

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-

STUDY ON THE OUTFLOW RESTRAINT OF COMBINED SEWER OVERFLOW
WHEN RAINY WEATHER BY THE RIVER BASIN MANAGEMENT
-AS A CASE OF ZENPUKUJI RIVER OF URBAN RIVER IN TOKYO-

岩永祐樹¹・巖島 怜²・佐藤辰郎²・島谷幸宏³

Yuki IWANAGA, Rei ITSUKUSHIMA, Tatsuro SATO and Yukihiro SHIMATANI

¹学生会員 工学 九州大学大学院工学府 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

²正会員 工博 九州大学持続可能な社会のための決断科学センター (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

³フェロー会員 工博 九州大学大学院工学研究院 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

Combined Sewer Overflow(CSO) cause severe effect to river environment. In Japan, 200 Urban areas adopt the Combined Sewer and CSO is the nationwide problem.

In this study, We investigated the relationship between intensity of rainfall and number of occurrence of CSO in the Zenpukuji River. And, we developed the outflow simulation model of CSO by using Inforworks ICM. Then, we carried out the simulation on the assumption that infiltration facilities are set in the basins.

As a result, we reveal that over 1.1mm/5min or 2.0mm/10min, 4.3mm/30min, 6.4mm/hr rainfall caused the CSO at the upper reach of the Zenpukuji River. The simulation results indicated that the infiltration facilities can reduce the CSO peak flow when the peak discharge was under 12m³/s at the observation point.

Key Words : Combined Sewer Overflow ,Interated watershed management for flood control,Infiltration facilities

1. はじめに

近年, 都市における非浸透域の増加や, 局所的短時間降雨による水害が全国の都市で頻発している. 気象研究所の報告では, 短時間強雨 (1時間降水量30mm以上) の発生回数は将来全国的に増加傾向であり¹⁾, 地球温暖化に伴う気候変動により都市型水害の頻発が懸念されている. 加えて, 合流式下水道が接続する都市河川では洪水時に未処理の下水が流出し, 水質の悪化や水環境の劣化が生じている. 合流式下水道は全国に広く分布しており (約200都市), 大きな課題となっている²⁾.

こうした都市型水害による複合的な課題を解決するためには, 「流域全体で保水・浸透・貯留能力を強化する」流域治水の概念が有効である³⁾. この概念に基づき, 福岡市内を流下する樋井川では, 市民・行政・大学等が一体となって「樋井川流域治水市民会議」を立ち上げ, 協働で流域治水の実現を目指している⁴⁾.

一方, 欧米では雨水貯留による都市型水害, 合流式下水道越流水 (CSO:Combined Sewer Overflow, 以下CSOと省略) 対策として, 要素技術開発が進んでおり, 米国

環境省 (EPA: United States Environmental Protection Agency) では植栽マスや透水性舗装, 樹木による雨水貯留をグリーンインフラ (Green Infrastructure) と位置づけ, 河川への流出抑制や合流式下水道雨天時越流対策としている⁵⁾.

流域治水の要素技術のうち雨水貯留浸透施設 (透水性舗装, 浸透ます等) の導入については, 研究が多く進められ定量的な評価が行われている. 透水性舗装に関する貯留浸透機能の評価に関する研究⁶⁾や浸透トレンチを流域に設置した場合の海老川の流量の変化を算出した研究⁷⁾等がある. 他にも, 兵庫県六甲川を対象とした雨水貯留浸透施設による面源負荷軽減対策に関する研究⁸⁾や, 大阪府道頓堀川を対象とした雨天時負荷の定量的評価に関する研究⁹⁾等がみられた. しかし, 雨水貯留施設による合流式下水道越流水の抑制については, 効果について指摘されているものの, 定量的な評価に関する研究はほとんどみられない.

