

1. はじめに

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、復水器冷却系統を通過し、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⁾

発電所の大容量化に伴い、大量の冷却水を取水する傾向にあるが、それに伴い、取水される海水の範囲も広範囲に及ぶと予想される。その範囲のなかに重要な産卵場や藻場が存在している場合、浮遊している卵稚仔等の魚類プランクトンが取水される冷却水に含まれて、どのような範囲から取り込まれるのを明らかにすることは、取放水による海洋生物への影響を最少限にする取水放口を設計する上で重要な課題である。

本文は、この問題に対処するために、冷却水取水に伴い取り込まれる浮遊体を確率論的に予測する数理モデルを開発し、モデル化した海域での浮遊体の取り込み確率の予測結果を述べ、現在稼動中の発電所へこのモデルを適用した結果について検討したものである。

2. 数理モデルによる浮遊体取り込み確率のシミュレーション

2-1 数理モデルの考え方

冷却水取水に伴い取り込まれる浮遊体の範囲やその割合を検討するためには、海域の流動特性や拡散特性が重要な要素と考えられる。筆者らがこれまでの日本の沿岸海域で実施された流動観測記録を統計解析した結果、次の特性が得られている。^{2) 3)} すなわち、瀬戸内海や伊勢湾、東京湾のような内海域では、半日周潮流が卓越し、それに乱れ成分が上畳されたものが観測された流速変動と考えられる。乱れ成分は、G.I.Taylor が定義した形式の拡散係数を用いれば、海域により変化はするが、季節的な変動はせずにほぼ一定の値を示すことが認められている。また、日本海や太平洋沿岸の外海に面した海域においては、複雑な流況を呈するが、数日間の時間スケールで考えると、観測された流動は、ある一定方向に流れる恒流成分とそれに上畳した乱れ成分の和と考えることができる。この乱れ成分は、前述の拡散係数で定義され、海域により値は異なるが、季節的な変動は小さく、ほぼ半オーダーの幅で変化することが認められている。

それ故、本文のモデルでは、内海における半日周潮流や外海における恒流成分のような平均的な流れは、数理モデルで再現し、海域に投入された個々の粒子に拡散係数で規定され、乱数を用いて発生させた乱れを与え、粒子の軌跡を時々刻々追跡し、取水口に取水される粒子の個数を計算することにより、浮遊体の取り込み確率を予測しようとするものである。

2-2 潮流および取水流の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求めるための基本式は、運動および連続式を鉛直方向に海表面より海底まで積分した次式を用いた。

$$\frac{\partial M}{\partial t} + u \frac{\partial M}{\partial x} + v \frac{\partial M}{\partial y} = -g(H+S) \frac{\partial S}{\partial x} + \Delta h \nabla^2 M - \tau_x \quad (1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + u \frac{\partial N}{\partial x} + v \frac{\partial N}{\partial y} = -g(H+S) \frac{\partial S}{\partial y} + \Delta h \nabla^2 N - \tau_y \quad (2)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

ここで、 $M = \int_{-S}^H u dz$, $N = \int_{-S}^H v dz$,

$$\tau_x = K_b u \sqrt{u^2 + v^2}, \quad \tau_y = K_b v \sqrt{u^2 + v^2}$$

u, v : x, y 方向の流速, g : 重力加速度, H : 水深, S : 水位, A_h : 渦動粘性係数, K_b : 海底摩擦係数。

鉛直方向の分布形は、潮流、取水流動とも海表面より海底まで一様とした。

2-3 乱れのシミュレーションモデル

所定の拡散係数を有した乱れを発生させる方法としては、乱れが一次マルコフ過程に従うとしたモデルを採用した。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される。

$$V_{i+1} = \rho V_i + r_i \quad (0 < \rho < 1) \quad (4)$$

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

式(4)より自己相関係数を求めると、 V_i と r_i は独立であるので次式となる。

$$\begin{aligned} R(n \Delta t) &= \overline{V_i \cdot V_{i+n}} / \overline{V_i^2} \\ &= (\rho^n \overline{V_i^2} + \rho^{n+1} \overline{V_i \cdot r_i} + \dots + \rho \overline{V_i \cdot r_{i+n-1}}) / \overline{V_i^2} \\ &= \rho^n \end{aligned} \quad (5)$$

