T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	合流式下水道からの雨水流出に伴う都市河川でのスカム発生に関する研究 － 東京都呑川を対象として －
Title(English)	
著者(和文)	三浦心
Author(English)	Shin Miura
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11302号, 授与年月日:2019年9月20日, 学位の種別:課程博士, 審査員:中村 恭志,神田 学,木内 豪,鼎 信次郎,吉村 千洋
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11302号, Conferred date:2019/9/20, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

合流式下水道からの雨水流出に伴う
都市河川でのスカム発生に関する研究
― 東京都呑川を対象として ―

2019 年 9 月

三浦　心

東京工業大学

合流式下水道からの雨水流出に伴う
都市河川でのスカム発生に関する研究
ー 東京都呑川を対象として ー

目　　次

第 1 章 序　　論 1-1
1-1 研究の背景 1-1
1-2 既往の研究 1-4
1-2-1 都市河川汽水域の有機汚濁に関する研究 1-4
1-2-2 スカムに関する研究 1-6
1-3 本研究の目的と構成 1-8
1-3-1 本研究の目的 1-8
1-3-2 本論文の構成 1-9
第 2 章 都市河川の現状と課題 2-1
2-1 緒言 2-1
2-2 東京都区部の都市河川 2-2
2-2-1 地形特性 2-2
2-2-1 下水道整備状況 2-5
2-2-2 河道特性 2-6
2-2-3 都市河川の水環境問題 2-7
2-3 研究の対象 2-12
2-4 結語 2-26
第 3 章 合流式下水道からの有機懸濁物の流出 3-1
3-1 緒言 3-1
3-1-1 既往の研究と課題 3-1
3-1-2 本研究の特徴 3-2
3-1-3 検討フロー 3-3
3-2 O-SS 流出量の現地調査 3-4
3-2-1 下水管渠内調査 3-4
3-2-2 河川内調査 3-17
3-3 合流式下水道流域からの O-SS 流出量の算出 3-23
3-3-1 下水流出モデルの構築 3-23

3-3-2 下水管渠内地点におけるキャリブレーション 3-39
3-3-3 感潮域上流端における検証 3-42
3-4 結語 3-51
第 4 章 有機懸濁物の河川感潮域における堆積 4-1
4-1 緒言 4-1
4-1-1 本章の目的 4-1
4-1-2 既往の研究と課題 4-1
4-1-3 本研究の特徴 4-3
4-1-4 検討フロー 4-3
4-2 室内実験（O-SS 沈降速度試験） 4-4
4-3 現地調査 4-13
4-3-1 水質縦断分布調査 4-13
4-3-2 堆積量調査 4-17
4-4 有機物堆積機構のモデル化 4-26
4-4-1 モデル化方法 4-26
4-4-2 検証 4-30
4-5 結語 4-38
4-5-1 得られた知見 4-38
4-5-2 課題 4-38
第 5 章 嫌気性ガスの生成・スカム発生 5-1
5-1 緒言 5-1
5-1-1 本章の目的 5-1
5-1-2 既往の研究と課題 5-1
5-1-3 本研究の特徴 5-3
5-1-4 検討フロー 5-4
5-2 室内実験 5-5
5-2-1 水中および底泥の酸素消費速度試験 5-5
5-2-2 嫌気性ガス生成速度試験 5-13
5-3 現地調査 5-30
5-3-1 水質連続観測 5-30
5-3-2 スカム発生状況調査（カメラ調査） 5-34
5-4 スカム発生予測モデルの構築 5-42
5-4-1 スカム発生予測モデルの構築 5-42
5-4-2 スカム発生予測モデルの検証 5-54

5-5 結語.....5-67
5-5-1 得られた知見.....5-67
5-5-2 今後の課題.....5-68
第 6 章 対策効果の把握..... 6-1
6-1 緒言.....6-1
6-1-1 本章の目的.....6-1
6-1-2 既往の研究と課題.....6-1
6-2 都市河川における水環境改善対策.....6-2
6-3 シミュレーションによる浄化対策効果の予測.....6-11
6-3-1 シミュレーション条件.....6-11
6-3-2 シミュレーション結果.....6-13
6-4 結語.....6-16
6-4-1 得られた知見.....6-16
6-4-2 今後の課題.....6-16
第 7 章 結　　論..... 7-1

謝　辞

図　表　目　次

図 1-1　都市河川の BOD の経年変化と下水道普及率 ……1-1
図 1-2　スカムの発生メカニズム ……1-6
図 1-3　本研究のワークフロー ……1-10
図 2-1　東京都区部山の手台地を流下する都市河川 ……2-2
図 2-2　河床の掘り下げによる停滞性の増大 ……2-3
図 2-3　河口域の埋め立てによる静穏域の拡大 ……2-4
図 2-4　東京都区部の下水道整備状況 ……2-5
図 2-5　都市河川の水質問題 ……2-7
図 2-6　呑川流域の概要 ……2-13
図 2-7　呑川流域地形図 ……2-14
図 2-8　呑川流域縦断図 ……2-15
図 2-9　呑川感潮域 ……2-17
図 2-10　呑川の感潮域の断面形状 ……2-18
図 2-11　感潮域の最深河床高縦断分布 ……2-19
図 2-12　呑川の河床高の平面分布 ……2-19
図 2-13 塩分の鉛直分布 ……2-19
図 2-14　呑川流域付近の気温・降水量 ……2-20
図 2-15　人口密度の分布 ……2-21
図 2-16　土地利用の分布 ……2-22
図 2-17 下層水質の経時変化およびスカム発生状況（2015 年） ……2-25
図 3-1　本章の検討フロー ……3-3
図 3-2　雨水吐き室の構造 ……3-6
図 3-3　水位計・自動採水器の調査地点位置図 ……3-7
図 3-4　水位計の外観と設置イメージ ……3-8
図 3-5　自動採水器概要 ……3-9
図 3-6　自動採水器の外観と設置状況 ……3-9
図 3-7　調査地点① の設置状況 ……3-10
図 3-8　調査地点① 設置方法 ……3-11
図 3-9　調査地点② の設置状況 ……3-12

図 3-10　調査地点② 設置方法 ……3-13
図 3-11　下水道内観測点の水深および O-SS の経時変化 ……3-15
図 3-12 観測地点位置図 ……3-17
図 3-13　調査期間における潮位（東京） ……3-18
図 3-14　自記式濁度計 ……3-19
図 3-15　自記式濁度計 設置方法（養源寺橋） ……3-20
図 3-16 観測期間中の出水状況 ……3-21
図 3-17　養源寺橋観測所における白濁化の状況 ……3-22
図 3-18　雨水流出モデルの概念図 ……3-25
図 3-19　有効降雨算定の概念図 ……3-26
図 3-20　流入ハイドロ算定の概念図 ……3-27
図 3-21　プライスマン･スロットの概念図 ……3-28
図 3-22　地上部モデル化の概念図 ……3-28
図 3-23　下水道モデル平面図 ……3-31
図 3-24　汚濁負荷量モデルの概念図 ……3-33
図 3-25　汚濁負荷量の堆積特性 ……3-34
図 3-26　 SS 蓄積ますの模式図 ……3-35
図 3-27　吐口及び分水人孔の位置図 ……3-37
図 3-28　水面制御装置の概要 ……3-38
図 3-29　水面制御装置のモデル化イメージ ……3-38
図 3-30(1) パラメータ調整結果（地点①） ……3-41
図 3-31　池上観測地点の横断図 ……3-42
図 3-32　SS と濁度の相関 ……3-43
図 3-33　感潮域上流端におけるシミュレーションの結果 ……3-45
図 3-34　O-SS の移流 ……3-47
図 3-35　下水道システム内の O-SS フラックスの遅延 ……3-48
図 3-36　2017 年データを用いた O-SS 時間波形についての検証 ……3-50
図 4-1　4 章の検討フロー ……4-3
図 4-2　河川水サンプル（投入前） ……4-8
図 4-3　投入下水サンプル ……4-9
図 4-4　下水越流水の沈降試験手順 ……4-11
図 4-5　実験実施中のサンプル ……4-11
図 4-6　沈降速度試験結果 ……4-12
図 4-7　調査実施地点 ……4-13
図 4-8　水質縦断分布調査 観測機器（ASTD） ……4-15
図 4-9　調査位置図（堆積物調査） ……4-17

図 4-10　sediment trap ……4-18
図 4-11　sediment trap 設置イメージ ……4-19
図 4-12　sediment trap 設置期間 ……4-20
図 4-13　堆積量調査結果 ……4-22
図 4-14　最深河床縦断図 ……4-22
図 4-15　無降雨期間と山野橋堆積量の相関 ……4-23
図 4-16　粒度分布の比較 ……4-25
図 4-17　有機汚泥の挙動のモデル化イメージ ……4-28
図 4-18　シミュレーション条件（下水道流出解析結果） ……4-30
図 4-19　検証結果縦断分布図（塩分） ……4-31
図 4-20　呑川の河床高の平面分布 ……4-33
図 4-21　出水第 2 ピーク時の塩分縦断分布（2017/7/29 22:00） ……4-33
図 4-22 2017/7/29 出水の流入量・SS のハイドログラフ ……4-33
図 4-23　2017/7/29 出水における O-SS の縦断分布 ……4-34
図 4-24　2017/7/29 出水における O-SS の河床面における ……4-35
図 4-25　sediment trap 堆積量の実績と計算結果の比較 ……4-36
図 4-26　3 地点の平均堆積量の比較 ……4-37
図 5-1　検討フロー（第 5 章） ……5-4
図 5-2　酸素消費速度設定フロー図 ……5-5
図 5-3　試料採取地点 ……5-6
図 5-4　底泥の外観 ……5-6
図 5-5　実験の状況 ……5-7
図 5-6　酸素消費速度試験結果 ……5-10
図 5-7　底泥+河川水カラムと河川水カラムの DO 変化の比較 ……5-12
図 5-8　使用するシリンジ ……5-13
図 5-9　実験準備手順 ……5-17
図 5-10　シリンジ内の層厚の変化イメージ ……5-17
図 5-11　試験結果のとりまとめイメージ ……5-18
図 5-12　シリンジ内の堆積物の変化(標準ケース) ……5-22
図 5-13　汚泥投入量とガス生成速度の関係 ……5-23
図 5-14　水温によるガス生成速度補正係数 ……5-24
図 5-15　塩分によるガス生成速度補正係数 ……5-25
図 5-16　強熱減量によるガス生成速度補正係数 ……5-26
図 5-17　嫌気性ガス生成速度経験式の適合性 ……5-28
図 5-18　ガス生成速度とスカム発生時間 ……5-29
図 5-19 汚泥投入量とスカム厚 ……5-29

図 5-20　調査実施地点（連続調査）……5-30
図 5-21　縦断図および水質計の設置水深……5-30
図 5-22　設置方法（旭橋）……5-31
図 5-23　設置方法（養源寺橋）……5-31
図 5-24　調査位置図（連続撮影）……5-34
図 5-25　設置カメラ……5-35
図 5-26　現地観測結果……5-40
図 5-27　降雨量，水位，水質項目およびスカムの面積割合（2017/7/26～8/6）…5-41
図 5-28　スカム発生メカニズム……5-42
図 5-29　硫黄 S の pH-ORP 関係……5-44
図 5-30　スカム浮上時のガス発生量……5-45
図 5-31　スカムの減少速度……5-46
図 5-32　汚泥投入量とガス生成量への Wijsman モデルの適用結果……5-49
図 5-33　Wijsman モデルの模擬実験への適用結果……5-50
図 5-34　水温及び塩分に対するガス生成速度の依存性……5-51
図 5-35　Wijsman モデルの模擬実験への適用結果……5-52
図 5-36　検証条件……5-56
図 5-37　実績と再現計算結果の比較……5-58
図 5-38 塩分縦断分布の変化……5-59
図 5-39　DO 縦断分布の変化……5-60
図 5-40　堆積量・スカムの縦断分布の変化……5-62
図 5-41　観測結果と計算結果の比較（全期間）……5-64
図 5-42 降雨後の堆積量の分布……5-65
図 6-1　雨水吐き室の構造……6-5
図 6-2　水流発生装置のイメージ……6-7
図 6-3　高濃度酸素水の供給イメージ……6-8
図 6-4　下水処理水の導水の事例……6-9
図 6-5　貯留施設のイメージ……6-12
図 6-6　貯留施設の設置位置……6-12
図 6-7　高濃度溶解水供給地点……6-13
図 6-8　スカム発生量の比較……6-14
図 6-9　貯留施設の設置による流入量削減率とスカム削減率の相関……6-15

表 2-1　都市河川の水環境問題……2-7
表 2-2　都市河川の悪臭……2-8
表 2-3　呑川の流域人口と人口密度……2-21

表 2-4　スカム発生状況の分類 2-24
表 3-1　下水道管渠内調査概要 3-4
表 3-2　流量計及び自動採水器の調査地点の概要 3-4
表 3-3　雨天時調査時の降雨状況 3-14
表 3-4　流出解析モデルの機能概要 3-24
表 3-5　モデル化する諸元 3-30
表 3-6　本検討でモデル化した管きょ数，人孔数 3-32
表 3-7　本研究でモデル化したオリフィス数 3-39
表 3-8　モデルパラメータの設定 3-40
表 4-1　試験ケース一覧 4-6
表 4-2　採水量一覧 4-10
表 4-3　調査期間 4-20
表 4-4　堆積量調査結果 4-21
表 4-5　汚濁物の種類ごとの強熱減量 4-24
表 4-6　呑川感潮域モデル 4-27
表 4-7　O-SS の沈降速度 4-28
表 5-1　実験方法 5-8
表 5-2　底泥と河川水の酸素消費速度 5-9
表 5-3　使用するシリンジ 5-14
表 5-4　使用する定点カメラ 5-14
表 5-5　試験ケース一覧 5-15
表 5-6 実験に用いた有機汚泥 5-16
表 5-7　嫌気性ガスの成分比 5-27
表 5-8　調査項目（連続調査） 5-33
表 5-9　嫌気化プロセスと反応式 5-44
表 5-10　設定したパラメータ 5-48
表 5-11 各酸化剤の有機物の分解可能量 5-48
表 5-12　気体の水に対する溶解度（溶解度の大きい順） 5-49
表 5-13　スカム発生予測モデル検証条件 5-55
表 6-1　都市河川の主な水質改善策 6-2
表 6-2　都市河川における水質浄化対策 6-3
表 6-3　その他の対策 6-10
表 6-4　想定する対策 6-11

第1章　序　　論

1-1　研究の背景

わが国の大都市の多くの都市河川は，1950 年代にはじまる高度成長期に著しく汚濁し，悪臭が漂う死の川だった．しかし，1970 年の水質汚濁防止法の制定により環境整備目標が設定されるとともに下水道整備など様々な水質改善策が実施され，都市河川の水質は大幅に改善された．図 1-1 に東京都を流れる都市河川のうち，神田川，目黒川および呑川の BOD の経年変化と都区部の下水道普及率を示す．これらの東京都区部を流れる都市河川は 1990 年代まで BOD は環境基準（C 類型）の BOD5mg/L を超えていたが，下水道整備普及率の向上に伴い低減し，近年では概ね環境基準（C 類型）を満足している．

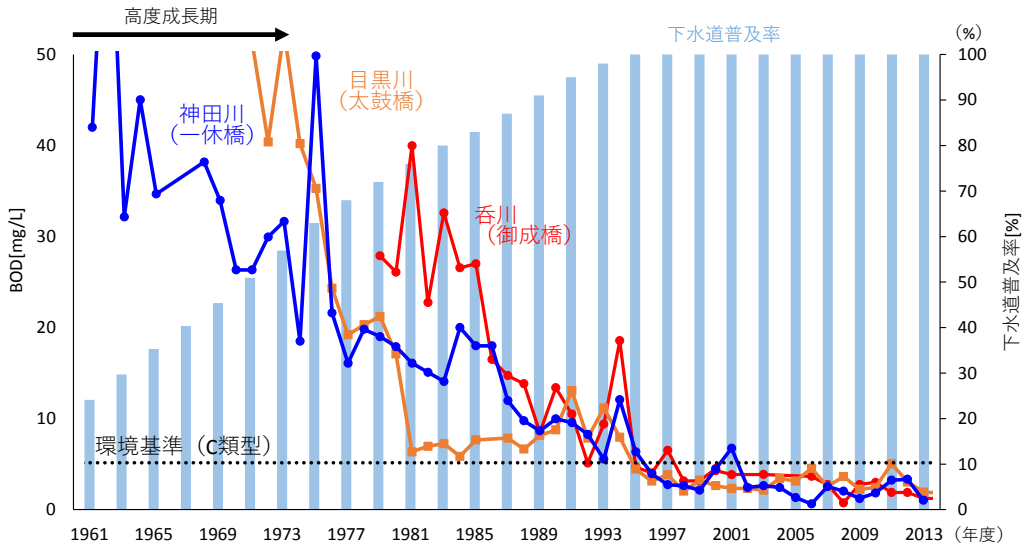


図 1-1　都市河川の BOD の経年変化と下水道普及率

（東京都下水道局事業概要 [1]や河川整備計画資料 [2)~4)]より作成）

神田川：1981 年度以前は年平均値，1982 年度以降は 75%値
目黒川：1997 年度以前は年平均値，1998 以降は 75%値
呑川：全て 75%値

ところで，現在東京都区部の下水道普及率は 100%に達しているものの，そのうち 80%は 1980 年以前に建設された合流式下水道であり，流域内に堆積した有機懸濁物（O-SS）[1]が雨天時に河道へ排出される．都下には中小河川が多数存在するが，大河川に比べて大きな流量や河道容積をもたないことから，出水に伴う水質変動が大きい．そして停滞性の強い感潮域では有機懸濁物が堆積し，底層付近を中心とした嫌気化[2]に伴い，スカム[3]の発生（写真 1-1）など一時的な水環境問題が生じている．これらの水環境問題は，主に降雨後など特定の期間に生じることが多く，定期水質調査などの一般的に行われている水質調査では把握することが困難である．そのため，重要な問題とし認識されてはいるものの，現象が十分に解明されていない．

写真 1-1　降雨後に大量発生し水面を覆うスカム

（呑川水質浄化対策研究会報告書 5)より）

---

[1] O-SS (Organic Suspended Solid) ：水中の有機懸濁物のこと．単位は mg/L である．SS は懸濁物，環境基準や排水基準では浮遊物質といい，2mm のふるいを通過し 1μm のろ過材上に残留する物質と定義されている 6).

[2] 嫌気化：水中が酸化状態から還元状態へ遷移すること．下記に示す有機物の 3 つの分解過程について，外部から酸素が加えられなければ①から③に向かう反応となる．下位の状態ほど，強い還元状態となっている．

① 好気性分解（溶存酸素を利用）：溶存酸素の消費
② 無酸素分解（結合性の酸素を利用）：硝化，マンガン・鉄還元，硫酸還元
③ 嫌気性分解（有機物自体の酸素を利用）：メタン生成

[3] スカム：有機汚泥が嫌気性ガスにより群体として浮上したもの．大きさは様々であるが，現地観測によると水平方向に大きさ数 cm～数 10cm のものが多い．

また，対策としては主に流域対策として下水道から河川への負荷量の削減を目標として様々な合流改善対策が検討・実施されているが，河道内での抑制効果は定量的に評価されていない．また，これらの下水道の合流改善対策は抜本的な効果は期待できる一方で，多大な費用と長い期間をかけて実施するため，早期の効果発現が困難である．そのため，これらの問題を抱える都市河川では，水流発生装置，河床整正や高濃度酸素水の供給などの様々な河道内対策を試行錯誤しながら実施している．

1-2　既往の研究

1-2-1　都市河川汽水域の有機汚濁に関する研究

河川の有機汚濁は，急速な流域の都市化に伴い生じる場合がほとんどである．古くは産業革命により急速な発展・人口の増大を遂げたイギリス・ロンドンの Thames 川で発生した大悪臭（Great Stink）（1858 年）が有名である．これらの有機汚濁問題に対処するため，近年まで汚水の流入や有機汚泥[4]の河床への堆積原因や悪臭の発生要因となる河川水の貧酸素化やそれらの対策についての研究や施策が積み上げられてきた．ロンドン，ニューヨークなど世界的な大都市においても合流式下水道が整備されており，合流式下水道から排出される CSO[5]が河川へ与える影響やその対策について様々な研究がなされている．近年では，特に大腸菌などのバクテリアや発がん性物質に与える影響やそれらの対策の研究事例が多くみられる [7)~9)].

わが国において，都市河川における水質問題を取り上げた研究は，有機汚泥（ヘドロ）の堆積などが顕在化した 1960 年代から 1970 年代にかけて多く見られる．杉木ら [10)]は，汚濁が進行した隅田川を対象に感潮域の酸素平衡を取り扱い，Thames 川における研究成果を参考に貧酸素化についてモデル化を実施している．村上ら [11)]は，都市河川汽水域の悪臭の発生要因として河床に大量に堆積した有機物の分解に伴う硫化水素の発生機構に着目し，嫌気化の進行と海水中の硫酸塩による硫化水素ガスの発生について現地観測や実験結果をもとに明らかにしている．また，土屋ら [12)]は，目黒川感潮域における汚濁堆積機構について一次元不定流解析をもとに推察しており，都市河川の勾配変化点において有機懸濁物流出負荷量の約 90%が沈降･堆積していることを示している．左合ら [13)]は，これらの貧酸素化に伴う問題を解消するため，河川への酸素注入による貧酸素化の緩和および悪臭の抑制効果について検討している．

有機汚濁指標となる BOD が概ね環境基準を満足している近年でも，底層の貧酸素化・無酸素化に伴う様々な水環境問題について研究成果が報告されている．金子ら [15)]は，東

---

[4] 有機汚泥：有機懸濁物が河床において集積し，フロック化したもの．有機汚泥の統一的な基準はないが，廃棄物処理法令では熱しゃく減量が 15%以下の汚泥を無機汚泥として処分できるように定められている [14)]ため，本研究ではこれを参考に強熱減量 15%より大きい汚泥を有機汚泥とした．

[5] CSO（Combined sewer overflow: 合流式下水道越流）： 雨天時において，合流式下水道の雨水吐き口やポンプ場などから汚水を含む未処理下水および雨天時排水が越流すること．

京都の都市河川の問題として魚の大量斃死に注目し，下水越流に伴う大規模貧酸素水塊の発生過程を現地調査や資料解析, ボックスモデル解析により明らかにしている. また，三浦ら[16]は，目黒川における白濁化（青潮）や悪臭発生要因として硫化物に着目し，底泥や水中で発生する硫化物を現地観測や実験結果よりモデル化している．これらの魚の大量斃死や白濁化の発生は，いずれも堆積した有機汚泥による底層の貧酸素化，嫌気性ガスの発生に起因する問題であり, 本研究で対象とするスカムの発生とも共通している.

1-2-2　スカムに関する研究

都市河川のスカムに関する研究は，顕著な有機汚濁が解消された後，降雨後に生じるスカムが目立つようになったことを受けて，わが国 1990 年代から研究が進められてきたものである．

山崎ら[17)~19)]は神田川等における現地調査に基づき，スカムの発生メカニズムを図 1-2 に示すよう“①降雨に伴う合流式下水道からの有機懸濁物の流出”，“②有機懸濁物の河川感潮域における堆積”および“③嫌気性ガスの発生に伴うスカム浮上”というプロセスに分けて考察している．また，スカムの発生には強熱減量[6]40%程度の有機汚泥が降雨から数日後までにスカムとして浮上しやすいことを示している．

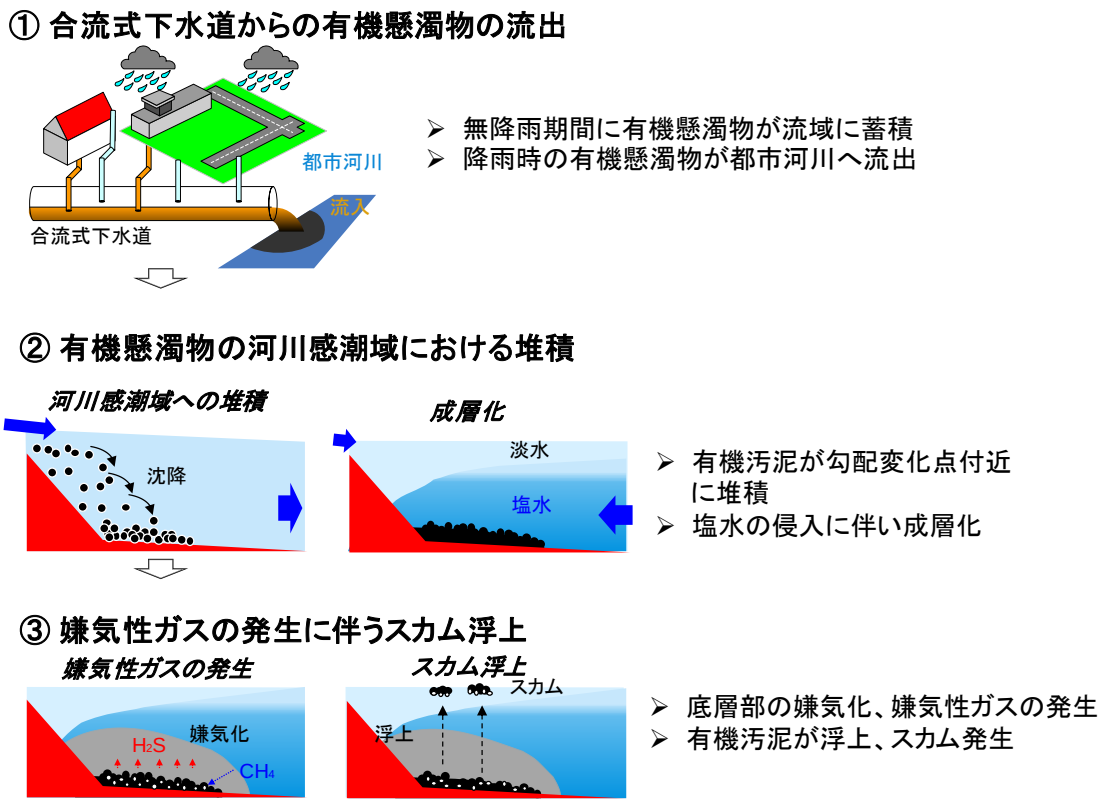


図 1-2　スカムの発生メカニズム

[6] 強熱減量（IL:Ignission Loss）：試料水を 105～110℃で蒸発乾固したときに残る物質を蒸発残留物といい，強熱減量とはこの蒸発残留物をさらに 600℃で灰化したときに揮散する物質のことをいう．強熱減量は水中の有機物量の目安となる．[20)]

菅原ら[21]は，食品，繊維やし尿を用いてスカムの発生実験を行い，スカム発生に関係する原因物質の特定を試みているが，これらの物質ではスカムは発生しなかった．スカムの発生しなかった原因としては，対象とした物質が固結化せず，発生した嫌気性ガスが放出されたことが原因として考えられる．濱田ら[22]や田辺ら[23]は，合流式下水道が流入する内港において，発生したスカムを採取し，その特性を調べたところ，n-ヘキサン抽出物質が高濃度に含まれるなど粘着性の高い油脂分が有機懸濁物を固結させ，スカムとして浮上していることを示している．

また三浦ら[24]は定点カメラを用いた連続観測から，出水後，潮位低下の際にスカムが発生する傾向を示している．これは，有機汚泥から発生した嫌気性ガスが，潮位の変化に伴い水中に溶解したり，ガスの密度が変化したりすることによって生じていることを示唆したものである．

しかしながら，これらを再現する数値シミュレーション・モデルはこれまで存在しておらず，対策の検討等において定量的な評価をすることができなかった．

なお，海外の都市河川においてスカムを取り扱った研究を調査したが，みつからなかった．スカムが研究対象として取り上げられていない理由としては，東京のように極端に人口密度が高く汚濁負荷量の大きい都市が少ないこと，河川勾配が全体的に緩く東京の都市河川のように勾配変化点に有機汚泥が集積し，その地点で多くのスカムが発生することがないこと，有機汚濁や汚染物質の問題が顕著で，スカムの問題が顕在化していないことなどが考えられる．

1-3　本研究の目的と構成

1-3-1　本研究の目的

本研究では，都市河川において顕在化している問題のうち，多くの都市河川で悪臭の発生および水面景観の悪化など悪影響を及ぼしているスカムについて取り上げる．これまで，スカムの発生は様々な現地観測や実験結果から理解されてきたが，対策法が確立されておらず，発生源となる流域対策（下水道の合流改善等）も一朝一夕には難しいため，解決には至っていない．また，河道内対策も現段階では現場において試行錯誤を重ねている状況である．スカム発生に関して降雨に伴う合流式下水道からの O-SS の流入量，河道内の堆積量やスカムの発生量を追跡できるシミュレーション・モデルが構築できれば，これらの対策の効果を定量的に把握できるようになる．また，様々な種類や規模の対策を比較することによって，より効率的・効果的な対策を選択することが可能となる．

本研究では, これらの今後のスカム発生抑制対策の検討に定量的な評価を加えるため, スカムの発生メカニズムを図 1-2 に示す合流式下水道流域から河川へ流入する有機懸濁物, 河川感潮域における堆積そしてスカム浮上の 3 つのプロセスをそれぞれモデル化し, スカム発生を定量的に解析できる数値シミュレーション・モデルを構築することを目的としている．また，都市河川呑川を対象としてそれらを実証的に行うものである．

1-3-2　本論文の構成

本論文は，全 7 章で構成されており，各章の概要は以下のとおりである．

第 1 章は序論であり，本研究の背景および目的について述べ，本論文の構成を示している．

第 2 章では，東京都の都市河川の現状と課題について，地形条件，下水道の整備状況，発生している水環境問題等を具体的な資料を示しながら説明している．また，本研究では対象河川として東京都南部を流れる呑川を対象とし，呑川の概要，河道特性や水環境問題の発生状況について紹介している．

第 3 章では，降雨時に合流式下水道流域から都市河川へ流出する有機汚濁物の流入負荷量の推定方法検討している．下水流出モデル（MIKE URBAN）の機能を用いてモデル化し，現地調査結果をもとに MIKE URBAN モジュールのモデルパラメータを調整することによって都市河川感潮域へ流入する有機懸濁物の負荷量を再現している．

第 4 章では，合流式下水道から都市河川の感潮域に流入した O-SS の堆積特性をモデル化している．ここで，下水道流域から流入する有機汚濁物の沈降特性を把握するため，室内実験（沈降速度試験）を行い，O-SS の沈降速度を把握している．また，現地にセディメント・トラップを設置し，降雨時における堆積量を計測している．堆積した汚泥の再浮上を Lane & Kalinske の式を用いてモデルに取り込んだ．これらの沈降・堆積・再浮上機構を鉛直二次元密度流モデル（TITech-WARM モデル）に導入し，現地で得られた堆積量と比較し，検証している．

第 5 章では，河床に堆積した有機汚泥による嫌気性ガスの発生，スカムの浮上・消失にかかわる特性を把握するため，有機汚泥を用いた室内実験を実施し，それらの特性を把握し，嫌気化の進行や嫌気性ガスの発生を Wijsman モデルや試験結果を用いてモデル化している．

第 6 章では，第 3 章から第 5 章までに構築した O-SS 流出予測モデルおよびスカム発生予測モデルを用いて，流域対策として下水道による合流改善対策，また河道内対策として高濃度酸素水の供給の 2 種類の対策を想定し，それらの効果を定量的に評価する．

最後に第 7 章は結論であり，本研究で得られた知見をまとめるとともに，今後の課題についてまとめた．

3～5 章の詳細なワークフローを図 1-3 に示す．

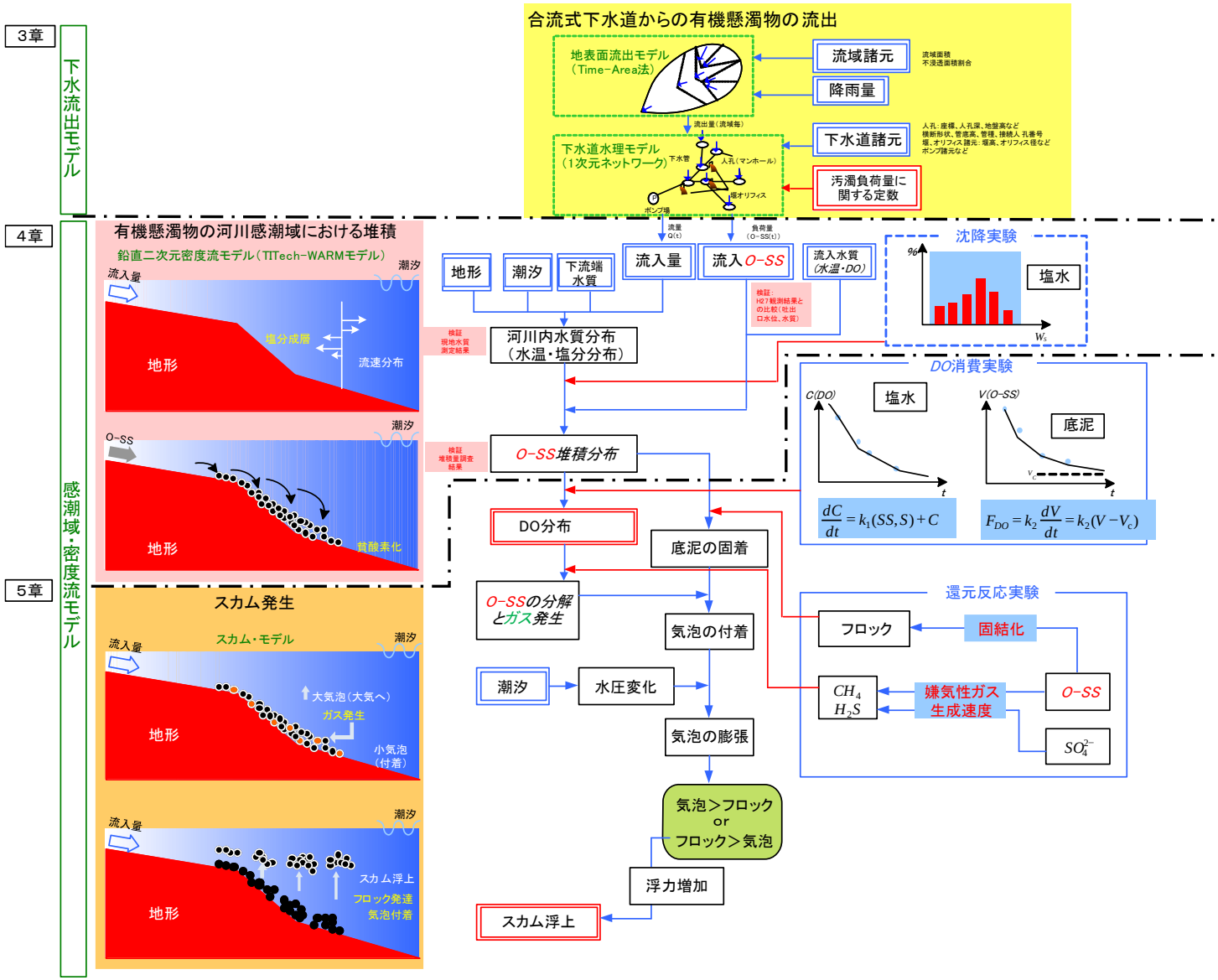


図 1-3　本研究のワークフロー

【参考文献】

1) 東京都下水道局：東京都下水道局事業概要（平成29年版）
http://www.gesui.metro.tokyo.jp/about/business/jg29/index.html（参照：2019/4/30）
2) 東京都：神田川流域河川整備計画，2016.
3) 東京都：目黒川流域河川整備計画，2018.
4) 東京都：呑川流域河川整備計画，2017.
5) 呑川水質浄化対策研究会：平成25年度呑川水質浄化対策研究会報告書，2014.
6) 国土交通省水質連絡会，河川水質試験方法（案），57，平成21年3月
http://www．mlit．go．jp/river/shishin_guideline/kasen/suishitsu/pdf/s04．pdf
（参照：2019/4/30）
7) Isabelle Jalliffier-Verne，Mourad Heniche，Anne-Sophie Madoux-Humery，Martine Galarneau，Pierre Servais，MichèlePrévost，SarahDorner ：Cumulative effects of fecal contamination from combined sewer overflows: Management for source water protection，Journal of Environmental Management Volume 174，pp. 62-70，2016. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.03.002
8) Mark G. Cantwell，David R. Katz，Julia C. Sullivan，Daniel Shapley，John Lipscomb，Jennifer Epstein，Andrew R. Juhl，Carol Knudson，Gregory D. O'Mullan：Spatial patterns of pharmaceuticals and wastewater tracers in the Hudson River Estuary，Water Research Volume 137, 15 018, pp.335-343，2018. DOI: 10.1016/j.watres.2017.12.044
9) Y. T. Tu，J. H. Ou，D. C. W. Tsang，C. D. Dong，C. W. Chen，C. M. Kao：Source identification and ecological impact evaluation of PAHs in urban river sediments: A case study in Taiwan：Chemosphere Volume 194, pp.666-674, 2018. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.12.008
10) 杉木 昭典：感潮河川の汚濁機構，特に隅田川について，土木研究所報告 133号の1，pp.1-130，1967.
11) 村上 健，長谷川 清：土木技術資料 13(6)，291-296，1971-06，土木研究センター
12) 土屋 十圀，岡田 光正：都市河川の感潮域における水質と汚濁堆積物の挙動，水環境学会誌 Vol．15，No．7，443-449．DOI: 10.2965/jswe.15.443
13) 左合 正雄，茂庭 竹生，長田 貞子，古井戸 良雄，土屋 隆夫，味村 昭：酸素による汚濁河川の悪臭防止に関する実験，衛生工学研究討論会講演論文集 Vol. 6，pp．62-71，1970．DOI: 10.11532/proes1964.6.62
14) 厚生省：昭和45年度 公害白書，https://www．env．go．jp/policy/hakusyo/s46/11732.

html（参照：2019/4/30）

15) 金子 真，二瓶 泰雄：雨天時越流下水負荷による都市河川感潮域の大規模貧酸素水塊形成過程，土木学会論文集B1（水工学）Vol. 68，No. 4， I_1591-I_1596，2012. DOI: 10.2208/jscejhe.68.I_1591

16) 三浦心，堀田哲夫，根岸均，鶴田泰士：都市河川汽水域における青潮の発生機構に関する調査と解析， 水工学論文集， 第53巻， 2009.

17) 山崎正夫，津久井公明：河川におけるスカムの発生に関する研究（その１）スカムの起源に関する研究，東京都環境科学研究所年報1991，171-179，1991.

18) 山崎正夫，津久井公明：河川におけるスカムの発生に関する研究（その２）－神田川白鳥橋～飯田橋間の堆積状況調査結果，東京都環境科学研究所年報1991-2，182-184，1991.

19) 山崎正夫，津久井公明：河川におけるスカムの発生に関する研究（その３）－降雨後のたい積状況変化について－, 東京都環境科学研究所年報1992, pp. 167-171, 1992.

20) 国土交通省水質連絡会，河川水質試験方法（案），27，平成21年3月 http://www．mlit．go．jp/river/shishin_guideline/kasen/suishitsu/pdf/s03．pdf （参照：2019/4/30）

21) 菅原 正孝， 石川 宗孝， 西田 一雄， 北村 誠， 梶 智裕， 木本 茂宏， 大西 敏夫 : 汚濁河川に発生するスカムの生成機構について, 環境技術 Vol. 24, No. 7， 402-405，1995．DOI: 10.5956/jriet.24.402

22) 濱田泰広，田辺弘雄，清水直樹，吉岡一郎，三戸勇吾，齊藤直，日比野忠史：スカムが発生する内湾での底質環境の改善法の設計と施工，土木学会論文集B3（海洋開発），Vol.68，No.2，I_1151- I_1156，2012.

23) 田辺弘雄，岩本幸生，清水直樹，三戸勇吾，出路康夫，吉岡一郎，斉藤直，日比野忠史：ヘドロ化した内湾でのスカム発生機構の解明と石炭灰造粒物を用いた底泥浄化法の設計，VI-5，第63回中国支部研究発表会，土木学会，2011.

24) 三浦陽介，堀田哲夫，根岸均，増本健祐：長期連続観測に基づく都市域感潮河川におけるスカム・悪臭発生要因の考察：環境水理部会研究集会2012資料，2012.

第2章　都市河川の現状と課題

2-1　緒言

本章では，東京都区部の山の手台地を流下する都市河川の特徴と，それらに共通する水環境問題について紹介する．これらの問題の発生メカニズムとして，合流式下水道からの有機懸濁物の流入 → 河川感潮域における堆積 → 塩淡成層化 → 底層の嫌気化 → 硫化水素やメタンガスの発生という一連のプロセスに関連して問題が発生していることを示す.

次に，地形条件や下水道の整備状況等の都市河川の持つ共通の特徴を述べ，これらの水環境問題が東京都区部の河川で発生しやすい状況を述べる.

本研究では，多くの都市河川で問題となっているスカムに着目する．また，スカム発生が問題となっている東京都南部を流れる呑川として対象河川として選定した.そして,呑川の流域特性について説明するとともに,地形条件や土地利用等の流域特性とともに,大田区が実施している河川パトロール結果からスカムの発生状況について整理した.

2-2　東京都区部の都市河川

2-2-1　地形特性

東京都区部山の手台地を流下する都市河川の標高分布を図 2-1 に示す．開水路区間を薄い青の点線，感潮区間（河床高が東京湾朔望平均満潮位 A.P.＋2.05m 以下の範囲）を濃い青の実線で示している．

いずれの河川も山の手台地に水源を発し，山の手台地を比較的急勾配で流下し，下流の低平地が感潮区間となっている．

参考として，感潮域でスカムなどの発生が確認[1)-5)]されている大体の区間を赤い点線の丸で示したが，いずれの場所も感潮区間の上流～中流部に存在している．

図 2-1　東京都区部山の手台地を流下する都市河川

これらの区域で水環境問題が生じやすい理由としては，下記の 3 点が考えられる．

① 都市化に伴う無降雨時流量の減少，降雨時の流入 O-SS 負荷量の増大

平常時の河川流量は，下水道の整備以前には降雨は流域から川へゆっくりと流出していたため，平常時は比較的流量が豊かであったと考えられる．しかし，戦後において流域の都市化が進展し，家屋や道路などの非浸透域が増大するにつれて，降雨の河川への到達時間が短縮し降雨時の流出量が増える一方で，地下貯留量が少なくなり無降雨時流量が減少した[6]．そのため，無降雨時は河川水の交換が生じにくくなっている可能性がある．

また，都市化による人口密度の増加により有機懸濁物（O-SS）の生産量も多くなるため，より多くの O-SS が都市河川へ流入するようになったと考えられる．

② 治水対策のための水深の増大

自然河川では，水深が比較的浅く，比較的流速（掃流力）が大きいため，河道内に流入した O-SS は沈降・堆積せず河口に到達していた（図 2-2 左）．しかし，近年治水対策のために河道が深く掘り下げられると，流速（掃流力）が小さく，O-SS は沈降，河床に堆積するようになった（図 2-2 右）．また，河口より塩水が侵入し，塩淡成層が形成されると，鉛直混合が生じにくく，さらに停滞性が強くなり，嫌気化による水環境問題が生じやすくなっていると考えられる．

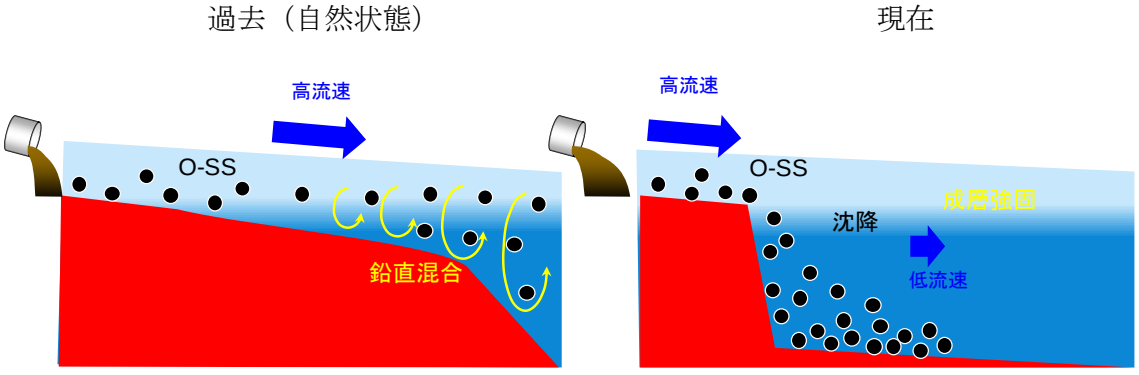


図 2-2　河床の掘り下げによる停滞性の増大

③ 河口域の埋め立てによる静穏域の拡大

自然状態では海域からの波浪などの影響により，河口域への擾乱が頻繁に生じていた．しかし，河口部は埋め立てによる静穏域が拡大したため，擾乱が少なく，停滞性の強い水域が形成されたと考えられる．

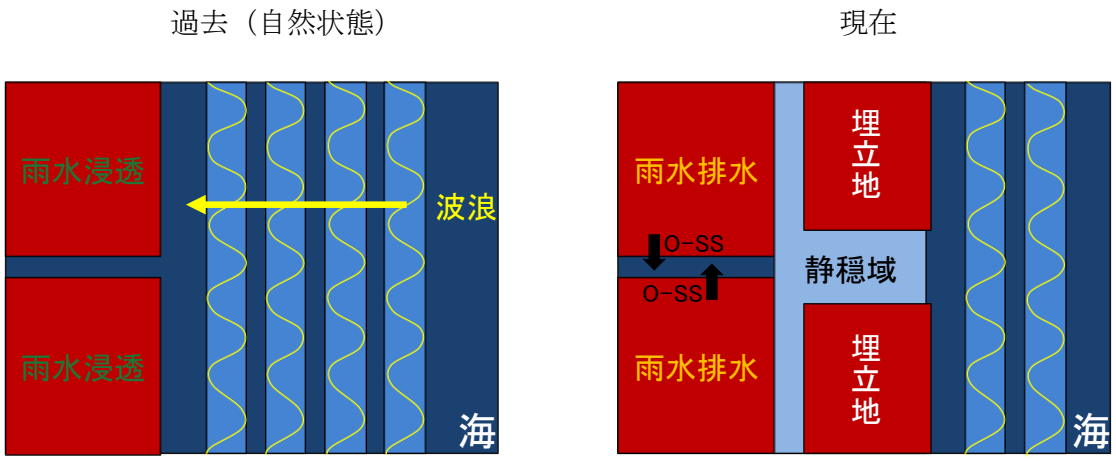


図 2-3　河口域の埋め立てによる静穏域の拡大

2-2-1　下水道整備状況

東京都区部の下水道現況図を図 2-4 に示す．図のうち，薄い赤，薄い青，濃い赤の部分が合流式下水道の整備された区域であり，東京都区部の約 8 割が合流式下水道流域となっている．特に，人口が密集する山の手台地部のほとんどは合流式下水道流域である．

薄い緑，濃い緑で示された北部や南部や東京湾の埋め立て地など比較的新しく整備された範囲が分流式で整備されている．

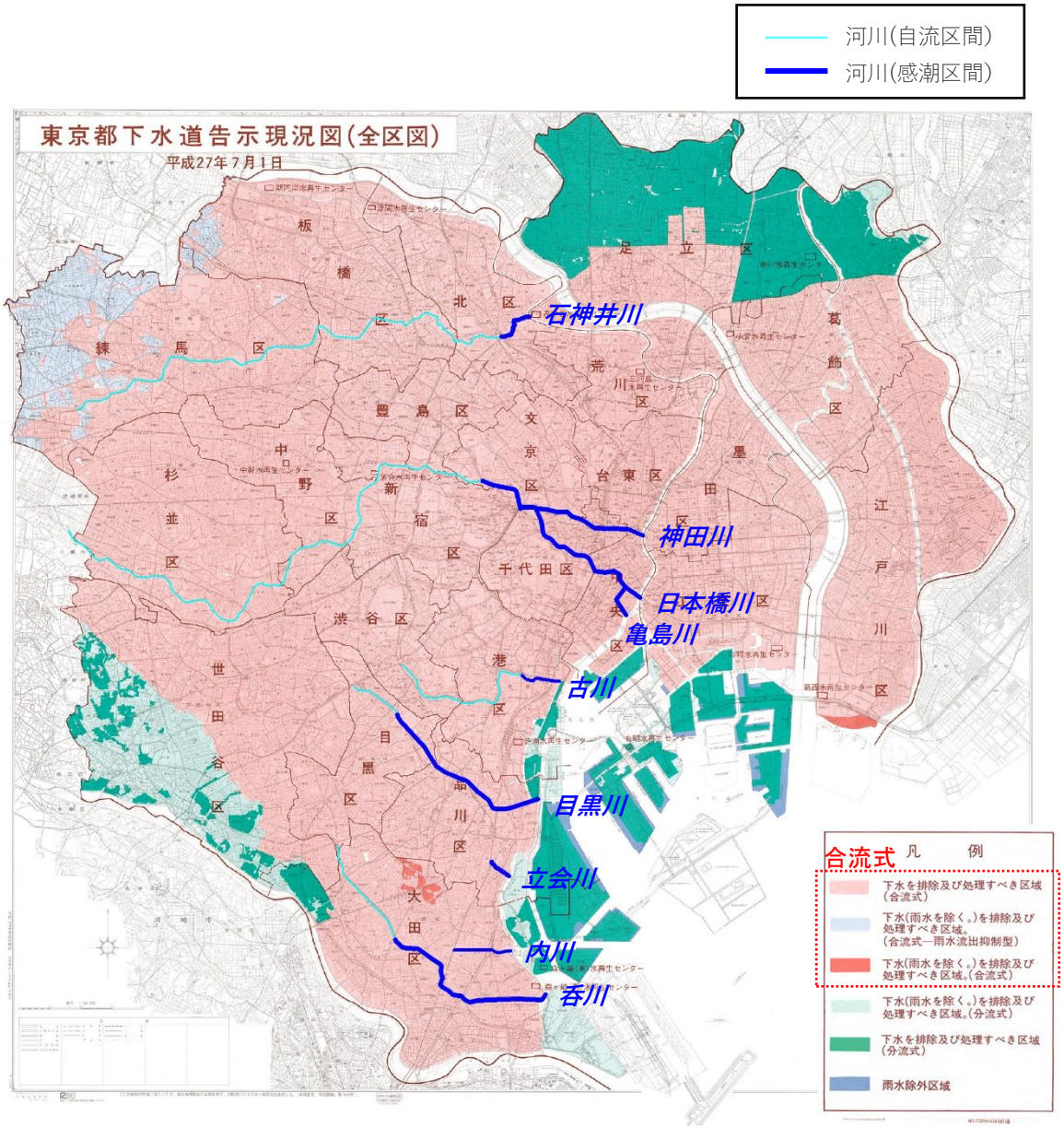


図 2-4　東京都区部の下水道整備状況

（東京都下水道告示現況図[7] に加筆）

2-2-2　河道特性

東京都区部の都市河川の河道は，以下の特徴がある．

- 周囲の土地を道路や住宅地等として活用するため，可能な限り川幅を小さくするように整備されており，大部分の川幅水深比（B/H）が 10 以下と極めて小さい．
- 流域が道路や宅地等の非浸透域が多く，降雨が涵養されないため，流量が少なく無降雨時はわずかな量の湧き水や下水処理水が放流されているのみである．
- 山の手台地部は比較的急勾配（勾配 I=1/1000 以上）で流下する淡水区間である．一方，下流低平地部に入った後の感潮区間は，治水対策のために河床が深く掘り下げられているため，無降雨時には塩水が遡上し，塩淡境界層を持つ汽水域となっている．
- 河道はコンクリート 2 面張，または 3 面張で整備されて護岸は直壁に近い．

2-2-3　都市河川の水環境問題

東京都区部の山の手台地を流下する都市河川の水環境問題は，主に表 2-1 に示す 4 つに集約される．いずれも合流式下水道からの CSO の流入および水中の嫌気化が原因となっている．それぞれの水環境問題の発生イメージを図 2-5 に示す．また，以降にそれぞれの水環境問題の発生機構について説明する．

表 2-1　都市河川の水環境問題

	発生が確認された河川	内容
悪臭	石神井川，目黒川，呑川	不快な臭気が発生し，近隣住民から苦情が入る．
スカム	石神井川，神田川，目黒川，立会川，呑川	スカムが水面を浮遊し，景観を悪化させる．また，強い硫化水素臭や腐敗臭を伴うことがある．
白濁化（青潮）	目黒川，立会川，呑川	水中の硫化物が酸化することにより水面が白濁する現象．強い硫化水素臭を伴うことがある．
魚の斃死	目黒川，呑川	出水後に魚が大量に斃死し，水面を漂う．腐敗臭を伴うことがある．

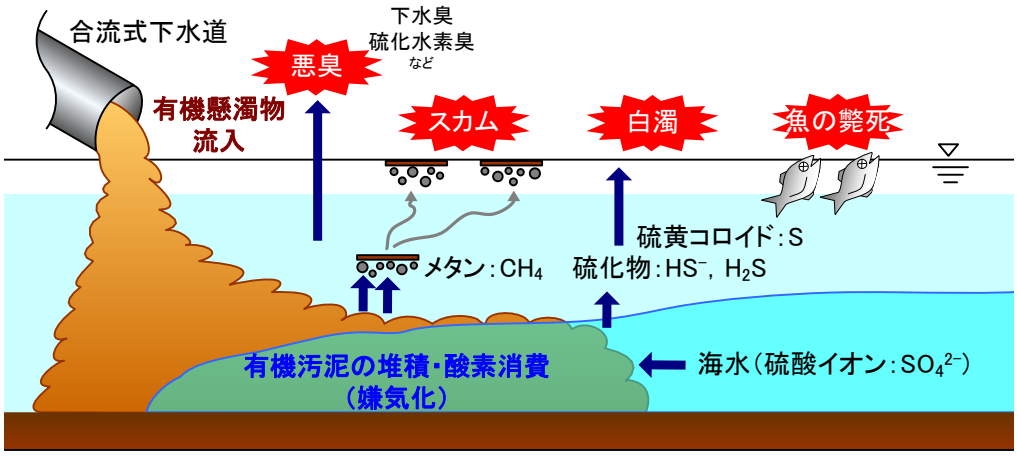


図 2-5　都市河川の水質問題

(1) 悪臭

悪臭は, 古くから問題視されてきた. 悪臭はひとたび発生すると, 河川内だけでなく, 周辺にまで拡散するため, 著しい住環境の劣化をもたらす. 実際, 都市河川において住民からの苦情のほとんどは悪臭に関するものである.

都市河川における悪臭の種類を表 2-2 にまとめた. 悪臭といっても様々な種類があり, 発生場所や発生のタイミングも異なるが, 大別すると, CSO に伴う下水臭か, 河道底層部の嫌気化により発生する硫化水素臭, 腐敗臭やスカムに付着するカビ臭など, いずれも下水の越流と底層の嫌気化に起因している.

表 2-2　都市河川の悪臭

	概要	代表的な悪臭物質	推定される発生源
下水臭	し尿臭や風呂, 台所の臭いなど生活雑排水の臭い	アンモニア トリメチルアミン メチルメルカプタン	降雨時に合流式下水道から越流した未処理水
硫化水素臭	卵の腐ったような臭い	硫化水素	嫌気化に伴い生成された硫化水素
腐敗臭	食品が腐ったような臭い	トリメチルアミン メチルメルカプタン	スカムや魚の斃死に伴うもの
カビ臭	埃のような臭い 絵の具のような臭い キノコのような臭い	TCA ジェオスミン 2-MIB	スカム等にカビが付着したもの

(2) スカム

スカム（写真 2-1）は，降雨に伴い合流式下水道から流出した O-SS が河床に堆積，有機汚泥が嫌気性ガスの発生に伴い浮力を得て浮上したものである[2)~4)]．春季から秋季の底層が嫌気化する時期に，下水越流が生じる規模（数 mm 程度）以上の出水後に頻繁に見られる．主に河道勾配が急勾配から平坦になる勾配変化点の下流側で生じることが多い．水面を潮汐流に乗じて上下流に移動するため，発生範囲は数キロに渡ることがある．強烈な悪臭（腐敗臭，硫化水素臭やカビ臭）を伴うことが多く，大きな問題となっている．

写真 2-1 スカムの発生状況

（呑川，2013/8/15）

（呑川水質浄化対策研究会報告書[5)]より）

(3) 白濁化

白濁化は，下水や塩水中に含まれる硫酸イオン SO_4^{2-}が硫酸還元菌による硫酸還元反応を経て生成される硫化物（H_2S,HS^-,S^{2-}）が風や潮汐に伴う湧昇流により酸素の豊富な表層水（淡水層）と混合・酸化することで発生する硫黄コロイドである．硫黄コロイドは光を反射するため，水面が青白く見える．海域における青潮と同じ現象である．白濁化発生時には硫化物による強い刺激臭を伴うことがある．

春季から秋季において，下水越流が生じる規模（数 mm 程度）以上の出水後，大潮の干潮時によく見られる．

写真 2-2 白濁化の発生状況（目黒川，2007[8)]）

(4) 魚の斃死

出水直後に大量の魚の斃死が確認されることがある．発生要因は明らかではないが，下水や底泥の巻き上げに伴い濁質濃度が上昇しそれらが魚のエラに詰まって呼吸困難となったことが原因として考えられる．また，貧酸素水塊の接触や，急激な水温の変化等が考えられる．

写真 2-3 魚の斃死

（呑川，2015）

2-3　研究の対象

(1)　対象とする水環境問題

本研究では，これらの水環境問題のうち，多くの都市河川で共通の問題となっており，上記のプロセスの中で最も嫌気化が進んだ状況で発生するスカムを研究対象とした．このスカムの発生に関わる有機懸濁物の流入 → 河川感潮域における堆積 → 塩淡成層化 → 底層の嫌気化 → 硫化水素やメタンガスの発生という一連のプロセスを定量的に評価し，スカム発生を予測できる数値シミュレーション・モデルを構築する．

なお，前節で挙げた 4 つの水環境問題はいずれも底層の嫌気化に伴い生じる現象であり，本研究で対象としたスカムの発生を予測することができれば，同様に悪臭，白濁化や魚の斃死の予測についても得られた知見を応用できると考えている．

(2)　対象河川の選定

本研究では，対象河川として東京都南部を流れる呑川を対象とした．選定理由は下記のとおりである．

- 春から秋にかけてスカムが発生し，景観やスカム発生に伴う悪臭により，住民から苦情が出るなど問題となっていること．
- スカム発生メカニズム把握のために，大田区による河川パトロールや水質観測など現象の分析に必要なデータの蓄積されていること．

(3) 呑川流域の概要

1) 流域の概要

呑川は流域面積約 17.7km^2，延長約 14.4km の二級河川であり，図 2-6 に示すように世田谷区，目黒区，大田区を流れて東京湾に注ぐ．集水域は全て合流式下水道が整備されており，雨天時には O-SS を含んだ未処理水が河川へ流入することがある．

上流部では平常時の流量が極めて少ないことから，城南三河川清流復活事業として下水道の再生水を工大橋上流へ導水している（日量 36,300m^3）．現在，支川である九品仏川との合流点より上流部は暗渠化され，下水道として利用されている．また，集水域下流（大田区池上一丁目地先の堤方橋より下流域）の雨水は，下水道施設を通じて東京湾へ直接放流されている．

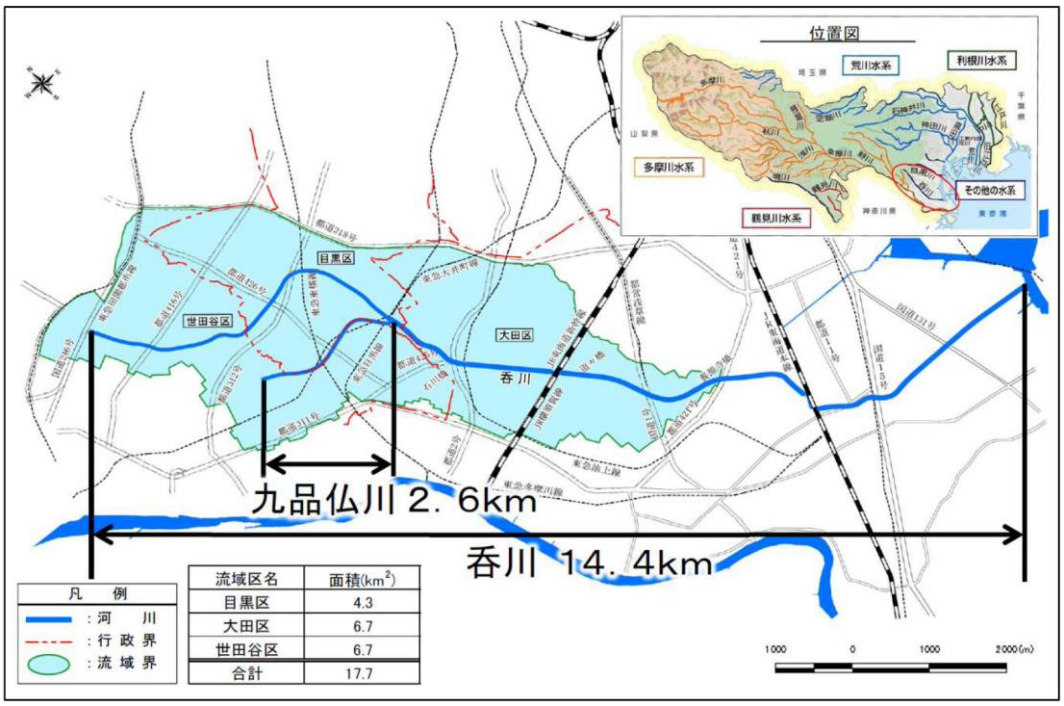


図 2-6 呑川流域の概要

（呑川流域河川整備計画 [9]より）

2) 地形

呑川流域の地形図を図 2-7 に示す．背景の色は国土地理院提供の基盤地図情報数値標高モデル（5m メッシュ，航空レーザ）の標高を示している．呑川の流頭部は山手台地上の世田谷区桜新町（標高 A.P. 37m）にあり，目黒区を通過し大田区池上付近（標高 A.P.7m 程度）で沖積低地に入り，海老取運河に流入する．世田谷区と目黒区の河道は幹線下水道として暗渠化されており（青色の点線），大田区に入る地点の工大橋（9.5 KP）から下流が開水路となっている．呑川の現在の河道整備状況は時間雨量 50mm 対応となっており，現況河道は計画流量 120m^3/s（工大橋地点）を流下させることができる [9]．将来的には時間雨量 100mm までの対応が計画されているが，河道の拡幅等は困難であることから，増加分は流域貯留等で対応する計画となっている [10]．

図 2-7 において，青色の▲で示す工大橋（9.5KP），池上（5.5 KP）および旭橋（0.5 KP）には水位計が東京都により設置されている．

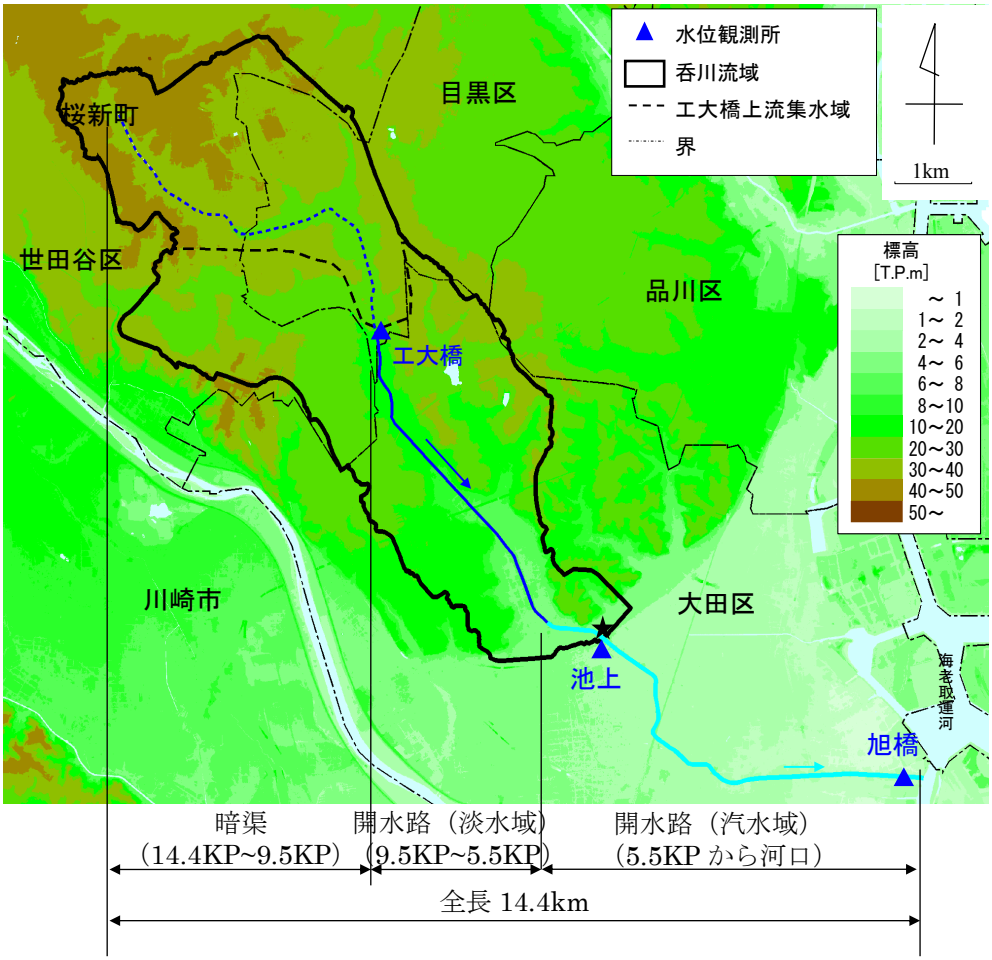


図 2-7 呑川流域地形図

図 2-8 に河床縦断図を示す．5.5 KP より上流の開水路区間（図 2-7 青色の実線）は山手台地斜面の谷地で河床勾配 1/350～1/560 の直立壁の三面張り水路となっている．その下流（図 2-7 水色の実線）は沖積低地で 5.5KP から 3.0KP までは勾配 1/1,150 以下の複断面，3.0KP より下流部は単断面で低水路部は移動床水路となっている．平水時は 5.5KP 付近まで感潮域となっており，潮汐に伴い河口潮位と時差はほとんどなく感潮域の水位が上下する．また，5.5KP 付近まで塩水が遡上しており，汽水域となっている．

合流式下水道からの排水の大部分は感潮域上流に流入する．しかし急勾配のコンクリート水路であるため有機懸濁物（O-SS）の堆積は生じていないので，全量が下流河道に流入すると考えられる．一方，下流河道は河床がほとんど水平で，かつ水深が大きく，また塩淡境界層を持つ汽水域で鉛直混合が生じにくく，さらに潮汐によって河川水が滞留するため，出水時に上流河道から運ばれた O-SS が 5KP～3KP の区間に堆積する．この堆積した有機汚泥が嫌気化することによりスカム浮上等の水質問題が生じる．以上のように淡水域と汽水域の水理特性は非常に異なっており，急勾配の上流河道から出水時に O-SS が内湾的な性質を持つ下流河道に流入するという構図になっている．

