

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。

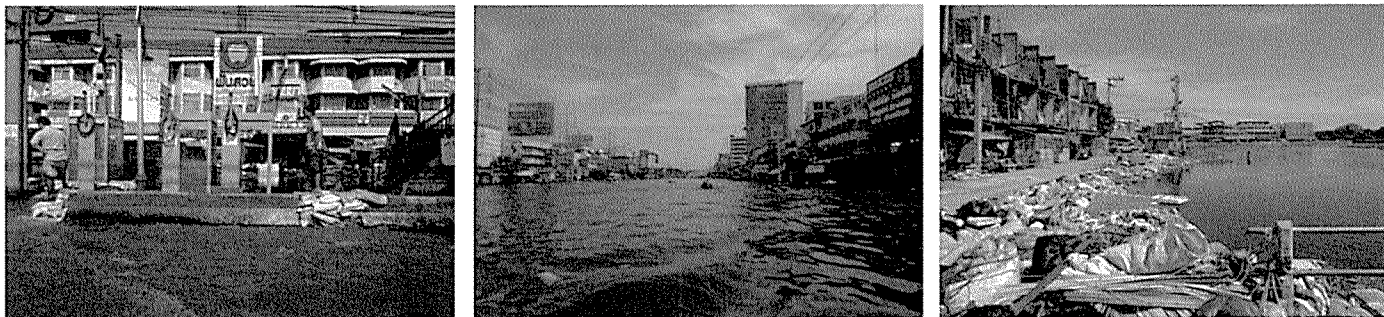


写真1 浸水の様子（パトゥンタニ，11月上旬に撮影） 左：残っている水痕がピーク時の氾濫水位がとて高かったことを示していた。中：主要道路が一面冠水し舟で移動しなければならなかった。右：自然災害一般にゴミの問題は避けて通れない。

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。

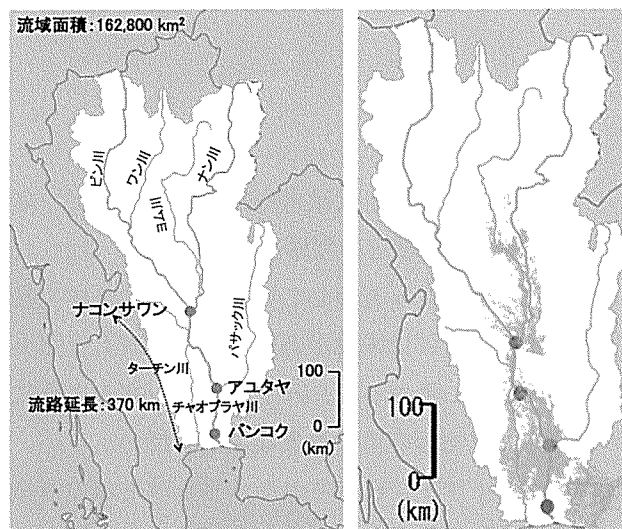


図1 チャオプラヤ川流域図（左図）および2011年10月18日時点の浸水状況（右図：青色は浸水域を示す。）

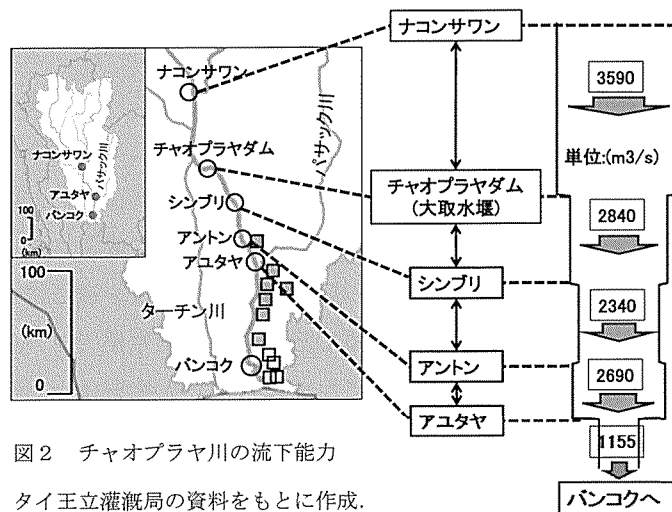


図2 チャオプラヤ川の流下能力

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。

このような河川の特徴を活かして、タイ国はこれまで、チャオプラヤ川上流域の洪水は貯水し、また下

流域の洪水はバンコク中心部や工業団地がない右岸側（図2）を中心に氾濫面積を拡大し、氾濫水位を低下させて洪水被害を軽減するという治水を行ってきた。チャオプラヤ川下流域の勾配は緩やかであることにより、氾濫した流れは緩く、膝下程度の浸水であれば実生活に影響はない。また氾濫面積を拡大することで氾濫水を効果的に蒸発させることもできる。1999年に出されたJICAの洪水調査報告³⁾によると、バンコク都でのチャオプラヤ川の流下能力は3年確率流量程度の能力しかない。バンコク都の安全が担保されているのはチャオプラヤ川下流域の氾濫を許容しているからである。

しかし、2011年のチャオプラヤ川大洪水では、流域開発に伴って潜在的に増大していた水害リスクが平年の1.4倍の雨季の総降水量（図3）によって顕在化した⁴⁾。これまでどおり計画的に右岸側を中心に氾濫面積を拡大し氾濫水位を低下させて洪水被害を軽減できればよかったのだが、2011年は1995年より50億 m^3 も多い洪水が下流域に流入し、水門の破壊や破堤（写真2）という想定しない形で左岸側に洪水が発生した（図4）。下流域左岸には9月下旬から50億 m^3 の洪水が浸水した^{5), 6)}。

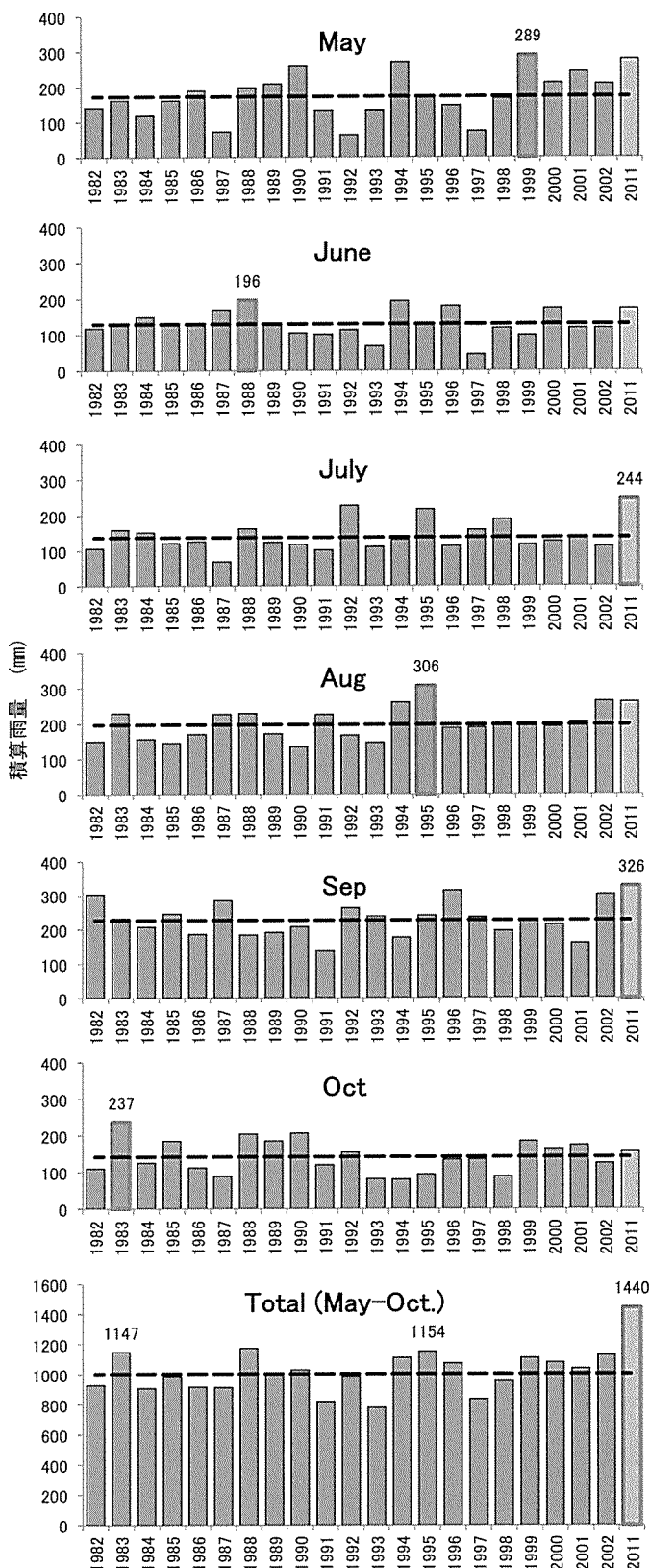


図3 1982年から2002年および2011年の雨期（5月～10月）における流域雨量の月雨量および総雨量。点線は対象期間平均、枠は対象期間における最高値を示す。15地点のタイ気象局観測所データよりティーセン分割を用いて算出した。

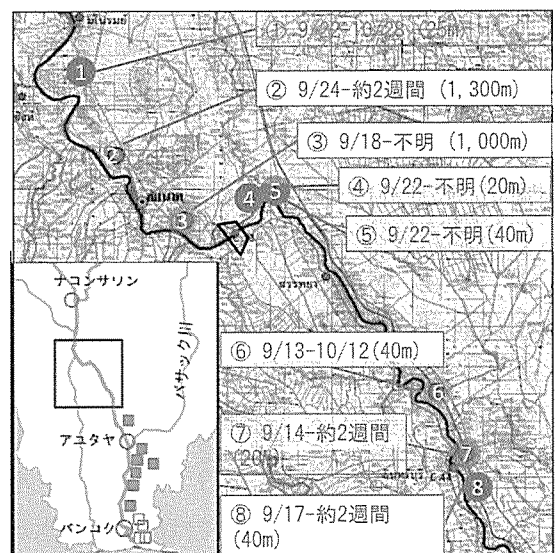


図4 チャオプラヤ川下流域左岸側の破堤箇所およびその期間。タイ王立灌漑局の資料をもとに作成。○内は破堤幅を示す。

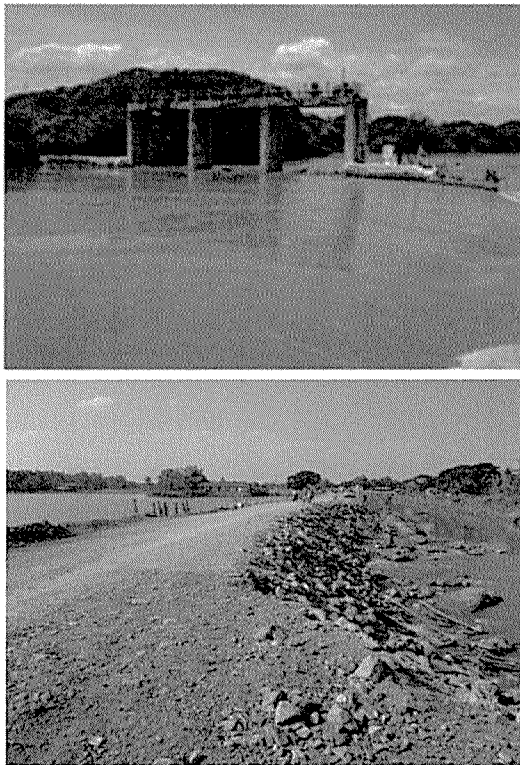


写真2 チャオプラヤ川下流域左岸側の破堤箇所
の写真（11月中旬に撮影） 左：破堤した8カ所の
うち2カ所が水門だった。右：写真の左側がチャオ
プラヤ川で右方向に破堤した。

