

外水・都市内水ネスティング解析による 流域治水とコンパクトシティ融合の影響評価

富山県立大学 教授 呉修一

概要：

本研究の目的は、流域治水とコンパクトシティ政策を融合することで、洪水被害の軽減と効果的な街づくりを推進することである。よって、富山県河川および富山市排水区における内水氾濫機構の解明と各種流域治水オプションの効果検証に向けて、コンパクトシティの現状把握、現地調査による排水区の内水氾濫モデルの構築、田んぼダムの評価、居住誘導による洪水被害軽減効果の評価を行った。従来型流域治水オプションの外水氾濫に対する効果の検証では、田んぼダムおよび植生伐採が良好な洪水被害軽減効果を得ている。また、都市河川および内水氾濫でも田んぼダムの実施により河川各地点で流量を 5%から 15%程度軽減することに成功している。内水氾濫でも浸水深と範囲を、上流側でわずかながら軽減できることが確認された。最後に、居住誘導を水害リスクの高い地域で実施することで洪水被害額の軽減に寄与することが示されたが、今後は居住誘導に向けてより実現可能なシナリオの検討が必要となるなど、2年目の研究実施に向けて様々な課題を明らかにすることが出来た。

キーワード: 流域治水, コンパクトシティ, 田んぼダム, 洪水氾濫解析

1. はじめに

昨今の地球温暖化の進行などに伴い、豪雨や洪水災害が日本全域で頻発している。富山では2023年6月には局所的な短時間強降雨により2級河川白岩川での堤防決壊被害や各地で内水氾濫被害が生じた。更に2023年7月に富山で初めて観測された線状降水帯により、小矢部川で既往最大水位を観測するとともに各地で内水氾濫被害が生じている。このように富山県では局所豪雨による内水被害などが頻発しており、地球温暖化に適応した内水氾濫対策が強く求められている。

昨今日本ではこのような豪雨災害に対処するため、流域治水の推進が進められている。「流域治水」とは、気候変動の影響による水災害の激甚化・頻発化等を踏まえ、堤防の整備、ダムの建設・再生などの対策をより一層加速するとともに、集水域（雨水が河川に流入する地域）から氾濫域（河川等の氾濫により浸水が想定される地域）にわたる流域に関わるあらゆる関係者が協働して水災害対策を行う考え方である¹⁾。流域治水の対策のなかで、①氾濫をできるだけ防ぐ・減らすための対策では、「田んぼダム」などの雨水貯留浸透施設の整備が推進されており、②被害対象を減少させるための対策では、リスクの低いエリアへ誘導/住まい方の工夫として、土地利用規制

や居住誘導、移転促進などが挙げられている。

土地利用規制や居住誘導などと都市の浸水対策を融合することが昨今重要と指摘されており、河川計画と都市計画が本気となって水害被害の軽減と街づくりを共同で議論する必要性が認識されている。特に今後の人口減少社会を想定した場合、コンパクトシティの重要性が再度注目されている。気候変動での水害の激甚化と地方の人口減少の両者に対応するため、コンパクトシティと浸水対策を融合して議論することが重要となってくる。よって、本研究の目的は、流域治水とコンパクトシティ政策を融合することで、洪水被害の軽減と効果的な街づくりを推進することである。水害レッドゾーンの明示を通じた住民の居住誘導、その後の荒廃地の保全を通じた、洪水被害の軽減を、今後の人口減少・地球温暖化への適応策として本研究で取り組む。

2. 対象流域の概要

本研究で対象とする富山県の1級河川およびコンパクトシティの推進が進められている富山市の現状を紹介する。

(1) 対象流域の概要

本研究では富山県を流れる一級河川（小矢部川・庄川・神通川・常願寺川・黒部川）を対象とする（図-1）。流域面積は小矢部川667 km²、庄川1,189 km²、神通川2,720 km²、常願寺川368 km²、黒部川682 km²であり、庄川流域と神通川流域は岐阜県にまたがる。そのため神通川と庄川では富山県内で降雨がなくとも岐阜県で豪雨が発生すると流量が増加する。