本研究で対象とした東京都善福寺川上流域は, 「善福寺川を里川にカエル会」を中心に地域住民による河川再生の取り組みが行われている. 一方で, 洪水時には合流

式下水道越流水が流入し、水質悪化が問題となっている。上記の課題を解決するため、現地観測によりCSOの発生の実態を明らかにし、豪雨時の合流式下水道からの河川への越流を再現可能なモデルを構築し、雨水貯留浸透施設（浸透トレンチ）を流域に設置した場合のCSOの削減効果について検証することを目的とする。

2. 研究方法

(1) 対象地域

本研究では、東京都杉並区を流れる一級河川荒川水系善福寺川上流域を対象とした（図-1）。善福寺川は善福寺池を水源とする延長10.5km、流域面積18.3 km²の神田川に合流する中小河川である。対象とする善福寺川流域では合流式による下水道が敷設されている。本研究では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を対象とした。東京都下水道局が公表している下水道台帳（<http://www.gesui.metro.tokyo.jp/osigoto/daicyo.htm>）から当該越流口の集水範囲を調べた。

(2) 対象地域の土地利用

国土地理院が公表している基盤地図情報及びGoogleの航空写真より、土地利用状況や標高を地理情報システム（Geographic Information System, 以下GISと省略）により整理した。得られた12種類の土地利用区分（図-2）を基に、脇岡らの研究¹⁰を参考にして対象地域を屋根面、道路面、浸透域に再分類した。建物とゴルフ場、墓地は浸透特性が屋根面に類似すると考えられるため、屋根面に含め、砂利駐車場とコンクリート駐車場、コンクリート面、道路は道路面に含め、その他は浸透域とした。流域の面積70.9haに対して、屋根面が23.3ha（33%）、道路面が18.0ha（25%）、浸透域が29.6ha（42%）を占めていた（図-3）。

(3) 現地観測による下水越流現象の把握

美濃山橋下の越流口からのCSOの流出現象の実態を把握するため、越流量を現地観測により明らかにした。この越流口の直上流と直下流の2ヶ所に水位計を設置し、越流口から約400m離れた井荻小学校内に雨量計を設置した（図-4）。水位及び雨量は5分間隔で計測した。データ観測の期間は2013年9月6日～11月6日及び2014年6月7日～10月9日である。あわせて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(式(1))及びManning式(式(2))を用いてH-Q曲線を作成し、流量を求めた。マンニングの粗度係数は、 $n=0.025$ とした。このようにして得られた、下流の流量から上流の流量を差し引いたものを越流口からのCSO

