

雨天時越流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

FORMATION OF LARGE-SCALE HYPOXIC WATER MASS IN TIDAL URBAN RIVERS DUE TO LOAD OF COMBINED SEWER OVERFLOW

金子真¹・二瓶泰雄²

Makoto KANEKO and Yasuo NIHEI

¹学生員 学 (工) 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻修士課程
(〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

²正会員 博 (工) 東京理科大学准教授 理工学部土木工学科 (同上)

Tidal urban rivers have severe environmental problems like massive fish death which was mainly caused by formation of hypoxic water mass. However there was little information on DO environments in large tidal rivers. To investigate DO environments in tidal rivers and its relation to floodings which are closely related to CSO(Combined sewer overflow) impacts, we conducted field measurements on water-quality environments in the Sumidagawa and Kandagawa Rivers, Japan. The result indicates that massive fish death in tidal reach of small urban rivers appeared frequently just after flooding events in summer seasons. The measured results reveal that DO on Sep. 9, 2010 were lower than 2 mg/L in overall region of Sumidagawa River due to the flooding event. These facts indicate that inflows of CSO due to flooding events have an important influence on reduction of DO concentration in the Sumidagawa River.

Key Words : *Tidal urban river, hypoxic water mass, massive fish death, dissolved oxygen, combined sewer overflow*

1. はじめに

都市河川の感潮域は、一般に低水流量が小さく、海水遡上の影響も受けるため、流れが淀みやすく、水質汚濁化が進行しやすい立地条件となっている¹⁾。そのため、例えば、東京都隅田川や神田川のような都市河川では、春期から夏期の感潮域において、溶存酸素濃度 (DO) 低下に伴う魚大量斃死事故が長年発生しており²⁾、2008年度においても隅田川にて発生している。また、同じく東京都の目黒川では、河川では珍しい青潮が観測されている³⁾。類似した現象はいくつかの河川で報告されており^{4)~6)}、都市河川感潮域ではdrasticな水質問題が各地で生じている。

これらの水質問題に共通する“DO低下”が都市河川感潮域において生じる主な要因としては、青潮の源となる貧酸素水塊が内湾底層で形成され、その海水が潮汐により河川を遡上するためである。これに加えて、出水時には、底泥の巻上げや雨天時越流水CSO (Combined sewer overflow) の流入により、それらに含まれる有機物がDOを大量に消費することが挙げられる。しかしながら、陸・海域影響を含めた形での都市河川感潮域のDO調査はほとんど行われておらず、ましてや、それらと魚大量斃死と

の関連性については十分検討されていない。

このことを念頭にして、著者ら⁷⁾ (以下、前報と呼ぶ) は、2008年において、魚大量死が生じた隅田川と生じていない荒川の感潮域にてDO観測を実施し、流量が相対的に小さく中小都市河川 (神田川等) が流入する隅田川のみDO低下現象が観測された。前報では、DO低下の要因が、底泥からの巻上げの寄与は小さく、「海域からの貧酸素水塊遡上」と「降雨時のCSO流入」と関連することを指摘したが、後者については検討が不十分であり、降雨時における陸域からのCSO汚濁負荷の実態やそれが感潮域のDO低下に及ぼす影響は今後の課題となっていた。

そこで本研究では、出水時におけるCSO負荷の実態やその都市河川感潮域のDO環境への影響に関して明らかにすることを目的とする。このため、まず、東京都²⁾による都内河川の魚大量斃死事故の概況 (事故発生場所や時期) を取りまとめ、それらと降雨状況の関連を調べる。次に、DO低下による魚大量死が多く確認されている隅田川やその流入河川である神田川を対象として、2009年と2010年の夏期において定期的なDO縦断分布調査やメモリ型測器によるDO連続計測、出水時CSO負荷調査を実施した。さらに、感潮域のDO低下とCSO影響の関連性を定量

