

洪水抑制効果に着目した市街地内のグリーンインフラ導入計画シナリオ評価

—広島県呉市中央地区を対象とした配置と量の検討—

Assessment of Green Infrastructure implementation scenarios within urban areas focusing on Flood Control Effectiveness - Study of layout and quantity for the central area of Kure City, Hiroshima Prefecture -

荒木良太*・山鹿力揮*・片野裕貴**・田村将太***・田中貴宏***
Ryota Araki*, Riki Yamaga*, Yuki Katano**, Shota Tamura***, Takahiro Tanaka***

In recent years, In Green infrastructure (GI) technology has been studied as a new flood control measure. This technology utilizes the rainwater infiltration function of the natural environment to prevent the damage caused by floods. However, much is not known about where and how much GI should be placed for it to be effective. Therefore, to effectively utilize the functions of GI, it is necessary to study its effective implementation based on quantitative evidence. Therefore, this study clarifies the effective placement and the quantity of GI in the central area of Kure City in Hiroshima Prefecture. After analyzing the results, it was found that 30% of GI introduction in the northern and the eastern areas of Kure City Hall and Renga Street, would reduce flood damage. These areas were particularly damaged during the heavy rain event of July 2018.

.Keywords: Green Infrastructure, The heavy rain event of July 2018, Scenario evaluation, Hydraulic analysis, Infiltration capacity
グリーンインフラ、平成 30 年 7 月豪雨、シナリオ評価、水理解析、浸透能

1. はじめに

1-1. 研究背景と目的

近年、気候変動により降雨強度が増加しているとされており、例えば 1 時間降水量 50mm 以上の年間発生回数は増加傾向にある¹⁾。ここ数年だけでも、平成 30 年 7 月豪雨や令和元年東日本台風等の豪雨による大規模な洪水が頻発しており、人命や社会経済に大きな被害がもたらされているため²⁾、洪水対策は喫緊の課題といえる。従来、洪水対策としては、ダム、堤防、貯水施設などの、所謂グレーインフラの整備が進められてきたが、気候変動が進む中、それらのみの対策では能力や経済性の観点から限界があり、近年新たな対策のひとつとしてグリーンインフラ（以降 GI）の導入の検討が進められている³⁾。

米国環境保護庁⁴⁾によると、GI は「植物、土壌システム、透水性舗装等の透水性表面、雨水貯留と再利用、造園技術を利用した雨水の貯留・浸透・蒸発等により、下水道や地表水への流出を低減するための一連の措置。」と定義されており、本論文の GI はこの定義に従うこととする。英国王立協会⁵⁾や日本学術会議⁶⁾によると、グレーインフラと比較して整備コストが低いことが指摘されており、グレーインフラを補完する新たなインフラとして注目されている。また、令和 2 年 3 月には、国土交通省によりグリーンインフラ官民連携プラットフォームが設立されるなど、社会的にも注目を集めつつあり、個々の要素技術の開発も進められている。しかしながら、現状では「GI をどこに、どの程度配置すれば効果的なのか？」という点については、不明な点も多い。そのため、科学的根拠に基づき、GI の機能面からその効率的な配置と量を明らかにする必要があると考えられる。

GI の洪水抑制機能に関する研究として、まず、現状の活

用状況と課題を整理した伊藤ら⁷⁾と濱中⁸⁾の研究がある。これらは、GI 導入時の課題として導入効果を定量的に示せていないことを挙げており、シミュレーションモデルを作成し定量的評価を行う必要性が示されている。

シミュレーションモデルを活用し、GI の洪水抑制効果の把握を試みた研究として、例えば小河原ら⁹⁾は GI を導入した場合のマンホール溢水量、CSO 抑制効果を予測し、洪水対策および CSO 対策としての GI 導入の有効性を示している。また、天口ら¹⁰⁾は GIS を用い、詳細な雨水流出過程のモデル化手法を提案し、グリーンルーフや流出抑制型水路の効果を示している。さらに横川ら¹¹⁾は、人口減少地域の農地や湿地を GI と捉え、内水氾濫解析モデルを用いて、これら GI の洪水調節機能を示し、また将来土地利用のあり方を示している。そして、根岸ら¹²⁾は地下水流動シミュレーションを用いて、GI による地下浸透対策量増加が健全な水循環形成に寄与することを示している。これら既往研究は洪水抑制の観点から GI の有効性を定量的に示した研究であるが、一方で、限られた資源（土地やコスト）の中での効果的な GI 導入に向けては、複数のシナリオ比較により、効果的な GI の配置や導入量を把握する必要があると考えられる。

シナリオ評価を行った研究としては、飯田ら¹³⁾によるものがあるが、これは緑地の減少、創出の 2 点から都市緑地が有する洪水抑制効果を示したものであり、配置や量について検討を行ったものではない。また、GI の計画論に関する研究として石川ら¹⁴⁾¹⁵⁾があるが、導入すべきエリアは示されているもののその量については扱われていない。

そこで本研究では、洪水抑制の観点からみた GI の効果的な配置と必要導入量を明らかにすることを目的とした。具体的には、(1)市街地全域の洪水被害に対して効果的な GI

* 学生会員 広島大学大学院先進理工系科学研究科 (Hiroshima University)

** 正会員 (株) 地域科学研究所 (Research & Consulting of Regional Science Co., Ltd.)

*** 正会員 広島大学大学院先進理工系科学研究科 (Hiroshima University)

配置を把握すること、(2)被害が大きくなる地区に対して効果的なGI配置とその必要量を把握することとした。

1-2. 研究対象地

広島県呉市中央地区を対象とした(図1)。この地区は平成30年7月豪雨の際に外水氾濫、内水氾濫が発生し、家屋や公共施設において床上浸水、床下浸水による多くの被害が見られた¹⁶⁾。また、人口減少が続いており、経済基盤を支えてきた産業の撤退¹⁷⁾が進むなど、今後、さらなる税収の減少が予想されている。そのため、限られた財源の中での、計画的な洪水対策が求められており、比較的成本が低いGIによる対策も求められており「第5次呉市長期総合計画」でもGI導入が謳われている。

1-3. 研究の流れ

本研究の流れを、以下に示す。

- (1) シミュレーションモデルの構築 (2章)
- (2) 対象地におけるGI導入モデルの作成 (3章)
- (3) GI導入エリア別の洪水抑制効果の分析 (4章)
- (4) GI導入割合と洪水抑制効果の関連分析 (5章)