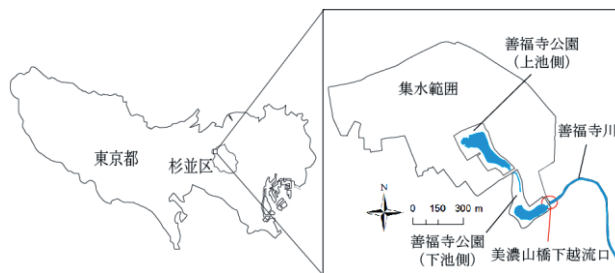


図-1 対象地域

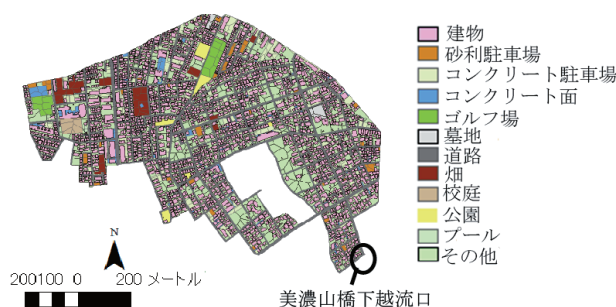


図-2 集水範囲の土地利用区分

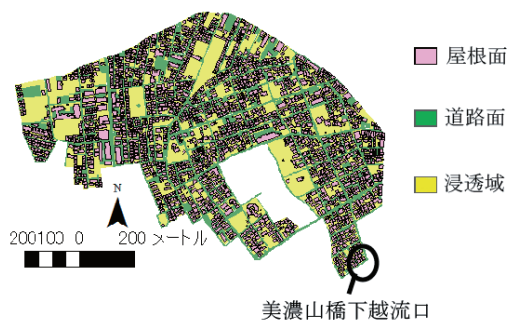


図-3 屋根面、道路面、浸透域の土地利用図

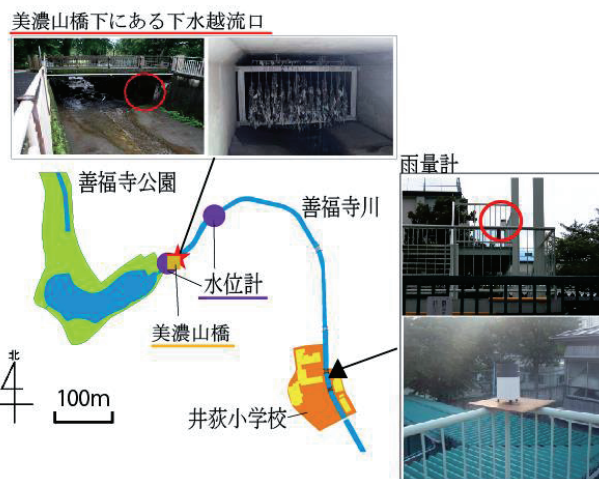


図-4 水位計、雨量計の設置場所

越流量とした。なお、水位の計測には、”HOBO U20 Water Level Logger”を、雨量の計測には、”HOBO Data Logging Rain Gauge”を使用した。

$$\text{連続の式: } Q = AV \quad \text{式(1)}$$

$$\text{Manningの式: } V = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} J^{\frac{1}{2}} \quad \text{式(2)}$$

Q : 流量[m³/s] A : 断面積[m²]
V : 流速[m/s] n : マニングの粗度係数[m^{-1/3}・s]
I : 河床勾配 R : 径深 (= A / S) [m]
S : 潤辺[m]

(4) 解析モデルの概要

本研究では分布型流出モデルの一つであるInfoWorks ICM 4.0を用いて、越流現象の再現及び流域に貯留浸透施設を設置した際の越流量削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、下水道管渠の構造等を変化させることで流出現象を再現するモデルである。

東京都下水道台帳から得られたマンホールの地盤高と面積、下水道管渠の幅、高さ、上下流の管底高を、GISで作成した流域マップに設定し流出モデルを構築した(図-5)。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。

管渠内の流水の挙動については、質量保存式(式(3))と運動量保存式(式(4))を組み合わせたサンブナン式(式(5))を基本式として、不定流解析を行った。

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad \text{式(3)}$$

$$\frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{gA} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + \cos\theta \frac{\partial h}{\partial x} - (S_0 - S_f) = 0 \quad \text{式(4)}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2Q}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{Q^2}{A^2} \frac{\partial A}{\partial H} \frac{\partial h}{\partial x} + gAS_f + gA \left(\frac{\partial h}{\partial x} - S_0 \right) = 0 \quad \text{式(5)}$$

Q : 流量[m³/s] A : 断面積[m²]
h : 水位[m] g : 重力加速度[m/s²]
x : 管軸方向の座標 t : 時間[s]
S₀ : 管路床勾配 S_f : 損失水頭勾配
θ : 水平方向となす角度 [°]

(5) 初期損失と浸透能の設定方法

流出現象の再現のためには、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る。そこで流出計算実施のため、土地利用ごとに初期損失と浸透能を設定した。初期損失と浸透能の設定は、一般的に使用されているパラメータを使用する方法や現地実験による方法があるが、本研究では糸井ら¹¹⁾の研究を参考に既往の研究で設定されている道路面、屋根面、浸透域の初期損失、最終浸透

