

大規模化した温排水の拡散特性

大塚行則*・三村信男**・堀川清司***

1. はじめに

近年海岸地域において大出力の火力、原子力発電所の建設が進んだが、これに伴って沿岸海域に排出される温排水の規模も非常に大きなものになっている。このように大規模な温排水の拡散現象の実態、すなわち、大量の温排水が海域に排出された場合どのような挙動を示すのか、それに対していかなる要因が影響を及ぼすのかといった問題に対して充分解明が進んでいるわけではない。それを明らかにするために、著者らは東京電力福島第一原子力発電所前面の海域において調査を継続してきた。また、多くの発電所の立地地点において種々の機関による環境調査が実施されている。そこで、本研究では、地域としては福島県大熊海岸と福井県若狭湾沿岸を選び、著者らの調査結果と種々の調査の報告資料とを用いて大規模な温排水の拡散特性に対して検討を加える。

2. 検討の対象と方法

本論文では表-1に示すように5つの原子力発電所をとり上げた。これらのうちで、敦賀発電所を除く4発電所では温排水の排出量が 100 m³/s を越える規模に達している。

大量の温排水が海域に排出されると周囲の海水より水温の高い温水塊が形成されるので、本論文ではこの温水塊の規模と温水塊中の水温の逓減特性との2つの項目に着目し検討を加えた。

温水塊の規模の指標としては種々のものがありうる

表-1 対象とした発電所

名 称	電 気 出 力 (MW)	最大冷却水量 (m ³ /s)
福島第一 1~6 号	4 696	270.8 (南放出口分 158.8)
高 浜 1, 2 号	1 652	102.2
美 浜 1~3 号	1 666	108.3
大 飯 1, 2 号	2 350	141.4
敦 賀	357	20.0

* 学生会員 東京大学大学院土木工学専門課程
** 正 会 員 工博 東京大学講師 工学部土木工学科
*** 正 会 員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

が、ここでは表層の水温が環境水温と比べて高い領域の面積を拡散面積と定義して用いた。温水塊の規模を支配する第一の要因は温排水の排出規模であると考えられるので、その指標として排出量と式 (1) で定義した排出熱量とをとり上げ、これらに対する拡散面積の依存性を調べた。

$$\text{排出熱量} = (\text{排出水温} - \text{環境水温}) \times (\text{排出量}) \dots\dots\dots (1)$$

一方、水温の逓減特性としては式 (2) で定義される水温の逓減率を用い、これが放出口からの距離に応じてどのように変化するかを調べた。

$$\text{水温の逓減率} = \frac{(\text{流軸上の水温} - \text{環境水温})}{(\text{排出水温} - \text{環境水温})} \times 100 \dots\dots\dots (2)$$

つぎに、これらの指標に基づいて各地点毎の温排水の拡散特性を比較し、排出条件と海域の特性の影響を検討した。温排水の拡散特性、すなわち温排水の冷却、拡散の過程に影響を与える要因としては具体的には次のようなものがあげられる。

- 排出条件: 排出量, 排出水温, 放流形態 (表層, 水中), 放出角度
- 地 形: 水深, 海底勾配, 海域の閉鎖性
- 気 象: 気温, 湿度, 風, 日射量, 降雨
- 海 象: 環境水温, 流れ, 波浪, 潮汐, 河川水の流入, 成層状態

本論文においてこれら全ての項目にわたって影響を評価することはとうていできないが、各海域毎に支配的な要因を抽出し、拡散特性との関連を明らかにすることを試みた。

3. 大熊海岸における温排水の拡散特性

最初に東京電力福島第一原子力発電所が立地する福島県大熊海岸における温排水の拡散特性について述べる。

(1) 対象海域と観測資料

福島第一原子力発電所は、南北にほぼ直線的に伸びたおよそ 130 km の海岸線を有する福島県沿岸の中央に位置しており、その前面は太平洋に開かれている。この付近の海底は緩やかな斜線を形成し、発電所前面での勾配

