# 対馬および日本海西部における水質・流況の現地観測

# THE WATER QUALITY AND FLOW REGIME IN THE WESTERN SEA OF JAPAN AND THE VICINITY OF THE TSUSHIMA ISLANDS

伊藤靖[1]・松本卓也[2]・押谷美由紀[2]
Yasushi ITO, Takuya MATSUMOTO, Miyuki OSHITANI

[1]正会員（財）漁港漁場漁村技術研究所（〒101-0047 東京都千代田区内神田1-14-11）
[2]（財）漁港漁場漁村技術研究所（同上）

With the passing of the Frontier Fishery Development Program Bill in the Diet in 2007, the fishery development project on the national level has begun in the exclusive economic zone as legislative philosophy. Under such circumstances, water quality and current measurements were carried out in the vicinity of the Tsushima and the Oki sea areas in the Sea of Japan where there is less information, for the purpose of preparing basic data required for fishing port construction in the distant offing in the future. Survey was conducted in the vicinity of the Tsushima area comprising the northern extremity of the East China Sea, and tow locations in the vicinity of the Oki representing the Western Sea of Japan, thus each physical data were gathered.

***Key Words :*** *Current measurement, water quality measurement, Tsushima current, Japan Sea Proper Water*

## 1．はじめに

これまでの水産基盤整備事業において行われてきた漁場整備事業は沿岸域を主体としてきた．一方，平成 19 年から水産庁において領海外を対象海域とするフロンティア漁場整備事業が策定された．このフロンティア漁場事業の第一号として，日本海西部の領海外においてズワイ保護育成礁の整備が始まっており，続いて湧昇マウンド礁が想定されている．しかし，領海外のような沖合域では，マウンド礁設置のための知見が少ない．そのため，本研究は沖合域における海洋環境について知見を得ることを目的とし，対馬南西及び隠岐周辺海域において流況並びに水質観測を行ったので報告する．

## 2．調査の方法

調査は対馬海域並びに隠岐周辺海域において実施した．対馬は 1 地点において海底設置型(TRBM)ADCP を用いた多層流向・流速連続観測(2008 年 8/6～9/11)，4 回の鉛直 6 層の採水による水質調査(2008 年 6/1, 7/1, 8/6, 10/7)，5 回の CSTD 鉛直水質観測(2008 年 6/1, 7/1, 8/6, 9/11, 10/7)を実施した．

同様に隠岐周辺海域では，1 地点(St. 1)で海底設置型(TRBM)ADCP による 15 昼夜流況観測(2008 年 8/9～8/28)，2 地点(St. 1 及び St. 2)で採水による 3 回の水質調査(各地点 3～4 層，2008 年 7/10, 8/9, 10/4)，4 回の CSTD 鉛直水質観測(2008 年 7/10, 8/9, 8/28, 10/4)を実施した．採水は T-N, NH4-N, NO2-N, NO3-N, T-P, PO4-P, SiO2-Si の 7 項目を分析した．また，3 層で動植物プランクトンについても分析した．このように夏季の成層期を中心に，観測を実施した．ADCP は対馬・隠岐とも，観測層厚：2m・観測間隔 10 分・観測時間：2 分・サンプリング間隔：0.5 秒である．

調査海域及び調査の諸元について**図-1, 2** 及び**表-1, 2** に示す．

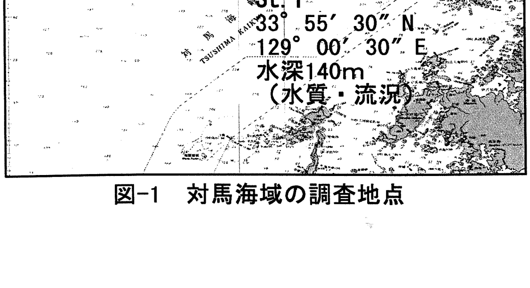



**図-1　対馬海域の調査地点**

表-1　調査緒元（対馬海域）

| 項目 | 調査方法 | 測定項目 | 調査日 |
|---|---|---|---|
| 水質調査 | CSTD鉛直観測 | 水温、塩分、クロロフィルa | 6/1,7/1,8/6,9/11,10/7 |
| | GPSフロート観測 | 水質調査時の表層流向・流速 | 6/1,7/1,8/6,9/11,10/7 |
| | 採水(多層) | 栄養塩(TN,TP,アンモニア態N,亜硝酸態N,硝酸態N、リン酸態P,珪酸態S) | 6/1,7/1,8/6,10/7 |
| | プランクトン調査 | 植物プランクトン（採水）、動物プランクトン(ネット曳) | |
| | 光量子測定 | 船上・水中光量子 | |
| 流況調査 | ADCP観測 | 係留系を用いない海底設置型架台(TBRM)を使用。多層流向・流速 | 8/6-9/11 |

