

都市感潮河川網における合流式下水道由来スカムの動態に関する研究

A study on the dynamics of scum from combined sewer system in an urban tidal river network

大阪大学大学院工学研究科 助教 中谷 祐介

(研究計画ないし研究手法の概略)

合流式下水道越流水CSOが流入する河川では、降雨後に大量のスカムが水面を埋め尽くすことが知られている。スカムは魚類の大量へい死などを引き起こし水域生態系へ悪影響を及ぼすとともに、都市景観や悪臭、公衆衛生の観点からも早急な解決が強く求められている。本研究の対象領域である大阪府寝屋川水系においてもスカム問題は発生しており、特に平野川や古川、寝屋川において頻繁に確認されている(図-1)。

スカムの実態は、CSOとともに排出された有機性懸濁物質(POM)が河床へ一旦堆積し、堆積物中に嫌気ガスが蓄積することで浮上・発生した汚泥塊である可能性が複数の既往研究(例えば1, 2)により指摘されている(図-2)。しかし、感潮河川の複雑な物質輸送場も相まって、スカムの動態には不明な点が多く、観測データが不足している現状ではその挙動を予測することは難しい。具体的な対策を講じるためには、スカムの発生機構や挙動特性を明らかにするとともに、感潮河川におけるスカムの複雑な挙動を予測可能なシステムを構築することが不可欠である。

このような背景を踏まえ、本研究では、大阪府寝屋川水系において特にスカムの発生が多く報告されている平野川を対象に、流況・水質計と複数の定点カメラからなるスカム観測ネットワークを構築し、河川の流動・水質特性とスカムの挙動について調査・解析を行った。また、三次元数値流動モデルをベースとしたLagrangian粒子追跡モジュールに浮遊物質の挙動特性を組み込み、感潮河川におけるPOMおよびスカムの挙動について解析を行った。



図-1 平野川で発生したスカム
(2017年7月6日撮影)

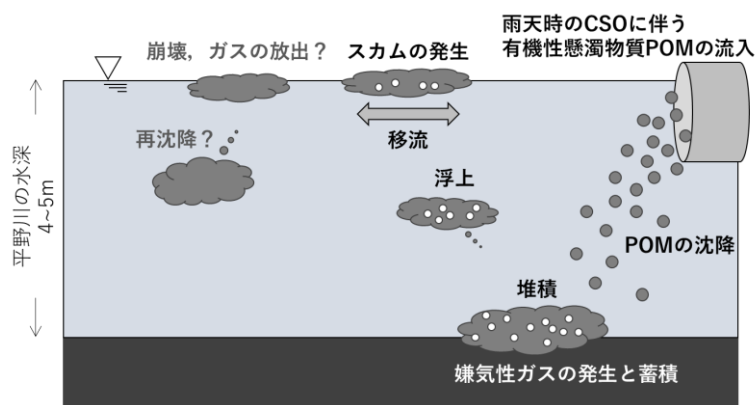


図-2 河道部におけるスカムの動態

(1) 現地調査

図-3に示すSta. Aにメモリー式の圧力式水位計，電磁流速計，溶存酸素DO計（それぞれCompact-TD，Compact-EM，Infinity-D0；すべてJFE Advantech社製）を設置し，平野川の流況・水質の調査を行った．現地では大気圧も同時に計測し，水位の計測データには大気補正を施した．

また，第二寝屋川と平野川の8地点（下流から順にSta. 1～8）に固定式カメラ（MAC200DN，Brinno社製）を設置

し，河面の連続撮影を行った．調査は2018年11月26日から開始し，撮影インターバルは1minとした．

さらに，平野川を含む寝屋川水系の複数地点（一部を図-3中に記載）には，大阪府河川室により固定カメラが設置され，web上で1min間隔の河面画像が配信されている（URL：<http://www.osaka-pref-rivercam.info/>）．そこで，画像が1minごとに更新されるたびにweb上から自動取得するpythonスクリプトを開発し，画像データの蓄積を行った．

