

発電所の取水に伴う浮遊体の取り込みに関する研究

角 湯 正 剛*・ 和 田 明**・ 曾 我 雅 海***・ 水 鳥 雅 文****

1. 緒 言

沿岸部に立地された火力・原子力発電所が、復水器冷却用として取水する海水に含まれるプランクトンや卵稚仔は、復水器を通過し、放水口より放出される間の機械的応力や熱的履歴により損傷されることが報告されている¹⁾。近年、発電所の大容量化や集中立地化に伴い、発電所で取水される冷却水量は大量となり、これらの取水される海水に重要な海産資源のプランクトンや卵稚仔が含まれる場合には、対象海域の生物環境に影響を与えることが予想される。この影響を軽減するためには、対象地点においてプランクトンや卵稚仔等の取り込まれる範囲やその割合を事前に予測し、取放水口の最適な配置を検討することが必要である。

筆者らは、このため海域での平均的な流動と乱れを再現し、海域に浮遊しているものが冷却水取水に伴い取り込まれる範囲とその割合を予測する数理モデルを提案した²⁾。この数理モデルの妥当性を検討するために、現在稼動中の発電所の前面海域に浮遊体を投入し、取水口に取り込まれる割合を調査した。本文は、この調査結果と数理モデルによる予測結果との比較より、筆者らが提案した数理モデルの適合性を検討した結果について述べたものである。

2. 海象観測結果の検討

2.1 流動連続観測記録の調和解析および統計解析

海域の流動および拡散特性を把握するために、対象発電所の前面海域で流動の連続観測を実施した。観測点は、図-1 に示す5測点で、測定水深は、海面下3m層および10m層とし、水深が10m以浅の場合は、海底上2mとした。用いた流速計は、アンデラ型流速計で、観測期間は、20日間である。

対象地点は、大阪湾の東南部に位置した発電所であり、内海特有の潮汐流の卓越する海域である。それ故、観測された流速変動記録を潮汐の4大分潮 (M_2 , S_2 , K_1 , O_1

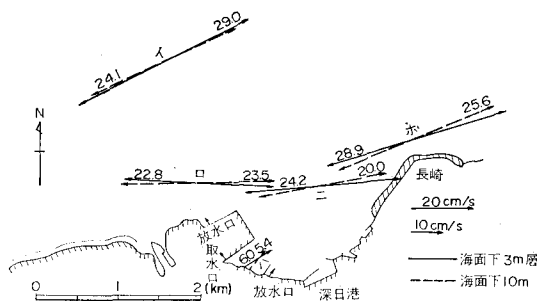


図-1 M_2 潮流の主流方向の潮流振幅

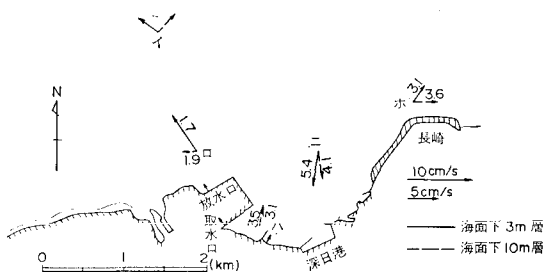


図-2 観測期間内の平均流ベクトル

分潮)と同周期の成分に調和解析した。その結果、本海域では、半日周潮流 (M_2 分潮流) の卓越することが認められた。図-1 は、 M_2 潮流の潮流楕円の長軸方向の潮流振幅を示している。沖合の海域では、潮流振幅は20~30 cm/s 程度であり、沿岸線に平行な方向である。

図-2 は、観測期間内の平均流のベクトルを示す。発電所東方の湾状海域では、時計方向の環流の形成されることが認められる。

つぎに、流動の乱れから渦動拡散係数を算定する。用いた手法は、筆者らがこれまで採用してきたもので、観測された流速変動から周潮流成分と半日周期以上の長周期成分を除去した流速変動を用いて自己相関関数を求めて積分し、インテグラルタイムスケールを求め、これに乱れ強度を乗じたものを拡散係数とするものである。すなわち

$$K_x = \beta \cdot \overline{u'^2} \int_0^{t^*} R_x(\tau) d\tau, \quad K_y = \beta \overline{v'^2} \int_0^{t^*} R_y(\tau) d\tau \quad \dots\dots\dots (1)$$