次章以降では、この流れに従い、方法と結果を記す。

2. シミュレーションモデルの構築

2-1. 入力データ収集と浸水範囲推定マップの作成

シミュレーションモデルの入力データとして表1に示すものを収集した¹⁾。また、シミュレーションモデルの精度検証に用いるために、平成30年7月豪雨の際の浸水範囲推定マップを作成した。なお、対象地における平成30年7月豪雨の際の明確な浸水範囲の記録がなかったため、罹災証明データをGIS上にプロットしたマップ、現地での住民ヒアリング調査結果(2021年12月3日実施)、災害時の写真を利用し、浸水範囲推定マップを作成した(図2)。

2-2. シミュレーションモデルの作成

シミュレーションモデルとして、下水道モデルと河川モデルを統合したInfoWorks ICMを用いた。このモデルには、一次元と二次元モデルの統合解析技術が組み込まれており、人孔、管渠、排水口、自然水路、人工水路、河川等の影響が、地上と地下を含めた形で、同時に計算される。

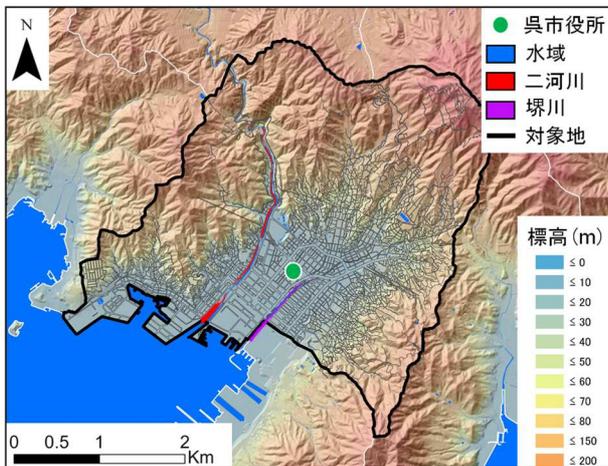


図1. 対象地

これにより、内水氾濫と外水氾濫の相互作用や下水への再流入といった、水の流れを再現することが可能となる。

具体のモデル作成順を以下に記す。(1) 対象地の24970個の人孔、それらをつなぐ24728本の管渠、集水範囲をGIS上に入力した。なお、この集水範囲は豪雨時に下水道から多くの溢水が発生し、浸水したことから、合流式下水道と分流式下水道の雨水管の集水範囲とした(図3)。(2) 計算負荷低減のために、雨水流入が発生しない汚水管の削除と、管径200mm未満の合流式下水道に対するランピング処理

表1. 使用した水文資料

使用データ	出典・提供組織
人孔・管渠	呉市上下水道局
罹災証明データ	呉市財務部収納課
二河川・塚川断面情報	広島県河川課
二河川・塚川河川水位	広島県危機管理課
数値標高モデル(5mメッシュ)	国土地理院(基盤地図情報)
土地利用現況	都市計画基礎調査
降雨情報	気象庁

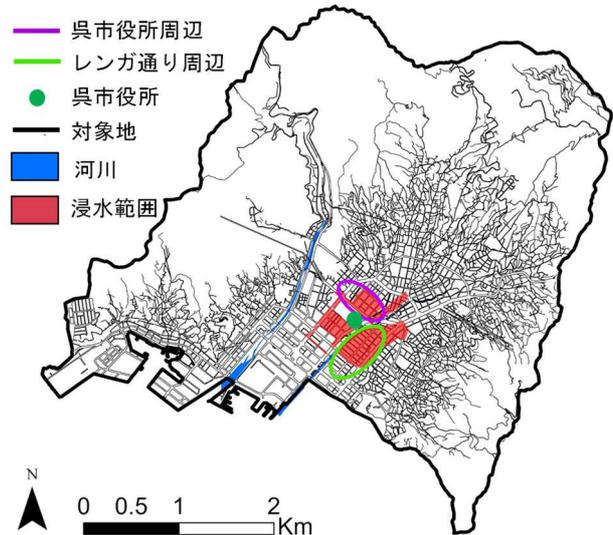


図2. 平成30年7月豪雨の際の浸水範囲推定マップ

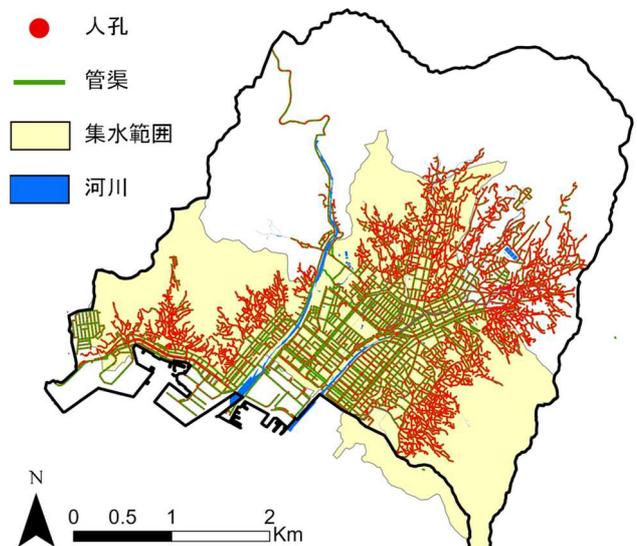


図3. 人孔、管渠と集水範囲

を行い¹⁸⁾、人孔 1772 個、管渠 1976 本とした (図 4)。その後、集水範囲において人孔を起点としたティーセン分割を行い、雨水が最寄りの人孔に流れる状況を表現し、人孔、管渠、下位集水域のデータをモデルに取り込んだ。(3) 集水範囲における土地利用図 (図 5)、数値標高モデル (5m メッシュ)、対象地を流れる 2 河川 (二河川と堺川) の断面と流量のデータを作成し、それぞれモデルに取り込んだ。なお、建物部分については、敷地内の非建蔽部分と GI 導入時の浸透能が異なるため、別区分とした。そのため、都市計画基礎調査の土地利用現況図に加え、建物データ (基盤地図情報)、航空写真をあわせて用いて、土地利用図を作成した。また、流量については、モデル上で 2 つの河川の H-Q 曲線を作成することで水位を流量に変換し、これを用いた。

