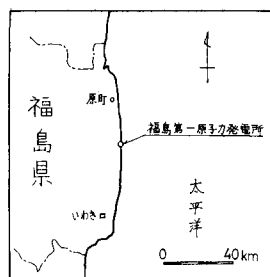


開放性海域に放出される温水の拡散について

中村 義治*・堀川 清司**

1. 緒 言

福島県沿岸は、南北に 130 km ほど直線的に延びており（図—1 参照）大陸棚が発達して、海岸付近の海底勾配はゆるやかである。また、内湾とは異なり、外海



図—1 調査地点位置図

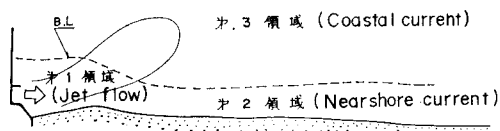
付近にも影響を及ぼしている。福島県下の海岸には、現在営業運転中の原子力発電所が 1 か所、建設中または計画中の火力及び原子力発電所がそれぞれ 2 か所ずつある。近い将来、これらの発電所が全て移動するようになると、放出される温水量は世界的な規模となる。その Positive と Negative の影響（特に水産生物に対する）を適正に評価するためには、より詳細な温水拡散の実体を調べておくことが重要である。

このような状況に対応するために、昭和 46 年頃から電力側が実施してきた物理環境調査と、昭和 49 年から始まった福島県水産試験場の温排水影響調査（生物調査）^{1),2)} も加え、本格的な総合調査を実施中である。さらに、昭和 50 年、51 年度には、従来実測が極めて困難であった放水口付近の噴流観測と砕波帯周辺の海浜流系の観測が、東京電力（株）によって実施された。この観測には、東京大学と I.N.A. 新土木研究所によって開発された気球観測法³⁾が採用された。

以上のようにして、次第に資料が蓄積されつつあるが、本報においては、福島第一原子力発電所前面海域（以下、大熊海岸と呼ぶ）における大局的な温水拡散パターンを把握することに主眼をおくことにした。

2. 温水域の流動特性

大熊海岸の温水放出海域は異なった支配要因の流れによって代表される 3 つの領域に分けて考えることができる（図—2 参照）。第 1 の領域は、温水噴流自身が卓越す



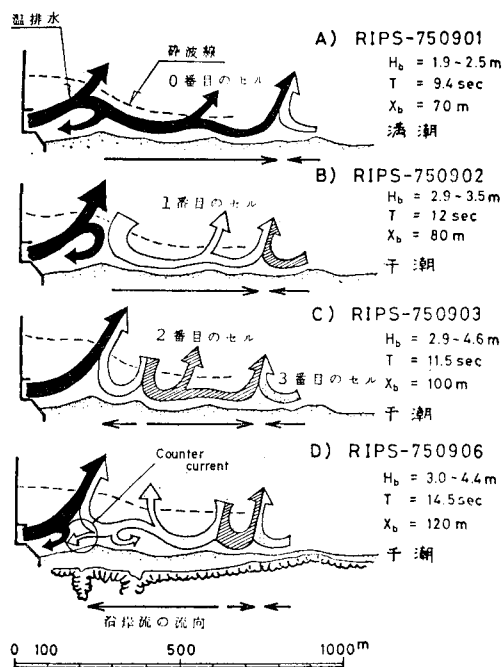
図—2 3 つの領域

る領域（温水噴流領域）⁴⁾、第 2 の領域は、波動のエネルギーが砕波によって流れに転化する領域（海浜流領域）⁵⁾、第 3 の領域は、砕波帯外の環境系流動の支配する領域（外海領域）である。

第 1 領域を通過する温水は、種々の条件により第 2 と第 3 の領域に分割されながら進入し、海浜流セル的存在により内部混合を繰り返しながら、流下方向に移流拡散すると考えられる。そこで、温水拡散のマクロ的立場から重要と思われる第 2、第 3 領域の流動特性の概略を過去の実測データを基にして以下に述べる。