* 正会員 工修 電力中央研究所環境水理部海洋環境研究室

** 正会員 工博 電力中央研究所環境水理部長

*** 正会員 電力中央研究所環境水理部海洋環境研究室

**** 正会員 工修 電力中央研究所環境水理部海洋環境研究室

ここに、 K_x, K_y : x, y 方向の拡散係数、 $\overline{u'^2}, \overline{v'^2}$: x, y 方向の乱流速の自乗平均、 $R(\tau)$: 自己相関関数、 t_* : 相関係数が最初に 0 となる遅れ時間、 β : オイラー、ラグランジュ系間の変換係数。

本文では、 $\beta=1$ と仮定した。各測点で観測された流速変動記録から、周潮流成分および 12 時間以上の周期を有する長周期成分を除去した流速変動より拡散係数を求めた。その結果を図-3 に示す。拡散係数は、表層で大きく、下層で小さい傾向を示すが、ほぼ $10^4 \sim 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$ で等方性に近い拡散場を示す。乱れ強度は、 x, y 方向ともほぼ同じで、平均的には約 7 cm/s であり、インテグラルタイムスケールは、 x 方向で約 30 分、 y 方向で約 20 分であった。

2.2 冷却水取水に伴う浮遊体取り込み調査結果

海域の数多くの点に浮遊体を投入し、取水口へ到達した浮遊体の数を観測することにより浮遊体の取り込み確率を求めた。浮遊体としては、図-4 に示すような、直径約 18 cm のプラスチック製の「海流くらげ」を用いた。この海流くらげを所定の水深に浮遊させるために、海面に小さな浮子を浮かべそれより所定の長さのひもの先端に海流くらげを着けた。ひもの長さは、作業上の容易さと吹送流の影響を小さくすることを考慮して、3 m とした。海流くらげの投入点および投入した時の潮流は、図-5, 6 に示す通りであり、6 月 12, 14 日は、大潮期、19 日は小潮期である。投入点は、海域の流れを考慮し、取水口へ向うであろうと考えられる海域に分散させた。投

入点は、各回 5 点で、1 点に 40 個投入した。

取り込み確率の観測結果をみると、西流時に投入された場合は、発電所から東方側、東流時に投入された場合は、発電所の北方護岸側からの取り込み確率が高くなっている。その値は、取水口以最も近い投入点のものは、ほぼ 100% 近いが、取水口から 1 km 離れると 20~70%, 1.5 km 離れると数 % となる。取水口近傍では、海域の乱れの影響は小さく、取水口へ向う流れに乗って殆んど全ての浮遊体を取り込まれるが、取水口から離れた投入点では、海域の乱れにより分散し、取り込み確率は低くなる。

投入された海流くらげには葉書が付けてあったので、後日拾得者が到着点を記入して送付されたものがある。その中には、淡路島東岸の岩屋、洲本や紀伊水道の白浜にまで到達したものがあり、大阪湾内の時計方向の環流や紀伊水道を南下する恒流の存在が示唆されている。

3. 数理モデルの内容

3.1 数理モデルの考え方

冷却水取水に伴い浮遊体を取り込まれる範囲やその割合を検討するためには、海域の流動や拡散特性が重要な要素と考えられる。前述の通り、本海域では、半日周潮流が卓越し、また、乱流変動の拡散係数は、 $10^4 \sim 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$ であることが得られた。前者の半日周潮流は、平均的な流動と考えられ、この流れに後者の乱れが重畳したものが、海域で観測された流動と考えることができ