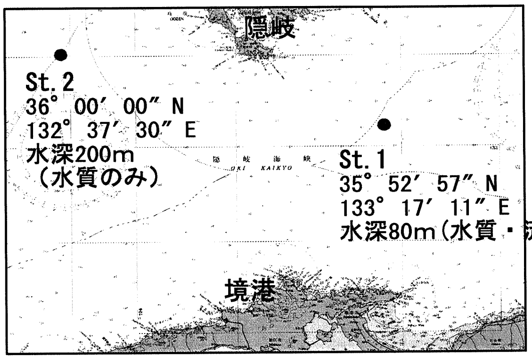



図-2　隠岐周辺調査地点図

表-2　調査緒元（隠岐海域）

| 項目 | 調査方法 | 測定項目 | 調査日 |
|---|---|---|---|
| 水質調査 | CSTD鉛直観測 | 水温、塩分、クロロフィルa | 7/10,8/9,8/28,10/4 |
| | GPSフロート観測 | 水質調査時の表層流向・流速 | 7/10,8/9,8/28,10/4 |
| | 採水(多層) | 栄養塩(TN,TP,アンモニア態N,亜硝酸態N,硝酸態N、リン酸態P,珪酸態S) | 7/10,8/9,10/4 |
| | プランクトン調査 | 植物プランクトン（採水）、動物プランクトン(ネット曳) | |
| | 光量子測定 | 船上・水中光量子 | |
| 流況調査 | ADCP観測 | 係留系を用いない海底設置型架台(TBRM)を使用。多層流向・流速 | 8/9-8/28 |

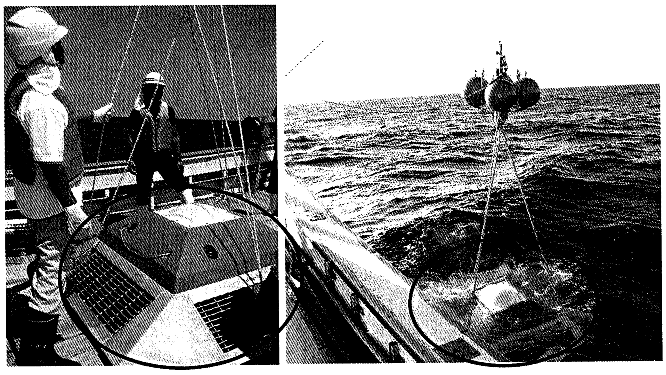


図-3　設置中の TBRM-ADCP

## 3．調査結果

### (1) 対馬海域

対馬暖流は黒潮の分岐流と東シナ海の陸棚水との混合水が集積し，対馬海峡を通って日本海に流入すると言われている[1),5)]．本研究における対馬の調査地点は，対馬暖流が対馬東西の水道を通り，日本海に流入する前の経路に位置すると考えられる．そのため，水塊は対馬暖流の特徴を有するものと推測される．流況，水質それぞれの特徴について述べる．

a) 流況

観測期間中の代表水深における流速ベクトルの経時変化を**図-4** に，観測層の最表層並びに最底層の流向別流速頻度分布を**図-5** に示す．

流れは表層から底層まで，ENE～NNE を主方向とする流向を持っていた．調査地点は対馬暖流が対馬下島の東西へと分岐する手前に位置するため，主に北東方向が主流向となることは過去の調査事例とも一致している[2),5)]．しかし，流向頻度図(**図-5**)並びに平均流の鉛直分布(**図-6**)を見ると，表層と底層とでは主流向が ENE から NNE へと若干異なっている．各層の流向を見ると，最表層の観測層の水深 10m 余りから中層約 90m 近くまで ENE 方向となっていた．

