

令和 2 年 6 月 1 日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H05626

研究課題名(和文) ジャカルタ湾のGiant Sea Wall建設が海洋環境に与える影響について

研究課題名(英文) Study on the environmental influence of the construction of the Giant Sea Wall in Jakarta Bay

研究代表者

速水 祐一 (Hayami, Yuichi)

佐賀大学・農学部・准教授

研究者番号：00335887

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,880,000円

研究成果の概要(和文)：ジャカルタ湾では湾奥東部を中心にほぼ年間を通して貧酸素水塊が形成されていた。貧酸素化の解消は湾外水の進入にともなって生じていた。湾奥の底層水および底泥の酸素消費速度は大きく、東京湾や広島湾に匹敵した。赤道域にあるジャカルタ湾では年間を通して表面冷却による継続的な鉛直混合が起きず、湾奥部では流入する河川水による成層が維持される。そのような場に高濃度の栄養塩を含む陸域の未処理な都市廃水が大量に流入することによって経常的な貧酸素化が起きているものと考えられる。湾奥南東部ではマクロベントス量が非常に少なく、経常的な貧酸素化によってベントスの生育が阻害されていると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ジャカルタ湾ではしばしば魚類の大量斃死が起きており、貧酸素水塊の影響ではないかと指摘されてきたが、これまで観測データが少なく、検証されていなかった。本研究の結果、ジャカルタ湾ではほぼ年間を通して貧酸素水塊が形成されていることが初めて分かった。また、赤道域ではこのような継続的な貧酸素水塊が形成されやすいことを世界で初めて指摘した。今後、ジャカルタ湾の開発を進めるにあたってはこのような貧酸素化の状況を考慮することが重要である。本研究の結果は、今後のジャカルタ湾の適切な環境管理、環境再生を進めるための基盤的な材料を提供するものである。また、本研究はインドネシア研究者の研究技術向上にも寄与している。

研究成果の概要(英文)：A hypoxic water mass was formed in the Jakarta Bay almost throughout a year mainly in the south eastern area. The recovery of hypoxia was generated by the cold intrusion from out of the bay mouth. The oxygen demand of bottom water and bottom sediment was high which was equivalent to the Tokyo Bay and Hiroshima Bay. As the Jakarta Bay was located in the equatorial area, no continuous vertical convection occurred in a year. Therefore, the density stratification generated by the river water continued throughout a year. The persistent hypoxic water mass was generated since a lot of sewage water containing high concentration of nutrients flowing into this system. The macrobenthos abundance in the southeastern area was very low. It suggested that the persistent formation of hypoxic water mass inhibited the survival of benthos.

研究分野：沿岸海洋学

キーワード：海洋環境 大規模開発 貧酸素水塊 ジャカルタ湾 インドネシア 環境影響評価

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

インドネシアのジャカルタ湾はジャワ島西部北岸に位置する幅約 30km、奥行き約 16km の開放性の湾で、南緯 6 度と赤道近くに位置する(図 1)。この湾では 2014 年 10 月に沿岸防災を目的とした大規模な複式干拓事業(Giant Sea Wall プロジェクト)が開始された。同様の複式干拓は日本では有明海の諫早湾で実施され、大きな環境問題・社会問題を引き起こした。しかし、ジャカルタ湾ではこれまでの海洋環境情報が少ないため、大規模干拓の海洋環境への影響の予測、さらには干拓を実施した後にその影響の検証をすることが困難な状態にある。

2. 研究の目的

そこで本研究では、佐賀大学・愛媛大学・静岡大学・インドネシア科学技術応用庁(BPPT)が共同で、ジャカルタ湾の海況・水質調査を行い、同湾の海洋構造と水質・底質・底生動物の分布、水質変動機構を明らかにする。水質としては底層の溶存酸素に特に注目する。さらに、その結果をもとに、大規模干拓による海洋環境への影響を評価する。

