

治水システムを考慮した飯塚市街地の 都市域氾濫解析と被害軽減効果の検討

NUMERICAL SIMULATIONS OF INUNDATION FLOWS WITH FLOOD
CONTROL SYSTEM IN IIZUKA CITY AND EXAMINATION OF ITS EFFECTS
ON FLOOD HAZARD MITIGATION

秋山壽一郎¹・重枝未玲²・小園裕司³・草野浩之³

Juichiro AKIYAMA, Mirei SHIGE-EDA, Yuji KOZONO and Hiroyuki KUSANO

¹フェロー会員 Ph.D. 九州工業大学大学院教授 工学研究院建設社会工学研究系
(〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

²正会員 博士(工) 九州工業大学大学院准教授 工学研究院建設社会工学研究系 (同上)

³学生会員 九州工業大学大学院 工学府建設社会工学専攻博士前期課程 (同上)

Numerical simulations of flooding event in the Iizuka-city area in the Onga river basin was performed by a numerical model for rainfall-runoff in watershed and flood inundation process in urban area with flood disaster-reduction system such as sewer network and drainage pump station. The rain-fall runoff was simulated by a distributed hydrological model. The flood flow in rivers and inundation flows on the ground were simulated simultaneously by the 2D free-surface flow model. The dynamic network model for free-surface-pressurized flow combined with the Preissmann slot was used for the sewer network. The effects of flood disaster-reduction system and inundation processes in Iizuka-city under different rainfall patterns were examined based on the numerical results.

Key Words : Risk control, urban area, rainfall-runoff, inundation flow, dynamic flood simulation, flood control system, Iizuka city

1. はじめに

近年、局地的な豪雨による水害が頻発し、甚大な被害が生じている。毎年のように観測史上最大規模やそれに近い規模の想定を越えた豪雨が発生しており、都市域では中小河川の氾濫や下水道の排水不良による内水被害が急増・激化している。

都市域の治水システムは、本川・中小支川、各所に設けられた水門・樋門や排水機場、雨水貯留施設、複雑に張り巡らされ下水道網などの治水施設で構成される。各施設の計画は、一般に異なった計画規模・計画降雨で行われるため、これらの治水効果を総合的に評価することが、都市域での洪水氾濫対策を検討する上では不可欠である。

このような観点から、任意の降雨外力から氾濫状況を予測する「統合型氾濫解析モデル」の開発^{1,2,3,4,5}が進められており、氾濫現象の再現計算^{1,2,3}にとどまらず、近年では浸水被害軽減策の検討^{4,5}も行われている。「統合型氾濫解析モデル」は、様々な降雨外力に対して、治水

システムを考慮に入れて氾濫現象を予測できるため、その整合性を検討する上で有用であると考えられる。しかし、流域レベルの比較的大きな領域を対象としているため、水災時の被害最小化対策の検討に必要な解像度を有しつつ、都市域での氾濫現象を十分な精度で予測するには至っていない。

著者らは、これまでに、市街地や都市域などの比較的小さな領域を対象として、氾濫原要素や治水システムを考慮できる「都市域氾濫解析モデル」を開発^{6,7,8}し、都市域での氾濫現象を十分な解像度で予測することを示してきた。さらに、同モデルと精度の高い洪水追跡を行うことが可能な「分布型流出・平面2次元洪水追跡モデル」⁹を組み合わせることで、「統合型氾濫解析モデル」と「都市域氾濫解析モデル」の両方の利点を生かした、任意の降雨外力から流域での雨水の挙動を把握した上で、都市域での詳細な浸水プロセスを予測可能な「流域流出・都市域氾濫解析モデル」を開発し、同モデルが流域の雨水の挙動、河道での洪水流の挙動、都市域での詳細な氾濫流の挙動を予測可能である¹⁰ことを示した。

