

2016 年度（第 52 回）
水工学に関する夏期研修会講義集

A コース

Lecture Notes of the
52nd Summer Seminar on Hydraulic Engineering, 2016
Course A

土木学会
水工学委員会・海岸工学委員会
Committee on Hydrosience and Hydraulic Engineering,
Coastal Engineering Committee,

JSCE
2016 年 8 月
August 2016

2016年度（第52回）
水工学に関する夏期研修会講義集

Aコース（河川・水文コース）
総合テーマ：地球環境変化時代の水防災

- A-1 「仙台防災枠組2015-2030」の策定に向けた科学・技術分野の取り組みとその後の展開
東京大学 教授 小池俊雄
Toshio KOIKE
- A-2 水防災意識社会再構築に向けた取り組みについて
国土交通省 東北地方整備局・河川部長 畠山慎一
Shinichi HATAKEYAMA
- A-3 2015年関東・東北豪雨災害における鬼怒川の堤防被災状況の把握とそのメカニズムの
検討
東京理科大学 教授 二瓶泰雄
Yasuo NIHEI
- A-4 降雪・積雪・融雪のモデリング
東北大学 教授 風間 聡
So KAZAMA
- A-5 流出予測，数時間先から数十年先まで
東北大学 名誉教授 真野 明
Akira MANO
- A-6 土砂災害を発生させる現象の実態と解析
京都大学 准教授 竹林洋史
Hiroshi TAKEBAYASHI
- A-7 洪水と河道管理
北海道大学 教授 泉 典洋
Norihiko IZUMI
- A-8 水防施設と氾濫
－2011年タイ大洪水および2015年関東・東北豪雨を例として－
東北大学 准教授 小森大輔
Daisuke KOMORI

2016 年度（第 52 回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 16-A-1

「仙台防災枠組 2015-2030」の策定に向けた
科学・技術分野の取り組みとその後の展開

東京大学 教授

小池俊雄

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2016 年 8 月

「仙台防災枠組 2015-2030」の策定に向けた 科学・技術分野の取り組みとその後の展開

Science and Technology Communities Play a Key Role in the Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030

小池俊雄

Toshio Koike

1. はじめに

世界 187 カ国から約 6,500 人、のべ 15 万人をこえる参加を得て、仙台で本年 3 月に開催された「第 3 回国連防災世界会議」（以下、仙台会議）は大成功を収め、災害による人的、経済的被害を 2030 年までに著しく低減する目標を定めた「仙台防災枠組 2015-2030」（以下、仙台防災枠組）が制定された¹⁾。

日本学術会議では、防災・減災には科学・技術の積極的導入が重要であることの認識に立って、仙台防災枠組の作成作業、ならびに仙台会議での有益な議論を支援するため、2012 年秋より準備を始め、「防災・減災に関する国際研究のための東京会議（以下、東京会議）」²⁾を主催するとともに、仙台会議での「科学技術の災害リスク削減の政策決定への適用」分科会の企画等を進めた。その結果、仙台防災枠組では、中央政府と多様な主体の連携による全国的防災組織の強化と、科学・技術の活用による災害リスクの理解が強調されており、日本学術会議が国際社会と連携して進めた活動が明確に反映された。

仙台会議後は、これらの合意事項を実施に移すため、提言「防災・減災に関する国際研究の推進と災害リスクの軽減—仙台防災枠組・東京宣言の具体化に向けた提言—」（以下、提言）³⁾が日本学術によって取りまとめられた。また世界各国のアカデミーと協力して、2016 年 5 月に伊勢志摩で開催された先進 7 カ国首脳会議（以下、G7 伊勢志摩サミット）に対して、Gサイエンス学術会議から「持続可能な発展を支える災害レジリエンスの強化」と題する共同声明（以下、G7 共同声明）⁴⁾が発出されたところである。

2. 近年の災害

仙台防災枠組によれば、災害による過去 10 年間の損失は、死者 70 万人、傷害者 140 万人を超え、住居の損失は 2300 万人にも及び、被災者は 15 億人以上で、経済損失は 1 兆ドルを超えるとされている。また、東京宣言においても、G7 共同声明においても、近年における災害の特徴が強調された。

自然がもたらすハザードの影響は増大する傾向にあるが、貧困、人口増、都市の過密化等の人間の活動がハザードの影響をさらに増大させている。また、被害の増加は発展途上国のみならず、2013 年のハリケーンサンディによるニューヨークの被害に見られるように先進国にもみられ、経済成長や科学・技術の発展は必ずしも災害リスクの減少にはつなげていないことがわかる。

さらに、経済のグローバル化による災害の特徴も指摘された。例えば、2011 年にタイで発生した洪水は自動車部品工場を停止させ、ヨーロッパでの自動車生産に悪影響が及ぶこととなった。サプライチェーン化によって世界経済の相互依存性が高まり、遠く離れた場所で生じた災害の影響が、国境を越えて次々と国際的に広がっていき、他国において混乱を引き起こしている。2004 年インド洋津波では、タイの海岸線一体に洪水が発生し、死者は観光客を含め 5000 人以上に及び、スウェーデン史上最大の自然災害による死亡者数をもたらした。2006 年のシリアでの干ばつは現在の人道的危機の誘因となった諸条件の一つであった。そして、2011 年に発生した東日本大震災は津波を引き起こし、原子力施設の機能を阻害し、世界中に経済的影響をも

たらした。このような国際的事象は災害へのレジリエンスと持続可能な発展とが関連していることを示している。



写真1 2011年タイ水害（左）と2013年ハリケーンサンディによるニューヨークの被害
（東京会議ビデオ⁵⁾より）



写真2 2011年東日本大震災時、田老町の防波堤を乗り越える津波
（東京会議ビデオ⁵⁾より）

3. 防災・減災政策への科学・技術の導入プロセス

ここでは、東京会議から、仙台会議、提言、G7 共同声明へと、日本学術会議が取り組んだ、防災・減災政策への科学・技術の導入プロセスを紹介する。

(1) 東京会議²⁾

国際科学会議(ICSU)が、国際社会科学会議(ISSC)、国連災害軽減統合戦略(UN/ISDR)と共同主催で開始した災害リスク統合研究(IRDR)⁶⁾は、災害の防止と軽減、災害対応に対する備えを向上させ、自然および人間由来の環境ハザードの影響や災害リスク要因の科学的知見の統合化と社会実装の実現へ向けた科学技術・学術の取り組みである。ハザードの種類や学問領域を超えてデータや情報を体系化、統合化し、これを科学者および様々なステークホルダー間で共有し、知識や経験、考え方を相互に交換し、熟議を通して、災害リスクの軽減を目指す方法論の確立に取り組んでいる。これは、レジリエントな社会を構築し、人類を持続可能な開発へと導くために不可欠なステップでもあるとも考えられている。

この国際プログラムの国内対応委員会として、日本学術会議の土木工学・建築学委員会の下に設置されたIRDR分科会では、第21期（2011年10月～2014年9月）の重点活動目標の一つとして、仙台会議において、防災・減災の意思決定に科学・技術をいかに役立てるかを議論の焦点にすべく活動を開始した。さらに、

2016年度（第52回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 16-A-2

水防災意識社会再構築に向けた 取り組みについて

国土交通省 東北地方整備局・河川部長

畠山慎一

土木学会
水工学委員会・海岸工学委員会

2016年8月

水防災意識社会再構築に向けた取り組みについて

Rebuild a risk-conscious and well-prepared society against water-related disasters

