

京都大学大学院 学生員 池田 英史
 京都大学工学部 正 員 井上 頼輝
 京都大学工学部 正 員 森澤 真輔

1. はじめに 現在の先進工業国におけるエネルギー、特に電力の使用量ははく大なものである。しかし発電プラント内で発生した熱エネルギーの全てを電気エネルギーとして利用することはできず、残りの熱は温排水として環境中に放出されている。その排熱は発電所の立地条件などの制約から内湾や河川に局在することが予想され、生態系への影響が危惧されている。ところが従来の温排水研究は、排熱によって構成される水温上昇と水温上昇域に関する研究がほとんどであり、環境中に放出された熱エネルギーが環境要素間にどのように分配され蓄積されるかに注目した、すなわち廃熱エネルギーの挙動に注目した研究は極めて少なく、それ故、廃熱エネルギーの観点より環境影響を評価しようとする研究も稀である。ここでは廃熱の放出源として火力発電所に比べ熱効率の劣る原子力発電所のうち、閉鎖的な海域(浦底湾)に温排水を放出している日本原子力発電(株)敦賀発電所に例をとり排熱の環境中での挙動をシステム=ダイナミクス(SD)の手法を用いて考察する。

2. システム=ダイナミクスの適用 システム=ダイナミクスとは、本来は経済活動のような人間の意志決定プロセス等が複雑にかみあった系の各構成要素間の相互作用を分析し、意志決定の過程が系全体の応答にどのような影響を及ぼすかを把握することにより、より合理的な政策を決定しようとする手法であるといえる。この手法では、物質やエネルギーをその存在量(レベル)と移行フラックス(レート)として把握し、対象系内での物質・エネルギーの分配や蓄積を直接の解析対象とするのが特色である。ここでは排熱の排出海域とその特性(海水の流動状況および水温躍層)により21のブロックに分割し、これに発電所、大気、外海(敦賀湾)の各ブロックを加え、これを要素とする系を設定する。その上で発電所および太陽より供給された熱エネルギーが系の中でどのような挙動を示すかを考える。ここでは海洋中の各要素内に存在する熱エネルギーをレベルとし、各要素間の熱エネルギーの移行量(レート)は海水の移動および伝熱により決定されるとする。また海洋中の要素と大気との間のレート量は、気温や表層海水温などによって決定されるとする。なお海域のブロック分割および流れ場を図-1に、排水口付近のブロックにおけるブロック=タイアグラムを図-2に示す。ここで設定した系にDYNAMOを専用言語とするSDの手法を適用できるかどうかを調べるために、まず本研究と同じ場において、取水(深層取水)に表層水が10%混入する場合の湾中央部の水温を算出し、参考文献の和田・片野による計算結果とDYNAMOを用いて行った計算結果とを比較して図-3を得た。図-3よりSDの手法は排熱による温度分布の計算にも適用できると思われる。

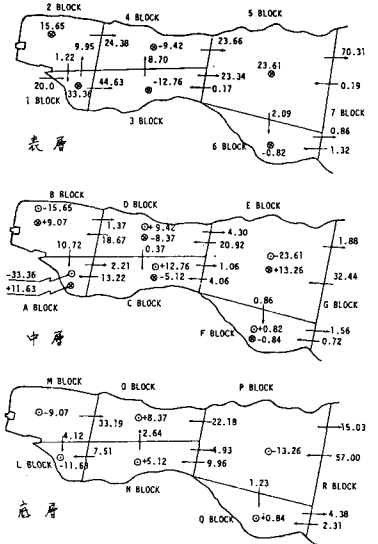


図-1 浦底湾の流れ場

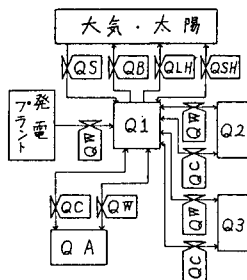


図-2 排水口付近のブロック・タイアグラム

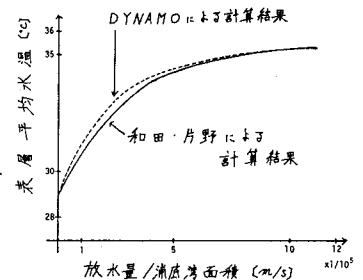


図-3 計算結果の比較

3. 計算に用いる式 対象海域の各要素（ブロック）内の熱エネルギー量の蓄積および変化は、次に示す微分方程式により記述される。

$$\frac{dQ_n(t)}{dt} = A_n \times \{QS(t) - QB(t) + QLH(t) + QSH(t)\} + \sum \{[QW_{n-1,n}(t) - QW_{n,n+1}(t)] + [QC_{n-1,n}(t) - QC_{n,n+1}(t)]\} \quad (1)$$

$$QS(t) = 0.97 \times QS'(t) \quad (2) \quad QB(t) = 0 \times \{T_{Wn}(t) + 273\}^4 \times \{1 - a - b\sqrt{e(t)}\} \times \{1 - h \times m\} \quad (3)$$

$$QLH(t) = 2 \times h(t) \times \{e(t) - e(0)\} \quad (4) \quad QSH(t) = h(t) \times \{TA(t) - T_{Wn}(t)\} \quad (5) \quad h(t) = 9.722 \times (0.48 + 0.272 \times v) \quad (6)$$

