

冷却水取水に伴い取り込まれる浮遊体の確率的検討

Stochastic Study on Entrainment of Floating Particles
with Intake of Cooling Water

(財) 電力中央研究所 正会員 ○角 湯 正 剛

(財) 電力中央研究所 正会員 和 田 明

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、復水器を通過し、放水口より放出される間の機械的損傷や熱的履歴により損傷されることが報告されている。¹⁾ 近年の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。これらの問題を検討するためには2つの方法が考えられる。その1つは従来より実施されてきた決定論的な手法と他の1つは海域の流動の乱れを考慮した確率論的な手法である。前者によると、海域の平均的な流動と冷却水取水に伴う流動が予測できればその流線より比較的簡単にプランクトンや卵稚仔等の浮遊体が取水口に取り込まれる範囲を予測できるが、この手法では現地海域での現象とはかなり相異なる。すなわち、海域の流動は乱流状態であり、乱れ成分によりある一点に投入された粒子群は、時間の経過とともに分散するため取水口に取水されるものとされないものとが生じる可能性がある。それ故、後者のような海域の乱れを考慮した確率論的な手法が必要となる。

本研究は、これらの観点より、海域の平均的な流動および冷却水取水に伴う流動を数理モデルによりシミュレートし、これら以外の不規則な乱れを乱数を発生させることにより考慮して、プランクトンや卵稚仔等の海中に浮遊している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確率論的に検討したものである。²⁾

2. 沿岸海域における流速変動の特性

日本の沿岸海域における流動は、瀬戸内海や東京湾、伊勢湾等の内海域と、日本海、太平洋等に面した外海域とでは、その特性が明瞭に異なる。前者の海域では、日または半日という明瞭な周期を有した周潮流成分が卓越するのに対し、後者の海域では明瞭な周期性を有した成分は存在せず、様々な周期を有した成分の合成されたものと考えられる。

筆者らは、瀬戸内海および福島沖を対象として、内海域と外海域の流況および分散特性について検討を行ってきた。^{3), 4)} その結果、内海域における流れは、周期的な往復流成分とそれに上畳した乱れの和と考えられ、この乱れは、G.I.Taylor がラグランジ的な流速変動を用いて定義した拡散係数をオイラー的な流速変動に変換した拡散係数を用いると、潮流振幅の大きさにより変化するが、 $10^4 \sim 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$ であることが認められている。また、外海域における流れは、内海のように卓越した周期を有する流速成分は存在せず様々な周波数成分を有したものであり、観測された流速変動からある周期より長い周期成分を除去した流速変動より前述の拡散係数を算定すると、海域によりその値は変るが、ある定点では、その値は季節的な変動は小さく、ほぼ1オーダ内での変化であることが認められている。それ故、外海域においては、数日という時間スケール内の拡散現象を対象とする場合においては、流れは、その期間内の平均流(恒流と定義する)に乱れが上畳したものと考えることができる。

沿岸海域における流れは、それ故、内海域における周潮流成分、外海域における恒流成分という平均的な

流動と、拡散係数という1つのパラメーターで表現される乱れ成分の和として考えることができる。

3. 乱れ成分のシミュレーション

不規則な乱れ成分をシミュレートする方法としては、筆者らが既に報告しているように日野の提案した乱子モデルによる方法と、乱流速度が一次マルコフ過程に基づくとしたマルコフモデルによる方法⁷⁾がある。前者は、乱れを様々な大きさを有した乱子の和と考え、様々な乱子を乱数を発生させることによりシミュレートし、その和として乱れを発生させるものであり、後者は、乱流速度の時系的な変動が、一次のマルコフ過程に従うものとして、乱子モデルと同様乱数を発生させることにより乱れをシミュレートするものである。両者とも乱れの特性格として、乱れ変動速度の自乗平均値 $(\overline{v'^2})$ と乱子の最大寿命時間またはインテグラルタイムスケール $(\theta = \int_0^\infty R(\tau) d\tau, R(\tau): \text{乱流速度の自己相関関数})$ という2つの量で規定されるが、この2つのものより拡散係数が算定でき、拡散係数という1つのパラメーターで乱れが規定できる。

