

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

小河原 洋平¹・田浦 扶充子²・島谷 幸宏³

¹ 非会員 岡山県備中県民局 高梁川ダム統合管理事務所 (〒718-0003 岡山県新見市高尾 2400)
E-mail: ogahara.river@gmail.com

² 正会員 九州大学工学研究院 環境社会部門 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744)
E-mail: f.taura@civil.kyushu-u.ac.jp

³ フェロー会員 九州大学工学研究院教授 環境社会部門

善福寺川上流域において、一つの合流式下水道の雨天時越流水 (CSO) 越流口の集水域を対象とし、グリーンインフラ (GI) を導入した場合のマンホール溢水量及び CSO の抑制効果を検証した。溢水量は 2 つの年超過確立 1/100 および極端豪雨として 2017 年 7 月に発生した九州北部豪雨の降雨波形を用い、CSO については観測降雨による年間の降雨波形を用いた。GI は、戸建住宅では 50% の樋と桝との連結を切り、前庭は雨水を浸透させる雨庭 (浸透型植栽空間) にする。また、道路や学校、公園等でも透水性の舗装や緑地等による流出抑制を行う等の計画を行った。全対策を導入することで、(1) 溢水量はどの降雨波形においても 90% 以上の抑制がみられ、(2) 年間の CSO 発生回数・発生量を大幅に削減できた。都市の洪水及び CSO 対策として、GI の導入は非常に有効であることが明らかとなった。

Key Words: *Green Infrastructure, overflow reduction, Combined Sewer Overflow, Distributed stormwater management, Watershed Management*

1. はじめに

近年、短時間強雨 (50mm/hr 以上) の発生回数は増加傾向にあり¹⁾、今後も気候変動により都市型水害は増加するものと考えられる。加えて、都市の水問題の課題として合流式下水道の雨天時越流水 (CSO: Combined Sewer Overflow) により水質悪化や水環境の劣化が生じている。欧米では、都市洪水の緩和や面的汚染源の負荷流出抑制を目的とした雨水管理手法としてグリーンインフラ (GI: Green Infrastructure) が導入されており²⁾、レインガーデン、透水性舗装、バイオスウェイル、屋上緑化等が要素技術として実施されている³⁾。例えばニューヨークでは、下水道整備による流出抑制対策から、安価で景観にも優れ、導入も早い、道路や駐車場、家屋の屋上などへの GI の導入へと流出対策を変更した⁴⁾。

総合治水対策と GI による流出抑制対策の違いは、前者が洪水流出抑制対策のみを目的にしているに対し、後者は加えて水質改善、都市の景観向上、生物多様性の保持、健康の増進などの多様な目的と機能を有し、都市の環境や価値の向上に寄与する点にある。総合治水で用いられる手法は、雨水浸透ます、校庭貯留、棟間貯留、調

節池などで、GI に比べ、よりハードな施設であり、町の景観や魅力の向上に直接寄与するとは言えない。後者は緑を活用した貯留・浸透能力の向上が中心的な手法であり、特に土壌の浸透能力を評価、活用することが特徴である。GI は下水道施設による流出抑制対策よりも安価で整備が早いとされている。筆者らの試算によると日本における雨水貯留施設の貯留量 1 m³ 当たりの単価がおよそ 10 万円から 20 万円である⁵⁾ のに対し、GI による雨水の浸透貯留量 1 m³ 当たりの単価は 5 万円から 10 万円⁶⁾ と推計され、GI 手法はより安価な手法と言える。

本研究は欧米で行われている GI の手法を、より降雨強度が大きい日本において、その有効性を検証し導入の可能性について検討する。また、海外の要素技術をそのまま導入するのではなく、都市住民とのワークショップを通して、より魅力的で現実的な案を提案する。これらに本研究の新規性があると考えている。

研究対象とする東京都杉並区を流れる一級河川荒川水系善福寺川流域は、内水・外水氾濫や CSO による河川水質悪化が課題である。善福寺川の環境を改善するため「善福寺川を里川にカエル会」が上流域の井荻小学校と連携し、里川の復活に向けた活動を行っている。筆者ら

