

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25289152

研究課題名(和文)内湾における無酸素水塊規模の将来動向予測と縮小へのシナリオ分析

研究課題名(英文) Prediction of the scale of anoxic water and possible measures for reducing it in eutrophic bays

研究代表者

佐々木 淳 (Sasaki, Jun)

東京大学・新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：50292884

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：内湾環境過程の長期予測を志向した水底質統合モデルを構築し、100年オーダーの積分計算に適用し、無酸素水塊と有機物含有量分布の形成メカニズムについて考察した。東京湾の底質中有機物含有量は総量規制等の施策にもかかわらず上昇していることが指摘されているが、湾奥中央への長期的な集積作用がその一因と示唆され、必ずしも、湾全体の有機汚濁の進行を反映したものではないと理解された。本モデルを用いることで、環境再生に向けたシナリオ分析を行い、無酸素水塊縮減効果の発現に長時間を有すること等を含め、従来の環境モニタリングから示唆される水底質過程と整合する結果が得られた。

研究成果の概要(英文)：A pelagic-bed coupled numerical model for long-term prediction of bay environments was developed and applied to reproduction of 100-year time scale of processes in Tokyo Bay. Using the model, mechanism of formation of anoxic water and organic rich sediment was discussed. It has been pointed out that organic matter content has increased in spite of introduction of the total load control and one of the causes was considered as long-term accumulation mechanisms of organic rich sediment at the central part of the head of the bay, which did not mean overall extension of organic contamination. Numerical experiments on measures for environmental restoration of the bay indicate that their results are consistent with findings in terms of pelagic and bed processes revealed in field works, including the necessity of long-term implementation of restoration efforts for reducing the area of anoxia.

研究分野：環境水工学，海岸工学，沿岸環境学，国際開発学

キーワード：水工学 海岸工学 貧酸素水塊 閉鎖性水域 環境再生 硫化物 有機汚濁 東京湾

### 1. 研究開始当初の背景

東京湾をはじめとする内湾の多くでは底層水の貧酸素問題が深刻であるが、近年の総量規制による負荷削減等にも関わらず、貧酸素水塊の規模には改善の兆しが認められず、実際、2012年9月下旬には東京湾で大規模な青潮が発生し、三番瀬ではアサリのへい死が見られる等の漁業被害が発生している。

このように貧酸素改善は長期的な取り組みを要する困難な課題であることから、最初に取り組みべき目標を、硫化物を含む無酸素水塊の縮減に絞ることは有効と考えられる。その目標を達成するための方策について、効果の発現に要する時間と効果の空間規模を科学的に予測し、環境再生への長期的な道程を提示したいと考え、本研究の着想に至った。

硫化物を含む無酸素水塊の主な発生域は湾奥平場、浚渫窪地、航路であるが、硫化物モニタリングのコストが高いことから、その時空間動態の全体像は未だ不明であり、施策の検討に不可欠な数値予測技術開発も十分でなく、さらに、長期予測に不可欠な底質の堆積形成過程までを含むモデルは十分に確立されていない。

一方、研究代表者らは硫化物計測の効率化に向けた検討や、有機泥の堆積を忠実に再現する数値モデルのプロトタイプを開発し、科学的な長期予測へ向けた準備を進めてきた。2011年福島第一原発事故による放射能汚染は東京湾の底質にも広がっているが、底質形成過程やバイオターベーションの程度の把握にセシウム 137 ( $^{137}\text{Cs}$ ) をトレーサとして活用することで、底質モデルの高度化に有用な新しい情報を取得できる可能性もある。

### 2. 研究の目的

#### (1) 無酸素水塊動態と底質環境の把握

無酸素水塊が発生する、浚渫窪地、航路、平場を対象に、硫化物モニタリングの高度化を達成し、無酸素水塊の時空間動態の詳細把握を行う。また、底質中の有機炭素含有率や放射能に関する分析を行うことで、数値モデルの開発・検証に有用な底質動態に関する定量的な情報を取得する。

#### (2) 水底質環境の長期予測

波浪推算・流動・水質・生態系・多層底質予測モデルを構築し、貧酸素、無酸素水塊に密接に関わる有機泥の長期的な形成過程を再現し、有機汚濁底質や無酸素水塊の形成予測に関する考察を行う。