北緯17度の山岳地域からアユタヤを經由し、
チャオプラヤ川に合流するパサック川（図1）
では、これら的大氾濫に対応するために左岸側
に1.8mの緊急土堤が建設された。結果として、
パサック川左岸は洪水被害を防ぐことができた
が、これらの洪水は全てアユタヤに押し戻され、
実際に自然堤防上に建設され元来水害に強いア
ユタヤ旧市街も浸水被害が発生した（図5）。そして、チャオプラヤ川本川の洪水と合流した洪水は、灌漑水
路を逆流する形でチャオプラヤ川左岸側に再び流入し⁴⁾、実際に多くの工業団地では10月から12月の二ヶ月
間も2m以上の浸水が続いた。

2.1.2 次の大水害を防ぐための課題と対策

図1右図より2011年の洪水に関して以下のことがみとれる。

- 1) チャオプラヤ川上流域ではヨム川で洪水が発生している
- 2) 上流域の洪水が狭窄部（ナコンサワン市）でせき止められている
- 3) チャオプラヤ川下流部では広域に洪水が発生している

1)に関しては、ヨム川にダムがないことが強く関係している。2)に関しては、上流域の洪水により狭窄部
周辺、すなわちヨム川およびナン川の下流域に大氾濫水域ができてしまい、さらにこの大氾濫水域は高い洪
水流量を下流域に供給することとなる。その結果、3)として、チャオプラヤ川水位の高水位により水門の破

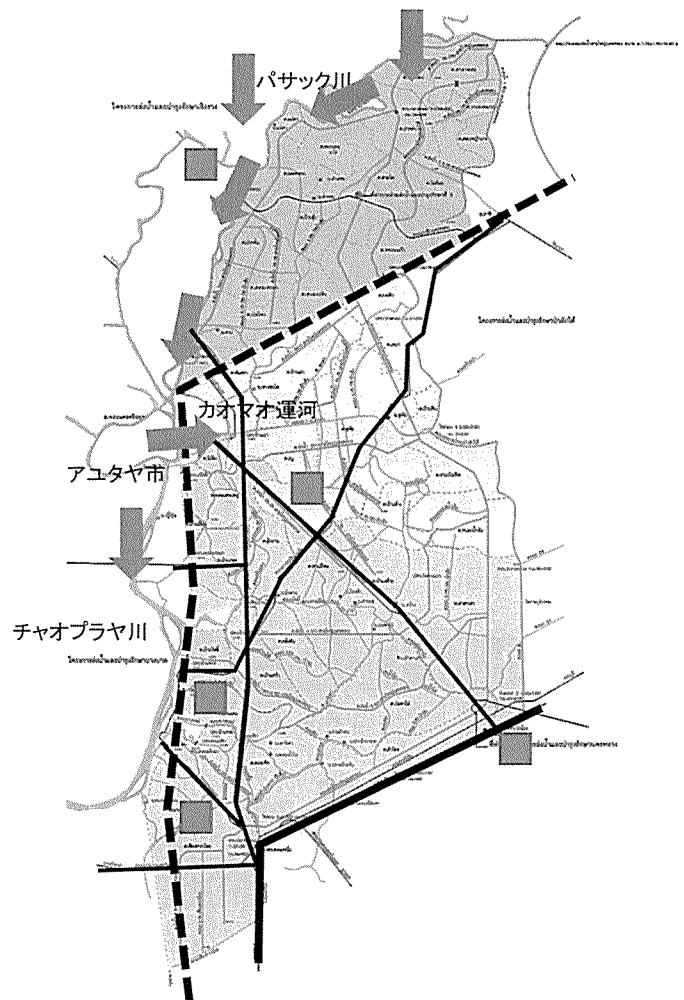


図5 パサック川左岸およびチャオプラヤ川左岸の運河網
図。太線は国道1号、細線はそれ以外の主要国道を示す。点
線は鉄道、四角は工業団地を示す。矢印は今回の氾濫水の流
れを示す。北からの洪水はパサック川などでアユタヤ市へ戻
されたが、アユタヤ市東端のカオマオ運河などで水門を越え
て逆流し、左岸側へ再度浸水した。

壊や破堤が生じ下流域へ広域な洪水が発生する。

これまでの情報より上流域の水収支を考えると、6月から10月における総雨量からダム貯水量、蒸発量およびナコンサワン市での総流量を差し引いた量は約470億 m^3 であり、仮にヨム川およびナン川下流域全体に氾濫したとすると、氾濫域の水位が1.4mになると推定される。チャオプラヤ川下流域への洪水流量を少なくするだけでなく、ヨム川下流域の治水のためのダムなどの治水容量増加が重要である。

下流域に関しては、ナコンサワン市からの洪水流量が下流域全体に氾濫したとすると、氾濫域の水位が0.29mになると推定される。これまでどおり計画的に右岸側を中心に氾濫面積を拡大し氾濫水位を低下させて洪水被害を軽減できればよかったのだが、2011年は1995年より50億 m^3 も多い洪水が下流域に流入し、水門の破壊や破堤という想定しない形で左岸側に洪水が発生した。下流域左岸には9月下旬から50億 m^3 の洪水（破堤地点の上流部分と下流部分のハイドログラフの差より推定）が浸水し、10月にパサック川からは約20億 m^3 （タイ王立灌漑局の資料より算出）の流入があったと推定される。図5にパサック川左岸からチャオプラヤ川左岸の地図を示す。チャオプラヤ川には鉄道と国道1号および主要国道が二線堤の形で本川堤防の役割を果たしている。多くの工業地帯はこの鉄道と国道の間に建設されている。一方、左岸に洪水が浸水してしまった場合、これら鉄道や国道が洪水を塞ぎ止めてしまうため、効果的に東側へ氾濫面積を拡大できない。さらに、塞ぎ止められた洪水は、国道と鉄道の間に集中的に流れてしまう危険性がある。そのため、左岸側への洪水は防ぐことは必須であり、左岸側に大洪水が発生した場合は国道1号を破堤するなどして速やかに氾濫面積を東側へ広げる対応が必要である。

バンコク都周辺に関しては、タイ王立灌漑局およびバンコク都庁によりチャオプラヤ川へ排水する排水機場群が左岸に約710 m^3/s 、右岸に約220 m^3/s 設けられている。一方、チャオプラヤ川以外への排水はバンコク都の東側で約100 m^3/s 、西側で約150 m^3/s 分の排水機場しか設けられていない。本洪水では10/14から10/31の約3週間はチャオプラヤ川水位がパラペット高さを超えており、チャオプラヤ川への排水は困難であった。都周辺では広い遊水池も用意できないため洪水には排水で対応するしかない。一方、洪水時は本川水位が高くなるのは必至であるため本川に頼らない洪水排水処理を検討する必要がある。

2.2 流域社会と灌漑システムの変遷に関する予備的考察

本節では、森田・小森ら（2013）の調査⁸⁾に基づき、2011年大洪水を取り巻く社会的、技術的、経済的な諸問題の絡み合いを明らかにするために、チャオプラヤ川下流域の水管理体制の変遷を、水路、灌漑網の変容およびそれと並行して生じた社会変化に注目して明らかにする。

2.2.1 チャオプラヤ川下流域の環境区分

18世紀後半から19世紀にかけての東南アジア大陸部の経済発展は、チャオプラヤ、メコン、サルウィンなどの大河川の下流部に形成された三角形の低平地—デルタの開拓を中心にして進行してきた。東南アジア大陸部の伝統的な諸国家は、山間盆地での灌漑稲作を基盤とする小国家（ランナータイ、ランサーン、シャン諸侯国などのタイ系諸国）、中国、日本などとの交易に基盤を持つ沿岸部の港市国家（アユタヤ、チャンパ、マラッカ）に大別される。これらの国家にとって、デルタのような極めて広大な低平地と雨季と乾季にはっきりと分かれた降雨パターンを持つモンスーン気候は、雨季にはデルタの大部分は大量に滞留した水によってほぼ完全に冠水し、一方、高温で降雨がほとんどない乾季には、水を溜めるくぼ地がない平坦なデルタの水はほぼ完全に干上がってしまったため、居住と農業開発に適さない地域と見なされていた⁷⁾。だが、18世紀末になると、清朝の成立前後に生じ、その後も継続した東南アジアへの中国移民の増加と、タイとベトナムの強大化にともなって、これまで空白地帯とされて来たデルタの開発が進行する^{9), 10), 11)}。

2.2.2 灌漑システムの形成およびその特徴

1899年、タイ政府は民間開発の行き詰まりを受けて、王立灌漑局を設立し政府直轄による開発事業に乗り出した⁷⁾。今にいたるまでの灌漑局によるデルタ開発が、それ以前の時代と明確に異なる点は、チャイナートから海岸へといったデルタ全体をひとつの水文システムとして捉えたという点である。前近代期と民間開発時代のデルタはあくまでも古デルタおよびバンコクなどの河川、および海岸沿いの諸都市の外部に広がる荒地、フロンティアと見なされていた。運河の掘削は、この荒蕪地を居住可能にするものだったが、相互の運河の連結や広域での水循環について関心が払われることはなかった。この時期の開発はあくまでも広大な荒れ地を運河にそってアドホックに開拓するという以上のものではなかった。

これに対して、灌漑局の設立に際して初代局長として招聘されたオランダ人技術者、ファン＝デル＝ハイデ (van der Heide) は、デルタ各地の詳細な調査を行い、1902年に現在にまで脈々と影響を与え続ける灌漑マスタープランを提案する¹²⁾。このマスタープランは、現在のチャオプラヤ川下流域全域にわたる灌漑計画の原型となるものであり、初めてデルタ全体をひとつの水文システムと捉えた画期的なものであった。

当時の米作の不安定な状況が水不足に起因すると考えたハイデは、このプランにおいて耕地への導水、雨水などが運河を経て下流へ流出するのを防ぐための水門建設を提案した。彼は、デルタの頂点に位置するチャイナートに巨大な堰を建設し、本流の水位をせき上げることで水を支流であるノイ川、スパンブリ川、さらに新たに建設する運河をとおしてロップリ川に導くことを計画した。これによって三つの河川は用水路化され、その水は古デルタの灌漑に部分的に利用されたのち新デルタに運ばれ、新たに建設された幹線運河をへて新デルタの広範囲を重力灌漑することになる⁷⁾。

ハイデのプランは、デルタ全体をひとつの灌漑システムに統合する極めて野心的なものであった。だが、その核となるチャイナート堰の建設コストはあまりにも高く、当時のタイ政府は財政の現状では実行が不可能であるとして、この案を最終的に却下してしまう。最終的に彼のプランに沿ってチャイナートに堰が建設されるのは、世界銀行の融資を受けた1950年代後半のことであった。

