

流域治水とコンパクトシティの融合を通じた適散適集 グリーン社会への展開とその治水安全度評価

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の融合を通じた「適散適集」なグリーン社会への展開を提案し、その治水安全度を評価することである。その第一歩として、富山県河川および富山市内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を検証するため、コンパクトシティの現状把握、二つの排水区の内水氾濫モデルの構築、流域治水オプションとしてのグリーンインフラの評価、居住誘導による洪水被害・洪水被災人口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、費用便益分析を行った。また、内水氾濫では雨庭、田んぼダム、校庭貯留を評価することが出来た。最後に、居住誘導を富山県全域で展開することで、洪水被害額および洪水被災人口を軽減できることが示されたが、今後の居住誘導の推進に向けては、大きな水害が発生していない現状では実施が難しく、長期的な取り組みが必要であることが改めて確認された。

キーワード：流域治水、コンパクトシティ、グリーンインフラ、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。2024 年 1 月 1 日の能登半島地震・津波に続いて、2024 年 9 月に奥能登地方で線状降水帯に伴う甚大な豪雨災害が生じ、中小河川の複合災害として今後の地方の中小河川における治水対策に課題を明示している。奥能登豪雨からの復旧・復興に向けては、被災地全域を復旧するのではなく、地域を選定して復旧を急ぐべきなどの指摘がなされるなど、今後の人口減少、気候変動を考慮した場合、水害リスクと地域の住まい方に本気で向き合う必要が生じている。

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も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（国土交通省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。奥能登豪雨後の復旧復興での議論を先述したように、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今まさに求められている。

筆者は、2023 年度研究課題「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」において、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を行っている。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、実施費用を考慮した検討は行われておらず、次のステップとして費用便益分析での評価が必要である。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坪野川などの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、これらも他の集水域での検討が必要不可欠である。

コンパクトシティと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、居住誘導の推進は極めて難しい状況である。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。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、更には富山市以外への展開が重要となってくる。これにより、富山県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。

以上、本研究課題の2年目は、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むことを目的とする。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する。よって、本研究の目的は、流域治水とコンパクトシティの融合を通じた「適散適集」なグリーン社会への展開を提案し、その治水安全度を評価することである。

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667km²、庄川1,189km²、神通川2,720km²、常願寺川368km²、黒部川682km²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。

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が確認され、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。

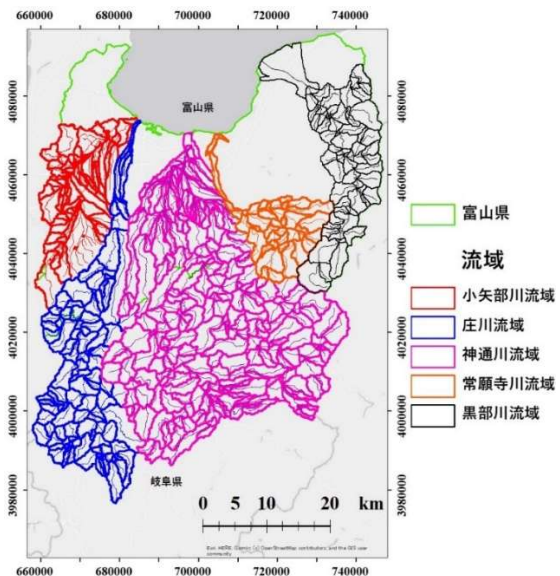


図-1 対象流域の位置関係

(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、浸水想定区域と居住誘導区域を重ねてみると(図-2)、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浸水想定区域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および洪水被災人口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ことに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。