国土交通省東北地方整備局河川部長

畠山 慎一

Shinichi HATAKEYAMA

1. はじめに

昨年は、全国各地で自然災害が相次ぎました。東北地方も例外ではなく、蔵王山の火山活動、岩木川での融雪洪水や7月の秋田県斉内川の堤防決壊、9月の関東・東北豪雨、また東北全域での渇水基調、9月のチリ中部地震による遠地津波など、様々な自然災害を経験する年となりました。

中でも9月の関東・東北豪雨では、宮城県、栃木県を中心に観測史上1位の降水量を記録するなど、記録的な豪雨により鬼怒川の堤防が決壊し、流域で2名の方が亡くなり約4,300名の方が救助されるという甚大な被害となりました。茨城県内で鬼怒川が決壊したのは、実に昭和13年以来であり、関東地方で国管理河川が決壊したのも昭和61年の小貝川以来29年ぶりのことでした。



写真-1 茨城県常総市三坂町の氾濫状況



写真-2 茨城県常総市三坂町の堤防決壊状況

国土交通省の対応として、堤防決壊前から常総市等の被災自治体にリエゾン（災害対策現地情報連絡員）を派遣し、連絡調整にあたりとともに、TEC-FORCE（緊急災害対策派遣隊）を派遣して、被災状況調査や排水活動に取り組みました。堤防決壊の当日には排水を開始し、全国から日最大51台の排水ポンプ車を投入して10日間で宅地及び公共施設等の浸水を概ね解消しました。また、堤防決壊箇所についても、当日から応急復旧に着手し、1週間で仮堤防（盛土）を完成、2週間で応急復旧を完了しました。



写真-3 茨城県常総市沖新田町の排水ポンプ車



写真-4 堤防決壊箇所の応急復旧完了状況

今回の水害では、氾濫域による家屋の倒壊・流失や広範囲かつ長期間の浸水が発生し、これに避難の遅れが加わったことで、近年の水害では例を見ないほどの多数の孤立者が発生する事態となりました。

さらに今後は、気候変動の影響により、このような施設の能力を上回る洪水が頻繁に発生することが懸念されます。

2. 施設では守り切れない大洪水は必ず発生する

こうした背景を踏まえ、社会資本整備審議会に「大規模氾濫に対する減災のための治水対策検討小委員会」を設置、有識者の皆様に今後の治水対策のあり方についてご議論頂き、12月10日は「施設では守り切れない大洪水は必ず発生するとの考えに立ち、水防災意識社会を再構築する必要がある」との答申をいただきました。

そもそも近代的河川改修が実施される以前は、施設の能力が低く、水害は日常的に起こるものと認識されていました。このため、その頃は水害を「我がこと」として捉え、これに自ら対処しようとする意識が社会全体に根付いていました。例えば、各家には水屋（水害時の避難場所として高い場所に作った建物）や上げ舟（水害に備えて軒下に備え付けられた小舟）等が備えられていました。その後、近代的な河川改修が進み、水害の発生頻度が減少したことに伴い、社会の意識は「水害は施設整備によって発生を防止するもの」へと変化していきました。すなわち「水防災意識社会」とは、今一度、河川管理者はもちろん、市町村や住民まで含めて、関係者が「施設では防ぎきれない大洪水は必ず発生するもの」へと意識を変革し、社会全体で洪水氾濫に備えることだと認識しています。



写真－5 水屋に設置された上げ舟



写真－6 一段高い場所に設置された上げ舟

※写真提供：岩手県一関市



写真－7 昭和22年カスリン台風時の上げ舟（岩手県一関市）

2016年度（第52回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 16-A-3

2015年関東・東北豪雨災害における鬼怒川の 堤防被災状況の把握とそのメカニズムの検討

東京理科大学 教授

二瓶泰雄

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2016年8月

2015 年関東・東北豪雨災害における鬼怒川の堤防被災状況の把握とそのメカニズムの検討

Field Survey on Levee Breach in the Kinu-gawa River by Kanto-Tohoku Heavy Rainfall Disaster, 2015 and Study on the Failure Mechanism

二瓶泰雄（東京理科大学）
Yasuo NIHEI（Tokyo University of Science）

1. はじめに

1.1 気象概況及び気象情報発表状況

2015 年 9 月に接近・来襲した台風 17, 18 号に伴って、西日本から北日本の広い範囲で大雨となり、全国で死者 8 名、家屋被害約 2 万棟という甚大な被害が発生した¹⁾。中でも栃木県・茨城県を流れる鬼怒川では堤防決壊・溢水が発生し、広範囲の洪水氾濫が発生した。

台風 18 号は 2015 年 9 月 7 日に沖ノ鳥島の東海上で発生し、その後北上し、9 日 10 時には愛知県渥美半島に上陸し、同日 15 時には日本海に抜け温帯低気圧となった（図 1 (a)）。この台風 18 号と温帯低気圧、同時発生していた台風 17 号により、南からの温かい湿った空気が流れ込んだ影響で、幅 100~200km の南北に伸びた線上降水帯が、関東地方と東北地方に形成された²⁾。図 1 (b)に示すように、この線上降水帯は、鬼怒川上流域と重なり、600 mm以上の二日間雨量が栃木県日光市で観測された。これらの雨量の再現期間としては、3 日間積算（421mm）・2 日間積算（403mm）・1 日間積算（330mm）においてそれぞれ 95 年、138 年、237 年となっており、相対的に短期間の降水ほど再現期間が長くなっている³⁾。

このような状況下において行われた気象情報などの発表状況を取りまとめたものを図 2 に示す。これは、気象庁の災害時気象報告⁴⁾に基づいて、災害の発生した茨城県常総市を例に表示している。ここでは、大雨