（1）第 2 領域の流動特性（海浜流領域）

昭和 50 年 9 月に大熊海岸で温水噴流及び海浜流系につ



図—3 温排水と海浜流の干渉パターン

* 正会員 水産修 福島県水産試験場 漁場環境部

** 正会員 工 博 東京大学教授 工学部土木工学科

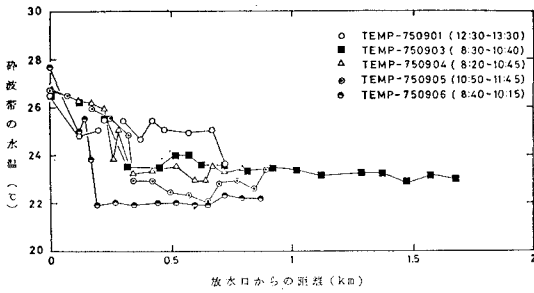


図-4 砕波帯における沿岸方向水温分布

いての観測を合計4回行った。その時の流況及び汀線に沿った水温変化を、それぞれ図-3、図-4に示した。図-3には海浜流セルがみとめられる。観測Aは、満潮時に行ない、その時の温水噴流は、ある区間砕波帯にトラップされている。一方、干潮時に行なった観測B、C、Dの場合は、温水の流軸は砕波帯の外に出ている。

汀線に沿う水温分布は、温水噴流の流軸の離岸位置に大きく支配されている。観測Aは、温水噴流の流軸が砕波帯内に存在し、放水口から約700m離れた地点で海浜流の作用により沖合に出ており、この地点で大きな水温低下がみられる。他の観測でも放水口から250m付近で、温水噴流の流軸の離岸による水温の低下がみられる。特に観測Dは、海浜流によるカウンター流の影響もあ

って、温度低下は急激である。

図-5は、放水口から測った離岸流の発生距離 Y と、水温低下がステップ状に変化している地点の距離 Y_r との関係を表わしたものである。放水口付近の2つのデータを除き離岸流の発生間隔と水温低下の距離との関係は線型的である。

図-6は、大熊海岸の砕波帯の幅 X_b と離岸流の発生間隔 Y_r の関係を表わしている。データは少しちがりはあるが、 Y_r/X_b は約2.3である。

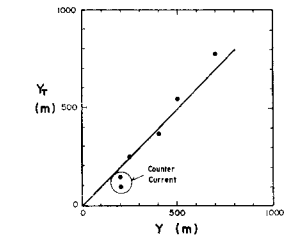


図-5 放水口から離岸流発生地点までの距離 Y と沿岸方向水温の急変地点までの距離 Y_r (第2領域)

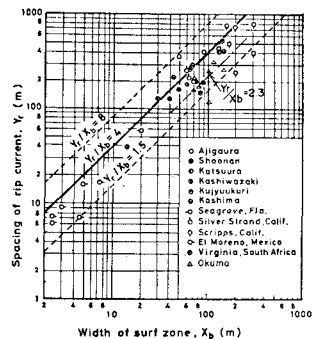


図-6 砕波帯の幅と離岸流の発生間隔 (第2領域)

(2) 第3領域の流況特性 (環境系流動)

第3領域における流れの変動は、内湾とは異なり潮流

変動は顕著ではなく、図-7のスペクトルに代表されるような長周期変動が卓越している^{6),7)}。そして、24時間以上の変動の中には、陸棚にトラップされて進行する陸棚波^{8),9)}のようなバロトロピック流動現象として、3~4日の周期変動も観測されており、必ずしも長周期領域の周期性は微弱ではない¹⁰⁾。図-8は、大熊海岸で観測された成分の流速ベクトル図である。

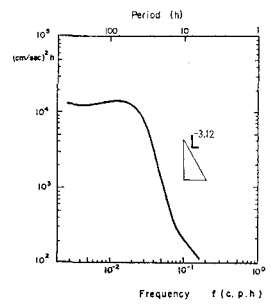


図-7 環境系流動 (第3領域) のスペクトル

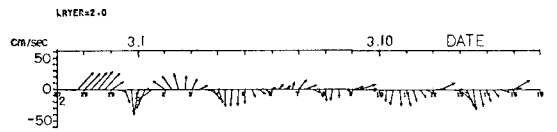


図-8 環境系流動 (第3領域) のベクトル図

一方、流れの南北成分の空間スケールは過去の観測の結果によると、longshore (N方向), offshore (E方向), とともに沿岸20~30kmの範囲では大した変化はなく、一体とした流況構造をしているものと考えられる。

