

糞便汚染指標を基にしたお台場海浜公園における 海水浴予報システムの試行運用

北山千鶴^{1),*} 森田健二²⁾ 福地広識^{3,4)}
李星愛^{5,6)} 古米弘明⁵⁾

Trial Operation of Water-quality Forecasting System Based on Fecal Pollution Indicators for a Beach in Odaiba Marine Park

Chizuru KITAYAMA^{1),*}, Kenji MORITA²⁾, Hiroshi FUKUCHI^{3,4)}, SungAe LEE^{5,6)} and Hiroaki FURUMAI⁵⁾

¹⁾ Tokyo Kyuei Co., Ltd., Shiba 6906-10, Kawaguchi 333-0866, Japan

²⁾ Association for Shore Environment Creation, Hiranuma 2-4-22-202, Nishi-ku, Yokohama 220-0023, Japan

³⁾ Collaboration Project Section, Shibaura-konan Regional City Office, Minato City, Shibaura 1-16-1, Minato-ku, Tokyo 105-8516, Japan

⁴⁾ Present Affiliation: Planning Section, Planning and Management Department, Minato City, Shibakoen 1-5-25, Minato-ku, Tokyo 105-8511, Japan

⁵⁾ Research Center for Water Environment Technology, The University of Tokyo, Hongo 7-3-1, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

⁶⁾ Present Affiliation: Central Research Institute, Nihon Suido Consultant Co., Ltd., Nishisinjyuku 6-22-1, Shinjyuku-ku, Tokyo 163-1122, Japan

Abstract

Fecal pollution caused by combined sewer overflows has been observed at urban waterfronts after rainfall and results in fecal pollution levels exceeding bathing water quality standards. To guarantee the swimmability of urban waterfronts, it is necessary to predict the situation of fecal contamination to ensure safe bathing. Therefore, we aimed to develop a water-quality forecasting system for the beach in Odaiba Marine Park using *Escherichia coli* as a fecal indicator to determine whether people can submerge their faces in the seawater on the day of bathing. First, rainfall events in the 23 cities of Tokyo over the past 10 years were categorized by cluster analysis, considering their temporospatial distribution characteristics. Then, *E. coli* concentration changes in the park were calculated using a 3D hydrodynamic and water-quality model for each categorized rainfall group. Using the calculation results for various tidal conditions, we constructed a database of *E. coli* concentration changes. It was confirmed that the *E. coli* concentration predicted using the database for a corresponding rainfall group agrees with the concentration peak calculated using the model within a safe margin. Using the constructed database, we carried out a trial operation of the water-quality forecasting system for the beach in 2018 and verified its effectiveness.

Keywords: *E. coli*; Combined sewer overflow; 3D hydrodynamic and water-quality mode; Classified rainfall group; Water-quality forecasting system for a beach

1. はじめに

沿岸域の水質改善に伴い水辺への人々の回帰が進み、臨海部において人工海浜などの身近な親水空間の整備が進められている¹⁾。東京都港区に位置する都立お台場海浜公園は臨海副都心内の最大の公園で、海辺の公園ならではの施設を備えた貴重な親水空間である。海浜公園内は通常は遊泳禁止となっているものの、晴天時は水浴判定基準（水浴場の水質判定基準（環境省））をほぼ満たし

ている^{2,3)}。東京都をはじめとして、昭和40年以前に下水道が整備された都市部では合流式下水道が採用されている⁴⁾。合流式下水道は、雨水と汚水を一本の管路で収集し排除する方式で、降雨時に一定以上の雨水が流入すると下水処理場ですべて処理できなくなり、未処理下水を公共用水域に放流する。東京湾臨海部においても、降雨後には合流式下水道雨天時越流水（CSO: Combined Sewer Overflow）の影響を受けて水浴基準を超える糞便性大腸菌群数（ 10^3 個 100 mL^{-1} ）が検出されている^{2,5), 6~8)}。

1) 株式会社東京久栄 〒333-0866 川口市芝 6906-10

2) 特定非営利活動法人海辺づくり研究会 〒220-0023 横浜市西区平沼 2-4-22-202

3) 港区芝浦港南地区総合支所協働推進課 〒105-8516 東京都港区芝浦 1-16-1

4) (現) 港区企画経営部企画課 〒105-8511 東京都港区芝公園 1-5-25

5) 東京大学大学院工学系研究科附属水環境工学研究センター 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

6) (現) 株式会社日水コン中央研究所 〒163-1122 東京都新宿区西新宿 6-22-1

* 連絡先: csato@tc.kyuei.co.jp

また、東京都以外においても CSO に起因する沿岸域の糞便汚染は確認され^{4,9)}、その汚染レベルは下水道排水区全域の降雨量に大きく依存している³⁾。

近年、東京都区部における短時間強雨は増加傾向にあり、その出現頻度に地域性があることが報告されている¹⁰⁻¹³⁾。さらに、降雨後にお台場海浜公園に達する CSO の排出源の寄与は潮汐条件等によって変化し、必ずしも近隣の CSO 排出源の寄与が大きいとは限らないことが報告されている^{14,15)}。以上のことから、お台場海浜公園における CSO に伴う糞便汚染の状況を把握する上で、台場周辺海域とその上流域に位置する下水道排水区全域における降雨特性やその空間分布特性は重要である。

我が国では、水域の糞便汚染指標の基準項目として大腸菌群、糞便性大腸菌群が、水道水質基準としては大腸菌がそれぞれ目的に応じて設定されている。そのうち、糞便性大腸菌群は大腸菌群の内、44.5℃で生育可能な大腸菌を含む工場排水、植物・土壌に由来する菌を指し、糞便汚染の指標として大腸菌群と比較すると糞便汚染を的確に示すものの、大腸菌よりは信頼性が低いとされている¹⁶⁾。糞便汚染に関する知見が集積され、糞便性大腸菌群数が 10^3 個 100 mL^{-1} を超過するとサルモネラ菌の検出率が高くなるとの報告から糞便性大腸菌群が水浴判定基準として長年採用されてきた。本研究では現行の基準に則り水浴の適・不適の判断に糞便性大腸菌群を用いた。しかし、対象水域であるお台場海浜公園周辺の水質調査結果から、糞便性大腸菌群と大腸菌の対数濃度はほぼ等しいことが報告されており^{7,14)}、糞便性大腸菌群を大腸菌に置き換えても糞便汚染状況を把握できるものと考えられる。

港区では、2014 年から「泳げる海、お台場！」を目指しアピール活動として、範囲を限定して安全面等に配慮しながら海水浴体験を実施している。2017 年からは海水浴エリアをポリエステル製シルトフェンス（以下、水中スクリーンと言う）で囲うことによって、さらなる安全面への配慮と糞便汚染の低減を図る取り組みを追加した海水浴体験が実施されている。そして 2018 年からは 2024 年オリンピック・パラリンピック競技大会の開催都市であるパリ市と連携し、セーヌ川の夏の風物詩「パリ・プラーージュ」の雰囲気再現した「お台場プラーージュ」として海水浴イベントを開催してきている^{17,18)}。

