

## 開口湾で観測された熱塩レンズについて\*

中村重久\*\*

### On thermohaline lens observed in a wide-open bay\*

Shigehisa NAKAMURA\*\*

**Abstract:** This reports on formation and movement of a thermohaline lens observed in a wide-open bay. First, a conceptual model is introduced in order to show a real pattern of the waters in the bay considering inflow of river discharge and influences of the offshore waters from the open ocean. For the convenience, a part of the observed result in Tanabe Bay is introduced to demonstrate the model to be reasonable. The author believes that this is the first time of reporting the observed thermohaline lens in Tanabe Bay. This lens should be understood as a result of interaction of the river discharge and the effects of the offshore waters in the bay. The lens should be a three dimensional as that named Meddy in the eastern North Atlantic, though the scale of the former is completely different from the latter.

#### 1. 緒言

外洋に面した開口湾は、その湾奥に、流入河川がある。また、この湾と河川との中間に干潟がある。このような条件をもった開口湾の河川水・湾内水・外洋水の静的あるいは動的安定状態について、簡単な模式的モデルを考えた。とくに、対象とする湾が感潮域であり、干潟での干潮時における水分蒸発が顕著な場合には、従来、沿岸海洋の問題として想定されていたものと全く異なる状態があらわれうる。本文では、そのような状態に対する観測の一例をも示し、沿岸域の現象が海洋学的には、まだ十分理解されていないことに論及したい。とくに熱塩レンズについて述べる。

#### 2. 模式的思考モデル

外洋に面した開口湾は、一般に、複雑な形状であり、そこでの海水の流動パターンも、簡単なものではない。ただ、基本的特徴に焦点をあてて、湾軸沿いの縦断面にあらわれる状態を模式的モデルの導入によって検討する。

\* 1992年3月29日受理 Received March 29, 1992

\*\* 京都大学防災研究所附属白浜海象観測所

〒649-22 和歌山県西牟婁郡白浜町堅田畑崎  
Shirahama Oceanographic Observatory, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Katada-Hatasaki, Shirahama, Wakayama, 649-22 Japan

従来、感潮河川や感潮域の淡水と海水については、多くの検討例があり、また、多数のモデルもある。しかし、ここでは、そのすべてを紹介することはしない。

ここで導入しようとする模式的モデルは、Fig. 1のようなものである。湾奥では河川水流入  $d_r$  があり、湾口では底層に外洋水  $d_p$  の影響がある。湾内水  $d_a$  は、 $d_r$  と  $d_p$  との影響を受けている。とくに、Aの例では、水の密度について、 $d_r < d_a < d_p$  である。河川水の切離したものは沖合へ運ばれ、パッチとして認識される。ここでは、それぞれの水の密度が、それぞれの水温  $T$ 、塩分  $S$  と深さ  $D$  (あるいは圧力) の関数として定まると考えてよい。この場合、 $TS$ 図に示すように、 $d_r$ 、 $d_a$ 、 $d_p$  の代表的な水温および塩分は、点  $P$ 、 $X$ 、 $Z$  で特徴づけられる。すなわち、水温は  $d_r$ 、 $d_a$ 、 $d_p$  の順に高く、塩分は  $d_r$ 、 $d_a$ 、 $d_p$  の順に高くなっている。湾内に残留した外洋水  $d_p$  にパッチの名称は与えられた例はないようである。

干潮時の水位  $LWL$  と満潮時の水位  $HWL$  との間、潮間帯に位置する干潟では、河川水流量が微量となった時期には、日射や気温などの影響をうけて水分の蒸発がうながされ、干潟面での塩分濃縮がすすむ。このようにして、高塩分・高温の干潟の水は、湾奥から底層に、あるいは中層に流下する。

