

冷却水取水に伴う取り込み範囲の汎用図

角 湯 正 剛*・ 和 田 明*・ 片 野 尚 明*

1. 概 説

沿岸部に立地された火力、原子力発電所の冷却水取水に伴う魚卵等の浮遊体の取り込み範囲を予測することは、発電所の冷却水取水に伴う影響評価を行う上で重要である。このため、筆者らは、流動の乱れを考慮した確率論的な手法を用いて海中に浮遊している浮遊体の取り込まれる範囲を予測する手法を開発し¹⁾、内海域において浮遊体の取り込み確率を観測し、その観測値と数理モデルを用いた予測値との比較から用いた数理モデルの適合性を検討してきた²⁾。

本文では、日本の沿岸海域で観測された流動連続観測記録の統計解析結果から得られた海域の流動特性を類型化し、流動特性、拡散係数、冷却水取水量、地形特性等をパラメーターとして、取り込み範囲とその割合を示す汎用図を提示する。さらに、この汎用図を用いて予測した取り込み確率と、内海域および外海域において浮遊体を用いて実施した取り込み確率の観測値とを比較し、汎用図の適合性を検討する。

2. 冷却水取水に伴う取り込み予測の数値モデル

2.1 数値モデルの基本的考え方

冷却水取水に伴う浮遊体の取り込み現象を予測するためには、海域の浮遊体が流動の乱れで拡散する状況を再現することが必要である。この場合、海域での流動をどのように評価するかが重要な問題である。

わが国周辺の沿岸海域での流動は、大別すると次の2つの型に分類される³⁾。

- (1) 潮流流による周期的な往復流の卓越している場合（瀬戸内海、東京湾、伊勢湾等の内海、内湾で観測される）
- (2) 明瞭な周期成分は認められず、不規則な流れの卓越している場合（太平洋、日本海等の外海域に面した沿岸域で観測される）

前者の内海、内湾での流れは、周期的な往復流である潮流流や定常的な流れである潮汐残差流という規則的な

流れに不規則な乱れ成分の重畳したものであり、後者の外海に面した沿岸域で観測される流れは、周期的な往復流成分はなく、ある期間を対象とすると、一方向に流れる恒流成分に不規則な乱れの重畳したものと考えられる。

それ故、潮流流、恒流等の規則的な流れと、不規則な流れとを数理モデルで再現できればこれを重畳することにより海域で観測される流れと考えることができる。

海域での流動が再現されると、これに冷却水取水に伴う流動とを加え合わせて海域の流れとし、海域に配置した粒子群は、これらの流れで移動するものとし、それらの位置の変化を追跡し、取水口へ到達する粒子の割合を求めることにより取り込み確率を予測できる。

2.2 海域の流動および冷却水取水に伴う流動の数値モデル

海域の流動を予測するための数値モデルは、三次元の Navier-Stokes の式を鉛直方向に積分した次式を用いる。

$$\frac{\partial M}{\partial t} + U \frac{\partial M}{\partial x} + V \frac{\partial M}{\partial y} = -g(H+S) \frac{\partial S}{\partial x} + A_h \nabla^2 M - \tau_x \quad \dots\dots\dots (1)$$

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

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

$$\left. \begin{aligned} M &= \int_{-S}^H u \, dz = U(H+S) \\ N &= \int_{-S}^H v \, dz = V(H+S) \\ \nabla^2 &= \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 τ_x 、 τ_y は海底での摩擦を示す項で次式で表わされる。

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

x, y : 水平方向の座標, u, v : x, y 方向の流速, H : 水深, S : 水面昇降量, g : 重力加速度, A_h : 水平方向の渦動粘性係数, K_b : 海底摩擦係数

