東京湾のクラゲのシミュレーション における水質の影響に関する数値実験

NUMERICAL EXPERIMENT OF WATER QUANTITY EFFECT ON A JELLYFISH SIMULATION IN TOKYO BAY

仲敷憲和¹・坪野考樹²・野方靖行³・遠藤紀之⁴・石井晴人⁵

Norikazu NAKASHIKI, Takaki TSUBONO,
Yasuyuki NOGATA, Noriyuki ENDO and Haruto ISHII

- ¹ フェロー 工博 研究参事 電力中央研究所 水域環境領域 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)
² 正会員 工博 主任研究員 電力中央研究所 水域環境領域 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)
³ 非会員 農博 主任研究員 電力中央研究所 生物環境領域 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)
⁴ 非会員 水産博 特別契約研究員 同上 (現:姫路エコテック) (〒672-8023 兵庫県姫路市白浜町甲841-49)
⁵ 非会員 農博 助教 東京海洋大学 海洋科学部 (〒108-8477 東京都港区港南4-5-7)

Moon jellyfish has many habitat in inner bays and enclosed coastal seas in Japan, which sometimes causes fishery damage and failure of cooling water intake at power plants. It is desired to develop a method to predict an amount of generation and seasonal distribution change of jellyfish, especially in enclosed coastal area. A numerical approach such as a particle tracking method is effective and has been used to a simulation of long-term jellyfish transport. In this study, a particle tracking method is applied in Tokyo Bay to calculate the annual change of jellyfish distribution, in relation with temporal change of water quality such as salinity, DO, etc. An effect of water quality on jellyfish is added as an advection term of particle transport equation in a manner that is proportional to the gradient. Simulated distribution is qualitatively more consistent with existing observed distribution in comparison with the case without water quality effect, which demonstrates the potential of annual simulation of jellyfish distribution in enclosed bay area.

Key Words : *jellyfish, numerical simulation, particle tracking method, water quality, Tokyo bay*

1. はじめに

沿岸域に大量に発生したクラゲは、漁業などの産業に影響を及ぼすだけでなく、臨海発電所では冷却水とともに取水されるため、発電障害を引き起こす場合がある(例えば、上ら¹⁾、滝沢²⁾)。内湾での代表的なクラゲであるミズクラゲは、一般的に、晩春から夏季にかけて成長して、パッチと呼ばれる成体の群れを形成し、特に大都市の沿岸域や閉鎖性海域ではクラゲの大量発生に伴うこれらの被害が懸念されている。内湾では、クラゲのポリプの発生量の調査なども行われているが(例えば、Ishiiら³⁾)、中・長期的なクラゲ成体の発生量や分布の予測に関する研究は少なく、数値シミュレーション等を用いた分布の予測手法の開発が望まれている。

クラゲの中・長期的な移動や分布の計算に関する既存の研究では、粒子追跡手法を用いた検討が試みられている。例えば、外洋での研究事例では、冷泉ら⁴⁾は、海洋モデル(POM: Princeton Ocean Model)により計算された詳細な黄海・東シナ海の流動を用いて、2002年や2003年に日本海に大量に来遊したエチゼンクラゲの挙動を、粒

子トレーサを用いた計算により検討している。この研究では、エチゼンクラゲの遊泳速度は海流に較べて小さいと仮定し、海流による移流と拡散を用いて数ヶ月の移流過程を検討している。ただし、トレーサの鉛直方向への移動は考慮されていない。

内湾に関する研究事例では、青木ら⁵⁾は、三河湾を対象に、海洋モデル(ROMS: Regional Ocean Modeling System)で計算された流動場を用いて、粒子追跡手法によりミズクラゲが幼生から成体になるまでの期間を想定して、30日間のシミュレーションを行っている。粒子の移動には、移流・拡散のほかに日射による日周鉛直運動を考慮することにより、クラゲが餌の豊富な沿岸の湾奥部に留まり集積する可能性を示した。

一方、クラゲの分布、出現時期や出現量に関しては、物理的な要因の他に、化学的な要因として水温や塩分、pHなどの水質の影響が指摘されている(例えば、三宅⁶⁾)。また、Suzukiら⁷⁾は三河湾において観測を行い、ミズクラゲの鉛直分布がDOや塩分の鉛直分布に関連していることを示している。