また、河川水  $d_r$  が極度に低温ならば、Fig. 1Cのように、河川水は湾内底層に沿って沖へ向かう。この図で

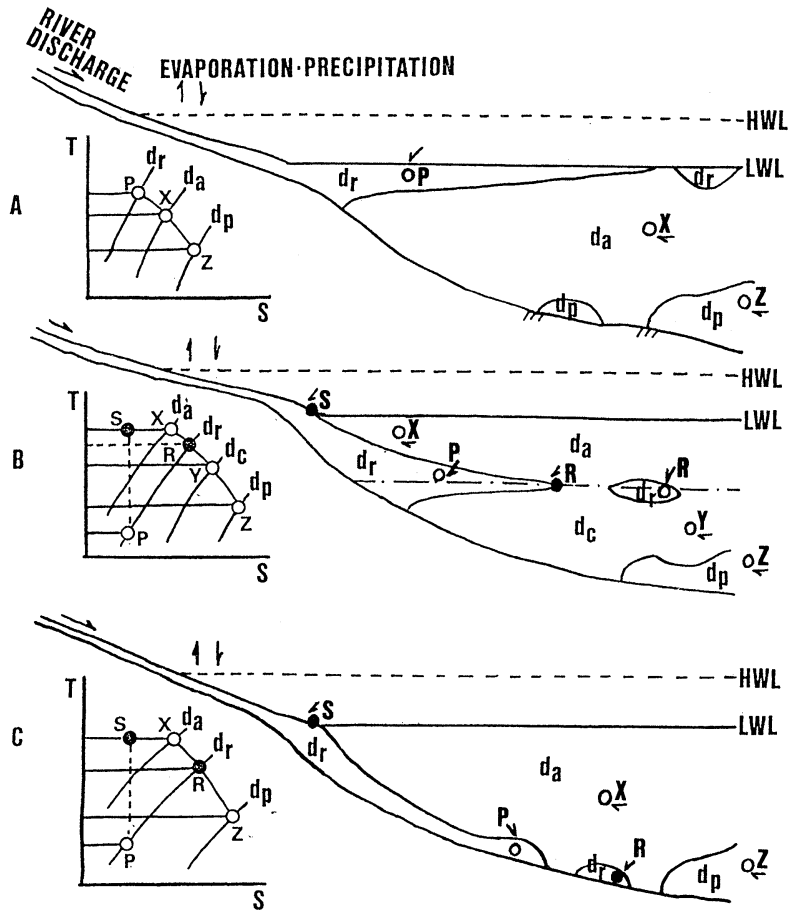


Fig. 1. Conceptual model of patterns of waters in a wide-open bay.  
 (A) sea surface spread of river discharge,  
 (B) subsurface intrusion of river water to form a subsurface thermohaline lens, and  
 (C) creeping river water on the sea floor.

は、水の密度については、 $d_r < d_a < d_p$ である。代表点は、P, X, Zで示した。河川水が湾内水と接して、状態がSとなったときには、水の密度は $d_r$ より小さくなり、 $d_r < d_a$ となることもありうる。また、 $d_r$ の水が $d_a$ の水と熱交換および塩分の二重拡散などによって、Rの状態になったときには、点X, R, Zでの水の密度は、 $d_a < d_r < d_p$ ということになる。

本文で、とくに、力をいれて説明をしたいのは、Fig. 1Bの例である。外洋水の影響は他の例と同じものとする。一般に、湾内水は外洋水と河川水との影響をうけ、強混合によって表面から底面までほとんど一樣な場合もあるが、海面での日射などによる熱的効果により、成層の状態にある例も少なくない。このように成層した湾内水へ河川水が流入するとき、直ちに混合してしまうわけではなく、河川水の特性的をもったまま湾内の同一の密度