各河川の土地利用割合を表-1に示す。富山県全体の土地利用の多くは山地であり、次いで水田面積が多い。流域ごとに土地利用分類を見ると山地がほとんどを占めているが小矢部川では水田の土地利用が多く、神通川では畑地の土地利用が多い。また、田んぼダムを議論するうえで、水田は平野部での広がり確認され、水田割合が小矢部川流域で34%、神通川流域で10%と、この2流域では貯留効果が期待できる可能性がある。

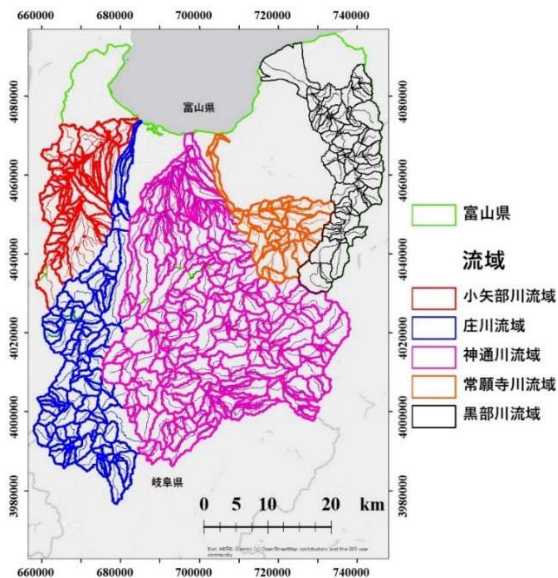


図-1 対象流域の位置関係

表-1 河川流域の土地利用割合

	山地 (%)	都市 (%)	水域 (%)	水田 (%)	畑地 (%)
小矢部川 流域	45.8	14.7	2.2	33.5	3.8
庄川流域	91.2	2.0	3.1	1.3	2.4
神通川流 域	62.5	12.1	0.1	9.7	15.6
常願寺川 流域	87.3	2.5	5.2	3.4	1.6
黒部川流 域	80.2	2.4	6.8	2.6	7.9

(2) 富山市の現状について

富山市は少子高齢化に伴う税収の減少や郊外化したインフラの維持管理・車に依存した交通網といった多くの課題を抱えている。富山市はこれらの課題に居住地域を集積するコンパクトシティ政策で対応している。規制ではなく、公共交通の充実や都市機能誘導区域・居住誘導区域を魅力ある町にすることで、移転を推進している。全国に先駆けて Light rail Transit（次世代型路面電車システム（LRT））を導入しており、富山駅を中心とした交通網を構築している。近年は富山駅周辺の再開発や新幹線の開通、ライトレールの環状線化により、公共交通の利用者が増加しておりコンパクトシティの成果が出始めていると考えられる。

しかし、洪水ハザードマップ（図-2）では、岩瀬浜から富山駅にある居住誘導地域で氾濫被害が予測されている。計画規模降雨におけるハザードマップでは神通川の右岸側において、河川に沿うように0.5～3m程度の浸水が予想されている。この範囲内には都市機能誘導区域があり、想定された氾濫が起こると甚大な被害が出ることを示している。このように、富山市の居住誘導地域は公共交通を基準に配置されているため、水害リスクの考慮にはいたっていないのが実情である。よって、本研究では居住誘導によりどの程度洪水被害額を軽減することが可能かを検討するとともに、流域治水により着実に水害リスクを下げるのが根本的には重要であるため、従来流域治水の評価と都市内水氾濫での流域治水の効果の定量的な評価を実施する。