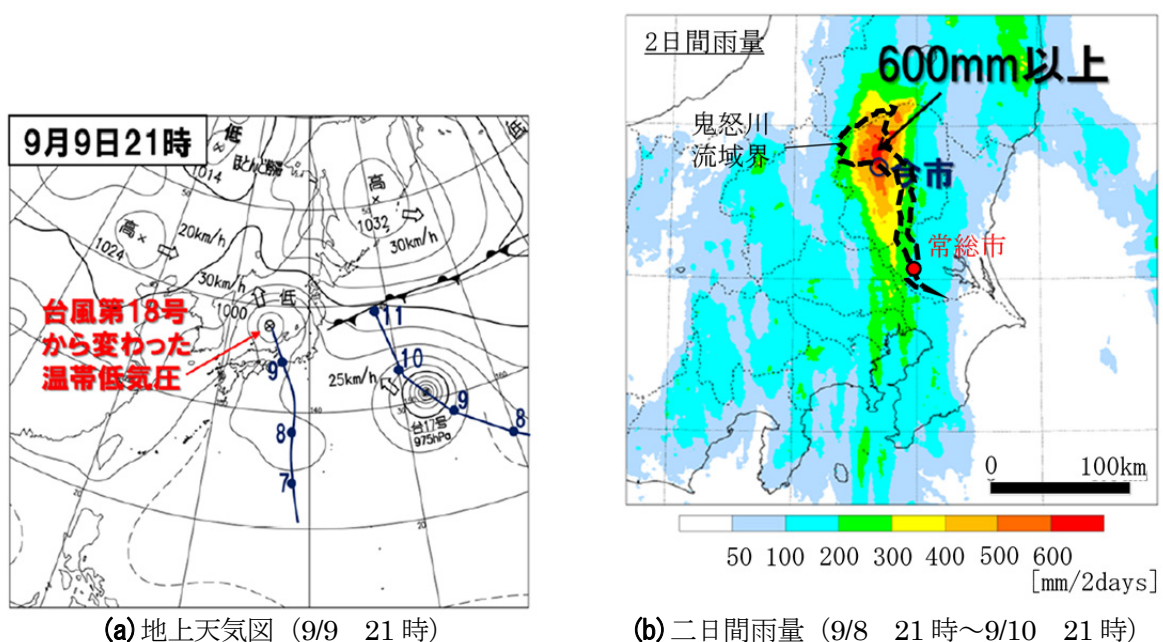


図 1 気象概況²⁾

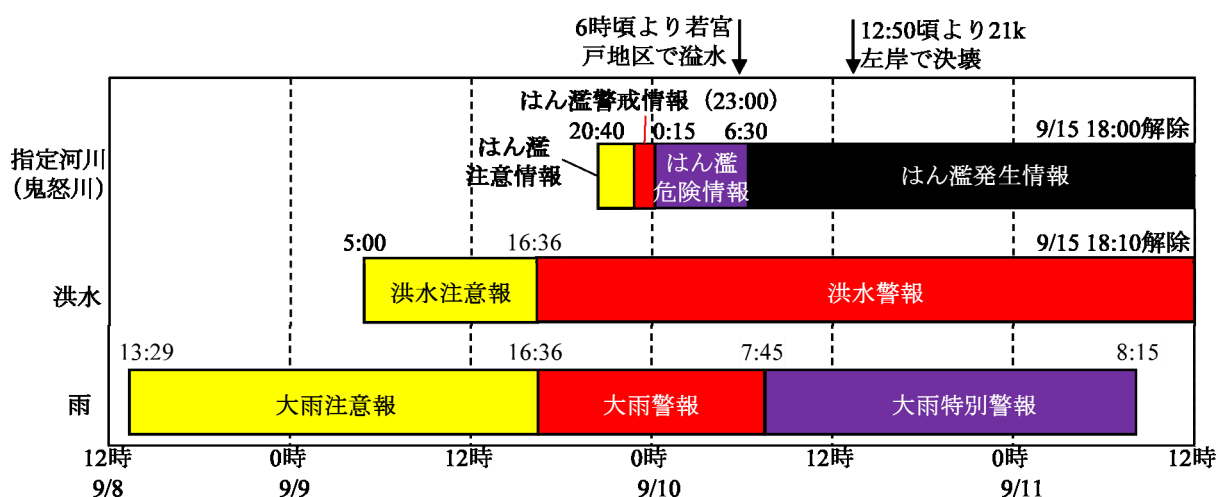


図2 気象情報等発表状況（茨城県常総市）⁴⁾

表1 人的・物的被害の概要（内閣府資料¹⁾，平成28年2月19日現在）

都道府県	人的被害[人]				住家被害[棟]					非住家被害[棟]	計[棟]
	死者	行方不明者	重症	軽傷	全壊	半壊	一部破損	床上浸水	床下浸水		
宮城県	2		1	2	2	572	298	138	727	2	1,739
山形県			1					13	17		30
福島県					2		6	43	163		214
茨城県	3		3	51	54	5,486		185	3,767		9,492
栃木県	3		1	5	22	964	29	1,102	3,934	153	6,204
埼玉県				3			2	374	1,482		1,858
千葉県							1	33	109		143
他			2	11			7	37	154	3	201
全国	8		8	72	80	7,022	343	1,925	10,353	158	19,881

と洪水、指定河川である鬼怒川のはん濫情報も記載している。これより、茨城県常総市では、9/8 13:29に大雨注意報が発令され、大雨警報は翌9日 16:36に発表された。また、洪水注意報は同じ9日 5:00、洪水警報は16:36にそれぞれ出された。指定河川・鬼怒川では、9/9 20:40にはん濫注意情報、同日23:00にはん濫警戒情報、翌10日 0:15にはん濫危険情報が出された。その後、同日6時ごろに鬼怒川左岸25.35k付近の常総市若宮戸地区にて溢水が発生し、6:30にはん濫発生情報が出された。その後、茨城県全域に大雨特別警報（土砂災害、浸水害）が7:45に出されると共に、8:00にはん濫発生情報（上記若宮戸地区に加え、筑西市船玉（左岸44.1k付近）、筑西市伊佐山（川島橋）（左岸45.9k付近））が出された。12:50頃には鬼怒川左岸21k付近（三坂町地区）にて堤防決壊が発生し、再びはん濫発生情報（左岸21k付近よりはん濫）が出された。このように鬼怒川における溢水や決壊により大量の氾濫水が鬼怒川左岸に流入し、茨城県常総市にて広域の浸水被害が発生した。

1.2 人的・物的被害

表1は、全国における人的・物的被害をまとめたものである（内閣府¹⁾，H28年2月19日現在）。このように、全国では、死者8名、重傷者8名、軽傷者72名の人的被害を受け、また物的被害としては、全壊80棟、半壊7,022棟、一部損壊343棟、床上浸水1,925棟、床下浸水10,353棟であり、住家・非住家の被害合計が19,881棟となった。このうち、茨城県・栃木県合計の人的被害は死者6名、重傷者4名、軽傷者56名、物的被害は、全壊76棟、半壊6,450棟、一部損壊29棟、床上浸水1,287棟、床下浸水7,701棟となっており、被害が顕著になっていることが分かる。牛山⁵⁾は、2015年関東・東北豪雨の被害状況を我が国で

2016年度（第52回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 16-A-4

降雪・積雪・融雪のモデリング

東北大学 教授

風間 聡

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2016年8月

Modeling of snowfall, snow accumulation and snowmelt

風 間 聡
So Kazama

1. はじめに

1. 1 雪の過程理解の重要性

豪雪地帯¹は国土の 51%ほどを占めると言われ、そこには総人口の約 15%が存在すると言われている。雪に関する研究は、数多くの分野で行われており、土木学会の水工学分野に限らず雪氷学会や雪工学会、気象学会などで過去から活発に行われてきた。教科書も多く、本夏期研修会においても 1993 年（秋田大学で開催）に「降雪・積雪・融雪の観測と解析」（堺）が実施されている。雪は地域の偏在性が強いいため西日本では関心の低い内容であるが、水文学、水資源に限らず水工学、土木工学全般に広く関わる問題であり、様々な場面でその理論が必要となることが多い。例えば、道路においては降雪による閉鎖、融雪による斜面崩壊などにおいて物理過程の理解が必要とされる。また、都市計画においては除雪のための流雪溝や消雪パイプの設置などを勘案することが寒冷地において必要とされる。これらの設計や計画には、雪に関する物理的性質を理解することが重要であり、本稿では、雪に関する問題点を述べた後、降雪、積雪、融雪について実務でよく利用されるモデル化について概略を説明する。

1. 2 雪が問題となる例

2011 年の前半は全国的に記録的な豪雪であり、各地で雪害が生じた。この年は様々な雪害が生じ、多くの関心を集めた。

2011 年以降の雪による犠牲者は降雪量の減少に伴い減少傾向にあるが、年間 100 人前後が犠牲になっている。重傷者も同様の傾向を持つが 500 人前後の人が被害を受けている。簡単に比較はできないが、熊本の地震の犠牲者が 50 名程度であり、毎年の雪害による犠牲者や重傷者は決して無視できない数であることがわかる。首相官邸のウェブページでは「過去 20 年の自然災害による死者・行方不明者数の内訳をみると、雪害は、大震災が発生した年を除き、合計数で風水害に次ぐ第 2 位、年によっては最も犠牲者の多い自然災害となっており、平成 26 年には、121 人の犠牲者が出ています」と記載されている。消防庁による 2014 年の雪害による犠牲者の内訳をみると、もっとも多いのが雪おろしや除雪中によるものであり、犠牲者 83 名のうち 65 名が該当し、さらにこの 65 名中、52 名が 65 歳以上である。他にスキーヤーや冬山登山者が雪崩による犠牲もしばしば大きく取り上げられる。雪崩については斜面災害と同様に都道府県別雪崩危険箇所を公表しているが、一般に認知されていない。2013 年 3 月 2 日からの爆弾低気圧では車外に出た父娘の父の犠牲が話題になったが、雪に埋もれた車中の一酸化炭素中毒で 4 名も犠牲になった。こうした豪雪によって車が動けなくなることはしばしば起こる。道路は閉鎖され、集落の孤立も大きな問題となっている。これは建設業者数の減少（2011 年までの不況による重機の老朽化と労働者の高齢化）に伴う除雪作業が十分でないためであり、道路を閉鎖する方針が取られるためである。除雪をあと何年続けられるかをアンケートした結果を図 2 に示す。5 年ほどで除雪をやめようと思っている企業が全体の 80%程度を占めており（朝日新聞、2011.1.30）、同様の犠牲者は増える傾向になると考えられる。