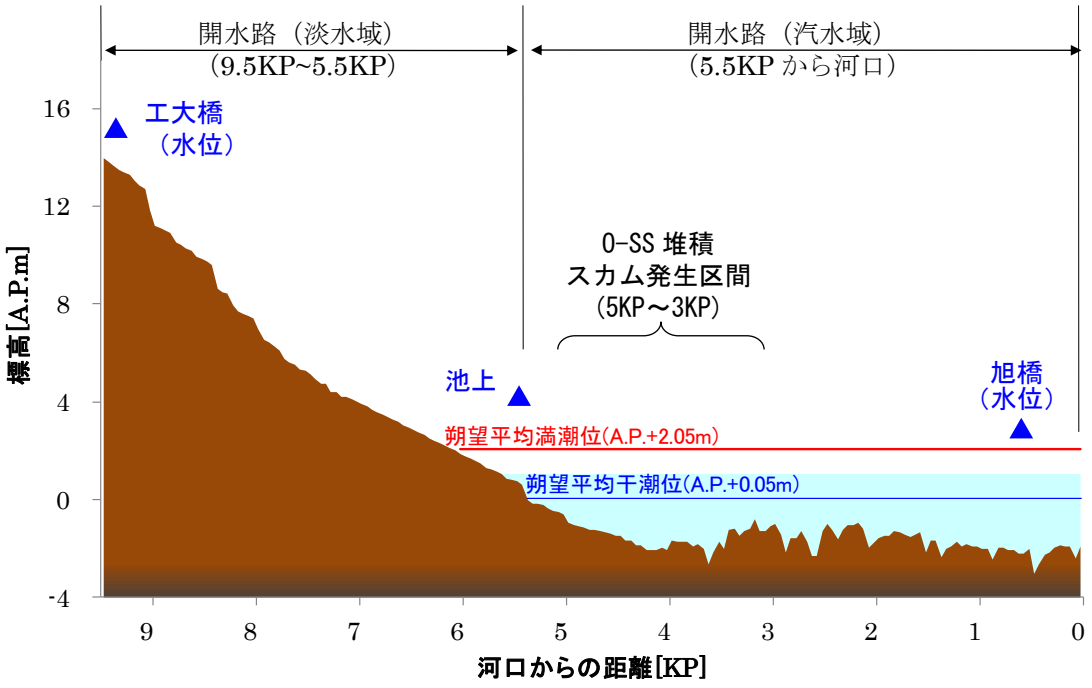


図 2-8　呑川流域縦断図

図 2-9 に呑川感潮域の平面図に養源寺橋（5.1KP），馬引橋（3.7KP），旭橋（0.5KP）の写真を重ねている．また，これらの地点の河道断面図を図 2-10 に示した．これらに見られるように河道はコンクリート 2 面張，または 3 面張で整備されて護岸は直壁に近い．3.0KP 付近までは低水路が形成されている．

図 2-11 に感潮域の最深河床高縦断分布，図 2-12 に河床高の平面分布を示す．勾配変化点 4.0KP より下流は勾配がほとんどなく，4.0KP 当たりの河床高が低く凹んでいる．

無降雨時は図 2-13 に示すように表層に数 10cm の薄い淡水層が流れ，下層には塩水が厚さ数 m にわたって遡上して明瞭な塩淡成層を形成している．

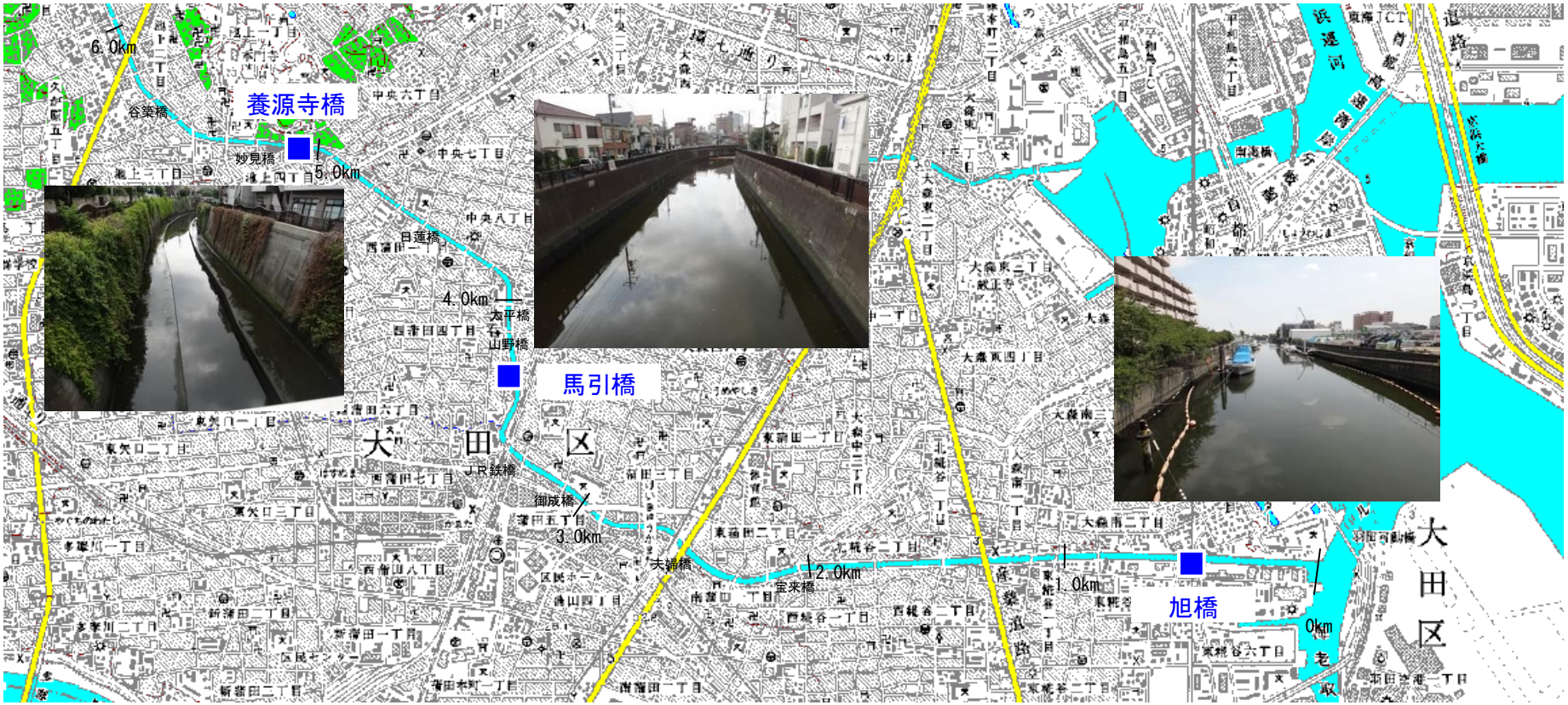

養源寺橋
馬引橋
旭橋
6.0km
5.0km
4.0km
3.0km
2.0km
1.0km
0km
谷築橋
妙見橋
目蓮橋
太平橋
山野橋
御成橋
夫婦橋
宝来橋
JR鉄橋
大田区
大田区

図 2-9　呑川感潮域

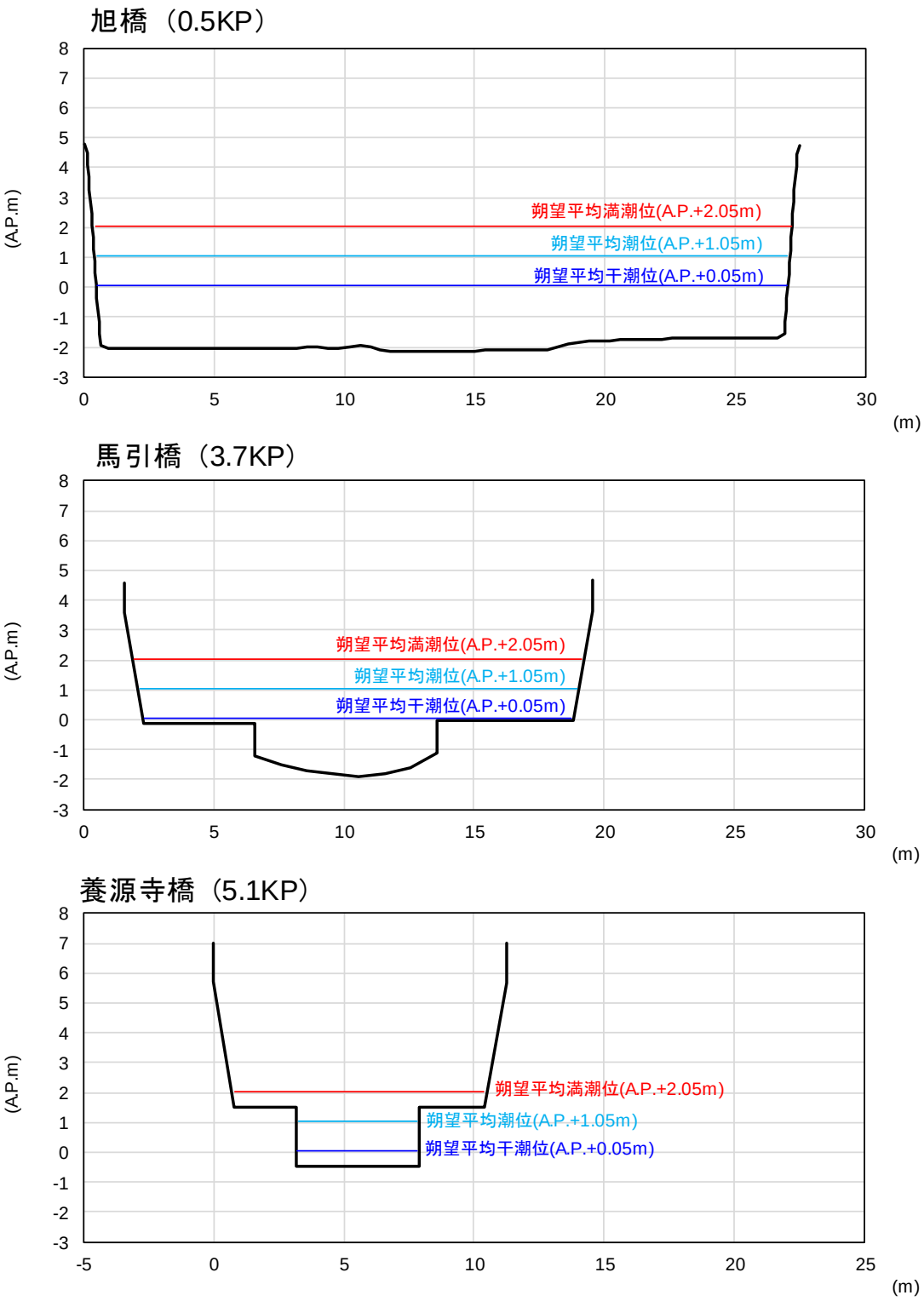


図 2-10　呑川の感潮域の断面形状

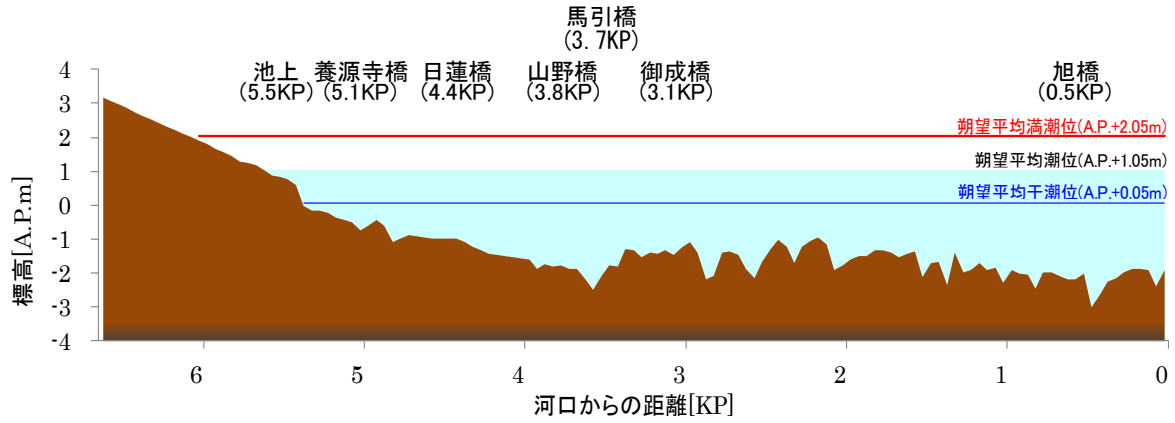


図 2-11　感潮域の最深河床高縦断分布

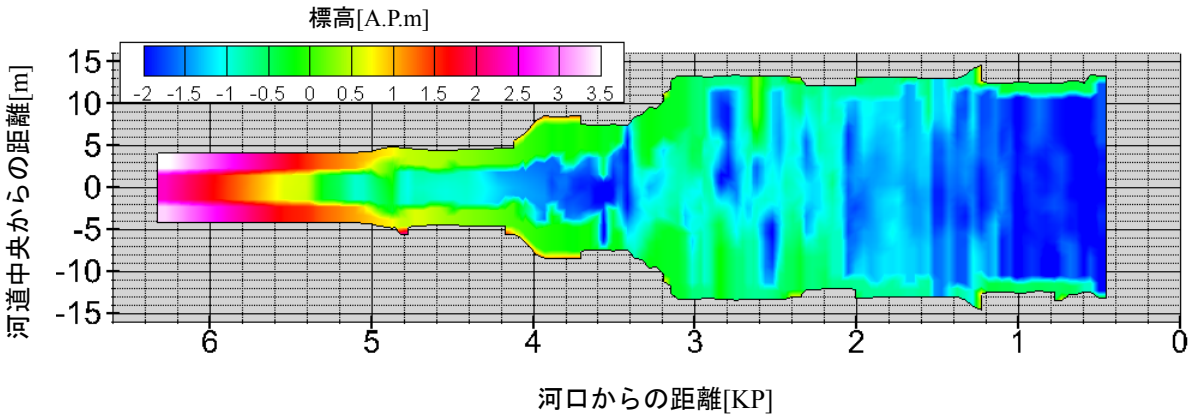


図 2-12　呑川の河床高の平面分布

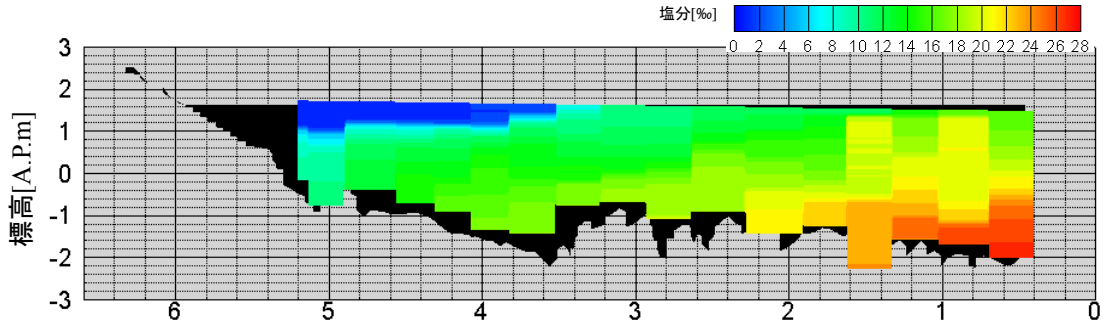


図 2-13 塩分の鉛直分布

（2015/7/21 18:00）

3) 気候

アメダス東京地点の気温，世田谷地点の降水量（降水量合計，降水量日最大，時間最大降水量，10 分間最大降水量）の月別 10 年平均値を図 2-14 に示す．

平均気温は 1 月が最も低く 5.9℃，8 月が最も高く 27.6℃ となっている．

降水量については，月別の降雨量合計をみると，梅雨時期の 6 月と台風シーズンとなる 8 月～10 月の降水量が多い．それらの間となる 7 月は比較的降水量が少ない．

東京都は太平洋岸気候であり，地形の関係上，台風の影響を受けやすく，特に 9 月，10 月には降雨量合計が月 200mm を上回っている．9 月から 10 月にかけては時間最大降水量も比較的大きく，大規模な出水になりやすいことが分かる．

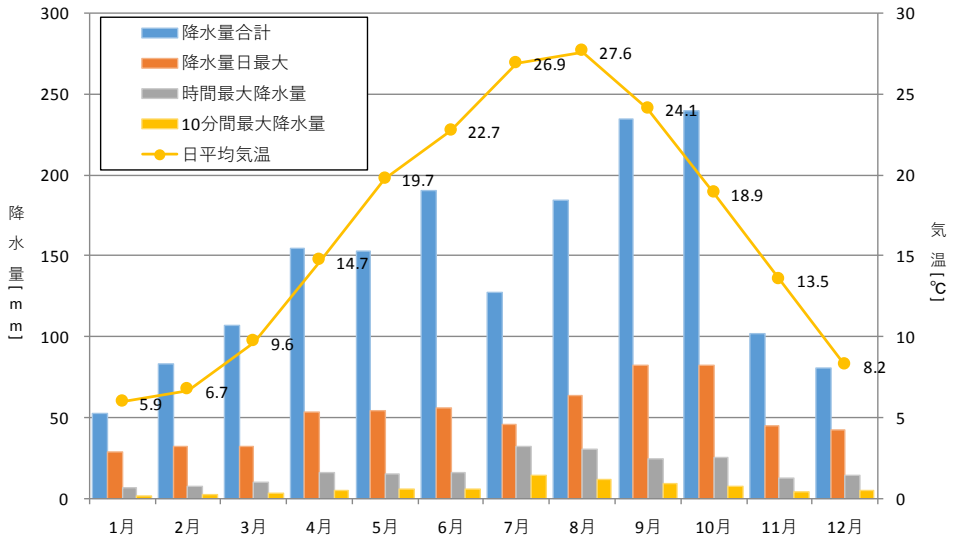


図 2-14　呑川流域付近の気温・降水量

気温：アメダス東京地点データ

降水量：アメダス世田谷地点データ

4)　人口

香川の集水域の人口はおよそ平成 27 年国勢調査時点で 26.5 万人，人口密度約 1.5 万人/km^2 であり，東京都区部の平均的な人口密度（約 1.5 万人/km^2）と同等である．図 2-15 に人口密度の分布を示すが，工大橋上流域には大学や公園が多く，若干人口密度が少なくなっている．

表 2-3　香川の流域人口と人口密度

流域人口	約 26.5 万人	平成 27 年国勢調査
人口密度	1.5 万人/km^2	

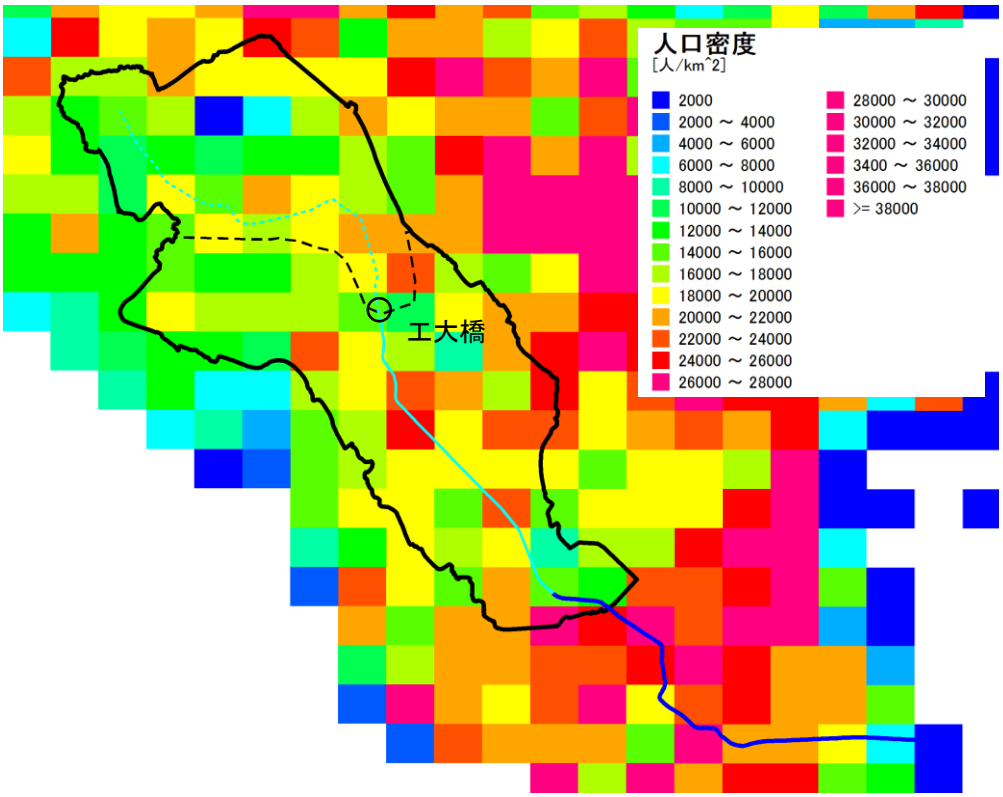


図 2-15　人口密度の分布

（H22 国勢調査メッシュ統計より）

5)　土地利用

図 2-16 に土地利用の分布を示す．流域のほとんどは建物用地であり，工大橋上流域は低層建物が多く，工大橋下流は高層建物が多い．

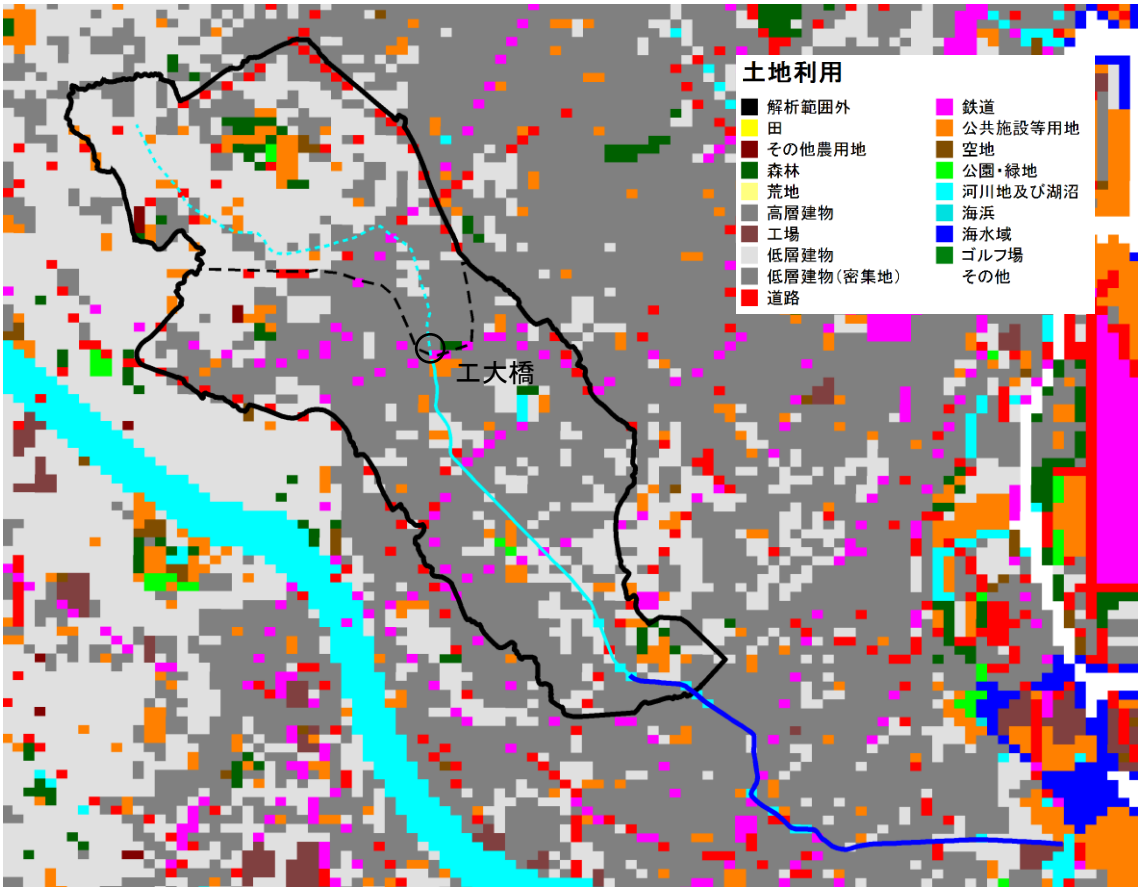


図 2-16　土地利用の分布

(4) スカムの発生状況

大田区環境対策課は，区内を流れる呑川の山野橋（河口から 3.8 km）地点に自記式水質測定器（HORIBA W-22XD）を設置するとともに，平日に 1 日 1 回行う河川パトロール時に，目視によりスカム発生状況を表 2-4 のように分類し記録している．

図 2-17 に 2015/4/1～10/31 の観測値を示す．図 2-17(a)にアメダス世田谷観測所における日雨量および日最大時間雨量を，図 2-17 (b,c)に 2015 年 4 月～10 月の山野橋地点の河床上 50cm の連続観測記録を，図 2-17 (d)にスカム発生状況を示す．(d)においてスカムが中量発生した日（当該期間では”多量”は発生しなかった）には赤色の縦点線を付している．多くの場合，スカム発生の 1~2 日前に降雨があり，それらを(a)に赤でマークしている．また降雨があっても 2 日以内にスカムが発生しなかった場合の降雨事象を青でマークし，その 1 日後に青の縦点線を付している．これらのデータから，以下の傾向が見て取れる．

連続観測記録を見ると，平常時における山野橋底層塩分は 10～30‰であり，底層水の DO はほぼゼロで，ORP はメタン生成菌により嫌気性ガスが発生する-330mV 以下となっている．しかし出水があると，塩分が若干低下し，DO もわずかに上昇する．これに対応して ORP は上昇するが，小降雨（日雨量 50mm 以下）では 1~2 日後には-330mV[11)]以下に低下する場合が多い．

中量以上のスカムの発生は，日雨量 10mm 以上の小降雨が発生して 1~2 日後に生じることが多い．呑川の洪水流達時間は 1 時間程度であるから，この 1~2 日の時差は，主に堆積後における汚泥中でのガス発生により十分な浮力が生じるまでの時間であると考えられる．また，同程度の降雨であっても夏季（6 月～8 月）にはスカム発生の頻度が高く，春と秋には低いが，これは季節による水温の違いが関与しているものと考えられる．一方，日雨量 50mm 以上の降雨ではスカムの発生していない場合が多い．この原因は河川流速の増加によって有機汚泥が沈積しにくいため，嫌気性ガスを発生させる浮泥層が十分発達しないためではないかと考えられる．また 5 月と 10 月には塩分が 20‰以上であることが多く，Hanna ら [12)]が指摘しているように高塩分によりメタン生成が抑制され，スカムが発生しにくくなっている可能性もある．

表 2-4　スカム発生状況の分類

指標	全　景	近　景
多　量		
中　量		
少　量		
微　量		

出典）　平成 26 年度呑川水質浄化対策研究会報告書 [13)]

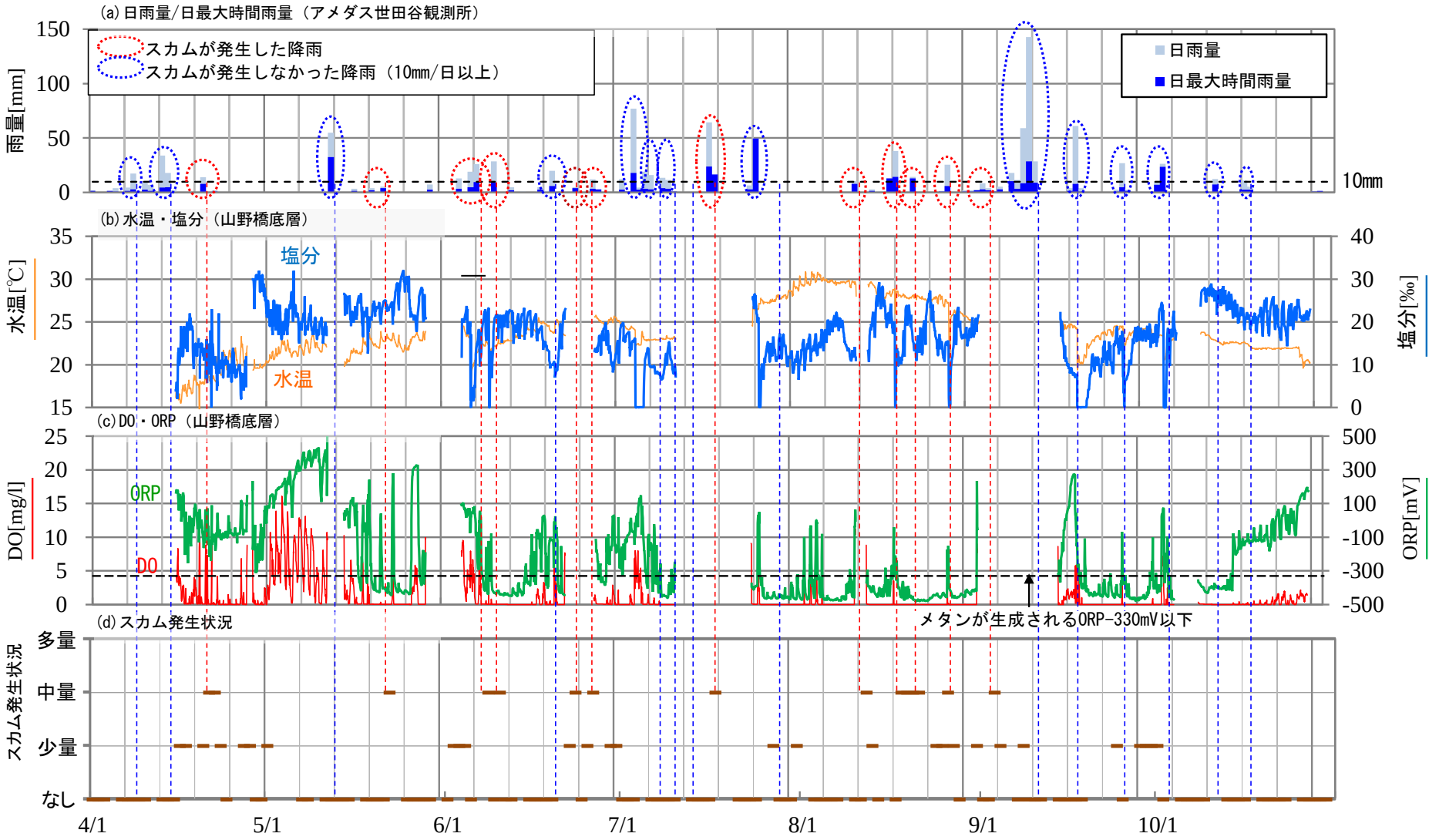


図 2-17 下層水質の経時変化およびスカム発生状況（2015 年）

2-4　結語

本章では東京都区部の山の手台地を流下する多くの都市河川感潮域の共通の水環境問題として，悪臭，スカムの発生，白濁化および魚の大量斃死の 4 つを挙げた．これらの水環境問題が生じる要因として，下記の要因が推定した．

【水環境問題の推定される発生要因】

① 流域の大部分が合流式下水道で整備されているため，降雨時には未処理越流水が河川に流入し，高濃度の有機懸濁物が流入しやすい．

② 自流区間から感潮区間への勾配変化点下流の汽水域において，上流から流入してきた有機性懸濁物が沈降・堆積しやすくなる．

③ 停滞性が強く，鉛直混合による酸素の供給が少ない汽水域上流部の底層では，河床に堆積した有機汚泥の分解に伴い嫌気化が進行する．

④ 有機物の分解の過程で，硫化物やメタンガスなどの嫌気性ガスが発生し，悪臭やスカム，白濁化などを引き起こす．

また，東京都区部の都市河川の感潮域でこれらの水環境問題が発生しやすい要因として，下記の 3 つを説明した．

【東京都区部の都市河川で水環境問題が発生しやすい理由】

- 世界でも有数の人口密集地であるとともに，流域のほとんどが合流式下水道で整備されており，降雨時には合流式下水道から汚水が流出する．
- 山の手台地を比較的急勾配で流れ下った後，低平地に入るとほとんど勾配がなくなり，さらに治水対策のために浚渫等により深く掘り下げられているため，流速が遅く，上流域から流入した有機懸濁物が堆積しやすい．
- 低平地区間は潮汐の影響を受ける感潮域であるとともに，運河部から侵入する塩水の影響を受ける汽水域であり，塩淡成層を形成しており，鉛直混合が生じにくく，さらに停滞性が強くなる．

また，本研究では，４つの水環境問題のうち，近年多くの河川で発生が確認されているスカムについて取り上げることを述べ，スカムに関するデータが比較的蓄積されている呑川を対象とした．さらに呑川の流域特性についてデータを用いて説明し，大田区の観測データからスカムの発生状況とその要因について考察した．その結果，以下の特性を把握した．

【呑川におけるスカム発生特性】

- 降雨の 1 ～ 2 日後に比較的多くのスカムが発生しやすい．
- 底層の ORP が-300mV を下回った場合に，スカムが発生しやすい．
- 水温が 20℃を超える期間にスカムが発生しやすい．
- 塩分が 20‰以上の時期にはスカムが発生しにくい．

【参考文献】

1) 北区（東京都）：石神井川の臭気対策・環境改善 https://www.city.kita.tokyo.jp/d-douro/jutaku/kankyo/bika/documents/syukitaisaku.pdf （参照：2019/5/3）
2) 山崎正夫，津久井公明：河川におけるスカムの発生に関する研究（その１）スカムの起源に関する研究，東京都環境科学研究所年報1991，pp.171-179，1991.
3) 山崎正夫，津久井公明：河川におけるスカムの発生に関する研究（その２）－神田川白鳥橋～飯田橋間の堆積状況調査結果，東京都環境科学研究所年報1991-2，pp.182-184，1991.
4) 山崎正夫，津久井公明：河川におけるスカムの発生に関する研究（その３）－降雨後のたい積状況変化について－，東京都環境科学研究所年報1992，pp.167-171，1992.
5) 呑川水質浄化対策研究会：平成25年度呑川水質浄化対策研究会報告書，2014.
6) 東京都大田区都市環境部公害課：水質関係調査報告書（平成3年度）
7) 東京都下水道局：東京都下水道告示現況図（全区図），http://www.gesui.metro.tokyo.jp/living/pdf/zenku.pdf.（参照：2017/8/7）
8) 三浦心，堀田哲夫，根岸均，鶴田泰士：都市河川汽水域における青潮の発生機構に関する調査と解析， 水工学論文集， 第53巻，2009.
9) 東京都：呑川流域河川整備計画，2017.
10) 東京都：呑川流域河川整備基本方針，2017.
11) 和田洋六：ポイント解説水処理技術，東京電機大学出版局, 2011.
12) Hanna J. Poffenbarger , Brian A. Needelman, J. Patrick Megonigal： Salinity Influence on Methane Emissions from Tidal Marshes，Wetlands 31，pp.831-842，2011. DOI: 10.1007/s13157-011-0197-0
13) 呑川水質浄化対策研究会：平成26年度呑川水質浄化対策研究会報告書，2015.

第3章　合流式下水道からの有機懸濁物の流出

3-1　緒言

東京都区部の中小河川下流部においては，合流式下水道から排出される有機懸濁物（O-SS）が停滞性の強い下流感潮区間において堆積し，種々の水質問題（貧酸素化，スカム浮上，悪臭，白濁化）を発生させている．スカムの発生量を予測するために，O-SSの発生・流下過程をモデル化し，汽水域に到達する O-SS の時系列を定量的に評価するモデルが必要とされる．

そこで本章では，合流式下水道が 100%を占める呑川をフィールドとして，現行下水道計画での流量算定に用いられている MIKE URBAN を用いて，出水時に汽水域上流端に達する O-SS の時間波形をシミュレーションするモデルを構築した．

3-1-1　既往の研究と課題

合流式下水道からの未処理汚水（CSO）の流出については，それらの流出量の把握や対策の検討，気候変動の影響評価について国内外で多くの研究が実施されてきた[1) ~ 5)]．下水道流域の流出モデルには，合理式やその変形であるタイムエリア法[6)]，貯留関数モデル[7)]，両者を複合した修正 RRL 法[8)]などがあり，また近年は下水道網を物理的に表現した流出モデルも活用されている[9)]．O-SS 輸送モデルは，原理的にはこれらのモデルに O-SS 発生・流出のモジュールを加えることにより構築される．都市域における O-SS 発生・流出については L-Q 式などの簡便法のほか，1980 年代から現地研究が実施され，その結果を修正 RRL 法などの流出モデルに組み込む方法が開発されている[10)]．また小排水区における詳細な計測に基づき下水管渠内の O-SS 堆積・洗堀まで含めたモデルも提案されている[11)]．

しかし，現実の O-SS 発生・流下は，道路側溝，汚水ますおよび雨水ます，管渠，マンホール（以下，人孔）などの小空間における現象の重合によっており，それらの調査結果を数十 km^2 オーダの東京都区部河川流域に拡張することは容易でない．一方，欧米では Info Works ICS[12)]，MIKE URBAN[13)]，xpswmm[14)]といった，汎用的下水道流出モデルが

開発されている．わが国における下水道計画の実務でも，現地観測による適用性評価を前提に，それらを合流式下水道改善計画等に用いることが推進されている[15]．

これらのモデルの細部は互いに異なっているが，田中ら[16]が上記 3 モデルを 5ha の 1 排水区に適用した結果では，それぞれのモデルパラメータを調整することにより，流出量および O-SS の時間波形を概ね再現できている．したがって小排水区レベルの実用性という観点からすると，3 者はほぼ同等と考えてよいと思われる．一方，下水道計画に用いられているモデルは河川ごとに異なっており，O-SS 算定に別種のモデルを使用すると実務上の混乱を生じる恐れがある．そこで，各河川流域の下水道計画で使用されているモデルの O-SS モジュールを用いた場合の再現性を調べておくことは，下流部汽水域の水質改善を実務的に検討する上で重要であると考えられる．

本研究では，合流式下水道の集水域から排出される O-SS が汽水域に達する過程を定量的に把握することを目的として，呑川を対象に当該流域の下水道計画に用いられている流出計算ソフトウェア MIKE URBAN を用いて O-SS 時系列の再現性を検討した．まず合流式下水道施設内の 2 か所において 2 出水時に現地観測を実施し，その結果に基づき MIKE URBAN のモジュールを拡張して適用し，モデルパラメータを調整して排水区レベルでのモデル再現性を検討した．続いて汽水域区間より上流の全排水区に同モデルを適用し，一次元不定流モデルにより流量および O-SS の時空間変動を計算し，同出水において汽水域上流端で観測された水位及び O-SS の再現性を調べた．最後に異なる年度に観測された 3 出水に対して同モデルの適用性をさらに検証した．

3-1-2 本研究の特徴

本研究の特徴は下記の 3 点である．

- 通常，下水流域からの流出に関する研究は，数 ha の比較的小さい流域を対象に実施されることが多い．それらを用いて数十 km^2 の集水域を持つ流域の流出特性を再現できるのか，検証したものである．
- また，MIKE URABAN においては，流域からの O-SS 排出については地表からの流出と，雨水ますからの流出の 2 つの機構をモデル化（モジュール化）している．これらのモジュールを用いて，現象の再現を試みた．
- 従来の検証では下水道内での検証にとどまっていたが，本研究では対象範囲を河道にまで拡大し，スカムなどの水質問題が発生している感潮域上流端における O-SS 負荷量が算定できるか検証を行った．

3-1-3　検討フロー

本章の検討フローを図 3-1 に示す.

「3-2　O-SS 流出量の現地調査」において，下水道管渠内 2 地点と呑川河道の感潮域上流端 1 地点において 2 出水時の O-SS の経時変化を把握した.「3-3　合流式下水道流域からの O-SS 流出量の算出」では，呑川集水域を対象に下水管路網をモデル化し，「3-2-1　下水管渠内調査」の結果を用いてモデル・パラメータのキャリブレーションを行った.そのモデルを用いて感潮域上流端の O-SS の経時変化の検証を行い，モデルの妥当性を確認した.

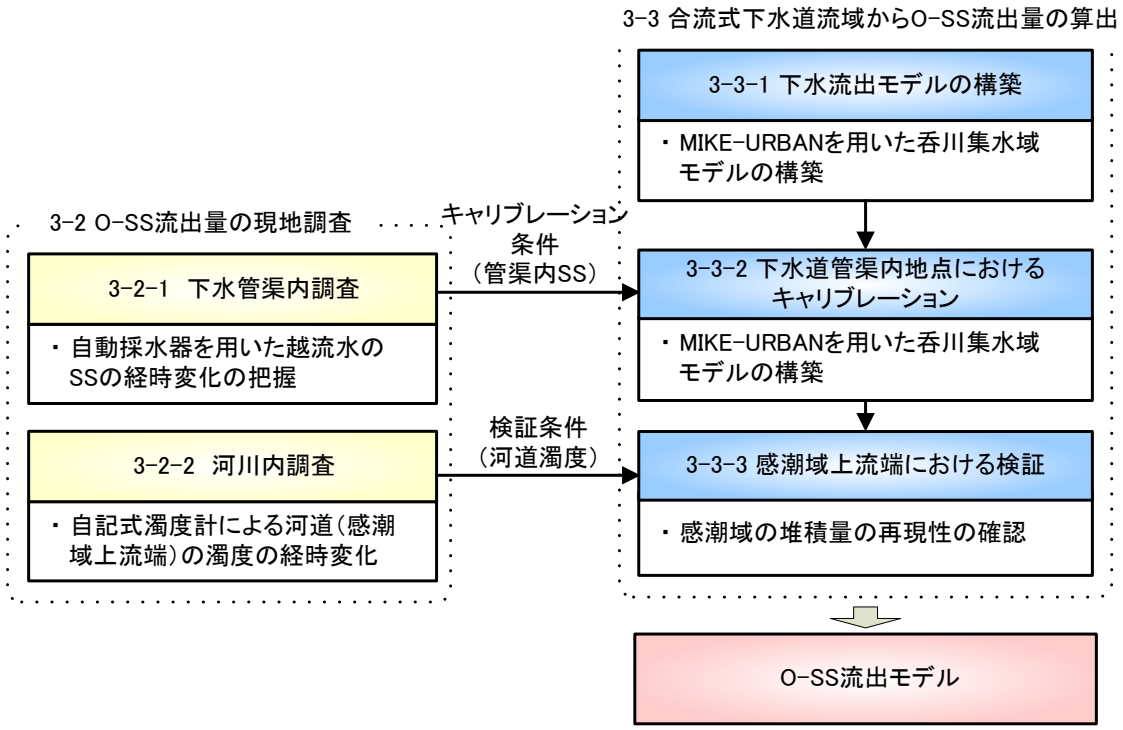


図 3-1　本章の検討フロー

3-2　O-SS 流出量の現地調査

3-2-1　下水管渠内調査

(1)　調査方法

2015 年において，下水道管渠内調査は，下水流出モデルの検証のために，下水道管渠内の 2 地点において調査を実施した．

表 3-1　下水道管渠内調査概要

調査項目	調査内容	摘要
①調査期間	2 ヶ月間(2015/9/5～10/23)	
②調査対象	呑川流域の管渠内の下水	
③調査地点	2 地点 雨水吐:1 箇所(調査地点①) 下流部遮集下水管渠:1 箇所(調査地点②)	
④調査内容	水位調査:2 ヶ月間 雨天時水質調査:2 降雨	水質調査は自動採水器による
⑤室内試験項目	濁度，O-SS(2 降雨×8 検体/降雨×3 箇所)	
⑥その他	水位計	

1)　調査地点

水位計及び自動採水器の設置箇所の概要を表 3-2 に示した．また，調査地点の位置図を，図 3-3 に示した．

表 3-2　流量計及び自動採水器の調査地点の概要

名称	住所	設置期間
調査地点①	東京都目黒区緑が丘 1-5 地先	2015/9/5～10/23
調査地点②	東京都大田区西蒲田 7-61 地先	2015/9/15～10/23

幹線下水道は開水路部上流の呑川幹線，駒沢幹線，柿の木坂幹線および九品仏幹線と呑川左岸の洗足池幹線は旧河川を暗渠化して下水道としたもので，地形図の谷地部分と概ね一致している．その他の幹線はカルバートを埋設したものである．

幹線は全て合流式であり，工大橋上流に到達した流水は雨水吐き室の堰により非越流水は呑川幹線（汚水）へ，降雨時の越流水は放流管渠から呑川へ排水される．呑川幹線は九品仏幹線の合流後に呑川河道右岸に沿って南に走り，最後は森ケ崎処理場に通じる多摩川幹線に合流する．途中に呑川分派幹線があり，西方の多摩川幹線に接続されている．その南側の中原幹線は呑川河道からの放水路であり，呑川幹線とは立体交差し，地表水および下水の流入はない．呑川左岸の洗足池幹線は，緑矢印の地点で呑川河道を横断し呑川幹線に合流する．その南にある中央幹線は洗足池幹線とは接続されておらず，それより下流部分にある雨水吐き室の非越流水を集め，森ケ崎処理場に通じる大森幹線に合流する．

下水管渠の容量は計画汚水量の 3 倍程度であり，降雨時に流量がこれを越えると，余剰分は図 3-2 に示す構造の雨水吐き室においてコンクリート製の堰により分流され，越流水は放流管渠を経て呑川への吐出口へ，非越流水は汚水流出管渠を通じて幹線下水道に送られる．堰の上流側には漂流物除去のためのガイドウォールが設置されている．水位が堰天端を越えると吐出口への排水が始まり，ガイドウォール上端を越えると自由越流になる．

雨水吐き室には，吐出口とセットで河道沿いに設置されているものと，河道から離れた位置に設置され吐出口に排水管で結ばれているものがある．なお前者の雨水吐き室の堰高は呑川吐出口における H.W.L.以上であるので，通常は河川水が下水道に逆流することはない．また後者では排水管に地表から雨水が流入することはない．

合流式下水道から排水される O-SS を計測するため，図 3-3 に①，②で示す位置に圧力式水位計（東建エンジニアリング社製 RT510F-W）と自動採水器（ISCO 社製 6712 スタンダードサンプラー）を設置した．観測精度を確保するために，測定器を設置・管理がしやすく流量が比較的大きい地点を選定した．地点①は暗渠から開水路に移行する工大橋の上流（10.2 KP）のカルバート（幅 3.6m，高さ 4.45m）内にあり，上流の全集水域からの排水の余剰分を開水路に分流する越流堰の上流側である．上部の人孔から降りるステップを利用し測定器を固定した．地点②は森ケ崎下水処理場に通じる呑川幹線のカルバート（幅 3.6m，高さ 3.2m）内にあり，人孔から降りるステップを利用して側壁に測定器を固定した．図 3-3 に示したように，地点②は呑川流域外からの排水も若干流

入する．後述する解析モデルでは流域外の集水域管渠部分も含めている．計測器設置期間は 2015 年 9 月 5 日から 10 月 23 日までであり，水位は連続的に計測された．一方，採水器のボトルは 12 個に限られるので，ファーストフラッシュを捉えるために，降雨が予報された 9 月 17 日および 9 月 25 日の前日に採水開始水深と採水時間間隔を指定した．採水開始水深は，調査地点①では 0.70m（9 月 17 日出水）と 0.80m（9 月 25 日出水），調査地点②ではどちらの出水に対しても 1.27m とした．本装置で指定できる採水時刻は標準時の 5 分ごと（以下，指定時間）であるため，水深が指定水位を超えた後の最初の指定時間から採水が始まり，前半 7 回の採水は 5 分刻み，その後は 15 分刻みとした．合計時間は 1 時間 45 分である．ただし分析検体数の制約で O-SS 分析対象は 8 検体とされていたため，O-SS 波形が捉えられるように目視により各 8 検体を選択した．

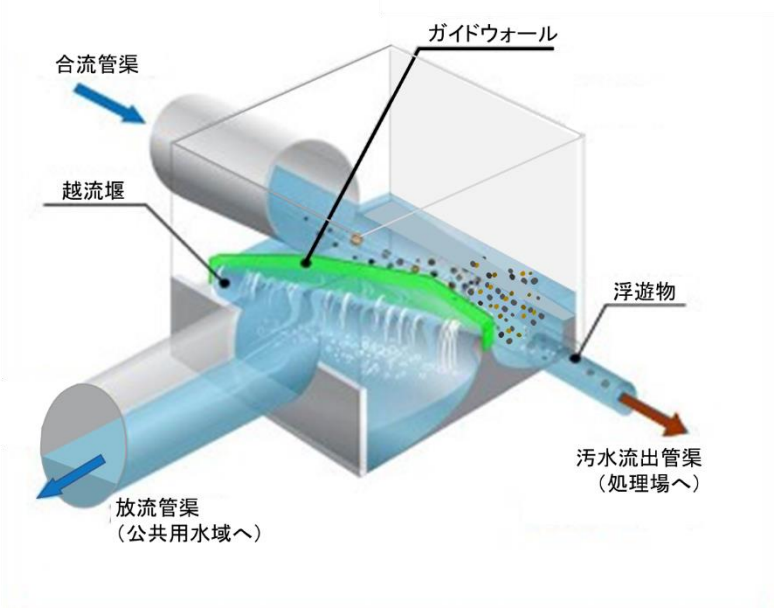


図 3-2　雨水吐き室の構造

（松島ら[17]の構造図を一部編集）

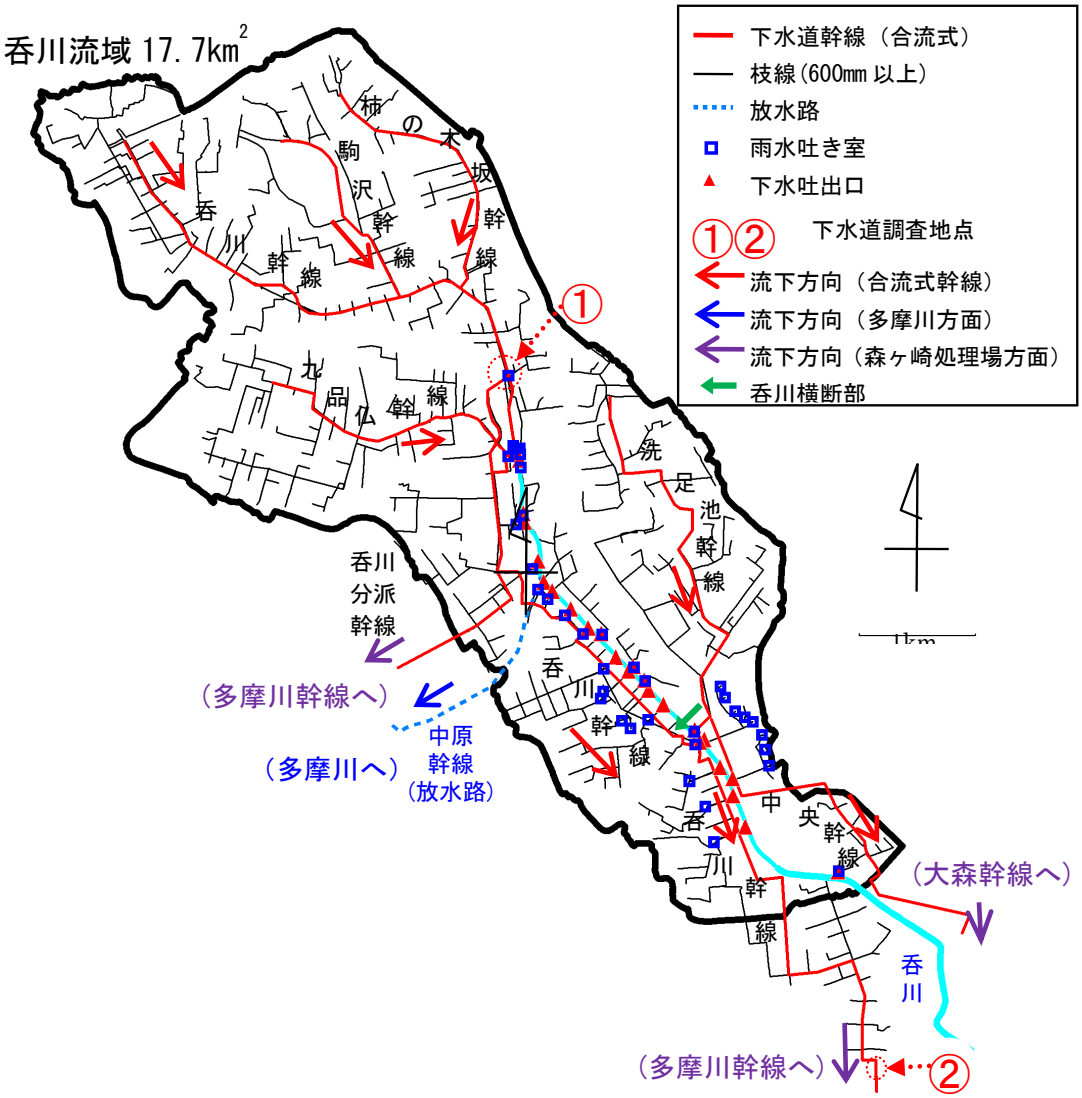


図 3-3　水位計・自動採水器の調査地点位置図

水位調査は，設置した自記式水位計による調査期間内の連続測定とした．測定間隔は5分ピッチ，24時間稼働で2ヶ月間計測を行った．

水質調査については，ファーストフラッシュなど降雨時の下水道管渠内の水質の挙動を明らかにすることを目的とし，各調査地点で同じ2降雨実施した．各回の採水検体数は8検体とした．

2) 観測機器

a) 水位計

管渠内に設置する水位計は EMR 社の水位計を設置した．測定間隔は 5 分ピッチとし，ロガーに自記することでデータを収集した．

データロガーについては，人孔の足掛金物等に吊り下げる形で設置した．

図 3-4　水位計の外観と設置イメージ

b)　自動採水器

管渠内に設置する自動採水器は ISCO 社の自動採水器を設置した（図 3-5）．本機器は自動採水器内部に採水ボトルが設置可能となっており，人孔底部に設置した水位計に連動して起動し，ポンプで揚水して採水を行うものである．

自動採水器はマンホールにアンカーで固定する形で設置する方法を標準とした（図 3-6）が，雨水吐については定期点検に入ることから，調査地点①については人孔内部に架台を設置しこれに固定する形を採用した（詳細は後述）．

図 3-5　自動採水器概要

図 3-6　自動採水器の外観と設置状況

3) 機器設置方法

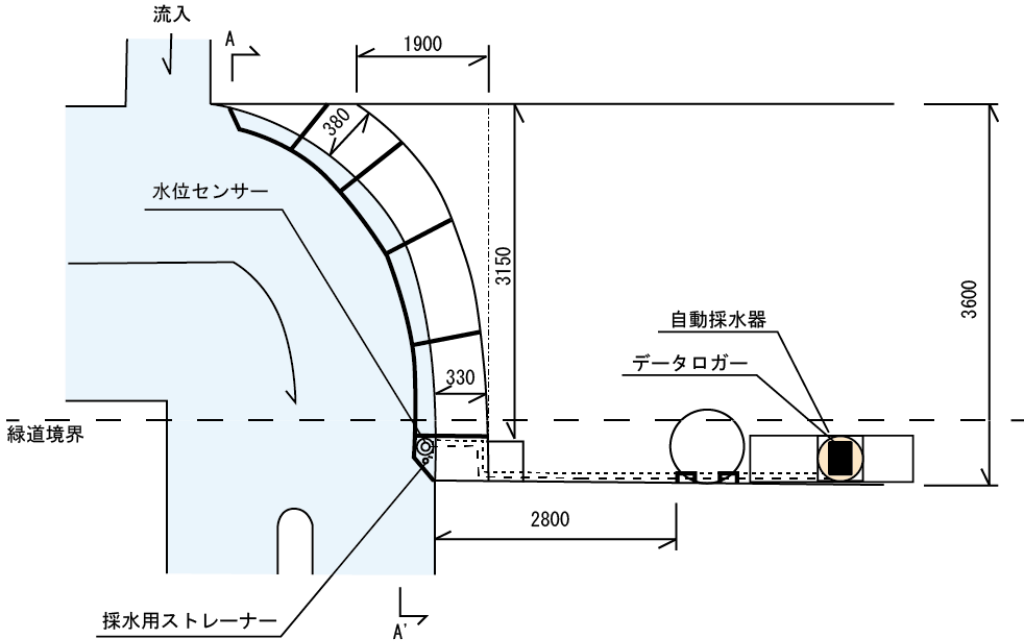
各調査地点の機器設置方法を以下に示した.

a) 調査地点①

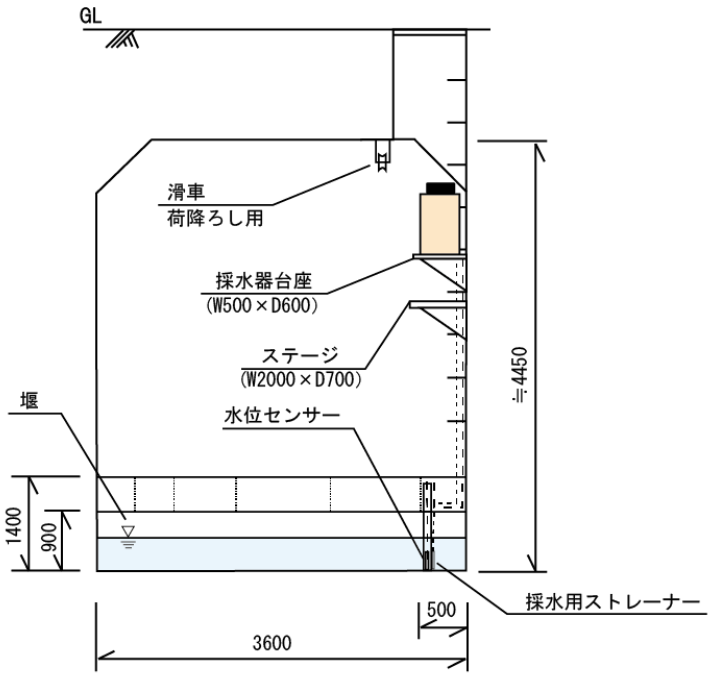
調査地点①の機器設置方法を図 3-7 と図 3-8 に示した.

- 当該地点は分水人孔の定期メンテナンスがあることから，自動採水器本体及び水位計のデータロガーは人孔直下に置くことができない．そのため，人孔内上部に架台を設置し，そこに設置した（図 3-7 左図）.
- 当該地点は常時水位が確保できることから，水位計及び採水用ストレーナーは越流堰下流部に垂直に設置した．（図 3-7 右図）

図 3-7　調査地点① の設置状況



平面図



A-A'断面図

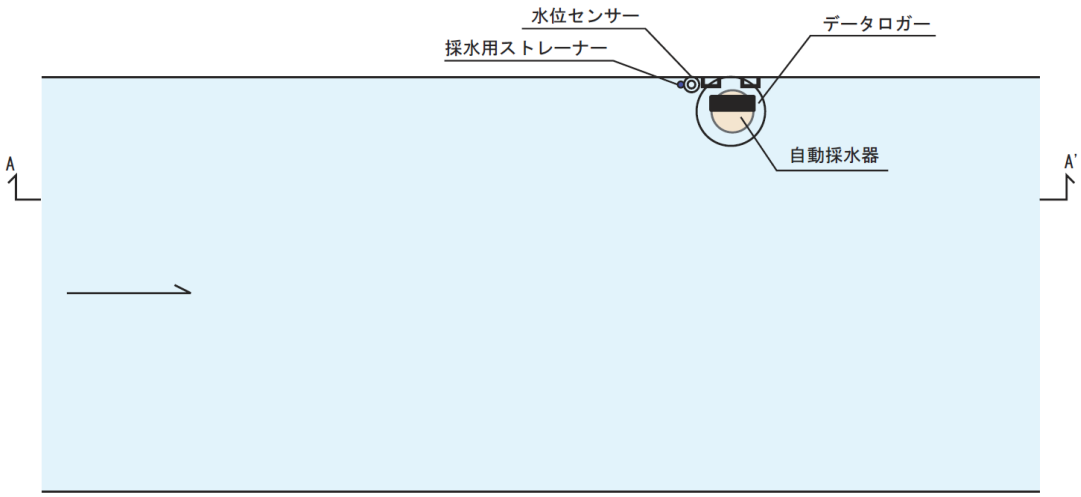
図 3-8　調査地点① 設置方法

b)　**調査地点②**

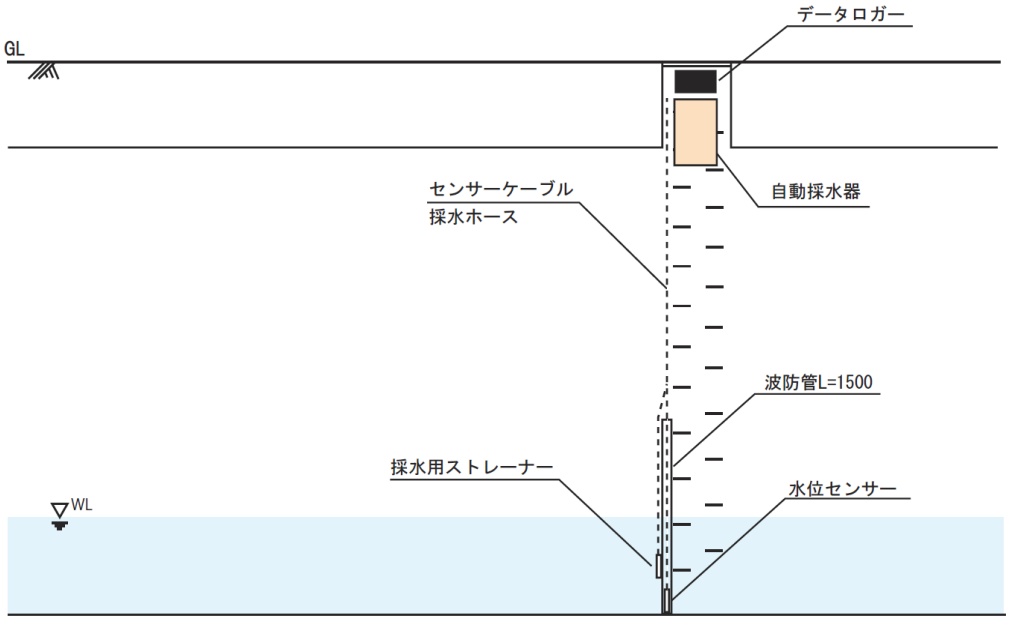
調査地点②の機器設置方法を図 3-10 に示した.

- 当該地点は分水人孔ではないため，定期メンテナンスがない．そのため，自動採水器本体及び水位計のデータロガーは人孔直下に設置した（図 3-9 左図）.
- 当該地点は常時水位が確保できることから，水位計及び採水用ストレーナーはマンホールステップ横に垂直に設置した（図 3-9 右図）.

