

日本海の水と物質循環の研究：大気海洋間における 物質・熱・運動量の交換過程の計測法の開発研究： 第1報

竹松，正樹
九州大学応用力学研究所：教授

尹，宗煥
九州大学応用力学研究所：助教授

金，哲鎬
九州大学応用力学研究所：助手

永野，善太郎

<https://doi.org/10.15017/4744016>

出版情報：応用力学研究所所報. 80, pp.39-47, 1996-10. 九州大学応用力学研究所
バージョン：
権利関係：



日本海の水と物質循環の研究

— 大気海洋間における物質・熱・運動量の交換過程の 計測法の開発研究 (第 1 報) —

竹 松 正 樹* 尹 宗 煥†
金 哲 鎬‡ 永 野 善太郎§

概 要

海洋中での物質・熱・運動量の移動に関する研究のためのテスト海洋として、ミニ大洋である日本海を選び、1993 年から国際共同研究プロジェクトも発足させながら、観測と数値モデルの両面からの研究を精力的に行ってきた。今回はその中で、深海における長期測流結果と数値モデル計算結果の一部を紹介する。

1993 年夏から 1995 年夏までの 2 年間におよぶ長期測流の結果から、日本海盆の中央および南西部の中・深層で強い流れが存在し、10~12 月には季節風の吹き出しに伴うと思われる慣性振動が卓越するが、3~5 月には強い平均流 (30 cm/s 以上になることもある) が卓越するという、非常に興味深い季節変動があることがわかった。

日本海の循環に関する数値実験は、蛇行や暖冷水渦で特徴づけられる対馬暖流をはじめとして、リマン、北朝鮮寒流、低塩分中層水の挙動や日本沿岸沿いの南西向き潜流等の、日本海表層および中層循環の季節変動の基本的な特徴を再現することができた。

Key words: Current Measurement, Numerical Modelling, Mini-Ocean, South-Westward Undercurrent, Tsushima Current, Seasonal Variation.

1 緒 言

大気と海洋間の物質・熱・運動量の交換過程は、地球環境での物質循環や気候変動に極めて重要な役割を果たしている。例えば、人為起源二酸化炭素の海洋への正味移行量の曖昧さが地球温暖化の予測結果

*九州大学教授，応用力学研究所

†九州大学助教授，応用力学研究所

‡九州大学助手，応用力学研究所

§九州大学大学院，総合理工学研究科，大気海洋環境システム学専攻

の不確定性をもたらしていると考えられている。また、大気海洋間の交換過程は、直接我国の環境問題にも大きな役割を果たしている。すなわち、東アジア地域は地球的規模からみてもヨーロッパ・北米大陸と並んで汚染物質の大量放出地域であるが、他の二地域とは異なり、日本海・東シナ海等の海洋を含んでおり、これが当該地域・大気海洋環境の双方に大きな影響を及ぼすと考えられる。しかしながら、大気海洋間交換過程の計測には技術的に大きな困難を伴うためほとんど行われていない。また、気象モデル等の数値モデルにおいても極めて初歩的な仮定に基づいた交換速度係数が用いられてきた。当然のことながら、このような状況では物質や熱の大気・海洋間の交換量、大気・海洋中の循環量を正確に評価することが不可能であり、将来予測も信頼性に欠けたものになる。当研究所では、これまで「文部省大型研究費」の支援を受けて、海洋計測法を中心とした研究を実施してきた。その中で、海流の長期測流システム・海面プイ・超音波ドップラー流速プロファイラー搭載水中曳航体を開発し、黒潮・東シナ海等の観測を実施して、その動態を明らかにしてきた。これらの計測法は、現在 WOCE・OMLET・J-COARE 等の国際共同研究で観測システムの中心をなしている。

本研究では、まず、(1)海面での物質・熱・運動量交換及び海洋・大気中での移動、拡散、沈着過程の解明を目指して、海面プイ、海中ロボット、航空機（飛行船）搭載型の物質濃度、フラックス（流速×濃度）計測法を確立する。さらに、(2)東アジア地域を対象として、これら計測システムを利用した大気海洋同時観測を実施し、当地域での大気海洋相互作用の動態を明らかにする。観測は中国・韓国・ロシア等との共同で実施する。また、(3)これらの観測及び平成3年度に新設された大気海洋システム解析実験設備（大気拡散風洞）等を用いた室内実験結果を基に、大気海洋結合モデル及び三次元物質循環モデルの構築を行い、当該地域の汚染物質の動態と将来予測を行うとともに、これがグローバルな大気及び気候変動に及ぼすインパクトを明らかにする。