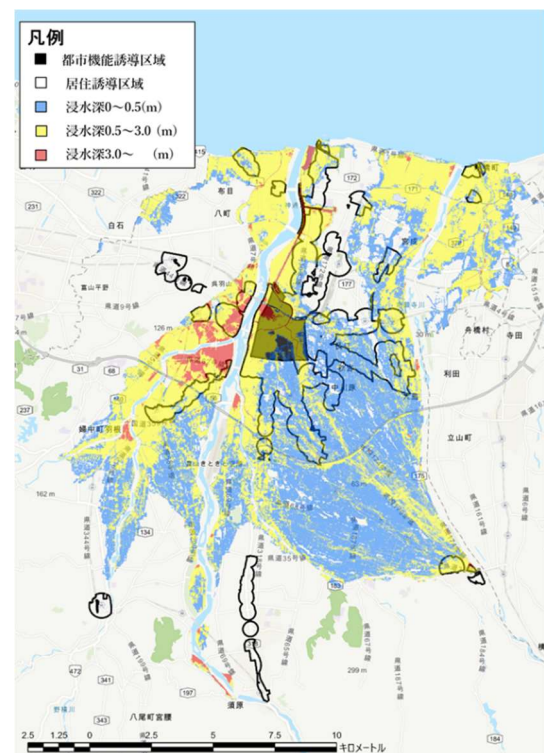


図-2 外水ハザードマップと誘導区域の分布

3. 降雨流出・洪水氾濫解析の概要

従来流域治水オプションの評価に向けて外力の設定と降雨流出・洪水氾濫モデルの適用概要を示す。

(1) モデルの概要

本研究では降雨流出モデルに、菊地・呉²⁾による土壌・地形特性に基づく降雨流出計算手法を使用する。本手法は、サブ分布定数系のモデルであり、サブ流域を集中定数系で解いたあと、河道部の洪水追跡を一次元不定流計算で実施することで、流域での空間分布と河道追跡を考慮している。河道部の洪水追跡計算には、MIKE FLOOD (DHI Water and Environment 社) を使用し一次元不定流計算を行った。氾濫域における洪水氾濫解析には二次元不定流計算を行った。

河道部の粗度係数は藤下・呉³⁾の手法に基づき、NDVI より算定している。対象外力には d4PDF の過去実験・4℃ 上昇実験における降雨量データより算定された河川流量を使用している。

(2) 洪水氾濫解析結果

図-3 に過去実験における最大浸水深の空間分布、図-4 に 4℃ 上昇実験における最大浸水深の空間分布を示す。



図-3 過去実験における最大浸水深[m]の空間分布

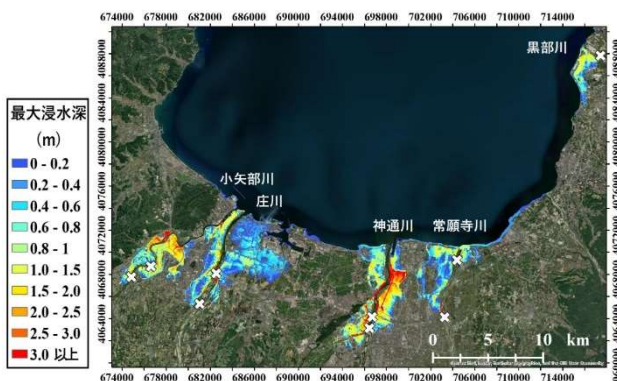


図-4 4℃ 上昇実験における最大浸水深[m]の空間分布

過去実験における氾濫状況を見ると、小矢部川蛇行部、神通川右岸側の標高の低くリスクの高い場所で顕著な浸

水が確認され、富山市の市街部を氾濫域に有することがわかった。また、庄川左岸沿いと常願寺川下流部での氾濫も確認される。黒部川においては、2 級河川の片貝川に向かって広がりを見せている。図-4 に示されるよう地球温暖化による流量増加に伴い、4℃ 上昇では氾濫範囲が拡大していることが明らかである。特に標高の低い庄川右岸と神通川で顕著に表れている。

4. 従来型流域治水オプションの評価

対象の 1 級河川で田んぼダムなどの従来型流域治水オプションがどの程度効果的か、洪水被害額低減効果から評価する。これにより富山の河川で有効な対策を検討する。

(1) 各種流域治水オプションの概要

流域治水オプションには、河道内植生伐採、田んぼダム、グリーンインフラの活用、森林保全管理の 4 つを評価する。河道内植生伐採では、植生伐採が行われた状態は高水敷の粗度係数を一律 0.03, 0.02 に低下させることで植生伐採を表現し流出抑制効果を評価する。田んぼダムは、Chai ら⁴⁾の 1 次元田んぼダムモデルを使用して評価する。グリーンインフラの活用では、流出モデルの各サブ流域における土地利用割合を考慮し、都市部の一部を緑化することでグリーンインフラとして表現し、流出抑制効果を評価する。森林保全管理では、流出モデルの土地利用割合をし、森林保全管理の有効性を表現するために、山地が荒廃することでの被害拡大を表現し、洪水変化を評価する。