的に検討するために、ボックスモデルによる簡易DO計算を行う。上記の調査結果より、2010/9/8の降雨イベント直後に隅田川全体にわたる大規模貧酸素水塊が形成された様子を観測することに成功したので、本論文ではその時のデータを中心に記述する。

2. 研究方法

(1) 観測対象河川

観測サイトである隅田川と神田川の位置を図-1に示す。埼玉県を流れる新河岸川と荒川から分流が合流する隅田川は、全長23.5kmで全区間感潮域であり、石神井川や神田川を支川とする。その神田川は、東京都三鷹市・井の頭池に源を発し、都市部を流れ隅田川に合流する全長24.6kmの一級河川である。神田川には落合水再生センターと中野水再生センターの処理水が流入しており、神田川の河川流量に対する下水処理水の占める割合は81%～88%にも達する⁸⁾。また、対象流域が含まれる東京都区内の下水道普及率は99.9%であり、その大部分(=82%)が合流式下水道である。

(2) 魚大量斃死事故及び関連気象・水質データ収集

都内河川の魚大量斃死発生状況やその原因となるDO低下状況の全体像を把握するために、東京都がまとめている「河川等の水質異常事故発生状況一覧」²⁾に基づいて、1989～2008年までの20年間分の東京都内における魚大量斃死事故データを収集する。この中には、事故発生日時、場所、被害状況、原因がリストアップされている。魚大量斃死の事故原因としては、工場排水・薬品やDO不足、原因不明等があり、本論文では、DO不足によるデータのみを解析対象とする。また、降雨量などの気象データ(アメダス)や水質データ(公共用水域水質データ)を収集し、DO低下による魚大量斃死時の気象・河川水質データを検討する。

(3) 現地観測概要

隅田川や神田川を対象として、都市河川感潮域のDO環境とそれへの陸域影響を把握するために、前報と同じ①空間分布観測と②長期連続観測に加えて、③出水時CSO負荷調査、という三種類の現地観測を行う。まず、①の空間分布観測では、多項目水質計(Datasonde5x, 環境システム(株)製)による水質鉛直分布計測を、図-1に示す隅田川6地点(図中○, □印, 河口から0.5～30km)と神田川5地点(図中○, △印, 隅田川合流地点から0～6km)において実施した。計測項目は、水温と塩分、濁度、DO、深度等である。ここでは、満潮(もしくは干潮)前後2時間以内に全対象地点を移動して計測する。観測回数は、