### 3. 研究の方法

#### (1) 無酸素水塊動態と底質環境の把握

東京湾奥部を対象として、現地調査により無酸素水塊の時空間動態の把握を行った。無酸素水塊の発生域は浚渫窪地、航路、および湾奥中央平場と想定され、これらを網羅的には把握するための測点の設定を行った。浚渫窪地については、規模の大小による影響を比

較するため、大規模な幕張沖と小規模な浦安沖の浚渫窪地を選定した。航路は千葉航路に測点を設けた。湾奥中央平場では、国土技術政策総合研究所による含水比マップ(岡田、古川、2005)を参考に、有機炭素含有率の高い底質域をカバーするように格子状に測点を設けた。

現地調査に際しては、全測点での調査は時間的に困難であるため、千葉県水産総合研究センターの貧酸素予測システムを参考にし、調査直前における無酸素水塊の分布を予想し、その分布域をカバーするように測点を配置した。多項目水質計 AAQ Rinko (JFE アドバンテック社) を用い、水温、塩分、溶存酸素濃度 (DO)、pH、ORP 等を測定した。また、多項目水質計にくくり付けたリゴ-B 号透明採水器 (離合社) を用いて、無酸素水を採水し、硫化物分析に供した。

次に底質環境を把握するため、エクマンバージ採泥器による表層底質の採取と、柱状採泥器を用い、30cm から 50cm 程度の底質コア採取を行った。底質分析は、含水比、粒度分布、全炭素含有率 (TC)、全有機炭素含有率 (TOC)、全窒素含有率 (TN)、およびガンマ線スペクトロメーター GMX29PHP-GE 検出器 (ORTEC 社) と Spectrum Navigator (SEIKO EG&G 社) による放射能 ( $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ) 測定を行った。得られた  $^{210}\text{Pb}$  および  $^{137}\text{Cs}$  の放射能測定結果から、底質堆積年代の推定を行った。 $^{137}\text{Cs}$  は 1954 年のビキニ環礁における水爆実験、1963 年の大気圏核実験、1986 年のチェルノブイリ原発事故、および 2011 年の福島第一原発事故の影響によって、極大値が検出されるものであり、年代特定の参考にした。

#### (2) 水底質環境の長期予測

貧酸素・無酸素水塊の長期的なシナリオ検討には、流入負荷に加え、底質性状の変化が大きな影響を与えるものと考えられる。そこで、本研究では数十年スケールの底質形成過程の再現を志向した、水底質統合モデルを構築した。波浪推算には Achiari and Sasaki (2007) を、流動は Sasaki and Isobe (1999) を、底質輸送は Rasmeemasuang and Sasaki (2009) をベースモデルに改良を加えた。水質・生態系モデルと多層底質モデルは、鯉淵ら (2000 ; 2001) と岡田・古川 (2005) による現地調査結果や本研究における現地調査結果を参考にしながら、実現象に忠実に設計を試みたものである。特に多層底質モデルにおいては、上層の鉛直格子サイズを 1 mm 程度に設定し、各層におけるシルト分と懸濁態有機物の含有率が含水比に与える影響や栄養塩の無機底質粒子表面への吸着・溶脱を考慮した。これにより底質間隙水中の栄養塩濃度等の鉛直分布を再現し、溶出速度を直接的に求められるようにした。本モデルを東京湾における長期再現計算に適用し、既述の現地調査結果との比較による検証を行った。さらに、無酸素水塊の長期予測に適用した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 無酸素水塊動態と底質環境の把握

図1に示すように、東京湾含水比マップ上に設定した測点と観測直前における千葉県水産総合研究センターの貧酸素予測システムの結果を重ね合わせ、平場における調査対象地点の絞り込みを行うことで、無酸素水塊の効率的な把握を行った。

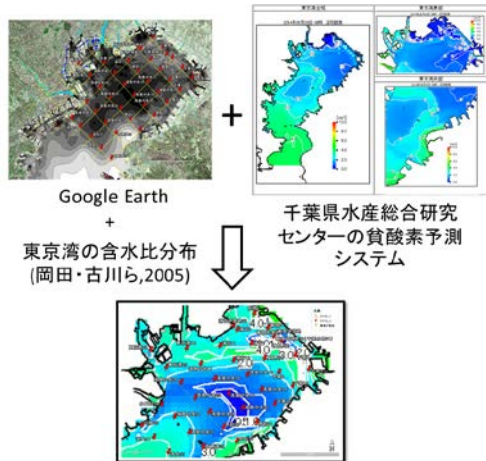


図1 含水比マップ(岡田, 古川, 2005)を参考にした観測点の配置と千葉県水産総合研究センター貧酸素予測システム(石井ら, 2011)を用いた無酸素水塊発生域の絞り込み方法