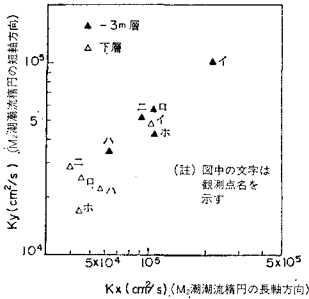


図-3 拡散係数の算定結果

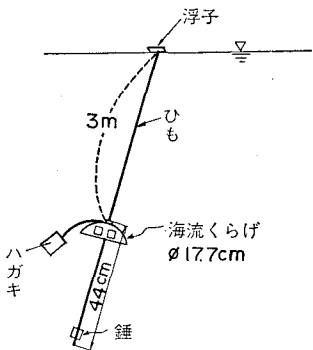


図-4 海流くらげの浮遊状況

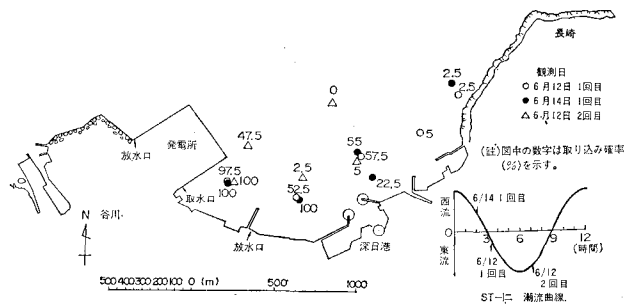


図-5 海流くらげの取り込み確率の観測結果 (大潮期)

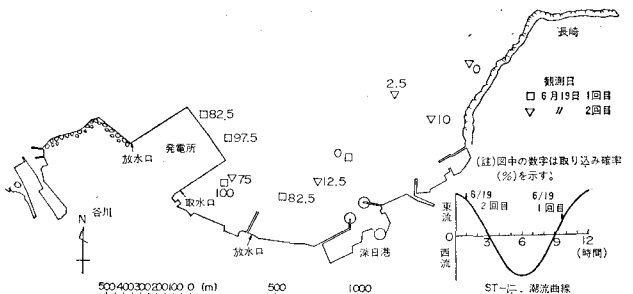


図-6 海流くらげの取り込み確率の観測結果 (小潮期)

る。本文のモデルは、これらの流動および乱れを数値モデルで再現し、海域に投入された粒子群の軌跡を時々刻々追跡し、取水口に取り込まれた粒子の割合を算定することにより、冷却水取水に伴う取り込み確率を予測するものである。

平均的な流動である半日周潮流および冷却水取水に伴う流動は、流体力学の運動および連続式を用いて求め、海域の乱れは、乱数を用いて所定の拡散係数を有する乱れを発生させる手法を用いた。

3.2 潮流および取水流の流動シミュレーションモデル

海域の潮流および冷却水取水に伴う流動を支配する運動および連続方程式は、次式で表わされる。

$$\frac{\partial M}{\partial t} + U \frac{\partial M}{\partial x} + V \frac{\partial M}{\partial y} = -g(S+h) \frac{\partial S}{\partial x} + A_h \nabla^2 M - \tau_x \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + U \frac{\partial N}{\partial x} + V \frac{\partial N}{\partial y} = -g(S+h) \frac{\partial S}{\partial y} + A_h \nabla^2 N - \tau_y \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\tau_x = k_b U \sqrt{U^2 + V^2}, \quad \tau_y = k_b V \sqrt{U^2 + V^2} \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$M = \int_{-S}^h u dz = U(S+h), \quad N = \int_{-S}^h v dz = V(S+h) \quad \dots\dots\dots(6)$$

ここに、 U, V : x, y 方向の鉛直方向の平均流速、 S : 水位、 h : 水深、 A_h : 水平方向の渦動粘性係数、 τ_x, τ_y : x, y 方向の海底での摩擦項、 k_b : 海底摩擦係数。

