小型模型を用いた「流れる水のはたらき」を可視化できる学習教材の開発

Development of the a learning material visualizing “functing of stream water” using a small flume

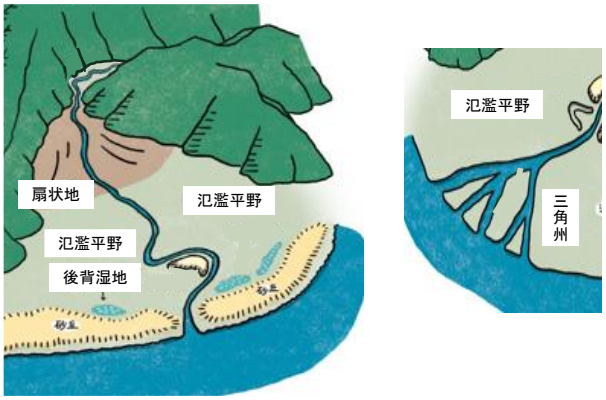
室蘭工業大学　○学生員　寺岡侑紀　(Yuki Teraoka)
室蘭工業大学　正　員　中津川誠　(Makoto Nakatsugawa)
室蘭工業大学　学生員　清水皓太　(Kota Shimizu)
室蘭工業大学　学生員　佐藤京弥　(Kyoya Sato)

1. はじめに

近年，日本では全国で豪雨災害が頻発している．直近では 2019 年 10 月，令和元年台風第 19 号によって，静岡県や関東甲信地方，東北地方を中心に広い範囲で記録的な大雨が降り，各地で堤防決壊や氾濫が発生した [1]．また，2018 年 7 月の西日本豪雨では，九州から東北にかけて広い範囲で断続的に激しい雨が降り続き，岡山県倉敷市真備町において堤防が決壊し，浸水被害が発生するなど，各地で甚大な被害が発生した [2]．さらに，2016 年 8 月には，北海道に 4 つの台風が連続して上陸及び接近し，十勝川水系や石狩川水系・空知川上流で堤防の決壊や河川の氾濫，日高山脈東側での道路や橋梁の流失など大きな被害が発生した [3]．このように，今や気候変動の影響とも言える大水害が日本の東西南北を問わず毎年のように起きる状況となっている．

このような水害の被害を軽減するためには，防災意識の向上が重要と考えられる．川真田ら [4]は「自然災害のメカニズムを理解し，危険を回避するために，いかに行動すべきかを自ら考え判断する力の育成が重要である」と述べており，防災の知識を持つ人材を育成する防災学習の重要性を示唆している．

そのような経緯から，本稿では，防災学習に広く活用することを目指し，「動画学習教材」の開発について検討した結果を示す．「動画学習教材」とは，小学校 5 年生の教科書で習う内容を模型実験で再現し，映像として可視化したものである．実際に映像を見せることによって授業で習った水や土砂のはたらきを，実感をもって理解し，さらに新たな発見を促すことができると考える．「流れる水のはたらき」によってできる中規模河床形態のイメージ [5]を**図－1** に示す．本稿では，我が国のような沖積地形に形成される (1) 扇状地，(2) 川の蛇行の発達，(3) 砂州，(4) 三角州を可視化できる動画学習教材の開発を目的とする．



図－１　中規模河床形態のイメージ [5]

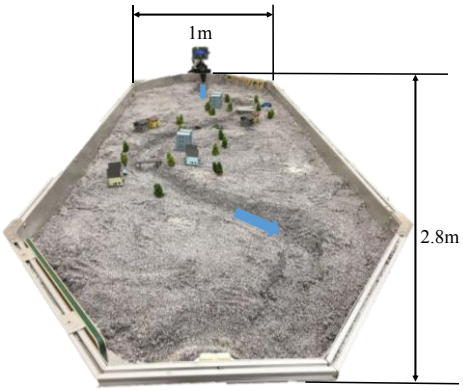
2. 研究方法

2.1 実験装置(EMRIVER EM3[6])について)

実験装置のイメージを**写真－1** に示す．これは Little River Research&Design 社製の EMRIVER EM3（本稿では以下 Em3 と表記する）というもので，河川のダイナミックな水の流れや河道の形成過程を実験で再現することができる実験装置であり，研究や教育に有用なツールとして有用である．その仕組みは，上流部にあるタンクに貯水し，装置上部にあるポンプで水をくみ上げ水を流下させる．Em3 で使用している河床材は，通常の砂とは異なり流出しやすく，軽い材料を使用している．この材料はメラミンプラスチックで人工的に作られており，土砂移動による侵食や堆積，蛇行といった川の基本原理を可視化できる．河床材の概要を**表－1** に示す．