その下，水深約 120m 近くまでは主流向は NE であったが，最底層 120～140m 付近のみ NNE を主流向としていた．

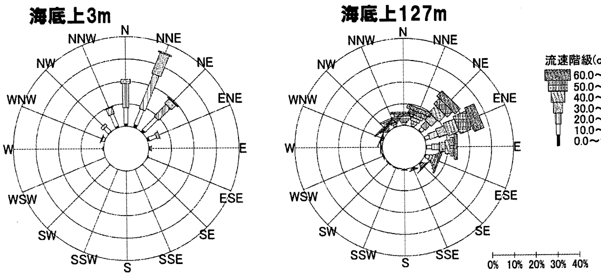



図-5　流向別流速頻度分布図（最底層・最表層）

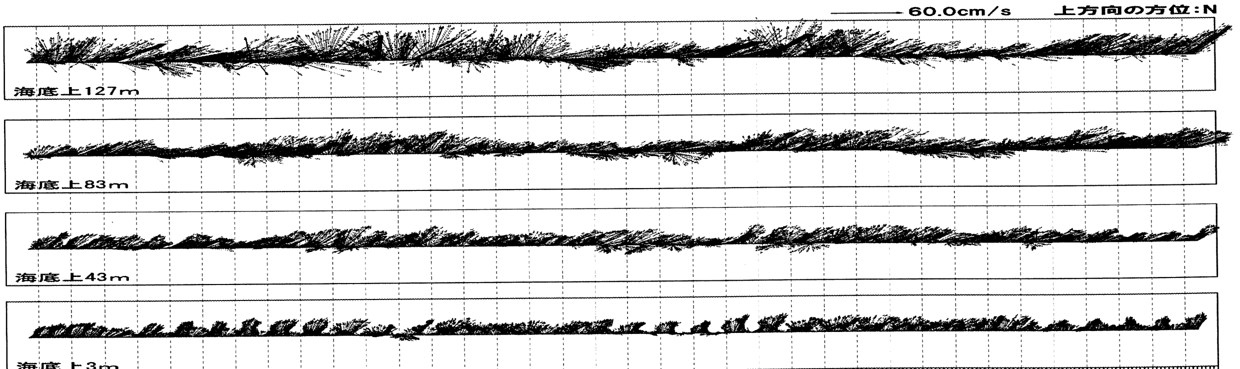



図-4　流向ベクトルの経時変化(8/6～9/12)

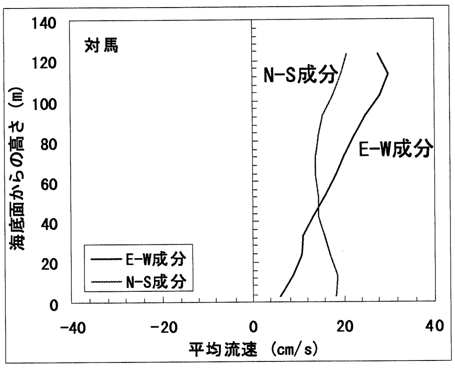



図-6　平均流の鉛直分布

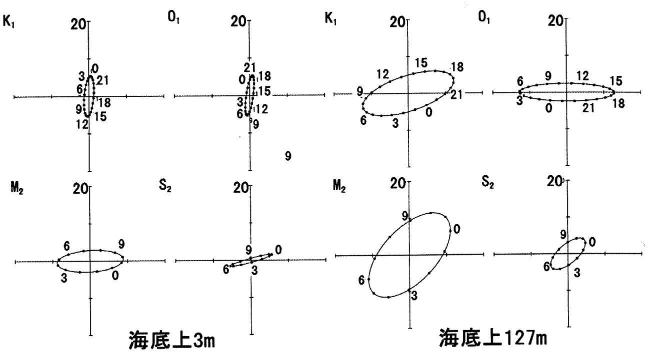



図-9　潮流楕円

次に調査地点付近の海底地形を**図-7** に示す．調査地点の南西側は，やや落ち込んだ地形となっている．調査地点は水深 140m 弱であるが，その南側の地形は水深 150m 強の溝のような地形となっている．この溝の向きが北北東寄りであることから，この地形の影響を受け，底層～中層の流向が変化した可能性がある．