本論文は、ミニ大洋である日本海をテスト領域として行われた、研究課題(1)の中の、海洋中での物質・熱・運動量の移動に関する研究の成果をまとめたものである。

2 日本海深層における直接測流

「日本海及び東シナ海に於ける水と物質循環の研究」（通称 CREAMS）の一環でもあるが、1993 年から毎年夏季に、日・韓・ロの三国協力により、応用力学研究所が中心になり、日本海の広域にわたる総合的海洋観測を実施している（1995 年より冬季も行っている）。これらの観測を通じて、日本海の深海は予想とは裏腹に、非常に活発な流動があることが発見された。

今回は 1993 年 8 月～94 年 7 月の結果及び 1994 年 7 月～95 年 7 月に係留観測した測流結果に基づいてこれらの流動の実体を報告する。

なお、流速計の係留、回収はロシア極東海洋気象研究所の観測船「Prof. Khromov」で行われた。

2.1 観測及びデータ

CREAMS '93 の航海では、図 1 で示すように M1, M2, M3 の点に各々 3 基のアンダーレー流速計（RCM 8）を設置した。このときは日本海盆東半分の中・深層の流動特性を探る目的で係留したが、

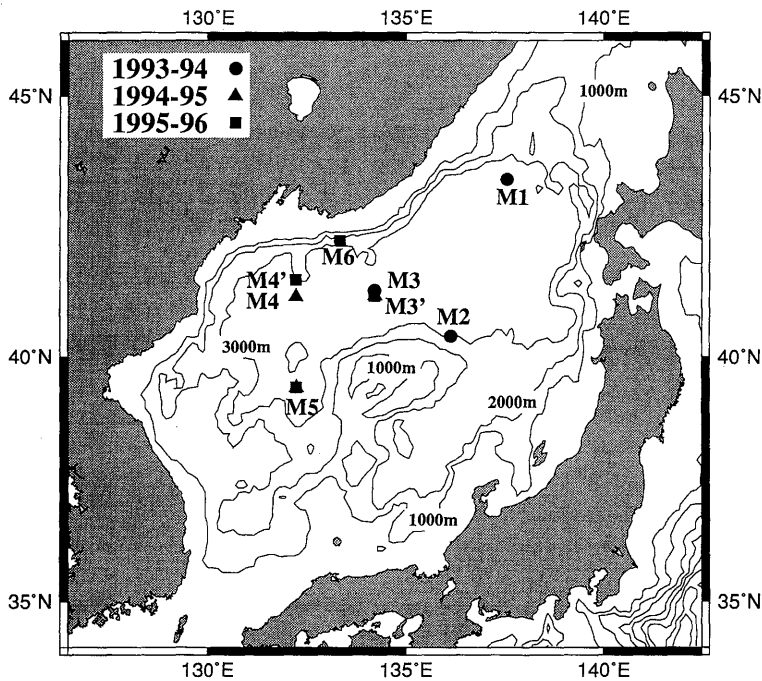


図1 係留系の設置位置

CREAMS '94 の航海では日本海盆西半分に於ける中・深層の流動特性を探るために、M3'、M4、M5 にそれぞれ3基、流速計の係留を行った。特にM4は日本海固有水の生成（沈降）域と考えられる付近に位置する。

2.2 観測結果

(1) 流速の時系列

図2にM3(1993~94)、M3'、M4、M5(1994~95)の約2000m水深でのスティックダイアグラムを示す。これは、生データに24時間タイドキラーフィルター¹⁾をかけて、1日毎にサブ・サンプリングしたものである。各点に共通して言えることは、毎年、春期(3~5月)に強い流れがあることである。特にM5では30 cm/sを越える流れもみられた。1000m、3000mの水深でも同様の結果が得られているが、M3(1993~94)、M5(1994~95)では、2000m水深の方がもっとも流れが強い。これは傾圧第1モードの存在を示唆する。これに対して、夏期(7~8月)には比較的穏やかな流れとなっている。