本研究では、内湾における中・長期的なクラゲの分布をシミュレーションする手法を検討するため、東京湾を

対象に、クラゲが成長し成体となる晩春から夏季にかけて計算を実施し、クラゲの移動と海域の水質の関連について数値実験を行った。従来の研究と同様に、本研究においてもクラゲの計算には粒子追跡手法を用いた。計算では、移流や拡散などの物理過程の他に、塩分などの水質項目に関連した移流速度をトレーサ粒子に与え、移動方向に指向性を持たせることにより、長期的な水質の影響を検討した。

2. 流動、水質モデルの概要と粒子追跡手法

東京湾における物質循環に関しては、これまでに多くの検討が行われ、水質の計算が実施されている（例えば、田中ら⁸⁾、鯉渕ら⁹⁾、松梨ら¹⁰⁾、今村ら¹¹⁾）。本研究の目的は、クラゲの移動に及ぼす水質の影響を検討することであるため、流動・水質の計算には、既存の今村ら¹¹⁾のモデルや計算条件に準じて計算した結果を用いた。平均的な東京湾の流動の再現性は既に確認されており、水質の年間の変化特性は今村ら¹¹⁾の計算結果と同様である。

(1) 東京湾の流動と水質の経時変化

a) 流動モデル

流動の計算には、鉛直方向に静水圧近似を仮定した準3次元モデル（松梨ら¹⁰⁾）を用いた。東京湾奥では、表層の循環流は風の分布に依存し年により変化することが知られているが（例えば、中辻ら¹²⁾）、本検討では、平均的な年の年間の変化を取り扱うため、水温・塩分を同時に計算することで密度効果を考慮した潮汐流の計算を行った。モデルの範囲は東京湾全域（40 km×65 km×水深100 m）を対象としており、計算に用いたメッシュは、水平方向に800 m、鉛直方向には表層から12 mまでを2 m間隔、12～40 mまでを4 m間隔、残り40 m～52 mを1層とし、最大層数15層で計算を行った。タイムステップは $\Delta t = 15$ sとし、境界条件として湾口でM2分潮の潮位振幅を与えると同時に、河川（江戸川、中川・荒川、隅田川、多摩川）等の流入を考慮した（今村ら¹¹⁾）。

b) 水質モデル

水質モデルは、今村ら¹¹⁾のモデルを用いた。モデルは複数の植物プランクトン類の消長を考慮したもので、1) 動植物プランクトンの消長（炭素量に換算）、2) 非生物体の有機体窒素・リン、3) 無機体の窒素・リン、4) 珪酸、5) COD、6) DO、を計算する。モデルやパラメータの詳細、流入負荷量については、今村ら¹¹⁾を参照されたい。

図-1に、本研究において粒子追跡計算に用いた東京湾の流動および水質の経時変化を示す。図は、一般にクラゲの成体が増殖する晩春から夏季にかけての表層（水深-3 m）での月平均値の変化（5月、7月、9月）である。残差流については、表層では河川流の影響が大きいので、水深-5 mの値を示している。また、東京湾奥部（図-2、

図-1 東京湾の流動と水質の経時変化

St.8(飯村¹³⁾), および F2(今村ら¹⁴⁾) における, 1997年のDOとChl-aの経時変化を示す. 計算された夏季のDOは, 観測値に比べ若干低い傾向にあるが, DOとChl-aの年間の変化傾向の特性は概ね示されている.

(2) 粒子追跡手法

本研究では, クラゲの移動を計算するため粒子追跡手法を用いた. 粒子には, 海域の移流・拡散による移動の他に, クラゲの行動特性をトレーサ粒子の水平・鉛直方向の移流項として考慮することにより, 水質などの各要因に対する指向性を与えた. 各要因に対するクラゲの挙動については研究事例が少なく不明な点が多いが, 本研究では移動速度は各要因に対する水平・鉛直方向の勾配に比例するものと仮定した.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \left[\left(U_i + \sum_n u_{n,i} \right) \frac{\partial C}{\partial x_i} \right] = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_i \frac{\partial C}{\partial x_i} \right),$$

$$u_{n,i} = \alpha_{n,i} \cdot \frac{\partial \phi_n}{\partial x_i} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (1)$$

ここに, C : 単位体積あたりのクラゲ密度(-/m³), U_i , K_i : 各方向の海域の流速(cm/s)と拡散係数(cm²/s), n : 各水質項目を示すインデックス, $u_{n,i}$: クラゲ粒子の移動速度(cm/s), ϕ_n : 行動特性を規定する要因(水温(°C), 塩分(-), DO(mg/L), プランクトン(C換算: g/m³) など), $\alpha_{n,i}$: 各水質に対する係数である.

