

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

鯉渕幸生* ・ 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***** ・ 岡安章夫***** ・ 磯部雅彦*****

お台場海浜公園周辺において、栄養塩類、大腸菌、アデノウイルスなど雨天時越流水起源物質の時空間変動過程を詳細に観測した。微生物の変動傾向は、栄養塩類のそれとは異なり、大腸菌については数 mm の降雨でも、降雨後数日間にわたって遊泳には不適切な糞便汚染を疑わせるレベルとなった。これらの微生物は下水管路内の堆積物に存在していると考えられ、降雨量よりも先行晴天日数により濃度が大きく変動する。現在では、糞便性大腸菌群数により感染リスクを評価しているが、細菌類とウイルスの変動過程は異なるため、今後はアデノウイルス等の観測結果を蓄積することが、都市沿岸域での感染リスクを正しく評価するために望ましいと考えられる。

1. はじめに

東京湾をはじめとする大都市沿岸域は、都市域からの様々な汚濁負荷を受けるため、水環境や水域生態系の悪化や親水空間における健康リスクの増加が懸念されている。特に東京都をはじめとする古くから下水道を整備した都市では、雨水と汚水を同一の管路を用いて流す合流式下水道が採用されているため、都市由来の汚染物質には、平常時の排水流入や下水処理水だけでなく、雨天時合流式下水道越流水(Combined Sewer Overflow 以下、CSO)由来の栄養塩類や病原微生物が含まれる。そのため合流式下水道緊急改善事業をはじめとする様々な対策が検討・実施されつつあるが、CSO の受水域での挙動を定量的に観測した例は、古米ら(2003)の数日の観測に限られ、特に時間変動に関する情報が不足している。また細菌については降雨応答を計測した例があるものの(Ackerman ら, 2003)、ウイルスについては濃縮操作や PCR 法などの特殊操作が必要で複雑なため、観測事例は皆無に等しい。現状では糞便汚染指標に選定されている糞便性大腸菌群数の計測結果から病原性微生物の有無を推定する方法が広く認知され、長年用いられてきて

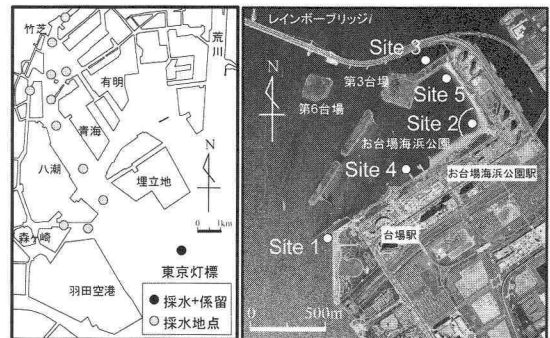


図-1 東京湾周辺(左)およびお台場海浜公園周辺(右)における現地観測地点

いるが、糞便性大腸菌群数が病原性微生物全てを正しく反映しているという確認さえ、観測が不十分な現在では為されていないことになる。したがって都市沿岸における CSO 由来の物質を連続的に測定し、その動態を把握することが、沿岸域管理や健康リスク制御を可能にする上では不可欠である。

そこで本研究では、国内で最も多くの雨天時流出汚染物質が流入するとされ、親水空間ではあるものの、現在環境基準で遊泳を利用用途としていないお台場海浜公園とその周辺において詳細な観測を行い、都市ノンポイント汚染や CSO 起因の汚濁物質に関連する化学物質と健康関連微生物の受水域における環境動態を定量的に評価することを目的とする。

2. 観測概要と概況

(1) 現地観測概要

現地観測は2004年8月4日から10月15日まで実施した。この期間中、晴天時には週2回の頻度で、降雨後は一週間にわたり毎日観測を行った。現場において投げ込み式水質計(Alec, AAQ1183)により水温、塩分、DO等を計測すると同時に、採水した試料を実験室で分析することで、大腸菌群数、大腸菌数、アデノウイルス、溶存態