はこの会と連携し、善福寺川で CSO の抑制や水害防止、および都市環境を改善する手法として、GI の導入を検討している。平成 29 年度には「善福寺川を里川にカエル会」や流域住民、専門家らと流域内の浸透能を簡易なダブルリングを用いて測定するとともに、ワークショップを開催し、善福寺川上流域に導入可能な GI プランを作成した。本研究では、善福寺川上流域を対象にワークショップで作成した GI プランが洪水及び CSO をどの程度抑制しうるかを流出モデルにより定量的に評価する。

過去の貯留浸透等による流出抑制に関する研究では、善福寺川を対象に浸透トレンチ・雨水タンク・土壌改良を導入し、流出抑制効果を検証した研究⁷⁾⁸⁾や、神田川上流域で緑地の増減シナリオを作成し、マンホール溢水量や浸水域を検証した研究⁹⁾等がある。しかし、これらの研究は従来の流出抑制手法による効果算定の研究であり、GI 技術を導入したものではない。

2. 研究方法

(1) 研究対象地

東京都杉並区を流下する善福寺川は合流式による下水道が敷設されており、複数ある越流口のうち、最上流部に位置する美濃山橋下に設けられている越流口の集水域 70.9ha を対象とした(図-1)。なお、集水域は東京都下水道局が公表している下水道台帳¹⁰⁾から調べた。図-2に対象とする集水域のマンホール及び地下管渠網を示す。

(2) 現地調査による水文資料の収集

2013年9月6日～2016年7月8日(欠測期間443日間を含む)、美濃山橋下の越流口の直上流と直下流に水位計を、越流口から400m程度離れた井荻小学校内に雨量計を設置し、共に5分間隔で計測した。

越流口および河川の横断形状を測量し、国土数値情報より5mメッシュのデータを用いて河床勾配($I=1/1500$)を求め、これらのデータにより、連続の式及び Manning 式を用いて H-Q 曲線を作成し水位を流量に変換した。

(3) 流出モデルの構築

分布型流出モデルの一つである InfoWorks ICM 8.0 を用い、越流現象の再現及び GI を導入した際のマンホール溢水量、CSO 量の低減効果について解析を行った。このモデルは降雨波形や浸透に関するパラメータ、下水道管渠の構造を変化させることで流出現象を再現するモデルである。一次元と二次元モデルの統合解析技術により地表面(河川氾濫や下水道からの溢水)と地下面(下水道網ネットワーク)の両要素のモデル化を行い、内水・外水氾濫の相互作用、下水等への再流入等も計算できる。