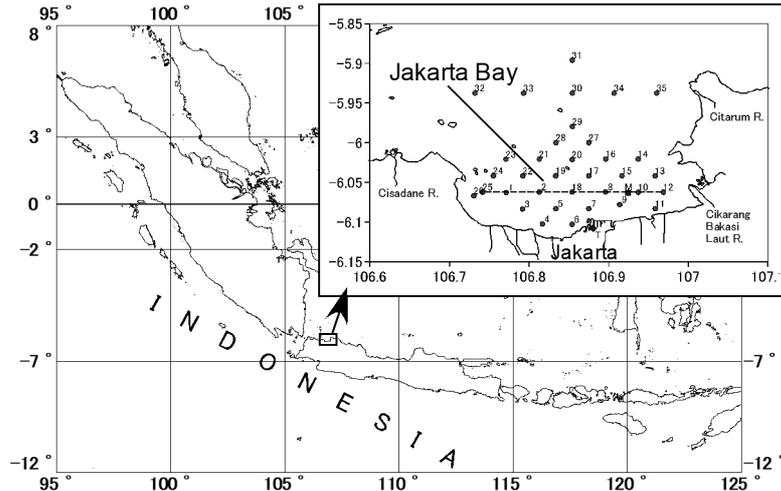


図 1 ジャカルタ湾の地図と測点位置

3. 研究の方法

ジャカルタ湾の広域的な水質分布調査を、2016 年 5 月から 2019 年 9 月までの間に年 2 ~ 4 回の頻度で実施した。測点は 2018 年 3 月までは湾全域をカバーするように約 30 点設置した(図 1)。2018 年 5 月以降は、ジャカルタ湾の北東に流入している湾に流入する最大の河川であるチタラム川の影響に注目し、湾中央部から北東部にかけて測点を配置した。観測では多項目水質計(JFE アドバンテック RINKO Profiler)によって水温・塩分・濁度・クロロフィル蛍光・溶存酸素濃度の鉛直分布を測定した。また、2017 年 6 月~2019 年 9 月の観測では採水を行い、クロロフィル a、栄養塩の濃度を測定した。2017 年 9 月~2018 年 5 月の 4 回の観測では、複数の点で底層水を採取し、FireSting O2 光学式酸素モニターを用いて溶存酸素濃度を暗条件で連続測定することによって酸素消費速度を求めた。2019 年 9 月には複数の点で底泥コアを採取し、あらかじめ曝気した直上水中の溶存酸素濃度を暗条件で連続測定することによって底泥による酸素消費速度を求めた。2017 年 6 月と 2018 年 9 月には底質とマクロベントスの分布調査を行った。2017 年 6 月は湾内の 11 測点で、2018 年 9 月は湾内と湾外の比較をするためにジャカルタ湾外(湾よりも西側沿岸)の 5 点を含む 10 測点で調査を実施した。調査ではグラブ採泥器によって底泥を採取し、目合い 1mm のフルイでふるってマクロベントスを採取すると共に、表層底泥の ORP を現地測定、表層底泥を実験室に持ち帰り、含泥率、TOC と TN の分析を行った。2017 年の 6 月 3 日から 9 月 6 日にかけて、図 1 の測点 M に係留系を設置し、水温・塩分・溶存酸素濃度・流向流速の連続観測を行った。

ジャカルタ湾の水温・塩分・流動場を再現するために Princeton Ocean Model (POM) を用いた 3 次元数値シミュレーションモデルを構築した。モデルには潮汐、海面熱フラックス、風、主要 11 河川からの河川流量を外力として加え、潮流・吹送流・密度流を表現できるものとした。モデルのメッシュサイズは緯度・経度方向が 1/400° で、鉛直方向は 11 層のレイヤーとした。このモデルを用いて 2015 年 6 月 1 日から 2016 年 12 月 31 日まで 1 年半の計算を行った。

4. 研究成果

本科研費で実施した全 13 回の水質分布調査のうち 11 回で、底層に貧酸素水塊(溶存酸素濃度 3mg/L)が観測された。貧酸素水塊が認められなかったのは、2017 年 9 月と 2019 年 9 月の 2 回であった。これは、ジャカルタ湾ではほぼ年間を通して貧酸素水塊が発生していることを示す。黒海のように非常に閉鎖性が強い水域を除くと、これまで世界で報告されている沿岸海域の貧酸素水塊は季節的に形成されるものである。今回の結果は、沿岸海域において世界で初めてほぼ経常的に発生する貧酸素水塊を発見したことになる。貧酸素水塊の規模・場所は調査によって異なったが、湾奥南東部に発生することが多かった。例として 2016 年 9 月 20 日の観測結果を示す(図 2)。表層と底層の水温・塩分、表層のクロロフィル a 濃度、底層の溶存酸素濃度である。クロロフィル a 濃度については、採水して得られたクロロフィル a 濃度と多項目水質計のクロロフィル蛍光の関係から得られた以下の式によって、多項目水質計のクロロフィル蛍光値を変換した値を示した。表層水温は沿岸海域で高く、特に南西域が高かった。底層水温は全域で 30.4