乱れの integral time scale T_L は次式で求められる。

$$T_L = \int_0^\infty R(\tau) d\tau \quad (6)$$

式(5)を式(6)へ代入すると、

$$\rho = \exp(-\Delta t / T_L) \quad (7)$$

式(4)の分散を求めると、

$$\begin{aligned} \sigma_v^2 &= \rho^2 \sigma_{v+1}^2 + \sigma_r^2 \\ \sigma_r &= \sqrt{1 - \rho^2} \sigma_v \end{aligned} \quad (8)$$

この乱れの発生方法を用いるためには、乱れの自己相関関数は、式(5)で示されるような形状でなければならない。日本の沿岸海域で観測された流速成分から得られた乱れ成分より求めた自己相関関数は、式(5)での形状とほぼ同様に、遅れ時間の増大とともに単調に減少し、相関係数が零に漸近する形状となることが認められており、前述の仮定が成立し、この手法の適用が妥当であると考えられる。

2-4 数値計算の条件

モデル化した海域としては、直線状の海岸線で半無限の海域を想定し、海域の流動は、半日周潮流成分が卓越しているものとし、潮流振幅、乱れの拡散係数をパラメーターとして、取り込み確率を予測した。一点に投入する粒子の個数は、計算時間、精度等を考慮し、100個とした。

投入された粒子の計算領域での境界条件は、海岸線に到達した粒子は、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た。海域の境界を飛び出した粒子は、再び計算領域には戻ってこないものとした。

2-5 数値シミュレーション結果

モデル化された海域の格子点上に粒子を100個づつ投入し、その軌跡を追跡することにより取り込み確率の計算を実施した。冷却水の取水量が $50 \text{ m}^3/\text{s}$ 、海域での潮流振幅が $20 \text{ cm}/\text{s}$ で乱れの拡散係数が $10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$ の取り込み確率のシミュレーション結果を図-1に示す。ケースAは、最強流速時に粒子が投入された場合であり、ケースBは、転流時に投入された場合である。これらの結果より判断すると、取り込み確率の分布は、粒子投入時の潮流の状態の影響が大で、ケースAでは、取水口から沖合方向に伸ばした線を中心にはほぼ左右対称的な分布となるのに対し、ケースBでは、取水口より右側への範囲が大きくなる。これは、潮流流程の相違で、前者は、投入点を中心に左右対称的な範囲で粒子は運動するのに対し、後者は、投入点から左方向へのみ運動するためである。

投入された粒子に乱れを考慮しないで平均流のみで計算すると一義的に取り込まれる範囲が求まる。この範囲を決定論的な手法による範囲とし、確率論的な手法による範囲と比較した結果を図-2に示す。両者の