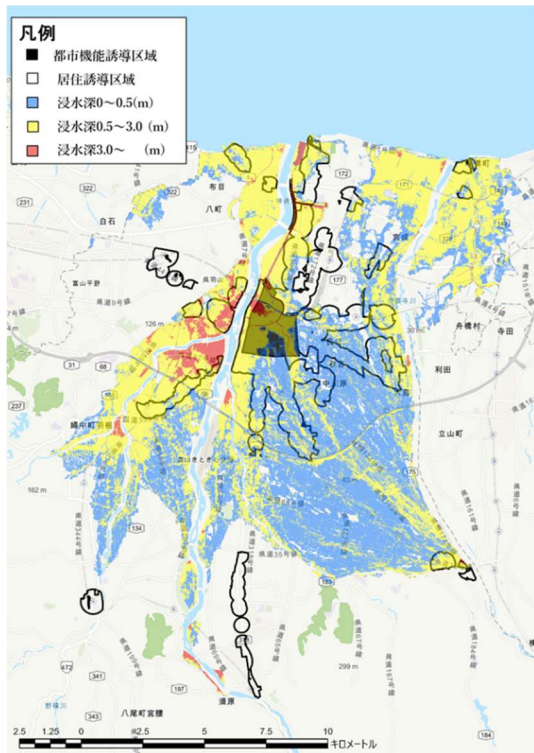


図-2 浸水想定区域と誘導区域の分布

3. 流域治水推進のためのアンケート調査

アンケート調査を実施することで、流域治水への貢献の意思や、居住誘導に従う意思、それらを実現するために必要な施策などを明らかにする。アンケート調査は2025年2月下旬から3月末にかけて、水災害に対する意識調査に関するアンケート調査票を作成し、小矢部川の河川堤防沿いから左右岸約500メートル以内の居住地区を対象に、計1,000通をポスティングし、394の回答を得た。アンケート調査結果より、まず水害リスクの低い箇所への移転の意思は相当低いことが再認識された。長期的に水害リスクを明示するとともに行政からの働きかけと一緒に徐々に徐々に居住誘導を進めていくことが重要と考えられる。また、流域治水への協力に関しては、多くの人が協力したいと考えていることが明らかとなった。上下流問題などが課題としてあげられているが、そもそも流域治水の認知度が低く、協力の仕方がわからないのが課題ではないかと思われる。流域治水の認知度をあげ、どのような対応をすれば洪水被害の軽減に寄与できるのか、それらを地域レベルで周知していくことが重要である。

4. 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、4℃上昇時の150、350年確率流量時の最大浸水深の空間分布を示す⁴⁾。

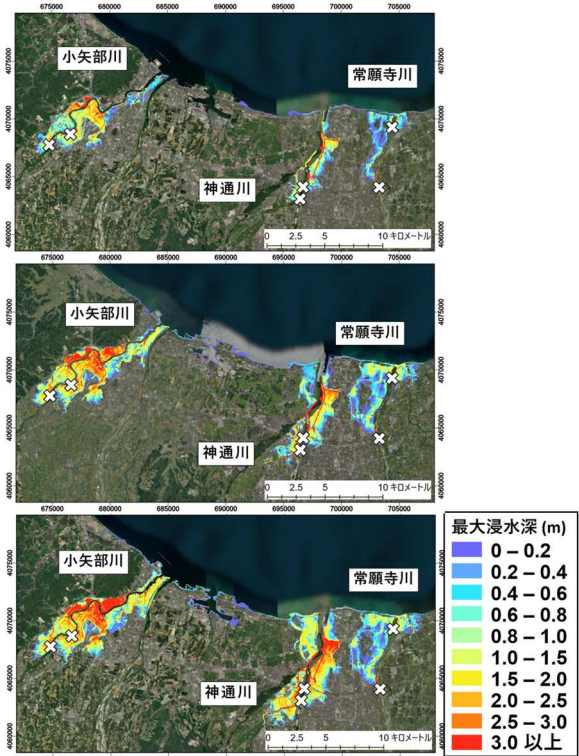


図-3 最大浸水深（上から過去実験、4℃上昇実験150年確率流量、4℃上昇実験350年確率流量）（沼澤ら⁴⁾）

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、常願寺川下流部での氾濫も確認される。

図-3 に示す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。

5. 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、植生伐採をグリーンインフラとして評価した。費用便益分析を行うことでコストを考慮した計算を行う。