(2) 洪水被害軽減額での各流域治水オプションの評価

上記の各種適応策の効果を、各流域の被害額の軽減率 (%) で評価した。洪水被害額は一般的に用いられる治水経済調査マニュアルの手法を用いて算定した。各種パラメータや条件などは複数を想定し、各条件で結果をプロットしている。一例として 5 河川 (小矢部川、神通川、庄川、常願寺川、黒部川) での効果を図-5 に示す。流域に多くの田んぼ (33.5%) を有する小矢部川では田んぼダムの効果が大きく (図中、田んぼダムの実施率は、50%, 30%, 10% で変化させ、小矢部川以外は 50% のみ計算を実施した)、神通川、小矢部川で河道植生伐採の効果が大きい (図中、植生伐採の効果は粗度係数を 0.03, 0.02 で変化) 事が確認された。しかしながら、黒部川では各種適応策の効果が殆ど見られないという結果となったため、今後その他の適応策の検討が必要となってくる。

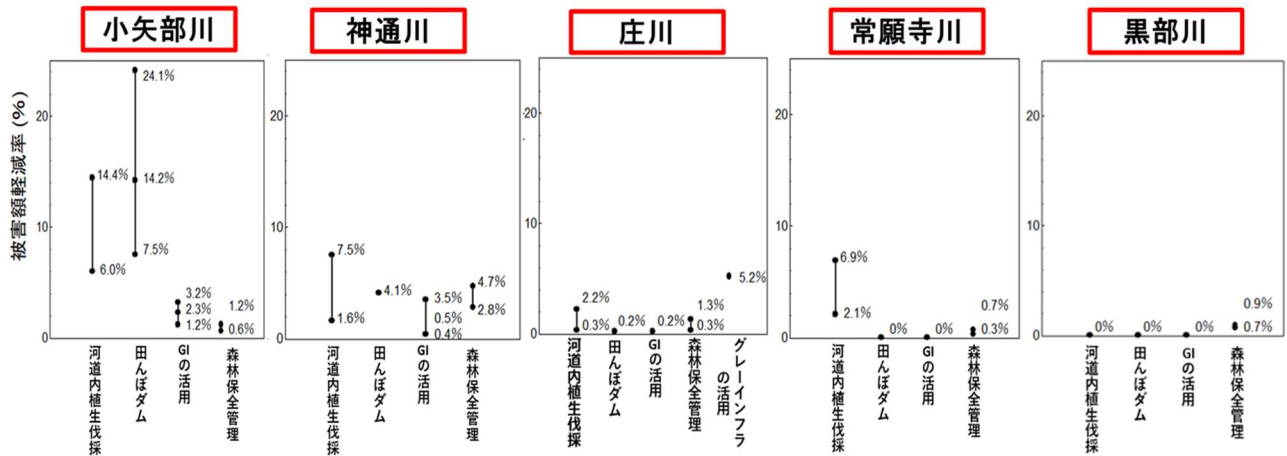


図-5 各河川における各種適応策の洪水被害額軽減率(%)

5. 都市内水氾濫への田んぼダムの効果

本研究では富山市を対象とした内水氾濫の数値モデリングを構築することで、田んぼダムの効果を検証するなど、今後の富山市での内水氾濫への対策案の検討も行っている。これは居住誘導地域の内水氾濫リスクを下げることで居住誘導先の安全を確保するとともに、居住誘導の促進にもつなげられる可能性があるためである。