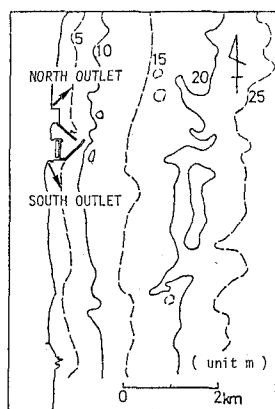


図-1 大熊海岸

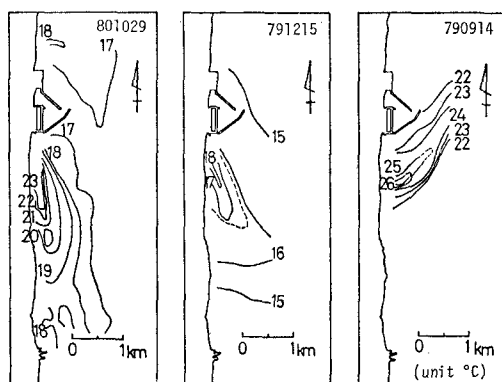


図-2 温水塊のパターン

は 1/100 程度である (図-1)。

この発電所は 6 基の原子炉を有しているが、それらから排出される温排水は防波堤の基部に設けられた南北 2 つの放出口から表層放流されている。2 つの放出口のうち、南放出口が 1~4 号機分を、北放出口が 5, 6 号機分を受けもっており、南放出口では、1~3 号機分の温排水が岸に平行に、4 号機分が約 45 度の角度で南側に放出され、2 つの噴流は放出直後に衝突して全体としてはやや沖向きに流出している。

著者らは、この海域において昭和 54 年から 3 年間に 4 回の現地調査を実施し、海域の流況と水温の平面および鉛直分布とを観測した^{*)}。一方、福島県も昭和 49 年から温排水調査を実施し、流況および水温分布に関する資料⁹⁾を刊行している。ここでは、著者らの観測結果とともに昭和 50 年から昭和 54 年までの福島県の資料を用いて検討を進める。ただし、対象としては観測資料の多い南放出口からの温排水に限ることにした。

(2) 流動特性と温排水の拡散パターン

上記の観測において見出された温排水の挙動の特徴は、海域表層に大規模な温水塊が形成され、その出現パターンがスケールの大きな流動場によって変化することである。

福島県沿岸においては卓越した南北流 (沿岸方向の海岸流) が存在し、かつ転流をくり返していることが見出されている^{10,11)}。この海岸流は、陸棚波であるという解釈が有力であるが¹²⁾、離岸 5 km の観測点においても検出された規模の大きな流れであり、1 日から数日の周期で流向を転じる。

大熊海域に形成される温水塊はこの海岸流によく追従し、南北流の交替的出現に対応した 2 つの出現パターンとその遷移パターンを示す。図-2 にその代表例を示すが、(a) は南流時のパターンで南側の海岸線に沿って温

水塊が形成されている。排出量が多い場合、温水塊が 1~2 km の幅で带状に更に南側に伸びているのが観察される場合も多い。(c) は北流時のパターンで、温排水はいったん南に噴出した後大きく北に振れ防波堤に沿って沖に流出している。(b) は転流時のパターンである。ただし、拡散特性としては転流時は南流時とほぼ同一の傾向を示したので以下では転流時を区別せず南流時に含めて議論する。

(3) 拡散面積

つぎに拡散面積に関する検討結果を示す。拡散面積と温排水の排出量および排出熱量との関係を南流時 (転流時を含む)、北流時の 2 つのパターンに対して示したのが図-3 である。同一の排出条件に対しても拡散面積はばらついているが、排出量と比べて排出熱量を用いた方が比較的確実な傾向にあり、排出熱量が温排水の排出規模の指標としてある程度有効であるといえる。