4℃上昇実験における適応策の費用対効果の結果を表-1 に示す。全体として植生伐採より田んぼダムの費用対効果が高い結果となった。これは、富山県において田んぼの分布の広がり大きいことや、田んぼダムの設置、維持にかかる費用が小さいことが要因だと考えられる。それぞれを詳しく見ると、植生伐採では、河道内粗度が0.03のケースと0.02のケースで倍の効果がみられるため、植生に関して伐採を行うほど費用対効果が高くなると考えられる。また本研究で行った伐採コストの考慮方法では植生の処理運搬コストは無視されているため、それらを加えることで小矢部川や神通川では評価値が1.0に近づくとして予想できる。田んぼダムでは、小矢部川・常願寺川において、実施率50%より100%の方が高い値を示しており、田んぼダム実施率が高いほど費用対効果が高いことが明らかとなった。しかしながら神通川では、実施率100%より50%の方が高い費用対効果を得られた。これらの結果から富山の適応策には田んぼダムが適していると考えられる。しかし、植生伐採のコストを今後バイオマス転用などで抑えることで費用対効果を上昇させることや、河川全域で伐採するのではなく、洪水低減効果のある個所をターゲットとして伐採することなどの対応を検討することでコストを大幅に減らすことが可能となる。これらの検討が今後必要となる。また、費用対効果の算定において、貨幣の現在価値化を行っていないため、費用便益が実際よりも高く算定されている点は注意されたい。これらは今後精査される必要がある。

表-1 4℃上昇における費用対効果の結果（沼澤ら⁴⁾）

		小矢部川	常願寺川	神通川
植生伐採	河道内粗度(0.03)	1.51	0.14	1.51
	河道内粗度(0.02)	3.13	0.22	2.81
田んぼダム	実施率50%	12.6	2.01	8.56
	実施率100%	14.9	2.61	6.01

6. 都市内水氾濫での各種オプションの評価

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、田んぼダムなど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。

田んぼダム、雨庭、校庭貯留のモデル化と被害低減効果を確認した。2つの地域においては、それぞれの流域治水オプションに特徴があるため、適切な被害低減効果により組み合わせる必要があると考える。また、対象領域を田んぼが多く有する2つの地域のみとしているため、他排水区での解析・比較検討により各地域に適した流域治水オプションを提案することが重要だと考える。

7. 居住誘導による洪水への適応効果の評価

居住誘導シナリオを策定した。まず、現状のコンパクトシティが促進され、居住誘導区域内への移転が進んだケースを考えた。これにより現状のコンパクトシティがもつ移転可能面積と被害低減効果を確認した。条件として、居住誘導区域内の田んぼが宅地化され、水害リスクの高い地域から移転していくものとし、これをCase1とした。Case2は、対象領域を現状のコンパクトシティから拡大し、全てのバス停から300m以内+居住誘導区域内の浸水被害が予測されていない田んぼが宅地化され、水害リスクの高い地域から移転していくことを想定した。

次に、対象領域内において一定以上の被害が予測されている地域から移転した場合を考えた。これにより、被害を基準とした場合に、必要な移転面積と被害低減効果を確認した。家屋倒壊等氾濫想定区域から全ての家屋が移転した場合をCase3、浸水深3m以上の地域から移転した場合をCase4としている。Case3,4における解析では移転先を設定しておらず、浸水がない箇所へ移転したものとしている。

居住誘導先を基準としたCase1, Case2, 居住誘導元を基準としたCase3, Case4において、被害額・被災人口を算出し被害低減効果を確認した。以下、表-2,3に解析結果を示す。

被害額を基準とした被害低減効果を確認すると、Case1, Case2は移転面積に対する被害低減効果大きいことが分かる。Case1では5%, Case2においては25%の被害低減効果を確認できたが、このケースでは移転先・移転元の選定基準により過剰な結果となっている。移転先選定の際に全てのバス停を対象としており、運行本数の少ない路線が対象に含まれている。移転元選定の際には被害額の大きいメッシュから順番に移転させており、最も効率的な移転を行った場合を想定している。特に、被害額のCase2, Case3を比較すると、Case2の被害低減効果はCase3の倍以上あるのに対して移転面積はCase3の方が大きい。Case3, Case4はCase1の10倍規模の移転面積が必要であるが、被害低減効果は2~3倍程度しか変化しないことが分かる。また、Case4は移転面積が広いCase3よりも被害低減効果が大きいという結果になっており、移転元の選定が重要であることがわかる。