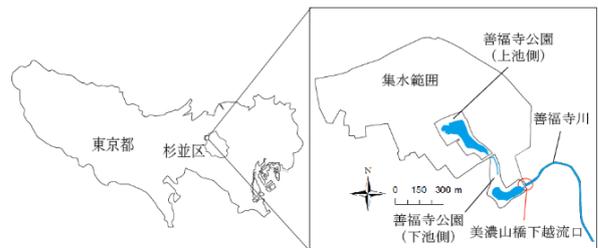


図-1 研究対象位置図

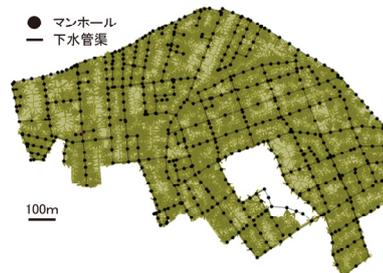


図-2 対象とする下水道管渠網



図-3 集水域の土地利用区分

本研究での流域モデルは、東京都下水道台帳から得られた 597 個のマンホールの地盤高と面積、それらをつなぐ下水道管渠の幅、高さ、上下流の管底高を、基盤地図情報及び Google の航空写真により ArcGIS Desktop10.5 で作成した流域マップ(図-3)に設定した。実測した降雨データを用いて、下水道管渠を流下する流量を再現することで、河川への CSO 越流量を算出した。なお、各マンホールに集水される雨水の量は、流域をティーセン分割することで最寄りのマンホールに流入するように設定した。なお、家屋についてはティーセン分割せず、最も近くにあるマンホールに流れ込むようにした。管渠内の流水の挙動については、質量保存式と運動量保存式を組み合わせ合わせたサンブナン式を基本式として不定流解析を行った。また、マンホールから溢水した水を氾濫させる二次元氾濫モデルは、基盤地図情報の数値標高モデル(5mメッシュ)を InfoWorks 内に取り込むことで作成した。

(4) 初期損失および浸透能の設定とモデルの妥当性

流出現象の再現のため、浸透現象を適切に評価できるパラメータの設定が重要であり、土地利用毎に初期損失と浸透能を設定した。本研究では既往研究⁷⁾⁸⁾を参考に、土地利用区分を屋根面(建物)、道路面(道路、駐車場、非浸透域)、浸透域(前庭、学校、公園)、畑・ゴルフ場の4つに再分類した。屋根面、道路面、浸透域は、既

往研究⁷⁾で求められている初期損失，浸透能を用い表-1の通りとした。既往研究⁷⁾では畑・ゴルフ場は浸透域に含まれていたが，飯田ら⁹⁾は畑の浸透能を215mm/hrとしており，他の浸透域よりも明らかに大きな浸透能を持つため，初期損失2.0mm，浸透能200mm/hrとして別に分類した。ゴルフ場は人工芝と碎石により，既に浸透機能が確保されていたため，畑と同程度に設定した。

本モデルの妥当性は，観測期間中CSO越流量の多い降雨イベントを抽出し，実測値と流出モデルによる計算値を比較し検証した。図-4に2013年10月15日～16日の再現計算結果を示す。実測値と再現計算値の波形は概ねあっており，適切であると考えられる。

3. 適用するグリーンインフラ

土地利用ごとの面積割合を図-5に示した。対象集水域は戸建住宅が多く，その屋根と前庭の面積を合わせると全体の66.3%を占めており，戸建住宅対策が重要である。また他の用途に対してもGIを適用し(表-2)，対象集水域全体にGIが導入される計画を立案した。

今回対象とする善福寺川上流域は関東ローム台地上に位置する地区であり，浸透能は高い。東京都は浸透施設設計時の関東ローム台地の最終浸透能を140mm/hr¹¹⁾，飯田ら⁹⁾は前庭植栽102mm/hr，屋敷林230mm/hとしていることから，本研究では浸透能を100mm/hrとして設定した。GIの各用途別のモデル計画を以下に示す。

戸建住宅のモデルとして敷地面積100㎡，建蔽率50%，前庭には車1台の駐車スペースがあるこの地域の典型的な住宅とする。GI導入前は屋根への降雨は樋を伝い，枿を経て下水管へ100%排出されている。これに対し，GIモデルでは，屋根面積の50%相当の樋と枿の連結を切り，そのうち25%分は前庭へ導水して土壌に浸透させ，25%分は雨水浸透ますへ流入させる(図-6)。これにより，屋根からの下水管への流出は50%になる。

現在，コンクリートなどで被覆されている前庭を改良し緑を大幅に増やして雨庭(浸透型植栽空間)にし，浸透能は100mm/hrとした。屋根からの流出も受け止めるため，流出モデル上は屋根からの流出分を差し引き，75mm/hrの浸透能を与えて計算する。

道路は，対象地区に見られる2車線の幅員10m，歩道2mの広幅員道路及び住宅街の幅員4.5m，1車線の生活道路をモデルとした。

広幅員モデルでは，歩道に透水性舗装を導入し，舗装下部には深さ40cm，間隙率40%の碎石貯留層(2m×0.4×0.4×2=0.64㎡/m)を設け，底面からの土壌浸透は100mm/hrとした(図-7)。これにより全道路面積に対して初期損失32mm，浸透能20mm/hr(100×2/10)を確保