$$\text{Chlorophyll } a = 1.57 \times \text{Fluorescence}$$

とほぼ同様であった。表層塩分は湾中央部から南東部にかけて低かった。底層塩分は全域で 32.4 と、湾南西沿岸部以外はほぼ同様であった。クロロフィル a 濃度は湾南東部で高く、最大値は 30 $\mu\text{g/L}$ を超えた。底層では 3mg/L 以下の貧酸素水塊が岸沿いに広がっていた。溶存酸素濃度の極小域は南東部と南西部の 2 カ所に認められたが、南東部の貧酸素水塊の方がより顕著であった。このような湾奥東部表層が低塩分化して成層が強化され、その下に貧酸素水塊が形成されるのはジャカルタ湾の貧酸素水塊の典型的なパターンである。

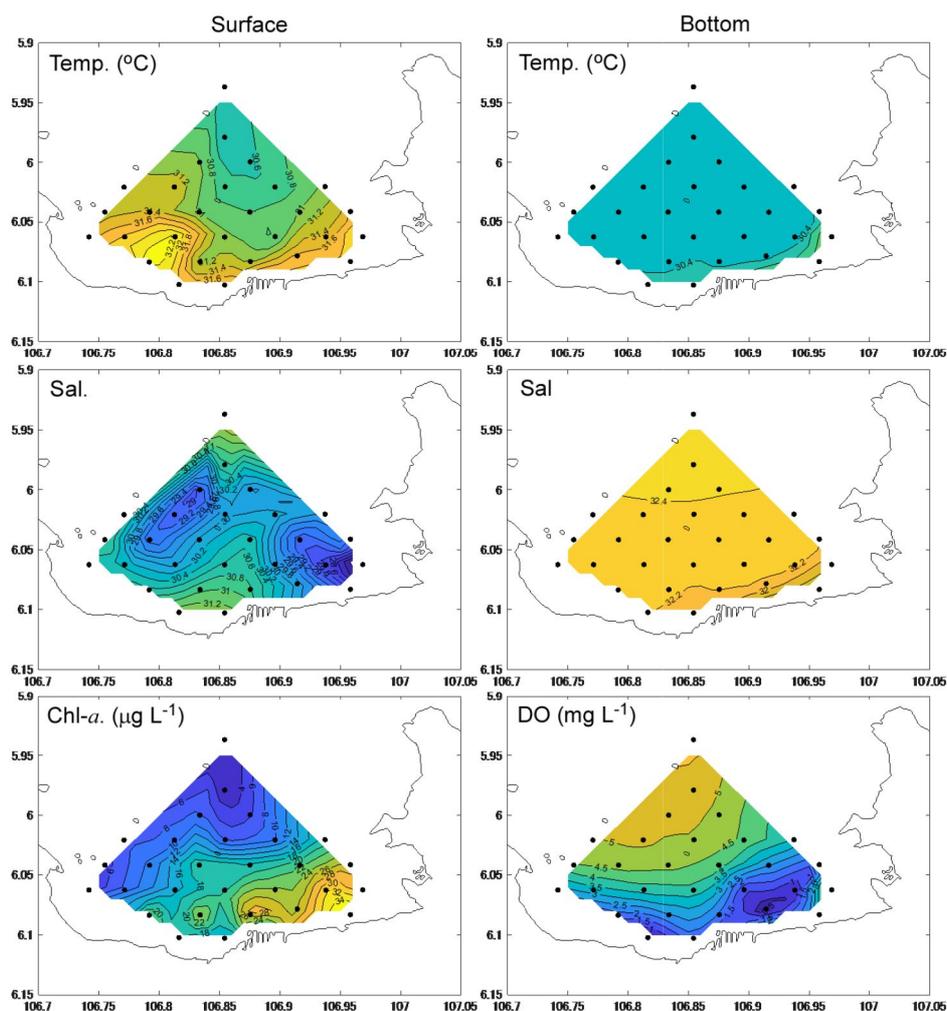


図 2 2016 年 9 月 20 日の表底層の水温・塩分、表層のクロロフィル a 濃度、底層の溶存酸素濃度分布

底層溶存酸素濃度の変動要因を調べるために、最低溶存酸素濃度と、その時の最低溶存酸素濃度水と表層 (0.5m) の水温・塩分、最低溶存酸素が観測された点の成層強度を図 3 に示す。成層強度は以下の式で表される有効位置エネルギーで表した。なお、2018 年 5 月以降は測点配置

