条件における表面流出率を示す。いずれの条件においても斜面長の増大に伴い表面流出率が低下していることが確認できる。降雨パターンは、Aが比較的大きな降雨が間欠的に降る場合で、パターンBは10mm/h以下の降雨が長時間続く場合であるが、覆土透水係数が 10^{-5} cm/sの場合にはパターンBで30mまで斜面長が増大しても60%以上の水分を排除可能なのことが確認できる一方、 10^{-4} cm/sではパターンBの降雨に対して著しく流出率が低下し、30mの斜面長では表面流出率は約10%程度に低下している。 10^{-4} cm/sの覆土は、定常時の検討では10mm/hの降雨に対して約60%という流出係数が得られたものの、非定常で弱い降雨が長時間続くような条件では排水溝間隔を極めて短くしなければ水分排除を期待できないということになる。したがって、現実的な集排水溝間隔で恒常的に高い割合の表面排除を期待する場合には 10^{-5} cm/s程度にまで透水性を低下させる必要がある。

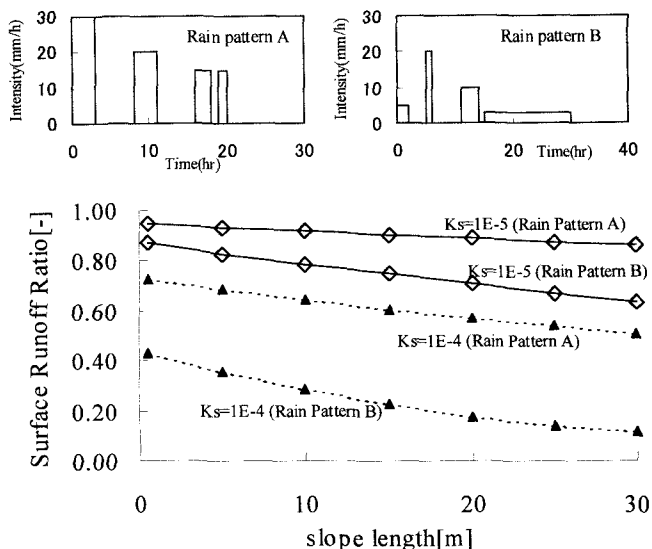


Fig.14 Decline of surface runoff ratio with increasing slope length, when two types of rainfall condition are burdened.

6. まとめ

最終処分場の表面での降雨水排除を検討するために、覆土上の表面流、覆土内側方流に関して実験・数値計算から検討を行った。その結果以下のような結果が得られた。

- 1) 埋立地原位置で表面流と側方流の測定を試みた流出測定実験では、覆土の透水係数が 10^{-5} cm/sと低かった為に表面流出係数85%以上、表面流出率70%と供給した水分の大半が表面流出し、覆土層と廃棄物層の境界からの側方流は認められなかった。
- 2) 覆土単層を対象に、表面流発生に与える覆土条件(透水係数、勾配)の影響について検討した結果、定常時の流出係数は覆土材の透水係数の影響を強く受ける傾向にあった。設定した勾配の範囲が狭いために勾配の影響は確認されなかった。
- 3) 覆土(砂層)と廃棄物を互層にした充填層に対する降水実験により、側方流が(覆土透水係数) > (廃棄物透水係数)の条件で生ずること、および砂層と廃棄物層の間にキャピラリーバリアによる水分の側方移動が生ずることが確認された。低透水性覆土の下に砂層を配置することで水分を排除できる可能性が考えられる。

- 4)多層型覆土の排水層からの流出は下部の低透水性覆土層に依存した側方排除であり,下部覆土層の透水性に相当する水分の下方浸透を許すため,下部層の透水性を低くしなければ効果を発現できない考えられる。
- 5)飽和不飽和浸透理論と拡散波近似による数値計算結果は現場,および単層の表面流出係数を良好に再現した。覆土材の透水係数を変化させて求めた表面流出係数および斜面長を変化させた検討から,10mm/h以下の弱い降雨も含めて表面排除の対象とするならば,10⁻⁶cm/s程度以下の低透水性が必要であると考えられる。

参考文献

- 1)厚生省水道環境部監修:廃棄物最終処分場指針解説,財団法人全国都市清掃会議,1990
- 2)Bagchi,A.:Design, Construction, and Monitoring of Landfills, John Wiley & Sons, Inc, 1994
- 3)長谷川信夫, 高橋浩一:廃棄物埋立地における雨水排除に関する実験的研究, 土木学会第43回年講Ⅱ, pp. 940-941, 1988
- 4)長谷川信夫, 太田 耕他:埋立地における雨水の表面排除による浸出水の挙動について, 第6回全都清講演集, pp. 189-192, 1985
- 5)土橋 弘, 伊藤英夫他:最終処分場の最終覆土に関する一考察, 第10回全都清講演集, pp. 226-228, 1989
- 6)谷上 裕:最終処分場における雨水の排除による浸出水の削減について, 第9回全都清講演集, pp. 178-180, 1988
- 7)J.W.Nyhan:Water Balance Study of four landfill cover designs varying in slope for semiarid regions, Journal of Environmental Quality, Vol. 26, No. 5, pp. 1385-1392, 1997
- 8)Stephen F.Dwyer:Alternative Landfill Covers Pass the test, Civil Engineering, vol. 68, No. 9, pp. 50-52, 1998
- 9)堀内将人:土壌水分の不飽和性に着目した通気層内物質移動の解析と制御に関する研究, 京都大学博士論文, 1995
- 10)梅田美彦他:人工多層地盤を用いた降雨浸透制御に関する研究, 第29回土質工学研究発表会, pp. 1917-1918, 1994
- 11)鈴木正人他:キャピラリーバリアを利用した降雨浸透抑制型処分場の開発(その2), 第8回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp. 840-842, 1997
- 12)井上将博, 花嶋正孝他:埋立地覆土での雨水の表面排除について(2), 土木学会第43回年講Ⅱ, pp. 942-943, 1988
- 13)渡辺亮一, 花嶋正孝他:埋立地覆土での雨水の表面排除について(その3), 土木学会第44回年講Ⅱ, pp. 952-953, 1989
- 14)河野孝志他:キャピラリーバリアを利用した廃棄物処分場底部浸出水集排水構造に関する基礎的研究, 第8回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp. 837-839, 1997
- 15)東條安匡他:多層型底部集排水構造の排水効果に与える影響因子に関する実験的研究, 第9回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp. 878-890, 1998
- 16)花嶋正孝, 松藤康司:「焼却灰」の埋立特性と今後の課題, 都市清掃, Vol. 39, No. 150, pp. 15-23, 1986
- 17)花嶋正孝監修, 廃棄物マネジメントハンドブック, エヌ・ティー・エス, 1996
- 18)日野幹雄, 太田猛彦他:洪水の数値予報<その第一歩>, 森北出版株式会社, 1989
- 19)細井正延, 杉山錦雄:新編土木工学講座・水理学, コロナ社, 1971