この手法によりシミュレートされた流速変動と現地海域で観測されたものとの適合性を検討するために、両者の自己相関関数とエネルギースペクトラムについて比較した。その結果を図-1に示す。ここで用いた観測記録は、周潮流成分の卓越した瀬戸内海で、アンデラ型流速計により5分間隔で約3日間観測されたものである。図-1の自己相関関数、エネルギースペクトラムの結果は、現地海域の観測結果より求めたものは、原データより周潮流成分を除去した高周波成分によるものであり、シミュレーション結果は、マルコフモデルにより、観測結果より求めた $\overline{v'^2}$ と θ を与えたものである。自己相関関数、エネルギースペクトラムとも両者は良く一致し、高周波の乱れは、この手法により充分再現できるものと考えられる。

4. 冷却水取水に伴い取り込まれる浮遊体の確率的検討

冷却水取水に伴い取り込まれる卵稚仔の問題を取り扱うに当り考慮すべきことは、卵または遊泳力を有しない稚仔より遊泳力を有する幼魚にまで成長に要する時間である。この期間の卵稚仔は、遊泳力を有さず、水粒子のように運動すると考えることができ、本文ではこの期間を対象としている。この期間は、もちろん種により異なるが、本文では、海域に卵稚仔を模擬させた粒子が投入されてから数昼夜にわたりシミュレートすることを考える。そのため前述の通り、海域における流れを平均流と冷却水取水に伴う流れの和として与え、各点に投入された粒子に乱れ成分を与え、取水口に到達した粒子の個数を計算することにより取り込まれる確率を検討する。

4-1 数値計算の条件

対象海域としては、図-2に示すような半無限状の海域を考え、

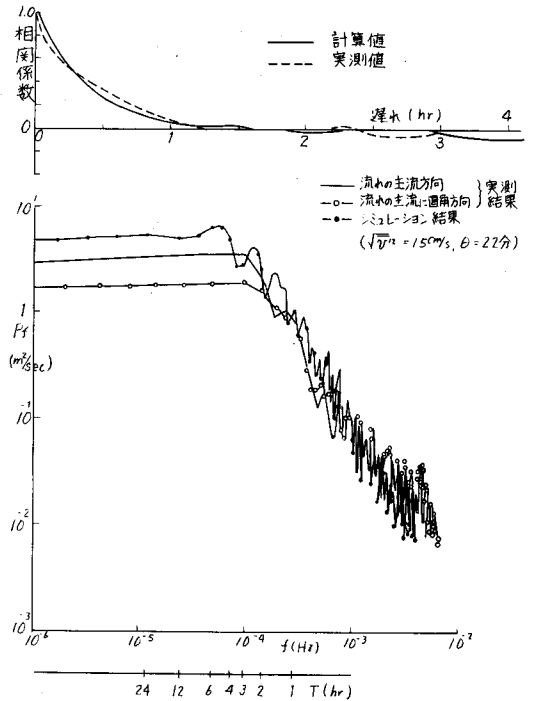


図-1 実測値と計算値による自己相関関数、パワースペクトラムの比較

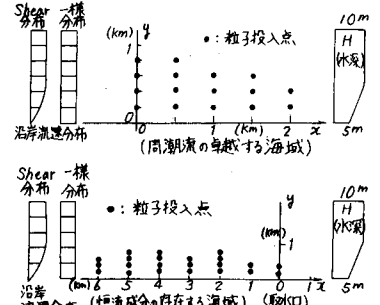


図-2 計算対象海域

直線の海岸線に位置した取水口より取水された場合を想定した。海域の水深は図に示す通りで、海域の海水密度は一定とし、冷却水取水に伴う流れは、表層より底層まで一様な流速で取水されるものとし、取水口での流速は20または40 cm/s とした。取水量としては、1,000または2,000 MW程度の発電所を想定して、50 m^3/s と100 m^3/s の2ケースを考え、海域の流動条件としては、内海域を対象とした潮汐による半日周期の往復流成分の場合と、外海域を対象とした一方向へ流れる恒流成分の場合を考えた。往復流の場合の潮流振幅は、10, 20, 30 cm/s の3ケース、恒流の場合の恒流速は10, 20 cm/s の2ケースとした。これらの流速成分の沿岸に直角な方向の分布は、図-2に示すように、沿岸より沖合まで一様の場合と、沿岸に近づくに従って流速が減少するいわゆる shear 分布の場合を考えた。乱れのパラメーターである拡散係数は、沿岸に平行な方向 (K_x) については、これまでの観測結果より判断して、全海域で一定としたが、沿岸に直角方向 (K_y) については、沿岸流速が一様の場合には、 K_x と同様一定としたが、shear 分布の場合は、スケールの $1/3$ 乗則を用いた次式を用いた。ただし、 K_y は K_x より大きくならないものとした。