得られた流況・水質データを基に，平野川の流動・水質特性を調べるとともに，カメラ画像を解析することでスカムの挙動について検討を行った．

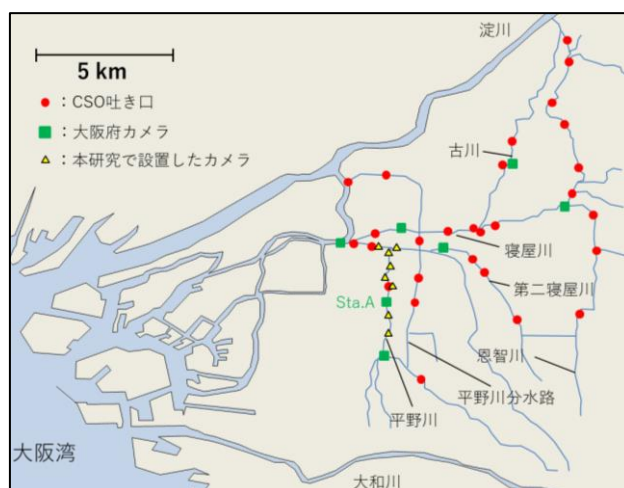


図-3 対象領域と調査地点

(2) 数値シミュレーション

大阪港～大阪市内河川～寝屋川水系に三次元流動モデルFVCOM（Finite Volume Community Ocean Model）³⁾を適用し，図-4に示す対象水域の流動と物質輸送について解析を行った．まずdomain1の大領域で計算を行った後，1-wayネスティングによりダウンスケーリングし，domain2（平野川）の小領域で計算を行った．

主な計算条件を表-1に示す．

解析期間は2014/7/4 0:00～2014/8/7 0:00までの34日間とし，このうち14日間を助走計算期間とした．domain1では大計算規模となるため，スパコン環境でMPI+OpenMPのハイブリッド並列により領域分割計算を行うことで対応した．

POMやスカムの挙動には図-2に示したように複数の素過程（沈降，凝集，ガス生成など）が関与しているが，各素過程のモデル化に必要なパラメータの大半は同定されていない．そのため，本研究ではLagrangian粒子追跡モジュールに粒子の沈降速度を組み込んだ簡易的な物質輸送モデルを構築し，河道部に排出されたPOMの堆積分布と発生したスカムの浮遊挙動について解析を行った．

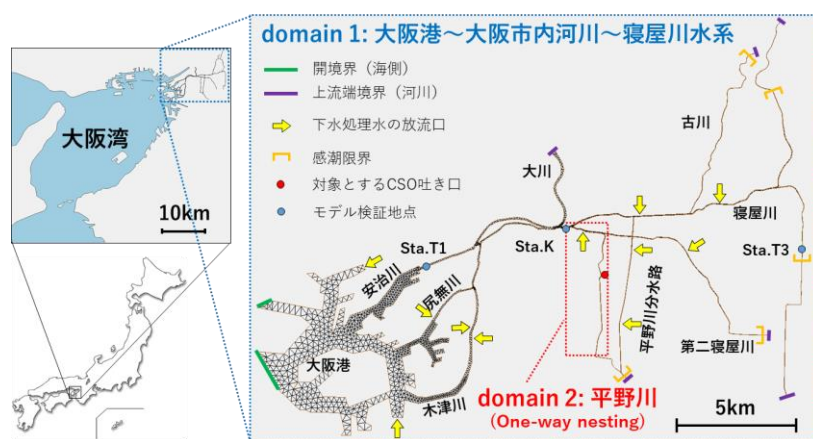


図-4 計算対象領域

(実験調査等により得られた新しい知見)

(1) 平野川の流動・水質特性

観測された水位、縦断方向流速、D0について高速フーリエ変換を行い、それぞれの変動において卓越する周波数成分を調べた。図-5に流速の時系列と高速フーリエ変換により得られた周期スペクトルを示す。その結果、いずれについても12.4h, 12.0h, 24.0h, 25.8hの周期成分が卓越しており、感潮河川である平野川の流動・水質には主要四分潮(M2, S2, K1, O1)が最も大きな影響を及ぼしていると考えられた。

一方、いずれの観測データにおいても4.1hや8.2hといった短周期成分も比較的大きなエネルギーを有していたことから、スカムの挙動には潮汐だけでなく、より高周波の振動成分が無視できない影響を及ぼしているものと推察された。これらは港湾や河道における副振動に起因する成分と推察されるが、今回得られた情報からその発生要因を特定するには至らなかった。

(2) 大阪府河川カメラ画像の解析

大阪府河川カメラのうち平野川中流部に設置されているカメラのデータについて、機械学習手法の一つであるニューラルネットワークを用いてスカム発生量の自動判別を試みた。カメラ画像の例を図-6に示す。ネットワークは入力層、中間層、出力の3層構造とし、カメラ画像のRGB値を入力として学習を行った。手法の詳細は既往研究⁴⁾を参考に構築した。