$d_r$ の深さ(中層)に貫入する。その先端では、点Pで特徴づけられる河川水 $d_r$ が、点Rの $d_r$ になることが十分考えられる。代表点P, X, Y, Zと点Rとは、図のような位置関係になる。点Pの河川水の温度が湾内上層水 $d_a$ と同じになったとき、塩分の変化がなければ、状態は点Sで表わされることとなり、水の密度も $d_r$ より小さくなり、さらには、 $d_a$ よりも小さくなる。流入河川水は湾内水を上層の $d_a$ と下層の $d_c$ に分けることになる。この河川水 $d_r$ が湾内水の影響を受け変質し、さらに、切離して沖合へ向かうものの存在は可能である。このような変質した切離水の形状は、レンズ状である観測例からみて、熱塩レンズと名付けて差支えないであろう。

地中海では海面からの水分の蒸発が顕著であり(たとえば、Toluazin, 1981)、これが、地中海の高塩分水形成に寄与しており、さらに、大西洋に出て、地中海水の

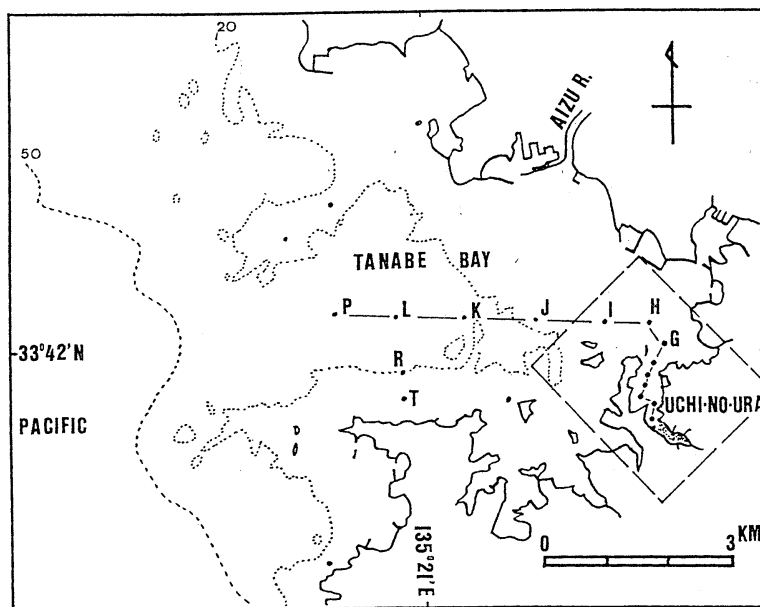


Fig. 2. Stations and survey line in Tanabe Bay as a wide-open bay.

特徴を維持しながら中層にレンズ状をなして、切離している。このような点で、熱塩レンズは、大きなスケールのもの（たとえば、Armiら、1988）もある。海水の力学を考えると、大西洋中層の熱塩レンズの特徴は、Fig. 1Bに示した例と基本的に変るところはない。Armiらの報告の後、大西洋の熱塩レンズの観測研究の例は多数にのぼることのみここに記す。

以上で、Fig. 1の模式的モデルとその検討を終ることとし、次に、観測例を示すこととしたい。

なお、これにさきだって、水温と塩分に加えて水深（あるいは水圧）が水の密度を決定する要因であることをここに記しておく必要がある。なぜならば、最近10数年にわたり、キャベリング効果（cabelling effect）が力学的に意義があるかのように取扱われているけれども、これは、水温と塩分のみを考え、水深（あるいは圧力）を無視した結果にすぎない。したがって、このような効果に力学的意義があるとすれば、水深の変動を考慮しないわけにはいかない。ここでは、この効果をさらに検討するつもりはない。

### 3. 観測例

上に述べたモデルに関連した観測例をここに示す。対象海域は、紀伊半島南西部の田辺湾および内の浦である（cf. Figs. 2 and 3）。観測点は、湾軸に沿ってとることとした。測点を結ぶ線に沿って、内の浦から田辺湾口ま

