人工降雨装置を用いた土壌の浸食量と 粒径分布に関する実験的検討

EXPERIMENTAL STUDY ON AMOUNT OF SOIL EROSION AND PARTICLE SIZE DISTRIBUTION BY USING RAINFALL SIMULATOR

新谷恵¹・木内豪²・小俣哲平³

Megumi ARAYA, Tsuyoshi KINOCHI and Teppei OMATA

¹学生会員 工修 東京工業大学大学院 総合理工学研究科 環境理工学創造専攻
(〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町4259)

²正会員 工博 東京工業大学大学院教授 総合理工学研究科 環境理工学創造専攻
(〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町4259)

³正会員 工修 大成建設株式会社技術センター (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)

The radioactive substance, such as ^{134}Cs and ^{137}Cs from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant (FDNPP), were transported with finer soil particles. In order to simulate the radiocesium transport, it is necessary to understand well the behavior of soil particle in hydrological systems. In this paper, we conducted the soil erosion experiment by using rainfall simulator and applied the existing erosion model to experimental results. Then we focused on the soil erosion phenomenon of each soil particle size. According to the experimental result, erosion rate reduces with time and flow rate become constant. The particle size distribution of eroded sediment and original soil surface are similar results. The existing erosion model reasonably reproduced different characteristic of each soil type and each particle size.

Key Words : Soil erosion, Rainfall simulator, Sediment transport, Particle size distribution

1. はじめに

2011年に発生した福島第一原子力発電所の事故により環境中に放出された放射性物質は大気中に拡散したのち、風雨によって陸域にも拡散した。放射性物質の中でも放射性セシウム137は半減期が30年と長く、一度放出されてしまうと環境中に長くとどまり、移行していく。この陸域における放射性物質汚染の移行過程について、さまざまな機関により研究が行われ、実態解明が進められている¹⁾。

陸域から水系へ移行する放射性物質の主な供給源は、陸域表層に存在する土粒子等の放射性セシウムを吸着した物質である。とりわけより小さな懸濁性の微細粒子（数 μm ～数10 μm の範囲）がより多く放射性物質を吸着することが示唆されている²⁾。このような微細粒子の発生源となる土壌表面からの侵食や表面流出の研究はこれまでもなされているが、流出土砂の粒径を考慮した現象理解やモデル化が不十分であり、総量としてのモデル化にとどまっている³⁾。人工降雨装置を用いて土壌侵食現

象を理解する取り組みとして、海外では砂と粘土を人工的に混合した土壌を用いた実験⁴⁾や自然の土壌を用いた実験⁵⁾が行われているが、いずれも粒径については着目していない。また、国内でも自然の土壌を用いて土壌クラストの形成と浸食量の関連性を検討した実験⁶⁾は行われているが、海外同様に粒径別に侵食現象を整理された研究は少ない。しかし、放射性物質吸着量の粒径依存性に鑑みると、流域スケールでのより精度の高い放射性物質の移行解析と長期的な動態予測を行っていくためには、現地の土壌を対象に流出土砂の粒径分布を考慮した侵食現象の理解やモデル化がさらに必要である。

そこで、新たに作成した人工降雨装置と現地の不擾乱土壌を用いた土壌侵食実験を行い、流出土砂量の総量のみならず、土粒子粒径も考慮した土壌侵食現象の理解と既存モデルとの比較・検討を行った。

2. 研究対象地域と土壌採取地の概要

福島県の中心を流れる阿武隈川流域の支川である移川

図-1 土壌採取地の写真

流域内の口太川を研究対象地域とした。本川は福島県西白川郡西郷村旭岳に水源を発し、福島県内を北上し宮城県に入り太平洋へと流れ込む一級河川である。口太川流域は阿武隈川水系の中央東側に位置しており、流域面積は約138km²である。土地利用は、国土交通省のデータより、農地が29%、森林が55%、水田が11%を占めている。

本研究では、口太川上流の山木屋地区から土壌を採取し、実験に用いた。土壌採取地の写真を図-1に示す。たばこ畑は採取時には耕作されていない場所である。水田は除染作業前の土壌表面が人工的に乱されていない場所から採取した。森林はスギ林内の土壌を採取した。