3. 温水拡散の諸特性

(1) 温水拡散パターン

温水拡散のパターンは、図-9にみられるように沿岸方向に南へ伸びるもの、防波堤に沿って北上するもの、さらにその中間的なものに分類される。各拡散パターンの環境条件を表-1に示す。

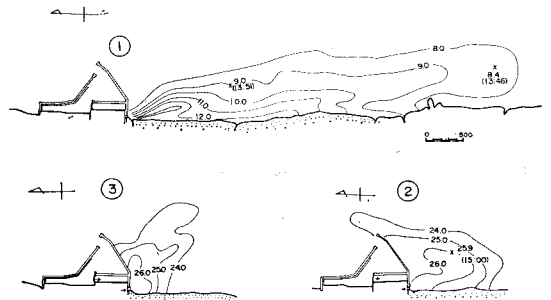


図-9 温水の拡散パターン

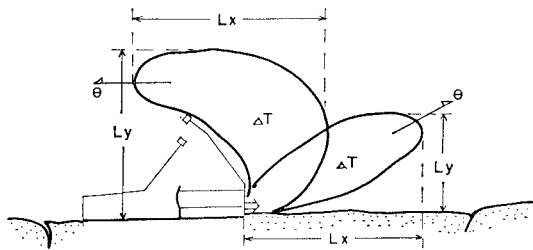
図-10に示すように、環境水温との温度差が ΔT の領域に注目して、その拡散のスケール L_x, L_y 、および拡散方向の角度 θ を定義する。過去に実測された拡散パターンについて、拡散面積の偏平度 (L_y/L_x) とその主軸方向 θ の関係を、相対水温 ΔT_n 別に表わしたものが図-11である。

図中のAは46,47年,Bは49年,Cは50年,Dは51年

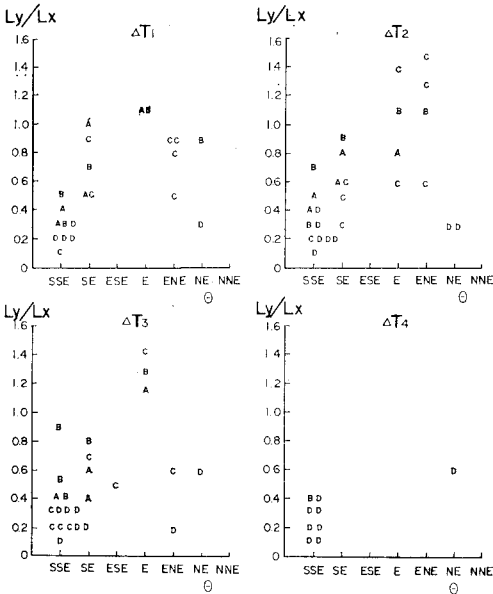
表一 拡散パターン図の調査状況

No.	①	②	③
測定年月日	51. 3. 4	50. 9. 20	46. 8. 12
測定時間 (時・分)	14:05~14:10	14:57~15:04	15:45~16:45
冷却水量 (m ³ /sec)	24.9 43.2 43.2	43.2	25.0
環境水温 (°C)	7	23.0	23.0
放水口水温 (°C)	15.1 14.8 16.1	28.6	29.8
放水熱量 (m ³ /sec)・deg	930	240	170
気 温 (°C)	9.6	24.0	26.0
風 向	NNE	ESE	N
風 速 (m/sec)	4.8	5.8	4
流 向	S	N	—
流 速 (m/sec)	0.4	0.4	0.2
波 向	ENE	E	E
波 高 (m)	0.4~0.7	0.8~1.2	0.2~0.3
潮 位 (cm)	50	150	80

のデータを表わし、それぞれの放水熱量は、A: 約 175 (m³/sec)・deg, B: 約 480 (m³/sec)・deg, C: 約 200~300 (m³/sec)・deg, D: 約 800~900 (m³/sec)・deg で、放水口水温と環境水温の差 ΔT_0 の平均は、正常運転の時には約 7~8°C である。ここで、放水熱量: (m³/sec)・deg とは、放水量 (m³/sec) と ΔT_0 (deg) の積を各放水口別に



図一10 拡散スケール (L_x , L_y) と主軸方向 (θ)