また, 角湯ら¹⁵⁾は粒子追跡手法を用いて発電所取水により取り込まれる卵稚仔のシミュレーションを実施している. 本研究においても, 式(1)の右辺の拡散項の計算には同様の手法を用いた. 海域の乱れが1次マルコフ過程に従うとすると, $(i+1)$ ステップの乱れは, i ステップの乱れを用いて次式で示される.

$$V_{i+1} = \rho \cdot V_i + r_i \quad (0 < \rho < 1) \quad (2)$$

ここに, V_i : 流速の乱れ成分, ρ : 定数, r_i : 平均0, 標準偏差 σ_r の正規乱数, である. V_i と r_i は独立であることより, 自己相関係数を求めると, 定数 ρ は次式となる.

$$\rho = \exp\left(-\frac{\Delta t}{T_L}\right), \quad R_E(n\Delta t) = \frac{\overline{V_i \cdot V_{i+n}}}{V_i^2} = \rho^n,$$

$$T_L = \int_0^\infty R_E(\tau) d\tau \quad (3)$$

ここに, Δt : V_i と V_{i+1} の時間間隔, R_E : 乱れの自己相関係数, T_L : 乱れの積分時間スケール, である. 式(2), 式(3)より, 正規乱数の標準偏差は次式で示される.

$$\sigma_r = \sqrt{1 - \rho^2} \sigma_v, \quad (\because \sigma_v^2 = \rho^2 \cdot \sigma_{v+1}^2 + \sigma_r^2) \quad (4)$$

本研究では, 海域の乱れによるトレーサ粒子の拡散係数として水平方向に10⁵ cm²/s, 鉛直方向に10 cm²/sを与えた.

(3) 計算ケースと計算条件

粒子追跡手法によるクラゲの分布の計算には, 流速, 水温, 塩分の1時間毎の計算結果, およびDO, プランク

トン濃度の月平均値を時間内挿して用いた(図-1). トレーサ粒子の初期条件としては, 湾口部分を除いた全計算領域の表層から水深10mまでに, 均一に各メッシュ1個の粒子を配置した.

図-2 トレーサ粒子の投入海域

図-2に, トレーサ粒子の投入位置を示す. 東京湾では, 沿岸域でクラゲのポリプが観測されており, これよりクラゲの幼生が発生していると思われるが, 分布に関しては不明な点が多いため, Case-Aのシリーズでは, 初期条件として粒子トレーサは一様分布として計算を実施した(黒丸●). Case-Bのシリーズでは, 護岸などの人工構造物が多く, クラゲのポリプが付着していると思われる海域(少し大きい赤丸●: 品川, 千葉, 横浜)を対象にトレーサ粒子を投入し, 移動特性を検討した. 計算期間としては, クラゲの成体が増殖する晩春から夏季を中心として, 3月1日にトレーサ粒子を投入し, 8ヶ月間計算を実施した.

表-1に, 式(1)中の移流項の計算に用いた, 各要因に対する係数 $\alpha_{n,i}$ の値を示す. 各水質に対するクラゲの挙動は, 以下のように仮定した. 河川水が流入する閉鎖性の内湾などでは, 一般的に, 表層の淡水層にはクラゲが少ないことが知られている. 例えば, 三宅¹⁶⁾は, 鹿児島での調査結果より, クラゲの表層への出現に影響がある要因として, 塩分, pH, 水温を上げており, クラゲが大量に出現する条件として, 塩分: 25~35, pH: 8.1~8.5, 水温: 14~28 °Cとしている. 本研究では, トレーサ粒子の特性として, 塩分の影響については, 河川水の影響を軽減するように, 塩分濃度の高い方に移動する方向に係数を設定した. 水温に関しては, 本研究では月平均水温を時間内挿して使用しているため, 28 °C以上の水温が出現しないことより, クラゲの活性が高くなると考えられる水温が高くなる方向に移動するように係数を設定した. DOに関しては, Suzuki¹⁷⁾らの伊勢湾におけるクラゲの鉛直分布の観測による知見があり, 一定のDO以下の水塊ではクラゲが存在しないことが示されている. 本計算ではパラメータの設定を簡単にするため, 単純に貧酸素化した水塊を回避するように, DOの高いほうに移動するように係数を設定している. また, 餌となるプランクトンに関しては, 濃度が高くなる方向に移動するように係数を設定した. その他, 一旦形成されたクラゲのパッチが保持されるように, クラゲの密度が高い方向に