本研究は、以上のような背景を踏まえ、任意の降雨外

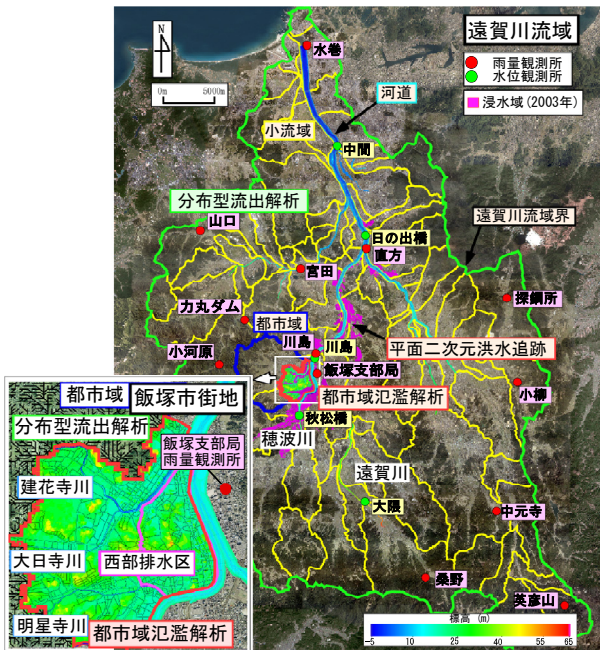


図-1 遠賀川流域の概要

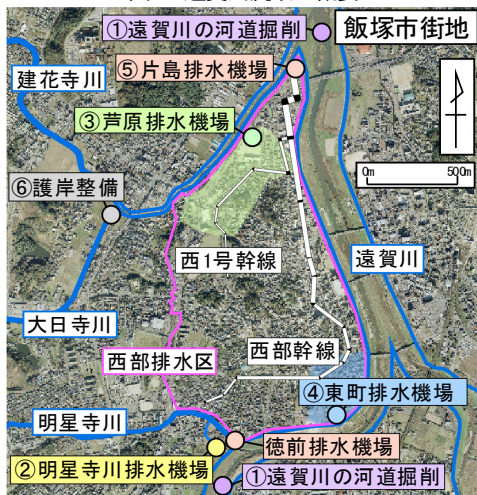


図-2 飯塚市街地の治水システム

力から都市域での浸水プロセスが予測可能な「流域流出・都市域氾濫解析モデル」を用い、飯塚市街地を対象に、2003年九州豪雨災害(以下、2003年豪雨災害と呼ぶ。)以降、整備されてきた治水システムを考慮した解析を行い、各施設が浸水プロセスに及ぼす影響やその被害軽減効果を検討した。さらに、仮想降雨に対する浸水プロセスについて検討した。

2. 飯塚市街地の治水施設の概要

遠賀川の中下流域では、低地部に住宅地が発達しており、支川の氾濫による内水氾濫被害が度々生じている。図-1に、遠賀川流域の概要を示す。図中には、2003年豪雨災害時の浸水域、飯塚市街地の拡大図、雨量、水位観測所等もあわせて示している。

本研究で対象とする飯塚市街地においても、支川の明星寺川の氾濫と下水道の排水不良により、2003年7月の

遠賀川豪雨災害時に飯塚市の旧飯塚地区では最大で約1.5mの浸水深となり、歴史ある劇場や中心商店街、文化施設をはじめとして周辺一体が大きな被害を受け、床上浸水1,569棟、床下浸水724棟をはじめ電気・水道・ガスなどのライフラインにも大きな被害が生じた。

図-2に、上述の大きな被害が生じた区域を含む飯塚市街地の西部排水区の治水システムを示す。西部排水区の治水システムは、2003年豪雨災害時には(1) 明星寺川、建花寺川、大日寺川の中小河川、(2) 西部幹線(幅1400～3600mm×高さ1120～2160mm×長さ2633m)と西1号幹線(直径250～1650mm×長さ1494m)の二つの幹線を有する下水道網で構成されており、明星寺川の下流では徳前排水機場(排水能力16.0m³/s)で、下水道網の末端は片島排水機場(排水能力10.33m³/s)で排水が行われていた。2003年豪雨災害後には(1) 遠賀川・穂波川の河道掘削(図中の①)、(2) 明星寺川下流の分流と分流河川の下流に明星寺川排水機場(排水能力26.0 m³/s)の新設(図中の②)、(3) 図-2の緑と水色のハッチの地域の雨水排水を担当する芦原排水機場(排水能力3.0m³/s)と東町排水機場(排水能力2.2m³/s)の新設(図中の③、④)、(4) 設備の更新による片島排水機場の排水能力の向上(排水能力12.66m³/s)(図中の⑤)、(5) 大日寺川と建花寺川合流点の護岸整備(図中の⑥)、などが浸水対策事業として行われ、2009年には竣工している。

このように、浸水対策事業により治水施設が整備された結果、2009年7月中国・九州北部豪雨災害(以下2009年豪雨災害と呼ぶ。)では、福岡県飯塚市の雨量観測所で1時間101mmの観測史上最大の豪雨が観測されたにも関わらず、2003年豪雨災害のような大きな浸水被害は生じなかった。