表-1 無対策時の初期損失・浸透能の設定値

設定値	屋根面	道路面	浸透面	畑・ゴルフ場
初期損失 (mm)	0	0.5	2.0	2.0
浸透能 (mm/hr)	0.01	0.01	5.0	200

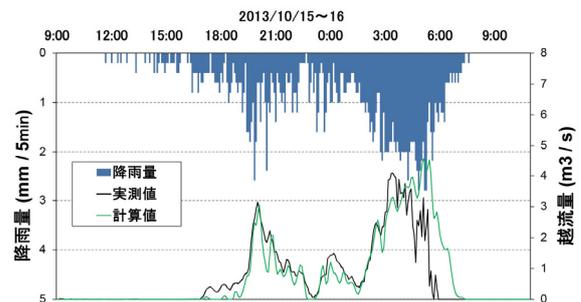


図-4 CSO再現計算結果

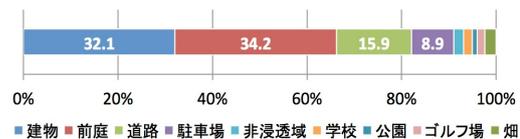


図-5 土地利用ごとの面積割合

表-2 グリーンインフラの導入モデル

土地利用	グリーンインフラ導入モデル
建物	種の本数のうち，25%を前庭に，25%を浸透トレレンチに浸透させ，合わせて50%の流出抑制
前庭	緑地を増やす (浸透能100mm/hr，計算上は75mm/hr)
道路(2車線以上)	歩道の浸透化(初期損失32mm，浸透能20mm/hr)
道路(1車線)	コミュニティ道路化，バイオスウェイル整備 (初期損失60mmと浸透能22.5mm/hr)
学校	グラウンドの人工芝化・浸透化により流出ゼロ
駐車場	轍以外の部分を緑化により流出ゼロ
公園	浸透化，地下に防災用雨水貯留施設を設置することにより流出ゼロ
上記以外の非浸透域	流出ゼロ

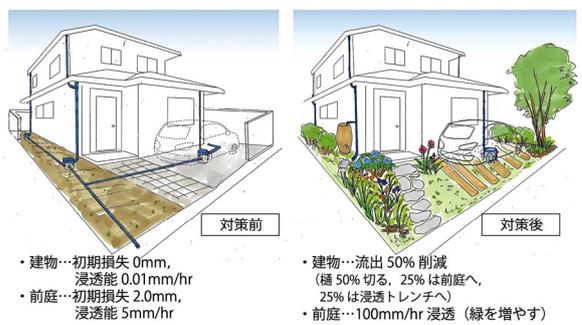


図-6 戸建住宅への導入モデルイメージ



図-7 2車線道路への導入モデルイメージ(断面)

する。生活道路モデルでは片側に上記と同仕様の0.5m幅の透水性舗装を設ける。歩道と車道の間には，0.5m幅のバイオスウェイル(線上の浸透型植栽枿)を設け，車道の表面流出水を浸透させる。このバイオスウェイルは深さ1.2m，間隙率30%の土壌を想定し，底面からの

浸透能は 100mm/hr とした。これにより全道路面積に対し、初期損失 60mm, 浸透能 22.5mm/hr を確保する(図-8, 図-9)。駐車場, 公園, 学校のグラウンド等は土壌面積が大きく, GI 導入により流出をゼロの計画とした。

4. GI 導入による洪水抑制効果

(1) 対象降雨について

対象降雨として観測期間中の比較的大きな降雨量が観測された長雨型(2013年10月15日)と集中豪雨型(2015年8月17日)を年超過確率 1/100 の降雨量に引き伸ばしたものを用いた(図-10, 図-11)。長雨型は24時間雨量が, また, 集中豪雨型は1時間雨量が最大となる期間を対象に 1/100 確率の降雨量に引き伸ばした。なお, 1/100 確率の降雨量は, 東京都公表資料¹²⁾により1時間 97.4mm, 24時間 327.4mm とした。