図 3-9　調査地点② の設置状況



平面図



A-A' 断面図

図 3-10　調査地点② 設置方法

4) 水質調査項目

本研究は呑川で発生している水環境問題を解決するために実施することから，連続調査では水位の連続観測を，採水分析は濁度，O-SS を対象とした．

【連続調査】水位

【採水分析】濁度，O-SS

5) 採水調査

採水調査は，9/17 降雨（2017/9/16～9/17）及び 9/25 降雨（2017/9/25）の 2 回実施した．調査結果を図 3-11 に示した．これらから以下のことがわかる．

- 各回とも降雨の流入に伴い下水管内で発生するファーストフラッシュの現象を捉えることができたことにより，モデルの検証に必要なデータの調査ができた．
- 降雨や調査地点の状況により値は異なるが，O-SS でみると，ファーストフラッシュ時の未処理放流水の値は 140～240mg/L 程度であり，その後，10～100mg/L 程度まで低減していることが確認できた．
- 雨天時調査時の降雨状況を整理すると，いずれの調査においても 6 日程度の先行晴天日数となり，降雨の状況，時間帯等にもよるが，水質としては概ね同程度の値であった．

表 3-3　雨天時調査時の降雨状況

調査	降雨開始時刻	降雨終了時刻	1降雨の総降雨量（mm）	降雨継続時間（時間）	1時間最大雨量（mm/h）	先行晴天日数（日）
第1回調査(9/16～9/17)	2015/9/16 21:00	2015/9/17 20:10	64	23:10	12	6.3
第2回調査(9/25)	2015/9/25 1:40	2015/9/26 1:20	33	23:40	12	6.6

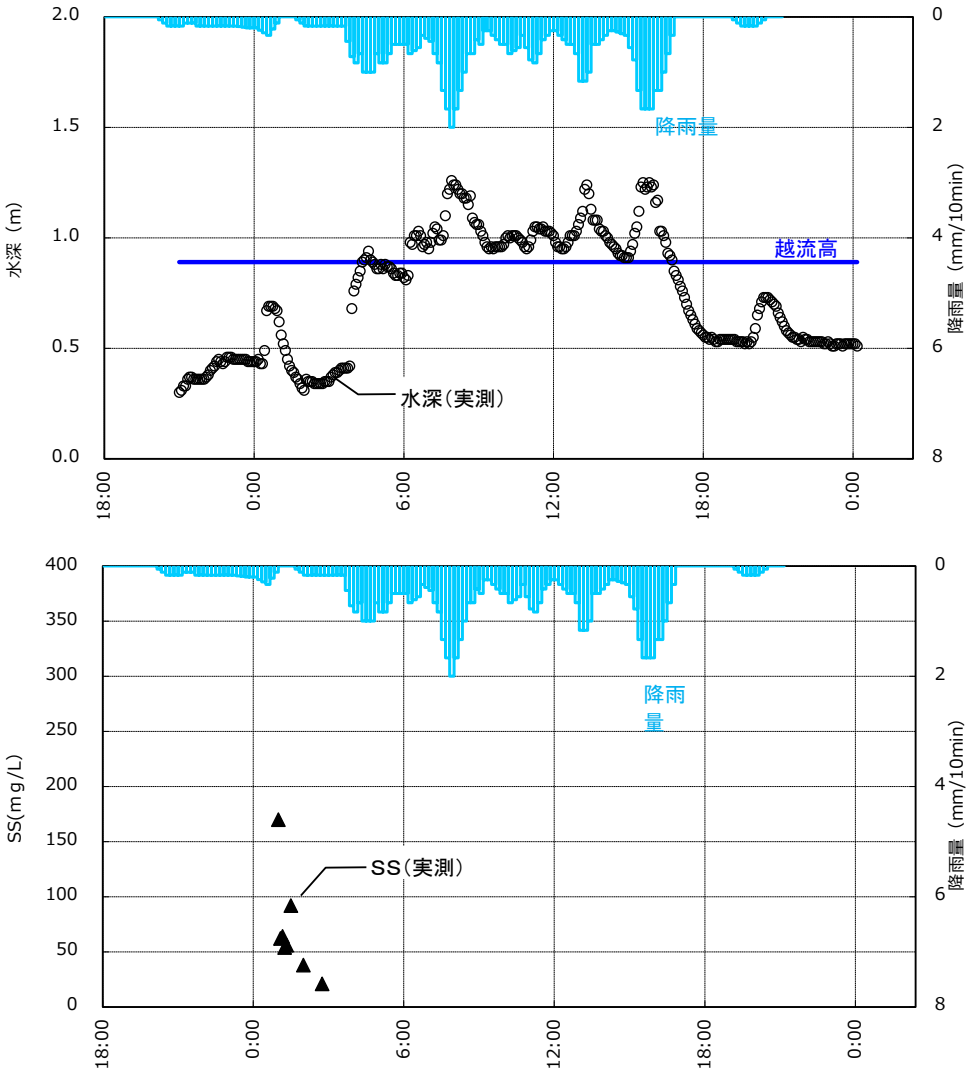


図 3-11　下水道内観測点の水深および O-SS の経時変化

（調査地点①，2015/9/16 出水）

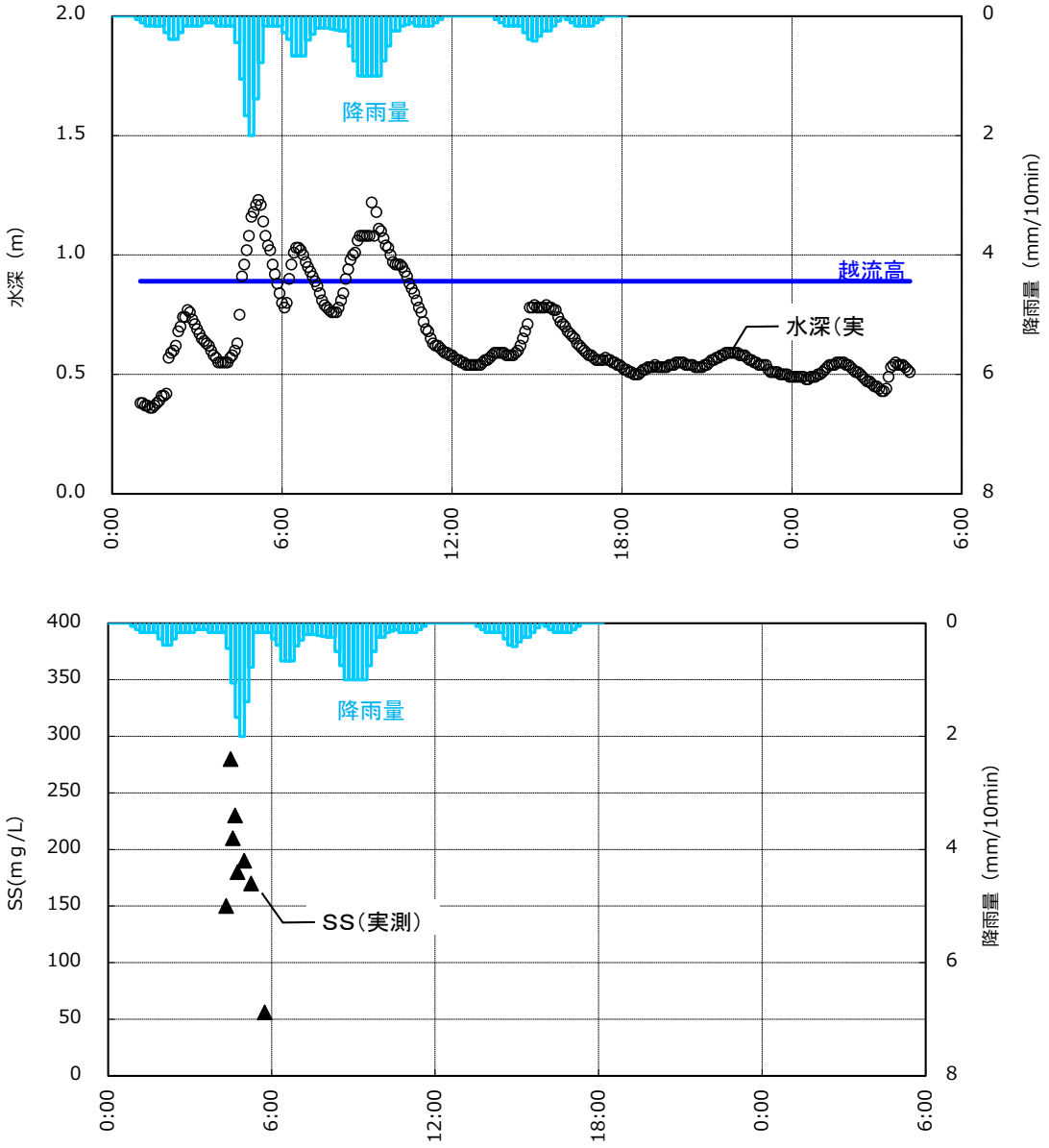


図 3-11　下水道内観測点の水深および O-SS の経時変化

（調査地点①，2015/9/25 出水）

3-2-2　河川内調査

本章では，集水域から感潮域に流入する O-SS を時間的に把握することを目的としている．そこで，現地において降雨に伴う呑川集水域からの O-SS の流出量を把握するため，感潮域上流端付近（養源寺橋）において濁度の連続調査を実施した．

(1)　調査方法

1)　調査地点

図 3-12 に雨量観測所および水位観測所の配置を示す．　また，本研究において集水域の下流の養源寺橋において自記式濁度計を設置し，濁度の連続観測を行った．

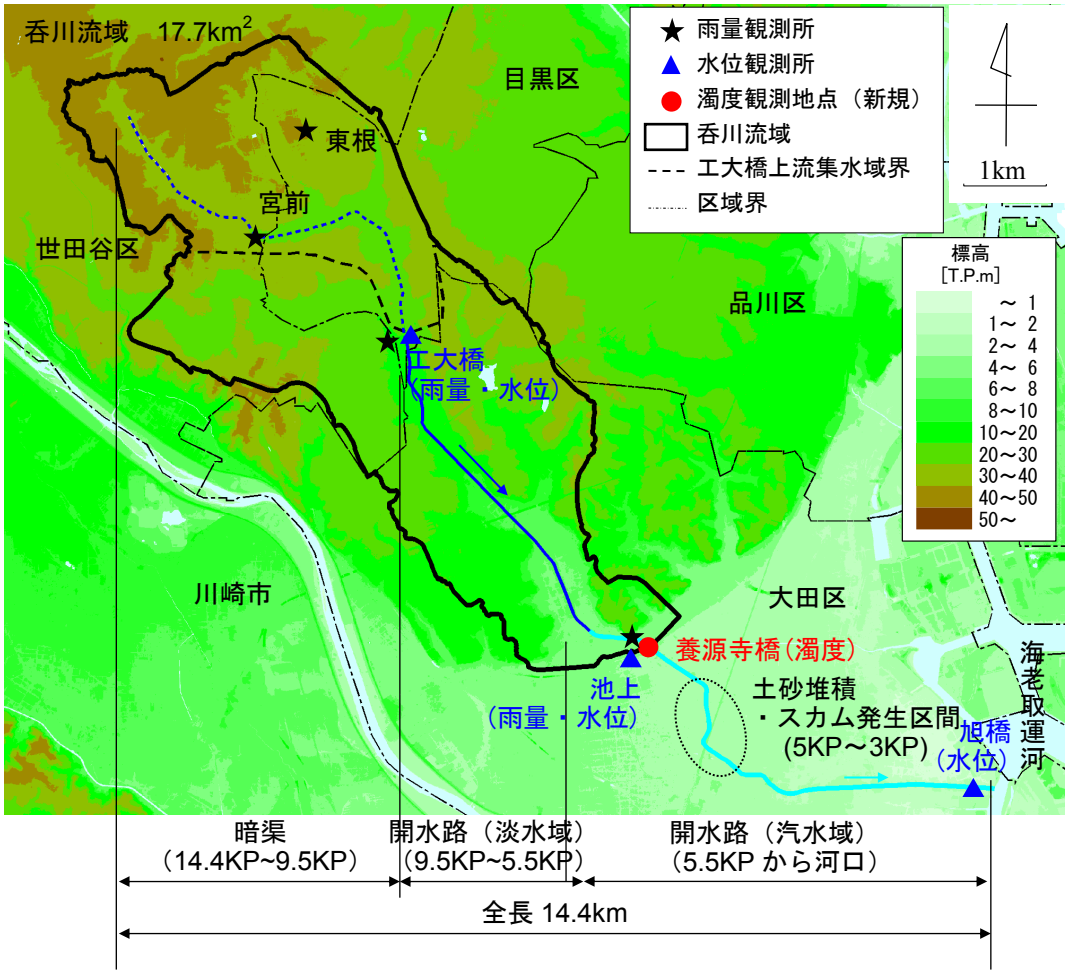


図 3-12 観測地点位置図

2) 調査期間

2015/9/5～10/30 の 2 ヵ月間，連続観測調査を行った．調査期間中の降雨と潮位の変化を図 3-13 に示す．

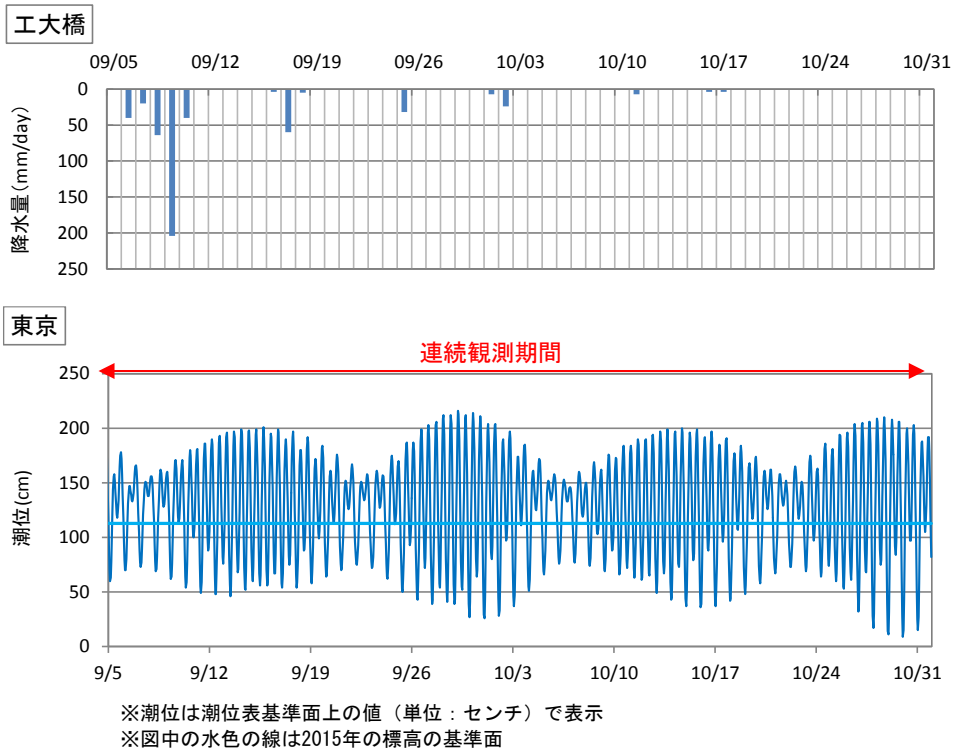


図 3-13　調査期間における潮位（東京）

3) 調査項目

調査項目としては，水温・濁度を計測した．

なお，近傍の池上地点において，雨量と水位の観測が東京都により実施されている（図 3-12 参照）．

4)　観測機器

JFE アドバンテック社製のワイパー付き自記式濁度計を河道内に設置した．測定間隔は 10 分間隔とし，ロガーに自記することでデータを収集した．

ワイパー式メモリクロロフィル濁度計 Infinity-CLW（JFE アドバンテック社製）

■本体仕様（ロガー部）

メモリータイプ	miniSDカード※防水高速仕様
メモリー容量	標準装備1GB(miniSDカード)
A/D変換分解能	16ビット
測定モード	連続モード、バーストモード
測定インターバル	0.1～600秒
バースト時間	1～1,440分
サンプル個数	1～18,000個
電源/容量	CR-V3型リチウム電池/3.3Ah(最大4個使用可)
通信形態	USB通信(Ver2.0準拠、Ver1.1相当)
消費電流	90mA
ケース材質	チタン2種
寸法	φ70mm×232mm
重量	空中約1.3kg、水中約0.6kg
耐圧性能	200m水深相当

■寸法図

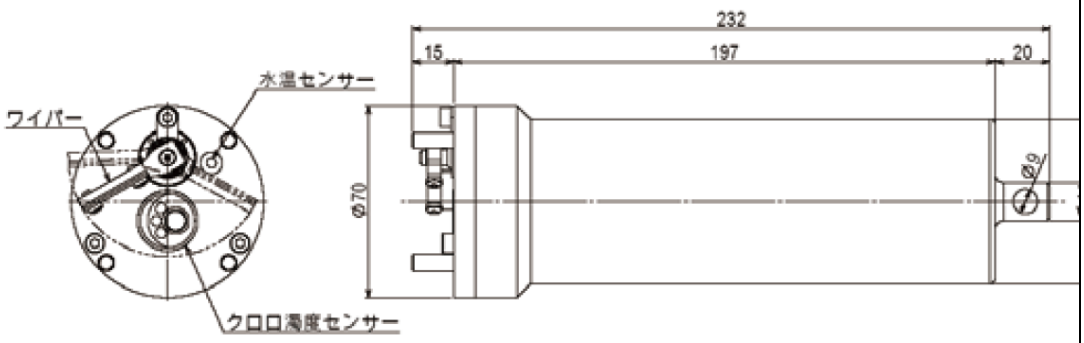


図 3-14　自記式濁度計

（JFE アドバンテック社 製品カタログ）

5)　機器設置方法

図 3-15 に示すように低水路部に塩ビ管を取り付け，連続観測機器を設置した．連続機器は，機器設置およそ１ヵ月毎に自記式水質計のデータ回収を行い，これに合わせて機器の点検・メンテナンスを実施した．

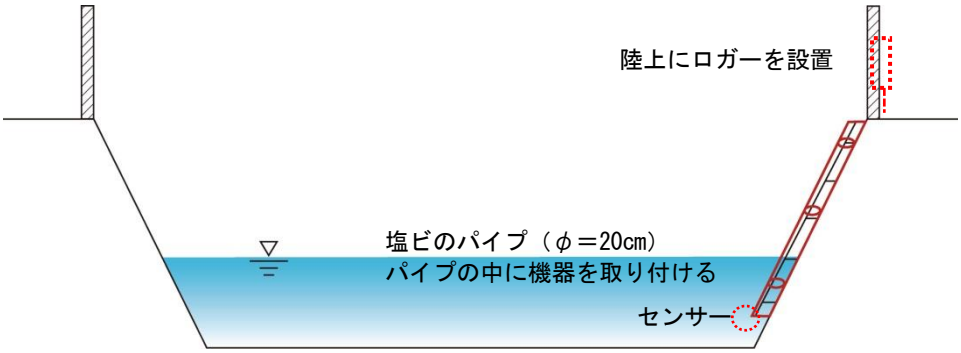


図 3-15　自記式濁度計 設置方法（養源寺橋）

写真 3-1　自記式濁度計 設置状況（養源寺橋）

(2) 調査結果

工大橋地点の 10 分雨量，池上および旭橋での河川水位および養源寺橋での濁度の時系列を図 3-16 に示す．9 月 17 日と 9 月 25 日に総降雨量 64mm と 33mm の降雨があり，濁度の増加がみられた．以下では前者を出水-A，後者を出水-B という．出水-A の降雨量は出水-B より大きかったが，濁度上昇量は出水-B が大きかった．ここで 9 月 28 日以降には無降雨期間でも周期的な濁度上昇が見られるが，これは出水-B 以降に汽水域において顕著な白濁化が生じ，潮汐により白濁水が上流へ運ばれ養源寺橋地点の濁度を上昇させたことによると考えられる．観測期間中に撮影した白濁化の状況を図 3-17 に示す．このような白濁化が生じると平常時でも濁度が大きく上昇し，濁度データから O-SS を求められなくなる．

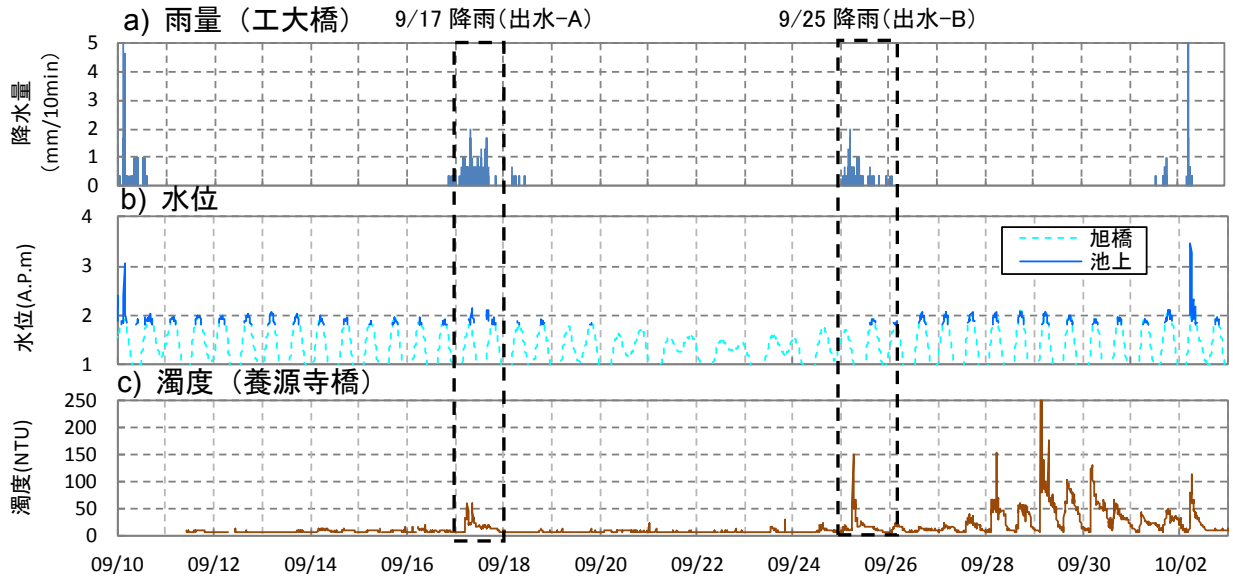


図 3-16 観測期間中の出水状況

（2017/9/10～2017/10/3）

9/22
（低濁度）

9/30
（白濁化）

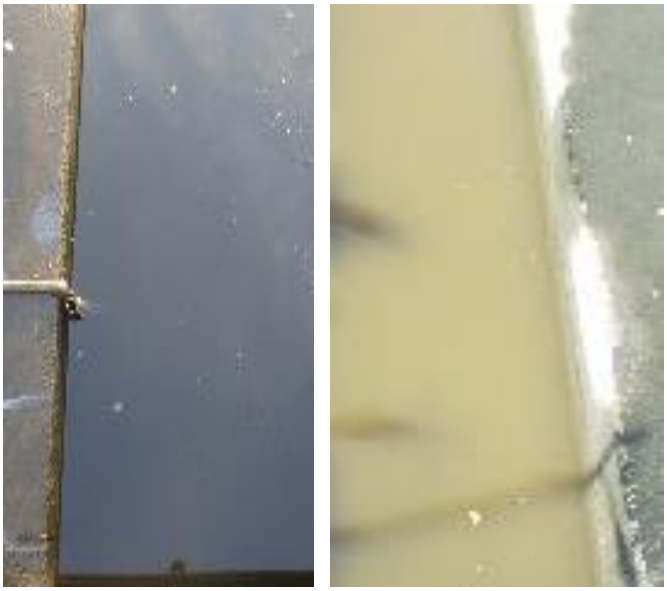


図 3-17　養源寺橋観測所における白濁化の状況

3-3　合流式下水道流域からの O-SS 流出量の算出

3-3-1　下水流出モデルの構築

(1)　下水流出モデルの概要

下水道流域からの流出モデルを取り扱った「流出解析モデル利活用マニュアル」には，Works ICS[12)]，MIKE URBAN[13)]，xpswmm[14)]が一般的なソフトウェアとして挙げられている．表 3-4 に示すように，流出解析モデルでは，降雨損失モデル，表面流出モデル，管内水理モデル，汚濁負荷量モデルの 4 つの要素に分かれ，それぞれの解析データの受け渡しによって，進められる．

以下に各要素の概要を述べる．

降雨損失モデル：地表面貯留，浸透，蒸発散による降雨の損失をモデル化し，降雨量から地表面に流出する有効降雨を算定する．

表面流出モデル：有効降雨が地表面を流れる経過を運動力学的に求め，ノードへの流入量を算定する．

管内水理モデル：地表面流出モデルより算出された各ノードでのハイドログラフを用いて，質量および運動量保存則からなる「Saint-Venant 方程式」により管渠や河道等の流れを解析する．

汚濁負荷量モデル：地表面汚濁物の堆積量および流出負荷量の算定と管渠や河道等における水質の挙動を解析する．

表 3-4　流出解析モデルの機能概要

		InfoWorks ICS	MIKE URBAN	xpswmm
基本機能	1. 降雨損失モデル	・降雨損失モデル ・流出係数モデル	・降雨損失モデル ・流出係数モデル	・降雨損失モデル
	2. 表面流出モデル	・二重線形貯留法 ・非線形貯留法	・時間面積法 ・非線形貯留法	・非線形貯留法
	3. 管内水理モデルと解法	・Saint-Venant式 プライスマン4点法 陰解法	・Saint-Venant式 アボット6点法 陰解法 ・拡散波モデル ・運動波モデル	・Saint-Venant式 ガウスーザイデル法 陰解法 ・運動波モデル ・非線形貯留法
	4. 汚濁負荷量モデル	・地表面堆積流出モデル ・堆積物輸送モデル ・水質7項目 ＋ユーザー定義項目	・地表面堆積流出モデル ・堆積物輸送モデル ・水質7項目 ＋ユーザー定義項目	・地表面堆積流出モデル ・堆積物輸送モデル ・水質：任意項目
追加機能	5. 氾濫解析モデル	・二次元不定流モデル (InfoWorks CS＋SULIS)	・二次元不定流モデル (MIKE Urban Flood)	・二次元不定流モデル (XP-Flood:2D)
	6. その他の機能	・リアルタイムコントロール ・河川統合解析 ・GIS	・リアルタイムコントロール ・河川統合解析 ・GIS	・リアルタイムコントロール ・河川統合解析 ・GIS

□：本検討で用いるモデル　　出典:「流出解析モデル利活用マニュアル－2017 年 3 月－」

これらの 3 つの解析モデルにおいては，基本的な解析機能，入力項目，出力結果が概ね同等であるとされている．実際，田中ら[16)]が上記 3 モデルを 5ha の 1 排水区に適用した結果では，それぞれのモデルパラメータを調整することにより，流出量および O-SS の時間波形を概ね再現できている．

なお，これらの下水道管路網を詳細にモデル化する手法はモデル構築が比較的労力が大きい．しかしながら簡略化したモデルと比較して下記の利点があり，できるだけ上記のようなモデル化を実施することが望ましい．

- 下水道網を無視して簡略化すると，それぞれの下流端でキャリブレーションを実施する必要があり，データ取得や解析に多大な労力が発生する．
- 対策の効果についても，簡略化したモデルにどの様に取り込むのかは課題があり，上記のモデルのように詳細にモデル化しておいた方が明確である．

(2) 下水流出モデルの構築

分布型流出解析モデル「MIKE URBAN」は，流入ハイドログラフを算定する「地表面流出モデル」と，管内の水理現象を計算する「管内水理モデル」の 2 つから構成されている（図 3-18 参照）.

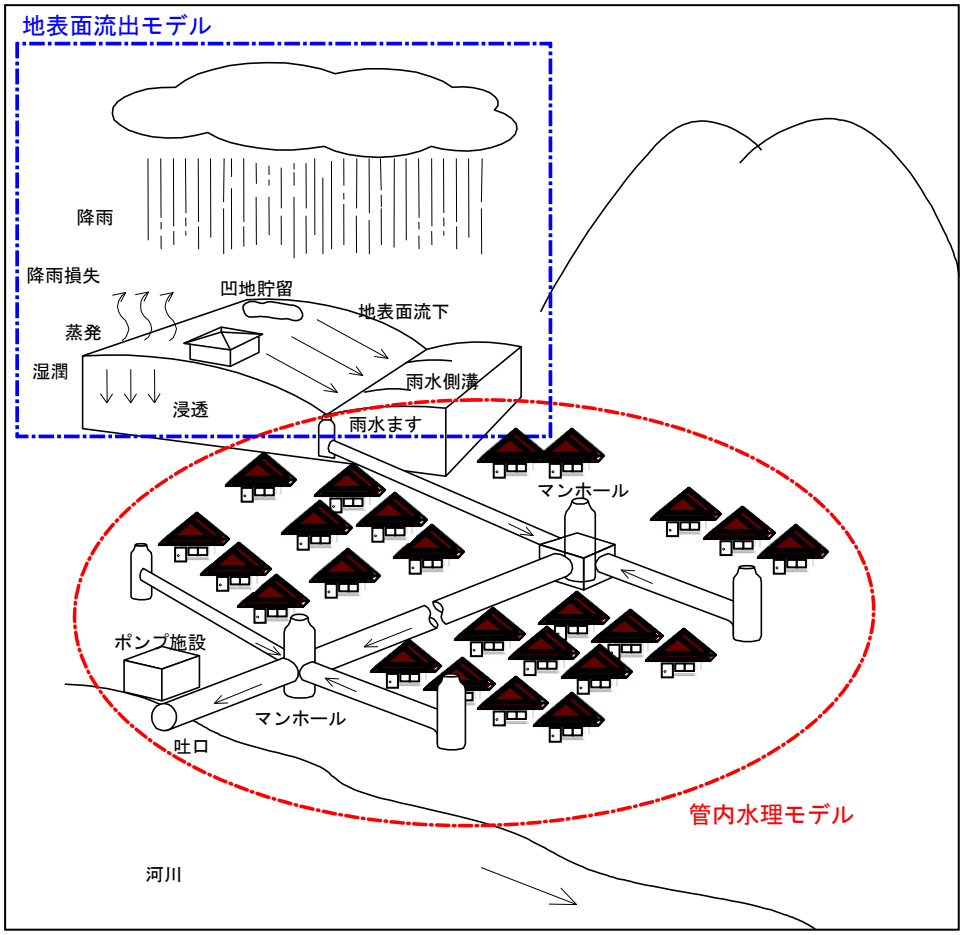


図 3-18　雨水流出モデルの概念図

1) 表面流出モデル

地表面流出モデルとしては，都市域（下水道区域）における流出計算手法として実績の多い，「時間／面積法（タイムエリア法）」を採用した．本手法は，降雨強度に関係なく降雨量と雨水流出量との間に一定の比例関係を与えるモデルであり，流域形状，流入時間を考慮した「時間／面積曲線」により雨水流出量を算定している.

また，地表面流出モデルは，降雨損失を考慮して，実降雨から有効降雨を算定する「有効降雨モデル」と算定した有効降雨を流入マンホール地点でのハイドログラフに変換する「地表面流下モデル」の 2 つで構成されている.

a) **有効降雨モデル**

有効降雨モデルでは, まず実降雨から設定した初期損失（凹地貯留）分を差し引き, 浸透損失を考慮した不浸透面積率を乗じて有効降雨を算定している．すなわち，初期損失後の実降雨と有効降雨との間に，次式の比例関係を与える．

$$R_{eff}(t) = f \cdot R(t) \qquad (3\text{-}1)$$

ここで $R_{eff}(t)$：有効降雨(mm/hour)

$R(t)$：初期損失後の実降雨(mm/hour)

f：雨水流出率※(-)

※総降雨量に対する雨水総流出量の割合

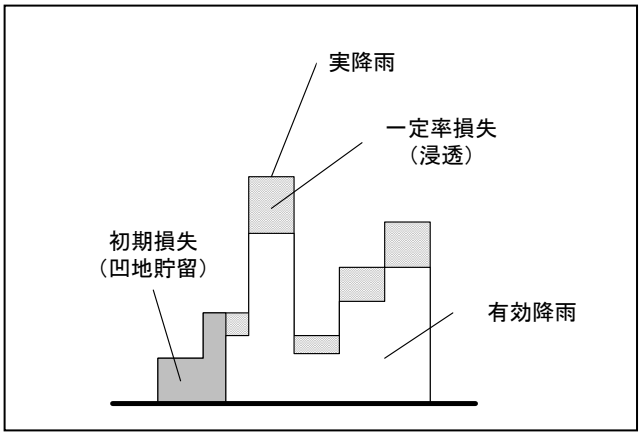


図 3-19　有効降雨算定の概念図

b) **地表面流下モデル**

地表面流下モデルでは，先に算定された有効降雨に対し，流域形状，流入時間を考慮した「時間／面積曲線」により流入ハイドロを算定している．流域は，流入マンホールを中心点とする多くのセルに分割される．なお，セル数は次式から算定している．

$$n = \frac{Tc}{\Delta t} \qquad (3\text{-}2)$$

T_c ：流入時間（雨水が流域の最上流地点からマンホールに流入する時間）

Δt ：シミュレーションの計算時間間隔

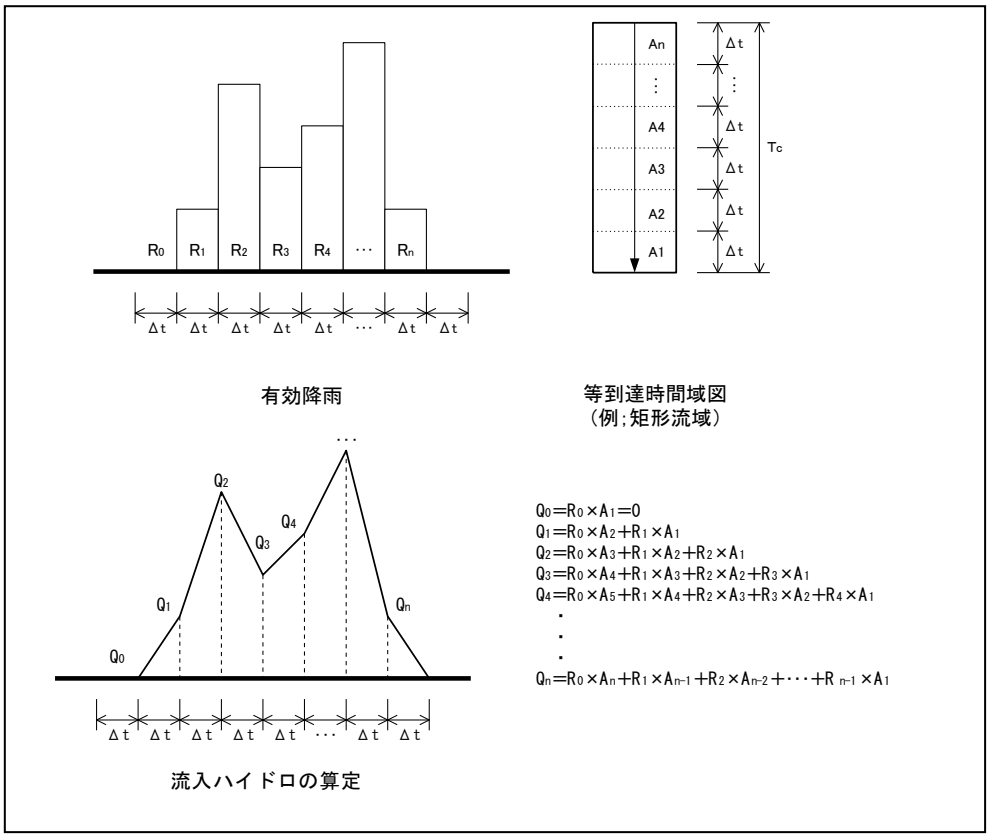


図 3-20　流入ハイドロ算定の概念図

なお，流入ハイドロ算定の一般式は次式のとおりである．

$$Q(t) = \sum_{i=0}^{n} \{R(t_{i-1}) \times A_{n-i+1}\}$$

ここで，$Q(t)$　：流入ハイドロ
$R(t_{i-1})$　：(i-1)単位時間前の有効降雨
A_{n-i+1}　：下流側から(n-i+1)番目のセル面積
n　：セル数

2) 管内水理モデル

管内水理モデルとしては, 背水流れ, 圧力流れを連続かつ正確に計算できる「Dynamic wave 法」が採用されている.「Dynamic wave 法」は，修正 RRL 法では解析不可能な不定流計算を「サンブナン式」により，連続的に解析することが可能である.「サンブナン式」は，自由水面流（開水路流れ）において成り立つ式であるため，これを近似的に解く方法として，図 3-21 に示すようなプライスマン･スロット（Preissman Slot）を考慮することが特徴的である.

この方法は，下水管の頂部に仮想のスロット（溝）を設け，管内圧力を水位で与えることにより，連続的に解くことを可能としたものである．また，プライスマン･スロットが地表面よりも大きく飛び出すと正確な解析ができなくなるため，計算の中では，マンホール上に仮想の貯留池を持たすことにより水位の上昇を抑え，地表面に溢水した状況を再現している（図 3-22 参照）.

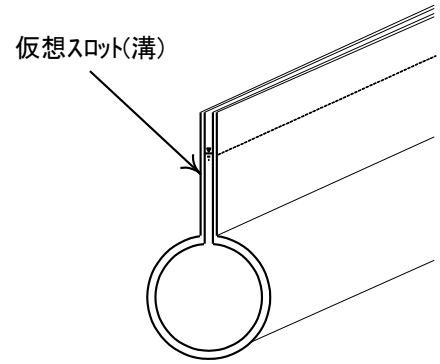


図 3-21　プライスマン･スロットの概念図

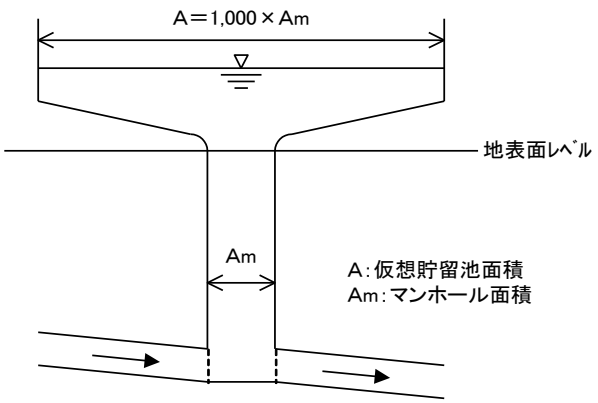


図 3-22　地上部モデル化の概念図

「Dynamic wave 法」においては，以下に示す「連続式」と「運動量保存式」を鉛直方向に積分した式（サンブナン式）を解くことで解を求めるようになっている．なお，計算解法は，差分形式を陰形差分法として，6 点 abbott 法[18]を用いている．

- 管路流計算には，連続式と，加速度項，慣性力，圧力，重力，底面摩擦力を考慮した運動量方程式（Saint-Venant 方程式）を用いた．
- 管路の底面摩擦力は Manning の式より粗度係数 n を用いて表してある．
- 数値計算は，差分法の 6 点 abbott 法[18]を用いて計算している．

これらの管路水理モデルの詳細については，MIKE URBAN の Technical Manual[25]を参考にされたい．

「連続式」（質量保存）

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

「運動量保存式」（Saint-Venant 方程式） (3-4)

$$\underbrace{\frac{\partial Q}{\partial t}}_{\text{非定常勾配（加速度項）}}+\underbrace{\frac{\partial\left(\alpha\frac{Q^2}{A}\right)}{\partial x}}_{\text{速度水頭勾配（慣性項）}}+\underbrace{g\cdot A\frac{\partial y}{\partial x}}_{\text{水深勾配（圧力項）}}=\underbrace{g\cdot A(I_o-I_f)}_{\text{水路底面勾配（重力項）}\ \text{摩擦勾配（摩擦項）}}$$

Q：流量
A：流下断面
y：水深
g：重力加速度
x：流下方向の距離
t：時間
α：速度分布係数
I_o：水路底面勾配
I_f：摩擦勾配

3) 流出解析モデルの構築

本検討に用いるモデルの構築にあたり，以下の項目についてモデル化を行った.

- 下水道管渠 及び 人孔
- 吐口
- 堰
- オリフィス
- 流域

a) 下水道管渠及び人孔

2015 年 10 月時点の SEMIS データ(下水道台帳情報システム)に基づき，以下の諸元をモデル化した.

表 3-5　モデル化する諸元

項目	諸元
人孔情報	座標，人孔深，地盤高等
管渠情報	断面形状，管底高，管種，接続人孔番号，集水面積等

「流出解析モデル利活用マニュアル[15)]」((以下,「利活用マニュアル」とする.）によると，シミュレーションの目的に応じて適切なモデル化を行う必要があり，枝線部分の浸水状況等を把握したい場合や，シミュレーション結果から貯留施設の規模を定める場合には，懸案地点における流達時間の影響を考慮するために枝線管渠までモデル化することが望ましいが，対策施設の概略規模の検討や河川への放流量の検討では，主要な管渠のみのモデル化で対応できる場合もあるとされている.

本検討では呑川の水質浄化を目的とし，河川への放流量及び汚濁負荷量を算定することを目的としており，以下の方針でモデル化を行った．モデルの簡素化を行うにあたっては，設定したモデルの諸元値等の妥当性を次項以降のキャリブレーションで確認する．

- モデル化する下水道管渠の最小管径は 600mm を基本とし，遮集管を除く管径 600mm 未満の管渠は簡素化した．
- 人孔については，勾配や断面形状が変化しない中間人孔については省略した．

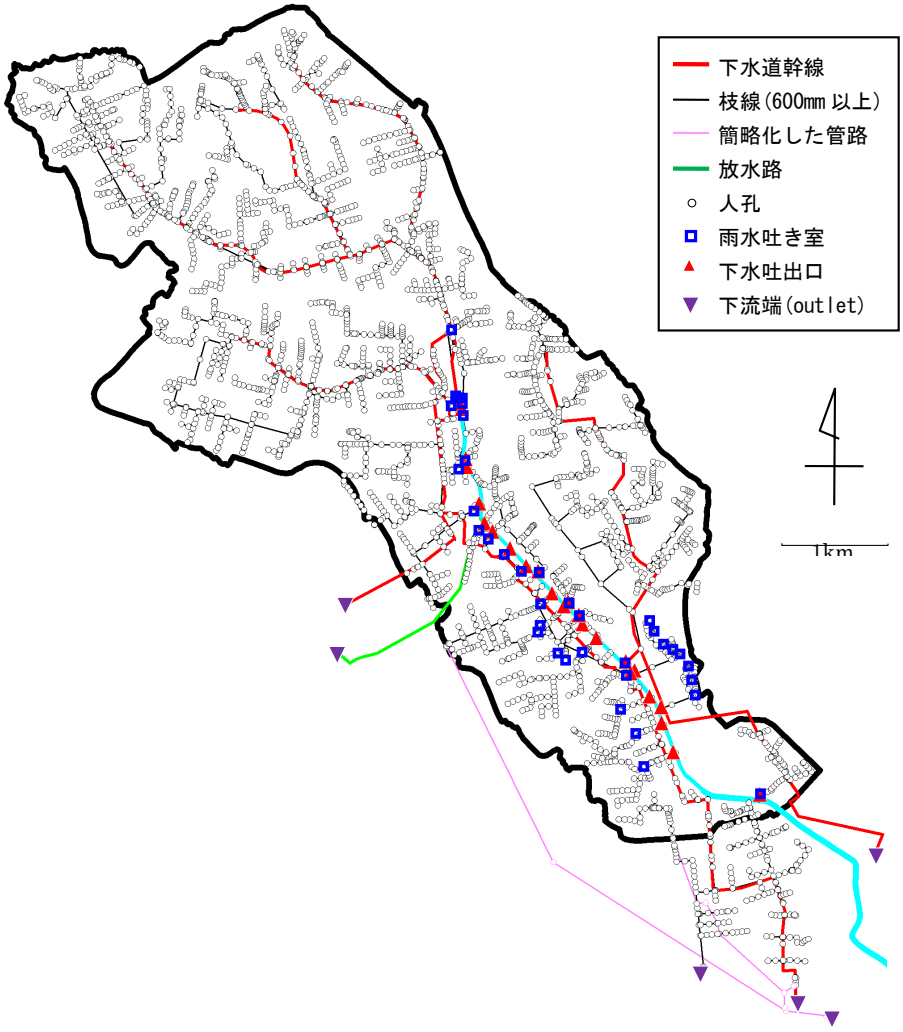


図 3-23　下水道モデル平面図

表 3-6　本検討でモデル化した管きょ数，人孔数

	単位	本検討 設定値	設定根拠
管きょ数	個	3,588	下水道データベース(SEMIS)より集計（管計 600mm 未満を省略（遮集管を除く）
人孔（マンホール）数	個	3,593	下水道データベース(SEMIS)より集計（管計 600mm 未満を省略（遮集管を除く）

b)　汚濁負荷量モデル

汚濁負荷量モデルでは，表面流出モデルと同時に地表面の汚濁負荷量流出解析を，管内水理モデルと同時に管渠内汚濁負荷量輸送解析を行なっている．図 3-24 に汚濁負荷量モデルの概念図を示す．流域から下水道管渠内に流入する汚濁物としては，下記の 4 つが考えられる．

① 地表面（不浸透域（道路面））での汚濁物堆積・流出

② 雨水ますでの汚濁物質堆積・流出

③ 汚水ますでの汚濁物質堆積・流出

④ 無降雨時汚濁量

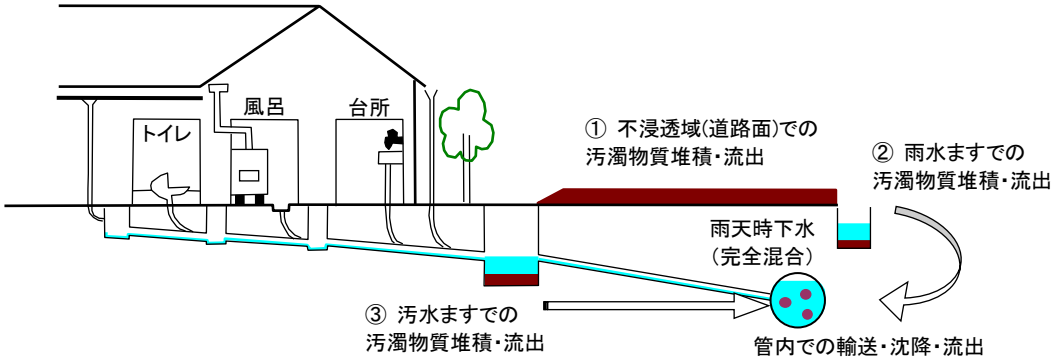


図 3-24　汚濁負荷量モデルの概念図

ア　地表面への汚濁物堆積

①の地表面での汚濁物堆積については，MIKE URBAN の機能を使用して，汚濁負荷量が一定で増えていくこととして取り扱った．また，上限値を設け，一定値以上にはならないように想定している．

$$M < M_{\max} \text{ のとき，} \frac{dM}{dt} = A_c \qquad (3\text{-}5\ (1))$$

$$M \geq M_{\max} \text{ のとき，} \frac{dM}{dt} = 0 \qquad (3\text{-}5\ (2))$$

ここに，M：O-SS の堆積量 (kg)

M_{max}：O-SS の最大堆積量 (kg)

A_c：O-SS の日蓄積量 (kg/日)

t：時間 (日)

出典）MOUSE TRAP Technical Reference Suface Runoff Quality Module [24)]

An example of the two build up formulations is shown in Figure 1.

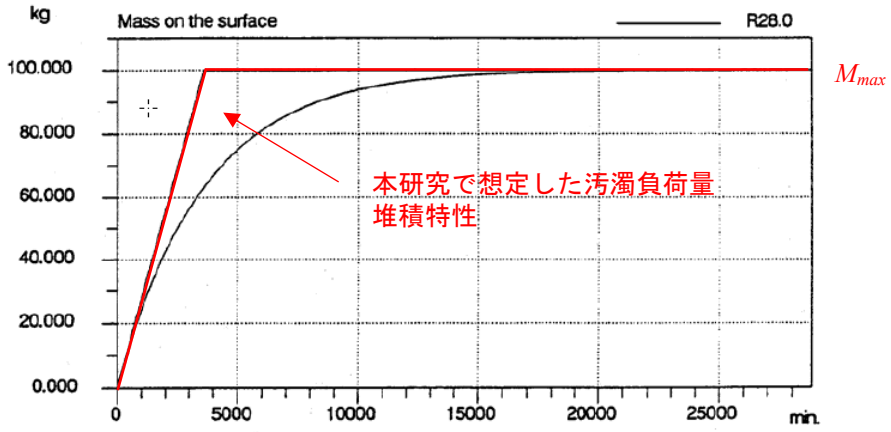


Figure 1 *The linear and the exponential build up function. Maximum value = 100 kg and Build up rate = 40 kg/ha/day.*

図 3-25　汚濁負荷量の堆積特性

（MOUSE TRAP Technical Reference [24]に加筆）

イ　地表面の汚濁負荷量流出解析

地表面の汚濁負荷量流出解析では，晴天時に地表面に堆積する汚濁負荷量の算定と堆積した汚濁負荷量が雨天時に下水道管渠に流入する掃流の算定を行っている．

降雨によって地表面から流出する汚濁負荷量の算定方法は，流出解析モデルにより異なるが，概ね降雨強度と，地表面における掃流力の関数となっている．

$$V_{sr} = D_r \left(\frac{i_r}{i_d} \right)^{\exp} LW(1-\varepsilon)A_s \qquad (3\text{-}6)$$

V_{sr}：O-SS の流出量 (m^3/h)

D_r：降雨による O-SS の剥離係数(m/h)

i_r：雨量強度 (mm/h)

i_d：雨量強度定数 (=25.4mm/h)

exp：雨量強度に関わる定数(初期値　2)

L：集水域の長さ(m)

W：集水域の幅(m)

ε ：O-SS の空隙率(-)

A_s：集水域の O-SS が流出する面積率(m^2)

出典）MOUSE TRAP Technical Reference Suface Runoff Quality Module [24]

ウ　雨水ます・汚水ます内の汚濁物質の堆積と流出解析

MIKE URBAN の流出解析モデルでは，汚濁物の供給源として無降雨時汚水および地表面の堆積汚濁物のほか，雨水ますからも供給があるとして，雨水ますをモデル化している．しかし，MIKE URBAN を呑川流域の合流式下水道にそのまま適用しようとすると，以下の 2 つの問題が生じる．

(1) 各家庭の汚水マスに堆積した SS が雨天時に流出する量をカウントできない．

(2) 流域スケールが大きいために，雨水ますと汚水ます（両者を合せて“SS 蓄積ます”と称した.）の数量が膨大で計算負荷が大きくなり，また各マスの設置位置や形状に関するデータも存在しない．

そこで本研究では，各人孔（マンホール）位置に仮想的な SS 蓄積ますが存在するものし，以下の雨水ますに関する計算方法を利用して，各人孔の小流域からの SS 流出をまとめて取り扱っている．

SS 蓄積ますについては，無降雨時における汚濁物質の堆積と，降雨時に流出する汚濁物質を表現している．SS 蓄積ますの模式図は，図 3-26 に示すとおりである．

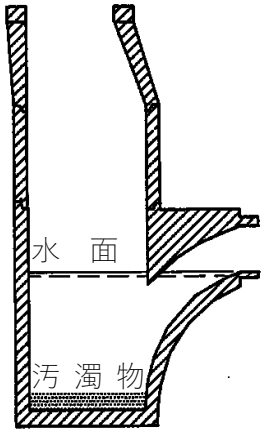


図 3-26　SS 蓄積ますの模式図

汚濁物資の濃度は，最大濃度の閾値を持った線形堆積関数によって堆積する．洪水時では全沈殿物は SS 蓄積ますを直接通過するものとし，SS 蓄積ます内の水と流入水を混合させた単純混合モデルを使用している．

$$C_{out} = \frac{q_i \times C_i \times dt + V_{gully} \times C_{gully}}{V_{gully} + q_i \times dt} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3\text{-}7)$$

ここで，C_i　：流入水中の汚濁物質濃度（mg/l）

C_{gully}　：SS 蓄積ます内の汚濁物質濃度（mg/l）

C_{out}　：流出水中の汚濁物質濃度（mg/l）

dt　：時間ステップ（s）

q_i　：流出量（m^3/s）

V_{gully}　：SS 蓄積ます容積（m^3）

エ　管渠内汚濁負荷量輸送解析

管渠内汚濁物質の輸送の基本的な解析理論は，下水管渠内での堆積・洗堀に定せん断層近似のせん断流モデルを適用した線形安定解析である Engelund-Hansen モデル [25] を用いている．

c)　水理構造物（堰，オリフィス等）

モデル化した分水人孔を図 3-27 に示す．人孔構造図に基づきモデル化を行った．

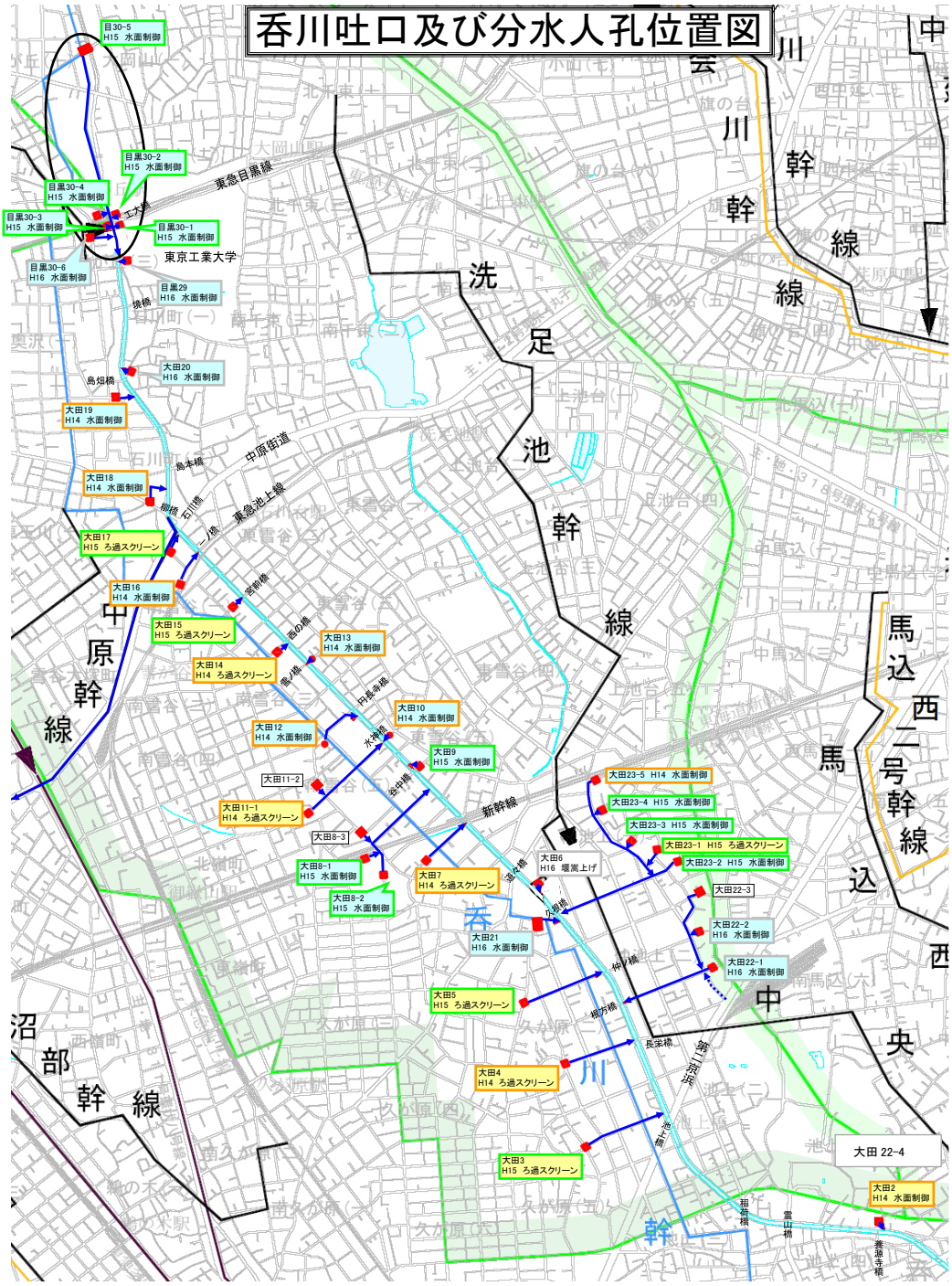
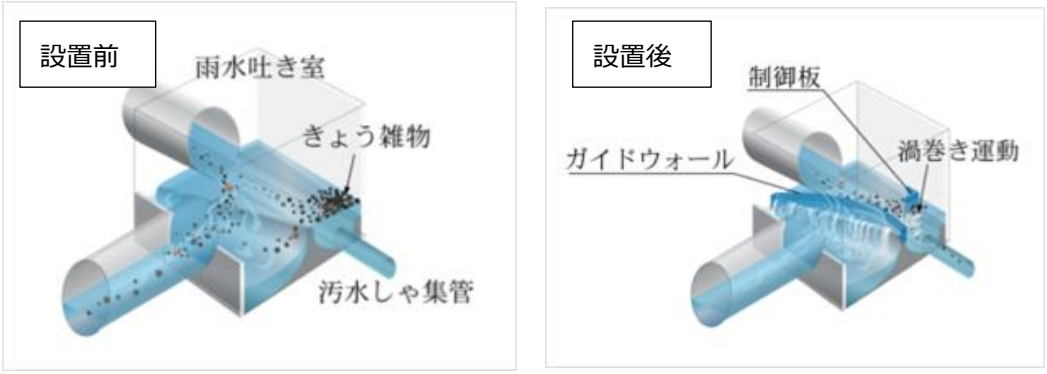


図 3-27　吐口及び分水人孔の位置図

また，水面制御装置は雨水吐の汚水管流出管渠入口に，制御板を設置するとともに，越流堰の前面にガイドウォールを設置することで，渦巻き流を誘発させ，夾雑物を下流側流出管渠へ流下するという合流改善対策による夾雑物の除去を目的としたものである．ガイドウォールが設置されている場合，ガイドウォールの天端高さをモデルの堰高とし，ガイドウォールとコンクリート堰の隙間をオリフィスとして設定した．オリフィスの底高はコンクリート堰の天端高さと同じに設定した．水面制御装置の概要を図 3-28 に，モデル化のイメージを図 3-29 に示す．



出典：「合流式下水道の改善における夾雑物対策を対象とした水面制御装置技術資料　日本下水道新技術機構」

図 3-28　水面制御装置の概要

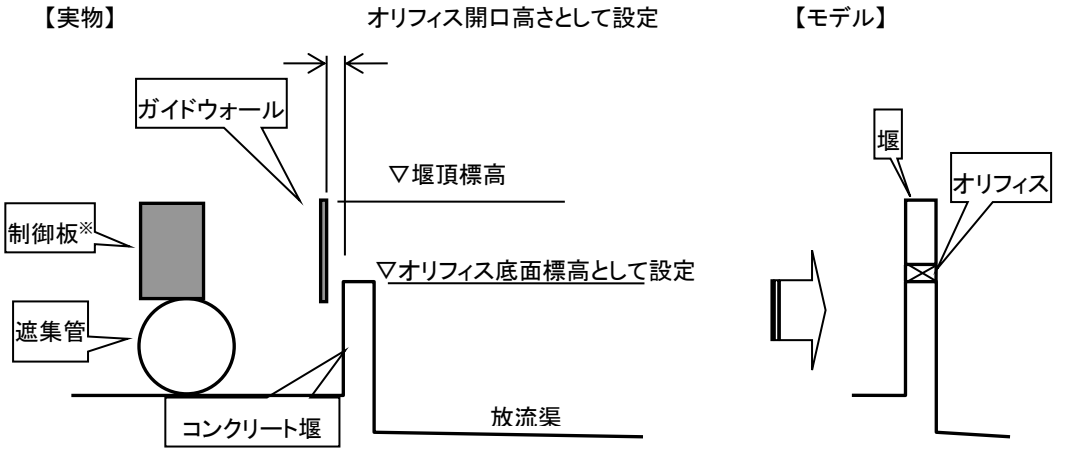


図 3-29　水面制御装置のモデル化イメージ

表 3-7　本研究でモデル化したオリフィス数

	単位	本検討 設定値	設定根拠
オリフィス数	個	38	下水道データベース(SEMIS)より集計 （管計 600mm 未満を省略（遮集管を除く）

3-3-2　下水管渠内地点におけるキャリブレーション

(1)　キャリブレーション方法

MIKE URBAN は表 3-8 に示すパラメータを含んでおり，それらは対象地域の土地利用，地盤傾斜，道路・側溝の形状などに依存すると考えられる．しかし流域全体にわたって地表状況をもとに数値分布を指定するのは困難であることから，観測データに基づき表中(3)欄に示す数値を参考にして，観測地点①，②の観測結果に合致するように値を設定した．このうち雨水流出および管路に関する 4 項目の範囲は下水道計画のための参考として文献[15]に示されているものであり, SS に関する 4 項目は MIKE URBAN（DHI, 2008b）で初期に設定されている値である. 後者は MIKE URBAN（旧名 MOUSE）のパラメータに関するヨーロッパにおける調査研究（例えば Artina *et al.*[19], Thorndahl[20], Thorndahl *et al.*[21]）に基づき決定されていると推測されるがマニュアルに明記はされていない．ヨーロッパと日本の都市構造はかなり異なっているので，本研究ではそれらを参考値として最終的には呑川観測データに合致するように調整した．なお，ここでは，3-3-1　で述べたように雨水ますだけでなく汚水ますからの流出についてもまとめて取り扱っている．

流量に関するパラメータは，試行計算により水位波形の立ち上がりとピークの値および時刻を合わせるように検討した. 具体的な検証期間を図 3-30 の上段に示している．地点②の排水区は地点①の排水区を包含するので，まず地点①について調整し，続いて①と②の間の排水区に対して地点②の観測データに合致するように調整した．結果は欄(4)に示されている．初期損失 R_I は地点①と②で異なる値となった．この原因は明確でないが，上流側に比較して下流側の集水区の住宅が密集しており，庭や公園等が少なく，雨水の浸透や窪地貯留効果が少ないためではないかと考えられた．

地表 SS の流出に関するパラメータについては，調査地点①および②についてそれぞれ約 100 ケースの試行計算を行い，吐出口での採水分析データの立ち上がりとピーク

の値および時刻を概ね表現した組み合わせを最終値とした．地表 SS 日堆積率 A_c と SS 蓄積ますの初期濃度 $C_{gully\text{-}ini}$，日増加率 $C_{gully\text{-}buildup}$ や最大濃度 $C_{gully\text{-}max}$ について①と②で差がみられた．これらの原因も明確ではないが，上流側は東名高速に繋がる首都高や国道などの交通量の多い幹線道路が多く，これらの幹線道路は SS の生産量が多い [22]ため，地表 SS 日堆積率 A_c が大きくなっていると推測される．一方，SS 蓄積ますのパラメータのうち日増加率 $C_{gully\text{-}buildup}$ と最大濃度 $C_{gully\text{-}max}$ が下流側で大きいのは，下流側の流域は住宅の密集度が高く，人口密度も多いため，家庭排水など SS の生産量が多いことが要因として考えられる．

以上のパラメータ設定は，今回の観測結果に基づく経験的なものである． MIKE URBAN のモデル構造は，現実の状況をかなり簡略化しており，これにより広い領域の下水道流出の非定常計算が可能となる反面，パラメータ値と集水区域の物理構造の対応は明確さを欠く結果になっている．したがって上記のパラメータ値を他の流域に適用できるという保証はない．しかし下水道改善事業では，対象流域で得られた観測データをもとにモデルキャリブレーションすることを前提として MIKE URBAN のような市販モデルを用いており，本研究で行っているような作業の積み上げが実務的には重要であるといえる．

表 3-8　モデルパラメータの設定

(1) 項目			(2) 単位	(3) 一般値 (初期値)	(4) 設定値 調査地点	
					①	②
①雨水流出	流出率 f		－	0.05～1.0	0.76	
	初期損失 R_I		mm	0～6	4	1
	流入時間 t_r		min	5～10	7	
②管路	粗度係数 n		$m^{-1/3}s$	0.010～0.025	0.015	
③懸濁物質	地表	日堆積率 A_c	kg/ha/日	(50)	30	5
		最大堆積量 M_{max}	kg/ha	(500)	500	
		堆積物流出速度 D_r	m / hour	(0.001)	0.003	
	SS蓄積ます	単位面積あたり容量 V_L	L/ha	(2300)	1500	
		初期濃度 $C_{gully\text{-}ini}$	mg/L	－	100	0
		日増加率 $C_{gully\text{-}buildup}$	mg / L /日	－	50	100
		最大濃度 $C_{gully\text{-}max}$	mg / L	－	1200	1500

(2)　キャリブレーション結果

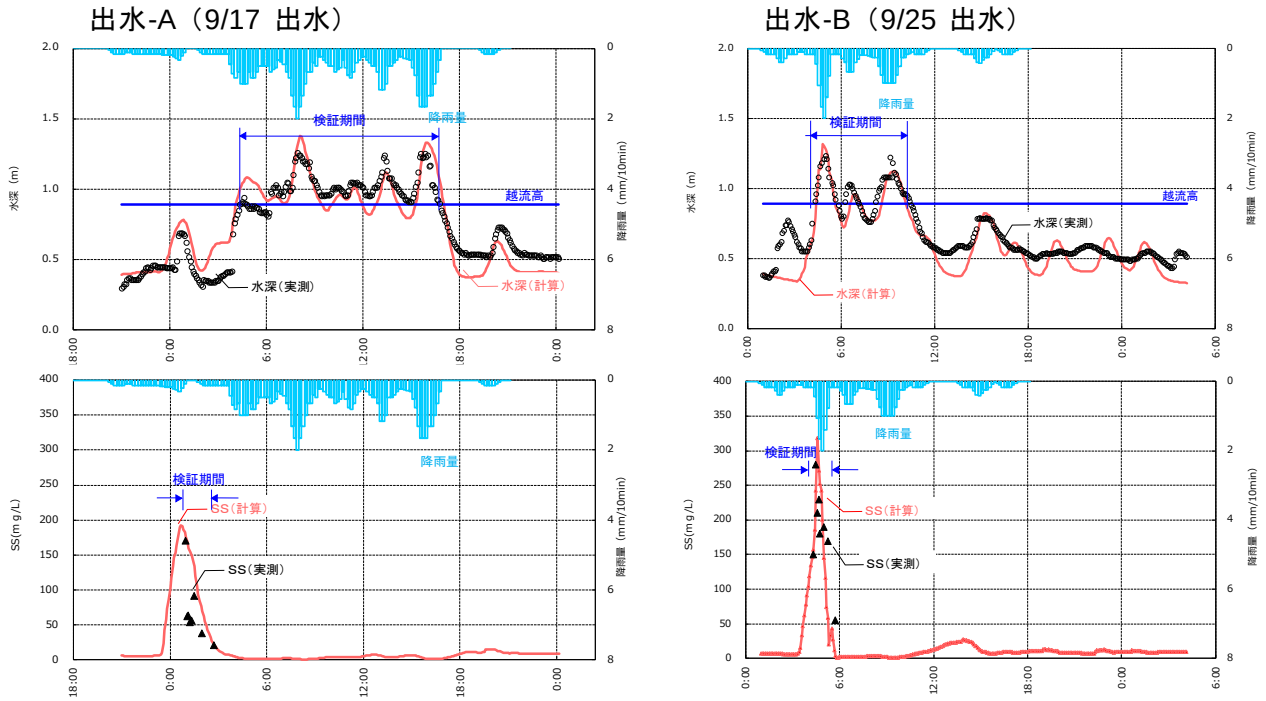


図 3-30(1) パラメータ調整結果（地点①）

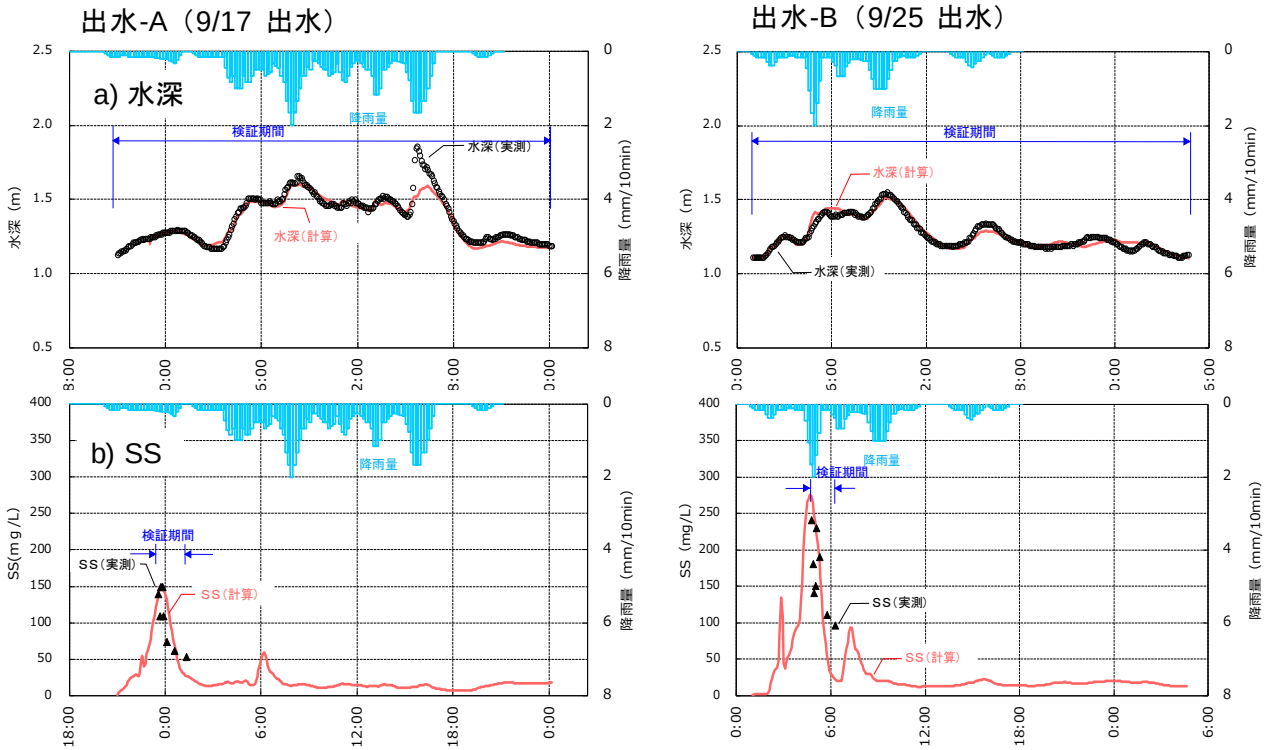


図 3-30(2) パラメータ調整結果（地点②）

3-3-3　感潮域上流端における検証

(1)　検証方法

1)　水位

池上地点（5.5 KP）には東京都が水位計を設置し 10 分ごとの値を記録している．観測地点の断面図を水位計測範囲とともに図 3-31 に示す．この水位計は高水観測用であり A.P. 1.9m 以下は計測できない．

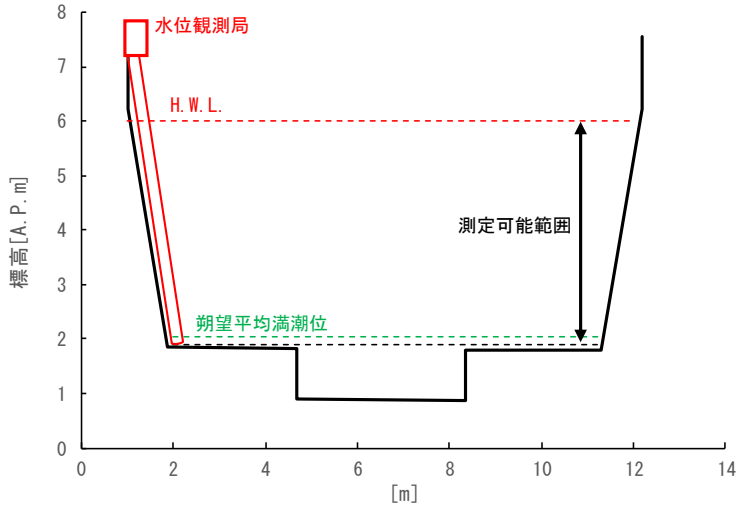


図 3-31　池上観測地点の横断図

2) SS

濁度と SS（O-SS と同意）の間には図 3-32 に示すように高い相関がみられたので，最小二乗法により求められた式(3-8)を用いて濁度を SS に変換し，実測値として使用した．

$$SS = 1.4C_{Turb} \tag{3-8}$$

ここに，SS：SS 濃度 (mg/L)，C_{Turb}：濁度 (NTU)である．

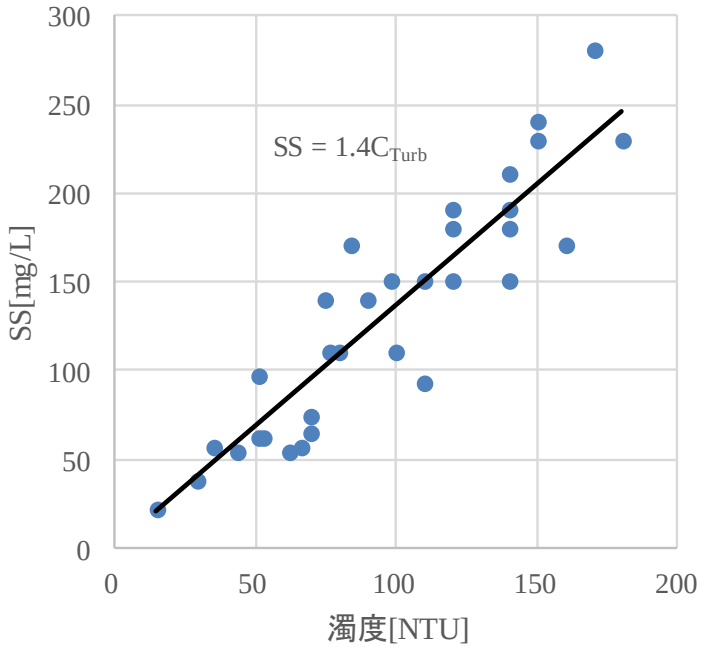


図 3-32 SS と濁度の相関

(2) 検証結果

1) 2015 年データによる検証

図 3-33 に出水-A，出水-B における計算結果（実線）と観測データ（○）を比較する．上段が池上地点水位，下段が養源寺橋地点 O-SS である．水位図には河口付近にある旭橋（0.5 KP）の水位とともに，計測最低水位（A. P. 1.9m）と河床高（A. P. 0.87m）も記入している．