2.2 実験の概要

本研究で行った実験では，流れのトレーサーとして，着色料であるウラニン(フルオレセインナトリウム)を使



写真－1　Em3 の外観(下流側から)

表－1　Em3 の河床材の概要

色	平均粒径(mm)	通常比重
黄	1.4	1.4
白	1.0	〃
黒	0.7	〃
赤	0.4	1.6

表－2　扇状地の形成の実験条件

実験条件	
川幅 (cm)	6.0
勾配	1/180
流量(ml/s)	4.0

表－3　川の蛇行の発達の実験条件

実験条件		
川幅 (cm)	t=0分	3.0
	t=14分	25
勾配	1/1800	
流量 (ml/s)	t=0~14分	50
	t=14~17分	4.0
初期水深 (cm)	2.0	

用している．後述する扇状地と複列砂州の実験では最初から最後までウラニンで着色した水を流し，蛇行と単列砂州と三角州の実験では実験終了時点で着色した水を流して現象を確認した．

(1)　扇状地の形成

実験条件を**表－2** に示す．実験装置の水の流出口側の上流に Em3 の河床材を山盛りし，プラスチック板で止水して水路を形成することで山地を流れる河川を再現した（後掲**写真－2** の左図）．実験中は水路に少しずつ河床材を流し，流水で運搬される砂礫を再現し，扇状地の形成を行った．

(2)　川の蛇行の発達

実験条件を**表－3** に示す．助走区間となる上流側は大きく蛇行させて偏流を促し，下流側をやや蛇行させた河川を初期状態とする．また，目印に幅 40 cm の位置に 30 cm 間隔で模型の樹木を立てた（後掲**写真－3** の左図）．実験開始時は 50 ml/s という多めの流量で氾濫させ，実験終了時は実験結果を分かりやするために 4 ml/s という少量の流量とした．これによって流跡や侵食によって削られた位置が視覚的に分かりやすいように工夫した．

(3)　単列砂州の形成

実験条件を**表－4** に示す．この条件は，黒木ら [7]による中規模河床形態の領域図を参考に設定した．砂州形成条件をオレンジ色の丸印でプロットした結果を**図－2** に示す．また，この実験中に上流側から少しずつ Em3 の河床材を給砂することで，流砂で形成される砂礫を再現した．この実験では，上端の水の吐出口付近に多めに河床材を盛り，石を置くことで上流部の侵食を抑制した．

(4)　複列砂州の形成

実験条件を**表－5** に示す．この条件は，単列砂州と同様に黒木ら [7]による中規模河床形態の領域図を参考に設定した．砂州形成の条件を青色の丸印でプロットした結果を**図－2** に示す．また，この実験中に上流側から少しずつ Em3 の河床材を給砂することで，流砂で形成される砂礫を再現した．この実験では，上端の水の吐出口付近に水勢を弱めるために石を扇形に配置し，水が川幅全体に広がるよう工夫した．

表－4　単列砂州の形成の実験条件

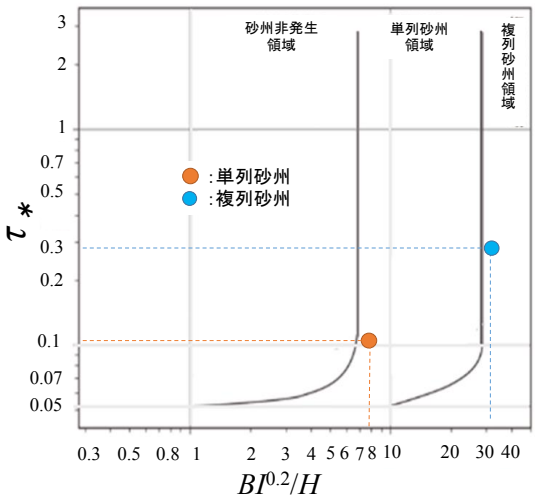
実験条件		
勾配I	1/180	
初期水深H (m)	0.009	
河床材の水中比重s	0.55	
河床材の平均粒径d (m)	0.000875	
川幅B (cm)	t=0分	20
	t=40分	30
流量Q (ml/s)	4.0	