3. 実験装置と実験方法

(1) 室内人工降雨装置

本実験では、噴射角約70°のフルコーン型のスプレーノズル（霧のいけうち、1/4 M J 070M BW）4本を用いた。スプレーノズルだけでは、与えたい降雨強度で雨滴径、雨滴落下速度、降雨分布の均一性を自然に近い状態に保てないため、園芸用のポータブルブロワーバキューム（RYOBI, PSV-600）を設置し、ノズルから噴出される水滴に上方から強風を当てることによって飛散させ、自然に近い均一性と雨滴径を実現した。実験装置の概要図を図-2に示す。ノズルを設置した高さは土壌表面から約3.5mである。水の供給は、実験室の一般的な水道の蛇口からホースを用いて直接ノズルへ接続するかたちで行った。また、供給される水の水压が雨滴径と均一性に影響するため、常に一定の水量を供給できるように水压計（長野計器、JIS汎用形圧力計A枠 GS50-171-0.1MP）で実験中の水压を監視した。雨滴径と雨滴落下速度はディストロメーター（ThiesCLIMA, Laser Precipitation Monitor 5.4110.00.100）を用いて計測した。降雨強度と均一性は縦横30cmで深さ10cmの容器を、縦横5cmの36マスに仕切った測定用のマスを作成し、10分間人工降雨中に置くことで計測した。降雨強度と均一性は、測定用マスの中心部分16マスを用いて計算し、確認した。この人工降雨装置では約110mm/h～130mm/hの降雨強度を発生させることができ、10分間測定した降雨分布の均一性の各マスの標準偏差は1.0～2.0mm/10minとなった。また、雨滴径は主に1mm～3mm程度で、最大

図-2 実験装置の概要図

(a) 土壌容器全体

(b) 底面流出口 (c) 流出口

図-3 土壌侵食実験装置写真

表-1 採取土壌の概要

サンプル名	採取日	採取深度	採取地点の勾配
たばこ畑①	2014/12/3	0-20cm	緩勾配
たばこ畑②	2015/1/18	15-35cm	緩勾配
水田	2014/11/27	0-20cm	なし
森林	2014/11/22	0-20cm	急勾配

8mm程度の大きさも観測された。今回の実験に用いた人工降雨は、観測された雨滴径分布と落下速度を用いて雨滴の運動エネルギーフラックスを計算すると、自然降雨の降雨強度30mm/h～40mm/h程度の持つエネルギーと等しい結果となった。

(2) 土壌の採取

現地から不擾乱の土壌を採取して実験に用いるため、土壌採取後から実験まで土壌を入れ替える必要がないアクリル製の容器（図-3(a)）を製作し、土壌採取を行った。採取する土壌の大きさは20cm角とした。Heiligら³⁾が7cm角の人工的に砂と粘土を混合した土壌で土壌侵食実験を行っており、Mahmoodabadiら⁵⁾はイラン中央部の実際の土壌を用いて実験を行っているが、本実験では、福島県の現地から採取した不擾乱土壌を用いた。

採取した土壌の採取日、採取深度、採取地点の勾配を表-1に示す。勾配のある地点では、土壌容器の流出口側に斜面下方がくるように採取した。土壌表面の土粒子粒径は、後述の図-5(a)に示すような粒径分布であり、たばこ畑は砂質が多く、水田は粘土質が多く、森林は有機物の多い一般的な森林土壌であった。

(3) 土壌侵食実験装置

現地から採取してきた20cm角の不擾乱土壌が入った容器に、図-2の土壌容器の側面に描いているような表面流出を集める集水器などのアタッチメントをつけることでそのまま実験に用いることができる実験装置を製作した（図-3）。湛水深を変えられるように、集水器の流出口の高さを調節できるようにした。流出口のスリット（図-3(c)）から越流した水は、集水器下部の排水口か

表-2 実験の測定項目と使用機器

実験前		
測定項目	使用機器	測定時間
雨滴径	ディストロメーター	30分間
雨滴落下速度		
雨滴の粒径分布		
降雨の均一性	測定用のマス	10分間
降雨強度		
実験中（連続6時間）		
流出量	サンプリング用ボトル (500ml)	15分間
流出土砂量		
浸透量		
土壌表面の状況	タイムラプスカメラ	10秒ごと
実験後		
降雨強度	測定用のマス	10分間
土粒子粒径分布	粒度分布測定装置	
SS濃度	吸引濾過器（1umのろ紙）	