学習を繰り返すにつれて評価関数である二乗誤差が学習用データ、検証用データともにそれぞれ一定値に収束したことから、過学習の兆候はなく良好に学習できたと判断した。検証用データにつ

表-1 主な計算条件

項目	条件
流動モデル	FVCOM 4.1 (Chen et al., 2003)
計算格子 (domain1)	水平：非構造格子 (辺長50~250m) 鉛直：10層等分割 (σ 座標)
計算格子 (domain2)	水平：非構造格子 (辺長最大5m) 鉛直：10層等分割 (σ 座標)
乱流モデル	水平：Smagorinskyモデル 鉛直：Mellor-Yamada 2.5モデル
計算期間	2014/7/18~2014/8/7
気象条件	バルク全熱収支式より算定 風応力：GPV-MSM
開境界条件	潮位、水温、塩分@大阪港
流入条件	6河川、11下水処理場を考慮

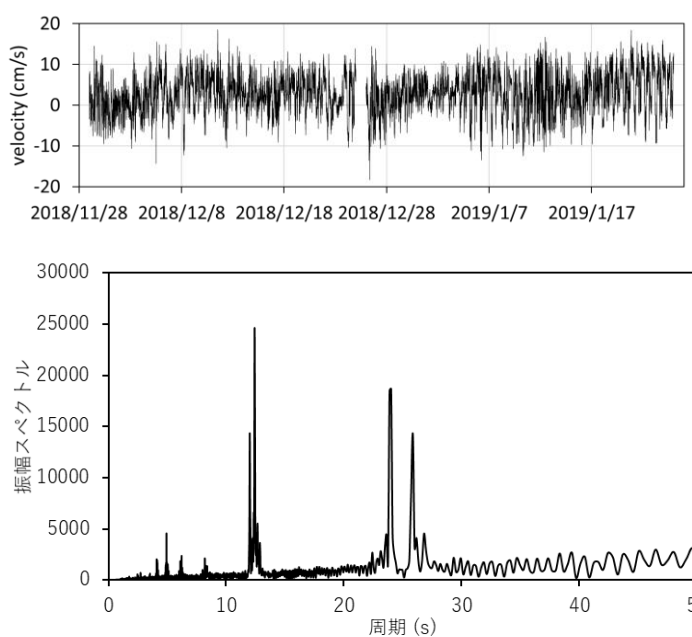
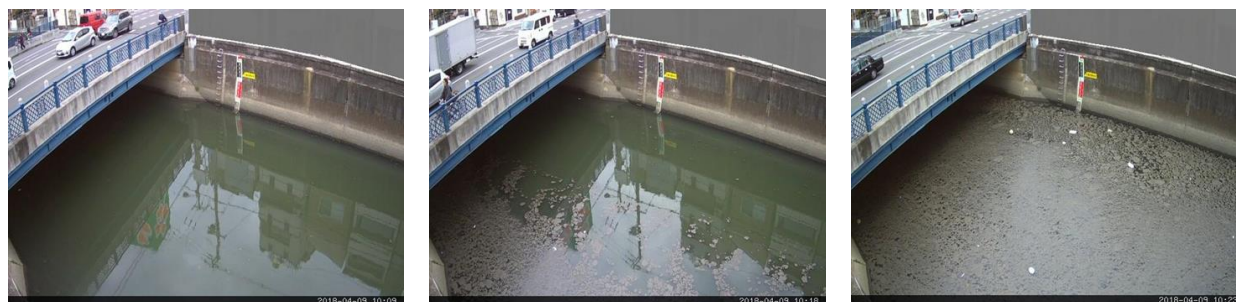


図-5 観測流速の時系列と周期スペクトル



スカムなし

スカム中量発生時

スカム大量発生時

図-6 大阪府河川カメラによるスカム画像の例

いて正答率を調べたところ、概ね80%以上の精度でスカム量を定量することが可能であった。

画像を基にスカムの挙動を調べたところ、スカムは潮汐周期よりも短い周期で流下・遡上を繰り返すこと、スカムの発生量には先行晴天日数が関係すること、河道が湾曲している地点において滞留しやすいこと、水温の高い夏季に限らず冬季にも大規模発生することなどが明らかになった。