水浴による定量的な下痢の発症リスクは、アメリカの水浴場における大腸菌濃度の幾何平均値 $126 \text{ CFU } 100 \text{ mL}^{-1}$ 以下の条件下で計算された、水浴者 1000 人当たり 36 人の結果がある。また、香港の疫学調査は、大腸菌濃度の幾何平均値 $180 \text{ CFU } 100 \text{ mL}^{-1}$ で 1000 人当たり 10 人、 $610 \text{ CFU } 100 \text{ mL}^{-1}$ で 1000 人当たり 15 人と報告している^{16,19)}。このように、大腸菌濃度が $10^3 \text{ CFU } 100 \text{ mL}^{-1}$ 以下であっても水浴による下痢症リスクは存在する。

将来、衛生面での安全性を確保して海水浴を継続的に実現するためには、水浴の適・不適判断を行うための情報として糞便汚染状況の予測が求められる。海外においては、米国マサチューセッツ州の Charles River, Lower Charles River を対象とした大腸菌濃度の予測モデルが作成されている^{20,21)}。また、デンマークコペンハーゲンでは 3 次元流動水質モデルによってリアルタイムに大腸菌濃度を予測し、その結果に基づいて水浴の適否を情報提

供するシステムの運用が行われている²²⁾。お台場周辺海域についても、河川・ポンプ場・処理場から海域へ放流された CSO の影響を考慮して、大腸菌濃度変化を再現する 3 次元流動水質モデルが開発されている^{14,15)}。このように糞便汚染状況は、CSO 発生量や気象・潮汐条件を与えて 3 次元流動水質モデルで大腸菌濃度変化を計算することにより評価可能であるが、専門的な知識や労力を多く必要とし、水浴中に海水へ顔をつけることの可否判断を予報するシステムの運用実績の報告はない。

そこで本研究では、リアルタイムに 3 次元流動水質モデルを計算することなく、お台場海浜公園周辺海域の大腸菌濃度から雨天時糞便汚染状況を予測し、海水へ顔をつけることの可否判断を予報するシステムの試行運用を実施することを目的として、以下の手順に従い研究を実施した。

- 1) 台場周辺海域とその上流域に位置する下水道排水区全域における降雨イベントを類型化する。
- 2) リアルタイムに数値モデルを計算することなく大腸菌濃度を予測するための代替として、類型化した降雨毎の大腸菌濃度の経時変化を示すデータベースを作成する。
- 3) データベースにおける最大濃度を包絡する濃度経時変化と 3 次元流動水質モデルによる濃度計算結果を比較し、濃度の包絡曲線に基づく大腸菌濃度予測の有効性を確認する。
- 4) 水質調査結果と類型化降雨ごとの濃度の包絡曲線に基づく大腸菌濃度予測とを組み合わせた海水浴予報システムを試行し、その有効性を検証する。

2. 研究方法

2.1 降雨イベントの類型化方法

雨水流出量を規定する降雨イベントの類型化のために、図 1 に示す 13 地点の降雨データ²³⁾を用いた。観測地点の中央と清澄、渋谷橋と上目黒は近隣に位置しており降雨特性の類似性も高いことから、それぞれ 2 地点の平均値を分析に使用した。降雨の類型化には、2008 年から 2017 年の 10 年間における 6 月から 11 月の 11 地点の降雨時系列データを用いた。前後 4 時間の無降雨時間を独立の降雨イベントの条件として、降雨イベントを抽出した。各イベントの地点別の時間最大降雨強度、積算降雨量、降雨継続時間を降雨特性値として、Ward 法を用い

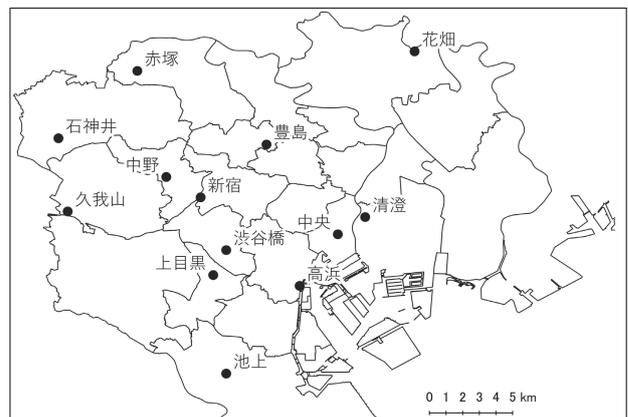


図 1 東京都水防災総合情報システムの降雨観測地点

た階層的クラスター分析により類型化した。その際、それぞれの特性値の最大値と最小値を用いた正規化を行った。

2.2 数値モデル解析を用いた大腸菌濃度の経時変化データベースの作成方法

2.2.1 3次元流動水質モデルの計算方法

お台場海浜公園における降雨後の大腸菌濃度の経時変化を示すデータベースは、3次元流動水質モデルの計算結果から作成した。このため、使用するモデルがお台場海浜公園の大腸菌濃度のピーク濃度や経時変化を十分な精度で再現できることが前提となる。

本研究で使用した3次元流動水質モデルは、 σ 座標系の水温や塩分による密度を考慮した流動モデルと大腸菌消長モデルを含む水質モデルから成る。流動場の基礎式は静水圧近似とブシネスク近似を仮定した Navier-Stokes 式、連続式、水温・塩分の移流拡散方程式及び密度の状態方程式である²⁴⁾。大腸菌消長モデルは、移流・

拡散に加えて、沈降、死滅、紫外線と塩分による減少を考慮した^{14, 15)}。なお、過去の東京都の調査結果を基に、大腸菌濃度の初期条件として計算領域において一律 10^2 CFU 100 mL^{-1} を与えた^{2, 25, 26)}。

糞便汚染予測のための3次元流動水質モデルの解析領域を図2 (a) に示す。モデルは2 km 格子の東京湾全体を対象としたモデル（東京湾モデル）と東京湾モデルをネスティングし、100 m 格子の隅田川を含む台場周辺海域を対象としたモデル（台場モデル）からなる¹⁵⁾。台場モデルの上流端境界では荒川からの分派量を考慮し、下流端の海側の境界では東京湾モデルの計算結果の水温と塩分濃度を利用した。糞便汚染指標として大腸菌を採用して、CSOの排出源として29の雨水ポンプ所、8箇所の水再生センター、6つの都市流入河川を考慮した（図2 (b)）。6つの流入河川沿いに存在する雨水吐き口からの雨天時越流量は参考文献¹⁵⁾ に基づいて算出した。降雨時