¹ 豪雪地帯対策特別措置法には豪雪地帯と特別豪雪地帯の区別がある。豪雪地帯は累年平均積雪積算値が 5,000cm 日以上の地域を持ち、かつ幾つかの条件（例えばこの条件を満たす面積が 2/3 以上）を満たす市町村であり、特別豪雪地帯は豪雪地帯のうち特に住民の生活に著しい支障が生じる地域としている。

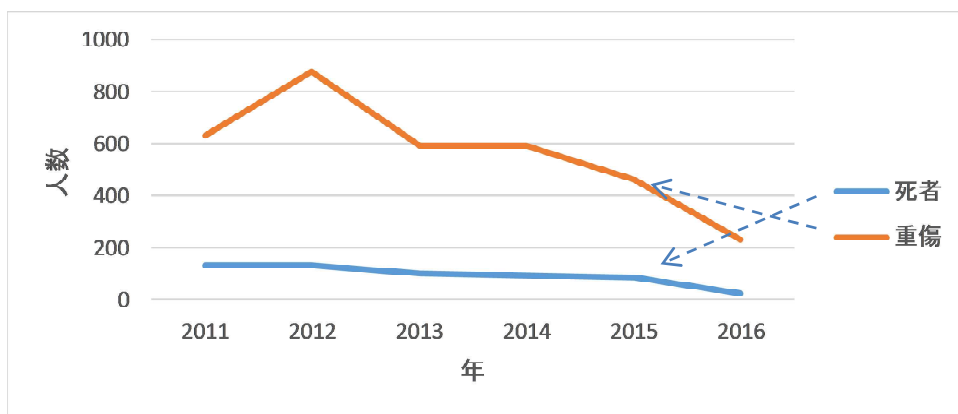


図1 雪害による犠牲者、重傷者数の変化 消防庁調べ

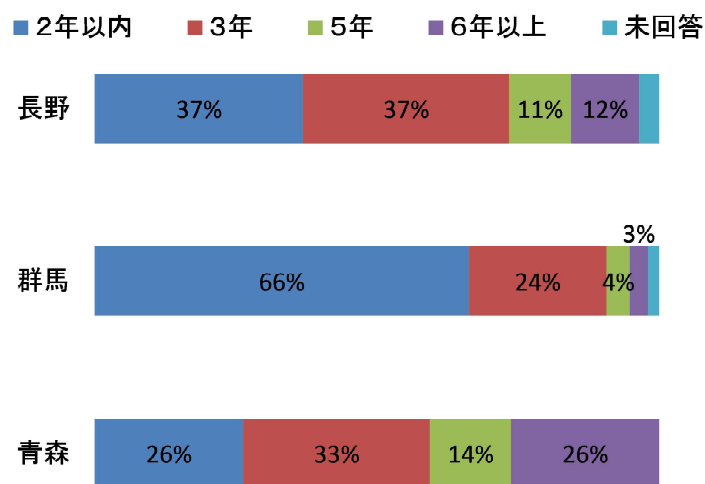


図2 あと何年除雪を担えるか？

青森 2010年10月 118社、群馬 2009年11月 246社、
長野 2010年1月 301社への県建設業協会インタビューデータ。

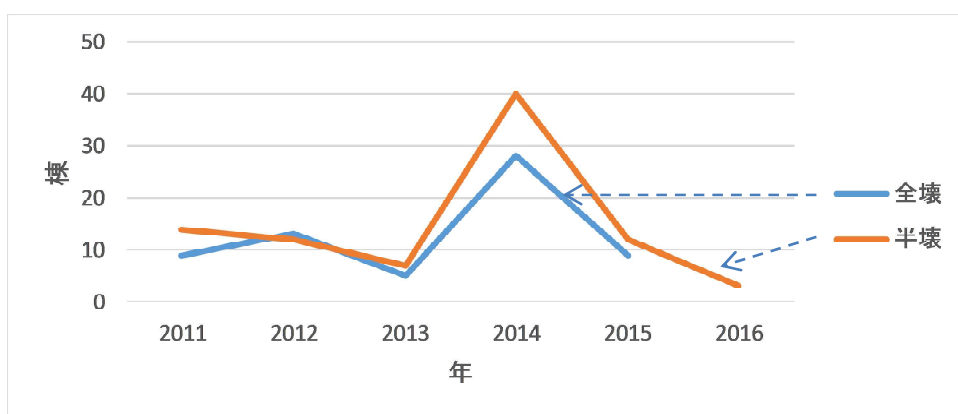


図3 雪害による家屋の全壊、半壊の変化

多くの降雪と積雪により家屋の倒壊も多い。図3に2011年以降の家屋の全壊、半壊の棟数を示す。犠牲者と同様に減少傾向にあるが、毎年10棟程度が全壊している。一般に豪雪地帯の家屋の柱は太いと言われるが、住民の高齢化のため、雪おろしが十分でなく倒壊することがしばしば見られる。この図からも必ずしも多くの降雪が記録

2016年度（第52回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 16-A-5

流出予測，数時間先から数十年先まで

東北大学 名誉教授

真野 明

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2016年8月

流出予測，数時間先から数十年先まで

Runoff Predictions, a Few Hours to Several Decades of Lead Time

真野 明

Akira Mano

1. はじめに

近年，日本各地で大雨による洪水災害や土砂災害が頻発している．2015年9月，台風18号に伴う関東・東北豪雨が発生し大きな被害が出た（土木学会ほか，2016）．2014年には，6月に三鷹市，調布市で，7月に仙台市で，8月に広島市，名古屋市，豊中市で，9月に別府市，東京都小岩，札幌市，石巻市，名古屋市でそれぞれ集中豪雨があり，人口が多い地区での事象で，浸水被害や地盤災害が拡大した．豪雨が起る地域は日本全体に広がっており，全体で見ると豪雨の回数は多いが，それぞれの地区では低頻度の事例であることが多い．これらの災害に対しては施設での対応は難しく，早期警報，早期避難による人の保全が効果的である．これを支えるのが，数時間先の流出や氾濫を予測する技術である．気象庁は9時間先までの気象を毎時更新して数値予報する局地モデルを運用しており，この出力を使って流出を計算すれば，洪水のリアルタイムの予測が可能になる．なお，人が警報を得てから避難を完了するには，1～2時間程度の時間を要することが知られており，数時間の先行時間を有する確度の高い洪水予測は避難を促すのに効果的である．