さて、図-3 をみると、この海域では排出熱量が $100^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ を越えると温水塊が形成され始めること、その後排出熱量の増大とともに拡散面積も増加する傾向にあることがわかる。しかし、形成される温排水の規模は海岸流のパターンによって異なり、南流時の方が拡散面積が大きくなる。さらに 2°C 上昇面積に着目すると、南流時には排出熱量が $700^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ を越えると急に拡散面積の増大が促進されるという傾向がみられる。この拡散面積の急増は実体としては温排水塊が南に伸び海岸線にはりつくような形で滞留するという現象に対応している。

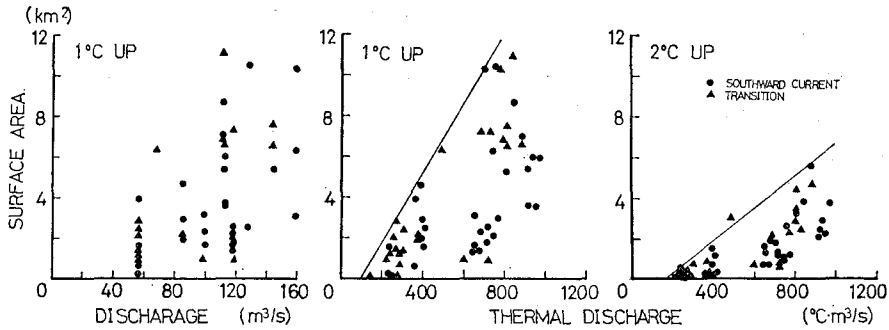
一方、北流時には排出熱量が増大しても拡散面積はさほど増加しないが、これは温水塊が防波堤にぶつかりそれ以上の拡大が妨げられるからである。