3. 都市域氾濫解析の概要

(1) 流域流出・都市域氾濫解析モデルの概要

「流域流出・都市域氾濫解析モデル」¹⁰⁾は、「セル分布型流出解析モデル」⁹⁾、「平面2次元洪水追跡モデル」⁹⁾、「都市域氾濫解析モデル」⁸⁾の3つのモデルで構成され、それぞれの結果を境界条件あるいは内部境界条件で接続することで、任意の降雨外力から、流域での雨水の挙動を把握した上で、精度の高い本川の洪水追跡を介して、都市域での詳細な浸水プロセスの予測を行うモデルである。その解析手順の概要は次の通りである。

- (1) 流域を小流域(図-1中の黄色の線)、河道および都市域(図-1中の青色の線)に分割する。
- (2) 小流域と都市域に含まれる斜面部の雨水の挙動解析と河川への流出計算を行う。
- (3) 河川への流出を考慮して、本川の洪水追跡を行う。
- (4) 分布型流出解析から得られた斜面部からの流出流量を氾濫原への流入条件として、今回の対象とする飯

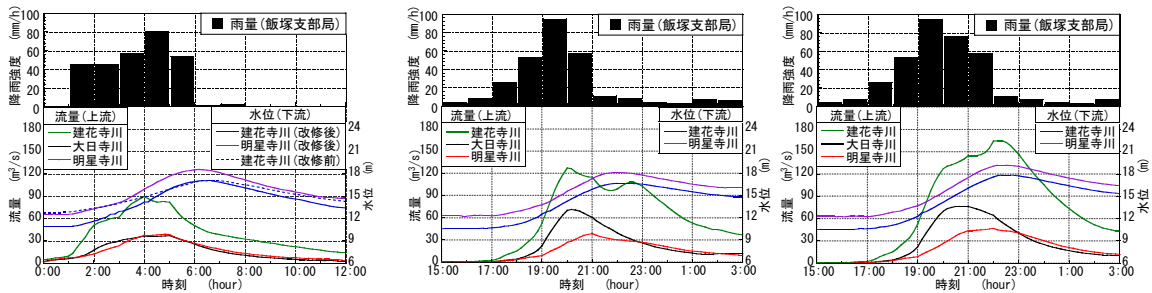


図-3 解析条件の一例(左：2003年豪雨災害，中央：2009年豪雨災害，右：仮想降雨)

塚市街地では支川の規模が小さく本川外水位に及ばず影響は小さいので、洪水追跡から得られた本川外水位を支川の下流端境界条件として、支川の洪水流、氾濫原の氾濫流および下水道流を一体的に解析する。手順(2)については「セル分布型流出解析モデル」を、(3)については「平面2次元洪水追跡モデル」を、(4)については「都市域氾濫解析モデル」を用いて解析を行う。各モデルの詳細については参考文献¹⁰⁾に示す通りである。

(2) 解析条件

①2009年豪雨災害時の降雨を用いた氾濫状況の再現、
②2003年豪雨災害時の降雨を用いた治水施設の被害軽減の検討、
③仮想降雨を用いた浸水プロセスの検討を目的に、3通りの解析を行った。

分布型流出解析、洪水追跡および都市域氾濫解析を行うための解析データは、解像度0.25mの航空写真(オルソ画像)を基図としてGISにより整理・作成した。その作成法の概要は、参考文献¹⁰⁾に示す通りである。

2003年豪雨災害の計算では、流域流出・洪水追跡解析の開始時刻を7月18日PM0時、都市域氾濫解析を7月19日AM1時とした。2009年豪雨災害の計算では流域流出・洪水追跡解析の開始時刻を7月24日PM0時、都市域氾濫解析を7月24日PM3時とした。

分布型流出解析ではモデルパラメータとして、表-1に示す値を用いた。ここに、 N =等価粗度係数、 k_a =重力水が卓越するA層内の透水係数、 d_c =マトリックス部の最大保水量を水深で表した値、 d_s =重力水を含めて表層土中に保水しうる最大水深、 β =重力水部と不飽和水部との飽和透水係数の比である。

洪水追跡を行った河川は、図-1に示す本川の遠賀川と支川の穂波川とその他の7つの支川である。河道断面には2002年および2009年の断面を用いた。粗度係数には河道計画で用いられた平均値0.035を与えた。計算格子には三角形の非構造格子を用いた。なお、総メッシュ数は18163個であった。河道上流端には分布型流出解析から得られた流量を、下流端には河口堰での水位を与えた。