池上地点は汽水域上流端に近いため，水位は潮汐の影響を大きく受けている．図 3-30 に示した地点①の越流状況から，出水-A では 6:00 頃から 16:00 頃までの長時間に 3 つのピークを持って河道への排水が継続したと考えられるが，その間に干潮があったので，水位の第 2 ピークはほとんど観測されなかった．また降雨が終了した 18:00 以降の水位の停滞は満潮によって生じたと考えられる．一方，出水-B において池上水位が計測下限の A. P. 1.9m を越えたのは 14: 00 以降の満潮時のみであった．数値シミュレーションは観測結果の傾向を概ね表現している．しかし，出水-A におけるピーク値は 10cm 程度高く，また出水-B における最初の 2 つのピーク値も A. P. 1. 9m 以上なので実際より 10cm 以上高く算定されていると考えられる．これらの原因として，今回設定した河道粗度はコンクリートでライニングされた水路の一般値（n = 0.01 ～ 0.02）の平均値をとって n = 0.015 としたが，実際には滑らかな部分が多く粗度係数が設定値よりも低いことや，前述したように 1 地点の工大橋雨量で代表させたため，降雨分布の影響が考慮できていないことが考えられる．

養源寺橋における出水-A での O-SS 値は 6:00 頃と 9:00 頃にピークが生じている．しかし図 3-30 に示した地点①および地点②の O-SS ピークは 0:00～1:00 に生じている．また，出水-B では 6:00 にピークが生じているが，図 3-30 では 4:00～5:00 であり 1 時間半の時差がある．一方，O-SS シミュレーションの結果は，どちらの出水でも観測結果を概ね再現している．

出水-A（9/17 出水）

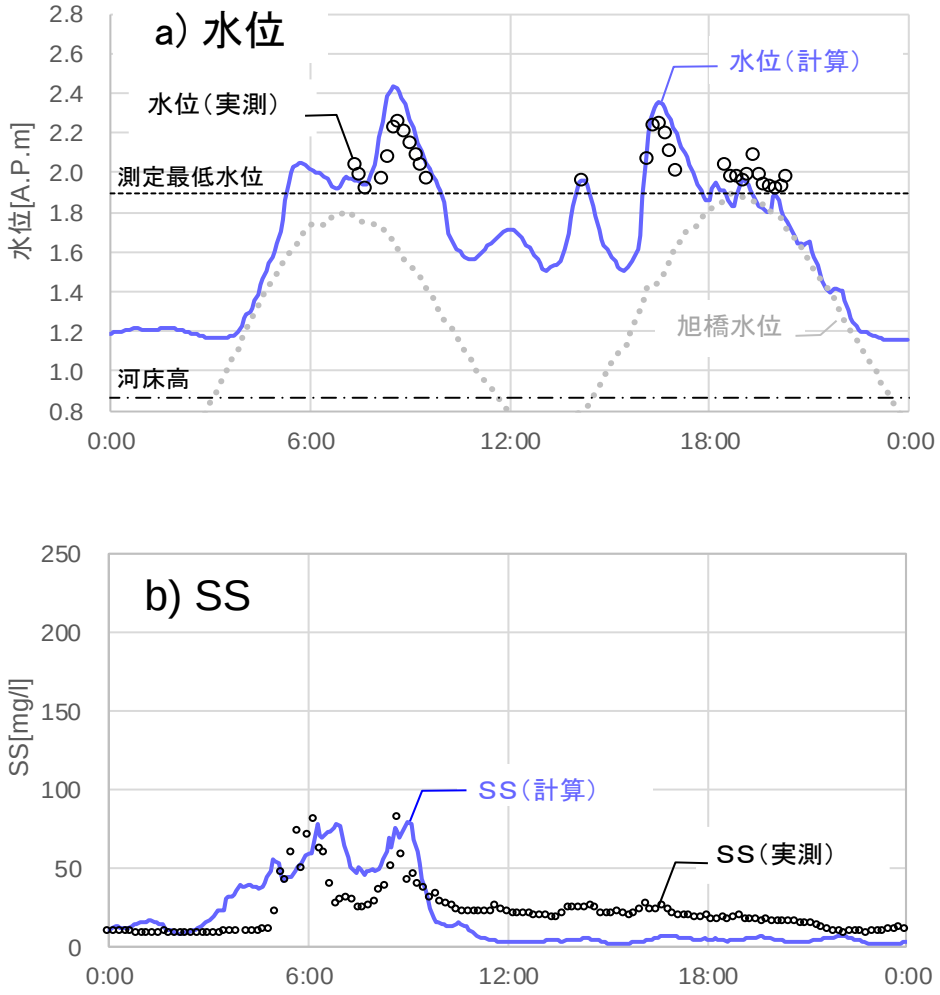


図 3-33　感潮域上流端におけるシミュレーションの結果

（2015/9/17 出水）

出水-B（9/25 出水）

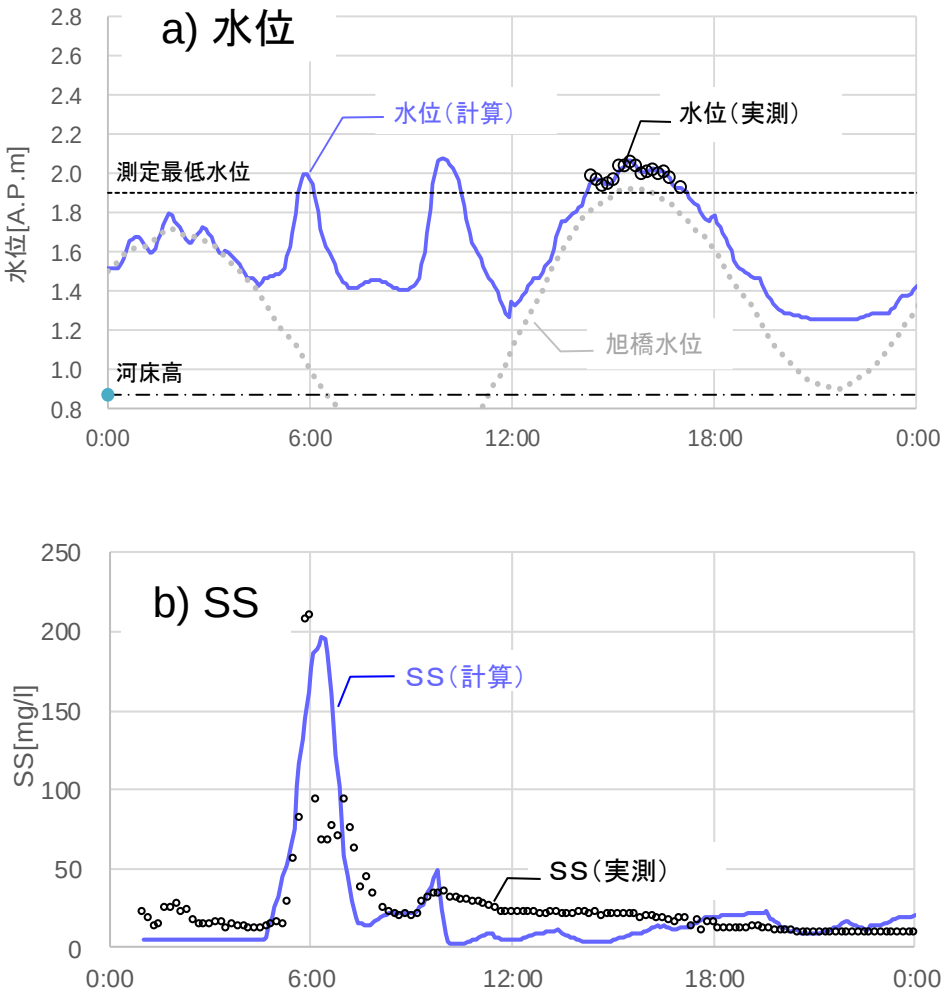
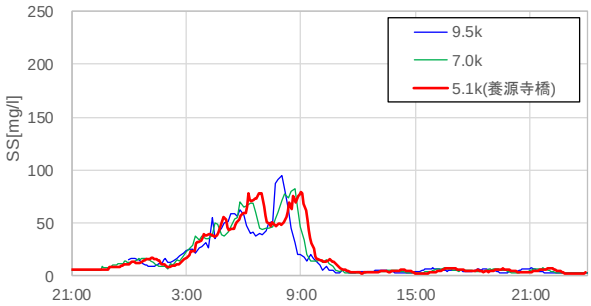


図 3-33　感潮域上流端におけるシミュレーションの結果

（2015/9/25 出水）

図 3-34(a), (b)は工大橋から養源寺橋の間の 3 断面における O-SS の時間波形を示している．出水-B においてはいずれの波形も一山であり，河道内ではほぼ一定速度（1m/s 程度）で下流に伝播し，その値は計算された流速値とほぼ同じであることから，前述の O-SS の時差は主に河道内の流下に要する時間と考えられる．一方，出水-A においては河道上流端付近で既に二山波形になり，それが河道内を伝播している．以上の検討から，呑川における出水時の O-SS 流出について以下の特徴が確認できる．地形勾配が比較的急な工大橋より上流の集水域では，降雨初期に発生した O-SS がそのまま下水管内を流下する．しかし河道に対して側方からの流入は，地形勾配が緩やかであるため，人孔から雨水吐き室に至る集水管渠および雨水吐き室から吐出口に至る排水管渠の中で一時的な堆積が生じ，その後の降雨量の増加とともに排出されるということが生じうる．このような O-SS の堆積は, 出水-A のように降雨の立ち上がりが緩やかな場合に発生するが, MIKE URBAN はその過程を概ね良好に再現していると考えられる．ただし現状の計算結果では出水-A の二山の谷部分での低下量が少なく，また観測においてみられる長い逓減部を表現できていない．したがって O-SS 堆積・流出過程についてはまだ改善の余地があると考えられる．

(a) 出水-A（2015/9/17 出水）



(b) 出水-B（2015/9/25 出水）

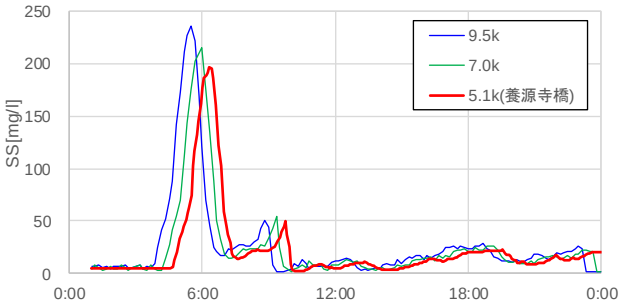


図 3-34　O-SS の移流

河道上流端近くで呑川に流入する九品仏幹線について，流域から下水道への O-SS 流入，雨水吐き室の堰の越流，呑川への吐出口の 3 段階での O-SS フラックス波形の変化を調べた（図 3-35 (a), (b)）．この結果から以下のことが推測される．降雨初期に発生して人孔に流入した時点では一山波形であったが，その時点では管内流量少なかったので約半分が雨水吐き室に至る前に堆積した．その後の降水量の増加により堆積土砂は掃流されて雨水吐き室の堰を越流したが，吐出口に至るカルバートの断面積が大きいために呑川に出る前に再び堆積し，その後の降水量の増加に伴い掃流されて呑川に排出された．その後は出水-B と同様に河川流によって養源寺橋まで波形が伝播した．

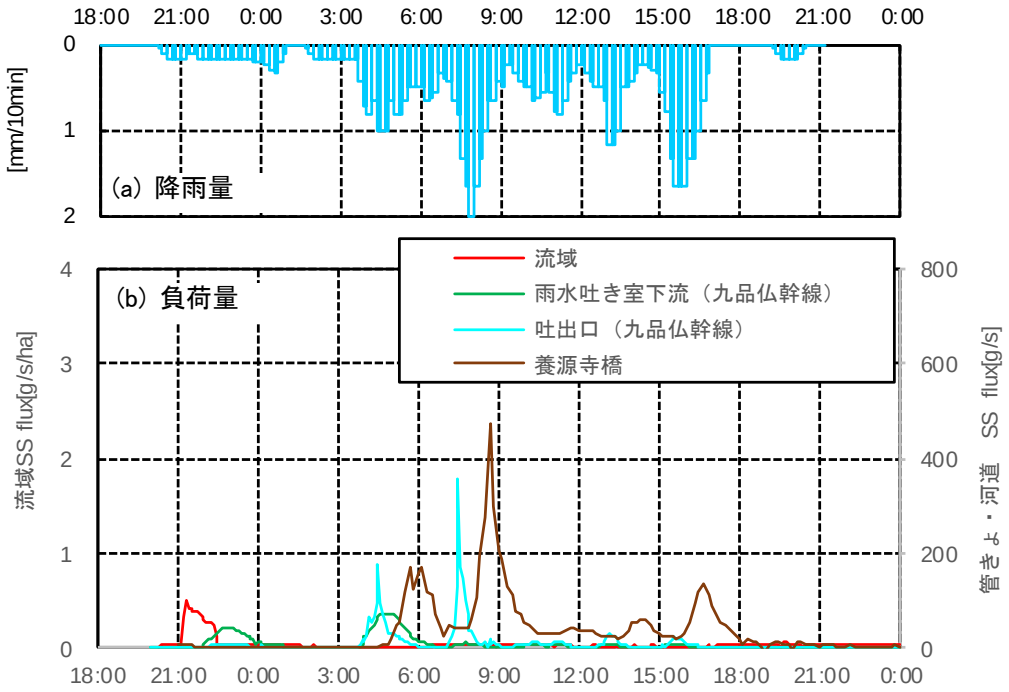


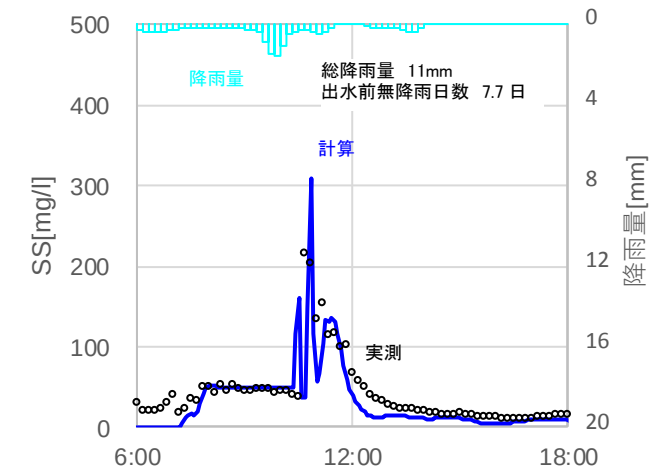
図 3-35　下水道システム内の O-SS フラックスの遅延

2) 2017 年データによる検証

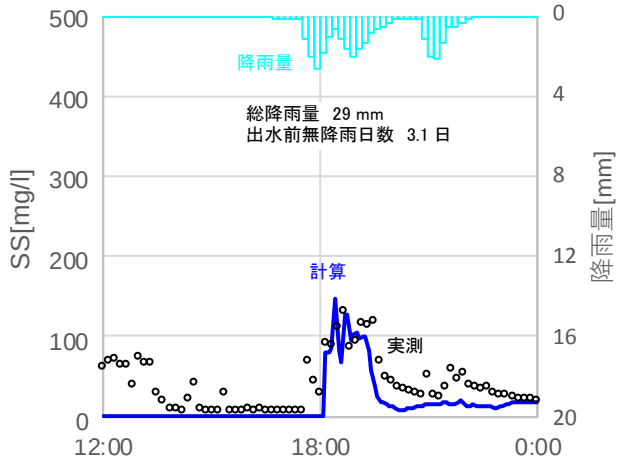
上記のシミュレーションは，前節で行ったパラメータ設定と同一の出水に対して行ったものである．モデルの適用性をさらに検証するために，2017 年夏季にも養源寺橋に濁度計を設置し同様の観測を実施した．観測期間は 4/12 から 10/11 の 6 か月間で，そのうち汽水域でスカムが大量発生した 7 月下旬から 8 月上旬に観測された 3 出水ついて解析を行った．計算の方法およびパラメータ値は前解析と同じであり，O-SS 時系列は式(1)を用いて濁度観測結果から求められた．図 3-36 に O-SS 時系列の比較を降雨データとともに示す．図中には出水前無降雨日数（各降雨開始時点までの無降雨期間（実測雨量 1mm 未満）の日数）と総降雨量も記入している．計算は各降雨開始時点から行っている．7 月 26 日出水では降雨量は少ないが，その前に無降雨日が続いていたために O-SS のピークは他の 2 出水よりも高くなったと考えられるが，モデルはその傾向を概ね良好に示している．一方ピーク後にも観測値は比較的高い値を示しているが，計算結果はそれを十分表現できていない．このことから，前節の末尾にも述べたように，水路網内の O-SS 堆積・流出過程について本モデルは改善の余地があると考えられる．ここで 7 月 26 日と 29 日は降雨前から濁度が高い値を示しているが，これは汽水域で白濁化した水が遡上していたことによる．

以上から，本モデルは多少の問題を残してはいるものの，集水域から呑川河道に至る高濃度 O-SS 流出の過程を概ね適切に表現できているものと考えられる．合流式下水道からの排水により呑川をはじめとする都市の中小河川汽水域で発生する水質問題を解決する手段の一つとして，O-SS を高濁度で含む排水を集水域内において効率的に貯留することが考えられているが[26]，その設計においては排水の時空間変動条件が必要とされ，従来の L-Q 式などの簡便法ではその定量的評価は原理的に不可能である．MIKE URBAN 等の下水管路網を近似的に表現するモデルは，そのような施設設計に対して有効なツールになり得ると考えられる．

2017/7/26 出水



2017/7/29 出水



2017/8/1 出水

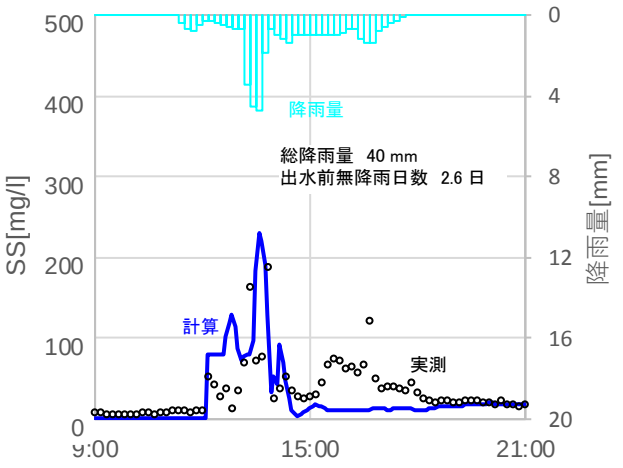


図 3-36　2017 年データを用いた O-SS 時間波形についての検証

3-4　結語

本研究では，合流式下水道が 100%を占める呑川をフィールドとして，現行下水道計画での流量算定に用いられている MIKE URBAN を用いて，出水時に汽水域上流端に達する O-SS の時間波形をシミュレーションするモデルを構築した. その結果, MIKE URBAN に含まれる O-SS 排出モジュールは，現地調査結果にもとづきパラメータを調節することにより，合流式下水道からのファーストフラッシュ波形を表現できるものと考えられた．また下水管渠内での堆積・洗堀に Engelund-Hansen モデルを用いた結果，河道における O-SS 波形ピークの縦断変化を良く再現できることがわかった．ただしピーク後の緩やかな O-SS 逓減を表現できないなどの問題は残された.

従来から指摘されているように，流域からの高濃度 O-SS の排出は降雨の初期に集中している．したがって，河道へ流出する前段階で初期流出成分をカットする吐出口前貯留池が中小都市河川下流部汽水域の水質問題軽減の有効な対策と考えられているが，集水管路および排水管路内での堆積・流出を考慮して貯留地の設計を行う必要がある．L-Q 式のような従来の簡易なモデルを施設設計に用いることは原理的に不可能であるが，下水管路網の O-SS 流下過程を表現する MIKE URBAN は施設設計ツールとしてのポテンシャルを有していると考えられる.

【参考文献】

1) A. Mailhot，G. Talbot，B. Lavallée：Relationships between rainfall and Combined Sewer Overflow (CSO) occurrence，Journal of Hydrology Volume 523, pp.602-609，2015. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.01.063

2) V. Puig，G. Cembrano，J. Romera，J. Quevedo，B. Aznar，G. Ramón，J. Cabot，Philip BB，Wayne CH： Predictive optimal control of sewer networks using CORAL tool: application to Riera Blanca catchment in Barcelona，Water Science & Technology 60 (4), pp.869-878.，2009.， DOI: 10.2166/wst.2009.424

3) Claudine Fortier，Alain Mailhot：Climate Change Impact on Combined Sewer Overflows, Journal of Water Resources Planning and Management Volume 141 Issue 5，2015. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000468

4) 草場 大作, 竹谷 究, 藤田 昌一, 姫野 修司, 小松 俊哉:合流式下水道越流水の長期観測と流出解析による汚濁負荷の定量的評価，水環境学会誌 33 巻 (2010) 5 号，2010.， DOI: 10.2965/jswe.33.41

5) 和田 安彦, 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 62 巻 (2006) 1 号，2006. DOI: 10.2208/jscejg.62.201

6) Philip BB, Wayne CH.：Hydrology and Floodplain Analysis, Addison-wesley Publishing Company：pp.76-77.，1988.

7) 高崎忠勝・河村明・天口英雄： 合流式下水道の流出特性を考慮した都市洪水貯留関数モデルの構築. 水文・水資源学会誌 21(3):228-241, 2008. DOI: 10.3178/jjshwr.21.228

8) 山口高志・松原重昭・山守隆:都市における降雨流出調査，第2報-修正RRL法による流出推定-，土木技術資料 14(11)，34-39，1972.

9) 古米弘明：都市域の雨天時汚濁負荷流出解析の現状と課題，水環境学会誌 25 (9)：524-528，2002.

10) 和田安彦・三浦浩之：分流式下水道の雨水流出に伴う汚濁負荷流出モデルとその適用，土木学会論文集 369，287-293，1986．DOI: 10.2208/jscej.1986.369_287

11) 渡辺政弘・永吉光一・右近雄大：土研モデルとSWMMを組み合わせた下水道流域の汚濁負荷流出モデル，水工学論文集 42，199-204，1998．DOI: 10.2208/prohe.42.199

12) innovyze社. 2017a. Info Works ICM, http://www.innovyze.com/products/infoworks_icm/.（参照：2017/8/7）.

13) DHI. 2017. MIKE URBAN
http://mikepoweredbydhi.com/products/mike-urban.（参照：2017/8/7）.
14) innovyze社. 2017b. xpswmm,
http://innovyze.com/products/xpswmm/.（参照：2017/8/7）.
15) 公益財団法人 日本下水道新技術機構 : 流出解析モデル利活用マニュアル（雨水対策における流出解析モデルの運用手引き），2017.
16) 田中修司・榊原隆・前田正博・千葉恭人・百崎和博・木内悟 下水道新技術研究所年報〔1/2巻〕，pp.73-77，1996.
17) 松島修：合流式下水道の改善における夾雑物対策を対象とした水面制御装置技術資料. 月刊下水道 33(2)，pp.76-80，2008.
18) Abbott, M.B.: Computational Hydraulics, Elements of the Theory of Free Surface Flows, Pitman. 1979.
19) Artina S, Bolognesi A, Liserra T, Maglionico M. 2007. Simulation of a storm sewer network in industrial area: comparison between models calibrated through experimental data. Environmental Modelling & Software 22: pp.1221‐1228. DOI: 10.1016/j.envsoft.2006.11.002
20) Thorndahl S, Beven KJ, Jensen JB, Schaarup‐Jensen K. : Event based uncertainty assessment in urban drainage modelling, applying the GLUE methodology.Journal of Hydrology 357， pp.421‐437，2008．DOI: 10.1016/j.jhydrol.2008.05.027
21) Thorndahl S, Schaarup‐Jensen K. ：Comparative analysis of uncertainties in urban surface runoff modelling. The 6th International Conference on Sustainable Techniques and Strategies in Urban Water Management Lyon, France.，2008.
22) 和田桂子：路面排水中の有機物質および栄養塩類の挙動とその削減手法に関する研究，京都大学博士論文，2007.
23) DHI：MOUSE PIPE FLOW - MOUSE Reference Manual，2008.
24) DHI：MOUSE TRAP Technical Reference Surface Runoff Quality Module，2008.
25) DHI：MOUSE TRAP Technical Reference Sediment Transport Module ，2008.
26) 国土交通省都市・地域整備局下水道部：効率的な合流式下水道緊急改善計画策定の手引き（案），2008.

なお，本章の内容は，下記の論文で公表済みである．

1) 三浦 心，石川忠晴，山本礼子：都市流域の合流式下水道から流出する懸濁物量の推定方法についてー東京都呑川をフィールドとしてー，水文水資源学会誌 Vol. 32, pp. 8 - 22, No.1 Jan. 2019. DOI: 10.3178/jjshwr.32.8

2) T. Ishikawa, S. Miura and R. Yamamoto：Field study on SS discharge from combined sewer system of highly urbanized area, Int. J. of Safety and Security Eng., Vol. 8, No. 4 pp.528‐535. 2018. DOI: 10.2495/SAFE-V8-N4-528-535

第4章　有機懸濁物の河川感潮域における堆積

4-1　緒言

4-1-1　本章の目的

本章では，都市河川感潮域に流入した有機懸濁物（O-SS）の沈降・堆積特性について把握することを目的として，室内実験により O-SS の沈降速度を把握し，それを用いて O-SS 堆積機構をモデル化した．また，現地の水質分布や O-SS 堆積量を把握し，鉛直二次元密度流モデル（TITech-WARM）による再現性の確認を行った．

4-1-2　既往の研究と課題

(1)　沈降速度に関する既往の研究と課題

海域における有機物の堆積に関する研究としては，海外においては現地計測等の事例がある [1]が，国内の研究において，実験などにより詳細に分析されたものが多い．著名なものとして，淡水中の土粒子が塩水に触れることによりフロック化し，沈降速度が増加することが知られている [2]．また，淡水と塩水の混合を考慮した数値シミュレーションモデルについても大竹ら [3]により提案されている．一方，小枝ら [4]は，強熱減量 10%～15%程度の有機懸濁物の沈降過程に及ぼす塩分の影響について詳細に検討しており，有機懸濁粒子は塩水中ではフロック間隔が増加することにより沈降速度が遅くなるという土粒子とは逆の応答があることを示している．また，下水処理においても，活性汚泥法などの処理能力を把握するために下水に含まれる懸濁物の大まかな沈降速度が得られている [5]．

本研究で対象とする降雨時に合流式下水道から都市河川感潮域に流入する O-SS の強熱減量は 70%程度 [6]と非常に高く，このような O-SS を対象にした沈降速度測定結果はほとんどない．また，下水処理における知見も非常に多くのサンプルを対象に大まかな沈降速度を把握するために設定されたものであり，本検討で対象とする合流式下水道流域から降雨に伴い流出する汚泥にそのまま適用することは好ましくない．そこで，本研究では合流式下水道内で採取した O-SS を使用して沈降速度試験を行い，その沈降速度について把握した．

(2) 都市河川汽水域における O-SS の堆積に関する既往の研究と課題

都市河川における降雨流出に伴う O-SS の堆積特性についての研究は非常に少ない.

海外では，William J.Walker *et al.*[7]が Passaic 川の表面堆積物への都市流出の潜在的寄与について定性的な分析を行っている．また，A. Casadio *et al.*[8]がイタリアの Navile 水路において，CSO による都市河川への水質に与える影響を定性的に評価している．

国内では，土屋ら [9]は，目黒川感潮域における汚濁堆積機構について一次元不定流解析をもとに推察しており，都市河川の勾配変化点において O-SS 流出負荷量の約 90%が沈降・堆積することを示している．また，林ら [10]は都市河川感潮域の降雨時水質変動と汚濁負荷の評価を目的として神田川における降雨時現地観測を行い，感潮河川の状態を洪水相・遷移相・感潮相に区分・定義して評価している．ただし，土屋らの研究においては沈降速度などの物理的なモデル化はなされておらず，現地調査結果から O-SS の沈降による除去率を試算的に求めたものである．また林らの研究は出水～出水後の時間的に区分することで現象を分析したものであり，都市河川感潮域における O-SS の堆積機構を物理的に扱った調査・研究は極めて少ない.

堆積した汚泥の再浮上については都市河川の底泥を扱ったものは極めて少ないが，類似する閉鎖性水域の堆積汚泥の再浮上について様々な知見やシミュレーションモデルが提案されている．大別すると，流れの掃流力で表現するモデル化と乱流エネルギーを用いたモデル化がある．流れの掃流力で表現するモデルとしては，大坪ら [11]は霞ヶ浦の底泥の再浮上について，実効掃流力という概念を導入し，モデルの再現精度を向上させている．また，中野ら [12]は，底泥の再浮上機構を検討する上で重要となる底面せん断応力や流体粒子速度などの底泥床面付近の特性について，粘性流体多層モデルを用いて検討している．乱流エネルギーを用いたモデル化としては，梅田ら [13]は霞ヶ浦において巻き上げ率の算定に k-ε 乱流モデルを適用し，精度の向上を図っている．他にも，阿部ら [14]は，有機汚泥の巻き上げ特性に及ぼす流水塩分の効果を実験的に調べ，巻き上げモデルを新たに構築している．二瓶ら [15]も，都市河川における O-SS の巻き上げ量について実験により求めている．これらのように，底泥の再浮上に関する論文について水域の特性や対象とする土砂の性状によって様々なものが存在するが，汎用化されたものはない.

そこで本研究では，前述した沈降速度に関する実験結果や既往の知見をもとに，鉛直二次元密度流モデルに O-SS の沈降・再浮上の運動を追加し，堆積特性について再現することとした.

4-1-3　本研究の特徴

本研究の特徴は下記の 3 点である.

- 合流式下水道流域から降雨時に都市河川感潮域に流入する O-SS を対象とした沈降速度の把握
- 下水流出シミュレーションから得られた上流域からの O-SS 流入量を境界条件として，感潮域の密度流シミュレーションによる沈降・堆積特性の再現
- 現地における堆積量の把握と数値シミュレーションとの比較

4-1-4　検討フロー

本章の検討フローを図 4-1 に示す.「4-2　室内実験（O-SS 沈降速度試験)」で得られた O-SS の沈降速度をもとに「4-4-1　モデル化方法」において数値モデルの構築を行った.　また,「4-3　現地調査」の結果を踏まえて，構築したモデルの塩水流動および O-SS 堆積量の検証を行った.

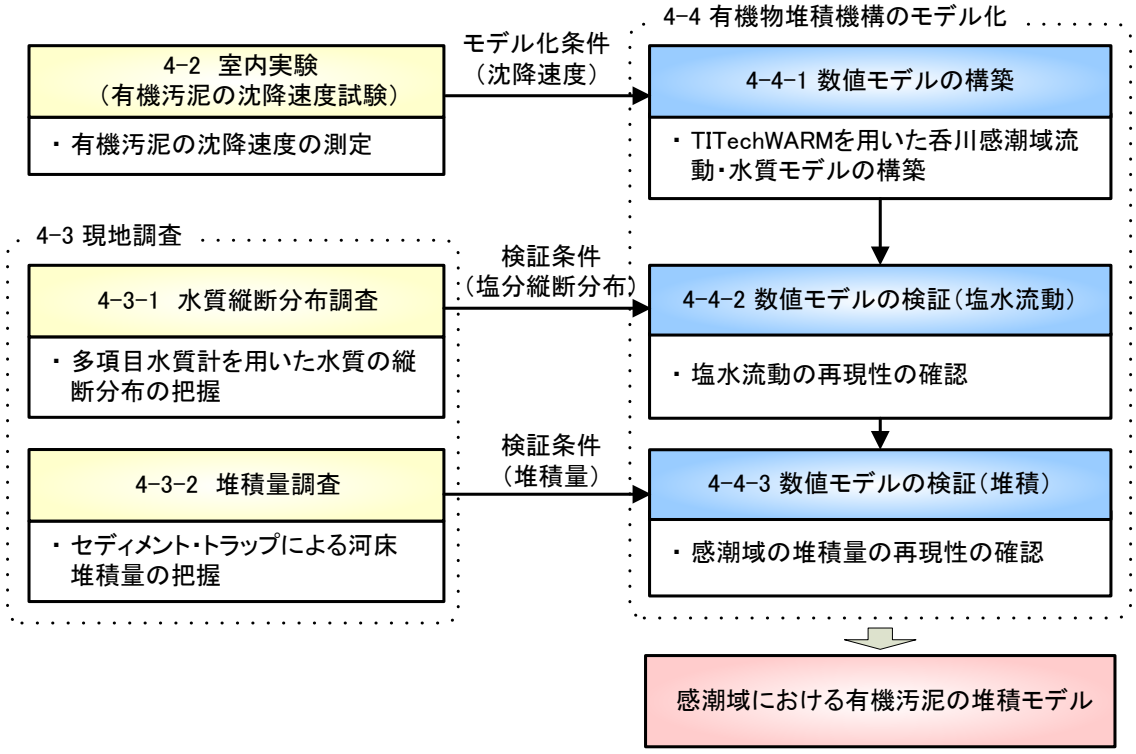


図 4-1　4 章の検討フロー

4-2　室内実験（O-SS 沈降速度試験）

合流式下水道流域から都市河川に流入する O-SS の沈降速度試験を行い，O-SS の沈降速度を把握する．

(1)　実験の目的

ここでは，河川に流入した O-SS の挙動を把握するために，O-SS 沈降速度試験を実施する．

河川内に流入した O-SS は，河川内の流動に伴い，流下・拡散していく．その際，河川水よりも比重の重い下水汚濁物の沈降が生じ，河床まで到達した O-SS は，河床に堆積する．このときの沈降速度を知ることができれば，数値シミュレーションモデルによる解析により，河川内の拡散状況や堆積状況を知ることができる重要なパラメータである．

都市河川汽水域に流入した O-SS の沈降速度を把握することを目的として，沈降速度試験を実施した．

(2) 実験方法

沈降速度の測定方法には，以下の種類がある [16) 17)]．室内実験による測定方法として，O-SS の比重が一般的な土粒子と同じであるか不明であったため，カラム試験による方法を選択した．また，沈降物の濃度が低く，界面が不明瞭であったため，界面法を選択できなかった．また，累積法では，一定水深に設置した受け皿の重量を測定する必要があるが，O-SS は容易に再浮上するため，計測が困難であった．そこで，水中の濃度から沈降速度を計測する増分法を採用することとした．

【現地における測定】

- sediment trap による方法
- 水質の鉛直分布による沈降速度測定

【室内実験による測定】

- 懸濁物質の粒径と比重から求める方法
- カラム試験による方法
  - 界面法
  - 増分法（本研究で採用した手法）
  - 累積法
    - 平均濃度を測る方法
    - 沈降した物質量を測る方法

【数値計算による推定】

- 現地調査結果からの逆算
- 確率的沈降モデル
- ランダムウォークモデル

1) 使用する機材

アクリル製円筒（φ200mm×H1000mm）

ゴム栓

サイフォン（ステンレス管＋ゴムチューブ）

2) 試験ケース

試験ケースは，下水の質や濃度，投入する下水と投入先の河川水の塩分濃度（密度）を変化させて実施する.

なお，試験では採水による沈降速度への影響を最小限にするため，O-SS のみの測定用カラムとその他の COD などの多項目の水質測定を行う多項目測定用カラムの 2 本ずつ実施することとした.

表 4-1　試験ケース一覧

	塩分濃度[‰]	備考
1	0 程度	O-SS 測定用カラムと多項目測定用カラムの 2 本ずつ実施
2	10 程度	
3	20 程度	

3) 実験手順

a) 事前準備

ア　下水の採水

投入する下水については，下水越流水を想定し下水道内マンホールの底に沈んでいるO-SS を採取し，未処理で使用した.

イ　河川水の採水

呑川において，下記の 2 か所で採水を行う.

① 淡水（汽水域の上流端の表層水）塩分 0～5‰（電気伝導度 0~7mS/cm）

② 塩水（河口の底層水）塩分 20～30‰（電気伝導度 29~43mS/cm）

ウ　河川水の前処理

採水した河川水を孔径 1μmのフィルターによりろ過し，水中の懸濁物質を除去した.

b) 沈降試験の実施

ア　河川水の準備，計測

室温を 25℃±1℃に調整した恒温槽内にφ20cm×H100cm のアクリル製円筒を 6 本設置し，静置しておく（水温が 25±1℃になることを確認）.

コアサンプルを曝気または撹拌し，DO は 5mg/l 以上としておく.

図 4-2　河川水サンプル（投入前）

調査項目：

【投入前コアサンプラー水中】

（現地測定）水温，pH，DO，ORP，EC，塩分，濁度，比重，コアサンプル水深

（採水分析）D-COD

イ　投入下水の準備，計測

投入下水 18L を水温が 25±1℃になるように恒温槽内に静置しておく．

投入する下水 18L を撹拌し，現地測定，採水分析を実施する．

図 4-3　投入下水サンプル

調査項目：

【投入前生下水】

（現地測定）水温，pH，DO，ORP，EC，塩分，濁度，比重

（採水分析）O-SS，P-COD，D-COD，強熱減量，n-ヘキサン抽出物質

ウ　下水投入

下水を投入し，撹拌する．投入後の濁度が概ね 100NTU（H27 馬引橋下流で測定された出水時の濃度）になるように調整する．この時，投入先の河川水と密度差が大きい場合には，河川水が混合しない恐れがあるため，必要に応じて予め河川水と混合させた下水を投入する．

また，撹拌後は板などを差し込み，流動の影響が出ないようにする．

エ　計測

下水投入後，下記の時点で水深 50cm の採水を行い，分析を行う．

各時点での採水量を表 4-2 に示す．採水はカラム内の水を引き抜くため，沈降速度に影響を与えるおそれがあり，最小限に留める必要がある．O-SS 測定用カラムは O-SS の計測のみのため，分析用の最小容量として，0.5L を採水する．多項目水質測定用カラムについては，投入直後は COD 分析の等の余裕を見て投入直後は 2.0L，以降は 1.0L の採水を行った．

表 4-2　採水量一覧

		O-SS 測定用カラム	多項目水質カラム
1	投入直後（撹拌後）	0.5l（93cm）	2.0l（88cm）
2	3 分後	0.5l（91cm）	1.0l（84cm）
3	10 分後	0.5l（89cm）	1.0l（80cm）
4	30 分後	0.5l（87cm）	1.0l（76cm）
5	1 時間後	0.5l（85cm）	1.0l（72cm）
6	3 時間後	0.5l（83cm）	1.0l（68cm）
7	約 6 時間後	0.5l（82cm）	1.0l（64cm）
8	実験終了時 （約 24 時間後）	0.5l（80cm）	1.0l（60cm）

カッコは採水後の概ねの水深（初期水深を 95cm とした場合）
（全 8 時点）

調査項目：
【O-SS 測定用カラム】
（現地測定）コアサンプル水深
（採水分析）SS
【多項目水質測定用カラム】
（現地測定）水温，pH，DO，ORP，EC，塩分，濁度，コアサンプル水深
（採水分析）SS，P-COD，D-COD

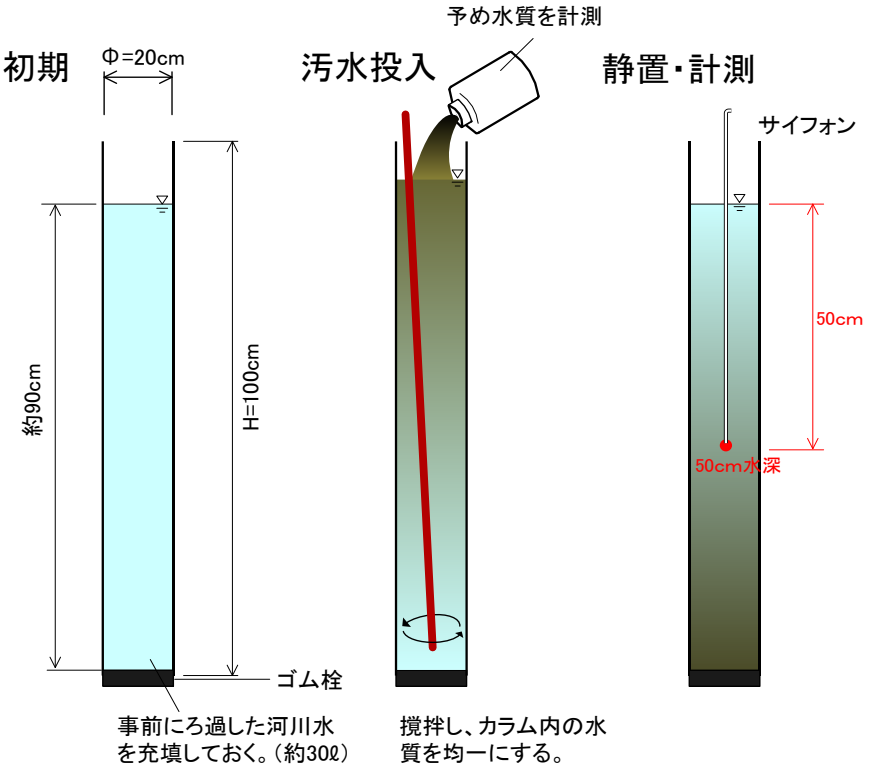


図 4-4　下水越流水の沈降試験手順

図 4-5　実験実施中のサンプル

(3) 実験結果

図 4-6 に初期濃度に対する計測濃度の比の時間変化を示す．これから下式で沈降速度 w_0 を求めた．

$$w_o = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(P_i - P_{i-1})\overline{w_i} \qquad (5\text{-}1)$$

ここに，n は採水回数（初期は除く），Pi は採水毎の濃度比[%]（P0 は初期濃度），$\overline{w_i}$ は区間平均沈降速度[cm/min]である．

算定された平均沈降速度 w_0 を図 4-6 中の表にまとめている． w_0 は塩分増加に伴い若干減少するが，概ね 12.0 cm/min であった．なお平均粒径（50 μ m）をストークス則に代入して得られる沈降速度は 15.1 cm/min であり，比較的近い値であった．なお長時間を経ても懸濁粒子がカラム底に完全に堆積することはなく，高濃度の浮泥層を形成し，水流の乱れによって容易に浮上する状態であった．

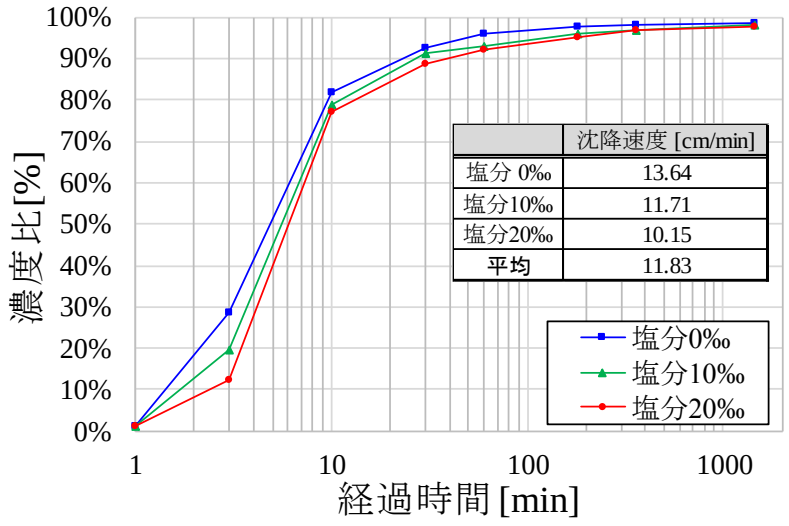


図 4-6　沈降速度試験結果

4-3　現地調査

4-3-1　水質縦断分布調査

(1)　調査の目的

塩淡成層が形成された呑川の水質変動特性を把握し，数値シミュレーションモデルの検証データを得ることを目的として，水質縦断分布調査を実施した．

(2)　調査方法

1)　調査手順

観測機器を橋上（横断方向中央部）から垂下し，鉛直的な水質分布を計測した．

鉛直方向の観測ピッチは基本 0.1m 以下としている．

これらを縦断的に多数の地点で実施することによって，水質の縦断分布を把握した．

2)　調査地点

図 4-7 に示す呑川感潮区間内の 16 地点において調査を実施し，詳細な鉛直水質分布を実施した．

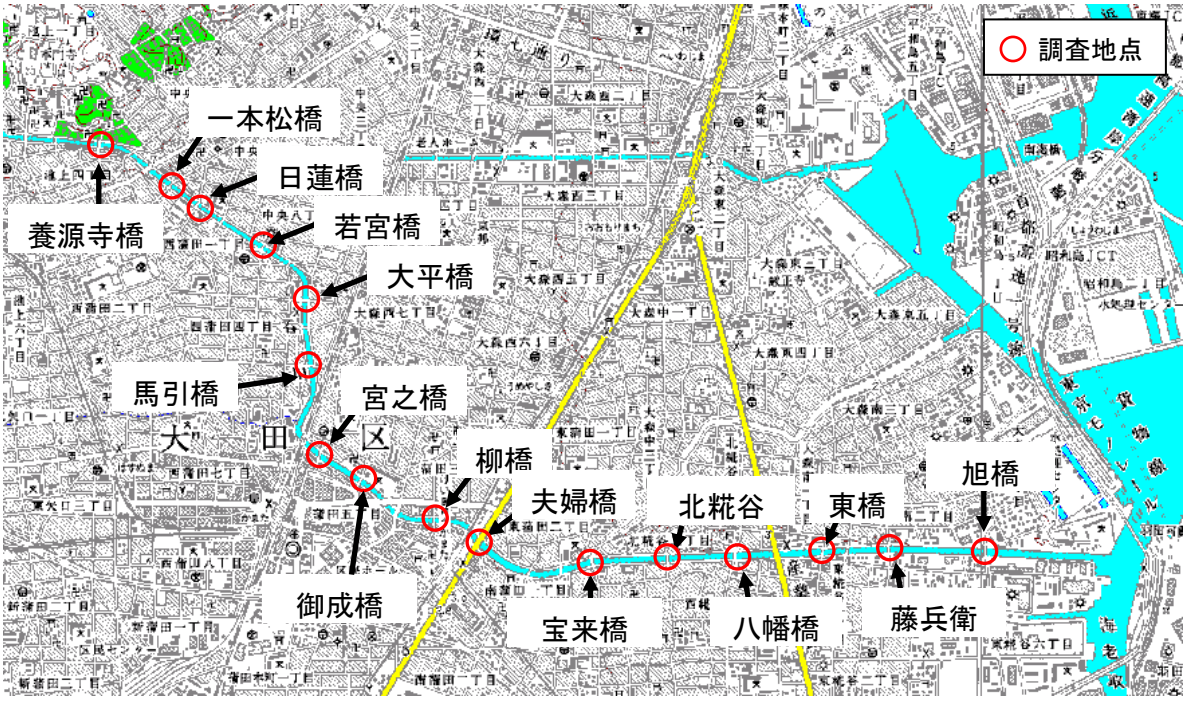


図 4-7　調査実施地点

3) 観測機器

JFE アドバンテック社の RINKO-Profiler（ASTD102）を使用した.

機器の概観，仕様等を図 4-8 に示す.

選定理由は，下記の 3 点である.

- 多項目の水質を同時に計測することができる.
- 機器を垂下することにより，自動的に水深毎のデータが記録されるため，短時間で高密度のデータが計測できる.（1 地点あたり数分で計測が完了）
- 電源やモニタなどの接続が不要，軽量・コンパクトなため，徒歩や自転車等で持ち運ぶことができる.

4) 調査項目

調査項目は，塩分を対象とした.

5) 観測日時

2017/5/17 ～ 2017/8/30 にかけて 22 回の調査を実施した.

高速応答DOセンサー搭載メモリーCTD

RINKO-Profiler

特　長

① 高速応答DOセンサー標準搭載
　・観測時間の大幅な短縮
　・より詳細なDOの鉛直分布の取得実現
② 大容量内蔵メモリーでケーブル不要
③ 充電型リチウムイオン電池内蔵
④ 浸漬型コネクターで漏水不安解消(特許)
⑤ 最小10cmピッチでの鉛直観測が可能(深度トリガーモード)
⑥ 短期での経時観測可能(タイムトリガーモード)
⑦ チタンボディで、腐食の不安解消
⑧ 空中約2.0kg/水中重量約1.0kgの小型軽量

■概要

RINKO-Profilerは、CTDに高速応答DOセンサーを標準装備したDOプロファイラーです。応答速度の標準値が0.4秒と非常に高速なため、これまで時間がかかっていた観測時間を大幅に短縮でき、さらにより詳細なDOの鉛直分布測定を可能としました。水中では約1.0kgと非常に軽量であり、内蔵記録式ですので、専用のケーブルは必要とせず、ロープ等により海中に降下させるだけで、非常に簡単に任意の深度ピッチでの水温、塩分、DOの鉛直プロファイル測定が行えます。(ASTD102モデルでは、クロロフィル、濁度も測定可能です)
内部メモリーには、1GBの大容量メモリーを搭載することにより、0.1mピッチでの水深100mまでのプロファイルデータが、約1,000回記録可能となりました。各プロファイルデータは内部でファイル化され、本体内部のカレンダー時刻情報により、管理されます。電源である内部電池には、繰り返し充電可能なリチウム電池を採用し、1回3時間の充電で、連続10時間の使用が可能です。
通信用コネクターには、浸漬型コネクターを採用しているため、本体内部を開ける必要が無く、専用ケーブルによりインターフェイス、パソコン間の通信、および、充電が行えます。インターフェイスは、パソコン通信用モデル、その場でデータの確認が可能なプリンター付モデルの2種類を用意しております。

■型式と測定項目

	深度	水温	電気伝導度	淡水EC	塩分	クロロフィル	濁度	DO
ASTD100	●	●	●	●	●			
ASTD101	●	●	●	●	●	●	●	
ASTD102	●	●	●	●	●	●	●	●
ASTD103	●	●	●	●	●			●
ASTD150	●	●	●	●	●			
ASTD151	●	●	●	●	●	●	●	
ASTD152	●	●	●	●	●	●	●	●
ASTD153	●	●	●	●	●			●

※ASTD15*は、1,000m仕様です。

浸漬型コネクターと見やすい
パイロットランプ

測定風景

図 4-8　水質縦断分布調査 観測機器（ASTD）

（JFE アドバンテック社カタログ [1]より）

■センサー仕様

測定項目	深度	水温	電気伝導度	淡水EC	塩分	クロロフィル	濁度	DO
センサータイプ	半導体圧力	サーミスター	7電極式	7電極式	実用塩分式	蛍光測定	赤外光後方散乱式(LED)	燐光式
測定範囲	0～600m 0～1,000m※1	−3～45℃	0.5～70mS/cm		2～42	0～400ppb (ウラニン基準)	0～1,000FTU (ホルマジン基準)	0～200% (0～20mg/l)
分解能	0.01m	0.001℃	0.001mS/cm		0.001	0.01ppb	0.03FTU	0.01%(0.001mg/l)
精度	±0.3%FS	±0.01℃ (0～35℃)	±0.01mS/cm※2		—	±1%FS ゼロドリフト±0.1ppb	±0.3FTUまたは 測定値の±2%	±2%FS (±0.4mg/l)
時定数	0.2秒	0.2秒	0.2秒	0.2秒	0.2秒	0.2秒	0.2秒	0.4秒※3

※1 いずれか選択　※2 検定は海水を使用(28～65mS/cmの範囲)。　※3 気体雰囲気中(1気圧25℃)での63%応答標準値。

■ロガー仕様

測定モード	深度トリガーモード	タイムトリガーモード
測定インターバル	0.1/0.2/0.5/1m	0.1～600秒
メモリータイプ	1GB内蔵メモリー	
記憶容量	0.1mピッチ100mを約1,000回	約8,000,000データ
電源	充電式リチウムイオン電池(連続使用で約10時間可能)	
ケース材質	チタン2種	
寸法	φ136mm×491mm	
質量	空中約2.0kg、水中重量約1.0kg	
耐圧性能	1,000m水深相当	

■インターフェイス(ASTD-IF)

電源	AC100V～240V または 単3形アルカリ乾電池×4個で約40時間
寸法	170mm×66mm×169mm
質量	約1.0kg
その他	信号ケーブル、電源ケーブル、通信ケーブル付

■専用プリンター(P-601)

印字項目	深度、水温、塩分、DO、クロロフィル、濁度
印字項目数	最大5項目
印字桁数	小数点以下2桁
プリンター仕様	感熱紙方式(約9,000行/巻)
機能	データ印字、観測設定、データ通信、センサー充電
電源	内蔵充電型電池(AC100V充電)
寸法	330mm×220mm×200mm
質量	約3.8kg
防水性	簡易防滴構造
その他	信号ケーブル、電源ケーブル、通信ケーブル付

■寸法図

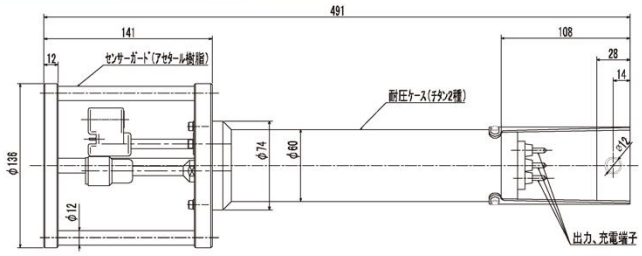


図 4-8 水質縦断分布調査 観測機器（ASTD）

（JFE アドバンテック社カタログ [1]より）

4-3-2　堆積量調査

(1)　調査の目的

合流式下水道流域から，河川感潮域で沈降・堆積する有機懸濁物量を把握するため，堆積量調査を実施した．また，堆積した有機懸濁物の粒度や強熱減量を測定することにより，下水道内で採取された懸濁物との違いを確認した．

(2)　調査方法

1)　調査方法

平常時に sediment trap（図 4-10）を設置し，出水後に回収した．

2)　調査場所

図 4-9 に示す養源寺橋，日蓮橋，山野橋，御成橋の 4 地点とする．

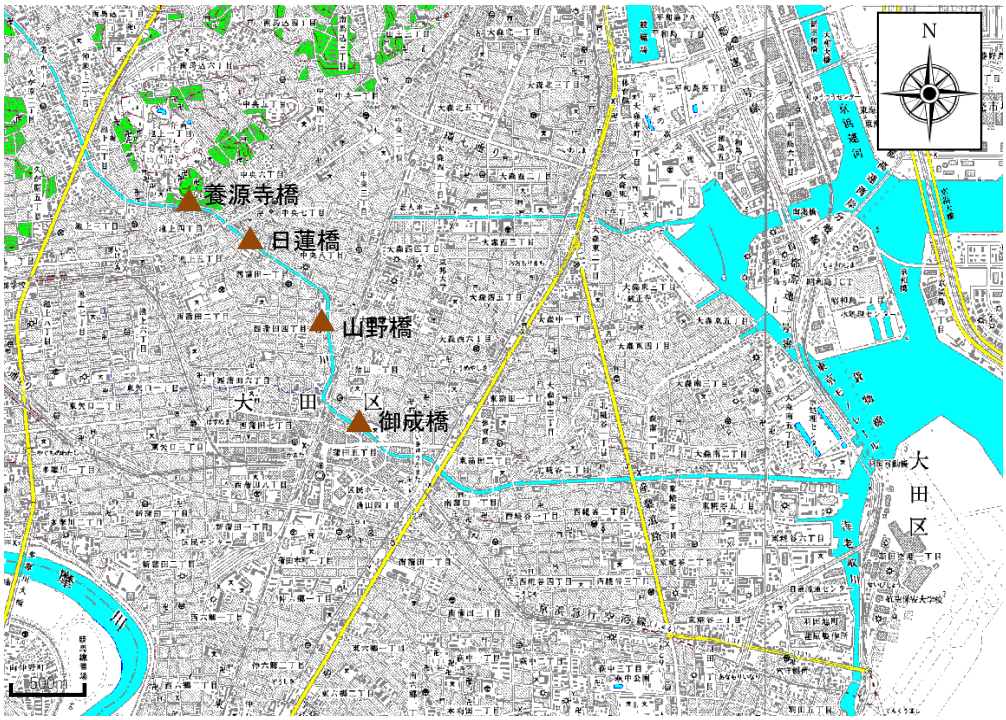


図 4-9　調査位置図（堆積物調査）

容　器

容器仕様

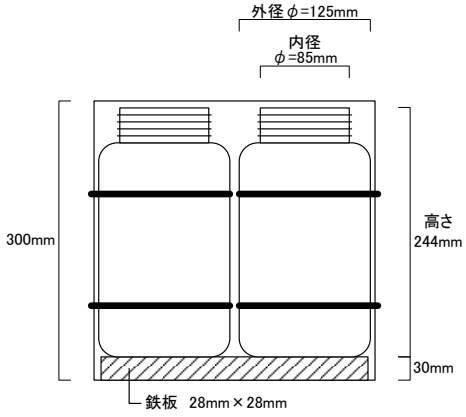
材質	口内径×胴径×高さ (mm)
ポリエチレン	0.00567m^2

外　装

外装仕様

材質	幅×奥行×高さ (mm)
ステンレス (SUS304)	(本体寸法)　300×300×300 (有効内寸)　290×290×295

断面図



平面図

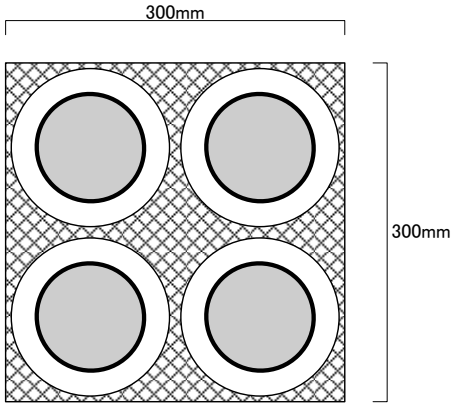


図 4-10　sediment trap

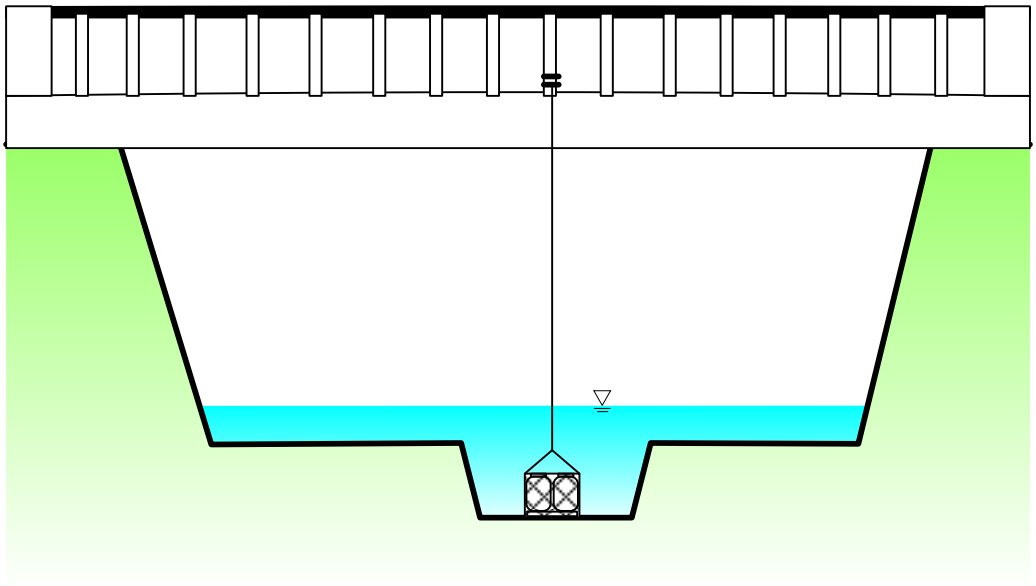


図 4-11　sediment trap 設置イメージ

3)　**調査項目**

（室内分析）乾燥重量，強熱減量，粒度組成

※ 粒度組成はレーザーカウンターによる測定とする．

※ 測定は地点毎にコンポジットした試料を作成し，分析を行う．

4) 調査時期

5 月 17 日～9 月 27 日の期間に 15 回実施した．調査期間を表 4-3 に示す．

また，日降水量と気温のグラフに，sediment trap の各設置期間を記したものを図 4-12 に示す．なお，日降水量は気象庁アメダス世田谷地点，気温は東京地点のデータである．

表 4-3　調査期間

	設置期間	設　置　箇　所
①	2017/5/17 ～ 2017/5/30	（1 地点）
②	2017/5/30 ～ 2017/6/7	山野橋
③	2017/6/7 ～ 2017/6/14	（3 地点）
④	2017/6/14 ～ 2017/6/21	御成橋，山野橋，日蓮橋
⑤	2017/7/18 ～ 2017/7/26	
⑥	2017/7/26 ～ 2017/8/1	
⑦	2017/8/1 ～ 2017/8/3	
⑧	2017/8/3 ～ 2017/8/8	
⑨	2017/8/8 ～ 2017/8/16	（4 地点）
⑩	2017/8/16 ～ 2017/8/24	養源寺橋，御成橋，山野橋，日蓮橋
⑪	2017/8/24 ～ 2017/8/30	
⑫	2017/8/30 ～ 2017/9/5	
⑬	2017/9/5 ～ 2017/9/13	
⑭	2017/9/13 ～ 2017/9/20	
⑮	2017/9/20 ～ 2017/9/27	

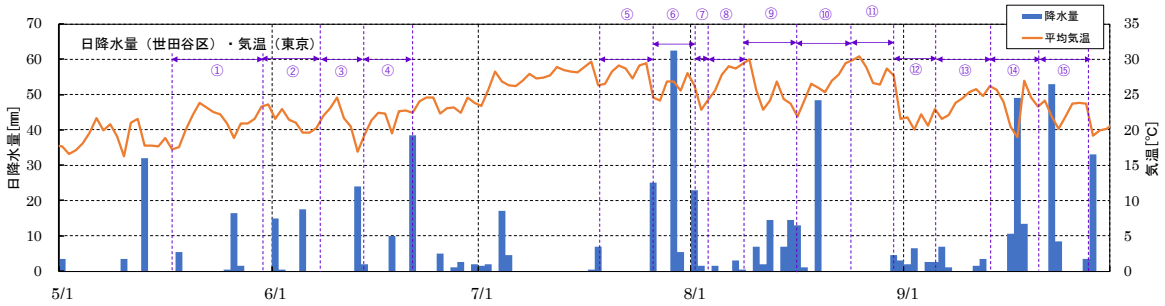


図 4-12　sediment trap 設置期間

(3) 調査結果

堆積量調査結果を表 4-4 に，設置期間ごとに堆積量をグラフ化したものを図 4-13 に示す.