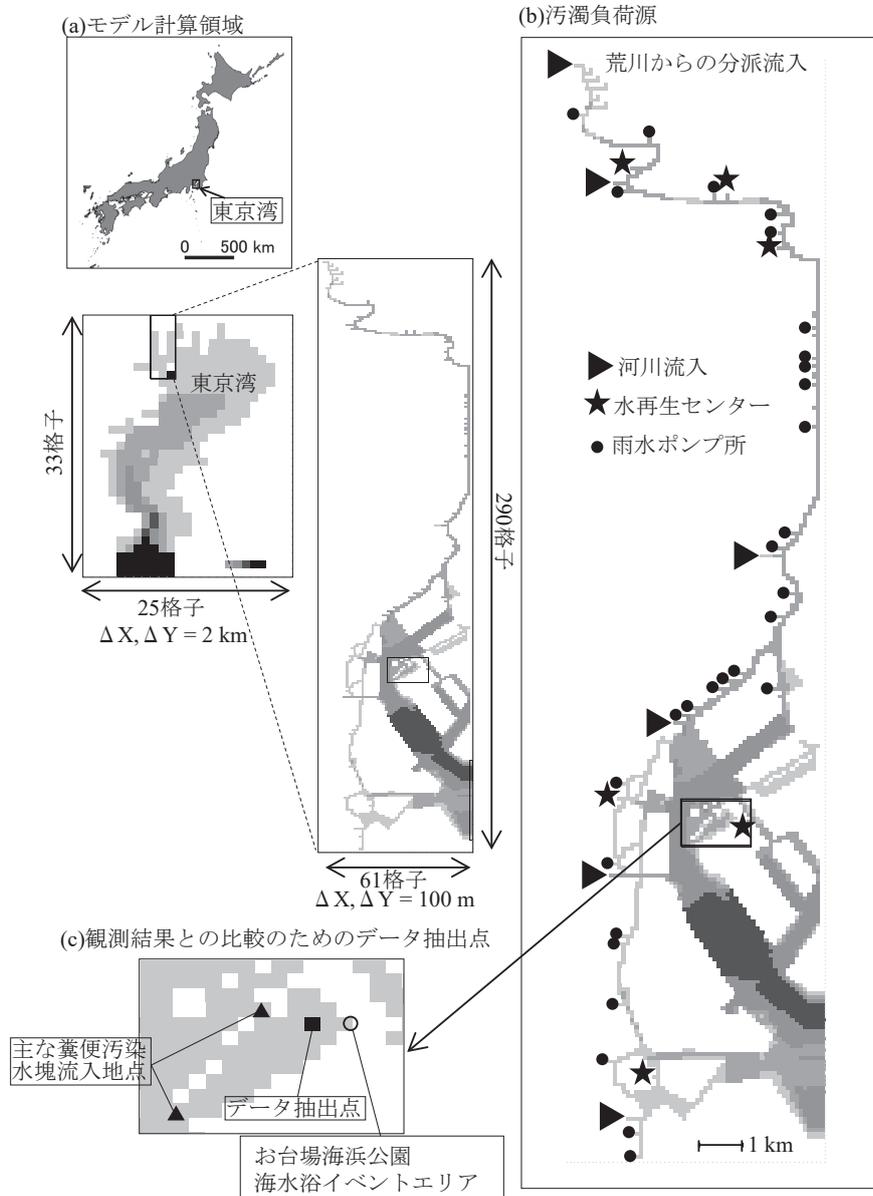


図2 (a) モデル計算領域, (b) 汚濁負荷源, (c) 糞便性大腸菌群数観測結果と計算結果の比較のためのデータ抽出格子 (■), 海水浴イベントエリア (○), 主な糞便汚染水塊流入地点 (▲)

の雨水流出量は、合理式合成法を用いて流入河川排水区単位で計算した。そして、図2(c)に大腸菌濃度変化のデータベース作成のための計算結果の抽出格子を示す。別途実施されたお台場海浜公園における流速調査の水平分布²⁷⁾から公園内の水塊は、北側開口部と南側開口部を含む南西部分と、北側開口部より東側の第3台場と陸地に囲まれた北東部分に分かれていると推測されたため、海水浴イベントエリアを含む北東部分のほぼ中央の格子を計算結果の抽出格子とした。また、この位置は海水浴イベントエリアよりも、降雨後のお台場海浜公園への主な糞便汚染水塊の流入地点(図2(c)▲の地点)に近く、この抽出格子を用いて海水浴予報システムを構築することによって安全側の予報が可能と考えた。

2.2.2 大腸菌汚濁負荷量の計算条件の設定

汚水量は排水区内人口と一人一日水使用量、汚水流量時間変動係数から算出し、降雨時の下水処理場への遮集量は、晴天時時間最大汚水量の3倍と仮定した⁴⁾。そして、CSO量は雨水流出量と汚水量の和から遮集量を差し引いた量とした。また、隅田川の支流を介さず、隅田川や台場周辺海域に直接放流するポンプ所からの越流量は、雨水排水面積と当該河川排水区の排水面積の比を、河川排水区全体の越流量に乗じることによって算出した。なお、汚水の大腸菌濃度は 9.6×10^6 CFU 100 mL⁻¹²⁸⁾とした。また、簡易処理水の大腸菌濃度は 3.0×10^4 CFU 100 mL⁻¹と設定した。簡易処理水の大腸菌濃度の実測値は入手できなかったものの、これは下水道法による放流水の水質基準に定められている大腸菌群数3000個 mL⁻¹より、大腸菌は大腸菌群の約10分の1であるという仮定の下で設定した値である²⁹⁾。

2.2.3 大腸菌濃度の経時変化データベースの作成方法

大腸菌濃度の経時変化データベースは、類型化した降雨グループを代表する降雨イベントを過去の降雨データから選定して、この降雨データを3次元流動水質モデルの入力条件として計算した図2(c)の格子(■で表記)の大腸菌濃度の経時変化から作成した。類型化した降雨グループを代表する降雨イベントは、各類型化降雨群の13地点における最大降雨強度・積算降雨量・降雨継続時間の平均値に最も近いものとした。

降雨発生後に、糞便汚染水塊がお台場海浜公園に到達するタイミングやその汚染レベルは潮汐条件にも影響を受ける¹⁴⁾。そこで代表降雨イベントに対して、大潮・小潮と降雨開始の潮時(干潮・上げ潮・満潮・下げ潮)とを組み合わせた8つの潮位条件でモデル計算を実施し、様々な大腸菌濃度の経時変化を得た。そして、類型化降雨ごとに、代表降雨イベントと潮位条件の全ての組み合わせにおける大腸菌濃度を包絡する濃度経時変化を求めて、安全側の濃度予測に利用することとした。

2.2.4 海水浴予報システムの試行運用

従来のお台場海浜公園の海水浴体験は、前日までの降雨状況に関係なく一律に「海水に顔をにつけないこと」を条件に実施されていたが、海水浴前日のColilert-18による糞便性大腸菌群数の調査結果と大腸菌濃度の予測とを組み合わせて、水浴時の海水への「顔つけ」の可否を予報するシステムを考案した。この海水浴予報システムでは大腸菌濃度と糞便性大腸菌群数は対数レベルで同程度であるとの報告^{7,14)}を基に、予測された大腸菌濃度を水

浴判定基準に採用されている糞便性大腸菌群数に置き換えることによって、海水への「顔つけ」の可否判断を行うこととした。

Colilert-18³⁰⁾は米国環境保護庁(EPA)が承認済みの調査手法で、水域の大腸菌群と大腸菌又は糞便性大腸菌群を検出する手法である。培地の準備が不要で、18時間の培養により結果が得られるため、海水浴の可否の判断材料として有効な手法であると考えられる。2018年の海水浴イベント開催時のColilert-18分析では、糞便性大腸菌群の計数のため44.5℃で18時間培養した。糞便性大腸菌群数は、発色酵素基質ONPG(o-ニトロフェニル-β-D-ガラクトピラノシド)が代謝され黄色に着色した試薬入りのくぼみ(ウェル)の数をカウントすることによって算出できる。