被災人口においては、Case1においても浸水深3.0m以

表-2 各ケースにおける被害額の被害低減効果

資産分類	被害額(億円)								
	現状	Case1		Case2		Case3		Case4	
	被害額	被害額	低減率	被害額	低減率	被害額	低減率	被害額	低減率
家屋	11610	10844	7%	8239	29%	9784	16%	9391	19%
家庭用品	11813	11159	6%	7945	33%	10597	10%	10291	13%
事業所	5836	5836	0%	5836	0%	5836	0%	5836	0%
農業家	30	30	0%	30	0%	30	0%	30	0%
農作物	45	45	0%	45	0%	45	0%	45	0%
合計	29334	27869	5%	22050	25%	26292	10%	25548	13%
移転面積(ha)	—	125		2228		2731		1413	

表-3 各ケースにおける被災人口の被害低減効果

浸水深(m)	被災人口(千人)								
	現状	Case1(コンパクトシティ)		Case2(+バス)		Case3(家屋倒壊想定)		Case4(浸水深3m)	
	被災人口	被災人口	低減率	被災人口	低減率	被災人口	低減率	被災人口	低減率
0～0.5m	32	32	0%	32	0%	29	9%	32	0%
0.5～3.0m	271	271	0%	238	12%	241	11%	271	0%
3.0～m	7	6	16%	0	100%	6	16%	0	100%
合計	310	309	0%	270	13%	276	11%	303	2%
移転面積(ha)	—	125		2228		2731		1413	

表-4 各ケースにおける被害額の被害低減効果 (県全体)

被害額(億円)		現状	Case1(コンパクトシティ)		Case2(+バス)		Case3(家屋倒壊想定)		Case4(浸水深3m)	
		被害額	被害額	低減率	被害額	低減率	被害額	低減率	被害額	低減率
富山市	合計	29334	27869	5%	22050	25%	26292	10%	25548	13%
	移転面積(ha)	—	125		2228		2731		1413	
+射水・高岡	合計	41978	—	—	22466	46%	37858	10%	36129	14%
	移転面積(ha)	—	—		5603		4406		2594	
富山県全域	合計	59494	—	—	24587	59%	54921	8%	52319	12%
	移転面積(ha)	—	—		11220		7400		3200	

表-5 各ケースにおける被災人口の被害低減効果 (県全体)

被災人口(千人)		現状	Case1(コンパクトシティ)		Case2(+バス)		Case3(家屋倒壊想定)		Case4(浸水深3m)	
		被災人口	被災人口	低減率	被災人口	低減率	被災人口	低減率	被災人口	低減率
富山市	合計	310	309	0%	270	13%	276	11%	303	2%
	移転面積(ha)	—	125		2228		2731		1413	
+射水・高岡	合計	499	—	—	404	19%	453	9%	453	9%
	移転面積(ha)	—	—		5603		4406		2594	
富山県全域	合計	503	—	—	331	34%	456	9%	456	9%
	移転面積(ha)	—	—		11220		7400		3200	

上の半分は低減できていることが分かった。しかし、こちらも被害額の算出法と同様に最も効率的な移転を想定しているため、移転元を最も効率的に選定した場合の結果である。Case2 においては最も高い被害低減効果を確認できたが、全てのバス停を対象としており移転元も最も効率的になるよう選定していることに留意していただきたい。また、Case3 の解析では全体の 15%ほどの被害低減効果が確認できたが、Case1 と比べると 20 倍程度の移

転面積が必要である。つまり、現状のコンパクトシティでは移転先容量が不足している。

居住誘導による解析で現状の居住誘導区域内だけでは移転面積が不足していることが分かった。そのため、対象領域を拡大して考えたケースを考える。富山市に射水市と高岡を含めた地域・富山県全域への拡大を考える。

主要な鉄軌道として射水市にはあいの風富山鉄道が通っており、高岡は他に JR 城端線や JR 氷見線、万葉線が

通っている。また高岡においては新幹線停車駅もあり、富山県における交通の要所といえる。対象領域を拡大しバス停から 300m 以内の浸水が見られない田んぼを移転先とした Case2 と、家屋倒壊等氾濫想定区域を移転元とした Case3 の浸水深 3m 以上を移転元とした。