(3) 平野川に設置した河川カメラの解析

平野川の8地点に設置したカメラ画像について、目視確認によりスカムの発生量（多量，少量）と移流方向（下流方向，上流方向，停滞）について整理を行った。2018年12月の1ヶ月間を解析対象期間とした。各地点について整理した結果を図-7に示す。縦軸の番号は「1：下流へ輸送・多量発生」「2：下流へ輸送・少量発生」「3：停滞・発生」「4：上流へ輸送・少量発生」「5：上流へ輸送・多量発生」を表している。平野川と第二寝屋川の合流部付近に位置するSta. 1～3では、スカムの発生が頻繁に確認され、順流と逆流を繰り返すがその場に滞留する様子も多くみられた。上流のSta. 7やSta. 8でも比較的多くのスカムが確認されたが、夜間に上流から輸送されてくるケースが多くみられた。CS0吐き口に近いSta. 6ではほとんど確認されなかったことから、スカムの発生源はSta. 8よりも上流側にも存在していることが示唆される。

なお、画像を確認していると、船舶の航行や降雨時の雨滴の沈着によって、スカムが破壊され水面から消失する様子も確認された。また、無降雨にもかかわらず数分の中に急激な水位上昇とともにスカムが流下してくるケースもみられ、上流側で水門操作がなされるなどの人為的な流量変動もスカムの発生に無視できない影響を及ぼしている可能性が考えられた。このようにスカムの挙動については極めて多くの要因が影響しており、今後より詳細に検討する余地が残されている。