* 正会員 工博 (財)電力中央研究所土木研究所

式(1),(2)および(3)が基本式で、これらを差分化し、適当な境界条件の基で数値計算を実施することにより海域の流動が再現される。

2.3 流動の乱れの数値モデル

流動の乱れの再現方法としては、種々提案されているが、本文においては、乱れが一次マルコフ過程に従うとしたモデルを用いる⁴⁾。

乱れが一次マルコフ過程に従うとし、 $(i+1)$ ステップの乱れを次式で表わす。

$$v_{i+1} = \rho v_i + \gamma_i \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 v_i : i ステップの乱れ、 ρ : $0 < \rho < 1$ の定数、 γ_i : $N(0, \sigma_r^2)$ の正規乱数

式(6)より自己相関関数を求めると、 v_i と γ_i は独立なので

$$\begin{aligned} R(n\Delta t) &= \overline{v_i \cdot v_{i+n} / v_i^2} \\ &= (\rho^n v_i^2 + \rho^{n-1} v_i \gamma_i + \dots + v_i \gamma_{i+n-1}) / v_i^2 \\ &= \rho^n \quad \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

ここに、 Δt : i と $i+1$ ステップの時間間隔

Integral Time Scale T_L を導入することにより、 ρ は次式から決定される。

$$T_L = \int_0^\infty R(\tau) d\tau = \int_0^\infty \rho^{\tau/\Delta t} d\tau = -\frac{\Delta t}{\ln \rho} \quad \dots\dots (8)$$

$$\rho = \exp(-\Delta t / T_L) \quad \dots\dots\dots (9)$$

式(6)の両辺の分散を求めることにより

$$\sigma_r = \sqrt{1 - \rho^2} \sigma_v \quad \dots\dots\dots (10)$$

σ_v^2 : 乱れの自乗平均

式(9),(10)で T_L , σ_v を与えることにより ρ , σ_r が決定され、式(6)を用いて初期値を設定することにより乱れを順次発生することができる。

この手法を用いるためには、乱れの自己相関関数は、式(7)に示すような形状でなければならない。これまで日本の沿岸海域で観測された流速変動から、内海域では半日以上、外海域では、ある時間スケール以上の周期を有する長周期成分を除去した残りの乱れ変動成分から求めた自己相関曲線は、遅れ時間の増大とともに指数関数的に相関係数が減少する形状となり、式(7)に近い形状を有する。それ故、ある時間スケール以下の高周波の乱れ成分については、式(6)で示すモデルにより再現することができる。

2.4 数値計算の条件

(1) 数値計算上の粒子を追跡する時間間隔は、1ステップで最小の格子間隔を飛び越えないことから、次の条件が定まる。

$$\Delta t < 4S_{\min} / U_{\max} \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 $4S_{\min}$: 最小格子間隔、 $U_{\max}$: 最大流速

ただし、乱れが式(7)の自己相関曲線となるためには Δt は、 $\Delta t < T_L / 10$ でなければならない。

(2) 計算境界での条件は、海域境界と陸地境界で異なり、海域境界では、十分広い領域を採用すれば、一旦境界から飛び出した粒子は、再び戻ってこないという条件を採用できる。陸地での境界条件は、種々考えられるが、浮遊体での実測等から判断して、岸に到着した粒子は、一旦その点に留め、沖へ向う乱れの生じた時に沖合へ飛び出すという条件を採用する。

(3) 数値計算を実施する期間としては、生物学的立場からは、産卵から遊泳力を有する稚仔にまで成長する期間、物理的な面からは、取り込み確率が定常値に達するまでの期間が対象となろう。前者では対象とする魚種、後者では流動特性や拡散係数により対象となる期間は異なるが、これまでの現地海域を対象とした数値計算結果から判断すると、3日～5日程度の時間スケールを考えれば充分であろう。

3. 汎用図の数値計算条件と計算結果

3.1 計算条件の設定

冷却水取水に伴う取り込み範囲の汎用計算図表の作成に当っては、直線状の海岸線で半無限状の海域と、港湾施設を有した半無限状の海域とを対象とし、流動および拡散特性を考慮し表-1に示す類型に分類した。