アメダス観測地点において，時間雨量が50mmあるいは100mmを超えた大雨の統計が，気象庁により公表されている．発生回数の長期トレンドは増えてきており，地球温暖化の影響が議論されているが，年変動が大きく，また観測期間も十分ではないことから，必ずしも因果関係は明確ではない．地球温暖化の影響評価は，気候変動を展望する大気海洋結合大循環モデル（GCMs）の出力を使って調べるのが適当である．各温室効果ガスの排出シナリオ（SRES: Special Report on Emission Scenarios, IPCC第4次レポートまで，RCP: Representative Concentration Pathway, 第5次レポート）に対して，数十年後の地球の気候がGCMを使って展望されている．このGCMの出力を利用して，降雨流出モデルに投入し計算することにより，将来の洪水の特徴を知ることができよう．

気候変動による洪水評価に関しては，時間的な余裕が十分あることから，減災施設の整備計画や，都市計画・土地利用計画への利活用が有望である．特に沿岸部では，気候変動に海面上昇が加わるため土地利用の大幅な変更が避けられない．綿密で効率的な地域計画の策定とその実施が求められている．現在，気候モデル，降雨流出モデルとも大きな不確実性を有している．これを減らしていくことが，予測技術を社会実装するためには必要である．

降雨流出モデルは，短期予測，長期予測いずれにおいても使われる基盤技術である．流水は，洪水だけではなく，水資源，斜面崩壊，生態系，地形形成など多くの分野で基礎的なメカニズムを決める現象であり，多くの分野で降雨流出モデルの利用が進み，活発な技術開発が行われている．2. は降雨流出モデルの現状と課題についてレビューを行う．3. は洪水を対象に著者らが開発を進めた Super Tank Model の特徴や適用について概説する．4. は気象庁の数値予報を入力した Super Tank Model の洪水予測について，また5. は気象研究所の高解像度 GCM の出力を使った将来の洪水予測について述べる．6. はまとめである．

2. 降雨流出モデル開発の現状と課題

近年多くの降雨流出モデルに関するレビューが出版された (Paniconi ら, 2015; Fatichi ら, 2016). それらも参考にしながら, モデルの現状と課題についてまとめてみよう.

(1) 流出現象の基礎概念

強降雨時の水の流れを図 2.1 に示す. 降雨の一部は植生により取り除かれ (樹冠遮断) 蒸発する. 残りが地表に到達するが, 地表の浸透能を超える雨は地表に溜り地表流を形成する. 地中に浸透 (浸潤) した水は浸透速度の違いにより, 濡れ前線を形成しその上は飽和状態となり, 側方流が発生する. 地下水面に達した濡れ前線 (浸潤線) は, 地下水面を上昇させ地下水流の流量を増加させる. 地表流, 側方流, 地下水流は水路に流入し洪水流として観測される. 安定同位体の分析により, 流出の初期の段階で新しい水の成分が有意に含まれていることが分かってきており (一柳錦平ほか, 1998), 地表流や側方流の無視できない寄与がある. 濡れ前線を挟んで, 密度的不安定状態にあるため, **fingering** と呼ばれる突起状の早い流れが生じ, 濡れ前線は均一ではない. 地表と地下水面の間は, 通常時は地中の間隙に空気が含まれており, 地中水分は不飽和状態で通気帯(vadose zone)と呼ばれる.

地表付近には土壌層が形成されている. 山間部の土壌の代表的な鉛直構造を図 2.2 に示す. 母岩が風化し, そこに植生が繁茂して, 土壌層が形成される. 一番上が O 層 (有機物層), その下に A 層 (粗大有機物が分解あるいは溶脱されて生じた黒色の層), B 層 (有機物に由来する黒色化が不十分で, 風化が進行した鉱物質の層), C 層 (風化が十分に進行していない岩石層) と続く. 平野部では, 山間部からの輸送堆積や耕作の影響が大きい. 土壌の各層は, 粒度, 空隙, 透水性などが異なるため, 地中の水分移動を考えるとときには区別して扱う必要がある.

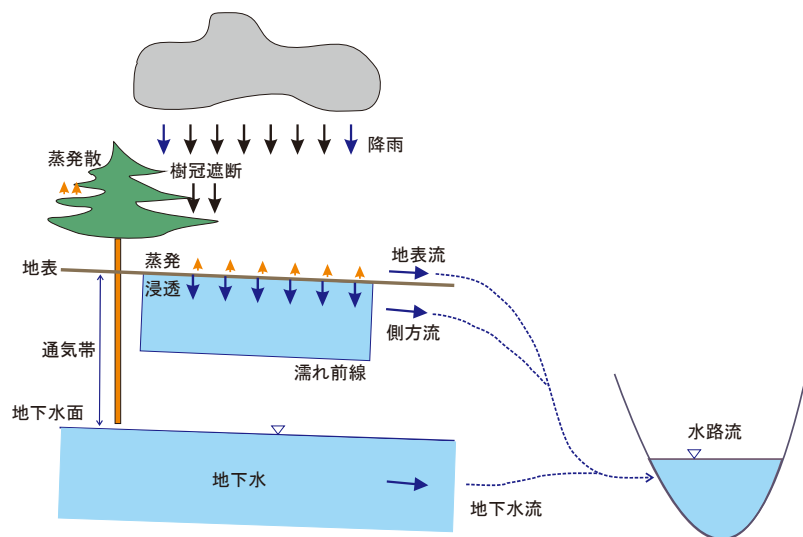


図 2.1 強降雨時の水の流れ

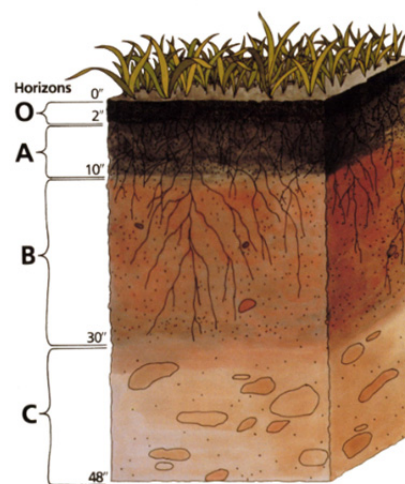


図 2.2 土の鉛直構造

<http://www.ctahr.hawaii.edu/>

地下水の流れは, 小さな空隙の間を流れるものがほとんどで, Reynolds 数が小さく層流であり, 抵抗は流速に比例し, 流速は動水勾配に比例する. この法則を Darcy の法則(1856)といい, 比例係数を飽和透水係数 K_s という. 飽和透水係数は, 空隙の代表径すなわち土砂の粒径のほぼ 2 乗に比例して変化する. 深度が増すと空隙が小さくなり飽和透水係数は小さくなる. 広く見ると, 地中には根系の跡, 動物が掘った穴などがあり不均質である. そのような場所では, 抵抗が小さいため流れが集中し, 細粒分の土砂を流し去って, 孔隙が拡大し発達する. これを **piping** という. 前述の **fingering** が生じた場所でも同様の現象が起こる.