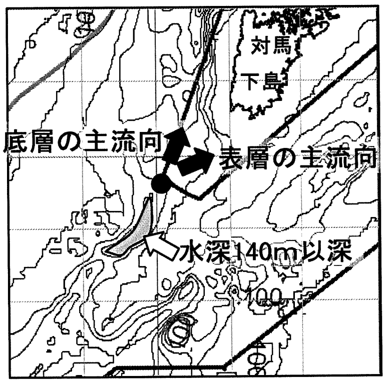



図-7　対馬海域周辺の海底地形図

観測水深の最表層と最底層の流速ヒストグラムを**図-8** に示す．調査地点は東シナ海の北端に位置し，表層では 3 割以上が流速 50cm/s 以上であり，常に流れが早い．底層においては弱まっている．

この流速データについて調和分解を行って得られた，最底層・最表層における主要四文潮の潮流楕円を**図-9** に示す．

対馬周辺は海流と共に潮流が大きく発達している海域である．分潮の長軸流速を見ると，隣接する東シナ海では $M_2$ 分潮が卓越しているが，対馬周辺では必ずしも半日周潮が際だっていない．

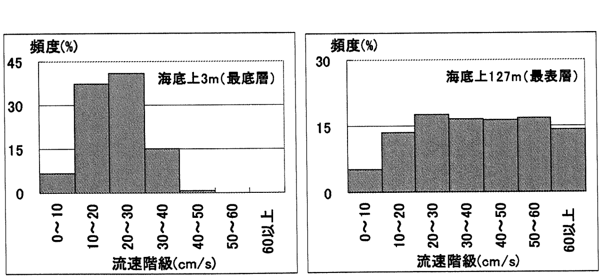



図-8　流速のヒストグラム(対馬)

振幅比 $F=(K_1+O_1)/(M_2+S_2)$ で見ると，対馬の調査地点は表層の観測層を除いて F 値が 0.74～1.19 の範囲であり，混合潮型であった．対馬周辺は東シナ海と同様に半日周潮型とされている文献もあるが [1]，本調査地点では一日周潮が $M_2$ 分潮の 60%～90% 程度の振幅の大きさを有していた．

### b) 水質

CSTD 鉛直観測によって得た，水温・塩分・ｸﾛﾛﾌｨﾙ a 並びに密度の鉛直分布を**図-10** に示す．一ヶ月に 1 回のみの観測であるため，その月の特徴を代表しているとは言えないが，6 月には顕著でなかった密度躍層が徐々に発達し，8 月に最も強くなり，9 月以降に弱まっている傾向が見られる．このとき，塩分の変化は表層を除いて小さい．表層塩分の変化は，特に 7 月・8 月の観測時に低下する傾向が見られた．これは，東シナ海の大陸棚上で表層水が大陸起源の淡水により大量の希釈を受けるためであり，淡水流入量が多くなる夏季にこの傾向が顕著である．平成 19 年の東シナ海における観測結果 [4] と比較するとやや塩分は高くなっており，水塊が東シナ海から対馬周辺へ北上する過程で，低塩分の表層水が周囲の高塩分の海水と混合したと考えられる．

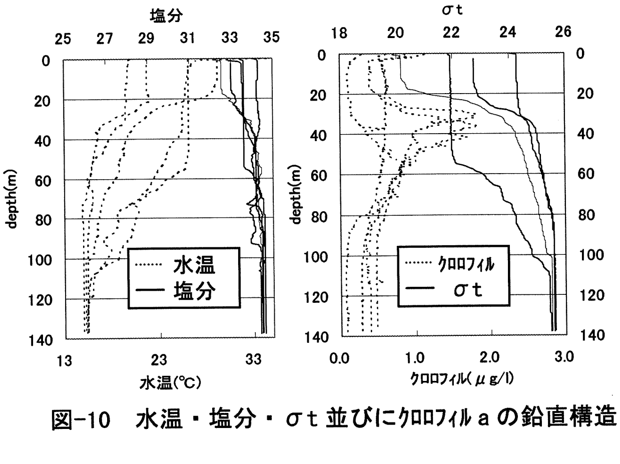



図-10　水温・塩分・σt 並びにｸﾛﾛﾌｨﾙ a の鉛直構造

水温はほぼ水深 120m を境界としてその上層が大きく変動しており，季節的な水温の変動に起因する水温躍層である．JODC における過去の観測データ (E128°，N33°)における水温を見ると，6 月～10 月