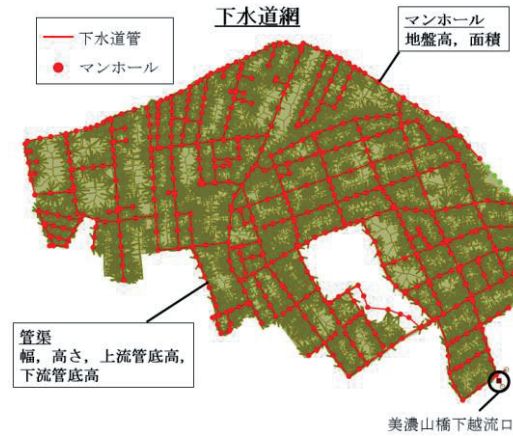


図-5 流出モデル図

表-1 既往研究の初期損失、浸透能の上下限值

	初期損失(mm)	浸透能(mm/hr)
屋根面	0～2	0～40
道路面	0～2	0～50
浸透域	2～6	5～10

表-2 当モデルの初期損失と浸透能の設定値

設定値	屋根面	道路面	浸透域
初期損失 (mm)	0	0.5	2.0
浸透能 (mm/hr)	0.01	0.01	5.0

能を調べ^{10)~19)}、それらの下限値～上限値の範囲内(表-1)で数値を変化させ、当該流域の流出現象の再現性が最も高い数値(表-2)を採用した。

3. 降雨特性とCSO発生との関係

(1) 1降雨イベントの総降雨量とCSO流出の関係

1回の降雨イベントは降雨発生時を始点とし、降雨発生後、下流側の水位が発生前の水位に戻るまでの期間とした(図-6)。また4時間以上無降雨が続いた場合は、別の降雨イベントとして扱った。表-3に対象期間における各イベント内の総降雨量とCSO発生状況の関係を示す。現地観測とシミュレーション結果から、越流口の下流側と上流側で0.1m³/s以上の差が生じたイベントをCSO発生と判断し回数をカウントした。全86回の降雨イベント中25回でCSOが発生していた。総降雨量が10mm未満では、CSOはほとんど発生せず、20mm以上で必ず発生していることがわかる。一方で、20mm以下でも、短時間降雨強度の大きい雨など降雨パターンによってはCSOの発生が見られた。

(2) 降雨強度とCSO発生との関係

次に降雨強度とCSO発生との関係を述べるため、CSOのピーク流出量と各時間間隔(5分、10分、30分、1時間)のピーク雨量との相関を調べた。その結果を図-7(a)～

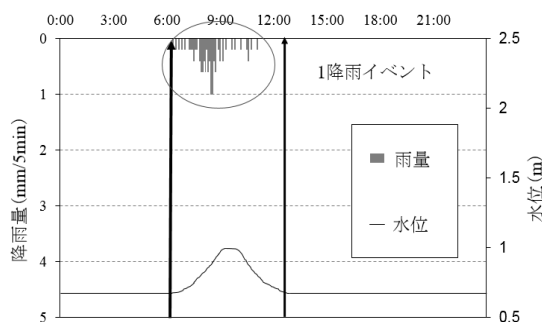


図-6 1降雨イベントの概念図

表-3. 対象期間におけるCSO越流の発生状況

総降雨量	CSO 発生回数	CSO 非発生回数
0～5mm	1	52
5～10mm	0	6
10～20mm	2	3
20～50mm	13	0
50～100mm	6	0
100mm 以上	3	0
計	25	61

(d)に示す. 各時間雨量とピーク流量は正の相関を示しており, 対象流域においては, CSOのピーク流出量は対数曲線を用いピーク雨量で説明可能であることが明らかとなった. また, CSO発生に影響する降雨強度以外の発生要因として降雨波形等を考慮することで, CSO発生/非発生の予測精度を向上させることができると考えられる. 図-7(a)～(d)において, 回帰曲線のx軸切片の降雨強度がCSO発生/非発生の閾値と考えられる. 従って, 1.1mm/5min, 2.0mm/10min, 4.3mm/30min, 6.4mm/hrを超えた降雨強度の降雨によりCSOが発生していた. また, ピーク雨量が同等であっても, 降雨パターンによってCSOのピーク流出量は異なる.