都市域氾濫解析の対象領域は、飯塚市街地を含む都市域(面積：27.9km²)(図-1中の青い線)である。この都市域を、分布型流出解析を行う斜面部(面積：21.7km²)と都市域氾濫解析を行う氾濫原(面積：6.2km²)(図-1中の赤い線)とに分離した。治水システムには、明星寺川、建花寺川

表-1 分布型流出解析に用いたモデルパラメータ

	$N(m^{-1/3}s)$	$d_s(m)$	$d_c(m)$	$k_a(m/s)$	β
森林	0.6	0.08	0.04	0.015	4.0
荒野	0.3				
田	2.0	0.00	0.00		
農地	0.3				
市街地	0.05				
水域	0.035				

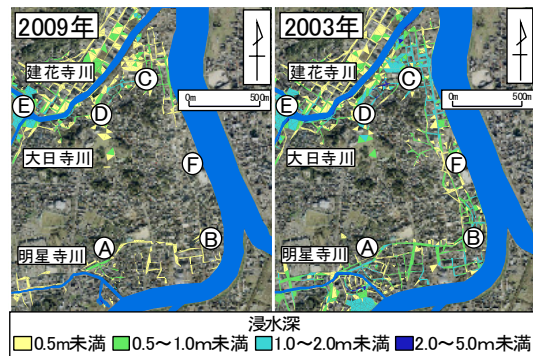


図-4 2009年の最大浸水域・浸水深

および大日寺川の3つの支川、西部幹線と西1号幹線の下水道網、排水機場を考慮した。また、大日寺川・建花寺川の合流点については詳細が不明であったため、2003年のデータと同様としている。計算格子には三角形非構造格子を用い、計算領域内の河川や街路などの線形に対して分割数を設定した後、メッシュジェネレータを用いて解析対象領域を三角形の計算メッシュに分割した。なお、総メッシュ数は、明星寺排水機場を考慮した場合は19,379個、それ以外の場合は19,126個であった。

都市域氾濫解析では、建花寺川下流端には洪水追跡によって得られた水位ハイドログラフを、明星寺川、建花寺川および大日寺川上流端には分布型流出解析より求めた流量ハイドログラフを与えた。明星寺川下流端の徳前排水機場・明星寺川排水機場については、再現計算ではポンプ場操作記録に基づき単位面積当たりの排水流量を与え、被害軽減効果の解析では操作ルールに従い排水させた。芦原排水機場と東町排水機場については、排水を担当する地域の単位面積当り排水能力に基づき排水させた。また、西部排水区の雨水下水道網下流端の片島排水機場については、下水道網末端に排水流量を与えた。

仮想降雨の計算では、2009年豪雨災害時のピーク雨量が30分間継続し、その後、ピーク雨量の1時間後の降雨量が30分間継続するような降雨を想定した。これは、近年の豪雨では河川の水位が計画高水位にまで達し、災害が発生するかどうかの瀬戸際となる状況が多いことを踏

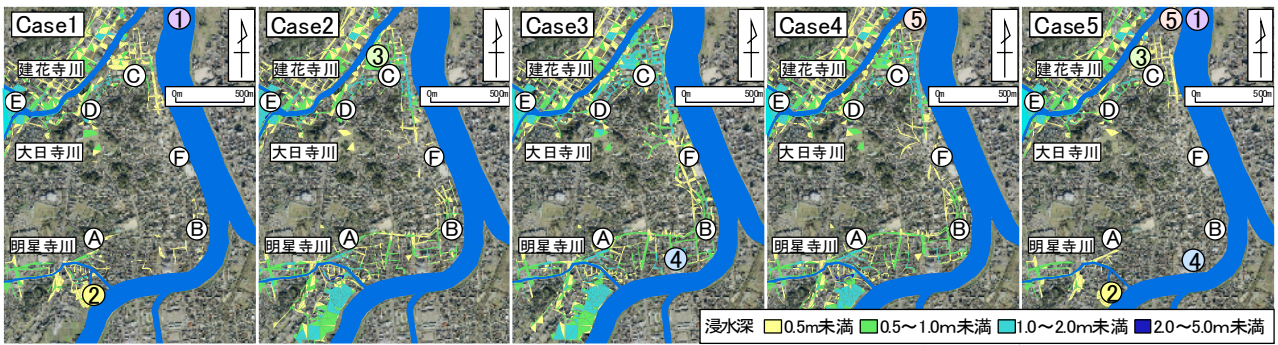


図-5 各Caseの最大浸水域・浸水深の解析結果

表-2 解析に考慮する治水システム

Case	浸水対策	
0	—	①遠賀川の河道掘削
1	①,②	②明星寺川排水機場の新設
2	③	③芦原雨水排水機場の新設
3	④	④東町雨水排水機場の新設
4	⑤	⑤片島揚水機場の設備更新
5	①,②,③,④,⑤	