※実験開始時の条件より，$\tau_*=HI/sd=0.104$，$BI^{0.2}/H=7.87$

表－5　複列砂州の形成の実験条件

実験条件		
勾配I	1/60	
初期水深H (m)	0.008	
河床材の水中比重s	0.55	
河床材の平均粒径d (m)	0.000875	
川幅B (cm)	t=0分	60
	t=25分	60
流量Q (ml/s)	4.0	

※実験開始時の条件より，$\tau_*=HI/sd=0.277$，$BI^{0.2}/H=33.0$



図－2　中規模河床形態の領域図

表－6　三角州の形成の実験条件

実験条件		
川幅 (cm)	5.0	
勾配	1/1800	
流量(ml/s)	t=0~13分	20
	t=13~16分	4.0

(5)　三角州の形成

実験条件を**表－6** に示す．Em3 全体の上流側に河床材を盛り川幅 5 cm の水路を形成する．下流側は河床材を除去し，河口付近の海を再現するために湛水する．（後掲**写真－6** の左図）実験終了時は堆積した三角州上の流路を見やすくするため流量を 4 ml/s と少なくした．また，この実験では上流側から河床材を少しずつ給砂することで，流砂で形成される砂礫を再現した．

3. 結果と考察

(1)　扇状地の形成

模型と実物との比較を**写真－2** に示す．実験が始まると上流側からの土砂の堆積が徐々に拡大していった．土砂の堆積が進行するに従い流路が変化し，移動を繰り返し，きれいな扇状地が形成された．**写真－2** は実験開始17 分後の状況と実物の扇状地を比較したものである．

(2)　川の蛇行の発達

模型と実物との比較を**写真－3** に示す．実験開始直後，すぐに蛇行の外岸側が侵食によって削られ，蛇行が徐々に発達していった．実験開始から約 13 分後，侵食によって下流側の木が倒れた．実験開始から約 14 分後，流量を 4 ml/s にして 3 分間水を流し実験を終了した．**写真－3** は実験で形成されたものと実物の蛇行河川を比較したものである．

(3)　単列砂州の形成

模型と実物との比較を**写真－4** に示す．実験開始後数分で川の両岸が侵食された．その後，川の流れが曲り始め河床材が堆積する様子が見られた．実験開始 40 分後，右岸と左岸に交互に砂州が形成され単列砂州を再現することが出来た．しかし砂州は定着せず，移動して不明瞭となった．**写真－4** は実験で形成されたものと実物の単列砂州を比較したものである．

(4)　複列砂州の形成

模型と実物との比較を**写真－5** に示す．実験開始から10 分ほどで砂州ができ始めた．その後，中州の数が増えていき，実験開始 25 分後，複列砂州が形成された．また，複列砂州は常に同じ場所に留まらず，時間が経つと移動していく様子も観察できた．**写真－5** は実験で形成されたものと実物の複列砂州を比較したものである．

(5)　三角州の形成

模型と実物との比較を**写真－6** に示す．三角州の形成は扇状地の形成と類似している．土砂が堆積し河口側に土砂が流れにくくなると別の向きに流れが変化して砂が堆積する．実験開始 13 分後，流量を 20 ml/s から 4 ml/s に抑えて水を 3 分間流すと数本の流路からなる，三角州が形成された．**写真－6** は実験で形成されたものと実物の三角州を比較したものである．

(6)　小型模型を用いた教材の意義

小学校 5 年の理科の教科書[8]には以下の内容が記述されている．

- 扇状地は土砂が扇形に堆積したところである．
- 曲がって流れているところの外側では地面が削られ，内側では土が積もる．
- 流れる水は土を運んだり，積もらせている．
- 三角州は三角形に土が広く積もったところである．

本実験では以上のような教科書の記述が実際に可視化された．また，模型がコンパクトであるため，間近でデモンストレーションすることができ，それができなくても動画に撮って見せることができる．

以上のような意識のもと，著者らは本年 9 月 11 日に小学校 5 年生を対象として，Em3 を用いた「流れる水のはたらき」に関する実験を行い，気付いたことを逐次記録させた．実験後に集約した記述には以下のようなものがあった．

- 雨が降ると川の水の流れが速くなって，曲がっている外側が削られて，川の近くにある木とかが倒れたので怖いと思った．
- 家や橋が流されている所を見て，早く逃げた方がいいと思った．