2-3. 初期損失、浸透能の設定と精度検証

地表面の違いによる浸透、流出現象の違いを表現するためには、土地利用区分別に初期損失と浸透能を設定する必要がある。そこで各土地利用区分について、まず対象地の

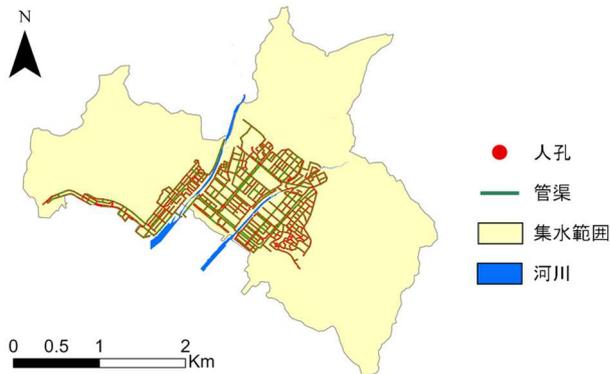


図 4. ランピング後の人孔、管渠

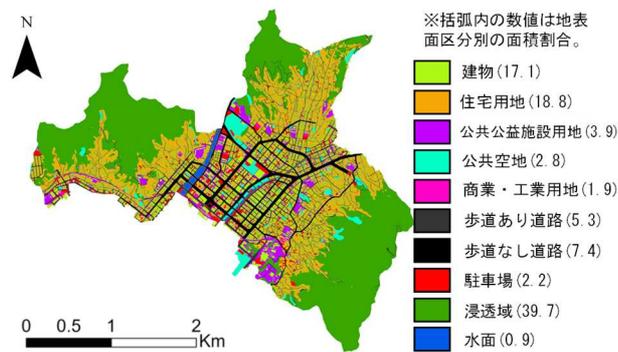


図 5. 土地利用図

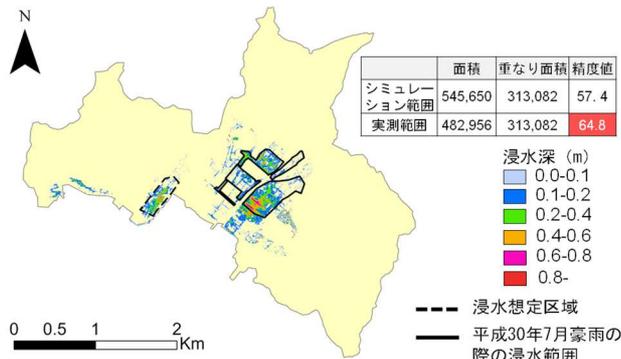


図 6. 精度検証結果

中から平均的な面積を有する敷地を抽出し、次にその敷地を構成する各地表面の浸透能をもとに、それらの面積重みづけ平均値を算出し、これをその土地利用区分の浸透能とした²⁾。なお、道路、駐車場、浸透域、水面の土地利用については、文献 9 の値をそのまま浸透能として用いた (表 2)。モデルの精度検証として、2-1 で作成した平成 30 年 7 月雨の浸水範囲と、同様の降雨を与えたシミュレーション結果の比較を行った (図 6)。なお、ランピングを行うことにより、末端管渠の排水能力不足に起因する溢水や流出の遅れ、上流側で分水されなかった水の主要管渠への直接流入が発生するため、これらを考慮する必要がある。そこで、同様のランピングを行った文献 19 の手法を参考に⁹⁾、時間最大降水量が 20 [mm/hr] となるよう、流量制限¹⁹⁾を行った。

なお、対象地には図 1 に示す通り 2 つの河川が流れているが平成 30 年 7 月豪雨の際、二河川では氾濫が見られなかったため、二河川流域については、「浸水想定区域」を示した。図 6 を見ると、シミュレーション結果と、平成 30 年 7 月豪雨の推定浸水範囲 (二河川流域は浸水想定区域) の重なる面積を実測範囲で除した値は 64.8% であり、本モデルは一定程度妥当と考えた⁴⁾。なお、このようなシミュレーションモデルの精度値を、浸水範囲を用いて算出した既往研究は見られなかった。

3. 導入 GI、浸透能、入力降雨の設定

3-1. 各土地利用区分の導入 GI と浸透能

各土地利用区分における GI 導入後の浸透能を算出する

表 2. 土地利用毎の浸透能計算

土地利用	初期損失 (mm)	浸透能 (mm/hr)	土地利用	初期損失 (mm)	浸透能 (mm/hr)
建物	0	0.01	歩道あり道路	0.5	0.01
住宅用地	2	11	歩道なし道路	0.5	0.01
公共公益施設用地	2	16	駐車場	0.5	0.01
公共空地	4	20	浸透域	2	200
商業・工業用地	2	3	水面	0	0

表 3. GI 先行事例

土地利用	先行事例・参考文献	土地利用	先行事例・参考文献
建物	住宅 (高浜市)・21)	商業・工業用地	ニチベイ工場 (愛甲郡愛川町)・25)
住宅用地	あめにわらいセンター (福岡市城南区)・22)	歩道あり道路	9)
公共公益施設用地	青梅市立第一小学校 (青梅市本町)・23)	歩道なし道路	9)
公共空地	カナドコロ (川崎市麻生区金程)・24)	駐車場	埼玉県庁敷地内駐車場 (さいたま市浦和区高砂)・26)

表 4. 土地利用毎の浸透能計算

土地利用	地表面	面積 (㎡)	浸透能 (mm/hr)	土地利用	地表面	面積 (㎡)	浸透能 (mm/hr)
建物	浸透トレんち、浸透例	86	50	住宅用地 (32.3%)	浸透型植栽	42	100
	全体	86	50		全体	42	100
商業・工業用地 (48.6%)	透水性舗装	1160	100	公共公益施設用地 (73.5%)	芝地	5570	22
	透水性舗装 (櫟)	80	100		レイズベッド	680	200
	芝地	220	22		透水性舗装	760	100
	樹木	230	200		樹木	320	200
	植栽	60	100		全体	7330	54
	全体	1750	98		歩道あり道路	透水性舗装	100
公共空地 0	芝地	1210	22	街路樹帯		20	150
	マルチング	830	50	車道		120	0
	レイズベッド	330	200	植栽		10	100
	樹木	600	200	全体	250	56	
駐車場	全体	2970	86	歩道なし道路	透水性舗装	10	100
	透水性舗装	240	100		バイオスウェル	5	100
	透水性舗装 (櫟)	120	100		車道	35	0
	芝地	240	22		全体	50	30
	全体	600	69				

※括弧内の数値は選定した土地利用ごとの非建蔽率。

ために、土地利用区分別に平均的な面積を有する敷地を対象地の中から選定した。その後、その地表面区分別面積を航空写真と GIS を用いて計測し、これを各土地利用区分の地表面区分別面積とした。次に先行事例 (表 3) を参考に、土地利用区分別に GI 導入イメージモデル (図 7) を作成した後、イメージモデルにおける地表面区分別の面積と文献 9、13、27 で示されている浸透能の値より、土地利用区分別の浸透能を算出した⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾ (表 4)。なお、建物以外の各土地利用区分の浸透能は建物部分を除いた面積を対象とした。