ハイデのマスタープランは、結果として却下されたものの、その構想はその後のタイの灌漑計画に根強い影響を与え続けた。タイを去ったハイデの後任となったイギリス人のワード (Ward) は、ハイデの計画からチャイナート堰を取り除きたいわば縮小版とも言えるマスタープランを作成し、より現実的な計画の元で農業ダムと水門の整備を進めた。この中心になったのは、1924年に建設されたタイで初めてのダムであるラマ6世ダムである。このプロジェクトは、パサック川の水をせき止め、新設のラビパット運河によってランシットの運河網に流し込むという比較的単純なものだった。だが、これによって、それまではランシット地区に溜まった雨水を排水するだけの機能しかなかったランシット運河網は水源と接続され、地区全体を潤す灌漑網へと変貌を遂げた。さらにワードは、デルタ全体を七つの灌漑区に区分し、それぞれの区画ごとに灌漑整備を進めた。この区分けは、現在に至るまで脈々と続く灌漑局の下位区分の原型となっており、水管理の基本構造がこのときに出来上がったと考えることが出来る⁷⁾。

ハイデとワードによる灌漑事業は、デルタをまったく新しい空間として政策的、工学的に再構成する端緒となったという点で極めて重要である。第一に、ハイデのマスタープランによって初めて、チャオプラヤ・デルタを水の流れによって連結されたひとつの水文システムとして想像することが可能になった。当時、バンコクから掘り進められたランシット運河が、その北側にあるいかなる河川とも接続されていなかったことから分かるように、それ以前のデルタの運河網はあくまでもバンコクから放射状に伸びる交通網として捉えられていたのである。ハイデは、デルタの地形の上に堰と数本の新設運河を設けることによって、既存の交通運河を、北から南へ流れる水をくまなく配水する灌漑ネットワークとして作り変えることを構想したのである。ワードによるラマ6世ダムとラビパット運河の建設は、デルタ全体にわたるこの大変貌をチャオプ

ラヤ川東岸で部分的に実現するものだった。

その後の灌漑開発は、徐々にではあるが、デルタ全体をひとつの配水システムとして確立することを目指して着実に進んでいった。この巨大なシステムは、1957年のチャイナートのチャオプラヤ大堰の完成によって成立する。さらに、1960年代以降、相次いで上流部に完成したプミボン、シリキット両ダムは、チャオプラヤ川の流量を安定化することによって、このシステムをより堅固なものにしたといえよう。

2.2.3 1990年代以降の変化

1990年代に入ると灌漑システムは、さらなる内的な変化と外的な課題に直面することになる。灌漑網の完成以降の農業開発は、乾季作の導入と同時に、高収量種の作付面積拡大の方向へと進んでいく。とくに後者は、雨季における水管理とくに排水に大きな変化をもたらすようになっていった。第一に生じたのは、灌漑区の中での水の均平化であった。ここで重要な役割を果たしたのは、Francois Molleら¹³⁾がいうdrainage boxesである。ここではこれを借りに排水区画と呼ぶ。これは互いに堤防や灌漑水路で区切られ、ひとつのレギュレーターによって河川ないし幹線排水路につながりたいわば極小流域である。乾季から雨季の始めにかけて水門を締め切って水を溜め、雨季の後半には洪水を避けるために適宜水門を開けて川ないし幹線水路に排水するこの排水区画は、デルタにおける基本的な水管理ユニットとなっている。1990年代後半の調査によって、Molleらは、デルタに合計18の主要な排水区画が存在し、それらが120の小区画にさらに分かれていることを明らかにした¹³⁾。

緑の革命を受けた政府の農業開発政策が高収量種の導入を協力に後押ししただけでなく、在来種と高収量種の収量と値段の格差は、農民たちに高収量種の採用に向かう強いインセンティブを与えてきた。その結果、多くの排水区画では、排水区画内に新たなレギュレーターが建設され、より細かなレベルで水位が均等に保つことで、高収量種の拡大が促された¹³⁾。

さらに特筆すべきことに、こうした高収量種に合わせた排水方法の変化が、農民からの要請によって引き起こされた。チャオプラヤ川の灌漑システムは、そのすべてが灌漑局によって一元的、中央集権的に管理されており、長年住民側の運営への参加はほとんど見られず、政策的に導入された水利組合や住民参加枠組みもほとんど機能してこなかった¹⁴⁾。だが、1990年代の半ばにある灌漑区において、村長たちが合同して灌漑局に対して、高収量種に適した新たなオペレーションを提案するという出来事が起こる。村長たちが要求したのは、在来種を前提として低地に水を溜める水管理を改め、低地においても低水位にあわせた排水を行うというものであった¹⁵⁾。

排水区画内へのレギュレーターの新設と低水位に合わせた排水方針の導入は、従来は排水区内の高地と低地で著しい差が見られた水位を次第に均等化してきた。このことは同時に、従来は排水区画内の低地に溜められていた水が河川や幹線排水路に排水されることを意味していた。排水は基本的に、水が過剰にある雨季に行われるため、古デルタ全体での排水強化は下流の洪水激化に影響を与える可能性があるものだったといえよう。

2.2.4 まとめ

チャオプラヤ川流域の変化を、水路、灌漑網の変容およびそれと並行して生じた社会変化に注目して概観した。フィールド調査での知見をもとにしながら先行研究を整理した結果、明らかになったのは、フロンティア空間だったデルタが、次第にひとつの技術＝社会的システムへと発展していくという過程だった。Molleは、2000年代初頭の乾季における水不足が引き起こした技術的・社会的反応を検討する中で、流域全体がひとつの「水文システム (hydrosystem)」－「経済 (および他の) 活動が、自然の水文循環および人口の水路

網と結びついている社会」ーを形成していると述べている¹⁶⁾。本稿で明らかにして来た通り、その契機は水源と結びつかない交通・排水用運河をチャオプラヤ川と結合するという20世紀初頭のハイデの灌漑マスタープランであった。

とくに、水文システムとしてデルタ内の諸地域が密接に結合されることは、住民の空間認識を大きく変化させたと考えられる。2011年の洪水の際には、バンコク防衛のために地方が犠牲にされるという理解がさまざまな場で表明され、洪水がいわば巨大な政治問題化するという現象が見られた。この背後には、かつてはそれぞれ異なる水文環境を持ち、互いに比較されることもなかったデルタ内の諸地域が、灌漑オペレーションの変化をとおして次第に均質化されてきたことがあると思われる。加えて、戦後の経済開発の中で、住民たちが地域（もしくは県）の間の格差を、インフラ開発や災害防御といったさまざまな基準にそって次第に細かく比較するようになって来たこともこうした意識の背後にある可能性がある¹⁷⁾。2011年大洪水を取り巻く社会的、技術的、経済的な諸問題の絡み合いを明らかにするためには、水文システムとこうした政治的、社会的領域との複雑な関係をさらに解き明かしていく必要があるだろう。

3. 平成27年9月関東・東北豪雨

平成27年9月9日から11日に発生した関東・東北豪雨は、関東地方北部から東北地方南部にかけて大きな被害をもたらした。特に線状降水帯の発生により観測史上最多雨量を記録した箇所も見られ、鬼怒川、渋井川の破堤、各地の地滑りをはじめとして多くの深刻な豪雨災害が発生した。本稿では、土木学会水工学委員会水害対策小委員会の東北グループの調査¹⁸⁾に基づき、大水害は発生事由を報告し、次の大水害を防ぐための課題と対策を議論する。

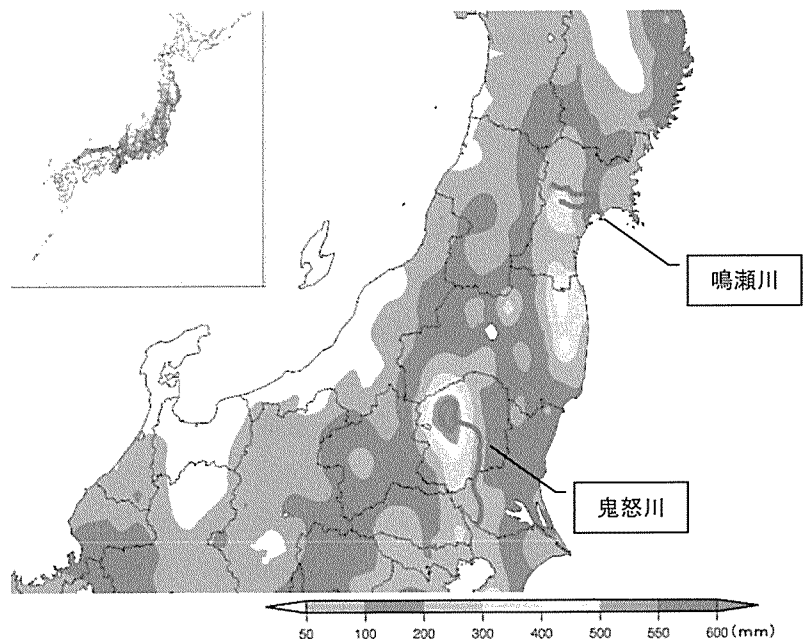


図6 2015年9月7日から11日にかけての累積雨量（気象庁¹¹⁰⁾の資料に一部加筆）

3.1 鳴瀬川水系多田川支川

3.1.1 被害の概要

平成27年9月関東・東北豪雨では鳴瀬川本川で大きな被害は生じていないが、鳴瀬川水系多田川支川の渋井川の3箇所です堤防決壊が生じ、大きな洪水氾濫被害が生じた。渋井川の決壊に伴い約2,100haの浸水が発生し床上浸水399棟、床下浸水150棟の被害が生じ、176人がヘリコプターやボートで救助された²⁰⁾。また、渋井川以外にも鳴瀬川水系では渋川、名蓋川等で堤防決壊が生じている。

3.1.2 雨量・水位の状況

9月10日から11日にかけて、台風17号周辺から湿った空気が東北地方太平洋側に流入し、複数の線状降水帯が宮城県周辺に大雨をもたらした²¹⁾。図6に9月7日から11日にかけての累積雨量分布¹⁹⁾を示す。利根川水系鬼怒川周辺のみならず福島県から宮城県にかけても線状降水帯が形成されていた。鳴瀬川水系では200から400mm程度の累積雨量となっている。図7に鳴瀬川水系河川および周辺水位・雨量観測所の位置を示す。

本出水イベントの雨量と過去の雨量を比較するため、古川および大衡地点で観測された雨量のDepth-Duration解析図を図8に示す。本出水と既往最大72時間イベントを比較している。既往最大72時間降雨

イベントとして、2011年9月の台風15号に伴う豪雨が観測されている。図8より本出水イベントの特徴として1～6時間程度の短時間に強降雨が観測されていることがわかる。これは線状降水帯が東北地方では4時間程度継続した²⁰⁾ためであり、これにより大衡、古川地点以外でも鶯沢で観測史上最大の3時間雨量を記録している。

9月10日から11日の鳴瀬川三本木地点における10分間雨量・水位の時系列を図9に示す。後述するように洪水氾濫が生じた渋井川の水位は、背水効果により本観測地点周辺水位の影響を受ける。10日の23:00程度から11日の4:00程度まで強い雨が観測され、鳴瀬川三



