

温排水の拡がりに及ぼす地球自転効果の数値的研究 (II)

松 野 健*・永 田 豊**

1. ま え が き

温排水量が大きくなり、形成される温水域が広くなると、その拡がりの予測に地球自転の効果を考慮する必要が生じてくる。我々は数値実験¹⁾を通して、福島第一原子力発電所の規模ですでに自転効果が有意に働いている可能性を指摘した。しかしその結果のパラメータ依存性など詳細は必ずしも回転水槽実験^{2),3)}のそれとは一致しなかった。その原因は、数値実験と水槽実験とでは諸種のパラメータ、特にコリオリのパラメータと粘性および拡散係数の値に大きな差異があるためと考えられる。前回の報告においては粘性および拡散係数等の値として、沿岸海域における数値シミュレーションでよく使われているものを使用した⁴⁾が、現実の温排水の三次元的拡がりを予測するためにどのような値を使うべきかは、必ずしも明確ではない。したがって、数値あるいは水槽実験の結果を現実の問題に適用する前に、諸種のパラメータの変化が温排水の拡がりの特性に対してどのような影響を与えるかを明らかにしておく必要がある。

この研究では、前回の報告で紹介した福島第一原子力発電所にはほぼ対応する放水条件のもとでの数値実験結果を基準として、コリオリのパラメータ・放出水密度・放出流量・放出流速を変化させたとき、温排水の拡がり方の特性がどのように変化するかを調べた。鉛直渦粘性係数・鉛直拡散係数を変化させた場合の結果については次回に報告を予定している。ただし計算の安定性を計るため、水平方向の粘性・拡散係数は変化させていない。現実の温排水の拡散予測にこの結果を直接適用するには、とるべき拡散係数をどのように選ぶか、他の要因、例えば波浪流や複雑な沿岸流系をどのように組み入れていくべきか等、多くの問題があるが、我々の研究の結果は温排水の大規模化に際し、地球自転効果が効くようになったときに、どのような物理現象が予想され、どのような考慮がはらわれなければならないかを示唆するものとして、工学的に見ても意味のあるものと考えられる。

2. 数値モデル

簡単のため南北に走る海岸線を考え、温排水はこの海岸線に設けられた矩形断面の放水路（深さ 4 m）から、東方に向って水深一様（深さ 30 m）の海に放出されるものとする。計算の便宜上放水路の北 4 km、南 8 km の所に東西に走る岸を設けて、沖合 4 km の所に開放境界をおいた矩形の海を考える。ここで方位には物理的な意味はないが、表現の便宜上選んだもので、座標軸は東方に x 軸を、北方に y 軸をとり、 z 軸は海面から下方にとるものとする。

計算に用いた基礎方程式には、静水圧近似・ブジネスク近似を適用した。すなわち用いた運動方程式および連続の方程式は、

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uw}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} - f v \\ = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + A_h F^2 u + A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial vu}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} + f u \\ = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + A_h F^2 v + A_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \\ 0 = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \end{aligned}$$

である。ここで、

$$F^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$$

であり、 u, v, w はそれぞれ x, y, z 方向の流速、 p は圧力、 ρ は密度で、 ρ_0 は基本場（周辺水）の密度 (1 g/cm^3) である。また f はコリオリのパラメータ、 g は重力の加速度 (980 cm/sec^2)、 A_h, A_v はそれぞれ水平方向・鉛直方向の渦動粘性係数である。

計算の効率化のため、表面非発散 (rigid lid) の仮定を置き、表面重力波を抑制した。このため、放出量に応じた水量がただちに沖の開放境界から流出するものとして計算した。なお西岸は粘性境界としたが、他の境界面（南北の岸および海底・海表面）は slippery としてあつ

* 理修 (財)海洋生物環境研究所 主任研究員

** 理博 東京大学教授 理学部地球物理学教室

かった。

海水の塩分は一樣と考え、海水の密度は水温にのみ線形的に依存するものとし、計算では形式上直接密度に対して拡散方程式を適用した。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = K_h \nabla^2 \rho + K_v \frac{\partial^2 \rho}{\partial z^2}$$