建物については、建物周囲に集水桝とそれに接続する幅 10cm 程度の側溝を設け、その集水桝から下水道への流入の 50% を浸透トレンチ、浸透桝へと流入させる計画とし、その結果、浸透能 50[mm/hr] と設定した。住宅用地については、浸透型植栽空間とすることで浸透能 100[mm/hr] とし、公共施設用地については、土で覆われたグラウンドを芝地へ、コンクリート舗装部分を透水性舗装、花壇をレイズドベッドにすることを想定し⁽⁸⁾、浸透能 54[mm/hr] と設定した。公共空地については、舗装を芝地に、土の表面部分は樹皮をマルチングしたもので覆うことにより浸透能を 74[mm/hr] と設定し、商業・工業用地については、駐車スペースの輻以外の部分に透水性舗装、芝、樹木を配置することで浸透能 99[mm/hr] と設定した。歩道あり道路については、歩道に透水性舗装と街路樹帯を整備し、中央分離帯を緑化することで浸透能 30[mm/hr] を、歩道なし道路については、路側帯部分を透水性舗装、道路面の一部にバイオスウェルを配置するコミュニティ道路とすることで、浸透能 52[mm/hr] を、それぞれ確保することとした。駐車場については、輻以外の部分の芝地化と透水性舗装により浸透能 71[mm/hr] と設定した。

3-2. 入力降雨

実際に対象地に大きな被害をもたらした、平成 30 年 7 月豪雨を入力降雨とした (図 8)。具体的には、呉特別地域気象観測所で観測された 1 時間雨量 50mm、3 日間 (72 時間) の総雨量 445mm を集水範囲に対して一様に与えた。なお、2-3 の精度検証と同様、時間最大降雨量は 20[mm/hr] とした。

4. GI 導入エリアの違いが洪水抑制効果に与える影響分析

4-1. 目的と方法

本章では、シナリオ分析法を用いて、GI 導入エリアの違いによる、市街地全域の洪水抑制効果の大小を比較することで、GI 導入が効果的な (洪水被害の低減効果が大きい) 配置を明らかにすることを目的とした。評価指標としては洪水曝露人口と経済被害を用い、これを、各 GI 導入エリアシナリオについて算出し、現状 (平成 30 年 7 月豪雨時) の値と比較することで、評価を行うこととした。なお、本章で用いる GI 導入エリアシナリオについては、次節で示す。

ここでの、洪水曝露人口は、洪水被害を受ける人の数とし、浸水深は考慮せず、浸水範囲のみを考慮した。具体的には、シナリオ別の浸水範囲と町丁目別人口を GIS 上で重ね合わせ、式(1)により算出した。また、経済被害額は浸水



図 7. GI 導入イメージモデル

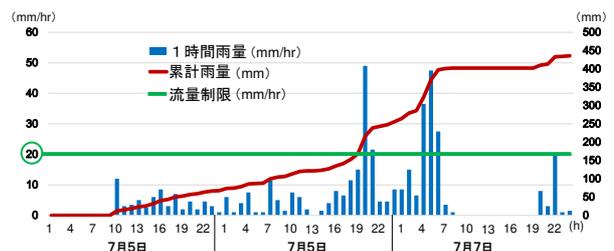
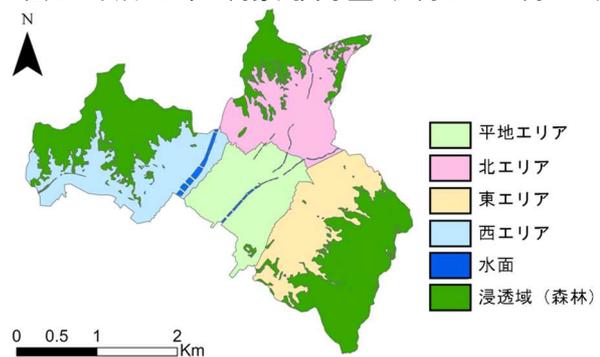


図 8. 平成 30 年 7 月豪雨降水量 (7 月 5 日-7 月 7 日)



エリア	人口 (人)	建物密度 (%)	非浸透面の割合 (%)	GI 導入可能面積
平地エリア	12599	27.1	69.2	1.00
北エリア	11810	30.9	82.9	1.01
東エリア	12153	28.2	68.8	0.98
西エリア	11681	28.3	73.2	1.01

図 9. GI 導入のエリア区分

被害を受ける建物を対象に、国土交通省の治水経済調査マニュアル²⁸⁾⁽²⁹⁾を用いて、式(2)により算出した。

$$\text{曝露人口(人)} = \text{町丁目人口(人)} \times \frac{\text{町丁目の浸水面積(m}^2\text{)}}{\text{町丁目面積(m}^2\text{)}} \quad \dots(1)$$

経済被害額(千円)=延床面積(㎡)×浸水深別被害率
×都道府県別 1㎡あたりの評価額(千円/㎡)率 …(2)

4-2. GI 導入のシナリオ作成

対象地を、まず都市機能が集積する平地エリアと、戸建て住宅が多く立地する郊外の斜面地エリアに分け、さらに斜面地エリア内においても場所により集水域が異なるため、斜面地エリアを北、東、西の3エリアに分け、計4エリアに分けた(図9)。次に、各エリアにGIを導入したシナリオ(4シナリオ)、4エリアの中の2エリアにGIを導入したシナリオ(全組み合わせで計6シナリオ)、4エリアの中の3エリアにGIを導入したシナリオ(全組み合わせで計4シナリオ)、全エリアにGIを導入したシナリオ(1シナリオ)を作成した。これら4エリアは、行政区のまともに配慮し、またGI導入が可能な面積が同程度になることを意図し設定した。なお、将来的には、GI導入推進区域の検討に資することを意図し、このようなシナリオ設定とした。

GI導入エリア別の浸透能については、3章で作成した土地利用区分別の浸透能(GI導入時)と土地利用図を利用して算出した⁹⁾。なお、使用したモデルの制約上、GI導入エリア内の各下位集水域の浸透能を4種のいずれかとする必要があるため、各下位集水域について4種の浸透能の中から、最も近い値を割り合てることとした。これにより一定の誤差が生じるが、平均的な傾向は得られると考えた。

