

洪水被害を可視化できる小型模型実験を用いた学習教材の開発

Development of learning materials using small flumes visualizing damage due to flood

室蘭工業大学 ○学生員 佐藤京弥 (Kyoya Sato)
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 寺岡侑紀 (Yuki Teraoka)

1. はじめに

近年日本では豪雨災害が頻発している。2016年8月の北海道豪雨では、8月17日から31日までの2週間に4つの台風の影響で、道東を中心に記録的な大雨となり、十勝川や常呂川、空知川などで堤防決壊等により、多くの家屋や農地が浸水し、道路冠水、及び橋梁損壊など、甚大な被害が発生した¹⁾。2018年の西日本豪雨では、6月28日から降り始めた大雨で岡山県、広島県、愛知県などで河川の氾濫、浸水害、土砂災害等、甚大な災害が発生した²⁾。さらに2019年10月13日からの台風第19号がもたらした大雨では、静岡県や関東甲信地方、東北地方の広い広範囲にわたり大雨、河岸侵食による家屋や橋梁の崩落、堤防決壊による氾濫、排水管からの逆流による氾濫といった被害が相次いだ³⁾。(2019年12月3日現在で20水系71河川140箇所の堤防決壊⁴⁾)このように、今や日本では毎年のように大水害が発生している。水害の被害を軽減するためには、ハード対策の必要性とともに、自助を主体としたソフト対策の必要性が指摘されている。とくに、いざという時に住民が主体的に避難行動をとれるような危機意識の醸成が必要である⁵⁾。

以上のような背景もあり、2019年9月、室蘭工業大学で、「流れる水のはたらき」を理科で学ぶ小学5年生を対象に、近年頻発している豪雨による水害に対する防災意識の向上を促すために、模型実験による防災学習を実施した(写真-1)。模型実験では、川の侵食により家屋や樹木、橋梁が倒れる被害や堤防が破堤する瞬間を見ることが可能である。また、同年8月、室蘭市輪西町の市民会館で行われた防災フェスタ2019(写真-2左)や同年10月、室蘭市中島町で行われた知利別川環境学習体験フェスタ2019(写真-2右)では、実験装置を用いて、地域住民に川が氾濫する様子や破堤するメカニズムを説明し、防災意識の向上に努めた。

川真田⁶⁾は「自然災害が発生しやすい日本においては、自然災害や防災・減災に関する教育は重要な教育である。特に理科は、自然災害を引き起こすメカニズムを学ぶ教科として防災教育と密接な関係をもつ」と述べている。また、高橋⁷⁾は、「理科教育において、①地域の自然環境や自然災害を知る、②自然災害のメカニズムを知る、③自然災害が発生した時、状況に応じて自らの安全を確保できる、④常日頃から災害に対する備えを万全にし、他の人々と協力して災害を乗り越えることができる能力を身につけることが大切である」と述べており、防災教育は理科教育と連携して行うことで、防災意識の向



写真-1 模型実験による防災学習の様子
(2019年9月室蘭市、室蘭工業大学実験室)



写真-2 イベントの様子

左: 防災フェスタ2019(2019年8月室蘭市、市民会館)

右: 知利別川環境学習体験フェスタ2019(2019年10月室蘭市中島町、知利別川)

上を図ることができることを示唆している。

以上より、本研究は、近年頻発している大水害に対する防災意識向上のために、直近で発生した豪雨による洪水被害のイメージを、2種類の小型模型を用いた実験で可視化することによって、専門的な知見を有しない一般の人にも災害の実態を認識できる学習教材を開発することを目指したものである。

2. 研究方法

2.1 実験装置の概要

本研究で使用した2種類の実験模型を以下に示す。

(1) Emriver Em3

一つ目の装置を写真-3に示す。Little River Research & Design社製のEMRIVER EM3[®](本稿では以下Em3と表記する)は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