表-3 土壌侵食実験の実験条件

サンプル名	回数	湛水深	降雨強度	浸透流出
たばこ畑①	1回目	7mm	120mm/h	有
	2回目	10mm	114mm/h	無
たばこ畑②	1回目	3mm	111mm/h	有
水田	1回目	3mm	118mm/h	有
	2回目	20mm	124mm/h	無
森林	1回目	4mm	132mm/h	有
	2回目	3mm	121mm/h	有

ら排出され、500mlのボトルで回収できるようになっている。

容器側面の一つには土壌水分計（ICT International, SMM土壌水分メーターMP306 Moisture Sensor）を土壌表面からの深度2.5cm, 7.0cm, 11.5cm, 16.0cmに4本差し込めるようになっており、実験中の土壌内の水分変化を確認できるようになっている。ステンレス製の底蓋には中心に直径2cmの穴が開いており、ステンレスフィルター（マツバラ金網株式会社、目の開き132μm, 線径80μm, 120メッシュ, φ50mm）を通して土壌を浸透した水が流れでて来るようになっており（図-3(b)）、表面流出と同様に500mlボトルで回収する。ステンレスフィルターによって土壌の底面が崩れ出ることを防いでおり、湛水させる条件ではこの穴をふさぐことができるようにしている。

また、本実験では、傾斜の影響を除いた状態で、雨滴の衝撃力と湛水深の影響による浸食現象のそれぞれの土壌の特性を調べるため、土壌容器には傾斜を付けず、土壌表面が水平な状態で実験を行った。

(4) 実験手順

土壌侵食実験における測定項目、使用機器、測定時間を表-2に示す。まず、土壌侵食実験を行う前に人工降雨の準備・測定を行う。降雨装置の雨滴径や均一性は水を供給後すぐは安定しないため、安定するまで20～30分通

水し、安定したら30分間ディストロメーターで雨滴径と雨滴落下速度を計測する。その後、前述の測定用のマスで10分間、降雨強度と均一性を確認した上で、土壌侵食実験装置を設置し、実験を開始する。表面流出は連続15分間ごと、浸透流は連続30分ごとに500mlのボトルに回収する。

6時間の実験後、再度、降雨強度と均一性が実験前と変わりがなければ、測定用のマスで測定し、確認した。湛水深については実験前と実験後に土壌表面9か所で土壌表面の高さを計測しておき、実験中30分ごとに土壌容器側面から数枚撮った写真から湛水面を読み取って求めた。回収したサンプルの分析については、表面流は15分間ごとのサンプルを1μmのガラス繊維フィルター（Whatman, ガラス繊維ろ紙, 孔径1μm, φ47mm）を用いて一部ろ過し、SS濃度を測定し、SS濃度と流出した水の総量からSSの総量（流出土砂量）を求めた。

15分間ごとにある流出サンプルから15分目から30分刻みでサンプルを抜粋し、レーザー回折式粒度分布測定装置（島津製作所, SALD-3000）を用いて、SSの粒度分布を測定した。表面流出サンプルに大きな有機物がある場合には、サンプルのろ過と粒度分布測定をする前に一度2mmの目のふるいを通して、2mm以上の物質を取り除いた。

4. 実験結果・考察

(1) 実験条件

現地から採取したたばこ畑土壌2体（たばこ畑①、たばこ畑②）、水田土壌、森林土壌の計4体の土壌サンプルを用いて実験を行った。それぞれのサンプルでの湛水深、降雨強度、底面からの浸透流出の有無を表-3にまとめる。実験の継続時間は6時間で、森林の2回目のみ実験継続時間を4時間とした。湛水深は流出量が安定する1時間目以降の湛水状況を撮影した写真から実際に読み取った値を載せている。また、水田の湛水20mmの条件を除き、実験開始時は土壌表面が湛水していない状況から開始した。水田20mmは湛水してから越流してくるまで時間を要するので、あらかじめ湛水させた状態から実験を開始した。