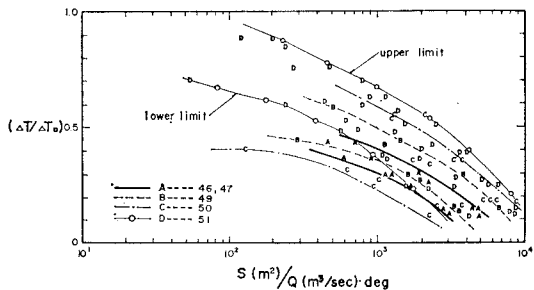


図一11 拡散パターンの偏平度と主軸方向 (θ)

計算し、加え合わせた値である。
相対水温が 1°C の場合 (ΔT_1), 拡散パターンの主軸方向の頻度分布はEを中心にほぼ左右対称であり, 第2, 第3領域の変動特性に依存していると思われる。しかし, ΔT が大きくなると拡散パターンの主軸方向は, 第1領域での噴流の放出方向に支配される。

各 ΔT の偏平度 (L_y/L_x) のピークは, ΔT_4 を除き E~ENE に位置しており, その大きさは 1.1~1.5 である。また, 放水熱量のいちばん大きいDの場合, その分布は各 ΔT とともに SSE 及び NE のみである。つまり, 放水熱量が大きくなるにつれて, 温水噴流の主軸方向は, ESE, E, ENE などの過渡的な拡散パターンが少なくなる傾向にある。

大熊海岸における温水拡散の全般的特徴をみるために, 放水熱量に対する拡散面積の比 S/Q (sec/m・deg) と正規化された相対水温 $\Delta T/\Delta T_0$ の関係を図一12 に示した。



図一12 相対水温 ($\Delta T/\Delta T_0$) と放水熱量に対する面積の比 (S/Q) の関係

(2) 温水プルームの軸上水温と拡散面積

開放性海域において汀線方向に放出された温水プルームの軸上水温 $T(L, 0)$ 及び, 拡散面積 $S(T_n)$ を2つの既存モデル¹¹⁾を使い, 今回のデータと比較した。データの整理には Michigan 湖の温排水調査報告を参考にした^{12), 13)}。

2つのモデルは保存系拡散理論であり, 温水拡散を考える場合問題はあるが一応の目安に使った。

Okubo-Pritchard の式

$$T(L, 0) = \frac{Q}{\sqrt{\pi} \cdot h \cdot \omega \cdot L} \dots\dots\dots (1)$$

$$S(T_n) = 2 \int_0^{L_{lim}} f_1(L) dL \dots\dots\dots (2)$$

ここで

$$\begin{cases} f_1(L) = \frac{\omega \cdot L}{u} \cdot \left(\log \frac{Q}{h \cdot \sqrt{\pi} \cdot \omega \cdot L \cdot T_n} \right)^{1/2} \\ L_{lim} = \frac{Q}{\sqrt{\pi} \cdot \omega \cdot h \cdot T_n} \end{cases}$$

Obukhov の式

$$T(L, 0) = \frac{Q \cdot \sqrt{u}}{\sqrt{\pi \cdot \beta^{3/2} \cdot L^{3/2} \cdot h}} \dots\dots\dots (3)$$

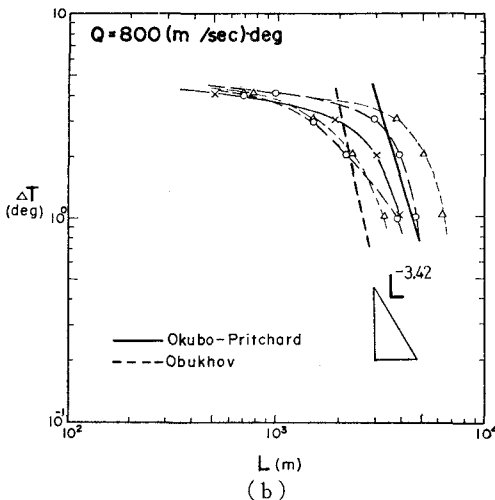
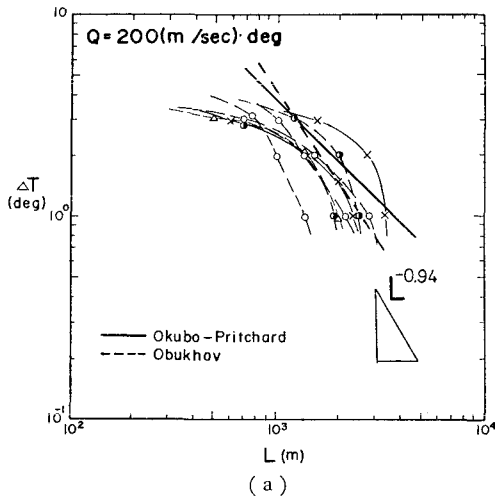
$$S(T_n) = 2 \int_0^{L_{lim}} f_2(L) dL \dots\dots\dots (4)$$