$K_y = \alpha l^{1/3} \dots \dots (1)$, ここに (K_y : 拡散係数 (cm^2/s), α : 定数 ($= 0.01$), l : 沿岸までの距離 (cm))

計算領域の境界での条件としては、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。また、海域の計算領域を飛び出した粒子は、その段階で計算を終了し、再び計算領域に戻ってこないものとした。

4-2 周期的な往復流の卓越する海域におけるシミュレーション結果

内海や内湾のような周期的な往復流の卓越する海域においては、前述の海域の流動および拡散特性がパラメーターとなるが、それ以外に、粒子が投入された時の潮流の状態もパラメーターとなる。すなわち、潮流の最強時に投入された場合は、粒子はその点を中心に往復運動をすることになるが、転流時に投入された場合は、その点より次の転流時までの間、潮流の流程だけ移動し、この点と投入点の間で往復運動することになり、同一の投入点であっても前者と後者では往復運動する領域が異なるために取り込み確率も異なることになる。そこでまず最強流速時に粒子が投入された場合について検討する。

海域に投入された粒子は、時間の経過に従い取水口に取り込まれるが、その時間経過の一例を図-3に示す。図の縦軸は、 $(1-P)$ (P : 取り込み確率) であり、これは海域に残存している粒子の割合を表わし、図の横軸は、粒子投入後の経過時間 (t) の3乗根である。この図より、取水口の近傍に投入された粒子は、投入後直に取り込まれるが、遠方の投入点ではかなりの時間経過した後に取り込まれ、その割合も小さいことが認められる。また、残存率の時間経過は、取り込まれる初期段階を除いてほぼ直線となり、残存率は、時間の $-1/3$ 乗で指数関数的に減少することが認められる。

取り込み確率の範囲の水平分布を図-4に示す。潮流振幅の小さい場合には、取水口を中心にほぼ楕円形状の取り込み範囲が描かれているが、潮流振幅が大きくなると取水口沖合よりはむしろ沿岸方向に0.5~1 km離れた投入点の方が取り込み確率が大きくなっている。粒子の投入時が最強流速時であり、そのため取水口前面の投入点では、粒子が

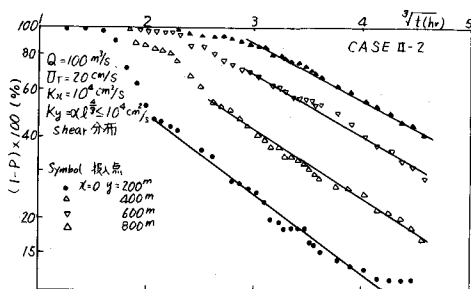


図-3 取り込み確率の時間変化

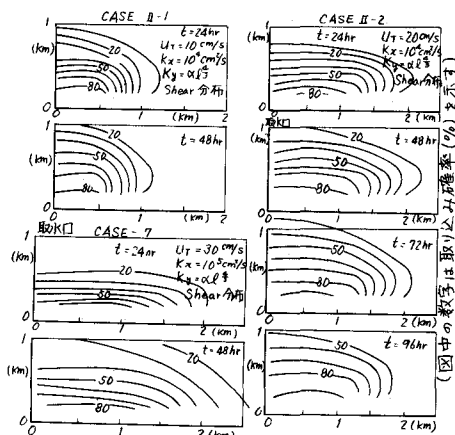


図-4 取り込み範囲とその確率 (最強流速時投入)