(2) 流出量・SS濃度・流出土砂量・浸透量の結果

土壌表面から流出してきた水の総量である流出量、サンプルをろ過して測定したSS濃度と流出量を乗じて求めたSSの量である流出土砂量、底面からの流出を測定した浸透量の実験結果を図-4に示す。流出量については、降雨開始時は土壌が乾いているため、初めの30分程度は降雨が土壌に浸透していきやすく、流出量が低くなっているが、水田の湛水20mm以外は1時間以内に安定する結果となった（図-4(1), (2), (3)）。図-4(2)の水田の湛

図-4 流出量・SS濃度・流出土砂量・浸透量

図-5 粒径分布の分析結果

水深20mmは初めから流出量が一定に近いが、これはこの条件のみ湛水させた状態から実験を開始したためである。

SS濃度はほとんどの実験条件で降雨の降り始めに高く、時間の経過とともに減少していく傾向となった。図-4(3)に示す森林の湛水深3mmの結果では、2時間を経過したあたりから流出量が減少し、SS濃度が増加する傾向となったが、湛水深が浅くなったことが考えられ、これは土壌内へ水が浸透しやすくなる水道が形成されてしまい浸透量が増加した可能性がある。1時間経過したあたりから、流出量がほぼ一定のため、流出土砂量もSS濃度同様に降雨の降り始めに高く、時間の経過とともに減少した。図-4(1)に示すたばこ畑①の湛水深7mmと湛水深10mm、図-4(2)に示す水田の湛水深3mmと湛水深20mmのSS濃度と流出土砂量の結果から、湛水深が大きいほどSS濃度が低くなり、侵食されにくくなることが確認された。これは、湛水によって土壌表面に与え

られる雨滴衝撃力が緩和され、雨滴の衝撃による侵食作用が弱まったためだと考えられる。同様に、降雨の降り始めにSS濃度が高濃度となるのも、実験開始時は湛水していないので、雨滴が直接土壌表面に当たり、より多く侵食されたと考えられる。また、実験開始時にSS濃度が同じ値とならないのは、前の実験で大きく重たい粒子がすでに侵食されていたり、侵食されやすい粒子が流出してしまったりしたため、1回目よりSS濃度が低くなったためだと考えられる。

浸透量は森林、たばこ畑、水田の順に多く、森林土壌がたばこ畑や水田よりも浸透能力がかなり高い結果となった。本実験では森林については、40～50mm/hほどの浸透能が確認できた。加藤ら⁷⁾による人工降雨装置を用いたヒノキ人工林内での浸透能の野外測定における39.0～172.8mm/hの浸透能の範囲内の値となった。

(2) 土粒子の粒度分布

図-6 係数 a と浸透能の関係

たばこ畑、水田、森林の土壌表面の土粒子の粒度分布の結果と、それぞれの実験条件における流出土砂の粒度分布の結果を前項の図-5に示す。たばこ畑は水田と森林に比べ砂分が多い結果となった(図5-(a))。図5(b)に示すたばこ畑①の1回目と図5(e)に示す水田の1回目では、土壌表面に堆積していた枯れた植物片等の有機物の影響があり、粒径が大きいものの割合が大きくなっている。1回目で有機物が洗い流され、2回目以降は粒径の大きな有機物が流出しにくくなった可能性がある。流出土砂の粒度分布は土壌表面に存在する土粒子の粒度分布と近い傾向がみられたことから、流出土砂の粒径は土壌表面に存在する土粒子の粒径に依存する事が示唆された。

また、図-5(b)と図-5(c)のたばこ畑①の湛水深7mmと湛水深10mm、図-5(e)と図-5(f)の水田の湛水深3mmと湛水深20mmのように、同じ土壌で異なった湛水深を比較すると、湛水が深くなると大きな粒子が侵食されにくくなる結果がみられた。このことから、湛水が土壌表面への雨滴の衝撃力を緩和し、湛水により粒径が大きくより大きな輸送エネルギーを必要とする粒子の侵食が抑制されたと考えられる。