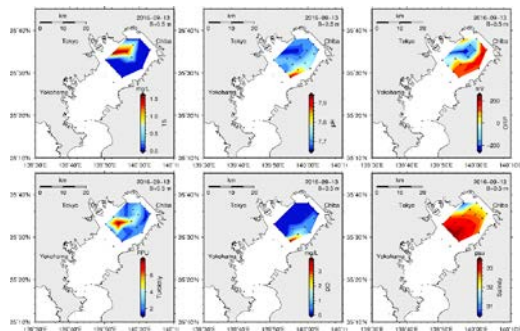


図2 2016年9月13日の平場における全硫化物(TS), pH, 酸化還元電位(ORP), 濁度(Turbidity), 溶存酸素濃度(DO), および塩分(Salinity)の平面分布観測結果

無酸素水塊モニタリングは、2014年は8月8日、8月26日、9月5日、9月18日、2015年は7月24日、8月24日、9月1日、9月16日、2016年は7月26日、8月19日、9月2日、9月13日に実施され、各年4回ずつ、合計12回実施した。この間では2014年8月27日から9月3日に東京湾奥部の広範囲で青潮が発生し、三番瀬では3,880tのアサリがへい死するといった被害が報告されているが、本研究における8月26日の調査時は既に湧昇過程にあり、平場の無酸素水塊は既に解消されていた。そこで平場については最も高濃度の硫化物が観測された2016年度を中心に、浚渫窪地と航路は最も高濃度の硫化物が観測された2015年の結果を紹介する。

図2に2016年9月13日の平場における全

硫化物(TS), pH, 酸化還元電位(ORP), 濁度(Turbidity), 溶存酸素濃度(DO), および塩分(Salinity)の平面分布を示す。また、図3に2015年7月24日、8月24日、9月1日の幕張沖浚渫窪地(Stn. 38)と浦安沖浚渫窪地(Stn. 39)における、溶存酸素濃度(DO), 濁度(Turb), 全硫化物(TS)の鉛直分布を示す。

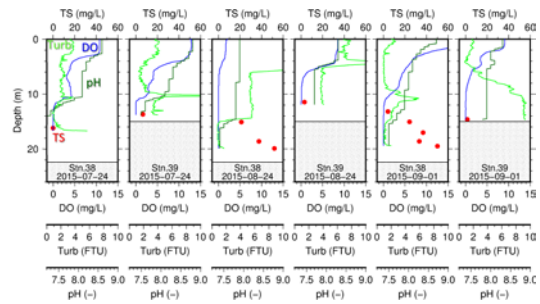


図3 2015年7月24日、8月24日、9月1日の幕張沖浚渫窪地(Stn. 38)と浦安沖浚渫窪地(Stn. 39)における、溶存酸素濃度(DO), 濁度(Turb), 全硫化物(TS)の鉛直分布

2014年度および2015年度の平場底層水中において硫化物が観測された測点は非常に少なく、値も0.1mg/L程度と低かった。既述のように2014年8月27日から比較的規模の大きい青潮が発生しているが、8月26日の観測からは平場における硫化物の発生は捉えられなかった。それ以前が不明であるが、2014年度および2015年度は全般的に平場における硫化物を含む無酸素水塊の発達は弱かったものと推察される。平場観測では2016年9月13日に浦安沖の平場底層において、最大となる1.62mg/Lの硫化物濃度が観測され、その硫化物発生域でpHが低下し、ORPが負値を示す分布が得られた。濁度は硫化物の酸化による単体イオウに起因する上昇がしばしば見られるが、図2にはそのような傾向は見えてとれない。これは同図が底質直上0.5mの分布を示したものであり、海底直上3.5m付近には濁度の極大域の存在が認められた。