取水口よりかなり離れた時に分散するのに対し、取水口より0.5 km程度離れた投入点では、取水口前面に粒子群が到達する時点で少し分散しているため比較的初期に大量に取り込まれるためである。潮流振幅の大きさが取り込み確率に与える影響をみるために、 $P=20\%$ 、 50% について、粒子投入後2日での沿岸方向の取り込み確率の分布を図-5に示す。図の横軸は、潮流流程($\ell_T = \int_0^{T/2} v_T \sin(2\pi/T) dt = v_T \cdot T/\pi$, T :潮流の周期)で無次元化されている。10%程度の確率で取り込まれる沿岸方向の範囲は、取水量に拘らず沖合200 mの投入点では、潮流振幅が 10 cm/s で潮流流程の約1.5倍、潮流振幅が $20, 30 \text{ cm/s}$ の場合は、約1倍であり、沖合400 mの投入点では、前者は約1.2倍、後者は約0.8倍の範囲である。つぎに、潮流振幅が同じで拡散係数の異なる場合の沿岸方向の取り込み確率分布を図-6に示す。10%程度の確率で取り込まれる範囲は、拡散係数が $10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$ と大なる場合は、沖合200 mの投入点で潮流流程の約1.3倍、沖合400 mで約1倍であるが、その他の場合は前者が約1倍、後者が約0.8倍である。これらの結果より判断すると、潮流振幅の小さい場合は、投入された粒子群の分散の影響が強く現われ、沿岸部においても潮流流程の1.5倍程度の範囲が取り込まれる範囲となるが、潮流振幅が大なる場合は、沿岸部においても潮流流程の範囲しか取り込まれない。また、取水流速の影響も小さい。

沖合方向の取り込み確率の分布については、取水量が重要な役割を果たすと考え、取水のみの流動により取水口沖合に投入された粒子が取水口に到達する時間を求めた。その結果、取水量 $50 \text{ m}^3/\text{s}$ の場合は、投入後1日で610 m、2日では820 m、取水量 $100 \text{ m}^3/\text{s}$ の場合は、取水流速 20 cm/s 、 40 cm/s ともほぼ同じで、1日では約800 m、2日では約1,100 m沖合より投入された粒子が取水口に到達する。そこで、これらの取水流動だけで到達する距離(y_t)で無次元化した沖合方向の距離を用いた沖合方向の取り込み確率分布を図-7に示す。潮流振幅の小さい 10 cm/s の場合の方が、大きな $20, 30 \text{ cm/s}$ より全体に取り込み確率が大きくなっている。 $y/y_t = 1$ 、すなわち、取水のみの流動で到達する最大範囲では、投入後1日で取り込み確率は10~25%、2日では20~30%と比較的一定の値を示している。潮流振幅が同じで、拡散係数等を変化させた

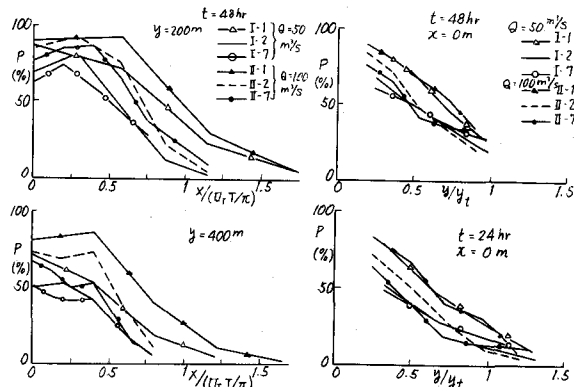


図-5 沿岸方向の取り込み確率分布

図-7 沖合方向の取り込み確率分布

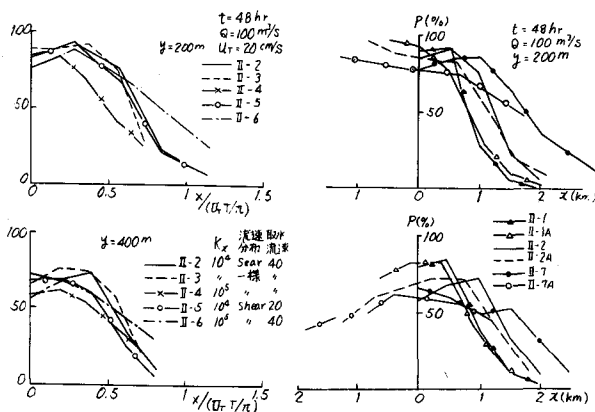


図-6 沿岸方向の取り込み確率分布

図-8 沿岸方向の取り込み確率分布

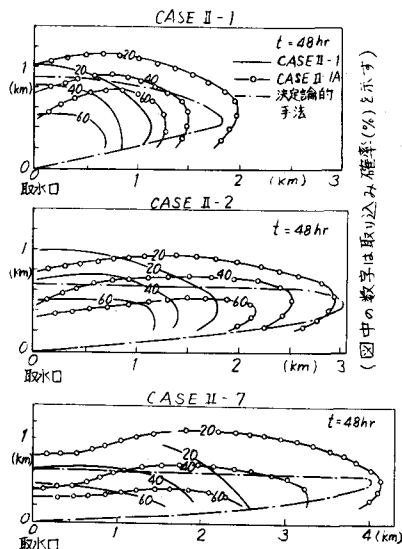


図-9 取り込み範囲とその確率 (転流時投入)