2016年度（第52回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 16-A-6

土砂災害を発生させる現象の実態と解析

京都大学 准教授

竹林洋史

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2016年8月

土砂災害を発生させる現象の実態と解析

Characteristics and Numerical Analysis of Phenomena Which Causes Sediment Disaster

竹林 洋史
Hiroshi TAKEBAYASHI

1 はじめに (竹林, 2016)

2014年の広島・南木曾・丹波, 2013年の伊豆大島など, 短時間で高強度の豪雨によって発生した表層崩壊に起因した土石流・泥流による土砂災害が近年頻発している。2014年8月の広島市安佐北区, 安佐南区等で発生した局地的豪雨では, 75名もの人命が失われた。IPCCのレポートによると, 地球温暖化に伴い気象特性が極端化することが予想されており, 平均降水量が変化しなくても短時間で高強度の豪雨の発生回数は増加することが予想されている。表層崩壊に起因した土石流・泥流は, 降雨継続時間が短くて総降水量が小さくても, 降雨強度が高いと発生しやすい。そのため, 地球温暖化による気象特性の極端化によって表層崩壊に起因した土石流・泥流の発生回数が増加することが予想され, 土石流・泥流の動態の解析と解析結果にもとづいた効果的な対策が求められている。

土石流・泥流対策を実施する上で解析に求められる情報としては, 土石流・泥流の氾濫域, 流動深, 流速, 土石流/泥流による生産土砂量などであろう。例えば, 土石流の土砂災害警戒区域の設定に用いられる土石流の氾濫域は, 土石流扇状地の上流端である土石流堆積開始地点を起点とした扇形の堆積域を想定し, 地盤勾配が緩やかになる地点を土石流氾濫範囲の下端としている。このような簡便な方法が用いられているのは, 土石流溪流が非常に多いことと, このような計算方法でもある一定レベルの精度で氾濫域が予測できるためである。しかし, 実際の土石流は, 氾濫域の建物や道路の影響を受け, より複雑な形状で堆積する。また, 2014年に広島市安佐南区八木三丁目で発生した土石流は, 本川源頭部での発生から宅地に到達するまでの時間が100秒程度であり, 土石流(斜面崩壊)発生後に避難をする場合は, 土砂災害警戒区域の中の安全な場所の情報が必要である。このように, 土石流の土砂災害警戒区域内の住民にとっては, より詳細な土石流氾濫域の情報が必要である。数値シミュレーションによる土石流・泥流の解析では, このような詳細な土石流・泥流氾濫域の情報を提供することが可能である。

また, 河岸・堤防の浸食, 局所洗掘, 河床上昇による氾濫など, 山地域だけでなく河川下流域でも土砂災害が発生する。2011年の紀伊半島南部の豪雨災害では, 那智川下流域で河岸浸食とともにJR橋が落橋し, 三重県五郷町では橋梁周辺の迂回流によって河岸, 道路, 農地の土砂などが流出した。2013年の京都・滋賀水害では, 渡月橋で堰上げられた流れにより, 多くの土砂と流木を含む流れが氾濫するとともに, 迂回流によって中ノ島が浸食された。さらに, 2015年は鬼怒川下流で堤防及び堤内地地盤が浸食され, 多くの土砂を含む流れが氾濫した。

このような河川下流域の土砂災害は, 河川工学分野における基礎的な研究課題として, 古くから研究が実施されており, 近年では, 数値シミュレーションによる現象の再現により, 現象の特性を把握し, 土砂災害対策の立案に利用されている。

本講義ノートでは, まず, 平面二次元流れの土石流・泥流を対象とした河床変動解析の基礎方程式を示すとともに, 2014年に広島市安佐南区八木三丁目で発生した土石流災害の現地調査結果を紹介するとともに, 平面二次元数値シミュレーションの結果を例にして, 土石流・泥流の数値シミュレーションによる解析技術と解析結果の利用方法について紹介する。次に, 平面二次元流れの掃流砂・浮遊砂を対象とした河床変動解析の基礎方程式を示すとともに, 2011年の紀伊半島南部の豪雨時に三重県五郷町で発生した迂回流による土砂災害の現地調査結果を紹介するとともに, 橋梁周辺で発生する迂回流による堤防・河岸浸食の平面二次元数値シミュレーションの結果を用いて, 迂回流による堤防・河岸浸食の特長と対策例について紹介する。

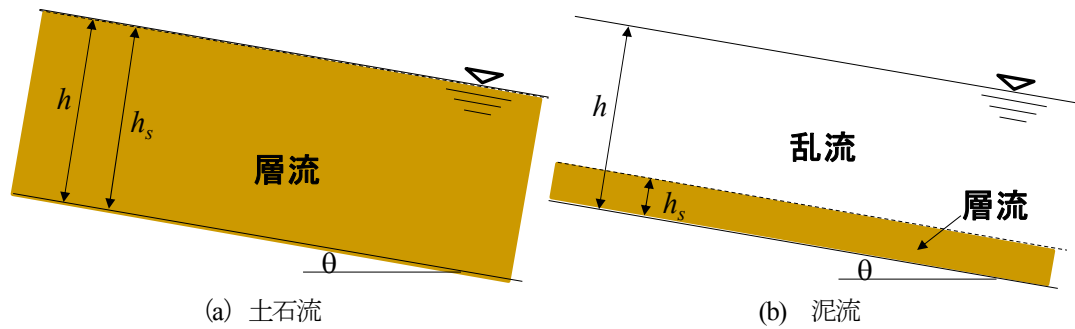


図-1 土石流と泥流

2 土石流・泥流を対象とした河床変動の解析方法

2.1 概説

土石流・泥流は、水と土砂が混合した固液混層流である。固液混層流は、水を液体、土砂を固体として扱う二層流体モデルと水と土砂の混合物を一つの流体として扱う一流体モデルが存在する。土石流・泥流の場合、非常に多くの土砂粒子が流体中に存在し、これら全てを固体粒子として扱う二層流体モデルは、計算負荷が非常に高く、工学的に実用性のある解析は条件が非常に限定される。そのため、ここでは、一流体モデルとして土石流・泥流の流れをモデル化する。急勾配の山地溪流を荒々しく流れる土石流は、非常に複雑な流れに見え、多くの方が土石流は乱流状態で流れていると考えているかもしれない。しかし、土石流中には流動深と同スケールの粒径の大きい砂礫が含まれているため、乱れが発達しにくく、流れ全体の特性は層流となる。一方、泥流の場合は、河床近傍においては土石流同様に層流域が形成されるが、流動深に対して土砂の粒径が小さいため、図-1に示すように層流域の上には乱流域が形成される。ここで紹介する解析モデルは、層流・乱流の二層の流れの状態 で形成された泥流にも適用可能である。また、本解析モデルでは、微細土砂に水がある一定以上加わることにより、降伏応力が無視できるほど小さくなり、土砂が流動化するプロセスを考慮している。これについては、後述する。

2.2 支配方程式 (江頭・佐藤・千代, 1994, 江頭・伊藤, 2004, 竹林, 2016)

従来の土石流の数値シミュレーションは、上流域は一次元モデルを用い、下流の土石流堆積域に平面二次元モデルを適用することが多い(和田・里深・水山, 2008)。しかし、このようなモデルでは支川からの土石流の扱いが別途必要となる。また、伊豆大島で見られたような尾根を土石流が超える場合の解析や土石流の流動幅の時間的な変化の評価が困難となる。そこで、本解析では全解析区間に平面二次元モデルを適用した。基礎方程式は以下のものである。

水及び土砂の混合物の質量保存則は以下のものである。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = \frac{E}{c_*} \quad (1)$$

ここに、 t は時間、 h は泥流の流動深である。 u と v は x と y 方向における速度成分、 c_* は静止堆積層の砂礫の堆積濃度、 E は河床の浸食速度であり、以下の式を用いる。

$$\frac{E}{\sqrt{u^2 + v^2}} = c_* \tan(\theta - \theta_e) \quad (2)$$

ここに、 θ は流動方向の河床勾配であり、以下の関係がある。

$$\sin \theta = \frac{u \sin \theta_x + v \sin \theta_y}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (3)$$

ここに、 θ_x は x 方向の河床勾配、 θ_y は y 方向の河床勾配である。 θ_e は水及び土砂の混合物中の鉛直平均土砂濃度 \bar{c} に関する流動方向の平衡河床勾配であり、図-1のように、水と土砂の混合物に対して河床近傍に層流域、その上に乱流域を有する二層流を考えると、以下の関係が得られる。

$$\tan \theta_e = \frac{(\sigma/\rho - 1)\bar{c}}{(\sigma/\rho - 1)\bar{c} + 1} \frac{h_s}{h} \tan \phi_s \quad (4)$$