4-3. GI 導入エリアシナリオの評価

各シナリオのシミュレーション結果より算出した洪水曝露人口と経済被害額を図10に示す。また、この結果より読み取れる事項を以下に示す。

- いずれのシナリオも、現状に比べると、大きな洪水抑制効果が見られる。
- 洪水曝露人口については、1つのエリアへのGI導入により、現状に比べ20~50%程度の被害低減効果が見られ、特に、平地エリアのGI導入が最も効果大きい。
- それに対し、西エリアへのGI導入シナリオは、洪水曝露人口の被害低減率が27%程度と相対的に小さい。
- 東・西エリアへのGI導入シナリオ(2エリア導入)は76%程度の被害低減効果(洪水曝露人口)が見られ、

これは中央・北・東エリア(3エリア導入)、中央・北・西エリア(3エリア導入)へのGI導入シナリオとほぼ同程度である。

- 全エリアへGIを導入した際の洪水曝露人口低減率は99%を超え、大きな効果が見られる。
 - 経済被害額については、洪水曝露人口と比較すると、GI導入が効果的なエリアが異なる。
 - 1つのエリアへのGI導入では、中央エリアと東エリアが、それぞれ経済被害額低減率46%程度、43%程度と高い効果が見られる。
 - 浸水被害が見られない上流域の北エリアに対してのGI導入によっても、経済被害額の低減効果がみられる。
- 以上の結果より考察すると、今後のGI導入に向けた知見として以下の事項が考えられる。
- 元々非浸透面が多い平地エリア(市街地中心部)へのGI導入による雨水流出低減効果が大きい。さらに、平地エリアは人口集積が大きいので、人的被害の低減度合いが大きい。
 - 北エリアと東エリアの下流域の人口が比較的多いに対して、西エリアの下流域の人口が比較的小さいため、人的被害低減の観点からは、西エリアに比べ、北エリアと東エリアへのGI導入の方の効果が大きい。
 - 中央エリアと東エリアへのGI導入は、下流域に建物密集地があるため、経済的被害の低減効果が大きい。
 - 下水道管渠、河川・水路で結びれている上流域へのGI導入は、下流域の浸水改善に寄与すると言え、本節の結果をもとに、例えば、GI導入の優先順位を決めることも可能と考えられる。具体的には、1つのエリアに導入するシナリオでは、平地エリアと東エリアが大きいものの、2つのエリアに導入するシナリオでは、平地・東エリアに比べ、東・西エリアへのGI導入効果が最も大きく、また、3つのエリアに導入するシナリオでは、平地+その他の2つのエリア(北、東、西の中から2つ)より、北・東・西エリアへの導入効果が大きい。このように、東エリアへの導入は単一エリアの導入だけでなく、複数エリア導入の際にも大きな効

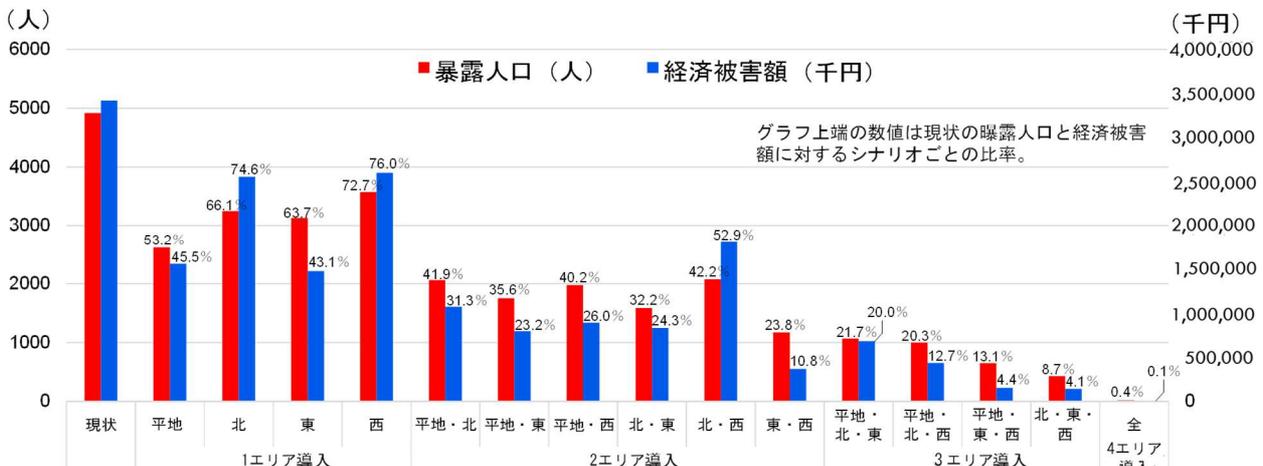


図10. GI 導入シナリオごとの曝露人口と経済被害額

果を有しており、優先順位は高いと考えられる。また、東エリアに対しては、2つのエリアへの導入では、西エリアが、3つのエリア導入では、北と西エリアへの導入が大きいことから、対象地 GI 導入の優先順位は、東、西、北、平地の順が適当と考えられる。

また、本節の成果をもとに、一般化可能な都市計画的な知見を挙げると、GI 導入が浸水被害対策に有効であること、対象地における人口と経済的資産の空間分布が異なると GI 導入が効果的なエリアが異なること等が考えられる。

5. GI 導入割合と洪水抑制効果の関連分析

5-1. 目的と方法

本章では、現状で被害が大きい地区の被害軽減を意図し、効果的な GI 導入エリアと必要 GI 導入量を把握することを目的とした。なお、4 章では、対象地全域の観点から、GI 導入エリアの違いによる効果の差異を、住民視点から把握するために、曝露人口や経済被害額を評価指標としたが、本章では物理的に総氾濫量や浸水面積が 0 となる GI 導入量を把握することが目的であるため、これらを指標とした。対象地区は、呉市中心市街地に位置し、日常的に人々が集まり、また平成 30 年 7 月豪雨の際に、特に甚大な被害が見られた呉市役所周辺とレンガ通り周辺の 2 地区とした。まず、4 章で行った 16 シナリオのシミュレーション結果をもとに、これら 2 地区に対して効果的な GI 導入エリアを把握した。次に、それらのエリアに対して GI 導入割合を段階的に減少させることで、洪水被害抑制のための最低限必要な GI 導入割合を明らかにすることとした⁽¹⁰⁾。なお、洪水抑制効果については、総氾濫量減少割合(式(3)より算出)と、浸水面積減少割合(式(4)より算出)の 2 つを指標とした。

$$\left(1 - \frac{\text{GI 導入時の氾濫量}(\text{m}^3)}{\text{対策なしの際の氾濫量}(\text{m}^3)}\right) \times 100 \quad \dots(3)$$