上述の式は、鉛直方向に積分された式系で表わされている。本文では、潮流、冷却水取水に伴う流れとも鉛直方向には一様分布していると仮定して計算した。

3.3 乱流のシミュレーションモデル

所定の拡散係数を有する乱れを発生させる手法としては、乱れが1次マルコフ過程に従うとしたモデルを採用した³⁾。すなわち、 $(i+1)$ ステップの乱れは、 i ステップの乱れを用いて次式で表わすことができる。

$$V_{i+1} = \rho V_i + \gamma_i \quad \dots\dots\dots(7)$$

ここに、 ρ : 定数、 γ_i : 平均 0、標準偏差 σ_r の正規乱数。

式 (7) から自己相関関数を求めると、 V_i と γ_i は独立であるので次式となる。

$$R(n\Delta t) = \overline{V_i \cdot V_{i+n}} / \overline{V_i^2} = \rho^n \quad \dots\dots\dots(8)$$

乱れのインテグラルタイムスケール (T_L) は、次式で求められる。

$$T_L = \int_0^\infty R(\tau) d\tau \quad \dots\dots\dots(9)$$

式 (8) を式 (9) へ代入すると、

$$\rho = \exp(-\Delta t / T_L) \quad \dots\dots\dots(10)$$

また、式 (7) の両辺の分散を求めることにより次式が得られる。

$$\sigma_r = \sqrt{1 - \rho^2} \sigma_V \quad \dots\dots\dots(11)$$

ここに、 σ_V : 乱流速の標準偏差。

この乱流発生法を用いるためには、乱れの自己相関関数は、式 (8) に示すような関数でなければならない。本海域で得られた乱流速の自己相関曲線は、遅れ時間の増大とともに相関係数は単調に減少し、零に漸近する式 (8) と同様の形状となり、前述の仮定は成り立ち、この手法の適用が妥当であると考えられる。

3.4 数値計算の条件

本海域での数値計算のために、発電所周辺海域を 150 m 間隔の格子群に分割した。取水口周辺については、75 m, 37.5 m の格子群に再分割している。計算に用いた条件は、以下に示す通りである。

- (1) 潮流を再現するために、計算対象領域の左右の境界で、潮位条件を設定する。潮位振幅は、本地点での潮位の観測結果より 66 cm とし、左右の境界での遅角は、12 度とした。潮流の周期は、12 時間とし、渦動粘性係数は、 $2.5 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$ とした。
- (2) 流動の乱れの拡散係数は、図-3 より判断して、発電所前面の湾状海域では $10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$ で等方性の値とし、沖合海域では、沿岸方向の値を半オーダー大きくした異方性の値とした。
- (3) 投入された粒子の計算領域の境界での条件は、海岸線に到着したものは、一たんその点に留め、沖合方向の乱れ成分が生じた段階で沖合に飛び出すものとし、海域の計算領域を飛び出したものは、その段階で計算を終了し、再び戻ってこないものとした。

4. 冷却水取水に伴う浮遊体取り込みの数値シミュレーション

4.1 潮流シミュレーション結果とその検討

本海域での半日周潮流を再現するために、前章で述べたように左右の境界で潮位条件を設定し、潮流を計算した。上げ潮最強流速時(東流最強時)の潮流シミュレーション結果では、図-7 に示す通り、発電所前面の湾状海域で時計方向の環流が形成されている。下げ潮(西流)時のシミュレーション結果は、地形に沿った流れとなっている。

計算された潮流と現地海域で観測された潮流との適合性を検討するために、流動観測点における両者の潮流楕円を比較した。その結果を図-8 に示す。図には掲載しなかったが、測点ハでは、計算値の潮流振幅は、観測値に比較して小さく、適合性は良くなかったが、その他の測点では、両者は良く一致しており、平均的な流れであ

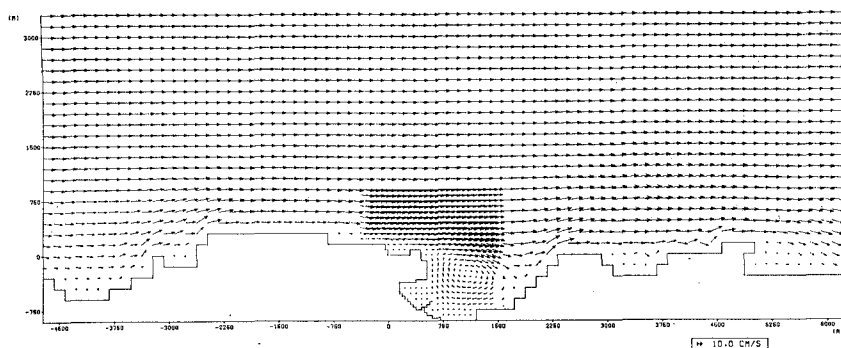


図-7 潮流のシミュレーション結果 (上げ潮最強流速時)