解析結果を、表-4,5 に示す。Case2 の移転面積は富山市を対象としていた際には Case3 よりも小さかったが、対象領域を拡大したケースでは Case3 よりも大きい。富山県全域を対象としたケースでは Case3 の 1.5 倍程度の移転可能面積であった。また、Case1 の被害低減効果が Case2 では射水・高岡市を追加した領域で被害額の被害低減効果が 46%・富山県全域で 59%とおおよそ半分程度であった。もちろん、このケースでは移転元・移転先の選定が最も理想的な場合を想定しているが、富山市内を対象に場合よりも被害低減効果が大きい。Case3, Case4 を比較すると、対象領域が異なっても移転面積の小さい Case4 の方が Case3 よりも被害低減効果が大きいことが分かった。Case3 は被災人口でみると富山県全域を対象とした場合を除き、Case4 よりも被害低減効果が大きい。被害額を基準とした場合と被災人口を基準とした場合で、効果的な移転元の選定基準が異なる。経済的基準とした被害額と人命を守るという側面のある被災人口の評価を組み合わせる必要がある。基準の検討には慎重を期す必要がある。

8. まとめ

本研究は、流域治水とコンパクトシティの融合を通じた「適散適集」なグリーン社会への展開を提案し、その治水安全度を評価することである。その第一歩として、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を行った。また、コンパクトシティの推進として居住誘導に着目し、富山県全域に居住誘導を拡大した場合の洪水被害・被災人口の軽減率を算定した。

まず、小矢部川周辺住民を対象としたアンケート調査では、洪水の被害軽減のために協力するには、自分の地域に洪水軽減効果ある場合のほうが、協力しやすいことが改めて示された。しかしながら、他の地域であっても見返りなしで協力したいと思う人は多くいることが明らかとなった。また、居住誘導を進めるためには行政からの勧告など、財政的な補助があったとしても現状では難しいことも再認識された。

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の費用便益分析を実施した。その結果、富山県河川では小矢部川で田んぼダム実施の効果が高いことが示された。また、都市内水氾濫への田んぼダム、校庭貯留、雨庭の効果を定量的に評価した。雨庭と田んぼダムの効果が大きい事を示すことができたが、想定した実施率が極めて高い状況であり、

今後は現実的な実施率での検証が必要不可欠となる。

居住誘導の被害低減効果を確認した。コンパクトシティは今後の少子高齢化社会において重要であると考えられる。しかし、富山市は現状で移転先が不足しており、人口密度を向上させるか他地域への展開が必須である。人口密度を向上させ、現状のコンパクトシティを進める場合には流域治水オプションによる氾濫対策はもちろんの事、居住誘導区域の居住誘導区域の見直し、強いてはレッドゾーンへの追加が必要であると考えられる。また、他地域への展開による適散適集社会の構築を目指す際には、水害リスクを考慮した居住誘導区域の設定が必要である。居住誘導はどうしても時間がかかるため、雨水貯留による内水氾濫対策は必須である。また、外水氾濫に対して河道内での氾濫対策も着実に進めていくべきである。水害リスクを考慮した移転の促進と、雨水貯留による内水氾濫への対策により水害リスクを考慮したコンパクトシティの構築が重要であると考えられる。本研究においては解析条件や移転シナリオについては極めて粗い点が多くあるが、コンパクトシティと居住誘導としての流域治水の協働について初めて検討できたと考えられる。また本報告書では記載していないが、令和 6 年元旦に発生した能登半島地震・津波における被害調査、アンケート調査も行っている。これにより、今後の人口減少に水害が与える影響を評価していくためである。これらの成果は執者の研究室 HP（呉研究室）にて逐次報告していく予定である。

謝辞

本研究は国土技術研究センター第 25 回研究開発助成の補助を受けて実施したものです。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、アンケート調査では富山沿岸部住民および小矢部川沿川住民には多大なご協力を頂きました。末尾ながら、ここに記して、皆様のご協力に感謝申し上げます。

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 (2025 年 4 月 7 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-I_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) 沼澤蓮音, 呉修一, 藤下龍澄, 柄澤志寿: 富山県河川における洪水氾濫解析を通じた河道内植生伐採と田んぼダムの費用便益分析, 土木学会論文集, Vol.81, No.16, 24-16011, 2025.