図-1 観測サイト

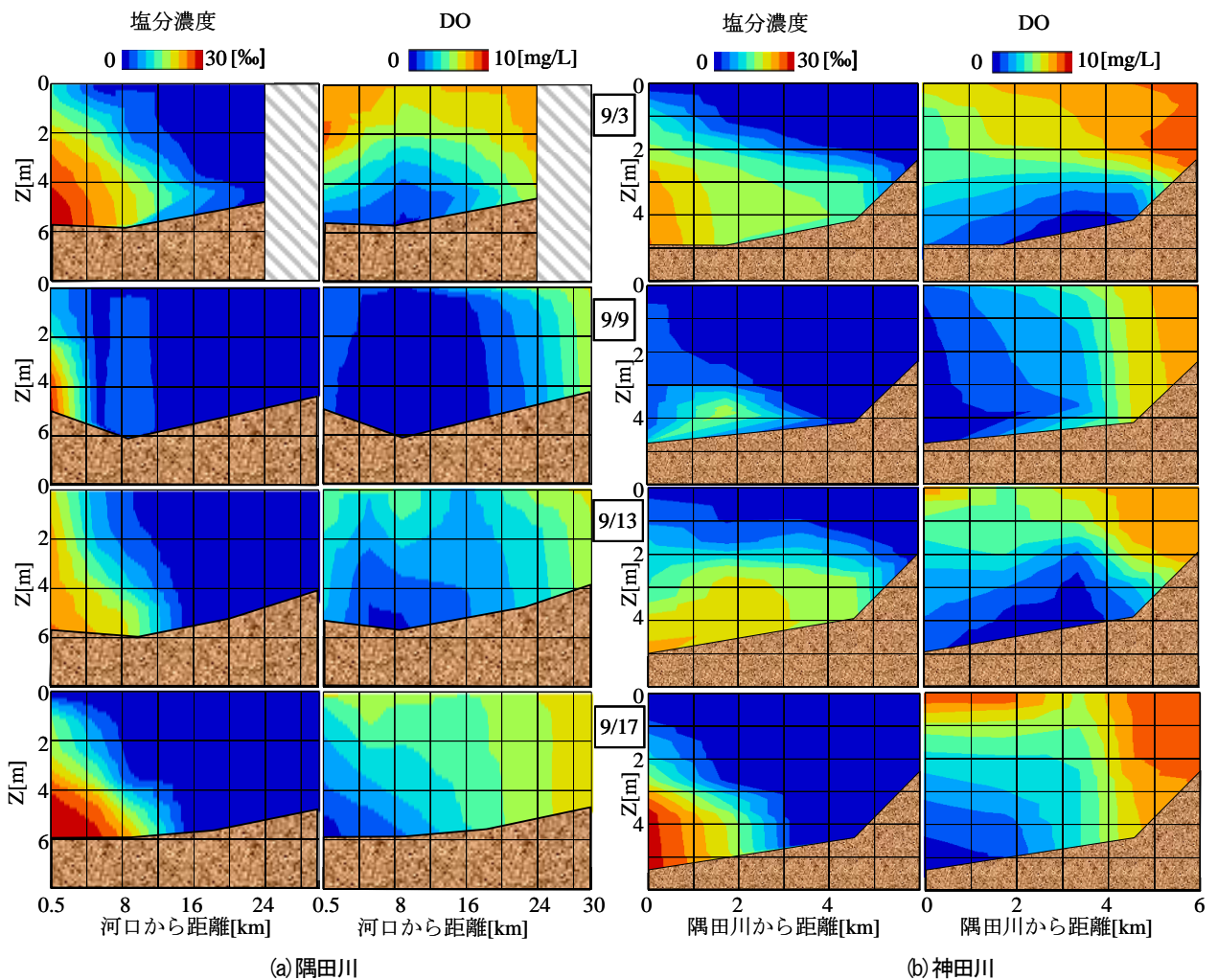
表-1 観測対象出水イベントの概要

No	採水地点	日時	雨量 [mm]	API [mm]
1	一休橋 (2009年)	10/8 0時-14時	129.5	46.5
2	和田見橋 (2010年)	9/16 18時-25時	3.5	110.7
3		9/27 1時-17時	44.5	72.2
4		9/30 9時-16時	12.5	124.5
5		10/9 16時-22時	25.5	34.0
6		10/28 16時-23時	22.5	18.2
7		10/30 9時-23時	42	37.4

2009年8～9月に計6回、2010年8～9月に計8回であり、この期間内に2010/9/8にて台風1009号出水が生じ、降雨一日後(9/9)の調査にて大規模貧酸素水塊が形成された様子が捉えられた。

次に、②の長期連続観測としては、自動連続的に河川水のDOや濁度、水温、塩分濃度を計測するために、隔膜式カルバニ電極型DO計(Compact-DOW)と光学式濁度計(Compact-CLW, いずれもJFEアドバンテック(株)製)を隅田川・白鬚橋(図中□印)と神田川・一休橋(図中△印)にて設置した。観測期間は、両測器が同時設置されているのは2009/9/18～12/17、2010/6/16～11/18であり(神田川では、測器の故障により2010/8/31～9/21はデータ欠測である)、計測間隔は10分である。