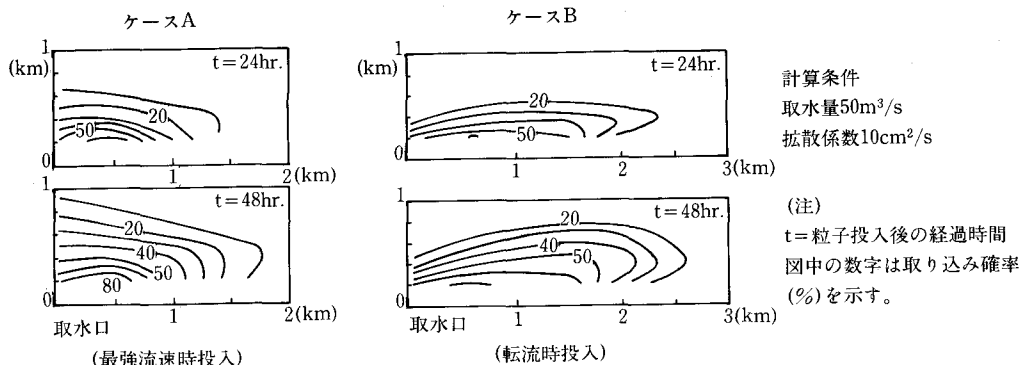


図-1 冷却水取水に伴う取り込み確率の分布

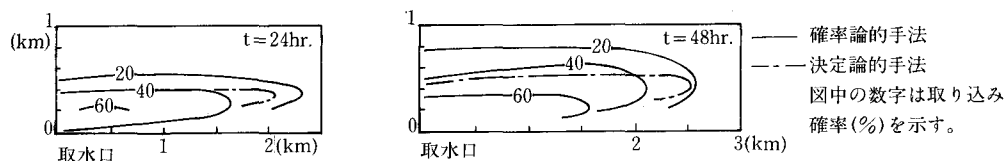


図-2 決定論的手法と確率論的手法による取り込み確率分布の比較

範囲とも潮流の転流時と最強流速時に粒子が投入された場合の範囲を包絡したもので、取り込まれる最大範囲と考えられる。この図からみると、決定論的な手法による範囲は、確率論的な手法によるものの40～50%の範囲に対応していることが認められる。換言すれば、決定論的な手法により得られた範囲内からは、40～50%以上の確率で取り込まれるが、それ以外の範囲からも40～50%以下の確率で取り込まれることを示している。

筆者らは、日本の沿岸海域で想定される流動、拡散特性を対象に、潮流速、恒流速、拡散係数、取水量等をパラメーターとして、取り込み確率の算定を実施し、報告している。上述の結果はその一例であり、詳しくは、文献⁵⁾を参考されたい。

3. 現地海域における魚卵取り込み予測の一例

筆者らが展開した浮遊体取り込み予測のための数理モデルを適用し、魚卵の取り込み予測を実施した適用例を示す。

対象海域は、内海の半日周潮流の卓越する海域で、発電所の取水量は、約40m³/sであった。

3-1 調査結果の概要

調査項目は、魚類プランクトン調査、流動連続観測および浮遊体取り込み量調査である。

魚類プランクトンは、発電所前面海域の20測点でMTDネット(口径56cm)を用いて表層および海面下5m層での水平曳により採集した。その結果を図-3に示す。魚卵は表層に多く、また岸近くに多いことが認められた。

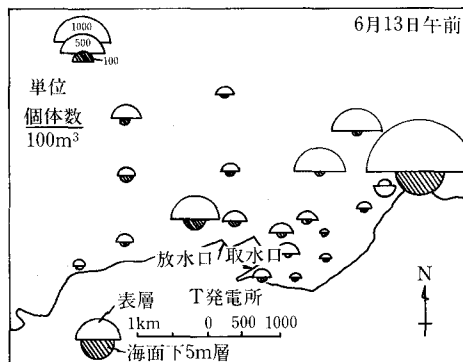


図-3 魚卵分布の調査結果

流動の連続観測は、発電所周辺の5測点で実施された。この流動の観測記録を調解析した結果、本海域では半日周潮流（ M_2 潮流）が卓越し、潮流振幅は、沖合の海域で $20 \sim 30 \text{ cm/s}$ 、発電所前面の湾状海域で 10 cm/s 前後であることが認められた。また、湾状海域には、潮汐残差流としての時計方向の環流の形成されることが認められた。