場合の沖合方向の取り込み確率の分布は、紙面の関係上割愛するが、ほとんど同じ分布となった。これらより判断すると、沖合方向の取り込み確率は、拡散係数等の影響は小さく、取水量の影響が大である。

海域に粒子が投入された時の流れの状態による取り込み確率の変化をみるために、流れの転流時に粒子が投入された場合の取り込み確率を求めた。最強流速時に投入された場合との比較を行うために投入時点の流れの状態以外は全て同じ条件でシミュレートした。この場合のケース番号は、最後に添字Aをつけた。転流時に投入された粒子は、最強時に投入されたものとは流程が異なるため、取り込まれる確率は、両者でかなり異なる。図-9にその結果を示すが、転流時に投入された場合の取り込み確率分布は、最強流速時に投入されたものが沿岸方向に引き延された範囲となっている。そこで、転流時に投入された場合については、最強流速時に投入された場合と比較するため投入された粒子が往復運動をする流程の中心を仮想の投入点とした。この仮想の投入点を求める時には取水流速の影響は考えていない。図-8に沿岸方向の取り込み確率分布を示す。投入時の流れの状態以外は同じ条件の場合を比較すると、取水口近傍では異なる場合もあるが、取水口より1 km以上離れると両者はほぼ一致している。投入された時の流れの状態が異なっても粒子の潮流流程の範囲が同じであれば取水口近傍を除き取り込まれる確率は、ほぼ同じである。つぎに、確率論的な手法による結果と、決定論的な手法による結果を比較する。決定論的な手法により取り込まれる範囲は、取水口に到達する粒子を順次時間を遡って追跡し、その包絡範囲より求めることができる。この範囲は、最大取り込み範囲である。確率論的な手法による最大取り込み範囲は、最強時と転流時に粒子が投入された場合の両者の包絡範囲と考えられる。その両者の比較を図-9に示す。決定論的な手法により取り込まれる範囲は、潮流振幅の大きさに拘らず沿岸方向は、確率論的な手法で20%取り込まれる範囲、沖合方向は、50%取り込まれる範囲と良い対応を示している。

4-2 恒流の存在する海域におけるシミュレーション結果

恒流速の大きさ、拡散係数、恒流成分の沖合方向の流速分布、取水量をパラメーターとして、恒流の存在する海域における取水に伴い取り込まれる浮遊体をシミュレートした。恒流成分が存在する場合には、海域に投入された粒子は、移流成分により絶えず一方に移送されるためにある時間以後は取水口に取り込まれず、取り込み確率は一定になると考えられる。取水口に取り込まれる確率の時間変化は、投入された粒子群の中心が取水口を通過する付近で取り込まれはじめ、その後時間の経過とともに増加する。この増加の傾向は前述の残存率(1-P)でみると、投入後の経過時間より粒子群の中心が取水口中央部を通過する時間を差し引いた時間の $1/3$ 乗で指数関数的に減少し、潮流の存在する海域の傾向と同じである。その後は、ある時間以後取り込み確率は一定となる。この時間は、恒流の沖合方向の流速分布が一樣分布の場合には比較的短い、shear分布の場合には沿岸付近の流速が遅く、そのため沿岸付近に粒子が留るためかなり長くなる。図-10は、定常値になった場合の取り込み確率の範囲を示している。取り込み範囲は、恒流速の沖合方向の分布形状に大きな影響を受け、一樣分布の場合には、shear分布の場合に比較してかなり小さくなる。一定になる確率の値は、恒流の