さらに、③の出水時CSO負荷調査としては、神田川のみを対象として、2009年には一休橋にてバケツ採水、2010年には和田見橋(図中◇印)にて自動採水機(6712型ウォーターサンプラー, Teledyne ISCO製)による採水観測を行った。採水サンプルの分析項目は、SS, VSS(揮発性浮遊物質濃度), COD, 窒素・リンを分析した。このうち、SSとVSSは下水道試験法に準じ、CODには過マンガン酸カリウム法、窒素・リンにはオートアナライザー(swwAt, BLTEC(株)製)が使用された。観測を行った出水イベント数は、2009年では1つ(台風0918号)、2010年では6つであり、対象出水イベントの基礎データを表-1に示す。ここ



図一6 2010年隅田川と神田川におけるDOと塩分濃度の空間分布（上から降雨前（9/3）、1日後（9/9）、5日後（9/13）、別の降雨イベント1日後（9/17））

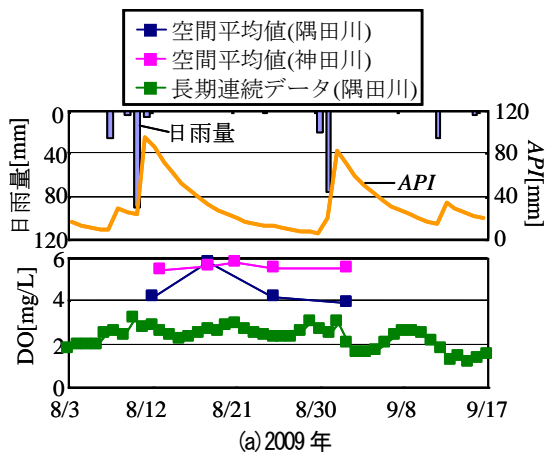
いて、降雨イベントが発生して急激にDOレベルが低下し、それが魚大量死事故に繋がったものと推測される。

(2) 隅田川と神田川におけるDO空間分布

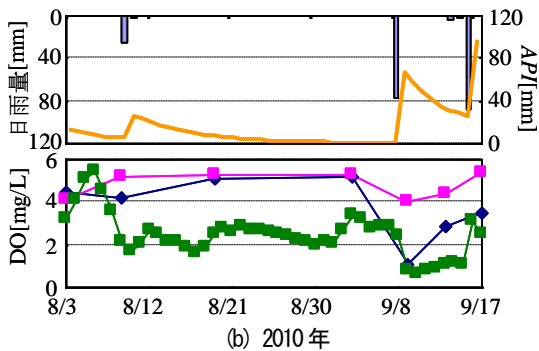
前述したように魚大量死が集中して発生していた隅田川と神田川における夏期のDO・塩分濃度の空間分布を図一6に示す。ここでは、2010/9/8に生じた台風1009号降雨イベントを中心として、降雨イベント前（9/3）、降雨1日後（9/9）、5日後（9/13）、別の降雨イベント発生1日後（9/17）の結果を表示している。まず、降雨前（9/3）では、両河川共に、前報と同様に、海域からの貧酸素水塊遡上が見られ、DO最小値は海水フロントの先端部分に現れている。それに対して、降雨1日後（9/9）では、両河川共にほぼ全域にわたり低塩分、かつ、低DOとなっており、大規模貧酸素水塊が生じている。その後の降雨5日後（9/13）においては、神田川は概ね回復し、降雨前の状況と類似しているものの、隅田川では未だ貧酸素水塊が河口から8kmを中心に残存している。その後、9/16において再び出水が起り、その1日後（9/17）には、DOは9/9のように下がり、両河川共に概ね台風1009号出水前の状況に戻って