(2) 進行ベクトル

図2で明かなように、M3、M3'では恒常的な流れは存在していないようであるが、M4では、ほぼ年間通じて南向き、M5ではほぼ年間を通じて西向き成分が卓越し、3~5月には強い西向きの流れが見られる。図3の進行ベクトル図でわかるように、M4の水深2100m、M5の水深2400mでは1年間

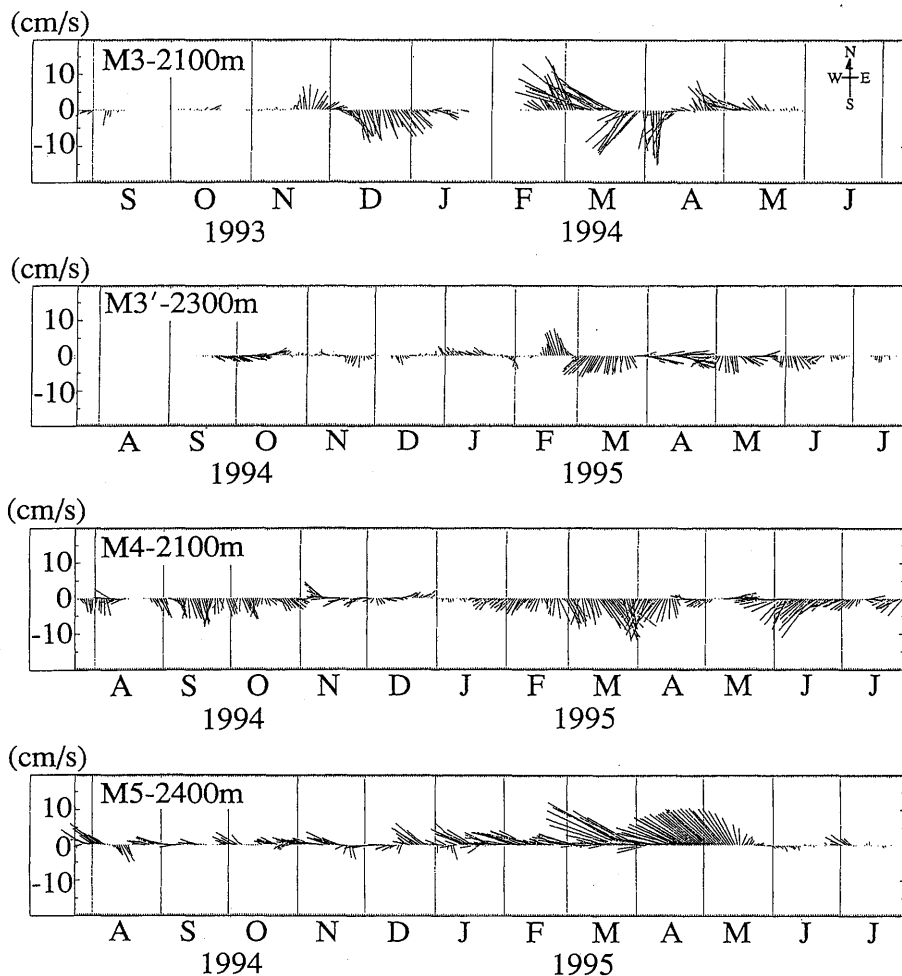


図2 各係留系の2000m水深付近でのスティックダイアグラム

で1000 km以上の水平移流が起きており、日本海盆全体を攪拌するのに充分の強さの流れがあることが分かる。

(3) パワースペクトル

図4にM5の2400m水深における、生データの東西流速、南北流速のFFTによるパワースペクトルを示す。これにより、慣性振動周期(約18時間)が非常に卓越していることがわかる。これは観測が行われた期間の全係留点、全層でほとんど同じ結果が得られている。