での鉛直断面について、水温・塩分の観測結果をまとめ、断面内分布パターンをFigs. 4-6に示した。これらの図の測点の位置は、Figs. 1および2の測点に対応する。ただし、便宜上、Figs. 4-6では、測点間の水平距離は示していない。測点の相互の位置関係のみを示している。

観測例のうち、Fig. 4は、内の浦に流入している河川水が、海表面を沖へ向かっていることわかる例のひとつである。これは、さきに示したFig. 1Aのパターンに対応する。

つぎに、Fig. 5では、塩分の分布から、河川水の湾内への流入過程でゆるやかな混合をしていることがある。垂表層に注目すると、この図では、密度逆転が、測点I周辺と測点C付近とに認められる。等密度線の作図とデータの離散度を考えると、密度逆転ではなくて、密度極大域あるいは密度極小域とみなされたかもしれない。いづれにしても、3次元の動的現象と考えなければ、このような観測結果は理解できない。なお、測点C付近の密度極大は、Fig. 1Bの例とみてもよいかもしれない。

また、Fig. 6では、田辺湾内の垂表層に、密度極小が認められる。測点H付近で、レンズ状をなしている。このような例は、田辺湾内で、過去において注目された例がない。おそらく、はじめて観測されたものようである。しかし、静的にみれば、垂表層の密度極小域は不安定であり、海面へと浮上するはずである。潮流の存在を考え、海岸線や海底地形を考慮すれば、垂表層の密度極

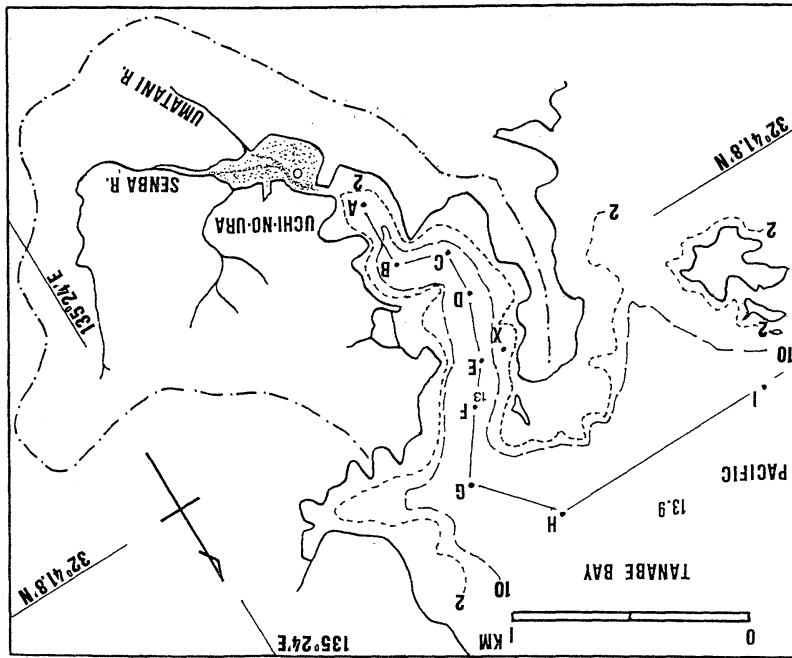


Fig. 3. An estuarine inlet "Utinoura" at the head of Tanabe Bay.

A survey line consists of stations A to I, catch ment area of rainfall for Utonoura is the area between the coastline and the hill's ridge indicated by a dot-dashed line, and wetland at the low tides is located between the rivers and the waters at the head of Utinoura (marked with 'O').