このように類型化したそれぞれの海域について、冷却水取水量、海域での流速、拡散係数等を組み合わせて得られた合計 43 ケースの取り込み確率の数値計算を実施した。

表-1 類型化した海域での数値計算条件

海域類型	地形条件	冷却水取水量 (m^3/s)	沿岸流の条件	拡散係数(cm^2/s)		計算ケース
				Kx:沿岸に平行	Ky:沿岸に直角	
沿岸の流れの周期性が微弱な海域	直線状	50, 100, 200	恒流成分なし	10^4 5×10^4 10^6	10^4 5×10^4 10^5	6
		50, 100	恒流成分考慮: 流速は10, 20	10^4 5×10^4 10^5	10^4 5×10^4 10^5	16
		200	および30 (cm/s)形式	10^4 5×10^4 10^5	10^4 5×10^4 10^5	9
沿岸の流れの周期性が顕著な海域	直線状	50, 100	半日周潮流考慮: 潮流振幅10, 20, 30 (cm/s)	10^4 5×10^4 10^5	10^4 5×10^4 10^5	12
		100	および30 (cm/s)	10^4 5×10^4 10^5	10^4 5×10^4 10^5	

3.2 数値計算条件

数値計算の条件としては、(1)海域の流動および拡散条件、(2)冷却水取水量、(3)取水される流動層および取水流速、(4)海岸地形条件、(5)沿岸流の流速分布等が考えられる。これらの項目について順次検討する。

(1) 海域の流動および拡散条件: 日本の沿岸海域の流動は、前述の通り、周期的な往復流と恒流とに分類される。内湾あるいは内海で観測される周潮流成分は、主

として半日周潮流であり、その潮流振幅は、局所的には大きい場合も認められるが、平均的には $10 \sim 30 \text{ cm/s}$ 程度が多いのでこれらの値を対象とすれば良いと判断される。また、外海域に面した沿岸域で観測される恒流についても、その流速値は、短期的には大きな場合も認められるが、1日以上時間スケールを対象とすると、 $10 \sim 30 \text{ cm/s}$ 程度であることが、これまでの観測結果から示されている。

拡散条件としては、沿岸に平行な方向 (K_x) およびそれに直角方向 (K_y) の拡散係数を与えねばならない。これまでの日本の沿岸海域で観測された流動記録の統計解析結果から判断すると、内海域においては、拡散係数は潮流振幅の大きさにより変化し、 $10^4 \sim 5 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$ 程度であり、 K_y は K_x に比較すると、同程度か半オーダー程度小さな値となる。外海域においては、海域での流速の大きさと対象とする時間スケールにより変化し、 $10^4 \sim 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$ 程度の変化を示し、また、 K_y は K_x に比較すると同程度か1オーダー程度小さな値を示している。

(2) 冷却取水量: 冷却水の使用量は、発電所の種類と出力により決定されるが、汎用図の作成に当っては、発電出力を 100 万 kW から 400 万 kW 級を対象として、 $50, 100, 200 \text{ m}^3/\text{s}$ の3ケースを考える。

(3) 取水される流動層および取水流速: 発電所の取水型式は、深層の冷水を取水する目的で、深層取水型式が近年多く用いられている。この場合、取水口近傍では、深層水のみを取水していると考えられるが、海域の鉛直方向の密度分布が一様分布の場合には、取水口から少し離れた領域では、流速分布は鉛直方向に一樣とみなせる。取水流速の設計値は、主として $10 \sim 30 \text{ cm/s}$ であり、この範囲内では取水流速により取り込み確率の変化する割合は小さいので、取水流速は 20 cm/s とする。

(4) 海岸地形条件: 発電所立地点の海岸地形条件は、千差万別であるので、直線状の海岸線を基本とする。ただし、外海に面して立地された発電所においては、燃料搬入等のため港湾施設を設ける例が多く認められるため、外海域の条件としては、直線状の海岸線と沖合方向 1 km 、沿岸方向 1 km 程度の港湾施設を設けた場合の2種類の海岸地形を想定する。