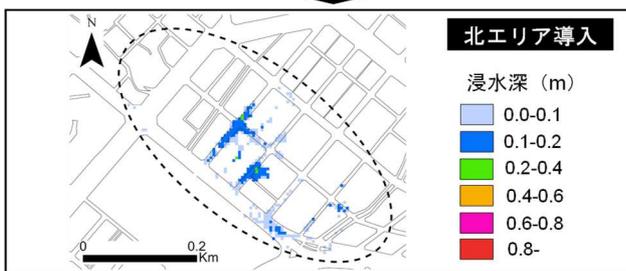
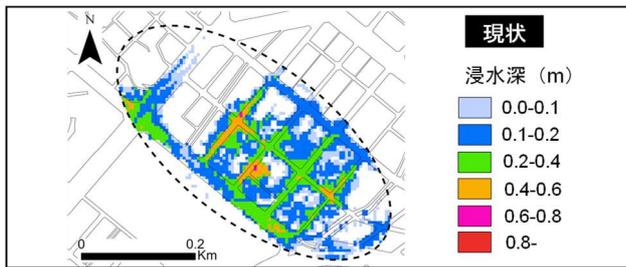


図 11. 呉市役所周辺の浸水変化

浸水面積減少割合(%)=

$$\left(1 - \frac{\text{GI 導入時の浸水面積}(\text{m}^2)}{\text{対策なしの際の浸水面積}(\text{m}^2)}\right) \times 100 \quad \dots(4)$$

5-2. GI 導入効果が有効なエリアの検討

1つのエリアに GI を導入する 4つのシナリオ、それぞれの呉市役所周辺の浸水状況をみると、呉市役所周辺に対しては、北エリアに GI を導入するシナリオで、最も大きな効果が見られ、総氾濫量は 95%程度の減少であった(図 11)。レンガ通り周辺については、1つのエリアに GI を導入するシナリオの、いずれにおいても大きな改善が見られなかったため、2つのエリアに GI を導入したシナリオの効果を比較した。その結果、平地・東エリアへ GI 導入を行うシナリオで、最も大きな洪水抑制効果が見られ、総氾濫量は 99%以上の減少であった(図 12)。そこで、次節では、呉市役所周辺の洪水被害抑制に向けては、北エリアへの GI 導入シナリオ(1エリア導入)、レンガ通り周辺の洪水被害抑制に向けては、平地・北エリアへの GI 導入シナリオ(2エリア導入)、をそれぞれ対象シナリオとし、GI 導入割合を段階的に変化させ、それぞれの効果を調べることにした。

5-3. 洪水対策のための最低限の GI 導入割合の検討

呉市役所周辺の GI 導入割合別の洪水抑制効果を図 13 に、また、これにより読み取れる事項を以下に示す。

- ・ 総氾濫量については、GI を最大限導入した際に 95%程度の抑制効果が見られるが、GI 導入割合を 27.3%まで減少させても、総氾濫量減少割合に変化は見られない。しかし、27.3%より小さくなると総氾濫量減少割合は小さくなる。
- ・ 同様に浸水面積についても、GI 導入割合が 27.3%~100%では変化がないが、27.3%より小さくなると、浸水面積減少割合も小さくなる。

次にレンガ通り周辺の GI 導入割合別の洪水抑制効果を図 14 に、また、これにより読み取れる事項を以下に示す。

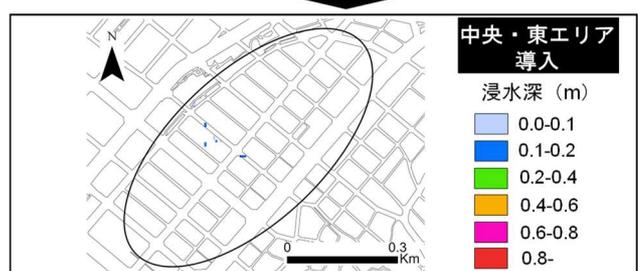
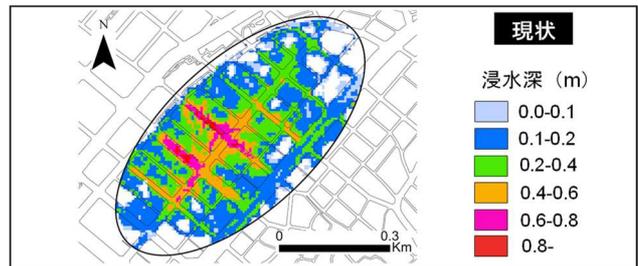


図 12. レンガ通り周辺の浸水変化

- ・ 総氾濫量については、GI を最大限導入した際に 99% 以上の抑制効果が見られるが、GI 導入割合を 33.3% まで減少させても、総氾濫量減少割合に変化は見られない。しかし、33.3% より小さくなると総氾濫量減少割合は小さくなる。
- ・ 同様に浸水面積についても、GI 導入割合が 33.3% ~ 100% では変化がないが、33.3% より小さくなると、浸水面積減少割合も小さくなる。

以上の結果より、対象地においては、上流域の GI 導入割合が 27.3% 程度でも、呉市役所周辺では大きな洪水抑制効果が期待できると言える。また、レンガ通り周辺については、GI 導入割合が 33.3% 程度でも、大きな洪水抑制効果が期待できると考えられる。

一般化可能な都市計画的な知見の獲得に向けて、本節の成果より「ポテンシャルの 3 割程度の GI 導入により、大きな効果が期待できる可能性」が考えられるが、この点については、より多くの検討事例を蓄積する必要があり、今後の課題としたい。

6. 結論

本研究では、広島県呉市中央地区を対象に、シナリオ分析法を用いて、(1) 市街地全域の被害に対して効果的な GI 配置を把握し、また(2) 被害が大きい地区に対して効果的な GI 配置とその必要最低限の量を把握することで、洪水対策の観点から見た GI の効果的な配置を示した。主な成果は以下に記す。