具体的な手順としては、まず、前日午後1時に水中スクリーンを挟んだ外側と内側の2点で採水した試料について、Colilert-18により糞便性大腸菌群を当日朝に計数した。次に東京都水防災総合情報システム²³⁾の前日午後11時までの降雨を基に、対応する降雨グループを選び、そのデータベースの濃度経時変化を包絡する曲線により大腸菌濃度を予測した。海水への「顔つけ」の可否の判断は、濃度変化を包絡する曲線を用いた予測結果が終日 10^3 CFU 100 mL⁻¹以下の場合のみ「顔つけ」可とした。そして、予測結果に 10^3 CFU 100 mL⁻¹を超える時間帯がある場合は「顔つけ」不可とした。「顔つけ」可となった中で、水中スクリーンの内側のColilert-18が 10^3 MPN 100 mL⁻¹を超える場合、当日の透明度、油膜、COD(パケット)の状況等を考慮し、海水への顔つけが適切ではないと判断された場合は「不可」とした。また、水中スクリーン外側のColilert-18が予測値を超えるような不整合が生じた場合、前日から無降雨であれば大腸菌濃度は低下するものの、その低下度合は明確ではないため、安全性を優先して「顔つけ」不可とした。

3. 結果と考察

3.1 降雨イベントの類型化結果

解析対象期間中の降雨イベントは1484例であり、最大降雨強度、積算降雨量、降雨継続時間をパラメータとした類型化結果を図3に示す。各降雨グループの最大降雨強度、積算降雨量、降雨継続時間の平均値と標準偏差を表S1～表S8に示す。各降雨グループの出現頻度としては、グループ1が923例と最も多かった。8つの降雨グループを代表する降雨イベントの雨量時系列を図4に示す。図4の上部のG1～G8は降雨グループを示し、G1～G8の下の日時は、雨量時系列の期間を示す。最も出現頻度の多かったグループ1は最大降雨強度が 2 mm hr^{-1} 以下で降雨継続時間が1時間であった。グループ2、グループ3、グループ6は番号が大きいほど、最大降雨強度が大きく、降雨継続時間も長かった。グループ4とグループ5は最大降雨強度の大きさに地点間のばらつきが大きく、グループ4は石神井、久我山の北西部、グループ5は中央-清澄の平均値、高浜の沿岸部の最大降雨強度が大きかった。グループ7は最大降雨強度が他のグループよりも大きく、グループ8は降雨継続時間が他の降雨グループよりも大きかった。

降雨グループ8を除いた他のグループでは、降雨パラ

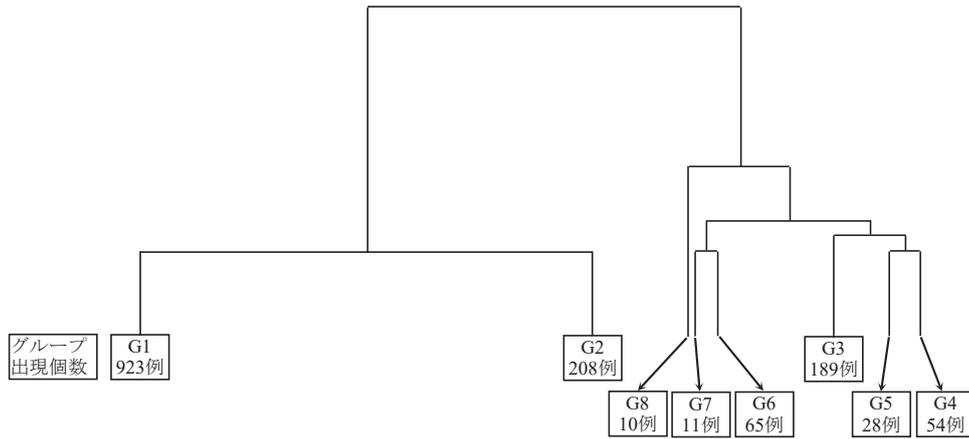


図3 過去10年間(2008年から2017年)の6月から11月の降雨データをクラスター解析により類型化した結果

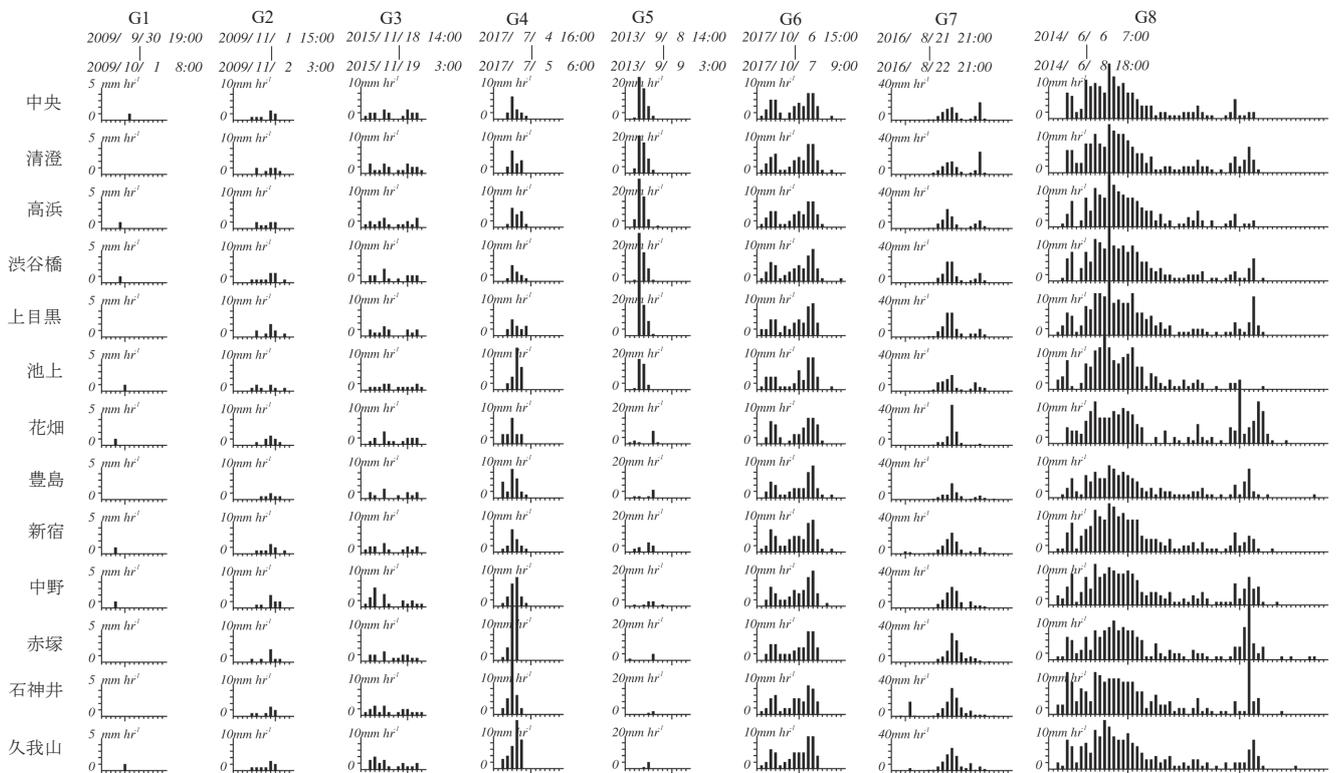


図4 8つの降雨グループを代表する降雨イベントの雨量時系列

メータの平均値に対して標準偏差がその50%を超えている地点が多くみられたことから、グループ内でさらに類型化を行い、グループ1は11個、グループ2は3個、グループ3は4個、グループ4は5個、グループ5は3個、グループ6は4個、グループ7は3個に類型化した。そして、3次元流動水質モデルの入力条件となる代表する降雨イベントを合計34選定した。

3.2 数値モデル解析を用いたデータベースの作成

3.2.1 モデル再現性検証

東京都と港区が2017年7月10日から2017年8月15日に実施したお台場海浜公園における糞便性大腸菌群数の調査結果(黒点)とモデル計算結果(実線)を図5に示す^{25,31)}。糞便性大腸菌群の測定方法は、試料をろ過し