ここで

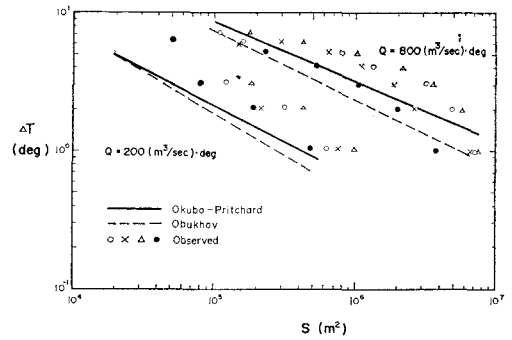
$$\left\{ \begin{array}{l} f_2(L) = \left(\frac{\beta^3 \cdot L^3}{u^3} \right)^{1/2} \\ \quad \cdot \left(\log \frac{Q \cdot \sqrt{u}}{\sqrt{\pi \cdot \beta^{3/2} \cdot L^{3/2} \cdot T_n \cdot h}} \right)^{1/2} \\ L_{lim} = \left(\frac{Q \cdot \sqrt{u}}{\sqrt{\pi \cdot \beta^{3/2} \cdot T_n \cdot h}} \right)^{2/3} \end{array} \right.$$

ここで、 $T(L, 0)$: 軸上水温 (°C), $S(T_n)$: 拡散面積 (m²), Q : 放水熱量 (m³/sec)·deg, h : 水温躍層の厚さ (m), L : 流下方向距離, ω : 拡散速度 (m/sec), u : 周辺流速 (m/sec), β : エネルギー逸散パラメータ (m²/3/sec).

放水熱量が約 200(m³/sec)·deg の時 (46, 47, 50 年)



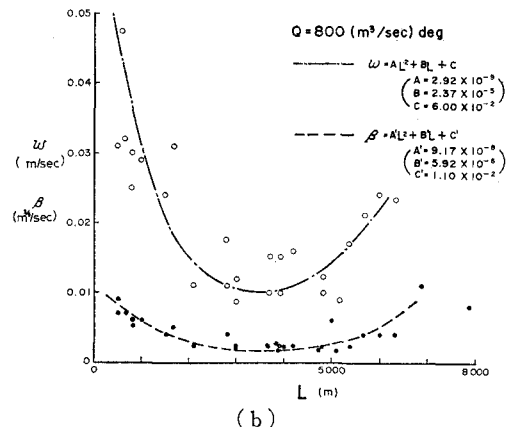
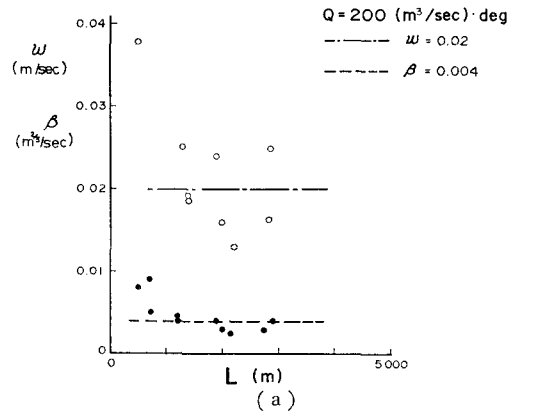
図—13 温水ブリュームの軸上水温分布



図—14 温水ブリュームの拡散面積, S

と 800(m³/sec)·deg の時 (51年) の $T(L, 0)$ と $S(T_n)$ のデータを 図—13(a), (b), 14 に示す. 図中の2つの理論曲線は ω , β を 図—15 から決定して, (1), (2), (3) 及び (4) 式から計算したものである. なお, h , u はそれぞれ 1.5 m, 0.2 m/sec とした.