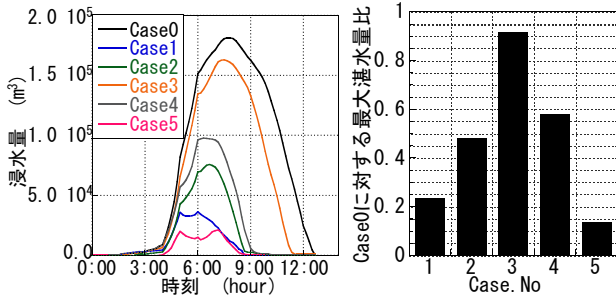


図-6 浸水量の経時変化 図-7 各Caseの最大浸水量比

まえ、ピーク雨量が30分継続したらどのような状況が生じるかを検討する目的で設定した。なお、降雨ハイトグラフは降雨強度で設定した。その他の条件は2009年豪雨災害の再現計算と同様である。図-3に①～③の都市域氾濫解析で用いた解析条件の一例を示す。

4. 結果と考察

(1) 2009年豪雨災害の再現計算

まず、2009年豪雨災害を対象に、2003年以降整備された治水システムを全て考慮した解析を行い、本モデルの再現性を検討した。

図-4は、2009年豪雨災害時の最大浸水域・浸水深の解析結果を示したものである。図中には2003年豪雨災害時の解析結果を合わせて示している。なお、本モデルの2003年九州豪雨災害時の再現性については参考文献¹⁰⁾に示す通りである。先述したように、2009年豪雨災害では観測史上最大の豪雨が観測されたにもかかわらず、浸水被害は2003年豪雨災害に比べて小さかった。また、2009年豪雨災害では建花川からの溢水はニュース等で報告されているが、明星寺川の溢水は報告されていない。図-4から、解析結果では(1) 建花寺川の溢水の発生等を再現していること、(2) 西部排水区に着目すると、C点付近で

の床上浸水が生じているが、他の領域では床下浸水以下の水深となっており、2003年豪雨災害時に比べ浸水被害が小さいこと、などが確認できる。このように、2009年豪雨災害時の浸水域・浸水深等の詳細なデータが存在しないので定量的な評価は難しいが、本解析結果は現実と同様な結果となっており、本モデルが治水施設を適切に取り扱うことで、2009年豪雨災害時の溢水や浸水箇所を再現していることがわかる。

(2) 治水施設の被害軽減効果

次に、各施設の被害軽減効果を検討する目的で、表-2に示すように治水施設を考慮した解析を行い、それぞれの浸水被害軽減効果を検討した。なお、検討は2003年豪雨災害時の降雨で行った。

図-5は、表-2に示す各Caseの最大浸水域・浸水深の解析結果を示したものである。なお、Case0は2003年豪雨災害時の図-4の結果となる。これらより、最大浸水域・浸水深は、(1) 当然ながら、全改修を考慮したCase5で最も小さくなること、(2) Case1はCase5と同程度に小さくなること、(3) Case2と4は同程度に小さくなり、標高が周辺よりも高い図中のF点で浸水しなくなること、(4) Case3ではB地点の浸水深が小さくなること、(5) 大日寺・建花寺川の合流点からの溢水についてはさほど大きな改善がされていないこと、などが確認できる。図-6は、飯塚市街地西部排水区内の浸水量の経時変化を示したものである。これより、(1) 最大浸水量はCase5, 1, 2, 4, 3, 0の順で小さくなること、(2) 浸水量は、いずれのCaseについても降雨強度が最大となる午前4:00を境に急激に増加すること、(3) 浸水量の増加速度はCase5, 1, 2, 4, 3, 0の順で低下すること、(4) 浸水量が0となる時間は、Case5, 1, 2, 4, 3, 0の順で早くなること、などが確認できる。図-7はCase0に対する各Caseの最大浸水量比を示したものである。これより、Case1では約75%、Case2では約50%、Case3では約10%、Case4では約40%、Case5では約85%の最大浸水量の低減が確認できる。