(4) 渦運動エネルギー

生データの流速と、ローパスフィルターをかけた流速から、1ヶ月毎の渦運動エネルギーを求めた(図5)。渦運動エネルギーとして次の式を用いた。

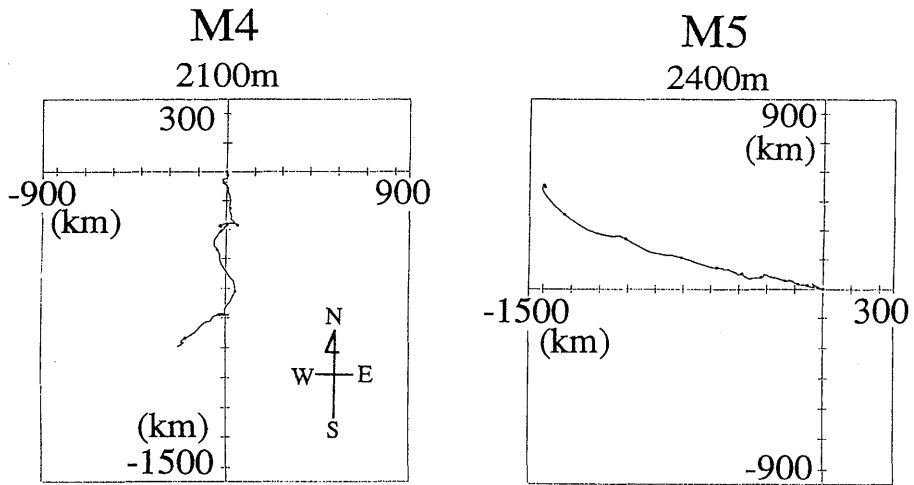


図3 M4, M5における進行ベクトル

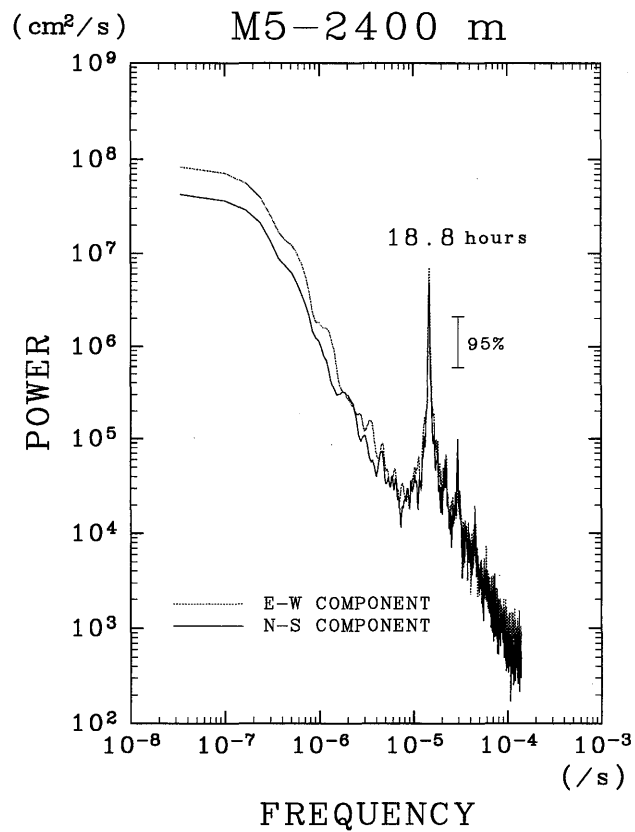


図4 M5 (2400m)におけるパワースペクトル

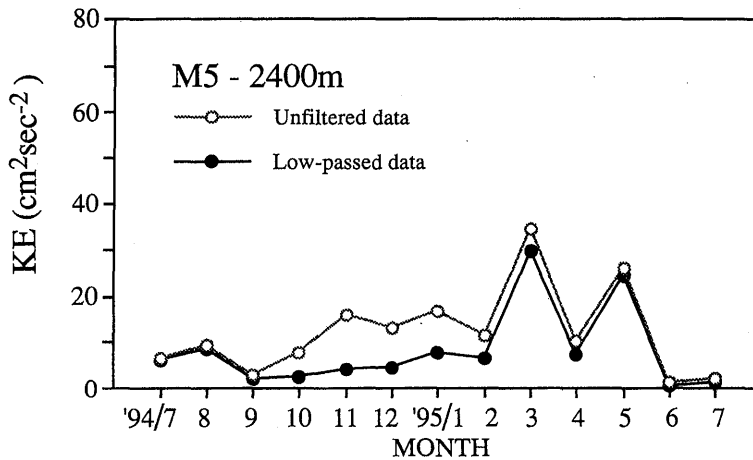


図5 M5 (2400m)における渦運動エネルギー

$$E = \frac{1}{2} [\sum (u - \bar{u})^2 + \sum (v - \bar{v})^2]$$

ここで、 u は流速の東西成分、 v は流速の南北成分である。 $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ はそれぞれの1ヶ月平均である。季節風の吹き始める10～12月には渦運動（慣性振動）エネルギーが卓越し、3～5月に平均流のエネルギーが卓越するという顕著な傾向が見てとれる。

2.3 まとめ

2ヶ年間に及ぶ長期測流の結果から、日本海盆の中央及び南西部の中・深層で強い流れが存在し、10～12月には季節風の吹き出しに伴うと思われる慣性振動が卓越するが、3～5月には強い平均流が卓越するという、非常に興味深い季節変動があることがわかった。3～5月に現れる強い平均流は場所によっては30 cm/s超にまで達する。この奇妙な流動特性に対する物理的説明は、未だになされていないが、現在係留中のM3'・M4'・M5・M6が回収されれば、さらに詳しい流動状況が明らかになり、その物理的な説明に大きな助けとなるであろう。

3 日本海の循環の季節変動に関する数値実験

リマン寒流や対馬暖流の時・空間的な変動は、日本海の表層循環を大きく支配するだけでなく、塩分極小・溶存酸素極大で特徴づけられる日本海中層水の循環にも深く係わっている。多層位モデルを用いた数値実験²⁾では、東韓暖流が観測より高緯度で離岸していたため、日本海の北西海域の循環には多少、非現実的な分布が得られた。今回は、東韓暖流の離岸を正しく再現するため、モデルの境界条件や拡散方式などを改善させて実験を遂行し、日本海の表層及び中層循環を調べてみた。

3.1 モデル