$$\Phi = \frac{1}{h} \int_{-h}^0 gz(\rho_{ave} - \rho) dz,$$

が大きく変わったため、ここではそれ以前の観測結果だけを示す。また、本科研費による調査以前の 2015 年 12 月、2016 年 2 月の結果も合わせて示す。溶存酸素濃度の最低値は 2015 年 12 月から 2016 年 11 月まで 1.1mg/L 以下であった。2017 年 2 月以降、この値は増加し、2017 年 9 月には 3mg/L を超えた。その後、2018 年 3 月に再び低下した。塩分には、2-3 月の雨季の後期に低下する傾向があったが、水温には季節変動は認められなかった。成層強度は 2015 年 12 月から 2017 年 2 月にかけては高かったが、2017 年 6 月から 2017 年 12 月にかけて低くなり、その後再び上昇した。最低溶存酸素濃度と成層強度の間には、有意な負の相関があり (P <= 0.05, Spearman's rank correlation) 成層が強いと溶存酸素濃度は低くなっていた。

係留系の観測データでは、2017年の6月3日から9月6日までの間に二度にわたって0.5以上の突発的な底層水温低下が生じていた。このような水温低下にともなって底層水の溶存酸素濃度が上昇していた。また、このようなイベントが発生した時には南東向きの残差流が発生していた。北西風が吹くのにともなってこうした流れが生じていたことから、こうした流れは沿岸湧昇による湾港外の沖合水の湾内への進入によって生じたと考えられた。このことは、広域水質分布調査で観測された2017年9月の貧酸素化の回復は、風が引き起こした沖合水の底層への進入によって引き起こされたことを示唆している。

底層水の酸素消費速度は0.06~1.50mg/L/dayで、湾奥部で高い傾向にあった。湾奥部の平均酸素消費速度は0.36~0.95mg/L/dayで、日本国内の内湾で最も酸素消費速度が大きい東京湾(柳, 2004)に匹敵する値であった。底泥による酸素消費速度は0.13~0.89g/m²/dayで、5点の平均値は0.61g/m²/dayであった。この値は毎年夏季に深刻な貧酸素水塊が発生する英虞湾や広島湾(丸茂恵右・横田瑞郎, 2012)に匹敵する値であった。

2017年6月に実施した底質・マクロベントス調査では、湾南東部では全くマクロベントスが採集されなかった。この海域では底泥のORPは負の値で底質が還元であることを示していた。それ以外の測点でも、マクロベントスの個体数は5~8個体/0.05m²で種数は6種以下と少なかった。このような貧弱なベントス相がジャカルタ湾内の環境悪化で生じたものか、それとももともとこのあたりの泥底海域ではマクロベントス相が貧弱なのか、調べるために、2018年9月にはジャカルタ湾内から湾外にかけて底質・マクロベントス調査を行った。その結果、この時には前回の調査ではマクロベントスが採集されなかった湾南東部でも3~29個体/0.05m²のベントスが採集された。しかし、貧酸素がもっとも著しい測点10では3個体/0.05m²と少なかった。測点10を除くと、底質のORPは2018年の調査よりも高かった。この調査時には、2017年の調査時に比べて貧酸素水塊の規模が小さく、底質・マクロベントス調査で貧酸素水塊が認められたのは測点10のみであった。ジャカルタ湾外と湾内を比較すると、マクロベントスの個体数・種数共に統計的には有意ではないものの湾外の方が湾内よりも多くなっていた。これらの結果は、おそらく人為的な環境悪化の結果、ジャカルタ湾内ではベントス相が貧弱になっていること、特に湾南東部では貧酸素水塊の影響を受けてベントスが少なくなっていることが示唆された。なお、2018年の調査ではユムシの一種である*Listriolobus brevirostris*が多く採取されたが、これはインドネシアでの初めての記録である(Nishikawa et al., 2019)。これはバラスト水の輸送にともなった人為的移入種であると考えられる。