における 120m 以深は概ね 13～16.5℃の間で安定しており[6),7)]，本調査地点においても対馬南西海域の平均的な水塊構造を示していると考えられた．

また，クロロフィル a(採水分析によるクロロフィル a 量により補正を行っている)は水深 30～40m付近の亜表層に極大値を持ち，概ね躍層の直下に位置していた．

次に，採水により得た栄養塩の分析結果を**図-11**に示す．採水は栄養塩の鉛直構造を把握するため，CSTD 観測で得られた躍層を挟んで，6 層で実施した．

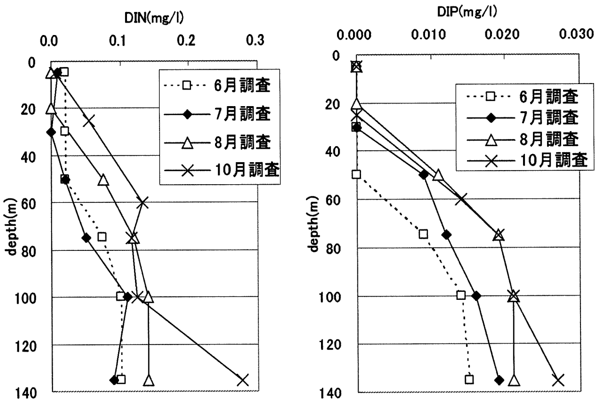



**図-11　栄養塩の鉛直分布**

DIN(アンモニア態 N，亜硝酸態 N，硝酸態 N の合計)，DIP(リン酸態 P)ともに表層で植物プランクトンの一次生産により枯渇し，水深 40m以深で増加していた．**図-10** のクロロフィル a の鉛直分布と比較すると，極大層の水深帯以深で栄養塩量が増加していた．夏季は躍層の発達によって混合が妨げられ，栄養塩の供給が少なくなるため躍層上層の栄養塩が一次生産によって消費され枯渇する．そのため表層の一次生産量の指標であるクロロフィル a 量は抑制されるが，亜表層付近では拡散等の効果により躍層下から栄養塩が供給され，クロロフィル a の極大層が生じると考えられる．

### (2) 隠岐周辺海域

隠岐周辺海域では，当初選定した St.1 が水深 100m 未満であり，栄養塩のデータが十分に得られない可能性があったため，水深 200mの St.2 の地点を設け，2 地点で観測を実施した．隠岐周辺では，対馬暖流の第一分枝流と呼ばれる流れが大陸棚上を陸地に沿って北上していると考えられており[1)]，St.1, St.2 ともこの分枝流の影響を受けているものと考えられた．

流況，水質それぞれの特徴について述べる．

#### a) 流況

日本海は潮汐振幅が小さいため，潮汐流の影響は弱く対馬暖流をはじめとした海流や山陰沿岸の沖合に存在する蛇行流や渦の影響等を受ける[1),3)]．ここで，St.1 にて ADCP により観測した流向・流速結果から得られる代表水深における流速ベクトルの経時変化(**図-12**)に示す．

流速は観測期間前半で概ね 20cm/s 程度であったが，8/19 頃から急速に増大している．このときの気象について見ると 2008 年 8/15～8/17 にかけ，台風 11 号が太平洋側を通過していた．この影響を受け隠岐周辺では 8/15 以降は風が強まり，この風向・風速により流速が大きくなっていることが示唆された．観測期間中のアメダスデータによると，19 日は日本海側の鹿島において南西の風となり最大風速 9m/s(中段の実線)となり，これに応じて表層から水深 50m 以深においても 50cm/s を超える流れが発生していた．

次に最底層・最表層の流向別流速頻度分布(**図-13**)を示す．最表層(海底上 73m)では，風による強流時を除けば概ね 20～40cm/s の流れとなっており，底層(海底上 3m)ではほぼ 20cm 未満であった．