2016年度（第52回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 16-A-7

洪水と河道管理

北海道大学 教授

泉 典洋

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2016年8月

洪水と河道管理

Flood and channel roughness control

北海道大学大学院
公共政策学連携研究部
泉 典洋

Norihiro Izumi

Public Policy School, Hokkaido University

1 はじめに

河川は単に水を流すだけの水路ではない。自然や生物にとって必要不可欠な様々な物質を輸送する重要な輸送路である。河川によって輸送される陸地由来の有機物やミネラルは、海の生態系にとってなくてはならないものである。また、河川によって輸送される土砂は、陸地を作り平野を作る。このとき、土砂と一緒に堆積した様々な栄養物質によってエジプト文明などの古代文明が誕生したことは言うまでもないであろう。現在でも、陸地や平野は陸上生物や人間にとって重要な生活の場となっている。特に河川が持つ土砂輸送機能は、河川の物理的な性質を単なる水路のそれとは異なるものとし、河川を河川ならしめている重要な機能である。

土砂を輸送する河川では、河床は通常土砂によって覆われている。河床を覆う土砂は水の流れによって運ばれるが、その際、流れと土砂の境界である河床には河床形態と呼ばれる様々な形状が現れる。ここでは、河床に現れる波状の形態を河床波と呼び、河床波と平坦床を合わせて河床形態と呼ぶことにする。河床の凹凸は河床上を流れる流水に対して抵抗となることから、どのような河床形態が現れるかによって流水に対する河床の流水抵抗が変化する。したがって、洪水時の水位を予測するためには、水理条件に応じてどのような河床形態が現れるのかを精度良く予測することが必要となる。

近代以降の河川工学では、降雨量から流出量を予測し、流量から水位を予測することで、河道の計画や管理が行われてきた。降雨量からの流出量の予測は河川水文学の分野で、流量からの水位の予測は河川水理学の分野で研究が行われ、河川工学の両輪としてその理論的根拠となってきた。降雨量からの流出量予測が地形や地質、土地利用など様々な要因に影響を受けることから予測が困難であるにも関わらず、実用的なレベルに達しているのに対して（というより、不確定要素が多いことから期待できる精度には達しているというべきか？）、純粋に水理学的関係から導かれるはずの流量と水位の関係が、未だマンニングの粗度係数やHQカーブ（水位流量曲線）の域を出ていないのは前述した水理条件と現れる河床形態の関係が未だに十分に明らかになっていないためである。

近年、地球規模の環境変化によって集中豪雨の頻度が増加している。集中豪雨では、短期間で河川の流量は増加し、水位の上昇が生じる。堤防への負担も増大し、避難の役割も重要となっている。このような時代にあって、洪水時の水位を精度よく予測することはこれまで以上に重要となっている。この講義では、洪水時に見られる河床形態に焦点を当て、洪水時における河床粗度の観点からの河道管理について解説する。

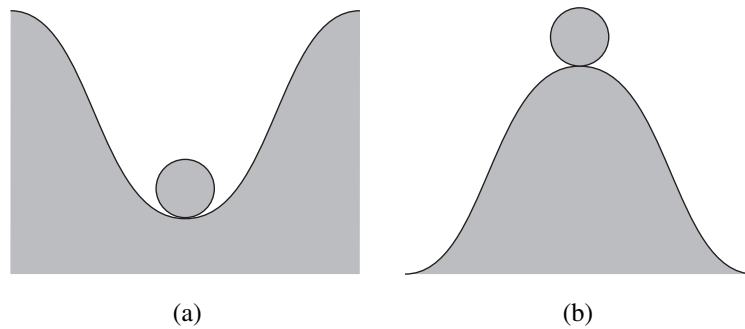


図1 二種類の平衡状態。(a) 安定な平衡状態, (b) 不安定な平衡状態.

2 自律形成現象と不安定性

水が河床上を流れるとき、河床上の土砂は流れによって輸送される。河床上の土砂が輸送されると河床の形状が変化する。河床形状の変化に応じて、河床上の流れも変化する。すなわち、河床形状が境界条件として流れを決定しているのと同時に、流れは境界の形状を決定している。このように、流れとの相互作用によって河床の形状が自律的に形成される現象をここでは自律形成現象と呼ぼう。河床形態の発生も自律形成現象の一つである。

河床形態がどのように自律形成されるかを見てみよう。まず、一様勾配で平坦床の状態があるとする。この上に水を流すと流速および水深が流下方向に変化しないような等流状態が発生する。土砂で覆われた河床の形状変化は、後述するように土砂収支によって発生する。すなわち、ある区間に入って来る土砂より出て行く土砂が多い場合、河床は低下し、逆にある区間に入って来る土砂より出て行く土砂が少ない場合、河床は上昇する。したがって土砂輸送量が流れ方向に一定であれば河床高さは変化しない。等流状態で流れている限り河床も平坦床のまま維持される可能性がある。ここで可能性があるという言い方をしたのは、維持されない場合があるからである。平坦床の状態が維持されたり、維持されなかったりするメカニズムを理解するには、次に述べる平衡状態と安定性の概念が必要になる。

力学では、力が釣り合っている状態を平衡状態という。例えば、図1(a)のように、谷の一番低いところにボールが静止している状態は一種の平衡状態である。ボールには、鉛直下向きに重力が働いており、同時にそれと釣り合う抗力が地表面から鉛直上向きに働いているため、ボールは静止する。では、図1(b)のように山の頂上にボールが置かれた状態はどうであろうか。実はこれも平衡状態である。ボールには鉛直下向きの重力と鉛直上向きの抗力が働いており、二つの力は釣り合っている。

いま、二つの平衡状態にわずかな擾乱を与えてみよう。ほんのちょっとだけ蹴とばしてみるののである。図1(a)の平衡状態では、ボールは谷壁に沿ってちょっとだけ駆け上がるが、地表面に対する接線方向の重力成分が谷底に向かって働くため、元の位置に戻って来る。一方、図1(b)では、わずかでも頂上からずれると、地表面に対する接線方向の重力成分は山裾の方向に働くため、ボールは二度と頂上には戻って来ない。図1(a)のように、多少の擾乱を受けても元の状態に戻る平衡状態を安定な平衡状態と言い、図1(b)のように、微小な擾乱を受けると元の状態に戻らない平衡状態を不安定な平衡状態と言う。自然界では、不安定な平衡状態は瞬く間に消滅してしまうため、我々は通常、安定な平衡状態しか目にするのではない。

河床形態に話を戻そう。平坦床等流状態は一つの平衡状態である。重力の流下方向成分と底面せん断力が釣り合っており、その底面せん断力によって流れ方向に一様な土砂が輸送されている。この平衡状態が安定であれば平坦床は維持され、我々は平坦河床を目にすることができる。ところが、この平衡状態が不安定

2016 年度（第 52 回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 16-A-8

水防施設と氾濫

—2011 年タイ大洪水および 2015 年関東・
東北豪雨を例として—

東北大学 准教授

小森大輔

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2016 年 8 月

水防施設と氾濫

-2011年タイ大洪水および2015年関東・東北豪雨を例として-

Flood control facilities and inundation - Case of 2011 Thai flood and 2015 Kanto-Tohoku rainfall -