図-8は、Case0, Case2, Case5の浸水プロセスを示したものである。なお、Case1はCase5の浸水プロセス、Case3, 4はCase0の浸水プロセスと同様であったので、ここでは割愛している。これらの図より、Case0の浸水プロセスは、次のようであったと考えられる。①明星寺

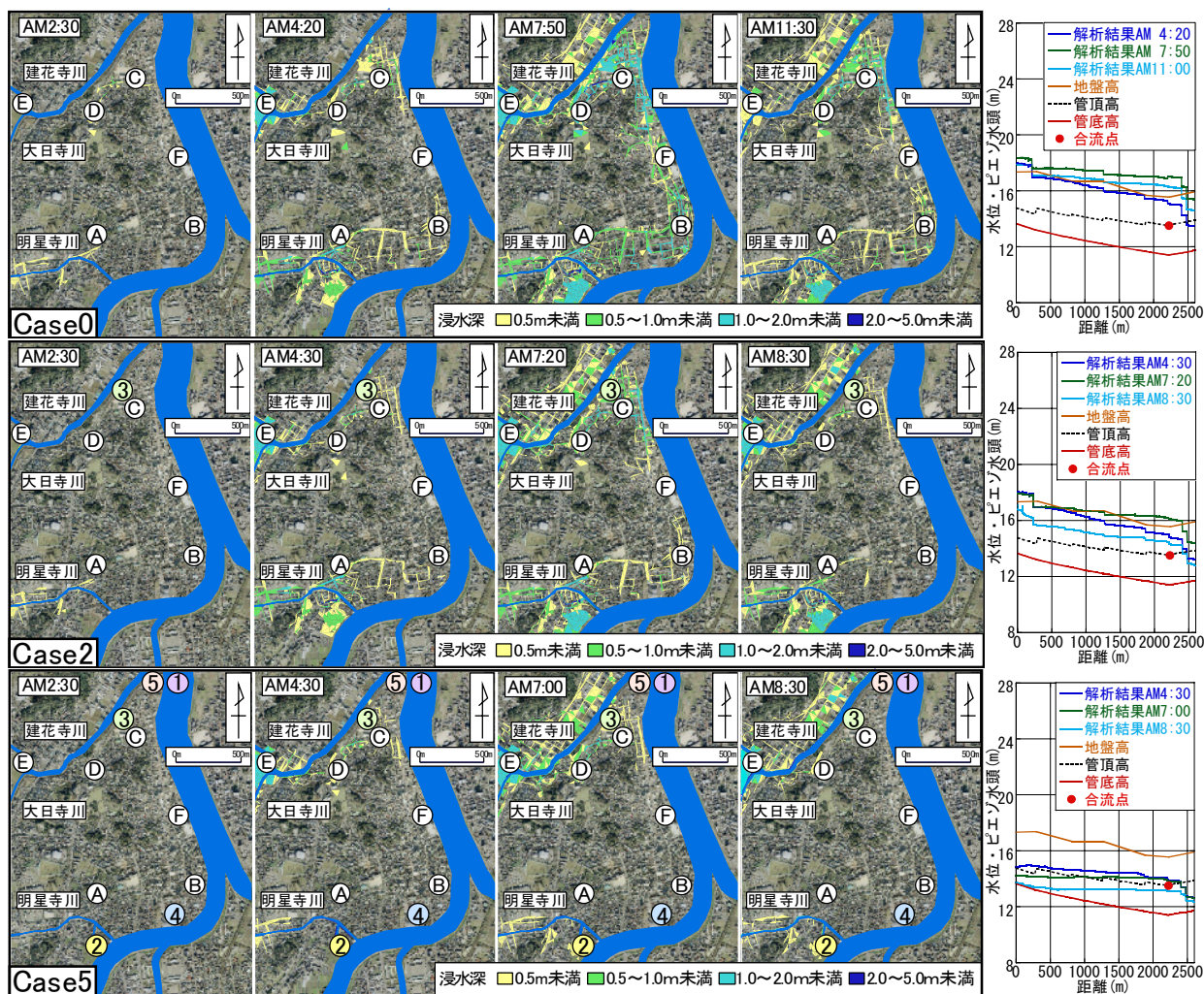


図-8 Case0, Case2, Case5の浸水プロセスと西部幹線の水位・ピエゾ水頭の経時変化

川の点A付近から溢水が発生し、②降雨強度が50mm/hを超えるAM4:10~AM4:20に下水道の排水不良による内水氾濫がB点でも生じ、明星寺川からの氾濫水もB点の市街地へ流入する。③C, D地点では下水道の排水不良による内水氾濫が生じ、合流点E点での氾濫水はD点へ向かう。④最終的にはC地点とB地点からの氾濫水がF地点で合流し、最大浸水深となる。⑤その後、時間の経過とともに氾濫水が引き始める。Case2の浸水プロセスは、ほぼCase0と同様であるが、③のC, D地点では芦原排水機場でポンプ排水されるので、下水道の排水不良による内水氾濫が発生する時間はCase0よりも遅くなる。また、④に示すようなF点での氾濫水の合流は生じなかった。Case5の浸水プロセスは、明星寺川からの溢水はほとんど発生せず、C点, D点での内水氾濫のみが生じ、Case0のプロセスとは大きく異なる。

以上を踏まえると、被害軽減効果が最も高い施設は、明星寺川の排水機場である。次に、芦原排水機場、片島排水機場の順で被害軽減効果が高い。このことは、2003年九州豪雨災害時の浸水被害は明星寺川からの溢水が浸水の大半を占めたことを示唆している。このように、飯塚市街地の浸水対策は、適切な対策であったことがわかる。今回、大日寺川合流点付近の改修は詳細なデータが

得られなかったために検討することができなかったが、この改修を考慮すれば合流点E点から氾濫流量を減少することができ、D地点での内水氾濫をより改善でき、実際はC地点付近においてもより大きな被害軽減効果があるのではないかと考えられる。