移動する、流速が遅い（運動エネルギー $(= \sum U_i^2 / 2)$ が小さい）ところに滞留する、ように係数を仮定している。

表-1 計算ケースと計算条件

計算ケース		式(1)の各要因に対する移流項中の係数 $\alpha_{n,i}$ の値							備考
		水温	塩分	日射量	DO	プランクトン	クラゲ密度	流動エネルギー	
Case-A0	水平	0E+0	0E+0	0E+0	0E+0	0E+0	0E+0	0E+0	流動、拡散のみ
	鉛直	0E+0	0E+0	0E+0	0E+0	0E+0	0E+0	0E+0	
Case-A1	水平	0E+0	5E-3	0E+0	0E+0	0E+0	0E+0	0E+0	Case-A0 + 塩分
	鉛直	0E+0	1E-3	0E+0	0E+0	0E+0	0E+0	0E+0	
Case-A2	水平	1E-4	5E-3	0E+0	1E-4	1E-4	5E-4	-5E+4	Case-A1 + 水温、DO、プランクトン 他
	鉛直	2E-5	1E-3	0E+0	2E-5	2E-5	1E-4	-1E+4	

3. 結果と考察

(1) 東京湾のクラゲの分布

東京湾全域での実測例は少ないが、例えば桑原ら¹⁶⁾やToyokawaら¹⁷⁾、野方ら¹⁸⁾によりクラゲ分布が観測されている。桑原ら¹⁶⁾は、1966年と1967年の夏季に千葉臨海工業地帯の海域で調査を実施し、五井から姉ヶ崎の前面でクラゲのパッチを観測し、塩素

量との関係を指摘している。Toyokawaら¹⁷⁾は、1990年から1992年にかけて東京湾で行った調査の結果を示している。この結果では、東京湾中央部ではクラゲの出現は少なく、観測時期によって差異はあるものの、東京や神奈

(a) 海域の流動、拡散のみを考慮

(b) Case-A0 + 塩分を考慮

(c) Case-A1 + 水温, DO, プランクトン 他を考慮

図-3 粒子分布の経時変化（水質の影響）
（分布は鉛直に海底まで積分したインベントリ）

(a) 計算条件 Case-A2, 粒子投入位置 - 品川

(b) 計算条件 Case-A2, 粒子投入位置 - 千葉

(c) 計算条件 Case-A2, 粒子投入位置 - 横浜

図-4 粒子分布の経時変化（粒子の投入位置の影響）

千葉県側では横須賀や横浜、品川付近、千葉県側では船橋沖や袖ヶ浦、木更津付近などの沿岸部でクラゲが観測されている。野方ら¹⁸⁾は、2006年と2008年に東京湾湾奥部で観測を行っており、稲毛から姉ヶ崎の前面海域にかけてクラゲのパッチを観測するとともに、水中ビデオカメラを用いて、その鉛直分布を明らかにしている。

(1) トレーサ粒子追跡計算の結果と考察

a) 水質の影響

図-3に、移流・拡散のみによりトレーサ粒子を移動させた場合と、水質の影響を考慮した場合の計算結果を示す。各図中の分布は月毎の平均濃度であり、濃度CZは粒子のインベントリとして海表面から海底面まで積分した水柱中の濃度を示している。

Case-A0に、移流・拡散による物理的な移動効果のみを考慮した計算結果を示す。3月に投入されたトレーサ粒子は、初期には東京湾全域にほぼ一様に分布しているが、6月にはほぼ全ての粒子が湾内より流出している。

Case-A1は、移流・拡散による移動に加え、塩分の影響を考慮した計算結果である。粒子の分布はCase-A0の場合と異なり、9月の計算結果においても千葉県側の沿岸域で粒子が保持されていることが分かる。上述の東京湾における知見に関しても、夏季に千葉県側の船橋沖や袖ヶ浦、木更津付近でクラゲパッチが多く観測されていることと定性的に整合しており、塩分の影響を考慮した効果は大きいと考えられる。しかしながら、粒子の分布は千葉県側のみであり、東京・神奈川側には分布は見られない。

Case-A2は、さらに塩分に加えて水質に関連する水温やDO、プランクトンのほかに、クラゲの集積効果や滞留効果の影響を仮定した場合の結果である。粒子は9月まで保持され、分布はCase-A1と同様の傾向を示している。3月の計算結果より、投入された粒子は比較的早い段階から沿岸域に分布していることが分かる。この計算条件では、9月においても横浜や横須賀、品川付近に粒分布が見られるとともに、千葉県側でも千葉や姉ヶ崎付近に高い濃度分布が存在し、Case-A1に比べ東京湾でのクラゲの分布の知見と、より整合的な結果となっている。