つぎに、海流くらげ（直径約 18 cm のプラスチック製のくらげ状の円盤）を多数海域に投入し、海面下 3 m 層に浮遊させ、取水口に

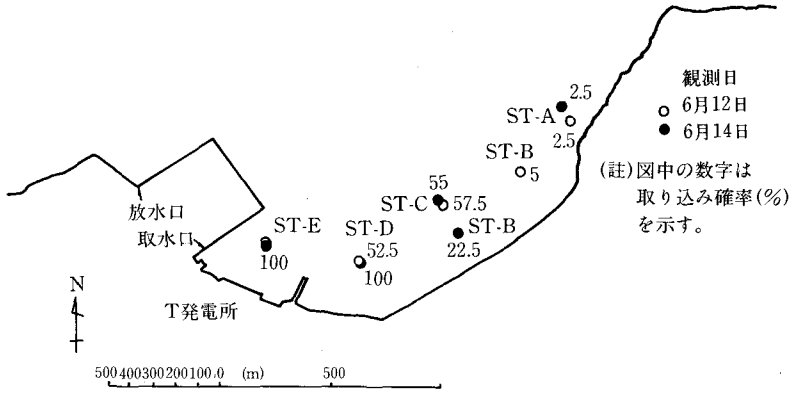


図-4 浮遊体取り込み確率の観測結果（下げ潮時投入）

到達する個数を算定することにより取り込み確率の観測を行なった。結果の一例を図-4に示す。取り込み確率は、取水口前面では大きく、離れるに従い小さな値となることが認められる。

3-2 浮遊体取り込み確率のシミュレーション結果

冷却水取水に伴い取り込まれる浮遊体の確率を予測するモデルは、前述の通りである。そこで、まず対象海域における

平均流としての潮流と冷却水取水に伴う流れを予測した。潮流のシミュレーション結果のうち、上げ潮最強流速時の結果を図-5に示す。

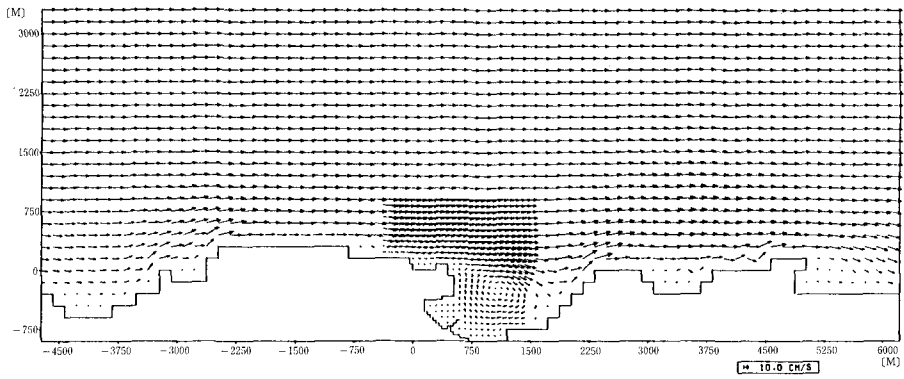


図-5 潮流のシミュレーション結果（上げ潮最強流速時）

発電所前面の

湾状海域に時計方向の環流が認められ、現地海域の流況をほぼ再現しているものと考えられる。流動観測点における半日周潮流の潮流楕円の実測結果とシミュレーションによる予測結果を比較したところ両者は良好な一致を示し、対象海域の潮流は、ほぼ再現されたものと考えられる。この潮流を用いて、冷却水取水に伴う浮遊体の取り込み確率を予測した。海流くらげの投入による取り込み確率の観測結果と比較するために、海流くらげの投入時の潮流の状態と同じ時期に粒子を投入し、取り込み確率を予測した。観測結果と予測結果の比較を図-6に示す。両者は良好な一致を示している。

発電所周辺海域の詳細な取り込み確率の予測結果は、図-7に示す通りである。これは、潮流が下げ潮（西流）の初期に粒子投入後1日での取り込み確率の予測結果である。そのため、取水口より東部海域での取り込み確率は高く、西部海域では低い値を示す。地形に沿った流線の距離でみると、取り込み確率 50% の範囲は、取水口より約 1.5 km 、 20% の範囲は約 2 km となっている。地形も異なり、潮流条件も異なるため一概な比較はできないが、図-1に示すモデル化された海域でのシミュレーション結果と比較する。投入された潮流の状態は、ほぼ転流時であるので、ケースBをみると、取り込み確率 50% の範囲は、取水口よ