なお、南流時、北流時それぞれに対して形成される温水塊の規模の目安として拡散面積の上限と考えられる値を図-3 中に実線で示した。

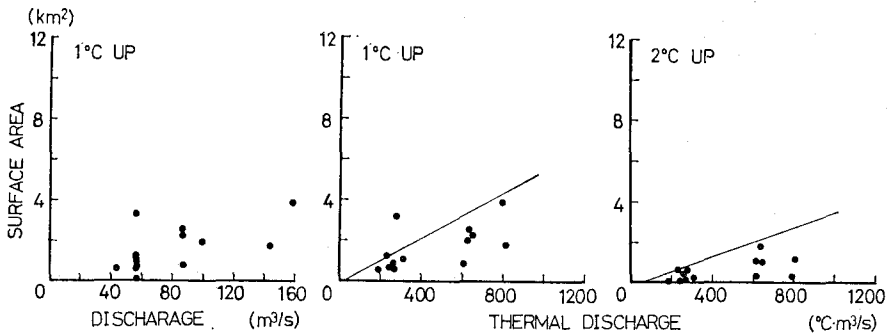
(4) 水温の逓減特性

温水塊中での水温の逓減特性を図-4 に示す。

*) これらの観測に関して、調査方法をはじめ具体的な報告は参考文献 1), 2) に述べられている。

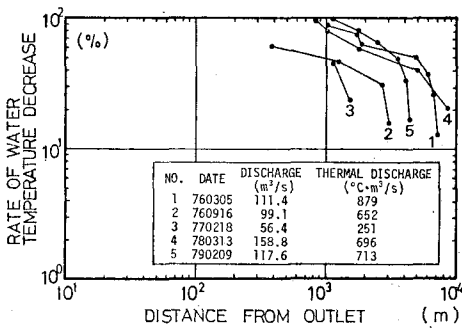


(a) 南流時

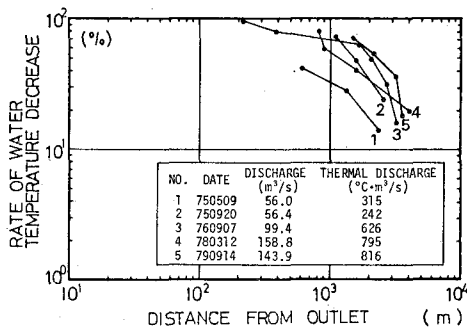


(b) 北流時

図-3 拡散面積



(a) 南流時



(b) 北流時

図-4 水温の通減率

南流時をみると排出熱量の増大に伴って通減曲線が右側にずれ、放出口からより遠方まで高温域が維持されていることがわかる。とくに排出熱量が大きい場合、放出口から 1km 付近までほとんど水温の通減がみられないが、これは温水噴流が海岸線に沿って流下するために水深が小さく下層水の連行が制限されることを示唆している。一方、北流時には、温排水はいったん南に流下した後沖に広がるので、放出口から 1km 程度の位置から水温の急速な通減がみられる。

以上のことから、大熊海岸における温排水の拡散に対して影響を与える重要な要因としては、海岸流の存在とともに温排水の放出先が緩勾配の海岸であることがあげられる。それは、先にも述べた通り放出口前面での水深が小さいためにいわゆる near-field において下層水の連行が抑えられることによっている。その上に、南放出口からの放出角度が岸に直角でなく斜めになっており、温水噴流の流軸が放出後相当の距離にわたって水深の小さな海域を進むために、この効果はさらに強調されることが考えられる。北流時には、温排水拡散の far-field に到ると噴流としての流速が減少し北へ向う海岸流によって温水塊は沖へ広がるが、南流時には噴流と海岸流の流向が一致するために、上述の要因が重なって水温の通減が妨げられ温水塊の規模が大きくなると思われる。

4. 若狭湾沿岸における温排水の拡散特性

次に、特性の異なる海域として若狭湾における温排水の拡散特性を検討した結果を示す。資料としては、沿岸に立地する美浜、大飯、敦賀、高浜の4発電所に対して水産庁および福井県水産試験場が調査を行なっているのでその結果^{6),7)}を用いて、大熊海岸と同様の検討を加えた。

(1) 若狭湾沿岸海域の特徴

若狭湾は湾口が広く奥行が狭い形状のため、湾全体としては外洋性の強い湾である。湾の沿岸部はリアス式海岸で多数の枝湾が発達しているが、これらの枝湾の水深は大きく、また沿岸部での海底勾配は急である。4発電所の立地地点を図-5に示すが、例えば高浜

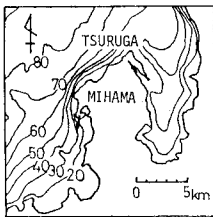
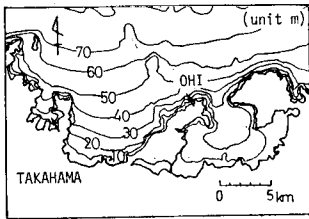


図-5 若狭湾沿岸における発電所立地地点

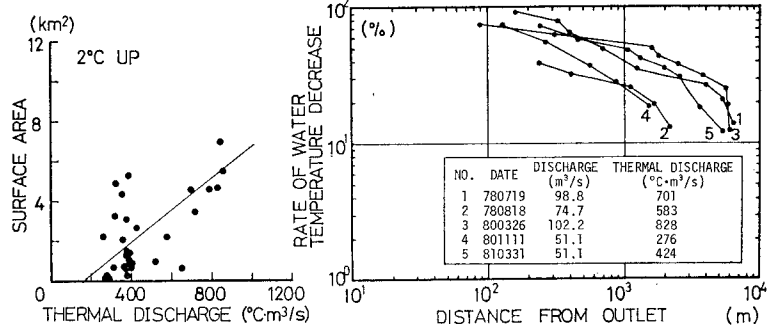
発電所の立地する内浦湾の平均水深は22mであり、また大飯発電所前面では約1/30の勾配で30mの水深に達している。

若狭湾の流れとしては、夏期には環流系など湾全体をおおう流動場が発達し、冬期には強い北西あるいは北北西の季節風をうけて表層の流れが発達することが報告されている⁸⁾。また、河川としては湾西部の丹後海に流入する由良川の影響が大きく、その低かん水が沿岸に沿って東進するため湾西部