表 4-4　堆積量調査結果

	設置	回収	設置地点	堆積量 [mg-dry/cm2]	強熱減量 [%]
①	2017/5/17 13:30	2017/5/30 17:30	山野橋	163	36.6
②	2017/5/30 17:45	2017/6/7 11:15	山野橋	145	42.6
③	2017/6/7 10:05	2017/6/14 13:10	御成橋	10	43.2
	2017/6/7 11:25	2017/6/14 14:30	山野橋	14	48.4
	2017/6/7 10:45	2017/6/14 13:50	日蓮橋	37	53.2
④	2017/6/14 13:25	2017/6/21 14:20	御成橋	27	38.7
	2017/6/14 14:45	2017/6/21 15:10	山野橋	59	58.9
	2017/6/14 14:05	2017/6/21 14:45	日蓮橋	393	61.5
⑤	2017/7/18 13:20	2017/7/26 13:35	御成橋	182	34.9
	2017/7/18 14:10	2017/7/26 14:30	山野橋	2,648	45.1
	2017/7/18 13:45	2017/7/26 14:05	日蓮橋	148	72.7
⑥	2017/7/26 13:45	2017/8/1 10:20	御成橋	159	44.1
	2017/7/26 14:40	2017/8/1 11:05	山野橋	1,852	46.7
	2017/7/26 14:15	2017/8/1 10:40	日蓮橋	41	53.1
⑦	2017/8/1 10:30	2017/8/3 12:45	御成橋	574	44.2
	2017/8/1 11:15	2017/8/3 13:25	山野橋	1,553	54.0
	2017/8/1 10:50	2017/8/3 13:05	日蓮橋	526	63.4
⑧	2017/8/3 12:55	2017/8/8 15:45	御成橋	21	42.1
	2017/8/3 13:35	2017/8/8 16:20	山野橋	49	43.9
	2017/8/3 13:15	2017/8/8 16:05	日蓮橋	4	55.4
⑨	2017/8/8 15:55	2017/8/16 10:00	御成橋	3,377	40.1
	2017/8/8 16:30	2017/8/16 11:05	山野橋	3,125	45.1
	2017/8/8 16:10	2017/8/16 10:45	日蓮橋	109	54.6
	2017/8/8 16:45	2017/8/16 10:20	養源寺橋	70	53.4
⑩	2017/8/16 10:10	2017/8/24 9:45	御成橋	96	25.8
	2017/8/16 11:15	2017/8/24 10:50	山野橋	249	22.9
	2017/8/16 16:55	2017/8/24 10:30	日蓮橋	78	38.6
	2017/8/16 10:30	2017/8/24 10:10	養源寺橋	10	52.6
⑪	2017/8/24 9:55	2017/8/30 9:50	御成橋	32	47.1
	2017/8/24 11:00	2017/8/30 10:50	山野橋	47	48.5
	2017/8/24 10:40	2017/8/30 10:30	日蓮橋	97	57.0
	2017/8/24 10:20	2017/8/30 10:10	養源寺橋	45	53.0
⑫	2017/8/30 10:00	2017/9/5 9:50	御成橋	25	42.1
	2017/8/30 11:00	2017/9/5 10:30	山野橋	143	51.2
	2017/8/30 10:40	2017/9/5 11:15	日蓮橋	164	57.8
	2017/8/30 10:20	2017/9/5 10:10	養源寺橋	124	60.4
⑬	2017/9/5 10:00	2017/9/13 9:45	御成橋	29	33.3
	2017/9/5 10:40	2017/9/13 10:45	山野橋	41	40.9
	2017/9/5 11:25	2017/9/13 10:25	日蓮橋	40	51.1
	2017/9/5 10:20	2017/9/13 10:05	養源寺橋	47	50.5
⑭	2017/9/13 9:55	2017/9/20 10:10	御成橋	27	36.9
	2017/9/13 10:55	2017/9/20 11:10	山野橋	215	47.4
	2017/9/13 10:35	2017/9/20 10:50	日蓮橋	234	50.1
	2017/9/13 10:15	2017/9/20 10:30	養源寺橋	233	59.1
⑮	2017/9/20 10:20	2017/9/27 9:45	御成橋	2,130	26.5
	2017/9/20 11:20	2017/9/27 11:25	山野橋	119	45.7
	2017/9/20 11:00	2017/9/27 10:55	日蓮橋	7	56.5
	2017/9/20 10:40	2017/9/27 10:30	養源寺橋	33	50.1

図 4-13 をみると，中量～大量のスカムが発生した⑤7/18～7/26，⑥7/26～8/1，⑦8/1～8/3 では，山野橋で大きな堆積量が観測されており，河川への大きな汚濁負荷があったことが推察できる．

山野橋付近で堆積量が大きいのは，図 4-14 に示すように山野橋付近の河床が周辺より低いことが要因であるとみられる．

⑨8/8~8/16 も大きな流入が生じていたが，底層部の DO が比較的高かったこと，それに伴い ORP も下がりきらなかったことから，多くのスカム発生が生じなかったと考えられる．

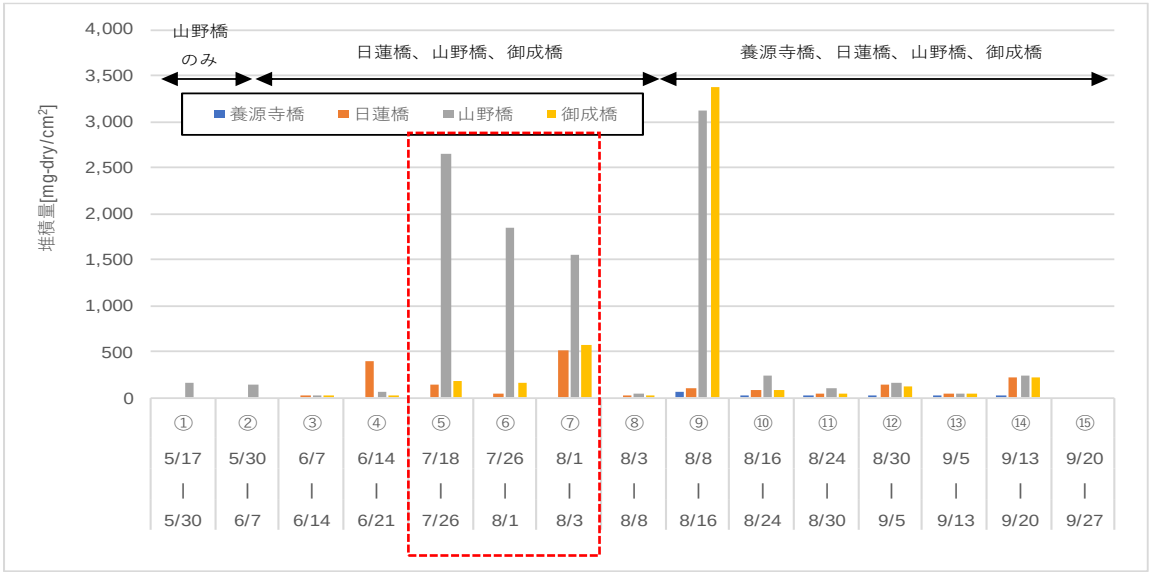


図 4-13　堆積量調査結果

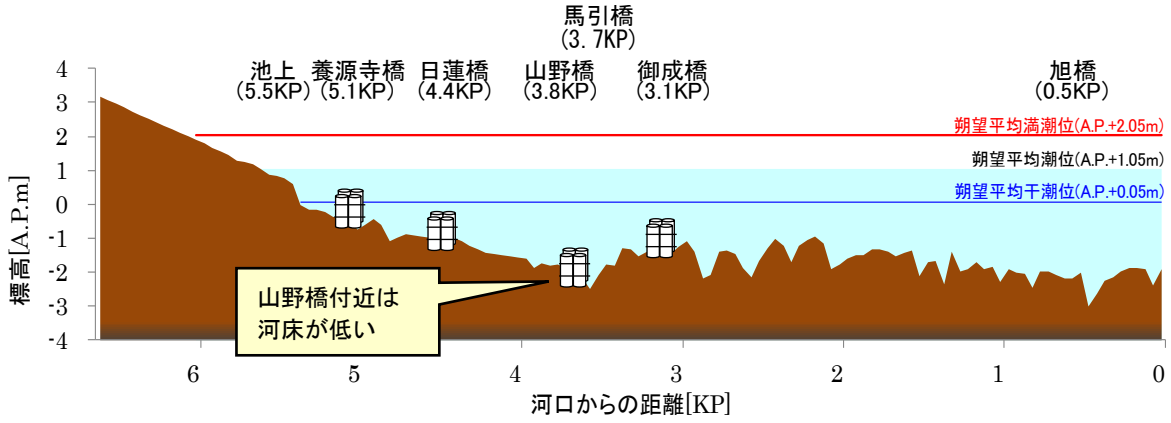


図 4-14　最深河床縦断図

(4)　考察

1)　降り始めの降雨量・無降雨期間・堆積量の関係に関する考察

山野橋における，無降雨期間（降雨がなかった日の連続日数），降り始めの降雨量および堆積量の関係を図 4-15 に示す.

降り始めの降雨量が大きい場合（降雨の開始からの 60 分雨量が 4mm 以上である場合とする），無降雨期間が長くなるに従って堆積量が大きくなる傾向がみられた.

この理由としては，①初期の降雨が強い場合にはファーストフラッシュとして有機性汚濁物が流域から河川へ流出することに加えて，②降雨前の無降雨期間が長いほど流域や下水道管きょ内に有機性汚濁物が多く堆積するために流出量が増加することが考えられる.

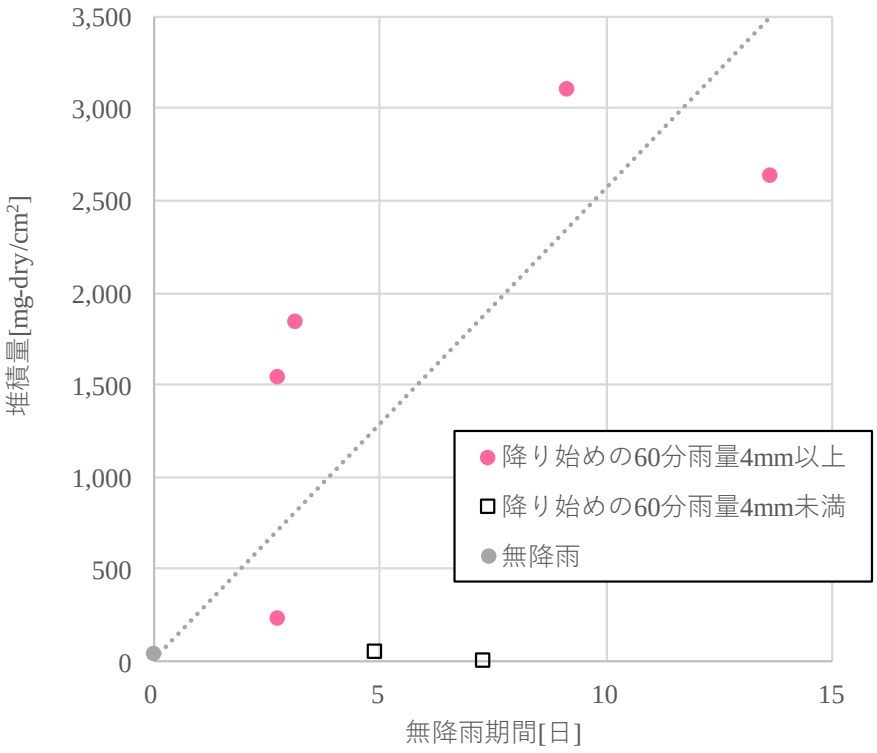


図 4-15　無降雨期間と山野橋堆積量の相関

2) 堆積物の成分および粒径に関する考察

堆積物調査の結果について，堆積物の成分および粒径から考察した．

a) 堆積物の成分（強熱減量）

下水道管きょ内で採取した有機性汚濁物と，sediment trap で捕集した汚濁物および底泥の強熱減量（有機物の割合）を表 4-5 に示す．

表 4-5　汚濁物の種類ごとの強熱減量

汚濁物の種類	強熱減量の範囲
下水道管きょ内で採取した有機性汚濁物	70%～79%（平均 75%）
sediment trap で捕集した汚濁物	23%～73%（平均 48%）
平常時の河川に堆積した底泥	5%以下

sediment trap で捕集した汚濁物の強熱減量は，平常時の河川に堆積した底泥の強熱減量に比べて非常に大きく，下水道管きょ内で採取した有機性汚濁物の強熱原料に比較的近い．このことから，sediment trap に堆積した汚濁物は，流域から下水道を通して有機懸濁物が流出し，元々河床にあった土砂の混入や有機物の分解などの影響を受けて強熱減量が低下したものとみられる．

b)　堆積物の粒径

下水道管きょ内の堆積物，sediment trap の堆積物（山野橋）および河床の底泥の粒度分布を図 4-16 に示す．sediment trap で捕集した汚濁物の粒度分布は，下水道管きょ内で採取した有機性汚濁物の粒度分布とほぼ等しい形状の曲線である．したがって，捕集した汚濁物は，流域から下水道を通して流出したものである可能性がある．

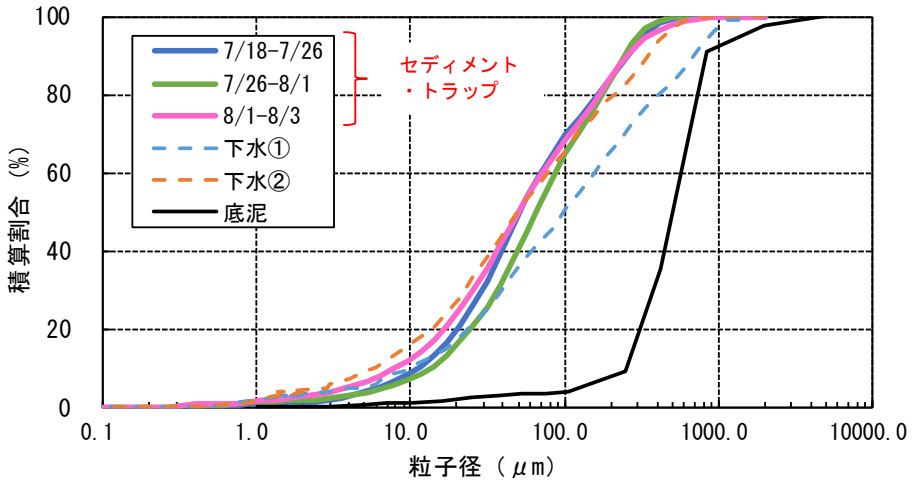


図 4-16　粒度分布の比較

4-4　有機物堆積機構のモデル化

4-4-1　モデル化方法

有機懸濁物（O-SS）の堆積機構について，河川汽水域の流動をシミュレーションすることができる TITech-WARM をベースとして，O-SS の運動をモデルに取り込むことでモデル化を行った.

(1)　TITech-WARM の概要

TITech-WARM（Tokyo Institute of Technology - WAter Reservoir Model）は東京工業大学中村恭志准教授が開発した湖沼や河川の水温成層や密度成層や各種水質の変化を高精度で解析可能な数値解析モデルである.

TITech-WARM は以下の特徴を有している.

- 複雑な地形を表現し, また水環境における流れに特徴的な水密度の不連続的境界の動的変化を正確に計算するため, 高精度移流計算法の CIP 法と Soroban 格子と呼ばれる新たな計算格子系を用いることで，高精度な計算を実現
- 計算の膨大な負荷を, 計算機クラスターを用いた並列計算を用いて従来よりも短時間での解析を実現
- ユーザーが任意に各種水質項目を設定することが可能. また，ユーザーがそれらの消長を設定できるなど，モデルの改変が可能

詳細については，文献[19)~21)]や TITech-WARM のユーザーマニュアル[22)]を参考にされたい.

(2)　呑川感潮域への適用

川幅は 20m 程度と狭いため，三次元成層流モデル[19)]を河道横断方向に積分した方程式系[20)]を用いて鉛直二次元成層流モデルとして取り扱った.

表 4-6　呑川感潮域モデル

項　目		内　容	
モデル	モデル	TITech-WARM モデル （鉛直二次元密度流モデル）	三次元モデルと鉛直二次元モデルが選択可能
	対象区間	旭橋（0.5KP）から 6.3 KP 地点まで （呑川感潮域）	
	格子間隔	縦断方向：20 ～ 50m ピッチ 鉛直方向：0.01 ～ 0.2m（可変※）	Soroban 格子
	格子点数	縦断方向：146 断面 鉛直方向：20 ～ 21	
	地形条件	最新の測量成果から設定	
	水質項目	水温，塩分，O-SS，O-SS 堆積量	
	計算期間	2017/6/19 0:00 ～ 2017/8/6 0:00	
境界条件	上流端	流量, O-SS については O-SS 流出計算結果 実測値から設定（鉛直方向に均一）	
	下流端	H29 連続観測結果から設定 （鉛直 3 地点データを内挿して設定）	
	水面	再曝気による DO 供給を考慮	
	河床	消費速度試験結果より設定	
初期条件	水温・塩分，DO	6/19 に水質縦断分布調査結果を与え，助走計算結果により設定	
	O-SS	初期状態（6/19）でゼロとした.	

(3) 有機汚泥の挙動のモデル化

河川における有機汚泥の挙動として，①輸送（移流・拡散），②沈降・堆積および③再浮上についてモデル化した．

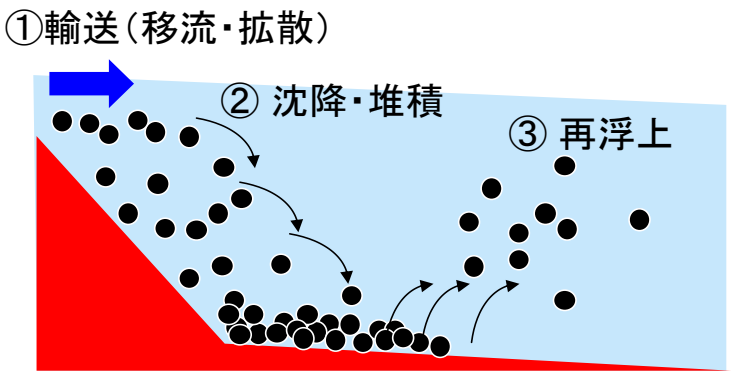


図 4-17　有機汚泥の挙動のモデル化イメージ

1) 有機汚泥の輸送（移流・拡散）

移流・拡散については他の水質項目と同様であるため，TITech-WARM の機能を用いて移流・拡散を評価した．

2) 有機汚泥の沈降

算定された平均沈降速度 w_0 を表 4-7 中の表にまとめている． w_0 は塩分増加に伴い若干減少するが，50%値でみると概ね 12.0 cm/min であった．なお平均粒径（50 μ m）をストークス則に代入して得られる沈降速度は 15.1 cm/min であり，比較的近い値であった．w_0 は沈降速度で，4-2　で求めた値（12.0 cm/min）一定値として与えた．

表 4-7　O-SS の沈降速度

	沈降速度 [cm/min]
塩分 0‰	13.64
塩分10‰	11.71
塩分20‰	10.15
平均	11.83

3) 再浮上

(3)a)で述べたように，浮泥状で堆積した懸濁物は容易に再浮上する可能性がある．浮泥の再浮上速度に関しては，流れの掃流力で表現するモデル化[11]と乱流エネルギーを用いたモデル化[13]があるが，ここでは比較的簡易な方法として次式を用いる[21]．

$$F_b=(C_b-C)\cdot w_0 \qquad (4\text{-}2)$$

ここに，F_bは正味の浮上量，C_bは平衡底面上濃度，Cは流動モデルで計算された底面上濃度，w_0は沈降速度で，O-SS の沈降速度試験で求めた値（12.0 cm/min）を用いた．C_bは iRIC などの汎用的なソフトウェアに適用されている以下の Lane & Kalinske の式[23]を用いた．

Lane & Kalinske の式

$$C_b = 5.55\left(\frac{1}{2}\frac{u_*}{w_0}\exp\left(-\frac{w_0}{u_*}\right)\right)^{1.16} \qquad (4\text{-}3)$$

ここに，u_*は摩擦速度[m/s]である．

4-4-2　検証

(1)　塩水流動の検証

塩水流動計算の精度を調べるために，図 4-18 上段に①～④で示す日に，多項目水質計（JFE アドバンテック ASTD102）を橋上（16 か所）より垂下し，縦断的な水質分布を観測した．その結果を図 4-19 左に，対応する計算結果を右に示す．その前に無降雨が続いた 7/21，8/9 には塩水が養源寺橋付近まで侵入しているが，直前に比較的大きな降雨のあった 8/2 や 8/16 には下流に後退している．シミュレーション結果はその様子を概ね再現できている．

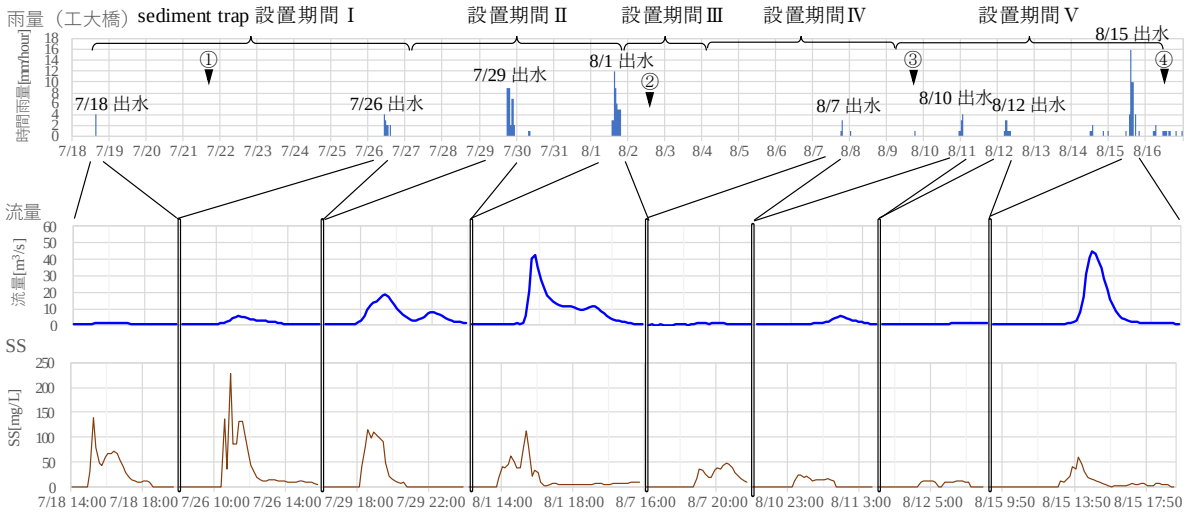


図 4-18　シミュレーション条件（下水道流出解析結果）

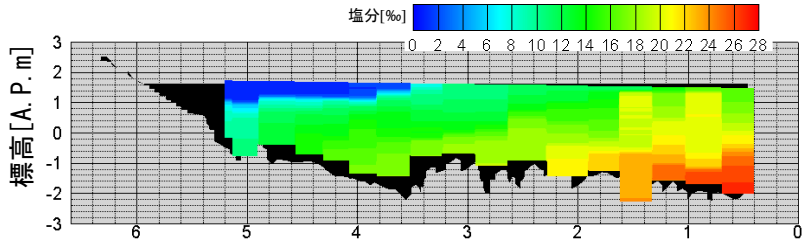
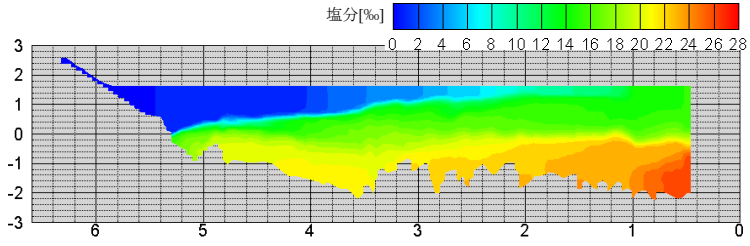
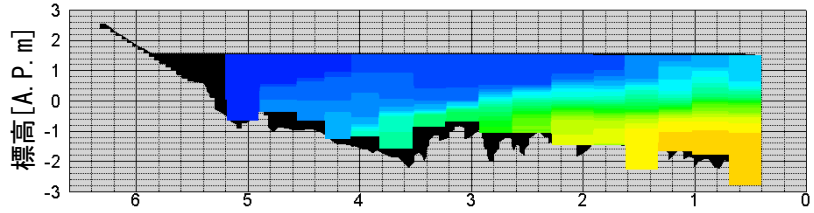
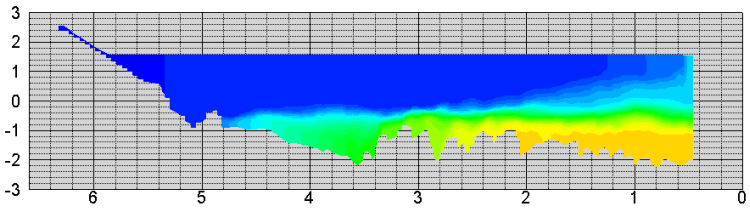
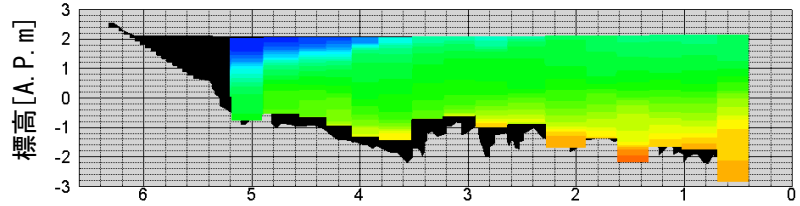
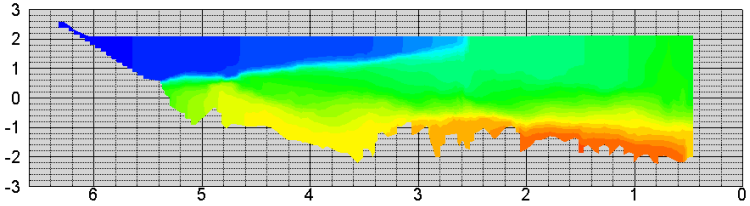
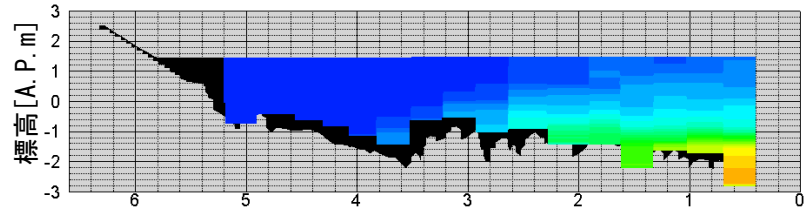
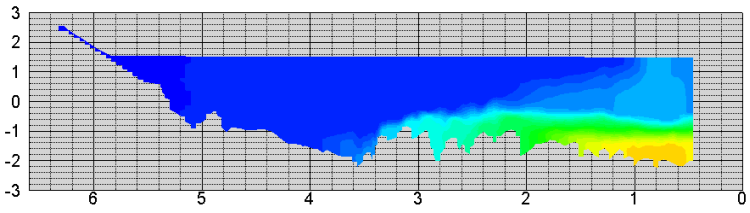
	観測値	シミュレーション結果
① 7/21 18:00		
② 8/2 15:00		
③ 8/9 18:00		
④ 8/16 12:00		

図 4-19　検証結果縦断分布図（塩分）

1) 堆積量の検証

7/29 出水に対して計算された懸濁物の運動を記述する．図 4-22 に感潮域上流端（5.5KP）に与えた流入量・SS のハイドログラフを，図 4-23 に図 4-22 の①～⑦に示す時点の鉛直縦断面内での O-SS 分布の推移を示した．図 4-24 に各時点の再浮上速度と河床直上の沈降速度および差し引きの積分としての累積堆積量の時空間分布を示す．また同図下段に汽水域への流入量および O-SS の波形を示すが，この出水は 2 つのピークを持ち，懸濁物質は出水第一波で流入し，第二波での流入はない．これは下水管内の堆積物の降雨初期にフラッシュされるからである．

図 4-23 の O-SS 分布は出水第一波（19:00 頃）で上昇する．これは流入した懸濁物によるものである．一方 22:00 頃の第二波では懸濁物の流入はほとんどないにもかかわらず O-SS は上昇する．これは第一ピーク後に沈降した懸濁物が再浮上したことによると考えられる．

図 4-24 の時空間表示（縦軸：距離，横軸：時間）では，出水第一波において再浮上速度と沈降速度の強度は拮抗しているが，前者は相対的にやや早い時間帯に山野橋・御成橋の中間点より上流側で生じているのに対し，後者は御成橋に達しており，また沈降速度の値の高い部分は図上で斜めになっていることから，ゆっくり下流に移動していることがわかる．つまり再浮上した懸濁物が下流に輸送されて堆積している．その結果，正味の累積堆積量は河床が周囲に比べて窪んでいる山野橋（3.8KP）と御成橋（3.1KP）の間に集中している．このように山野橋～御成橋間に多く堆積する理由としては，御成橋付近で窪んでいて停滞性が強くなること，図 4-20 に示すように御成橋付近から川幅が広くなり流速が遅くなること，さらに図 4-21 に示すように塩水楔が御成橋付近までしか後退せず先端部は停滞性が強くなることなど，地形や水理的な条件により堆積が多くなっている．また出水第二波では懸濁物の新たな供給はないにもかかわらず，再浮上した懸濁物が沈降していることがわかる．

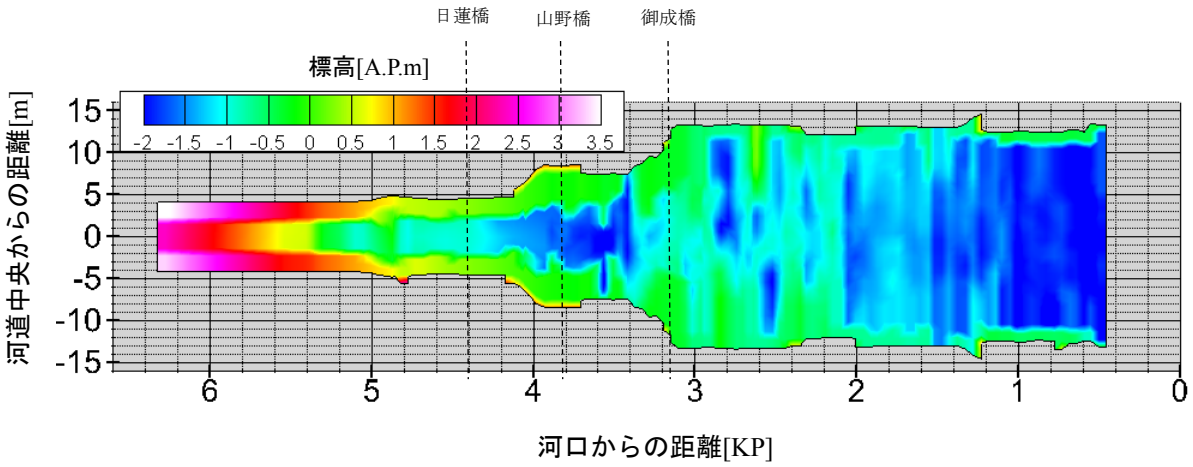


図 4-20　呑川の河床高の平面分布

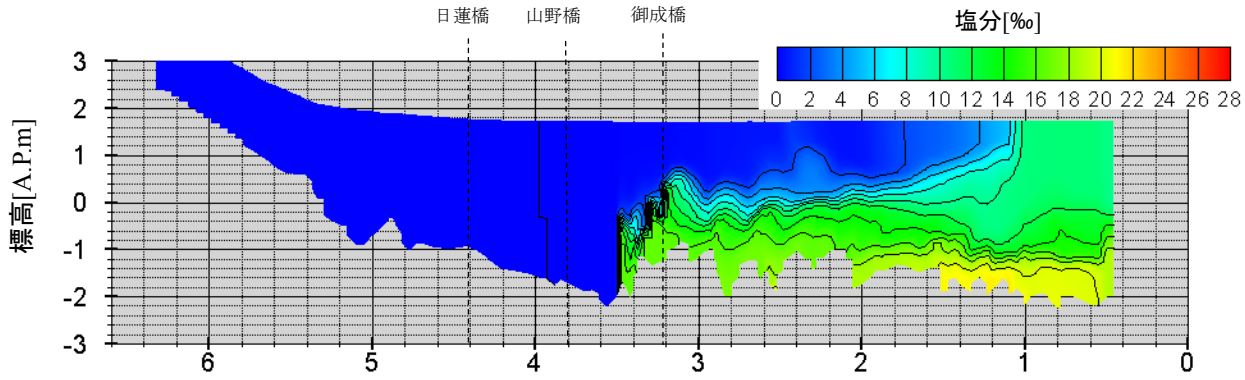


図 4-21　出水第 2 ピーク時の塩分縦断分布（2017/7/29 22:00）

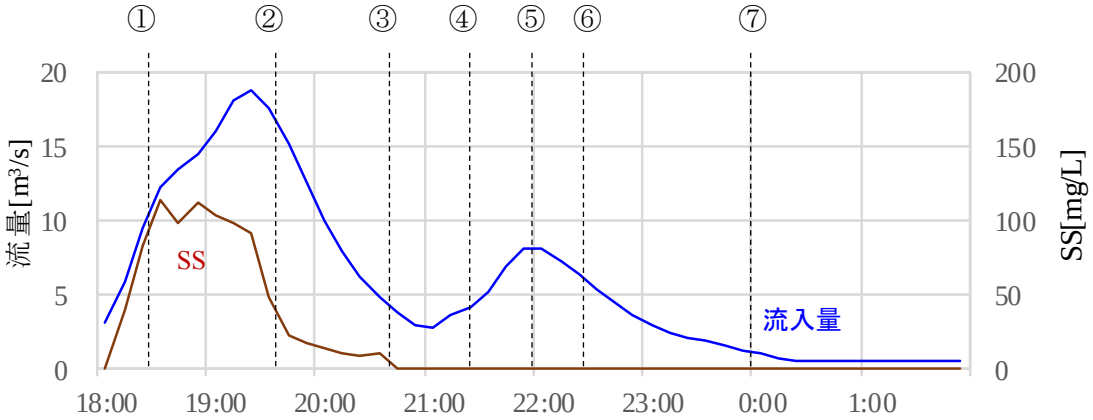


図 4-22 2017/7/29 出水の流入量・SS のハイドログラフ

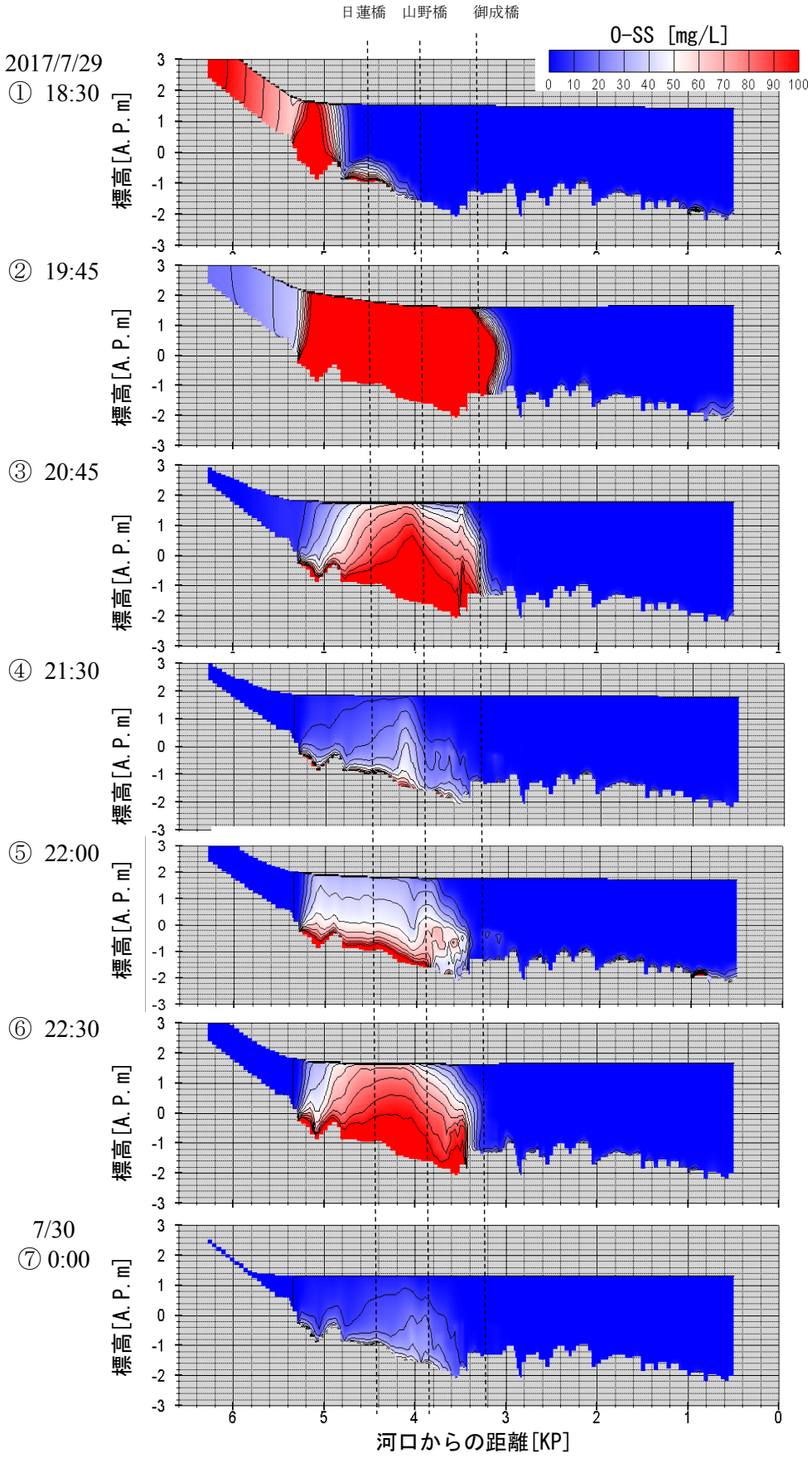


図 4-23　2017/7/29 出水における O-SS の縦断分布

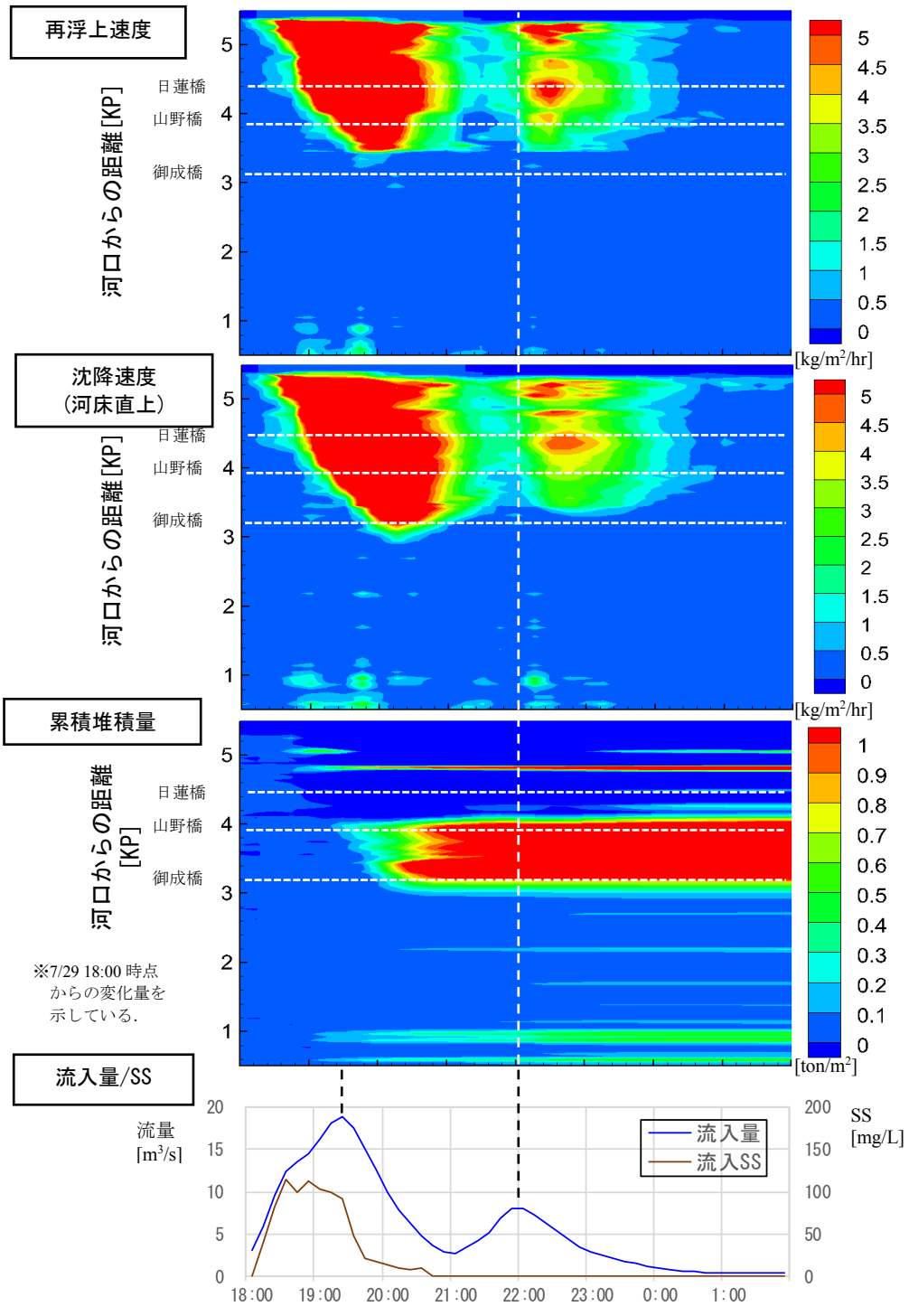


図 4-24　2017/7/29 出水における O-SS の河床面における
再浮上速度，沈降速度，累積堆積量の時空間分布

日蓮橋，山野橋，御成橋に設置した sediment trap（開口部内径 8.5cm，高さ 24.4cm）で捕捉された土砂量（表 4-4）と計算結果を比較する．ただしいったん捕捉された土砂は再浮上できないので，比較する計算結果は図 4-24 の累積堆積量ではなく，単位時間当たり沈降量の時間積分値である．両者の相関を図 4-25 に示す．5 期間 3 地点なので 15 点あるが，ばらつきは非常に大きい．この原因は堆積量の空間分布が河床形状により微妙な影響を受けるために，ピンポイントの計算結果の再現性には問題があるからだと思われる．

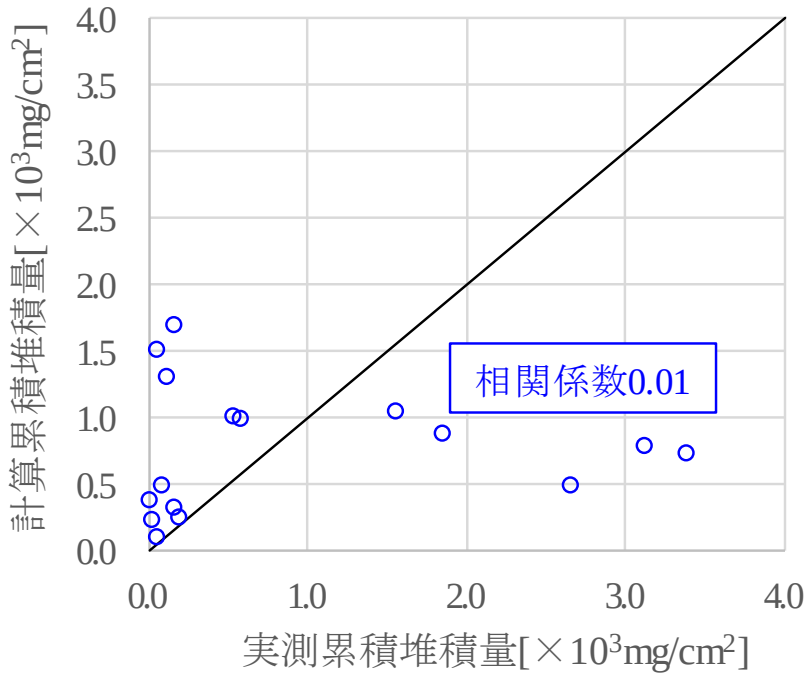


図 4-25　sediment trap 堆積量の実績と計算結果の比較

一方，図 4-23，図 4-24 で示したように O-SS の運動は主に御成橋上流で生じることから，3 地点の平均堆積量で整理すると図 4-26 の●のようになり相関性は高くなる．ただし観測値の大きかった設置期間Ⅴの計算値は観測値よりかなり小さい．表 4-5 からわかるように河道堆積物の強熱減量は上流の下水幹線で採取された土砂の強熱減量（70%）より小さいことから，下水道以外の土砂供給（例えば元河床の洗堀など）が含まれていた可能性がある．そこで累積堆積量に強熱減量を乗じて有機懸濁物量の収支を調べたところ，図 4-26 の△のように高い相関が得られた．このような整理は理論的にはやや曖昧で今後の検討を要するが，下水道モデルと河道水理モデルを連結することにより汽水域における有機懸濁物の堆積過程を推定できる可能性は示されたと思われる．

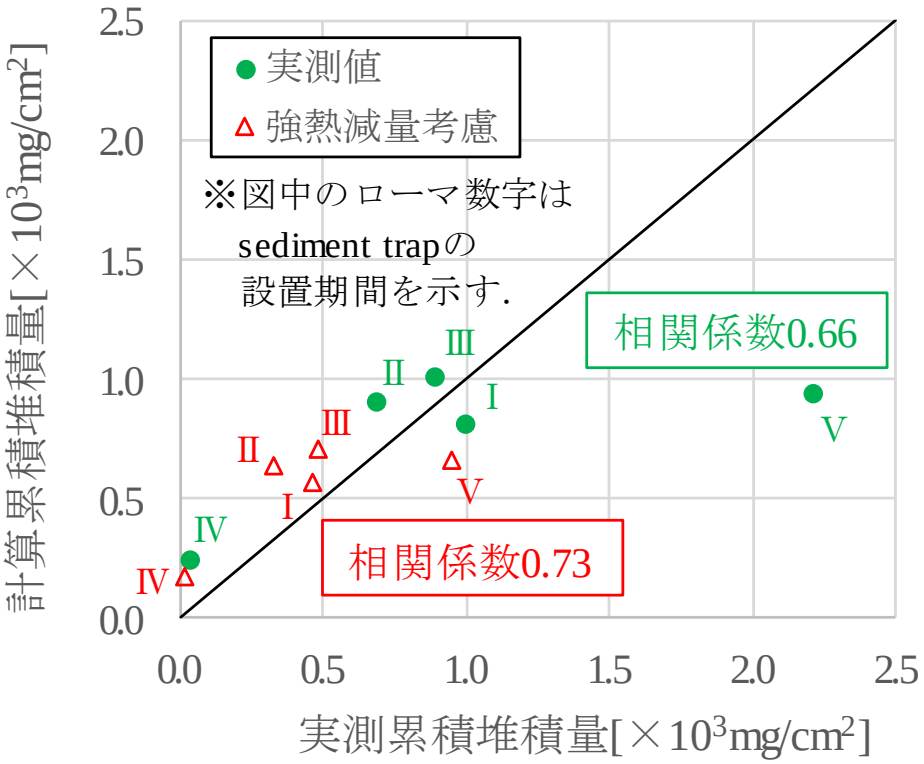


図 4-26　3 地点の平均堆積量の比較

4-5　結語

4-5-1　得られた知見

本章では，MIKE URBAN をベースにして作成された合流式下水道モデルと一次元不定流モデルを用いて呑川汽水域上流端に達する O-SS の負荷量の時間変化を求め，これを境界条件として汽水域流動モデルにより O-SS 堆積量を推定する方法について検討した．その結果を現地において sediment trap で捕捉した堆積量と比較したところ，地点ごとの相関はばらつきが大きかったものの，堆積が主に進行する呑川 3~5KP の単位面積あたり沈降量との相関はある程度認められた．また強熱減量を乗じた有機懸濁物量についての相関はかなり高かった．モデルを更に厳密化して改良する必要性はあるものの，現象のアウトラインはある程度説明できたものと思われる．

4-5-2　課題

今後の課題は以下の点である．

- 地点別の累積堆積量については，計算結果と実測の堆積量の相関はよくなかった．この原因として，堆積量の空間分布が河床形状により微妙な影響を受けることが考えられる．より正確な比較を行うために，現地において sediment trap のように点の観測ではなく，平面的な堆積汚泥の分布が把握できれば，検証データとしてより信頼できる．
- 有機汚泥の再浮上について，今回は汎用的なソフトウェアに適用されている以下の Lane & Kalinske の式を用いたが，他の方法を用いることで，再現性が改善される可能性がある．

【参考文献】

1) George Voulgaris，Samuel T. Meyers：Temporal variability of hydrodynamics, sediment concentration and sediment settling velocity in a tidal creek，Continental Shelf Research Volume 24, Issue 15，pp.1659-1683，2004 DOI: 10.1016/j.csr.2004.05.006
2) 安立重昭：塩水中におけるベントナイトのフロック形成について：港湾空港技術研究所　資料　0421，1982.
3) 大竹 剛史・AYURZANA Badarch・細山田得三：河口から放出される土砂と海水の混合による沈降促進を考慮した浮遊土砂の数値計算，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol. 72, No. 2, I_1309―I_1314, 2016. DOI: 10.2208/kaigan.72.I_1309
4) 小枝豪志・中下慎也・駒井克昭・日比野忠史：有機懸濁物質の沈降過程に及ぼす塩分の影響，土木学会論文集B2（海岸工学）Vol. 66，No.1，1156-1160，2010. DOI: 10.2208/kaigan.66.1156
5) 中沢 均，大森信慈，田中和博：都市下水を対象とした回分式活性汚泥法に関する研究（１）ーパイロットプラントによる処理性能ー，下水道境界誌 Vol.27 No.308，1990.
6) 山崎正夫，津久井公明：河川におけるスカムの発生に関する研究（その１）スカムの起源に関する研究，東京都環境科学研究所年報1991，171-179，1991.
7) William J.Walker，Richard P. McNutt，Carol Ann K. Maslanka：The potential contribution of urban runoff to surface sediments of the Passaic River: Sources and chemical characteristics, Chemosphere Volume 38, Issue 2, January 1999, pp.363-377，1999. DOI: 10.1016/S0045-6535(98)00186-6
8) A. Casadio，M. Maglionico，A. Bolognesi，S. Artina : Toxicity and pollutant impact analysis in an urban river due to combined sewer overflows loads，Water Science & Technorogy，61 (1): 207-215.，2010. DOI: 10.2166/wst.2010.809
9) 土屋 十圀，岡田 光正：都市河川の感潮域における水質と汚濁堆積物の挙動，水環境学会誌 Vol.15，No. 7，　443-449.，1991. DOI: 10.2965/jswe.15.443
10) 林秀彦・高坂信章・石塚与志雄・守田優：都市中小感潮河川における強降雨時の水質変動と汚濁負荷，土木学会論文集B1(水工学) Vol.69, No.4, I_1723-I_1728, 2013. DOI: 10.2208/jscejhe.69.I_1723
11) 大坪 国順，村岡 浩爾：底泥の再浮上現象の現地観測およびそのシミュレーション，土木学会論文集第387号/II-8，1987. DOI: 10.2208/jscej.1987.387_189
12) 中野 晋，鶴谷広一：底泥床上の底面せん断応力と底泥運動，第35回海岸工学講演会

論文集，342-346，1988. DOI: 10.2208/proce1970.35.342
13) 梅田信・長峯知徳・長広遙・石川忠晴・宇多高明：霞ケ浦湖心部における底泥の巻き上げ過程に関する研究，水工学論文集,第45巻，1171-1176，2001. DOI: 10.2208/prohe.45.1171
14) 阿部真己，中下慎也，日比野忠史：感潮域における堆積有機泥の巻き上げ機構のモデル化，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol. 67，No. 2，I_1146-I_1150.，2011.
15) 二瓶 泰雄・山崎 裕介・西村 司・丸山 透：都市河川における易浮遊性堆積物環境の検討，水工学論文集,第48巻，1447- 1452. 2004. DOI: 10.2208/prohe.48.1447
16) 細川恭史，堀江毅，三好英一，加藤道康：沿岸域におけるけん濁粒子の沈降速度測定法についてー数種の測定法の比較ー，港湾技研資料 No.433, 1982.
17) 土木学会水工学委員会 環境水理部会：環境水理学, 135, 2015.
18) JFE アドバンテック 株式会社 海洋・河川事業部，海洋・河川事業部製品カタログ Vol.6，7，2016.
19) XU, X., Ishikawa, T., Nakamura, T.: Three-dimensional modeling of hydrodynamics and dissolved oxygen transport in Tone River Estuary, Journal of JSCE, Vol.1,194-213, 2013. DOI: 10.2208/journalofjsce.1.1_194
20) 中村恭志，菊池喬，石川忠晴: 東北地方太平洋沖地震に伴う河床地形変化が北上川塩水挙動に及ぼす影響の数値流動解析による検討，河川技術論文集, 第19 巻, 537-542, 2013.
21) 石川忠晴，松延和彦：利根川汽水域における細粒底質の流送に関する数値シミュレーション，土木学会論文集B1（水工学），Vol.68, No.4. I_1729-I_1734, 2012.
22) 中村 恭志：TITech-WARM貯水池シミュレーター User Manual，2012.
23) Hiroshi Takebayashi：iRIC Software Morpho2D Solver Manual，2011.

なお，本章の内容は，下記の論文で公表済みである．

1) 三浦 心，石川忠晴，中村恭志，古田島樹，前田卓見，金子拓史：東京都呑川における有機性懸濁物の堆積とスカム発生に関する現地観測，土木学会論文集B1(水工学) Vol.74, No.4, I_523-I_528, 2018. DOI: 10.2208/jscejhe.74.I_523
2) 三浦 心，中村 恭志，石川 忠晴，古田島 樹：数値シミュレーションによる東京都呑川汽水域における有機性懸濁物堆積過程の検討，土木学会論文集B1(水工学) Vol.74, No.5, I_475-I_480, 2018.

第5章　嫌気性ガスの生成・スカム発生

5-1　緒言

5-1-1　本章の目的

「第 3 章 合流式下水道からの有機懸濁物の流出」と「第 4 章 有機懸濁物の河川感潮域における堆積」により有機懸濁物（O-SS）の流入・堆積について評価が可能となった．本章では，これらの結果を踏まえ堆積・フロック化した有機汚泥内および底層水の嫌気化，嫌気性ガスの生成，スカム発生・消失に関わる生化学的なプロセスについて鉛直二次元密度流モデル（TITech-WARM）に組込み，これらのプロセスを定量的に追跡できるようにすることを目的としている．

河床に堆積・フロック化した有機汚泥内では，好気性分解から脱窒，鉄・マンガン還元，硫酸還元を経てメタン生成に至り，メタン（CH_4）などの嫌気性ガスを生成する．また，これらの嫌気性ガスは有機汚泥中の水温や圧力に応じてガス化したり，水中に溶解したり形態を変化させる．さらに，嫌気性ガスが有機汚泥の重量を上回ると，有機汚泥が浮上して，スカムとして水面を浮遊する．やがてスカムに付着した嫌気性ガスが放出されるとスカムは徐々に沈降・減少し，最終的には消失する．これらのプロセスについて，室内試験結果によりモデル化した．

また，2017 年に実施したスカムに関する現地観測結果をもとに，モデルの再現性を確認することを目的として検証を行った．

5-1-2　既往の研究と課題

(1)　嫌気性ガスの生成に関する既往の研究と課題

嫌気性ガスの発生に関する研究としては，国内外において温暖化ガスであるメタンの生成について，現地における計測事例が多数存在している [1)~4)]．これらの研究は，各地域におけるメタン放出量を把握するために湖沼や湿地からの生成速度を求めるものであり，水温，塩分や土砂の性状などの影響因子による応答については必ずしも明確ではない．

嫌気性ガスの発生量をモデル化している研究として，堀田ら[5]は運河部の底泥を対象とした実験と現地観測から，嫌気性ガス発生速度の経験式を提示し，牛久保ら[6]は海岸で採取した試料を用いた嫌気性ガス生成速度試験を実施している．また，丸谷ら[7]は，網走湖におけるメタン発生メカニズムの解明のために，現地の底泥を用いた実験を行い，メタン生成フラックスを把握している．しかし，これらの研究で用いられた底泥の強熱減量は30%以下であり，第3章においてsediment trapで捕集された降雨後の堆積物の強熱減量（23～73%）に比較してかなり小さい．（なお，丸山らの網走湖研究での底泥の強熱減量は不明だが，網走湖の底泥の平均的な強熱減量は30%程度である[8].）また，バイオガス発電などのために下水汚泥等の嫌気性分解における嫌気性ガス生成速度はある程度調べられているが[9),10)]，温度以外の影響については不明な点が多い．

そこで，本研究では，室内実験により有機汚泥からの嫌気性ガスの発生速度を把握した．また，水温や塩分などの影響因子を変化させることで，各因子の影響についても把握することとした．さらに，有機汚泥の浮上やスカムの減少について観察を行った．

(2) 嫌気化に関する既往の研究と課題

水中の嫌気化は，有酸素下での好気性呼吸，脱窒，マンガン還元，鉄還元，硫酸還元，メタン生成の順で生じ，後の反応ほど強い還元条件が必要となる．また上位の反応の酸化剤が存在するうちは下位の反応は抑制される．底泥の嫌気化過程については様々な実用的モデル（例えば，松梨ら[11)]）が提案されているものの，それぞれの対象水域に合わせて構築され経験的なパラメータを調整したものが多く，統一的なモデルは少ない．

現時点で最も精密なモデルのひとつとして，これらの反応を反応式から一般化したWijsmanモデルがある．このモデルはJ.W.M.Wijsmanら[12)]が黒海でその適用性を確認している他に，永尾ら[13)]が東京湾の水質と堆積物の再現，入江ら[14)]が大阪湾の硫化水素の生成・蓄積に適用し，いずれも高い再現性を得ている．一方で，このモデルはこれまで主に湖底・海底の堆積物中の栄養塩類や硫化物の追跡に用いられており，嫌気性ガスの生成量の推定に用いた事例はない．そこで，本研究ではWijsmanモデルによって有機汚泥からの嫌気性ガスの発生特性を再現できることを確認したうえで，シミュレーション・モデルに適用することとした．

(3) スカムに関する既往の研究と課題

スカムに関する研究は，国内の研究においていくつか存在する．山崎ら [15) ~ 17)]は神田川等における現地調査に基づき，出水後の有機汚泥の堆積 ⇒ 嫌気性ガスの発生 ⇒ スカムの浮上 ⇒ 悪臭発生，という過程を現象論的に考察している．また三浦ら [18)]は定点カメラを用いた連続観測から，出水後，潮位低下の際にスカムが発生する傾向を示している．一方，濱田ら [19)]，田辺ら [20)]は，内湾で発生したスカムが粘着性の高い油脂分により相互付着した有機泥であることを示している．これらの研究は主にスカムの発生メカニズムを解明するためのものであり，スカム発生の定量的な評価には至っていない．

スカムのモデル化について，下水処理場での放線菌の増殖によるスカム発生の解析例 [21)]はあるものの，水域での有機汚泥の浮上にともなうスカムをモデル化した研究はこれまで国内外を問わず存在していない．

そこで本研究では，スカム発生を模擬した実験結果をもとに，有機汚泥の浮上（スカムの発生）や消失に関するモデル化を行った．

5-1-3 本研究の特徴

本研究の特徴は下記の 3 点である．

- 下水道内で採取した有機懸濁物を用いて，室内実験により嫌気性ガスの生成速度を把握した．実験においては，想定される河川内での水質分布を考慮し，水温，塩分，強熱減量を指標として，それぞれの特性を把握した．
- 河床に堆積した有機汚泥中の嫌気化について，Wijsman モデルを用いて，呑川汽水域における好気性分解から脱窒，鉄・マンガン還元，硫酸還元を経てメタン生成に至る嫌気化プロセスをモデル化した．これまでの研究では Wijsman モデルは主に堆積物中の栄養塩類や硫化物の追跡に用いられており，嫌気性ガスの生成量の推定に用いた事例はない．そこで，本研究では Wijsman モデルによって有機汚泥からの嫌気性ガスの発生特性を再現できることを確認した．
- 有機汚泥の浮上，スカムの消失特性を把握するために，嫌気性ガスの生成速度試験において発生したスカムを対象に，それらの特性を把握し，スカムのモデル化を行った．また，スカムの移流・拡散については鉛直二次元密度流モデル（TITech-WARM）の表層流速・拡散係数から一次元的に追跡し，水面を浮遊するスカムを定量的に把握できるようにした．

5-1-4　検討フロー

室内実験として，底泥の酸素消費速度試験と嫌気性ガス生成速度試験を実施した．底泥の酸素消費速度試験では，呑川の河川水，底泥を採取し，直径 20cm 高さ 100cm のアクリルパイプを用いて河川水と底泥の酸素消費速度を把握した．また，嫌気性ガス生成速度試験については，直径 4cm 高さ 25cm の小型のシリンジ（注射筒）に有機汚泥を封入し，嫌気性ガスの生成速度を把握した．これらを用いて 5-4 節において数値モデルの構築に反映させている．

現地調査では，感潮域上下流端において自記式水質計を用いた水質観測を行った．これらは 5-4 節において検証のための境界条件として用いている．また，大田区環境課において，多項目水質計を河川内 3 地点に設置したモニタリングや職員によるスカム発生状況などの確認のため河川パトロールが実施されている．これらのモニタリング結果を用いて現地のスカム発生状況について分析を行った．また，定点カメラ調査を行い，それらのデータを用いてモデルの再現性を確認した．

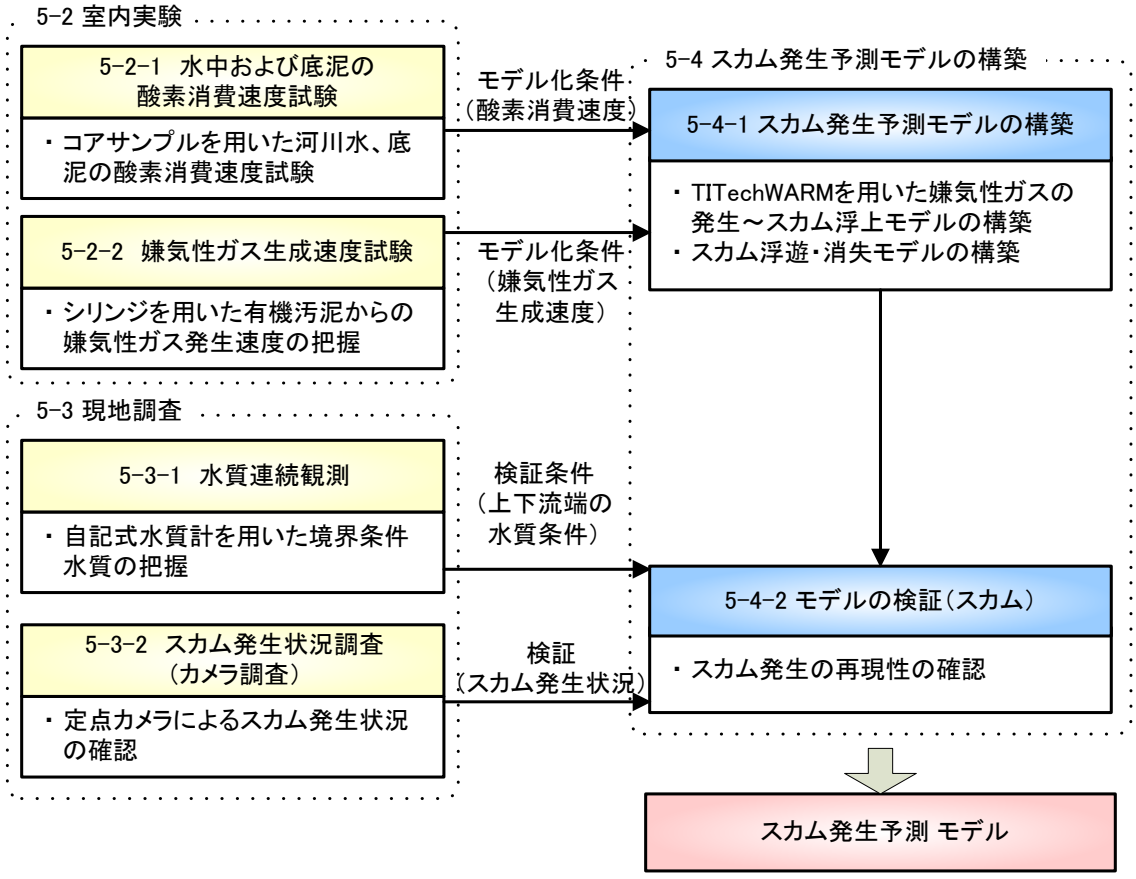


図 5-1　検討フロー（第 5 章）

5-2　室内実験

5-2-1　水中および底泥の酸素消費速度試験

(1)　実験の目的

水中および底泥の酸素消費速度を把握するため，酸素消費速度を把握した．

(2)　実験方法

酸素消費試験は，“底泥+河川水”と“河川水のみ”の 2 ケースについて行った．

酸素消費速度設定のフローは図 5-2 のようになる．まず，水中の酸素消費実験結果から水中の酸素消費速度を算出し，そして，底泥と水中の酸素消費量から水中の酸素消費量を差し引いて，底泥の酸素消費速度を設定している．こうして求めた水中と底泥の酸素消費速度をシミュレーション・モデルへ反映することとした．

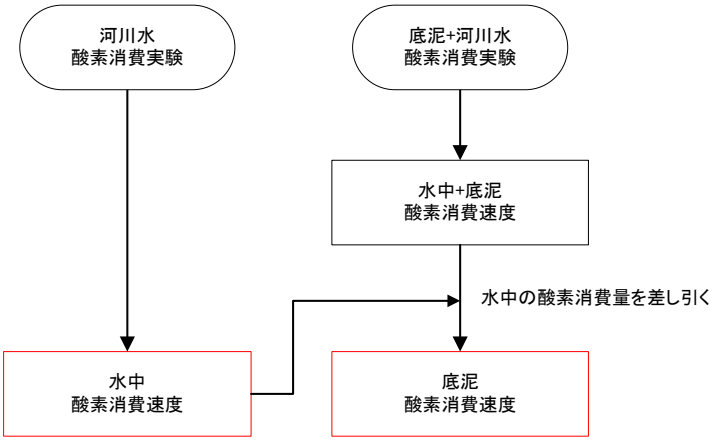


図 5-2　酸素消費速度設定フロー図

1)　試料の採取

採取地点は，底泥の堆積が確認できた山野橋，御成橋，旭橋の 3 地点とした（図 5-3）．

試料の採取は 2010/8/16 に実施した．

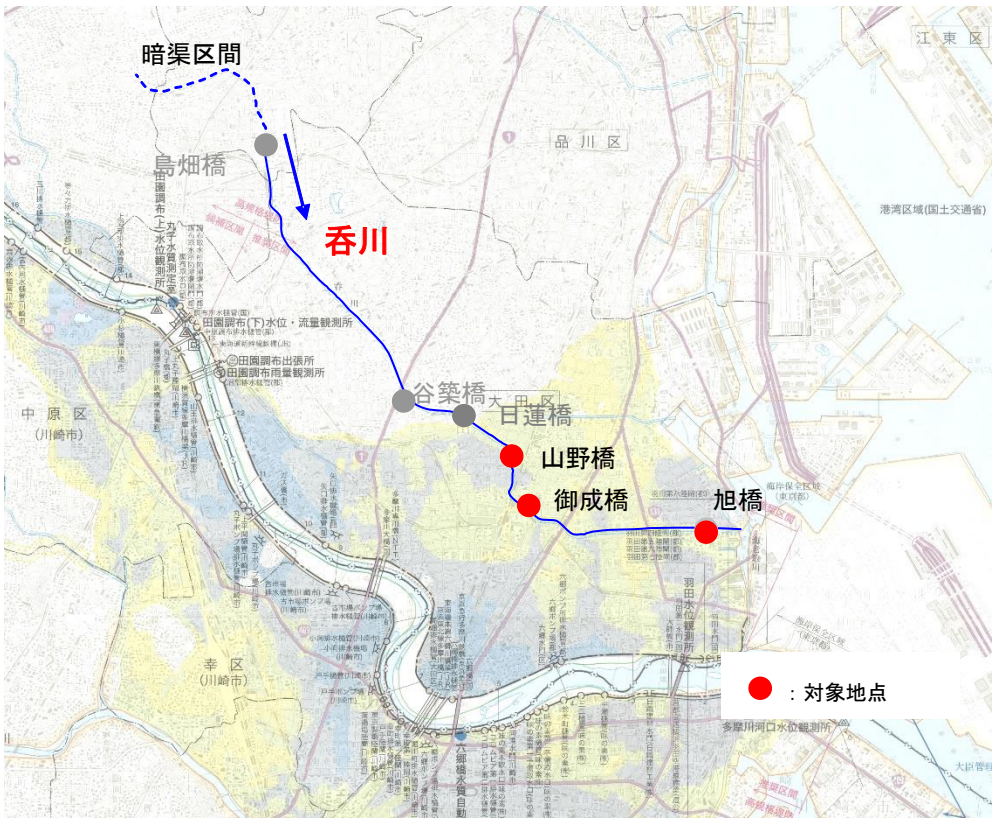


図 5-3　試料採取地点

底泥の採取は，当初底泥と直上水を柱状試料として同時に採取する予定であったが，底泥の堆積厚が 10cm に満たない状況であったため，エクマンバージ採泥器により実施した．採取した底泥の外観を図 5-4 に示す．底層水の採取は，ポンプを用いて河床から 50cm 上の底層水を採水した．

山野橋	御成橋	旭橋

図 5-4　底泥の外観

試料を試験室へ搬入した後，以下の手順で実験準備を行った．

①実験用に恒温槽を 25℃±1℃に設定した．

②底泥を均一になるように混ぜ，アクリル製カラム（φ20cm×1m）に対して，30cm の厚さになるようにつめた．

③底層水は夾雑物を除くためにろ過を行い，ポンプ曝気により溶存酸素を飽和させた．その後，底泥の巻き上がりを抑えるために徐々に，満水になるまでカラムに抽水した．

④それぞれの試料について，DO メーター，pH メーター，ORP メーター，サイフォンなどを取り付け，ゴム栓により密封した．計測メーターの設置位置は，底泥面より 20cm 上方とした（下図）．

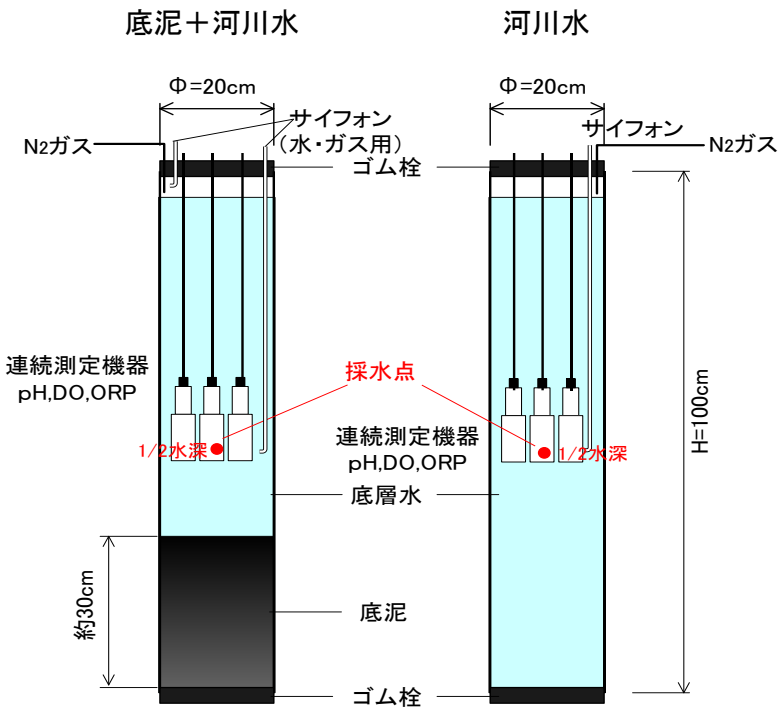


図 5-5　実験の状況

2) **実験方法**

表 5-1 に，期間，測定項目などの実験方法について示す.