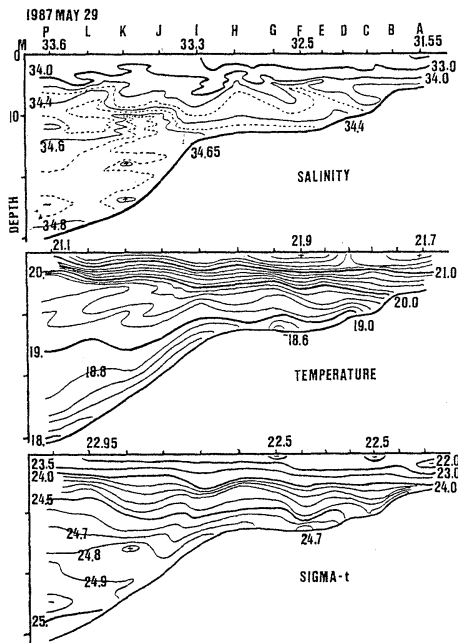


Fig. 4. Vertical sections of salinity, temperature and sigma-t on the 29th May 1987 (horizontal distance is not in scale).

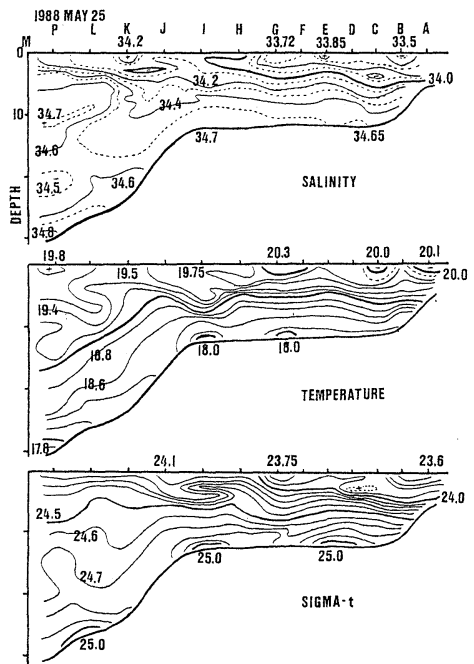


Fig. 5. Vertical sections of salinity, temperature and sigma-t on the 25th May 1988 (horizontal distance is not in scale).

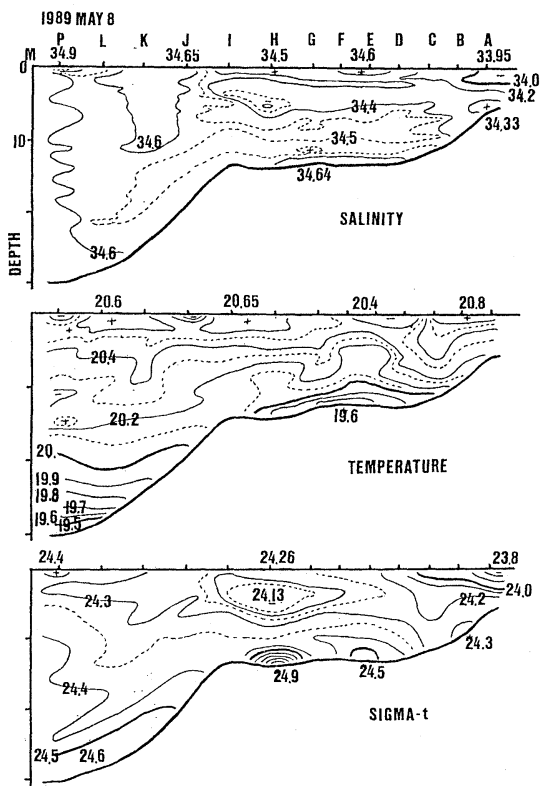


Fig. 6. Vertical sections of salinity, temperature and sigma-t on the 8th May 1989 (horizontal distance is not in scale).