浚渫窪地における硫化物は2015年度が最も発達した年であった。全般的傾向として、規模の大きい幕張沖窪地における無酸素水塊の層厚は大きく、硫化物濃度も高い値を示しており、浦安沖窪地の値より1オーダー高い値となっていた。2015年8月24日は青潮発生初期に当たり、7月24日と比較して無酸素(貧酸素)水塊の厚みが増大している様子が見て取れ、この間の無酸素水塊の発達や無酸素水塊の湧昇が捉えられていると考えられる。幕張沖窪地の硫化物濃度は最大で50mg/Lを超える値が記録されているが、これは極めて高い値である。無酸素水塊の上端付近では濁度の極大域が見られるが、これはその付近で溶存酸素への曝露により硫化物が酸化されて単体イオウ粒子となった様子を捉えたものと考えられ、それ以深での硫化物

の存在を示すものである。一方、特に大規模な幕張沖浚渫窪地におけるこの濁度極大域以深では、濁度は減少し全硫化物は増大していく傾向がある。この濁度極大域以深は酸素が全く存在せず、硫化物の酸化によるイオウ粒子の生成がほとんど認められないことによるものと考えられ、このような環境下で高濃度の硫化物が蓄積すると理解できる。これに対し、規模の小さい浦安沖浚渫窪地では底層でも濁度が高い傾向にあり、底層への酸素供給が示唆される。

図4に2014年度および2015年度に実施した、コア採泥に基づく表層底質中の全有機炭素含有率 (TOC) の実測値を示す。同図中の上は浦安沖浚渫窪地、幕張沖浚渫窪地、および平場全測点の平均値を示し、同図下は平面分布を示す。TOCは有機物含有量の指標である強熱減量とよく似た分布形を示しており、既往の知見を整合した結果となっている。含水比や強熱減量の平面分布と同様にTOCも湾奥中央部で高い値を採り、周辺で低い値となっている。また、含水比や強熱減量で見られたように、湾奥中央の中心よりもそのやや周辺部において同心円状に最も高い値を示す海域が分布している様子が見て取れる。浚渫窪地における値に着目すると、幕張沖窪地の方が浦安沖窪地よりも高い値を示している。一方、幕張沖窪地は平場の平均値と同程度の値であり、両者に余り差が無い。この特徴は強熱減量と異なっており、強熱減量は無機態の炭素を含んだ値であることが一つの相違点ではあるが、原因については不明である。また、含水比は幕張沖窪地が平場よりも顕著に高い値を示したが、TOCはあまり差が無かった。含水比はTOCに加え、底質粒径の影響を受けるため、粗い粒径の海域の影響を受けて、平場の含水比が低く現れたものと考えられる。

図5に2014年度および2015年度に実施したコア試料採取に基づく、東京湾奥中央部での強熱減量 (LOI)、全有機炭素 (TOC)、全窒素 (TN)、および C/N 比の鉛直分布実測値を示す。C/N 比を除く項目はほぼ底質中における有機物の含有割合を示すものであり、基本的な分布傾向は類似しており、有機物の堆積年代が新しい上層ほど高い値を示し、下層に行くほど低くなるが、35cm 以深では変動が小さくほぼ一定値に漸近していくように見える。これは数十年スケール以内で分解される、有機物の易分解成分と比較的分解の時間スケールが小さい難分解成分が分解され、分解に要する時間スケールの大きい有機物成分が残った結果であると考えられ、数十年スケールの有機物を含む底質堆積過程を再現するモデルのチューニングや再現性の検証に有用な結果であると考えられる。深度 20cm 付近に若干の不連続があるが、複数のサンプルに共通するものであり、底質への有機物供給が大きかった年代を示唆するものであり、興味深い。C/N 比は基本的な構造は、深度 30

cm 付近までは上層から下層に向かって値が大きくなるが、それ以深はどちらかというと低下傾向があり、ばらつきも大きくなっている。一方、深度 30 cm 以深の TOC と TN の分布を見るとほぼ一定値に近く安定しており、C/N 比のばらつきは不自然にも感じられる。これは TN の値が TOC に比べ 1 オーダー小さく、同図中における TN の比較的小さい見目の変動でも、TN の絶対値に比べると無視できない割合を占める変動である。従って、TN の誤差が C/N 比に大きく影響を与えることになり、ばらつきが大きくなる原因の一つであると考えられる。