本研究における計算では、クラゲに対する水質の影響等のモデル化や、各パラメータの設定に多くの仮定が入っているが、移流・拡散のほかにトレーサ粒子に水質等の影響によるクラゲの挙動を考慮することにより、計算された粒子の分布は従来の観測による知見と定性的により整合する結果となり、計算が改善されることが示唆された。

b) トレーサ粒子の投入海域による分布の違い

前節では、初期のトレーサ粒子の分布を一様として計算を行った。一般に、クラゲのポリプは、護岸や浮き桟橋などの人工構造物に多く付着している。本節では、Case-A2の計算条件を用いて、ポリプが多く付着してい

(a) 表層 水深 -1m

(b) 中層 水深 -7m

図-5 粒子分布の経時変化 (水深の影響)

と考えられる海域を想定し、品川や千葉、横浜付近に初期トレーサ粒子を設定して(図-1)粒子の移動を検討した。図-4に、投入位置の違いによるトレーサ粒子の計算結果を示す。

Case-B1は、品川付近に粒子を投入した場合の粒子の分布を示す。粒子は、千葉沿岸に沿って移動し、9月には千葉や姉ヶ崎付近に到達している。田中ら⁸⁾のシミュレーションや鈴木ら¹⁹⁾のHFレーダによる観測結果と同様に、本研究で用いた流動では東京湾湾奥部に時計回りの残差流が形成されており、計算された粒子の分布は、主にこの残差流の移流効果によるものと考えられる。また、図-5に示すように、トレーサ粒子の移動は水深により異なっている。表層では、6月の分布を見ると、隅田川や荒川河口域で粒子の分布が少なくなっている。一方、水深 -7 mの中層では、3月から9月にかけて千葉沿岸を粒子が時計回りに移動している。これは、トレーサ粒子に塩分の影響を考慮した結果と考えられる。図-1に見られるように、隅田川や荒川の河口部では河川水の影響により表層の塩分が低下している。トレーサ粒子に高塩分方向に移動する特性を持たせることにより粒子は鉛直方向に移動し、中層では河川水層の下を粒子が通過している。

Case-B2は、千葉付近に粒子を投入した場合の計算結果を示す。粒子の一部は流速が遅い湾奥に滞留しているが、Case-B1の場合と同様に、時計回りの残差流の移流効果により、沿岸に沿って移動していると考えられる。

Case-B3は、横浜付近に粒子を投入した場合の計算結

果を示す。横浜付近では、計算された残差流は湾口方向を向いており、粒子の一部は留まるものの、投入後の比較的早い段階から粒子が湾外に流出している可能性が推測される。

以上の結果より、投入された粒子の移動は、基本的には東京湾全体の広域の残差流により規定されているが、水質などの影響を考慮してトレーサ粒子に水平方向や鉛直方向の移流効果を与えることにより、粒子が沿岸部分に滞留して分布していることが示唆される。

4. まとめ

本研究では、内湾に多く発生するミズクラゲの分布を、中・長期的に予測する手法を検討した。クラゲの移動の計算には、トレーサ粒子追跡手法が用いられているが、内湾などの閉鎖性海域では河川水の流入などにより、水質が時・空間的に複雑に変化している。既存の内湾におけるクラゲの分布に関する調査結果では、クラゲの分布は、海域の塩分やDOなどに影響を受けることが示されている。これまでの研究では、三河湾において粒子追跡手法に日射に伴う日周期の上下運動を考慮した計算事例は見られるが、水質などの影響を考慮した事例はない。

本研究では、これらの水質等の影響を検討するため、東京湾を対象に数値実験を実施した。流速、水温、塩分の1時間毎の計算結果、およびDO、プランクトン濃度の月平均値を用いて、トレーサ粒子の移動にバックグラウンドの水質の分布を反映させることで、クラゲの挙動を模擬した。各水質に対するクラゲの挙動については十分な知見がないため、本研究では、各水質の水平・鉛直方向の勾配に比例した移流項を与えた。