全86回の降雨イベントを対象に各時間間隔(5分, 10分, 30分, 1時間)のピーク雨量とCSO発生/非発生の関係を図-8に示す. CSO越流が発生した25回のイベントのうち, 上記で設定した閾値未満の降雨でCSOが発生した回数はそれぞれ5分間ピーク雨量で3回, 10分間ピーク雨量で3回, 30分間ピーク雨量で4回, 1時間ピーク雨量で2回であったことから閾値は概ね正確と考えられる.

4. 分布型流出モデルを用いたCSO削減効果のシミュレーション

(1) モデルの検証

対象期間における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, モデルの適合度を評価した. 一例として, 2013年10月15日～

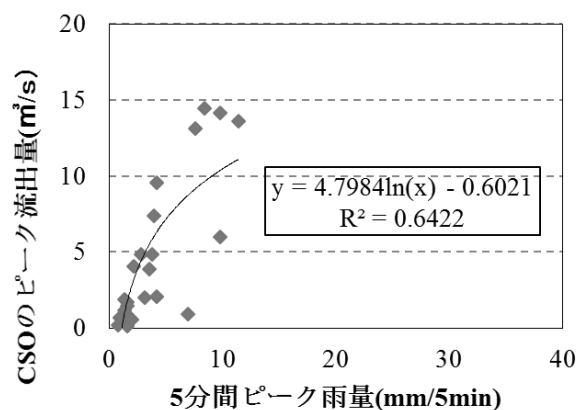


図-7 (a) CSOピーク流出量と5分間ピーク雨量との相関

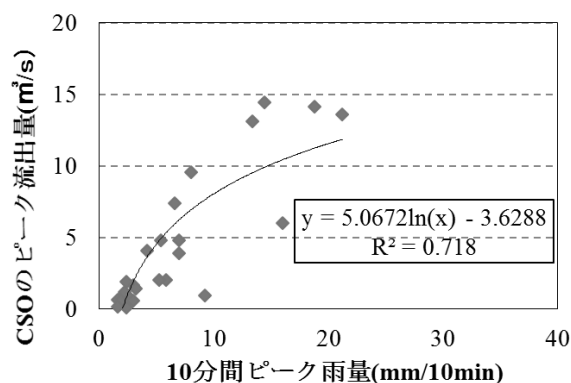


図-7 (b) CSOピーク流出量と10分間ピーク雨量との相関

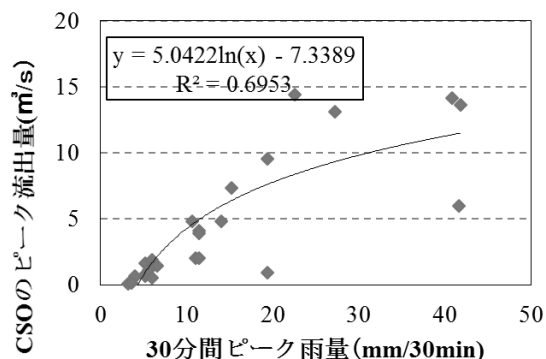


図-7 (c) CSOピーク流出量と30分間ピーク雨量との相関

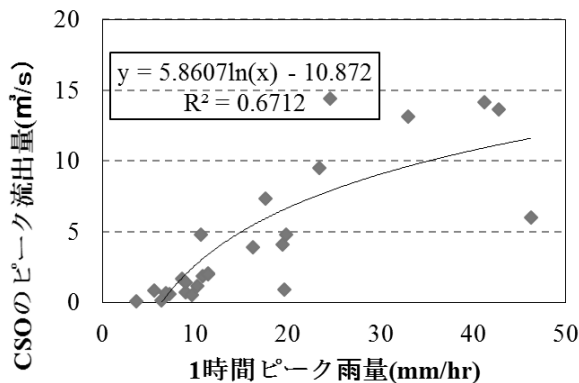


図-7 (d) CSOピーク流出量と1時間ピーク雨量との相関

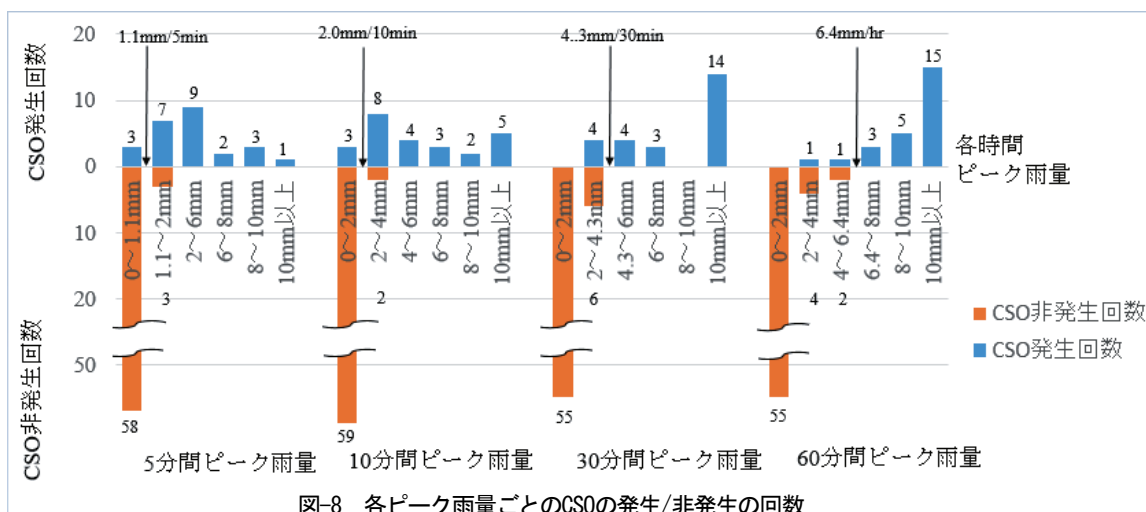


図-8 各ピーク雨量ごとのCSOの発生/非発生の回数