また, 近年の気候変動による降水量増加を受け, 国土交通省は社会全体が想定しうる最大規模の降雨「想定最大外力(洪水・内水)」¹³⁾を設定している。善福寺川が含まれる関東地区の想定最大外力は排水面積 1km²以下において12時間 584mm, 24時間 690mm である。本研究では極端豪雨においても GI が効果を発揮するのか検証するため, 関東地方の可能最大降雨程度の降雨量が平地の都市部で観測された九州北部豪雨(図-12)の降雨データを併せて用いた。2017年7月5日に福岡県朝倉市で観測された24時間降水量は516mm である。関東は九州と降雨特性は異なるものの, 線状降水帯が停滞した場合, 同規模の降雨が発生する可能性は否定できないと考え, 九州北部豪雨のデータを極端豪雨として用いた。

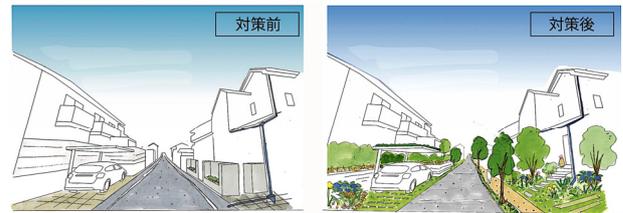
(2) 1/100 洪水確率における流出抑制効果

1/100 確率の2降雨を対象にした, GI 導入によるマンホールからの溢水による洪水量抑制結果を述べる。長雨型は, GI 導入前の総溢水量は 700 m³であったが, すべての GI を導入した場合, 溢水は発生しなくなった。

集中豪雨型については, 降雨時間は短いですがピーク流量が非常に大きいため, GI 導入前には総溢水量で 45,000 m³が発生し, 最大浸水深が 60cm を超える箇所も存在した。すべての GI 対策導入により 240 m³程度まで低減し, 99%の抑制効果が得られた。最大浸水深は 5cm 以下に低減される。流出抑制対策別の効果を図-13 から見ると, 建物, 前庭, 道路への単独導入においても 30%を超える流出抑制効果が表れる。学校, 公園, 非浸透域は流域に占める面積が小さいことから効果は限定的である。

(3) 極端豪雨における流出抑制効果

関東の想定最大外力に近い九州北部豪雨の雨量データ



・道路…初期損失0.5mm, 浸透0.01mm/hr ・道路…初期損失60mm, 浸透22.5mm/hr (バイオスウェイル, コミュニティ道路化)

図-8 1車線道路への導入モデルイメージ(断面)

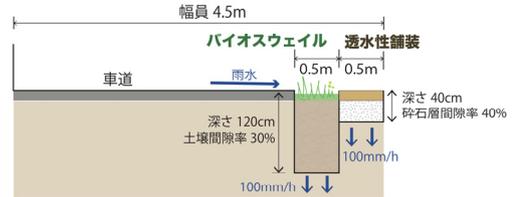


図-9 1車線道路への導入モデルイメージ(断面)

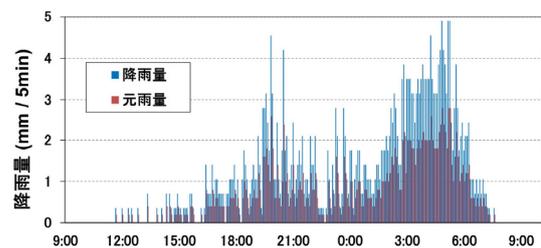


図-10 長雨型: 1/100 確率波形(2013年10月15日)