東京湾において、3月から8ヶ月間にわたる粒子追跡計算を実施した結果、移流・拡散過程のみを考慮した計算では粒子は湾内に留まることなく流出するが、塩分の効果を考慮すると粒子は湾内に留まり、既存のクラゲ分布の知見と定性的に整合する結果が得られることが分かった。更に、DOなどのその他の水質の効果や、クラゲの集積や滞留を仮定すると観測結果との整合性は改善され、トレーサ粒子に水質等の影響を考慮することが有効であることが示唆された。

実際の海域において、水質とクラゲの関係に関する研究事例は少なく、本研究で仮定したクラゲの挙動に関するモデル化や各パラメータの与え方は単純化されたもので、計算は数値実験的なものであるが、中・長期的なクラゲの分布の計算の可能性が示唆された。

今後、水質とクラゲの関係に関する研究が進展することにより、クラゲの挙動に関するより詳細なモデル化が期待される。

参考文献

- 1) 上真一 他: 瀬戸内海におけるクラゲ類の出現動向と漁業被害の実態, 水産海洋研究, 68巻1号, pp. 9-19, 2004.
- 2) 滝沢正登: 電力産業への影響, 日本プランクトン学会報, 52巻1号, pp. 36-38, 2005.
- 3) Ishii, H. et al.: Survivorship and production of *Aurelia aurita* ephyrae in the innermost part of Tokyo Bay, Japan, *Plankton Biol. Ecol.*, 51 (1), pp.26-35, 2004.
- 4) 冷泉伸泰 他: 黄海・東シナ海のエチゼンクラゲを模したトレーサの挙動に関する数値実験, 海の研究, 15, 425-436, 2006.
- 5) 青木一弘 他: 三河湾におけるミズクラゲの輸送過程に関する数値的研究, 水産海洋研究 76, vol 1, pp.9-17, 2012.
- 6) 三宅裕志: ミズクラゲの生活と環境, *SESSILE ORGANISMS*, 16 (1), pp.5-16, 1999.
- 7) Suzuki, K. S. et al.: Quantitative effects of pycnocline and dissolved oxygen on vertical distribution of moon jellyfish *Aurelia aurita* s.l.: a case study of Mikawa Bay, Japan, *Hydrobiologia*, pp1-13, 2015.
- 8) 田中昌弘 他: 東京湾の残差流のシミュレーションとそれが水質解析に及ぼす影響について, 海岸工学論文集, 第43巻, pp.1121-1125, 1996.
- 9) 鯉淵幸生 他: 東京湾における窒素・リンに着目した物質循環機構, 海岸工学論文集, 第48巻, pp1076-1080, 2001.
- 10) 松梨史郎: 湾奥水域における水質の時空間変化の解析, 土木学会論文集, No. 573/VII-4, pp.93-110, 1997.
- 11) 今村正裕 他: 植物プランクトン種の特性を考慮した水質モデルによる負荷削減に伴う水質応答特性の検討, 海洋調査技術, 18 (2), pp.11-26, 2006.
- 12) 中辻啓二 他: 東京湾における残差流系に関する三次元数値実験, 海岸工学論文集, Vol. 42, pp386-390, 1995.
- 13) 飯村晃: 千葉県沿岸海域におけるCOD, DOの推移, 千葉県環境研究センター年報(水質環境), 平成25年度.
- 14) Imamura, M. et al.: Seasonal and Spatial Characteristics of Particulate Organic Carbon and Nitrogen and Chlorophyll a in Tokyo bay, *Proc. of Medocost & EMECS1999 Joint Conference*, Vol.1, pp.207-214, 1999.
- 15) 角湯正剛 他: 発電所の取水に伴う浮遊体の取り込みに関する研究, 第29回海岸工学講演会論文集, pp614-618, 1982.
- 16) 桑原連 他: ミズクラゲの生態学的研究-I.1966, 1967年夏季の東京湾北東部における分布状態について, *Bull. of the Jap. Soc. of Scientific Fisheries*, Vol. 35, No. 2, pp.156-162, 1969.
- 17) Toyokawa, M. et al.: Life history and seasonal abundance of *Aurelia aurita* medusae in Tokyo Bay, Japan, *Plankton Biol. Ecol.*, 47 (1), pp.48-58, 2000.
- 18) 野方靖行 他: 水中ビデオカメラを用いたミズクラゲの鉛直分布観測, 電力中央研究所, 研究報告 U08050, 2009.
- 19) 鈴木高二郎 他: 東京湾奥の貧酸素化に及ぼす時計回りの循環流の影響について, 土木学会論文集B2 (海岸工学), vol. 68, No. 2, pp.I_981-I986, 2012.

(2015. 9. 30受付)