16日の再現計算結果を示す(図-9)。実測値と再現計算値の波形は概ね合っており、今回設定した浸透能は適切で、本モデルは妥当であると考えられる。

(2) 貯留浸透施設によるCSOの低減効果

貯留浸透施設は、雨水を貯留し河道への流出を抑制する効果があることから、CSOを削減にも寄与するものと考えられる。ここでは、貯留浸透施設の設置によるCSO削減効果を定量的に把握するための流出計算を実施した。流域内の家屋と道路の25%、50%、75%、100%に浸透トレンチを設置した場合のCSO削減効果を解析した。設置する浸透トレンチは、雨水浸透施設技術指針[案]に従い、単位貯留浸透量 $0.26\text{m}^3/\text{hr}/\text{m}^2$ とした。ただし道路に設置する場合は、全て片側のみに設置した。図-10に2013年10月15日～16日の降雨におけるCSO削減効果を示す。浸透トレンチの設置率を上げることでCSO削減効果も高まり、流域の家屋と道路の50%に浸透トレンチを設置した場合CSOのピーク越流量を約20%、100%に設置した場合はCSOのピーク越流量を約42%削減可能であることが分かった。また対象期間中のCSOの総流量について、設置率が50%のときは総流量の約34%、設置率が100%のときは総流量の約63%削減可能だった。

次に浸透トレンチの設置率とCSOのピーク越流量のカット率、CSOの発生を抑制した回数を表-4に示す。対象は3.で示した25回のCSO発生イベントとした。流域の家屋と道路の50%に浸透トレンチを設置することで対象期間におけるCSOの発生回数は25回から22回に減少し、100%に設置した場合は16回に減少した。この結果から、流域の貯留浸透能力を高めることでCSOの流出が削減されることがわかった。