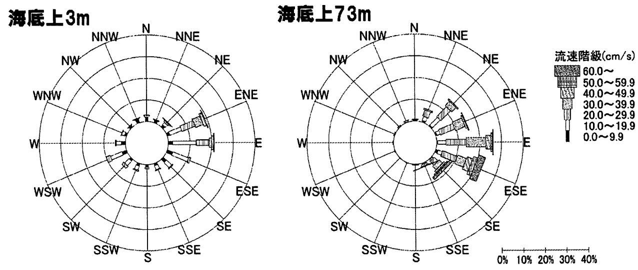
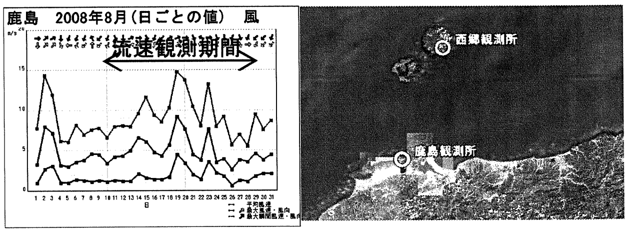



**図-13　流向別流速頻度分布図(最底層・最表層)**



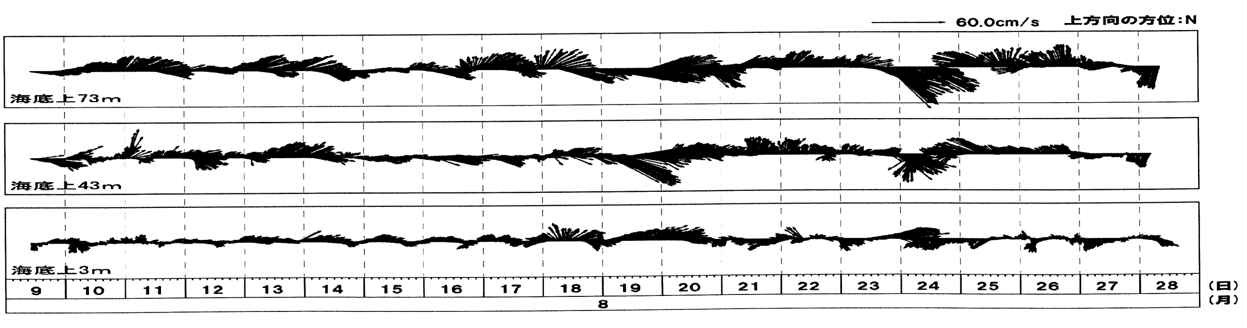




**図-12　流速ベクトルの経時変化(8/9～28)及びアメダスデータによる観測期間中の風の状況(隠岐周辺)**

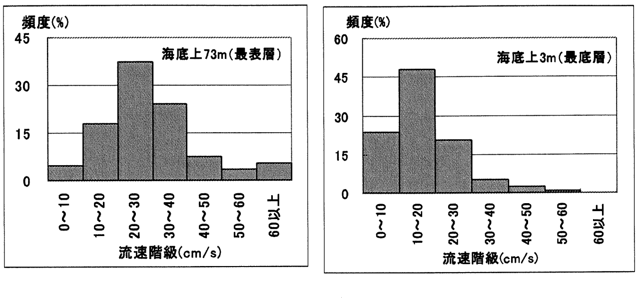



図-14　流速のヒストグラム(隠岐周辺)

次に流速のヒストグラムを**図-14** に，調和分解を行った潮流楕円を**図-15** に示す．対馬と比較すると隠岐海域の流速は全般的に小さく，最表層においても 20～30cm/s の流れが主である．日本海の潮汐は一般的に1日潮が卓越するとされている．観測結果から得られた主要4分潮の潮流楕円に見る通り，$M_2$・$S_2$ 分潮に比べ $K_1$・$O_1$ 分潮が大きいことが判る．しかし，分潮の大きさは対馬と比較すると小さく，流況において潮流の影響はきわめて少ない．

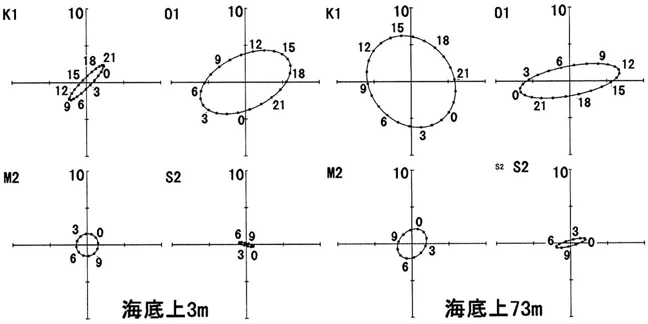



図-15　潮流楕円

さらに調和分解によって得られる平均流の鉛直分布を示したのが**図-16** である．東西成分の東流が上層から下層まで卓越しており，南北の平均流はほとんど見られない．流向別流速頻度分布の主流向が示すとおり，平均流はE方向の流れとなっている．水深によって流れの強さは異なるもの，主流向は全層で E と一定であり，本調査地点（St.1）のこの流れは，日本海沿岸の 100m 等深線上を沿って北上する，対馬暖流の第一分枝流に相当する可能性が考えられた．