1. GI は大きな洪水抑制効果を有している。特に、対象地全域に対して最大限の GI を導入することで洪水暴露人口、経済被害ともに 99% 以上の被害軽減が見込まれる。これが対象地の GI のポテンシャルといえる。

2. GI 導入を行うエリアによって、洪水抑制効果が異なる。特に、2つのエリアに導入する際は東エリアと西エリアのように、下流域が離れているエリアでの GI 導入が、対象地全域の洪水被害軽減の観点から見ると、有効と考えられる。
3. 洪水曝露人口、経済被害の 2 指標では、効果的な GI 導入エリアが異なる。そのため、GI 導入に際しては「何を優先的に守るか？」という観点も必要と考えられる。
4. 平成 30 年 7 月豪雨の際に、洪水被害に対して脆弱なエリアであった、呉市役所周辺に対しては北エリアへの GI 導入、レンガ通り周辺に対しては、中央・東エリアへの GI 導入が有効であり、また、ポテンシャルの 3 割程度の GI を導入することができれば、大きな効果が得られるものと考えられる。

1 は、文献 9 で示されている傾向と同様である。しかし、文献 9 が内水氾濫を対象にしているのに対し、本研究は内水氾濫に加えて外水氾濫を考慮しており、この点において文献 9 と異なる。これにより、本研究の対象地における被害に対して、外水氾濫の影響は小さく内水氾濫による被害が大きいと言え、対象地においては、内水氾濫への対策を重点的に行うべきと考えられる。また、このような知見は内水氾濫に加え、外水氾濫を考慮した本研究のモデルによる成果と言える。また、2~4 については、本研究により得られた新たな知見である。

最後に、今後の都市計画的提言への課題を以下に記す。

- ・ 本研究により得られた知見は、対象地に限られたものであるが、本研究のような検討を蓄積し、一般化したガイドラインを作成する必要があると考える。
- ・ GI 導入にあたっては、浸水被害軽減以外の観点から

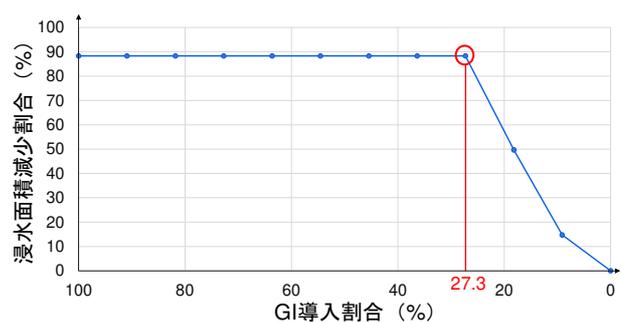
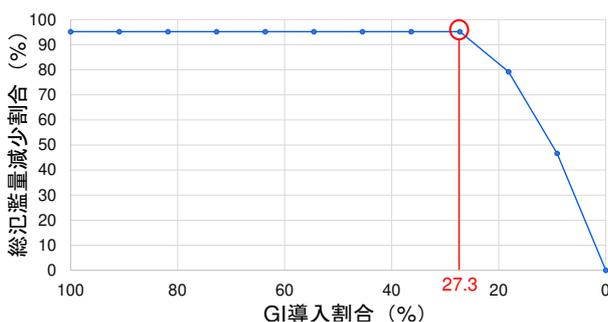


図 13. 呉市役所周辺における GI 導入割合別の洪水抑制効果 (左図：総氾濫量減少割合，右図：浸水面積減少割合)

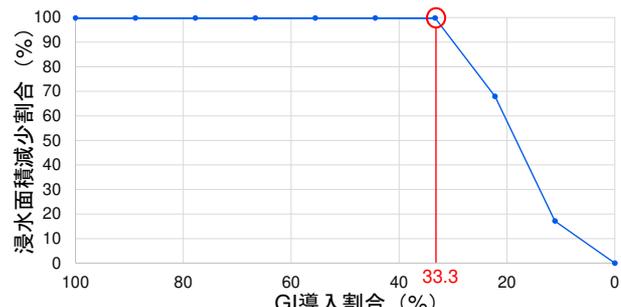
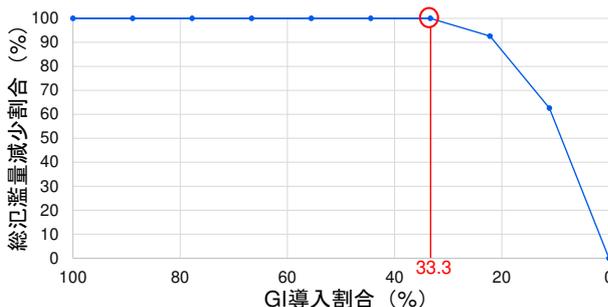


図 14. レンガ通りにおける GI 導入割合別の洪水抑制効果 (左図：総氾濫量減少割合，右図：浸水面積減少割合)

の評価も必要と考えられる。具体的に、GIに期待される効果としては、熱環境緩和、生態系保全、環境教育の場の影響等があるが、GIの社会実装に向けては、多様なステークホルダーとの協議の中から、その場所の特性に適した効果に着目する必要があると考えられる。

【謝辞】

本研究はJSPS 科研費(20H02331)(20K21034)の成果の一部である。また、本研究を進めるにあたり、広島大学呉サテライト、広島県河川課、呉市上下水道局からデータをご提供いただいた。ここに記して謝意を表す。