たメンブランフィルターを培地(m-FC Ager)上に密着させ、 44.5 ± 0.2 °Cで 24 ± 1 時間培養後、発生した青色で光沢のあるコロニーをカウントする公定法である。点線は環境省の定める水浴の適・不適を分ける糞便性大腸菌群数の基準値 10^3 個 100 mL^{-1} (水浴判定基準)である。図中の棒グラフは東京都区部13地点の平均降雨量である。

黒点で示す降雨後の糞便性大腸菌群濃度の変化について述べる。7月18日の降雨直後の調査結果はないが、降雨の影響を受けて7月20日でも糞便性大腸菌群数は水浴判定基準を超え、7月24日には水浴判定基準以下に減少した。7月26日の降雨後の7月27日に糞便性大腸菌群数は水浴判定基準を超え、さらに2日後の7月29日には水浴判定基準以下に減少した。しかし、同日の降雨によ

り7月30日には再び糞便性大腸菌群数は水浴判定基準を超え、3日後の8月2日に水浴判定基準以下に減少した結果もあるが、8月1日の降雨の影響により再び水浴判定基準を超えた。8月2日から8月4日の降雨強度は小さく、糞便性大腸菌群数は8月2日から徐々に減少し、6日後の8月8日には水浴判定基準から2オーダー低い値に減少した。お台場海浜公園における糞便性大腸菌群数は、降雨直後に急速に増加し、その後、緩やかに減少する変化傾向が見られた。また、降雨強度が小さい場合は糞便性大腸菌群数が水浴判定基準を超えないこともわかった。

3次元流動水質モデルの大腸菌濃度の計算結果（抽出点は図2(c)に示す）を図5に実線で示す。計算結果は、約1か月間にわたる調査期間において、糞便性大腸菌群数の降雨後の変化傾向をよく捉えた。特に、7月25日から8月8日の計算結果は、降雨直後に大腸菌濃度が急速に 10^3 CFU 100 mL⁻¹以上に増加し、その後徐々に減少

する調査結果を非常によく再現した。一方、7月20日の糞便性大腸菌群数、大腸菌濃度のピークの4、5日後の3次元流動水質モデル計算結果は調査結果よりも1オーダー低く、計算結果と調査結果が一致しない。これは3次元流動水質モデルの流動場の鉛直拡散係数や大腸菌消長モデルの設定が原因と考えられ、今後検討が必要である。

お台場海浜公園周辺における糞便性大腸菌群と大腸菌の対数濃度はほぼ等しいことが知られている^{7,14)}ことから、大腸菌濃度のモデル計算を用いて糞便汚染状況を把握できるものと考えられる。したがって、計算された大腸菌濃度は糞便性大腸菌群数を置き換えられるものとして以下では考察を行う。

3.2.2 大腸菌濃度の経時変化データベースの作成

例として図6に降雨グループ1とグループ3におけるモデル計算結果から得た大腸菌濃度の経時変化データベースとそれらを包絡する曲線を示す。図6は、グループ1は11の降雨イベント、グループ3は4つの降雨イベン

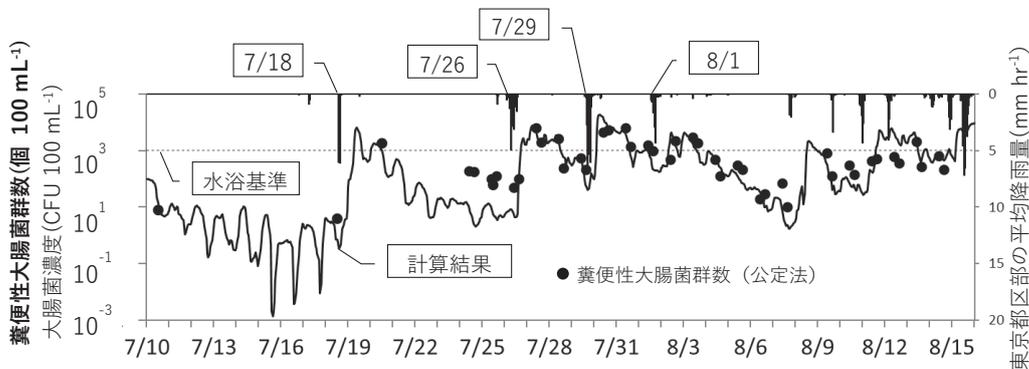


図5 糞便性大腸菌群数の調査結果（●公定法）と台場モデル計算結果（実線）の比較（2017年7月10日から8月15日、棒グラフ：東京都区部の平均降雨量）

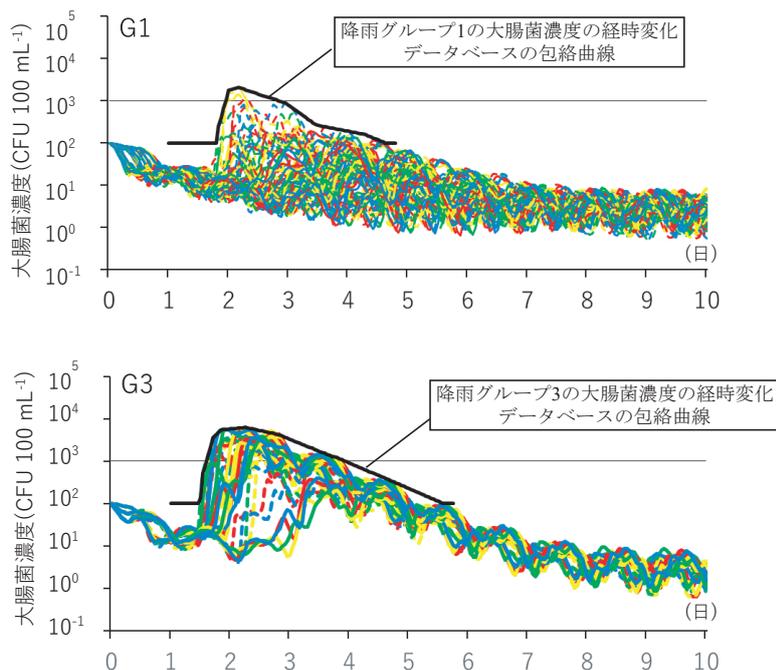


図6 降雨グループ1とグループ3に対する大腸菌濃度の経時変化データベースとその包絡曲線

トに対して、8つの潮位条件の組み合わせた88と32の計算結果を実線と点線を用いて黒線の下の部分に示した。グループ1、グループ3ともに降雨イベントと潮位条件の組み合わせによって大腸菌濃度がピークに達するまでの時間とピークの値は異なり、 10^3 CFU 100 mL⁻¹を超えない条件もあった。特にグループ1は大部分の計算結果の大腸菌濃度は 10^3 CFU 100 mL⁻¹以下であるが、いくつかの降雨イベントと大潮条件の組み合わせにおいて大腸菌濃度が 10^3 CFU 100 mL⁻¹以上であった。大腸菌濃度の予測には、衛生面での安全性を考慮して図6の黒線で示すように、すべての大腸菌濃度を包絡する曲線を採用した。