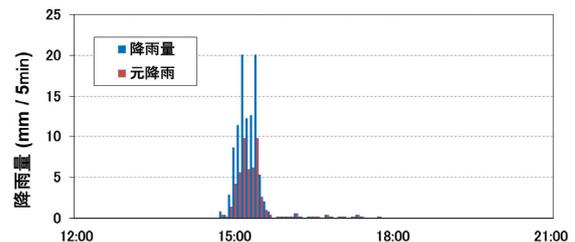


図-11 集中豪雨型: 1/100 確率波形(2015年8月17日)

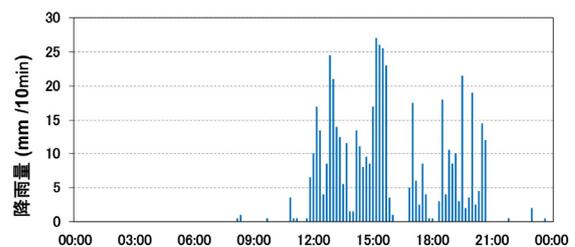


図-12 極端豪雨(九州北部豪雨2017年7月5日)

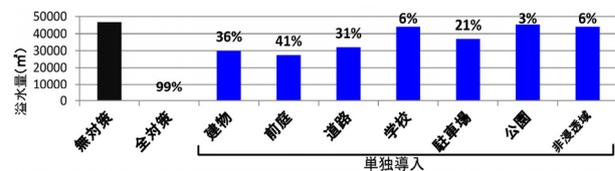


図-13 GI 対策別の溢水量(集中豪雨型2015/8/17)

は, 長時間, 雨量強度が強い降雨のためマンホール溢水量は約 200,000 m³と集中豪雨型の約 4.4 倍である。浸水域が最大の 15 時 50 分の浸水深について, GI 導入前を図-14 に, 導入後を図-15 に示す。降雨強度が強い場合, 広範囲で浸水が発生する。最大浸水深は 80 cm 以上である。

台地上の住宅地において水深が大きい氾濫が発生することは、住民が想定していないことから非常に危険である。

図-14 には氾濫流向を示したが、低い場所のマンホールに水が集中し、氾濫流が低いところをたどり最終的に谷地に流出している。中央のくぼ地では、1つのマンホールから総溢水量 50,000 m³もの氾濫が発生している。

一方 GI を導入すると、浸水面積は約 10%へ大きく低減した。最大浸水深は一部 40cm の箇所は残るものの、概ね 20cm 未満まで低減している箇所が多く、総氾濫量は 98%削減された。極端豪雨に対しても GI は大きな効果を発揮することがシミュレーション上示された。

対策別の効果を図-16 から見ると、集中豪雨型と同様、建物、前庭、道路への単独導入の効果が高く 50%を超える流出抑制効果が表れる。学校、公園、非浸透域は流域に占める面積が小さいことから効果は限定的である。

5. GI 導入による CSO 抑制効果

(1) 対象降雨について

合流式下水道の場合、平常時の汚水流量の概ね 3 倍以上の流量になると、河川等に越流する構造になっている。

善福寺川流域の既往研究⁷⁾によると 30 分雨量で 4.3mm を超えると CSO が発生することが明らかになっている。CSO は閉鎖性水域の水質や平常時の河川水質を悪化させる。閉鎖性水域への影響は CSO の総量と関係があり、年間の越流量で評価できる。また、河川への影響は総越流量とともに、頻度で評価しうる。本研究では、対象流域に対して、GI による CSO の削減効果を年間の流出量および年間の CSO 発生回数で評価する。

ここでは 2016 年に観測された 1 月 1 日から 7 月 8 日まで (190 日間) の降雨に、2014 年 (7 月 9 日～12 月 18 日 : 163 日間)、2015 年 (12 月 19 日～12 月 31 日 : 13 日間) をつなぎ合わせて年間の降雨データとし (図-17、総降雨量 1495mm)、CSO 量抑制効果について検証した。

(2) 年間の CSO 抑制効果

対象集水域に年間降雨時の CSO 流出量及び年間発生回数を図-18 及び表-3 に示す。導入前は、年間総 CSO 量 220,000 m³が発生している。全対策を施すことで、約 95%まで大幅に抑制することが可能となる。

