

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)

永田 豊*・道田 豊**・仲井 圭二***

1. はじめに

海洋中に放出された温排水の挙動については、局地的現象として地球自転の効果を無視してあつかわれるのが通例である。たしかに、現実の温排水の拡がりについては、複雑な波浪流、沿岸流、各種の乱れ、地形効果などがより卓越するためか、地球自転の影響がきわだった効果を与えているとは云えないようである^{1),2)}。しかし、福島第一原子力発電所の例を念頭においた数値実験の結果³⁾は、現在の規模でも有意の地球自転効果が現われてもおかしくないことを示唆しており、今後排熱規模が増大されたり、複数の排熱源が近接して設置されたりした場合には自転効果が重要な要因となることは容易に予想される所である。

回転場の流れは、その準地衡流的特性から等圧線（従って水面の等高線）に沿って流れる傾向をもち、水は高きより低きに流れるという我々の局地的現象に対する直観には著しく反する振舞いをする。地球自転の効果は、温排水の水平的な拡がりを抑え、陸岸の存在下では拡がりに著しい非対称を生じさせるが、その細部については予測が難しい。そのため回転水槽を用いた自転効果を強調した実験が、問題点を明確にし関連するパラメータの相対的な重要度をつかんでいく上で、非常に有効な手段を提供することになる。実験結果の一部はすでに昨年の海岸工学講演会で発表したが⁴⁾、今回は水槽の中央部に排水した場合、すなわち陸岸の存在しない場合を中心とし、陸岸からの排水については定性的な議論を行なったにすぎなかった。ここでは陸岸から放出した温排水の振舞いについて、より定量的な結果を報告する。

2. 実験方法

円柱状の亚克力製の水槽（内径 78 cm）を回転台の上に乗せ、最初に塩水（重い周辺冷水に対応）を入れておく。回転台を一定の角速度で回転させ、内部の塩水が水槽と同じ角速度で回転するようになるのをまって、塩

水の表面近くに置かれた放水口から着色した真水（軽い温排水に対応）を注入し、その拡がり方を上方または側方に取り付けたカメラによって撮影する。今回の実験では、最初の塩水の深さ H は 11 cm または 16 cm とした。放水口は壁の所に置き、真水は 0.7 cm^2 の放出口からほぼ水平に放出される。実験のパラメータは回転台の回転速度（反時計回りに 6.0 sec から 16.0 sec の周期、コリオリのパラメータ f として 2.1 sec^{-1} から 0.78 sec^{-1} ）、塩水の密度差 $\Delta\rho$ (0.001 g/cm^3 から 0.030 g/cm^3)、注入流量 Q ($0.29 \text{ cm}^3/\text{sec}$ から $5.25 \text{ cm}^3/\text{sec}$) および海岸線に相対的な放出角度（放出口左側壁沿いの方向から、時計回りに測って 0° から 180° ）である。また温水塊中の速度場の測定には pH 法を用いた。

3. 陸岸から直角方向に放出された温水の振舞い

陸岸から直角方向に放出された温水（低密度水）の拡がりの測定例を図-1、および図-2 に示す。外周につけたマークは、注入開始後 10 秒毎の岸沿いにのびる水塊のフロントの位置を示し、数値（単位秒）をつけた時刻に対しての注入水の拡がりの輪郭をそれぞれ示してある。放出された温水は最初放出口の右前方に半円形の水

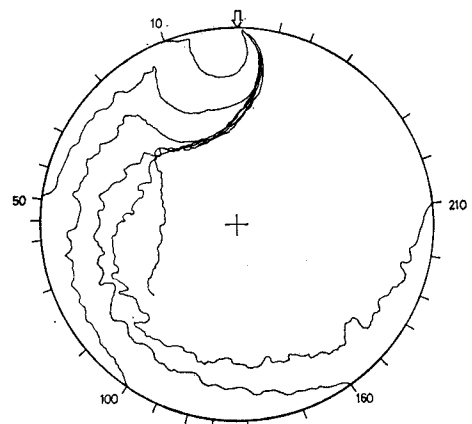


図-1 陸岸から直角に放出された温水の拡がり
($\Delta\rho=0.020 \text{ g/cm}^3$, $f=1.68 \text{ sec}^{-1}$, $Q=3.0 \text{ cm}^3/\text{sec}$)