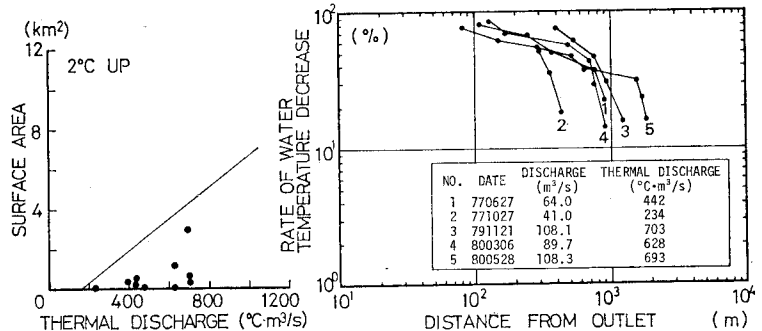
では複雑な密度構造をなしていると考えられる。

(2) 温排水の拡散特性

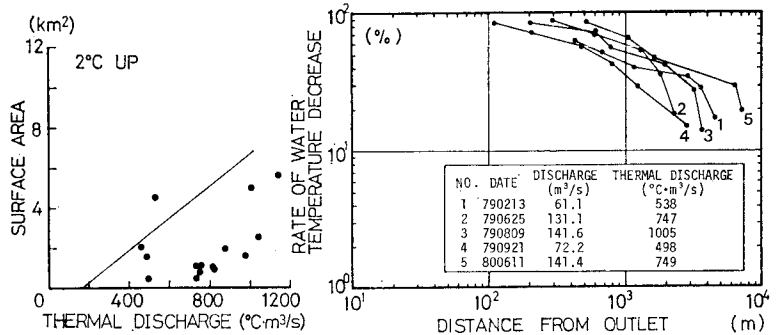
大熊海岸と同様に拡散面積および水温の通減特性を整



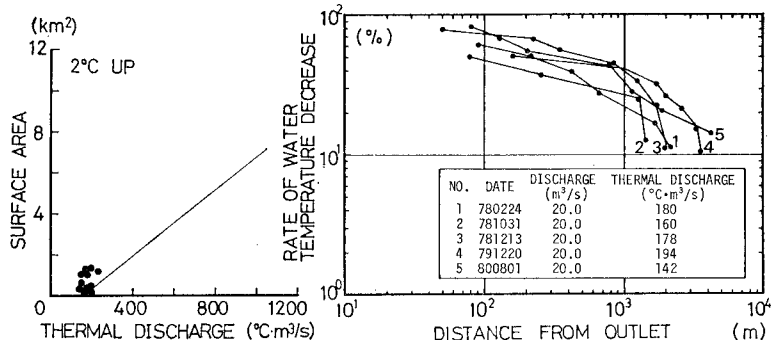
(a) 高浜発電所



(b) 美浜発電所



(c) 大飯発電所



(d) 敦賀発電所

図-6 拡散面積と水温の通減率

理したものが図-6である。拡散面積としては 2°C 上昇面積を用い、図中には大熊海岸における南流時の 2°C 上昇面積の上限を比較のために実線で示した。

図をみると温排水の排出規模が大きいにもかかわらず美浜、大飯両発電所前面海域における 2°C 上昇面積が他と比べて小さいのが特徴的である。これは両発電所が若狭湾に面しており、温排水は開放性で、かつ水深の大きい海域に直接放出されるために、周囲水の連行が充分行なわれることによるものであると考えられる。このことは、図-6 (b), (c) にみられるように流軸上の水温が放出直後から徐々に減衰していることから裏づけられる。

一方、内浦湾の湾奥に位置する高浜発電所から排出される温排水の拡散面積はばらつきが大きく、かつ大熊海岸と比べても値が大きくなる場合も多い。表層の水温分布を調べると、拡散面積が大きくなる場合には温排水が内浦湾表層をおおひ、さらに湾口からはり出している。水温の鉛直分布は、図-7 に示すように拡散面積の大小