ここで K_h , K_v は水平方向、鉛直方向の渦動拡散係数である。全ての境界は、東側の開放境界を除き断熱とし、大気との間の熱の交換は無視されている。

上記の基本方程式を差分化して数値積分を行なうが、その具体的な方法は、基本的に Bryan⁴⁾、あるいは Sugimoto⁵⁾ と同じである。水平方向の格子間隔は東西・南北とも 200 m にとり、鉛直には表面から 2, 2, 2, 3, 5, 8, 8 m の 7 層を考えた。

各種のパラメータの値は、便宜上 A_h , K_h はそれぞれ $10 \text{ m}^2/\text{sec}$, $1 \text{ m}^2/\text{sec}$ に固定したが、他の諸量は、

$$f = 0.88 \times 10^{-4} / \text{sec} \quad \delta \rho = 1 \text{ kg/m}^3$$

$$Q = 80 \text{ m}^3/\text{sec} \quad v_0 = 0.3 \text{ m/sec}$$

$$A_v = 1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec} \quad K_v = 1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{sec}$$

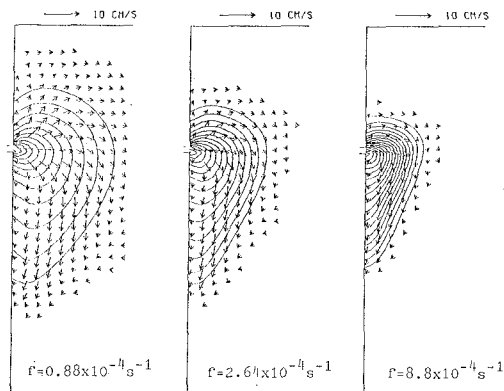
を基準的な値に選び、これを用いた計算結果と、いずれか一つまたは二つのパラメータを変化させた計算結果を比較して、これらの値の変化が温排水の拡散特性にどのような変化を与えるかを調べる。ここで基準にとったコリオリのパラメータはほぼ福島の緯度 (37 度) に対応する値であり、密度差 $\delta \rho$ は 33‰, 15°C 前後の海水にあてはめると約 5°C の温度差に対応する。福島第一原子力発電所の最大放出流量は、270 m^3/sec であるので、ここでの放出流量 Q はやや小さめといえるが、南あるいは北側の放水口だけを考えればこの程度といえる。また v_0 は放出流速である。

3. 諸パラメータの変化によって生じる温排水の振舞いの相違

(1) コリオリのパラメータ

コリオリのパラメータを 0 とした場合については、前に報告したので、ここでは他のパラメータをそのままにして、 f の値だけを基準値のそれぞれ 3 倍、10 倍にしたときの温排水の振舞いを見ることにする。勿論、地球上で f の値が最大になるのは北極であり、そこでの値は $f = 1.45 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$ であるから、このような値は地球上では起こり得ない。しかし、 f の現象への効き方を見るためには、このような極端な値について見ておくことも意味あるものと考え。

図一に温排水放出開始後 48 hrs における表層での密度分布および水平速度分布を、左から標準的な場合、 f を 3 倍、10 倍にした場合について示す。図では、放出水と周辺水の密度差の 0.05 を単位として、等密度線

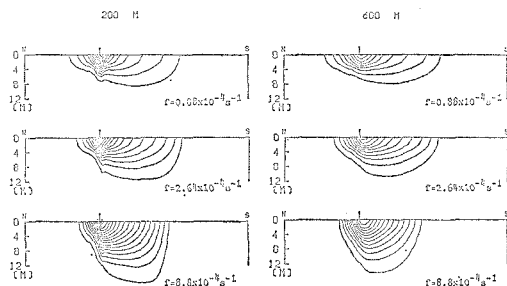


図一 コリオリのパラメータの変化による表面層での密度場、水平流速場の変化。 $T = 48 \text{ hrs}$ 。

を引いているが、放出口の近くの等密度線は簡単のため省略してある。(したがって、最も外側のコンターが 0.05, 次が 0.10 となる。以下全ての密度分布図は同じ要領で示す。) これらの図から解るように、コリオリのパラメータ f の増加は、温排水の水平的な広がりを明らかに抑制する働きをしている。