いることが分かる。

このように降雨イベントに対するDOの応答が異なる要因を把握するために、2009年と2010年における雨量条件（日雨量とAPI）とDOの時間変化を図一7に示す。ここで、DOデータに関しては、空間分布観測データに基づいて、河川全域の空間平均値（両河川）と長期連続観測結果の24h移動平均値（隅田川・白髭橋）を表示している。これより、2010年における長期連続観測結果のDOは、9/8の前までは2-3mg/Lであり、2009年と同程度であるが、9/8の降雨イベント後にはDOは1mg/Lを下回り、その後、非常に緩やかにDOは増加するものの、7日間も1.5mg/L以下を継続している。定性的な傾向は、空間平均値についても確認できる。9/8の降雨イベント後では、隅田川において魚大量死が発見され、今回のDO低下は大きな影響があった。その後の出水（9/16）ではDOは大きく上昇している。この9/8と9/16の降雨イベントを比べると、総雨量は概ね同程度であるが、APIが9/8のイベントでは0.23mmであり、9/16のAPI（≒32.2mm）と比べて非常に小さい。出水中の河川水のDOは増加することが多いが、無降雨期間が長い（APIが小さい）と流域内に蓄積した有機物を含む堆積物が流出し、それによる酸素消費が河川水のDOを低下させてお



(a) 2009年



(b) 2010年

図-7 日雨量・APIとDOの時間変化 (DOとしては、空間分布観測データによる河川全体空間平均値(両河川)と長期連続観測結果(偶田川のみ)を图示)

り、その様子は先行降雨条件の差により大きく異なる。

(3) CSO負荷とAPIの関係

上記で論じられた出水時におけるCSO負荷を把握するため、流域の大部分に合流式下水道が整備されている神田川和田見橋における出水時の流量、COD、SS、VSSの時間変化を図-8に示す。ここでは2010/10/9の出水イベントを対象としており、流量は和田見橋近くの寿橋におけるH-Q式より与えられる。また、図中のTとD、Pは全成分、溶存態成分、懸濁態成分を示す。これより、D-CODを除く水質項目は流量と共に大きく増加し、水質濃度のピークが流量ピークよりも早い濃度先行型である。

このような水質データに対しL-Q式 ($L=aQ^b$, a, b : 係数) を適用し、採水を行った7つのイベントに関して得られた係数 b とAPIの相関図を図-9に示す。ここではT-CODとSSを表示する。これより、SS・T-CODともに、APIが小さいほど係数 b は非常に大きい。これは、APIが小さい、すなわち無降雨期間が長いと、市街地の路面・屋根面のみならず下水管渠内に様々な堆積物が蓄積する。出水が生じた際には、それらの堆積物が一気に流送されるため、APIが小さいと大きなCSO汚濁負荷が発生する。また、T-CODは、出水時には懸濁態成分 (P-COD) とともに増減するため、SSと類似した係数 b のAPI依存性が見られる。

この係数 b のAPI依存性に基づいて、2010年1年間にわたる年間累積SS fluxを年間累積流量と共に図-10に示す。L-Q

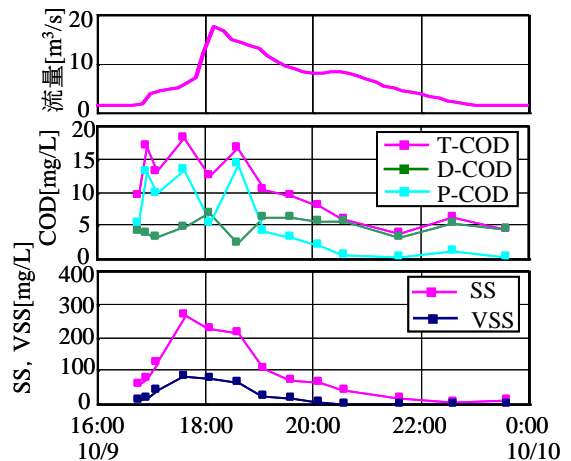


図-8 出水時における流量、COD、SSの時間変化(2010/10/9)