* 正会員 理博 東京大学教授 理学部地球物理学科

** 理修 海上保安庁水路部海洋調査課

*** 東京大学大学院 理学系研究科

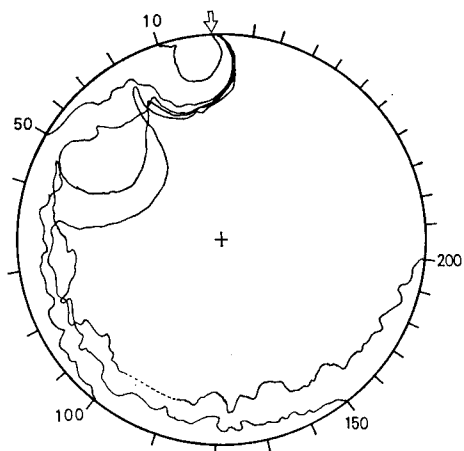


図-2 陸岸から直角に放出された温水の拡がり
($\Delta\rho=0.010\text{ g/cm}^3$, $f=2.10\text{ sec}^{-1}$, $Q=3.0\text{ cm}^3/\text{sec}$)

塊を作るが、この半円は放出口に対して極めて非対称で、左側へののびに対して右側へののびが大きい。半円形状の水塊中の水は、時計回りに回転し、その一部は壁沿いに放出口の方にもどり、放出水の中に取り込まれる。しかし、全体としてみると、この準傾度流的な循環は、半円形水塊の放出口からみて右端の壁近くに温水を貯める形となり、この貯められた温水は、壁を右に見る形で壁に沿って舌状に伸びて行く。

舌状にのびる部分の沖側の境界には、図-1に見られるように、内部変形半径程度の波長をもった波動を生じる。しかしある条件のもとでは、図-2に示すように、放出口の周りの第一の半円形の渦の隣りに、第二の渦が大きく成長する場合がある。図でもわかるように、第一の渦の幅 r は、ある一定の限度を越えては成長せず、慣性周期 ($2\pi/f$) の 20~30 倍程度の時間後にはほぼ一定の値 (R) になる。第二の渦については、それが発生した場合には、我々の実験の範囲内では時間とともにどんどん成長して行く。第一、第二の渦の発生・維持の物理機構は明確でないが、以上のことから第一の渦は放出流の性質により直接の支配をうけており、第二の渦は、水槽の中央に放出した場合のレンズ状水塊の分裂現象⁴⁾のような、束縛のない条件下の不安定現象ではないかと考えられる。

種々の条件のもとで第二の渦の発生の有無を調べたものが、図-3(a), (b) である。図では発生した場合を○、発生しなかった場合を×、どちらともいえない場合を△で示してあるが、 f , Q が大きいほど、 $\Delta\rho$ が小さいほど渦の発生が起り易いことがわかる。図中実線で発生の有無の領域分けを試みてあるが、境界線の形を正確に決めるには資料がまだ十分でない。

陸岸沿いに進行する温水舌の先端の進行は、放出の初

期には、第一あるいは第二の渦の形状により若干の差異を生じるが、ある程度の時間が経過すると、ほぼ一定の速度 V で進行するようになる。図-4 に V のパラメータ依存性を示すが、我々の実験の範囲内では

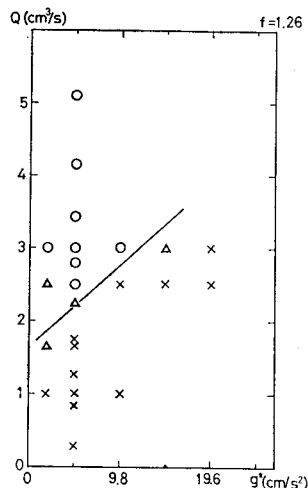


図-3 (a) 第二の渦の発生条件 ($f=1.26\text{ sec}$)

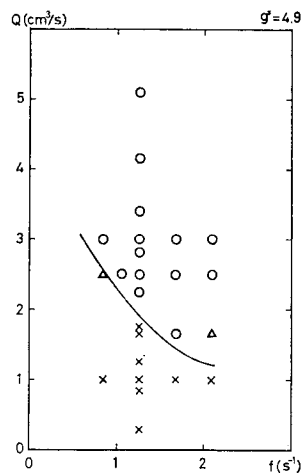


図-3 (b) 第二の渦の発生条件 ($\Delta\rho=0.005\text{ g/cm}^3$)