(5) 沿岸流の流速分布: 直線状の海岸線では、沿岸流(潮流, 恒流)は、沿岸方向には一定とみなせるが、沖合方向には地形の影響を受け、流速分布は分布形を有する。前章の流動の数値モデルを用いて数値計算した結果、沿岸流は、沖合方向には、次式で示す分布を有するとする。

$$U(y) = \begin{cases} u_1 y^{1/4}, & 0 \leq y \leq 1 \text{ km} \\ = u_1, & y > 1 \text{ km} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (12)$$

y : 沿岸から沖合方向の距離 (km), u_1 : 1 km 以遠での流速

港湾施設を有する場合の恒流速分布は、海岸構造物の境界条件を設定した数値計算結果を用いた。

4. 汎用図の作成

流動条件, 地形条件, 冷却水取水量, 潮流振幅, 恒流速および拡散係数をパラメーターとして取り込み確率の数値計算を実施し、それらの結果から取り込み範囲とその割合を示す汎用図を作成することにする。

汎用化のパラメーターとしては、取り込み確率の平面方向の積分値が取水量の総和に等しく、取り込み範囲がほぼ取水量に比例することから、距離については無次元とはならないが、沿岸に平行な方向、それに直角な方向の距離 X, Y を $\sqrt{Q}$ (Q : 取水量) で除した $X/\sqrt{Q}$, $Y/\sqrt{Q}$ (X, Y (m), Q (m^3/s)) を採用した。

各流動条件, 地形条件について作成した汎用図の一例を図-1~4に示す。沿岸の流れの周期性が顕著な海域においては、計算を開始した時の潮流の状態を取り込み範囲は変化するため、最強流速時と転流時における範囲を示している。また、数値計算の期間としては、5日間としている。

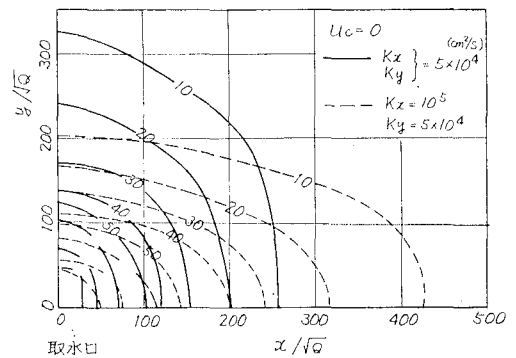


図-1 取り込み範囲の汎用図 (沿岸の流れの周期性が微弱で恒流の存在しない海域)

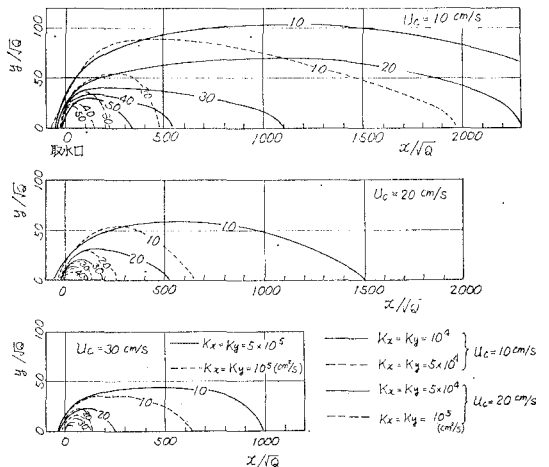
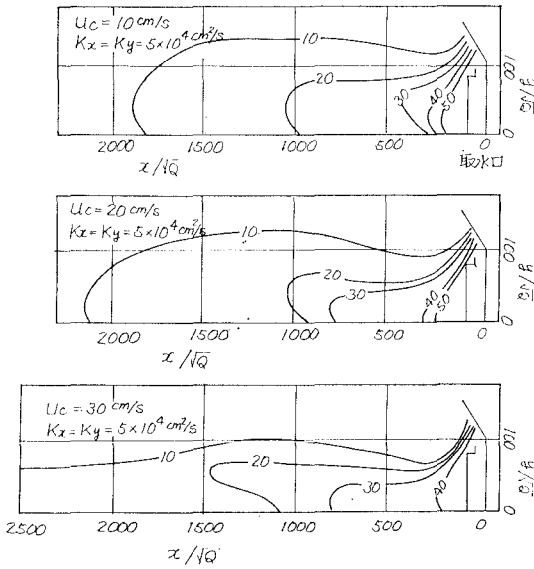
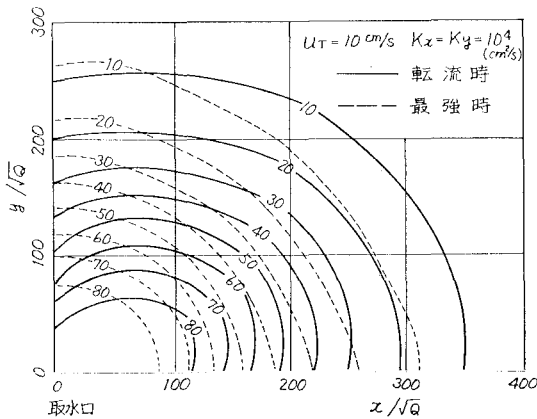