図7 鳴瀬川水系河川および水位・雨量観測所の位置

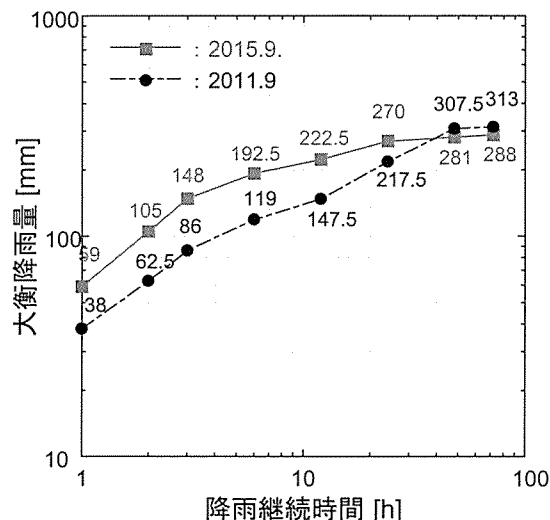
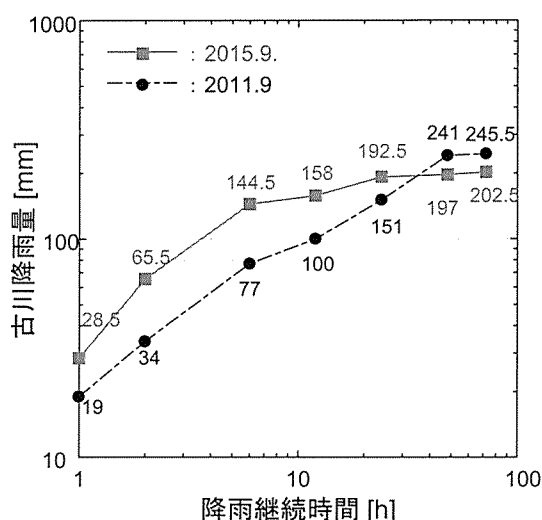


図8 古川、大衡における雨量のDepth-Duration解析結果

本木地点では11日の2:20に氾濫危険水位を超過している。水位のピーク時刻は3:40となっている。渋井川での住民からの聞き込み調査から、洪水氾濫は3:00から4:00頃に発生していたとの証言を得ている。3:20に気象庁より宮城県全域を対象とする大雨特別警報が発令され、大崎市は2:30に避難準備情報（三本木全地域）、4:30に避難準備情報（古川全地域、松山全地域、鹿島台地域、田尻地域）が発令されている。大崎市は5:00過ぎから渋井川堤防決壊の情報を得始めるが、その時には西新井地区が浸水しほぼ孤立状態であり避難所へ向

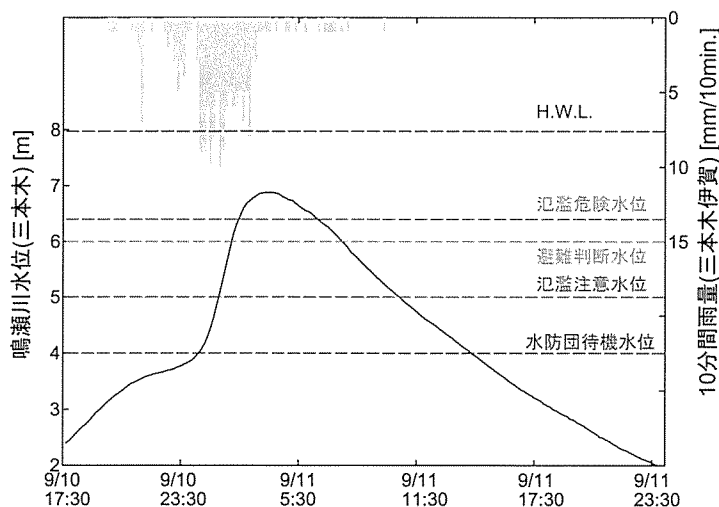


図9 鳴瀬川三本木地点における10分間水位・雨量の時系列

かうことが非常に危険と判断し、避難勧告・指示の発令は行っていない。8:15に宮城県が自衛隊に対して大崎市への災害派遣要請を行う。このような状況下で浸水地域にいた176人の方がヘリやボートで救助された。

3.1.3 渋井川の堤防決壊要因

現地調査より明らかとなった本豪雨イベントでの渋井川堤防決壊状況を記述する。渋井川は流路延長約7.88km(宮城県知事管理区間²²⁾)、流域面積約18.6km²の県管理河川である。写真3に堤防決壊地点(下流からA, B, C地点)および渋井川、多田川の位置を示す。現地調査より、各位置での決壊幅は、約40m, 約15m, 約17mであった。

図10に渋井川および多田川の河川堤防天端高および最深河床標高を示す。本天端高は、現地RTK測量より測定したものであり、堤防決壊部は応急復旧がなされた場所で計測した。また、最深河床標高は宮城県河川課より提供頂いた。図10に示すよう多田川の堤防が渋井川より高いとともに、渋井川が多田川合流地点から決壊地点上流まで河床勾配が非常に緩やかなことがわかる。渋井川は多田川の支川であり、多田川の水位上昇に伴い渋井川の洪水流が多田川合流部への流入が困難となる背水(バックウォーター)効果により多田川の水位が下流側から上昇したものと推測される。堤防決壊後は、渋井川の水位低下に伴い多田川洪水の渋井川への逆流が生じ、浸水拡大に寄与したものと推測される。この多田川からの逆流により堤防決壊後も渋井川の水位は高い状態を維持し、第2、第3の決壊が生じたものと推測される。住民からも多田川から渋井川への逆流が報告されるとともに、洪水低減時に河川表面流れの逆流が確認されている²³⁾。

以下では、代表的な事例として決壊地点Bの状況を記述する。渋井川の決壊地点Bは多田川との合流部より約0.6 km上流に位置する。写真4に地点B周辺の決壊前(①)と決壊後(②)の空撮画像および決壊状況を示す。決壊幅は約15mである(③)。調査より洪水流の堤防越流痕跡は確認されなかった。堤防天端に舗装はされていない(④)。水路はゆるやかに決壊部に向かって湾曲しており(①, ④)、地点Bへの流れの集中や2次流による侵食等が生じた可能性は排除できない。しかしながら、背水効果に伴い水位が上昇し流速が抑制される状況では洪水流速も小さい事が推測され、侵食破壊がB地点で生じた可能性は低いと考える。現地調査でも堤防侵食の痕跡は確認されなかった。



写真3 渋井川、多田川および決壊箇所の位置

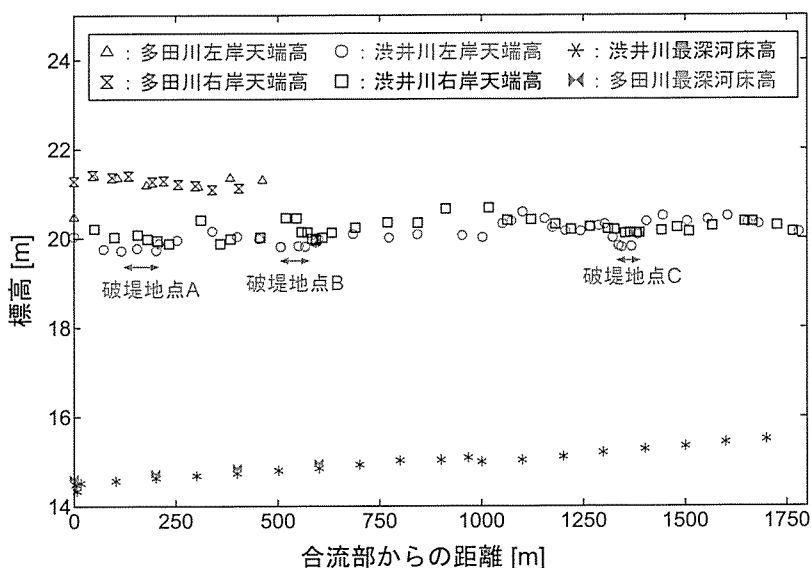


図10 渋井川、多田川合流部上流の堤防天端高

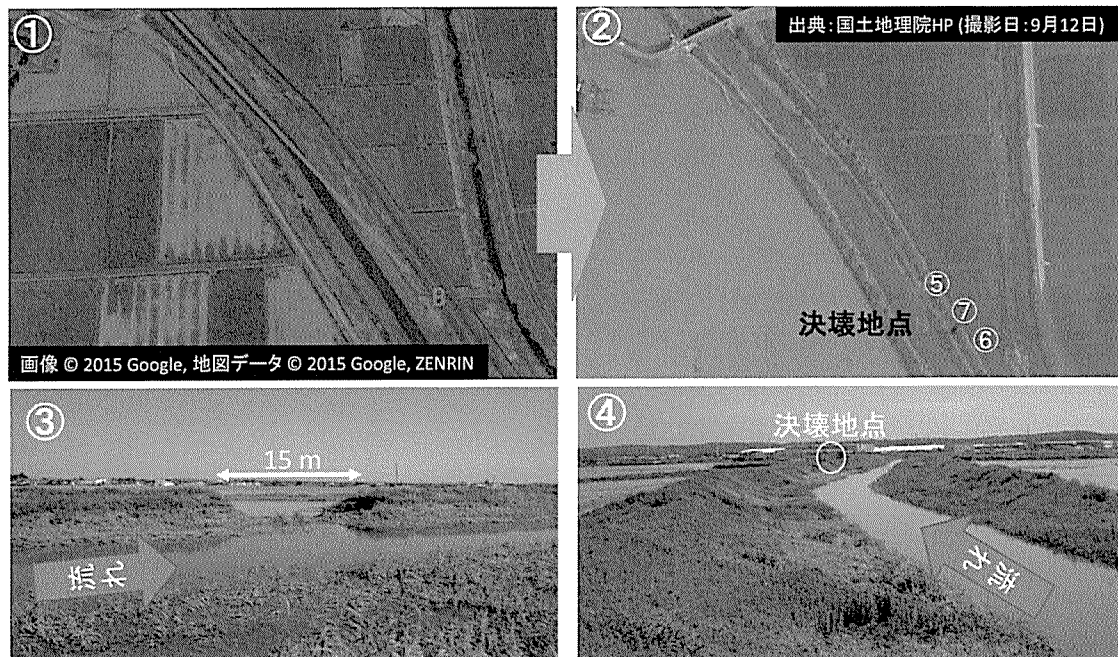


写真4 決壊地点Bの状況(Google Earthおよび国土地理院画像²⁴⁾に加筆)



写真5 決壊地点B堤内側の状況

決壊部堤内側の状況を写真5に示す。決壊部裏のり面には多くの崩落・すべり箇所（⑤、⑥）が存在し浸透流が発生した痕跡が確認される。⑦は決壊地点の堤内側である。氾濫流による用水路金網フェンスの変形や植生の倒伏、落堀の形成が堤内側で確認される。稲は中央からやや下流側に広がるように倒伏している。フェンスの倒伏は洪水氾濫流の流体力による基礎部の破壊ではなく、支持杭周辺土壌の洗掘に伴うものである。このような堤内地の状況から、決壊時に堤内側に大きな浸水（湛水）は生じていなかったものと推測される。上記の決壊状況や直線水路、越流が確認されていない点等から、堤防決壊は浸透破壊に伴い生じた可能性が極めて高い。実際にA点、B点付近の堤防裏のり面に多くの崩落・すべり箇所等が存在し、浸透流が生