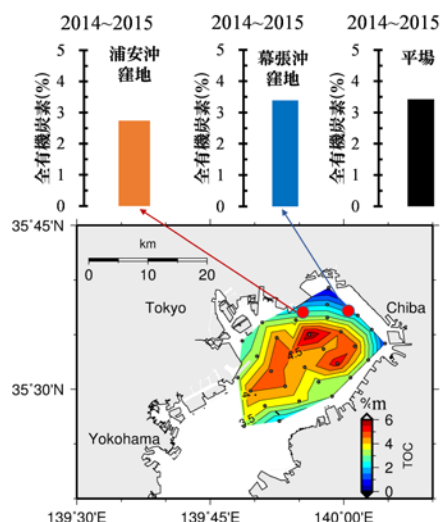


図4 表層底質中の全有機炭素含有率 (TOC) の実測値 (下)、浦安沖浚渫窪地、幕張沖浚渫窪地、および平場全測点での平均値 (上)

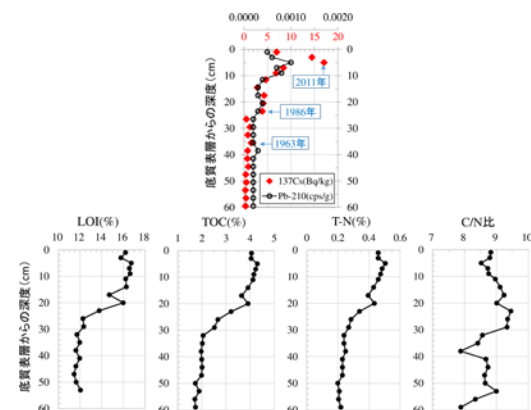


図5 2014年度および2015年度に実施したコア試料採取に基づく、東京湾奥中央部での強熱減量 (LOI)、全有機炭素 (TOC)、全窒素 (TN)、および C/N 比の鉛直分布実測値

## (2) 水底質環境の長期予測

図6に水底質統合数値予測システムの全体像を、図7に水底質素過程を表す模式図を示す。計算は詳細な水質に関する現地調査結果が存在する、1999年4月から2000年3月を対象とし、その間の境界条件を繰り返し用いながら長期計算を実施した。底質の初期条件



は分解性の有機炭素が0の状態から計算を行うことで、有機分に富む底質が形成される過程の再現を試みた。

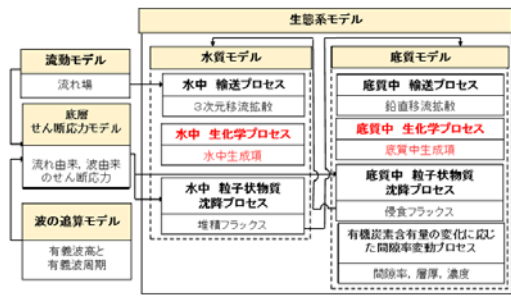


図6 水底質統合数値予測システムの全体像

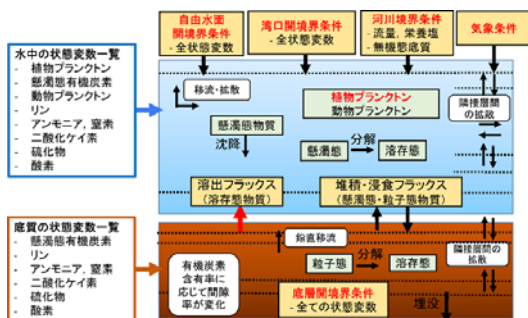


図7 水底質素過程を表す模式図

図8に1999年4月から2000年3月の千葉灯標、京葉シーバース、および東京灯標におけるDO鉛直分布時系列の観測値と計算値の比較を示す。観測結果はいずれの観測点においても、5月から10月にかけて下層で貧酸素化が進行している様子が見られるが、計算においてもその傾向はおおよそ再現しているものと判断される。千葉灯標と京葉シーバースでは、数値計算の方が貧酸素化の程度がやや弱い結果となった。一般に貧酸素化を再現する場合、底質における酸素消費速度のチューニングを行うが、本研究では酸素消費に関わる底質中の有機物含有率を含む、底質形成過程そのものをモデル化して計算しているため、底質における酸素消費速度を直接的にチューニングすることは基本的にできない。この点で、水柱の現象だけに焦点を当てる場合は、通常の水質生態系モデルの方が再現性の向上に関わる選択肢が多く、本研究のように底質そのものの再現を含めた上で、水柱における水質の再現性を高めるのは困難が伴う。