このことから，実験による現象の可視化は，水害の危険性を認識させるうえでも有効であることが実証されたと考える．

4．まとめ

本研究で得られた成果を以下に示す．

1) 小型模型実験により「流れる水のはたらき」によって形成される地形を，小学校の教科書に記載されているように可視化できた．
2) 実験を見せることで現象の理解の促進や，防災意識向上につながることが分かった．
3) 本研究で行った実験を実際に見せることや，動画で編集して公開することで，「流れる水のはたらき」を学ぶ小学生が教科書と併用して理解を深める媒体として活用できると考える．

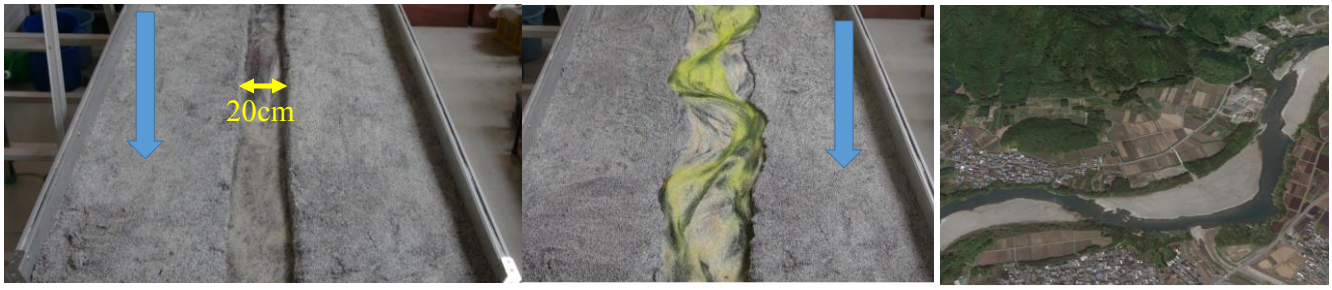
謝辞：本研究は文部科学省(MEXT)の事業である気候変動適応技術社会実装プログラム(SI-CAT)の助成を受けたものである．また，実験において株式会社水工リサーチから助言をいただいた．ここに記して謝意を表す．

参考文献

1) 国土交通省関東地方整備局：「令和元年 10 月台風 19 号」 出水速報（第 3 報）http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000760776.pdf (2019.11.28 閲覧)
2) 国土交通省中国地方整備局：国管理河川，小田川の河川管理施設等の被害及び応急復旧対策の状況，http://www.cgr.mlit.go.jp/emergency/2018/pdf/02odagawahaifu.pdf (2019.11.21 閲覧)
3) 国土交通省北海道開発局：平成 28 年 8 月北海道豪雨災害 被災とその影響，そしてこれから，https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/saigai/splaat000000otsj-att/splat 000000ougk.pdf (2019.11.21 閲覧)
4) 川真田早苗ら：水害から命を守る地域防災教育プログラムの実践・地域特性を考え，危険を判断し，回避する力の育成を目指して，日本理科教育学会第 64 回全国大会論文集，pp.76-77，2014.
5) 国土交通省・国土地理院，山から海へ川が作る地形，川の地形とは，https://www.gsi.go.jp/CHIRIKYOUIKU/kawa_1-1.html (2019.11.21 閲覧)
6) LITTLE RIVER RESEACH&DESIGN, https://emriver.com/ (2019.11.20 閲覧)
7) 黒木幹男，岸力：中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究，土木学会論文報告集，第 342 号．pp.87-96 ，1984.2.
8) 新興出版社啓林館，わくわく理科，pp.98-119.

写真－2　扇状地の形成の実験前後と実物との比較
（左：実験前，中：実験後，右：富山県黒部川扇状地（google earth））

写真－3　川の蛇行の発達の実験前後と実物との比較
（左：実験前，中：実験後，右：釧路湿原(北海道開発局)）



写真－4　単列砂州の形成の実験前後と実物との比較
（左：実験前，中：実験後，右：三重県宮川（google earth））

写真－5　複列砂州の形成の実験前後と実物との比較
（左：実験前，中：実験後，右：静岡県大井川（google earth））

写真－6　三角州の形成の実験前後と実物との比較
（左：実験前，中：実験後，右：広島平野（google earth））