ただし $Q_n(t)$: 第 n ブロック中の熱量 (kcal), t : 時間 (hr), A_n : 第 n ブロックの面積 (m²), $QS(t)$: 太陽による水平面輻射量 (kcal/m²/hr), $QB(t)$: 海面よりの逆輻射 (kcal/m²/hr), $QLH(t)$: 水の蒸発により移動する潜熱 (kcal/m²/hr), $QSH(t)$: 海水と大気との温度差により移動する熱量 (kcal/m²/hr), $QW(t)$: 海水の運動により移動する熱量 (kcal/hr), $QC(t)$: 各ブロック間の温度差に起因する熱伝導により移動する熱量 (kcal/hr), $QS'(t)$: 太陽により水平面輻射量 (kcal/m²/hr), $T_{Wn}(t)$: 第 n ブロックの海水温 (°C), 0 : Boltzman 定数 (kcal/m²/hr/K⁴), a, b : 山本の定数 ($a = 0.59, b = 0.076$), $e(t)$: 海面付近の水蒸気圧 (mmHg), h : 雲の高さによる係数 (雲高 1.5~2 km において $h = 0.083$), m : 雲量 (-), $h(t)$: 熱伝達係数 (kcal/m²/hr/°C), $e(0)$: 海水温における飽和蒸気圧 (mmHg), $TA(t)$: 大気温 (°C), v : 風速 (m/s) である。これらの式を DYNAMO 言語によりアルゴリズム化し、計算機を用いて各時刻の解を逐次求めていくことになる。

4. 環境中における排熱の挙動 ここでは (平年) 気温の最も高い 7 月 28 日正午より 8 月 4 日正午までの間に、敦賀発電所が平常運転 (冷却水量 $VD = 20$ (m³/s), 取排水温度差 $T_c = 8$ (°C)) を行った場合の、プラント、湾内表層水 (海面~水深 3 m)、同中層水 (水深 3 m~同 6 m)、同底層水 (水深 6 m~海底)、大気、湾外水という各要素内の排熱エネルギーの蓄積量 (レベル) および各要素間の排熱エネルギーの移行量 (レート) を算出する。

この際、注意する必要があるのは、温排水の放出により海水は排熱を付与されると同時に、熱を運ぶ海水の流れ場も変化するという点である。従って、ここでは発電所が稼働している場合 ($T_c = 8$ (°C)) の熱エネルギーの移行量と、稼働していない場合 (施設の保守のため、復水器中に海水を循環させている; $T_c = 0$ (°C)) の熱エネルギーの移行量との差を“排熱の移行量”と定義することにする。解析結果を図-4 に示す。図-4 より排熱の大部分が湾内表層水を介して湾外に流出していることがわかる。つぎに排出条件 (VD および T_c) が変化する場合に、排熱の環境構成要素間での分配比がどう変化するかを考察した。まず T_c のみか 6, 8, 10 (°C) と変化する場合であるが、図-5 に示すように排熱の分配比はほとんど変化しない。それに対して VD のみか 10, 20, 30 (m³/s) と変化する場合には、図-6 に示すように湾内表層水から大気へ移行する熱エネルギーの分配比が減少し、湾内表層水から外海へと流出する熱エネルギーの分配比が増大する。つまり T_c の上昇は排熱の影響の増大につながり、 VD の増大は排熱の影響範囲の拡大につながる。

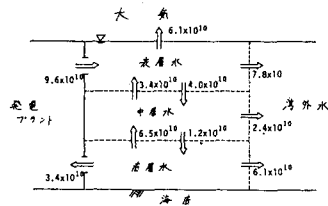


図-4 排熱の移行量

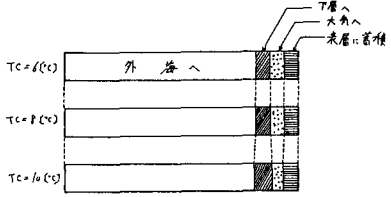


図-5 T_c による排熱分配比の変化

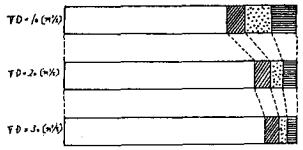


図-6 VD による排熱分配比の変化

5. 結論 解析対象に選定した日本原千力発電 (株) 敦賀発電所の現在の稼働状況では、排熱の大部分は外海へ流出している。また今後、電気出力の増大に伴い排熱量が増大した場合、取排水温度差 T_c が増大すると排水口付近の海水温が上昇し、その海域の生態系に大きな影響を与えると思われる。また冷却水量 VD が増大した場合排水口付近の水温は変化せず高温域が広がるという結果を招き、微気象への影響が懸念される。よって今後の発電所増設に際しては、生態系や微気象への影響を考慮した環境影響評価が不可欠である。

参考文献 和田明・片野尚明: 冷却水放出に伴う湾内表層水の熱収支解析 電中研技術研究所報告 No. 67008