じていた痕跡が確認された。つまり背水効果に伴い水位が上昇した状況が継続し、多数の箇所では堤防への浸透が生じたものと結論できる。また、今回の洪水で堤防決壊は左岸のみで発生したが、渋井川の右岸でも多くの漏水や浸透が生じていた。状況によっては、左岸のみならず右岸も決壊に至っていた可能性がある。その他の決壊地点の詳細に関しては呉ら²⁵⁾の報告を参照されたい。

3.1.4 渋井川を対象とした数値計算

上記したように渋井川の堤防決壊は、多田川との合流部の背水効果により渋井川の水位上昇が継続したためと考えられる。このような背水効果の検証や洪水氾濫状況を検証するため、渋井川および周辺流域を対象とした数値計算を実施した。

降雨流出モデルは、呉ら²⁶⁾の土壌・地形特性に基づく降雨流出計算手法を用いた。河道部における洪水波の追跡には1次元不定流計算を行っている。本計算手法の詳細は呉ら²⁶⁾に詳しいのでこちらを参照されたい。河道部の洪水計算で必要となる河川横断面形状は、国土交通省東北地方整備局および宮城県河川課に提供頂いた。入力降雨は気象庁の再解析雨量を用いている。

モデルを本出水に適用した結果を図11に示す。計算結果より西荒井観測地点におけるピーク流量は $30 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度であり、ピーク水位時刻は9/11 5:30に計算されている。水位は堤防天端高より2 m程度低いことがわかる。本モデルを用い基礎的な数値実験を行うことで、多田川合流部からの背水効果については鳴瀬川の水位上昇が渋井川の水位に影響していることが示されている

25)。本計算の詳細に関しては呉ら²⁵⁾の報告を参照されたい。

次に洪水氾濫計算結果を実施した結果を報告する。河川からの氾濫流は2次元不定流の式を用い計算した。地形標高データは国土地理院の5mメッシュデータを使用している。最大浸水深、最大流速(x方向)、最大流体力(x方向)を図12に示す。図12より国道4号を境に浸水深の低下が見られる。

また、平坦な地形に伴い

流速・流体力が伴に小さいことが確認される。このような流速・流体力の低さが利根川水系鬼怒川で発生した洪水氾濫との最大の相違点あろう。本計算結果の詳細は呉ら²⁷⁾の文献を参照されたい。

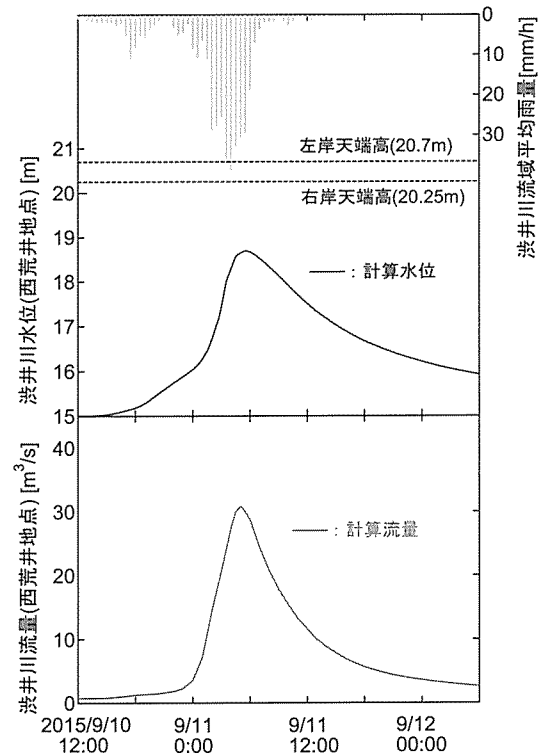


図11 2015年9月出水時の渋井川西新井地点における計算水位・流量

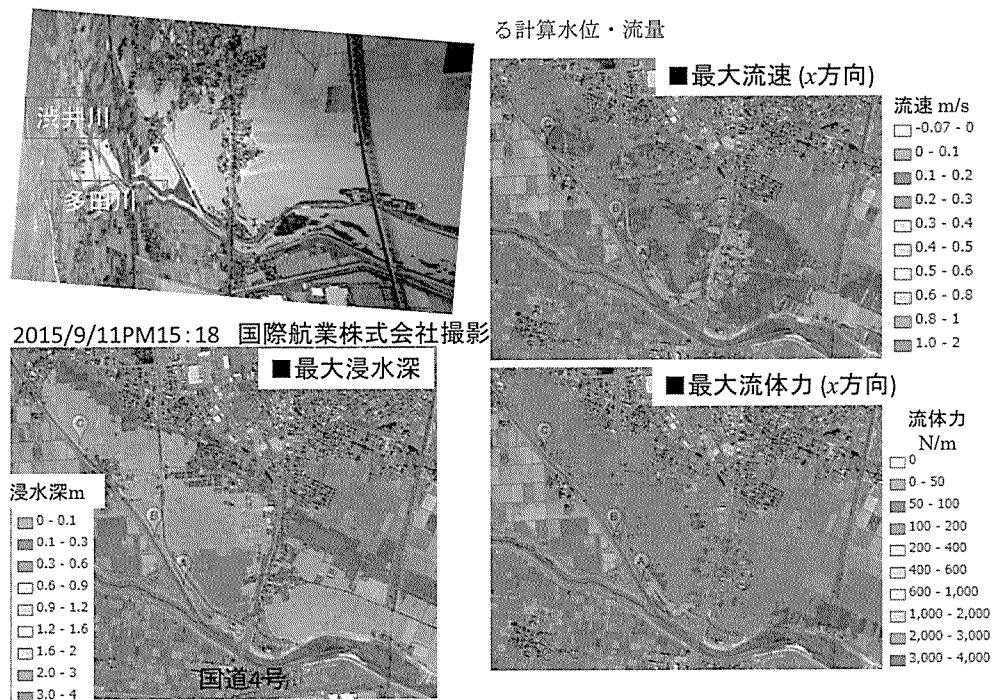


図12 洪水氾濫計算より得られた最大浸水深・流速・流体力の空間分布

3.1.5 まとめ

平成27年関東・東北豪雨に伴い鳴瀬川本川での大きな被害は生じなかったが、多田川支川の渋井川、渋川、名蓋川等で堤防決壊が生じた。本出水の降雨の特徴は短時間（3時間から4時間程度）に線状降水帯形成に伴う強降雨が発生したことである。この線状降水帯に伴う強降雨が更に1, 2時間継続していたら甚大な被害が生じていた可能性がある。

堤防決壊の要因は、渋井川と名蓋川の決壊状況が酷似している。多田川合流部の背水効果により合流部付近で水位上昇が継続し、堤防の漏水・浸透を伴い堤防決壊している。渋川の3箇所の決壊は、1) 合流部背水効果による水位上昇に伴う浸透決壊、2) 取水堰・樋管部での侵食破壊と、3) 越流の集中による越流破壊が原因と推測される。

このような合流部付近や取水堰・樋管部等での洪水被害は近年多く報告^{28), 29)}されているものであり、本川での被害は少なく支川での被害が近年顕著である。特に県管理の中小河川や支川等での被害、河川合流部等の脆弱部での被害や、夜間から早朝にかけての避難の困難さなど、共通かつ難しい課題が挙げられる。渋井川では176人の方が浸水域に孤立しヘリやボートで救助された。

県管理の河川は国内に無数に存在し、その全てに強固な堤防の整備やリアルタイム水位計を設置し水位を常時モニタリングする等の対応は、予算・人員不足の観点から難しい。今後このような洪水災害は、日本全国のどの河川でも起こりえることを肝に銘じ、自助・共助・公助を有機的に結合し今後の豪雨災害に備える必要がある。

今後必要な対策として、ハザードマップの精緻化や最悪シナリオを想定した可能最大洪水・流体力までを評価することで、事前に水平避難が必要な家屋と垂直避難で十分な家屋を分けて周知する必要がある。このような対応により特に危険な地域に存在する家屋には早め早めの避難の重要性を認識してもらう事が重要となる。更に中小河川までをも含んだリアルタイムでの洪水予測モデルの実装・運用を逐次進める必要がある。レーダ雨量情報の高精度化に伴いリアルタイムや短時間先の降雨状況を加味したシステムの実装が必要である。このようなシステムと時々刻々と得られる水位・雨量情報を加味することで避難勧告・指示のスムーズな発令が期待される。

3.2 鳴瀬川水系吉田川流域

3.2.1 被害の概要

平成27年9月10日から11日にかけて、台風17号、18号の豪雨により鳴瀬川水系吉田川、竹林川、善川からの溢水に伴う洪水氾濫が大和町中心部で生じ、住宅の床上・床下浸水や農地の冠水などの大きな被害をもたらした。

3.2.2 流域の概要

図13に吉田川水系流域、およびダム貯水池の位置関係、雨量・水位観測所を示す。図に示されるように、竹林川および善川は吉田川の支川であり、吉田川は河口で鳴瀬川に合流する。吉田川の流路延長は53km、流域面積約350km²の1級河川であり、国管理河川と県管理河川の境を図中に黒矢印で示す。上流には、利水・治水・発電目的のために南川ダム（貯水容量10百万m³、1987年建設）が、利水・治水目的のために宮床ダム（貯水容量5百万m³、1998年建設）が建設された。

3.2.3 水害の歴史

鳴瀬川流域では、古くから災害の記録が残されており、天保6年（1835）の大洪水について「耕土は泥海と化し、収穫は皆無・・・」との記述がある（図14）。明治以降では明治43年、大正2年の大洪水、また昭和22年9月（カスリン台風）、昭和23年9月（アイオン台風）、昭和61年8月の洪水等、記録的な水害に見舞われてい