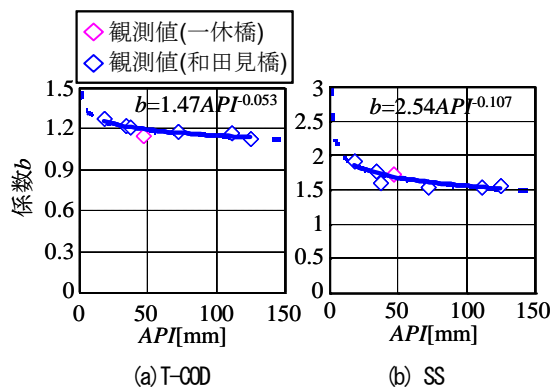


図-9 係数 b とAPIの相関関係(全イベントを対象)

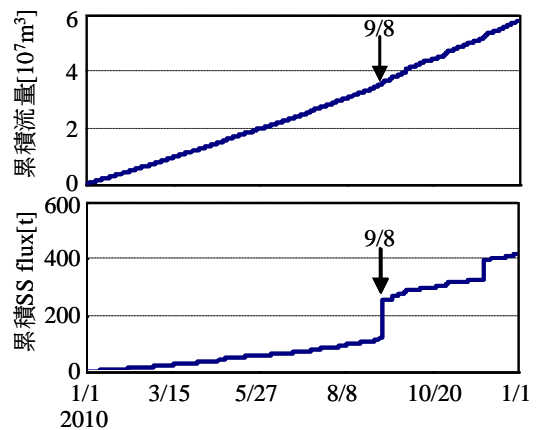


図-10 流量とSSフラックスの累積値の時間変化(神田川・和田見橋)

式中の係数 a に関しては、平常時の公共用水域データとAPIから得られる係数 b より求める。これより、9/8の出水イベントではSS fluxが急上昇し、年間の約30%の負荷量がわずか0.5日間で流出したことが分かる。これより、大規模貧酸素水塊が形成された9/8の出水時には、大量のCSO負荷が感潮域に流入したことが示唆された。

(4) ボックスモデル解析によるDO低下量とAPIの関係性

このような高負荷をもたらされた2010/9/8の出水時を対

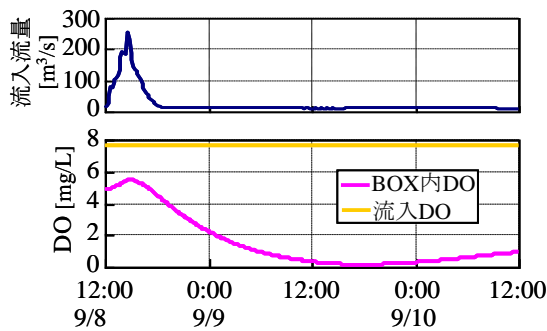


図-11 ボックス内及び流入水のDOの時間変化（実降雨条件下のボックスモデル解析結果）

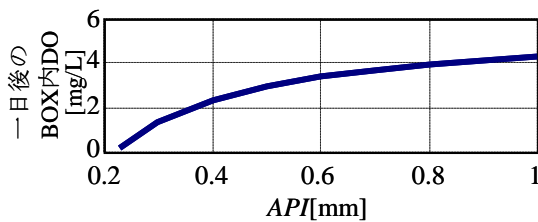


図-12 計算開始一日後のボックス内DOとAPI

象として、ボックスモデルにより得られたDOのシミュレーション結果を図-11に示す。図中では、BOX内DOの計算結果と流入DO及び流量が表示されている。この初期・流入条件として、DOは観測値により設定し、T-CODは初期条件には平常時データ、流入条件には図-9(a)に示す係数 b とAPIの相関式より与える。これより、BOX内のDOは出水直後に急激に減り、翌日9/9の12時過ぎに0mg/L付近まで減少し、その後、緩やかに増加している。このように、陸域からのCSOに起因する過剰な有機物負荷により、感潮域でDOが大量に消費され、結果として、BOX (=感潮域全体)で貧酸素水塊が形成されたことが確認された。