複数排水区を対象に内水氾濫モデルの構築を行い、MIKE URBAN モデルを適用している。本モデルの検証を行ったうえで、田んぼダムモデルを適用している。手法や対象排水区などの詳細は割愛するが、都市小河川では田んぼダムの実施によってピーク流量低減率が 5～15%程度となることが分かった。次に田んぼダムが内水氾濫に与える影響評価では、田んぼダムの実施によって浸水範囲が減少し、それに伴い浸水深の低下も確認できた。しかしながら、今後は様々な降雨パターンや他の排水区での解析が必要となるなど、検証ケースの増加が必要となっている。

6. 居住誘導による洪水への適応効果の評価

本章では、本研究の主目的である流域治水とコンパクトシティの融合を目指して、外水氾濫による直接被害額が居住誘導によってどの程度低減することが出来るかに着目し、数値実験より評価した事例の一例を示す。上記で算定した結果の一例である、神通川右岸の洪水氾濫解析結果、浸水域の資産額・被害額を図-6 に示す。この解析では外力として神通川の想定最大規模流量である 1000 年確率流量程度のものを用いており、破堤地点は被害額が最大となるような箇所を選定している。また資産額、被害額の算定は治水経済調査マニュアルを基に行われており、浸水域内の資産額に、浸水深・対象資産別に定められている被害率を掛け合わせることで被害額の算定を行っている。結果として、神通川右岸では標高の低

くリスクの高い場所で顕著な浸水が確認されることや、浸水域内では家屋の資産額が最も高いことが分かっている。

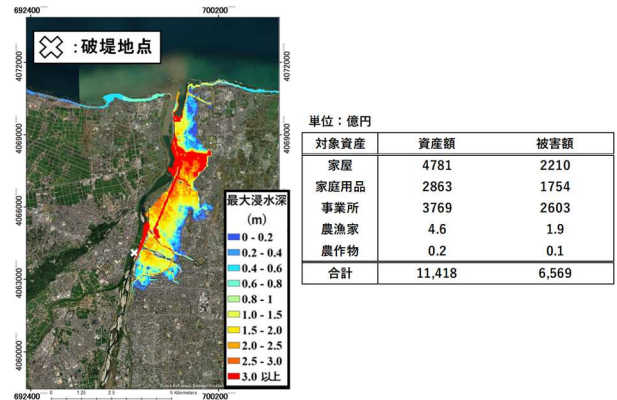


図-6 神通川右岸の浸水計算結果と資産額・被害額

上記のように神通川右岸で洪水氾濫が起こった場合、多大な被害をもたらすことが明らかとなっている。そのため浸水域内の家屋には居住誘導による事前避難を促す必要がある。しかしながら浸水域内にあるすべての家屋を対象に郊外移住を促進することは実現可能性が低い点が課題として挙げられる。そこで今回の検討では浸水深が 3 m 以上の特に浸水被害が大きくなる地点のみを対象として、浸水域の広がりが見られない居住誘導地域に移住していただくことを、まずは検討した (図-7)。

方法として浸水深が 3 m 以上の地域の全ての家屋・家庭用品資産額を浸水が広がっていない居住誘導区域に移動させる (Case 1)、半数が移住したとして家屋・家庭用品の資産額を 0.5 倍する (Case 2) を検討した。ただし、再度の洪水氾濫解析は行っておらず、被害率の変動はないものとする。本検証で算定した被害額の結果を表-2、表-3 に示す。