* 正 会 員	博(工)	東京大学講師 大学院新領域創成科学研究科環境学専攻
** 学生会員		東京大学修士課程 大学院工学系研究科社会基盤学専攻
***	修(工)	元東京大学 大学院工学系研究科社会基盤学専攻
**** 正 会 員	修(工)	東京大学博士課程 工学系研究科都市工学専攻
***** 正 会 員	博(工)	東京大学講師 工学系研究科都市工学専攻
***** 正 会 員	工博	東京大学教授 工学系研究科都市工学専攻
***** フェロー	工博	東京大学教授 大学院工学系研究科社会基盤学専攻
***** 正 会 員	工博	東京海洋大学教授 海洋科学部海洋環境学科
***** フェロー	工博	東京大学教授 大学院新領域創成科学研究科環境学専攻

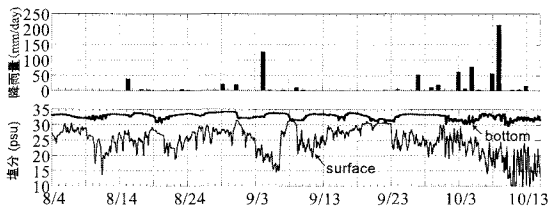


図-2 観測期間中の降雨量および塩分の観測結果

無機窒素($\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$), 溶存態無機リン($\text{PO}_4\text{-P}$), 溶存態無機珪素($\text{SiO}_2\text{-Si}$), 全窒素(T-N), 全リン(T-P)の測定を行った。

測定地点はお台場海浜公園とその外側の合計5地点である(図-1(右)参照)。Site1は東京港の航路に面しており、東京湾や隅田川を含む様々な水路の水が直接影響する地点である。Site2はお台場海浜公園の中央、お台場浄化実験を実施している地点で、有明西運河で取水した海水を、東京都下水道局有明水再生センターの海水浄化プラントにて砂ろ過および紫外線消毒により処理し約5000 m^3/day を実験区域に放流している。放出口周辺はオイルフェンスで覆われており、フェンス内部にて採水を行った。Site3は海浜公園の北側にあたり、Site1と同様に海水交換が大きく、観測地点中最も隅田川河口に近い地点である。さらにSite4とSite5では、海浜公園内でのCSO起因物質の空間分布を把握するため10月5日～15日までの期間、それぞれSite1と2の中間地点、Site2と3の中間地点にて観測を行った。

栄養塩については、より広範囲に分布を把握するため、東京港内にて東京海洋大学所有の調査船「ひよどり」による観測を実施した(図-1(左)参照)。測定項目は、水温や塩分、DO、クロロフィル a 等の鉛直プロファイル(Alec製, AAQ1183)、採水により海底から1.5 m間隔でお台場海浜公園と同様の栄養塩類の計測を行った。さらに水面下1, 2, 5 mにおいて採取したサンプルについて、植物プランクトン細胞数の計数を行った。

(2) 分析方法

大腸菌群数(Total Coliform), 大腸菌(*E. coli*form)の分析は、採取後冷却しながら直ちに持ち帰ったサンプル10 mLを10倍段階希釈し、m-ColiBlueキット(Millipore社)を用いて膜面上に形成されたコロニー数の定量を行った。アデノウイルスの分析は、陰電荷膜吸着・酸洗浄・アルカリ誘出法(Katayama et al., 2002)を用いてサンプル1 Lを濃縮した後、DNA抽出を行い、アデノウイルスに特異的なプライマー(Heim et al., 2003)を用いたリアルタイムPCRによって、アデノウイルス濃度の定量を行った。また栄養塩の分析には、オートアナライザー(プラン・ルーベ(株)製AACS III)を用いた。