図-2 取り込み範囲の汎用図 (恒流の存在する海域)



図—3 取り込み範囲の汎用図 (恒流の存在する海域, 港湾型式)



図—4 取り込み範囲の汎用図 (潮流の存在する海域)

これらの結果から、取り込み範囲は、流れ、特に一方向に流れる恒流の影響が顕著であることが認められる。また、拡散係数の影響については、沿岸流の存在する場合には、流れが沿岸方向であるため、沿岸方向よりもそれに直角方向の拡散係数の影響が大きい。沿岸の流れの周期性が顕著な海域においては、最強時に計算を開始した場合は、取り込み範囲は取水口を中心にほぼ左右同じ範囲となるが、転流時の場合には、取水口の片側へ片寄った範囲となる。両者の差は、潮流振幅が大きい程大きくなる。

5. 現地海域への適用

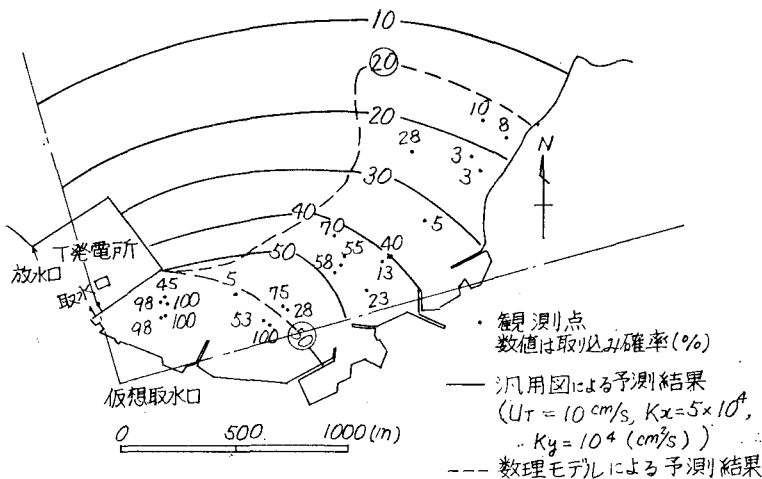
取り込み範囲の汎用図を現地海域へ適用する場合、次の限定条件が存在する。まず、地形条件としては、直線状の海岸線か、図—3 に示す程度の港湾施設を設けた地形であること、そして、海域の流動特性は、表—1 に示す条件であることである。

本章では、内海域と外海域で、浮遊体 (直径約 18 cm のプラスチック製のくらげ状の円盤) の取り込み確率を観測した地点に汎用図を適用し、その適合性を検討する。

5.1 内海域への適用

流れの周期性の顕著な海域に面して立地されたA地点 (冷却水取水量 42.5 m³/s) に汎用図を適用した場合について検討する。

A地点の取水口は、図—5 に示す通り湾状地形の湾奥部に位置しており、前面海域では半日周潮流が卓越し、その潮流振幅は、湾状海域では約 10 cm/s、沖合海域では約 30 cm/s であり、湾状海域では時計方向の環流の形成される複雑な流況を示しており²⁾、汎用図の適用の困難な海域である。しかし、西流の流動は、比較的地形に沿った流れとなり、この場合の流動は、地形が直線状で