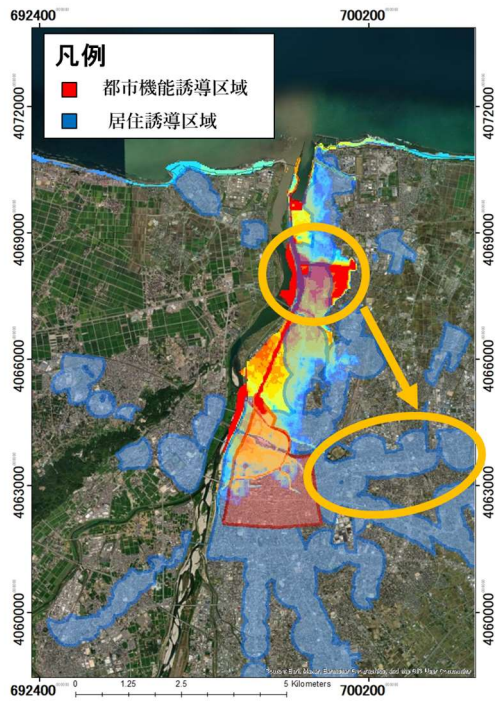


図-7 居住誘導のイメージ

表-2 Case 1(資産額が全て移動)の被害額の変化

単位: 億円

対象資産	被害額	Case1 被害額	軽減率
家屋	2210	1425	36%
家庭用品	1754	1591	9%
事業所	2603	2603	0%
農漁家	1.9	1.9	0%
農作物	0.1	0.1	0%
合計	6,569	5,621	14%

表-3 Case 2(資産額の半分が移動)の被害額の変化

単位: 億円

対象資産	被害額	Case2 被害額	軽減率
家屋	2210	1647	25%
家庭用品	1754	1664	5%
事業所	2603	2603	0%
農漁家	1.9	1.9	0%
農作物	0.1	0.1	0%
合計	6,569	5,916	10%

結果として居住誘導を行うことによって Case 1, Case 2 ともに被害額の低減につながる事が分かった。また被害額軽減率は Case 1 では 14%, Case 2 では 10% となった。一方で今回の検討では、外水氾濫を対象にしており、内水氾濫までは考慮されていない。加えて家屋の移動によって氾濫域の粗度係数が変わるため浸水範囲、浸水深が変化することが考えられる。

今回の検討方法のように半数以上の移転や家屋倒壊等氾濫想定区域からの全家屋の移転などの実現は難しいと考えられる。「環境研究総合推進費 2-1805 成果 (日本版 SSP 別土地利用シナリオ)」(Yoshikawa ら⁵⁾)において、

将来的な土地利用の変化を人口動態から推定されているが、これによると SSP1 の 2015~2050 年の間で、富山駅をはじめとする浸水範囲内では都市の割合(本研究では建物用地、道路、鉄道を都市と分類している)は、1.5~2.2 割程度減少することが予想されている。また人口に関しては、県全域で 20 万人程度減少することが示されており、浸水範囲内では平均 500 人程度減少することが予測されている。(図-8) 本検討ではコンパクトシティにより 5 割・10 割、居住誘導が進んだと仮定して計算を行ったが、上記の研究成果を踏まえると、被害額の軽減率が過大評価と考える必要がある。

今後の検討では対象とする外力の規模を下げることで、多くの破堤地点を設けることで、居住誘導が必要な地域を明確化し、効率的な居住誘導の実施を検討する必要がある。また将来の土地利用変化の予測を用いて計算することで、より実現可能性の高い検討を行う必要がある。

本研究で検討したように浸水リスクの高い区域から居住地を移転することができれば洪水被害額の軽減につながる。しかしながら、これら防災集団移転を大規模水害が生じる以前に一気に実施するのは、現状不可能に近いと考える。将来の人口減少に適応しつつ、コンパクトシティの推進に加えて、水害リスクを考慮した「適散適集」社会の形成に向けて徐々に居住誘導を推進する必要がある。今後はコンパクトシティの推進シナリオなどを検討し、現実的な将来シナリオの検討が必要となってくる。これらには R6 年度に取り組む予定である。

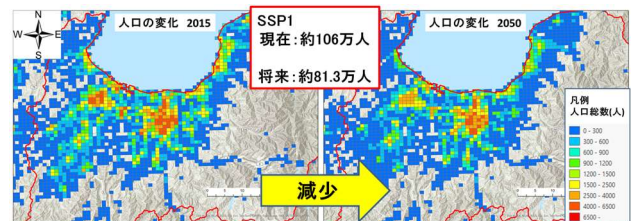


図-8 富山県人口の減少

7. まとめと R6 年度に実施する内容

本研究では、富山県河川および富山市排水区における内水氾濫機構の解明と各種流域治水オプションの効果検証に向けて、コンパクトシティの現状把握、現地調査による排水区の内水氾濫モデルの構築、田んぼダムの評価を行ったものである。