図二に $x = 0.6 \text{ km}$ および 0.2 km の線に沿った $T = 48 \text{ hrs}$ の密度の鉛直分布を、3 つのケースについてそれぞれ示す。 f を増大させるほど暖水塊の厚さが増大する様子が解るであろう。この断面図で暖水の拡がり方に著しい南北の非対称性が表れているが、この非対称性は f が大きいほど、また断面の位置が岸に近いほど顕著になっている。これは、図一で見られるように、回転場における準地衡流パランスのために、等圧線 (近似的に等密度線または等温線) に沿って時計回りにめぐる流れが水塊の中に生じるが、この流れが暖水を水塊の南側岸よりに集める働きをするためと考えられる。また等密度線の最深部の位置が、 f の増加と共に相対的に水塊の南端に近づく傾向がある。このため、暖水塊の南側の端近くでは、等密度線が鉛直方向に走る傾向があり、そこにフロントが形成される。このようなフロントの形成も回転場に特有の現象である。

暖水塊の外縁の拡がりは、 f が大きくなると相対的に

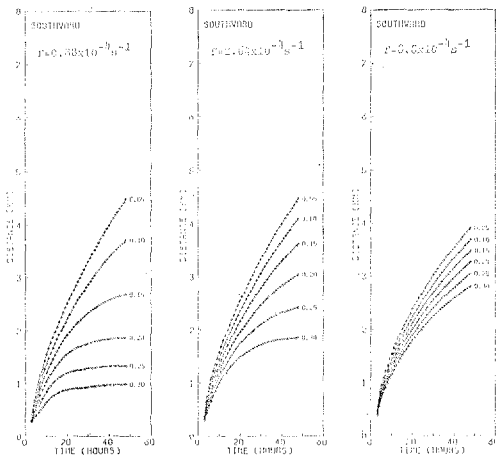


図二 コリオリのパラメータを変化させた時の密度断面の変化。 $T = 48 \text{ hrs}$ 。

小さくなるが、内側の等密度線についてはむしろ逆である。図-3に、各等密度線についての最南端の位置の時間変化を3つのケースについてそれぞれ示す。この図からも明らかなように、密度差が0.15より大きな内部の等密度線は、 f の大きい場合の方が伸びが速い。面白いことに、 f が小さい時、密度差の大きい等密度線はある時間で伸びが止り、それ以上は伸びずに平衡状態に達する傾向を示す。あるいは、ある値の等密度線について考えると、それが定常の位置にたつまでの時間が f の増加とともに増大する傾向にあるとも云えよう。通常、現象に f だけがかかわっているならば、時間スケールは f に逆比例するはずであるから、この結果はあ

る意味で奇妙である。しかし、このような外縁近くの等密度線と内側の等密度線との特性の差が、暖水塊の内部の等密度線密度の相対的变化をもたらし、 f の大きい時の等密度線の間隔が縮まってそれが水塊の厚さを増す働きをしていると云えるのである。

支配的な物理機構を見るため、図-4に基準的なケースについて、 $T=48$ hrsにおける $x=0.7$ kmの線上での運動方程式の各項の寄与の分布を示す。この図から解るように、 x 方向の運動方程式においては、放出口の近くを除けば、ほとんどの部分ではほぼ地衡流のバランスが



成り立っている。\$y\$ 方向の運動方程式では摩擦項が重要な働きをしており、若干のコリオリ項の寄与があるものの、主として摩擦項と圧力項との間でバランスが成り立っている。コリオリ項は放出口の北側と、南端のフロント付近でその役割が相対的に大きくなっている。言い換えれば、東西流は傾斜流の、南北流は地衡流の性格を強く持っていると言える。図-5 に表層、 $x=600$ m 線上(密度と流速の評価される格子点は1メッシュずれている。)での拡散方程式の各項の寄与の分布を、 $T=12, 24$ および 48 hrs について、基準の場合(左図)と f を10倍にした場合(中図)に示す。放出開始後あまり時間がたたないうちは、放出口の近くを中心に種々の項の寄与が見られるが、時間の経過と共に放出口のごく近くを除いて、移流項と鉛直拡散項と時間変化項以外の寄与は無視できるようになる。そうして、暖水塊南端のフロントの付近を除くと、移流項と鉛直拡散項の間のバランスが成り立ち、水塊内部の等密度線の定常性が得られることになる。これに対して、フロントの所では、等密度線が鉛直に走る傾向から、密度の鉛直方向のコントラストが弱くなり、鉛直拡散項の寄与が小さくなり、移流項は直接時間変化を引き起こすことになる。