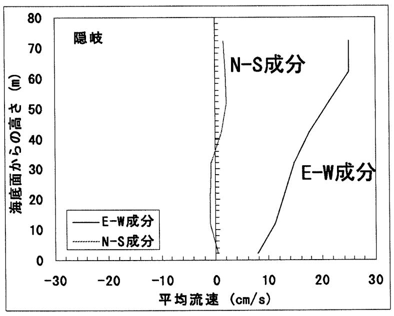



図-16　平均流の鉛直分布

b）水質

隠岐周辺 St.2 における CSTD 観測結果を以下に示す．水温・塩分を見たとき，水温・塩分とも季節的な変動の大きい水深 50m以浅，ほぼ水温のみ変動している 50m～190m，変化のないそれ以深と概ね 3 層に特徴が分けられる．日本海西部海域では，表層において高水温・低塩分の季節的な密度躍層が形成され(暖流表層水)，中層では対馬海流中層水とも呼ばれる冬季に形成された混合層，その下層が日本海固有水の上層という層構造を成しており [3),8)]，今回の観測においても，この特徴的な水塊構造が観察された．また，水深 150m 付近で大きな水温の上下震動が見られる．月に1回の観測であるため連続的な状況は把握できていないが，季節的な表層の変動と一致していないことから，内部波の打ち上げ等の可能性が考えられる．

クロロフィルａの分布は，対馬と同様に亜表層に極大値を示し，躍層の直下に形成されていた．しかし，対馬と比較してその量は大きく，極大値の数値は約2倍であった．表層の水塊は対馬と同様に対馬暖流の表層水であると考えられることから，底層からの栄養塩の供給量の違いに起因するものと考えられた．次に，採水による栄養塩の観測結果を**図-18** に示す．

隠岐周辺海域では，海域の鉛直的な栄養塩について把握するため，St.1(水深 80m)で3層または4層，

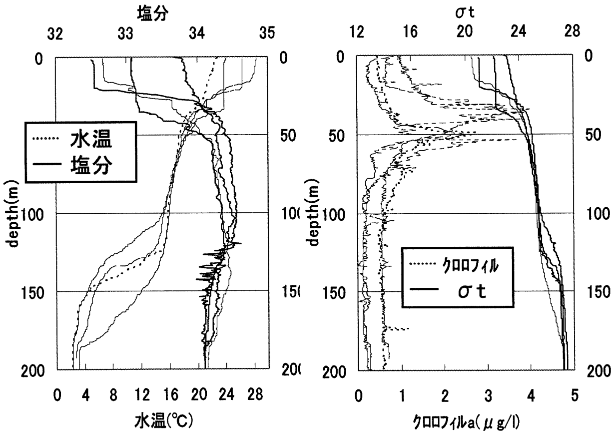



図-17　水温・塩分・σt 並びにｸﾛﾛﾌｨﾙａの鉛直構造

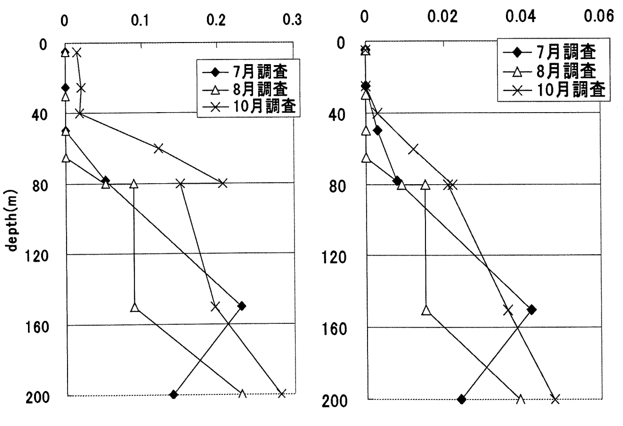



図-18　栄養塩の鉛直分布

St. 2(水深 200m)の 80m 以深について，3 層あるいは 4 層の採水を実施した．**図-18** 中の 80m 以浅の値は St. 1 のもの，80m 以深の値は St. 2 で観測したものである．St. 1 と St. 2 の調査地点間は 80km ほどの距離があるが，CSTD の結果ではほぼ同じ鉛直構造を示し，2 地点はほぼ同じ水塊と考えられたため，同一の図上に示した．