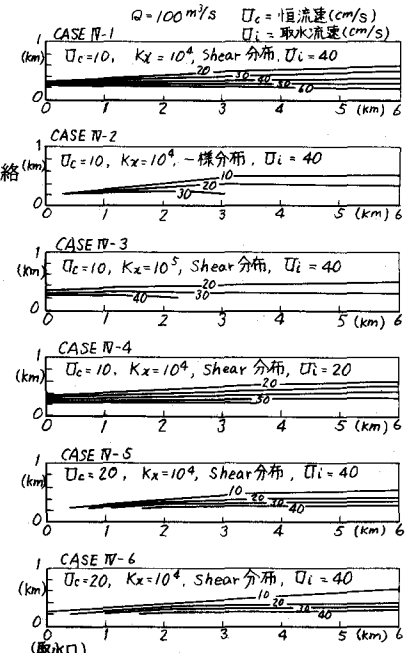


図-10 恒流の存在する海域での取り込み範囲とその確率

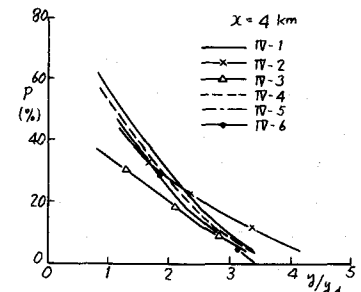


図-11 沖合方向の取り込み確率分布

沖合方向の流速分布が一様分布の場合は、shear 分布の場合より小さく、恒流速の大なる場合の方が小さくなる。

図-11は、沖合方向の取り込み確率の分布を示す。横軸の沖合方向の距離は、前述のように、海域の乱れを無視して、取水口の両端においた粒子を時間を遡って追跡した決定論的な手法により求まる沖合方向の最大取り込み範囲(y_d)で無次元化している。沖合方向の取り込み確率の値は、取水口より2~6km間ではほぼ一定であり、決定論的手法で求められる境界では約50%, その2倍の距離では約20%, 3倍では5~10%程度で、それ以遠の沖合からはほとんど取り込まれない。

5. 結 論

沿岸部に立地された火力・原子力発電所に復水器冷却用として取水される冷却水取水に伴い取り込まれる浮遊体の範囲を確率的な手法を用いて予測し、決定論的な手法で求めたものと比較した。その結果の概要は以下に示す通りである。

1) 周期的な往復流の卓越する海域における冷却水取水に伴い取り込まれる浮遊体の範囲およびその確率は、沿岸方向は潮流流程に、沖合方向は取水量に支配される。拡散係数の値は、潮流振幅が 10 cm/s と小さい場合には、沿岸方向の取り込み範囲に大きな影響を与えるが、 $20, 30\text{ cm/s}$ と大なる場合は、影響は小さい。粒子投入時の潮流の状態を取り込み範囲およびその確率は、大きな影響を受ける。しかし、投入された粒子群が平均流のみにより往復運動する範囲が同じであれば、取水口近傍を除き、粒子投入時の潮流の状態は関係なく、取り込まれる範囲およびその確率は、ほぼ同じである。

2) 恒流成分の存在する海域における取り込み範囲およびその確率は、恒流成分の大きさおよび沖合方向の流速分布、取水量に支配され、拡散係数値は、恒流速が 10 cm/s と小さい場合には影響を与えるが、 20 cm/s と大なる場合は、その影響は小さい。投入された粒子が取り込まれる確率が定常値になる時間は、特に恒流の沖合方向の流速分布に支配され、一様分布の場合は比較的早く定常になるのに対し、shear 分布の場合はかなりの時間を要する。

これらの結果は、海岸線が直線で半無限状の海域の場合であり、実際に対象となる海域は、このような単純な地形ではなく、複雑な地形形状を有する場合もあるが、上述の通り、平均流の挙動は、取り込み範囲に大きな影響を及ぼすため、対象海域の流況を十分把握しておく必要がある。その上に、海域の拡散特性の把握も重要である。

参考文献

- 1) Marcy, B.C., Jr.: Entrainment of Organisms of Power Plants, with Enphasis on Fishes: An Overview, Fisheries and Energy Production: 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, 電力中央研究所報告, №378027, 1979.
- 3) 角湯正剛・和田明: 瀬戸内海における流況と分散特性, 電力中央研究所報告 №375010, 1975.
- 4) 加藤正進・和田明・角湯正剛: 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, 1978
- 5) 和田明・角湯正剛: 瀬戸内海における水粒子運動の数値シミュレーション, 第20回水理講演会論文集, 1976.
- 6) Hino, M.: Disital Computer Simulation of Turbulent Phenomena, Trans. of JSCE, №123, Nov. 1965.
- 7) Hall C.D.: The Simulation of Particle Motion in the Atomosphere by Numerical Random Walk Model, Quart. J. R. Met. Soc., 101, 1975,