南端のフロントは、移動と共にそこでの密度の値が変化していくと考える方が自然であるから、フロントを拡散方程式での時間変化項の先端付近での局所的な極大で定義することにしよう。このように定義した時のフロントの進行速度は、計算の範囲内ではほぼ一定で、基準にしたケースでは 1.94 cm/sec である。 f を10倍にした場合についても、全体の様相は似ているが、フロントの移動速度は、 1.28 cm/sec に減少している(f が3倍の場合の速度は 1.77 cm/sec)。このフロント域が去った後で定常状態が出現するわけであるから、この速度の減少は定常になるまでの時間スケールの増大をもたらす筈である。ただ、図-5 を見るかぎり、時間スケールの増大はむしろフロント域の幅の増加に起因しているように思われる。

水槽実験³⁾においては、岸沿いに南に進むフロントの速度は $f^{1/4}$ に比例する傾向を示しており、今回の数値実験の結果とは逆センスである。この差異は実現された暖水塊の形状が水槽では、放出口近くの半円状の水塊と岸沿いに延びる舌状の部分に別れていたのに対し、数値実験では、半円状の水塊のみが現われている所によるのではないかと考えている。いいかえれば、水槽の中央で温水を出した実験³⁾の凸レンズ状の水塊の半径が $f^{-1/2}$ に比例したものとの中間の状態が今回の数値実験のパラメータ範囲で出現したのであろう。鉛直拡散係数をずっと小さく取った場合には、この水塊の分離にあたる様相が現われる。この点については次回に検討する予定であ

る。いずれにせよここでの結果は自転効果が、現象のアスペクト比を増大させる形で働いているわけである。

(2) 放出水の密度差

図-6 に放出水と周辺水の密度差を3倍に増加させたときの $T=48$ hrs における表層の密度場、流速場を示す。このとき流速場からわかるように、フロントはすでに南岸にまで達している。この場合のフロントの速さは 2.90 cm/sec であった。一般に密度差の増大は外縁の延びの増大、内側等密度線の拡がりの抑制、水塊の厚さの減少等、 f の減少に対応する影響を温排水の振舞いに与える。これは一つには、密度差の増加は成層を強める効果を持つから、現象のアスペクト比を減少させるとして説明しうる。(コンターは密度差の5%ごとであり、絶対値としては図-1, 2 に比べて、図-6の間隔は5倍の粗さになっている。) しかしここで見出された対応関係はいわば定性的なものであって、両者を結びつける無次元量のようなものは見付かっておらず、細部まで、 f の減少と密度差の増加が対応するわけでは無い。

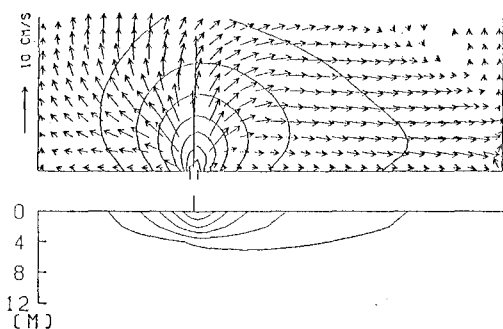


図-6 密度差を5倍にした時の表層での密度と水平流速場(上図)と密度断面(下図 $x=600$ m)。 $T=48$ hrs.