(3) 観測期間における気象と海象

図-2は東京港の入り口に位置する東京灯標において連続観測した、水面下1 mおよび海底上0.5 mにおける塩分(詳しくは鯉浦ら(2005)参照)と東京管区気象台における降雨量の時系列である。8月から9月前半にかけての降雨は間欠的で少ないのに対し、9月後半から10月中旬にかけての降雨は連続的であった。約2ヶ月の観測期間中の降雨は少ないものも含め32日観測され、最大は10月9日の222 mm/day、平均降雨量は24.2 mm/dayであった。これにより塩分は、表層の塩分は大きく減少し、降雨後の9月3日前後と、9月20日から10月10日頃に著しく低下している。以下では間欠的な降雨が見られた8月後半から9月上旬と、10月上旬から中旬にかけて2つの期間に着目して検討を行う。

3. 観測結果および考察

(1) 栄養塩の変動

図-3は間欠的な降雨が観測された8月23日から9月10日における、 $\text{NO}_3\text{-N}$ (上), $\text{NH}_4\text{-N}$ (中), $\text{PO}_4\text{-P}$ (下)と降雨量の時経列である。

$\text{NO}_3\text{-N}$ は8月30日にかけて低下した後、8月29日および31日の降雨で再び増加した。地点毎の時間変動を比較すると、Site2の $\text{NO}_3\text{-N}$ が高く、他の2地点と比較して平均で20 μM 程度高くなっている。 $\text{NH}_4\text{-N}$ については、降雨のあった8月下旬をピークに、その後は減少する傾向が見られた。またSite1やSite3と比較してSite2が低く、 $\text{NO}_3\text{-N}$ とは反対の傾向となっていた。同様に $\text{PO}_4\text{-P}$ についても降雨に対応して減少する傾向が見られ、その傾向は $\text{NH}_4\text{-N}$ よりも顕著であった。一方、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の変動は3地点でほぼ等しく、地点間の違いは小さい。このように無機態窒素の変動はSite2とそれ以外で異なる変動を示した。これはSite2で海水浄化処理が施されているために $\text{NH}_4\text{-N}$ が $\text{NO}_3\text{-N}$ へと酸化された海水が流入している結果と考えられる。

図-4は連続的な降雨が見られた9月28日から10月15日における無機態栄養塩の変動を同様に示したものである。期間中の $\text{NO}_3\text{-N}$ は徐々に増加し、特に10月2日から10月5日にかけての降雨で、Site1と3で増加した。一方さらに大雨となった10月8日から9日にかけての降雨では、ほぼ横ばいで、変化が小さいことが分かる。このように連続降雨時の $\text{NO}_3\text{-N}$ の増加は、間欠的な降雨の時(図-3)と比較して、明らかに緩やかであった。同様に $\text{NH}_4\text{-N}$ 及び $\text{PO}_4\text{-P}$ を見ると、間欠的な降雨時にも見られたように降雨に対応して減少する傾向となった。

図-5は期間中の $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{PO}_4\text{-P}$ の表層と底層での空間分布である。図中の棒グラフは観測期間中の平均値をバーチャートは最大値と最小値を示す。 $\text{NO}_3\text{-N}$ は全

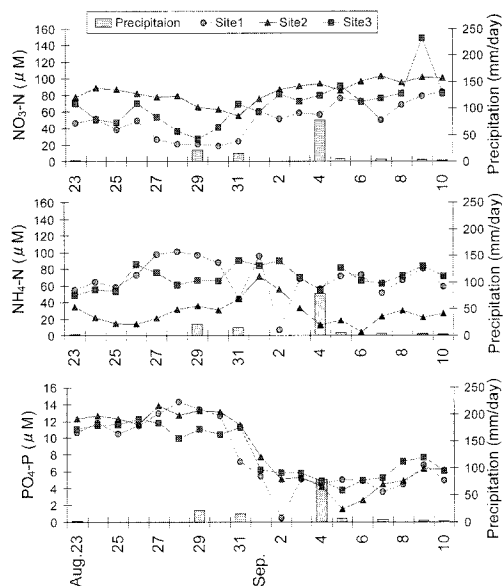


図-3 間欠的な降雨時における $\text{NO}_3\text{-N}$ (上), $\text{NH}_4\text{-N}$ (中央), $\text{PO}_4\text{-P}$ (下) の時間変動