以上から、2003年豪雨災害後の浸水対策事業により整備された治水施設は非常に機能していること、「流域流出・都市域氾濫解析モデル」は、各施設の総合的な評価を検討する上で有用なモデルであることがわかった。

(3) 仮想降雨を用いた浸水プロセスの予測

最後に仮想降雨に対する浸水プロセスの検討を行った。図-9は本解析で得られた浸水プロセスである。シミュレーションから得られた浸水プロセスは、次のようであった。①降雨強度が100mm/h程度となるPM6時以降、下水道の排水不良によりCとD地点で内水氾濫が生じる。②PM7時ごろには大日寺と建花寺川の合流部から溢水が開始し、E地点の氾濫水はD地点へ流下する。③同時刻にはB地点付近の市街地においても内水氾濫が生じる。④降雨強度が60mm/hを下回ると東町排水機場による排水によりB点の氾濫水は排水される。⑤PM9時以降、飯塚市街地での降雨は減少するが、建花寺川上流の流域で

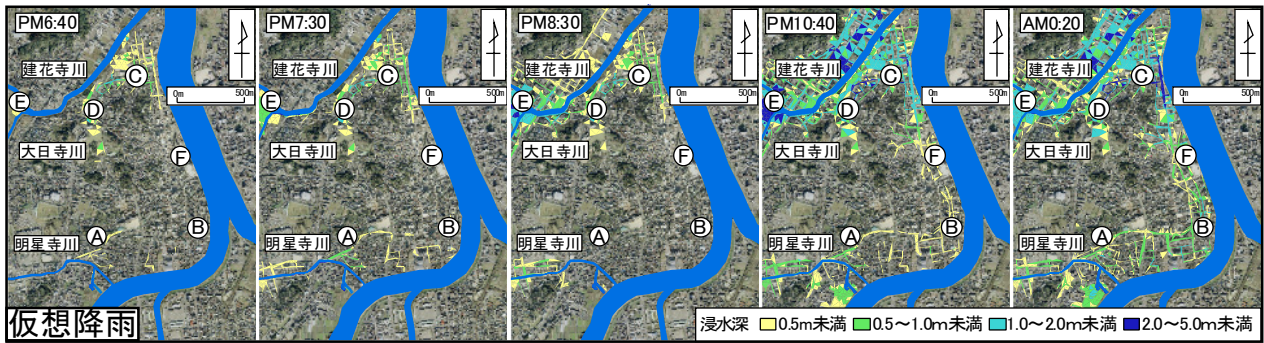


図-9 仮想降雨時の浸水プロセス

は100mm/h以上の降雨強度があるため、図-3に示すようにPM10時に建花寺川の流量と下流の水位がピークとなり、E地点からの氾濫流量が増加し、D地点さらにC地点へと流入する。⑤そのため、飯塚市街地での降雨強度は11mm/hにもかかわらず、下水道が排水不良を起こし、PM10時40分にはB地点で内水氾濫を再度引き起こし、最終的にはB地点で床上浸水を引き起こす。このような⑤の内水氾濫は、2009年豪雨災害の再現計算では確認されていない。今回の仮想降雨の場合、建花寺川や明星寺川のピーク流量は、飯塚市街地で降雨強度が小さい時間帯に生じている。もし、2003年豪雨災害時のように、ピーク流量と同じタイミングでピーク雨量が生じた場合には、B地点においても甚大な被害が生じた可能性がある。