流出抑制対策別の単独導入のケースでは建物、前庭、道路では CSO 総流出量で 30%程度の削減効果があった。また、道路と駐車場に併せて対策を講じた場合、前庭への単独導入よりも削減効果は大きかった。これは、GI 導入前にも前庭には浸透能 5mm/hr があり、少雨が多い年間降雨量に対しては、この浸透能によって効果が既に発揮されているためである。一方、道路や駐車場は GI

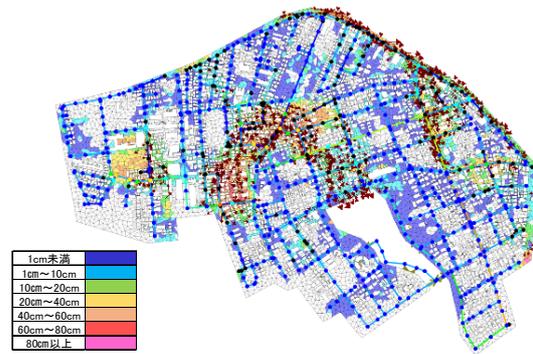


図-14 無対策時の氾濫解析の結果 (極端豪雨)



図-15 GI 全対策導入時の氾濫解析の結果 (極端豪雨)

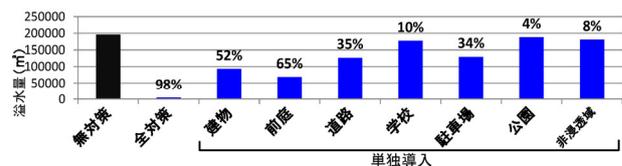


図-16 GI 対策別の溢水量 (極端豪雨)

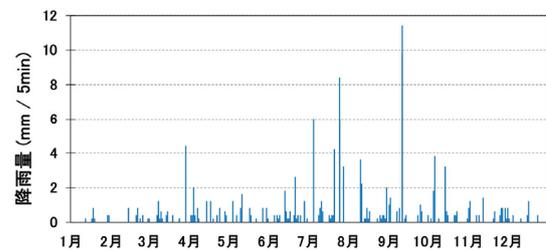


図-17 作成した年間の降水量

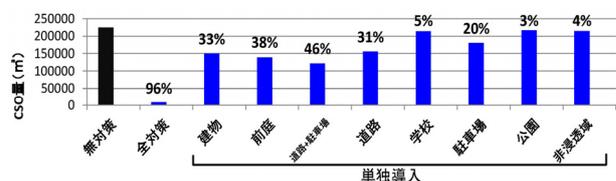


図-18 1年間の CSO 量

表-3 GI 対策別の年間 CSO 発生回数

無対策	全対策	建物	前庭	道路+駐車場	道路
24	6	18	24	17	18
学校	駐車場	公園	非浸透域		
24	20	24	22		

導入前は浸透能がほぼゼロであるため、導入効果は高い。

次に、CSO 発生回数は無対策時、年間 24 回発生したが、すべての GI を導入すると年 6 回まで抑制できる。

流出抑制対策別にみると、道路や建物単独、または道路と駐車場を併せた対策は削減効果は高いが、前庭だけ

の単独導入ではCSOの発生回数を削減できていない。

CSOは小出水で発生するため、GIによって完全に発生回数を抑制することは困難であることが分かる。

以上のように、GIの導入によって、CSO流出量は大幅に削減可能であり、これにより閉鎖性水域の水質の改善に大きく寄与するものと考えられる。

6. 結論

シミュレーション解析の結果、GI技術の洪水流出抑制効果は非常に高いことが明らかとなった。対策後は、長雨型と集中豪雨型、極端豪雨の各洪水量に対して、全対策を行うことで95%以上の流出抑制効果が得られた。