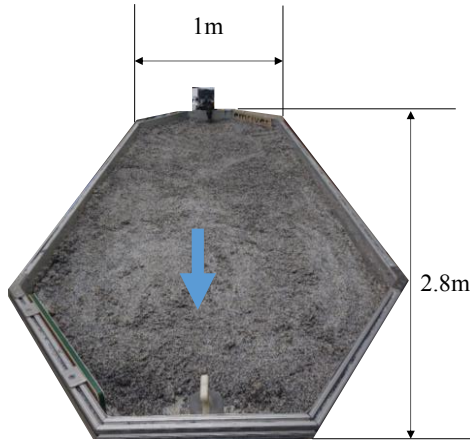


写真-3 Em3の外観

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	5
黒	0.7	1.6
赤	0.4	

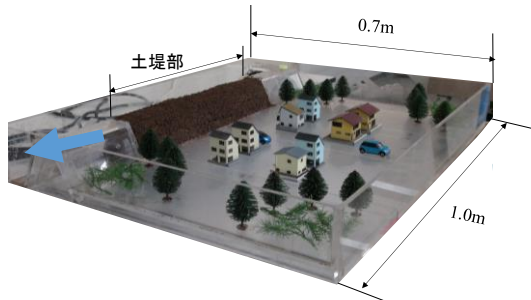


写真-4 破堤模型の外観

写真-5 長野県上田市のトラス橋梁の被災状況
(2019年11月8日撮影)写真-6 長野県穂保地区破堤箇所の状況
(2019年11月8日撮影)

いった川の基本原則を可視化できる。河床材の概要を表-1に示す。

(2) 破堤模型

もう一つの実験装置を写真-4に示す。この実験装置

表-2 家屋の崩落の実験条件

	模型(model)	想定した実物(prototype)
縮尺	1	1,000
川幅(m)	0.5	500
流量(m ³ /s)	0.00013	5,500
河床勾配	1/360	1/360

表-3 橋梁の崩落の実験条件

	模型(model)	想定した実物(prototype)
縮尺	1	1,000
川幅(m)	0.3	300
流量(m ³ /s)	0.00013	5,500
河床勾配	1/360	1/360

表-4 内水氾濫の実験条件

	模型(model)	想定した実物(prototype)
縮尺	1	1,000
川幅(m)	0.6	600
流量(m ³ /s)	0.00012	6,000
河床勾配	1/360	1/360

参考) フルード相似則に基づく模型(m)と実物(p)の倍率
縮尺 $r=x_p/x_m$ (x_p : 実物長さ, x_m : 模型長さ)
流速 $U_p=r^{1/2} \cdot U_m$, 流量 $Q_p=r^{5/2} \cdot Q_m$, 時間 $t_p=r^{1/2} \cdot t_m$

は、国立研究開発法人寒地土木研究所の模型にヒントを得て制作したもので、河川の水位が上昇するに従い、浸透、越流、（裏法部の）侵食の作用により堤防が破壊する様子を見ることができる装置である。その仕組みは、装置内部にあるタンクに貯水し、タンク内部にあるポンプで水をくみ上げ川幅 5 cm の河道に水を放出する。川の左岸側にはプラスチック製の堤防を設置し、延長 50 cm の開口部を脱水ケーキ焼却材で盛った堤防を設置する。これによって盛土部からの漏水や越水破堤を観察できる。

2.2 実験方法

本実験の事例は、2019年10月の台風第19号で被害にあった河川を、Google マップの空撮画像からイメージして作成した。実際の街並みをイメージしやすくするため川の周辺に模型の家屋や樹木、車両などを配置した。

(1) 家屋の崩落

第一の事例は、河岸侵食により家屋が崩落した千曲川をイメージし、1/1,000 程度の縮尺となるように作成した。フルード相似則に基づく模型と実物の縮尺（スケール）を表-2に示す。洪水時の状態を再現するために、下流側をせき上げし、水位を堤防の高さ程度になるように調節し、流量は 130 ml/s とした。川の水位が高く、流速が速いことから、侵食作用が顕著に表れる。その影響により、川の近くにある家屋が崩落する様子を再現した。また、本実験ではカメラを3台用意して撮影を行った。1台目はEm3の真上にカメラを吊るして全体が映るようにした。2台目は上流の右岸側から崩落する家が斜めに映るようにした。3台目は上流の右岸側から崩落する家が正面に映るように配置した。