数値シミュレーションによる計算結果を検証するために、計算対象期間中に実施した広域水質調査の結果と比較した(図4)。計算の結果では、湾北東岸に流入するチタラム川からの淡水流入がジャカルタ湾の塩分分布に大きな影響を与えているという結果になった。しかし、実測された塩分分布ではチタラム川起源の低塩分水の湾内への流入は限定的であり、計算された塩分分布とかなり異なっていた。この結果から、計算に用いた河川流量データに問題があると考えられ、現在対応策を検討中である。

本研究により、ジャカルタ湾ではほぼ年間を通して貧酸素水塊が形成されていることが明らか

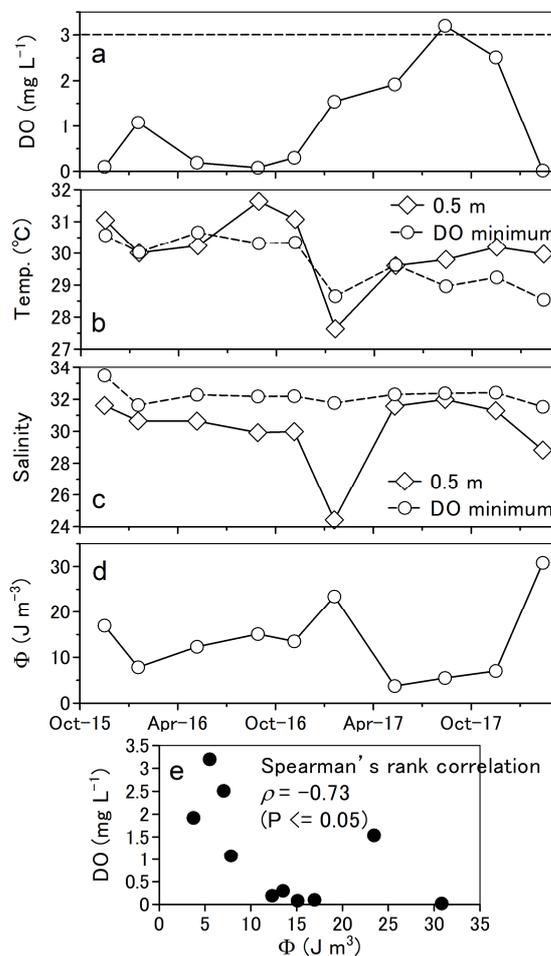


図3 最低溶存酸素濃度 (a)、水温 (b)、塩分 (c) 成層強度 (d)の変動と、最低溶存酸素濃度と成層強度の関係 (e)