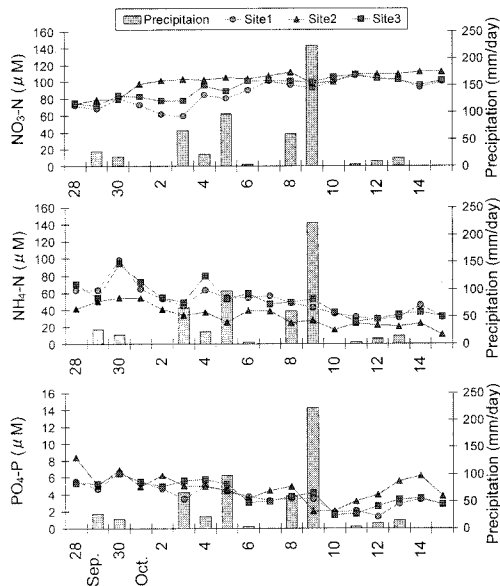


図-4 連続的な降雨時における $\text{NO}_3\text{-N}$ (上), $\text{NH}_4\text{-N}$ (中央), $\text{PO}_4\text{-P}$ (下) の時間変動

体では東京灯標にむけて徐々に希釈されるような分布となっており、表層と底層での濃度差が大きい。また、隅田川河口・品川付近の運河・森が崎付近で最大と最小の濃度差が大きいことがわかる。一方、 $\text{PO}_4\text{-P}$ は隅田川河口よりも品川付近の運河や森が崎において高濃度で、それ以外の地点では表層と底層の濃度差が小さい。

以上のように、栄養間で変動傾向が異なり $\text{NO}_3\text{-N}$ については処理場のみならず、降雨起源の寄与が大きいことが分かった。一方、 $\text{PO}_4\text{-P}$ や $\text{NH}_4\text{-N}$ については、降雨よりも底泥起源や処理場の寄与が大きいとみられ、それにより降雨時に希釈され減少したと考えられる。

(2) 大腸菌及びアデノウイルスの観測結果

図-6 に間欠的な降雨が観測された8月23日から9月10日における大腸菌およびアデノウイルスの観測結果を示す。大腸菌は8月28日および9月4日の降雨後には、100倍程度増加し、その後2～3日かけて晴天時のレベルにまで濃度が減少している。このような急激な増減は、栄養塩では認められない傾向である。またアデノウイルスでは、さらにこの傾向が著しく、降雨前には定量限界以下であることが多いのに対し、降雨後に急増している。また Site2 においては、降雨後においても濃度の増加が見られない場合があるが、これは先述の浄化実験の影響とみられる。

図-7 は、連続的な降水が記録された9月28日～10月15日の大腸菌とアデノウイルスの観測結果である。期間中の大腸菌やアデノウイルスは、高いレベルを維持しており、降雨後に低下する前に次の降雨があったためと考

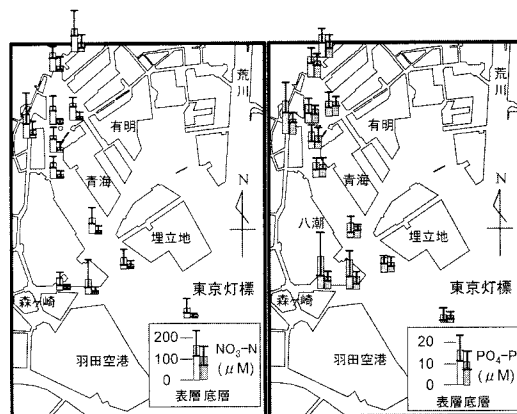


図-5 表層と底層での $\text{NO}_3\text{-N}$ (左) と $\text{PO}_4\text{-P}$ (右) の期間平均、最大、最小値の空間分布