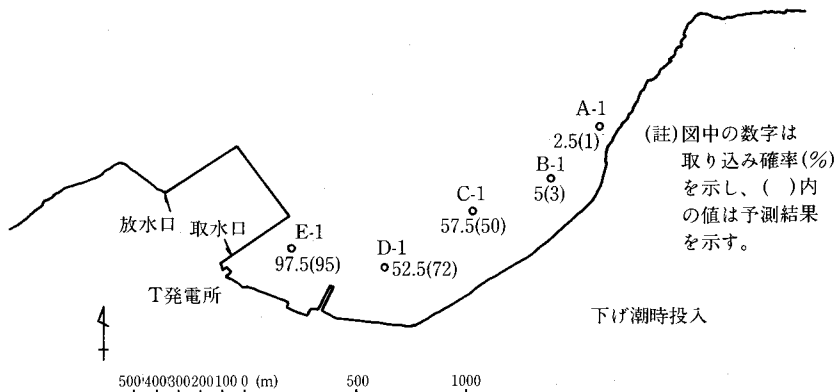


図-6 浮遊体取り込み確率の観測結果と予測結果の比較

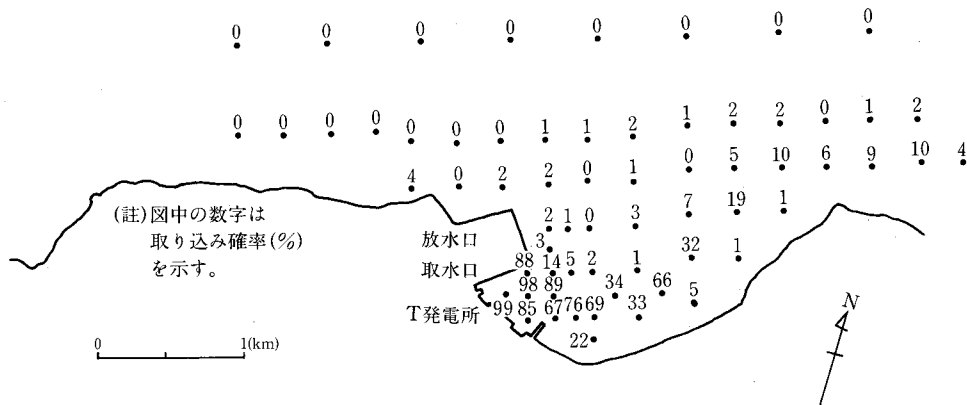


図-7 粒子投入後1日の浮遊体取り込み確率の予測結果

り約 1.5 km, 20 % は約 2.5 km となっており, 地形, 潮流等の相異を考慮すれば, 良い一致と考えられる。換言すれば, 海域の潮流速と乱れの拡散係数が推定されれば, 取水口への取り込み確率は, モデル化された海域での取り込み確率よりほぼ推定できる。

4. 冷却水取水に伴う魚卵の取り込み予測

発電所の冷却水取水に伴う魚卵の取り込み量を予測するためには, 魚の産卵場所と産卵量が判明すれば, その点での取り込み確率を乗じて加え合せることにより求められる。しかし, 現実の海域で産卵場所と産卵量を推定することは至難の業と考えられる。その代替の方法としては, 産卵の盛期に魚卵の密度分布を調査し, 魚卵密度に取り込み確率を乗じて加え合せたもので魚卵の取り込み量と考える手法である。この手法によれば, その時に分布していた魚卵のうちどの程度の割合の魚卵が取り込まれるかが予測される。