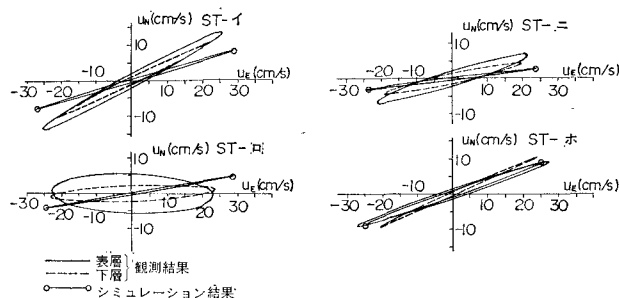


図-8 観測された流速と計算された流速による潮流楕円の比較

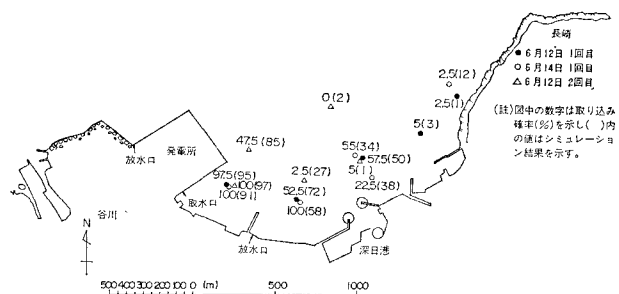


図-9 冷却水取水に伴う浮遊体取り込み確率のシミュレーション結果と観測結果との比較 (大潮期)

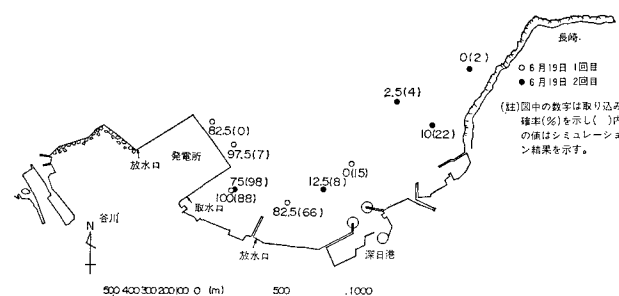


図-10 冷却水取水に伴う浮遊体取り込み確率のシミュレーション結果と観測結果との比較 (小潮期)

現地海域で観測された 図-2 の流況パターンをほぼ再現している。

数値モデルにより、現地海域の半日周潮流は、ほぼ再現された。次に、冷却水取水に伴う流動を計算し、半日周潮流の計算結果と線形結合して、海域の流れとした。

4.2 冷却水取水に伴う浮遊体取り込み確率のシミュレーション結果とその検討

冷却水取水に伴う浮遊体の取り込み確率を予測するために、浮遊体の投入点と同じ位置に、粒子を 100 個づつ投入し、個々の粒子は、海域での流れと、個々の粒子に与えられた所定の拡散係数を有する乱れとで移動するものとして、個々の粒子の位置を時々刻々追跡し、取水口へ到達するものを算定した。計算の時間間隔は、1 回の時間ステップで、粒子が 1 格子間隔を越えないという条件から 1 分とした。また、粒子の投入時刻は、浮遊体投入時の測点二の潮流条件に合致させた。