8つの降雨グループのすべての降雨イベントに対して同様の計算を実施し、大腸菌濃度の経時変化データベースを作成して、降雨グループごとにすべての大腸菌濃度を包絡する曲線を得た(図7)。図7から全ての降雨グループの大腸菌濃度の包絡曲線に、大腸菌濃度が 10^3 CFU 100 mL⁻¹以上の時間帯があった。降雨強度や降雨量の小さいグループ1は降雨開始から大腸菌濃度がピークに達するまで

の時間が他のグループと比較して長かった。一方、沿岸部(図1の中央-清澄、高浜)において降雨強度が大きかったグループ5は降雨開始から大腸菌濃度のピークに達するまでの時間が最も短かった。大腸菌濃度が 10^3 CFU 100 mL⁻¹以上の時間帯はグループ1が最も短く約20時間、降雨が長く継続したグループ8が最も長く約90時間であった。

3.3 降雨グループごとの大腸菌濃度の包絡曲線による予測の有効性

降雨グループごとの大腸菌濃度の包絡曲線(図7)を予測に使った結果と、3次元流動水質モデルの再現結果の整合性を比較することで、包絡曲線による予測の有効性について検証を試みた(図8)。検証期間は2016年と2017年の7月から8月である。

発生した対象降雨イベントがどの降雨グループに相当するかは、対象イベントと各降雨グループの13観測点の3つのパラメータ(最大降雨強度、積算降雨量、降雨継続時間)間のユークリッド距離を求め、その距離が最も近い降雨グループを適用する降雨グループとした。図8

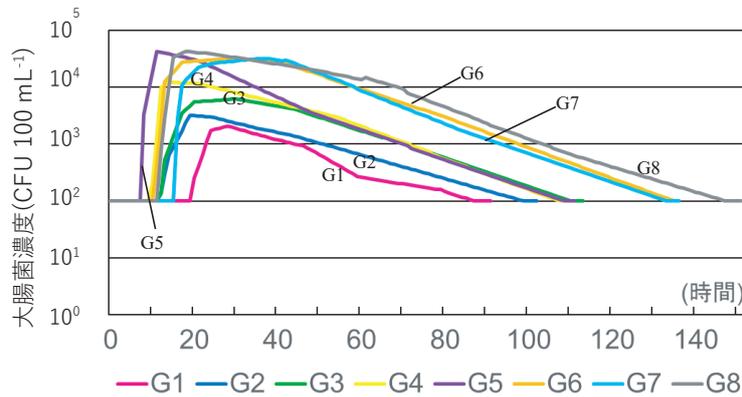


図7 各降雨グループに対する大腸菌濃度変化の包絡曲線

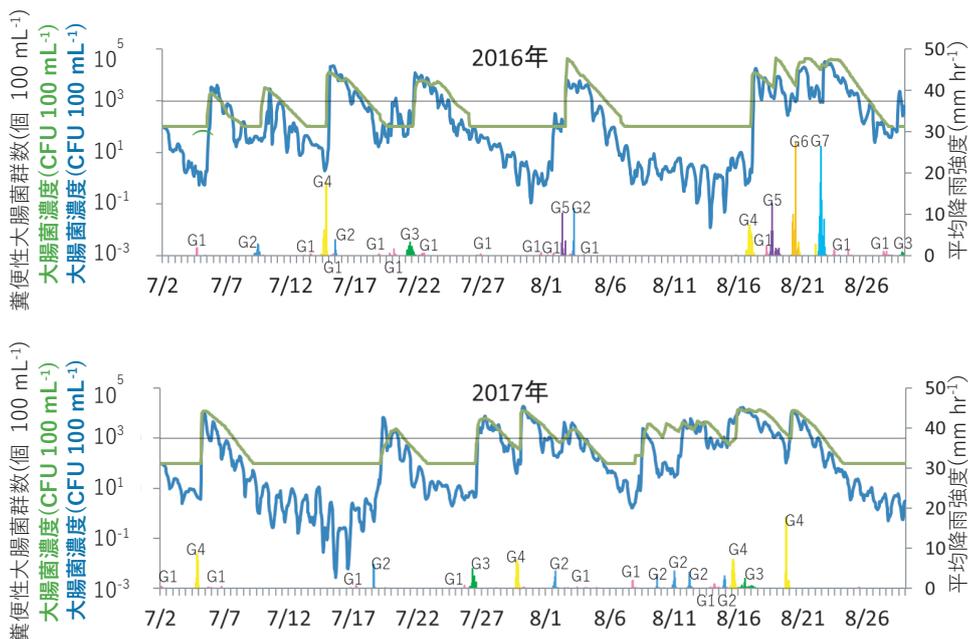


図8 大腸菌濃度のモデル計算結果(青線)と大腸菌濃度の包絡曲線による予測結果(緑線)の比較(2016年と2017年)と東京都区部13地点の平均降雨強度(棒グラフ)

の青線は3次元流動水質モデルの再現結果であり、緑線は大腸菌濃度の包絡曲線（図7）による予測結果である。図中の文字付き棒グラフは東京都区部13地点の平均降雨強度を示している。検証期間において、グループ8以外の降雨グループはすべて発生していた。3次元流動水質モデルの雨水流出量条件は、図8の棒グラフで示した雨量と同じデータを用いて、13地点の雨量から合理式合成法を用いて流入河川排水区単位で計算した。図8の棒グラフの添え字G1～G7は降雨グループ名である。3次元流動水質モデル計算では、降雨前の大腸菌濃度初期値を 10^2 CFU 100 mL⁻¹に設定していること、海水への「顔つけ」の可否判断基準である 10^3 CFU 100 mL⁻¹を超えるかどうかを判断することが予測の目的であることから、 10^2 CFU 100 mL⁻¹以下は一定として扱って表示した。グループ1とグループ2の降雨は大潮の場合のみ大腸菌濃度が 10^3 CFU 100 mL⁻¹を超え、小潮の場合は大腸菌濃度が 10^3 CFU 100 mL⁻¹を超えなかった。このため、小潮の前後1日を含めた3日間の降雨は大腸菌濃度の増加を考慮しなかった。

図8の緑線の大腸菌濃度の包絡曲線による予測結果は3次元流動水質モデル計算結果（青線）のピークを概ね再現しており、様々な降雨グループと潮位条件での大腸菌濃度の経時変化データベースを作成して、その包絡曲線を求めたことにより、モデルによる計算と同程度の予測情報を提供できることが分かった。したがって、海水浴イベントにおける海水への顔つけ可否判断するための大腸菌濃度 10^3 CFU 100 mL⁻¹以上となる降雨イベントを判定するには十分な予測が行えるものと判断した。ただし、包絡曲線の予測結果より3次元流動水質モデル結果が高い場合もあり、予測精度のさらなる検証は必要である。

3.4 海水浴予報システムの試行運用

2017年以降のお台場海浜公園の海水浴イベントは海水浴エリアを水中スクリーンで囲いその内側で実施されている（図9）。水中スクリーンは海底で固定せず、海面からカーテンが垂下式に設置されている。このように設置することで、CSOに起因する低塩分な糞便汚染を含む水塊が表層から流入すること抑制し、海水浴エリアの糞便汚染を低減する試みが実施されている^{17,18)}。