図9に表層底質中の全有機炭素含有率(TOC)の観測値(岡田・古川, 2005)と計算値の比較を示す。湾奥では、観測値は湾奥中央部で高く、周辺に向かって低くなる様子と、羽田から横浜沖にかけて高い値を持つ領域が南西に伸びている様子が見られる。数値計算結果はこの観測から得られた特徴的な分布形と概ね整合した結果になっていると考える。また、観測値は存在しないが、荒川および江戸川河口付近の計算値は低い値と

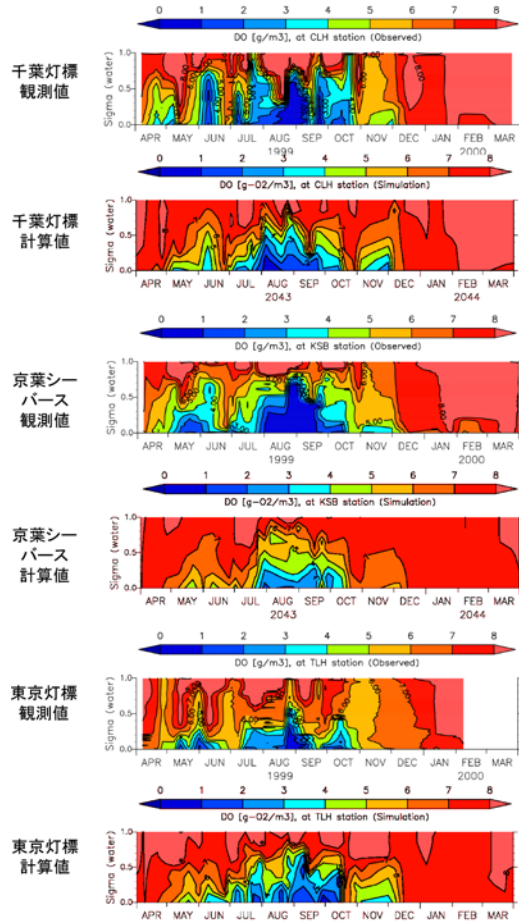


図8 1999年4月から2000年3月の千葉灯標、京葉シーバース、東京灯標におけるDO鉛直分布時系列の観測値と計算値の比較

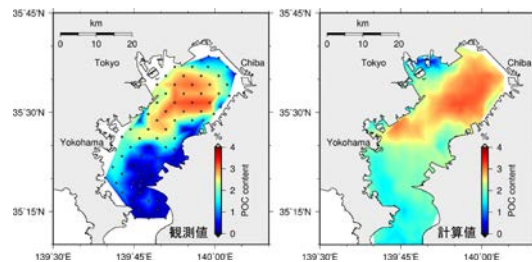


図9 表層底質中の全有機炭素含有率(TOC)の観測値(左)(岡田, 古川, 2005)と計算値(右)の比較

なっている。これは出水に起因する無機態の底質の供給速度が大きく、また流れに起因するせん断応力が大きく、有機物が蓄積されにくいことを反映したものと考えられ、定性的に物理現象から推察される分布と整合しているものと考えられる。一方、全炭素含有率の値については、計算値の最大値は観測値の最大値とおおよそ整合しているが、計算値の方が全般的にはやや高めになっている。本計算では1999年から2000年の境界条件を繰り返し用いて長期計算を行ったものであり、実際とはこの点で大きく異なる点がある。また、全有機炭素含有率は底面せん断応力に

起因する再懸濁と再堆積による移動の影響を受け、波および流れによる底面せん断応力の評価や再懸濁の条件に強く依存する。

無酸素水塊の長期予測には底質過程が影響し、その影響発現には時間を要する結果が得られた。環境再生施策の効果について、底質への影響と底質が水質へ与える影響を長期的スケールで予測するシステムの開発に繋がったものと考えられる。