図—5 取り込み確率の観測値と汎用図を用いた予測値との比較 (内海域)

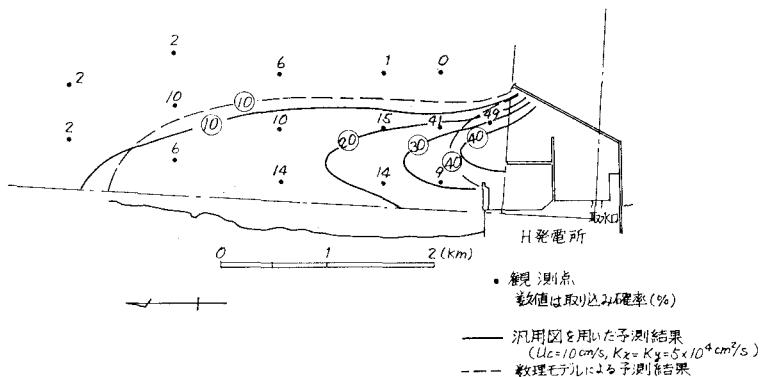


図-6 取り込み確率の観測値と汎用図を用いた予測値との比較(外海域)

はないが、汎用図の条件に適合しているのでこの場合の観測値と、汎用図を用いた予測値との比較を行う。この比較結果は、図-5に示す通りである。汎用図の取水口の位置は、地形の再現性を考慮して、南東方向に移動させている。流況が複雑なため沖合方向の範囲は、予測値がかなり大きいが、沿岸方向については両者の適合性は良好である。図中に数値計算により予測した範囲を示しているが、汎用図とは、沿岸方向の範囲はほぼ適合している。

5.2 外海域への適用

流れの周期性が微弱で、恒流の存在する外海域に面して立地されたB地点(冷却水取水量 $53 \text{ m}^3/\text{s}$)に汎用図を適用した場合について検討する。

B地点の取水口は、図-6に示す通り、港湾施設の港奥に位置し、前面海域では、南流または北流の恒流が存在し、3日または5日の間隔で転流し、その流速は、 $10 \sim 20 \text{ cm/s}$ である。地形は、ほぼ直線状であり、汎用図の適用条件は満足されている。

B地点で実施した浮遊体取り込み確率の観測値と汎用図を用いた予測値との比較は、図-6に示す通りである。取り込み確率の観測値は、観測時の条件でかなり変化するが、図中に示したのは、5回の観測時の平均値であり、その恒流は、南流で約 10 cm/s であった。汎用図による予測値と観測値とを比較すると、両者はほぼ適合しており、汎用図の適合性は良好である。図中に数値計算を用いて予測した取り込み範囲を示しているが、汎用図の予

測範囲との適合性は良い。

6. 結 論

沿岸部に立地された発電所の冷却水取水に伴う取り込み範囲とその割合を簡単に予測する汎用図を、冷却水取水量、海域の流動特性、拡散係数、地形条件をパラメーターとして作成した。

この汎用図を浮遊体を用いて取り込み確率の観測を実施した内海域、外海域の2地点へ適用し、汎用図による予測範囲と観測値とを比較した。その結果、両者の適合性は良好であり、汎用図の現地海域への適用性が立証された。

本文で提案した汎用図を現地海域へ適用する場合、地形は、直線状の海岸線であるか、図-3に示す程度の港湾施設を有すること、流動条件は、表-1に示す条件であることの条件を満足する必要がある。

参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) 角湯正剛・和田 明: 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, pp. 614~618, 1982.
- 3) 和田 明・片野尚明: 海域での温排水拡散に及ぼす流れの影響, 電力中央研究所研究報告, No. 71008, 1972年1月.
- 4) Hall, C. D.: The simulation of particle motion in the atmosphere by numerical random walk model, Quart. J. Met. Soc. No. 101, pp. 235~224, 1975.