図—15 から ω , β の分散を調べると, 一般的に β の方が小さい. 次に図中の ω , β の分布をみると, Q が 200 の時は $L \leq 1.2$ km の領域で, また, Q が 800 の時は $L \leq 2.8$ km と $L \geq 5$ km の領域で, それぞれの値が大きくなっている. 2つのモデルの ω , β が比較的安定



図—15 ω と β の実測値

し始める距離 ($Q=200(\text{m}^3/\text{sec})\cdot\text{deg}$: $L\approx 1.2\text{ km}$, $Q=800(\text{m}^3/\text{sec})\cdot\text{deg}$: $L\approx 2.8\text{ km}$) は, それぞれ軸上水温分布 図-13 の屈曲点とほぼ一致している. また, 屈曲後の軸上水温の減衰勾配は, それぞれ $L^{-0.94}$, $L^{-3.42}$ 程度である.

一方, 各ケースの拡散面積のデータをプロットした曲線も, ゆるやかな減衰曲線を描いており, 理論曲線は実測データから少し下にずれている.

4. む す び

大熊海岸における温水拡散過程は, それぞれ異なる領域の流速場に支配され複雑である. 軸上水温分布と拡散面積 (図-13, 14) が屈曲現象を生ずるのは, 第2及び第3領域の移流効果によるものと考えられる. また, 汀線近くの温水分布に対しては, 砕波帯の果たす役割が大きい.

一方, 水産生物の生育場としての砕波帯の重要性は, あまり認識されていない. 常時, その中で生息している二枚貝類に対しては, 温水の浸透問題を考えなければならないし, シラウオの漁場分布は砕波帯付近に集中している. また, イシガレイの稚魚のように, 一時期を砕波帯付近で過ごす生物もある. そして, 温水が汀線方向に長く延びた分布をする時には, サケの回帰行動に対する影響も考えなければならない. 今後は, これらの生物生態調査において必要とする時空間スケールに合わせた物理調査を実施して, 温水の生物に対する影響評価をする必要がある.

終りに, 海浜流系について有益な助言を頂いた, I.N. A. 新土木研究所の佐々木民雄博士に深謝するとともに, 重要な資料を提供して頂いた東京電力(株)に対して感謝の意を表します.

参 考 文 献

- 1) 福島県温排水調査管理委員会: 昭和49年度温排水調査報告書, 223p., 1976.
- 2) 福島県温排水調査管理委員会: 昭和50年度温排水調査報告書, 264p., 1976.
- 3) 佐々木民雄: 海浜流系の構造に関する野外的研究, 東京大学大学院工学系研究科学学位論文, 1974.
- 4) 中村義治: 温排水噴流解析報告書, 未発表, 1976.
- 5) 堀川清司: 海岸工学, 東京大学出版会, 1973.
- 6) 中村義治: 福島県沿岸の流況解析—I, 福島水試研究報告, 第3号, 1975.
- 7) 中村義治: 福島県沿岸の流況解析—II, 福島水試研究報告, 第4号, 1976.
- 8) Robinson, A. R.: Continental shelf waves and the response of sea level to weather systems, J. Geophys. Res., 69, pp. 367-368, 1964.
- 9) Kundu, P. K. and J. S. Alion: Some three-dimensional characteristics of low-frequency current fluctuations near the Oregon coast, J. Phys. Oceanogr., Vol. 6, pp. 181-199, 1976.
- 10) 和田 明・片野尚明・角湯正剛・荒木 洋: 沿岸海域における温排水拡散予測手法の適合性に関する研究, 第22回海岸工学講演会論文集, pp. 191-196, 1975.
- 11) 大久保明: 海洋拡散, 東海大学出版会, pp. 323-373, 1970.
- 12) Frigo, A. A. and D. E. Frye: Physical measurement of thermal discharges into Lake Michigan, Argonne Nat. Lab., 1974.
- 13) Frigo, A. A., D. E. Frye and J. V. Tokar: Field investigations of heated discharges from nuclear power plants on Lake Michigan, Argonne Nat. Lab., ES-32, 1972.