えられる。さらに降雨量と濃度との間には相関が低いことが分かる。

現在、海水浴場における糞便性大腸菌群数の上限値として1000(CFU/100 ml)が設定されている。今回の観測では大腸菌と大腸菌群数を計測していることに注意が必要であるが、これらの変動傾向は類似していると考えられ、大腸菌群数から、海水浴場における基準を上回る日数を推定したところ、数 mm/day の降雨でも大腸菌が急増して、数日間の短い期間においてのみ、基準値を上回ることが明らかになった。

図-8 は大腸菌およびアデノウイルスの期間平均、最大、最小値の平面分布である。この図から大腸菌の最大値は運河に面した Site1 および Site3 で高く、Site1 およ

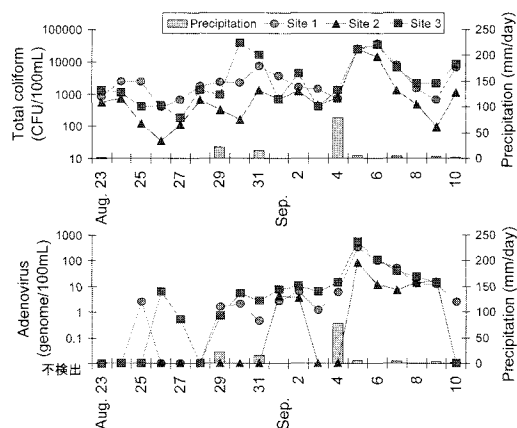


図-6 間欠的な降雨時における大腸菌群数とアデノウイルスの時間変化

びSite2の最小値が他の地点と比較して低いことが分かる。Site2においては浄化処理の影響と見られるが、Site1の最小値が低いのは、この地点が東京港に面しており、海水交換が大きいためと考えられる。アデノウイルスについても、Site1と3で最大値が高く、時系列と同様、変動の幅が大きくなっている。また大腸菌・アデノウイルスに共通して、Site4およびSite5の最小値が高いが、2地点での観測が短期であることや、海浜公園内の比較的静穏な海域にあるため、海水交換が低く、これによっていったん流入した物質が減少しづらい傾向にあるためと考えられる。

以上のように、それぞれの項目間で変動傾向は異なり、栄養塩に比べて、大腸菌やアデノウイルスの変動幅は大きく、特に晴天日数の大きい間欠的な降雨後は、連続降雨時と比較して増加の幅が大きかったことが分かった。これは栄養塩が処理場等から平常時にも放出されているのに対して、微生物が下水管路内の堆積物に存在して、降雨時に放出されているためと考えられる。またこれらの物質はこのような放出起源の影響だけでなく、海水交換の影響も強く受けていることが分かった。そこで次節においては、塩分との相関や各項目間の比較から、それぞれの物質の挙動の差異についてさらに検討を行う。

4. CSO 起源物質の受水域での挙動の違い

(1) CSO 起源物質の海水による希釈の影響

図-9は、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、大腸菌およびアデノウイルスと塩分の相関を示している。 $\text{NO}_3\text{-N}$ は塩分の減少に伴い直線的に増加するが、15 psu 程度未満では横ばいとなり、それ以上増加しないことが分かる。これは100 mm/day 程度の降雨時には、河川水の寄与が増加するために、河川水の濃度以上には $\text{NO}_3\text{-N}$ が増加しないためと考えられる。一方、大腸菌については、ばらつきが大きく、相関は小