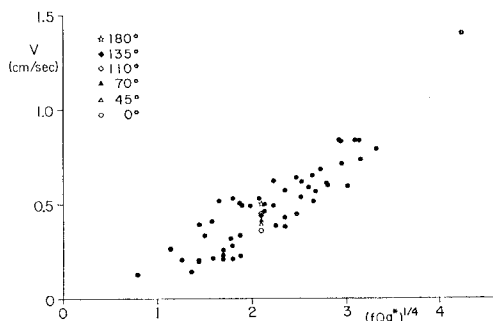
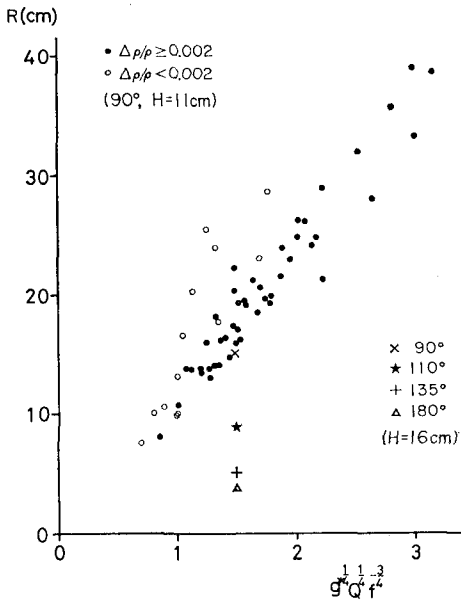


図-4 岸沿に進む温水フロントの速度 V のパラメータ依存性



図—5 第一の渦の幅のパラメータ依存性

$$V = 0.23(fg^*Q)^{1/4}$$

ただし、 $g^* = g\Delta\rho/\rho$ の関係がある。第二の渦の発生の有無は、この先端速度に有意な影響を与えない。

すでに述べたように、放水口の右前方に生ずる第一の渦の幅は、一定の大きさ以上には発達しない。この定常に達した幅 R のパラメータ依存性を 図—5 に示す。 R は $\Delta\rho$ が非常に小さい場合を除くと、

$$R = 12.1(g^*Q/f^3)^{1/4}$$

の関係にある。 $\Delta\rho/\rho < 0.002$ の場合、 R は系統的に大きい方にずれる傾向にある。これは、この一連の実験で、初めの塩水層の深さ 11 cm にとっているが、 $\Delta\rho$ が小さいとき真水層の厚さが大きくなり、その有限性がきいてきたためではないかと考えている。

4. 放出角度の温水の拡がりへの影響

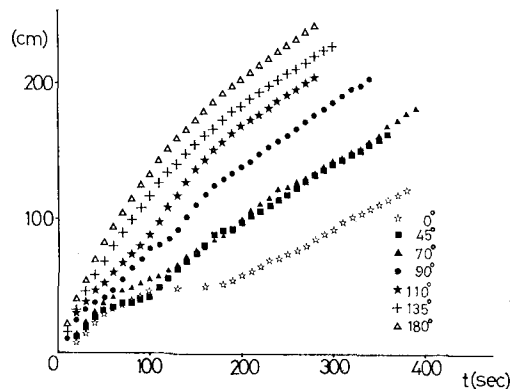
放出口近傍の条件が温水の拡がりによどのような影響を与えるかの一例として、陸岸に相対的な放出角度の温水域の形状への影響を調べた。今回の実験では、 $\Delta\rho = 0.004 \text{ g/cm}^3$ 、 $Q = 3.5 \text{ cm}^3/\text{sec}$ 、 $f = 1.4 \text{ sec}^{-1}$ 、初期水深を 16 cm に固定して、放水口の角度が 0° 、 45° 、 70° 、 90° 、 110° 、 135° 、 180° の 7 ケースについて行なっている。この条件は、前章で述べた 90° のケースについては、第二の渦の発生するパラメータ範囲にある。

図—6 に種々の放出角に対して陸岸沿いにのびる温水舌のフロントの位置の変化を示す。放出開始後 100 ないし 200 秒の間は、放出角の大きい程（温水舌の進行方向の放出速度が大きい程）温水舌は早くのびる傾向が見られる。しかし、ある程度の時間が経過すると、放出角度

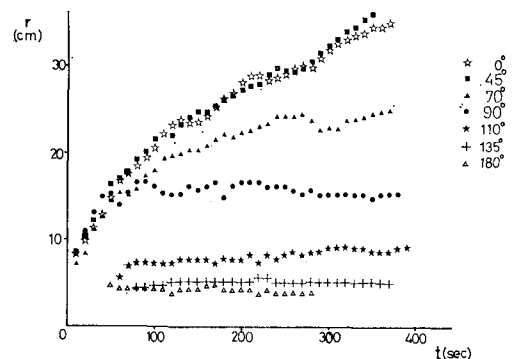
に関係なくほぼ同一の速度でフロントが進行するようになる。この定常速度を種々のパラメータ範囲について調べた 90° の場合と共に 図—4 に示すが、両者は良い一致を示している。このことは、放出後ある時間経過したあとの温水舌フロントの進行速度は、放出口近傍の条件にはよらないことを示すものである。