(2) 橋梁の崩落

第二の事例は、トラス鉄橋が崩落した千曲川（写真-5）をイメージし、1/1,000 程度の縮尺となるように作成した。フルード相似則に基づく模型と実物の縮尺（スケール）を表-3に示す。



写真-7 家屋の崩落の実験前後の比較



写真-8 家屋の崩落後の状況



写真-9 橋梁の崩落の実験前後の比較



写真-10 橋梁の崩落後の状況



写真-11 内水氾濫の実験前後の比較



写真-12 内水氾濫後の状況



写真-13 破堤実験前後の比較



写真-14 破堤後の状況

ール)を表-3に示す。洪水時の状態を再現するために、下流側をせき上げし、水位を堤防の高さ程度になるように調節し、流量は130 ml/sとした。川の水位が上昇し、流速が速いことから侵食作用が顕著に表れる。その影響で堤防に架かる橋梁が崩落する様子を再現した。本実験ではカメラを2台用意して撮影を行った。1台目はEm3の真上にカメラを吊るして全体が映るようにした。2台目は上流の右岸側から崩落する橋梁が斜めに映るように配置した。

(3) 内水氾濫

第三の事例は多摩川をイメージし、1/1,000程度の縮尺となるように作成した。フルード相似則に基づく模型と実物の縮尺(スケール)を表-4に示す。本実験では川の水位が上昇し、外水が排水管を通じて逆流し、街に水が溢れ出す内水氾濫現象を再現するために、川と堤内地の間の地中にストローを埋め込んだ。写真-11の左側に表示されている線分AA'の断面図を図-1に示す。また、洪水時の状態を再現するために、下流側をせき上げし、水位を堤防の高さ程度になるように調節し、流量は120 ml/sとした。川の水位が上昇するに従い、ストローから逆流して浸水する様子を再現した。本実験では、トレー

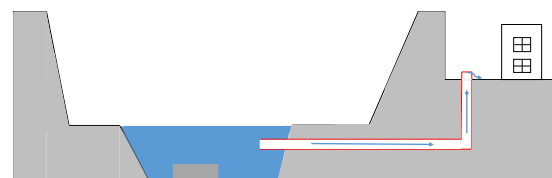


図-1 線分AA'の断面図

サーとしてウラニン(フルオレセインナトリウム)を使用して浸水の様子を可視化した。また、本実験ではカメラを3台用意して撮影を行った。1台目はEm3の真上にカメラを吊るして全体が映るようにした。2台目は上流の左岸側から内水氾濫する街が斜めに映るようにした。3台目は中流の左岸側から内水氾濫する街が正面に映るように配置した。

(4) 破堤実験

第四の事例は堤防決壊で氾濫する状況をイメージしたものである。写真-4に示す川の左岸側にはプラスチック製の堤防のうち、延長50 cmの開口部を設け、この区間は土(脱水ケーキ焼却材)を使用して天端幅5 cm、堤防高10 cm、堤防敷13 cmの4分勾配の堤防を作成する。水路の下流側にプラスチックのせき上げ板を設置し、

川の水位が堤防の高さと同程度になるように設定する。本実験では高さ 8 cm の板を用いた。堤内地には、Em3 の実験と同様に模型の家屋や樹木を配置し、堤防決壊がどのように起きるのか、決壊によってどのようなことが起きるのかを可視化することが可能である。また、本実験ではカメラを 3 台用意して撮影を行った。1 台目は破堤模型の真上にカメラを吊るして全体が映るようにした。2 台目は下流の左岸側から破堤する堤防が斜めに映るようにした。3 台目は堤防の正面側から破堤する堤防が映るように配置した。

3. 結果

(1) 家屋の崩落の実験結果

実験前後の比較写真を写真-7 に示す。増水すると、中州が水没し侵食によって削られた。川の水位が上昇していくにつれ、樹木が倒れ流された。時間が経過して水位が上昇すると高水敷まで浸水した後、侵食される範囲が広くなり、川の左岸側が侵食されて基礎地盤を失った家屋は崩落した（写真-8）。崩落した家屋を黄色で囲んで示す。