表 5-1　実験方法

項　　目	内　　容	
	底泥+河川水カラム	水カラム （コントロール）
本数	3 本	3 本
試験温度	25℃±1℃（恒温槽に静置）	
測定期間	1 ヶ月	
連続測定項目	pH，DO，ORP（山野橋，御成橋，旭橋）	

写真 5-1　実験の状況

3) 実験結果

図 5-6 に示す DO 値の経時変化によると，実験開始初期に 7～8mg/l 程度あった DO が，山野橋の底泥では 12 時間後，御成橋の底泥では 78 時間後，旭橋の底泥では 97 時間後に 0mg/l となり，山野橋の底泥が御成橋および旭橋の底泥に比較して酸素消費速度が速いことがわかった．これは，他地点の底泥に比べ，山野橋の底泥が有機物の分解等により多くの DO を消費することを表している．

河川水カラムについては，山野橋と御成橋でおよそ 72 時間程度，旭橋で 120 時間程度であった．

また，図 5-7 に底泥＋河川水カラムと河川水カラムの DO 変化の比較を示した．山野橋については底泥カラムの方が速く DO が 0mg/L となっているが，御成橋と旭橋においては大きな差がない．

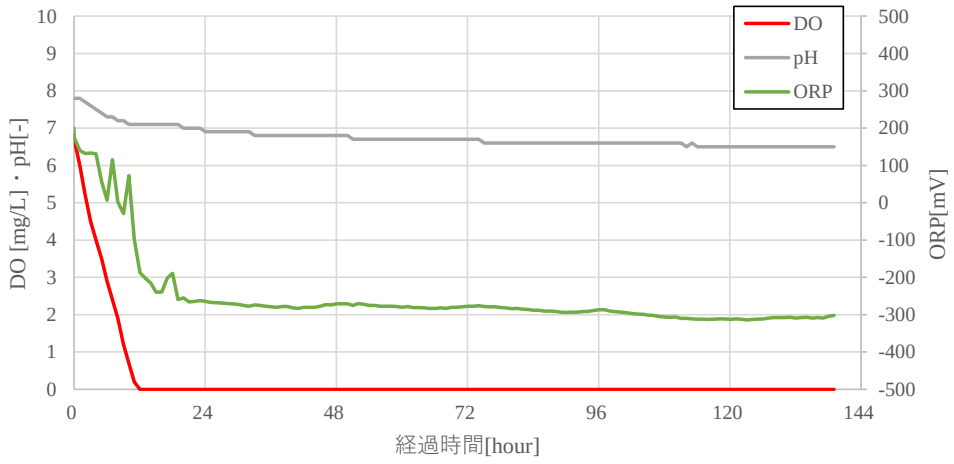
これらから，3 地点における底泥，河川水の酸素消費速度を表 5-2 のように算出した．なお，底泥の酸素消費については，河川水分の酸素消費速度を差し引いて求めている．

表 5-2　底泥と河川水の酸素消費速度

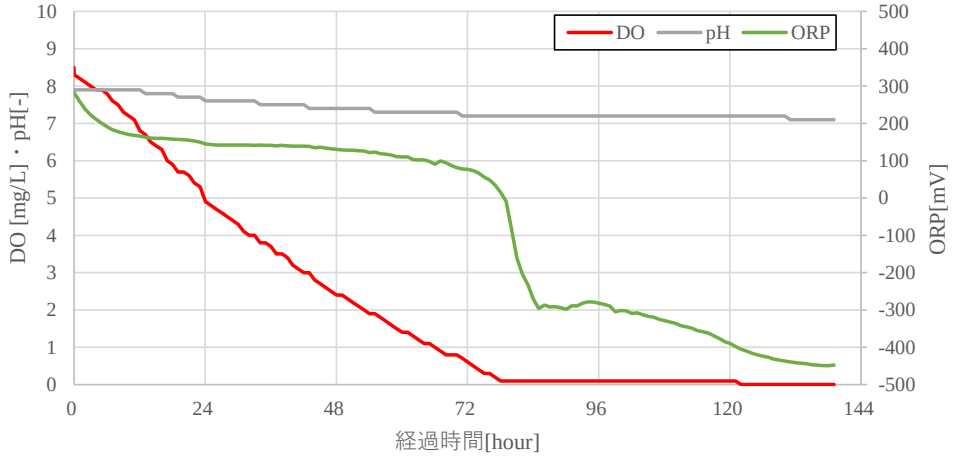
	底泥の酸素消費速度 [mg/m^2/day]	河川水の酸素消費速度 [mg/L/s]
山野橋	144.	2.6
御成橋	0. ※1	
旭橋	0. ※1	

※1）御成橋，旭橋は底泥カラムと河川水カラムを比較すると河川水カラムの方の酸素消費が速かったため，底泥の酸素消費速度はゼロとした．
※2）水中の酸素消費速度は，山野橋と御成橋の実績から一律として設定した．

山野橋



御成橋



旭橋

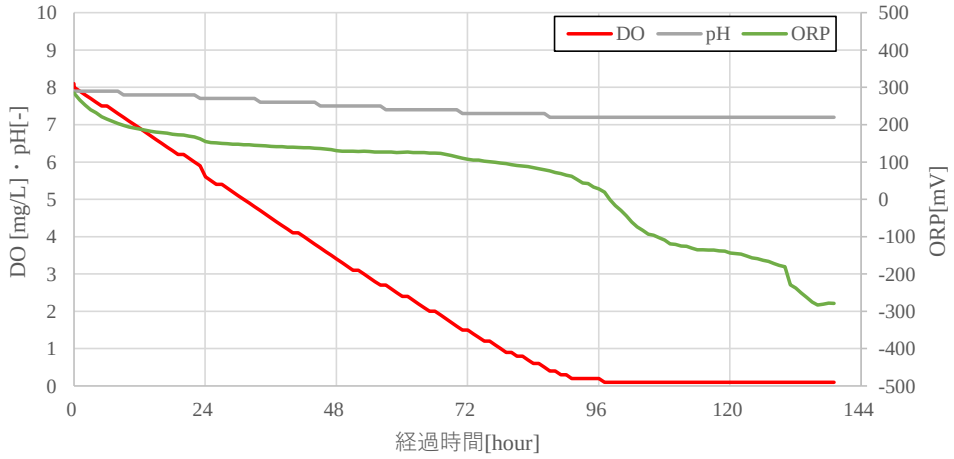
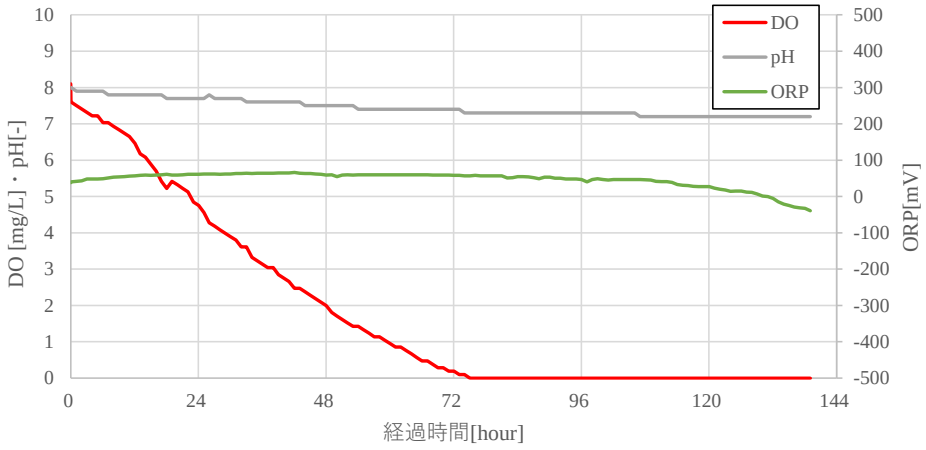


図 5-6　酸素消費速度試験結果

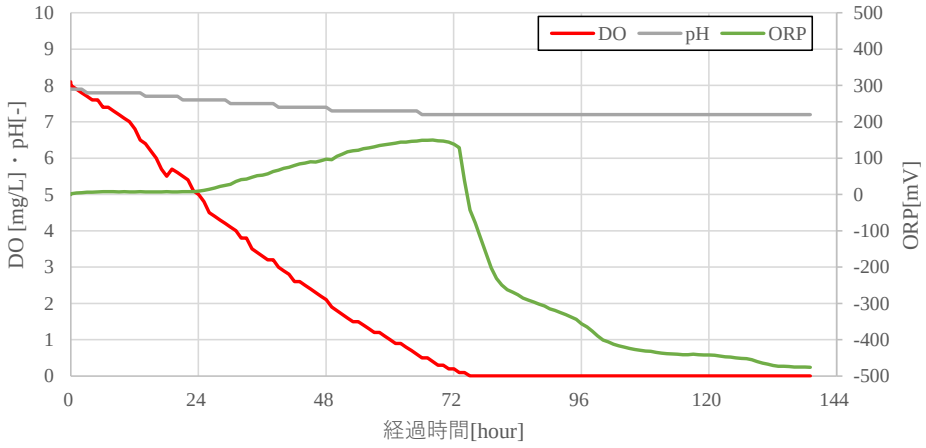
（底泥+河川水カラム）

河川水

山野橋



御成橋



旭橋

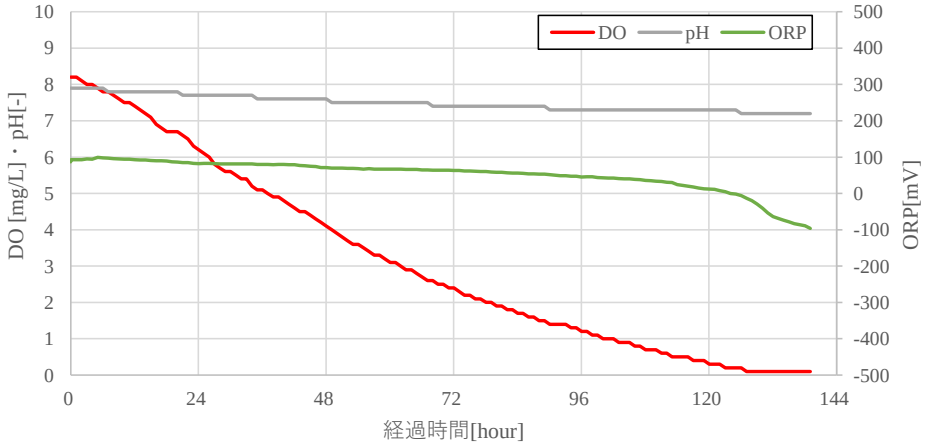
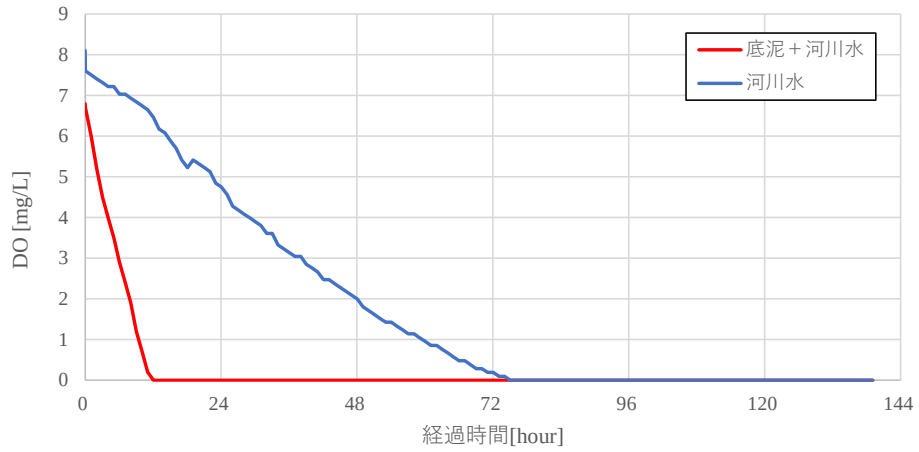


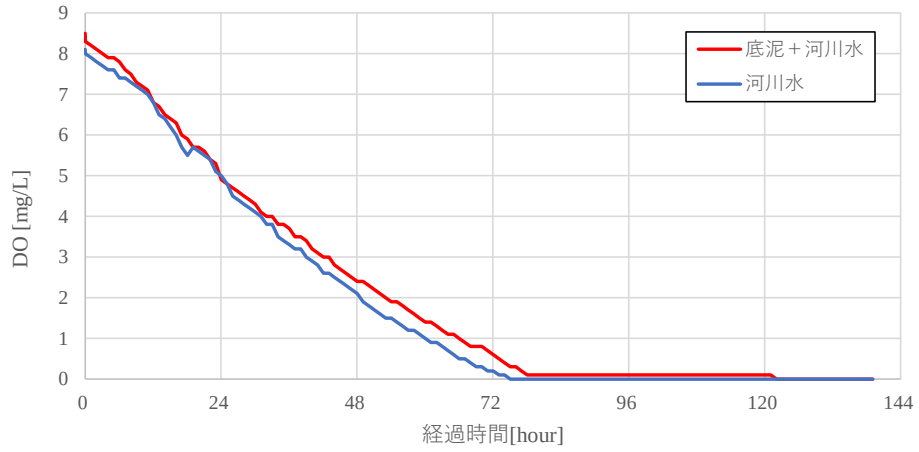
図 5-6　酸素消費速度試験結果

（河川水カラム）

山野橋



御成橋



旭橋

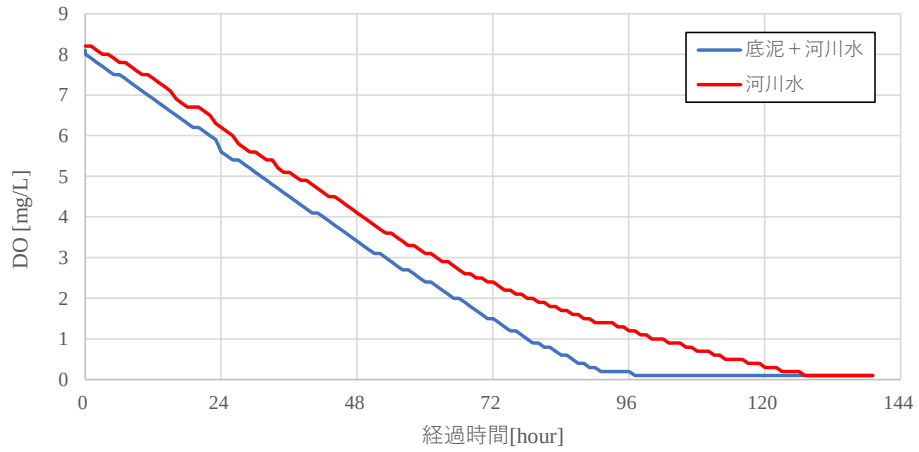


図 5-7　底泥+河川水カラムと河川水カラムの DO 変化の比較

5-2-2　嫌気性ガス生成速度試験

有機汚泥に対し嫌気性ガス生成速度試験を行い，沈降・堆積特性を把握する．

(1)　実験の目的

呑川流域内の合流式下水道で採取した有機汚泥からの嫌気性ガス発生とスカムの浮上を模擬した基礎実験を行い，それらの水温，塩分等による嫌気性ガス生成速度の応答を定量的に把握した．また，有機汚泥の浮上，スカムの消失特性について観察を行った．

(2)　実験方法

1)　使用する機材

ア　シリンジ（注射筒）

使用する機材は，市販のシリンジから，下記の観点で表 5-3 に示すシリンジを選定した．

・本体が透明なもの
・容量の大きなもの（市販のシリンジはほとんどが 100ml 以下）
・計測できるメモリが入っているもの
・取扱いが安全なプラスチック製またはアクリル製のもの
・先端がキャップやコックで開閉できる構造となっていること

LIVARE シリンジ プラスチック 250ml

図 5-8　使用するシリンジ

表 5-3　使用するシリンジ

	諸　　元
メーカー	LIVARE（中国）
型番	SA-169
大きさ	H250mm×Φ45mm
内径	約 42.65mm（断面積 14.3cm^2）
容量	250ml（最大 275ml）

※一部改造して使用（押し棒が外れるようにする．付属したキャップに止水処理）

イ　定点カメラ

連続的に堆積厚，スカム発生状況を把握するために，定点カメラを使用した．

表 5-4　使用する定点カメラ

	諸　　元
メーカー	brinno（米国）
型番	CBR-TLC2000
大きさ	W64mm×H106mm×B46mm
画質	1280 pixel×720pixel

2) **試験ケース**

試験ケースは，下水堆積物の投入量，水温と塩分と圧力を変化させて実施した．

実験ケースを表 5-5 に示す．

表 5-5　試験ケース一覧

Case	強熱減量 [%]	単位面積あたり投入 [mg/cm2]	浮泥厚 [cm]	温度 [℃]	塩分 [‰]
1	79	235	4.0	25.0	0.4
2	79	117	3.3	25.0	7.4
3	79	82	2.2	25.0	0.4
4	79	352	6.8	25.0	0.4
5	79	176	4.1	25.0	0.4
6	79	117	2.7	25.0	13.2
7	70	210	4.8	25.0	9.6
8	70	210	4.2	25.0	10.0
9	70	70	2.2	25.0	10.0
10	70	559	8.1	25.0	10.0
11	70	245	5.2	20.0	10.0
12	70	245	5.0	30.0	10.0
13	70	210	4.3	25.0	0.4
14	70	210	4.0	25.0	20.1
15	70	210	4.8	15.0	10.0
16	70	280	5.0	10.0	10.0
17	70	280	5.6	25.0	14.8
18	70	280	5.3	25.0	17.8
19	70	280	5.0	25.0	19.1

3) 実験方法

a) 実験に用いた試料

呑川流域中流の排水区のマンホール下の堆積物を 2 か所で採取した．それらの特性の分析結果を表 5-6 に示す．有機分が多く弱酸性で嫌気化していることがわかる．また電気伝導度は淡水と同程度であった．これらの試料を未処理のまま実験に用いた．

表 5-6 実験に用いた有機汚泥

	COD [mg/g-dry]	強熱減量 [%]	pH [−]	ORP [mV]	電気伝導度 [mS/cm]
試料 1	275	79	6.71	-68	0.22
試料 2	286	70	6.64	-123	0.37

b) 実験準備

① 下水堆積物の投入

採水した汚泥をポリバケツ等に入れ，沈殿させる．

上澄み液を捨て，ポリバケツ等の底に堆積した下水堆積物の水質を測定し，シリンジに投入する．

【下水堆積物の測定項目】

堆積物：SS，含水率，強熱減量，n-ヘキサン抽出物質

② 押し子を設置

シリンジの外筒に押し子を設置する．

③ 空気抜き

シリンジを逆さにして押し子を押し，空気を追い出す．

④静置

シリンジの筒先を下方に向けて 25±1℃に調整した恒温槽内に静置

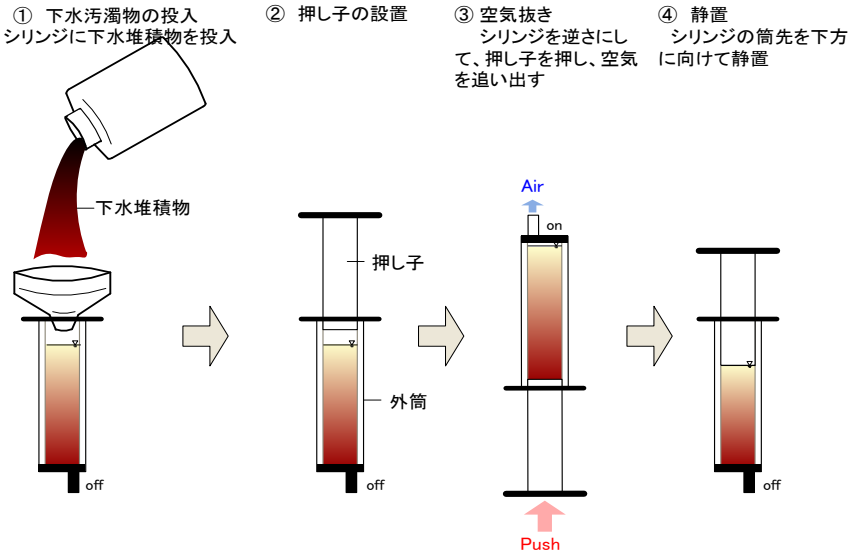


図 5-9　実験準備手順

c)　実験の実施

定点カメラを用いて，シリンジ内の下記の層厚を 10 分毎に観測する．

実施する期間は，現地観測の結果から下水越流からスカム発生～スカムの消失までの日数が概ね 2 日であることから，2.5 日間（設置から 60 時間）とした．

H_{gas}：気相の層厚[cm]
H_{scum}：スカム（浮上堆積物）の層厚[cm]
H_{liq}：液相の層厚[cm]
H_{sed}：堆積物の層厚[cm]

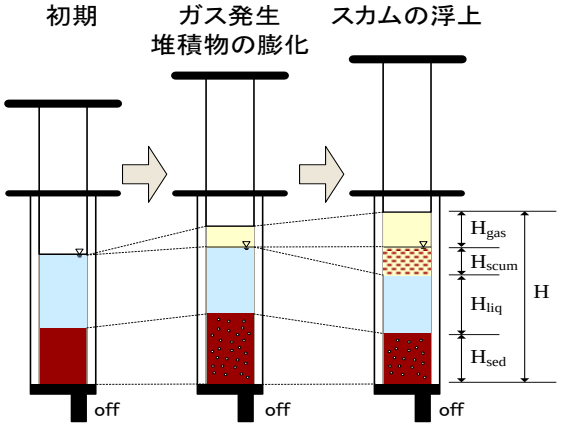


図 5-10　シリンジ内の層厚の変化イメージ

(3)　実験結果

a)　実験結果のとりまとめ

実験結果より，以下の項目のとりまとめを行う．

① 嫌気性ガス発生速度

堆積変化より，ガス生成速度を把握する．

② 堆積量と堆積厚の関係

投入した下水堆積物の水質と投入後の堆積厚より，堆積量と堆積厚を推定する．

③ スカム浮上に必要なガス量

浮上したスカム厚と直前の堆積厚より，スカムの浮上に必要なガス量を推定する．

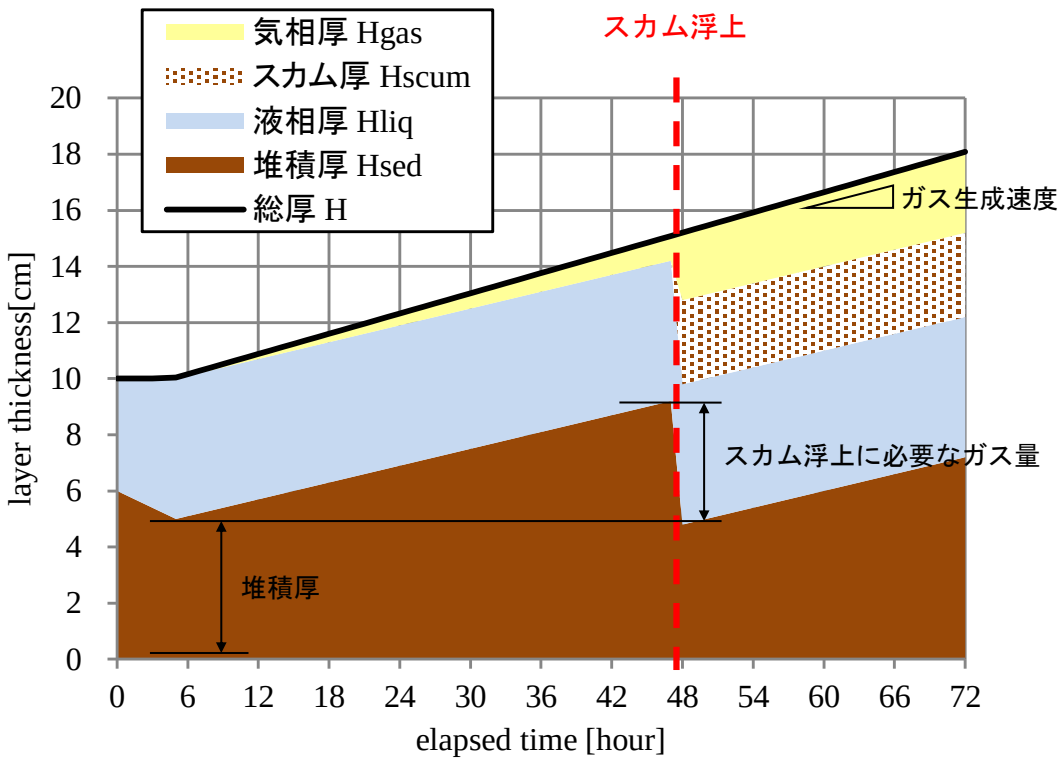


図 5-11　試験結果のとりまとめイメージ

写真 5-2(1)　嫌気性ガス生成速度試験の様子（Case1～3，開始から 15 時間 16 分後）

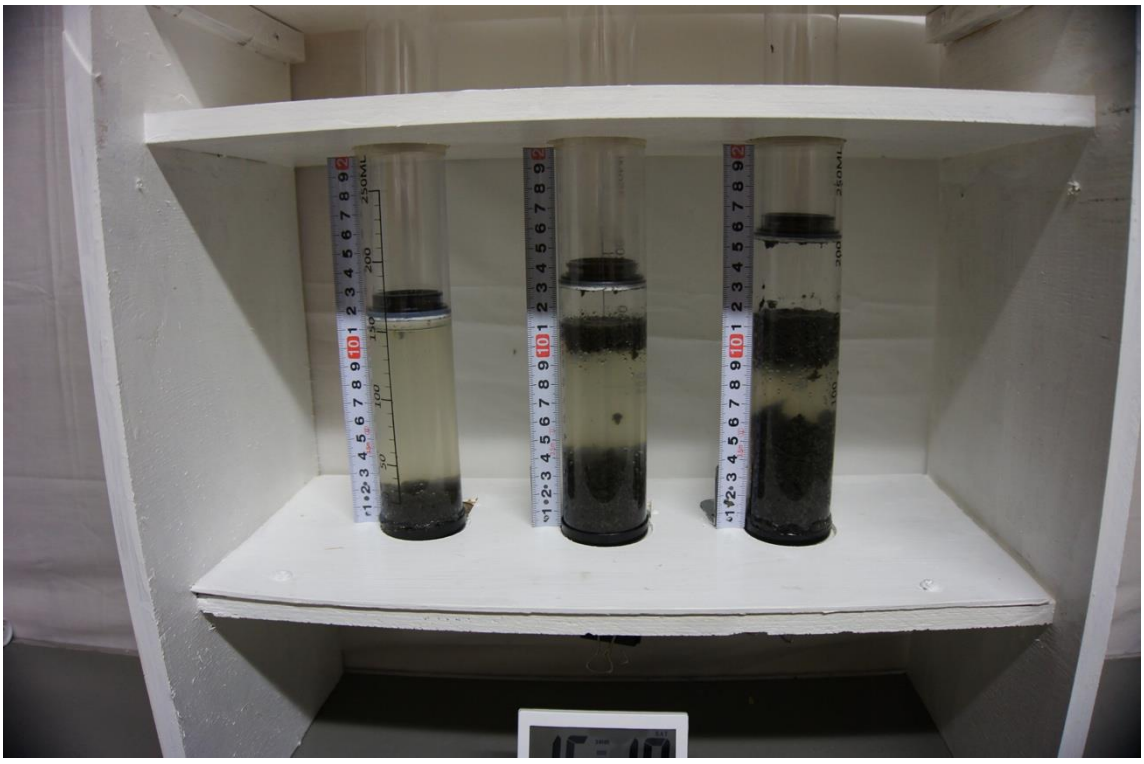


写真 5-2(2)　嫌気性ガス生成速度試験の様子（Case1～3，開始から 15 時間 16 分後）

写真 5-2(2)　嫌気性ガス生成速度試験の様子

（Case1’&6～9，開始から 5 分後）

2) 試験結果

a) 実験経過の概要

試料 1 を用いた標準条件におけるシリンジ内の状態変化を図 5-12 に示す．実験開始から t=2 hour までは，圧密のために浮泥層がわずかに収縮した．t=2～3 hour では浮泥が膨潤するとともにピストンが上昇し始めた．すなわち浮泥層内でガスが発生して空隙が増加したものと考えられる．t=3 hour で浮泥層の上部 2/3 が分離してスカムとなりピストン下面まで上昇した．浮泥層内で生成した微細な気泡により浮力が発生したためと考えられる．t=6 hour になるとピストンの上昇速度が増加して一定速度に達した．このことからガス生成速度は定常状態に達したと考えられる．t=12 hour 以降ではスカムとピストン下面の間にガス層が現れ自由水面が形成されるとともにスカムが徐々に沈降して浮泥層が厚くなっていった．これは主にスカム内の微細気泡が合体して上方に抜け出たためであると考えられる．また目視によれば浮泥層からの微細気泡の上昇も観察された．なお，一度沈降したスカムが再浮上することはなかった．

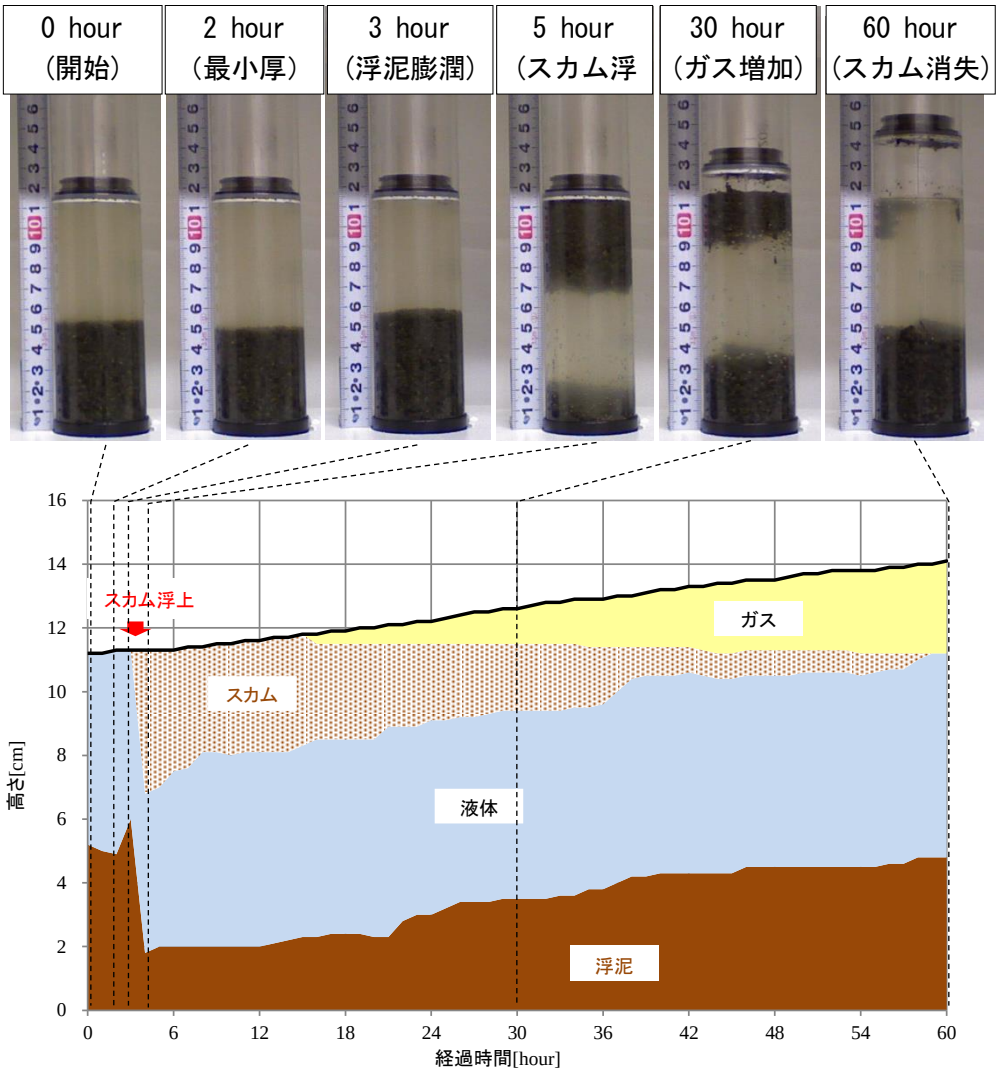


図 5-12　シリンジ内の堆積物の変化(標準ケース)

全ての実験ケースにおいて上記とほぼ同様の経過が見られたことから，ピストンの上昇が安定した t=12hour～60hour の平均上昇速度を単位面積当たりのガス生成速度とし，実験条件によるガス生成速度の変化を以下に整理した．

b)　汚泥投入量によるガス生成速度の変化

標準条件から汚泥投入量のみを変化させた場合のガス生成速度の変化を図 5-13 に示す．単位面積あたりの汚泥投入量の範囲は，600mg-dry/cm^2 以下である．これからガス発生量は汚泥投入量に概ね比例することがわかる．すなわち嫌気性ガスの生成は，浮泥層全体でほぼ均一に生じているものと推察される．なお図中の関係は次式で近似される．

$$P_0 = 0.0048W \qquad (5\text{-}1)$$

ここに，P_0 : 標準条件における嫌気性ガス生成速度 [cm^{3N}/cm^2/day]，W : 単位面積あたり汚泥投入量[mg-dry/cm^2]である．

ところで, 堀田ら [5]は運河における現地観測から嫌気性ガス生成速度と浮泥層厚の間に概ね比例関係が成立するとしており，本研究の結果と類似しているが，比例係数は異なっている．この点については後ほど考察する．

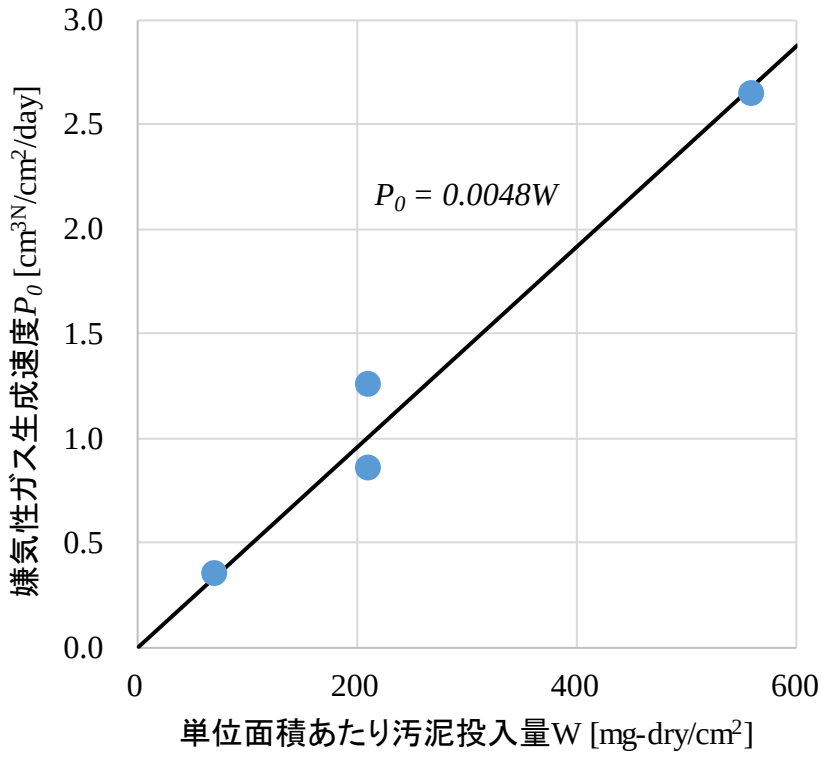


図 5-13　汚泥投入量とガス生成速度の関係

c)　水温によるガス生成速度の変化

標準状態から水温を変化させて行った実験の結果を，標準状態（水温 25℃）からの変化率 θ_T として図 5-14 に示す．実験の対象範囲は呑川の春季～秋季の水温の幅を想定し，10℃～30℃の範囲である．嫌気性ガスの生成速度は水温に対して敏感に変化し，20℃と 30℃では 4 倍以上の開きがある．また 10℃以下ではガスはほとんど生成されない．スカムが主に夏季に発生するのはこのような温度依存性によっているといえる．なお，バイオガスプラントの実験 [10]においても温度依存性が示されているが，20℃と 30℃における差は 2 倍弱であり，本実験の結果に比較すると影響は小さかった．このことは実験材料や環境条件によって温度依存性が異なることを示しており，対象とするフィールドの条件によって実験によるガス生成速度を確認することの必要性を示唆している．

本実験の結果は次式で近似できる．

$$\theta_T = 0.0058(T-10)^{1.9} \tag{5-2}$$

ここに，θ_T：水温補正係数，　T：水温[℃]である．

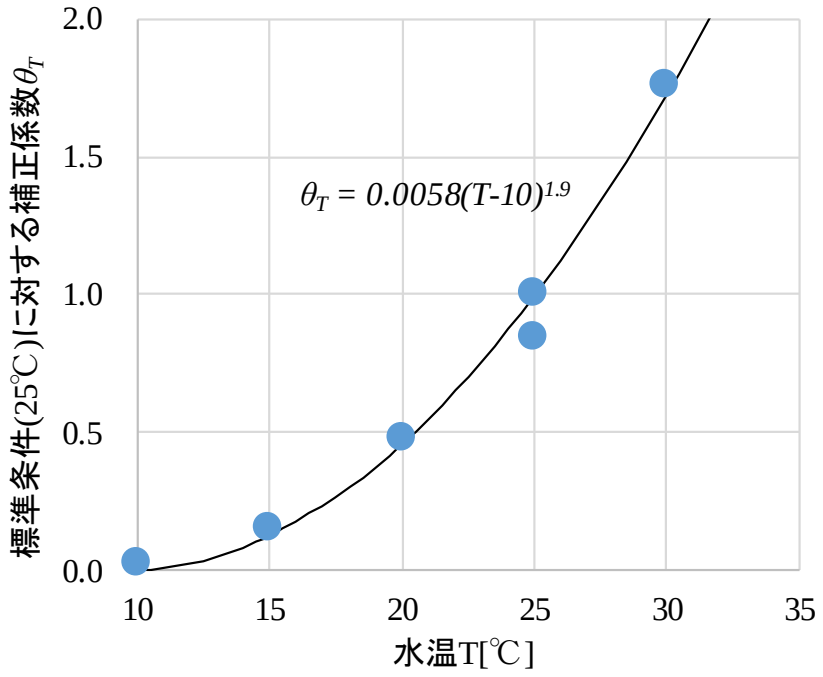


図 5-14　水温によるガス生成速度補正係数

d)　塩分によるガス生成速度の変化

標準状態から塩分のみを変化させて行った実験の結果を，標準状態（塩分 10 ‰）からの変化率 θ_S として図 5-15 に整理した．塩分の増加に伴いガス生成率は急激に減少し，25 ‰を超えるとほぼゼロになる．この原因は，硫化物イオンの増加に伴いメタン生成菌よりも硫酸還元菌の活動が優占することと[6]，後者により発生する H_2S が前者による CH_4 に比較して溶解性が非常に高い（20℃において 80 倍[22]）ことによると考えられる．

本実験の結果は次式で近似できる．

$$\theta_s = -0.08S + 1.8 \qquad (5\text{-}3)$$

ここに，θ_s：塩分補正係数，S：塩分[‰]である．

なお，Hanna ら[23]は多数の湿地や湖沼におけるメタンガス生成量の観測結果を収集し，高塩分になるとメタン生成量が少なくなることを示しているが，各湿地・湖沼における代表塩分の定義やメタン生成速度の計測方法が統一されていないため，定性的な議論にとどまっている．

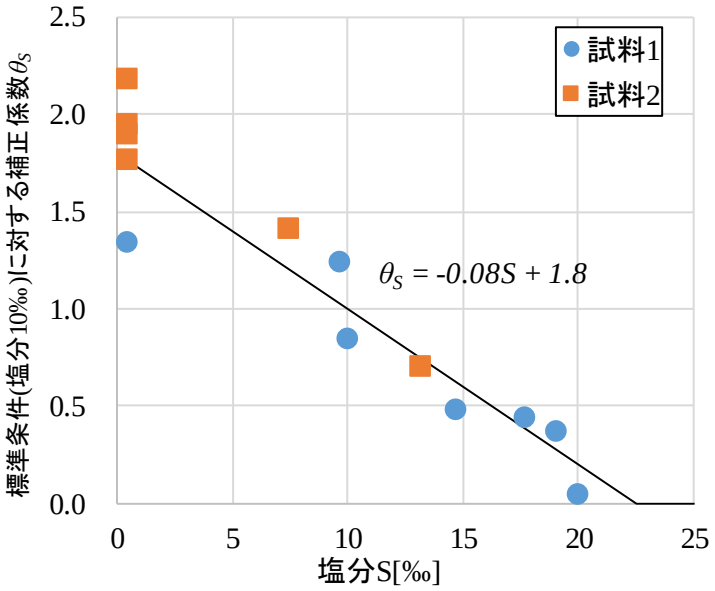


図 5-15　塩分によるガス生成速度補正係数

e)　強熱減量によるガス生成速度の変化

嫌気性ガスの生成速度は，発生源となる有機物量（強熱減量）との相関が高いと考えられる[24]．そこで本実験および堀田ら[5]の現地観測の結果を強熱減量 70%の試料についての実験の平均値を基準としてプロットした結果を図 5-16 に示す．基準値に対するガス生成速度増分 θ_{IL} は強熱減量に対して概ね線形に増加することがわかる．

この結果は次式で近似される．

$$\theta_{IL} = 0.014IL \tag{5-4}$$

ここに，θ_{IL}：強熱減量補正係数，IL：強熱減量[%]である．

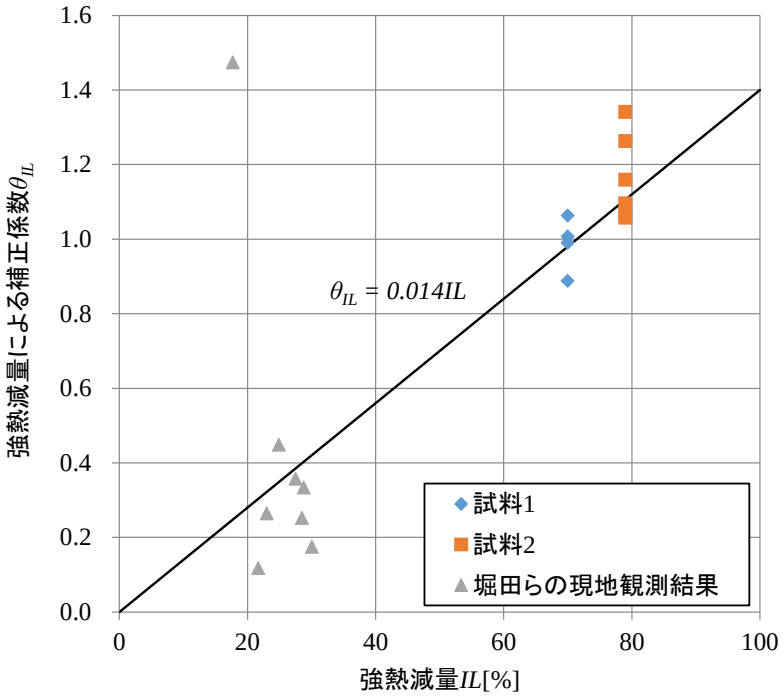


図 5-16　強熱減量によるガス生成速度補正係数

f) 嫌気性ガスの成分

発生したガスの成分分析結果を図 5-7 に示す．表中の横線は分析していない成分である．下段には家畜糞尿や食用油残渣等のバイオガスプラント 10 施設における嫌気性発酵の報告例[25)]（以下，biogas という）も比較のために記している．本実験で発生したガスの約 2/3 は CH_4 であり，biogas とほぼ同じである．一方二酸化炭素は biogas に比較して小さくなっている．この原因として，分解対象とする物質の違いのほかに発酵期間の違い（バイオガスプラントでは 20 日，本実験では 2.5 日）が影響しているのではないかと思われる．また，塩分が 20 ‰に達すると H_2S が CO_2 を上回っている．H_2S は毒性が極めて強いので，微量でも人体および水中生物への影響は無視できない可能性がある．

表 5-7　嫌気性ガスの成分比

	CH_4	CO_2	N_2	H_2S	O_2
塩分 0 ‰	66.3	11.7	-	0.02	-
塩分 10 ‰	64.7	7.4	-	1.02	-
塩分 20 ‰	62.0	4.8	-	5.96	-
biogas[25)]	48-65	31-42	3-16	-	0-4.3

unit:[%]

g)　実験式の適合性

(2)～(5)の結果から，嫌気性ガスの発生速度 P_a は次式で表現できる．ここに P_0 は式(5-1)で表される標準状態のガス発生速度，θ は式(5-2)，(5-3)および(5-4)で求められる各影響因子の補正係数である．

$$P_a = \theta_T \theta_S \theta_{IL} P_0 \tag{5-5}$$

ここに，P_a：嫌気性ガス生成速度 [$cm^{3N}/cm^2/day$]

上式と実験結果の一致度を図 5-17 に示す．

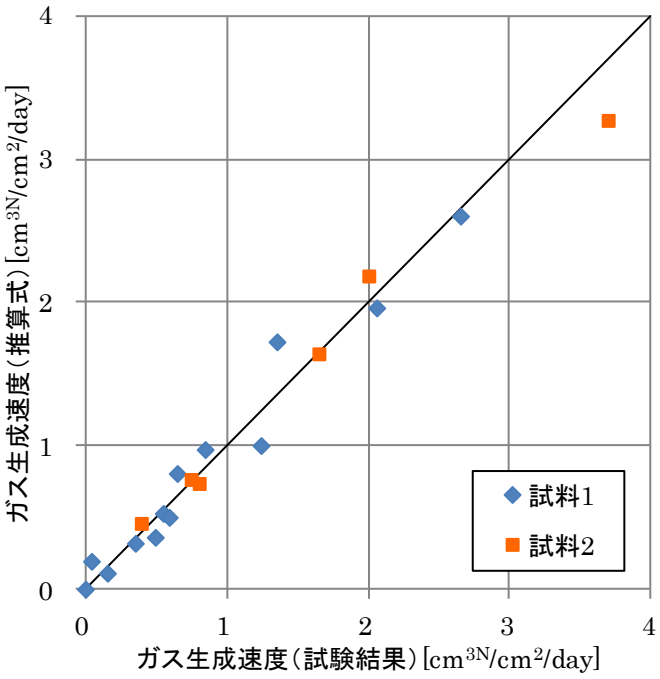


図 5-17　嫌気性ガス生成速度経験式の適合性

h)　スカム発生特性について

図 5-12 に示したように，ガス発生に伴う浮力が限界値を超えると有機汚泥がスカムとして浮上する．そこでガス生成速度と実験開始からスカム発生までの時間の関係を図 5-18 にプロットした．データはかなりばらつくものの反比例する傾向があり，嫌気性ガスの生成総量が汚泥のガス保持能力を超えるとスカムが発生すると考えられ，汚泥の上昇には汚泥のガス保持能力を考慮する必要がある．

また，汚泥投入量と浮上したスカム厚の関係は，図 5-19 に示すように概ね比例関係を示している．

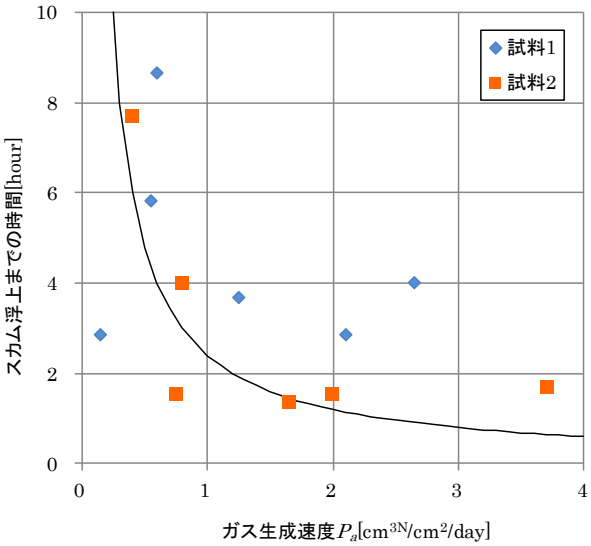


図 5-18　ガス生成速度とスカム発生時間

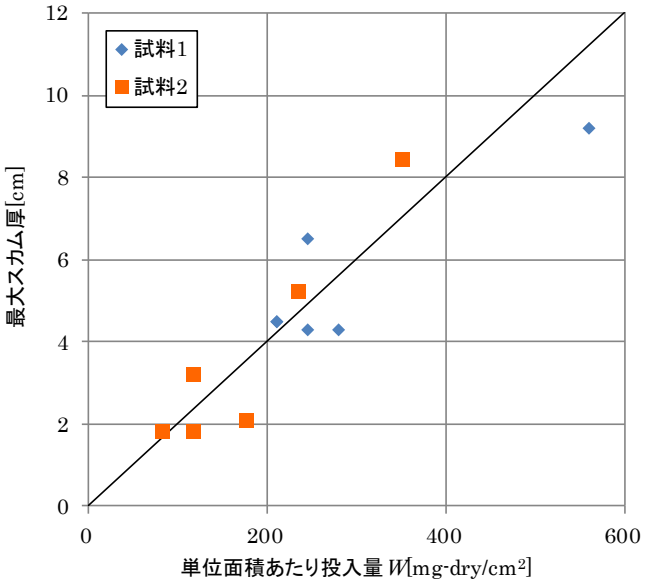


図 5-19 汚泥投入量とスカム厚

5-3　現地調査

5-3-1　水質連続観測

(1)　調査目的

シミュレーションの境界条件として，上流端の水温や下流端の水温，塩分の鉛直分布を把握するため，自記式水質計を上下流端に設置し，水質連続観測を行った．

1)　調査場所

旭橋，養源寺橋の 2 地点とした．なお，環境対策課では大平橋，馬引橋，御成橋地点での観測を行っているそれらのデータについても合わせて整理した．調査地点を図 5-20 に，調査区間の縦断図および水質計の設置水深を図 5-21 に示す．

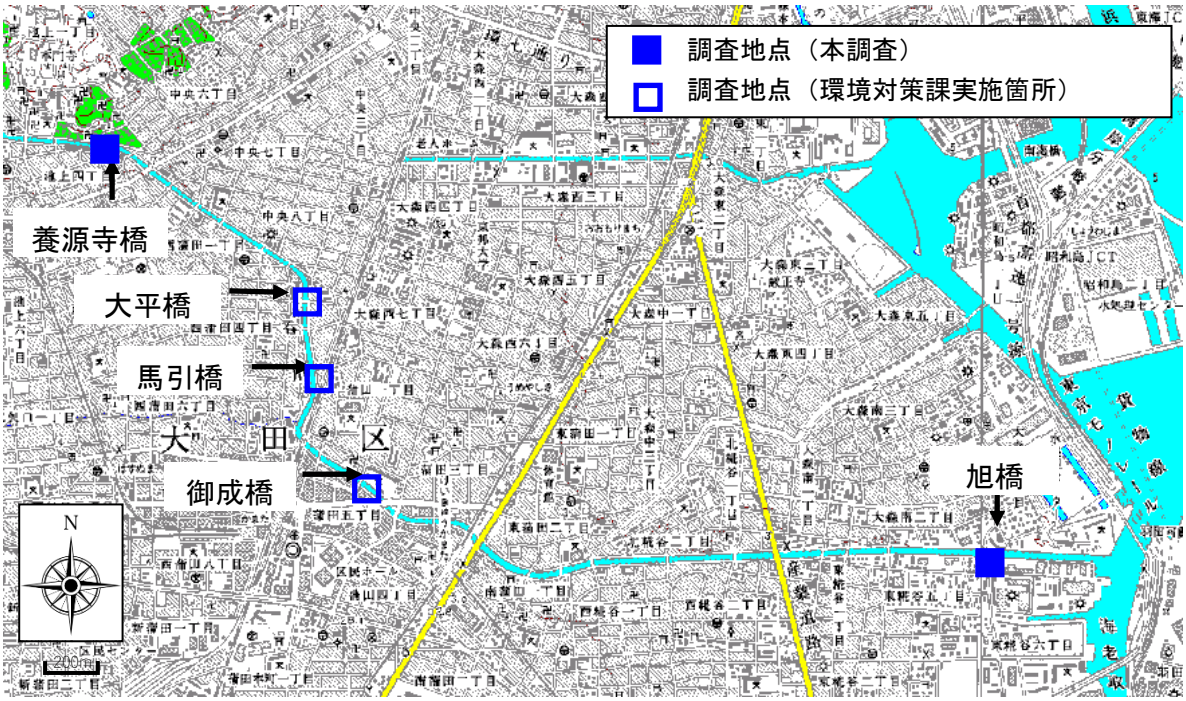


図 5-20　調査実施地点（連続調査）

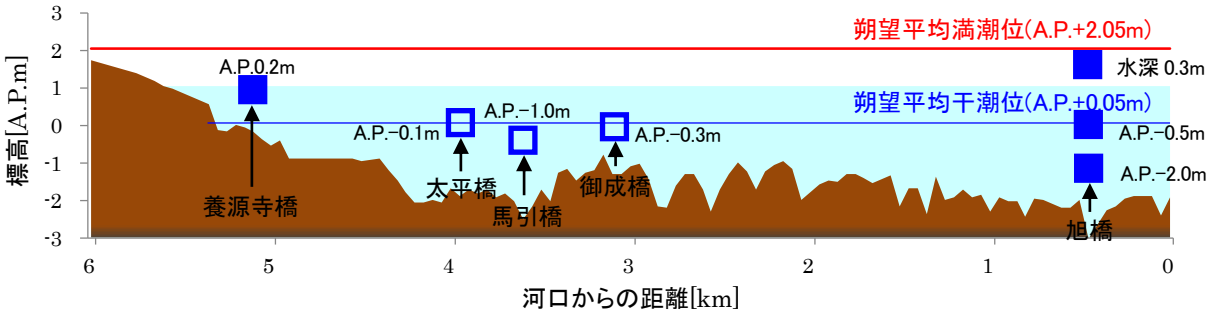


図 5-21　縦断図および水質計の設置水深

2)　設置方法

河床から 50cm 付近に小型メモリー計を設置し測定した．旭橋には，支柱に塩ビ管を取り付け，中に小型メモリー計を設置した（図 5-22）．養源寺橋には，低水路部に塩ビ管を取り付け，中に小型メモリー計を挿入した（図 5-23）．

各地点における測定機器の設置状況を写真 5-3 および写真 5-4 に示す．

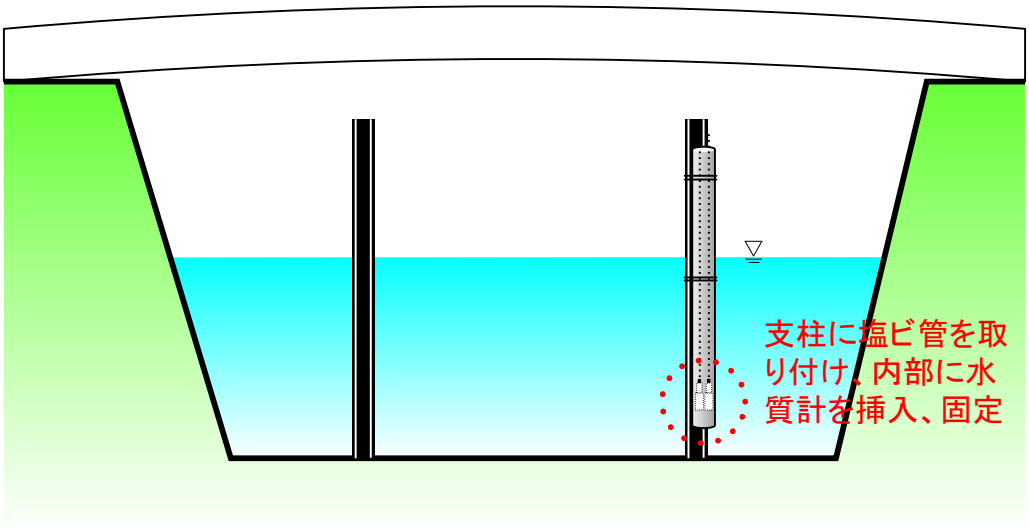


図 5-22　設置方法（旭橋）

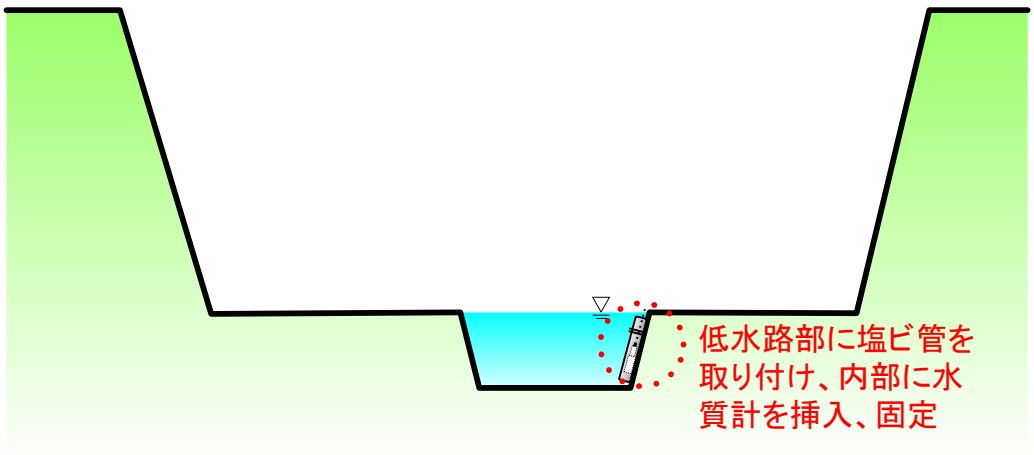


図 5-23　設置方法（養源寺橋）

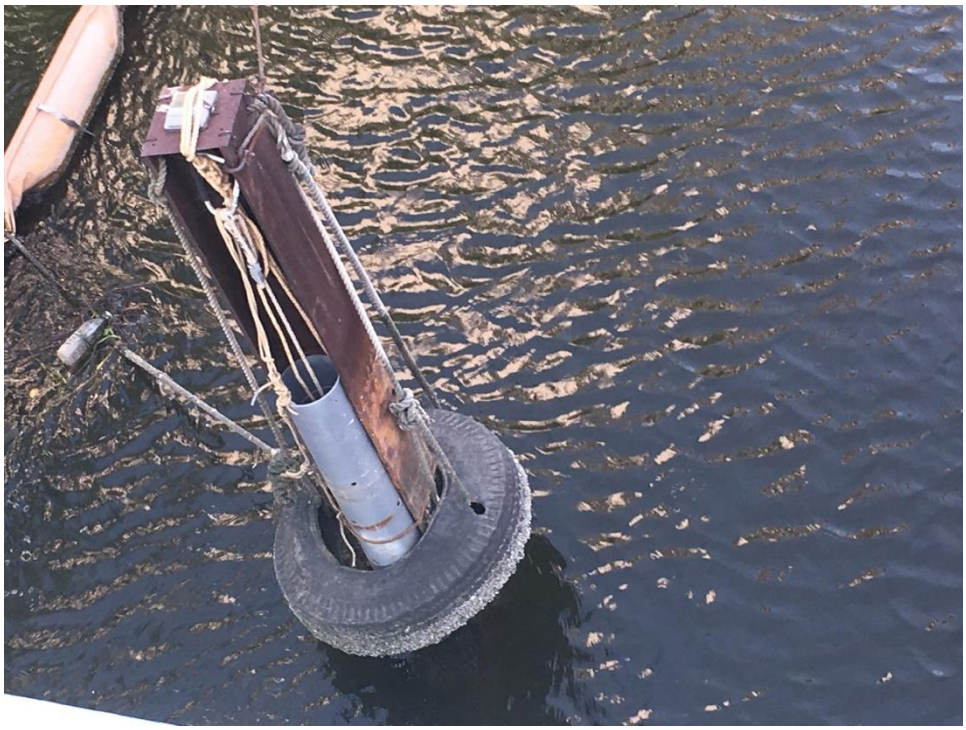


写真 5-3　設置状況（旭橋）

写真 5-4　設置状況（養源寺橋）

(2) 調査期間

2017/4/12 から 2017/10/11 までの 6 か月間に調査を実施した.

(3) 調査項目

1) 養源寺橋地点

養源寺橋では，上流域からの流入水の水温および濁度を測定した.

2) 旭橋地点

旭橋では，東京湾からの影響を把握するため，水温，塩分および DO（10 分間隔連続測定）を測定した．水温，塩分については 2 水深，DO については 3 水深で計測を行った.

表 5-8 調査項目（連続調査）

		水温	塩分	DO	濁度
養源寺橋※1	A.P.0.2m	○	－	－	●
旭橋※2	表層（水深 0.3m）	●	●	－	－
	中層（A.P.-0.5m）	●	●	●	－
	下層（A.P.-2.0m)	○	○	○	－

○：調査項目（仕様書項目）

●：調査項目（追加項目）

－：観測なし

※1 既往の調査より，養源寺橋表層（流入水）の塩分はほとんどゼロで，DO も飽和状態であることが明らかにであるため，塩分および DO は測定しない.

※2 既往の調査より，旭橋表層については DO が飽和状態になっていることが明らかであるため，測定しない.

(4) 調査結果

調査結果を図 5-26 に後述するカメラ調査結果と合わせて示した.