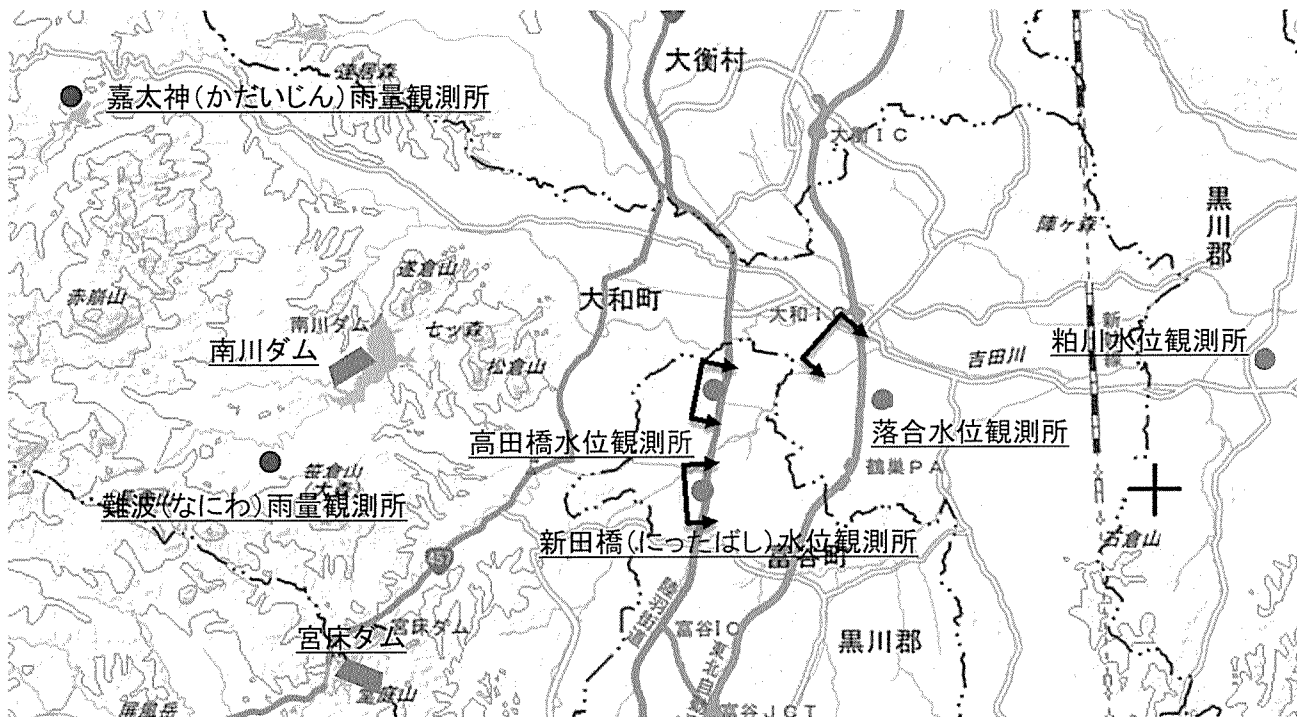


図13 吉田川水系のダム貯水池および水位観測所位置（地図は国土地理院より引用）

る。昭和61年8月の大洪水では、旧鹿島台町（大崎市）が12日間冠水する等の大災害となった。平成以降も、平成14年7月、平成23年9月洪水等、床上浸水を伴う大水害に度々見舞われている現状にある。平成14年7月の集中豪雨では、善川・竹林川・西川（いずれも指定区間）において、浸水面積56ha、浸水戸数17戸の被害が発生した。吉田川では、過去の度重なる洪水被害の度に堤防の補修等が行われてきたが、古い堤防は履歴や材料構成が必ずしも明確ではなく、構造は不確実性を有している。

そこで、一般資産水害統計調査の一環として、水害発生の都度、市区町村によって作成される水害区域図³¹⁾を用いて、過去に氾濫が頻発している区域を抽出した。図15aに鳴瀬川下流部および吉田川本川の1992年から

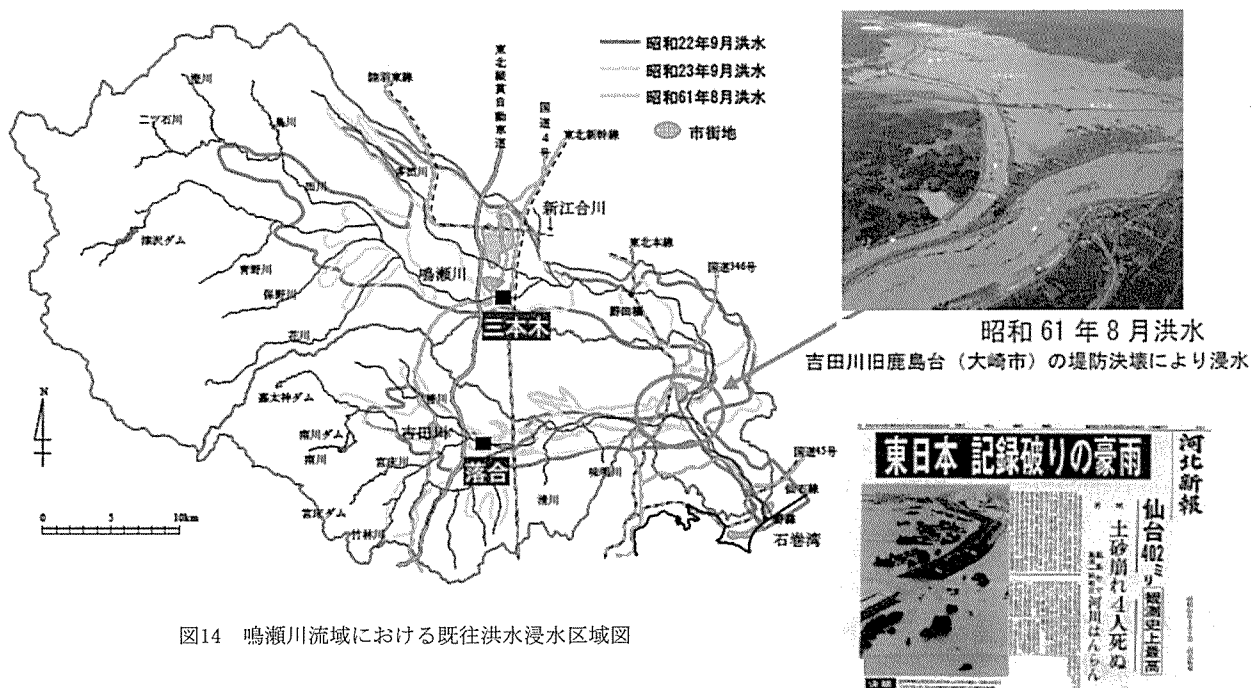


図14 鳴瀬川流域における既往洪水浸水区域図

【出典：鳴瀬川水系河川整備計画 [大臣管理区間]，東北地方整備局】³⁰⁾

昭和61年8月洪水に関する新聞記事

2015年8月までの23年間ににおける外水氾濫および内水氾濫の発生区域およびその頻度を示す。上述した旧鹿島台町にて外水氾濫は2回記録し、大槌町近辺では内水氾濫が多発していたことが示された。また、今次災害でも外水氾濫が生じた身洗川にて外水氾濫および内水氾濫が、西川にて内水氾濫が複数回発生していたことが明らかとなった。図15bに吉田川上流部の1992年から2015年8月までの23年間ににおける外水氾濫および内水氾濫の発生区域およびその頻度を示す。過去に善川で外水氾濫と、複数回数の内水氾濫が発生していたことが示された。今次災害でも同じ区域で外水氾濫が発生した。なお、全ての水害が水害区域図として記録されていないケースもみられるため、抽出された区域以外にも水害区域が存在する可能性があることに注意が必要である³²⁾。

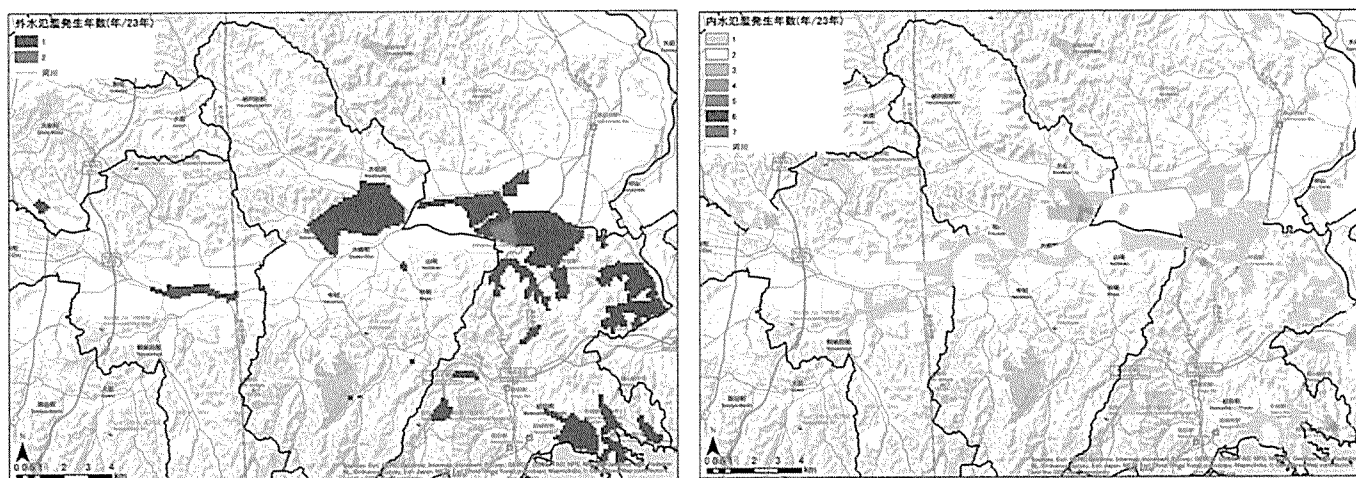


図15a 鳴瀬川下流部および吉田川本川の過去23年間ににおける外水氾濫（左）・内水氾濫実績（右）

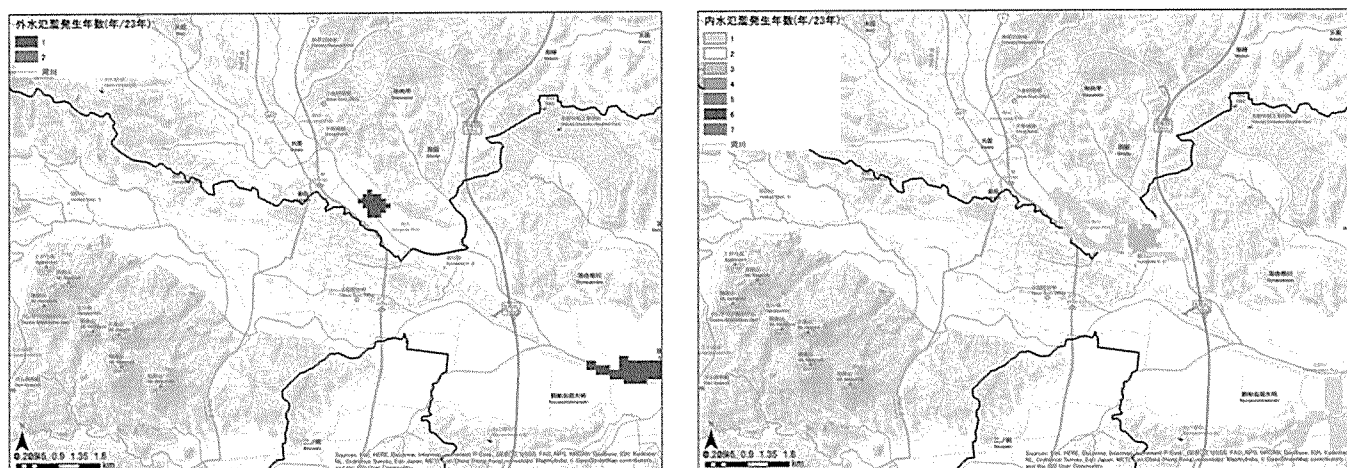


図15b 吉田川上流部の過去23年間ににおける過去23年間ににおける外水氾濫（左）・内水氾濫実績（右）

3.2.4 治水の歴史

吉田川では大水害の歴史とともに、元禄時代から治水事業が行われている。吉田川の下流に位置し氾濫により周囲に甚大な被害をもたらしていた品井沼干拓に伴う元禄潜穴、品井沼周辺の洪水を松島湾に排除するための明治潜穴、品井沼流域を鳴瀬川から分離するための掘削・堤防建設（昭和2～15年）、鳴瀬川からの逆流を防止する背割堤工事（大正14年～昭和16年）等、水害被害の軽減を図ってきた。近年では、昭和61年8月洪水を契機とした河川激甚災害対策特別緊急事業により、主に下流～中流の掘削・築堤が行われている。このため、吉田川の中下流部は堤防が完成しており、三川合流点上流よりも安全度が高い状況にある。現在は、南川ダム（昭和62年完成）、宮床ダム（平成11年完成）による洪水調節を行うとともに、昭和63年にスタートした「水害に強いまちづくり事業」により、二線堤・水防災拠点等の総合的な治水整備を行っている状