【補注】

- (1) モデル作成に使用した資料は、地方自治体が整備・管理するデータが多く、本モデルの作成には地方自治体の協力が必要である。また、各データの刊行年・地図縮尺は以下の通りである。
 - ・呉市上下水道局(2020): 下水道台帳データ(縮尺 1:2500)
 - ・呉市財務部収納課(2021): 罹災証明データ(縮尺 1:2500)
 - ・広島県河川課(2020): 堀川・二河川横断図(縮尺 1:2500)
 - ・広島県危機管理課(2021): 二河川・堀川水位
 - ・国土地理院(2021): 数値標高モデル(5m メッシュ)
 - ・都市計画基礎調査(2016): 土地利用現況(1:2500)
 - ・気象庁(2021): 降雨情報
- (2) 文献9の浸透能の値は、本研究の対象地外で出された値であり、この値を本研究で使用する際、誤差が生じる可能性がある。しかし、精度検証の結果、本研究のシミュレーションモデルは一定の精度が見られたため、今回はこれを用いることとした。シミュレーションモデルの更なる精度向上は、今後の課題としたい。
- (3) 文献19では、ランピングモデルに実際の降雨57.9[mm/hr]と、流量制限を行った降雨20[mm/hr]の2つの降雨を与え、精度比較が行われている。その結果、流量制限を行った方で、より高い精度が得られていることから、本研究においても20[mm/hr]を用いた。
- (4) 図6の「浸水想定区域」は、文献20を参照し作成した。これは、50年確率降雨が対象地に降った際の河川氾濫による浸水エリアが示されている。
- (5) 文献9、13の浸透能の値は、本研究の対象地外で出された値であり、この値を本研究で使用する際、誤差が生じる可能性がある。しかし、実際の浸透能の数値を設定するには理論的にも技術的にも困難を伴うため、既往文献の浸透能を用いた。
- (6) 本研究で設定した浸透能は、対象地外で計測された値であり、土壌等の地域性により、結果に一定の誤差が生じる可能性がある。ただし、その誤差は土地利用区分の差に比べ小さく、シナリオ比較を意図した本研究の意図を考慮すると、その誤差の影響は小さいと考えた。また、都市計画上、住宅用地や商業・工業用地等の民有地へのGI導入を行うためには、土地所有者の合意が必要であり、その合意形成手法については今後の課題としたい。
- (7) 平面図の一例として、商業・工業用地における現状とGI導入後のものを示す。
- (8) レイズドベッドは一般的な花壇より一段高くしたもので、水はけが良く浸透能が高いとされている。本研究では、文献27で示されている浸透能の値を用いた。
- (9) モデルの制約により、地表面区分(初期損失、浸透能の組み合わせ)の設定可能区分数の上限は12であるため、それに合わせる必要が生じた。そこで、具体的には、建物、住宅用地、公共施設用地、公共空地、商業・工業用地、道路又は駐車場、浸透域、水面、GI導入エリア浸透能(4つ)の計12の浸透能を設定した。なお、GI導入エリア浸透能については、エリア内の下位集水域別の浸透量[mm/h]を全て算出し、その値より全下位集水域を昇順に並べ、それらを均等に4グループに分けた後、4グループそれぞれについて平均浸透量(面積で重み付け)を算出し、これをグループ内の下位集水域に割り当てることで、GI導入エリアの浸透能を算出した。
- (10) GI導入割合とは、各GI導入エリア全域の面積に対する、GI導入面積の割合とした。具体的には、補注9)で示した4種の浸透能の中で

最も浸透能の低い値をGI導入エリア全体の浸透能と仮定し、その浸透能を5[mm/h]ずつ減少させた。モデル上では浸透能の変化として表現したが、これはGI導入割合と同義と考えた。ここでは、GIの最大導入可能なポテンシャルに対して、どの程度のGI導入が必要かを把握することが目的であるため、このような設定とした。

【参考文献】

- 1) 気象庁(2020), 大雨や猛暑日など(極端現象)のこれまでの変化
- 2) 国土交通省(2021), 水害統計調査
- 3) 大沼あゆみ(2018), 生態系インフラによる防災・減災(Eco-DRR)をどのように拡大していくべきか?—第五次環境基本計画に示されたグリーンインフラ: その経済的特徴と持続可能社会形成における意義—, 環境経済・政策研究 11(2), pp.61-64.
- 4) 米国環境保護局(2022), What is Green Infrastructure?
- 5) The Royal Society(2014, 2), Resilience to extreme weather.
- 6) 日本学術会議(2014), 復興・国土強靱化における生態系インフラストラクチャー活用のすすめ
- 7) 伊藤優一・北村隆光・古米弘明(2021), 下水道事業におけるグリーンインフラ活用の現状と課題に関する考察, 下水道協会誌 58(707), pp.64-76.
- 8) 濱中特樹(2020), 人口減少時代におけるグリーンインフラの活用方策について, 名古屋都市センター
- 9) 小河原洋平・田浦扶充子・島谷幸宏(2018), 善福寺川上流域を対象にしたグリーンインフラによる流出抑制及びCSO抑制効果, 土木学会論文集 B1(水工学) 74(5), pp.355-360.
- 10) 天口英雄・河村明(2020), グリーンインフラを考慮した雨水流出解析モデルの提案とその適用, 土木学会論文集 G(環境) 76(5), pp.319-325.
- 11) 横川涼・武藤裕則・鎌田磨人・田村隆雄(2020), 内水氾濫解析を用いたグリーンインフラの有する洪水調節機能に関する検討土木学会論文集 B1(水工学) 76(2), pp.463-468.
- 12) 根岸勇太・田原康博・山本遼介・小西裕喜・石川幹子(2019), 健全な水循環の形成に向けたグリーンインフラ活用シナリオと地下水流動シミュレーション—東京都神田川上流域を対象として—, 環境情報科学論文集 33, pp.277-282.
- 13) 飯田晶子・大和広明・林誠二・石川幹子(2015), 神田川上流域における都市緑地の有する雨水浸透機能と内水氾濫抑制効果に関する研究—内外水複合氾濫モデルを用いたシミュレーション解析—, 都市計画論文集 50(3), pp.501-508.
- 14) 石川幹子・森田楓菜・山本遼介(2020), 小流域分析に基づく神田川上流域の緑地施策の歴史的経緯と今後の計画論に関する研究, ランドスケープ研究 83(5), pp.667-672.
- 15) 石川幹子・山本遼介(2021), 流域圏分析に基づく埼玉県荒川中・下流域右岸域のグリーンインフラの特質と計画論に関する研究, 都市計画論文集 56(3), pp.1099-1106.
- 16) 呉市(2020), 平成30年7月豪雨—呉市災害誌—
- 17) 日本経済新聞(2020, 2, 7), 日本製鉄、呉製鉄所閉鎖—地域経済・雇用に打撃—
- 18) 山田龍男・古米弘明(2015), 浸水解析モデルにおける小排水区の溢水発生を考慮した集約化手法の検討, 下水道研究発表会
- 19) 李星愛・古米弘明(2018), 管渠集約区域の排水能力を考慮した下水道ネットワークモデルの実時間浸析への適用, 下水道協会誌 55(670), pp.116-123.
- 20) 呉市危機管理課(2021), 洪水ハザードマップ (<https://www.city.kure.lg.jp/uploaded/attachment/24182.pdf>), 閲覧 2021.6
- 21) 高浜市(2022), 雨水貯留浸透施設の種類
- 22) あまみず社会研究会(2022), あめにわらいセンター
- 23) 東邦レオ(2022), 青梅市立第一小学校
- 24) 工学部遠藤新研究室(2021), カナドコロ
- 25) 株式会社ニチベイ(2022), 生産本部・開発本部
- 26) 埼玉県(2022), 埼玉県庁敷地駐車場緑化
- 27) 遠藤新(2020), 人口減少社会におけるグリーンインフラとしての空地デザイン技術ならびに空地まちづくりの構想技術に関する研究(3年目)
- 28) 国土交通省(2020, 4), 治水経済調査マニュアル(案)
- 29) 国土交通省(2021, 3), 治水経済調査マニュアル(案)—各種資産評価単価及びデフレーター—