海水浴予報システムの試行運用期間は2018年の海水浴イベント期間の7月31日から8月5日である（図10）。黒線は大腸菌濃度の包絡曲線による予測結果、十字印と



図9 お台場海浜公園の海水浴イベントにおいて設置された水中スクリーン（水中スクリーンから岸側を海水浴イベントエリアと設定）

白抜き四角はそれぞれ水中スクリーンの外側と内側のColilert-18の結果である。この期間の降雨イベントはグループ1とグループ6に分類された。大腸菌濃度の包絡曲線による予測結果は水中スクリーンの外側のColilert-18と良く一致している。一方、水中スクリーンの内側のColilert-18は外側よりも常に低く、試行運用期間を通じて 10^3 MPN 100 mL⁻¹を超えなかった。7月28日～7月30日は台風の影響で海水浴イベントは中止され、7月31日と8月1日は、水中スクリーンの内側のColilert-18は 10^3 MPN 100 mL⁻¹を超えていないものの、大腸菌濃度の包絡曲線を用いた結果が 10^3 CFU 100 mL⁻¹を超える時間帯があったため、「顔つけ」を不可とした。8月2日以降は、水中スクリーンの内側のColilert-18、大腸菌濃度の包絡曲線を用いた結果ともに 10^3 MPN 100 mL⁻¹（ 10^3 CFU 100 mL⁻¹）以下であったため、「顔つけ」を可とした。海水浴イベント8日間の予報の中で、海水浴予報は7回が当たり、8月1日の顔つけ不可の予報が外れた。8月1日は大腸菌濃度の包絡曲線を用いた結果では終日 10^3 CFU 100 mL⁻¹以下では無かったため「顔つけ」不可としたが、水中スクリーンの外側のColilert-18の結果は 10^3 MPN 100 mL⁻¹以下であり、「顔つけ」可のケースであった。安全側ではあるが、「顔つけ可」を「顔つけ不可」と予報したため、正答率は87.5%だった。大腸菌濃度の包絡曲線を用いた結果と水中スクリーンの外側のColilert-18は概ね一致しており、糞便汚染の状況を予測することができたため、海水への顔つけの可否を予報す

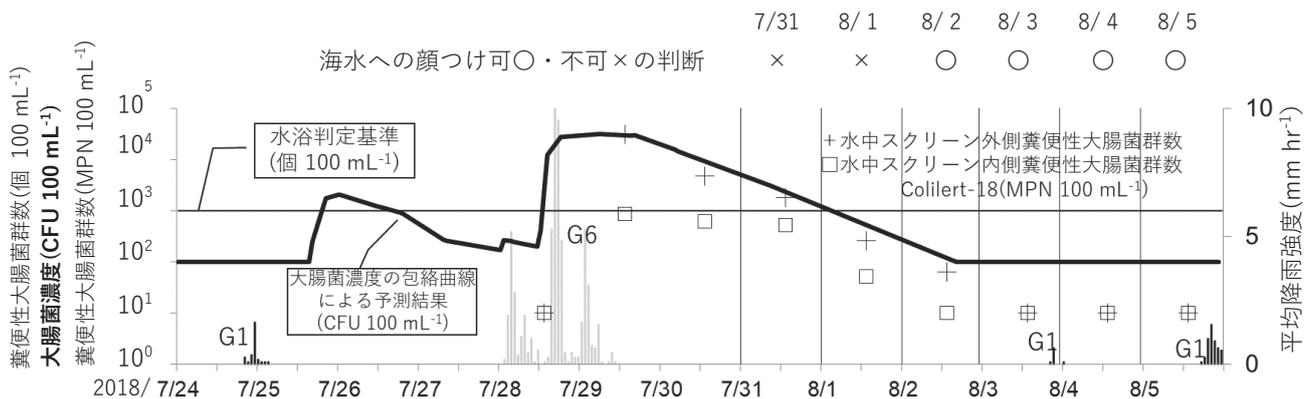


図10 海水浴予報システムを使った海水浴予報の試行運用結果

るために有効な情報であることが確認できた。今後は、大腸菌濃度が 10^3 CFU 100 mL^{-1} 以下であっても水浴による下痢症リスクは存在する^{16,19)} ことも踏まえたうえで海水浴予報システムの運用を行う必要がある。

4. まとめ

東京都区部における2008年から10年間の6月から11月までの降雨データを用いて、各観測地点の降雨特性とともにその空間分布を考慮した降雨の類型化を行った。そして、類型化された降雨グループごとに降雨後のお台場海浜公園における糞便汚染状況を予測するため、様々な潮位条件でのモデル計算結果を得て、大腸菌濃度の経時変化のデータベースを得た。そして、降雨グループごとに経時変化のデータベースにおける大腸菌濃度変化を包絡する曲線を求めた。これにより、予測対象の降雨がどの降雨グループにあてはまるかを判定できれば、海水浴当日における海水への顔つけの可否判断に活用できる可能性が見出された。

すなわち、前日までの降雨データから最も類似した降雨グループを決定して、海水浴当日の大腸菌濃度の包絡曲線による予測結果と、前日のColilert-18による糞便性大腸菌群数調査結果と組み合わせ、顔つけの可・不可を予報するシステムとした。そして、この海水浴予報システムを2018年7月31日から8月5日に試行運用したところ、糞便汚染の状況に基づいて海水への顔つけの可否を予報することが可能であった。一方、図8で示した大腸菌濃度の包絡曲線による予測結果は3次元流動水質モデル計算結果を下回る期間がわずかにあり、降雨条件によっては更に予測精度の向上のための検討を行う必要がある。予測精度の向上には、雨量の少ないグループ1やグループ2において、降雨イベントの類型化に用いた雨量観測点と降雨特性パラメータの検討が挙げられる。また、3次元流動水質モデルの雨水流出量の算出に用いる雨量観測点の設定、流動モデルの鉛直拡散係数や大腸菌消長モデルの設定を検討することが考えられる。加えて、過去にはない想定外の降雨イベントへの対応として、さらに降雨データが蓄積された段階で、降雨の類型化、大腸菌濃度の経時変化に与える潮汐条件の見直しとそれに付随する大腸菌濃度の経時変化データベースの更新が必要である。

謝 辞

本研究成果は、港区との共同研究「お台場における海水浴予報システムの構築」において実施した内容である。現地調査データの取得・分析に尽力くださった、(株)東京久栄の大隈正氏、萩野裕基氏に感謝いたします。お台場海浜公園の利用にご協力いただいた東京都港湾局・東京都埠頭公社株式会社に深く感謝申し上げます。また、東京都建設局より降雨データ、国土交通省関東地方西部局荒川河川事務所より河川流量データの提供をいただいたことに併せてお礼申し上げます。

付録：補足資料

補足資料は下記より閲覧可能である。

<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jswe/-char/ja/>
(原稿受付 2020年8月12日)
(原稿受理 2021年2月28日)