モデルは基本的に金と尹 (1994)²⁾と同じである。即ち、GFDL MOMを用い、水平格子間隔は1/6度、鉛直方向には19層位とした。対馬海峡では季節的に変動する水温、塩分の観測値を与えた。流入する流量は観測³⁾に基づいて、平均2.2 Sv.、振幅0.35 Sv.の正弦関数的な季節変動を与えた。津軽海峡を通しては、季節変動なしに1.4 Sv.の一定な流量で流出し⁴⁾、残りの流量は宗谷海峡を通して流出するようにした。風のデータとしてはNa et al. (1992)⁵⁾の風の応力を使った。海表面の熱塩境界条件は、Hirose et al. (1995)⁶⁾によって計算された Heat Flux データを Haney Type で与え、塩分については、モデル第1層目の塩分が海表面の観測値に Newtonian Damping によって収束するように設定した。拡散係数は等密度面混合^{7,8)}を導入し、等密度面の最上層の $5 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$ から最下層の $1 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$ に指数関数的に減少する分布を、鉛直拡散 (Diapycnal Diffusion) 係数は、最上層の $0.1 \text{ cm}^2/\text{s}$ から最下層の $0.4 \text{ cm}^2/\text{s}$ に漸増する分布をそれぞれ設定した。

3.2 結果

- 1) 対馬海峡の流速分布：対馬暖流は対馬によって二つに分かれる (図6a)。東水道を通過した対馬暖流は、山陰海岸に沿って陸棚上を流れ、 $35^\circ 30' \text{N}$ まで北東進した後、日本沿岸分枝になる。西水道へ収斂する流れは水路の出口部で冬季には 60 cm/s 、夏季には 100 cm/s 以上の強い流速を示す。西水道を通った流れの一部が北東に進み沿岸分枝に合流し、ほかは東韓暖流を形成する。対馬海峡内での海流の空間分布には、顕著な季節変動は現れない。
- 2) 沿岸分枝：1月から5月頃まで、沿岸分枝は本州沿岸に沿って流れ、能登半島まで達するが、一部の流れが大陸斜面に沿って隠岐堆北方を迂回する。7月頃には津軽海峡に至までの大陸斜面に沿って勢力が強まる (図6b)。8月～9月になると隠岐堆付近と、能登半島付近で小さい蛇行が発達しはじめる。この蛇行は11月～12月にはさらに大きく発達し、蛇行の峰と谷からそれぞれ時計回りと半時計回りの渦動が分離される。また、沿岸分枝自体も沿岸から離れ、 β 効果によって沖側に移動す