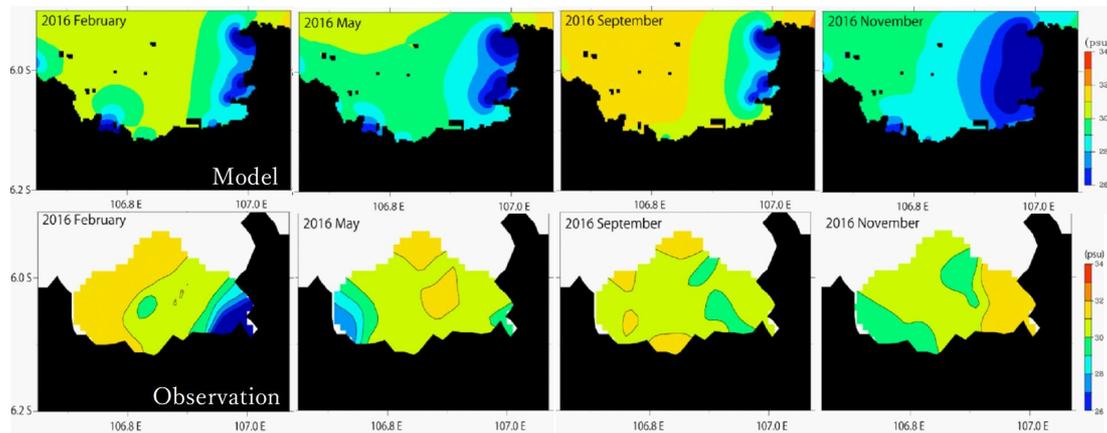


図4 表層塩分分布に関する計算結果(上)と実測結果(下)の比較

かになった。その原因として以下の3つが考えられる。1)ジャカルタ湾は潮汐が小さく(潮差は1m以下)潮汐混合が弱い一方で、湾奥に河川が流入していることで密度成層しやすい。2)ジャカルタ湾は赤道域に位置しているため、年間を通して海面熱フラックスが正であり、海面冷却による連続的な対流が起きにくい。そのために成層が維持されやすい。3)ジャカルタ湾奥部の酸素消費速度は非常に大きい。これは、湾奥部では沿岸陸域から高濃度の栄養塩を含む未処理の都市排水が大量に流入し、植物プランクトンによる有機物生産が活発なためと考えられる。このことは、一般的に淡水流入の影響を受ける赤道域の沿岸海域では、人間活動の活発化によって陸域からの栄養塩負荷量が増加すると、年間を通して貧酸素化することで沿岸生態系に対して温帯域以上に深刻な影響が生じることを示唆する。

ジャカルタ湾では現状でもほぼ経常的な貧酸素水塊が形成され、ベントス相の悪化が顕著であり、人間活動による著しい海洋環境の悪化が起きている。このような場で大規模な干拓事業が実施され、湾奥部の鉛直混合が減衰する、あるいは海水交換の悪い海域が作られると、さらなる海洋環境の悪化が起きると推察される。

文献

- 1) Teruaki Nishikawa, Shin'ichi Sato, Yuichi Hayami, Suhendar I Sachoemar and Agus Sudaryanto (2019) Occurrence of the Indo-West Pacific echiuran *Listriolobus brevisrostris* (Annelida: Echiura) in Jakarta Bay, Indonesia, likely due to human-mediated introduction. *Biogeography*, 21: 48-50.
- 2) 柳哲雄(2004)貧酸素水塊の生成・維持・変動・消滅機構と化学・生物的影響. *海の研究*, 13(5): 451-460.
- 3) 丸茂恵右・横田瑞郎(2012)貧酸素水塊の形成および貧酸素の生物影響に関する文献調査. *海生研研報*, 15: 1 - 21.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Teruaki Nishikawa, Shin'ichi Sato, Yuichi Hayami, Suhendar I. Sachoemar and Agus Sudaryanto	4. 巻 21
2. 論文標題 Occurrence of the Indo-West Pacific echiuran <i>Listriolobus brevirostris</i> (Annelida: Echiura) in Jakarta Bay, Indonesia, likely due to human-mediated introduction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Biogeography	6. 最初と最後の頁 48-50
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Yuichi Hayami, Akihiko Morimoto, Agus Sudaryanto, Suhendar I. Sachoemar, Endro Soeyanto, Alfi Rusdiansyah, Mochamad Saleh and Shinichi Sato
2. 発表標題 The Dead zone in Jakarta Bay
3. 学会等名 EMECS 12 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 速水祐一・森本昭彦・Agus Sudaryanto・Suhendar Sachoemar・Endro Soeyanto・Mochamad Saleh・織田将太
2. 発表標題 インドネシア・ジャカルタ湾における貧酸素水塊
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yuichi Hayami, Akihiko Morimoto, Agus Sudaryanto, Suhendar I. Sachoemar, Endro Soeyanto, Mochamad Saleh, Kenji Yoshino, Shinichi Sato and Shota Oda
2. 発表標題 Observation of the hypoxic water mass in Jakarta Bay
3. 学会等名 Second CCore-RENSEA Seminar on Coastal Ecosystems in Southeast Asia (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Suhendar I SACHOEMAR et al.
2. 発表標題 The environmental study to understand the hypoxia behavior in Jakarta Bay
3. 学会等名 International symposium on coastal ecosystem change in Asia: hypoxia, eutrophication, and nutrient conditions (国際学会) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Endro SOEYANTO et al.
2. 発表標題 Behavior and residence time of river waters in Jakarta Bay
3. 学会等名 International symposium on coastal ecosystem change in Asia: hypoxia, eutrophication, and nutrient conditions (国際学会) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	佐藤 慎一 (Sato Shinichi) (70332525)	静岡大学・理学部・教授 (13801)	
研究分担者	森本 昭彦 (Morimoto Akihiko) (80301323)	愛媛大学・沿岸環境科学研究センター・教授 (16301)	
研究分担者	吉野 健児 (Yoshino Kenji) (40380290)	佐賀大学・低平地沿岸海域研究センター・特任助教 (17201)	~2017年度

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	濱田 孝治 (Hamada Takaharu) (30294979)	佐賀大学・低平地沿岸海域研究センター・准教授 (17201)	~2016年度