DIN・DIP とも，対馬と同様に表層で枯渇し，躍層の形成される 40～60m以深で増加している．底層の栄養塩は N・P どちらも対馬と比較して大きい傾向が見られるが，特にDIPで顕著である．これらの栄養塩の差が，クロロフィル量の差として生じている可能性がある．他の調査事例とも比較し，検討が必要である．

## 4．まとめ

### (1) 流況

ADCPによる流況観測結果は，全般的に潮流の影響の強い対馬で大きく，潮流の弱い隠岐で小さい結果となった．対馬の観測地点では，流向が表層付近から底層までほぼ東北東～北北東であったことから，この観測地点の流れは主に対馬の東水道を通過するものと推測された．底層については北北東へと変更しており，地形の影響を受けた可能性があった．

隠岐周辺の観測した流れは，観測期間中全層で東向きとなっており，調査地点の水深は若干浅いが，山陰の沿岸100m等深線に沿って流れる対馬暖流の第１分枝流中に相当する可能性が考えられた．

### (2) 水質

CSTDによる水質観測の結果から，対馬海域では表層の季節的な変動が大きく，特に夏季7・8月に塩分が低下する傾向が見られ，東シナ海の大陸棚上で見られる夏季の大陸起源の河川流入の影響を受けた表層水塊が対馬近辺まで影響を与えていると考えられた．水深80m以深の中底層では大きな季節変化がなかった．一方，隠岐周辺海域では全層で対馬よりも変化が小さい．特に，10月の対馬海域では水深70m近くまで躍層水深が下がり，同時に塩分が上昇するのに対し，隠岐周辺では60m～90mの水深帯でほとんど変化がなく，100m以深で水温が変化していた．隠岐における水深100m以深の変化は気温の変化と連動せず，下層のみ変化していることから，対馬暖流下の第２躍層を形成する底部冷水の影響によるものと考えられた．無機態の栄養塩は，対馬・隠岐とも表層で枯渇し，中層以深で増加する．特に密度躍層の下層水深から増加する傾向が見られた．

## 5．おわりに

本論文は，水産庁の委託を受け，平成20年度水産基盤整備調査委託事業として実施した調査の一部をとりまとめたものである．この成果は，JCOPE等の既存データや過去の観測事例と合わせ，フロンティア漁場整備事業の基礎資料として使用される予定である．しかし，ポイントのデータであることや，季節ごとに1回のみの観測であることから，さらに今後も知見の集積が望まれる．

### 参考文献

1) 宇野木早苗：沿岸の海洋物理学，東海大学出版会，1995.
2) 日本海洋学会　沿岸海洋研究部会編：日本全国沿岸海洋誌，東海大学出版会，1985.
3) 日本海洋学会　沿岸海洋研究部会編：続・日本全国沿岸海洋誌，総説編・増補編，東海大学出版会，1990.
4) 伊藤靖，押谷美由紀，大谷靖朗: 東シナ海における水質・流況環境特性，海洋開発論文集，第 24 巻，海洋開発委員会，pp.837-842，2008.
5) Kato, O., Teshima, K., Kubota, K. and Tsukiyama, K.: Downstream Transition of the Tsushima Current West of Kyushu in Summer, Journal of Oceanography, vol.52, pp.93-108.1996
6) 金子新，下相慶，張善徳，高橋実：対馬海峡における海流の構造と流量，海岸工学論文集，第 37 巻，pp.784-788，1990.
7) 日本海洋データセンター (JODC)，http://www.jodc.go.jp/index_j.html
8)村山達郎：日本海西部海域の海況-研究の成果と展望-，水産海洋研究会報，第 51 巻，pp.230-234，1987.