図-11にCSOが発生した25回のイベントを対象に、浸透トレンチを設置した場合のCSOのピーク越流量とその削減率を示した。CSOのピーク越流量とその削減率は対数曲線で良く説明でき、CSOのピーク越流量が小さいほど削減率が高いことが分かる。曲線

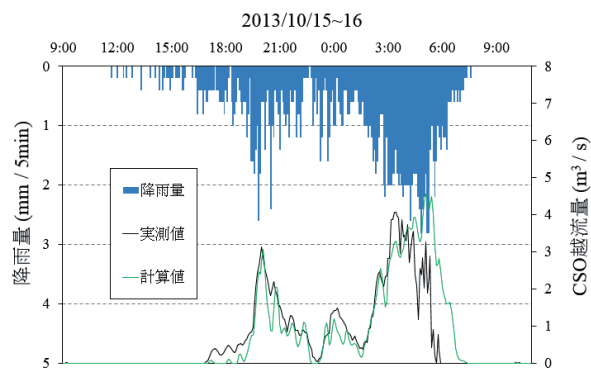


図-9 2013年10月15日～16日の出水を対象としたCSO越流の実測値と計算値の比較グラフ

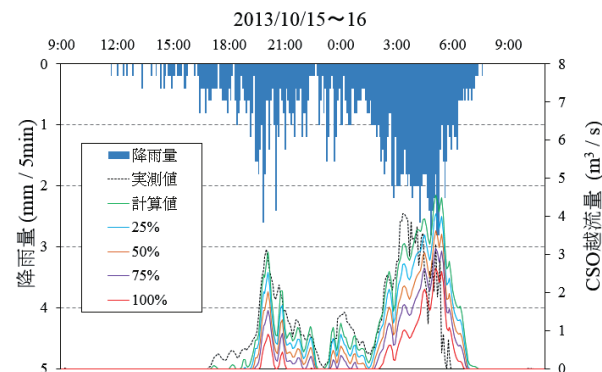


図-10 浸透施設設置による越流量の変化(2013年10月15日～16日)

表-4 浸透トレンチ設置によるCSO低減効果

浸透トレンチ 設置率	ピーク流量 カット率	対象期間においてCSO 発生を抑制できた回数
25%	10.7%	0
50%	20.3%	3
75%	30.5%	4
100%	41.7%	9

から外れた降雨イベントを見ると、短期間に降雨強度が大きい降雨が集中しているものや、長期間継続した降雨が多く、こうした降雨現象では浸透トレンチの効果が低くなることが分かった。また、同じ貯

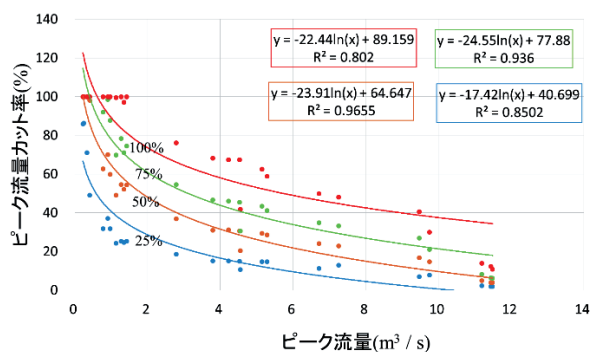


図-11 ピーク流量とそのカット率

留浸透施設の設置率であっても配置によってはその効果は異なることが考えられる。効率的な配置に関する研究についても今後行う必要があると考えられる。

5. 結論

本研究では、美濃山橋下越流口の流域において、雨水貯留浸透施設（浸透トレンチ）を設置した際のCSO削減効果について検証することを目的として研究を行った。

①CSO発生の現状として、対象流域に総降雨量が10～20mmでピーク雨量が1.1mm/5min，2.0mm/10min，4.3mm/30min，6.4mm/hr以上の降雨強度を持つ降雨により、CSOが発生する可能性が極めて高いことが明らかになった。