このように、飯塚市街地では2003年豪雨災害のように、明星寺川から氾濫水がB地点へ流入し、市街地に甚大な被害を生じさせる可能性は低くなった。しかし、建花寺川の氾濫水がC地点へ流入し、下水道の容量を超えた場合には、降雨量が少ない場合でもB地点での内水氾濫を生じさせ、床上浸水が起こるような危険な状況が生じる可能性があることがわかった。

5. おわりに

本研究では、任意の降雨外力から都市域の浸水プロセスが予知可能な「流域流出・都市域氾濫解析モデル」を用い、飯塚市街地を対象に、2003年九州豪雨災害以降、整備されてきた治水システムを考慮した解析を行い、各施設が浸水プロセスに及ぼす影響やその被害軽減効果を検討した。さらに、仮想降雨に対する浸水プロセスについて検討した。その結果、本モデルは治水システムを総合的に評価する上で非常に有用なモデルであることを示した。さらに、飯塚市街地では、建花寺川の氾濫水により、B地点で内水氾濫を引き起こす可能性があることなど、危機管理対策を講じる上で有用な情報を得ることができた。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金基盤研究B(課題名：豪雨災害時の浸水減災シミュレータの開発と樹林帯の減災効果に関する研究、課題番号：21360237、研究代表

者：秋山壽一郎)の助成を受け実施したものである。本研究を実施するに当たり、国土交通省遠賀川河川事務所から現地調査やデータ提供など、福岡県飯塚県土事務所からデータ提供など多大な協力を得た。また、本学学部4年生の川本直樹君、工藤大祐君には、データ整理等で協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 辻本哲郎, 本守真人, 安部友則, 山田哲夫: 氾濫シミュレーション手法の開発と東海豪雨災害の再現, 河川技術論文集, 第8巻, pp.121-126, 2002.
- 2) 戸田圭一, 井上和也, 村瀬賢, 市川 温, 横尾英男: 豪雨による都市域の洪水氾濫解析, 土木学会論文集, No. 633/II-53, pp.1-10, 2000.
- 3) 川池健司, 井上和也, 戸田圭一, 野口正人: 低平地河川流域での豪雨による都市氾濫解析, 土木学会論文集, No. 761/II-67, pp.57-68, 2004.
- 4) 川池健司, 丸山寛起, 吉本静磨, 野口正人: 諫早平地における氾濫解析とその浸水被害軽減策への応用に関する研究, 水工学論文集, 第49巻, pp.565-570, 2005.
- 5) 川池健司, 市川 温, 丸山寛起, 内藤正顔: 松江低平地における内水氾濫の危険性とその浸水被害軽減策に関する検討, 河川技術論文集, 第12巻, pp.103-108, 2006.
- 6) 秋山壽一郎, 重枝未玲, 田邊武司: 自由表面・圧力流れのダイナミックネットワークモデルの構築と都市域下水道網への適用, 河川技術論文集, 第14巻, pp.241-246, 2008.
- 7) 秋山壽一郎, 重枝未玲, 田邊武司: GISを用いた氾濫解析データの作成と飯塚市を中心とした都市域の氾濫解析, 河川技術論文集, 第14巻, pp.235-240, 2008.
- 8) 秋山壽一郎, 重枝未玲, 田邊武司: 下水道網を考慮した飯塚市街地の氾濫解析, 水工学論文集, 第53巻, pp.829-834, 2009.
- 9) 重枝未玲, 秋山壽一郎, 小園裕司: 遠賀川流域の分布型流出解析と複数の支川を考慮した平面2次元洪水追跡, 河川技術論文集, 第16巻, pp.443-448, 2010.
- 10) 秋山 壽一郎, 重枝未玲, 小園裕司: 流域特性を考慮した都市域氾濫解析モデルと都市域での浸水プロセスの予知, 水工学論文集, 第54巻, pp.919-924, 2010.

(2010. 9. 30受付)