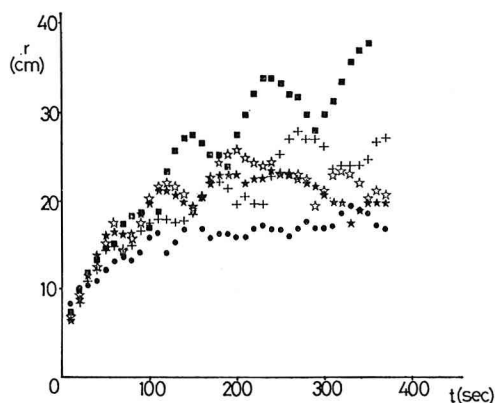
放水口前面の第一の渦の幅 r の時間変化の様子を 図—7 に示す。この図で、 0° 、 45° 、 70° のケースについては変動が大きいの、それぞれ、3 回、5 回、5 回の実験結果の平均で示してある。 90° 以上では、第一の渦の幅が一定値に収束し、その大きさは角度と共に減少する傾向が見られる。 90° 以上の結果について、定常に達した第一の渦の幅を 図—5 に加えてある。測定誤差範囲内であるが、図—7 の 90° の場合の幅が若干小さめであるのは、初期水深を 16 cm としたことが影響しているかもしれない。定量的な関係を得るにはさらに実験例を増す必要があるが、この結果は放水速度の岸に直角方向成分が幅に関係することを示唆するものであろう。

70° 以下の放出角度では、第一の渦の幅は少なくとも我々の実験の範囲内では成長しつつきて、一定値に近づ



図—6 種々の放出角に対する陸岸沿いのフロントの位置の時間変化

図—7 種々の放出角に対する第一の渦の幅 r の時間変化。 0° 、 45° 、 70° については変動が大きいの、数回の実験値の平均を示す。

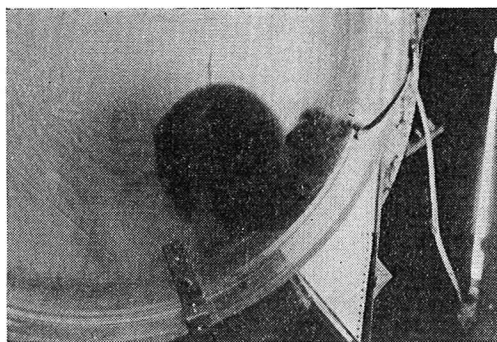


図—8 放出角 70° に対する第一の渦の幅 r の時間変化

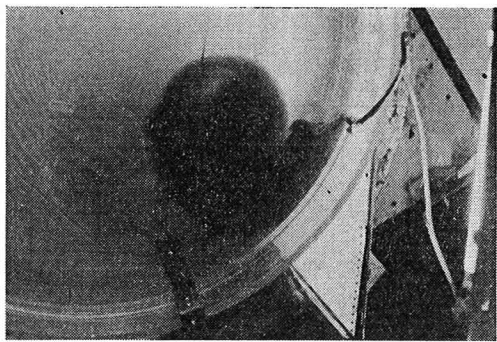
く傾向はない。図—8 に、 70° のケースについて個々の実験結果を示す。 70° 以下のケースでは、幅の単調な増大傾向の上に、何か周期的な変動が重なるのが通常である。この変動は放水条件の微妙な差異によって、位相や振幅が変化するようだが、面白いことに、 70° のケースで変動が発生しなかった場合は、 90° のケースとほぼ同じ変化を示し、定常値らしいものが得られるのに、変動成分の増大と共に発散傾向が増大し、図の例で最も大きな変動が見られる場合は、 0° あるいは 45° の r の変化とほぼ同じ様子を示す。(図—7 参照)。 0° 、 45° の両ケースの間にほとんど系統的な差異が見られないことと合わせて、 70° 付近を境に第一の渦の特性に大きな違いを生じており、それ以上の角度では放出角によって定まる一定値に収束する傾向をもつものに対して、それ以下ではほとんど放出角には依らない成長率をもつ発散性の渦となるようである。

放出角度 0° ないし 45° の場合、すなわち温水舌ののびとは反対の方向へ放出した場合、最初放水口の左前方に円形に近い温水塊が形成されて、右方向への温水舌の形成はかなり遅れる。今回の放水条件のもとでは、この温水塊は発達と共に、写真—1 に示すような S 字型の構造をもつようになる。この S 字型ないし楕円形状の渦は、それ自身時計回りにゆっくりと回転する(写真—2)。S 字型の渦の側面が放水口右側の壁にぶつかると、岸沿いにのびた舌状の帯の外縁に、かなり大きな波動ないし渦を加える形となる。これが第二の渦の形成につながる場合もあるが、内部構造が明確でなくなり半円形の第一の渦とみなせる形になる場合もある。いづれにせよ、やがて再び S 字型の構造が現われ、それがまたゆっくりと回転するという変遷をくり返す。この S 字型ないし楕円形の渦の回転が、図—8 で r の周期的変動として現われるわけである。