小 森 大 輔
Komori Daisuke

1. はじめに

近年、2011年タイ大洪水や2013年フィリピン高潮災害など、アジアモンスーンに位置する多くの都市は洪水・浸水による被害を頻繁に受けている。これは、気候的な特徴のみならず、防災施設社会基盤（インフラ）の未整備などにも起因している。今後の気候変動による影響分も考えた場合、インフラだけから水害被害を軽減することには限界がある。日本政府も自然災害の激甚化に備え、氾濫を許容する洪水対策の検討をはじめめている。したがって、ハザードマップのように水害発生前に危険度の高い地域を住民に対して広報し、被害を軽減する適応策が重要な役割を持つ。

ハザードマップに記される水害危険地域の情報は、短期的には、避難開始タイミングや避難経路の検討など避難行動の見直しを中心に発災時の安全性向上に、また長期的には、水害リスクを考慮した施設配置や土地利用の見直しなど地域の防災性能の向上に活かされることが期待されている。しかし、現実には、特に後者の長期的な視点に立った水害リスク情報の利用が行われている例は数多く見られない。危険度情報に基づいて、土地利用の変更が議論される、あるいは、住宅の移転など地域の防災性能を向上させる計画が実施される事例は少ない。むしろ反対に、水害リスクが高い地域が新たに住宅地として開発されることさえあり、水害リスク・危険地域の情報が十分に社会で認知されているとは言えないことが多い。特にアジアモンスーンに位置する多くの都市は、社会経済発展に伴い、潟など、元来水害に脆弱な土地に、工業団地など重要度の高い、災害を許容できない地域社会が形成されている。

次の洪水災害に備え、抜本的な治水対策を練るにあたっては、洪水の実態をしっかりと把握し、洪水被害の原因を探ることが重要である。そこで本稿では、2011年タイ大洪水および2015年関東・東北豪雨を例に、インフラと社会の関係に焦点を当て、大水害はなぜ生じたのかについて報告し、次の大水害を防ぐための課題と対策を議論することを目的とする。

2. 2011年タイ大洪水

2.1.1 大水害はなぜ生じたのか？

2011年、タイ王国中央部を流れるチャオプラヤ川の歴史的な大洪水のため工業団地が次々と泥流に沈み、日系約450社を含む800余りの企業が浸水被害を受けた。2011年タイ国内における800人以上の自然災害死者数のうち大多数はこの洪水に伴う溺死者とされ、1000万人以上が影響を受け、2011年11月14日のピーク時には関東平野とほぼ同じ面積である2万km²近くの農地が被害を受けたとタイ国内務省は発表している。被害総額は世界銀行の推計で不動産等資産損害6,600億バーツと機会損失7,000億バーツの合計1兆3,600億バーツ（約3.5兆円）にも上った。



写真1 浸水の様子（パトゥンタニ，11月上旬に撮影） 左：残っている水痕がピーク時の氾濫水位がとても高かったことを示していた。中：主要道路が一面冠水し舟で移動しなければならなかった。右：自然災害一般にゴミの問題は避けて通れない。

図1にチャオプラヤ川流域図および2011年10月19日時点の浸水状況を示す。チャオプラヤ川の流域面積は約16万km²で関東平野の約10倍，日本の総面積の44%に匹敵する。河口に首都バンコクが位置しタイの中央平原を流れるチャオプラヤ川は，狭窄部であるナコンサワン市で上流域と下流域に二分される。上流域の総面積は約11万km²で，ピン川にはブミポルダム，ナン川にシリキットダムというそれぞれ国王，女王の名前を冠した大ダムが，1964年，1974年に利水と発電目的のために建設された。貯水容量はそれぞれ135億m³，95.1億m³と極めて大きく，それぞれ2.3年分，1.5年分の総流量を貯めることが可能な容量である。Tebakari et al. (2012)¹⁾によると，この2つの大ダム建設により下流の流況は最低流出量が増加し，また小・中規模の洪水を約40%減少させ，大規模洪水についても約35%を減少させている²⁾。下流域では，ナコンサワン市の下流96kmにチャオプラヤ大堰（1957年建設）が建設され，右岸から流下するサカエクラン川と合流したチャオプラヤ川の河川流量をコントロールしてチャオプラヤ川の左岸および右岸に灌漑用水を分水している。

タイ国の河川は全般的に緩流河川で，上述したチャオプラヤ川下流域とナン川とヨム川の下流域の河川勾配は特に緩やかである。例えばチャオプラヤ川下流域の標高は，チャオプラヤ大堰周辺は15m，アユタヤ市周辺は7m，バンコク都周辺は5mの低地であり，河川勾配は1/10,000～1/15,000と著しく緩やかである。図2にチャオプラヤ川の流下能力を示す。従来，河川は水が集まる下流の方で流下能力は大きくなるのだが，チャオプラヤ川は下流の流下能力に乏しい。そのため，上流から流下した洪水は下流で水位が上昇し流域内に洪水を拡散させる。また，本川に流下する多くの小支流も本川の背水位の上昇で洪水を本川に流下させることが出来ず，小支流の流域内に洪水を拡散させる。即ち，下流域では河川沿いに多くの氾濫水域が拡大され，自然の洪水災害軽減が行われている。この軽減がなかったら下流域は大きな洪水被害を受けることになる。

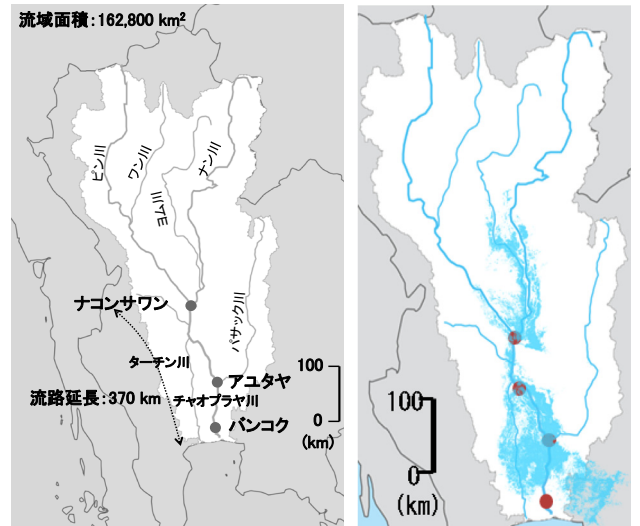


図1 チャオプラヤ川流域図（左図）および2011年10月18日時点の浸水状況（右図：青色は浸水域を示す。）

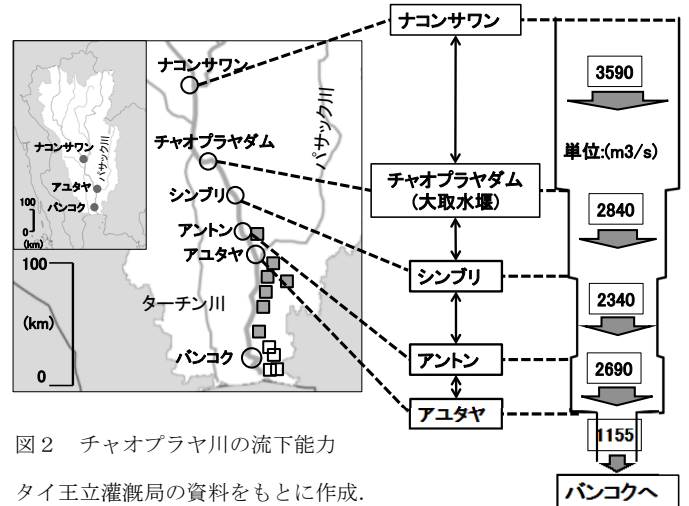


図2 チャオプラヤ川の流下能力

タイ王立灌漑局の資料をもとに作成。

地図上の四角は工場団地，色付きは被災した工場団地を示す。