参 考 文 献

- 1) 運輸省港湾局監修・エコポート(海域)技術WG編, 1999. 自然と生物にやさしい海域環境創造事例集. 財団法人港湾空間高度化センター, 東京.
- 2) 和波一夫, 石井裕一, 安藤晴夫, 木瀬晴美, 2015. お台場における大腸菌数の鉛直分布把握の試み. 東京都環境科学研究所年報 2015, 34-35.
- 3) 和波一夫, 竹内健, 保坂三継, 佐藤綾子, 亀井理恵, 2006. 親水性水域の大腸菌群数等に関する研究. 東京都環境科学研究所年報 2006, 137-143.
- 4) 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, 2002. 合流式下水道の改善対策に関する調査報告書. URL: <https://www.mlit.go.jp/crd/city/sewage/info/cso/goryu01.html> (2021年3月時点).
- 5) Haramoto, E., Katayama, H., Oguma, K., Koibuchi, Y., Furumai, H., Ohgaki, S., 2006. Effects of rainfall on the occurrence of human adenoviruses, total coliforms, and *Escherichia coli* in seawater. *Water Science and Technology* 54(3), 225-230.
- 6) 鯉淵幸生, 小野澤恵一, 中村格之, 原本英二, 片山浩之, 古米弘明, 佐藤慎司, 安岡章夫, 磯部雅彦, 2005. 東京湾お台場海浜公園における雨天時合流式下水道越流水の影響調査. 海岸工学論文集 52, 886-890.
- 7) 鈴木元彬, Chomphunut POOPIATTANA, 春日郁郎, 古米弘明, 2018. 隅田川上流部から台場周辺海域における降雨後の糞便汚染状況と指標微生物の相互関係. 環境工学研究論文集 55, III_169-III_179.
- 8) Poopipattana, C., Nakajima, M., Kasuga, I., Kurisu, F., Katayama, H., Furumai, H., 2018. Spatial distribution and temporal change of PPCPs and microbial fecal indicators as sewage markers after rainfall events in the coastal area of Tokyo. *Journal of Water and Environment Technology* 16(3), 149-160.
- 9) 古川隼士, 甲斐竜輔, 土手裕, 鈴木祥広, 2011. 宮崎県青島海水浴場における細菌学的調査. 水環境学会誌 34(12), 197-201.
- 10) 和田卓也, 山田朋人, 2011. 東京における120年時間降雨量データを用いたひと雨降雨形態の日変化の検討. 土木学会論文集 B1 67(4), I_481-I_486.
- 11) 鈴木正人, 鈴木航, 杉原由基, 2014. 東京と大阪の長時間降雨量データを用いた降雨の時間分布特性の経年変化の検証. 土木学会論文集 B1 70(4), I_559-I_564.
- 12) 三上岳彦, 大和田広明, 安藤晴夫, 横山仁, 山口隆子, 市野美夏, 秋山祐佳里, 石井康一郎, 2005. 東京都内における夏期の局地的大雨に関する研究. 東京都環境科学研究所年報 2005, 33-42.
- 13) 高橋日出夫, 中村康子, 鈴木博人, 2011. 東京都区部における強雨頻度分布と建築物高度の空間構造との関係. 地学雑誌 120(2), 359-381.
- 14) 小野澤恵一, 鯉淵幸生, 古米弘明, 片山浩之, 磯部雅彦, 2005. 台場周辺海域における雨天時合流式下水道越流水の数値解析. 海岸工学論文集 52, 891-895.
- 15) Shibata, T., Kojima, K., Lee, S.A., Furumai, H., 2014. Model evaluation of faecal contamination in coastal areas affected by urban rivers receiving combined sewer overflows. *Water Science and Technology* 70(3), 430-436.
- 16) 環境省水環境部生活環境項目環境基準専門委員会, 2018. 第9回議事次第・配付資料. URL: https://www.env.go.jp/council/09water/post_102.html (2021年3月時点).
- 17) 福地広識, 2019. 東京2020大会のレガシーとしての「泳げる海, お台場」実現に向けた取り組み. 水環境学会誌 42(A)(8), 266-271.
- 18) 森田健二, 大浦昇, 永山幸江, 古米弘明, 2018. 「泳げる海, お台場」の実現を目指して官民連携による都市臨海部での環境教育の実践と体験の機会創出. 日本沿岸域学会第31回研究討論会概要集, 1-4.
- 19) 片山浩之, 2015. 水浴基準-微生物リスク管理に向けて. 水環境学会誌 38(A)(5), 168-172.
- 20) Eleria, A., Vogel, R.M., 2005. Predicting fecal coliform bacterial levels in the Charles River, Massachusetts, USA. *Journal of the*

- American Water Resources Association 41(5), 1195-1209.
- 21) Hellweger, F.L., Masopust, P., 2008. Investigating the fate and transport of *Escherichia coli* in the Charles River, Boston, using high-resolution observation and modeling. Journal of the American Water Resources Association 44(2), 509-522.
- 22) Andersen, S.T., Erichsen, A.C., Mark, O., Albrechtsen, H.-J., 2013. Effects of a 20 years rain event: a quantitative microbial risk assessment of a case of contaminated bathing water in Copenhagen, Denmark. Journal of Water and Health 11(4), 636-646.
- 23) 東京都建設局. 東京都水防災総合情報システム. URL. <http://www.kasen-suibo.metro.tokyo.jp/im/tsim0101g.html> (2021年3月時点).
- 24) Koibuchi, Y., Sato, S., 2010. Chapter3. Numerical Simulation of Urban Coastal Zones. In: Furumai, H., Sato, S., Kamata, M., Yamaoto, K. (Eds.), Advanced Monitoring and Numerical Analysis of Coastal Water and Urban Air Environment: cSUR-UT. Library for Sustainable Urban Regeneration Volume3, Springer, Tokyo, pp. 33-69.
- 25) 東京都オリンピック・パラリンピック準備局, 2017. 報道発表資料お台場海浜公園における水質・水温調査結果について. URL. <http://www.metro.tokyo.jp/tosei/hodohappyo/press/2017/10/06/09.html> (2021年3月時点).
- 26) 和波一夫, 石井裕一, 安藤晴夫, 木瀬晴美, 2015. 隅田川から東京港までの大腸菌数等の変化. 東京都環境科学研究所年報 2015, 32-33.
- 27) 特定非営利活動法人海辺づくり研究会, 2019. 平成30年度お台場海水浴予報システム構築支援業務委託報告書. 港区, 東京.
- 28) 南山瑞彦, 吉澤正宏, 桜井健介, 2006. 新たな衛生指標の下水処理への適応性の評価. 平成18年度下水道関係調査研究年次報告書集. 国土技術政策総合研究所, 東京, pp. 79-82.
- 29) 東京都下水道局. 下水処理の解説. URL. <https://www.gesui.metro.tokyo.lg.jp/business/technology-statistics/fukyu/kaisetsu/> (2021年3月時点).
- 30) IDEXX. Colilert-18. URL. <https://www.idexx.co.jp/ja/water/water-products-services/colilert-18> (2021年3月時点).
- 31) 特定非営利活動法人海辺づくり研究会, 2018. 台場水質調査・解析業務委託報告書. 港区, 東京.

[論文要旨]

合流式下水道雨天時越流水の影響により水浴判定基準を超える糞便性大腸菌群数が観測される都市の水辺において、安全性を確保して海水浴を行うためには糞便汚染状況の予測が求められる。そこで大腸菌を指標として糞便汚染状況を予測し、お台場海浜公園において海水へ顔をつけることの可否判断を行うシステム構築と試行運用を実施した。降雨の時空間特性を考慮して東京都区部の過去10年間の降雨イベントを類型化した。類型化した降雨毎に3次元流動水質モデルでお台場海浜公園における大腸菌濃度を計算し、濃度経時変化データベースを作成した。任意の降雨を類型化降雨にあてはめ、対応する大腸菌濃度のデータベースを包絡する濃度変化曲線は、降雨後のモデル計算結果の濃度上昇を再現することを確認した。このデータベースを包絡する濃度変化曲線を用いる方法で2018年の海水浴イベントにおいて予報システムの試行運用を実施し、その有効性を検証した。

キーワード：大腸菌；合流式下水道雨天時越流水；3次元流動水質モデル；降雨の類型化；海水浴予報システム