(3) 放出流量と放出流速

放出流量を3倍にして、福島第一原子力発電所の最大規模に近い 240 m³/sec とした時の 24 hrs 後の表層の密度分布および $x=200$ m の線に沿った密度断面をそれぞれ図-7, 8 に示す。これ等の図には、比較のため、基準のケースについて、同じ流出量に対応するもの(72 hrs)、同じ時刻の分布を幾何学的相似を仮定して引伸ばしたもの($\sqrt[3]{3}$ 倍)を示してある。同じ流出量で比べた場合、外縁の延びは流量の多い方がずっと抑えられるが、内側の等密度線の拡がりは著しく加速される。しかし、図-5 の右図に拡散方程式の各項の寄与の分布の時間変化を示すが、分布のパターンは基準のケースの同時刻の場合に良く似ており、幾何学的相似を仮定した比較の方が自然であるようだ。実際に同時刻の基準のケースの結果を引き伸ばしてやると、外縁の形は非常に似ている。フロントの速度も 2.87 cm/sec となり、基準のケースでの値の $\sqrt[3]{3}$ 倍、 2.80 cm/sec に非常に近い値をと

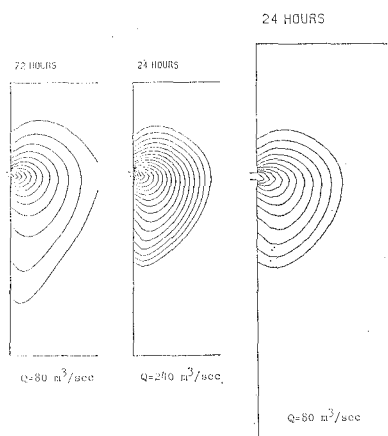


図-7 放出流量3倍の時の24 hrs後の表層の密度分布(中央). 左図は基準ケースの72 hrs後の分布, 右図は24 hrs後の分布を $\sqrt[3]{3}$ 倍に拡大したもの.

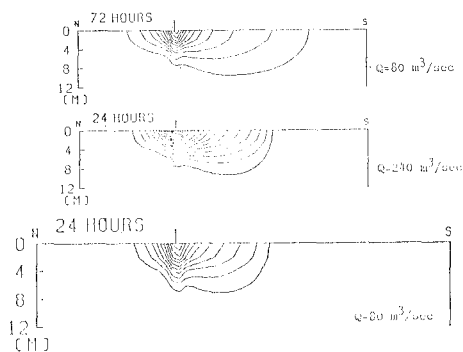


図-8 密度断面での図-7と同様の比較 ($x=200$ m).

る. しかし内側の等密度線の拡がりの速度は, 幾何学的相似よりも更にずっと速い.

放出流速に対する依存性は放出口のごく近くを除くとほとんど結果に影響を与え無い. ただ, 流速を増すと放水口のすぐ沖で下からの水の連行が増加する傾向があり, 放出流量が少し増大し, 密度差が少し減少するような効果が僅かに現れる.

4. おわりに

計算例も少なく, 現在の結果はむしろ定性的な段階であるが, 地球自転効果の現れ方についてのある程度の見通しが得られたように思われる. 特に, あつかったパラメータ範囲では, 鉛直方向の渦動粘性・拡散が重要な働きをしていることが示されている. 次の機会にこれらの係数の変化の温排水の振舞いにたいする影響を明確にしていける予定である.

参考文献

- 1) 松野 健・永田 豊: 温排水の拡がりに及ぼす地球自転効果の数値的研究, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 536~540, 1983.
- 2) 永田 豊・北村佳照・道田 豊・福森一郎: 回転水槽による温排水の拡がり方に対する地球自転効果の研究, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 531~535, 1983.
- 3) 永田 豊・道田 豊・仲井圭二: 回転水槽による温排水の拡がり方に対する地球自転効果の研究(2), 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 625~629, 1984.
- 4) Bryan, K.: A numerical method for the study of the circulation of the world ocean, J. Comput. Phys., Vol. 4, pp. 347~376, 1969.
- 5) Sugimoto, N.: Coastal upwelling: onshore-offshore circulation, equatorward coastal jet and poleward undercurrent over a continental shelf slope, J. Phys. Oceanogr., Vol. 12, pp. 272~284, 1982.