放出角度 90° の場合には、S 字構造は明瞭ではないが、ビデオを用いた観察結果ではこれに対応するように



写真—1 放出角 0° の場合の温水域の拡がり。放出開始後 70 秒



写真—2 放出角 0° の場合の温水域の拡がり。放出開始後 80 秒

第一の渦の沖側に反時計回りの成分をもつ渦動を発生し、これが右方に運ばれて第二の渦の発生につながる傾向が認められる。従って、 70° 以下の放出角による第一の渦の発散性は、 90° の場合の第二の渦が、放出水のもつ左方向の流速成分のため、放水口の前ないし左に捕捉されたものと解釈できそうである。 90° 以上の放出角において、この様な渦の成長(r の周期的変動)があまり見られないのは、発生した(不安定性の)渦が一般流によって速やかに右方向に流されてしまう為であろう。 90° のケースで見た第二の渦(不安定性の渦)の発生条件が、全ての放出角にあてはめうるかどうか疑問のある所であるが、今回の実験は第二の渦の発生するパラメータ範囲で行なわれたことは注目値する。

水槽の中央において放線方向の速度を出来るだけ小さくして放水した場合⁴⁾にも、レンズ状の水塊の分裂という形で同様の S 字型の構造が観測されていた。水平速度成分をもつ今回の放水口を、試みに水槽の中央に移した場合の温水域の拡がり方を写真—3 に示すが、この水平成分をもつ場合には、かなり早い時期に S 字構造あるいは水塊の分裂が起こるようである。放出水のもつ速度シアが水塊の不安定性を増大するのではないかとと思われるが、そうだとすれば、関与するパラメータは放出流量 Q だけでなく、絶対流速あるいは放出口の面積・形状が

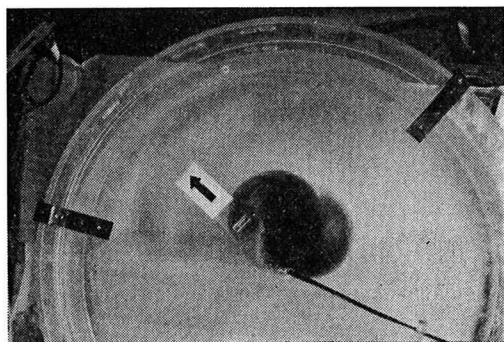


写真-3 同じ条件で水槽の中央から水平に放出した場合の温水域の拡がり。放出開始後 60 秒

かかわってくると考えられる。この点についてはさらに検討を加えて行く予定である。また 90° 以上の放出角で S 字型の構造が明確でないのは、右側の壁・陸岸の存在のためであろう。少なくとも S 字型構造全体が時計廻りに回転する性質をもつから、放水角の小さな場合に中央での自由放出の場合と似てくることは十分に予想しうる所である。

5. おわりに

温排水の拡がり方を論ずる場合、放水口の近傍と、放出口の微構造がきかなくなる遠方領域に分けて論ぜられることが多い。地球自転効果のきいてくるのは、さらに遠方の領域と考えるのが普通であろう。確かに実験結果の示すように、岸沿いに放出口右方（北半球を考えてい

る）にのびる温水舌のフロントの進行速度は、放出角度のような量にも左右されることが少なく、超遠方領域での温排水の振舞いとみなすことができそうである。

しかし、実験の結果は、放水口の前面での温水域の幅のような量に対しては、放水方向（従って沿岸流の存在）のような、比較的近領域の条件が自転効果とからみ合って影響することを示唆しており、また第二の渦の発生条件や、近領域での温水塊構造には、より放水口近傍の条件のきくことを示唆している。また、実験に現われた S 字型の構造は、時計廻りの流速場のみを予想する回転場の通常の直観とはやや異なった性質をもつものであり、地球自転効果がこのような形で現実の温排水の拡がり方に効いてくるとするならば、自転効果としては認識されない可能性も存在する。

最後に、この研究は文部省科学研究費によって行なわれ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) 大塚行則・三村信男・堀川清司：大規模化した温排水の拡散特性，第 29 回海岸工学講演会論文集，pp. 619～623, 1982.
- 3) 松野 健・永田 豊：温排水の拡がり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.
- 4) 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.