現地海域での浮遊体取り込み確率の観測結果と、数値モデルによる予測結果との比較を 図-9、10 に示す。図-9 に示す大潮期の場合は、潮流が比較的地形に沿って流れる西流時と、東流の後期に浮遊体が投入されているため、取り込み確率の予測結果は、観測値と良い一致を示している。図-10 に示す小潮期の場合も、東流の後期に投入された場合には、予測値は、観測値と良い一致を示しているが、東流の初期に投入された 1 回目の場合は、発電所北東側に投入された測点のものは、観測値がかなり大きな取り込み確率となるのに対し、予測値は小さく、両者の差異は大きい。これらの投入点付近では、地形性の渦流の発達することが確認されており、モデルでは、この局所的な

半日周潮流は、再現されたものと考えられる。

潮汐残差流の計算結果は、図-7 の流動から判断される通り、湾状海域に時計方向の環流が形成されており、

流動が再現されていないことが原因と考えられる。

これらの潮時以外にも投入された浮遊体の取り込み確率の観測値は、投入点の配置の不手際で取水口前面の投

入点を除いて、殆んど 0 であった。予測値でも、これらの投入点では、殆んど 0 に近い取り込み確率となり、適合性は良好であった。

数理モデルにおいて、投入された粒子群の分散の時間変化を 図-11 に示す。投入点は、取水口東方約 1km の湾状海域内の 2 点と、長崎北方約 1km の沖合海域の 2 点で、投入時刻は、西流初期である。沿岸線に直角方向

の分散 (σ_y) は、湾状海域、沖合海域のものとも変わらず時間の $1/2$ 乗に比例して増加する傾向を示すが、沿岸線に平行方向の分散 (σ_x) は、沖合海域に比較して、湾状海域に投入された粒子群の方が大きい。これは、沖合に比較して、湾状海域内の流れの複雑性に起因しているためである。また、分散値は、時間の経過に従い大きくなるが、転流時には、数時間減少し、収れんすることが認められる。分散値の大きさは、設定した拡散係数から推定されるものより大きく、流れの shear 効果によるものと考えられる。

5. 結 語

発電所の冷却水取水に伴い取り込まれる浮遊体の取り込み確率を現地海域で観測し、筆者らが開発した数理モデルを用いて予測したものと比較した結果、両者は良好な一致を示し、用いた数理モデルの妥当性が確認された。この数理モデルを用いれば、海域に浮遊している魚卵の取り込み量も予測することができる。

今後は、恒流成分の卓越する外海域で同様の調査を実施し、数理モデルによる予測値と比較し、外海域での本モデルの適用性を検討する予定である。

参 考 文 献

- 1) Marcy, B. C., Jr.: Entrainment of organisms of power plants, with emphasis on fishes; A Symposium, S. B. Saila, (Ed.) Lexington Book, 1975.
- 2) 角湯正剛・和田 明: 冷却水取水に伴い取り込まれる浮遊体の確率的検討, 第 24 回水理講演会論文集, pp. 13~18, 1980.
- 3) Hall, C. D.: The simulation of particle motion in the atmosphere by numerical random walk model, Quart. J. R. Met. Soc., 101, 1975.

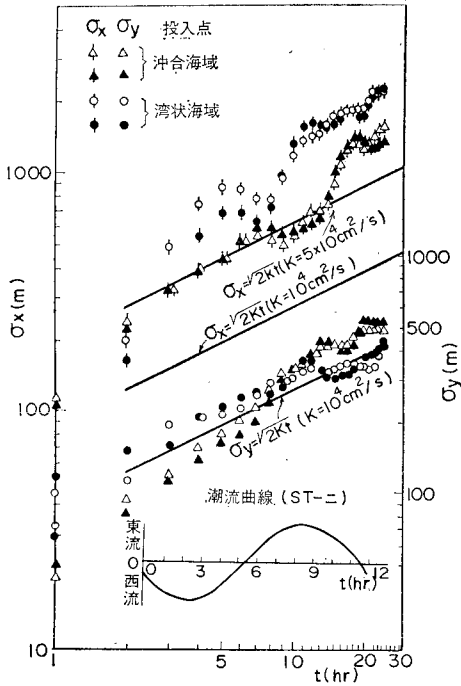


図-11 投入された粒子群の分散の時間変化