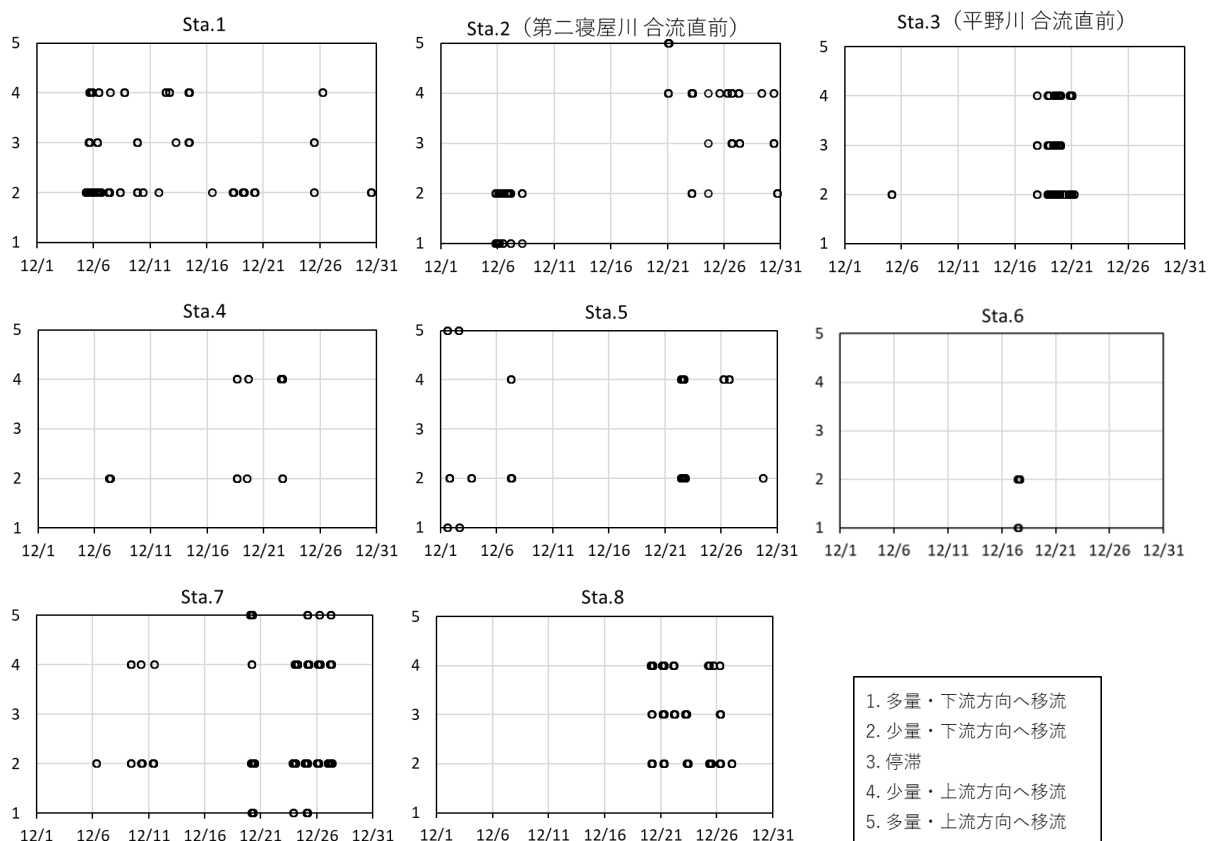


図-7 スカムの発生状況と移流方向

(3) POMおよびスカムの挙動シミュレーション

Sta. T1（下流汽水域）とSta. T3（感潮限界付近）における水位変動について、観測値と計算値との比較を図-8に示す。計算値では干潮時にSta. T3の水位が若干低下しすぎているが、上流端境界に与えた流量や河道地形のモデル解像度、河床粗度の不確実性などが再現性低下の原因と考えられる。しかしながら、両地点で振幅と位相がともに概ね一致していることから、今回構築した流動モデルは対象水域の水位変動を良好に再現しており、物質輸送の解析に利用可能であると判断した。

平野川ではCSO吐き口は1ヶ所（図-4参照）に限定されているが、感潮河川であるため、CSOが発生する潮時によって河道部に排出された後のPOMの挙動は異なると考えられる。また、POMには様々な粒径の粒子が含まれており、それらの沈降速度は大きな幅を有している。そこで、CSOが発生する潮時（大潮、小潮）と沈降速度のオーダー（ $10^{-5} \sim 10^{-2} \text{m/s}$ ）の設定を組み合わせさせた8つの計算ケースを実行し、各ケースで得られたPOMの堆積分布を重ねることで、POMが堆積しやすいと考えられる空間分布を推定した。

POMの堆積分布について計算結果を図-9に示す。沈降速度が 10^{-5}m/s の微細粒子は平野川の河道内に堆積することなく大半が下流へ流出したことから、平野川におけるスカムの発生に寄与する可能性は低いと考えられた。一方、平野川の河床に堆積した粒子の多くがCSO吐き口の上下流2kmまでに堆積したことから、この範囲がスカムの発生しやすい地点となっている可能性が高いと考えられた。

次に、スカム発生地点の空間分布が図-8に示したPOMの堆積分布に一致すると仮定し、そこからスカムに見立てた粒子を放出し、その後の挙動を解析した。粒子は沈降速度を持たず、常に水表面（ σ 第1層）を浮遊し続けるものと仮定した。POMの場合と同様に、スカムの挙動は発生するタイミングの潮時によって異なると考えられるが、そのタイミングを予測することは困難であるため、スカムが発生する潮時について8ケース（干潮～上げ潮～満潮～下げ潮）を想定し、各ケースについてスカムの挙動を追跡した。

結果の一例として、干潮時にスカムが発生した計算ケースについて、スカムの空間分布の変化を図-10に示す。スカムは上げ潮には集積する一方で、下げ潮時には分散する傾向が確認された。また、発生時の潮時に依らず、24時間以内にはSta. Kを通過し大阪市内河川にまで到達する結果となった。