5-3-2　スカム発生状況調査（カメラ調査）

(1)　調査方法

1)　調査目的

定点カメラにより，10 分間隔で水面を撮影し，スカムの発生状況などを確認する．

2)　調査方法

3)　調査方法

定点カメラを設置し，10 分間隔で連続撮影を行う．

4)　調査地点

図 5-24 に示す日蓮橋，山野橋，御成橋の 3 地点とする．

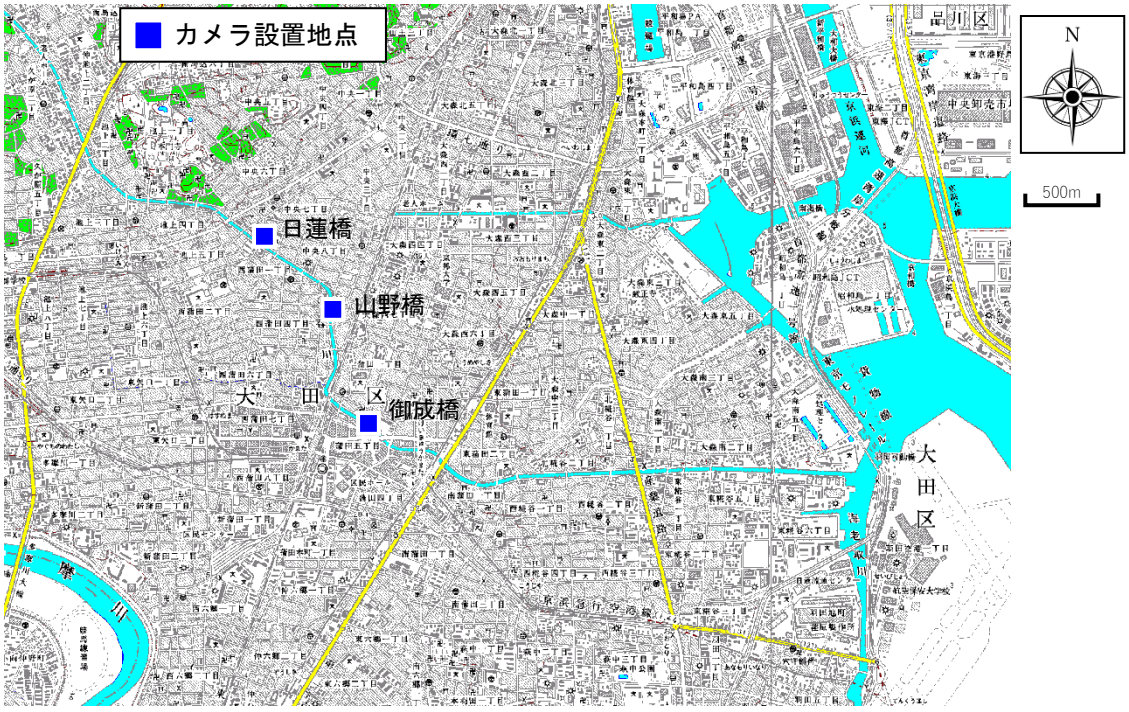


図 5-24　調査位置図（連続撮影）

E-mail : sales2@weather.co.jp

インターバルカメラ　タイムラプスカメラ / 顕微鏡用撮影セット

CBR-TLC200Pro / BLC200

タイムラプスビデオ　－無人・自動インターバル撮影－

野外での無人観察に、フェノロジーの記録用に、
130 万画素　インターバル(タイムラプス)撮影専用カメラ

TLC200Pro

特　徴

- brinno 製 130 万画素インターバル撮影/コマ撮り専用カメラです
- 最大 24 万 4 千枚の写真が AVI 形式で動画になります。
- HDR 搭載により、ダイナミックレンジが広く(115dB)、夜景や星も撮影可能
- ピクセルサイズ 4.2μm なので、シャープな画像が残せます
- CS マウントなので、市販レンズに交換可能
- 画角は 112°、広いエリアのパノラマ映像を作成可能
- 植物の季節変化、道路状況、凍結積雪状況などの記録に
- 任意の間隔で無人撮影が可能
- SD メモリー、電池が一緒にセッ
- 夜間は撮影を OFF にできます
- 防滴ケースに入れて屋外撮影が
- オプションレンズで広角/マクロ
- レリーズなどのオプションあり

防滴ケース

シャッターライン

顕微鏡用タイムラプスカメラプ
撮影セット

仕　様

カメラ	モデル	CBR-TLC200Pro
	LCD 画面	1.44 インチ TFT LCD
	レンズ回転角/防水	120° /オプション(飛沫防水ケース(CBR-ATH120)使用時)
撮影モード	こま撮り	こま撮りビデオの自動生成
	ストップモーション	オプション(シャッターライン(CBR-ATS110)使用時)
イメージセンサー	タイプ	1/3 インチ HDR センサー
	ダイナミックレンジ	115dB
	解像度/ピクセルサイズ	1.3 メガピクセル/4.2μm
	光感度	3650mV/lux-sec(超低光量にも対応)
光学レンズ(BCS 019)	タイプ	CS Mount(非球面ガラスレンズ)
	F 値/画角	f 2.0/112°
	焦点距離	35mm フィルム換算 19mm 相当
	撮影距離	1cm～∞の手動フォーカス(工場出荷時設定:40cm)
撮影設定	シーン	日光、トワイライト、夜景、月、星
	ホワイトバランス	オート、太陽光、日陰、曇り、蛍光灯(冷)、蛍光灯(暖)、タングステン光
	カスタム画像	露出、彩度、コントラスト、シャープネス
録画	こま撮りビデオ	形式:AVI　解像度:1280×720
	静止画	形式:JPEG(シャッターライン(CBR-ATS110)使用時のみ)　解像度:1280×720
	記憶装置	SD カード(最大 32GB までサポート)
撮影間隔	最短納期(ASAP)	1 秒に 5 枚(ただし SD カードの速度により異なる)
	カスタム	1 秒～24 時間で設定可能
電力	電源	電池:単 3 形乾電池 4 本　外部電源:マイクロ USB 端子による DC5V 電源
	電源持続時間(参考値)	最短 2.3 日(撮影間隔 1 秒、シーン設定が「日光」の場合) 最長 45 日(撮影間隔 24 時間、シーン設定が「日光」の場合)
カメラ本体寸法	サイズ	64mm(幅)×106mm(高さ)×46mm(奥行)
	質量/色	140g(電池含まず)/ブラック
その他	同梱物	4GB の SD カード、単 3 形乾電池 4 本、キットレンズ(BCS 019)、レンズカバー、ドライバー、ねじ、ユーザマニュアル(保証書含む。保証期間 1 年)
CBR-BLC200 顕微鏡用タイムラプスカメラプロ 撮影セット		顕微鏡に取り付けて簡単に微生物をコマ撮り撮影！ スライド上の現象をパソコンで再生！ 130 万画素　インターバル(タイムラプス)撮影専用カメラ セット販売のみ セット内容：タイムラプスカメラプロ、顕微鏡アダプタ

Tel　03－3988－6616
Fax　03－3988－6613
URL　http://www.weather.co.jp/

Climatec

図 5-25　設置カメラ

【日蓮橋】

右岸側の欄干に取り付け，下流側の連続撮影を行う．

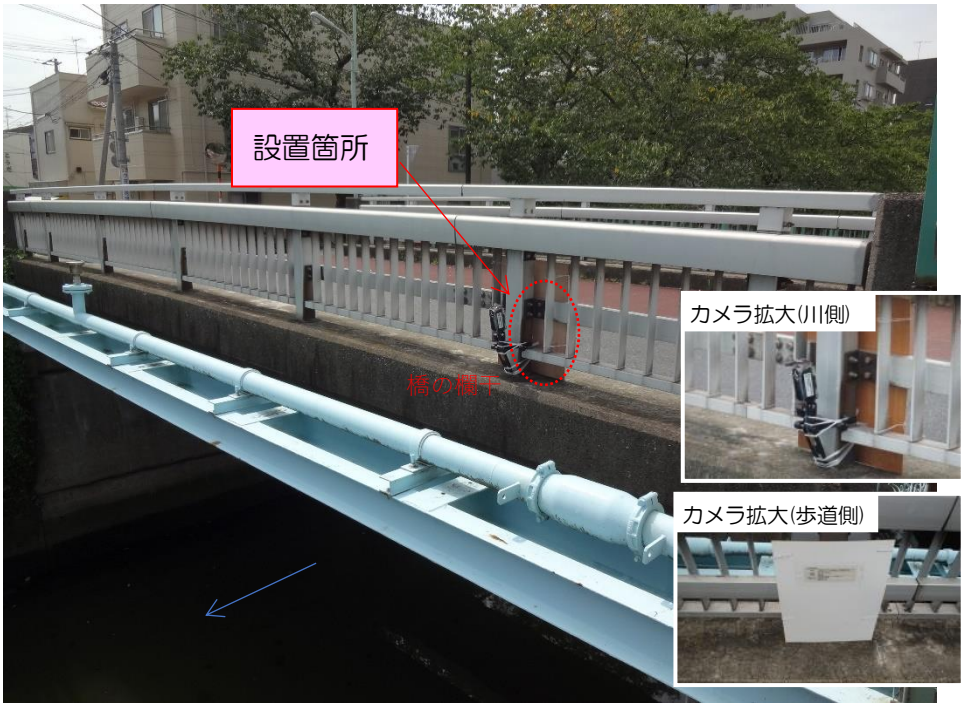


写真 5-5 (1)　カメラ設置位置（日蓮橋）

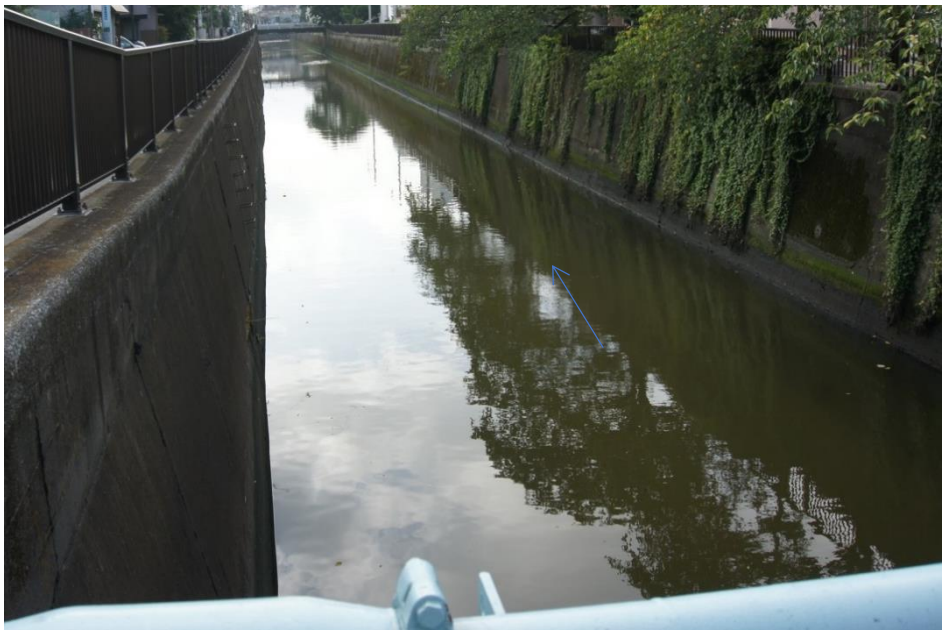


写真 5-6 (1)　カメラ撮影映像イメージ（日蓮橋）

【山野橋】

山野橋下流側の欄干に取り付け，下流側の連続撮影を行う．

写真 5-5 (2)　カメラ設置位置（山野橋）

写真 5-6 (2)　カメラ撮影映像イメージ（山野橋）

【御成橋】

御成橋上流側に取り付け，上流側の連続撮影を行う．

写真 5-5 (3)　カメラ設置位置（御成橋）

写真 5-6 (3)　カメラ撮影映像イメージ（御成橋）

(2) 調査結果

2017 年度の調査結果および大田区環境課による「呑川パトロール」の結果を図に示す．これらの結果から，スカムの発生と気温や降雨量との関連性を分析した．以下に考察事項をまとめる．

- 2017 年は，7 月中旬～8 月中旬にかけて，中量～多量のスカム発生が観測された．（図 5-26e)）
- 中量～多量のスカム発生が観測された直接的な原因は, 4 月～9 月にかけての少雨であるとみられる．特に，多量のスカムが連続的に発生した 7 月中旬～8 月中旬は，スカムの発生以前に少雨の期間が続いていた．（図 5-26a)）
- スカムが多量発生した 7 月～8 月上旬は，水温が最も上昇した時期であり（図 5-26b)），かつ ORP（酸化還元電位）がメタンガスが発生する上限値の-330mV を下回っていたため（図 5-26d)），嫌気性ガスが発生したものとみられる．
- 大田区環境課によるパトロール結果より，スカムの中量～多量発生が見られた 7 月下旬に強度の悪臭，500 匹以上の魚の斃死が確認された．（図 5-26f）

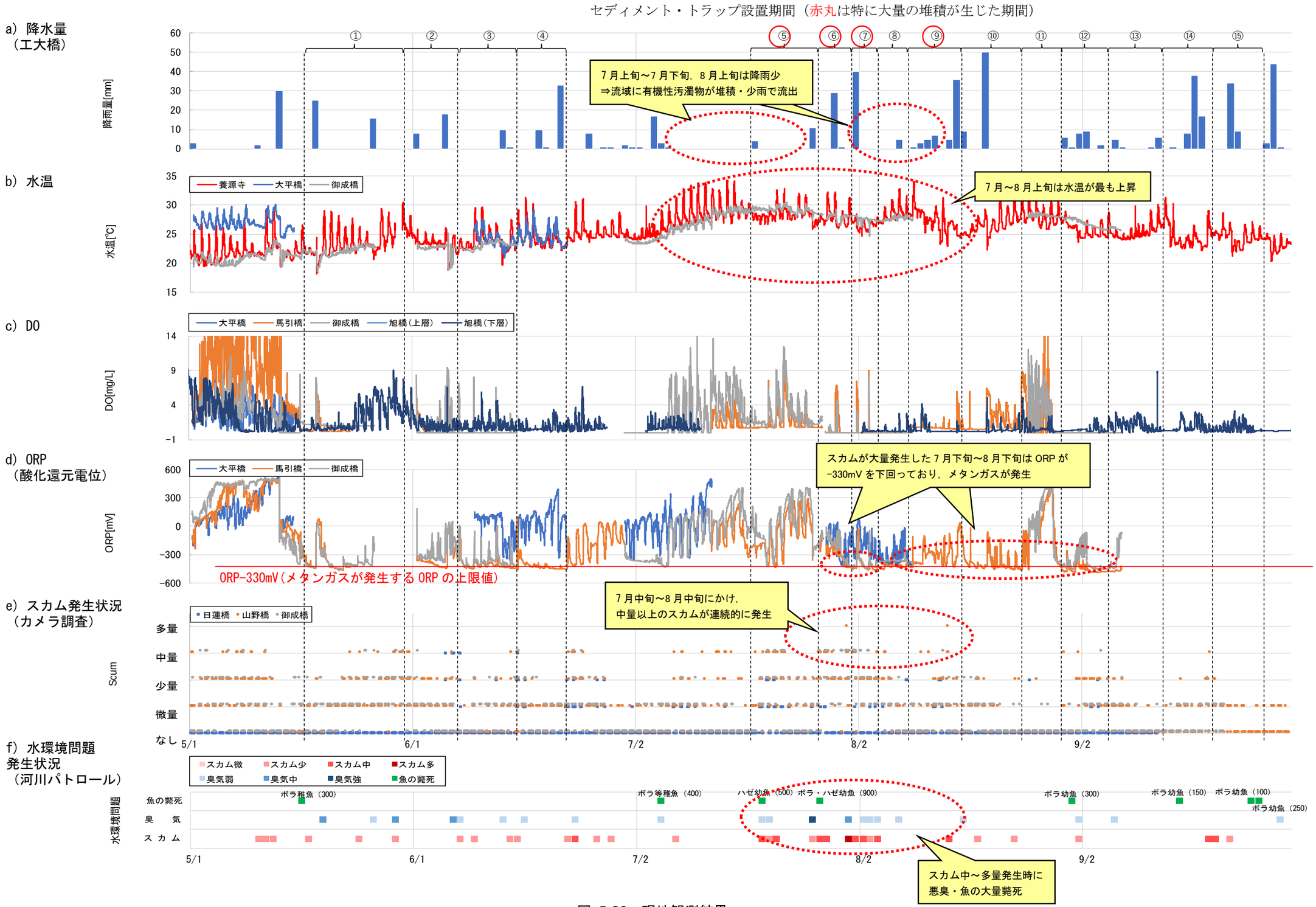

セディメント・トラップ設置期間（赤丸は特に大量の堆積が生じた期間）
a）降水量
（工大橋）
降雨量[mm]
①
②
③
④
⑤
⑥
⑦
⑧
⑨
⑩
⑪
⑫
⑬
⑭
⑮
7月上旬～7月下旬，8月上旬は降雨少
⇒流域に有機性汚濁物が堆積・少雨で流出
b）水温
水温[℃]
養源寺
大平橋
御成橋
7月～8月上旬は水温が最も上昇
c）DO
DO[mg/L]
大平橋
馬引橋
御成橋
旭橋（上層）
旭橋（下層）
d）ORP
（酸化還元電位）
ORP[mV]
大平橋
馬引橋
御成橋
スカムが大量発生した7月下旬～8月下旬はORPが
-330mVを下回っており，メタンガスが発生
ORP-330mV（メタンガスが発生するORPの上限値）
e）スカム発生状況
（カメラ調査）
Scum
日蓮橋
山野橋
御成橋
多量
中量
少量
微量
なし
7月中旬～8月中旬にかけ，
中量以上のスカムが連続的に発生
5/1
6/1
7/2
8/2
9/2
f）水環境問題
発生状況
（河川パトロール）
水環境問題
スカム微
スカム少
スカム中
スカム多
臭気弱
臭気中
臭気強
魚の斃死
魚の斃死
臭　気
ス カ ム
ボラ稚魚（300）
ボラ等稚魚（400）
ハゼ幼魚（500）
ボラ・ハゼ幼魚（900）
ボラ幼魚（300）
ボラ幼魚（150）
ボラ幼魚（100）
ボラ幼魚（250）
スカム中～多量発生時に
悪臭・魚の大量斃死

図 5-26　現地観測結果

ここで，大量のスカムが観測された 7/30 と 8/2 付近の降雨量，水位，水質項目およびスカムの面積割合を図 5-27 に示す．これらの結果をみると，降雨後からおよそ半日強でスカムが発生している．そのうち嫌気性ガスの発生の目安となる ORP が-330mV を下回るまでに 12 時間程度，ORP が-330mV を下回った時点からスカムの発生までに 5 時間以内の時間を要している．

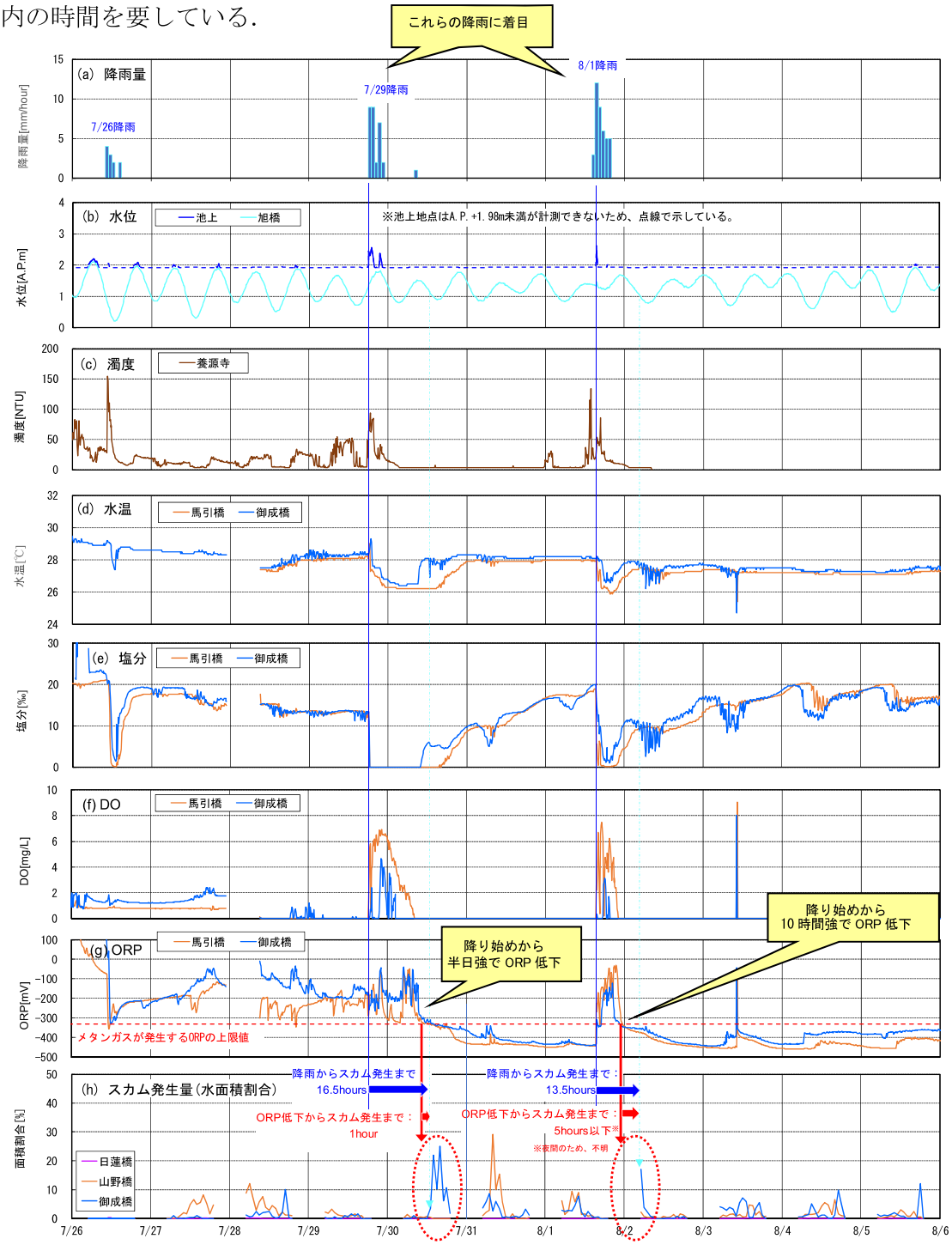


図 5-27　降雨量，水位，水質項目およびスカムの面積割合（2017/7/26～8/6）

5-4　スカム発生予測モデルの構築

5-4-1　スカム発生予測モデルの構築

(1)　メカニズムの区分

スカム発生から消失にかけての過程は，図 5-28 に示すように，大きく 5 つの Step に区分できる．

Step1：降雨流出時に O-SS が堆積する．

Step2：底層の嫌気化に伴い，底泥中に CH_4 等の嫌気性ガスが発生する．

Step3：嫌気性ガスにより浮力が加わった底泥はスカムとして水面に浮上する．

Step4：浮上したスカムは水面を浮遊し，表層の流れに伴い，上下流へ移流・拡散する．

Step5：時間の経過とともに嫌気性ガスがスカムから大気中に放出されスカムは沈降消失する．

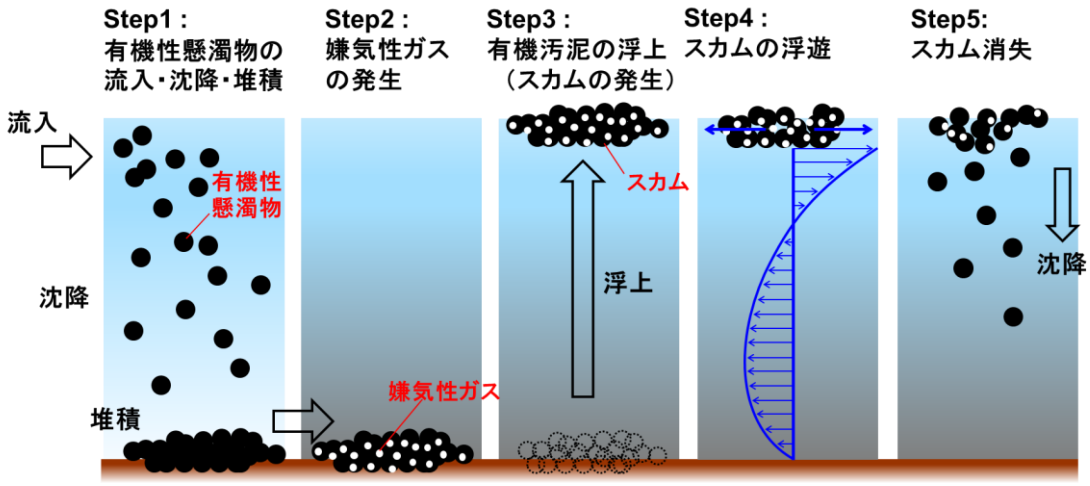


図 5-28　スカム発生メカニズム

(2) モデル化

Step1 の有機懸濁物の流入・沈降・堆積については，4 章で取り上げたため，Step2 以降のモデル化方法について以降に説明する．

1) 嫌気性ガスの発生（Step2）

嫌気化のプロセスを表 5-9 に示す．

これらの嫌気化の程度を示す指標として ORP がある．表 5-9 右欄に示す ORP の強度に応じて嫌気性プロセスが進行する．ORP は嫌気化の程度を知るためには重要な指標である．表 5-9 右欄に示すように，それぞれの反応は大きな幅を持っており，ORP によって生じる反応は明確ではないため定量的な評価は困難ある．そのため，ORP をモデル化した研究はほとんどみられない．唯一の研究としては，朝井ら[26]は，ダム貯水池の鉄・マンガンの還元反応を把握するため，OPR を指標として取り扱っている．しかし，この研究においても現地観測結果から ORP と鉄・マンガン還元反応速度の相関を統計的に扱ったものであり，厳密には嫌気化プロセスをモデル化しているものではない．

そこで，本研究では，これらの反応を反応式から一般化した Wijsman モデルを用いることとした．このモデルは J.W.M.Wijsman ら[12]が黒海で適用性を確認している他に，永尾ら[13]が東京湾の水質と堆積物の再現，入江ら[14]が大阪湾の硫化水素の発生・溶出に適用し，いずれも高い再現性を得ており，現時点で最も精密なモデルのひとつであるといえる．なお Wijsman モデルの適用方法については次節(3)　で詳述する．

表 5-9　嫌気化プロセスと反応式

反応	反　応　式	目安となる ORP [27] [mV]
好気性呼吸	$\mathbf{(CH_2O)_x(NH_3)_y(H_3PO_4)}+\mathbf{x}O_2+yH^+ \rightarrow x\mathbf{CO_2}+yNH_4^+ + HPO_4^{2-} + 2H^+ + xH_2O$	50 ～ 250
脱窒	$\mathbf{(CH_2O)_x(NH_3)_y(H_3PO_4)} + 4/5xNO_3^- + (4/5x+y)H^+ \rightarrow \mathbf{x}CO_2+yNH_4^+ + 2/5xN_2 + HPO_4^{2-} + 7/5xH_2O$	-50 ～ 50
マンガン還元	$\mathbf{(CH_2O)_x(NH_3)_y(H_3PO_4)}+2xMnO_2+(4x+y)H^+ \rightarrow \mathbf{x}CO_2+2xMn^{2+}+yNH_4^+ + HPO_4^{2-} + 2H^+ + 3xH_2O$	－
鉄還元	$\mathbf{(CH_2O)_x(NH_3)_y(H_3PO_4)}+4xFe(OH)_3+(8x+y)H^+ \rightarrow \mathbf{x}CO_2+4xFe^{2+}+yNH_4^+ + HPO_4^{2-} + 2H^+ + 11xH_2O$	－
硫酸還元	$\mathbf{(CH_2O)_x(NH_3)_y(H_3PO_4)}+1/2x\mathbf{SO_4^{2-}} + (1/2x+y)H^+ \rightarrow \mathbf{x}CO_2+1/2x\mathbf{\Sigma H_2S}+yNH_4^+ + HPO_4^{2-} + H^+ + xH_2O$	-50 ～ -250
メタン生成	$\mathbf{(CH_2O)_x(NH_3)_y(H_3PO_4)}+yH^+ \rightarrow 1/2x\mathbf{CO_2}+1/2x\mathbf{CH_4}+yNH_4^+ + HPO_4^{2-} + 2H^+$	-175 ～ -400

x，y はそれぞれ有機物内の N/P モル比，C/P モル比を示す．
赤字：酸化剤，青字：常温でガス化する生成物質，太字はモデルに組込んだ項目を示している．

なお，上記の硫酸還元反応において硫化水素（H_2S）に ΣH_2S と Σ を付けて表記しているのは，下図に示すように H_2S は pH と ORP（Eh）によって形態が変化するため，還元条件下で生じる硫化水素（H_2S）と硫化水素イオン（HS^-）と硫黄イオン（S^{2-}）の 3 つの硫黄化合物の総量を示している．

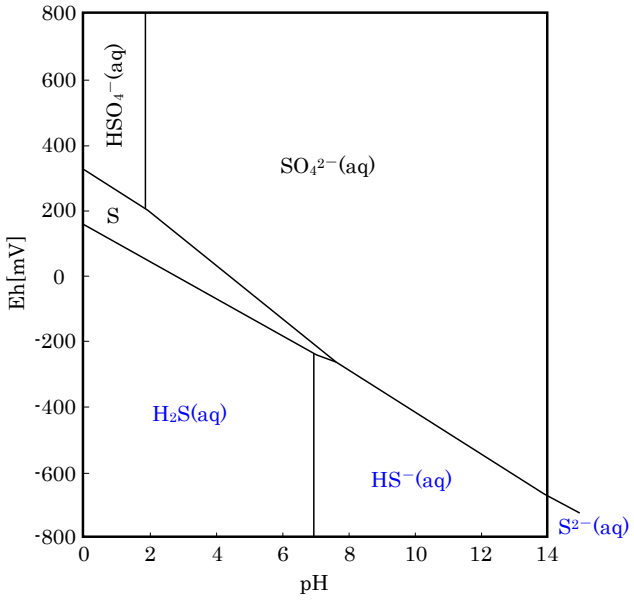


図 5-29　硫黄 S の pH-ORP 関係

2) 有機汚泥の浮上（スカムの発生）（Step3）

室内実験により，スカム浮上時の有機汚泥内ガス発生量を求めた結果を図 5-30 に示す．スカム浮上に要するガス発生量は有機汚泥投入量に比例する．そこでガス量が(5-6)式で示す相関式を超えた場合に，有機汚泥がスカムとして浮上することとした．

$$V_c=0.0006W \qquad (5\text{-}6)$$

ここに，V_c：有機汚泥がスカムとして浮上するガス量[cm³/cm³]，W：単位面積あたりの有機汚泥堆積量[mg-dry/cm²]である．

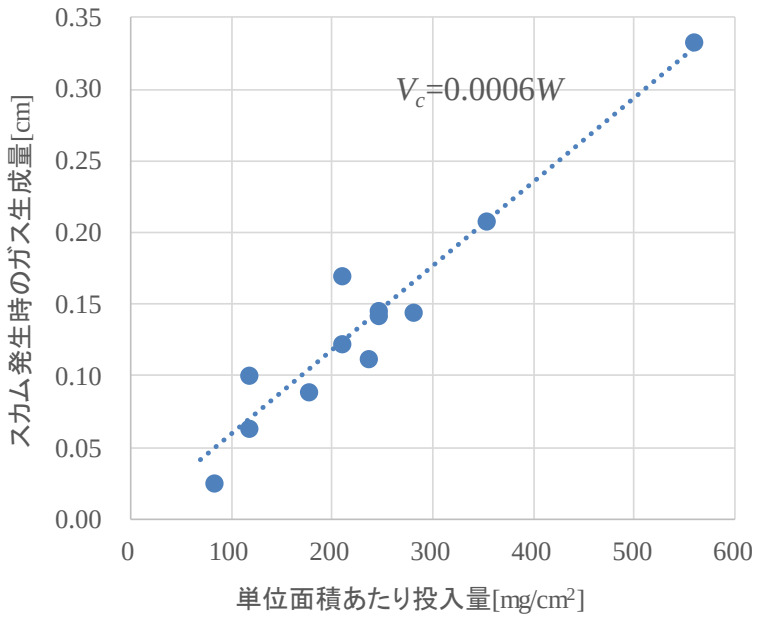


図 5-30　スカム浮上時のガス発生量

3) スカムの浮遊（Step4）

浮上したスカムは表層を一次元的に移流・拡散するものとし，鉛直二次元密度流モデル（TITech-WARM）の表層流速を用いて移流拡散を算定した．

なお，呑川には水面を浮遊するゴミ回収を目的としたフェンス等が設置されることがあるが，その設置地点では移流・拡散が生じないものとした．

4) スカムの消失（Step5）

スカムは嫌気性ガスを大気中に放出し，徐々に浮力を失い崩落・沈降していく．実験結果によればスカムの厚さは図 5-31 に示すように減少した．そこで 減少率を(5-7)式のように仮定した．

$$dH_{scum} / dt = -0.035 H_{scum} \qquad (5\text{-}7)$$

ここに，dH_{scum}/dt：スカム厚減少速度[cm/hour]，H_{scum}：スカム厚[cm]

スカム密度を一定と仮定し，厚さ H_{scum} をスカム重量に置き換えてスカム消失過程を表現した．

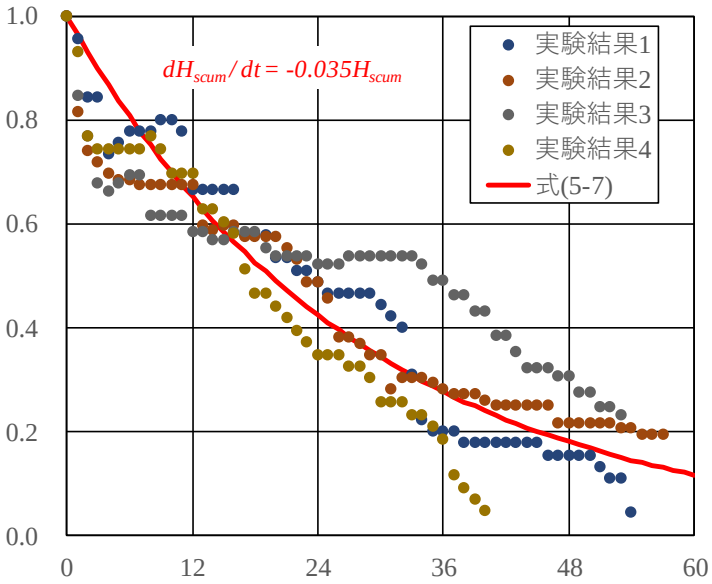


図 5-31　スカムの減少速度

(3) 嫌気性ガス発生過程（Wijsman モデルの適用）

Wijsman ら[12]は，表 5-9 に示すように嫌気化プロセスをいくつかの反応過程に分け，各反応における制限因子と抑制因子を考慮し，モデル化している．

例えば，入江ら[14]は硫酸還元反応による有機物分解速度を以下のように具体的に示している．硫酸還元反応については，SO_4 が制限因子であり，表 5-9 の反応系で制限因子よりも上位にある O_2，NO_3，MnO_2，$FeOH_3$ が抑制因子となっている．

$$R_{so_4red} = R_m[\text{有機物}] \cdot \left(\frac{[SO_4]}{[SO_4] + Ks_{SO4}}\right) \cdot \left(1 - \frac{[O_2]}{[O_2] + K_{in\,O_2}}\right) \cdot \left(1 - \frac{[NO_3]}{[NO_3] + K_{in\,NO_3}}\right) \cdot \left(1 - \frac{[MnO_2]}{[MnO_2] + K_{inMn\,O_2}}\right) \cdot \left(1 - \frac{[FeOH_3]}{[FeOH_3] + K_{inFe\,OH_3}}\right) \quad (5\text{-}8)$$

ここで，R_{SO4red}：硫酸還元による有機物分解速度，R_m：有機物の最大分解速度（1/day），［M］：物質 M の濃度，Ks_{SO4}：硫酸還元反応における SO_4 半飽和濃度（μ mol/l），K_{inM}：物質 M の制限半飽和濃度（μ mol/l）である．そこで，SO_4^{2-}濃度消費速度や H_2S 濃度生成速度は式（5-3）および表 5-9 で示す反応系を用いて，モル比で算出できる．

従来の研究では，Wijsman モデルは主に堆積物中の栄養塩類や硫化物の追跡に用いられており，嫌気性ガスの生成量の推定に用いた事例はない．

底泥堆積物においては，通常好気的分解が行われるのがごく表層に限られることや各項目の濃度勾配が底泥表層で大きいことから，海域における Wijsman モデルの適用では底泥層を鉛直方向に細かく分割する．例えば Wijsman ら[12]や入江ら[14]は 1cm，永尾ら[13]は 0.02～3.50cm に分割している．しかし呑川汽水域における一出水での堆積厚は，第 4 章の堆積シミュレーション結果から，平均 0.62cm，最大でも数 cm 程度と非常に薄く，堆積から浮上までの時間も 5 時間程度と短い．加えて 5-2-2　の実験によれば，数 cm の厚さの底泥が一度に浮上する．したがって詳細な層分割は，理論上はともかく実際的意味は明確でない．そこで本研究では，5-2-2　の実験に基づくモデルパラメータの調節を前提にして，河床に堆積した有機汚泥層を一層として Wijsman モデルを適用することとした．

そこで，まず Wijsman モデルによる嫌気性ガスの生成速度試験結果の再現性を確認した．実験結果が再現できるように，有機物の分解速度と水温補正係数を調整した結果を表 5-10 に示す．J.W.M.Wijsman ら[12]は有機物の分解速度によって 2 つの値を使い分けているので両方を記した．また表中の一般値とは物質循環モデル等（例えば Philippe *et al.*[28]）で採用されている値である．なお他のパラメータの値は J.W.M.Wijsman らの設定値を基本として用いた．汚泥投入量などの初期条件は実験条件と同一とした．NO_3^-, Fe と Mn の初期濃度については計測していなかったため，過去の現地測定結果[29]から平均的な値としてそれぞれ 1.0 mg/L，0.1 mg/L と 0.02mg/L を設定した．

なお, これらの反応における酸化剤について, 有機物の分解可能量を図 5-10 に示す．分解可能量は硫酸還元反応に必要となる硫酸イオン SO_4^{2-}が他の反応より 2～3 オーダー大きく，多くの有機物を分解することができる．

表 5-10　設定したパラメータ

	Wijsmanら[12]	一般値	設定値
有機物の分解速度 [1/day]	遅）0.003 速）0.0753	0.01 ～ 0.30	0.03
温度補正係数[-]	2	1 ～ 5	3

表 5-11 各酸化剤の有機物の分解可能量

	酸化剤	① 単位有機物量を分解するために必要な酸化剤の量	② 呑川汽水域の存在量の範囲 [mg/L]	③ (=①×②) 有機物の分解可能量 [mg/L]
好気性呼吸	O_2	0.77	0～10	0 ～ 7.7
脱窒	NO_3^-	1.20	1.0	1.20
マンガン還元	MnO_2	4.19	0.02	0.08
鉄還元	$Fe(OH)_3$	10.31	0.1	1.03
硫酸還元	SO_4^{2-}	1.16	0 ～ 2700	0～3,132

※メタン生成は有機物自体を酸化剤として用いるため，この表には含めていない．

実験におけるスカムの浮上・沈降の様子を図 5-33 上段に，シリンジ内の変化とガス量に関する Wijsman モデルとの比較を中段に示す．嫌気性ガスの生成速度が概ね再現できていることがわかる．下段には Wijsman モデルから得られたガス成分の変化を示している．CH_4 が 6 割，CO_2 が 2 割と，発生する嫌気性ガスの成分についても実験後に測定した結果（5-2-2 (3) 2) f) 参照）を概ね再現できている．なお CH_4 の比率が大きい理由のひとつは，水中溶解度が小さいことによる．参考までにガスの溶解度を表 5-12 に示すが，CH_4 の溶解度は他の嫌気性ガス比較して非常に低い．他の投入量についても Wijsman モデルを適用した結果，図 5-32 に示すように傾向を再現することができている．

表 5-12　気体の水に対する溶解度（溶解度の大きい順）

物質	化学式	0℃	20℃	40℃
アンモニア	NH_3	1176	702	-
硫化水素	H_2S	4.67	2.58	1.66
二酸化炭素	CO_2	1.71	0.88	0.53
メタン	CH_4	0.056	0.033	0.024
酸素	O_2	0.049	0.031	0.023

出典：理科年表 [21)]

溶解度は 1atm の気体が水 1cm³ 中に溶解するときの容積を，0℃，1atm のときの容積に換算した値．単位は cm³

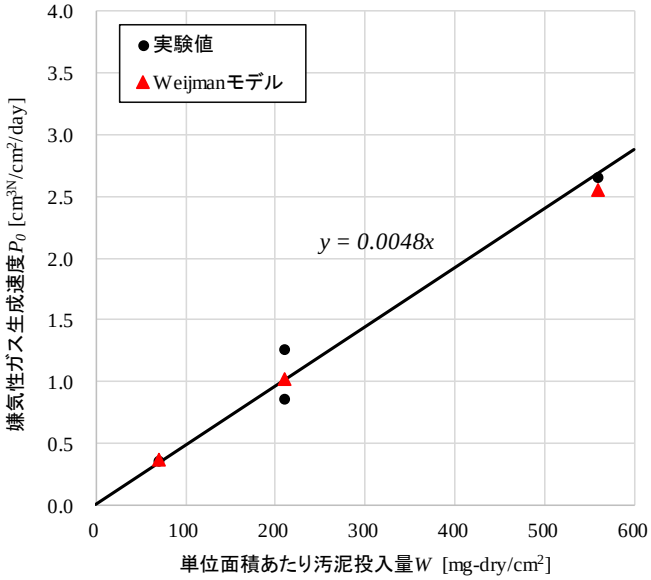


図 5-32　汚泥投入量とガス生成量への Wijsman モデルの適用結果

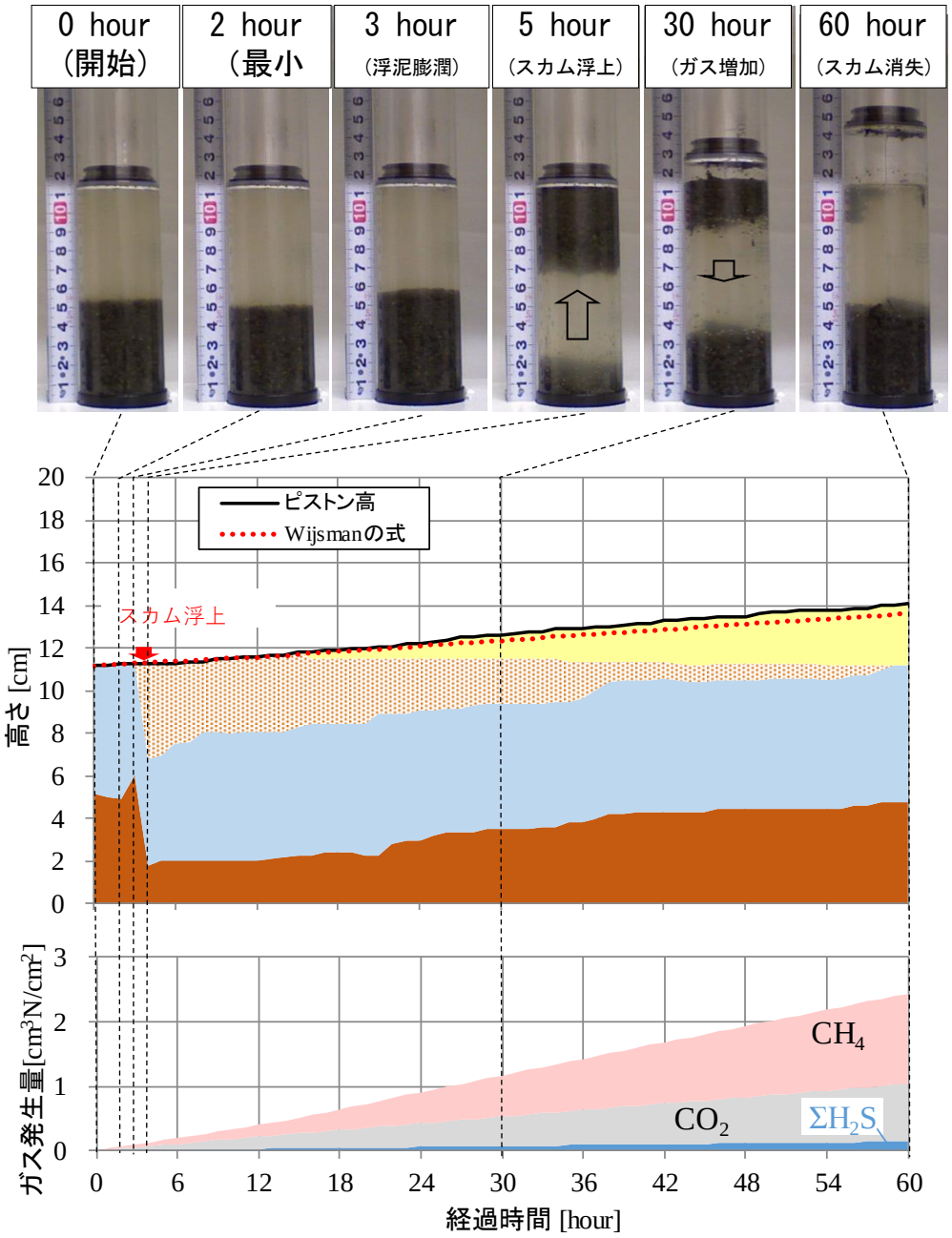
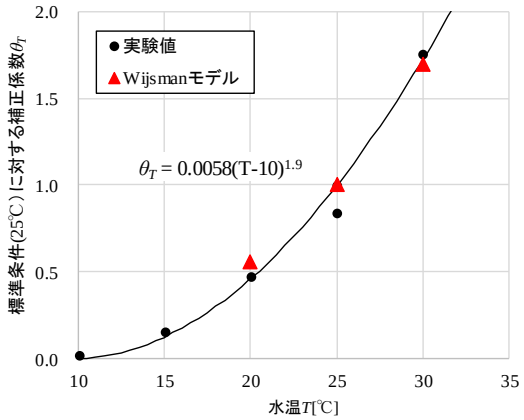


図 5-33　Wijsman モデルの模擬実験への適用結果

図 5-34 は嫌気性ガス生成速度実験で得られた水温及び塩分に対するガス生成速度の依存性のグラフの上に Wijsman モデルで得られた結果（▲）をプロットしたものである．水温に対する応答は良好に再現されている．一方塩分に対する応答は高塩分で過大となっている．Al-Zuhair ら [30]は高塩分下では硫酸還元も低下すると報告しているが，Wijsman モデルではそのことが十分表現できていない可能性がある．しかし呑川での現地観測では出水からスカム発生までの期間の底層塩分が 10 ‰以下（図 5-27 参照）であったので，呑川を対象とした数値シミュレーションにあたっての問題は少ないと思われる．

a) 水温への応答



b)　塩分への応答

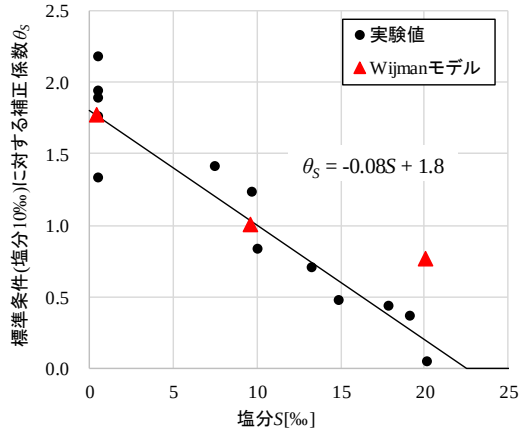


図 5-34　水温及び塩分に対するガス生成速度の依存性

表 5-9 の嫌気化プロセスのうち，表 5-11 に示した通り，水中に大量に含まれる硫酸イオンを使用する硫酸還元や有機物自体を酸化剤とするメタン生成に比べて，脱窒，マンガン還元と鉄還元反応は微小である．実際に標準条件（水温 25℃，塩分 10‰）で比較したものを図 5-35 に示す．両者の差は微小ある．そのため，表 5-9 の嫌気化プロセスのうち脱窒，マンガン還元と鉄還元反応はガス発生量が小さいため，スカム発生予測モデルの構築にあたっては省略することとした．

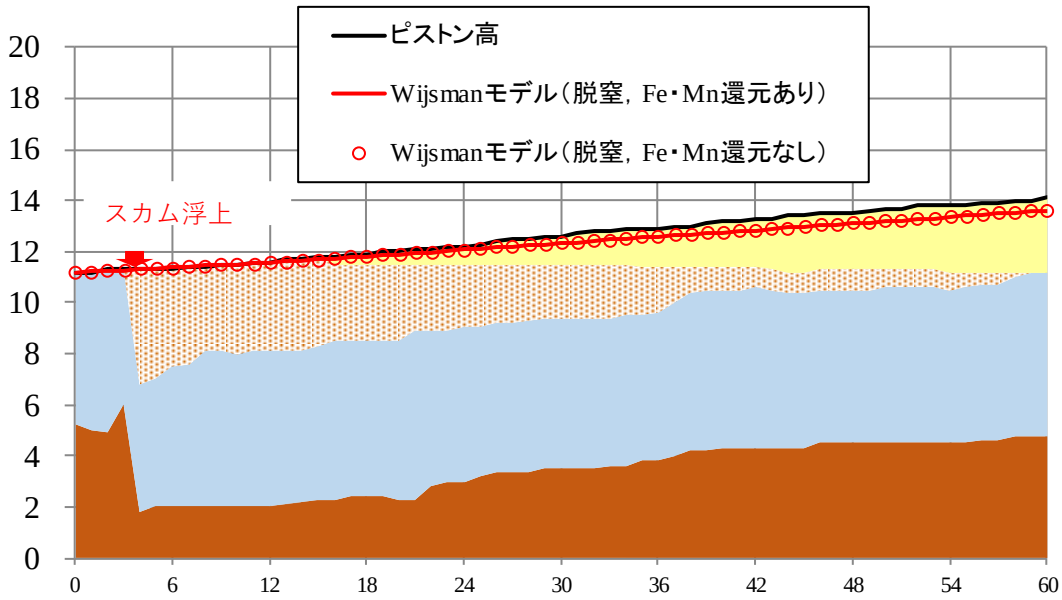


図 5-35　Wijsman モデルの模擬実験への適用結果
（脱窒，Fe・Mn 還元あり・なし）

(4) 水位低下がスカム発生に及ぼす影響

三浦ら[18]が示したように，スカムは干潮時に発生しやすい．この原因として，水位低下に伴う水圧減少により，①水中に溶解していた成分が気泡として水中に放出されること，②気泡の膨張により浮力が増大することの 2 点が考えられる．これらの効果を考慮するため，嫌気性ガスの溶解と圧力低下に対する応答を以下のようにモデル化した．

水中への気体の溶解度は Henry の法則を用いて下式で表すことができる．

$$S = S_0(T)\, P_{gas} \tag{5-9}$$

ここに，S：気体の溶解度[cm^{3N}/cm^3]，$S_0(T)$：1atm 下での溶解度[cm^{3N}/cm^3]，T：水温[℃]，P_{gas}：気体の分圧[atm]である．なお溶解度は気体の種類によって異なるため，それぞれの気体について上式を個別に適用する．

また，気体の圧力変化に伴う体積増減は Boyle･Charles の法則を用いて下式から求めた．

$$V=V_0\,(1+(T\text{-}25)/273)\,/\,P \tag{5-10}$$

ここに，V：気体の体積[cm^3]，V_0：1atm，25℃下での気体の体積[cm^3]，T：水温[℃]，P：水圧[atm]である．なお，嫌気性ガス生成速度試験（5-2-2　）においては標準状態を 25℃としたことから，ここでも標準状態を 25℃として扱っている．

5-4-2　スカム発生予測モデルの検証

(1)　検証方法

2017 年に呑川の 3 地点に定点カメラ（Brinno TLC200Pro）を設置して日中の水面状態を観測し, 画像解析によりスカムの水面被覆率を求めている (5-3-2　参照). そこで, この被覆面積率と, 前節で述べたモデルによるシミュレーションの結果を比較し, 再現性を検討した.

(2)　スカム発生予測モデルによる再現計算条件

上記で構築したスカム発生予測モデルを, 鉛直二次元密度流モデル（TITech-WARM）に組込み，底泥からのスカム発生と浮遊拡散を追跡できるようにした.

検証計算条件を表 5-13 にまとめた．また，設定した諸量を図 5-36 に図示した.

有機汚泥の堆積量については，図 5-26 に示すように 6 月中旬から 7 月上旬までの梅雨期に比較的連続した降雨があり, 有機汚泥がフラッシュ, スカムとして流下したことを想定し，梅雨明けの最初の降雨（2017/7/18 降雨）から助走計算を行い，設定している.

表 5-13　スカム発生予測モデル検証条件

項　目		内　容	備　考
モデル	モデル	TITech-WARM モデル （鉛直二次元密度流モデル）	
	対象区間	旭橋（0.0KP）から呑川汽水域上流（6.3KP）	
	格子間隔	縦断方向：50 m ピッチ 鉛直方向：10 ～ 100cm ピッチ	鉛直方向格子は可変 （Soroban 格子）
	格子点数	縦断方向：154 断面 鉛直方向：20 格子	
	地形条件	太平橋下流は H26 測量成果 太平橋～養源寺橋は H29 測量成果 養源寺橋上流は計画河道	
	水質項目	水温，塩分，O-SS，DO，CO_2，ΣH_2S，CH_4	
	計算期間	2017/7/26 0:00 ～ 2017/8/6 0:00（11 日間） 2017 年において, 特に多くのスカムが観測された期間	
境界条件	気象	風向・風速：AMeDAS 羽田地点観測データ	
	上流端	流量・O-SS：下水道流域流出モデル計算結果 水温：養源寺橋の連続観測結果から設定 塩分：上流からの流入塩分はゼロとした. DO：上流からの流入 DO は飽和と設定 CO_2，ΣH_2S，CH_4：ゼロと想定	
	下流端	水位：旭橋地点観測水位 水温・塩分・DO：旭橋の連続観測結果から鉛直方向に水質分布を考慮して設定 CO_2，ΣH_2S，CH_4：DO と CO_2 で飽和と想定	
	水面	再曝気による DO 供給を考慮	
	河床	消費速度試験結果より設定（5-2-1　）	
初期条件	水質	水温，塩分，DO：2017/6/19 水質鉛直分布調査結果から助走計算を行い設定 CO_2，ΣH_2S，CH_4：DO と CO_2 で飽和と想定	
	O-SS 堆積量	6 月中旬から 7 月上旬までの梅雨期に比較的連続した降雨があり，有機汚泥がフラッシュ，スカムとして流下したことを想定し，梅雨明けの最初の降雨（2017/7/18 降雨）から助走計算を行い設定	

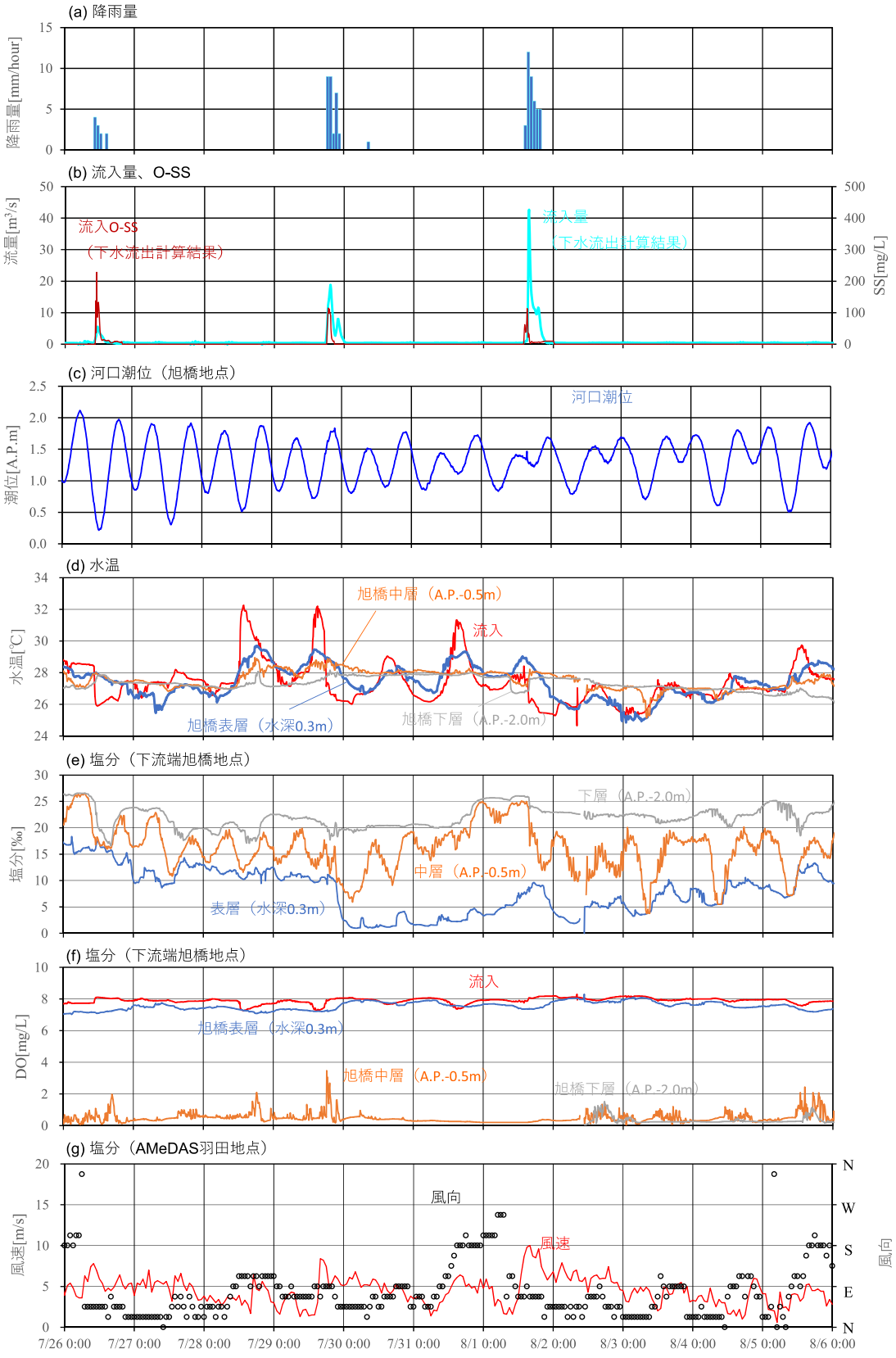

(a) 降雨量
降雨量[mm/hour]
(b) 流入量、O-SS
流量[m³/s]
SS[mg/L]
流入O-SS
（下水流出計算結果）
流入量
（下水流出計算結果）
(c) 河口潮位（旭橋地点）
潮位[A.P.m]
河口潮位
(d) 水温
水温[℃]
旭橋中層（A.P.-0.5m）
流入
旭橋表層（水深0.3m）
旭橋下層（A.P.-2.0m）
(e) 塩分（下流端旭橋地点）
塩分[‰]
下層（A.P.-2.0m）
中層（A.P.-0.5m）
表層（水深0.3m）
(f) 塩分（下流端旭橋地点）
DO[mg/L]
流入
旭橋表層（水深0.3m）
旭橋中層（A.P.-0.5m）
旭橋下層（A.P.-2.0m）
(g) 塩分（AMeDAS羽田地点）
風速[m/s]
風向
風速
風向
7/26 0:00
7/27 0:00
7/28 0:00
7/29 0:00
7/30 0:00
7/31 0:00
8/1 0:00
8/2 0:00
8/3 0:00
8/4 0:00
8/5 0:00
8/6 0:00

図 5-36　検証条件

(3) 検証結果

検証結果から，2017 年において最も多くのスカムが観測された 7/29 出水前後の計算結果を図 5-37 に示す. 図上の数字は後述する水質の縦断分布の出力時点を示している．

(a)は時間降雨量であり，7/29 降雨では総雨量で 29mm の降雨が生じた．

(b)に境界条件として与えた流入量，流入 SS および下流端潮位を示している．降雨の初期に，高濃度の SS が流出していることがわかる．

図 5-38 に降雨前後の塩分の縦断分布の変化，図 5-39 に DO の縦断分布の変化を示す. ①出水前には，明瞭な塩淡成層を形成しており，水面付近の淡水層の厚さは数 10cm と薄い. その下部は塩水層となっており，降雨前には河口から感潮域上流端となる 5KP 付近まで広い範囲で無酸素状態となっている．②出水ピーク時には，出水により塩水楔の先端は山野橋下流まで後退している．それに伴い，山野橋より上流側では底層の無酸素化が解消している．③の降雨後には，塩水楔はすぐに遡上を始め，④の降雨 6 時間後には，5KP 付近まで塩水楔が遡上するとともに，底層が無酸素化している．これは，底泥や堆積した O-SS による酸素消費と，貧酸素化した塩水楔の遡上によるものである．⑤の降雨 12 時間後には，ほとんど④からの変化はないが，この後徐々に塩水が侵入し塩水層が厚くなり，塩分濃度も高くなっていく．

図 5-37(c)(d)にカメラを設置した 3 地点における観測値と実測値のスカムの量を比較した．観測値は水面でのスカム面積割合(c)である一方，計算値はスカム重量濃度(d)である．両指標の間の変換にはスカムの物性と形状変化の関係に関する知識が必要だが，現時点では得られていない．しかし上記の比較でもスカム発生時期や発生強度についての検証は可能であると考えた．なお灰色のハッチは画像が得られない夜間を示している．(c)と(d)の波形をみると，各地点においてスカムが大量に観測された時間は概ね再現できていると考えられる．

(e)はこの出水で底泥堆積が進行した御成橋から日蓮橋に至る区間でのスカム浮上量の計算値である．三浦ら [18)]が指摘したように下げ潮期に集中している．一方(f)は同区間における底泥中のガス保有量の計算値である．出水後約半日の間に嫌気化によりガス保有量が増加し，7/30 12:00 頃付近の下げ潮に伴うスカムの大量浮上により，底泥のガス保有量は減少した. また 7/31 0:00 過ぎの下げ潮期でも同様の変化が生じている．つまり 5-4-1 (4) に述べたように水圧変動がスカム発生に及ぼす影響は非常に大きい.

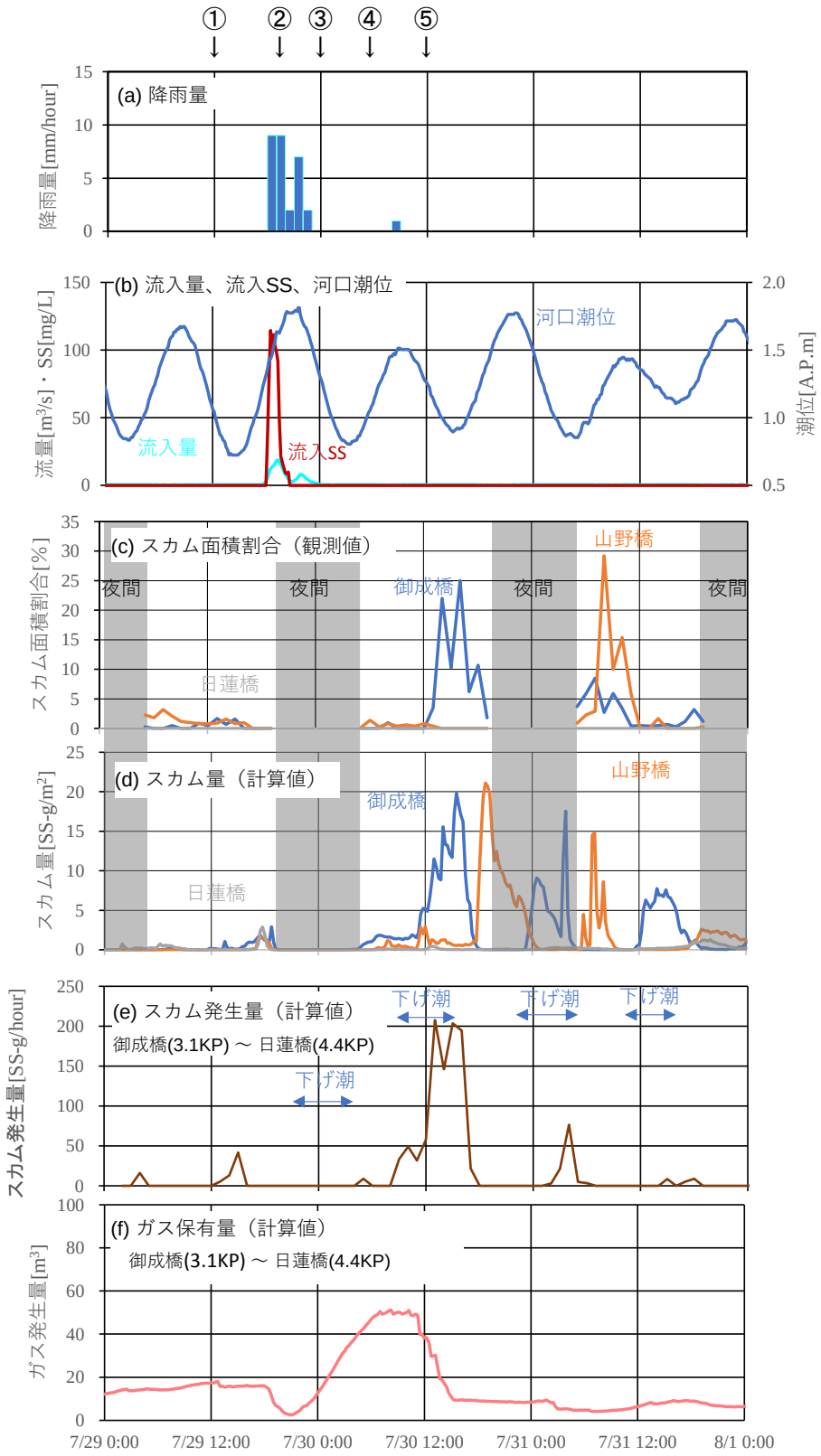


図 5-37　実績と再現計算結果の比較

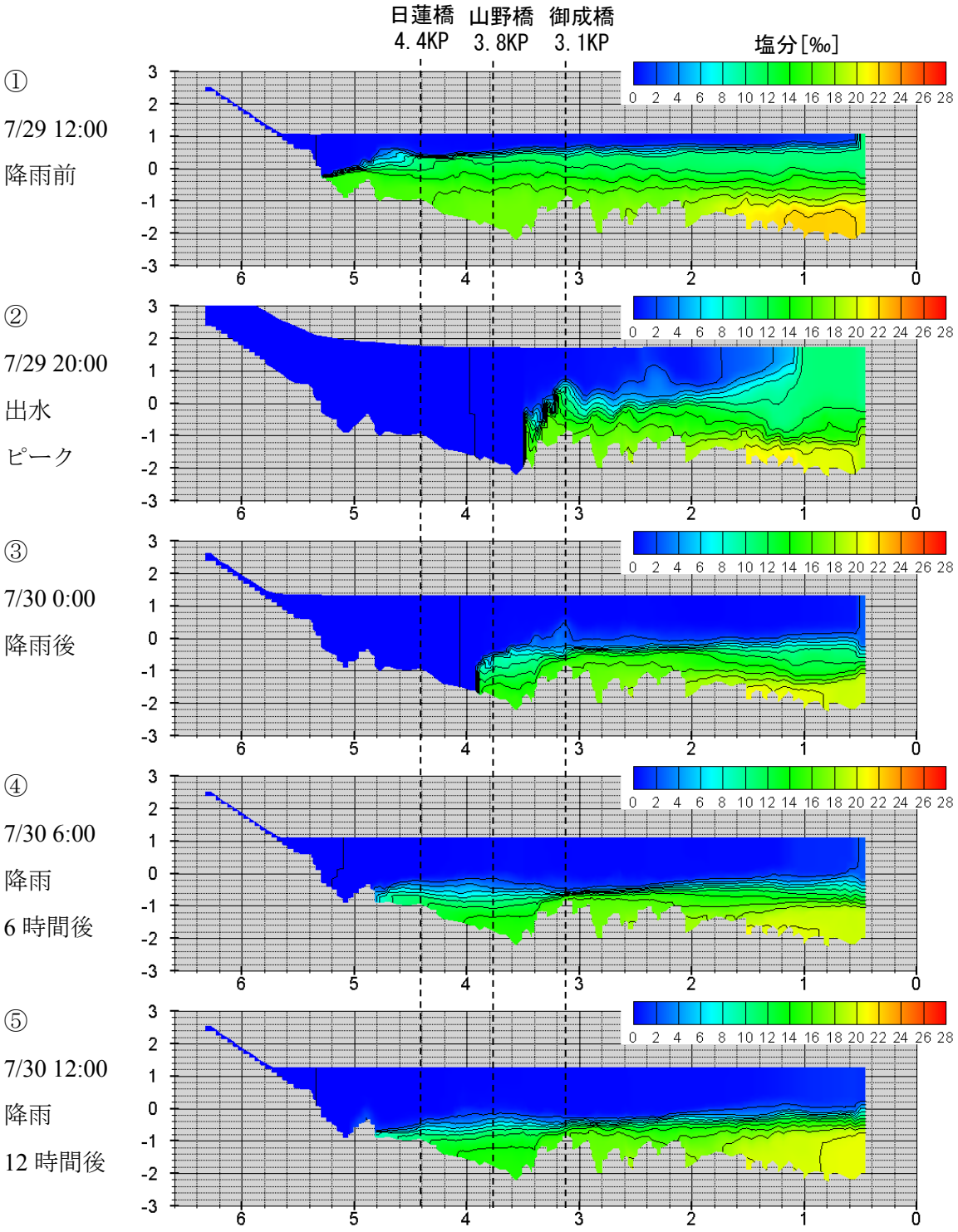


図 5-38 塩分縦断分布の変化

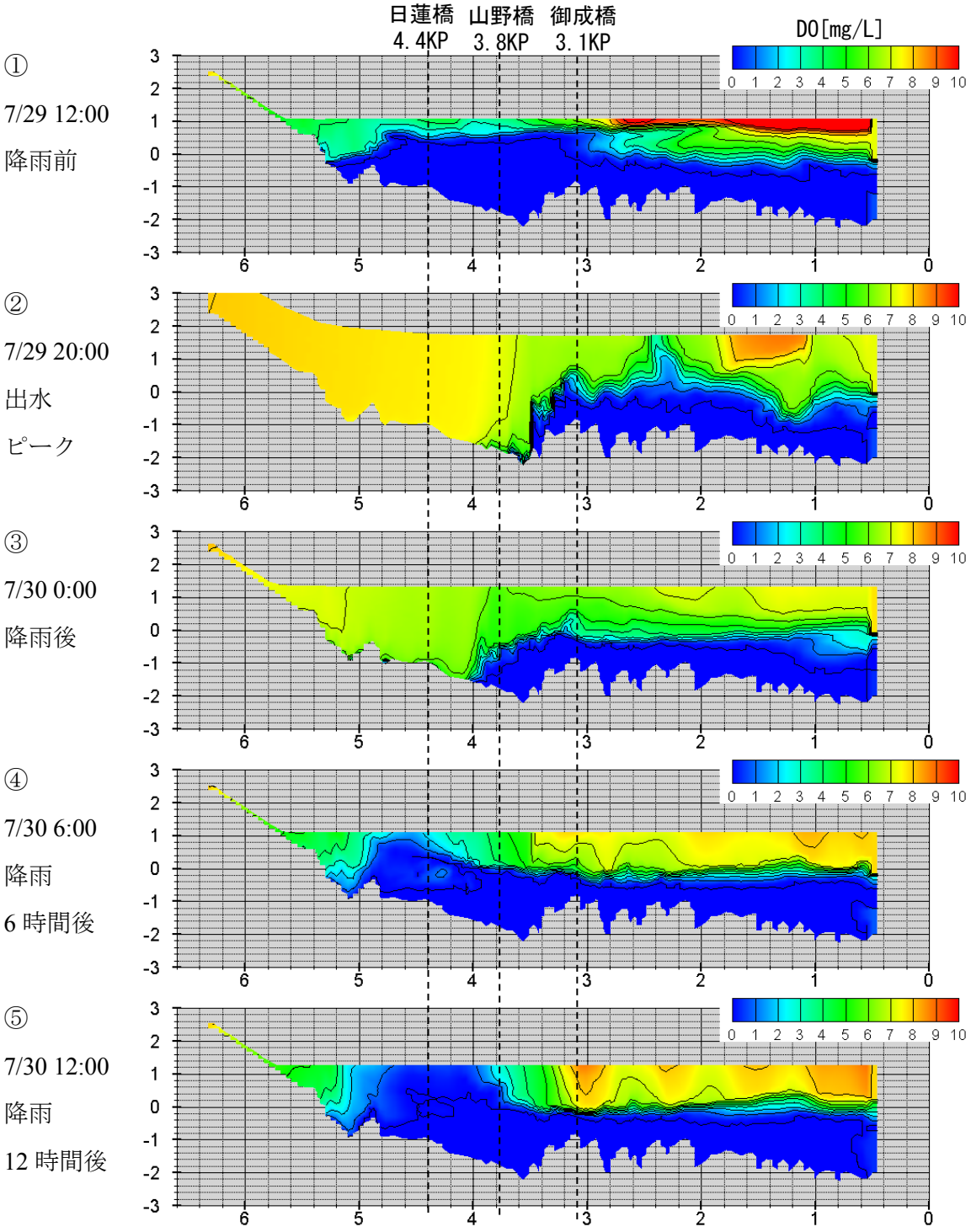
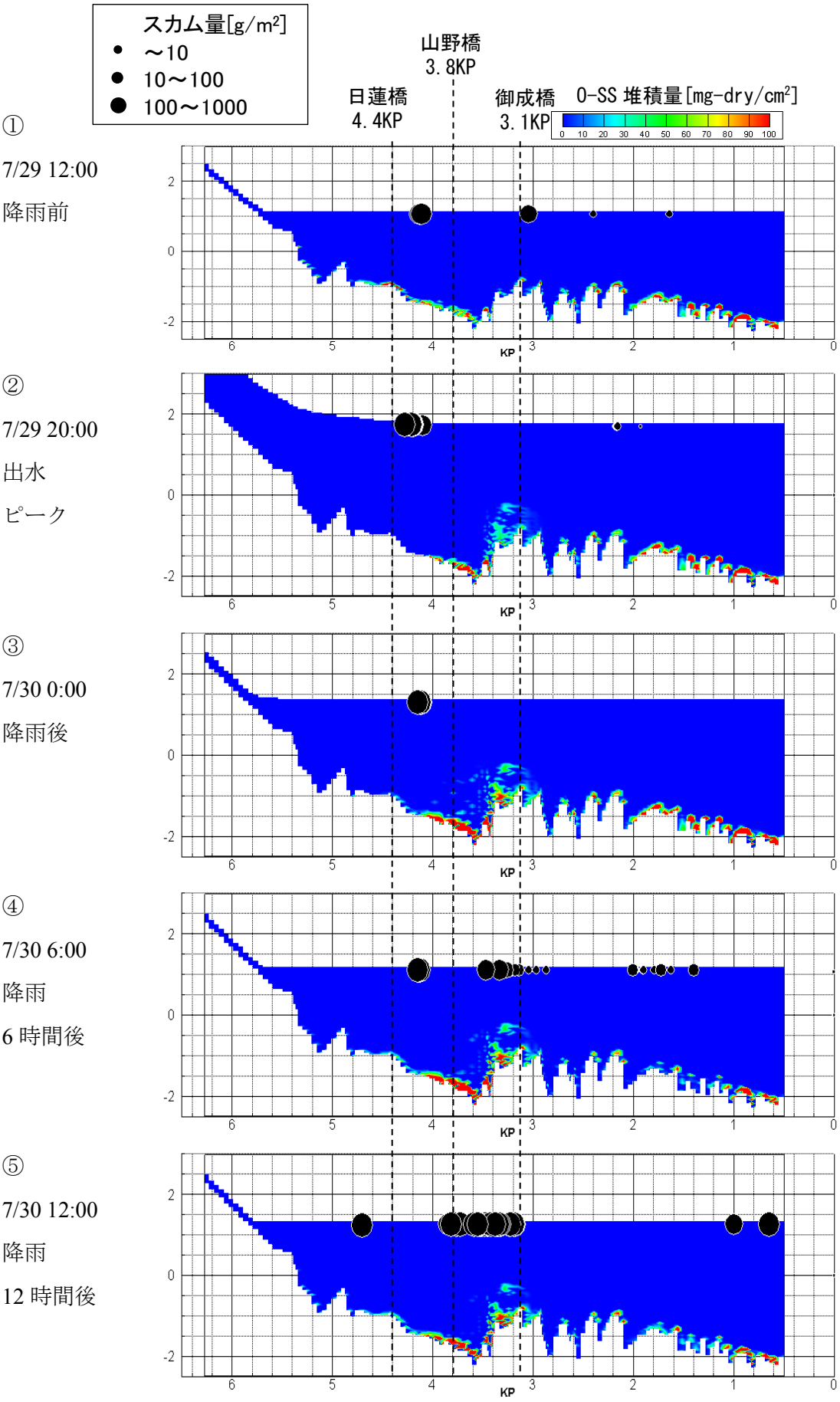