況にある。

3.2.5 今次災害の水文気象状況

図16に9月10日から11日の各観測所の10分間水位および吉田川上流に位置する難波雨量観測所（北緯38度25分05秒，東経140度48分00秒），嘉太人雨量観測所（N38度28分35秒，東経140度45分54秒）の平均10分間雨量の時系列を示す。以下に，今次災害の水文気象状況を時系列に沿って示す。

[9月10日]

12:00- 豪雨発生（17:00まで）

20:00- 豪雨発生（11日4:00まで）

[9月11日]

0:30 竹林川・新田橋地点にて氾濫危険水位を超過

3:40 竹林川・新田橋地点にてピーク水位

5:40 吉田川・落合地点にてピーク水位

7:50 吉田川・粕川地点にてピーク水位

これらの状況を踏まえて，大和町は9月10日23:00に吉田川・高田橋地点や吉田川・落合地点を含む地域に避難指示が発令されている。

3.2.6 上流2ダムの貯水状況

図17に上流2ダムの降水量，貯水状況および流入量と放流量，吉田川・落合地点の河川水位と流量を示す。両ダムの利水容量は宮床ダムで3,000千 m^3 ，南川ダムで4,800千 m^3 （洪水期）であり，貯水量がそれ以上になった場合は自然調整方式の常用洪水吐により，貯水量（流入量）に比例して宮床ダムで最大80 m^3/s ，南川ダムで最大130 m^3/s 放流される設計になっている。両ダムへの流入量は豪雨が観測された9月10日12時頃から増加しその後9月11日早朝まで継続した。

宮床ダムでは9月10日12時時点で貯水量が利水容量の約70%であったことより，利水容量が満水になるまでの流入はほぼ貯留され，9月10日23:00頃から放流量が増加した。貯水量のピークは9月11日4:20で，9月10日12:00から貯水量ピーク時までの総流入量は1,973千 m^3 で，その内1,564千 m^3 が貯留し，本洪水を効果的に緩和したと言える。南川ダムでは9月10日12時時点で貯水量が利水容量を上回っていたため，常用洪水吐により流入量に比例して放流量が増加した。貯水量のピークは9月11日3:50で，9月10日12:00から貯水量ピーク時までの総流入量は4,235千 m^3 で，その内1,913千 m^3 が貯留し，本洪水を効果的に緩和したと言える。貯水量は貯水計画量の範囲内であるが，両ダムの貯水量が低ければさらに洪水を蓄えることができた可能性があった。将来，

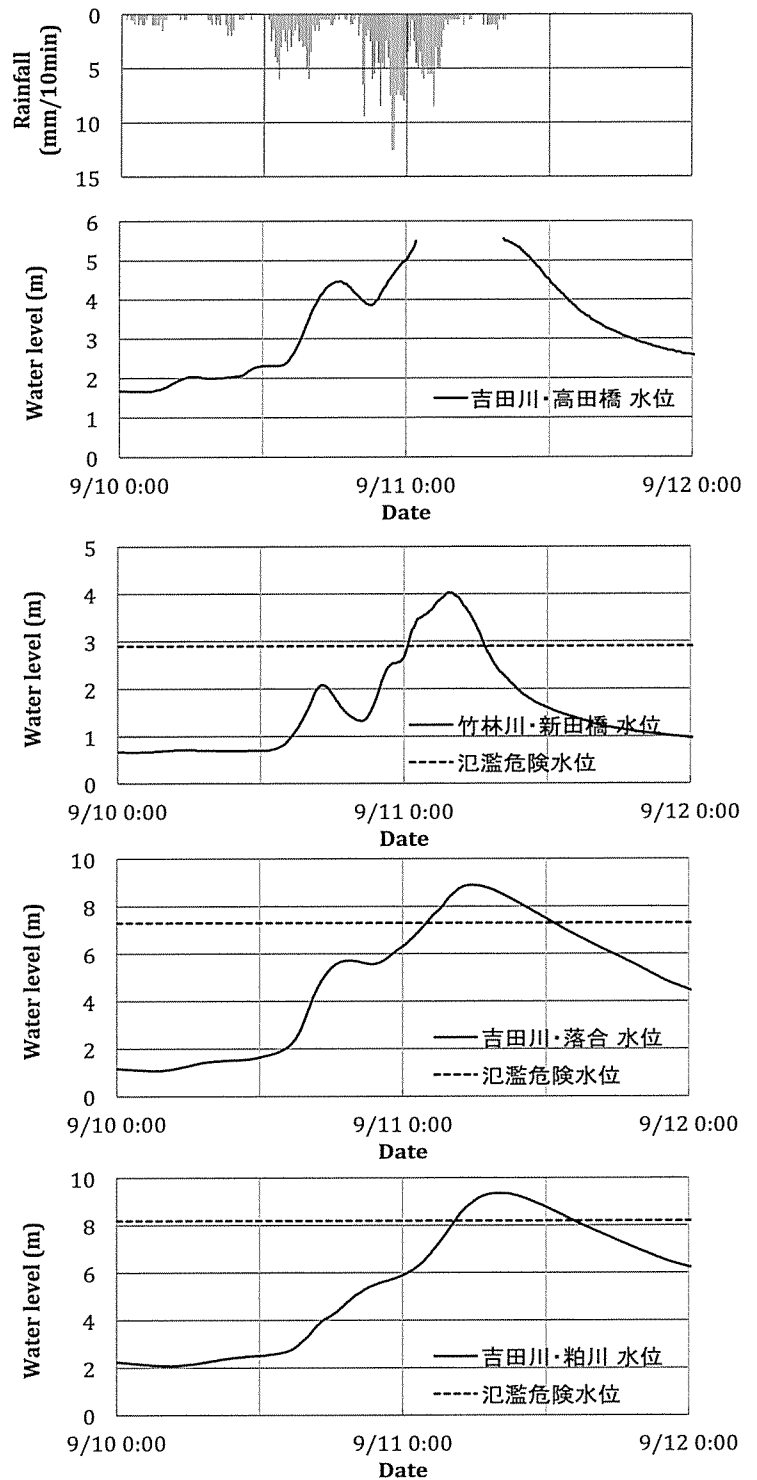


図16 吉田川上流の10分間雨量および各観測所の10分間水位

気候変動に伴う豪雨およびその頻度のさらなる増加や、人口減少に伴う県管理河川における治水対策予算のさらなる制約も考えられることより、降雨量予報に基づく貯水量の事前調整放流など、ソフト的対応策を検討していくことが重要であると考え。

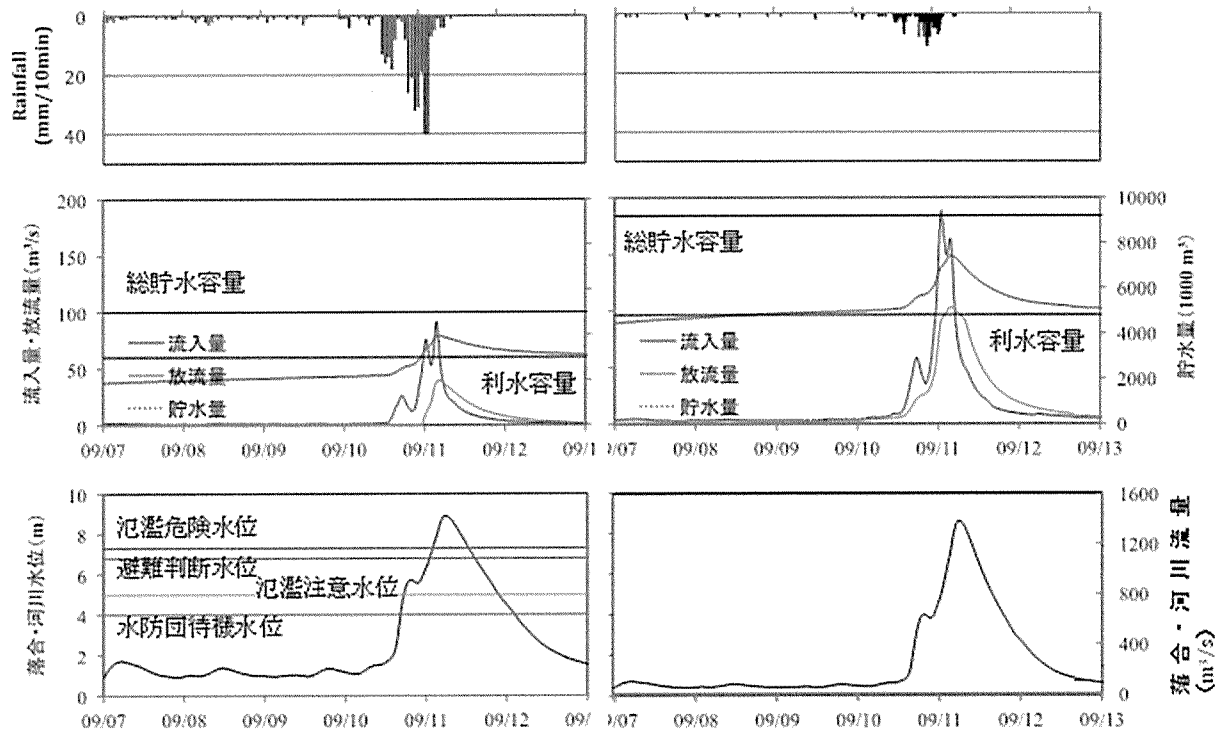


図17 宮床ダム（左）および南川ダム（右）の降水量，貯水状況および流入量と放流量，吉田川・落合地点の河川水位（左下）と流量（右下）

3.2.7 浸水状況

図18に浸水の状況（国土交通省東北地方整備局資料）および浸水想定区域図（宮城県河川課）を示す。今次の浸水区域は、浸水が想定されていた区域で発生したことがわかる。紙面の都合上、主な溢水地点に関する詳細は土木学会水工学委員会平成27年9月関東・東北豪雨東北水害調査報告書¹⁸⁾を参考いただきたい。