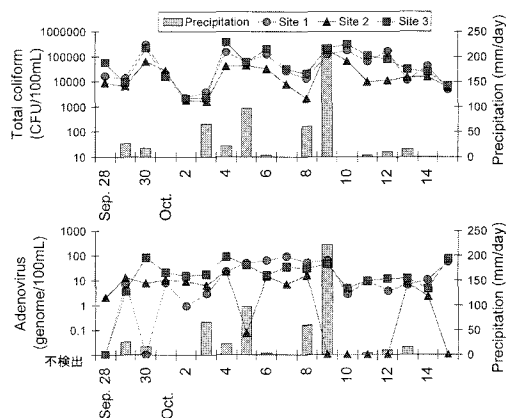


図-7 連続的な降雨時における大腸菌群数とアデノウイルスの時間変化

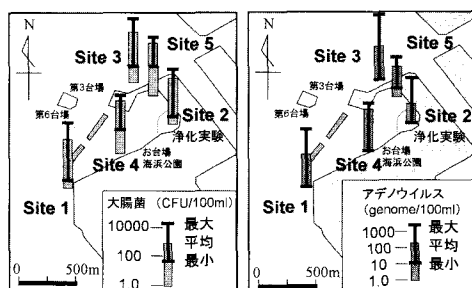
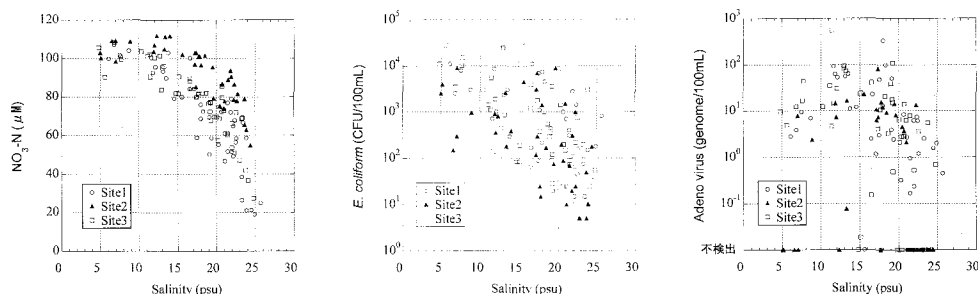
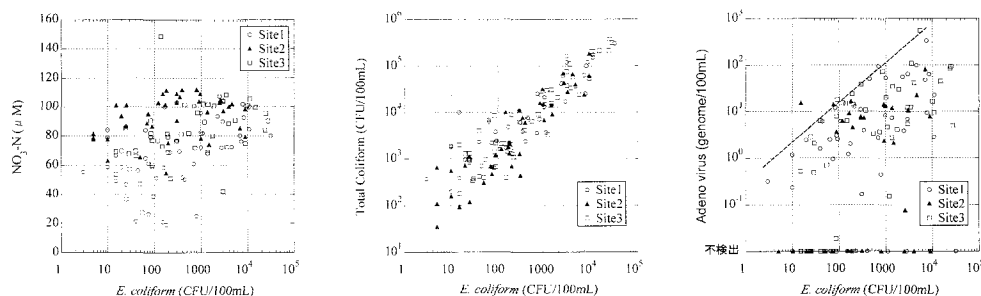


図-8 大腸菌 (左) およびアデノウイルス (右) の期間平均、最大、最小値の平面分布

さいことが分かる。さらにアデノウイルスについては相関がまったく見られず、その傾向が大腸菌とも異なっていることが分かる。

(2) CSO 起源物質の項目間の関係

図-10は $\text{NO}_3\text{-N}$ 、大腸菌群数、アデノウイルスと大腸菌との関係を示している。この図から、 $\text{NO}_3\text{-N}$ と大腸菌では相関がないことが分かる。これは栄養塩が下水処理場から絶えず供給されるのに対して、大腸菌が降雨時にイベント的に流入することが原因とする先ほどの結果と一致している。一方、大腸菌と大腸菌群数には高い相関があり、大腸菌よりも大腸菌群数が1オーダー高いことが分かる。したがって大腸菌群数によっても大腸菌の挙動をある程度把握することが可能といえる。アデノウイルスと大腸菌の関係については、一見して相関が低い、図中の波線に示すように、アデノウイルスの上限が、大腸菌の増加に伴って増加していることが分かる。このことから大腸菌からアデノウイルスの量を推定することは不可能であるものの、その最大値についてはある程度推定できると考えられる。したがって、現在用いられている糞便性大腸菌群数による健康リスクの予想は、これまでウイルスの計測が困難であった状況下で、より安全側に水域の健康リスク評価を行う意味では適正であ