図 5-39　DO 縦断分布の変化

図 5-40 に各時点における O-SS 堆積量とスカム発生量を示す．③の降雨後をみると，河床が凹んだ山野橋付近に多くの堆積が見られる．これは，流入した O-SS が沈降・巻き上げを繰り返しながら，河床が凹んだ山野橋付近に堆積したものである． 図 5-39 に示した通り，この山野橋付近は出水後速やかに嫌気化するため，嫌気性ガスが発生し，スカムとして有機汚泥が浮上しやすくなっている．



①
7/29 12:00
降雨前

②
7/29 20:00
出水
ピーク

③
7/30 0:00
降雨後

④
7/30 6:00
降雨
6 時間後

⑤
7/30 12:00
降雨
12 時間後

図 5-40　堆積量・スカムの縦断分布の変化

図 5-41 は，シミュレーション対象期間（2017/7/26～2017/8/6）についての観測結果（c）と計算結果（d）の比較である．上段(a)に時間降雨を，(b)に流入量，流入 SS，河口潮位を示している．それぞれの降雨について，図上に総雨量と SS 負荷量を示している．

3 降雨について，総雨量は大きく異なるものの，感潮域に流入した SS 負荷量は 0.48t～0.65t と同等である．しかし，7/29 降雨で著しく多くのスカムが御成橋および山野橋で観測されている．この理由は，図 5-42 に示すように，①7/26 降雨では，総雨量が小さく，比較的上流側に堆積が生じた．上流側は，水深が浅く，また上流から DO を多く含んだ淡水が流入するため，比較的嫌気化しにくい．②7/29 降雨は比較的総雨量が大きく，出水も大きかったために感潮域に流入した O-SS は水深の深い山野橋付近に堆積した．この山野橋付近は呑川の感潮域で最も停滞性が強いため，嫌気化が始まり嫌気性ガスが発生，スカムが浮上したものとみられる．一方で，③7/29 降雨は 40mm と大きな降雨があり，O-SS が下流側まで流送されたことで，御成橋・山野橋付近ではスカムの発生がみられなかった原因である．この様に，このモデルでは下水道流出モデルによって得られた流入量，SS 流入量のハイドログラフから，O-SS の堆積特性やスカム発生特性を考慮することによって，おおまかにスカム発生を予測することができているといえる．

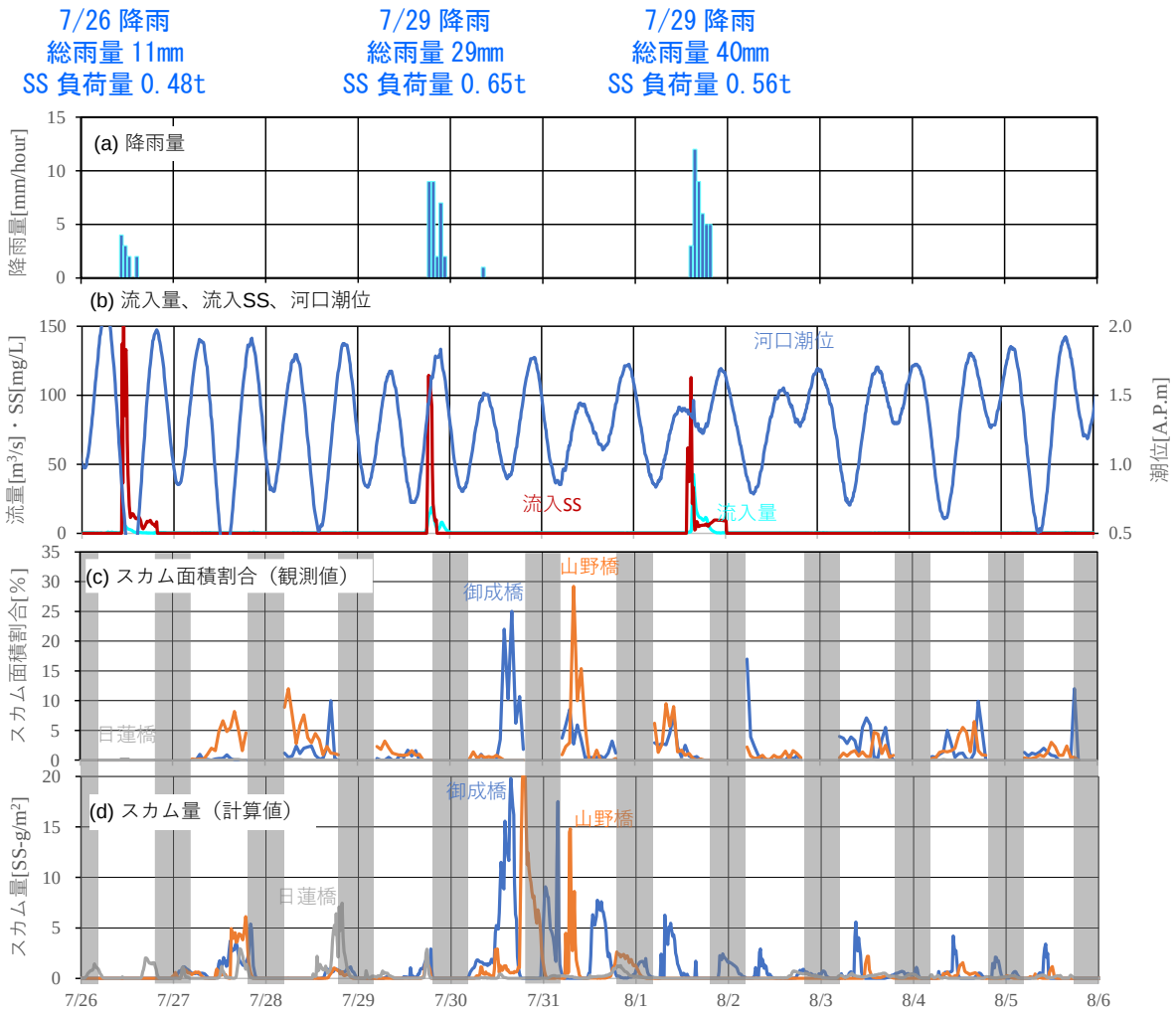


図 5-41　観測結果と計算結果の比較（全期間）

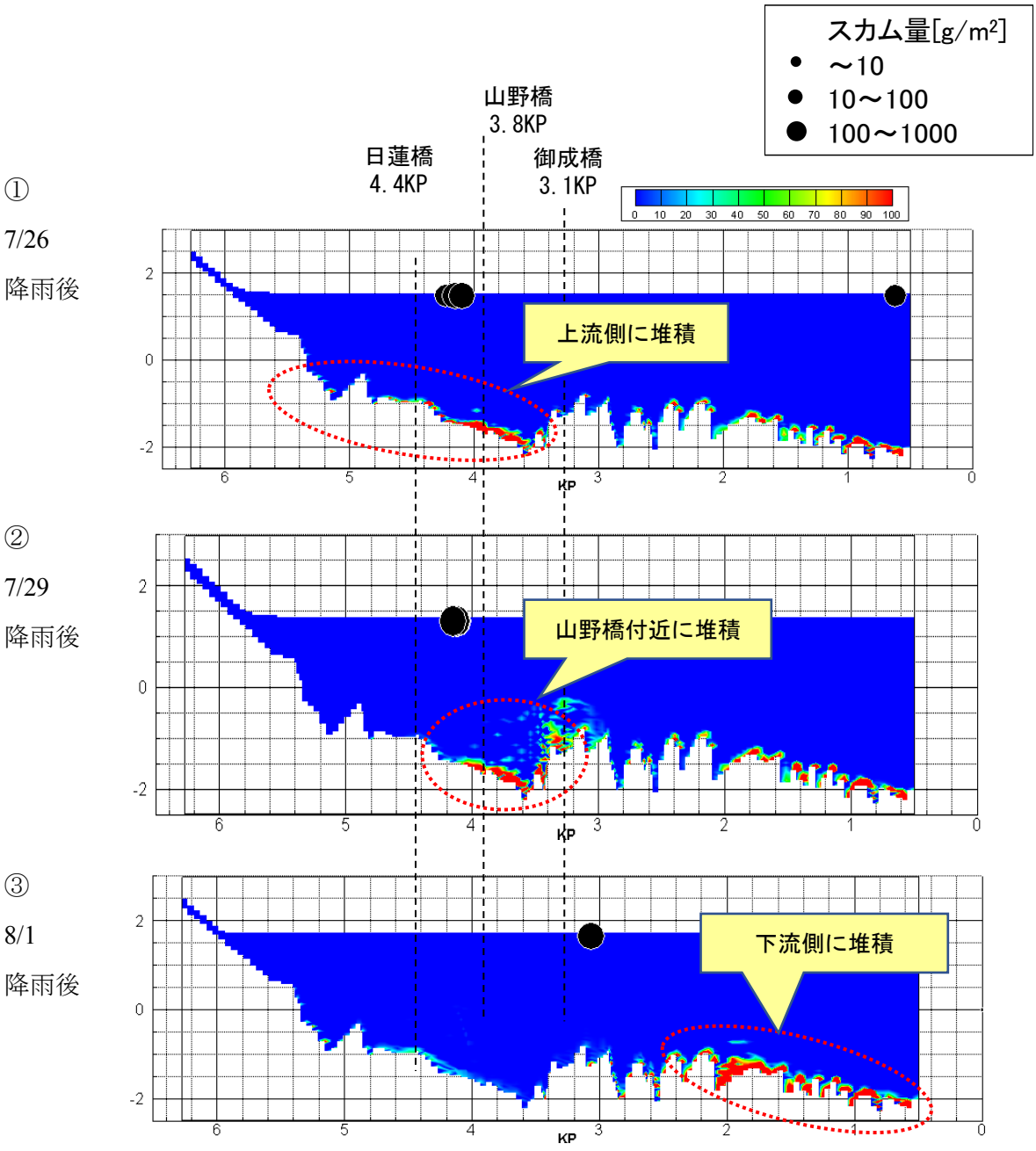


図 5-42 降雨後の堆積量の分布

上述のように，本検討で構築したスカム発生予測モデルはスカム発生傾向を概ね捉えることができているが，詳細な発生場所や時期については誤差がある．誤差の要因としては，以下のことが考えられる．

- 河道内で元々存在し，出水に伴い混入した土砂等の影響を考慮できていないこと．また，流下過程での有機汚泥の変質を考慮できていないこと．
- 計算条件としてAMeDAS羽田地点（呑川の河口から2km程度南東に位置）の風向・風速データを使用しているが，呑川沿川は建物が多く，また河川内は異なる風向・風速が生じている可能性があり，それらの影響を考慮できていないこと．
- スカムの発生箇所は微地形などの大きく受け，堆積量や発生量に差異ができるため，解析においてはそこまでの解像度を有していないこと．
- 浮上したスカムは，河道内の横断方向の流速分布や湾曲部内岸側などの淀み点において滞留することがある．それらの平面二次元的な挙動を鉛直二次元モデルでは再現できないこと．
- スカムの観測において，画像解析によりスカム面積割合を算出しているが，スカム量として同様な比較ができていないこと．

上記の課題はあるものの，本研究で構築したスカム発生予測モデルはスカム発生の傾向を概ね捉えることができており，スカムの発生予測や対策効果への使用が期待できる．

5-5　結語

5-5-1　得られた知見

(1)　嫌気性ガスの生成

本研究では，による嫌気性ガスおよびスカムの発生を模擬した基礎実験を実施した．実験で得られた主な知見は以下のとおりである．

- 嫌気性ガスの発生は底泥直上水が嫌気的になってから比較的速やかに開始し，数時間後にスカムが急激に浮上した．またガス生成速度は汚泥投入量に概ね比例していた．
- 嫌気性ガスの生成速度は水温上昇に伴い急激に増加し，30℃と 20℃では約 4 倍の開きがあった．また塩分とは負の相関があり，25 ‰以上ではほぼゼロとなった．
- 嫌気性ガスの約 2/3 を CH_4 が占めており，次いで CO_2 であった．しかし塩分が 20 ‰に達すると H_2S が CO_2 を上回った．その量は必ずしも多くはないが，H_2S は毒性が強く，また河川水の白濁化の原因ともなるので[23]，都市河川の環境予測および評価において重要であると考えられる．
- スカムは嫌気性ガス生成速度が大きくなると短時間で発生し，スカム厚は汚泥投入量と正の相関があった．

(2)　嫌気性化

- 嫌気性ガスの発生については Wijsman モデルによりモデル化を行った．その結果，上記の嫌気性ガスの発生特性を良好に再現できた．
- また，呑川で発生するスカムについてモデル化を行い，現地調査結果との比較検証を行った．その結果，スカムの浮上過程に Henry の法則と Boyle･Charles の法則を適用することにより，スカム発生が下げ潮時に集中することを説明できた．
- 現地で見られるスカムは，河川流の移流･拡散およびガスの放出による沈降･消失の結果であるが，これらについて実験結果と流動モデルを用いてシミュレーションしたところ，現地画像から求められた水面上のスカム面積割合の変動を概ね説明できた．

5-5-2　今後の課題

今後の課題は下記の点である．

- 嫌気性ガスの生成速度への Wijsman モデルの適用において，塩分の応答など，一部の特性については表現できなかった．実際，有機化合物の分解過程は生化学的に複雑であるため，これらについては詳細な実験のうえモデルの改良を考えていく必要がある．
- 本研究は呑川を研究対象として行われてきたが，今後は東京都下の他の都市河川への適用性を確認することで，他の水域でも適用できるようになる．
- 都市河川で発生している悪臭，白濁化や魚の斃死など，スカム以外の水環境問題についても，本検討で構築したモデルを応用してその他水環境予測モデルを構築し，総合的な対策を検討していくことが望まれる．

【参考文献】

1) Solomon S., Qin D., Manning M., Marquis M., Averyt K., TignorM.M.B., Miller H.L. and Chen, Z. eds : Climate Change 2007, The　Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, pp.235-336, 2007.
2) Matthews, E., and I.Fung, Methane emissions from natural wetlands:Global distribution, area, and environmental characteristics of sources, Global Biogeochem. Cycles, Vol.1, 61-86, 1987. DOI: 10.1029/GB001i001p00061
3) Aselmann, I., and P.J.Crutzen, Global distribution of natural freshwater wetlands and rice paddies, their net primary productivity, seasonality, and possible methane emissions, Journal of Atmospheric Chemistry Vol.8 pp.307-358, 1989. DOI: 10.1007/BF00052709
4) Bastviken, D., J. J. Cole, M. L. Pace, and L.Tranvik, Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate, Global Biogeochem Cycles Vol.18 GB4009, 2004, DOI:10.1029/2004GB002238
5) 堀田哲夫，天野光歩，山下芳浩，陳飛勇，東海林光：停滞性沿岸域での悪臭ガス発生に関する調査，海岸工学論文集，第 49 巻，2002. DOI: 10.2208/proce1989.49.1101
6) 牛久保明邦，竹島征二，高井康雄：汽水域のモデル実験による硫酸還元とメタン生成，日本海水学会誌，第 47 巻，第 1 号，pp.19-23，1993. DOI: 10.11457/swsj1965.47.19
7) 丸谷靖幸，中山恵介，佐々木正史，新谷哲也，駒井克昭，岡田知也：網走湖におけるメタン発生メカニズムの解明，土木学会論文集 B1(水工学) Vol.69, No.4, I_1435-I_1440, 2013. DOI: 10.2208/jscejhe.69.I_1435
8) 湖沼技術研究会底質ワーキング：底質に関わる技術資料，2009.
9) 李玉友：メタン発酵技術の概要とその応用展望，JEFMA No.53，pp.4-18，2005.8.
10) 社団法人日本有機資源協会：バイオガス化マニュアル 有機資源 熱・エネルギー化調査検討専門委員会 報告書，　2006.8.
11) 松梨 史郎, 今村 正裕, 井野場 誠治:貯水池底泥堆積物の嫌気化予測モデルの開発，電力中央研究所 研究報告書，研究報告：V05016，2006.
12) J. W. M. Wijsman, P. M. J. Herman, J. J. Middelburg and K. Soetaert，A Model for Early Diagenetic Processes in Sediments of the Continental Shelf of the Black Sea : Estuarine, Coastal and Shelf Science, vol.54, pp.403-421，2002. DOI: 10.1006/ecss.2000.0655
13) 永尾謙太郎，畑恭子，芳川忍，細田昌広，藤原建紀：水質改善対策の評価を目的と

した浮遊系-底生系結合生態系モデルの開発と適用，海岸工学論文集 第 55 巻 pp.1191-1195，2008. DOI: 10.2208/proce1989.55.1191

14) 入江政安・西田修三・寺中恭介・辻陽平・平澤充成・藤原敏晴・中筋みゆき，硫化水素の発生・溶出に着目した水底質モデルによる貧酸素水塊の動態解析，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol. 66，No.1，2010，pp.1066-1070. DOI: 10.2208/kaigan.66.1066

15) 山崎正夫，津久井公明：河川におけるスカムの発生に関する研究（その１）スカムの起源に関する研究，東京都環境科学研究所年報 1991，pp.171-179，1991.

16) 山崎正夫，津久井公明：河川におけるスカムの発生に関する研究（その２）－神田川白鳥橋～飯田橋間の堆積状況調査結果, 東京都環境科学研究所年報 1991-2, pp.182-184，1991.

17) 山崎正夫，津久井公明：河川におけるスカムの発生に関する研究（その３）－降雨後のたい積状況変化についてー, 東京都環境科学研究所年報 1992, pp.167-171, 1992.

18) 三浦陽介，堀田哲夫，根岸均，増本健祐：長期連続観測に基づく都市域感潮河川におけるスカム・悪臭発生要因の考察：環境水理部会研究集会 2012 資料，2012.

19) 濱田泰広，田辺弘雄，清水直樹，吉岡一郎，三戸勇吾，齊藤直，日比野忠史：スカムが発生する内湾での底質環境の改善法の設計と施工，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol.68，No.2，I_1151- I_1156，2012.

20) 田辺弘雄，岩本幸生，清水直樹，三戸勇吾，出路康夫，吉岡一郎，斉藤直，日比野忠史：ヘドロ化した内湾でのスカム発生機構の解明と石炭灰造粒物を用いた底泥浄化法の設計，VI-5，第 63 回中国支部研究発表会，土木学会，2011.

21) J. KAPPELER and W. GUJER：SCUMMING DUE TO ACTINOMYCETES: TOWARDS A BETTER UNDERSTANDING BY MODELLING, Water Research 28(4):763-779, 1994. DOI: 10.1016/0043-1354(94)90084-1

22) 理科年表（平成 28 年）：国立天文台編，第 89 冊, pp.物 155(517)，2016.

23) Hanna J. Poffenbarger ,Brian A. Needelman, J. Patrick Megonigal： Salinity Influence on Methane Emissions from Tidal Marshes，Wetlands 31：pp.831‑842，2011. DOI: 10.1007/s13157-011-0197-0

24) 三浦心，堀田哲夫，根岸均，鶴田泰士：都市河川汽水域における青潮の発生機構に関する調査と解析, 水工学論文集, 第 53 巻, 2009.2.

25) Heinz Schulz and Barbara Eder 共著，浮田良則監訳：バイオガス実用技術，(株)オーム社発行，2002.3.

26) 朝井孝二，大脇哲生，村岡和満，星山栄市，中田泰輔：鉄・マンガンの酸化速度を考慮したダム貯水池の水質モデルの構築：山口大学工学部研究報告 Vol.65 No.2，2014.
27) YSI Environmental : ORP Management in Wastewater as an Indicator of Process Efficiency，Application Note，2008.
28) Philippe Van Cappellen, Yifeng Wang：Metal Cycling in Surface Sediments: Modeling The Interplay of Transport and Reaction，Metal Contaminated Aquatic Sediments，1995.
29) 平成 29 年度版　大田区の環境調査報告書東京都大田区，2017.3.
30) Al-Zuhair SulaimanMuftah El-NaasMuftah El-NaasAl-Hassani Huda : Sulfate inhibition effect on sulfate reducing bacteria，J Biochem Tech vol.1(2)，pp.39-44. 2008.

なお，本章の内容は，下記の論文で公表済みである．

1) 三浦心，石川忠晴，堀田哲夫：都市河川汽水域に集積する有機汚泥からの嫌気性ガス発生とスカムの浮上に関する研究，土木学会論文集B1(水工学)，第73巻，pp.I_1063- I_1068, 2017. DOI: 10.2208/jscejhe.73.I_1063
2) S. Miura, T. Ishikawa and T. Hotta：Laboratory experiment on generation of anaerobic gas and scum from organic sludge in urban rivers, WIT Transactions on Ecology and the Environment, Vol.228, Water Pollution XIV pp.9-20, 2018. DOI: 10.2495/WP180021

第6章　対策効果の把握

6-1　緒言

6-1-1　本章の目的

前章までに下水道流域から都市河川への有機懸濁物の流入，感潮域における堆積そしてスカムの発生・消失など，スカム発生に関わる一連のプロセスについて定量的に評価できる数値シミュレーション・モデルを構築，実現象の再現性について確認してきた.

本章では，構築したスカム発生予測モデルを用いて，都市河川で適用されている各種対策のうち，代表的なものについてスカム発生抑制効果を定量的に評価した.

6-1-2　既往の研究と課題

下水道の合流改善については，これまで多くの検討がなされており，簡易なモデルを使用したシミュレーション[1)]から, MIKE-URBAN 等の市販ソフトウェアを使った詳細な合流改善検討[2)]まで様々な検討が目的に応じて実施されている．しかしながら，それらの検討は下水道から河川に流入する O-SS 負荷量を算出したものであり，それらの削減がスカム発生抑制にどの程度寄与するのかは評価できていなかった.

一方，都市河川の河道内対策について水質浄化事例はほとんど無く，現場で試行錯誤を行いながらスカム発生抑制を行っている状況である．高濃度酸素水については，自然湖沼やダム湖などで多数の研究事例[3)~5)]があるが，それらの水域に比べて都市河川は水深が浅く，流動や水質の変化の大きい都市河川における研究事例は極端に少ない.

そこで本研究では，構築した O-SS 流出予測モデルおよびスカム発生予測シミュレーション・モデルを用いて，代表的な対策についてシミュレーションを行い，それらの評価を行えることを示す.

6-2　都市河川における水環境改善対策

(1)　都市河川における対策メニュー

多くの都市河川においてスカムなどの水環境問題が発生しており,水質浄化のために様々な対策が実施されている.

スカム発生の抑制に効果があると考えられる対策を表 6-1 にまとめた．大きく，流域からの有機懸濁物の流入を抑制するための流域対策と,河川内でスカム発生を抑制する河道内対策の 2 種類に分けられる．主な対策としては，汚濁水を河川に放流しないための一時的な雨水貯留施設の整備,水中に酸素を溶存させるための高濃度酸素水の供給,河床を平らにして汚濁物質を溜めないようにする河床整正,河川の水量を確保するための導水などが挙げられる.

表 6-1　都市河川の主な水質改善策

分類	対策	効果
流域対策	下水道 合流改善	雨水の初期越流水を貯留することで，河川に流入する有機汚濁物の量を減少させる.
河川内対策	水流発生 装置	水流を発生させることで有機物の沈降を抑制し，かつ底層に酸素を供給する.
	高濃度酸素水 浄化施設	底層に高濃度酸素水を供給することで，底層の溶存酸素量を増加させて嫌気化状態を解消する.
	河床整正工事	河床に堆積した汚濁物質を除去し，有機汚濁物が堆積し難い縦断形にする.
	導水	他河川や海域から導水することで，河川の水量を増大させ，河川水の流動・交換を促進することで水質を改善する.

参考のため，他の府県を含む都市河川で実施されている水質浄化対策を表 6-2 に示す.

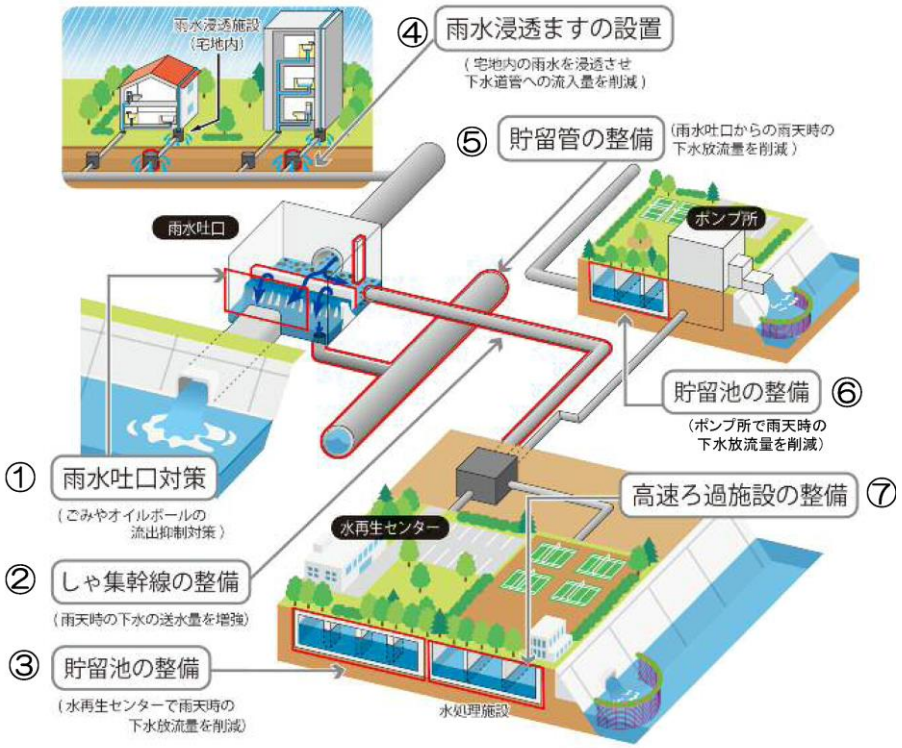
表 6-2　都市河川における水質浄化対策

都府県	河川	対策
東京都	石神井川	河床浚渫，河床整正，水流発生装置，地下水の散水， 高濃度酸素水の供給（実験）
	神田川	河床浚渫
	日本橋川	河床浚渫
	亀島川	河床浚渫
	目黒川	河床浚渫，河床整正，高濃度酸素水の供給（実験）， 再生水の散水※1，越流水の貯留※2 ※1）御成橋から再生水（下水処理水）を 1 時間に 1 回散水している. ※2）上目黒一丁目，青葉台一丁目付近で降雨時に越流水を貯留する施設を整備.
	古川	導水※3 ※3）東京メトロ恵比寿駅付近の地下水を，渋谷橋下流付近で放流している.
	立会川	河床浚渫，高濃度酸素水の供給，導水※4 ※4）JR 総武線トンネル内地下水を導水している.
	内川	曝気装置※5 ※5）諏訪橋上流に曝気装置を設置し，水中に酸素を供給している.
	呑川	河床浚渫，河床整正，水流発生装置
大阪府	道頓堀川	河床浚渫，導水※6，越流水の貯留※7 ※6）潮の干満に合わせて水門を開閉し，大川の水を導水している. ※7）降雨時，貯留管（平成の太閤下水）に越流水を貯留している.
愛知県	堀川	河床浚渫，高濃度酸素水の供給，導水※8 ※8）庄内川から暫定導水を行っている.

(2) 流域対策

流域対策としては，下水道の合流改善対策が積極的に進められている．東京都では，合流改善対策として下記の対策が実施されている．

合流式下水道の改善対策イメージ（東京都下水道局 [6]）



（取組1）①
雨水吐け口からのごみや白色固形物（オイルボール）などの
流出を抑制する水面制御装置などの整備は概ね完了しています。

（取組2）②
雨天時の下水をより多く（晴天時の汚水量（1Q）の3倍（3Q））、
水再生センターに送水するための、下水道管の整備は概ね完了しています。

（取組3）③⑤⑥
降雨初期の特に汚れた下水を貯留する施設の整備を進めています。
貯留した下水は降雨終了後、水再生センターに送水して生物処理をします。
計画：170万m^3の貯留施設（平成35年度までに完了予定）
実績：115万m^3の貯留施設（平成28年度末）

（取組4）④
下水道管への流入量を削減する雨水浸透ますの設置を進めるとともに、
区などと連携し、お客さまによる設置の促進についてＰＲしています。
※下水道管への流入量が減ることで雨天時の放流量を削減します。

（取組5）⑦
水再生センターからの雨天時の放流水質を改善する高速ろ過施設を、
東京2020大会開催までに6か所の水再生センターに導入します。
※高速ろ過とは、従来の沈殿処理と比較して省スペースで、
汚濁物を２倍除去することが可能な処理技術

① 雨水吐口対策

浮遊物を越流させないための水面制御装置（ガイドウォール）（図 6-1 参照）の設置や，未処理水を越流させないように越流堰高の嵩上げなどが実施されてきている．水面制御装置については，東京都においてはほぼ設置が完了している．一方で，堰の越流開始流量は，一般に晴天時汚水量の 3 倍（3Q）を標準としており，この水量は汚水処理場の沈殿池やしゃ集幹線の流下能力と関連しています．したがって堰の嵩上げについては②のしゃ集幹線の整備や下水処理場の能力の増強と一体で実施する必要がある．

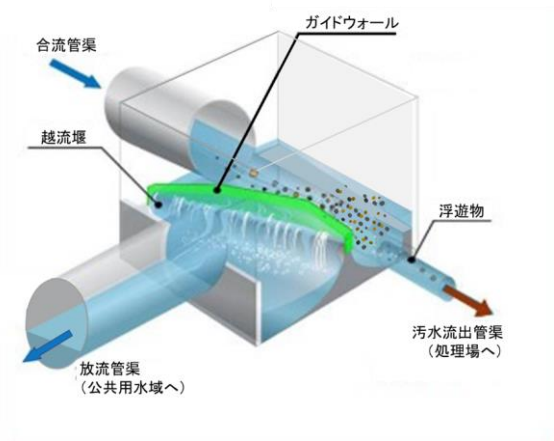


図 6-1　雨水吐き室の構造
（松島ら [7]の構造図を一部編集）

② しゃ集幹線の整備

汚水を下水処理場までの送水するしゃ集幹線については，東京都においては晴天時流量の 3 倍（3Q）までの整備がほぼ完成している．これ以上の増強は幹線延長が長いため，コストや時間が必要となるため，現在はほとんど実施されていない．

③⑤⑥ 貯留施設の整備

貯留池や貯留管などのファースト・フラッシュにおける負荷削減を目指した貯留施設の整備は，地下を利用して新設または治水管を転用して貯留管とするなど，東京都区部における事業が多数実施されている．

④ 雨水浸透ますの設置

雨水流出を抑制するため，雨水ますを浸透性のものを採用したもの．東京都においても積極的に実施されている．

⑦ 高速ろ過施設の設置

越流堰を越流した未処理水を高速でろ過し，放流負荷の低減を図る施設．東京都では試験的に実施されている．

(3) 河道内対策

1) 水流発生装置

底層にジェット噴流を起こし，酸素の少ない底層水と混合・攪拌し，上下の混合を促進する流動を起こして成層を破壊し，底層の停滞・無酸素状態の解消を図る装置である．

導入が比較的簡単であるため，東京都石神井川や呑川で実施されてきた．

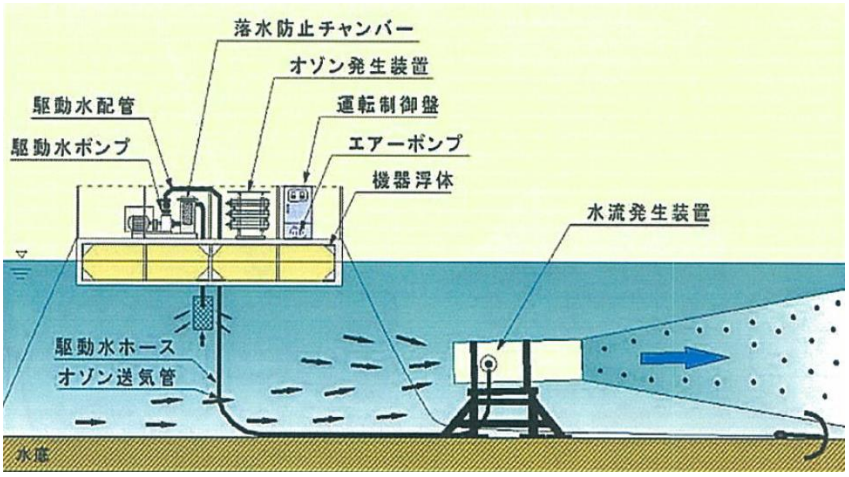


図 6-2　水流発生装置のイメージ

写真 6-1　呑川に設置された水流発生装置

2)　高濃度酸素水の供給

高濃度酸素水浄化施設は，まず吸込口から底層の塩水を引き込み，気体溶解設備によって高圧下で酸素を溶解させる．そして，吐出口から底層へ緩やかに水を戻すことで成層を破壊せず，嫌気化した河床面に効率良く酸素を供給する．底層の嫌気状態を解消することによって，スカム浮上の原因となるメタンなど嫌気性ガスの発生を抑制する効果が期待される．

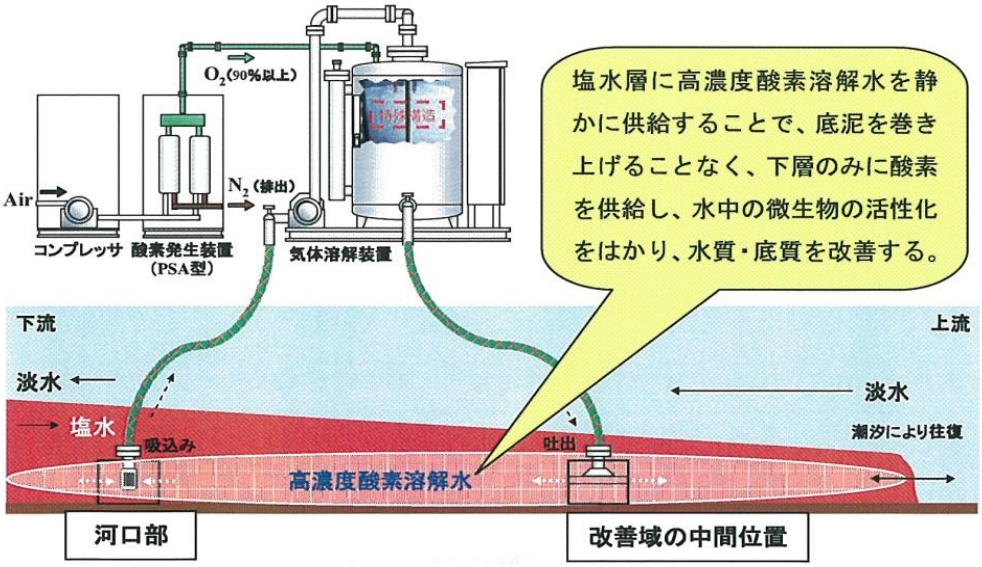


図 6-3　高濃度酸素水の供給イメージ

3)　河床整正

河床を掘削してヘドロが堆積しにくい縦断形にすることで，悪臭の発生を防ぐ．また，流動を促進し，底層の嫌気化による硫化物の発生を防ぐ効果が期待される．

4)　導水

他河川や海域から導水することで，河川の水量を増大させ，河川水の流動・交換を促進することで水質を改善する．

東京都では「城南三河川清流復活事業」として，落合水再生センターで処理した再生水を渋谷川（古川），目黒川および呑川へ送水・放流している（図 6-4）．

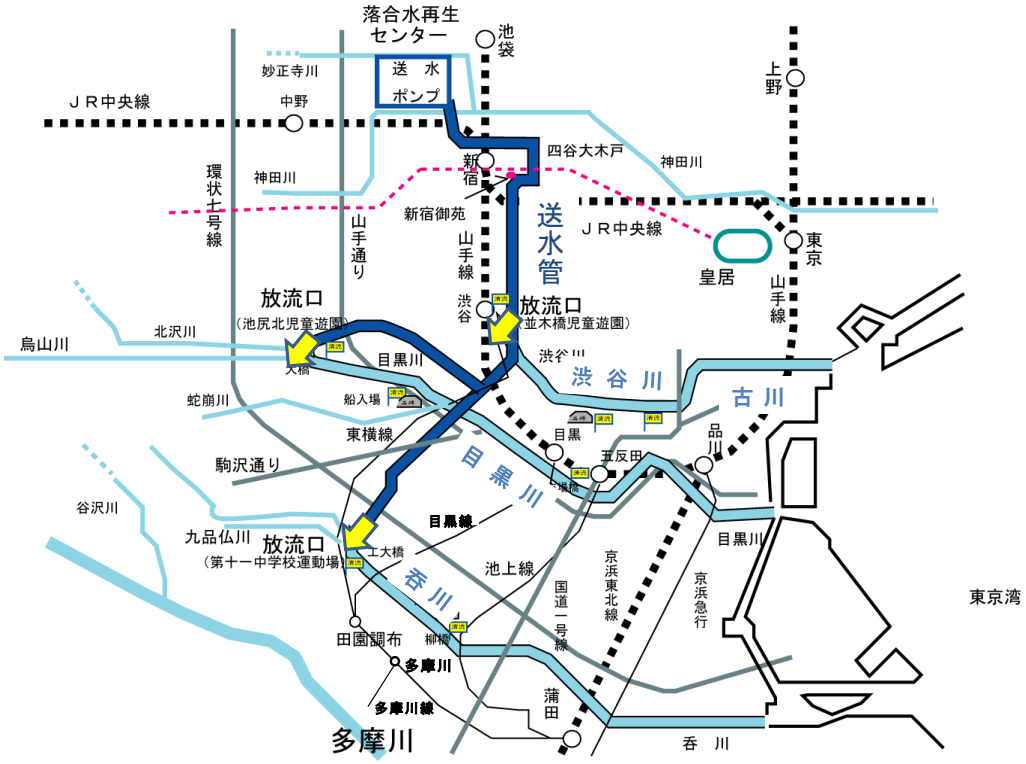


図 6-4　下水処理水の導水の事例

（城南三河川清流復活事業 [8]）

5) その他の対策

その他，現在は実施されていなくても，様々な対策が考えられる．

表 6-3　その他の対策

	対　策	期待される効果	課　　題
河川水のフラッシュ放流	上流側に河川水（淡水）を貯留しておき，スカム発生時に放流する．	スカムの流下を促進させる．	・フラッシュ放流水の確保（貯留施設の増築）
O-SS 堆積箇所の設置	意図的に O-SS が溜まりやすい地形（窪地）などを設けておき，出水後などに浚渫などにより堆積した有機汚泥を取り除く	O-SS を特定の場所に堆積させて，その部分を集中的に改善対策（浚渫・高濃度酸素水など）	・掘削に伴う護岸の安定性などの確保 ・水中に浮遊している O-SS を全て補足することは難しい． ・出水後における O-SS 除去が困難

6-3　シミュレーションによる浄化対策効果の予測

6-3-1　シミュレーション条件

(1)　対象とする対策

上記で構築したモデルを用いて，スカム抑制対策効果を検討した．スカム抑制対策としては，下水道の合流改善の他，河床浚渫や河川底層への高濃度酸素水の注入など様々な手法が検討・適用されている．

ここでは，代表的な水質浄化対策として，流域対策の中から貯留管の設置と河道内対策として高濃度酸素水を選定した（表 6-4 参照）．

表 6-4　想定する対策

	対　策	対策の内容
流域対策	貯留施設設置	工大橋上流域の流末に有効雨量 5mm 分を貯留する施設を設置
河道内対策	高濃度酸素水の供給	最もスカムが発生しやすい 3.6KP において，底層に DO を 30mg/L にまで溶解させた高濃度酸素水 300m^3/h を低層部に供給する．

(2)　貯留施設設置の想定

ここでは下水道の合流改善の一例として，下水道吐出後に貯留施設（図 6-5）を設置した場合を想定し，効果の検証を行った．貯留施設は，呑川集水域で最大の集水面積（7.2km^2）を持つ呑川幹線の工大橋上流集水域流末の吐出口に設置することを考えた（図 6-6）．多くの降雨では，降り始めから累積雨量 9mm までに高 SS の初期越流が生じている．そこで，この集水域の初期損失雨量分 4mm（表 3-11 参照）を除いた有効雨量 5mm 相当の容量 36,000m^3 の貯留施設を設け，初期越流水を貯留することを想定した．

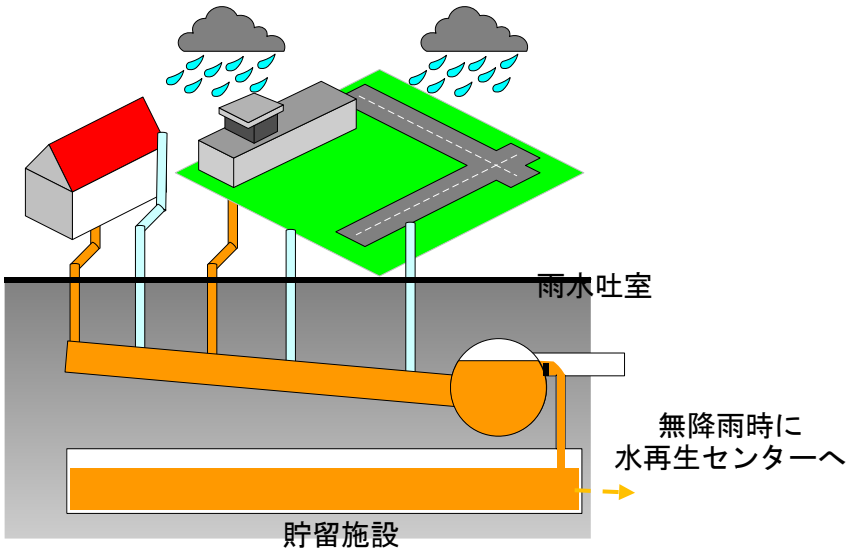


図 6-5　貯留施設のイメージ

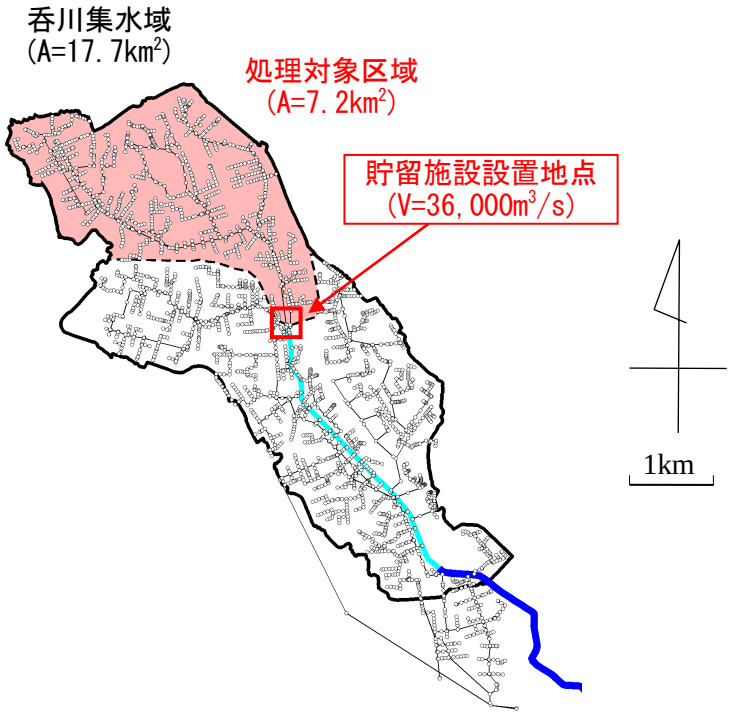


図 6-6　貯留施設の設置位置

(3)　高濃度酸素水の供給

高濃度酸素水の供給については，過去に呑川において実験が行われており，その有効性が確認されている．そこで，本検討では，大田区で実際に計画されている DO30mg/L まで高めた高濃度酸素水を 300m^3/h の水量でスカムが多く発生している 3.6KP 地点の底層（A.P.-1.5m）に供給することを計画している [9)8)]．

そこで，本研究では上記の条件で高濃度酸素水を供給した場合のスカム抑制効果を把握した．

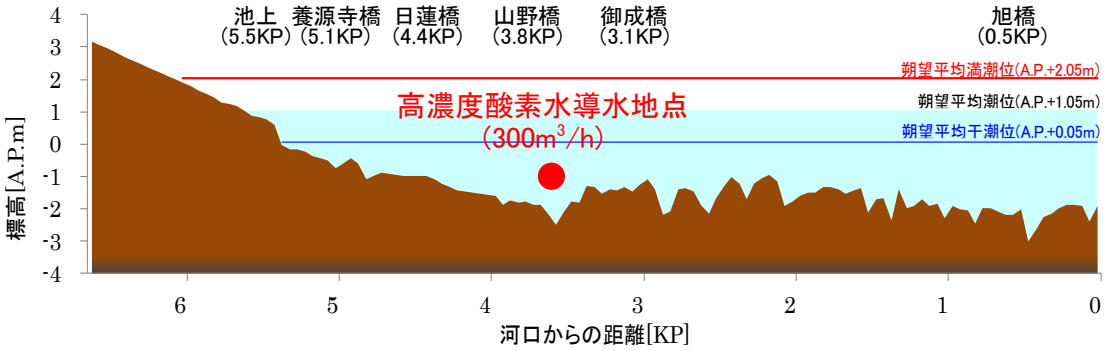


図 6-7　高濃度溶解水供給地点

6-3-2　シミュレーション結果

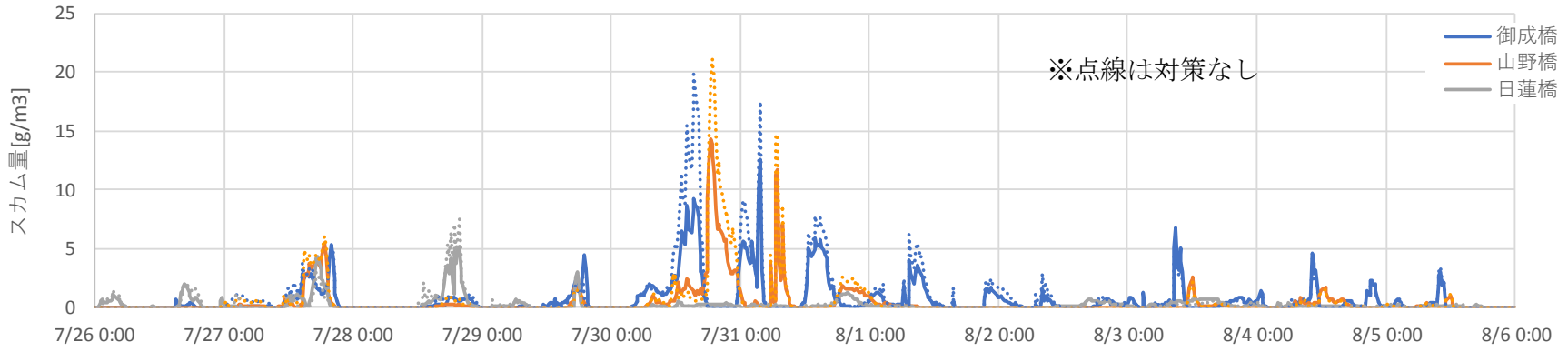
シミュレーション結果を図 6-8 に示す．

流域対策（貯留施設の対策）では，スカムの発生減となる有機性懸濁物の流入自体が減少しているため，全体的に半分から 1/3 程度発生量が低下している．

河道内対策（高濃度酸素水の供給）も酸素を供給することで，底層部の嫌気化を抑えることで 7/30 午後のスカムの大量発生のピークを抑制できている．一方で，スカムの発生源となる有機汚泥量は対策なしと変わっていないために，7/31～8/1 のピークより遅れた時期のスカムの発生時は若干対策なしよりも上回っている時期も見られる．

このように，各種対策について効果を定量的に評価できるとともに，それらの対策による効果の特性を把握することができる．

流域対策（貯留施設の設置）



河道内対策（高濃度酸素水の供給）

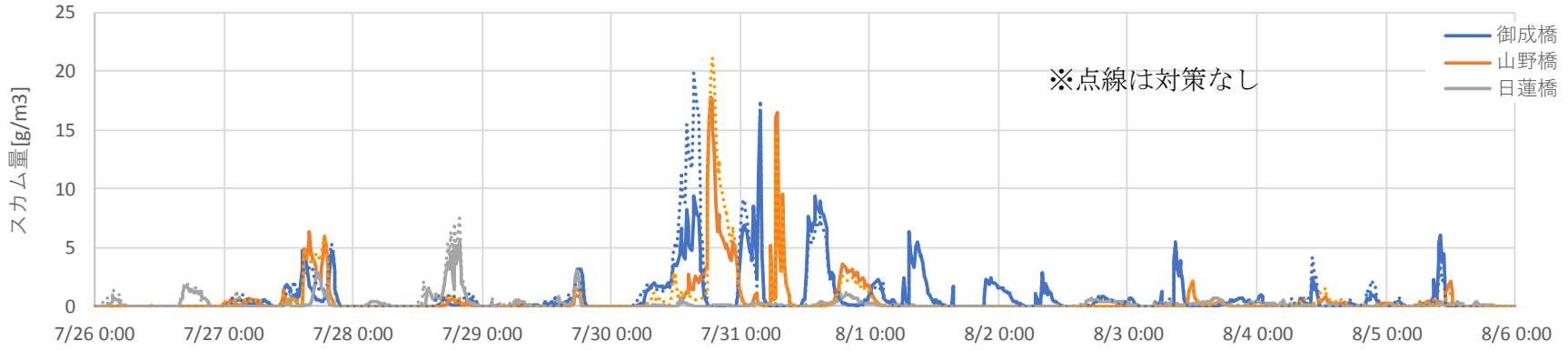


図 6-8　スカム発生量の比較

図 6-8 に対象期間中の 3 出水における貯留施設の設置による流入量削減率とスカム削減率の相関を示す．流入量削減率とスカム削減率は 3 出水ともほぼ同等であり，出水規模によらず流入負荷量を削減した分だけ，スカム量を削減できていることがわかる．

このスカム発生予測モデルを用いて，このような評価を行うことが可能となる．

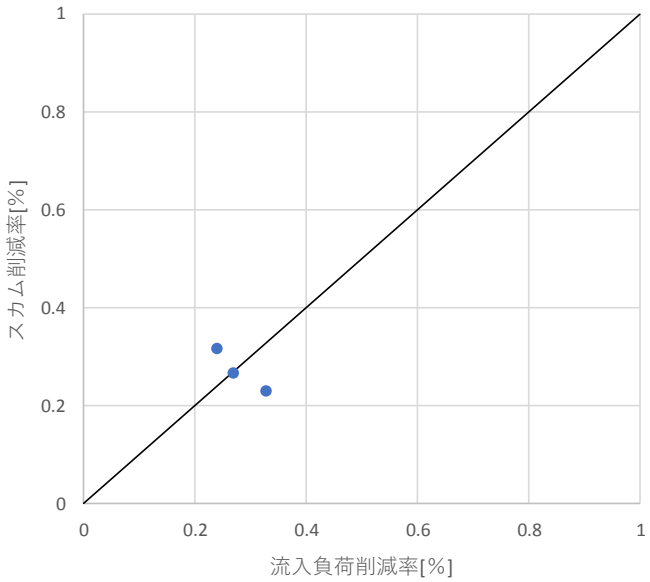


図 6-9　貯留施設の設置による流入量削減率とスカム削減率の相関

6-4　結語

6-4-1　得られた知見

本章では，構築したスカム発生予測シミュレーション・モデルを用いて，都市河川で適用されている各種対策のうち，代表的な“下水道の合流改善（貯留施設の設置)”と“高濃度酸素水の導水”についてスカム発生抑制効果を定量的に評価した.

合流改善における効果は，O-SS 流出シミュレーション・モデルを用いて，それらの対策によるスカム発生抑制効果を把握できるようになった. 今回は貯留施設の設置を一例として実施したが，他の合流改善対策についても同様に評価できると考えている.

高濃度酸素水を導水した場合の効果について確認した. その他の対策についても，シミュレーションに効果を反映することで合流改善対策と同様に評価できる.

6-4-2　今後の課題

- 今回のシミュレーションではスカムの発生量で評価を行ったが, 住民など一般にはどのくらいの効果があるのか分かりづらい. そこで，水面割合や悪臭の強度などに変換してわかりやすく示してくことが必要である.
- 対策の効果のモデル化方法については, 現地の状況や施設の特性を考慮しながら, 詳細に検討・モデル化していく必要がある.
- 対策の実施後においては，評価のためのモニタリング調査を行いながら，各種対策の効果的な運用方法等について検討していく必要がある.

【参考文献】

1) 国土交通省都市・地域整備局下水道部，財団法人下水道新技術推進機構：合流式下水道の改善対策に関する調査報告書 －合流式下水道改善対策検討委員会報告－，2002.
2) 公益財団法人 日本下水道新技術機構 ：流出解析モデル利活用マニュアル（雨水対策における流出解析モデルの運用手引き）2017.
3) 高柳淳二，坂之井和之，佐合純造，鈴木穣，田中宏明，阿部千雅，津森ジュン，中薗孝裕，尾崎正明，山下洋正，南山瑞彦，天野邦彦，中村圭吾，時岡利和：閉鎖性水域の底泥対策技術に関する研究 報告書, 独立行政法人土木研究所重点プロジェクト研究（平成13～17年度）
4) 今井 剛，浮田 正夫，関根 雅彦，樋口 隆哉：閉鎖性水域における底層部への高濃度酸素水導入による水質改善効果に関する研究, 環境工学研究論文集, 第41巻, 2004. DOI: 10.11532/proes1992.41.635
5) 大脇 哲生，星山 英一，中田 泰輔，村岡 和満：高濃度酸素供給によるダム貯水池底層の重金属類の低減効果，第40会環境システム研究論文発表会講演集，2012.
6) 東京都下水道局HP 合流式下水道の改善 http://www.gesui.metro.tokyo.jp/about/pdf/currentproblem.pdf （2017/8/15参照）
7) 松島修：合流式下水道の改善における夾雑物対策を対象とした水面制御装置技術資料. 月刊下水道 33(2)：76-80，2008.
8) 東京都環境保全局 城南三河川清流復活事業パンフレット
9) 呑川水質浄化対策研究会：平成26年度呑川水質浄化対策研究会報告書，2015.

第7章　結　　論

本研究では，都市河川の水環境問題のひとつで大きな問題となっているスカムを研究対象とした. そして東京都南部を流れる呑川を対象として, 流域からの有機懸濁物(O-SS)の流出や感潮域での堆積，さらにスカムの発生・消失について，定量的に評価できる数値シミュレーションを構築した．また，このモデルを使用して，対策の効果を定量的に評価できることを示した．以下に，各章で得られた成果を示す.

第 1 章「序論」では研究の背景として，高度成長期にヘドロの堆積など著しく有機汚濁した都市河川が 1970 年以降の下水道整備などの様々な水質改善対策が実施され，近年では概ね環境基準を満足している一方で，悪臭，白濁化(青潮)やスカム発生や魚の大量斃死など水環境問題が生じていること，これらの水環境問題は，主に降雨後など特定の期間に一時的に生じることが多く，定期水質調査などの一般的に行われている水質調査では実態がほとんど把握できていないことを説明した.

第 2 章「都市河川の現状と課題」では，東京都の都市河川の現状と課題について，東京都区部の約 8 割が合流式下水道で整備されているため，降雨時には汚水の一部が未処理のまま都市河川に流入することを述べた．また，上流部は比較的急勾配の山の手台地を流下するが，下流部の低平地はほとんど河床勾配がなく，その勾配変化点において悪臭，スカム，白濁化や魚の斃死などの水環境発生していることを説明した．また，対象河川呑川について上記の特徴を持つ典型的な都市河川であること，中小規模の降雨後に発生するスカム発生状況について説明した.

第 3 章「合流式下水道からの有機懸濁物の流出に関する研究」では，現行下水道合流改善計画での流量算定に用いられている MIKE URBAN を用いて，出水時に汽水域上流端に達する O-SS の時間波形をシミュレーションするモデルを構築した. その結果, MIKE URBAN に含まれる O-SS 排出モジュールは，現地調査結果にもとづきパラメータを調節することにより，合流式下水道からのファーストフラッシュ波形を表現できるものと考えられた．また下水管渠内での堆積・洗堀に Engelund-Hansen モデルを用いた結果，河道における O-SS 波形ピークの縦断変化を良く再現できることがわかった.

第 4 章「有機懸濁物の河川感潮域における堆積に関する研究」では，第 3 章で構築した下水道流出モデルから呑川感潮域上流端に達する懸濁物流入量を境界条件として，鉛直二次元密度流モデル（TITech-WARM）により懸濁物沈降量を推定する方法について検討した．その結果をセディメント・トラップで捕捉した堆積量と比較したところ，地点ごとの相関はばらつきが大きかったものの，堆積が主に進行する呑川 3~5KP の単位面積あたり沈降量との相関はある程度認められた．また強熱減量を乗じた有機懸濁物量についての相関はかなり高かった．モデルを更に厳密化して改良する必要性はあるものの，現象のアウトラインはある程度説明できたと考えている．

第 5 章「スカム発生に関する研究」では，嫌気性ガスおよびスカムの発生を模擬した基礎実験を実施した．実験で得られた主な知見として，ガス生成速度は汚泥投入量に概ね比例していた．嫌気性ガスの生成速度は水温上昇に伴い急激に増加し，30℃と 20℃では約 4 倍の開きがあった．また塩分とは負の相関があり，25‰以上ではほぼゼロとなった．嫌気性ガスの約 2/3 を CH_4 が占めており，次いで CO_2 であった．しかし塩分が 20‰に達すると H_2S が CO_2 を上回った．これらの有機汚泥の嫌気性ガスの発生特性について，Wijsman モデルによりモデル化を行った．その結果，上記実験の嫌気性ガスの発生特性を良好に再現できた．さらに，上記実験結果を用いて呑川で発生するスカムについてモデル化を行い，現地調査結果との比較検証を行った．その結果，スカムの浮上過程に Henry の法則と Boyle･Charles の法則を適用することにより，スカム発生が下げ潮時に集中することを説明できた．さらに現地で見られるスカムは，河川流の移流･拡散およびガスの放出による沈降･消失の結果であるが，これらについて実験結果と流動モデルを用いてシミュレーションしたところ，現地画像から求められた水面上のスカム面積割合の変動を概ね説明できた．

第 6 章「対策効果の把握」では，構築したスカム発生予測シミュレーション・モデルを用いて，都市河川で適用されている各種対策のうち，代表的なものについてスカム発生抑制効果を定量的に評価できることをしめした．合流改善における効果は，SS 流出シミュレーション・モデルを用いて，それらの対策によるスカム発生抑制効果を把握できるようになった．今回は貯留施設の設置を一例として実施したが，他の合流改善対策についても同様に評価できると考えている．河道内対策については，一例として高濃度酸素水を導水した場合の効果について確認した．その他の対策についても，シミュレーションに効果を反映することで合流改善対策と同様に評価することができた．

今後の課題としては，本研究は，都市河川呑川を対象として研究を実施したが，他河川においてもこれらのモデルを適用できる可能性があると考えられるので，他河川においてもこのモデルを適用・検証していきたい.

他河川において適用する場合，下記の点に留意する必要がある.

- 本研究では，① 下水道ネットワーク，② 流域で発生する SS の強熱減量と沈降速度のデータを入手してモデルに組み込めることを前提としている．①については，わが国では下水道台帳が整備されているので比較的容易に作成でき，実際，下水道の合流改善計画の実務でも行われている．②については，本研究で示している沈降試験方法により比較的容易に求められる.
- ただし本研究では，都市化が 100%進行し且つ下水道流入部の河道がコンクリート三面張りの呑川を対象実施しており，流域内のある程度の面積を農地や公園が占め，そこからの有機性 SS の流出量が無視できない場合は，本研究で対象とする都市下水道モデルとは別個に流出モデルを作成して組み合わせる必要がある．また上中流域に長区間の移動床河道や湿地等の滞留区間がある場合には，そこで有機物が分解される可能性があるため，それらを考慮するモジュールの追加の必要性が考えられる.

また，本研究で構築したスカム発生予測シミュレーション・モデルを用いて効率的なスカム抑制対策を立案･実施していく必要がある．さらに，対策が実施された場合には，それらのモニタリング結果を踏まえてモデルの検証を実施していく必要がある.

謝　辞

本研究を進めるにあたり，東京工業大学 名誉教授 石川忠晴先生には，研究の方針，遂行，成果のまとめ方や発表にいたるまで多方面にわたり惜しみないご指導を賜りました．2015 年に初めてお会いしてから，私が記録を残しているものだけでも 60 回以上の打合せを重ね，研究論文の考え方や書き方について細部にわたり熱くご指導いただきました．先生は何度も，“成果が出るだけではダメで，美しくないといけない．” とおっしゃられました．私にとって先生は，一切の妥協を許さない芸術家のように感じていました．時に厳しくご指導いただきましたが，先生の真摯なご指導のお陰で，これだけの研究を成し遂げることができました．深く感謝申し上げます．

指導教官の東京工業大学 環境・社会理工学院 融合理工学系／地球環境共創コース 准教授 中村恭志先生にも，多くのご指導を賜りました．中村研の一員として加えていただき，ゼミにも参加させていただきました．研究内容のレベルの高さ，活発な議論など，とても刺激になりました．また，木内 豪先生にも何度も鋭いご指摘をいただきました．また，研究室の皆様にもお世話になりました．ここに感謝の意を表します．

論文の審査を実施いただきました神田 学教授，鼎 信次郎教授，吉村 千洋准教授にも様々な視点からご意見をいただき，研究の刺激になりました．ありがとうございました．

株式会社 建設技術研究所 堀田 哲夫 元顧問にも多くのご助言・ご指導をいただきました． 堀田さんが担当された嫌気性ガスの発生についての報告書「昭和 53 年度 芝浦・江東地区水域環境調査報告書」（昭和 54 年 3 月，東京都港湾局）には大きなインスピレーションを受けてきました．私の一連の研究は，この報告書を見た時から始まったと思います．クアラルンプールでの学会発表にもわざわざご同行いただきました．感謝しております．

大田区の皆様には，研究を進めるにあたり多大な支援を賜りました．大田区が河川の水環境に問題意識を持ち，住民や NPO とともに真摯に取り組まれていることが，私の研究の成果に結びついたと思います．

東京都下水道局 南部下水道事務所の皆様にも多大なご支援をいただきました．ここに深く感謝申し上げます．

都市河川の調査・研究を共に進めてきた，株式会社 建設技術研究所 根岸 均上席技師長をはじめ，初期のころに手探りで調査や検討をした金山 季志子さん，原田 拓也さん，松田 尚志さん，宮尾 徹さん，感謝しております．私が本格的に研究を始めてから一緒

に調査･研究を実施してきた大石 夏帆さん, 古田島 樹さんには特に苦労をかけました．ただ，私は一緒に研究ができて楽しかったです．また，武藤 潤子さんにはデータの整理など幅広く手伝っていただきました．感謝しております．いろいろと英語を教えてもらった，Kolar Boris さん，ありがとうございました．

また，株式会社 建設技術研究所 下水道部 鈴木 英之さん，山本 礼子さん，金盛 高之さん，渡邉 暁人さんには，下水道のことについて色々教えていただきました．また，星野 弘顧問にも色々とご相談に乗っていただきました．ありがとうございました．

調査や実験を進めるにあたり，(有)鈴木理化商会 鈴木 靖雄社長と安藤 敏雄さんには調査や実験について多くのご協力をいただきました．ありがとうございました．また，株式会社 環境総合リサーチ 生沼 光二さん，多久間 浩司さんにも多くのご協力をいただきました．感謝しております．

社会人大学院へ進学するにあたり，会社からも多方面でご支援いただきました．株式会社 建設技術研究所 西村 達也 企画・営業本部長，天野 光歩東京副本社長をはじめ，多くの方々に研究のための環境を整えていただきました．また，班長という役職にも関わらず，大学院へ通わさせていただいた歴代の水システム部長 小滝 訓一 元部長，岩田 通明 元部長，伊藤 猛部長をはじめ水システム部の皆様，特に三浦班の皆様には感謝しております．

研究，仕事と家庭の 3 つを成り立たせることには非常に苦心しました．悩んでいた時に相談に乗ってただいた矢神 卓也さん，瀬尾 弘美さんには感謝しております．特に一番苦しかった時期に支援してくれた岡峰 奈津美さん，本当に感謝しております．

また，幼い 2 人の子供を抱えながら，文句もいわずに支えてくれた妻の美紀には心から感謝を伝えたいです．

ここまで，本当に多くの方々に支えられてきたお陰で，この研究を成し遂げることができました．ここに深く感謝の意を表します．

学生としてはここで一区切りとなりますが，ここからが新たな始まりだと思っています．都市河川が良好な状態で維持されるよう，これからもこれらの問題に取り組んでいきたいと思います．

2019 年 9 月

三浦　心