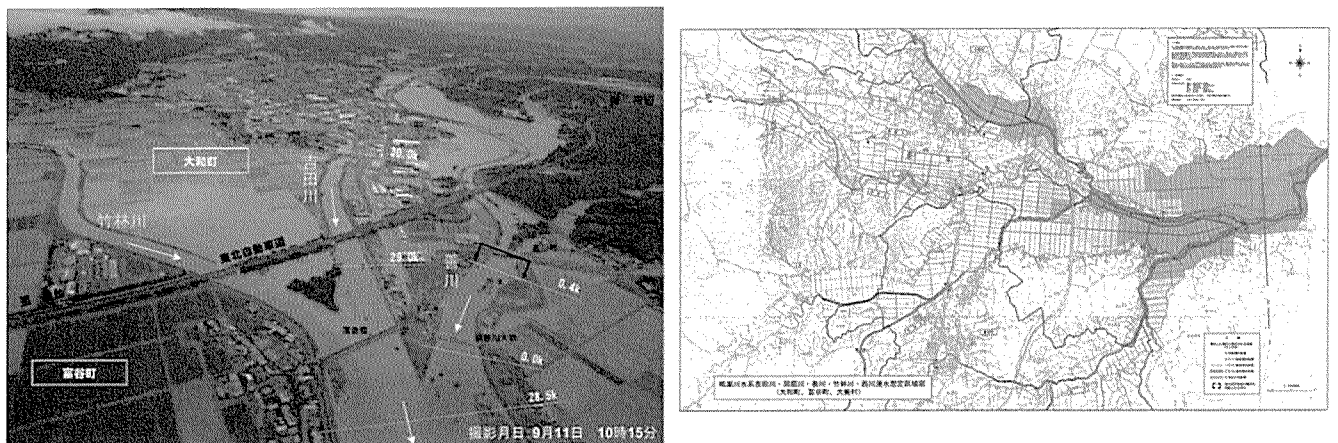


図18 （右）吉田川の浸水状況（国土交通省資料³³⁾）。（左）吉田川・洞堀川・善川・竹林川・西川浸水想定区域図（宮城県河川課資料³⁴⁾）。

3.2.8 まとめ

今次の災害で氾濫した区域の大半は吉田川上流部や支川など県管理河川であり、吉田川本川での浸水区域

は浸水想定区域より小さいが、吉田川上流部や支川の氾濫により吉田川本川の流量が低減された可能性も考えられる。さらに将来、気候変動に伴う豪雨およびその頻度のさらなる増加や、人口減少に伴う県管理河川における治水対策予算のさらなる制約も考えられることより、危険地域の市街化調整区域指定や、降雨量予報に基づく貯水量の事前調整放流など、ソフト的対応策を検討していくことが重要であるとする。

4. 最後に

本稿では、どういう土地にリスクがあったのか、リスクのある土地に立地している場合の対策として何が可能か、について、2011年タイ洪水および2015年関東・東北豪雨を事例に、インフラと社会の関係に焦点を当て、大洪水発生メカニズムから次の大洪水を防ぐための課題と対策を議論した。

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。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。一方、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く、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る。2011年タイ洪水および2015年関東・東北豪雨を事例より、近年の流域開発と社会的変化が、その被災形態と規模に顕著に影響していることが明らかとなった。また、井上・小森ら（2016）³⁵⁾は、神田川流域を対象に、水害危険度指標が取引地価に与える影響が変化する時点を分析し、地域住民や社会が有する水害危険性認識の変化の把握を試みた。水害区域図に記録された氾濫履歴地域に基づく水害危険地域設定を行い、取引地価を分析した結果、内水氾濫履歴地域の周辺では、東日本大震災を機とした取引地価の下落が確認され、未曾有の被害をもたらした東日本大震災の経験によって、地域住民・社会の防災意識が向上し、これまで水害危険性が強く意識されていなかった地域の取引地価に影響を与えた可能性が示唆された。一方、水害危険地域の取引地価が相対的に高いとの結果が得られ、水害危険性が取引地価に反映されておらず、水辺に近接することによるアメニティ効果による影響も考えられた。さらに、東日本大震災後、東京湾岸の住宅が忌避され需要が急減したが、五輪誘致の成功により以前よりも人気が高まっていると言われている。

このように、近年の流域開発と社会的変化が、その被災形態と規模に顕著に影響している。よって今後は、それら変化の実態について、自然現象的側面のみならず社会的・地域的側面からも調査・研究することが重要である。

謝辞

2011年タイ洪水に関しては、日本国際協力機構（JICA）及び科学技術振興機構（JST）の地球規模課題対応国際科学技術協力事業（SATREPS）「気候変動に対する水分野の適応策立案・実施支援システムの構築（IMPAC-T）」の下で行われたものである。また、貴重なデータを提供いただいたタイ国王立灌漑局、タイ気象局をはじめとする現地現業機関の多大な協力を受けた。ここに記して深甚なる謝意を表す。

2015年関東・東北豪雨に関しては、土木学会水工学委員会水害対策小委員会の下で行われたものである。また、国土交通省東北地方整備局、宮城県河川課からは貴重な資料の提供を受けた。また、土木学会東北支部、財団法人建設工学研究振興会からは調査にあたって助成を受けた。水害区域図は国土交通省水管理・国土保全局河川計画課より提供いただいた。ここに記して深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 1) Tebakari. T, Yoshitani. J, and Suvanpimol. P, “Impact of large-scale reservoir operation on flow regime in the Chao Phraya River basin, Thailand,” *Hydrological Processes*. Vol. 26, pp.2411-2420, DOI:10.1002/hyp.9345, 2012.
- 2) 手計太一, 吉谷純一, Suvanpimol. C, 宮本守, 山田正, 「数値実権を利用した大ダムの持つ治水・利水効果の検証 -タイ王国・Chao Phraya川流域を対象として-,」 *水文・水資源学会誌*, Vol. 20 (3), pp.145-155, 2007.
- 3) JICA : チャオプラヤ川流域洪水対策総合計画調査, 1999
- 4) Komori. D, Nakamura. S, Kiguchi. M, Nishijima. A, Yamazaki. D, Suzuki. S, Kawasaki. A, Oki. K, and Oki. T, “Characteristics of the 2011 Chao Phraya River Flood in Central Thailand,” *Hydrological Research Letters*, Vol.6, pp.41-46, 2012.
- 5) 小森大輔, 木口雅司, 中村晋一郎. 「2011年タイ国チャオプラヤ川大洪水の実態および課題と対策,」 *河川*, 2012年1月号, pp.3-10, 2012.
- 6) 中村晋一郎, 小森大輔, 木口雅司, 西島亜佐子, 山崎大, 鈴木聡, Janne FERNANDEZ, 梯滋郎, Cherry MATEO, 岡根谷実里, 恒川貴弘, 湯谷啓明, 川崎昭如, 沖一雄, 沖大幹. 「2011年タイ王国Chao Phraya川洪水における水文及び氾濫の状況,」 *水文・水資源学会誌*, Vol.26(1), pp38-46.
- 7) 高谷 好. (1982) 『熱帯デルタの農業発展 : メナム・デルタの研究』, 東京: 創文社.
- 8) 森田敦郎, 小森大輔, 川崎昭如. (2013) チャオプラヤ川の学際踏査研究 その3 -流域社会と灌漑システムの変遷に関する予備的考察-. *生産研究*, 65(4), 211-216.
- 9) Biggs DA. (2010) *Quagmire : nation-building and nature in the Mekong Delta*, Seattle: University of Washington Press.
- 10) 田辺 繁. (1973a) 「Chao Phraya デルタの運河開発に関する一考察 (I) : Ayutthaya朝よりRatanakosin朝四世王治世まで」. 『東南アジア研究』 11: 14-48.
- 11) 田辺 繁. (1973b) 「Chao Phraya デルタの運河開発に関する一考察 II : 19世紀末葉における変容過程」. 『東南アジア研究』 11: 191-222.
- 12) Van der Heide H. (1903) *General report on irrigation and drainage in the lower Menam Valley*, Bangkok: Ministry of Agriculture, Kingdom of Siam.
- 13) Molle F, Durongdej S, Chompadist C, et al. (1999) Improvement of rice cultivation and water management in the flooded area of the Central Plain of Thailand : a zoning of rice varieties by using remote sensing imagery. In: CENTER D (ed) *DORAS - DELTA : Research Report n°5*. Bangkok: Kasetsart University, DORAS Center.
- 14) 中島 正. (1992) 「タイ国チャオプラヤー・デルタにおける水利秩序の形成と発展」. 『東南アジア研究』 29: 454-467.
- 15) Molle F and Keawkuladya J. (1998) Water Management and Agricultural Change : A Case Study in the Upper Chao Phraya Delta. *Southeast Asian Studies* 36: 32-58.
- 16) Molle F. (2004) Technical and Institutional Responses to Basin Closure in the Chao Phraya River Basin, Thailand. *Water International* 29: 70-80.
- 17) Nishizaki Y. (2011) *Political authority and provincial identity in Thailand : the making of Banharn-buri*, Ithaca, N.Y.: Southeast Asia Program Publications, Southeast Asia Program, Cornell University.
- 18) 土木学会水工学委員会 : 平成27年9月関東・東北豪雨東北水害調査報告書, 2016
- 19) 気象庁 : 台風第18号等による大雨 (平成27 (2015) 年9月7日～9月11日 (速報))
<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/2015/20150907/20150907.html>
- 20) 大崎市 : 渋井川決壊に伴う救助者数, 平成27年9月関東・東北豪雨情報
<http://www.city.osaki.miyagi.jp/index.cfm/38.11484.179.html>

- 21) 気象庁気象研究所：平成27年9月関東・東北豪雨の発生要因
<http://www.jma-net.go.jp/sendai/>
- 22) 宮城県：一級河川鳴瀬川水系多田川ブロック河川整備計画
<http://www.pref.miyagi.jp/uploaded/attachment/42683.pdf>
- 23) 森口周二・金鍾官・呉修一・Bricker Jeremy・山田知寛・堀合孝博：平成27年9月関東・東北豪雨による東北地方の被害について（速報），基礎工，Vol.43, No.12, pp.94-97, 2015
- 24) 国土地理院，平成27年9月関東・東北豪雨の情報，（渋井川）9月12日に撮影した空中写真の概要
<http://www.gsi.go.jp/common/000107326.pdf>
- 25) 呉修一・森口周二・堀合孝博・小森大輔・風間聡・田中仁：2015年9月東北豪雨による渋井川洪水氾濫の特徴，自然災害科学，投稿中。
- 26) 呉修一・山田正・吉川秀夫：表面流の発生機構を考慮した斜面多層降雨流出計算手法に関する研究，土木学会水工学論文集，Vol.49, pp.169-174, 2005
- 27) 呉修一・林晃大・森口周二・堀合孝博・田中仁：2015年9月渋井川洪水氾濫を対象とした可能最大流体力の算定，土木学会河川技術論文集，Vol.22, 投稿中
- 28) 梅松理美・呉修一・真野明・有働恵子：2013年7月山形集中豪雨被害特徴～月布川流域を一例として～，東北地域災害科学研究，Vol.50, pp.75-80, 2014
- 29) 呉修一・森口周二・久利美和・安倍祥・Carine Yi・有働恵子・真野明：2013年8月秋田・岩手豪雨災害の特徴，東北地域災害科学研究，Vol.50, pp.81-86, 2014
- 30) 国土交通省東北地方整備局：平成24年11月 鳴瀬川水系河川整備計画 [大臣管理区間]
- 31) 国土交通省:水害統計,国土交通省,1992-2015
- 32) 梯滋郎・中村晋一郎・沖大幹・沖一雄：日本の水害常襲地の分布とその特性，土木学会論文集B1（水工学），Vol.70 No.4, I_1489-I_1494, 2014
- 33) 国土交通省東北地方整備局河川部:平成27年9月11日出水の概要（第2報）
- 34) 宮城県河川課,吉田川, 洞堀川, 善川・竹林川・西川浸水想定区域図
<http://www.pref.miyagi.jp/soshiki/kasen/ki-sins-yoshi.html>
- 35) 井上亮・永吉真也・小森大輔：水害危険性が地価に与える影響の変化時点推定－地域の水害危険性認識変容の把握に向けて－，土木学会論文集B1（水工学），Vol.72 No.4, I_1309-I_1314, 2016