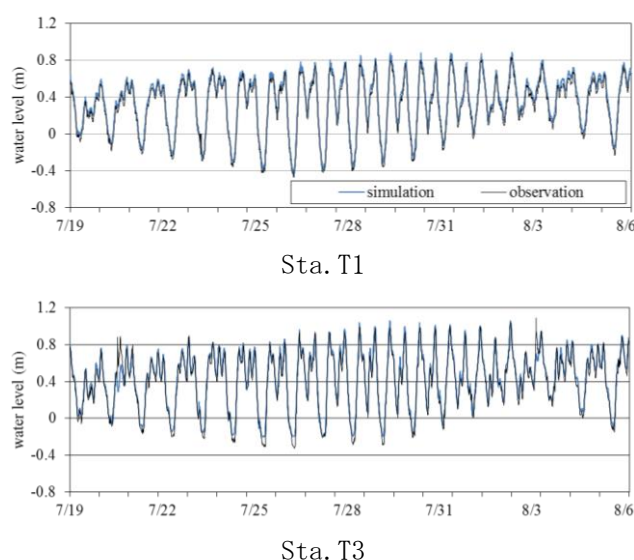


図-8 水位変動に関する観測値と計算値との比較

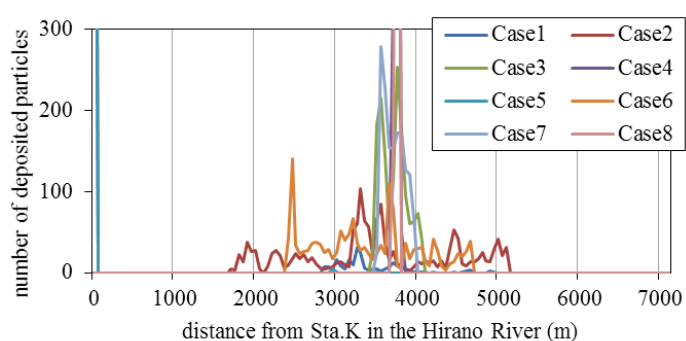


図-9 POM堆積分布の計算結果

このことを踏まえると、スカムの発生を予測できることが前提ではあるが、スカムを回収する際には満潮時に集積したところを狙うことが効率的であると考えられた。

本研究では現地調査と数値シミュレーションにより、スカムの挙動について解析を行った。スカムの挙動特性については明らかになりつつあるが、研究期間中に得られたデータが限られて

いたこともあり、未だ不明な点が多く残されている。解析においても大きな不確実性に基づいた仮定が現段階では多く含まれており、スカムの挙動に関する知見はまだ十分には得られていない。今後もデータの蓄積を継続するとともにさらに精緻な解析を進めることで、本研究成果をスカム問題の具体的な解決策の提案につなげることが必要と考えている。

最後に、現地調査を行うにあたり、大阪府河川室と大阪府寝屋川水系改修工営所の方々、および研究室学生には多大なご協力を頂いた。また、数値計算では大阪大学サイバーメディアセンターの大型計算機OCOTPUSを利用させていただいた。ここにあわせて深く謝意を表する次第である。

(参 考 文 献)

- 1) 山崎正夫, 津久井公昭: 河川におけるスカムの発生に関する研究 (その1), 東京都環境科学研究所年報, pp. 174-179, 1991.
- 2) 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, pp. I_523-I_528, 2018.
- 3) Chen, C. H. Liu and R. C. Beardsley: An unstructured, finite-volume, three-dimensional, primitive equation ocean model: application to coastal ocean and estuaries, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Vol. 20, pp. 159-186, 2003.
- 4) 水田周作, 高崎忠勝, 河村明, 天口英雄, 石原成幸: 定点カメラを用いたニューラルネットワークによる都市河川のスカム自動判別, 土木学会論文集B1(水工学), Vol. 71, No. 4, pp. I_1232-I_1236, 2015.

(発 表 論 文)

1. 奥村素基, 中谷祐介, 西田修三: 定点カメラ画像を用いた深層学習による河川スカムの定量的解析, 平成31年度土木学会関西支部年次学術講演会, II-46, 2019.
2. 谷口和也, 中谷祐介, 西田修三: 寝屋川水系における浮遊汚泥の挙動に関する研究, 平成30年度瀬戸内海研究フォーラム, 2018.
3. Nakatani, Y., Naka, Y., Nishida, S., and Taniguchi, K.: Behavior analysis of scum deposited from a combined sewer system in urban river system, 15th Estuarine Coastal Modeling Conference (ECM15), 2018.

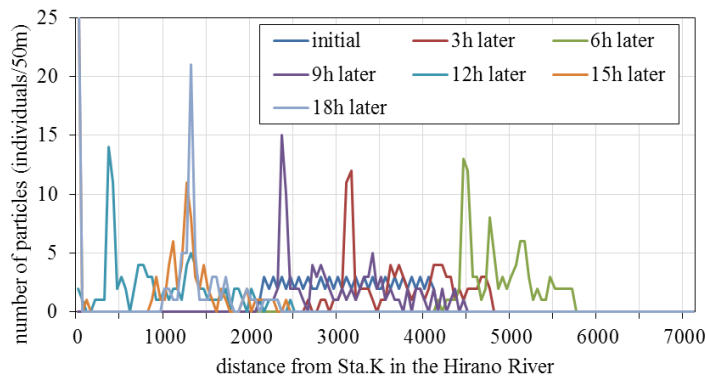


図-10 スカムの空間分布の変化