#### <引用文献>

- ① 石井光廣・古川恵太・佐々木 淳・柿野純・増田修一・小森明裕・桃井幹夫・麻生晃也：東京湾底層 DO 分布の短期予測システムの水産分野への活用に向けた実証的研究。土木学会論文集 B2 (海岸工学), 67(2), 1236-1240, 2011.
- ② 岡田知也, 古川恵太：東京湾沿岸域における音響装置を用いた詳細な底質分布図の作成とベントス生息場, 海岸工学論文集, 第 52 巻, 1431-1435, 2005.
- ③ 鯉淵幸生・小倉久子・安藤晴夫・五明美智男・佐々木 淳・磯部雅彦：東京湾湾奥部における栄養塩の周年変動に関する現地観測, 海岸工学論文集, 47, 1066-1070, 2000.
- ④ 鯉淵幸生・五明美智男・佐々木 淳・磯部雅彦：現地観測に基づく春季の東京湾における赤潮発生機構, 海岸工学論文集, 47, 1071-1075, 2000.
- ⑤ Achiari, H. and Sasaki, J. : Numerical Analysis of Wind-Wave Climate Change and Spatial Distribution of Bottom Sediment Properties in Sanbanze Shallows of Tokyo Bay, J. Coastal Res., SI50, 343-347, 2007.
- ⑥ Rasmeemasuang, T. and Sasaki, J. : Modeling of mud accumulation and bed characteristics in Tokyo Bay, Coastal Eng. J., 50(3), 277-308, 2008.
- ⑦ Sasaki, J. and Isobe, M. : Development of a long-term predictive model of water quality in Tokyo Bay, Estuarine and Coastal Modeling, ASCE, 6, 564-580, 1999.

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 11 件)

- ① 佐々木淳：内湾における環境再生の課題－官民連携による生き物生息場づくりの取り組み, 都市計画, 査読無, 66(1), 30-33, 2017. (依頼論文)
- ② 呉海鍾, 佐々木淳, 佐野弘明：東京湾奥部における柱状採泥に基づく有機汚濁底質の時空間堆積特性, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 査読有, 72(2), I\_1291-I\_1296, 2016.  
DOI:10.2208/kaigan.72.I\_1291
- ③ Amunugama, A. A. W. R. R. M. K., Sasaki, J., Nakamura, Y. and Suzuki, T. :

Spatial distribution of sediment quality in Tokyo Bay through benthic-pelagic coupled modeling approach, J. JSCE B2 (Coastal Eng.), 査読有, Vol. 71 (2), I\_1399-I\_1404, 2015.

DOI:10.2208/kaigan.71.I\_1399

- ④ Amunugama, A. A. W. R. R. M. K., Sasaki, J., Nakamura, Y. and Suzuki, T. : Development of a benthic-pelagic coupled model for reproducing water quality in Tokyo Bay, J. JSCE B3 (Ocean Eng.), 査読有, 71(2), I\_886-I\_891, 2015.  
DOI:10.2208/jscejoe.71.I\_886
- ⑤ 佐藤文也, 佐々木淳, 佐野弘明, 呉海鍾：東京湾奥部における硫化物を含む無酸素水塊の変動特性と数値再現, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 査読有, 71(2), I\_1267-I\_1272, 2015.  
DOI:10.2208/kaigan.71.I\_1267
- ⑥ Chen, C., Lai, Z., Beardsley, R. C., Sasaki, J., Lin, J., Lin, H., Ji, R. and Sun, Y. : The March 11, 2011 Tōhoku M9.0 Earthquake-induced tsunami and coastal inundation along the Japanese coast: A model assessment, Prog. Oceanogr., 査読有, 123, 84-104, 2014.  
DOI:10.1016/j.pocean.2014.01.002

〔学会発表〕(計 10 件)

- ① Sasaki, J. : Strategies and policies towards environmental and fisheries restoration in Tokyo Bay, 12th Int. Conf. Coasts, Ports and Marine Structures, Tehran (Iran), 2016 年 10 月 31 日. (基調講演)
- ② 佐々木淳, 呉海鍾：東京湾奥部における無酸素水塊規模の推定に関する検討, 第 29 回日本沿岸域学会研究討論会講演集, 高知工科大学 (高知県・高知市), 2016 年 7 月 17 日.

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

佐々木 淳 (SASAKI, Jun)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：50292884

##### (2) 研究分担者

鈴木 崇之 (SUZUKI, Takayuki)

横浜国立大学・大学院都市イノベーション研究院・准教授

研究者番号：90397084

##### (3) 研究協力者

呉 海鍾 (O, Hechon)

Amunugama, A. A. W. R. R. M. K.