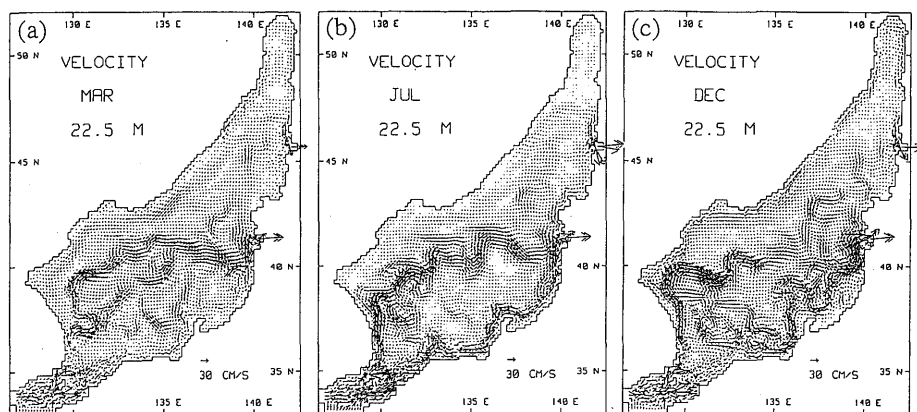


図6 (a)3月, (b)7月, (c)12月の22.5m水深における水平流速

る(図6c). 沿岸分枝は冬季にその勢力が弱まり, 冷・暖水渦も次第に消滅して行く. 特筆すべきことは, 図7の, 沿岸分枝の下方200 m~300 m 深の陸棚端沿いには, 夏期に上層の沿岸分枝とは逆の流れ(南西向き沿岸潜流)が存在するが, これは実際に観測によって確かめられた.

- 3) 東韓暖流: 韓国東岸に沿って北上する東韓暖流は, 夏から秋にかけて勢力が強くなり, その離岸緯度は12月には約 39°N 付近になる. しかし, 冬には 37°N 付近で離岸する. 東韓暖流の沖側には南向きの反流が現われ(図6a), 4月以降に Ullung 海盆のなかで閉じた時計回りの渦動になるが, 夏季には東朝鮮湾付近でもう一つの時計回りの渦動が形成される. この南北の2つの渦動は東韓暖流の再循環によって作られたものであると思われる.
- 4) リマン寒流及び北朝鮮寒流: リマン寒流や北朝鮮寒流は, 沿海州沿岸—韓国北東岸に沿って南下し, 12月~3月に最も強くなる. 1月には表層で最大20 cm/s 以上の, 385 m 層でも10 cm/s 程の速度を示す(図7). 北朝鮮寒流は 37°N 以南では東韓暖流水の下層を南下し, 寒流による反時計回りの流動は能登半島まで達する(図7). しかし, 4月からは東韓暖流の北上が強くなるため, 沿岸側の北朝鮮寒流の南下は阻止される.
- 5) 中層水の分布: 図8aと8bは, それぞれ $37^{\circ}35'\text{N}$ に沿ったモデルと観測における塩分断面分布である. モデルは観測で現れる中層水(斜線部分)やその中の低塩分の核(韓国沿岸側)をよく再現している. この中層水は, モデルの北西海域で, 冬季の対流によって33.90 ~34.00 psu 程度の低塩分特性を獲得した後, 北朝鮮寒流によって南に運ばれ, Ullung 海盆付近で季節的に変動する東韓暖流の再循環渦動によってさらに南西海域に運ばれることになる.