図-9 地点における $\text{NO}_3\text{-N}$ (左), 大腸菌 (中央), アデノウイルス (右) と塩分の関係図-10 地点における $\text{NO}_3\text{-N}$ (左), 大腸菌群数 (中央), アデノウイルス (右) と大腸菌との関係

ったと考えられる。しかし、ウイルスによる感染リスクを評価するという意味では、このようにばらつきが大きいため、今後は糞便性大腸菌群から推定するのではなく、ウイルスを直接計測していくことが適切と考えられる。また今回の観測結果を踏まえると、従来の評価では遊泳が不適とされた期間は、大きく減少することが予想され、親水空間での活動の制限を小さくすることができるものと期待できる。

5. ま と め

お台場海浜公園周辺において、降雨後毎日採水を実施し、栄養塩、大腸菌、アデノウイルスなどCSO由来物質の受水域での変動過程を観測した。各栄養塩によってその変動傾向は異なり、 $\text{NO}_3\text{-N}$ は降雨量に比例するように濃度が増加するのに対して、 $\text{NH}_4\text{-N}$ や $\text{PO}_4\text{-P}$ については逆に濃度が低下する傾向が見られ、栄養塩の供給源の違いが反映されたものと考えられた。また大腸菌やアデノウイルスなど従来観測が乏しい項目についても、雨天時の挙動を捉えることができた。大腸菌については、数mmの降雨でも遊泳可否の基準を上回る場合があったが、降雨後数日で急減するため、その期間は降雨後数日に限られる。これら微生物は管路内に蓄積されており、先行晴天日数によってもその濃度が大きく変化することが明らかになった。

現在の水質基準では、微生物感染リスクを評価するため、糞便性大腸菌群数の計測が行われ、すでに長年の蓄

積があるが、この評価は安全側であり、必ずしも適切に感染リスクを評価しているとは考えにくい。今後はアデノウイルス等の観測結果を蓄積することが、都市沿岸域での感染リスクを適切に評価するために望ましいと考えられる。

謝辞: 本研究の一部は、21世紀COEプログラム「都市空間の持続再生学の創出」および河川整備基金事業「河川汽水域の水環境と生物環境に関する研究」および科学研究費若手研究B(課題番号: 16760403, 代表: 鯉渕幸生)により実施したことを付記する。

参 考 文 献

- 小野澤恵一・鯉渕幸生・古米弘明・片山浩之・磯部雅彦(2004): 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, 第52回海論文集, 印刷中。
- 鯉渕幸生・磯部雅彦(2004): 2004年の東京湾西岸横浜港周辺における青潮の発生要因, 第52回海論文集, 印刷中。
- 古米弘明・高田秀重・福士謙介・中島典之・片山浩之(2003): 環境中における雨天時下水道由来のリスク因子の変容と動態, 建設技術研究開発助成制度研究成果報告書, 177p。
- Ackerman, D. and S. B. Weisberg. (2003): Relationship between rainfall and beach bacterial concentrations on Santa Monica Bay beaches, J. Wat. Health, pp. 447-465.
- Katayama, H., A. Shimasaki and S. Ohgaki(2002): Development of a virus concentration method and its application to detection of enterovirus and Norwalk virus from coastal seawater, Appl. Environ. Microbiol. 68, pp. 1033-1039.
- Heim, A., C. Ebnet, G. Harste and P. Pring-Akerblom(2003): Rapid and quantitative detection of human adenovirus DNA by real-time PCR, J. Med. Virol. 70, pp. 228-239.