②降雨強度30mm/hrの雨に対して、流域の家屋と道路50%に浸透トレンチを設置するとCSOのピーク流量は約20%カットされ、100%に設置するとピーク流量は約42%カットされた。対象期間中のCSO発生回数は50%の設置率で25回から22回に、100%の場合は16回に削減でき、浸透トレンチの設置率が高いほど、ピーク流量、CSO発生回数ともに削減効果があった。ただし、短期間に降った降雨強度の強い雨や長時間継続した雨の場合、浸透トレンチによるCSOの削減効果が少ないことが分かった。

③貯留浸透施設の設置等の流域治水を進めていくことで、CSOの削減に効果があることが分かった。都市河川における水質の悪化や水環境の劣化を防ぐために、流域内への雨水貯留を促進し、河道への流出抑制を図ることが重要である。

参考文献

- 1) 気象庁：気候変動監視レポート2011
- 2) 財団法人下水道新技術推進機構：合流式下水道越流水（CSO）対策の研究，'96下水道新技術研究所年報ダイジェスト，No.23，1996。
- 3) 島谷幸宏，山下三平，渡辺亮一，山下輝和，角銅久美子：

治水・環境のための流域治水をいかに進めるか？，河川技術論文集，第16巻，2010。

4) 樋井川流域治水市民会議HP

5) United States Environmental Protection Agency: Greening CSO Plans: Planning and Modeling Green Infrastructure for Combined Sewer Overflow (CSO) Control, March 2014.

6) 西山哲，大西有三，矢野隆夫，北山迪也，和田実：透水性舗装の雨水浸透機能に関する研究，土木学会舗装工学論文集，第12巻，2007.12

7) 賈仰文，倪广恒，河原能久，末次忠司：都市河川流域の水循環解析と雨水浸透施設の効果の評価，水工学論文集，第44巻，2000.2

8) 和田有朗，岸本宏司，道奥康治：流出抑制及び面源負荷軽減対策における雨水貯留施設の評価，水工学論文集，第54巻，2010.2

9) 中村祐介，今福大智，根井大輝，西田修三：都市河川における雨天時汚濁負荷の実態と水質・低質への影響，土木学会論文集B1(水工学)Vol.71，No.4，I_1183-I_1188，2015

10) 脇岡靖明，市川新，古米弘明：下水道台帳データベースと細密数値情報を利用した分布型モデルによる都市雨水流出解析，下水道協会誌，Vol.38，No.469，pp79-90，2001.11

11) 糸井優輔，古米弘明，中島典之：合流式下水道雨天時汚濁解析のための管路内堆積物局在状況の推定手法，環境システム研究論文集，vol.32，2004.10

12) 藤村和正，安藤義久：都市流域における雨水浸透施設による流出抑制効果に関するシミュレーション，水文・水資源学会誌Vol.11，No.4，pp360-370，1998

13) 渡邊曉人，山田正，石川美宏：雨水浸透施設によるノンポイント汚濁負荷の補足効果のモデル化に関する研究，水文・水資源学会誌 Vol.23，No.6，pp458-469，2010.11

14) 藤村和正，安藤義久：表層浸透能の変化を考慮した多摩丘陵都市流域における水循環解析，水工学論文集，第46巻，2002.2

15) 藤村和正，安藤義久，前田正博：低地部都市流域の洪水流出モデルに関する一考察，水工学論文集，第39巻，1995.2

16) 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（資料編），2009.2

18) 金泰成，山田淳，文亨夫：雨水貯留施設による雨天時ノンポイント流出汚濁物のリアルタイム制御，環境システム論文集，Vol.28，2000.10

19) 和田彦彦，尾崎平，村岡基：下水道施設のリアルタイムコントロールによる合流式下水道改善に関する研究，土木学会論文集G，Vol.62，No.1，201-210，2006.3

20) 増補改訂 雨水浸透施設技術指針〔案〕，公共社団法人雨水貯留浸透技術協会 編

(2015. 4. 3受付)