3.3 まとめ

今回の実験を通して, 蛇行や冷・暖水渦で特徴づけられる対馬暖流をはじめとして, リマン, 北朝鮮寒流, 低塩分中層水の挙動の季節変動や日本沿岸沿いの南西向き潜流等の, 日本海表層及び中層循環の季節変動の基本的な特徴を再現することができたと思われる. また, 韓国東岸の Ullung 海盆でたびたび

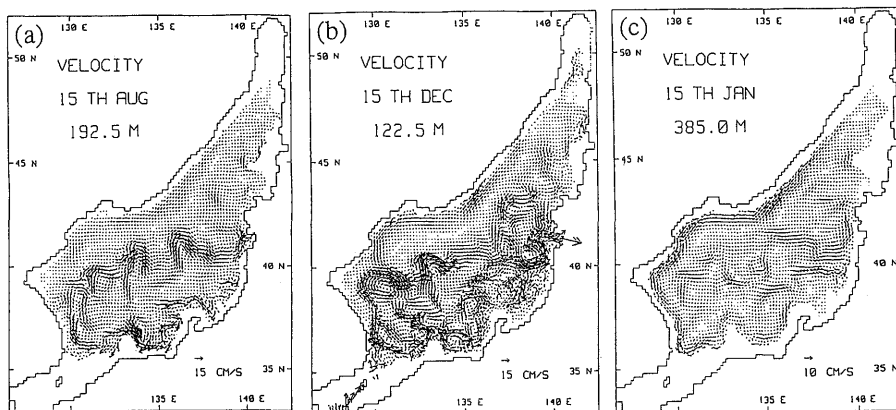


図7 (a)8月の192.5m水深, (b)12月の122.5m水深, (c)1月の385.0m水深における水平流速

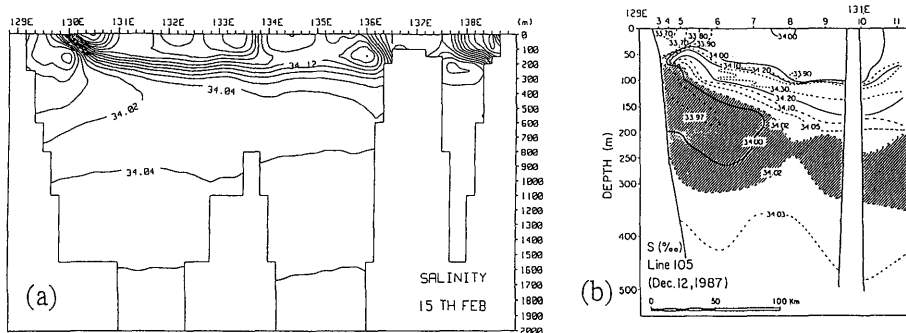


図8 37°35'N に沿った、モデル(a)と観測(b)における塩分断面分布

観測される暖水塊の形成機構や低塩分中層水の流動機構等についても多くの知見を得た。深層及び中層の大部分の領域については、未だ観測事実の不足から、その平均的な流動状況は依然として不明であり、計算結果との比較は現在のところ難しい状況である。

4 お わ り に

約2年間にわたる深海測流観測は、日本海の深層において、事前の予想とは裏腹に、非常に興味ある活発な海水の流動を観測したが、数値モデルにおいては、深層におけるこのような流動は現れず、未だ謎に包まれているのが現状である。

今後は、この謎の解明を含め、活発な鉛直循環を行っていると思われ、日本海の中層や深層の循環の解明に焦点を当てるとともに、Hindcasting 等を通じた更なるモデルの精度を向上させ、海況予報のための基礎システムの構築をめざす。

参 考 文 献

- 1) 花輪公雄・三寺史夫 (1985): 沿岸海洋研究ノート, 23, 79-87.
- 2) 金 哲鎬・尹 宗煥 (1994): 日本海洋学会 1994 年度秋季大会講演要旨集, 220-221.
- 3) 磯辺篤彦 (1994): 月刊海洋, 26, 802-809.
- 4) 四電信行 (1994): 月刊海洋, 26, 815-818.
- 5) Na et al. (1992): J. Oceanol. Soc. Korea, 27, 1-10.
- 6) Hirose, N. et al. (1995): J. Oceanogr., 52, 553-574.
- 7) Redi, M. H (1982): J. Phys. Oceanogr., 12, 1154-1158.
- 8) Cox, M. D (1987): Ocean Modelling, 74, 1-5.

(平成8年5月30日 受理)