まず従来型流域治水オプションの外水氾濫に対する効果の検証では、田んぼダムおよび植生伐採が良好な洪水被害軽減効果を得ている。特に富山県河川では小矢部川でこれらの効果が高いことが確認された。しかしながら、黒部川などでは効果がある流域治水オプションは確認されず、今後も更に多くのオプションの検討が必要と考えている。また、都市河川および内水氾濫への田んぼダムの効果を定量的に評価した。田んぼダムの実施により都

市河川各地点で流量を 5%から 15%程度軽減することに成功している。内水氾濫でも浸水深と範囲を、上流側でわずかながら軽減できることが確認された。しかしながら、これらも今後降雨パターンの変化や他の排水区での検討が必要となってくる。

コンパクトシティとの浸水対策の融合に関しては大規模水害などが生じていない現時点では、居住誘導の推進が難しい状況である。しかしながら、富山市の居住誘導区域は水害リスクが高いため、居住誘導区域を対象とした浸水対策を着実に実施する必要があることを再認識できた。居住誘導を促進するためには、将来シナリオの策定が必要な点と洪水被害額以外の指標の開発が必要であると考えられる。これにより、富山市ではコンパクトシティを中心とした街づくりに、「適散適集なまちづくり」を展開していくことで、水害リスクの増加、人口減少に適応していくことが重要と考えられる。2 年目には過去の都市の変遷と洪水被害額の関係、将来の都市の拡張シナリオと洪水被害額の関係など、より現実的なシナリオで検討を行う必要が大きい。

以上、本研究 1 年目で洪水氾濫解析の実装などが基本的なものを予定どおり実施することが出来た。2 年目には、シナリオの構築や新しい評価指標の開発を通じて、より現実的な流域治水とコンパクトシティの融合に取り組んでいく。また従来型流域治水オプションなどでは更にグリーンインフラに着目し、GX と流域治水の融合に加えてコンパクトシティの推進もしくは適散適集社会と融合することにより、今後の気候変動および人口減少社会への適応に向けた様々な検討を実施していく予定である。そのための基礎準備は 1 年目で十分達成できたと考えている。

謝辞

本研究は国土技術研究センター第 24 回研究開発助成

の補助を受けて実施したものである。コンパクトシティと流域治水の融合に向け、はじめの一步である本研究に助成頂いたこと、心より感謝申し上げます。本研究の遂行にあたり、富山河川国道事務所、富山県河川課、富山市建設部にデータの提供など様々な面でご支援を頂きました。また、富山県立大学工学部環境・社会基盤工学科の防災水工学研究室（呉研究室）学生には現地調査に多く従事頂きました。末尾ながら、ここに記して皆様のご協力に感謝いたします。

参考文献

- 1) 国土交通省水管理・国土保全局治水課: 流域治水施策集 目的とそれぞれの役割, Ver.2.0 水害対策編, 2023.
https://www.mlit.go.jp/river/pamphlet_jirei/kasen/gaiyou/pamf/sesaku/pdf/r503_sesaku_01.pdf (2024 年 4 月 26 日閲覧)
- 2) 菊地大智, 呉修一: 富山県河川における洪水氾濫解析を通じた各種適応策の洪水被害低減額の評価, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.78, No.2, pp.1_787-1_792, 2022.
- 3) 藤下龍澄, 呉修一: 地球温暖化による 1.5℃上昇と各種適応策が富山県河川の洪水・侵食リスクに与える影響評価, 土木学会論文集, Vol.79, No.27, 23-27034, 2023.
- 4) Y. Chai, Y. Touge, K. Shi and S. Kazama: Evaluating Potential Flood Mitigation Effect of Paddy Field Dam for Typhoon No.19 Using Rainfall Runoff Inundation Model in the Naruse River Basin, Journal of Japan Society of Civil Engineers(B1), Vol.76(1), pp.295-303, 2020.
- 5) Yoshikawa, S., Takahashi, K., Wu, W., Matsubashi, K., and Mimura, N.: Development of common socio-economic scenarios for climate change impact assessments in Japan, Geosci. Model Dev. Discuss. [preprint], <https://doi.org/10.5194/gmd-2022-169>, in review, 2022.