さらに詳細に結果を考察していくと、図-5(e)に示す水田の湛水深3mmの結果では、時間とともに大きな粒子の割合が減少していく現象が見られ、土壌表面が湛水していない初期の段階で、雨滴の衝撃によって大きな粒子や有機物等が洗い流される可能性が示唆された。一方で、図-5(g)に示す森林の湛水深4mmの場合、時間と共に大きな粒子の割合が少し増加しているようにみえるが、これは、侵食されやすい小さな粒径の土粒子が先に流出してしまったからである。また、図-5(b)に示すたばこ畑①の湛水深7mmについても、同様な現象により後半の3時間に大きな粒子の割合が増加したと考えられる。

(3) 侵食モデルのパラメータの検討

実験で得られた結果を用いて侵食モデルのパラメータの検討を試みた。まず、Heiligら³⁾を参考にし、より単純化して侵食量を係数 a (kg/m²)と降雨量で表現する方法を、式(1)のように定義した。

$$e_s = aP \quad (1)$$

ここで、 e_s は雨滴の衝撃による侵食量 (g/s/m)、 P は降雨量 (m/s)である。今回の実験では、降雨量 P を一定で与えているため、この係数 a の時間変化は雨滴の

図-7 係数 C_e の時間変化

衝撃による侵食量と似た結果となった。たばこ畑①、水田、森林それぞれについて、同じ土壌の異なる湛水深で比較すると、湛水深が深い方の係数 a が小さくなる結果となった。このことから湛水深が大きくなると、湛水によって雨滴衝撃力が緩和され、降雨量に対する侵食量が少なくなることが示唆された。また、係数 a と浸透能の大きさを比較した結果を図-6に示す。浸透能が高い土壌ほど侵食されにくいことが考えられる。それは、同じ降雨量が供給されても浸透能が高ければ、地下へ浸透していき、表面流出の流出量が少なくなるため侵食されにくくなるためであると考えられる。このことから、浸透能が影響する土壌表面からの流出量を考慮する必要があるのではないかと考え、次に、Kinouchiら⁸⁾が口太川流域内での放射性物質の移行を計算するモデル内で用いている侵食モデルでの検討を行った。

湛水深の増加による雨滴侵食の低下を表す係数を C_e とし、式(2)のように定義した。

$$e_s = C_e B \rho_s R P \quad (2)$$

$$C_e = c_f \exp(-c_h h) \quad (3)$$

ここで、 c_f は土壌や地表特性に関する定数 (s/m)、 c_h は湛水による雨滴侵食の減衰定数 (1/m)、 h は湛水深 (m)、 B は表面流の流水幅 (m)、 ρ_s は土粒子密度 (kg/m³)、 R は流出高 (m/s)であり、土粒子密度 ρ_s の値は2700 kg/m³、流出幅 B は実験容器の幅である20cmを用いた。係数 a と比較すると湛水の影響と流出量が考慮されるモデルとなっている。

図-7に係数 C_e の時間変化を示す。係数 a の結果に比べて流出高 R を考慮しているため、各実験条件における値が近い値となった。浸透能の影響を流出高 R で反映することができていると考えられる。

また、同じ土壌において2つの湛水条件で実験を行っているものの実験結果を用いて式(3)の係数 c_h を算出した。比較的流出量の安定している45分目～2時間15分目までの30分ごとの値を用いて計算した。その結果を図-8に示す。土壌が異なることによる係数 c_h の大きな差は見られなかった。このことから、湛水による影響は土壌

図-8 係数 C_h の時間変化

図-9 総量から求めた C_f 値

図-10 粒径区分別係数 C_h

によって大きく変わらない可能性がある。

しかし、図-10に示すように、粒径区分ごとに係数 C_h を求めると、小さい粘土粒子よりも大きい砂の粒子の値の方が大きくなる結果となり、大きい粒子の方が湛水の影響を受けやすいことが示唆された。

また、流出土砂の6時間の総量の値を用いて、Kinouchiら⁸⁾の侵食モデルを適用すると、土地利用ごとに係数 C_f が求められた。各土壌の係数 C_f の結果を図-9に示す。その結果から、土壌によって係数 C_f の値が異なるので、土壌による特性の違いは係数 C_f によって表現できると考えられた。このことから、Kinouchiら⁸⁾の既存の土壌侵食モデルを用いた方が、土地利用ごとの土壌特性を表現できることが示唆された。