このCSO負荷と大きく関係するAPIを仮想的に変化させ、BOX内のDOとAPIの関係性をまとめたものを図-12に示す。ここでのDOは計算開始1日後の9/9におけるDO最小値を採用する。これより、APIとともにDOは大きくなり、DO2mg/L以下となるAPIは0.35mmである。以上より、先行降雨状況によっては、今回のような大規模貧酸素水塊や魚大量死は発生しなかった可能性は高く、これらは今後の感潮域の環境管理を進める上で有用な指標になる。

4. おわりに

本研究では、前報を受け、CSO負荷を考慮した形で都市河川感潮域の大規模貧酸素水塊発生過程を定量的に明らかにするため、現地調査や資料解析、ボックスモデル解析を行った。得られた主な結論は以下の通りである。

1) DO低下による魚大量斃死事故は平均DOレベルの低い夏期感潮域で多く発生し、かつ、事故4日前までに降雨があった事例は全体の72%であった。このことから都市中小河川感潮域でのDO低下は、降雨に起因する可能性が

高いことが分かる。

2) 空間分布観測により、2010/98の降雨イベント1日後において、隅田川と神田川のほぼ全域にて大規模貧酸素水塊が形成された。98と同等の降雨量であった9/16の降雨イベント後ではDO低下は生じなかった。両イベントでは、先行降雨状況が大きく異なり、これにより降雨に伴う陸域影響に大きな差が生まれた。

3) 出水時水質データより、 $L-Q$ 式の係数 b は先行降雨指標APIが小さいほど大きい、という相関性が得られた。また、2010/98のSS負荷量が年間値の30%という高負荷がわずかに0.5日間で供給されたことが示された。

4) 隅田川、神田川、石神井川感潮域を一つのボックスと見立てたDOシミュレーションを行ったところ、98の出水時における高CSO負荷により、BOX内のDOは0mg/L付近まで低下した。これより、陸域からのCSOに起因する過剰な有機物負荷により、感潮域でDOが大量に消費され、結果として、感潮域全体にわたる貧酸素水塊が形成されたことが定量的に明らかとなった。

謝辞：測定機器設置の際には、文京区や中野区にご協力を頂いた。また、東京理科大学理工学部土木工学科水理研究室学生諸氏、特に真原久美氏（現セントラル科学(株)）には現地観測作業に対して多大なる御助力を頂いた。本研究の一部は、下水道振興基金研究助成金（研究代表者：二瓶泰雄）によるものである。ここに記して深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 1) 高崎忠勝, 杉原大介, 岩屋隆夫: 都内中小河川感潮域の流量変化と水質特性, 都土木技術センター年報, ISSN1882-2657, 2008.
- 2) 東京都環境局: 河川等の水質異常事故発生状況一覧, 1989-2008.
- 3) 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, Vol.53, pp.1453-1458, 2009.
- 4) 武田誠, 松尾直規; 堀川の流れと水質に関する現地調査, 水工学論文集, Vol.51, pp.1135-1140, 2007.
- 5) 入江政安, 寺中恭介, 山口とも, 西田修三: 都市河川河口域の底質特性と貧酸素化への影響-現地調査と底質モデルによる解析-, 土木学会論文集 B2, Vol.B2-65, No.1, pp.1061-1065, 2009.
- 6) 入江政安, 西田修三, 庄路友紀子: 都市域の感潮河川網における水質構造とその潮汐応答性, 水工学論文集, Vol.52, pp.1099-1104, 2008.
- 7) 二瓶泰雄, 山口紘栄, 柏田仁, 岩本演崇: 魚大量斃死時における河川感潮域のDO環境特性, 土木学会論文集 B2, Vol.B2-65, No.1, pp.1021-1025, 2009.
- 8) 和波一夫, 竹内健: 都市排水の環境影響に関する研究(まとめ)-河川水質・底生生物におよぼす下水処理水の影響-, 東京都環境科学研究所年報, pp.38-46, 2008.
- 9) 水村和正: 水圏水文学, 山海堂出版, pp.82-88, 1998.
- 10) 土木学会: 水理公式集 [平成11年版], pp.604-605, 1999. (2011.9.30 受付)