CSOは比較的小さな降雨でも発生するが、今回作成した年間降雨を対象としたシミュレーションによると年間の総量に対して95%の大幅なCSO削減ができるため、河川環境の改善ならびに閉鎖性水域である東京湾への負荷削減改善に大きく貢献できると考える。都市のCSO対策、洪水対策としてGIを適用していくことは、非常に有効であることが分かる。なお、土壌が持つ浸透能の継続性及び浸透能の値について研究者間でも意見が一致しない場合もあるため、今後正確な土壌特性を検証することが課題である。GIは魅力的で効果的な流出抑制策でありその導入は都市政策の一環として行われべきものである。本研究で行った効果の定量的な評価およびコスト、多面的な機能の評価が行われ、行政に浸透すれば日本においても十分、導入可能であると考えている。

謝辞：本研究は、国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）の社会技術研究開発センター（RISTEX）により採択された戦略的創造研究推進事業によって行われた。

参考文献

- 1) 気象庁：気候変動監視レポート，2016

- 2) American Rivers, Association of State and Interstate Water Pollution Control Administrators, National Association of Clean Water Agencies, Natural Resources Defense Council, The Low Impact Development Center, U.S. Environmental Protection Agency: Managing Wet Weather With Green Infrastructure Action Strategy, pp.5, 2008
- 3) United States Environmental Protection Agency : <https://www.epa.gov/green-infrastructure/what-green-infrastructure>
- 4) NYC Environmental Protection : NYC Green Infrastructure Plan, 2010
- 5) 島谷幸宏：戦略的創造研究推進事業 平成 27 年度研究開発実施報告書「分散型水管理を通じた、風かおり、緑かがやく、あまみず社会の構築」, pp.14, 社会技術研究開発センター, 2015
- 6) 島谷幸宏：戦略的創造研究推進事業 平成 28 年度研究開発実施報告書「分散型水管理を通じた、風かおり、緑かがやく、あまみず社会の構築」, pp. 4, 社会技術研究開発センター, 2016
- 7) 岩永祐樹, 巖島怜, 佐藤辰郎, 島谷幸宏：流域治水による合流式下水道雨天時越流水の流出抑制に関する研究-東京都善福寺川を事例として-, 河川技術論文集, Vol.21, pp.445-460, 2015.
- 8) 巖島怜, 岩永祐樹, 出田一史, 佐藤辰郎, 島谷幸宏：各戸貯留及び土壌改良によるマンホール集水域を対象とした流出抑制効果に関する研究, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.72 No.2, pp.49-58, 2016.
- 9) 飯田晶子, 大和広明, 林誠二, 石川幹子：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, Vol.50 No.3, pp.501-508, 2015
- 10) 東京都下水道局 : gesui.metro.tokyo.jp/osigoto/daicho.htm.
- 11) 東京都総合治水対策協議会：東京都雨水貯留・浸透施設技術指針, pp.14, 2009.
- 12) 東京都：東京都豪雨対策基本方針（改定）, 2014, <http://www.metro.tokyo.jp/INET/KEIKAKU/2014/06/DATA/70o6u105.pdf>
- 13) 国土交通省：浸水想定（洪水，内水）の作成等のための想定最大外力の設定手法, 2015

?

FLOOD AND CSO SUPPRESSION EFFECT BY GREEN INFRASTRUCTURE TARGETING UPSTREAM ZEMPUKUJI – RIVER BASIN

Yohei OGAHARA, Fumiko TAURA and Yukihiro SHIMATANI

We investigated the flood and Combined Sewer Overflow(CSO) volume suppression effect in the case of introducing green infrastructure (GI) in the catchment area of CSO at the rainy weather sewer system in the Zenfukuji Upstream Basin.

We used three types of rainfall forms in flood case: two annual exceedance probability (1/100) and torrential rain with maximum possible rainfall in the Kanto region, in CSO case: annual rainfall. GI was introduced for each land use, such as private houses and roads, etc. By introducing all countermeasures, it became clear that the flood volume of more than 90% can be suppressed, the annual number of CSO occurrences and the amount generated per year can be drastically reduced.