(2) 橋梁の崩落の実験結果

実験前後の比較写真を写真-9 に示す。水を流し始めると水の勢いで河床材が流された。さらに徐々に水位が上昇すると、樹木が倒れ、流された。高水敷まで水位が上昇すると河岸の侵食が進行した。この結果、川の左岸側が侵食され、橋台となる地盤を失った橋梁は崩落した（写真-10）。崩落するメカニズムは前節の家屋の崩落と同じである。落橋した場所は川幅が狭くなっており、水の勢いが強く、侵食が進んだと考えられる。

(3) 内水氾濫の実験結果

実験前後の比較写真を写真-11 に示す。堤防の高さ付近まで水位が上昇した際、堤内地側の地盤高よりも、河川の水位が高くなり、排水管に見立てたストローから水が逆流し、堤内側市街地の浸水が始まった。マンション低層部や家屋への浸水がイメージできる（写真-12）。

(4) 破堤の実験結果

実験前後の比較写真を写真-13 に示す。水を流し、水位が上昇すると堤防の堤内地側の法尻（裏法尻）から漏水し始める。さらに水位が上昇することで天端からの越水が始まり、越流水は裏法部を侵食して、一気に決壊していく。決壊した堤防から流出した水は、濁流となって住宅地へ流れ込む。そのエネルギーは非常に大きく、家屋や車を流すほどである（写真-14）。

(5) 実験の効果について

以上のような実験の効果について、事例を紹介して見解を述べる。第 1 章で示した小学 5 年生を対象とした 9 月 11 日実施の防災学習の際に、Em3 と破堤模型を用いた実験では、児童たちに気付いたことを逐次記録させた。その際の記述に以下のようなものがあった。

- ① 曲がっている川では、カーブの外側では水の流れる速くなって砂が削られ、カーブの内側では水の流れる遅く砂がたまった。
- ② 家や橋が落ちて流された。
- ③ 堤防が崩れると水が流れて家が水没した。

①は教科書に記述してあることで、実験を見て再確認できたと考える。②、③は実験を見て初めて気づいたことと言える。とくに土でできた堤防が、水の作用で簡単に壊れることが認識されたと考える。この結果により、模型実験による洪水被害の可視化によって、その危険性を実感させる効果があったと考える。

4. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

- 1) 今般 2019 年の水害を念頭に置いた小型模型実験では、河岸浸食や堤防決壊といった現象、それによって起こる被害の状況が可視化できた。
- 2) 洪水時の流れの状況を小型模型を用いて可視化することで、小学校の理科の教科書に記述されているような内容の理解に役立つと考える。
- 3) 本稿で示したような小型模型を用いた実験を通し、地域社会や子供の防災意識の向上が図られると考える。

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。実験装置のアイデアは国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所からいただいた。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る。

参考文献

- 1) 国土交通省気象庁，平成 30 年 7 月豪雨，<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/2018/20180713/20180713.html> (2019.12.2 閲覧)
- 2) 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/splaat000000ougk.pdf> (2019.12.2 閲覧)
- 3) 国土交通省，令和元年台風第 19 号等による被害状況等について（第 48 報），<https://www.mlit.go.jp/common/001317685.pdf> (2019.11.30 閲覧)
- 4) 国土交通省，堤防決壊箇所一覧，<https://www.mlit.go.jp/common/001313204.pdf> (2019.12.3 閲覧)
- 5) 田中耕司，大久保省良，村岡治道，北村祐二，前田善一，小根田康人：洪水によって人的被害が想定される地区の減災対策，土木学会論文集 F6(安全問題)，Vol.68，No.2，I-153-I-160，2012。
- 6) 川真田早苗，香西武：水害から命を守る防災学習の実践，運動場の土地の傾きの調査から始まる地域防災教育の実践，日本理科教育学会四国支部会報，第 32 巻，pp.15-16，2013。
- 7) 高橋治郎：防災教育のための理科教育，愛媛大学教育学部紀要，第 50 巻，第 2 号，pp.105-113，2004。
- 8) LITTLE RIVER RESEACH&DESIGN，<https://emriver.com/> (2019.11.30 閲覧)