小域の存在は、3次元の動的現象の一側面と考えなくてはなるまい。その鉛直断面は、厳密に、各測点での同時観測の結果ではない。1-2時間の観測であることから、潮汐と外洋の条件に海上の気象学的条件と関連して、垂表層にレンズ状になったものであろう。このレンズの中心が密度極小であることから、これは河川水起源であるとみられる。河川水が熱交換・塩分二重拡散の過程で形成されたものとみるべきだろう。このようなことから、これを熱塩レンズと名付けてもよいと思う。

なお、Fig. 6の測点Aの底面付近の塩分極大は、本文のはじめに述べた干潟における干潮時の熱的効果によるものとみることでもできる。このことは、Fig. 6のシグマ・tに対応させると肯定的に認めることができるようだ。

ここでは、日本周辺のような中緯度以外の沿岸にみられる外洋に面した湾にも着目し、湾内の流動状態の特徴を、全く新しい模式的思考モデルによって把えようとした。ここに示した観測例も、モデルとの対応の検証例である。細部については別の機会に記したい。

#### 4. 考察

外洋に面した開口湾について、湾内水と流入河川水や外洋水とのかかわりを、新しいモデルによって特徴づけることを試みた。その基礎となった資料はごく限られた範囲のものかもしれないが、これまでに見過されていたものを明確にする手がかりを与えることになるものと考えている。

実際の観測例として、ここでは、北西太平洋に面した田辺湾の例を示した。これを単純に、鉛直断面内の水温・塩分・密度の分布の数値モデルと対比することは、かならずしも適当ではない。時間変数を考慮した3次元数値モデルを利用したとしても、外洋の条件は不明である。観測例が数値モデルと対応したとしても、それが一義的なものかどうかを確認することは容易ではない。

ここで示した観測例の力を目的として、養殖筏からプロペラ式流速計を吊り、点×(Fig. 3)で、大潮時に満潮時刻からその次の満潮時まで、流速鉛直分布の時間的变化を観測した。点F(Fig. 3)では、約1ヶ月間の係留測流をした。いづれにしても、流速の分布や変動は複雑であり、ここには示さないが、3次元の現象であることがわかった。ADCPを利用した流速観測は、未だその成果を論ずるまでに至っていない。沿岸域の浅海では、ADCPは十分機能を発揮できるまでに至っていない。点Fでの水温・塩分をみると、基本的にFig. 1のパターンのひとつがあらわれていると解釈される例もあったが、時間的変動は複雑である。点R(Fig. 2)での補助的定測流例や、点T(Fig. 2)に位置する白浜海象観測塔の風・気温・水温などの観測結果も、ここでは、現象の局地性を強く認識する助けとなった。このようなことで、流速の観測結果の詳細は、ここに示さなかった。

いづれにしても、本文でとくにとりあげようとした熱塩レンズについて、ほかには、何もこれを支持するような資料はない。

ただし、田辺湾内の2次元モデルによる流速パターンの時間的変動の一部がLee(1992)によって紹介されている。外海の流れの条件によっては、田辺湾内に渦があらわれるときがある。その位置は、垂表層の熱塩レンズの観測された位置に近い。

#### 5. 結 言

開口湾で観測された熱塩レンズの特徴について論じた。はじめに、湾軸鉛直断面での湾内水と流入河川水・外洋水との相互関係を模式化して、思考モデルを導入した。

つぎに、田辺湾の観測例によって、思考モデルとの対応を検討し、とくに、湾内亜表層熱塩レンズの特徴を示した。詳細については、動的3次元問題としての検討をまたなくてはならない。

なお、本文は、投稿後、1990年9月現在の原稿を1991年7月に改訂し、1992年3月に再度改訂した。この間、時間の経過によって本文の本質的部分は変更していない。

#### 文 献

- ARMI, L., D. HERBERT, N. OKAEY, J. PRICE, P. L. RICHARSON, T. ROSSBY and B. RUDDICK (1988): The history and decay of a Medditerranean salt lens. *Nature*, **333** (5174), 649-651.
- LEE, J. H. -W. (ed.) (1992): *Environmental Hydraulics*. Balkema, Rotterdam, 1663p. (especially, pp. 943-948).
- TOLUAZIN, D. (1981): *Element of dynamic oceanography*. Allen & Unwin, Boston, 181p..