5. 結論

本研究では、自然な降雨を再現できる室内人工降雨装置を用いて土壌侵食実験を行い、土壌侵食現象を定量的に分析し、侵食モデルのパラメータの検討を行った。この結果から、流出量は土壌が乾燥している初期は少ないが、時間と共に安定していくことが分かった。しかし、SS濃度と侵食量は時間とともに減少する傾向となった。これは、時間とともに湛水深が増加して土壌表面に与える雨滴衝撃力を緩和したためであると考えられた。

流出土砂の粒度分布に関しては、初期に有機物などの大きな粒子が流れ出てくることが考えられ、たばこ畑、水田、森林いずれも1回目の実験において2回目の実験よりも大きな粒子が確認された。また、湛水深が時間とともに増加しているとみられる水田の湛水深3mmの実験では、最初に大きな粒子が多く、時間とともに減少する傾向がみられ、湛水によって雨滴衝撃力が緩和されることにより、大きな粒子の侵食量が減少したと考えられた。

一方で、森林の湛水深4mmでは、時間とともに粒径が大きくなる傾向がみられた。これは、小さい粒子が先に洗い流され、相対的に大きい粒径の割合が増加したためであると考えられた。

実験結果をもとに、侵食モデルのパラメータの検討を行った結果、雨滴による侵食をモデルで表現するには、降雨量だけを考慮する単純な方法では不十分であることが示唆された。流出量、湛水深だけでなく、係数 C_f によって土壌の違いも考慮できるKinouchiら⁸⁾の既存の侵食モデルを適用することが、土地利用による土壌特性の違いを考慮した土壌侵食現象を表現するためには適していることが示唆された。また、粒径区分ごとの特性の違いは係数 C_h によって表現できる可能性が示唆された。

謝辞：本研究は、科研費（新学術領域研究，課題番号25110503）により助成を受けて行われた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 恩田裕一ほか：放射性物質の包括的移行状況調査報告書，国立研究開発法人日本原子力研究開発機構福島研究開発部門，2012。
- 2) Q. He, D. E. Walling: Interpreting particle size effects in the adsorption of ^{137}Cs and unsupported ^{210}Pb by mineral soils and sediments, *Journal of Environment Radioactivity*, Vol.30 No.2, pp.117-137, 1996.
- 3) A. Heilig, D. DeBruyn, M.T. Walter, C.W. Rose, J.-Y. Parlange, T.S. Steenhuis, G.C. Sander, P.B. Hairsine, W.L. Hogarth, L.P. Walker: Testing a mechanistic soil erosion model with a simple experiment, *Journal of Hydrology*, 244, pp.9-16, 2001.
- 4) B.Gao, M.T. Walter, T.S. Steenhuis, J.-Y. Parlange, B.K. Richards, W.L. Hogarth, C.W. Rose: Investigating raindrop effects on transport of sediment and non-sorbed chemicals from soil to surface runoff, *Journal of Hydrology*, 308, pp.313-320, 2005
- 5) Majid Mahmoodabadi, Sara Arjmand Sajjadi: Effects of rain intensity, slope gradient and particle size distribution on the relative contributions of splash and wash loads to rain-induced erosion, *Geomorphology*, 253, pp.159-167, 2016
- 6) 西村拓，中野政詩，宮崎毅：室内人工降雨装置による土壌クラストの形成と浸食との関連性，農業土木学会論文集，146, pp.101-107, 1990
- 7) 加藤弘亮，恩田裕一，伊藤俊，南光一樹：振動ノズル式降雨実験装置を用いた荒廃ヒノキ人工林における浸透能の野外測定，水文・水資源学会誌，21(6)，pp.439-448，2008
- 8) T. Kinouchi, K. Yoshimura and T. Omata, Modeling radiocesium transport from a river catchment based on a physically-based distributed hydrological and sediment erosion model, *Journal of Environment Radioactivity*, DOI:10.1016/j.jenvrad.2014.07.022, p. 1-9, 2014.

(2015. 9. 30受付)