この手法を用いて, 調査した稼働中の発電所における魚卵の取り込み量を推定した。取水口における魚卵取り込み量 $Q(t)$ は, 次式で表わされる。

$$Q(t) = \iint P(t, x, y) \rho(x, y) h(x, y) dx dy \quad (9)$$

ここに, $P(t, x, y)$: t 時間後の (x, y) における取り込み確率, $\rho(x, y)$: 魚卵密度, $h(x, y)$: 魚卵の生息する層の厚さ。

式(9)に従い, 図-3に示された魚卵密度の調査結果と, 取り込み確率のシミュレーション結果より魚卵取り込み量を求めた。ただし, $h(x, y)$ は, 調査結果より判断して, 7.5 m とした。図-8は, 魚卵取り込み量の予測結果と, 取水口での調査結果との比較を示す。計算開始の初期の段階では, 予測結果は調査結果に

比較してかなり大きな値を示しているが、半日経過後以後では両者は良好な一致を示している。この結果より判断すると、半日あるいは1日のオーダーで考えれば、魚卵の取り込み量は、予測可能であると考えられる。

5. おわりに

発電所立地に伴う冷却水取水による魚類プランクトンの取り込みが、生物環境に及ぼす影響が懸念されている。本文は、そのための第一歩として、海域に浮遊している魚卵等の浮遊体が冷却水取水に伴い取り込まれる範囲およびその割合を予測する数理モデルの展開と、そのモデルを用いたシミュレーション結果について述べ、現地海域へ適用した例について記した。発電所へ取り込まれる魚卵量については、1日程度の時間スケールでは、予測結果は、調査結果と比較すると良好な適合性を示している。

魚類プランクトンの取り込みが、海域の生物環境に及ぼす影響を予測するためには、例えば、海域の総資源量に対し、取り込まれる魚卵の量がどの程度の割合を占め、それが魚の数世代後にどの程度の影響を及ぼすのかといった一連の研究を実施する必要があるものと考えられる。このためには、生物学的な研究を実施する必要があるが、それとともに取り込み量の定量的な把握が必要である。本研究は、そのための予測手法の検討と、内海に立地された発電所への適用例を示したものである。

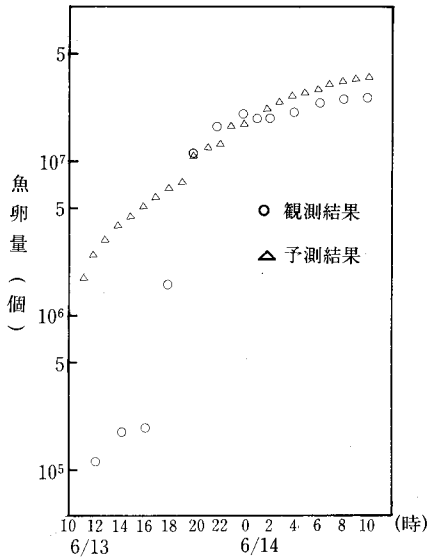


図-8 冷却水取水に伴う取り込み量の予測結果と観測結果の比較

参考文献

1) 例えば, Marcy, B. C. Jr. (1975) : "Entrainment of Organisms at Power Plants, with Emphasis on Fishes : An Overview", Fisheries and Energy Production : A Symposium, S. B. Saila, (Ed.)

2) 角湯正剛・和田 明 (1974) : 瀬戸内海における流況と分散特性, 第21回海岸工学講演会論文集, pp. 297-302.

3) 加藤正進・和田 明・角湯正剛 (1978) : 福島沖合海域における流動と拡散特性, 第22回水理講演会論文集, pp. 55-60.

4) Hall, C. D. (1975) : The Simulation of Particle Motion in Atmosphere by Numerical Random Walk Model, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, No.101, pp. 235-244.

5) 角湯正剛・和田 明 (1979) : 冷却水取水に伴い取り込まれる浮遊体の確率的検討, 電力中央研究所土木技術研究所研究報告 Ⅲ 378027.