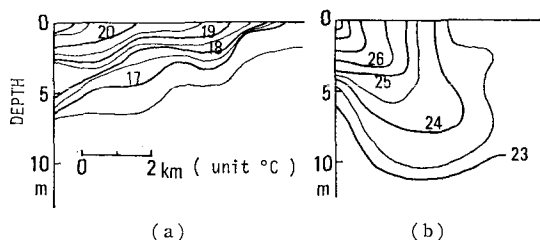


図-7 水温の鉛直分布 (内浦湾)

に対応して大きな変化を示す。内浦湾におけるこうした現象には風の影響が大きいと観察された。すなわち、風が弱い場合 (図-7 (a)), 水温成層が形成されて表層に薄く温水塊が浮かび拡散面積は大きくなるが、他方、特に冬期において北西からの強い風を受けると温水塊は湾奥に吹き寄せられ鉛直方向の混合がすすんで拡散面積が小さくなると説明できる。このような要因の影響が顕著に現われるのは温排水の放出先が閉鎖性の小湾であるからであり、このことが高浜発電所からの温排水の拡散特性を規定する基本的な条件であると考えられる。

敦賀発電所も同様に細長く伸びた浦底湾の湾奥から温排水を放出しており、排出量が $20\text{ m}^3/\text{s}$ 、排出熱量が $140\sim 200^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ と比較的小さいにもかかわらずある程度の

規模の温水塊が形成されている。ここでも、温排水の放出先が小湾であるために、排熱の蓄積が生じていると考えられる。

5. 結 語

福島県大熊海岸と福井県若狭湾沿岸をとって上げ大規模な温排水の拡散特性を論じた。温排水の排出規模の指標として排出熱量を用いて拡散面積との対応を調べ、この両者の関係が各々の海域によって非常に異なることを明らかにした。本論文では、それが海域の閉鎖性、海底勾配 (水深)、海岸流や風といった各海域の特性によることを示した。温排水の拡散に対しては、このように種々の要因が関係しているが、さらに温排水の排出規模が大きくなり、形成される温水塊の規模も増大すると海域の形状やスケールの大きな海象、気象条件が影響を与えるようになるため、温排水の拡散特性をより明確に把握するためには、その海域の特性を明らかにすることがますます重要であるといえる。

本研究をすすめるに際して、東京電力株式会社、福島県温排水調査管理委員会、水産庁、福井県水産試験場には資料を利用させていただいた。ここに謝意を表する次第である。また、本研究は文部省科学研究費環境科学特別研究「熱排水の沿岸域での滞留と人為的水塊形成」(研究代表者東京大学理学部 永田豊教授) から援助を受けたものであることを付記する。

参 考 文 献

- 1) 三村信男・堀川清司・渡辺 晃: 大熊海岸における温排水の拡散に関する現地観測, 第 27 回海岸工学講演会論文集, pp. 507~511, 1980.
- 2) 文部省「環境科学」特別研究「熱排水の沿岸域での滞留と人為的水塊形成」研究班: 「環境科学」研究報告集 B129-R 14-2, 77 p., 1982.
- 3) 福島県温排水調査管理委員会: 昭和 49 年度~昭和 54 年度温排水総合調査報告書.
- 4) 福島県水産試験場: 福島県沿岸域の流動特性とサケの回帰行動についての野外的研究, p. 41, 1979.
- 5) Kubota, M.: Continental shelf waves observed along the Fukushima Coast, Doctoral Thesis, Univ. of Tokyo, 94 p., 1981.
- 6) 水産庁・東海区水産研究所: 大量温排水に対する水産環境アセスメント総合調査, pp. 1~85, 1981.
- 7) 福井県水産試験場: 昭和 52 年度~昭和 55 年度温排水水産影響調査報告書.
- 8) 舞鶴海洋気象台海洋課: 若狭湾 (Ⅲ), 沿岸海洋研究ノート, 第 12 巻第 2 号, pp. 145~149, 1975.